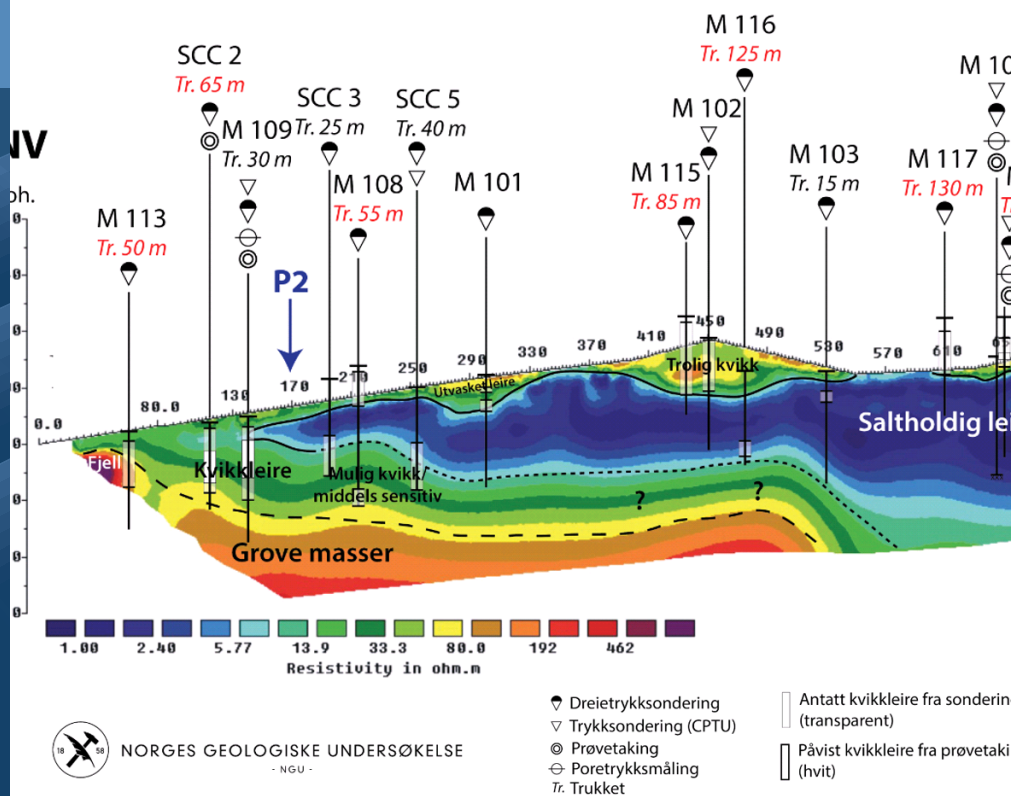




Detektering av kvikkleire- Sluttrapport.

Naturfareprosjektet: Delprosjekt 6 Kvikkleire

126
2015



Rapport nr 126-2015

Detektering av kvikkleire-Sluttrapport.

Utgitt av: Norges vassdrags- og energidirektorat

Redaktør: Ingrid Havnen, NVE og Hanne Ottesen, SVV

Forfattere: Multiconsult AS: Rolf Sandven, Alberto Montafia, Anders Samstad Gylland .
NGI: Andreas Aspmo Pfaffhuber, Kristoffer Kåsin
University Collage Dublin (UCD): Michel Long

Trykk: NVEs hustrykkeri

Opplag: P.O.D

Forsidefoto: Norges Geologiske Undersøkelse

ISBN 978-82-410-1178-8

ISSN 1501-2832

Sammendrag: Rapporten oppsummerer arbeidet innen NIFS for detektering av kvikkleire/ sprøbruddmaterialer. Det gis anbefalte strategier for bruk av konvensjonelle geotekniske metoder (sonderingsmetoder, CPTU, vingeboing og prøvetaking med laboratorieundersøkelser) også kombinert med geoelektriske målinger på overflaten (ERT) og luftbårne målinger (AEM) samt resistivitetsmålinger utført nedhulls (R-CPTU) for detektering. Rapporten er støttet av NGF og gir grunnlag for en NGF-veileder

Emneord: Detektering av kvikkleire sluttrapport, sondering, CPTU, R-CPTU, elektrisk vingebor, geofysiske metoder, ERT, AEM, resistivitet, ledningsevne, sprøbruddmateriale, kvikkleire, sensitiv leire, feltundersøkelser, laboratorieundersøkelser.

Norges vassdrags- og energidirektorat
Middelthunsgate 29
Postboks 5091 Majorstua
0301 OSLO

Telefon: 22 95 95 95
Telefaks: 22 95 90 00
Internett: www.nve.no

RAPPORT

NIFS, delprosjekt 6 Kvikkleire

OPPDRAUGSGIVER

Statens vegvesen, Jernbaneverket og NVE

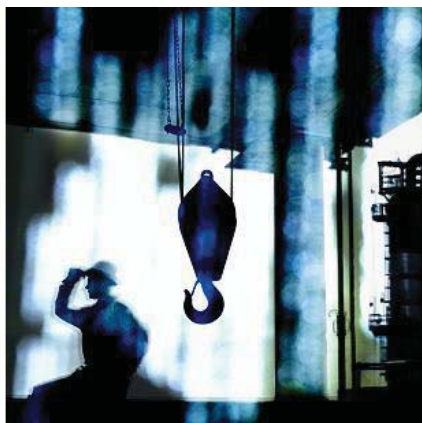
EMNE

Detektering av sprøbruddmateriale.
Sluttrapport med anbefalte prosedyrer.

Endelig rapport.

DATO / REVISJON: 20. november 2015 / 01

DOKUMENTKODE: 415559-RIG-RAP-004



Multiconsult

Denne rapporten er utarbeidet av Multiconsult i egen regi eller på oppdrag fra kunde. Kundens rettigheter til rapporten er regulert i oppdragsavtalen. Tredjepart har ikke rett til å anvende rapporten eller deler av denne uten Multiconsults skriftlige samtykke.

Multiconsult har intet ansvar dersom rapporten eller deler av denne brukes til andre formål, på annen måte eller av andre enn det Multiconsult skriftlig har avtalt eller samtykket til. Deler av rapportens innhold er i tillegg beskyttet av opphavsrett. Kopiering, distribusjon, endring, bearbeidelse eller annen bruk av rapporten kan ikke skje uten avtale med Multiconsult eller eventuell annen opphavsrettshaver.

RAPPORT

OPPDRAAG	NIFS Naturfare – infrastruktur, flom og skred	DOKUMENTKODE	415559-2-RIG-RAP-004rev01
EMNE	Detektering av sprøbruddmateriale. Sluttrapport med anbefalte prosedyrer.	TILGJENGELIGHET	Åpen
OPPDRAAGSGIVER	Statens vegvesen, Jernbaneverket og NVE	OPPDRAAGSLEDER	Rolf Sandven
KONTAKTPERSON	Ingrid Havnen (NVE), Hanne B. Ottesen (Statens vegvesen), Mostafa Abokhalil (Jernbaneverket)	UTARBEIDET AV	Rolf Sandven, Alberto Montafia, Anders Gylland, Kristoffer Kåsin, Andreas A. Pfaffhuber, Michael Long
NIFS RAPPORT ID		ANSVARLIG ENHET	3012 Midt Geoteknikk

SAMMENDRAG

Etatsatningsprosjektet NIFS (Naturfare – infrastruktur, flom og skred) er et samarbeid mellom Norges Vassdrags- og Energidirektorat (NVE), Jernbaneverket (JBV) og Statens vegvesen (SVV) og omfatter i alt 8 delprosjekter innrettet mot ulike typer naturfare. Delprosjekt 6 i etatsatningsprosjektet, der SINTEF/Multiconsult AS og NGI er kontraktsfestede parter, har hovedfokus på kvikkleire. En av arbeidsoppgavene i dette delprosjektet omfatter et studie innen "Detektering av sprøbruddmateriale". Sprøbruddmateriale defineres her som materialer med $c_r < 2,0$ kPa og $S_t > 15$, og innbefatter dermed kvikkleire med $c_r < 0,5$ kPa. Hensikten med dette studiet er å vurdere ulike felt- og laboratoriemetoders egnethet i forhold til påvisning av slike materialer.

Dette studiet avsluttes nå med en oppsummeringsrapport med en vurdering av anbefalte felt- og laboratoriemetoder for påvisning av sprøbruddmateriale. Rapporten bygger på tidligere delstudier i prosjektet, der ulike kriterier for detektering av sprøbruddmateriale har blitt vurdert og testet på data fra en rekke utvalgte forsøksfelt. Det henvises i denne sammenheng til tidligere NIFS-rapporter og andre relevante referanser i litteraturlisten.

Anbefalte metoder omfatter konvensjonelle geotekniske sonderinger, CPTU, vinge boring og prøvetaking med laboratorieundersøkelser. I tillegg behandles resistivitetmålinger utført nedhulls (Trykksondering med resistivitetmåling R-CPTU), på overflaten (Elektrisk resistivitetstomografi ERT) og luftbårne målinger (Airborne Electromagnetic Measurements AEM). Det er også gitt anbefalte strategier for grunnundersøkelser med kombinert bruk av geotekniske og geofysiske undersøkelser, der en av hensiktene vil være å påvise forekomst av sensitive og kvikke sedimenter. De anbefalte detekteringsprinsippene er delvis en videreføring og presisering av tidligere anvendte metoder og klassifiseringsprinsipper. Prosjektet definerer imidlertid også ny metodikk, som på en bedre måte enn tidligere påviser forekomst av sprøbruddmateriale. Metodene har imidlertid begrensede muligheter til å skille mellom sensitiv og kvikk leire, i sum sprøbruddmateriale, så dette har ikke vært et tema i vurdering og bearbeiding av metodene. Både tidligere og nye metoder må brukes med skjønn og vil representere en mulighet for feiltolkning i enkelttilfeller.

I studiets første faser har oppgavene blitt gjennomført av Multiconsult/SINTEF. I oppsummeringsfasen har prosjektet blitt gjennomført i et faggruppebasert samarbeid mellom Multiconsult/SINTEF og NGI, eksterne fagpersoner, samt representanter fra NIFS-partnerne.

FORFATTERLISTE

Multiconsult: Rolf Sandven, Anders Samstad Gylland, Alberto Montafia

NGI: Andreas Aspmo Pfaffhuber, Kristoffer Kåsin

University College Dublin (UCD): Michael Long

REV.	DATO	BESKRIVELSE	UTARBEIDET AV	KONTROLLERT AV	GODKJENT AV
01	20.11.2015	Endelig rapport tilsendt NIFS-partnere	Rolf Sandven m.fl.	Anders Gylland m.fl.	Arne Vik
00	15.09.2015	Foreløpig rapport tilsendt NIFS-partnere for kommentarer	Rolf Sandven m.fl.	Anders Gylland m.fl.	Arne Vik

ENGLISH SUMMARY

The NIFS project is a joint venture between the Norwegian Water Resources and Energy Directorate (Norges Vassdrags- og Energidirektorat NVE), The Norwegian Railroad Administration (Jernbaneverket NNRA) and the Norwegian Public Roads Administration (Statens vegvesen NPRA). In addition to other topics, Task 6 of the NIFS project focus on detection and behaviour of brittle materials.

In this work topic, major efforts are put into detection of brittle materials such as quick clay from various field and laboratory investigation methods. The main objective is to evaluate the methods according to their potential to identify brittle materials in a rational and reliable way.

In the project period between 2012 and 2015 a study titled "Detection of sensitive materials" has been carried out, concentrating on this topic. This report defines the conclusion of this study, presenting a summary report including recommended methods and procedures for detection of brittle materials by various field and laboratory tests. The report is based on previous activities and reports in the project, where different related criteria for detection of brittle materials have been tested and evaluated. Reference is hence made to previous NIFS reports and other relevant references in the literature list.

Recommended procedures include conventional geotechnical soundings, CPTU, vane testing and sampling with laboratory testing. In addition, resistivity measurements carried out downhole (Cone penetration test with resistivity measurements R-CPTU), on the surface (Electrical Resistivity Tomography ERT) or from the air (Airborne Electromagnetic Measurements AEM) are presented. Recommended strategies for combined use of geotechnical and geophysical site investigations are also suggested, with detection of sensitive and quick clays being one of the major objectives.

The recommended detection principles are partly refinements of previously well-known principles and classification methods. However, the project also defines new methods that can be used for detection in a more reliable way. The suggested methods have limitations in separating between sensitive and quick clays as such, so this has not been a motivation in the study. Moreover, both previous and new methods should be used with engineering judgement and a critical approach, since the interpretation and classification methods may mislead in some cases.

In the first phase of the study, the work tasks have been carried out by Multiconsult and SINTEF. In the concluding phase, the project has been carried out in close cooperation between Multiconsult/SINTEF, NGI and external scientists, supported by representatives from the NIFS-partners.

INNHOLDSFORTEGNELSE

1	Innledning	7
1.1	Bakgrunn.....	7
1.2	Problemstilling	7
1.3	Hensikt med rapporten.....	8
1.4	Organisering av studiet.....	9
1.5	Definisjoner og terminologi.....	10
1.6	Forsøksfelter benyttet i studiet	10
2	Aktuelle metoder for detektering av sprøbruddmateriale.....	12
2.1	Konvensjonelle sonderingsmetoder	13
2.1.1	Dreiesondering.....	13
2.1.2	Dreietrykksondering	14
2.1.3	Totalsondering	15
2.2	Trykksondering med poretrykkmåling (CPTU).....	16
2.3	Resistivitetsmåling	19
2.3.1	Nedhullsmålinger med resistivitetssonde (R-CPTU).....	20
2.3.2	Elektrisk resistivitetstomografi (ERT)	21
2.3.3	Luftbårne målinger (AEM).....	23
2.4	Vingeboring.....	25
2.4.1	Generelt	25
2.4.2	Beskrivelse av utstyr og forsøksprosedyrer	26
3	Anbefalt bruk av aktuelle metoder – vurdering av muligheter og begrensninger	27
3.1	Konvensjonelle sonderingsmetoder	27
3.1.1	Dreiesondering.....	28
3.1.2	Dreietrykksondering	28
3.1.3	Totalsondering.....	31
3.2	Trykksondering med poretrykkmåling	33
3.2.1	Detektering av kvikk eller sensitiv leire fra CPTU.....	33
3.2.1.1	Bruk av revidert spissmotstandstall N_{mc}	36
3.2.1.2	Bruk av revidert poretrykksforhold B_{q1}	37
3.2.1.3	Bruk av revidert friksjonsforhold R_{fu}	38
3.2.1.4	Resistivitet ρ	38
3.2.2	Nye identifikasjonsdiagrammer	38
3.2.3	Bruk av stangfriksjon for detektering av sprøbruddmateriale	40
3.2.1	Oppsummering	45
3.3	Resistivitetsmålinger.....	45
3.3.1	Nedhulls målinger med resistivitetssonde (R-CPTU).....	46
3.3.2	Overflatemålinger (ERT).....	47
3.3.3	Luftbårne målinger (AEM).....	49
3.3.4	Sammenligning mellom R-CPTU, ERT og AEM resultater.....	51
3.3.5	Korrelasjoner mellom resistivetsverdier og geotekniske rutineegenskaper.....	52
3.4	Vingeboring.....	54
3.4.1	Konvensjonell tolkning.....	54
3.4.2	Bestemmelse av omrørt skjærfasthet fra vingebor	55
3.4.3	Arbeidskurve fra vingeborforsøk	57
3.4.4	Oppsummering	60
3.5	Laboratoriemålinger	61
3.5.1	Generelt	61
3.5.2	Rutineundersøkelser i laboratoriet	61
3.5.3	Saltinnholdsbestemmelse	62
3.5.4	Resistivitetsmåling i laboratoriet	62
3.5.5	Oppsummering	63
4	Strategi for grunnundersøkelser i kvikkleireområder	64
5	Oppsummering med viktige konklusjoner	68
6	Forslag til videre arbeid	71
7	Referanser	73
8	Øvrig litteratur.....	76
8.1	Tidligere NIFS rapporter - Detekteringsstudiet	76
8.2	Tekniske rapporter og veiledninger	76
8.3	Prosjekt-, masteroppgaver og PhD-avhandlinger	76

9	SYMBOLER OG TERMINOLOGI.....	78
10	VEDLEGG	80
	Vedlegg C Eksempler på grunnundersøkelser med bruk av geofysiske og geotekniske metoder	80
	VEDLEGG A	81
	Detaljert oversikt over utvalgte forsøksfelt	81
	VEDLEGG B	85
	Sammendrag av grunnlagsdata fra utvalgte forsøksfelt	85
	VEDLEGG C	142
	Eksempler på grunnundersøkelser	142
	med bruk av geofysiske og geotekniske metoder	142
	Eksempel C1: Undersøkelse langs traséer og i terrengkorridorer	143
	Eksempel C2: Undersøkelse for større arealer	147

1 Innledning

1.1 Bakgrunn

Etatene Statens vegvesen (SVV), Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE) og Jernbaneverket (JBV) har tildelt samarbeidspartnerne SINTEF/Multiconsult og NGI en rammeavtale under etatsatsingsprosjektet Naturfare - Infrastruktur, flom og skred (NIFS). Hovedmålsettingen med NIFS-prosjektet er å "Samordne retningslinjer og utvikle bedre verktøy for geoteknisk prosjektering i kvikkleireområder". Arbeidsoppgavene er gjennomført innenfor delprosjekt 6 Kvikkleire.

I prosjektperioden 2012-2015 er det blant annet gjennomført et studium innen "Detektering av sprøbruddmateriale". Dette studiet avsluttes nå med en oppsummeringsrapport med anbefalte metoder og prosedyrer for påvisning av sprøbruddmateriale ved bruk av ulike felt- og laboratoriemetoder. Rapporten bygger på tidligere delstudier i prosjektet, der ulike kriterier for detektering av sprøbruddmateriale har blitt vurdert og testet på data fra en rekke utvalgte forsøkssteder. Det henvises i denne sammenheng til tidligere NIFS-rapporter i litteraturlisten. I studiets første faser har disse oppgavene blitt gjennomført av Multiconsult/SINTEF. I oppsummeringsfasen har prosjektet blitt gjennomført i et faggruppe-samarbeid mellom Multiconsult/SINTEF, NGI og eksterne fagpersoner, supplert med representanter fra NIFS-partnerne.

1.2 Problemstilling

Indikasjoner på forekomster av kvikke og sensitive leirer er viktige i de fleste prosjekter, ettersom dette vil legge føringer for den videre gjennomføring av grunnundersøkelsen. Det påvirker også gjennomføring av rådgivning og prosjektering, samt kontroll- og kvalitetsrutiner vedrørende dette.

Feltmetodene som benyttes i dag gir i mange tilfeller gode indikasjoner på sprøbruddmaterialer, men det må likevel gjennomføres prøvetaking og påfølgende laboratoriemålinger for å verifisere forekomstene. I mange tilfeller er det imidlertid påvist at indikasjoner på kvikk eller sensitiv leire fra sonderingsprofilene ikke stemmer med laboratorieklassifiseringen. Det er derfor et klart behov for å vurdere dagens praksis for detektering av sprøbruddmateriale for å oppnå bedre forståelse av de ulike metodenes muligheter og begrensninger i så måte.

Arbeidsoppgavene i dette prosjektet kan oppsummeres som følger:

- Vurdering av konvensjonelle sonderingsmetoders brukbarhet for detektering av sprøbruddmateriale
- Forbedring av CPTU-baserte klassifiseringsdiagrammer for identifikasjon av sprøbruddmaterialer
- Vurdering av resistivitetsmålinger for kartlegging av kvikkleireområder (nedhulls- (R-CPTU), overflatemåling (ERT) og luftbårne målinger (AEM))
- Anbefalt strategi og tolkningsmetodikk basert på kombinasjon av geotekniske boringer og geofysiske målinger for å kunne bestemme sprøbruddmaterialers forekomst og utstrekning

Studiet har vist at tolkning av resultater fra konvensjonelle metoder kan føre til feilbedømming av grunnforholdene, der både overvurdering og undervurdering av sprøbruddmateriale kan forekomme. Det er også pekt på mulige årsaker til dette.

CPTU er en av de mest brukte geotekniske sonderingsmetodene i dag. Med samtidig måling av poretrykk, spissmotstand og sidefriksjon samles data som sammen er velegnet for klassifisering av jordartstype. Det er tidligere utviklet en rekke klassifikasjonsdiagrammer for formålet, men de har vist seg å være usikre for påvisning av norske sensitive og kvikke leirer. Det foreligger derfor et klart

forbedringspotensial ved å oppdatere og videreutvikle klassifikasjonsdiagrammer for mer pålitelig påvisning av sprøbruddmateriale fra denne metoden.

Samtidig viser bruk av geofysiske undersøkelsesmetoder et stort potensiale for detektering av sprøbruddmateriale, både når det gjelder kvalitet og omfang. Utførelse av resistivitetsmålinger kan for eksempel være godt egnet til kartlegging av sprøbruddmateriale, spesielt i en tidlig fase av grunnundersøkelsen. Geotekniske borhull gir kun informasjon som er typisk for borpunktet, og informasjon om grunnforholdene oppnås som regel gjennom interpolering av informasjon mellom to eller flere nabohull. Resultater fra resistivitetsmålinger vil kunne gi kontinuerlig informasjon om grunnforholdene langs de utførte profiler i terrenget, og supplerer derfor informasjonen fra borhullene med hensyn på utstrekning og mektighet av de enkelte jordlagene. Ved å kombinere disse metodene oppnås derfor i mange tilfeller en mer optimal gjennomføring av grunnundersøkelsen og langt bedre forståelse av grunnforholdene.

Så langt har den mest brukte geofysiske metoden for detektering av sprøbruddmateriale vært 2D-resistivitetsmålinger på terrengoverflaten (Electrical Resistivity Tomography ERT). Resistiviteten kan imidlertid også bestemmes lokalt i borehull ved hjelp av trykksonderinger med resistivitetsmåling (R-CPTU). Med dette utstyret er det mulig å måle jordens elektriske motstand ved hjelp av en egen resistivetsmodul som kobles til selve trykksonden. I tillegg til måling av resistivitet kan jordens lagdeling bestemmes meget nøyaktig ved tolkning av de konvensjonelle CPTU-målingene spissmotstand, poretrykk og sidefriksjon. Tolkning av hele profilet med hensyn på sprøbruddmateriale kan derfor bli mer pålitelig. Luftbårne målinger (AEM) har blitt introdusert i kvikkleirekartlegging i de siste årene, og dette synes å være en meget effektiv metode til dette formålet, blant annet til kartlegging og utredninger i større veg- og baneprosjekter.

Den store innsatsen for kartlegging av faresoner med sprøbruddmateriale har ført til et økende behov for raskere og mer pålitelig identifisering av sprøbruddmaterialer. Det er i dag en økende tendens til kombinert bruk av geofysiske og geotekniske undersøkelser i forbindelse med kartlegging av utvaskede leirer. Denne praksisen kan gi betydelige fordeler når det gjelder tolkning av grunnforholdene, både for geoteknikere og geofysikere. Generelt kan man si at geofysiske metoder dekker store områder på forholdsvis liten tid sammenlignet med geotekniske undersøkelser, men med lavere oppløsning og treffsikkerhet. Ved kombinert bruk av geotekniske og geofysiske målinger i en tidligfase kan resultatene benyttes til mer rasjonell og kostnadseffektiv plassering av nye sonderinger, in situ målinger og prøvetakinger slik at en får et best mulig grunnlag for bestemmelse av grunnforholdene.

1.3 Hensikt med rapporten

Metodene som anvendes i kartlegging av sprøbruddmateriale må velges med utgangspunkt i et kostnytte perspektiv, anvendeligheten av metode i forhold til de rådende grunnforhold og øvrig bruk av måledataene i det aktuelle prosjektet. Sluttrapporten i dette prosjektet inneholder sammenstillinger og anbefalinger vedrørende detektering av sprøbruddmateriale fra de vanligste felt- og laboratorieundersøkelser som benyttes i Norge. Rapporten bygger på tidligere delrapporter i NIFS-prosjektet. Disse omhandler både konvensjonelle undersøkelsesmetoder og ny metodikk, i hovedsak CPTU og utstyr for måling av jordens resistivitet. Det henvises til disse rapportene for mer detaljerte vurderinger.

I slutfasen av NIFS prosjektet har det først og fremst vært viktig å få oppsummert og systematisert de erfaringer og funn som er gjort tidligere i studiet. Spesielt gjelder dette resistivitetsmetodene R-CPTU, ERT og AEM, der det foreløpig foreligger begrenset erfaring fra praktisk bruk. Videre er det viktig å sammenstille erfaringer med generell tolkning av sprøbruddmateriale fra CPTU, og sammenligne disse med resultater fra resistivitetsmålingene. Måling av total nedpressingskraft i CPTU/R-CPTU med

utledning av mobilisert stangfriksjon er også en interessant kombinasjon som så langt har gitt lovende resultater.

Prioriterte oppgaver i avslutningsfasen av studiet har vært:

- Sammenfatning av erfaringer og prosedyrer for detektering av sprøbruddmateriale fra konvensjonelle sonderingsmetoder
- Sammenstilling av målte resistivetsverdier for sprøbruddmateriale, med sammenligning mellom resultater fra R-CPTU, ERT og AEM og data fra øvrige sonderingsmetoder og laboratoriemålinger
- Utvikle nye identifikasjonsdiagrammer med basis i CPTU/R-CPTU målinger, der avledede parametre fra spissmotstand, poretrykk, friksjon og eventuelt resistivitet kombineres
- Sammenligning av resultater fra elektriske vingeboringer med resultater fra laboratorieforsøk og CPTU
- Bruk av korrelasjoner mellom resistivetsverdier fra R-CPTU og ERT med resultater fra rutineundersøkelser og saltinnholdsmålinger.
- Utarbeidelse av anbefalt strategi for grunnundersøkelser i avsetninger med sprøbruddmateriale
- Oppsummering, konklusjoner og anbefalinger for utvalgte metoder

1.4 Organisering av studiet

De grunnleggende delstudier i detekteringsprosjektet ble gjennomført av Multiconsult/SINTEF i perioden 2012-2015. Følgende aktiviteter ble gjennomført (delrapportnummer i parentes):

- Vurdering av konvensjonelle sonderingsmetoder for detektering av sprøbruddmateriale. NIFS-rapport nr.R46-2012 (MC 415559-RIG-RAP-001), samt masteroppgave Tesfaye Tilahun, NTNU
- Bruk av resistivetsmåling for detektering av sprøbruddmateriale. NIFS-rapport nr.R47-2014 (MC 415559-RIG-RAP-002), samt masteroppgave Alberto Montafia, NTNU
- Feltstudium med måling av resistivitet (R-CPTU, ERT) på utvalgte forsøksfelt. NIFS-rapport nr. R101-2015 (MC 415559-RIG-RAP-003))

Det henvises til disse rapportene for nærmere beskrivelser.

I slutfasen er det opprettet en arbeidsgruppe for utarbeidelse av en sluttrapport med anbefalinger for praktisk bruk. Denne gruppen har bestått av representanter fra Multiconsult, SINTEF, NGI, University College Dublin og NIFS-partnerne. Følgende personer har deltatt:

- **Multiconsult:** Rolf Sandven, Alberto Montafia, Anders Samstad Gylland (fra august 2015)
- **SINTEF:** Anders Samstad Gylland (til august 2015)
- **NGI:** Kristoffer Kåsin, Andi A. Pfaffhuber (med bidrag fra Sara Bazin og Helgard Anshütz)
- **University College Dublin (UCD):** Mike Long
- **NIFS-partnere:** Ingrid Havnen (NVE), Hanne Bratlie Ottesen (SVV), Mostafa Abokhalil (JBV)

Norsk Geoteknisk Forening (NGF) har også støttet prosjektet økonomisk, og sluttrapporten utgis derfor også i bearbeidet form gjennom NGFs meldingsserie (NGF Melding 12). Det vil også bli utarbeidet en engelskspråklig versjon av sluttrapporten.

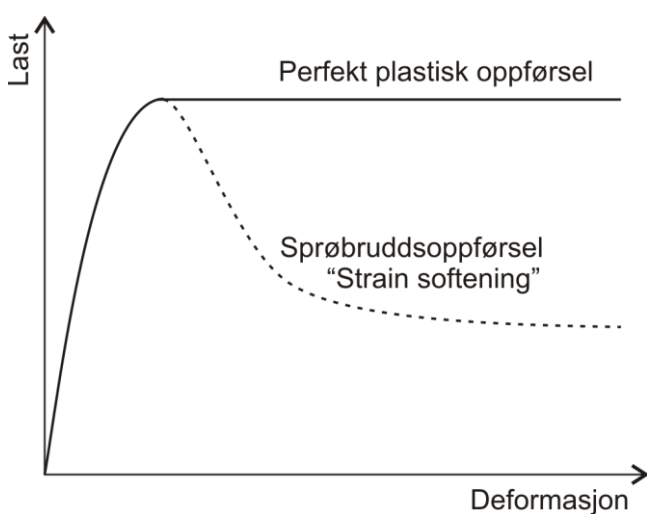
1.5 Definisjoner og terminologi

I rapporten er kvikkleire, sensitiv leire og sprøbruddmateriale definert i henhold til NGF-melding nr. 2 Symboler og terminologi i geoteknikk og NVEs veileder for utbygging i kvikkleireområder (NVE rapport 7/2014).

Kvikkleire: Leire som i omrørt tilstand har udrenert skjærfasthet c_r lavere enn 0,5 kPa.

Sensitiv leire: Leire som utviser en grad av sensitivitet (S_t = forhold mellom intakt og omrørt udrenert skjærfasthet). Generelt klassifiseres en leire som lite sensitiv for $S_t < 8$, middels sensitiv for $8 < S_t < 30$ og meget sensitiv for $S_t > 30$.

Sprøbruddmateriale: Med sprøbruddmaterialer menes her leire og silt som i betydelig grad taper fasthet ved økt tøyning ut over maksimal fasthet i en udrenert belastningssituasjon (ref. Figur 1.1). NVEs veileder klassifiserer alle materialer med omrørt skjærfasthet c_r lavere enn 2,0 kPa og med sensitivitet $S_t > 15$ som sprøbruddmateriale, der begge kriterier må være oppfylt.



Figur 1.1 Perfekt plastisk og sprøbruddoppførsel i geologiske materialer.

Leirer som ikke regnes som sprøbruddmateriale kan likevel vise betydelig grad av sprøbruddoppførsel. Det er imidlertid verd å merke seg at NIFS-Rapport 88/2014 ikke påviser noen korrelasjon mellom sensitivitet og grad av sprøbruddoppførsel i treaksialforsøk for norske leirer. Dette peker på at den nåværende definisjonen av sprøbruddmateriale ikke er endelig, og at den med fordel kan videreutvikles etter hvert som mer data og større forståelse blir opparbeidet.

1.6 Forsøksfelter benyttet i studiet

Utvalget av forsøksfelt i dette studiet har hatt som formål å kunne evaluere ulike metoder for detektering av sprøbruddmateriale. For å oppnå et størst mulig erfaringsgrunnlag er det etablert et samarbeid om datautveksling med NIFS partnere som NGI, Statens vegvesen, NTNU/SINTEF og NGU, med Rambøll som ekstern partner. I NIFS-prosjektet er det etablert 2 egne forsøksfelt (Klett og Fallan) som er dokumentert i rapport R101-2015 (MC 415559-RIG-RAP-003). I tillegg er en rekke andre forsøksfelter inkludert. Disse er enten grundig undersøkt i en kommersiell sammenheng eller i forskningsstudier. Ved utvelgelsen er det lagt vekt på en regional fordeling med forsøksfelt i Østlandsområdet og i Trøndelag. I tillegg er det søkt å dekke variasjon i forkonsolidering og kornfordeling i leirene. Forsøksfeltene er alle rimelig godt dokumenterte med hensyn på grunnforhold og geologisk opprinnelse.

Tabell 1.1 Oversikt over utvalgte forsøkssteder med tilgjengelig geoteknisk informasjon.

Prøvefelt	Sondering	CPTU	R-CPTU	ERT	Ving	Prøvetaking	Utvalgte referanser
ØSTLANDET							
E16 Kløfta Nybakk – Slomarka	TOT	x	x	x AEM	-	72/Blokk	Christensen, C.W. m.fl. (2015) Anschütz, H. m.fl. (2015) NGI rapport 20120491-01-R(2013)
Smørgrav/ Vestfossen	DRT	x	x	x	-	72	NGI rapport 20081135-1 (2009) NGI rapport 20100136-1-R (2010) Donohue m.fl. (2009) Donohue m.fl. (2012) Pfaffhuber m.fl. (2010) Bazin m.fl. (2013)
TRØNDELAG							
Tiller	DRT/TOT	x	x	x	x	54/76/Blokk	NTNU Div. PhD- og masteroppgaver: Sandven (1990), Ørbech (1999), Seierstad (2000), Long (2005), Yesuf (2008), Gylland (2011/2012), Gylland (2013), Sandene (2010), Holsdal (2012)
Esp, Byneset	DRT/TOT	x	x	x	-	54/76/Blokk	Thakur (2012) NTNU masteroppgaver: Hundal (2014), Torpe (2014), NGI filer
Klett sør	DRT/TOT	x	x	x	x	54/76/Blokk	Multiconsult 415531-RIG-RAP-003 (2014). NIFS R101-2015.
Klett nord	DRT/TOT	x	x	x	-	54/76/Blokk	NGF seminar prøvetaking 2014
Dragvoll	DRT	x	x	x	-	54/Blokk	NTNU masteroppgave: Montafia (2013)
Fallan	DRT/TOT	x	x	x	x	54	Multiconsult r414622-1 (2011) Multiconsult n414622-1 (2011) NIFS R101-2015
Rein, Rissa	DRT/TOT	x	x	x	-	54/76/Blokk	NTNU masteroppgave: Kåsin (2011) Multiconsult r414792-2 (2012)
Nidarvoll	TOT	x	x	x	-	54	NTNU masteroppgave: Hundal (2014)
Rødde	DRT/TOT	x	x	x	-	54	NGI rapport
Ranheim Vestre	TOT	x	x	x	-	54	Multiconsult 416235-RIG-RAP-002 (2014)
Hommelvik sjøside	TOT	x	x	x	-	54/72	NGI rapport 20130532 (2013) NGI rapport 20140383 (2014)

Tabell 1.1 gir en detaljert oversikt hvilke undersøkelser som er utført på de enkelte forsøksstedene.

På de ulike forsøksfeltene er det i noe varierende grad utført undersøkelser med følgende metoder:

Sonderinger

- Dreietrykkssondering (DRT)
- Totalsondering (TOT)
- Trykksondering med poretrykksmåling (CPTU)
- Trykksondering med resistivitetmåling (R-CPTU)

Prøvetaking

- Stempelprøvetaking (ϕ 54 mm, ϕ 72-76 mm)
- Blokkprøvetaking (ϕ 250 mm Sherbrooke, ϕ 160 mm NTNU)

In situ målinger

- Elektrisk vingebor (EFVT)

Spesielle målinger

- Resistivitetsmåling på overflaten (ERT)
- Luftbårne resistivitetsmålinger (AEM)

En detaljert oversikt over utførte undersøkelser og egenskaper for utvalgte forsøksfelt er oppsummert i Vedlegg A, mens en kort beskrivelse med geotekniske og geofysiske data, samt de mest aktuelle jordprofilene er samlet i Vedlegg B.

2 Aktuelle metoder for detektering av sprøbruddmateriale

I dagens grunnundersøkelsespraksis benyttes et beskjedent antall undersøkelsesmetoder for påvisning av sprøbruddmateriale, i hvert fall innenfor ordinære prosjekterings- og kartleggingsoppdrag. Det er imidlertid mulig å benytte alle sonderingsmetoder som baserer seg på en konstant penetrasjonsrate for boringen, og der penetrasjonskraften på toppen av stangsystemet eller et annet relevant mål for sonderingsmotstanden registreres. Blant sonderingsmetodene er følgende metoder vurdert som de mest aktuelle:

- Dreiesondering (først og fremst på grunn av stor mengde tidligere undersøkelser)
- Dreietrykksondering
- Totalsondering (dreietrykksondering i kombinasjon med bergkontrollboring)
- Trykksondering med poretrykksmåling (CPTU)

Dreiesondering var tidligere den mest benyttede metoden til dette formålet, men er nå i stor grad erstattet med riggbaserte metoder som dreietrykksondering og særlig totalsondering. Metoden er imidlertid fremdeles aktuell ved gjennomgang av data fra tidligere grunnundersøkelser.

Konvensjonelle sonderingsmetoder som dreietrykk- og totalsondering er i mange tilfeller vurdert å være tilstrekkelige for påvisning av sprøbruddmateriale. Dette studiet har imidlertid vist at disse metodene kan gi feilaktig indikasjon på slike materialer, både i konservativ og ikke-konservativ retning. Det vil si at sprøbruddmateriale ikke kan påvises sikkert fra disse sonderingene alene.

De siste 15-20 årene har bruken av trykksondering med poretrykksmåling (CPTU) i landjordsbaserte prosjekter økt betydelig, og metoden er i dag anerkjent både som sonderings- og in situ målemetode. Resultatene gir i de fleste tilfelle meget presis bestemmelse av lagdeling og jordart, og måleresultatene benyttes også til direkte eller indirekte tolkning av geotekniske parametre. Metoden har også potensiale i forhold til påvisning av sprøbruddmateriale, men det har så langt vært noe varierende erfaringer med dette her i landet. Svenske studier har imidlertid vist at påvisningen kan forbedres ved måling av resistivitet (R-CPTU) og total nedpressingskraft for utledning av stangfriksjonen langs borstengene (Løfroth m.fl., 2010).

Vingeboring er også vurdert ettersom dette er den eneste in situ målemetoden som kan gi omrørt skjærfasthet og sensitivitet ved direkte måling og ikke gjennom empiriske vurderinger. Metoden kan, med bruk av riktig utstyr, være viktigere ved undersøkelser og utredninger i områder med sprøbruddmaterialer enn dagens begrensede bruk skulle tilsi.

I felt er resistivitetsmålinger på terrengoverflaten (Electric Resistivity Tomography ERT) blitt benyttet i flere år til forskjellige anvendelser innen geologisk og geoteknisk kartlegging. ERT gir i prinsippet et kontinuerlig resistivetsprofil som kan være flere hundre meter langt, og som også kan nå de dypeste lagene, inklusive berg. Metoden blir nå vurdert som svært nyttig og aktuell i forbindelse med kartlegging av sprøbruddmateriale (Solberg m.fl., 2008). I det siste er det også benyttet luftbårne

metoder (Airborne Electromagnetic Measurements AEM) for kartlegging av løsmasser, der det også anses å være mulig å indikere kvikkleireforekomster (Pfaffhuber m.fl., 2010). I tillegg benyttes R-CPTU for nedhulls måling av resistivitet i kombinasjon med tradisjonelle CPTU-målinger. Data fra R-CPTU kan også benyttes i prosessering og tolkning av ERT- og AEM-data ved bruk av betinget inversjon.

Resistivetsmålinger på overflaten og fra luften gir kontinuerlig informasjon om grunnforholdene i et område. Geotekniske sonderinger og in situ målinger gir kun punktinformasjon, med muligheter for å overse avgrensede lommer av kvikkleire mellom borpunktene. Resistivetsmålinger kan derfor i mange tilfeller benyttes i en innledende fase av grunnundersøkelsen for å påvise mulig omfang og kontinuitet av utvasket leire. Dette kan følges opp av strategisk plasserte geotekniske undersøkelser for sikrere bestemmelse av grunnforholdene. På denne måten kan grunnundersøkelsen gjennomføres mer rasjonelt, med et større potensiale for å avdekke områder med særlig utfordrende grunnforhold.

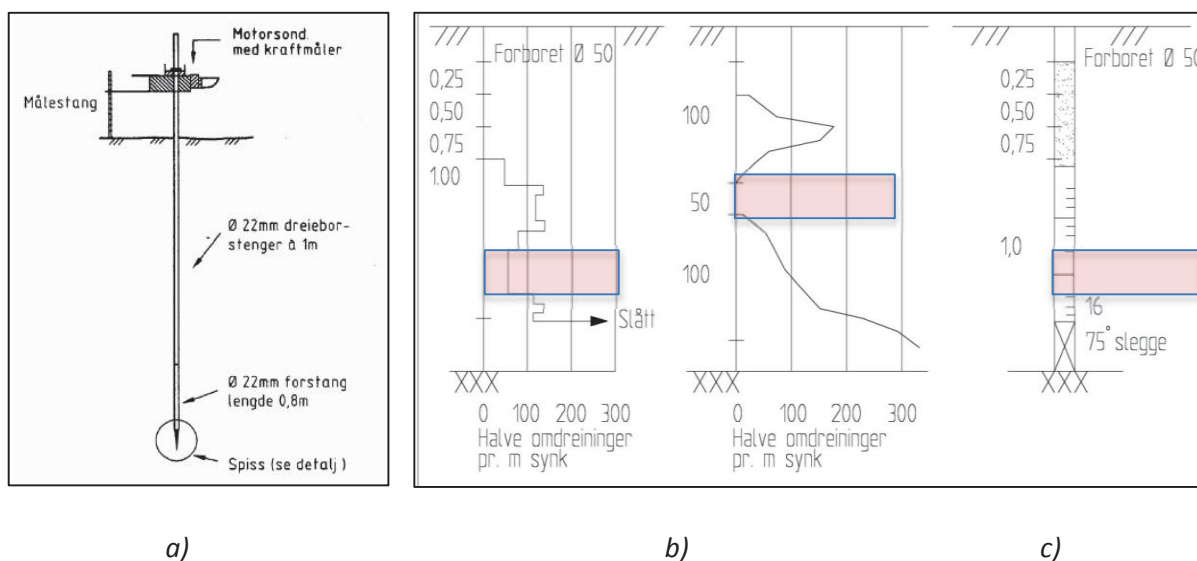
Forutsatt bruk av likt utstyr og lik forsøksmetodikk i et undersøkelsesområde kan det i mange tilfeller oppnås et godt bilde av grunnforholdene. Uavhengig av metode må imidlertid resultatene fra feltundersøkelsene sammenlignes og kalibreres mot omrørt skjærfasthet c_r fra laboratorieundersøkelser på opptatte prøver. Sistnevnte metode er den eneste sikre metoden for verifikasjon av kvikk eller sensitiv leire, men prøvetaking og laboratoriemålinger er også den dyreste og mest tidkrevende metoden.

I denne rapporten er de aktuelle metodene oppsummert med hensyn på anbefalt utstyr og forsøksmetodikk, samt erfaringer og begrensninger ved praktisk utførelse og tolkning av resultatene.

2.1 Konvensjonelle sonderingsmetoder

2.1.1 Dreiesondering

Dreiesondering er en enkel sonderingsmetode som benyttes for å gi et inntrykk av grunnens relative fasthet og dybden til fast lag. Resultatene kan til en viss grad benyttes for 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 ellers der det er vanskelig å komme til med tyngre boreutstyr.



Figur 2.1 Utstyr for utførelse av dreiesondering.

a) Utstyr og prinsipp for dreiesondering

b) Resultatfremstilling for tolkning av dreiesondering etter NGF

c) Resultatfremstilling etter Statens vegvesen

Rød markering: Mulig kvikkleirelag

Resultatene fra dreiesonderingen kan tegnes opp ved å avsette antall halvomdreininger pr. m synk langs horisontalaksen, se Figur 2.1 b. Eventuell forboringsdybde markeres. Belastningen i kN angis på borhullets venstre side. Borerresultatene kan også fremstilles i diagram med bruk av tverrstreker etter Statens vegvesens håndbok, se Figur 2.1 c. Hel tverrstrek tilsvarende 100 halvomdreininger, halv tverrstrek benyttes for hver 25 halvomdreining. I dette tilfellet vil strekene ligge med stor avstand ved penetrasjon av bløtere eller sensitive lag. Synking uten dreining markeres med skyggelegging eller raster. Penetrasjon ved slag på boret vises med kryss, eventuelt angis også antall slag og benyttet slagredskap.

Figur 2.1 (b) viser et eksempel der det er sondert gjennom et kvikkleirelag der boret har sunket for 50 kg loddbelastning uten rotasjon.

Dreiesondering var tidligere en mye benyttet sonderingsmetode, og data fra eldre grunnundersøkelser inneholder ofte dreieborresultater. Etter hvert som behovet for riggbasert sondering og større nedpressingskapasitet har økt, er metoden erstattet av mer robuste sonderingsmetoder.

Ved dreining av boret registreres antall halve omdreininger pr. 20 cm synk eller synk pr. 25 halve omdreininger med 100 kg (1 kN) normert vekt på stengene. Motstanden mot nedtrengning registreres i løs jord som den trinnvise pålagte belastning (inntil 100 kg) som gir jevn synk.

Både motorisert og manuell penetrasjon av boret er mulig, se Figur 2.1 a. Antall halve omdreininger pr. dybdeenhet kan imidlertid være forskjellig ved motorboring og ved håndboring. Selv om denne metoden benyttes lite, vil den være et godt supplement på steder der det er dårlig fremkommelighet for beltegående borerigger, og der ønsket sonderingsdybde ikke er for stor (10-15 m). Det henvises for øvrig til NGF Melding 3 og NS-EN ISO/TS 22476-10 for en mer detaljert beskrivelse av utstyr og forsøksprosedyrer.

2.1.2 Dreietrykksondering

Dreietrykksondering er en sonderingsmetode der borstengene presses og roteres ned i bakken med konstant penetrasjons- og omdreiningshastighet. Sonderingsmotstanden registreres som den nedpressingskraft som skal til for å oppnå de normerte penetrasjonsbetingelsene.

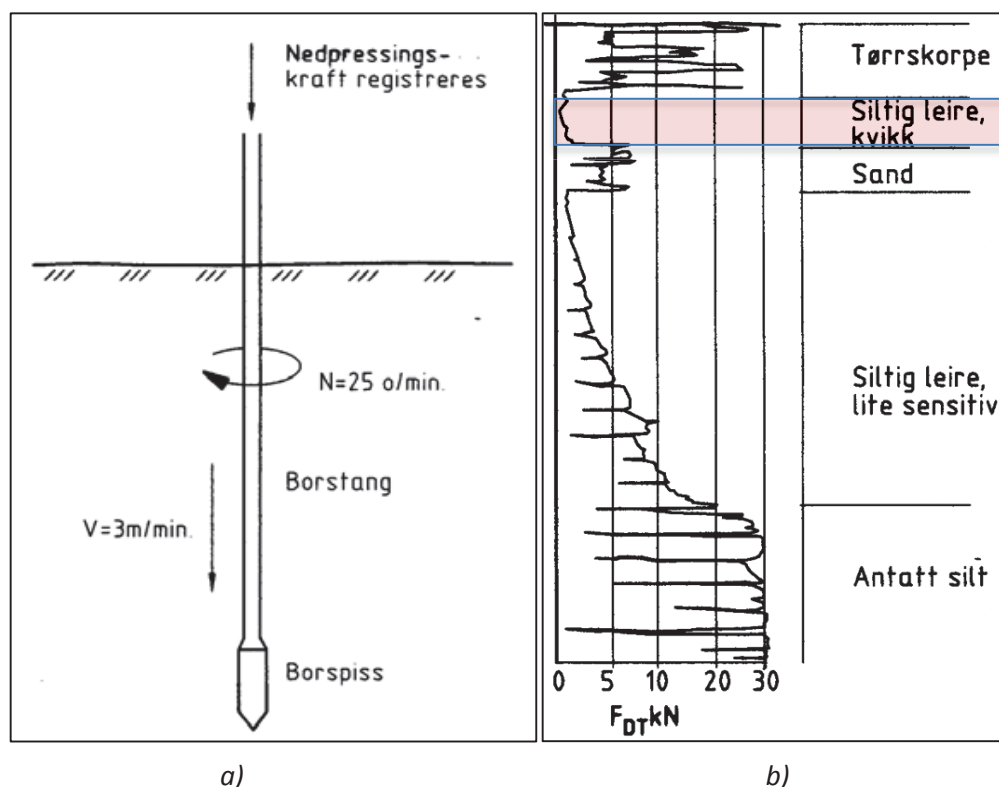
Dreietrykksonderinger brukes i de fleste typer masser, fra leire til grus. Metoden kan benyttes til bestemmelse av lagdeling i løsmasser og dybde til faste eller bæredyktige lag. Metoden har forholdsvis god evne til å penetrere faste jordarter, men vil vanligvis stoppe mot stein og blokk. Dreietrykksondering gir derfor ikke pålitelig påvisning av bergoverflaten, men kan gi en indikasjon på denne.

Prinsippet for dreietrykksondering er vist i Figur 2.2. Ved nedpressing skal prosedyren tilfredsstillende følgende betingelser:

- Penetrasjonshastighet: $3 \pm 0,5$ m pr. min.
- Rotasjonshastighet: 25 ± 5 omdreininger pr. min.

Det er nødvendig å benytte hydraulisk drevet borerigg med minimum nødvendig dreiemoment 1,0 kNm og nedpressingskapasitet 30 kN ved gjennomføring av metoden. Sonderingen fortsetter til borspissen stopper mot berg, blokk eller fast grunn. Et eksempel på sonderingsdiagram fra lagdelt jord med et tynt kvikkleirelag øverst i profilet er vist i Figur 2.2.

Når motstanden blir for stor kan sonderingen føres videre ved å øke dreiehastigheten. Det kan også benyttes pumping ved at borstangen føres opp og ned, samtidig med at boret dreies for eventuelt å kunne penetrere det faste laget. Når nedpressingskraften overstiger 30 kN eller når det pumpes, vil sonderingskurven ikke gi sikre holdepunkter for bestemmelse av materialtype.



Figur 2.2. Dreietrykkssondering (etter NGF Melding 7)

a) Utstyr og prinsipp for dreietrykkssondering

b) Sonderingsresultat i lagdelt avsetning med mulig tynt kvikkleirelag

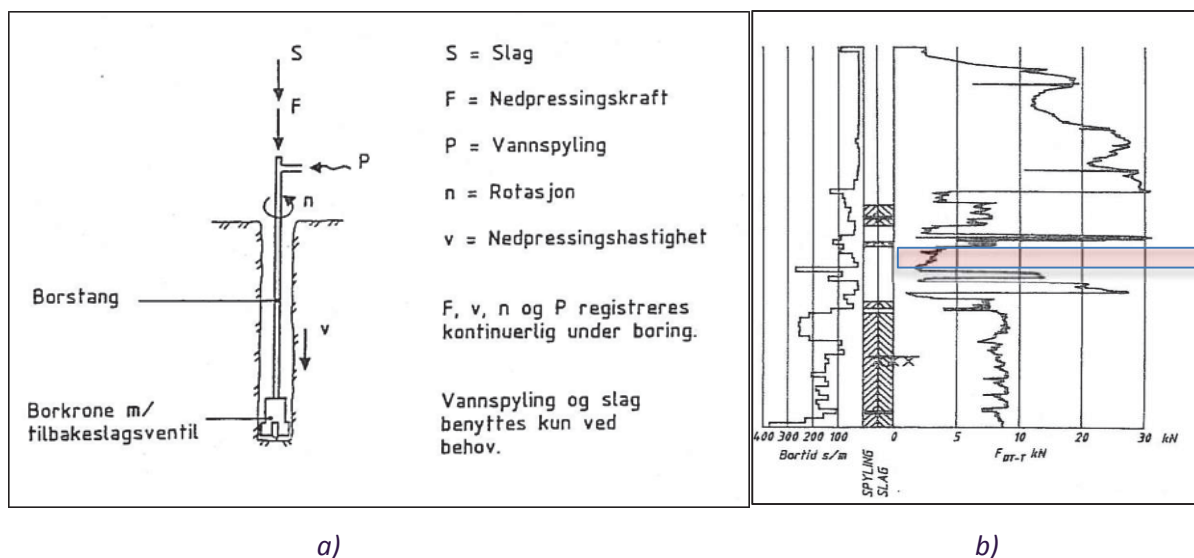
Rød markering: Mulig kvikkleirelag

Det henvises for øvrig til NGF Melding 7 for detaljert beskrivelse av utstyr og forsøksprosedyrer.

Når borspissen penetreres 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. Resultatene fra dreietrykkssondering gir på denne bakgrunn grunnlag for å tolke jordart og relativ lagringsfasthet i grunnen. Silt- og sandlag i leire vil for eksempel karakteriseres med en plutselig økning i nedpressingskraften og det vil derfor som regel være en tydelig grense mellom leire og friksjonsmaterialer. Det vil også være en tydelig grense mellom tørrskorpeleire/forvitret leire og upåvirket leire.

2.1.3 Totalsondering

Totalsondering benyttes til å bestemme lagdeling i løsmasser og dybde til fast grunn og berg. Metoden gir også muligheter til å bore gjennom stein/blokk og inn i bergoverflaten. Metoden kan benyttes for verifisering av bergoverflaten ved å bore minimum 3 m i berg. For å utføre totalsondering må det benyttes en hydraulisk drevet borerigg med slagborhammer og muligheter for spyling. Bruk av vann som spylemedium er anbefalt. Luft kan benyttes i enkelte tilfeller der det er vanskelig med tilførsel av vann, men skal ikke benyttes ved boring i kvikk eller sensitiv leire. Bruk av luft gir generelt større og hurtigere trykkforplantning i leiren rundt borkronen. Det kan også utvikles sug ved borkronen ved bruk av luft. Ved bruk av luft kan det også blåses opp bobler som kan føre til at store volum med kvikkleire kan bli forstyrret på grunn av volumekspansjon av trykkluft ved trykkfall. Dette kan både utløse skred i områder med kritisk stabilitet og føre til store setninger.



Figur 2.3. Totalsondering (etter NGF Melding 9).

a) Utstyr og prinsipp for totalsondering

b) Sonderingsresultat i lagdelt avsetning med mulig tynt kvikkleirelag.

Rød markering: Mulig kvikkleirelag

Totalsondering kombinerer sonderingsprinsippene fra metodene dreierykksondering og bergkontrollboring. I dreierykksonderingsmodus penetreres borstengene ned i bakken med konstant penetrasjons- og rotasjonshastighet, se kap. 2.2 og Figur 2.3. Hvis dette prinsippet ikke gir borsynk går en over til bergkontrollboring. Sonderingen føres da videre ved først å øke rotasjonshastigheten, deretter anvendes spyling, deretter slagboring med spyling og rotasjon. Normal sonderingsprosedyre (dreierykkmodus) skal gjenopptas så snart som mulig etter passering av blokk eller faste lag.

Nedpressingskraften registreres med elektronisk registreringsenhet eller hydraulisk kraftmåler. Bruk av økt rotasjon, slag og spyling markeres under boringen.

Det henvises for øvrig til NGF Melding 9 for en detaljert beskrivelse av utstyr og forsøksprosedyrer.

Sonderingsresultatene presenteres i diagram med kontinuerlig kurve for nedpressingskraft der hvor sonderingen er utført med normert nedpressingshastighet (dreierykkmodus), se Figur 2.3. 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. Resultatene kan gi grunnlag for å bedømme jordart og vurdere løsmassenes relative fasthet.

Ved boring i berg registreres borsynk som antall sekunder pr. m boring. Borsynk i berg kan gi holdepunkter for å bedømme bergkvalitet og for eksempel tykkelse av forvittringsone, sprekker og andre inhomogeniteter.

2.2 Trykksondering med poretrykkmåling (CPTU)

CPTU blir utført med en instrumentert sylindrisk sonde med konisk spiss som penetreres ned i jorda med konstant penetrasjonshastighet 20 mm/sek (1,2 m pr. minutt). 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, vanligvis bak den koniske spissen. Sidefriksjonen måles på en 15-30 cm lang instrumentert friksjonshylse plassert like bak den koniske spissen. 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 (u_2). En

helningsmåler (inklinometer) er vanligvis inkludert for måling av penetrometerets helning i forhold til vertikalaksen.

For trykksonder med måling av poretrykk skal filteret og andre deler av poretrykkssystemet være mettet med væske eller fett før penetrasjonen starter. Tilstrekkelige tiltak for å opprettholde metningen underveis i forsøket skal gjennomføres.

Resultater fra en CPTU-sondering kan i prinsippet brukes til å bedømme:

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

CPTU gir grunnlag for tolking av geotekniske parametre som i enkelte tilfeller kan medføre mindre behov for prøvetaking og kostbare laboratorieundersøkelser.

Trykksondering er egnet i jordartene leire, silt og sand. Metoden er mindre godt egnet i grus og grovere jordarter med stort steinnhold, da utstyret lett vil bli skadet.

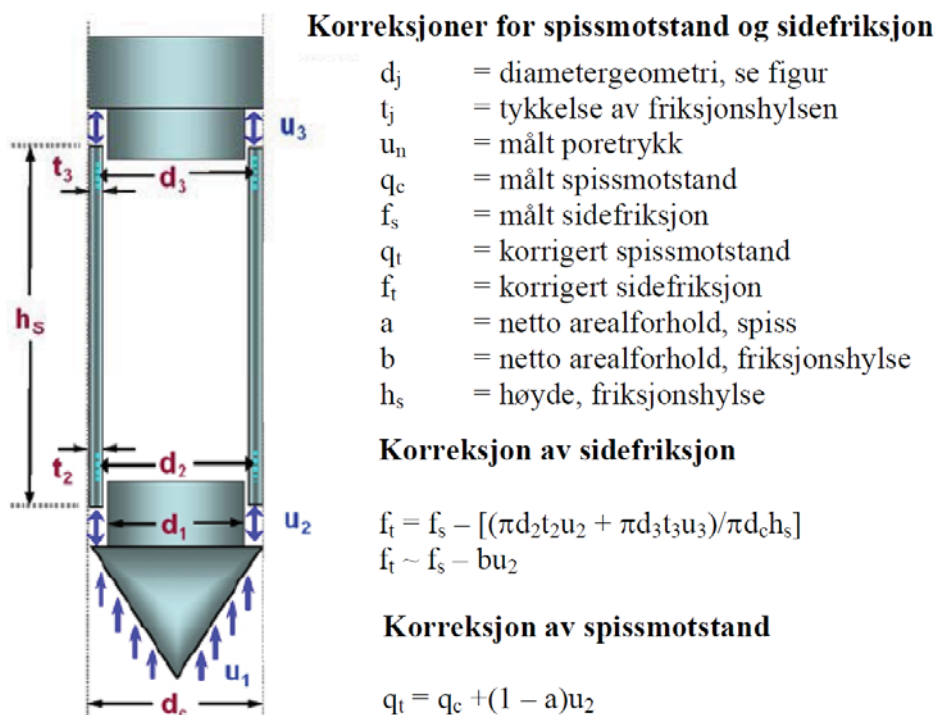
CPTU er en vesentlig mer komplisert metode enn de enklere, konvensjonelle sonderingstypene, og utførelse av metoden krever nøyaktige forberedelser før forsøk. Metoden gir på den annen side et vesentlig mer detaljert bilde av grunnforholdene, både hva angår lagdeling og jordart i lagene og massenes mekaniske egenskaper.

Den totale nedpressingskraften kan også måles i en CPTU. Denne kan benyttes til å bestemme stangfriksjonen langs borstengene, noe som kan benyttes til påvisning av lag med sprøbruddmateriale. Dette er beskrevet nærmere i kap. 3.2.3 i denne rapporten.

På grunn av trykksondens design med variable innvendige diametre $d_{j=1-3}$, vil det oppstå en ubalansert kraft mot endeflatene i sonden forårsaket av poretrykket som utvikles ved nedpressing. I prinsippet påvirkes både målt spissmotstand q_c og målt sidefriksjon f_s av denne effekten, og målingene må derfor korrigeres. Arealforholdene for sonden, a (for spissmotstand) og b (for sidefriksjon) benyttes for denne korreksjonen og må være kjent for den enkelte sonde.

Figur 2.4 viser hvordan disse korreksjonene utføres for henholdsvis målt spissmotstand og målt sidefriksjon. Sidefriksjonen er vanskelig å korrigere ettersom poretrykket bak friksjonshylsen (u_3) er ukjent. Det er derfor akseptabelt å benytte ukorrigert sidefriksjon f_s i alle relasjoner. Denne korreksjonen er størst for sondering i leire og silt der det utvikles store poretrykk rundt sonden ved nedpressing.

Utførelse av CPTU klassifiseres i fire Anvendelsesklasser (1-4), avhengig av opptredende grunnforhold og krav til nøyaktighet av målingene. Anvendelsesklasse 1 (beste klasse) benyttes primært for bløte til meget bløte homogene avsetninger og kreves alltid ved utredninger i kvikkleireområder (NVE, 7/2014).



Figur 2.4 Utstyr og korreksjonsprosedyre for målinger i CPTU (etter NGF Melding 5).

I Anvendelsesklasse 1 skal forsøksresultatene presenteres som kontinuerlige profiler mot penetrasjonsdybde:

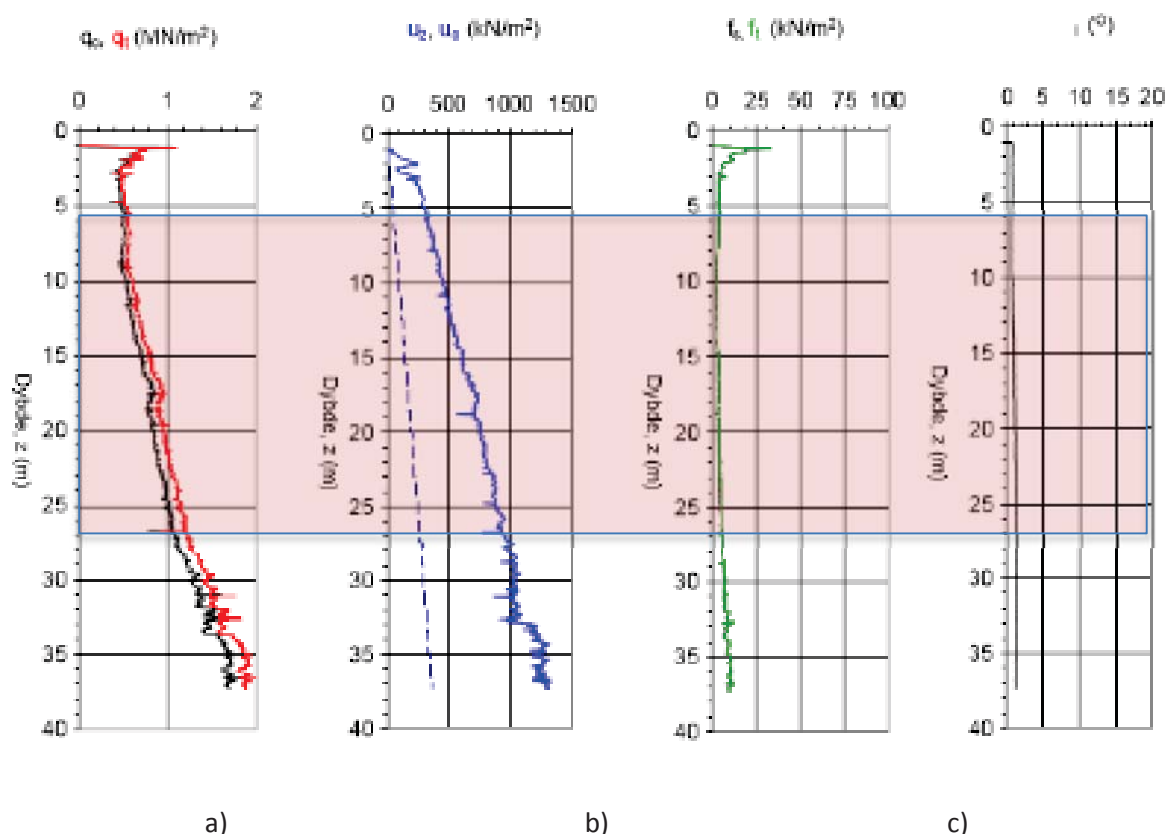
- Korrigert spissmotstand - dybde q_t (MPa) - z (m)
- Sidefriksjon - dybde f_s (kPa) - z (m)
- Totalt poretrykk, referansenivå - dybde u_2 (kPa) - z (m)
- Målt helning av stangsystem i (°) - z (m)

Et eksempel på CPTU resultater i kvikkleire er vist i Figur 2.5 (Klett forsøksfelt, Multiconsult 415559-RIG-RAP003). I figuren er kvikkleirelaget vist med rød skygge, og det er bemerkelsesverdig at hverken spissmotstand (rød strek), poretrykk (blå strek) eller sidefriksjon (grønn strek) indikerer overgangen mellom kvikk og ikke-sensitiv leire. Det er med bakgrunn i dette vanligvis ikke mulig å påvise sprøbruddmateriale fra måledata alene, de må bearbeides videre som dimensjonsløse normaliserte forhold.

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

- Sondens måleområde og oppløsning
- Kalibreringsnøyaktighet
- Temperaturpåvirkning på sonde og elektriske målere
- Nullpunktavvik for elektriske målere
- Metning av poretrykksmåler
- Helningsavvik
- Slitasje av sonde (konisk spiss og friksjonshylse)

Nullpunktavvik for spissmotstand, sidefriksjon og poretrykk skal sammen med annen unøyaktighet vurderes og dokumenteres i forhold til krav for den aktuelle Anvendelsesklasse.



Figur 2.5 CPTU-profil i kvikkleire (ref. Klett forsøksfelt, MC 415559-RIG-RAP003)

a) Korrigert spissmotstand, q_t

b) Poretrykk, u_2

c) Sidefriksjon, f_s

Rød markering: Verifisert kvikkleirelag fra laboratorieforsøk

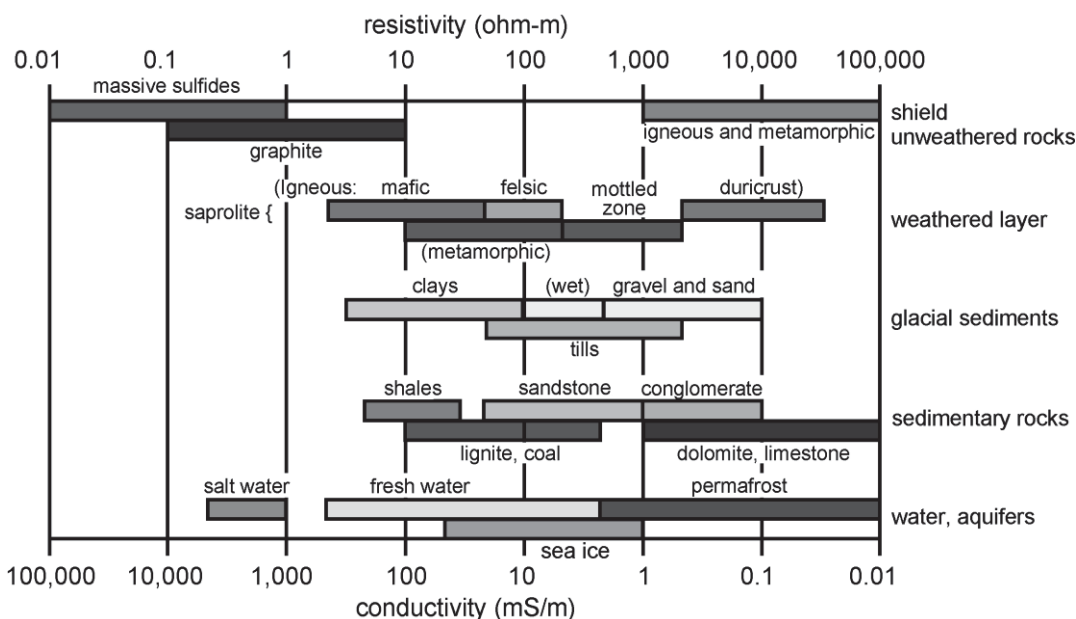
For øvrig henvises til NGF Melding 5 og NS-EN ISO 22475-1 for detaljert beskrivelse av utstyr og forsøksprosedyre, samt beskrivelse av Anvendelsesklassene.

2.3 Resistivetsmåling

Den elektriske resistiviteten av jord- og bergarter er generelt en funksjon av porøsitet, porevannets ioneinnhold, salinitet, leirinnhold og innhold av elektrisk ledende mineraler som grafitt og en del sulfider. I avsetninger med sprøbruddmateriale er som regel saltinnholdet betydelig lavere enn i intakt marin leire grunnet utvasking av salt i porevannet. Resistiviteten vil derfor vanligvis være høyere i sprøbruddmateriale enn i intakt marin leire.

For leire generelt, og utvasket leire spesielt, er det hovedsakelig saltinnholdet som bestemmer leirens resistivitet, i hvert fall ned til et saltinnhold på ca. 1 g/l (Montafia, 2013). Ved måling av løsmassenes resistivitet kan man derfor identifisere forekomster av slike utvaskede masser fra materialenes elektriske ledningsevne, se oversikt over ledningsevne/resistivitet for løsmasser og berg i Figur 2.6.

Jordens elektriske resistivitet kan måles i laboratoriet, ved punktmåling i jorden (R-CPTU), i borehjul, fra overflaten (ERT) eller fra luften (AEM). Noen aktuelle metoder er beskrevet i de følgende kapitlene.



Figur 2.6: Typisk resistivitet for forskjellige typer løsmasse og berg (Pakacky, 1987).

2.3.1 Nedhullsmålinger med resistivitetssonde (R-CPTU)

Resistivetsmåling kan være et nyttig verktøy i kartlegging av sprøbruddmateriale. Spesielt gjelder dette ved sammenligning av målt resistivitet (spesifikk elektrisk motstand) med tradisjonelle måledata fra en trykksoneering med resistivetsmåling (R-CPTU). For å utføre direkte målinger av jordens elektriske motstand må elektrodene være i kontakt med jordvolumet det skal måles i.

Sonderingsutstyret som benyttes til R-CPTU består av en vanlig CPTU sonde og en resistivetsmodul som monteres bak spissen, se Figur 2.7. Modulen er drevet av batterier, og den kan som regel lese, lagre og sende måledata akustisk gjennom stengene eller via kabel til en mottakerenhet på overflaten. Måledata kan også lagres direkte på et minnekort montert i sonden. Elektrodene er montert på en egen resistivetsmodul som er festet i bakkant av selve CPTU-sonden. Denne må være tilpasset bruk av resistivetsmodulen.

Skandinaviske produsenter av R-CPTU utstyr har valgt å utruste sine resistivetsmoduler med fire ringelektroder. De to ytre elektrodene sender elektrisk strøm gjennom jorden, mens de to indre måler potensialdifferansen. Avstanden mellom elektrodene avgjør konfigurasjonen. Både Geotech og ENVI benytter en konfigurasjon med lik innbyrdes avstand, også kjent som en Wenner- α konfigurasjon. Andre produsenter markedsfører moduler med kun to elektroder, se for eksempel utstyr fra Gouda Geo-Equipment (Nederland) i Figur 2.7b.

Påføring av strøm i jorden er ikke lik for alle sondetyperne. Sonden produsert av Geotech sender korte impulser av likestrøm inn i jorden, alle med lik intensitet 200 ganger pr. sekund. Noen sonder benytter imidlertid vekselstrøm som kan justeres i intensitet.

Resistivetsmodulen blir vanligvis kalibrert i løsninger av salt og vann. Når saltkonsentrasjon er kjent og temperaturen er målt, kan man bestemme løsningens elektriske konduktivitet (elektrisk ledningsevne), som da benyttes som referanse under målingene.



a) Geotech CPTU sonde med resistivitetsmodul



b) Montert sonde med resistivitetsmodul, Gouda

Figur 2.7: R-CPTU utstyr med fire (a) og to elektroder (b).

Tilleggstiden det tar for å utføre en R-CPTU sondering i forhold til vanlig CPTU dreier seg bare om noen få minutter. Dette vil være tiden man trenger for å montere resistivitetsmodulen på batteripakken. Det må imidlertid ved behov forbores noe dypere for å omfatte lengden av resistivitetsmodul og sonde (ca. 1,25 m), men dette er sjelden et praktisk problem. Hvis diameteren på resistivitetsmodulen er større enn for CPTU-sonden, benyttes en overgangshylse med lengde på minst 500 mm. For øvrig er sonderingsprosedyren i felt tilsvarende som for en vanlig CPTU. I de nordiske landene benyttes R-CPTU hovedsakelig til kartlegging av utvasket leire, mens metoden i resten av verden benyttes til sporing av forurensninger i grunnen.

Det er fremdeles et betydelig behov for videreutvikling av resistivitetmålinger med R-CPTU, ikke minst for å forbedre tolkningsprosedyrene i skjæringspunktet mellom mekaniske parametre og resistivitet. Resistivitetsspekteret som dekker utvaskede, kvikke leirer er forholdsvis stort, og tolkning av resultatene påvirkes også ofte av stedsspesifikke forhold som kompliserer tolkningen.

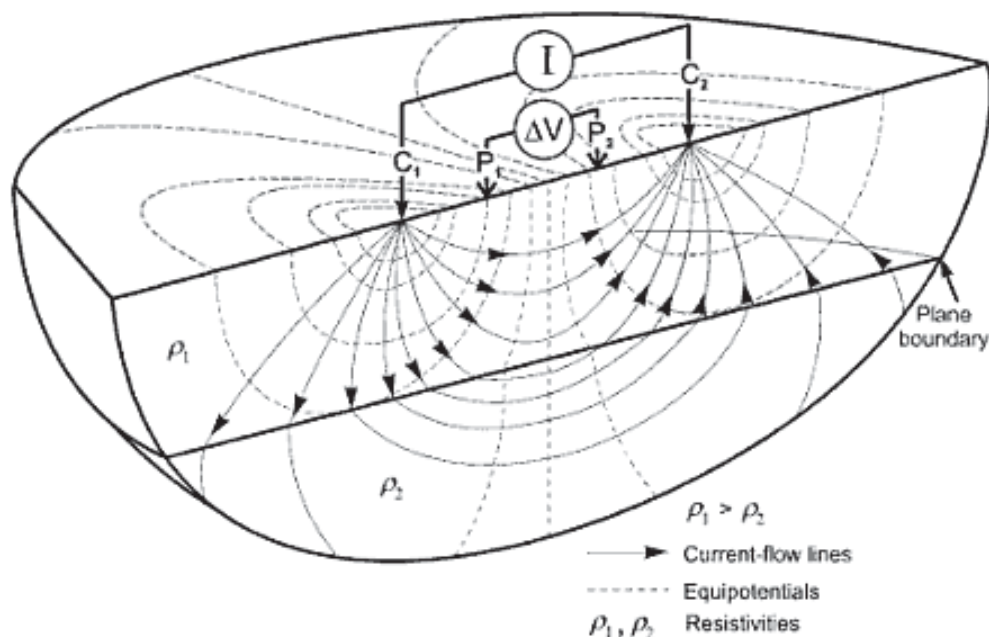
2.3.2 Elektrisk resistivitetstomografi (ERT)

Elektrisk resistivitetstomografi (ERT) er en geofysisk metode som benytter likestrøm til å måle grunnens resistivitetsfordeling. Det sendes strøm gjennom jorden ved hjelp av korte stålelektroder som installeres fra terengoverflaten og trenger 10-20 cm ned i bakken (se Figur 2.8). Ved å måle potensialforskjellene mellom installasjonspunktene beregnes resistansverdier for alle elektrodepunktene.

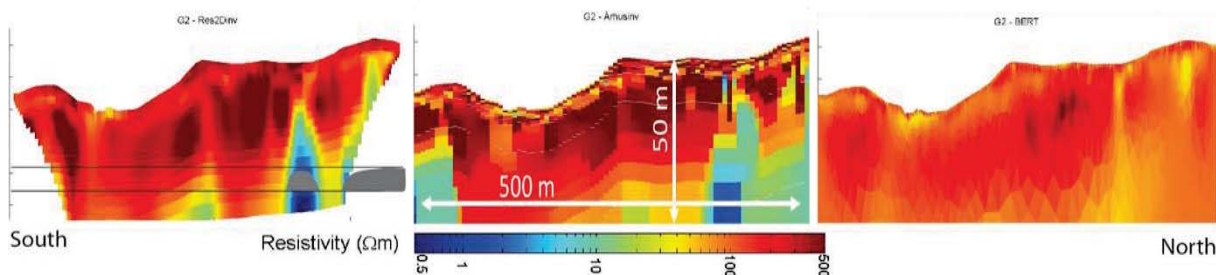
De fleste typer ERT-utstyr måler i tillegg ladbarhet av grunnen, såkalt induisert polarisasjon (IP). Denne parameteren er en kompletterende fysisk parameter som er nyttig i forbindelse med kartlegging av forurensning, mineralforekomster eller grunnvannsforhold. Ved å prosessere dataene og kjøre en inversjonsalgoritme får man til slutt en to- eller tredimensjonal resistivitetsmodell av grunnen (se Figur 2.9). Ved å integrere resistivitetsmodellen med data fra boringer og geologisk kunnskap om undersøkelsesområdet kan resistiviteten tolkes til en geologisk modell. Dette prinsippet baseres på at resistivitet i hovedsak er bestemt av type sediment eller bergart.

Gjennomføring

En ERT-kabel kan legges ut de fleste steder så lenge man kan ferdes i området til fots. Det er også mulig å krysse veier så lenge en effektiv trafikkregulering er iverksatt. Profilene må være utlagt i en eller flere rette linjer. Dagens utstyr kan måle spenninger på flere kanaler parallelt og måletiden i et profil er typisk mindre enn én time. Norges Geologiske Undersøkelse (NGU) har utviklet en veileder for resistivitetmålinger i potensielle kvikkleireområder (NGU, 2011).



Figur 2.8: Prinsippkisse av ERT målinger. Elektrisk strøm sendes igjennom jorden med 2 elektroder (C) mens spenningen blir målt på flere steder (to i illustrasjonen, P) (Knödel m.fl. 2007).



Figur 2.9: ERT modeller beregnet med tre ulike inversjonsprogrammer som bruker forskjellige inversjonsalgoritmer.

Merknad 1: Det finnes ingen entydig modell for målingene, og bruk av forskjellige regnemetoder kan illustrere usikkerheten. Lav resistivitet i dette eksemplet gjenspeiler svart leirskifer som ble påtruffet i forbindelse med et tunnelprosjekt (merket med grått i modellen til venstre).

Merknad 2: Det eksisterer ingen standardisert fargekode for presentasjon av resistivitetsmålinger. Det anbefales imidlertid å benytte den samme fargekoden i ett og samme prosjekt.

Tidligere var det flere forskjellige måter for registrering av et ERT profil (dipol-dipol, Wenner etc.). Disse hadde ulike fordeler og ulemper med hensyn på oppløsning og dybdekapasitet. Med dagens flerkanalsutstyr er *Gradient array* den mest aktuelle metoden. Enkelte fordeler som kan oppnås ved *Dipol-dipol* utlegg forsvarer vanligvis ikke den vesentlig lengre måletiden med bruk av denne konfigurasjonen.

Et generelt anslag for undersøkelsesdybden er 10-20 % av profillengden, avhengig av jordens resistivitetsfordeling. Oppløsning som oppnås i resistivetsmodellen er bestemt av elektrodeavstanden. Nær overflaten er oppløsningen i dybde og langs profilet omtrent halve elektrodeavstanden, mens den blir grovere med dybden på grunn av det økende jordvolumet den elektriske strømmen påvirkes av. God planlegging av måleprofilene er derfor viktig, men det må vanligvis velges et kompromiss mellom undersøkelsesdybde og måleoppløsning. Det er imidlertid mulig å måle et profil med flere ulike elektrodeavstander for å oppnå en kombinasjon av høy

oppløsning og nedtrengningsdybde. Høy måleoppløsning vil være spesielt viktig for å skille små resistivitetsvariasjoner mellom salt og utvasket leire.

Geotekniske anvendelser

ERT-målinger på overflaten er aktuelt å benytte ved følgende geotekniske problemstillinger:

- **Kartlegging:** Bestemmelse av dybde til berg og tykkelse av løsmasselag. Ved å integrere geoteknisk informasjon fra for eksempel CPTU, totalsondering og dreietrykksondering med ERT-data, kan dybden til berg kartlegges presist og kontinuerlig. I tillegg fremkommer informasjon om løsmassenes karakter, for eksempel innslag av kvikkleirelommer eller grovere lag.
- **Sprøbruddmateriale:** Saltinnholdet og dermed ledningsevnen til sprøbruddmateriale (kvikk og sensitiv leire) er vanligvis lavere enn for ikke-sensitiv leire. Det kan derfor være mulig å skille salt og utvasket leire med ERT, forutsatt at oppløsningen er god nok.
- **Skredfare/bergkvalitet:** Områder der det kan utløses steinsprang er gjerne karakterisert ved oppsprukne soner i berget. Disse sonene har ofte stort innslag av leire og kan være mettet med vann, noe som gjør det mulig å kartlegge sonene med ERT.
- **Arkeologiske gjenstander:** Gamle strukturer av tømmer, stein eller murstein fremstår som små og avgrensede resistivitetsanomalier dersom de er omgitt av ledende sedimenter som salt leire.
- **Kartlegging av miljørisiko:** Med ERT kan industrielle fyllinger og lignende kartlegges, og med indusert polarisasjon (IP) kan ladbare elementer som for eksempel kreosot, alkoholer og metallioner avdekkes.

Begrensninger

ERT er en robust metode som gir gode resultater i de fleste tilfeller. Det finnes imidlertid noen begrensninger og utfordrende forhold det er viktig å være klar over:

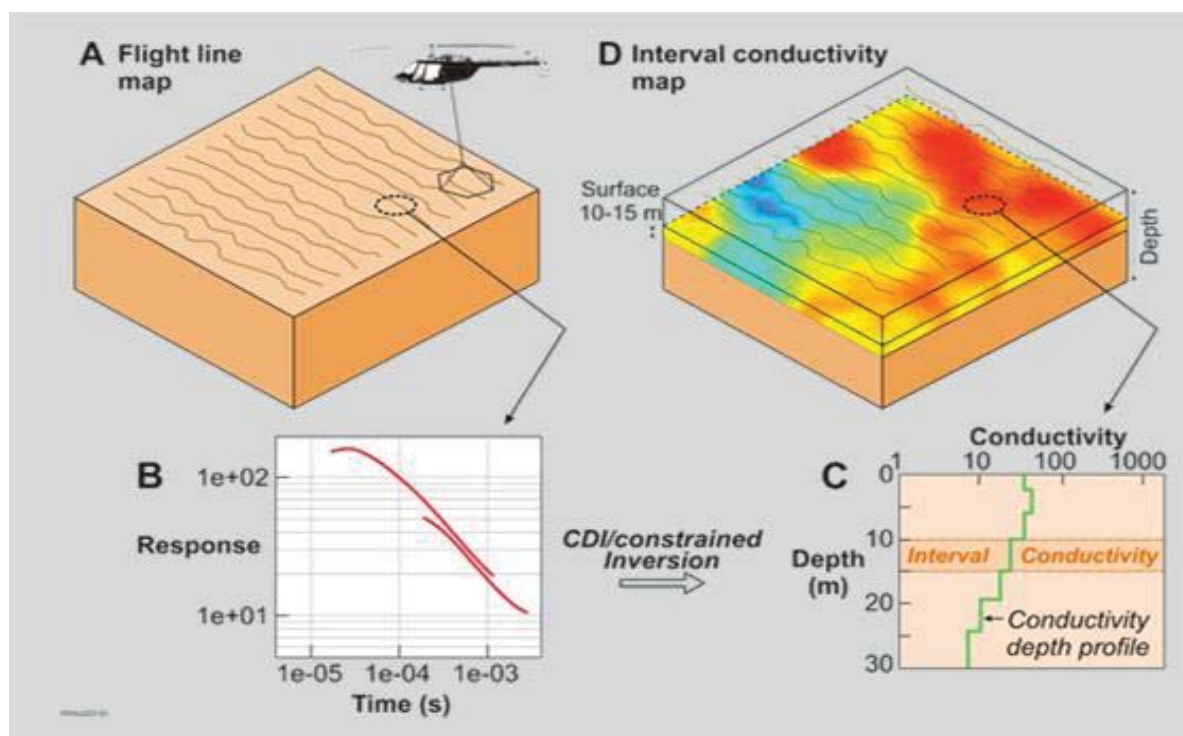
- **Eksisterende infrastruktur:** Målingene er følsomme for alle objekter og medier innenfor strømmens rekkevidde. Det vil si at kabler, rør og konstruksjoner påvirker resistivetsmodellen. Dette betyr ikke nødvendigvis at målingene ikke kan benyttes med godt resultat, men det kan påvirke mulighetene til å skille geologiske signaler fra responsen fra installasjonene i undergrunnen.
- **Dybdeoppløsning versus resistivetsoppløsning:** Resistivetsmodeller beregnes på en måte som prøver å forklare målingene med kontinuerlig økende eller fallende resistivitet i dybden og langs profilet. Det betyr at overgangen fra marin leire med lav resistivitet til berg med svært høy resistivitet blir misvisende, spesielt hvis tykkelsen av leirlaget er liten. Leirens resistivitet vil da virke høyere enn den egentlig er, noe som kan føre til feiltolkning av materialene som utvasket leire.

2.3.3 Luftbårne målinger (AEM)

AEM (Airborne Electromagnetic Measurements) benyttes for å kartlegge grunnens elektriske resistivitet, den inverse egenskap til elektrisk ledningsevne, innenfor et større område. Metoden er tradisjonelt mye brukt innen malmleting, men moderne luftbårne systemer har så høy oppløsning at metoden kan brukes også i hydrologiske og geotekniske prosjekter. De nyeste resultatene tyder på at det også er mulig å skille saltholdig leire fra utvasket leire, slik det nå gjøres fra R-CPTU og ERT målinger.

Det finnes flere forskjellige AEM systemer, noen tilpasset ønsket om stor penetrasjonsdybde for malmleting og noen tilpasset behovet innen hydrogeologi og geoteknikk, som ofte krever høy oppløsning (NGI-Rapport 20130058-02-R_NO). Alle systemer har det til felles at et magnetfelt

induserer strøm i bakken som diffunderer nedover og utover. Endringsraten til det elektromagnetiske feltet disse strømmene produserer registreres med en mindre sekundærspole. Ved hjelp av inversjon av de målte datapunkter kan grunnens resistivitetsfordeling modelleres (se Figur 2.10).



Figur 2.10: Prinsippskisse AEM: Målingene samles langs flylinjer og inverteres til en resistivitetsmodell (Kilde crcleme.org.au).

Mulig undersøkelsesdybde varierer fra 50 m til omlag 500 m, avhengig av geologi og løsmassetype, AEM system og flyforhold (påvirkning fra støy og infrastruktur). Den vertikale oppløsningen kan være så god som 3-6 m nærmest bakken, men blir gradvis dårligere med dybden.

Oppløsningen sideveis er bestemt av størrelsen på det jordvolumet der strøm induseres. Typisk estimeres at > 90 % av signalet fra bakken kommer fra en omkrets lik 3-4 ganger antennes flyhøyde. Det vil si at én måling definerer en halvkule med ca. 100 - 150 meter diameter. Oppløsningen påvirkes i tillegg av prosesseringsmetoden. Erfaring viser at strukturer som faller brattere enn 30° ikke blir korrekt avbildet, men fremstår slakere enn de er i virkeligheten. Det finnes imidlertid prosesseringsverktøy som er bedre tilpasset vertikale strukturer.

Gjennomføring

AEM data kan innsamles både over vann og land, og kan eksempelvis differensiere mellom dyrket mark, skog og berg i dagen. Ferskvann utgjør ingen hindring for å vurdere grunnforholdene, mens måling over saltvann begrenses til et mulig vanddyb på noe over 10 m. Bratt topografi er forholdsvis utfordrende, men problemene kan reduseres med lavere flyhastighet, og med å fly alle linjer «oppoverbakke». Som landingsplass brukes et egnet område innenfor eller nær målområdet, for eksempel en idrettsbane, parkeringsplass eller andre arealer som er flate, åpne og ikke nær kraftlinjer, trær eller lignende obstruksjoner, se Figur 2.11.

Opptil 300 km flylinjer kan samles inn daglig. Dette tilsvarer et område på ca. 30 km² med linjeavstand på 100 m. AEM utstyrets sensor (antenne) har typisk en høyde på 30 m over bakken. Siden metoden vekker mye oppmerksomhet er det viktig med god nabovarsling via fylker / kommuner og lokale media. Fylkesmannen må kontaktes for å sikre at ingen verneområdet blir overfløyet. For øvrig ordner

helikopterfirmaet med tillatelse til å fly lavt med hengende last, og holder også god kontakt med lokale flygeledere og andre luftromsansvarlige.



Figur 2.11: AEM utstyr (SkyTEM304), take-off ved campus for Høyskolen i Vestfold.

Geotekniske anvendelser

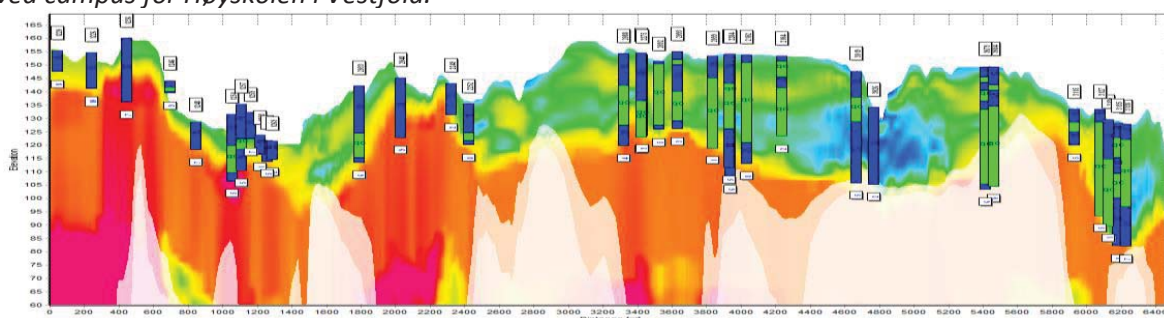
De geotekniske anvendelsene er først og fremst:

- Undersøke forekomster av utvasket marin leire og silt
- Kartlegge mulig skredfare ved å identifisere mulige svakhetssoner og glideplan i grunnen
- Modellering av berggrunnen ved å integrere AEM med geotekniske data

Begrensninger

Urbane områder har gjerne stort omfang av installasjoner i undergrunnen, infrastruktur på overflaten, bygninger, gjerder og kraftlinjer som alle resulterer i induktiv kobling og dermed støy. En del av disse områdene kan heller ikke dekkes med AEM siden det ikke er tillatt å fly over mennesker eller dyr med hengende last.

En del data som likevel samles inn over eller nært infrastruktur må maskeres i prosesseringen siden de er for mye påvirket av støy.



Figur 2.12: 6,5 km langt resistivetsprofil med bergkontrollboringer (blå/grønne striper) som illustrerer hvordan AEM kan kartlegge bergtopografien (gul-røde farger) langs en vegkorridor (se også vedlegg C1).

AEM kan derfor ikke anbefales for mindre prosjekter, da det er relativt dyrt å mobilisere et AEM system for noen få kilometer profil. For prosjekter som er store nok er meterprisen for AEM imidlertid svært konkurransedyktig i forhold til ERT og andre bakkegeofysiske metoder.

2.4 Vingeboing

2.4.1 Generelt

Vingeboing brukes til å bestemme udrenert skjærfasthet i leire og leirig silt. Både intakt (c_{uv}) og omrørt udrenert skjærfasthet (c_{rv}) kan måles. Som eneste in situ måleinstrument kan vingeboret dermed benyttes til å bestemme sensitiviteten ($S_t = c_{uv}/c_{rv}$) direkte. Det er også mulig å avlede forkonsolideringsforholdet (OCR) og aspekter knyttet til omrøringsenergi fra vingebormålinger. Det må på forhånd kontrolleres ved sondering at jordarten er egnet for metoden. Ved vurdering av bæreevne og stabilitet bør ikke vingeboret brukes som eneste metode til bestemmelse av skjærfastheten.

2.4.2 Beskrivelse av utstyr og forsøksprosedyrer

Et komplett vingeborutstyr består av en nedredel med vingesko og ving, innerstenger, ytterrør og et registreringsinstrument, se Figur 2.13. 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. De fleste tolkningsmodeller tar utgangspunkt i at bruddgeometrien rundt vingeboret kan tilnærmes en sylindrisk flate.

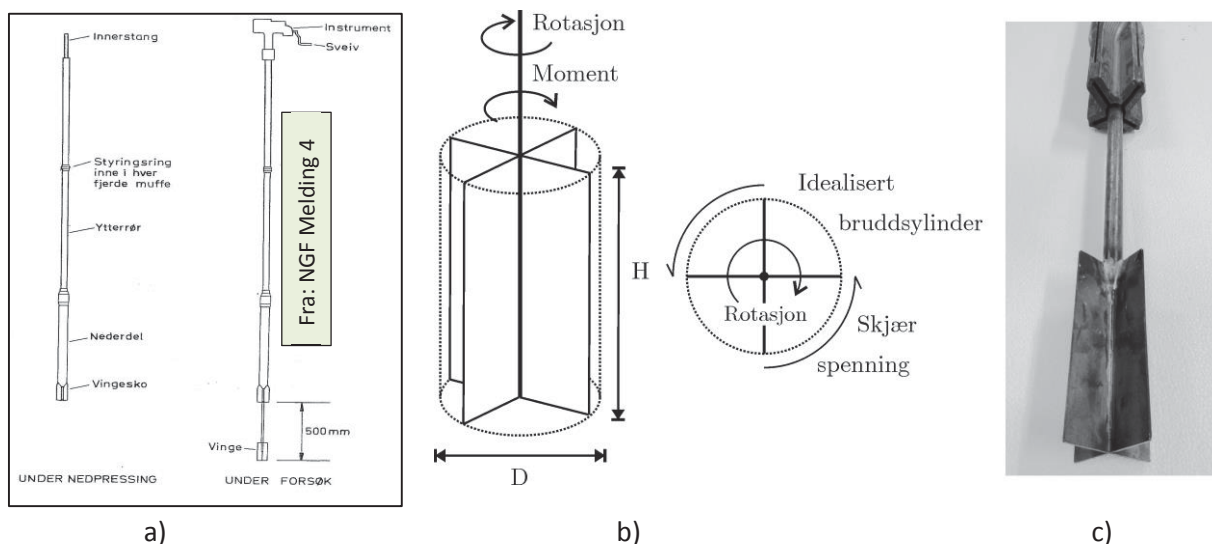
Standardstørrelse for aktuelle vinger for norske forhold er:

Liten vinge (DxH): 55 x 110 mm

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

Stor vinge (DxH): 65 x 130 mm

Anbefalt for arbeidsområdet $c_{UV} < 50 \text{ kN/m}^2$ og for måling av omrørt skjærfasthet c_{rv} i sensitiv leire.



Figur 2.13 Illustrasjon av vingeborutstyr.

- Oversikt over vingeborutstyr.
- Prinsipiell påføring av torsjonsmoment på ving.
- Detalj av vinge og vingesko.

Vingeborforsøk gjennomføres i dybdeintervaller, ofte hver 0,5 eller 1,0 m. Før måling presses vingen ned i uforstyrret leire til det nivå målingen ønskes utført. Her påføres vingen en gradvis økende rotasjon til materialet rundt vingen går til brudd, samtidig som maksimalt torsjonsmoment måles. Det maksimale torsjonsmoment benyttes for å bestemme udrenert vingeborskjærfasthet c_{UV} . Vingens rotasjonshastighet nær og ved brudd skal være ca. $0,2^\circ/\text{sek}$. Forsøket bør føres til brudd i løpet av 1-3 minutter.

Den omrørte skjærfastheten (c_{rv}) bestemmes etter minst 25 hele, hurtige omdreininger av vingen. Det foretas to avlesninger med rotasjonshastigheter $0,2^\circ/\text{sek}$, og med instrumentet dreid 90° mellom hver avlesning. Den laveste verdien benyttes. Ved bruk av elektrisk vingebor kan man registrere hele forløpet for torsjon og rotasjon slik at arbeidskurven for forsøket defineres. Dette kan gi verdifull informasjon om materialets oppførsel, ut over måling av torsjonsmomentene.

Vingeboret er følsomt for heterogeniteter i jorda. Hvis deler av vingen (side, topp/bunn) er påvirket av et sterkere/svakere lag eller stein- og gruskorn, vil dette i stor grad påvirke måleresultatene. Det anbefales derfor å kjøre flere serier med vingeborforsøk for å redusere denne usikkerheten. Videre er det viktig at nivået på selve vingen holdes konstant under rotasjonen. Hvis vingen synker eller trekkes

noe opp under målingen vil det registreres for høyt moment, ettersom deler av vingekorset da vil rotere i uforstyrret eller delvis omrørt materiale.

Vingeborutstyr av forskjellige typer og fabrikat vil ikke alltid gi de samme resultatene. I Norge har det modifiserte SGI-vingeboret vært mest benyttet, og praktiske erfaringer og resultater er derfor i stor grad knyttet til dette utstyret.

3 Anbefalt bruk av aktuelle metoder – vurdering av muligheter og begrensninger

3.1 Konvensjonelle sonderingsmetoder

Dreie-, dreietrykk- og totalsondering benytter, direkte eller indirekte, den målte totale penetrasjonskraften som indikator på sprøbruddmateriale. Imidlertid er den omrørte skjærfastheten c_r kun avhengig av stangfriksjonen. Ved start av forsøket og i overflatenære lag er stangfriksjonen liten, og nedpressingskraften utgjøres hovedsakelig av spisskraften. Dette endrer seg gradvis med økende dybde, og på store dybder 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 med økende penetrasjonsdybde 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 drenere bort fra omrøringssonen under konsolideringen, noe som medfører en økende omrørt fasthet med tiden. Ved studier av total nedpressingskraft mot dybde antas det ofte at de nevnte effekter er neglisjerbare, samt at variasjon i spissmotstand på grunn av leirens tekstur er liten. Dette er ikke alltid tilfelle, spesielt ikke i overgangssoner mellom tørrskorpelag og andre faste lag, samt ved underliggende bløte eller sensitive leirlag. Overgangen til siltige eller varvige leirer kan også gi feilaktig tolkning av grunnforholdene.

Stangfriksjonen er ofte den dominerende komponenten i sensitive materialer, bortsett fra ved små penetrasjonsdybder. Det kan derfor forventes at det eksisterer en god korrelasjon mellom penetrasjonskraften målt på toppen av stengene og den omrørte skjærfastheten for leiren. Denne korrelasjonen påvirkes imidlertid av stangdiameteren på boreutstyret, 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.

Påvisning av sprøbruddmateriale med konvensjonelle sonderingsmetoder kan videre være påvirket av en rekke vanlig forekommende lagbetingelser og grunnforhold som kan forklare avvikene, blant annet:

- Laminert leire med sand- og siltlag
- Sprøbruddmateriale under henholdsvis tynt og mektig topplag
- Sprøbruddmateriale under faste topplag med innslag av grovt materiale
- Løs, vannmettet silt/sand
- Leire med artesisk poretrykk

I tillegg påvirkes resultatene også av metodiske effekter:

- Effekt av spyling på underliggende lag i en totalsondering

- Effekt av forkonsolidering og naturlig skjærfasthet-/stivhetsvariasjon i dybden
- Effekter ved sjøboring på grunn av manglende hiv-kompensering

Dette danner bakteppet for tolkning av resultater fra enkeltmetoder som beskrevet i det følgende.

3.1.1 Dreiesondering

Dreiesondering representerer det enkleste utstyret og den mest oversiktlige feltprosedyren. Metodens fortrinn er at den tydelig tilkjenner bløte lag ved at stangsystemet synker for sin egen vekt i bløte eller sensitive partier. Figur 2.1 i kap.2.1.1 viser eksempler på tolkning av kvikkleirelag fra ulike dreiesonderingsprofiler. Ved gjennomføring av dreiesondering vil derfor den sikreste indikasjonen på kvikkleirelag være at boret synker jevnt for mindre belastning enn 1,0 kN (100 kg). 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. Oppførselen er også avhengig av dybden til det bløte laget.

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 borehullet.

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. Hvor dette inntreffer vil være avhengig av grunnforholdene i de øvre lagene, tykkelsen av det aktuelle sensitive laget og hvorvidt det er forboret gjennom faste topplag eller tørrskorpe. Ved å forbore gjennom topplaget vil den relative fastheten av underliggende grunn, og bløte eller sensitive lag vil kunne fremstå tydeligere.

For detaljer og tolkning henvises til NGF melding 3. En oppsummering av metodens detekteringsprinsipper med muligheter og begrensninger er gitt i tabell 3.1.

Dreiesondering benyttes i liten grad i dagens praksis, men fortjener likevel behandling grunnet det store innslaget av dreieboringer i gamle grunnundersøkelser fra 1950-tallet og utover til 1980-tallet.

Tabell 3.1 Oppsummering – detektering av sprøbruddmateriale fra dreiesondering.

Detekteringsprinsipp	Positive forhold	Negative forhold
Stangsystemet synker ved sin egenvekt i bløte, sensitive lag. Gir sprang i sonderingskurve (synk uten omdreining) Helning på sonderingskurve kan unntaksvis benyttes	Enkel og billig metode Kan benyttes på vanskelige tilgjengelige steder, for eksempel raviner og sterkt hellende terreng Enkelt detekteringsprinsipp	Begrenset penetrasjonsevne i faste materialer Penetrasjonen påvirkes av stangfriksjon ved økende penetrasjonsdybder (> 10 m) Kan ikke benyttes til sikker påvisning av bergoverflaten

3.1.2 Dreietrykksondering

Dreietrykksondering gjennomføres med tyngre og større utstyr enn dreiesondering, og gjennomføres også på kortere tid. Stigningen på den vridde spissen sammen med rotasjonshastigheten er tilpasset penetrasjonshastigheten, og borstengene skrur derved nedover i grunnen samtidig som boret penetreres med konstant penetrasjonshastighet. Omrøring av jorden og den relative ekspansjonen av

borehullet er derved redusert. På den annen side medfører dette at kun en del av friksjonen langs stengene registreres som en vertikal kraft.

For detaljer og tolkningsprinsipper henvises til NGF melding 4, mens en oppsummering av typiske sonderingsresultater er vist i Figur 3.1. Figuren viser prinsipiell tolkning av sprøbruddmaterialer, der registreringskurven ved sondering i leire kan benyttes til å bestemme sensitiviteten av leirmassene. 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, gjerne lineært i homogene, ikke-sensitive leirlag.

Påvisning av sprøbruddmateriale fra dreietrykksondering er derfor i hovedsak vurdert ut ifra formen på sonderingsprofilen, i mindre grad på størrelsen av registrert nedpressingskraft. Denne kan imidlertid være nyttig å vurdere, spesielt hvis kombinasjonen lav kraft og konstant eller avtagende sonderingsmotstand inntreffer. Vurdering av nedpressingskraftens størrelse betinger imidlertid at lastcellen på boreriggen er nøyaktig kalibrert, slik at registrert nedpressingskraft gir et riktig bilde av grunnforholdene.

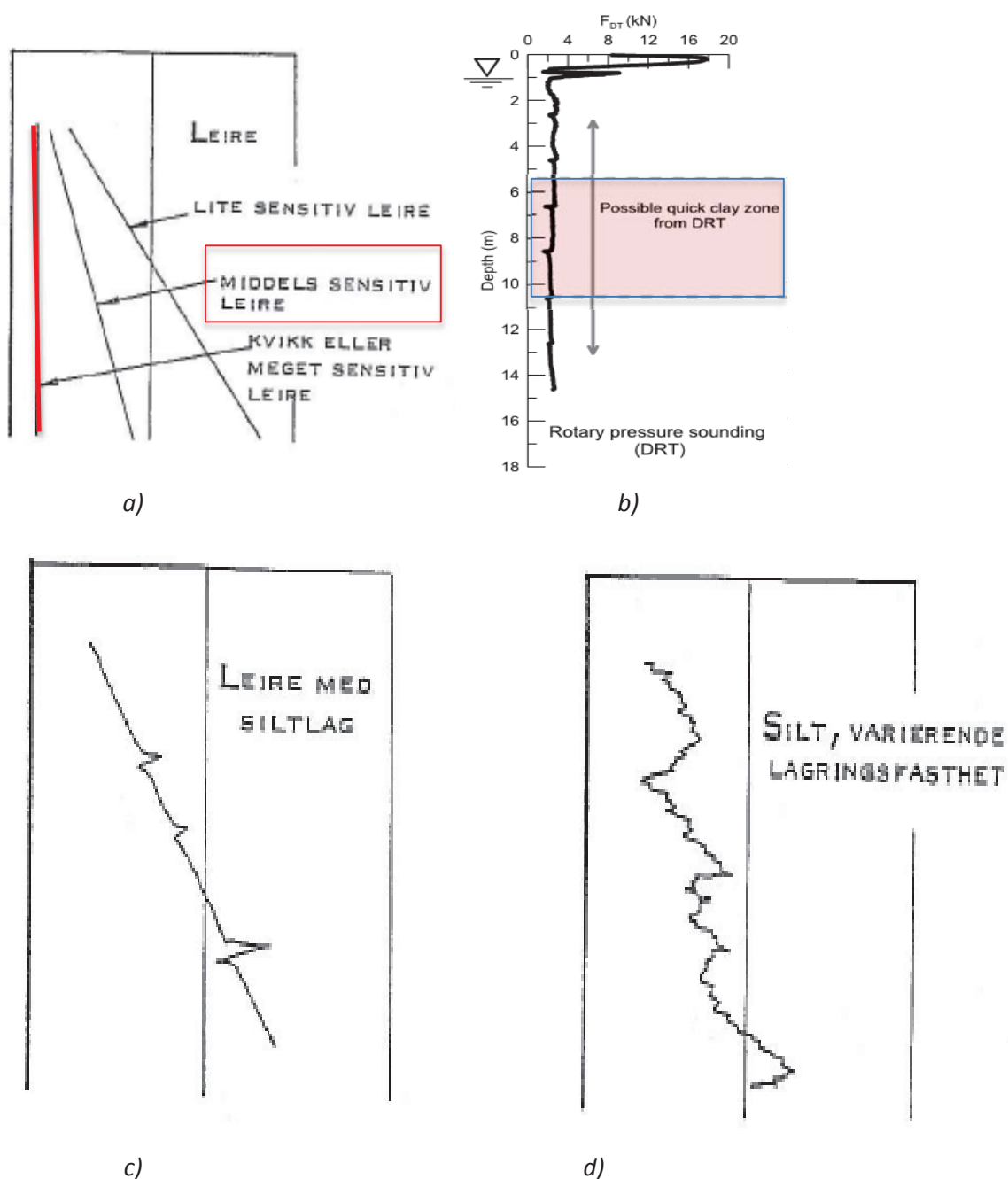
I de fleste typer løsmasser vil økende friksjon langs borstengene gi en økende nedpressingskraft med dybden. I en meget sensitiv eller kvikk leire blir økning i friksjonen langs stengene tilnærmet lik 0., dersom forholdene for øvrig ikke varierer.

Sensivitetsens innflytelse forklares ved at omrørte, sensitive masser gir mindre friksjonsbidrag mot stengene. I kvikkleire og meget sensitive leirer ($S_t > 20-30$) vil friksjonsbidraget bli marginalt på grunn av de omrørte massenes flytende karakter. Dermed får man ingen økning i nedpressingskraft med dybden, noe som vil gi tilnærmet vertikal strek, dersom forholdene for øvrig ikke endrer seg.

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

I enkelttilfeller er det påvist at selv profiler med konstant eller avtagende sonderingsmotstand ikke nødvendigvis skyldes innhold av sensitiv eller kvikk leire i grunnen. Flere forhold kan forårsake feiltolkning av sonderingsprofiler, 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.
- 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, noe 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.



Figur 3.1 Karakteristiske sonderingsprofiler for dreietrykks sounding.

- a) Prinsipp for detektering av kvikkeire/sensitiv leire
- b) Eksempel på dreietrykks sonderingsprofil i kvikkeire, Klett nord
- c) Typisk sonderingsresultat, ikke-sensitiv leire
- d) Typisk sonderingsresultat, silt

En oppsummering av metodens detekteringsprinsipper, muligheter og begrensninger er gitt i tabell 3.2.

Tabell 3.2 Oppsummering – detektering av sprøbruddmateriale fra dreietrykksondering.

Detekteringsprinsipp	Positive forhold	Negative forhold
<p>Tilnærmet vertikal eller negativ helning på sonderingskurve</p> <p>Penetrasjonskraftens størrelse kan være en supplerende informasjon. Dette krever riktig kalibrert lastcelle på borrhigen</p>	<p>Enkel tolkning fra sonderingskurve</p> <p>Maskinell metode, store kapasitet ved normalt gode sonderingsforhold</p> <p>Følsom for bløte og sensitive lag i grunnen</p>	<p>Detekteringsprinsippet påvirkes av en rekke forhold, der i blant innslag av tykke topplag med grovt materiale (> 5 m)</p> <p>Kan ikke bore gjennom faste, steinrike lag og kan ikke benyttes til sikker påvisning av berg</p> <p>Påvirkes i noen grad av stangfriksjon ved økende penetrasjonsdybder (> 10 m)</p>

3.1.3 Totalsondering

For detaljer vedrørende utstyr, forsøksprosedyrer og tolkning henvises til NGF melding 9.

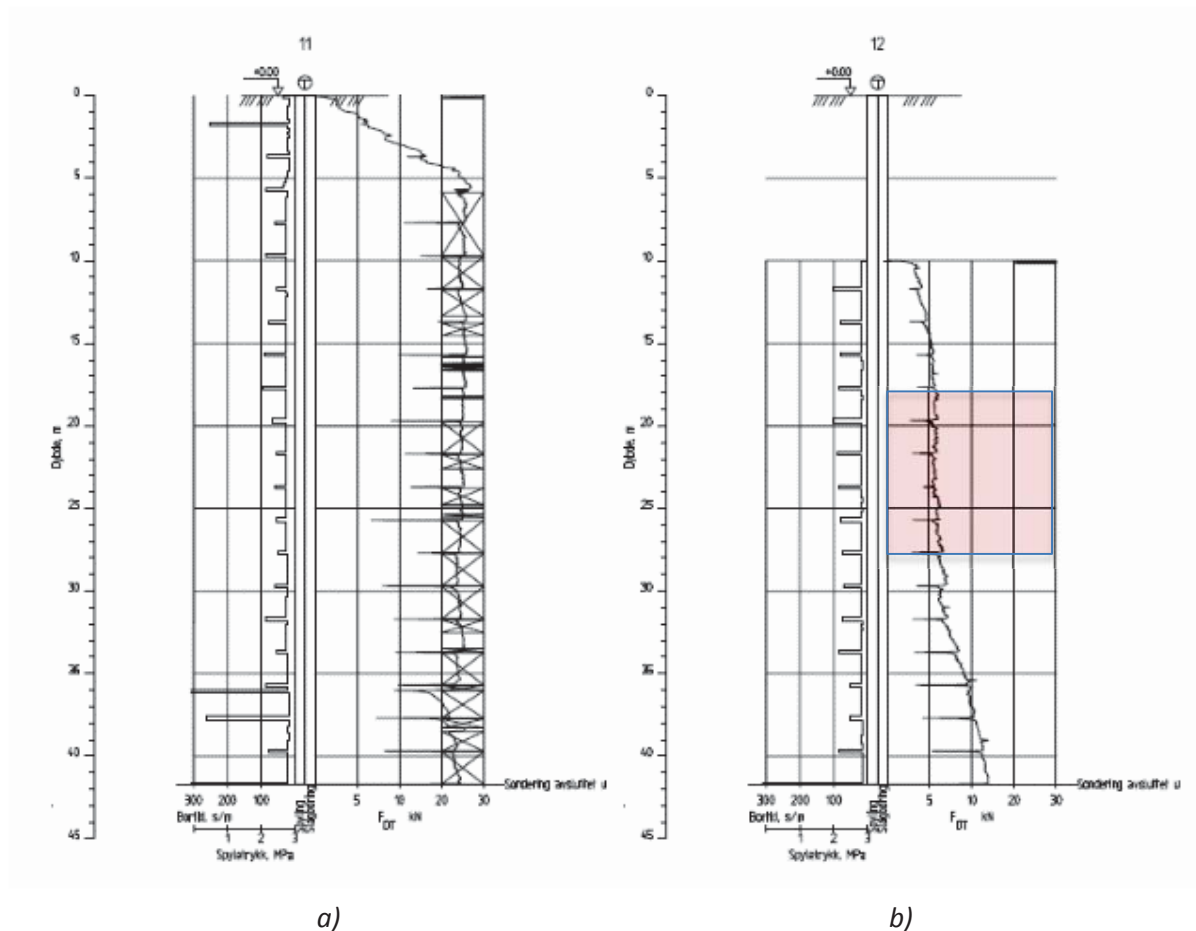
Totalsondering gjennomføres med samme penetrasjons- og rotasjonsrate som dreietrykksondering, men utstyret er tyngre og gjennomføres med større krone og stenger ($\phi 57$ mm/ $\phi 45$ mm). Oppløsningen i boringen vurderes å være tilsvarende som for dreietrykksondering, men reduksjon av stangfriksjon antas å være større på grunn av den noe større borkronen. Dette er positivt for penetrasjonskapasiteten, men vil kunne gi en mindre tydelig effekt av friksjonsreduksjonen i sprøbruddmaterialer. Den roterende kronen medfører også en viss omrøring av massene, men det er usikkert hvor stor denne effekten er. Dreietrykksondering blir derfor av mange fremholdt som en mer følsom metode for påvisning av sprøbruddmateriale, da den i større grad fremhever friksjons- og skjærbidraget mot spiss og stenger.

Erfaringer som er etablert for dreietrykksondering over mer enn 20 år har gitt grunnlag for å tolke grunnforholdene på grunnlag av registrert sonderingsmotstand for dreietrykkmodus i totalsondering. Totalsonderingsutstyret påvirker i mindre grad selve formen på sonderingsprofilen, mens matekraftutslaget er oftest lik eller større enn matekraftutslaget til en dreietrykksondering. Forskjellen er også noe avhengig av hvilke masser det sonderes i. Det henvises derfor til kap.3.1.2 hva angår den prinsipielle påvisningen av sprøbruddmateriale.

Hvis det benyttes spyling vil dette kunne redusere stangfriksjonen betydelig over det nivå der en sluttet å spyle. Spylingen foregår med relativt høyt trykk, og kan påvirke egenskapene også i massene under det nivået der en sluttet å spyle. Påvirkningen kan medføre redusert fasthet i laget under borkronen, noe som medfører lavere penetrasjonsmotstand og 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.

Det er ikke gjort systematiske studier med hensyn på maksimal påvirkningsdybde under det nivået spylingen avsluttes. Dette er avhengig av rekke forhold, både knyttet til grunnforholdene, størrelsen av spyletrykket, spylemedium (luft/vann) og dybde over overflaten. Trykkendringer i leiren vil vanligvis spre seg minst 5-7 ganger diameteren av trykk-kilden, med andre ord ca. 25-35 cm i intakt leire

Generelt vil bruk av luft medføre større innflytelse på underliggende bløte lag enn spyling med vann. Et annet moment er at spyling vil medføre bedre smøring av stangsystemet, noe som også vil påvirke friksjonen langs stangsystemet når boret kommer ned i den underliggende leiren. Denne effekten vil være mindre, og friksjonen således større ved boring i leire uten forutgående spyling.



Figur 3.2 Eksempel på innvirkning av forboring gjennom topplag ved detektering av kvikkleire.

(a) Uten forboring gjennom 10 m topplag

(b) Med forboring gjennom 10 m topplag

Rød markering: Antatt kvikkleirelag fra totalsondering

Eksempel fra Flatåsen kvikkleiresone, Trondheim, ref. Trondheim kommune rapport R-1622).

Når det er avvik fra normal sonderingsprosedyre (standard rotasjons- og nedpressingshastighet) er imidlertid sonderingskurven ikke pålitelig for å vurdere relativ fasthet i løsmassene og sensitivitet. I så fall kan man alternativt forbore ned til den dybden sonderingen var kjørt etter normal prosedyre og så kjøre en ny totalsondering derfra. På denne måten er sonderingsmotstanden fri for stangfriksjon fra overliggende topplag, og sonderingskurven kan brukes for å vurdere relativ fasthet og sensitivitet så lenge standard rotasjons- og nedpressingshastighet er oppnådd.

Ved boring gjennom faste, mektige topplag kan friksjonen i dette laget påvirke sonderingsprofilen nedover i dybden. Figur 3.2 viser et eksempel på sonderingsprofiler med og uten forboring gjennom det faste topplaget. Resultatene viser at kvikkleirelaget fremkommer tydelig i profilet med forboring gjennom topplaget (Figur 3.2 b), mens det er skjult ved sondering fra overflaten og gjennom topplaget (Figur 3.2a). Ved mistanke om sprøbruddmateriale i grunnen under mektige topplag bør det derfor forbores, eventuelt i et supplerende profil, for å oppnå et riktig bilde av grunnforholdene.

Når vanlig penetrasjon skal kombineres med forboring gjennom topplag for detektering av sprøbruddmateriale foreslås følgende prosedyre:

1. Flytting med minst 2 m fra opprinnelig profil som er brukt for å bestemme forboringsdybde
2. Forboring ned til ønsket dybde og kjapp identifisering av massene som kommer opp fra hullet (føres i loggboka)
3. Totalsonderingen deles opp i to deler og registreres i to rådatafiler, for eksempel A og B: A skal inneholde sonderingsresultater ned til forboringsdybde og B derifra og ned til avslutningsdybde. På denne måten kan man se hvor stor innflytelsen fra overliggende masser er.
4. Prosedyren som er brukt blir ført i loggboka slik at det enkelt kan skilles mellom sondering A og B

For å kunne vurdere dette forholdet er det med andre ord nødvendig å bore to profiler, ett med og ett uten forboring. Dette krever mer ressurser og kan ikke utføres i alle tilfeller. Det er derfor viktig at man vurderer mulig forekomst av sprøbruddmateriale i forkant av grunnundersøkelsen, basert på tidligere informasjon om området og en helhetsvurdering av tilgjengelige boreresultater. En oppsummering av metodens detekteringsprinsipper, muligheter og begrensninger er gitt i tabell 3.3.

Tabell 3.3 Oppsummering – detektering av sprøbruddmateriale fra totalsondering.

Detekteringsprinsipp	Positive forhold	Negative forhold
Tilnærmet vertikal eller negativ helning på sonderingskurve	Enkel tolkning fra sonderingskurve	Påvirkes i noen grad av stangfriksjon ved økende penetrasjonsdybder (> 10 m)
Penetrasjonskraftens størrelse kan være supplerende informasjon. Dette krever riktig kalibrert lastcelle på boreriggen	Maskinell metode, stor kapasitet ved normalt gode sonderingsforhold	Spyling påvirker sonderingsforholdene i underliggende lag, kan gi falskt inntrykk av bløte, sensitive lag under spyleneivå
Detekteringsprinsippet påvirkes av en rekke forhold	Kan bore gjennom faste, steinrike lag og kan også benyttes til sikker påvisning av berg	Noe mindre følsom for friksjons- og skjærbidrag mot spissen enn dreietrykksondering

3.2 Trykksondering med poretrykkmåling

I utgangspunktet har CPTU et stort potensiale for detektering 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 i noen grad kan fange opp eventuelle kollapsmekanismer i materialet som penetreres av sonden.

3.2.1 Detektering av kvikk eller sensitiv leire fra CPTU

Detektering av kvikk eller sensitiv leire fra CPTU kan vurderes fra følgende resultater:

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

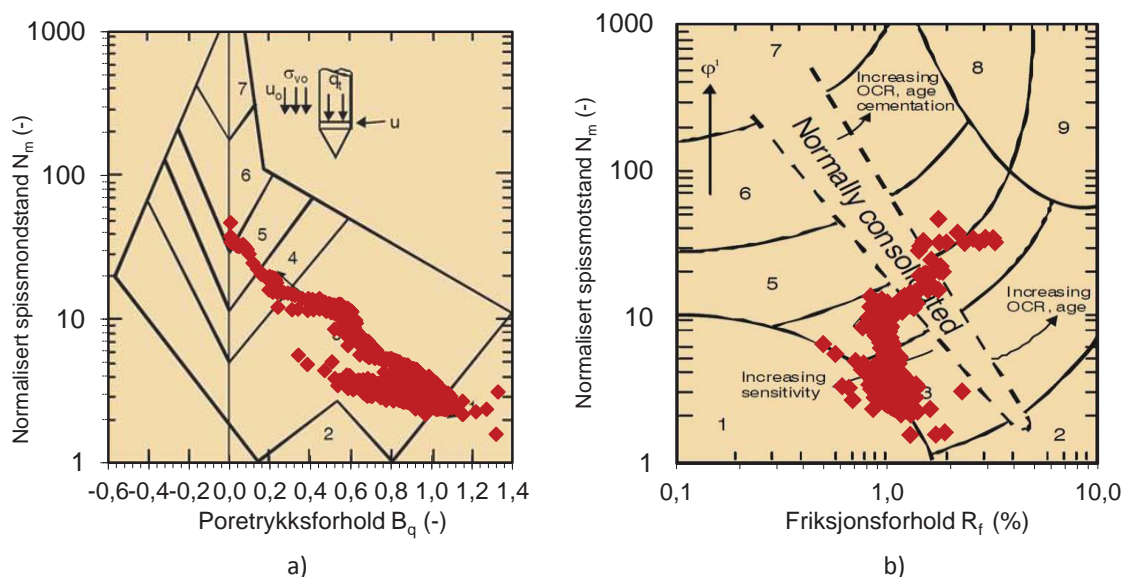
- Lave verdier for sidefriksjonen f_s (R_f , $R_{fu} < 2,0$ %) kan være en god indikasjon på sprøbruddmateriale
- **Poretrykksforhold ($B_q = \Delta u/q_n$) – sonderingsdybde (z).**
 - Høye verdier for poretrykksforholdet $B_q > 1,0$ indikerer ofte kvikke eller meget sensitive leirer
- **Bruk av identifikasjonsdiagrammer for påvisning av sensitivt materiale**
 - Kombinasjon av dimensjonsløse forhold for spissmotstand (N_m , Q), poretrykk (B_q) og friksjon (R_f) kan gi klassifisering av sprøbruddmateriale. Et eksempel fra kvikkeleire på Klett forsøksfelt er vist i Figur 3.3.

Tolkning av jordens oppførsel er basert på en kombinasjon av målte og avledede parametere, og det benyttes ofte identifikasjonsdiagrammer for å klassifisere materialene, se eksempel i Figur 3.3.

På tross av det åpenbare potensiale er det vekslende erfaringer med å bruke CPTU til detektering av sprøbruddmateriale. Dette skyldes at sonderingsresultatene er påvirket av en rekke forhold som ikke nødvendigvis har sammenheng med at leiren er sensitiv eller kvikk. Dette er nærmere diskutert i det følgende.

Sidefriksjon f_s :

Ettersom en fullstendig omrørt kvikkeleire har omrørt skjærfasthet $c_{ur} < 0,5$ kPa, er materialet omtrent flytende etter full nedbryting av strukturen. Dette skulle medføre svært liten mobilisert sidefriksjon langs friksjonshylsen, forutsatt at leiren omrøres fullstendig ved første gangs penetrasjon av sonden. Analyse av en rekke CPTU-profiler viser imidlertid at sidefriksjonen kan være forholdsvis høy, selv ved penetrasjon av sensitiv eller kvikk leire. Dette skjer ofte i siltige, magre leirer der materialet krever flere penetrasjonssyklus for sonden for å oppnå full omrøring av leiren. Utførte forsøk med spesialsonder viser at det ofte må gjennomføres 5-10 repeterte penetrasjonssyklus før materialet er blitt tilstrekkelig omrørt. Deretter antar leiren en omrørt skjærfasthet som kan sammenlignes med konusverdier på omrørt leire i laboratoriet.



Figur 3.3 Eksisterende identifikasjonsdiagrammer for klassifisering av jordart, Robertson m.fl.(1990).

a) Poretrykksforhold B_q , b) Friksjonsforhold R_f .

Resultater fra Klett forsøksfelt i kvikkeleire (ref. Multiconsult rapport MC 415559-RIG-RAP003)

Friksjonsforhold R_f :

I normalkonsoliderte leirer pleier friksjonsforholdet $R_f = f_s \cdot 100 \% / q_n$ å ligge mellom 0 % og 2 %, men det er ofte store avvik fra disse tallene i begge retninger. I tillegg kan det ofte hende at også ikke-sensitiv leire viser verdier i dette intervallet, sannsynligvis på grunn av unøyaktige målinger og manglende korreksjon av målt sidefriksjon for poretrykkseffekter.

Netto spissmotstand q_n :

Effekten med konstant eller jevnt avtagende penetrasjonsmotstand er karakteristisk for flere typer sonderinger i kvikk eller sensitiv leire. Tilsvarende skulle man forvente at netto spissmotstand q_n viste samme tendens med dybden i en CPTU. Dette synes imidlertid å være et mindre uttalt og lite konsistent kriterium og anbefales ikke benyttet. Dette kan skyldes at CPTU-sonden ikke roteres og derved i mindre grad omrører leiren rundt sonden.

Spissmotstandstall N_m :

Det dimensjonsløse spissmotstandstallet N_m ($\sim Q$, der Q er uten attraksjonsledd, men ellers lik N_m) er funnet å være en bedre indikator på sprøbruddmateriale enn netto spissmotstand q_n . I sprøbruddmateriale viser som regel N_m -profilen ingen økning med dybden, heller en svakt avtagende tendens. Dessuten vil man i sensitive, normalkonsoliderte leirer ofte observere verdier for $N_m < \text{ca. } 4$.

Tolket parameter kan imidlertid være noe påvirket av dybdeeffekter.

Poretrykksforhold B_{q_2} :

Ved penetrasjon av CPTU-sonden ned i grunnen oppstår det en betydelig massefortrengning med store tøyninger i materialet rundt sondespissen. Disse spennings- og tøyningseffektene fører til en endring av poretrykket i den influerte sonen rundt sonden.

Poretrykksforholdet $B_{q_2} = \Delta u_2 / q_n$ kan være en effektiv indikator på kvikk og sensitiv leire i normalkonsoliderte leirer, der dilatans-effekten i jorden bak sondens koniske del er beskjeden og poretrykksresponsen i kompresjonssonen under den koniske spissen (u_1) er omtrent som den målte bak spissen (u_2). Ved penetrasjon i kvikkeleirer er da ofte $B_{q_2} \geq 1,0$ på grunn av kvikkeleirenes kontraktante bruddoppførsel, ledsaget av store poreovertrykk ved kollaps.

I stivere, overkonsoliderte kvikkeleirer vil som regel B_{q_2} -verdiene ligge betydelig lavere, ofte mellom 0,6 og 0,9 avhengig av blant annet forkonsolideringsforholdet. Dette skyldes at skjærspenningsinduserte poretrykk bak den koniske delen vil gi lavere bidrag til total poretrykksoppbygging på grunn av positiv dilatans. Dette fører til at målte poretrykk bak spissen blir noe lavere enn det poretrykket som utvikler seg i bruddsonen under spissen (u_1). Her er dilatans-effekten mindre på grunn av lavere skjærspenningsbidrag og større bidrag fra normalspenningsendringer til poretrykket. Leirenes dilatanssegenskaper har derfor en avgjørende innflytelse på det målte poretrykket, noe som medfører at poretrykksforholdet B_{q_2} ikke kan benyttes som en entydig identifikasjonsparameter for klassifisering av sprøbruddmaterialer.

Her vil det være ønskelig å kunne måle eller estimere poretrykksresponsen på spissen av sonden (u_1), noe som lettere vil fange opp kollapsoppførselen til sprøbruddmaterialet, og den betydelige poretrykksresponsen dette medfører i bruddsonen under spissen. Poretrykksbidragene vil også være mindre påvirket av skjærspenningsbidraget og den opptredende dilatans.

Rent praktisk ville det være fordelaktig å benytte en sonde med poretrykksmåling både i u_1 - og u_2 -posisjonen, men slike sonder er ikke vanlig å benytte i praksis.

Erfaringene med påvisning av sprøbruddmateriale direkte fra CPTU-målinger har som beskrevet i tidligere kapitler vært varierende, og det foreligger ikke i dag noen entydig, tilstrekkelig dokumentert

metode for påvisning av kvikk og sensitiv leire fra CPTU. Dette skyldes i hovedsak at parameterne ikke i tilstrekkelig grad tar hensyn til forhold ved sprøbruddmaterialets oppførsel som påvirker målingene, blant annet sensitivitet, nødvendig omrøringsenergi og spenningshistorie.

Som et resultat av detekteringsstudiet i NIFS er det derfor foreslått nye og alternative måter å tolke CPTU-målingene på, som mer entydig kan benyttes til påvisning av sprøbruddmateriale:

- ✓ Bruk av totalkraftmåling og stangfriksjon for hele stangsystemet
- ✓ Utvikling av nye identifikasjonsdiagrammer basert på følgende reviderte, dimensjonsløse forhold:
 - Bruk av revidert spissmotstandstall N_{mc}
 - Bruk av revidert poretrykksforhold B_{q1}

De nye metodene er nærmere beskrevet i de følgende kapitler.

3.2.1.1 *Bruk av revidert spissmotstandstall N_{mc}*

N_m synes å være en effektiv indikator på sprøbruddmateriale, bedømt ut i fra helningen på N_m -kurven mot dybde. Spissmotstandstallet N_m er definert som (se f.eks. Sandven, 1990):

$$N_m = q_n / (\sigma_{vo}' + a) \quad (3.1)$$

der:

σ_{vo}' = effektivt overlagingstrykk (dagens)

a = attraksjon (avtagende effekt med dybden, betyr lite for $z > 5$ m)

Her er tradisjonelt det nåværende effektive overlagingstrykket σ_{vo}' benyttet som referansespenning. Det vil imidlertid være riktigere og mer representativt å benytte forkonsolideringsspenningen σ_c' som grunnlag i forhold til materialets reelle oppførsel, noe som fører til det reviderte uttrykket:

$$N_{mc} = q_n / (\sigma_A' + a) \quad (3.2)$$

der:

σ_A' = referansespenning (se ligning 3.3)

For å ta tilstrekkelig hensyn til materialets forkonsolidering foreslås å benytte uttrykket i ligning 3.3 som referansespenning σ_A' . Uttrykket er analogt med det som benyttes i SHANSEP-tilpasning (Ladd & Foott, 1974), der spenningsekspONENTEN m ivaretar effekten av avlastning og svelling av sedimentet. Måten uttrykket er sammensatt på gjør det også mulig å gradere betydningen av forkonsolideringsspenningen σ_c' i forhold til dagens effektive overlagingstrykk σ_{vo}' , gjennom valg av spenningsekspONENTEN m :

$$\sigma_A' = \sigma_c'^m \cdot \sigma_{vo}'^{(1-m)} \quad (3.3)$$

der:

σ_c' = forkonsolideringsspenning

σ_{vo}' = effektivt overlagingstrykk
 m = spenningsseksponten ($0 < m < 1,0$)

Forkonsolideringsspenningen varierer som regel forskjellig fra σ_{vo}' , og vil kunne gi et riktigere bilde av materialets egenskaper og N_{mc} -variasjonen med dybden. Dette forutsetter at man har tilstrekkelige og pålitelige verdier for σ_c' slik at et $\sigma_c' - z$ profil kan etableres. Velges spenningsseksponten m basert på erfaringstall for aktiv udrenert skjærfasthet i norske leirer er den i størrelsesorden 0,7-0,8. Tilsvarende blir eksponenten for effektivt overlagingstrykk 0,2-0,3. Forkonsolideringsspenningen σ_c' blir dermed en parameter det er viktig å fastslå med rimelig nøyaktighet. Samtidig gjør en eksponentverdi $m < 1,0$ at eventuelle feil i anslagene av σ_c' jevnes noe ut gjennom den matematiske formuleringen. Forkonsolideringsspenningen bør primært bestemmes fra laboratoriedata, fra kjente topografiske forhold og tidligere terrengnivå, sekundært fra uavhengig tolkning av CPTU-data. Empiriske sammenhenger mellom forkonsolideringsforhold OCR og poretrykksfordeling rundt sonden i aktuelle jordarter kan også benyttes (se f.eks. Sully m.fl., 1988).

Spissmotstandstallet N_{mc} anbefales derfor benyttet i nye identifikasjonsdiagrammer for CPTU-data, sammen med det reviderte poretrykksforholdet B_{q1} , se Figur 3.4.

3.2.1.2 Bruk av revidert poretrykksforhold B_{q1}

Ettersom poretrykksforholdet B_q i noen grad påvirkes av forkonsolideringsforholdet OCR og materialets dilatanssegenskaper, vil det være naturlig å utnytte dette i bestemmelse av poretrykksforholdet B_{q1} . Dette kan for eksempel uttrykkes på følgende måte (se Sandven (1990)):

$$B_{q1} = (u_1 - u_o) / (q_n) = (k_{leire} * u_2 - u_o) / q_n \quad (3.4)$$

der:

k_{leire} = erfaringsbasert korreksjonsfaktor som angir forholdet mellom poretrykket målt på ulike steder langs sonden (se Sandven (1990)):

Bløt NC-leire:	$k = 1,25$
Middels leire, svakt OC:	$k = 1,50$
Fast OC-leire:	$k = 1,90$

Følgende relasjon er benyttet for estimat av u_1 (Sully m.fl., 1988), se figur 2.5 for definisjon av u_1 :

$$u_1 = u_2 + u_o \cdot (OCR - 0,66) / 1,43 \quad (3.5)$$

der:

u_1 = poretrykk målt på konisk del (u_1 vanligvis $> u_2$)
 u_2 = poretrykk i referansenivå bak konisk del
 u_o = in situ poretrykk før penetrasjon
OCR = forkonsolideringsforhold (= σ_c' / σ_{vo}')

Dette reviderte poretrykksforholdet vil kunne bidra til et bedre grunnlag for identifikasjon av sensitiv og kvikk leire fra nye identifikasjonsdiagrammer, sammen med revidert spissmotstandstall N_{mc} .

Kombinasjonen mellom N_{mc} og B_{q1} er benyttet som grunnlag i et enkelt identifikasjonsdiagram som viser inndeling for sensitiv leire, se Figur 3.3 og tabell 3.4.

3.2.1.3 Bruk av revidert friksjonsforhold R_{fu}

Tolkning av udrenert skjærfasthet fra CPTU kan baseres enten på spissmotstand eller poretrykksrespons. I sprøbruddmaterialer er det ofte den poretrykksbaserte tolkningen som er mest pålitelig. Det er derfor foreslått å beskrive friksjonsforholdet med utgangspunkt i poretrykk u_1 (eventuelt u_2) i stedet for netto spissmotstand q_n i lign. 3.5, se Figur 3.5.

Denne formuleringen har videre den effekt av materialer med distinkt forskjell i poretrykksrespons blir lettere å klassifisere. Dette gjelder for eksempel overgangen mellom sprøbruddmaterialer og grunne leirlag eller grovere lag.

$$R_{fu} = f_s * 100 \% / \Delta u_1 \quad (3.5)$$

der:

f_s = Sidefriksjon (korrigert verdi bør benyttes)

Δu_1 = $u_1 - u_o$, poreovertrykk under konisk spiss

u_o = in situ poretrykk før penetrasjon

Dette forholdet gir en bedre og mer entydig samling av data fra de ulike leirtypene enn ved bruk av netto spissmotstand.

Sidefriksjonen er likevel en noe usikker størrelse med hensyn på detektering av sprøbruddmateriale. Dette vil også være tilfelle i alle uttrykk der sidefriksjonen inngår på grunn av forhold som er kommentert tidligere i dette kapitlet. Det reviderte friksjonsforholdet gir likevel samlet et brukbart klassifiseringsgrunnlag for påvisning av sprøbruddmateriale.

3.2.1.4 Resistivitet ρ

Et annet alternativ er å plote N_{mc} eller B_{q1} mot resistiviteten ρ . I studiet er det undersøkt om bruk av resistivitet i klassifikasjonsdiagrammer kan benyttes for å skille ut sprøbruddmaterialer i kombinasjon med andre parametere, som f.eks. N_{mc} . Dette er studert for samtlige felter inkludert i denne rapporten og trenden er tydelig: området for klassifisering av mulig sprøbruddmateriale (10-80 Ωm) inkluderer de fleste målepunkter, uavhengig av om materialet har sprøbruddsegenskaper eller ikke. For et klassifiseringsformål av den typen som utvikles her er dermed ikke resistivitet fra R-CPTU direkte egnet som eneste grunnlag for klassifisering av sprøbruddmateriale. Resistiviteten vil likevel være et viktig supplement for indikasjon på sprøbruddmateriale sammen med de øvrige CPTU-parametere.

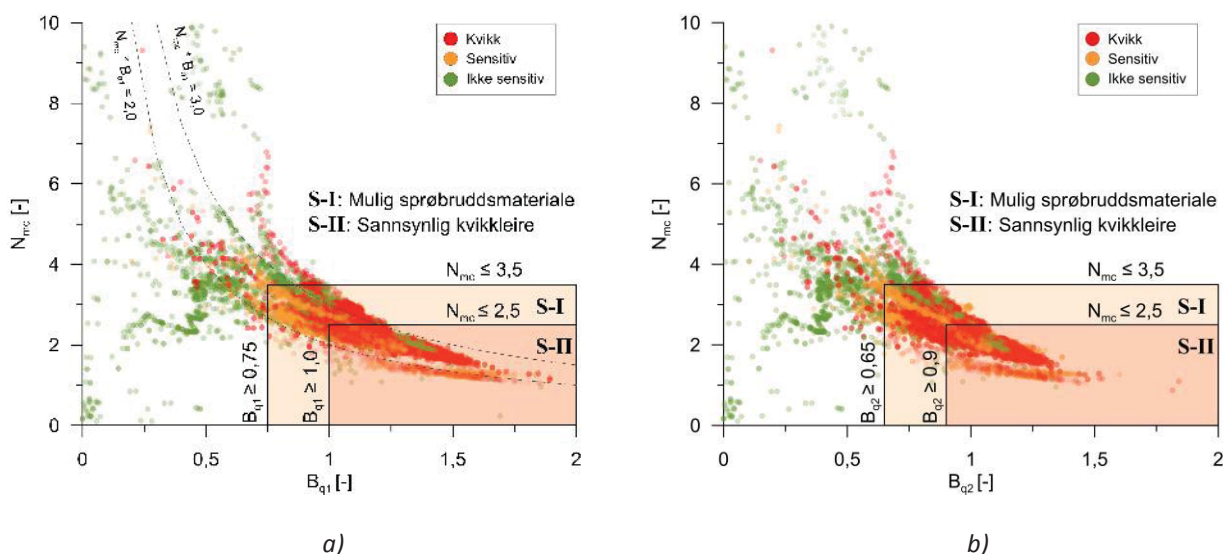
3.2.2 Nye identifikasjonsdiagrammer

Det er her foreslått å benytte kombinasjonen av N_{mc} og B_{q1} som grunnlag for klassifisering av sprøbruddmateriale, der det oppnås en forholdsvis tydelig markering av lag med sprøbruddmateriale/kvikkleire for de forsøksfelter som er inkludert i dette studiet. Klassifiseringsdiagrammer med alle datapunkter er vist i Figur 3.5.

Følgende klassifisering er anbefalt på bakgrunn av resultatene i dette studiet:

- $N_{mc} \leq 3,5$ og $B_{q1} \geq 0,75$: Mulig sprøbruddmateriale

- $N_{mc} \leq 2,5$ og $B_{q1} \geq 1,00$: Sannsynlig kvikkleire



Figur 3.4 Forslag til anbefalte identifikasjonsdiagrammer for detektering av sprøbruddmateriale.

a) Basert på tolkningsfaktoren N_{mc} og revidert poretrykksforhold B_{q1} ,

b) Basert på tolkningsfaktoren N_{mc} og opprinnelig poretrykksforhold B_{q2} .

Sammenlignet med identifikasjonsdiagrammet utviklet av Robertson m.fl. (1990), som viser N_m mot B_{q2} , gir N_{mc} mot B_{q1} en mer entydig klassifisering av sprøbruddmaterialer. Samlingen av datapunkter strekkes mer langs begge aksene, og det blir enklere å skille ut ulike materialerespons. I Figur 3.4a er det tegnet inn avgrensninger for sprøbruddmateriale i henhold til funnene i dette studiet. Det finnes eksempler på registreringer som bryter med denne avgrensningen, men for de aller fleste tilfeller gir forslaget en god og treffende klassifisering.

For de fleste CPTU-sonder måles ikke u_1 , men poretrykket like bak konisk spiss, u_2 . Det er imidlertid publisert en rekke relasjoner for å estimere u_1 fra u_2 , blant annet som en funksjon av OCR. En slik relasjon er benyttet for datapunktene i Figur 3.4a (Sully m.fl., 1988). Denne fremgangsmåten introduserer noe usikkerhet på grunn av den empiriske korrelasjonen som benyttes, og det kan derfor være ønskelig å benytte B_{q2} som grunnlag siden dette forholdet er basert på kjente måledata. En slik klassifisering er vist i Figur 3.4b, der følgende klassifiseringsgrenser er anbefalt:

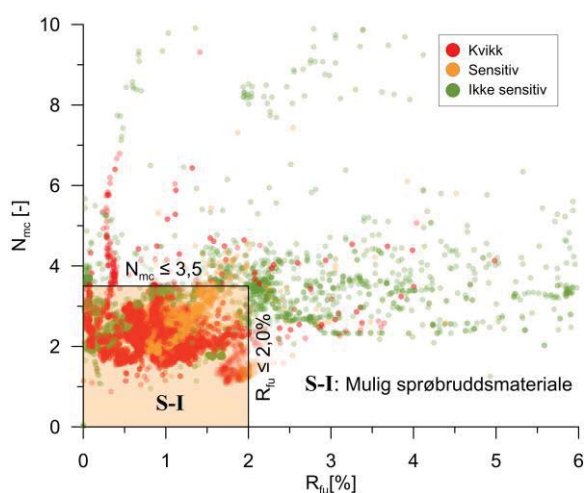
- $N_{mc} \leq 3,5$ og $B_{q2} \geq 0,65$: Mulig sprøbruddmateriale
- $N_{mc} \leq 2,5$ og $B_{q2} \geq 0,90$: Sannsynlig kvikkleire

Sammenlignet med bruk av B_{q1} i gir bruk av B_{q2} i Figur 3.4b mindre spredning langs den horisontale aksene og dermed noe mer utydelige grenser mellom ulike materialoppførsel.

I Figur 3.4a er det inkludert to linjer for forholdet mellom N_{mc} og B_{q1} . Trenden i datasettet er tydelig ved at det eksisterer en sammenheng mellom disse to størrelsene; høy B_{q1} tilsvarer parallelt lav N_{mc} . Denne sammenheng skyldes at de to parametrene til en viss grad beskriver samme fenomen, nemlig bruddforholdene ved spissen og den tilhørende strukturkollaps. Dette er ønskelig ettersom det er sprøbruddmaterialenes bruddkollaps som er karakteristisk for sprøbruddmaterialene, noe som blir fanget opp av CPTU-målingene. Lav spissmotstand henger dermed sammen med høyt poretrykk noe som er fysisk forklarlig ut ifra materialenes fysiske-mekaniske egenskaper. Videre er det slik at B_q og

OCR viser en klar sammenheng, samtidig som OCR er en del av uttrykket for N_{mc} . Det er dermed en sammenheng mellom B_{q1} og N_{mc} som matematisk kan vises å være i størrelsesorden $N_{mc} \cdot B_{q1} \approx 1,8-3,2$ for sensitive og kvikke leirer.

Sammenhengen mellom B_{q1} og N_{mc} innebærer at N_{mc} alene kan være en god klassifiseringsparameter. Dette prinsippet er benyttet i Figur 3.5, hvor N_{mc} er plottet mot friksjonsforholdet R_{fu} for alle forsøksfelt. Som diskutert tidligere, er det usikkerhet knyttet til tolkning av sidefriksjonen fra CPTU-forsøk. Dette gjenspeiles i noe mer spredning for denne klassifiseringen sammenlignet med $N_{mc} - B_{q1(2)}$ i Figur 3.4.



Figur 3.5 Forslag til nytt identifikasjonsdiagram for detektering av sprøbruddmateriale, basert på tolkningsfaktoren N_{mc} og revidert friksjonsforhold R_{fu} .

Det er likevel en klar trend at sprøbruddmaterialer har lav N_{mc} og lav R_{fu} . På bakgrunn av dette foreslås følgende klassifisering:

- $N_{mc} \leq 3,5$ og $R_{fu} \leq 2,0\%$: Mulig sprøbruddmateriale

For klassifisering av sprøbruddmaterialer er det viktig å se på alle tilgjengelige indikatorer i én undersøkelse. Konvensjonelle sonderingsprofiler, sammen med dybdeprofiler av N_{mc} og B_{q1} , er viktige i så måte. De foreslåtte klassifikasjonsdiagrammene er ment som et supplement til dette og ikke en erstatning. Videre kan det også være relevant informasjon å hente fra målt total nedpressingskraft med tolkning av stangfriksjon.

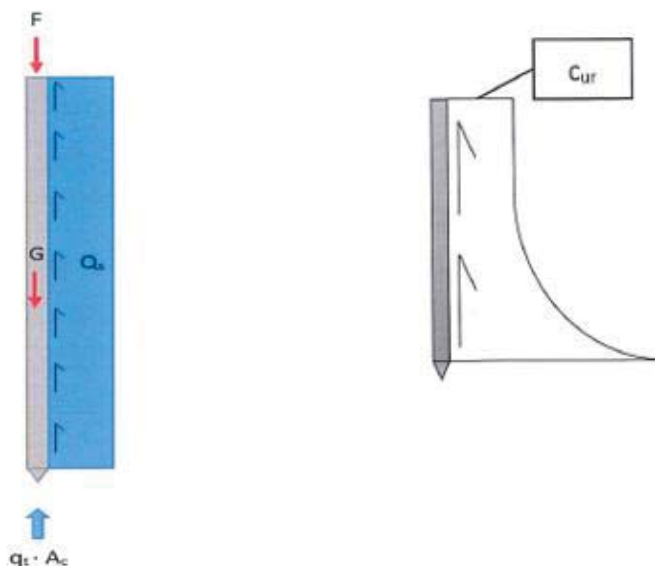
Tabell 3.4. Verdiområde for klassifiseringsparametrene N_{mc} , B_{q1} og R_{fu} i sprøbruddmateriale.

Parameter	Verdiområde for kvikkeleire	Verdiområde for sensitiv leire
$N_{mc} = q_n / (\sigma'_A + a)$ (-)	1 - 2,5	2,5 - 3,5
$B_{q1} = \Delta u_1 / q_n$ (-)	1 - 2	0,75 - 2,0
$B_{q2} = \Delta u_2 / q_n$ (-)	1 - 2	0,60 - 1,80
$R_{fu} = f_s / \Delta u_1$ (%)	0 - 2,0	0 - 2,0

3.2.3 Bruk av stangfriksjon for detektering av sprøbruddmateriale

Etter førstegangs penetrasjon av CPTU-sonden vil sidefriksjonen sjelden representere et fullstendig omrørt materiale, noe som gjør det usikkert å vurdere kvikkeleirestatus fra den målte sidefriksjonen (f_s). Derimot vil friksjonen langs stangsystemet representere en omrørt tilstand for omkringliggende jord etter hvert som stengene presses lenger ned i grunnen.

Den totale nedpressingskraften måles vanligvis ikke i en konvensjonell CPTU. Dette kan imidlertid gjøres ganske enkelt hvis boreriggens datainnsamlingsutstyr tilpasses til dette formålet. Ettersom det ikke er noe ekstraarbeid å registrere total nedpressingskraft ved utførelse av CPTU, anbefales det å gjøre dette rutinemessig.



Figur 3.6 Prinsipp for bestemmelse av stangfriksjon Q_s (Hundal (2014)).

I dette tilfellet kan vekten av borstengene og spisskraften trekkes fra den totale kraften, ettersom spissmotstanden mot sonden registreres, se Figur 3.6. Den totale friksjonskraften Q_s langs stengene kan da bestemmes som en funksjon av nedpressingsdybde, ved at vekten av borstengene og spisskraften trekkes fra den totale nedpressingskraften:

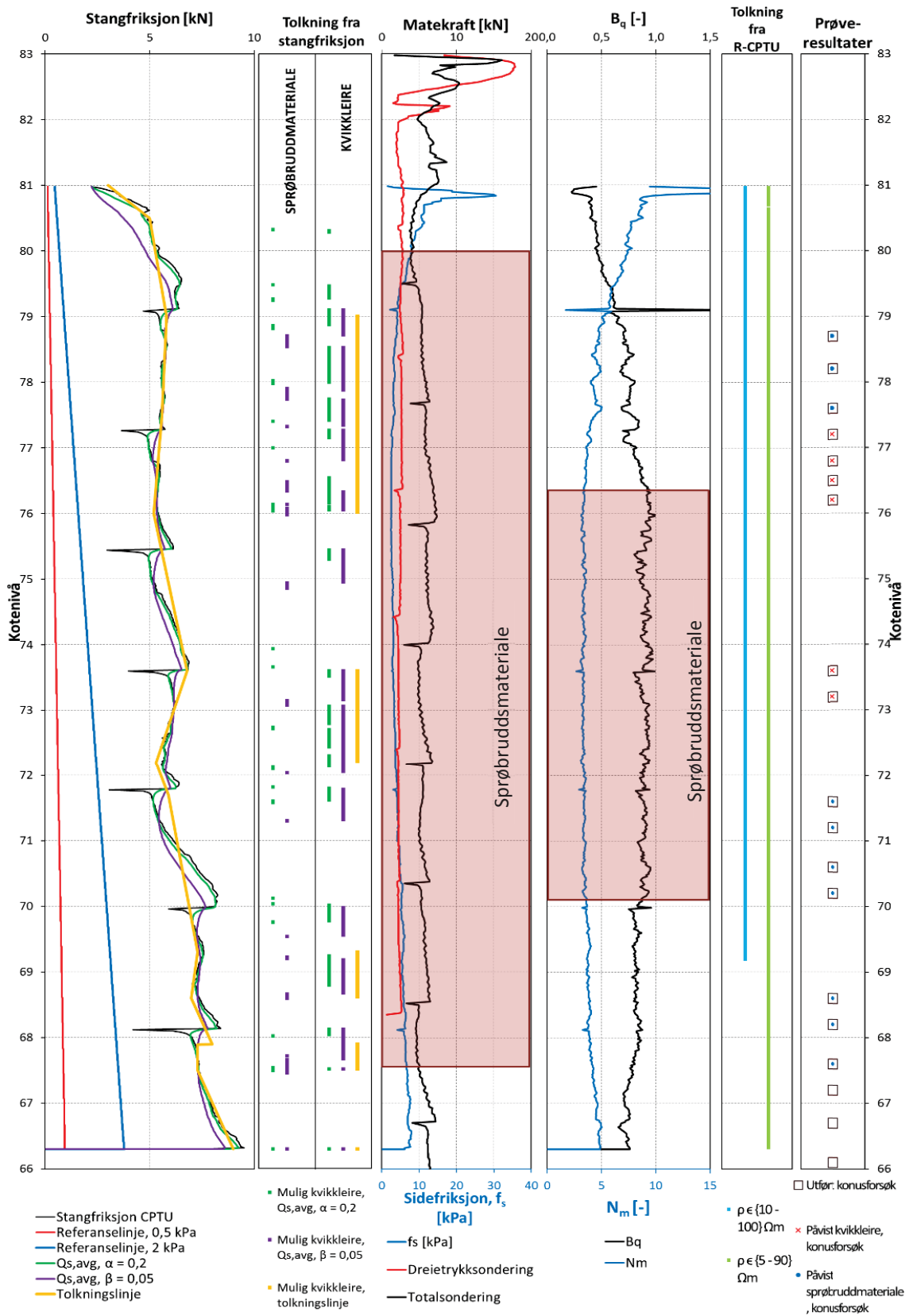
$$Q_s = F + G - q_t \cdot A_c \quad (3.6)$$

der:

- F = Total penetrasjonskraft (kN)
- G = Stangvekt (N)
- q_t = Korrigert spissmotstand fra CPTU (kN/m^2)
- Q_s = Mobilisert stangfriksjon (kN)
- A_c = Tverrsnittsareal for trykksonde (mm^2)

Omrøringsen vil gradvis være mer fullstendig oppover langs borstengene, etter hvert som stengene penetreres dypere. Friksjonen kan enklest bestemmes som den gjennomsnittlige friksjonen langs borstengene, men det vil også være mulig å bestemme friksjonsøkning per meter borstang. Det siste bør likevel gjøres med forsiktighet. Det måles kun gjennomsnittlig friksjon, og friksjonen i en gitt dybde kan endre seg langs hele lengden av borstenger under nedpressing. Prøver man å isolere friksjonsbidrag i en enkelt dybde, kan resultatet bli dominert av en reduksjon i friksjonen et annet sted langs stangen.

3 Anbefalt bruk av aktuelle metoder – vurdering av muligheter og begrensninger



Figur 3.7 Eksempel på sammenstilling av resultater - tolket stangfriksjon. Forsøksfelt Esp, Byneset (Hundal, 2014).

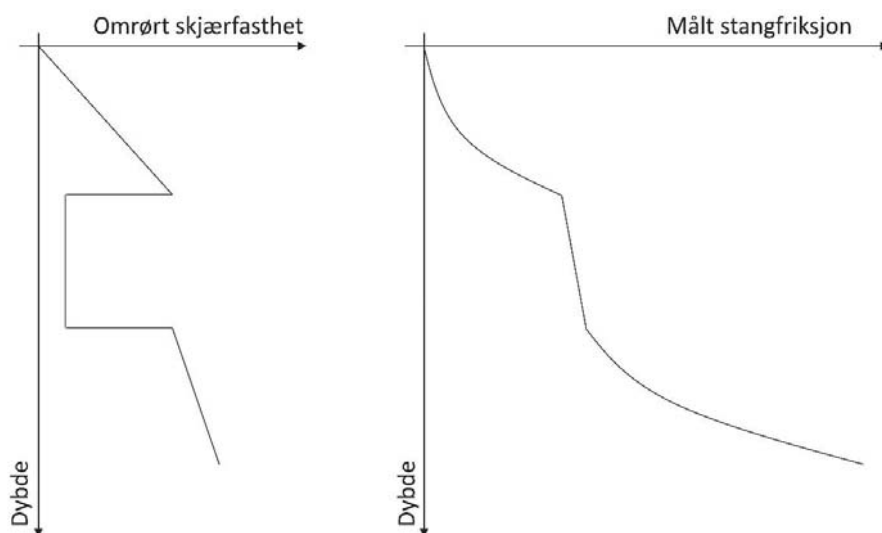
Et eksempel på resultattolkning i kvikkleire er vist i Figur 3.7 (Hundal, 2014). I figuren sammenstilles CPTU-data med resultater fra dreietrykksondring, totalsondering og konusforsøk i laboratoriet.

Tolkning av sprøbruddmateriale fra hver enkelt metode er vist og danner til sammen et godt grunnlag for vurdering av grunnforholdene.

Kurven for beregnet friksjonskraft kan også sammenlignes med teoretisk linje for stangfriksjon tilsvarende 2,0 kPa sidefriksjon, noe som definerer øvre grense for omrørt skjærfasthet i sprøbruddmateriale. Hvis helningen av friksjonskraften < helningen for kvikkleirekurven (tilsvarende 0,5 kPa sidefriksjon, rød referanselinje i Figur 3.7) antas kvikkleire i laget. Beregning av helning må gjøres med utgangspunkt i den stangdimensjonen som benyttes. For eksempel vil stangdiameter på $\phi 36$ mm (CPTU stenger) medføre at kvikkleire tolkes ved en stangfriksjon som har helning lavere enn 55 N/m.

I mange tilfeller benyttes en ekspansjonsring («rømmer») bak CPTU-sonden. Dette bidrar til økt omrøring og muligens også dårligere kontakt mellom stangsett og jord. Det samme gjelder ved bruk av R-CPTU der resistivitetsmodulen har større diameter en stangsettet. Det er ikke fullt ut kartlagt hvilken effekt en lokal diameterøkning har på tolkning av sprøbruddmaterialer fra stangfriksjon.

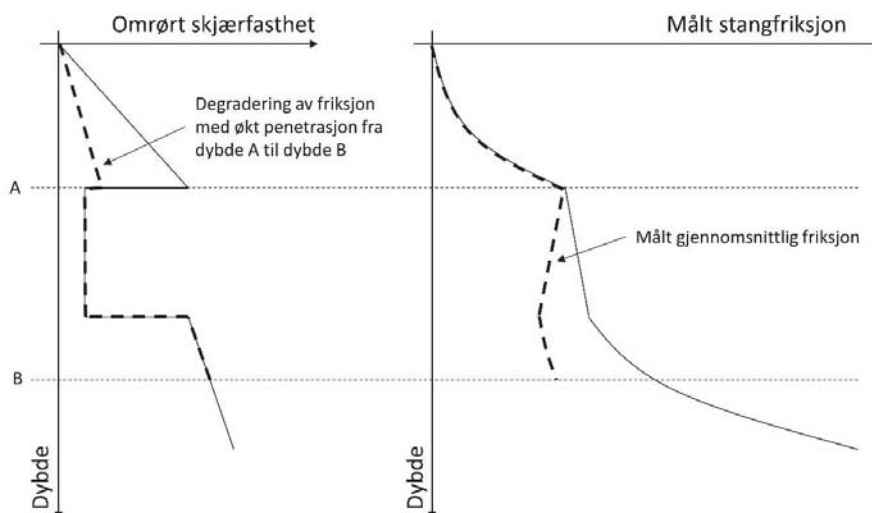
Tolkning av sprøbruddmaterialer fra målt stangfriksjon er undersøkt på en rekke forsøksfelt i dette studiet. Resultatene tilsier at sprøbruddmateriale kan påvises, men at metoden tilsynelatende overvurderer kvikkleireomfanget noe i forhold til reell forekomst. Tilsvarende erfaringer ble gjort i Sverige i Göta älv prosjektet.



Figur 3.8 Opptredende grunnforhold og tolket stangfriksjon.

Grunnen til at metoden overestimerer kvikkleireforekomster henger sammen med metodens største svakhet; at man kun har informasjon om gjennomsnittlig friksjon langs borstengene. For ideelle grunnforhold er tolkningen imidlertid enklere, som eksemplifisert i Figur 3.8.

Der omrørt skjærfasthet øker med dybden, øker målt gjennomsnittlig stangfriksjon eksponentielt. I laget med lav og konstant omrørt skjærfasthet tolkes en lineært økende stangfriksjon. Helningen på denne tilsvarer omrørt skjærfasthet i dette laget og tolkning av kvikkleire basert på en gitt helning av denne kurven er riktig.



Figur 3.9 Opptredende grunnforhold og tolket stangfriksjon der økt penetrasjon fører til tap av friksjon i topplag.

Utfordringen er at virkeligheten ofte vil være som vist i Figur 3.9. Etter hvert som stangsettet penetrerer videre gjennom det øvre laget, vil friksjonen reduseres. Dette kan skyldes flere forhold, blant annet økt omrøring. Resultatet er at den gjennomsnittlige friksjonen viser negativ helning i det svake laget og videre svak økning i det dype fastere laget. Tap av friksjon i øvre lag fører altså til redusert helning på en kurve som viser gjennomsnittlig friksjon mot dybde. Negativ helning er en klar indikasjon på en slik mekanisme. For tolkning av sprøbruddmateriale kan en lav økning i stangfriksjonen like gjerne skyldes tap av friksjon i øvre lag som at det faktisk er lav friksjon i et eventuelt lag med sprøbruddmateriale ved den gjeldende penetrasjonsdybden. Dette kan føre til en overvurdering av kvikkleireutbredelsen.

En annen utfordring med metoden er tiksotropiske effekter under stangbytte, det vil si at leiren «biter» seg fast i stengene i ventetiden som oppstår. Resultatet er at opptredende friksjon blir høyere enn den omrørte skjærfastheten.

Tabell 3.5 Oppsummering – detektering av sprøbruddmateriale fra trykksondering med poretrykksmåling (CPTU).

Detekteringsprinsipp	Positive forhold	Negative forhold
Verdi for poretrykksforhold B_q , primært med estimert eller målt poretrykk på spissen av sonden (u_1) som klassifiseringsgrunnlag Profil over netto spissmotstand eller spissmotstandsforhold N_m Sidefriksjon og/eller stangfriksjon	Muliggjør detektering etter en rekke prinsipper: Spissmotstand, poretrykk og friksjon Svært nøyaktige målinger gir et godt grunnlag for videre bearbeiding Uavhengig av dybde og akkumulert stangfriksjon	Forholdsvis komplisert sonderingsmetode Krever stor kompetanse hos operatør for å oppnå gode måleresultater Måledata og identifikasjonsparametre påvirkes av en rekke forhold Kan ikke benyttes ved sondering i faste og steinrike lag, forboring gjennom slike lag kreves

3.2.1 Oppsummering

Med de nye metodene som er beskrevet i foregående kapitler er potensiale for påvisning av sprøbruddmateriale fra CPTU klart styrket. Selv om ingen av de foreslåtte metodene er helt feilsikre, vil de gi en utvidelse av tolkningsrepertoaret for små tilleggsressurser sammenlignet med tidligere tolkningsmetodikk.

En oppsummering av metodens detekteringsprinsipper, muligheter og begrensninger er gitt i tabell 3.5.

3.3 Resistivitetmålinger

Resistivitet er et mål på materialenes evne til å hindre elektrisk strømgjennomgang. Resistiviteten ρ (Ωm) er definert ved elektrisk feltstyrke E (V/m) over strømdensitet J (A/m^2) og kan beregnes fra strømmengde, en geometrifaktor og målt spenning. Den målte resistiviteten gir informasjon om jordlagene og kan i denne sammenheng gi informasjon om grunnvannets saltinnhold og indikere graden av utvasking i marine leirer. Den beregnede resistiviteten fra målingene er en tilsynelatende resistivitet som vil være identisk med den reelle resistiviteten i grunnen hvis materialet er homogent. Hvis grunnen er inhomogen beregnes den tilsynelatende resistiviteten fra et vektet gjennomsnitt av resistiviteten i de enkelte lag.

I 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 saltutvasking, siden porevannet i marine leirer inneholder salt fra havvannet leirpartiklene ble avsatt i. Resistiviteten er imidlertid også avhengig av faktorer som vanninnhold, kornfordeling, organisk innhold, mineralogisk sammensetning og temperatur. Leirinnholdet kan også påvirke målt resistivitet i en leire.

Hvis kornskjelettet 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 resistivitetsverdier 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. Arbeidet med å etablere representative resistivitetsintervall for jordtyper har foregått i mange år i Norge, Sverige og Canada. Intervaller, inndeling av jordtyper og målemetoder varierer imidlertid noe mellom studiene.

Tabell 3.6 a og b oppsummerer resistiviteten i ulike materialer basert på norske erfaringer, men det presiseres at stedsspesifikke variasjoner fra verdiene i tabellen kan forekomme.

Tabell 3.6. Resistivitet i ulike geologiske materialer.

a: Etter Rømoen m.fl. (2010).

Jordart	Resistivitet (Ωm)			
	1	10	100	1000
Intakt/salt og uforvitret leire				
Utvasket, uforvitret leire (kvikk-leire)				
Utvasket og forvitret leire				
Siltig leire/silt, antatt utvasket				
Sandig silt, antatt utvasket				

b: Etter Solberg m.fl. (2008).

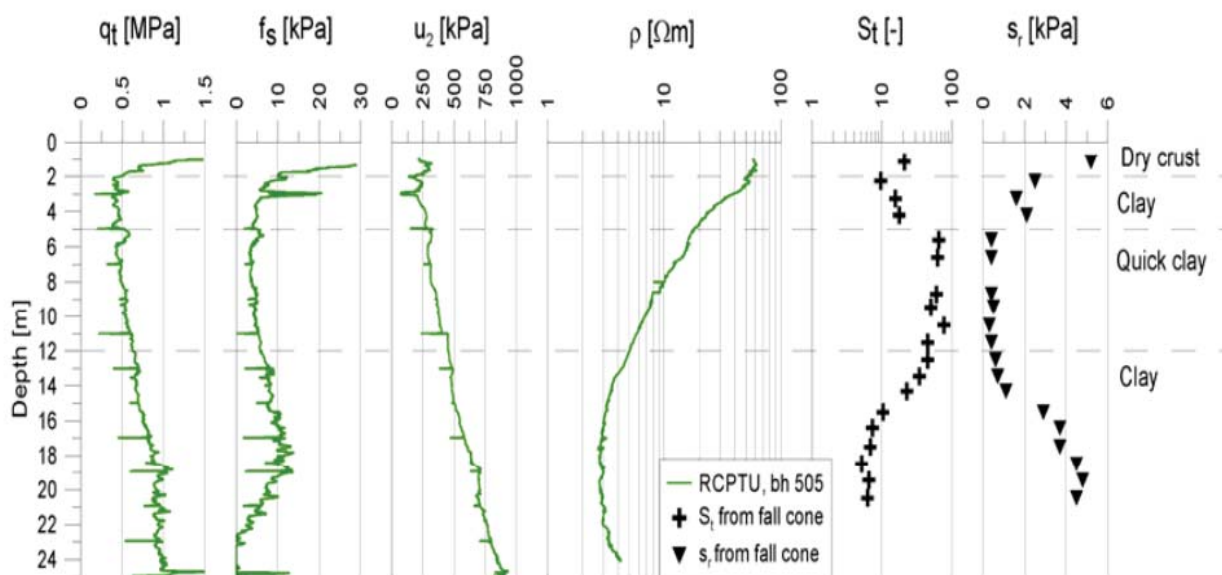
Jordart	Resistivitet (Ωm)	Merknad
Saltholdig, marin leire	1 – 20	
Utvasket leire, mulig kvikk leire	20 – 90	<u>Merk:</u> Dette kan også være siltige masser eller leire som har passert det kvikke stadiet
Tørrskorpeleire, grove materialer, sand og grus	70 – 300	
Silt, mett	50- 200	
Sand, mett	200 - 1000	
Berg	Flere 1000	

Merknad: Med utvasket leire menes saltfattig leire som ikke er rast ut og re-konsolidert. Data fra utvasket og re-konsolidert leire fra kvikkleireskred er ikke samlet systematisk. Det forventes imidlertid at slike leirer har resistivitet tilsvarende data for utvaskede leirer, og at de på samme måte vil være utsatt for oksideringsprosesser over tid.

3.3.1 Nedhulls målinger med resistivitetssonde (R-CPTU)

Gjennomføring av R-CPTU gir en kombinasjon av ulike fysiske størrelser som mekanisk stivhet (spissmotstandsforhold), hydrauliske egenskaper (poretrykksforhold) og resistivitet som samlet burde gi klarere indikasjon av sprøbruddmateriale enn de tradisjonelle sonderingsmetodene.

Når R-CPTU sonderingen er utført, har man fått registrert de vanlige CPTU resultatene, korrigert spissmotstand q_t , poretrykk u_2 og sidefriksjon f_s , samt måledata for resistivitet (Ωm) og/eller konduktivitet (mS/m), alle som funksjon av dybden. Resistiviteten kan fremstilles i lineær eller logaritmisk skala.



Figur 3.10 Resultater fra R-CPTU sonderinger på Smørgrav, sammenstilt med laboratoriedata (Rømoen m.fl., 2010).

Ved presentasjon og tolkning av resultater fra R-CPTU er det fornuftig å sammenstille data fra en rekke aktuelle undersøkelser parallelt, se Figur 3.10. Her kan man samle resultater fra konvensjonelle sonderinger, trykksondering med poretrykksmåling (CPTU) og eventuelt resistivitetmåling (R-CPTU), vingeboring (EFVT), resistivitetsprofiler (ERT/AEM) og laboratorieresultater. Hvis dette gjøres er det

langt enklere å se helheten i grunnforholdene der resultatene både samlet og hver for seg kan indikere lag av sprøbruddmateriale.

Tabell 3.7 Oppsummering – detektering av sprøbruddmateriale fra trykksondering med resistivitetsmåling (R-CPTU).

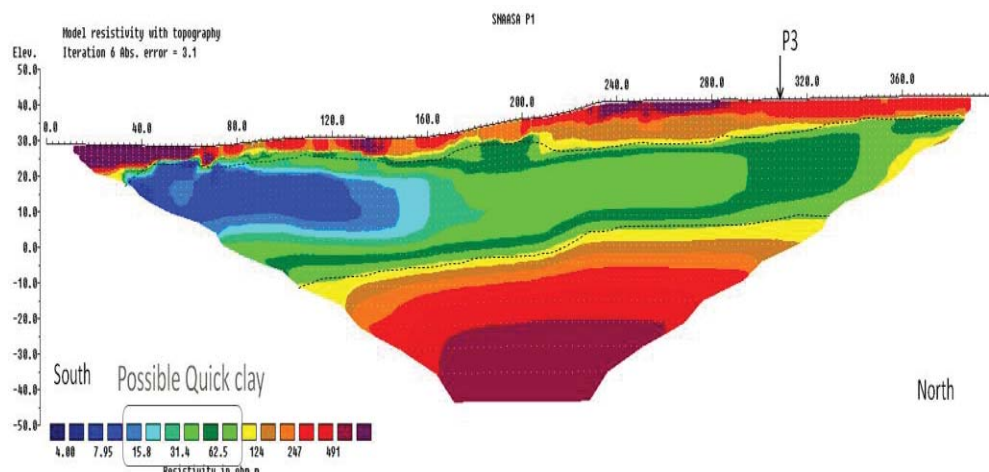
Detekteringsprinsipp	Positive forhold	Negative forhold
Verdi for poretrykksforhold B_q , primært med estimert eller målt poretrykk på spissen av sonden (u_1) som klassifiserings-grunnlag	Muliggjør detektering etter en rekke prinsipper: Spissmotstand, poretrykk, friksjon og resistivitet	Resistivitet for utvaskede leirer viser stor spredning, overlapper med verdier for andre materialer
Profil over netto spissmotstand q_n eller spissmotstandsforhold N_m (Q)	Svært nøyaktige målinger gir et godt grunnlag for videre bearbeiding	Måledata og identifikasjonsparametre påvirkes av en rekke forhold
Målt resistivitet sammenlignes med erfaringsverdier for utvasket leire. Kan sammenlignes med data fra ERT og AEM.	Uavhengig av dybde og akkumulert stangfriksjon Kontinuerlige målinger i dybden.	Kan ikke benyttes ved sondering i faste og steinrike lag, forboring gjennom slike lag kreves

3.3.2 Overflatemålinger (ERT)

Resistivitetsmålinger (Electrical Resistivity Tomography ERT) gir en detaljert oversikt over jordens elektriske resistivitet langs profiler som kan være flere hundre meter lange og flere titalls-meter dype. Primært kan metoden brukes for å få en oversikt over homogeniteten av sedimentlagene. Siden leirens resistivitet hovedsakelig er bestemt av saltinnholdet, kan en resistivitetsmodell brukes til å vurdere utstrekning av potensielle lag med sprøbruddmateriale. Dette kan videre brukes til å vurdere mulig utstrekning av et eventuelt retrogressivt (bakovergrepene) bruddforløp og maksimal utløpsdistanse for skredmassene. Hvis ERT-målinger foreligger før boringene, kan borplanen utarbeides basert på resistivitetsmodellen, noe som er anbefalt praksis.

Hvis det allerede finnes boringer langs et ERT-profil, kan resistivitetsmodellen eventuelt også brukes til å avgrense sensitive lag som kan identifiseres fra de geotekniske boringene (se Figur 3.11).

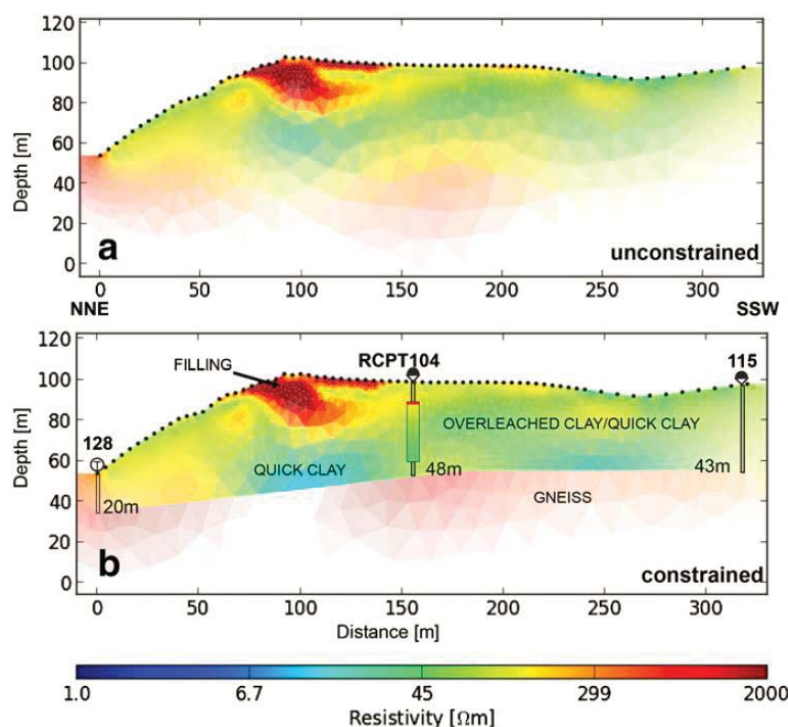
ERT-målinger er hensiktsmessige å benytte som verktøy for planlegging av geotekniske boringer og prøvetaking. I mange tilfeller kan ERT brukes i områder som ikke er tilgjengelige for borerigger, for eksempel i tett skog, i bratt terreng, for påvisning av leire under grus eller morene som ikke kan penetreres med geoteknisk sonderingsutstyr og lignende. Metoden er også godt egnet til å undersøke store arealer eller lange traseer på en betydelig mer kostnadseffektiv måte enn med boringer alene.



Figur 3.11: Resistivitetsmodell langs en skråning i Snåsa. En boring ved ca. profilmeter 300 indikerer kvikkleire, og ERT-modellen indikerer at selve leirlaget er mindre utvasket lenger ned på selve skråningen. (NGI rapport 20110935-03-R).

To viktige utfordringer og delvis begrensninger med ERT er:

- (a) Resistiviteten er ikke en entydig indikasjon for utvasket leire. Økt resistivitet kan forårsakes av lavere saltinnhold, men også av høyt siltinnhold. Det er derfor alltid nødvendig å "kalibrere" resistivitetsmodellen, ideelt med en R-CPTU som kan brukes til å finne en empirisk sammenheng mellom resistivitet og sensitivitet. En slik sammenheng kan vanligvis etableres, men bør bare brukes innenfor det aktuelle undersøkelsesområdet. Ettersom utvasket, sensitiv leire generelt har høyere resistivitet enn mindre utvasket og mindre sensitiv leire, finnes det også tilfeller hvor sprøbruddegenskaper er funnet i lag med lavere målt resistivitet ρ .



(b) I tillegg til denne geologiske usikkerheten kommer metodens begrensninger i oppløsning. ERT kan ikke sammenlignes med seismikk eller georadar som baserer seg på utsendelse og refleksjon av akustiske eller elektromagnetiske bølger. ERT er en integrerende metode og tomogrammer viser generelt en kontinuerlig overgang fra lav til høy resistivitet og omvendt. Det betyr at for eksempel et tynt leirlag på noen få meter over berg med høy resistans vil vises med for høy resistivitet, noe som kan feiltolkes som utvasket leire. Det er også krevende å avbilde den korrekte resistiviteten i overgang fra leire til berg. Betinget inversjon kan forbedre resultatet betydelig, se Figur 3.12.

Figur 3.12: To resistivitetsmodeller som tilsvarer samme data men forskjellige prosesseringsmetoder.

(a) Ubetinget inversjon uten føringer i profilet.

(b) Betinget inversjon hvor resultater fra 3 eksisterende sonderinger brukes til å fastsette dybde til berg. Resistivitet målt i R-CPTU er tegnet inn i samme fargeskala.

Ved betinget inversjon tar man hensyn til annen informasjon i prosesseringen av resistivitetsprofilen, for eksempel bergoverflaten fra totalsondering eller målt resistivitet fra R-CPTU. Selv om disse to begrensningene gjelder generelt for metoden og alle bruksområder, er de spesielt relevante for kvikkleirekartlegging siden resistivitetsforskjellen mellom salt og utvasket leire kan være liten.

Det er også viktig å være klar over at tolkningen av ERT data sannsynligvis overvurderer forekomstene av utvasket materiale noe. Dette må legges til grunn ved en helhetsvurdering av grunnforholdene.

Tabell 3.8 Oppsummering – detektering av sprøbruddmateriale fra målinger på overflaten (ERT).

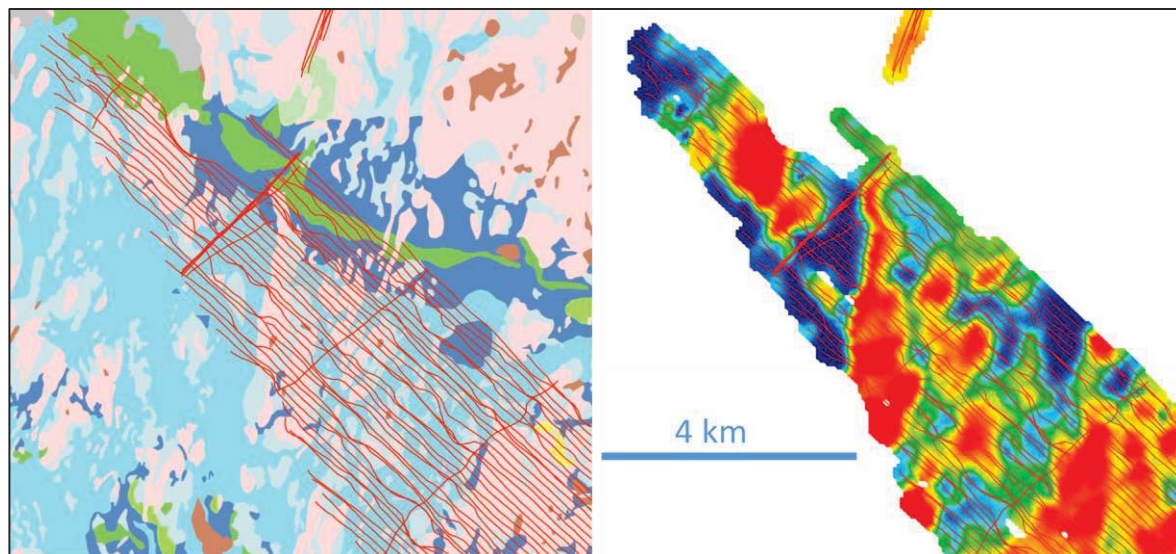
Detekteringsprinsipp	Positive forhold	Negative forhold
Resistivitetsverdier indikerer omfang av utvasket leire	Resultater fra ERT-modellen kan benyttes ved planlegging av boreprogram	Usikkerhet om resistivitetskontrast skyldes saltinnhold eller andre geologiske årsaker
Empirisk korrelasjon mellom saltinnhold og resistivitet indikerer utvasket materiale	Gir kontinuerlig informasjon om jordlagene i grunnen	Begrenset oppløsning, usikker resistivitet for tynne lag og inhomogene forhold (2-4 m)
Kontinuitet av soner og lag med lik resistivitet	Dekker profillengder på flere hundre meter	Mulige forstyrrelser ved liten avstand mellom kvikkleirelag og bergoverflaten
	Tilgjengelighet ved undersøkelser i skog, bratte skråninger og tilsvarende	Støy fra strømførende ledninger og annen infrastruktur i grunnen

3.3.3 Luftbårne målinger (AEM)

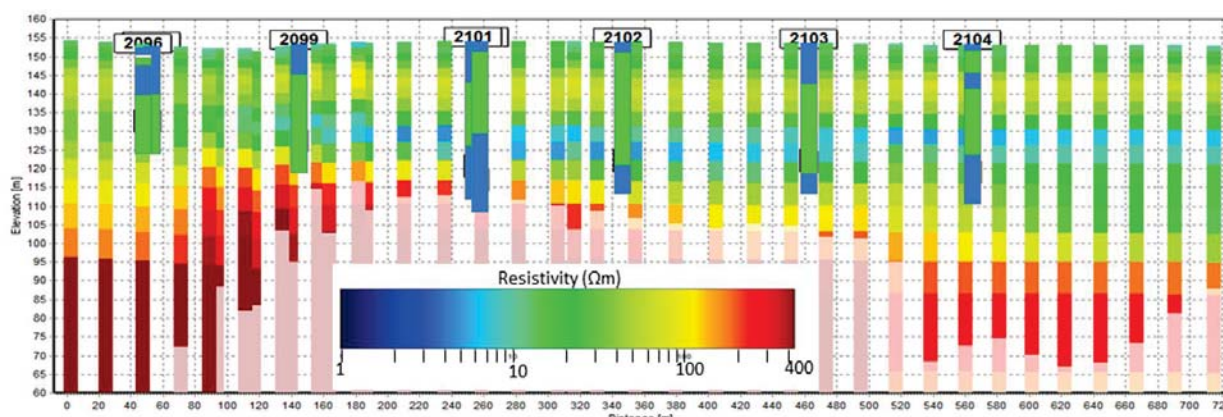
Resistivitmålinger fra fly eller helikopter (Airborne Electromagnetic Measurements AEM) kan brukes for detektering av sprøbruddmaterialer på mer eller mindre samme måte som ERT. AEM produserer elektriske resistivetsmodeller på en regional skala langs profiler med nesten ubegrenset lengde og flere hundre meters dybde. Bruksområdet for AEM er ikke nødvendigvis det samme som for ERT, i det AEM er best egnet for regional kartlegging i et tidlig stadium av store geotekniske prosjekter eller regional kartlegging av leirforekomster, se Figurene 3.13 og 3.14.

Begrensningen med metoden er økonomien i prosjektet, da AEM er veldig prisgunstig for store prosjekter, mens det ikke lønner seg å mobilisere utstyr for noen få kilometer med målinger. Som beskrevet i kapittel 2 er metoden begrenset av lavere oppløsning enn ERT, og det er ikke aktuelt å fly over bebygget området eller veier med tett trafikk.

Erfaringene med bruk av AEM for detektering av sensitiv leire er blandede og veldig avhengig av valgt utstyr. Historisk utstyr som ble designet for malmleting er lite egnet (NGU rapport 2012.004), mens utstyr for hydrogeologisk kartlegging har vist seg å være nesten like nøyaktig som ERT (Anschütz m.fl., 2015). Så lenge man påtreffer et tykt nok leirlag (noen 10-talls meter), er AEM oppløsningen god nok til å påvise resistivitetsforskjeller mellom salt og utvasket leire (se Figur 3.14), noe som kan være en indikasjon på sprøbruddmateriale.



Figur 3.13: Venstre: Løsmassekart (NGU) og AEM flylinjer. Høyre: AEM resistivitsdybdesnitt fra 0-15 m dybde. Legend geologi: Blå: marine avsetninger, Grønn: morene, Rosa: fjellblotninger, Brun: myr. Legend resistivitet: Blå 1 Ω m til Rød 1.000 Ω m. Lokasjonen av målingene er konfidensiell.



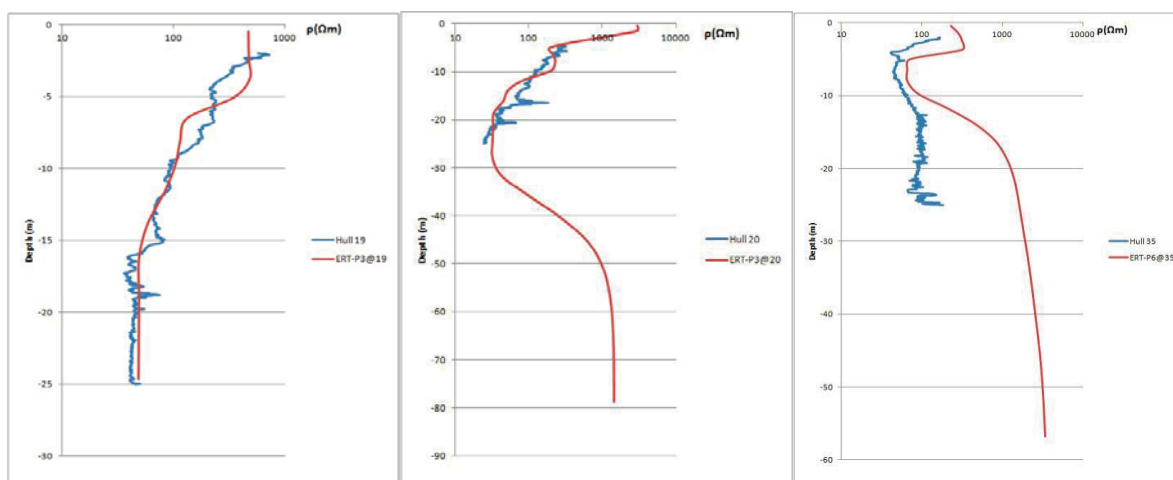
Figur 3.14: AEM resistivitsmodell av et lag med sensitiv leire i nærheten av Vorma på E16 Nybakk - Slomarka. Et lag med resistivitet 10 Ω m er tydelig og korrelerer med kvikkleire identifisert i borerer (grønt).

Tabell 3.9 Oppsummering – detektering av sprøbruddmateriale fra luftbårne målinger (AEM).

Detekteringsprinsipp	Positive forhold	Negative forhold
Resistivitsverdier indikerer omfang av utvasket leire	Er økonomisk gunstig ved kartlegging av store områder	Kan ikke brukes over bebygget strøk
Empirisk korrelasjon mellom saltinnhold og resistivitet indikerer utvasket materiale	Gir kontinuerlig informasjon om jordlagene i grunnen	Oppløsningen er ikke like bra som ERT, tynne lag (5-10 m) er vanskelige å påvise
Kontinuitet av soner og lag med lik resistivitet	Resultater fra AEM-modellen kan benyttes ved planlegging av boreprogram	På grunn av høye mobiliseringskostnader krever metoden en viss størrelse av prosjektene for å være økonomisk

3.3.4 Sammenligning mellom R-CPTU, ERT og AEM resultater

Forskjellen i oppløsning mellom de tre metodene for resistivitetmåling er viktig å være klar over når det skal gjennomføres en innbyrdes sammenligning mellom to eller flere av metodene. Se kap. 3.3.1 til 3.3.3 for flere detaljer om dette. Målingene er påvirket av et jordvolum på i størrelsesorden noen centimeter til et titalls centimeter for R-CPTU, noen meter til noen titalls meter for ERT og noen titalls meter til noen hundretalls meter for AEM-målinger. For eksempel vil resistivetsverdier målt med R-CPTU fra et 3 meter tykt leirlag over en bergart med høy resistivitet være riktige, mens ERT-målinger vil være påvirket av bergarten, selv i de grunneste målingene. AEM vil muligens ikke kunne påvise leirlaget i det hele tatt. Det samme gjelder for tynne lag som avbildes "skarpe" i et R-CPTU profil, men som vil vise en gradvis overgang i ERT- og AEM-fremstilling. Dette er eksemplifisert i Figur 3.15.



Figur 3.15: Resistivitetmålinger med R-CPTU (blå) sammenlignet med ERT (rød) for tre lokasjoner i Snåsa med delvis veldig bra sammenligning. I figuren til høyre er ERT-målingen påvirket av høy resistivitet i berg under et tynt leirlag (NGI rapport 20110935-03-R).

Bortsett av disse metodiske begrensningene viser erfaring at målingene stemmer godt overens der forholdene ligger til rette.

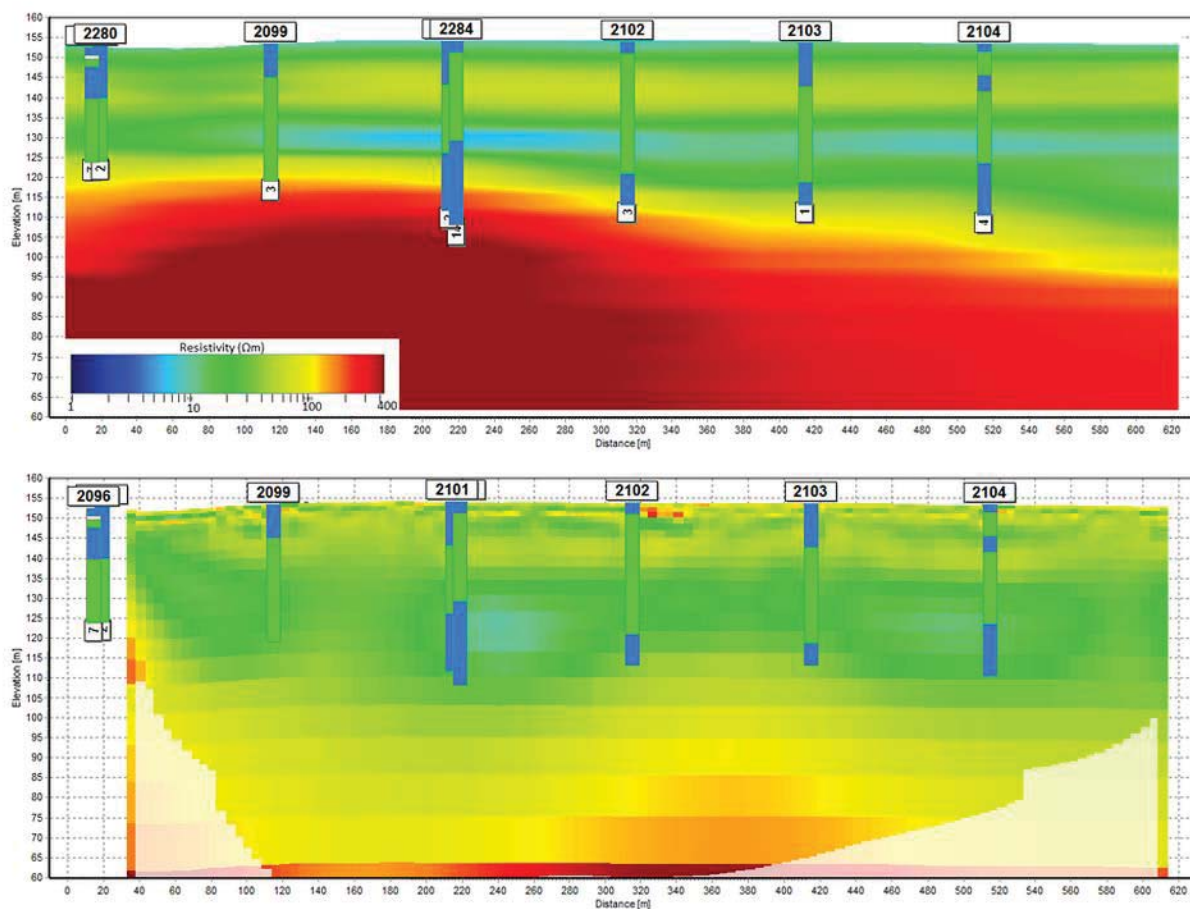
I tillegg til disse begrensningene vil noen materialegenskaper kunne føre til avvik mellom de forskjellige typer målinger i enkelttilfeller:

(1) Indusert polarisasjon (IP)

Når man sammenligner resistivitet fra R-CPTU og ERT, så benyttes verdier målt med vekselstrøm på noen kHz i resistivitetssonden, mens ERT benytter likestrøm. Det forutsettes her at den elektriske resistiviteten ikke er avhengig av frekvens. Dette er ikke alltid sikkert, og dette prinsippet kan utnyttes ved utførelse av målinger med indusert polarisasjon (IP). Basert på eksisterende erfaringer i Norge og Sverige har denne effekten ingen betydelig effekt for påvisning av utvasket leire, selv om leire innblandet i grovkornete sedimenter gjerne fører til IP effekter.

(2) Anisotropi

Hvis man vil benytte R-CPTU, ERT og AEM til resistivitetmåling i et sterkt anisotrop materiale, ville de tre metodene gi tre forskjellige resultater for den elektriske ledningsevnen. R-CPTU måler i hovedsak den vertikale resistiviteten, AEM den horisontale og ERT en kombinasjon av de to. NGI har undersøkt anisotropien i noen prøver av sensitiv leire, men ingen tydelig anisotropi med hensyn på elektrisk ledningsevne kunne finnes. Generelt vil man forvente anisotropi i alle typer leire og spesielt i leirskifer.



Figur 3.16: Romlig og dybderelatert oppløsning av AEM (øverst) og ERT (nederst) langs en kvikkleireforekomst på E16 Kløfta, strekning Nybakk – Slomarka nær Vorma (Anschütz m.fl. 2015).

(3) Prøveforstyrrelse

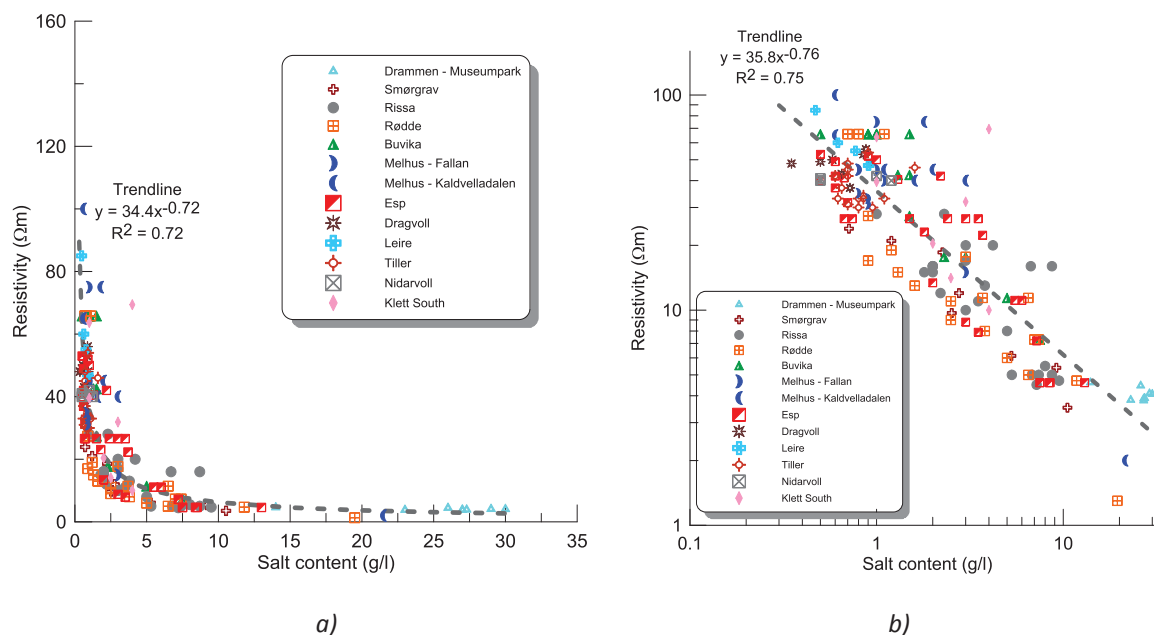
Det har vært vurdert om den lokale omrøringen av leiren rundt R-CPTU sonden kan ha en reduserende effekt på den målte resistiviteten (Söderblom, 1958). I dette studiet er det imidlertid ikke funnet noen systematiske avvik som støtter denne hypotesen.

3.3.5 Korrelasjoner mellom resistivitetsverdier og geotekniske rutineegenskaper

Mens geotekniske rutineundersøkelser gir unike muligheter for identifikasjon av sprøbruddmaterialer, er geofysiske metoder egnet til å gi en oversikt over grunnforholdene med utstrekning av eventuelle sensitive lag. Det burde ikke eksistere tvil over brukspotensialet ved å kombinere geofysikk og geoteknikk i kvikkleireutredninger.

Det er også kjent at grenseverdier for resistivitet i utvasket og salt leire er variabler og kan være forskjellige for hvert prosjekt. Spørsmålet er om det finnes noen entydige korrelasjoner på regional eller nasjonal basis. I dette og tilsvarende prosjekter er det samlet inn en representativ mengde data for å kunne etablere eventuelle korrelasjoner mellom resistivitet og utvalgte laboratoriedata. Resultatene som vises her baserer seg på tidligere arbeid (Long m.fl., 2012 og Donohue m.fl., 2013), men også nye data. Bakgrunnsinformasjon for datasamlingen er delvis vist i Vedleggene A og B.

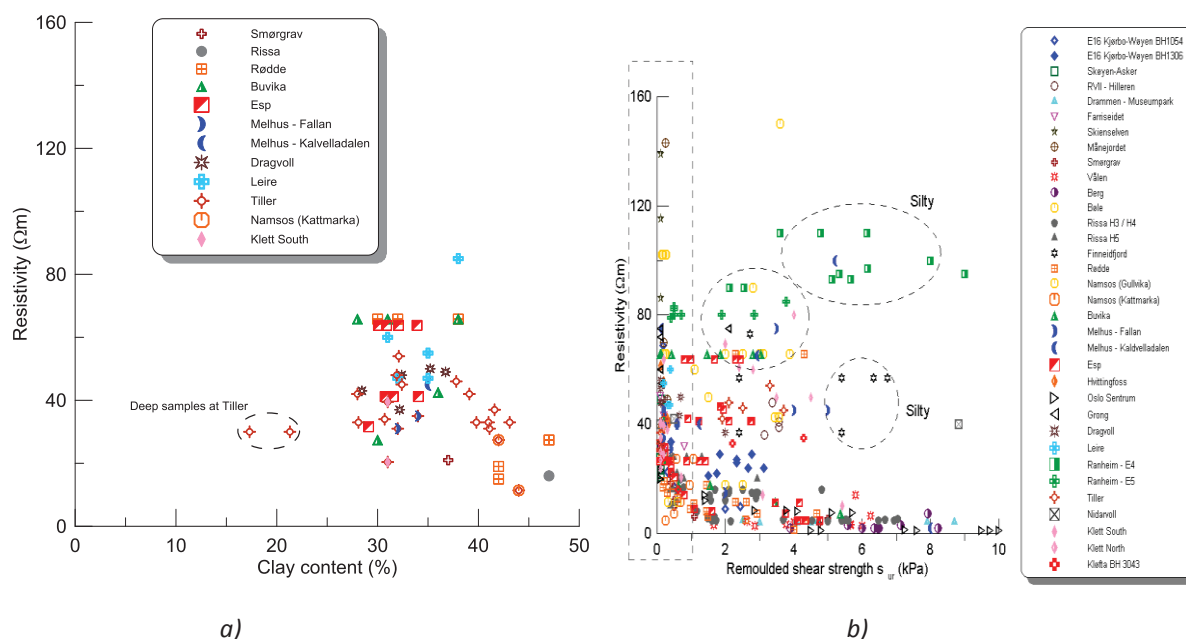
Datamengden er sammensatt av prøvedata fra rutineundersøkelser på i alt 33 lokasjoner i Norge. For hver av disse stedene er det plukket ut resistivitetsverdier fra R-CPTU i dybder der laboriemålte data foreligger, eventuelt også fra ERT-målinger hvis disse var utført mindre enn 5 meter fra prøvene.

3 Anbefalt bruk av aktuelle metoder –
vurdering av muligheter og begrensninger

Figur 3.17: Korrelasjon mellom saltinnhold og målt resistivitet.

a) Aritmetisk plott

b) Dobbel-logaritmisk plott



Figur 3.18: a) Sammenheng mellom leirinnhold og resistivitet for prøver med saltinnhold under 2 g/l.

b) Resistivitet plottet mot omrørt skjærfasthet.

Elektrisk resistivitet er påvirket av jordegenskaper som porøsitet, porevanns-sammensetning, salinitet og leirinnhold. Det er tydelig at saltinnholdet er den viktigste enkeltfaktor for resistiviteten for den type leire som undersøkes her, se Figur 3.17. For lavt saltinnhold (< 1 g/l) spiller også leirinnholdet en rolle (se Figur 3.18 a). Siden saltinnholdet er en bestemmende faktor for sensitiviteten, finner vi også en indirekte korrelasjon mellom resistivitet og omrørt skjærfasthet. Selv om denne observasjonen kan korreleres, kan ikke en grenseverdi som gjelder for alle prøver identifiseres. Korrelasjonen blir også dårligere jo flere ulike lokasjoner som inkluderes i statistikken. Spesielt viser siltholdige prøver variasjoner som viser at resistivitet alene ikke er egnet som identifikasjonsverktøy.

Mens det altså ikke finnes en global grenseverdi eller korrelasjon mellom resistivitet og geotekniske parametre, skal det ikke glemmes at slike korrelasjoner eksisterer for mange undersøkelsesområder. Resistiviteten er bestemt av mange faktorer, som rimeligvis fører til en viss spredning i verdier, se Figurene 3.17 og 3.18. For et aktuell undersøkelsesområde må det derfor innhentes tilleggsinformasjon om hvilke jordegenskaper som mest sannsynlig skaper variasjoner i målt resistivitet.

Resistivetsverdier benyttes i dag for å undersøke eventuell utvasking av leire. En relativt sett økt resistivitet betyr at salt er vasket ut fra leiren, men det betyr ikke nødvendigvis at materialet kan klassifiseres som sprøbruddmateriale. Kjemisk forvitring med utveksling av ioner mellom porevann og kornskjelett kan over tid stabilisere leiren uten at den elektriske resistiviteten påvirkes.

3.4 Vingebooring

3.4.1 Konvensjonell tolkning

Ved tolkning av udrenert skjærfasthet forutsettes det ofte at mobilisering av materialets skjærfasthet er like stor over hele bruddflaten. Udrenert skjærfasthet kan da bestemmes fra følgende formel:

$$c_{uv} = 6T/7\pi D^3 \quad (3.7)$$

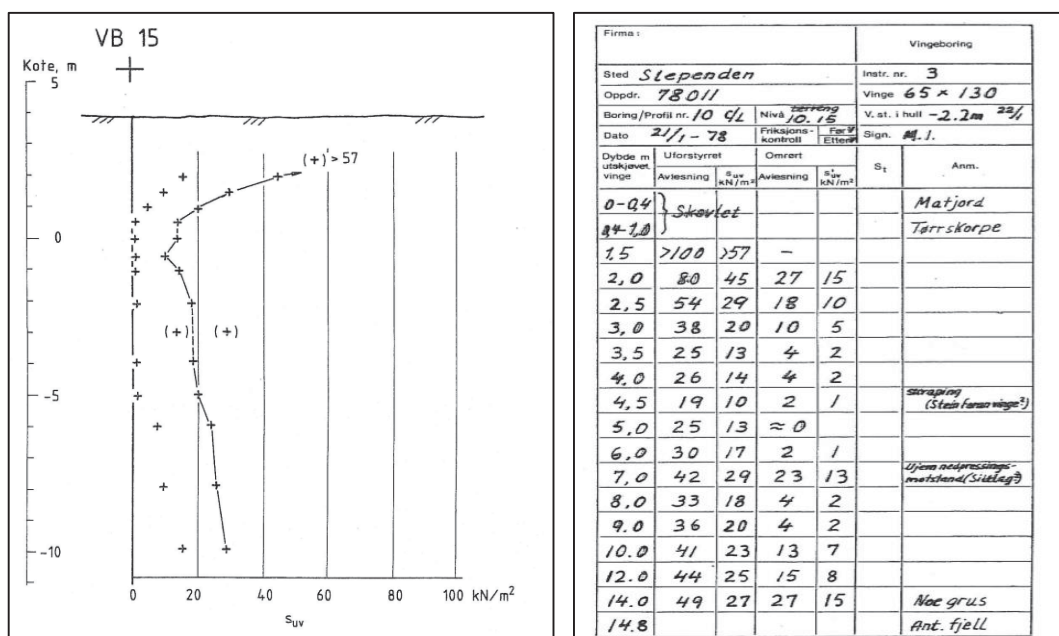
der:

T: målt torsjonsmoment

D: vingediameter

For bestemmelse av intakt udrenert skjærfasthet (c_{uv}) benyttes maksimalt torsjonsmoment og for omrørt skjærfasthet (c_{rv}) benyttes målt residual (rest)torsjonsmoment etter manuell omrøring av materialet. Bruk av denne tolkningsmodellen er konservativ. Det fins andre tolkningsmodeller som er basert på andre antagelser om spenningsfordelingen rundt vingeboret, og som teoretisk kan være mer korrekte.

Et eksempel på opptegning av forsøksresultater er gitt i Figur 3.19.

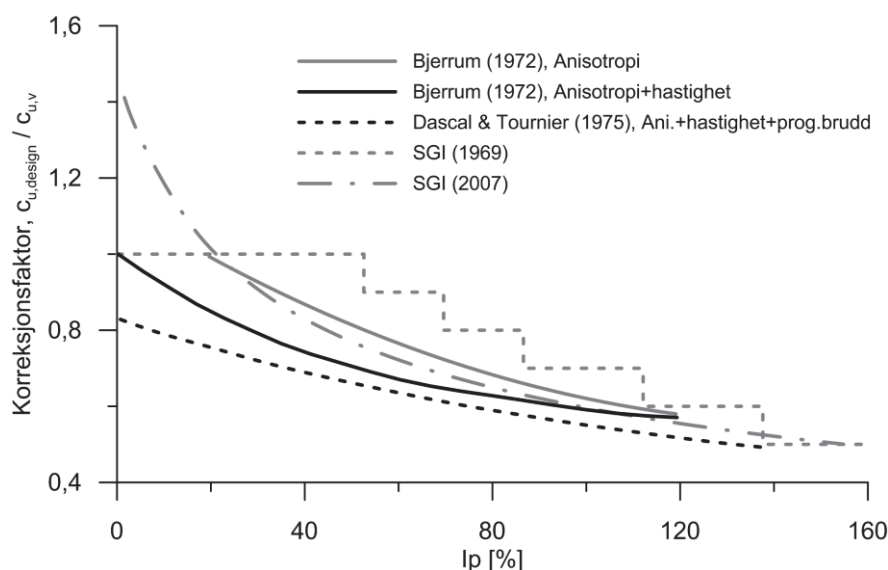


Figur 3.19 Eksempel på feltregistrering og opptegning av vingeboringsforsøk (fra NGF Melding 4).

Udrenert skjærfasthet målt med vingebor er beheftet med flere usikkerheter. Spesielt gjelder dette effekter rundt installasjon av vingebolet, bruddforhold rundt vingen så som geometri, spenningsforhold og progressiv bruddutvikling, samt anisotropiforholdet mellom skjærfastheten på horisontale og vertikale plan. Vingebolet måler i all hovedsak skjærfasthet på et vertikalplan, som for anisotrope leirer ikke vil gi samme motstand som i et horisontalplan. Dette er noe av forklaringen på hvorfor vingebor ofte gir svært lave skjærfasthetsverdier i sensitive, lav-plastiske leirer. Videre utføres vingeborforsøk med en ekvivalent tøyningshastighet som er mange ganger større enn hva som gjøres ved laboratorieforsøk. På grunn av disse forholdene benyttes vanligvis en korreksjonsfaktor (μ) for å justere tolket skjærfasthet fra vingebolet til en skjærfasthet som kan benyttes i geoteknisk dimensjonering, se ligning 3.8.

$$c_u = \mu c_{uv} \quad (3.8)$$

Etterregning av fyllingsbrudd utført av Bjerrum (1972) viste at design basert på udrenert skjærfasthet fra vingebor, som gav materialfaktorer $\gamma_m > 1.0$, faktisk gikk til brudd. Ved å sammenstille dataene kunne en trend med økende materialfaktor for økende plastisitetsindeks bestemmes. Bjerrum antok at de to viktigste faktorene som medførte et korreksjonsbehov for målt skjærfasthet var anisotropi og hastighetseffekter. Han separerte disse to effektene, se Figur 3.20, som også viser noen av de viktigste korreksjonsfaktorene foreslått i litteraturen. Av disse er den originale Bjerrum-korreksjonen en av de mest treffsikre for norske leirer.



Figur 3.20 Et utvalg av korreksjonsfaktorer for udrenert skjærfasthet c_{uv} fra vingebor.

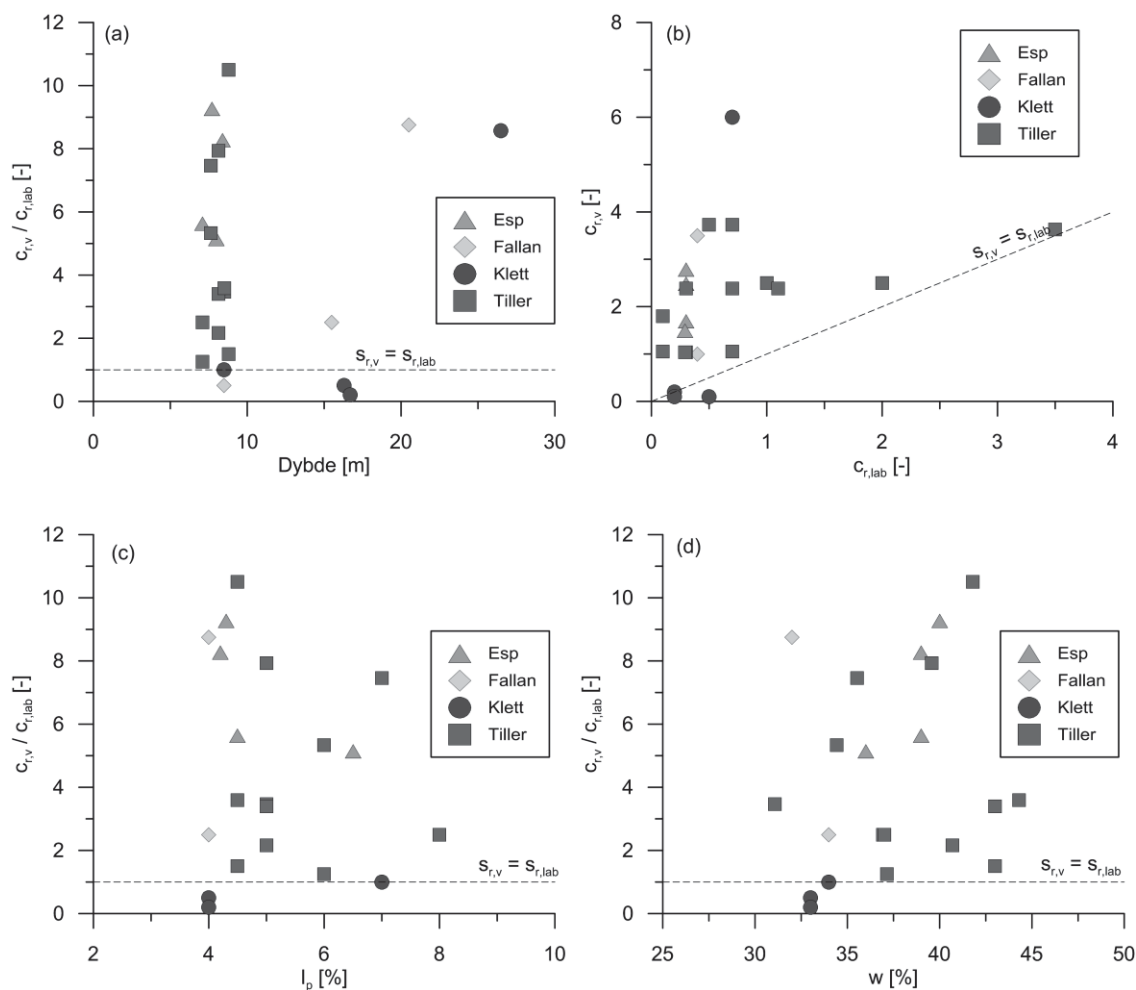
3.4.2 Bestemmelse av omrørt skjærfasthet fra vingebor

Detektering av sensitiv og kvikk leire fra vingeboring er basert på måling av torsjonsmomentet etter fullstendig omrøring av leiren i bruddsonen. Dette gjøres ved å påføre vingeborset 25 hele omdreininger før måling. Når leiren i sonen rundt vingebolet røres om, bygges det opp et lokalt poreovertrykk. I og med at bruddsonen er i størrelsesorden 1 mm tykk (Gylland m.fl., 2013), vil dette poretrykket dissipere relativt raskt, med høyere målt skjærfasthet med tiden som resultat. For riktig måling av omrørt skjærfasthet er det derfor viktig at målingen utføres så snart som mulig etter omrøringen for å unngå lokal drenering i bruddsonen.

Ved bruk av utstyr med slippkobling anbefales det derfor at man rett etter omrøring måler motstanden i jorda og deretter måler friksjon i slippkoblingen. En rotasjon på ca. 5° anbefales for avlesning av

torsjonsmomentet for omrørt leire. 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 vingebor). Kriteriet for bestemmelse av kvikkleire er som ellers en omrørt skjærfasthet på $c_{r,v} < 0,5$ kPa.

Rent teknisk er det utfordrende å måle slike lave skjærfasthetsverdier med vingeboret. Utstyr som måler friksjonsbidraget med en slippkobling kan benyttes, men det kan likevel være utfordrende å skille ut hva som er reelt bidrag fra den omrørte leiren til torsjonsmomentet. Slike resultater er derfor beheftet med betydelig usikkerhet.



Figur 3.21a – d Sammenstilling av sensitivitet fra vingebor og laboratoriemålinger.

Merknad: (a) Forhold mellom omrørt skjærfasthet fra vingeboring og konus som funksjon av dybde. Data hvor moment er målt ved borelegg; (b) Forhold mellom omrørt skjærfasthet fra vingebor og konus som funksjon av vertikal overlaging (dybde). Data hvor moment er målt ved ving; (c) Sammenheng mellom omrørt skjærfasthet fra vingebor og konus; (d) Forhold mellom omrørt skjærfasthet fra vingebor og konus som funksjon av vanninnhold. Figuren er basert på data fra dette studiet og Gylland (2015).

Konvensjonelt påføres og måles torsjonsmomentet på toppen av stangsettet. I overføringen ned til selve vingeboret vil faktorer som skjeve stenger, samt deformasjon i og opplagring av stangsettet føre til at noe av torsjonsmomentet ikke når ned til vingekoret. Typisk er denne friksjonen i størrelsesorden 1-3 Nm. Friksjonen vil øke noe med dybden og også være avhengig av smøring og tilfredsstillende vedlikehold av utstyret. For en omrørt skjærfasthet på 0,5 kPa, og en vingediameter på 65 mm, vil momentbidraget fra omrørt skjærfasthet være ca. 0,5 Nm. Dette er lavere enn friksjonsbidraget og utfordrer dermed oppløsningen til utstyret. Mens det for måling av intakt udrenert skjærfasthet ofte

oppgis en nødvendig måleoppløsning på ± 1 kPa, er det nødvendig med en oppløsning som er minst 10 ganger bedre for måling av omrørt skjærfasthet ($\pm 0,1$ kPa). Dette er normalt ikke oppnåelig med dagens utstyr, men elektriske vingebor er dog bedre enn de manuelle. For utstyr som ikke tillater måling av friksjonen anbefales ikke å utføre bestemmelser av omrørt skjærfasthet i kvikk og sensitiv leire.

Totalt sett betyr forholdene knyttet til måleusikkerhet og lokal konsolidering at det ikke nødvendigvis er fullt samsvar mellom omrørt skjærfasthet målt med vingebor og konusverdier fra laboratoriet. 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 betydelig, særlig i kvikkleirer, og dette er ikke-konservativt. I denne sammenhengen skal man også erkjenne at konusverdiene for skjærfasthet er empirisk korrelert blant annet mot vingeborforsøk utført i laboratoriet, og således basert på et datagrunnlag som i seg selv har betydelig spredning.

Figur 3.21 a-d viser en sammenstilling av omrørt skjærfasthet målt med vingebor og konus i laboratoriet for forsøksfeltene Esp, Tiller, Klett og Fallan. Figur 3.21 (a) viser tydelig at vingeborforsøk med måling av torsjonsmomentet på topp av borstengene, overestimerer omrørt skjærfasthet i sprøbruddmaterialer for dybder $> 10-15$ m. Noen få datapunkter viser høyere registrert omrørt skjærfasthet målt i laboratoriet, men de fleste punktene viser motsatt forhold. Figur 3.21 (c) indikerer med noe usikkerhet at det i hovedsak er ved lave verdier av omrørt skjærfasthet at avviket mellom vingebor og konusdata er størst. Dette er forventet med tanke på at friksjonsbidraget relativt sett blir mindre for høyere omrørt skjærfasthet. Effekter knyttet til konsolidering av poreovertrykk kan også bli mindre ved økende omrørt skjærfasthet.

Det er gjort forsøk på å finne trender som kan belyse om andre enkeltfaktorer kan forklare variasjon i avvik mellom omrørt skjærfasthet fra vingebor og fra konusforsøk. Ingen klare tendenser er imidlertid identifisert, bortsett fra en trend med økende avvik for økende vanninnhold som vist i Figur 3.21 (d). Trenden er uklar, men kan ha sammenheng med at økende vanninnhold ofte betyr bløtere forhold, og dermed lavere skjærfasthet med sterkere påvirkning av poretrykksdissipasjon, samt større forstyrrelser under nedpressing av vingeboret.

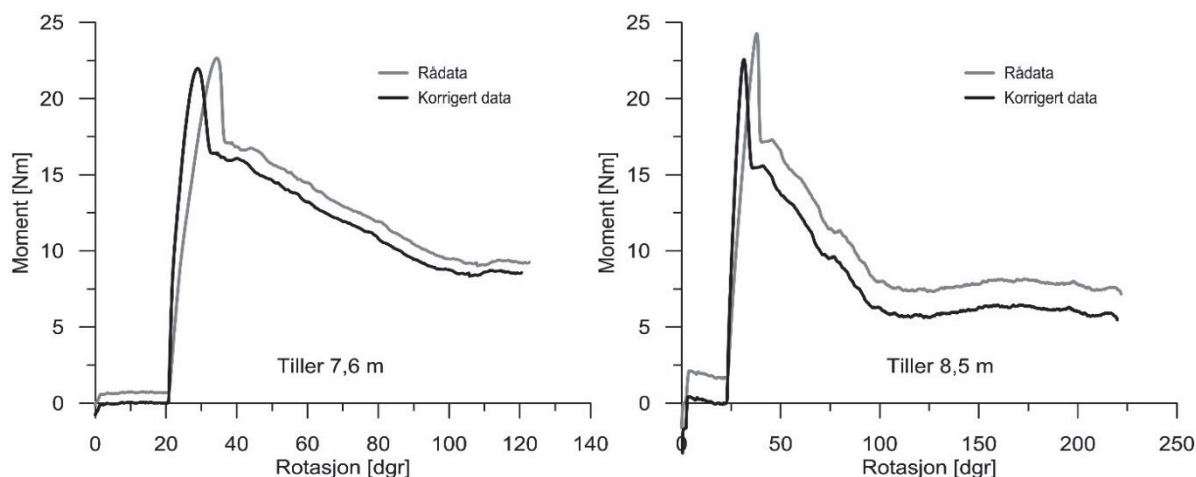
Måling av omrørt skjærfasthet er en av styrkene til vingeboret når det gjelder detektering av sprøbruddmaterialer. Samtidig så er det klart at metoden har klare begrensninger ved måling av denne verdien, med en nøyaktighet som tilsvarende konusforsøk i laboratoriet. En stor del av denne begrensningen ligger i usikkerheter knyttet til friksjon og andre effekter i utstyret hvis torsjonsmomentet måles på topp av borstengene. For måling av omrørt skjærfasthet i sensitiv og kvikk leire anbefales derfor å benytte vingeborutstyr som måler moment og rotasjon nede ved selve vingeborset. Slikt utstyr finnes kommersielt tilgjengelig i dag, og nye konsepter er for tiden også under utvikling. Bruk og erfaring med slikt utstyr vil kunne bidra til å forbedre oppnådde resultater hva angår omrørt skjærfasthet fra vingeborforsøk.

3.4.3 Arbeidskurve fra vingeborforsøk

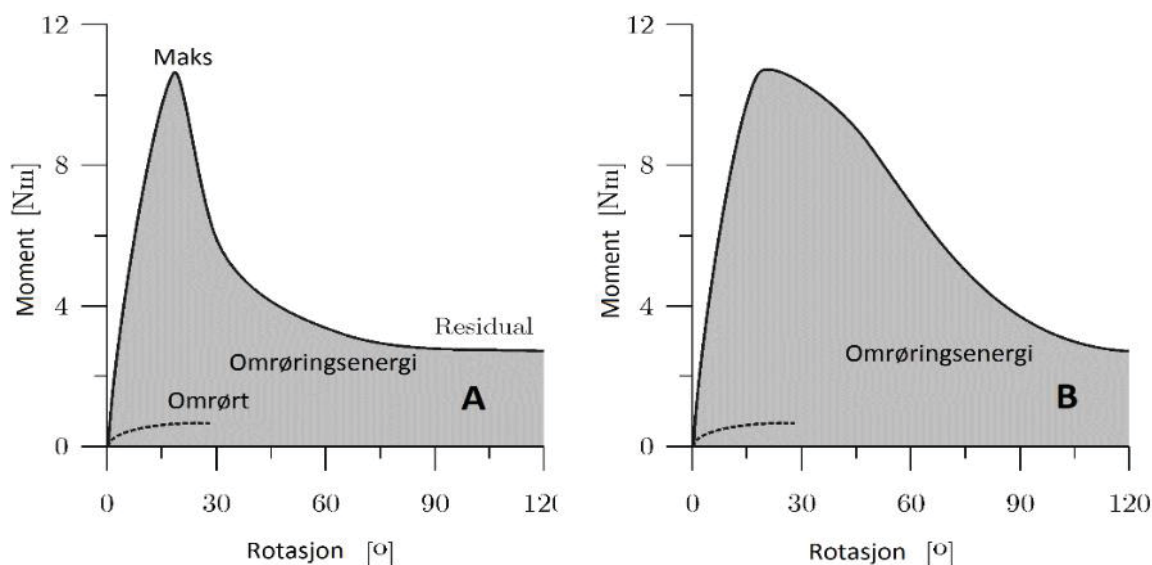
Med arbeidskurve menes en måling av hele forløpet for rotasjon og torsjonsmoment i et vingeborforsøk, se Figur 3.22. Ved bruk av elektrisk vingebor gjøres denne målingen automatisk i forsøket. Målt torsjonsmoment kan korrigeres for friksjon og rotasjon i stangsettet før tolkning av skjærfastheten. For at en slik kurve skal være til nytte bør forsøket kjøres til minimum 90° rotasjon av selve vingen slik at en full bruddsirkel er definert. Erfaringer med forsøk kjørt til minst 360° rotasjon viser at arbeidskurven er tilnærmet flat etter 90° rotasjon.

Arbeidskurven fra et vingeborforsøk sier noe om hvor mye arbeid som skal til for å omrøre materialet. Materialer som kollapser lett vil vise et bratt tap av fasthet etter at maksimal skjærfasthet er oppnådd, mens et seigere materiale vil ha en slakere kurve (se case A og B i Figur 3.23). Begge disse materialene kan til slutt oppnå samme residualverdi etter 90° rotasjon.

Det er i denne sammenhengen verd å merke seg at residual fasthet 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 drenering fra bruddsonen rundt vingeboeret. Dette fører igjen til en rateavhengighet av arbeidskurven. Dette understreker viktigheten av konsistent utførelse av vingeboring hvis tolkning og vurdering av arbeidskurven skal gjennomføres.



Figur 3.22 Eksempler på arbeidskurver fra vingeborforsøk, inkludert korreksjon for friksjon og stangrotasjon.



Figur 3.23 Idealiserte arbeidskurver fra vingeboring. Eksemplene A og B har samme maksimum, residual og omrørt skjærfasthet, men arbeidet som skal til for å nå disse verdiene er forskjellig.

En tolkning av arbeidskurven er spesielt relevant ved kartlegging av sprøbruddmaterialer og vurdering av risiko for kvikkleireskred. Med hensyn på utvikling og utbredelse av et retrogressivt (bakovergrepene) skred er det flere faktorer som er avgjørende. For eksempel må leiren ha en svært lav omrørt skjærfasthet, og det må være nok energi i selve skredutløsningen til at materialet blir tilstrekkelig omrørt. I denne sammenhengen er det relevant å benytte arbeidskurven for å vurdere

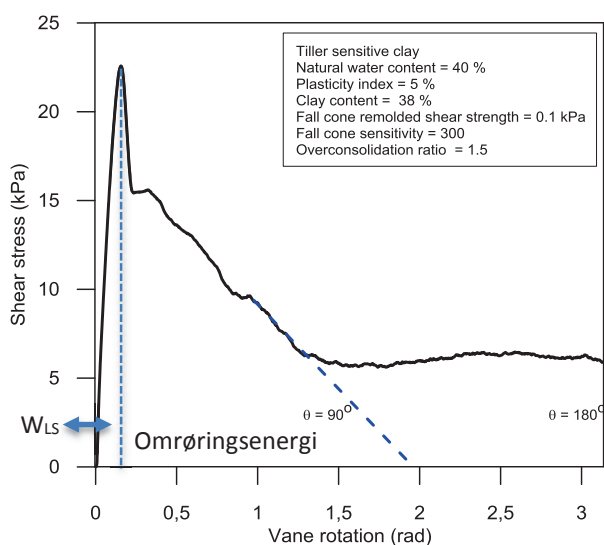
hvor mye arbeid som må til for å røre om leiren. Flere indikatorer er vurdert for å estimere dette, for eksempel omrørt skjærfasthet, flyteindeks og sensitivitet, men disse parameterne fanger ikke direkte den styrende mekanismen. For å regne ut og evaluere nødvendig omrøringsenergi kan man benytte tilsvarende fremgangsmåte som Tavenas m.fl. (1983) og Thakur m.fl. (2015). Omrøringsenergien regnes ut som arealet under kurven fra maksimal skjærfasthet og til ønsket omrøringsnivå. Denne størrelsen normaliseres med arbeidet som skal til for å mobilisere maksimal skjærfasthet i starten av forsøket (W_{LS}). W_{LS} er dermed arealet under kurven i mobiliseringsfasen frem til brudd som illustrert i Figur 3.24. Man får da følgende dimensjonsløse uttrykk:

$$W_N = \text{Omrøringsenergi} / W_{LS} \quad (3.9)$$

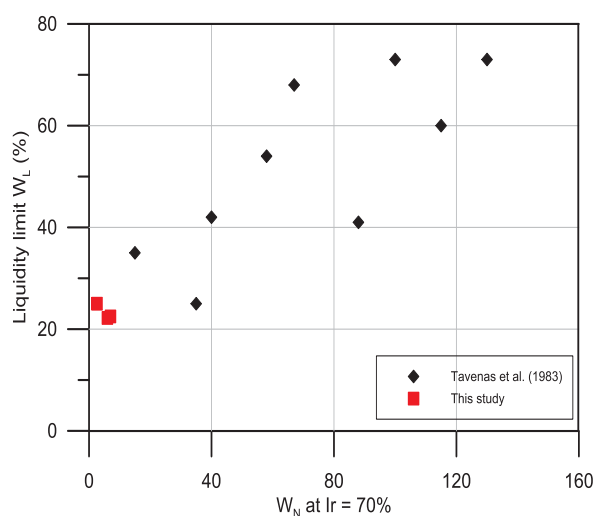
For vingeboforsøk vil det være naturlig å benytte målt omrøringsenergi ved 90° rotasjon. For å beskrive grad av omrøring kan omrøringsindeksen benyttes:

$$I_r(\theta) = (c_{UV} - c_v(\theta)) / (c_{UV} - c_{rv}) \quad (3.10)$$

$c_v(\theta)$ angir skjærfasthet ved ønsket grad av rotasjon. For full omrøring er $I_r = 100\%$. For å tolke I_r fra vingeboforsøk, der motstanden som regel flater ut etter 90° , kan en ekstrapolering som vist i Figur 3.24 benyttes. Utflatingen ved 90° skyldes effekter relatert til lokal drenasje i bruddsonen, og er ikke representativ for den reelle omrørte skjærfastheten.



Figur 3.24 Arbeidskurve fra vingeboforsøk utført på Tiller (8,5 m dypde). Definisjon på omrøringsenergi og W_{LS} er inkludert. Fra Thakur m.fl. (2015).



Figur 3.25 Sammenstilling av omrøringsenergi fra vingeboforsøk med data for canadiske leirer. Fra Thakur m.fl. (2015).

Tavenas m.fl. (1983) foreslo at faren for store retrogressive skred er størst i materialer som har W_n under 40 og I_r over 70. Tolkning av utførte vingeboforsøk og data fra canadiske leirer er vist i Figur 3.25, der resultatene fra dette studiet faller inn i datatrenden. Figuren viser at nødvendig omrøringsenergi uttrykt ved omrøringsindeksen I_r ved 70 % av full omrøring øker for økende flytegrense w_i . Det vil kreve et betydelig arbeid å etablere en fullstendig oversikt for norske forhold,

men dette eksemplet viser hvordan arbeidskurve og beregnet omrøringsenergi fra vingeborforsøk kan tolkes og benyttes for å evaluere skredkonsekvens i et kartleggingsperspektiv.

3.4.4 Oppsummering

Det er for tiden fornyet interesse for bruk av elektrisk vingebor i geotekniske undersøkelser, spesielt innen kvikkleirevurderinger. Det må imidlertid dokumenteres at bruk av metoden gir pålitelige resultater, og at oppnådde data forstås og brukes riktig. Det bør derfor samles mer erfaring med bruk av metoden, både med hensyn på utstyrvalg, prinsipp for måling av torsjonsmoment (på overflaten eller nær ving), eventuell dybdeavhengighet og forbedret prosedyre for utførelse. Dagens kunnskap tilsier at det tradisjonelle manuelle vingeboret, samt elektriske vingebor der torsjonsmomentet måles ved overflaten, ikke er godt egnet for detektering av kvikkleire.

Selv med sine ulemper har vingeboret flere sterke sider som kan utnyttes i forbindelse med kvikkleirekartlegging og relaterte problemstillinger. Med videre utstyr- og prosedyreutvikling kan vingeboret igjen bli et verdifullt verktøy for detektering og klassifisering av sprøbruddmaterialer. En oppsummering av metodens detekteringsprinsipper, muligheter og begrensninger er gitt i Tabell 3.10.

En oppsummering av vingeborets anbefalte bruksområder er gitt under:

- *Uforstyrret udrenert skjærfasthet*
 - Plastisitet $I_p > 10\%$
 - Moment måles ved overflate eller ved ving
- *Omrørt udrenert skjærfasthet*
 - $c_{ur} > 5$ kPa: Moment måles ved overflate eller ved ving
 - Kvikkleire: Moment måles ved ving.
 - Det er mulig å oppnå representative målinger med annet utstyr ved dybder grunnere enn 10 m. I så fall er det avgjørende at utstyret er rent og godt smurt for å minimere friksjon.
 - Må verifiseres med videre arbeid
- *Omrøringsenergi*
 - Moment måles ved overflate eller ved ving
 - Må verifiseres med videre arbeid

Tabell 3.10 Oppsummering – detektering av sprøbruddmateriale fra vingeboring.

Detekteringsprinsipp	Positive forhold	Negative forhold
In situ måling av omrørt skjærfasthet Estimering av omrøringsenergi fra arbeidskurve	Direkte måling av klassifiseringsparameter uten empiriske tolkningsmodeller og korrelasjoner Muliggjør vurdering av fare for retrogressiv skredutvikling og utløpspotensiale gjennom tolkning av arbeidskurven	Utstyr hvor torsjonsmomentet måles ved overflaten er ikke egnet for detektering av kvikkleire. Slikt utstyr kan gi for høye c_{ur} -verdier, spesielt under ca. 10 m dybde Utførelse med utstyr som måler moment ved selve vingen anbefales, og synes å gi verdier upåvirket av dybde. En slik anvendelse er enda i tidligfasen og videre utvikling er nødvendig for å kunne gi sikre konklusjoner

3.5 Laboratoriemålinger

3.5.1 Generelt

Selv om det er gjort fremskritt i påvisning av mulig sprøbruddmateriale i ulike typer feltundersøkelser, er laboratorieforsøk fremdeles den sikreste metoden for påvisning av kvikk og sensitiv leire. Laboratorieforsøk gjør det mulig å kontrollere forutsetningene for testing, samtidig som man får observert og analysert materialet og dets sammensetning. Både på kort og lang sikt vil derfor laboratoriebestemmelse med konus på uforstyrret og omrørt materiale være den sikreste bestemmelsen av sprøbruddmateriale, men dette krever forholdsvis dyr og omfattende prøvetaking i et materiale som er vanskelig å prøveta.

3.5.2 Rutineundersøkelser i laboratoriet

Ikke alle rutineundersøkelser er like godt egnet til å gi informasjon om leirens egenskaper i forhold til sprøbruddklassifisering. Imidlertid kan noen rutineegenskaper benyttes til å forklare målte resistivetsverdier, men sammenhengen mellom geotekniske, fysiske og elektriske egenskaper i leire er ikke fullt ut forstått ennå.

Vanninnhold w : Gir ingen direkte informasjon om sprøbruddmateriale, men i kvikkleirer er ofte det naturlige vanninnholdet w høyere enn flytegrensen w_l .

Densitet ρ : Gir ingen direkte informasjon om sprøbruddmateriale.

Udrenert skjærfasthet c_u : Gir ingen direkte informasjon om sprøbruddmateriale, men udrenert skjærfasthet er lavere for kvikkleirer enn andre leirer under ellers like betingelser. Prøveforstyrrelse og lagringstid kan påvirke den udrenerte skjærfastheten, slikt at sensitiviteten blir lavere.

Omrørt skjærfasthet c_r : Definisjon av kvikkleire og sprøbruddmateriale i Norge er helt eller delvis basert på verdien av omrørt skjærfasthet ($c_r \leq 0,5$, $c_r \leq 2,0$ kPa). Bestemmelsen av omrørt skjærfasthet i konusforsøk på omrørt materiale blir benyttet for verifikasjon av både kvikkleire ($c_r < 0,5$ kPa) og sprøbruddmateriale ($S_t > 15$, $c_r < 2,0$ kPa).

Merknad: Ved lang lagringstid kan egenskapene for prøvematerialet endre seg på grunn av interaksjon mellom prøven og emballasjen (prøvesylindren). Blant annet er det erfart at omrørt skjærfasthet øker med økende lagringstid, noe som vil påvirke kvikkleirebestemmelsen.

Sensitivitet S_t : Sensitiviteten for sprøbruddmateriale er som regel høy på grunn av lav omrørt skjærfasthet c_r . Sensitiviteten ($S_t = c_u/c_r$) er likevel ikke en entydig og sikker størrelse for bestemmelse av kvikkleire og annet sprøbruddmateriale ettersom prøveforstyrrelse kan påvirke den udrenerte skjærfastheten c_u betydelig. Det er derfor ikke anbefalt å etablere korrelasjoner basert på sensitiviteten, og den omrørte skjærfastheten c_r bør normalt foretrekkes.

Flytegrense w_l : De geologiske prosessene som danner kvikk og sensitiv leire påvirker også noen andre geotekniske parametere, blant annet flytegrensen w_l . Prosessene som bidrar til å svekke forbindelsen mellom jordpartikler fører til lavere vanninnhold i flytegrensetilstanden. Verdien i seg selv er imidlertid ingen indikator, og flytegrensen må derfor alltid sammenlignes med det naturlige vanninnholdet for å kunne vurdere forholdene ($w/w_l > 1$; flyteindeks $I_L > 100$ %). Andre forhold enn saltutvasking kan imidlertid også påvirke flytegrensen, for eksempel høyt siltinnhold eller høyt organisk innhold. I Canada benyttes i større grad flyteindeksen I_L for bestemmelse av kvikkleire.

Plastisitetsgrense w_p : Leirens plastisitetsgrense gir ingen direkte informasjon om kvikkleirestatus. Det er også en vanskelig og tidkrevende egenskap å bestemme i kvikkleirer.

Plastisitet I_p : Plastisiteten I_p er ofte svært lav (5-10 %) i kvikkleirer på grunn av lave verdier for flytegrensen. Like lave plastisitetsverdier kan imidlertid observeres i leire som ikke er kvikk. Utover det gir ikke plastisiteten noen direkte informasjon om kvikkleirestatus.

Kornfordeling: Leirens kornfordeling (leirinnhold) gir ingen informasjon om kvikkleirestatus.

3.5.3 Saltinnholdsbestemmelse

Porevannets saltinnhold blir ofte trukket frem som den viktigste faktoren for å forklare kvikk oppførsel for marine leirer. I dag er det generelt akseptert at porevann med saltkonsentrasjon mindre enn ca. 2 g/l er en nødvendig forutsetning for at utvasket marin leire skal kunne omdannes til kvikkleire. Likevel finnes det eksempler på marin leire med veldig lavt saltinnhold som ikke viser kvikk oppførsel, sannsynligvis på grunn av forvittringsprosesser og forhøyet innhold av spesielle ioner som for eksempel magnesium- eller karbonationer (CO_3) i porevannet. Resultater fra utførte geokjemiske analyser viser at utvaskede leirer som likevel ikke var kvikke/sensitive, hadde et forhøyet magnesium- og karbonatinnhold (CO_3), se for eksempel Løfroth m.fl. (2011). Dette innholdet har sannsynligvis blitt utvekslet fra leirmineralenes overflate gjennom forvittringsprosesser. På den annen side finnes det eksempler på leire med saltinnhold høyere enn 2 g/l som viser kvikk oppførsel.

Saltinnhold i porevannet kan måles med forskjellige metoder. Kjemiske laboratorieanalyser kan både identifisere hvilke elektrolytter som finnes oppløst i porevannet og kvantifisere disse. Andre laboratorier som er utstyrt for å måle vannets ledningsevne beregner saltinnholdet direkte fra ledningsevne målingene. Begge metoder har både fordeler og ulemper. Kjemisk analyse av porevannet er en kostbar og tidskrevende metode, men gir en komplett oversikt over hvilke salter som er oppløst. Ledningsevne målinger er vesentlig billigere og raskere, men saltinnholdet må da beregnes fra korrelasjoner mot kjente saltoppløsninger.

Porevannets ledningsevne kan også oppnås ved korrelasjoner basert på saltanalyser. Den siste metoden er åpenbart mer utsatt for feilkilder, idet forskjellige elektrolytter gir forskjellige bidrag til porevannets ledningsevne. Korrelasjoner er vanligvis utarbeidet fra kunstige løsninger (f.eks. NaCl i vann) eller sjøvann med kjent saltinnhold. Vannets ledningsevne vil også være avhengig av temperaturen i løsningen.

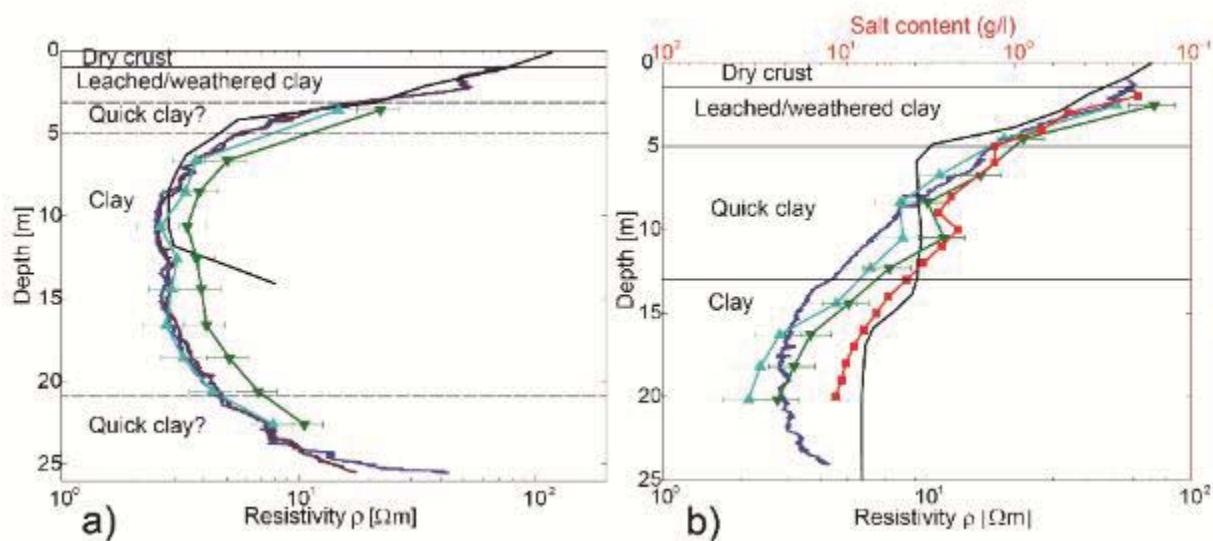
Porevannets saltinnhold gir ingen direkte informasjon om kvikkleirestatus, men er uansett en parameter som er interessant å måle i forbindelse med grunnundersøkelser i kvikkleireområder. Sammenhengen mellom saltinnhold og målt resistivitet er dessuten veldig tydelig over en viss grense (ca. 1 g/l), og måling av saltinnholdet kan derfor gi et bedre grunnlag for tolkning av resistivitet målinger. Under denne grensen er det ingen etablert sammenheng, og andre påvirkningsfaktorer overtar.

3.5.4 Resistivitet måling i laboratoriet

Nøkkelverdien av geofysiske målinger i kombinasjon med klassiske geotekniske undersøkelser er ekstrapoleringen fra boringer til profiler og områder. På denne måten kan man etablere korrelasjoner mellom geotekniske og geofysiske egenskaper. Siden både overflate- og nedhullsmålinger har sine usikkerheter (se kap 3.3.4), er det noen ganger hensiktsmessig å måle den elektriske resistiviteten direkte på prøvematerialet. Resistivitet måling i laboratoriet kan, bedre enn i felt, belyse om leiren er anisotrop og/eller polariserende, se eksempel på resultater i Figur 3.26.

Siden resistivitet målinger ikke har hovedfokus i geotekniske laboratorier, benyttes en forholdsvis enkel måleutrustning til dette formålet, se Figur 3.27. Det gjennomføres en motstandsmåling på en prøve med definerte fysiske mål, og resistiviteten beregnes deretter basert på målt motstand og

geometri. Denne fremgangsmåte innebærer imidlertid en betydelig usikkerhet i målt resistivitet, der det er rapportert opp til 20% standard avvik (se NGI rapport 20091013-00-24-R).



Figur 3.26 Sammenligning mellom R-CPTU resultater (blå og lilla) mot horisontal og vertikal resistivitet målt i laboratoriet (rød, grønn og lyseblå), samt ERT data (sort).



Figur 3.27 Resistivetsmåling i laboratoriet. Enkelt oppsett for måling av elektrisk motstand og elektrisk anisotropi i en prøve.

For å oppnå en mer nøyaktig resistivetsmåling og i tillegg studere frekvensavhengigheten, kan det benyttes et måleoppsett tilsvarende det som brukes i miljøgeofysiske laboratorier. Der benyttes en 4-elektroders anordning, tilsvarende utførelse av ERT-målinger, for å unngå elektrodepolarisasjon og feil på grunn av ukjent overgangsmotstand.

3.5.5 Oppsummering

Laboratorieforsøk på opptatte prøver med bruk av uforstyrret og omrørt konus er den eneste sikre metode for påvisning av kvikk og sensitiv leire. Selv om prøvene er forstyrret, vil den omrørte skjærfastheten være representativ ved standardisert utførelse av forsøket. Sensitiviteten vil imidlertid være påvirket av prøveforstyrrelse, og er derfor en noe mer usikker størrelse for klassifiseringsformål.

Det er også mulig å utføre andre typer forsøk på opptatt prøvemateriale, blant annet saltinnhold av porevann, mineralogi og ioneinnholdet i porevannet. Dette er imidlertid spesialforsøk som bare unntaksvis gjennomføres i geotekniske laboratorier.

Så langt har det i liten grad vært gjennomført resistivetsmålinger i laboratoriet, men dette ser nå ut til å endre seg. Det å kunne måle resistiviteten under kjente og dokumenterbare grensebetingelser i laboratoriet synes å være nødvendig for å få mer innsikt i resistiviteten som fysisk egenskap, noe som igjen kan forbedre tolkningen av resistivetsmålinger utført i felt.

En oppsummering av muligheter og begrensninger for aktuelle laboratorieforsøk er vist i Tabell 3.11.

Tabell 3.11 Oppsummering – påvisning av sprøbruddmateriale fra laboratorieundersøkelser.

Detekteringsprinsipp	Positive forhold	Negative forhold
Bestemmelse av omrørt skjærfasthet i konusforsøk.	Sikker og rask bestemmelse av kvikk og sensitiv leire.	Krever opptak av prøver med tilstrekkelig kvalitet for laboratoriebestemmelse av sensitivitet.
Indikasjon på kvikkleire ved at flytegrensen w_l er større enn det naturlige vanninnholdet w .	Bestemmelse av omrørt skjærfasthet krever ikke uforstyrret prøvemateriale.	Vanskelig å ta prøver i kvikke og sensitive leirer. Dyr og tidkrevende teknikk.
Indikasjon på sensitiv eller kvikk leire ved at saltinnholdet som regel er < 2 g/l.	Gir mulighet for visuell vurdering av opptatt materiale.	
Mulig å måle resistivitet i laboratoriet. Gir muligheter for å måle resistiviteten under kjente og dokumenterbare grensebetingelser.	Gir mulighet for full klassifisering og identifisering av materialet.	

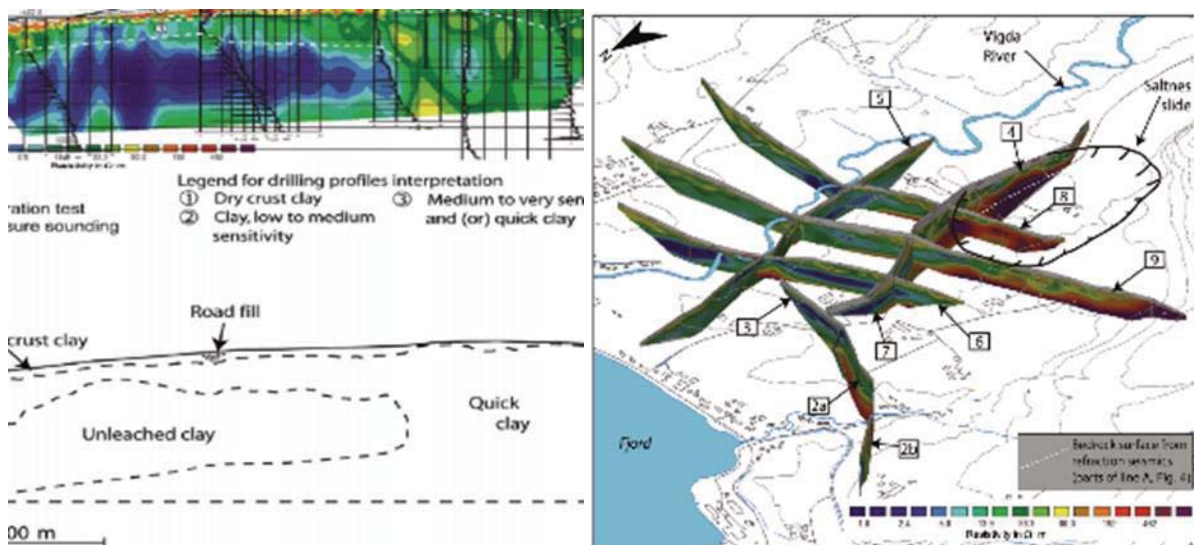
4 Strategi for grunnundersøkelser i kvikkleireområder

En kombinasjon av geofysiske og geotekniske metoder er i dag blitt vanligere ved gjennomføring av grunnundersøkelser, spesielt i større prosjekter. Ved integrerte målinger kan geoteknikere og geofysikere sammen avgjøre hvor sonderinger, in situ målinger og prøvetaking kan plasseres mest hensiktsmessig når resultater fra de geofysiske undersøkelsene er tilgjengelige. Denne praksisen gir fordeler når det gjelder strategisk plassering av boringene, samt at tolkning av resultatene blir sikrere både for geoteknikere og geofysikere. Kost-nytteverdien for grunnundersøkelsen kan da i mange tilfeller forbedres og plassering av undersøkelsespunktene optimaliseres.

Bruk av resistivetsmålinger for påvisning av mulige kvikkleireforekomster er godt egnet i forbindelse med kartlegging av grunnforholdene i større prosjekter, se Figur 4.1. Med ERT kan man for eksempel dekke vegtraséer på forholdsvis kort tid, der man kan påvise kritiske områder som trenger detaljerte geotekniske undersøkelser. I noen tilfeller kan også luftbårne resistivetsmålinger være aktuelle (Airborne Electromagnetic Measurements AEM) for å påvise områder med løsmasser og mulige forekomster av sprøbruddmateriale i en større skala.

Det finnes dog noen områder der resistivetsmålinger ikke kan utføres på grunn av topografiske eller andre begrensninger, der strømførende kabler i grunnen er et eksempel på støykilde som kan påvirke

målingene. I urbaniserte områder kan det derfor være vanskelig eller umulig å utføre resistivitetsmålinger av høy kvalitet. Her kan imidlertid R-CPTU være en praktisk løsning for nedhulls måling i enkeltpunkter.



Figur 4.1 Resistivetsprofil med fence-diagram og resultater fra geotekniske borer. Eksempel på tolkning av lengdeprofil med tilhørende geologisk grunnforholdsmoell. E39, Buvika, Sør-Trøndelag (Solberg m.fl., 2008).

Resistivetsmålinger har potensiale til å skille utvasket marin leire fra saltholdig marin leire, og kan benyttes til å påvise barrierer av ikke-sensitivt materiale i grunnen, for eksempel oppstikkende berghorisonter, mektige sand- og gruslag eller kontinuerlige lag av ikke-sensitiv leire. Denne informasjonen vil være veldig verdifull ved skredvurderinger, blant annet for å kunne bedømme potensielle løsn- og utløpsområder for skredmasser fra et progressivt/retrogressivt (forovergripende/bakovergripende) kvikkleireskred. Kombinasjonen av geofysiske og geotekniske grunnundersøkelser kan i tillegg gi informasjon om utstrekning og mektighet av kvikkleirelagene over hele området. Når ERT- målinger er «kalibrert» mot geotekniske data, vil geoteknikere ha et meget godt grunnlag for geotekniske utredninger og vurderinger.

For å sammenfatte mulighetene ved gjennomføring av kombinerte grunnundersøkelser er det foreslått en anbefalt strategi for større grunnundersøkelser i områder med innslag av kvikke og sensitive leirer:

- **Resistivetsmålinger utføres fordelaktig i et tidlig stadium av kartleggingen**

- ✓ Vanlig kartstudie utføres i forkant av resistivetsmålingene, eventuelt i kombinasjon med undersøkelser fra luft (AEM), for å legge riktig strategi for ERT og innledende geotekniske borer. AEM synes å ha omtrent samme potensiale for påvisning av utvasket leire som ERT, og passer for kartlegging av større områder og trasékorridorer.
- ✓ ERT egner seg også godt i område- og trasékartlegging, samt i terreng med vanskelig tilgjengelighet for borerigger, også i mindre prosjekter.

- **Resultater fra ERT/AEM kan benyttes til planlegging av geoteknisk sonderingsprogram**

- ✓ Konvensjonelle sonderinger gjennomføres i rutenett eller langs traséer basert på informasjon fra ERT/AEM
- ✓ CPTU/R-CPTU og in situ målinger utføres i strategiske nøkkelpunkter, basert på informasjon fra ERT/AEM

- ✓ R-CPTU bør benyttes i alle borepunkt med CPTU hvis man disponerer utstyret, da metoden kun krever marginal tilleggstid i forhold til vanlig CPTU
- ✓ Utførelse av R-CPTU kan gi et utfyllende og mer detaljert bilde av kvikkleireforekomstene, selv om resistiviteten alene ikke er tilstrekkelig for sikker påvisning.
- ✓ R-CPTU kan også benyttes til å forbedre tolkning av ERT-resultater ved å benytte betinget inversjon i prosessering og tolkning av data (kjent lokal resistivitet)
- **Ved utførelse av CPTU/R-CPTU må total nedpressingskraft måles**
 - ✓ Gir mulighet for bestemmelse av stangfriksjon og friksjonsgradient med mulig identifikasjon av lag med kvikkleire/sprøbruddmateriale. Dette krever ingen tilleggstid i forhold til vanlig CPTU, men loggeprogrammet må være forberedt for måling av totalkraft
- **Prøvetaking utføres i utvalgte punkter for verifikasjon av kvikkleire/sprøbruddmateriale**
 - ✓ Lokalisering av prøvetakinger baseres på resultater fra ERT, sonderinger og CPTU/R-CPTU
 - ✓ Konusforsøk på omrørt materiale i laboratoriet er fremdeles den viktigste og eneste sikre metode for verifisering av kvikkleire/sprøbruddmateriale
- **Undersøkellesprogrammet kan også inkludere utførelse av forsøk med elektrisk vingebor**
 - ✓ Kan benyttes til vurdering av udrenert skjærfasthet, omrørt skjærfasthet og arbeidskurve (NB! Vær oppmerksom på begrensningene beskrevet i kap. 3.4.4)

Vedlegg C beskriver eksempler på grunnundersøkelser der det er lagt stor vekt på kombinasjon av innledende geofysiske oversiktsmålinger og mer detaljerte geotekniske boringer. Vedlegg C1 beskriver kort grunnundersøkellesprogrammet for ny E16 Kløfta, parsell Nybakk - Slomarka, mens vedlegg C2 omhandler utredning av geotekniske forhold og skredfare langs Göta älv i Sverige. Begge eksemplene viser hvordan geofysiske metoder kan supplere de mer tradisjonelle geotekniske undersøkelsene.

En oversikt over de ulike metodene, som viser hvordan både geofysiske og standard geotekniske metoder kan benyttes i ulike prosjekter, er vist i flytskjema i Figur 4.2. Denne oversikten kan benyttes som et utgangspunkt for planlegging av en grunnundersøkelse. Omfang og kompleksitet av en grunnundersøkelse varierer fra prosjekt til prosjekt. Saksbehandlers skjønn og vurdering må derfor ligge til grunn for endelig grunnundersøkelse, der valg av metoder påvirkes av en rekke prosjektspesifikke faktorer så som prosjektets størrelse og type, beliggenhet og naboforhold, foreliggende grunnforhold, terrengforhold, opptredende geoteknisk problemstilling og tilgjengelig utstyr.

Valg av prosjektklasse (lite til stort areal) må derfor ses som veiledende størrelser. For eksempel kan mindre vei-prosjekter vurderes forskjellig avhengig av kompleksiteten i grunnforhold og veglinje.

I alle prosjekter der sprøbruddmateriale er påtruffet må for øvrig omfang av grunnundersøkelsen tilfredsstillende kravene i NVEs retningslinjer (NVE 7/2014).

	Stort areal	Middels areal	Lite areal	Utredninger	Generelt	Merknader
Bakgrunnsdata Innledende kunnskap om sprøbruddmaterialer kan forventes	Eksempler: Store vegprosjekter og jernbaneanlegg, større utbyggingsområder	Eksempler: Næringsområder, skoler, anleggsområder	Eksempler: Utbygging av boligområder, lokale plasser	Eksempler: Utredning av kvikkleiresoner, varierende antall og størrelse	Detaileringsgrad kan være noe lavere for enkle prosjekter sammenlignet med mer kompliserte tilfeller	
Geofysikk Oversikt over område og indikasjon på utvasket leire	For store prosjekter kan AEM være aktuelt. Alternativt kan et grid av ERT-profiler være dekkende.	Flere enn 2 ERT-profiler for å dekke arealet.	Hvis det forventes uryddig lagdeling, og dybde til berg er viktig, kan ERT vurderes. ERT hensiktsmessig i utligjengelige områder for boreriegg	Vanligvis vil et grid av ERT-profiler være dekkende.	Geofysiske målinger plasseres for å gi best mulig dekning av området. Bruk: Bestemmelse av lagdeling og planlegging av videre grunnundersøkelse.	Metodene gir indikasjon på utvasket leire. Dette er ikke nødvendigvis det samme som sprøbruddmateriale.
Enkle geotekniske sonderinger Indikasjon på sprøbruddmaterialer	Dreietrykksondering eller totalsondering.	Dreietrykksondering eller totalsondering.	Dreiesondering (ved vanskelig tilkomst med boreriegg), dreietrykksondering eller totalsondering.	Dreietrykksondering eller totalsondering.	Plasseres for god dekning og verifisering av geofysiske målinger. Bruk: Lagdeling, dybde til berg og indikasjon på sprøbruddmateriale.	Ved bløt, sensitiv leire under fast og mektig topplag vil ikke alltid sensitive leirslag kunne påvises i sonderingsprofilen
In situ metoder Indikasjon på sprøbruddmaterialer, kan gi sikrere tolkning enn enkle sonderinger	CPTU R-CPTU Vingebor	CPTU R-CPTU Vingebor	CPTU R-CPTU Vingebor	CPTU R-CPTU Vingebor	Plasseres der problemstilling krever data om parametere og jordart. Bruk: Parameterbestemmelse og jordartsklassifisering.	Disse metodene gir en god, men ikke sikker, bestemmelse av sprøbruddmateriale.
Prøvetaking Sikker påvisning av sprøbruddmateriale	Prøvetakingsmetode tilpasset formål (Klassifisering og/eller parameterbestemmelse).	Prøvetakingsmetode tilpasset formål (Kun klassifisering eller også parameterbestemmelse).	Fokus på in situ metoder, men prøvetaking kreves i alle prosjekter i henhold til Eurokodene.	Prøvetakingsmetode tilpasset formål (klassifisering og/eller parameterbestemmelse).	Parameterbestemmelse og sikker jordartsklassifisering. Kreves i alle prosjekter i henhold til Eurokodene.	Fokus på områder der tolkning av in situ metoder er usikker. For kartlegging: $0,75 < B_{qt} < 1,0$. For utløpsbetraktning: $B_{qt} > 1$ i tillegg

Figur 4.2 Skjema med anbefalt bruk av en kombinasjon mellom geofysiske og standard geotekniske metoder.

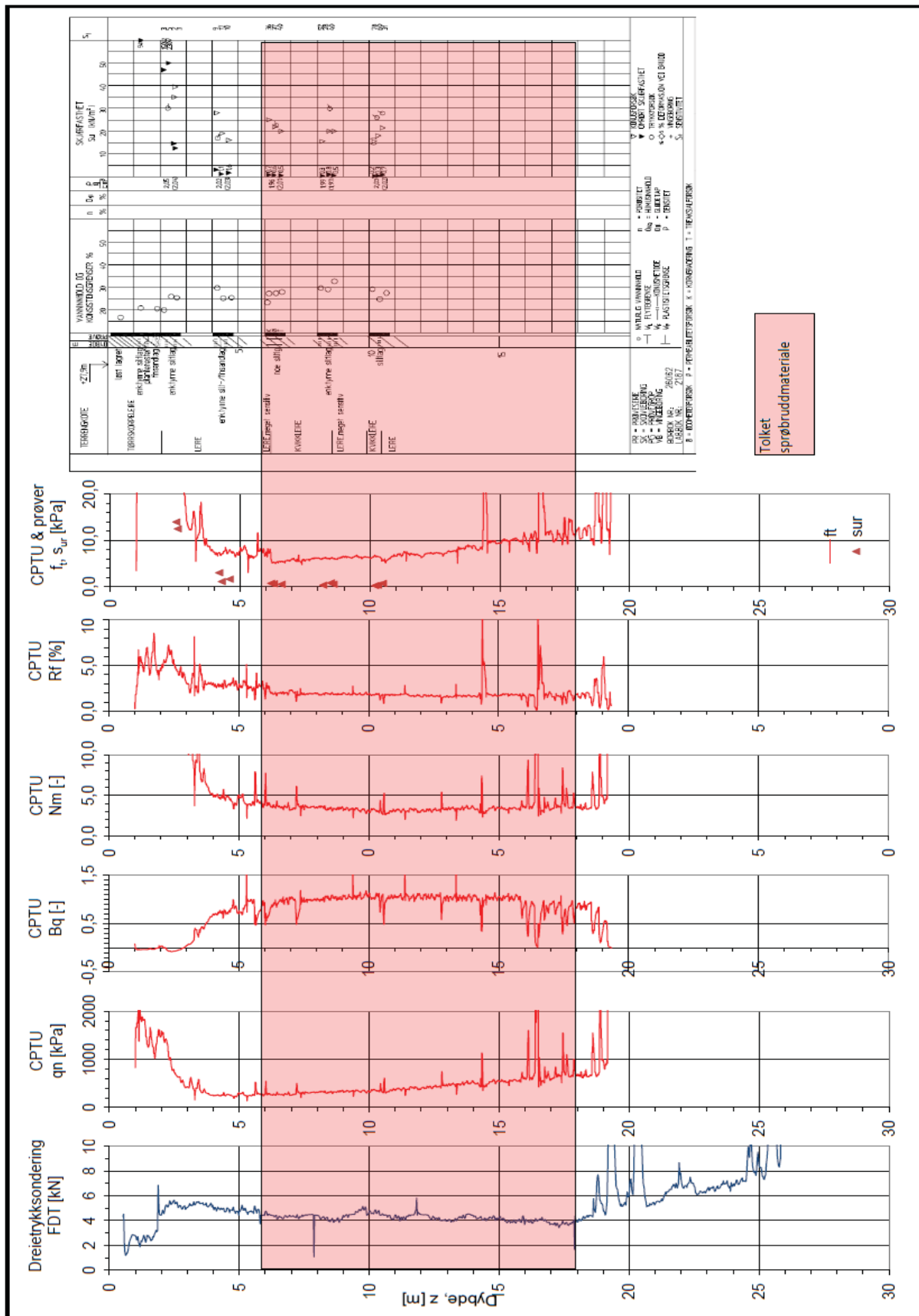
5 Oppsummering med viktige konklusjoner

Anbefalte prosedyrer presentert i denne rapporten omfatter konvensjonelle geotekniske sonderingsmetoder, CPTU, vingeboing og prøvetaking med laboratorieundersøkelser. I tillegg behandles resistivetsmålinger utført nedhulls (Trykksondering med resistivetsmåling R-CPTU), på overflaten (Elektrisk resistivitetstomografi ERT) og luftbårne målinger (Airborne Electromagnetic Measurements AEM). Det er også gitt anbefalte strategier for grunnundersøkelser med kombinert bruk av geotekniske og geofysiske undersøkelsesmetoder, der en av hensiktene vil være å påvise forekomst av sensitive og kvikke sedimenter.

Anbefalingene er delvis en videreføring og presisering av tidligere anvendte metoder og klassifiseringsprinsipper. Prosjektet presenterer imidlertid også ny metodikk som på en bedre måte enn tidligere kan benyttes til å påvise forekomst av sprøbruddmateriale. Både tidligere og nye metoder må brukes med skjønn og vil inkludere muligheter for feiltolkning i enkelttilfeller.

Følgende trekkes frem som de viktigste konklusjonene fra studiet:

- De konvensjonelle sonderingsmetodene (dreietrykk- og totalsondering) kombinert med prøvetaking og laboratorieundersøkelser vil fortsatt være en viktig metodikk for detektering av sprøbruddmaterialer. CPTU/R-CPTU og eventuelt elektrisk vingeboing vil være en naturlig oppfølging i nøkkelpunkter, blant annet for parameterbestemmelse og en sikrere tolkning av kvikkeleireforekomst.
- Dreietrykksondering synes å gi en klarere tolkning av sensitiv og kvikk leire sammenlignet med totalsondering, sannsynligvis på grunn av større følsomhet for skjærmotstand på spissen. Totalsondering er den foretrukne metoden ved sondering gjennom fastere lag, og når det skal bores inn i berg.
- Nedpressingskraften for de forskjellige sonderingsmetodene påvirkes av en rekke enkeltfaktorer, så som lagrekkefølge, økende stangfriksjon, tidligere forkonsolidering, effekt av spyling i overliggende lag etc. Spesielt synes mektige topplag med innslag av grovt materiale å ha innflytelse på nedpressingskraften, noe som kan kamuflere eventuelle lag med sprøbruddmateriale i dybden. Forboing gjennom tykke topplag med innslag av grovt materiale anbefales hvis omstendighetene ellers tillater dette.
- Tolkning av feltmetoder kan gi avvik både til konservativ og ikke-konservativ side av virkelig kvikkeleireforekomst, blant annet avhengig av de foreliggende grunnforholdene.
- Trykksondering med poretrykksmåling (CPTU), eventuelt også resistivetsmåling (R-CPTU), har stort potensiale for detektering av sprøbruddmateriale gjennom kombinert registrering av spissmotstand, sidefriksjon og poretrykk. Ved valg av disse metodene må man ha et helhetlig perspektiv ut ifra behovet i det aktuelle prosjektet, noe som vanligvis er mer omfattende enn kun påvisning av sprøbruddmateriale. Både CPTU og R-CPTU muliggjør en detaljert kartlegging av grunnforholdene med bestemmelse av lagdeling, jordart og ingeniørparametre.
- Bruk av eksisterende identifikasjonsdiagrammer for CPTU gir ofte usikker identifikasjon av sprøbruddmateriale, og det anbefales derfor å benytte de nye diagrammene som presenteres i denne rapporten. Disse tar i større grad hensyn til materialenes forkonsolidering, samt poretrykket som utvikles i bruddsonen under sondespissen (u_1).



Figur 5.1 Eksempel på sammenstilling av resultater fra ulike metoder for samlet vurdering av forekomst av sprøbruddmateriale.

- Måling av total nedpressingskraft bør alltid utføres i en CPTU. Denne kan benyttes til å påvise lag med sensitiv eller kvikk leire ved å skille ut stangfriksjonens variasjon med dybden. Målingen medfører ikke noe ekstraarbeid i felt, utover en enkel tilpasning av sonden til boreriggens registreringssystem.
- Kombineres CPTU med nedhulls resistivitetsmåling i en R-CPTU inkluderes en ny fysisk størrelse i tillegg til spissmotstand, poretrykk og sidefriksjon/stangfriksjon. På denne måten oppnås et bredere grunnlag for klassifisering og påvisning av sprøbruddmateriale. Erfaringene fra dette studiet viser at alle kvikkleirene ligger innenfor det forventede variasjonsområdet på 10 og 100 Ω m, de fleste med resistivitetsverdier i størrelsesorden 20-50 Ω m. Resistivitetsverdier utenfor det erfaringsbaserte måleområdet kan derfor med stor sannsynlighet klassifiseres som ikke-utvasket leire. Dog finnes eksempler på at også ikke-sensitive leirer kan vise resistivitet i området mellom 10 og 100 Ω m.

Denne spredningen i resistivitetsverdier gjør denne parameteren mindre egnet som enkeltstående klassifiseringsparameter. Ved å benytte ordinære CPTU data sammen med resistivitetsmålingen, kan de totale registreringer gi sikrere informasjon om leiren er kvikk eller sensitiv. Det anbefales derfor å benytte resistivitetsmodul ved CPTU i finkornige sedimenter hvis utstyret er tilgjengelig, ettersom dette bare krever ubetydelige endringer i forsøksprosedyren. Videre kan det etableres lokale korrelasjoner mellom resistivitetsverdier og sprøbruddmaterialer ved å sammenstille R-CPTU og laboratoriedata. Slike stedsspesifikke sammenhenger vil ha større treffsikkerhet enn bruk av mer generelle variasjonsområder.

- Bruk av ERT og AEM gir tilnærmet samme resistivitetsverdier som R-CPTU, og det er generelt godt samsvar i måleresultater, spesielt i homogene sedimenter. Den største fordelene med disse målemetodene er at de gir informasjon om den kontinuerlige utbredelse av lagene i grunnen, noe som er svært viktig ved vurdering av løsnemåte og mulig utløpsvolum for omrørt og flytende skredmasse.
- Vingeboarmålinger gir tradisjonelt informasjon om in situ udrenert skjærfasthet (uforstyrret og omrørt), samt sensitiviteten. Bestemmelse av omrørt skjærfasthet skal kunne gi informasjon om forekomst av kvikk eller sensitiv leire, men tradisjonelt utstyr har i ukjent omfang blant annet vært påvirket av friksjon som har gjort resultatene usikre. Nyere elektriske systemer gir muligheter for friksjonsmåling, men her kreves det at torsjonsmomentet måles nede ved vingen for å unngå uønskede feilkilder i målingene. Slikt utstyr er nå tilgjengelig, selv om det fremdeles må sies å være under utprøving. Hvis torsjonsmomentet måles på overflaten ved borerigg er det vist at målingene av omrørt torsjonsmoment påvirkes betydelig. I dette tilfelle anbefales ikke metoden benyttet for måling av omrørt skjærfasthet for dybder > 10 m.
- Nye applikasjoner i vingeborforforsk er tolkning av arbeidskurve med hensyn på nødvendig omrøringsenergi. Dette er viktig informasjon i forhold til leirens potensiale til å opprettholde en retrogressiv/progressiv bruddutvikling, samt en vurdering av sprøbruddmaterialets utløpsdistanse etter et eventuelt skred.
- Bestemmelse av omrørt skjærfasthet ved konusforforsk i laboratoriet vil fremdeles være den sikreste metoden for bestemmelse av sensitiv og kvikk leire. Denne metoden har imidlertid også feilkilder, blant annet i form av operatørvhengig bestemmelse og ikke-standardiserte korrelasjoner i ulike land.

- Resistiviteten korrelerer godt mot saltinnhold ned til konsentrasjoner rundt 1 g/l. For lavere saltinnhold enn dette synes andre påvirkningsfaktorer å overta. Dette kan være en grunn til den store variasjonen i målt resistivitet i utvaskede leirer.
- Det anbefales å sammenstille informasjon fra flere boremetoder i samleprofiler slik at man kan oppnå en samlet vurdering av forekomst av kvikk eller sensitiv leire. Det vil for eksempel alltid utføres en konvensjonell sondering (DRT, TOT) i forkant av en CPTU/R-CPTU, slik at det er grunnlag for å vurdere resultatene fra begge metodene samlet. Både konvensjonell sondering og CPTU/R-CPTU vil kreve prøvetaking og laboratorieundersøkelser for verifikasjon. CPTU/R-CPTU gir langt flere vurderingskriterier for sprøbruddmateriale, samtidig som måleresultatene gir sikrere påvisning av lagdeling og muligheter for tolkning av mekaniske parametre. Et eksempel på sammenstilling av resultater fra konvensjonell sondering, CPTU og laboratoriedata er vist i Figur 5.1.

Ingen av metodene som er behandlet i denne rapporten kan sies å være uten mulighet for feiltolkning, og krever derfor en kritisk vurdering og ingeniørskjønn i det enkelte prosjekt. Kombinert bruk av geofysiske og geotekniske målemetoder gjør hvert av fagfeltene sterkere og vil være den anbefalte strategi i større prosjekter, se kap.4.

For flere eksempler og sammenstillinger henvises til vedleggene B og C. Vedlegg A viser en oppsummering av parametere fra feltstudiet.

6 Forslag til videre arbeid

Denne sluttrapporten presenterer en rekke metoder for påvisning og kartlegging av sprøbruddmaterialer. Noen av disse metodene har vært brukt i lang tid med vekslende erfaringer, mens andre er forholdsvis nye. De nyere metodene bør ha spesielt fokus i tiden fremover for å vinne mer erfaring med muligheter og begrensninger.

Konkret ser vi behov for videreutvikling og forskning innenfor følgende områder:

- Feltmetodene som beskrives i denne rapporten evner ikke i særlig grad å skille mellom kvikkleire ($c_r < 0,5$ kPa) og sprøbruddmateriale ($c_r < 2$, $S_t > 15$). Dagens grenseverdier og definisjoner burde imidlertid være gjenstand for diskusjon, da dagens inndeling etter manges mening er forvirrende. Med hensyn på klassifisering av kvikkleire ville det være mer hensiktsmessig å endre definisjonen til for eksempel $c_r < 1,0$ kPa, og slik at terminologien sprøbruddmateriale bortfaller. På denne måten vil man også oppnå en romsligere definisjon som vil ivareta følgende forhold:
 - Nøyaktigheten av konusmålinger for kvikkleire er diskutabel, og bestemmelsen av konusinstrykk for omrørt skjærfasthet er ikke nøyaktig. Leiren kan like gjerne ha omrørt skjærfasthet 0,4 som 0,6 på grunn av operatørfeil. En økning av definisjongrensen fra 0,5 til 1,0 vil gi en mer pragmatisk bestemmelse av begrepet kvikkleire.
 - Ny standardisering medfører at vi høyst sannsynlig innfører en ny korrelasjon mellom udrenert skjærfasthet og konusinstrykk. Denne vil ha størst påvirkning for de bløtteste materialene, noe som medfører at det kan oppstå forskjeller mellom tidligere og ny klassifisering. En økning av kvikkleiregrensen vil kunne redusere dette problemet.
 - Forsøk viser at omrørt leire med skjærfasthet på 1,5 – 2,0 ikke er flytende, og at omrørte leirer først inntar en flytende konsistens for en omrørt skjærfasthet på ca. 1,0 kPa. Dette tilsier også at definisjonen bør endres. En slik definisjon vil medføre samsvar mellom definisjongrensen for kvikkleire, samt materialets flyteegenskaper i omrørt tilstand. Det må imidlertid tas hensyn til de sensitive leirers potensiale til

retrogressiv/progressiv bruddutvikling som i større grad er styrt av energiforhold enn materialets flyteegenskaper.

- Forsøk på høykvalitets leirer viser sprø oppførsel i de aller fleste tilfeller. Begrepet sprøbruddmaterialer er derfor noe misvisende, da leirer generelt viser strain softening og sprø karakter bare prøvekvaliteten er nær uforstyrret.

- Konvensjonelle sonderinger: Fortsatt systematisering av erfaringer fra bruk av konvensjonelle sonderingsmetoder. Spesielt gjelder dette erfaringer med bruk av forboring ved forekomst av mektige topplag med grovt materiale over kvikk eller sensitiv leire.
- CPTU, klassifisering: Bruk av nye identifikasjonsdiagrammer basert på de reviderte dimensjonsløse forholdene N_{mc} og B_{q1} , som i denne rapporten blir anbefalt benyttet for identifisering av sensitive materialer. Det må innhentes erfaring med diagrammene benyttet i ulike typer sprøbruddmateriale, både fete og magre kvikkleirer, samt kvikkleirer med ulik spenningshistorie.
- CPTU, stangfriksjon: Måling av total nedpressingskraft bør gjøres rutinemessig i en vanlig CPTU og kan benyttes til å utlede stangfriksjon fra CPTU-målingene. Kvikkleirelag vil i denne sammenheng fremstå som partier med lav eller avtagende friksjonsgradient. Resultatene i dette studiet har vært oppmuntrende, men metoden krever mer utprøving i norske kvikkleirer. Det er flere aspekter med tolkningen som bør undersøkes nærmere, blant annet effekten med bruk av R-CPTU modul med større diameter enn stangsettet.
- Resistivetsmålinger, felt: Sammenligning mellom resultater fra luftbårne målinger (AEM), overflatemålinger (ERT) og nedhullsmålinger (R-CPTU), spesielt med hensyn på resistivetsverdier og eventuelle begrensninger med metodene.
- Resistivetsmålinger, laboratorium: Laboratoriemålinger av resistivitet under kontrollerte betingelser i laboratoriet for å forstå hvilke egenskaper som påvirker resistiviteten, spesielt ved lave saltinnhold (< 1 g/l).
- Elektrisk vingebor, omrørt skjærfasthet: Anvendelse av elektrisk vingebor med tanke på sikrere bestemmelse av omrørt skjærfasthet for påvisning av sprøbruddmateriale. Dette forutsetter måling av torsjonsmomentet nede ved vingen, og det er pr. i dag slikt utstyr tilgjengelig i markedet. Erfaringer fra bruk av dette utstyret bør innhentes og bearbeides systematisk, inkludert sammenligning med laboratoriemålte data.
- Elektrisk vingebor, tolkning av arbeidskurve: Videreutvikling av teori og erfaring for bestemmelse av nødvendig utløsningsenergi for kvikkleireskred, samt vurdering av utløpsdistanse for skredmasser fra slike skred.
- Databehandling – ekspertsystemer: Bruk av nevrale nettverk for data-assistert behandling av kriterier for sprøbruddmateriale fra anbefalte detekteringsmetoder. Nevrale nettverk blir i hovedsak benyttet innen statistiske analyser og bruk av kunstig intelligens (ekspertsystemer), og kan i denne sammenheng brukes til statistisk og matematisk bearbeiding av kriteriesettet for påvisning av sprøbruddmateriale.

7 Referanser

Andersson-Sköld Y., Torrance J.K., Lind B., Odén K., Stevens R.L. og Rankka K. (2005). *Quick clay – A case study of chemical perspective in Southwest Sweden*. Engineering geology, 82(2), s.107-118.

Anschütz, H., Bazin, S. og Pfaffhuber, A. (2015). *Towards using AEM for sensitive clay mapping – A case study from Norway*. 1st European Airborne EM conference. Torino, Italia, Mo AEM 04.

Amundsen, H.A. m.fl. (2015a) "On engineering characterisation of a low plasticity sensitive clay," *GEOQuébec 2015 - Challenges from North to South*. Québec, Canada.

Archie, G. E. (1942). *The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics*. Trans. AIME, 146(99), s.54-62.

Bjerrum, L. (1972). Embankments on soft ground. State-of-the-art rapport, ASCE Specialty Conference on Performance of Earth and Earth-supported Structures, vol.2, s.1-54, Lafayette, Indiana, USA.

Christensen, C. W., Pfaffhuber, A.A., Anschütz, H og Smaavik, T.F. 2015. Combining airborne electromagnetic and geotechnical data for automated depth to bedrock tracking. Journal of Applied Geophysics 119, s.178-191.

Donohue, S., m.fl. (2009). *Assessment of geophysical techniques for the mapping of quick clay deposits in Norway*. Proceedings Near Surface 2009 – 15th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, September. Dublin, Irland. Paper C17.

Donohue, S., m.fl. (2012). *Geophysical mapping of quick clay: a case study from Smørgrav, Norway*. Journal of Near Surface Geophysics, EAGE, Vol. 10, No. 3, s.207 - 219.

Eide – Helle, T., m.fl. (2015). *Laboratory setup to evaluate the improvement of geotechnical properties from potassium chloride saturation of a quick clay from Dragvoll, Norway*. GEOQuébec 2015 - Challenges from North to South. Québec, Canada.

Emdal, A., m.fl. (2012). *Characterisation of Quick Clay at Dragvoll, Trondheim, Norway*. Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA Vol. 43, No. 4 (December), s.11 - 23.

Gylland, A.S. (2015). *Utvidet tolkningsgrunnlag for vingebor*. NIFS Rapport nr. R79-2015.

Gylland, A., m.fl. (2013). *Characterisation and engineering properties of Tiller clay*. Engineering Geology (Elsevier), vol. 164, s.86 - 100.

Gylland, A., Jostad, H.P, Nordal, S. og Emdal, A. (2013). *Micro-behaviour of shear vane tests in soft sensitive clay*. Geotechnique 14, vol.63, s.1264-1270.

Kalscheuer, T., Bastani, M., Donohue, S., Persson, L., Pfaffhuber, A.A., Reiser, F. og Ren, Z.Y. (2013). *Delineation of a quick clay structure at Smørgrav, Norway, with electromagnetic methods under geotechnical constraints*. Journal of Applied Geophysics, 92, s.121–136.

Knödel, K., Lange, G. og Voigt, H.-J. (Eds.) (2007). *Environmental Geology, Handbook of Field Methods and Case Studies*, Springer, ISBN 978-3-540-74669-0, Berlin, Tyskland.

Ladd, C.C. og Foott, R. 1974. *New design procedure for stability of soft clays*. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 100(7), s.763–786.

Locat, J., Berube, M. A., Chagnon, J. Y. og Gelinias, P. (1985). *The mineralogy of sensitive clays in relation to some engineering geology problems - an overview*. Applied clay science, 1(1), s.193-205.

Long, M. (2013, 2014, 2015). *Personlig kommunikasjon*.

Long, M., Donohue, S., L'Heureux, J. S., Solberg, I. L., Rønning, J. S., Limacher, R. og Lecomte, I. (2012). *Relationship between electrical resistivity and basic geotechnical parameters for marine clays*. Canadian Geotechnical Journal, 49(10), s.1158-1168.

Lundström, K., Larsson, R. og Dahlin, T. (2009). *Mapping of quick clay formations using geotechnical and geophysical methods*. Landslides, 6(1), s.1-15.

Löfroth, H., Suer, P., Dahlin, T., Leroux, V. og Schälin, D. (2011). *Quick clay mapping by resistivity - Surface resistivity, CPTU-R and chemistry to complement other geotechnical sounding and sampling*. Statens Geotekniska Institut, SGI. Göta älv utredningen. GÄU. Delrapport 30. Statens Geotekniska Institut, Linköping, Sverige.

Løken, T. (1968). *Kvikkleiredannelse og kjemisk forvitring i norske leirer*. Norges Geotekniske Institutt, Oslo. Publikasjon nr. 75, s.19-26.

Palacky, G.J. (1987). *Resistivity characteristics of geologic targets*. Geosciences Journal, 3, s.138-144.

Pasquet, S., m.fl. (2014). *Surface-wave dispersion inversion versus SH wave refraction tomography in saturated and poorly dispersive quick clays*. 20th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics (EAGE) Athen, Hellas.

Peixoto, A. S. P., Pregolato, M. C., Silva, A. C. C. L., Yamasaki, M. T. og Junior, F. C. (2010). *Development of an electrical resistivity measure for geotechnical and geoenvironmental characterization*. Proceedings CPT'10, s.1-7, Huntington beach, USA.

Pfaffhuber, A.A., m.fl. (2010). *Multi - method high resolution geophysical and geotechnical quick clay mapping*. Near Surface 2010 - 16th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, Zurich, Sveits.

Rankka, K., Andersson-Sköld, Y., Hultén, C., Larsson, R., Leroux, V. og Dahlin, T. (2004). *Quick clay in Sweden*. Statens Geotekniska Institut (SGI), Rapport 65, 145.

Reynolds, J. M. (2011). *An introduction to applied and environmental geophysics*. John Wiley & Sons.

Robertson, P.K. (1990). *Soil classification using the cone penetration test*. Canadian Geotechnical Journal, 27 (1), s.151-158.

Rømøen, M., Pfaffhuber, A. A., Karlsrud, K. og Helle, T. E. (2010). *Resistivity of marine sediments retrieved from R-CPTU soundings: A Norwegian case study*. In Proceedings of 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing CPT'10, s. 9-11, Huntington beach, USA.

Sandven, R (1990). *Strength and deformation parameters from piezocone tests*. Dr.ing. avhandling 1990:3, Institutt for geoteknikk, NTH (nå NTNU).

Sandven, R. og Solberg, I-L. (2013). *Geophysical and geotechnical investigations for a major highway in a quick-clay area*. J.-S. L'Heureux, and S. Leroueil, Eds., Proceedings of the International Conference on Landslides in Sensitive Clays (ICLSC). University of Laval, Québec City, Canada.

Sauvin, G., m.fl. (2011). *Towards joint inversion / interpretation for landslide-prone areas in Norway - integrating geophysics and geotechnique*. Near Surface 2011 - 17th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics Leicester, UK. Paper E11.

Sauvin, G., m.fl. (2014). *On the integrated use of geophysics for quick-clay mapping: The Hvitvingfoss case study, Norway*. Applied Geophysics, Vol. 106, s.1 -13.

Sauvin, G., m.fl. (2013a). *Geophysical data integration for hazard assessment of quick-clay landslide prone areas: the Hvitvingfoss case study, Norway*. J.-S. L'Heureux, and S. Leroueil, Eds., Proceedings of the International Conference on Landslides in Sensitive Clays (ICLSC). University of Laval, Québec City, Canada.

Sauvin, G., m.fl. (2013b). *Towards geophysical and geotechnical integration for quick clay mapping in Norway*. Journal of Near Surface Geophysics, EAGE, Vol. 11, No. 6, s.613 - 623.

Schälin, D. og Tornborg, J. (2009). *Evaluation of CPT-R and resistivity measurements in quick clay area*. M.Sc. thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Division of GeoEngineering, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sverige.

Solberg, I.-L. m.fl. (2012). *Combined geophysical and geotechnical approach to ground investigations and hazard zonation of a quick clay area, mid Norway*. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, Vol. 71, No. 1, s.119 - 133.

Solberg, I. L., Hansen, L., Rønning, J. S., Haugen, E. D., Dalsegg, E. og Tønnesen, J. F. (2012). *Combined geophysical and geotechnical approach to ground investigations and hazard zonation of a quick clay area, mid Norway*. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 71(1), s.119-133.

Solberg, I. L., Rønning, J. S., Dalsegg, E., Hansen, L., Rokoengen, K. og Sandven, R. (2008). *Resistivity measurements as a tool for outlining quick-clay extent and valley-fill stratigraphy: A feasibility study from Buvika, central Norway*. Canadian Geotechnical Journal, 45(2), s.210-225.

Solberg I.L., Dalsegg E., L'Heureux J.S. og Rønning J.S. (2012). *Resistivitetmålinger for løsmassekartlegging ved skredgrop på Byneset, Sør-Trøndelag*. NGU Rapport nr. 2012.004

Sully, J.P., Campanella, R.G. og Robertson, P.K. (1988). *Overconsolidation ratio of clays from penetration pore water pressures*. ASCE Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 114 (2), s.209-15.

Tavenas, F., Flon, P., Lerouil, S. og Lebuis, J. (1983). *Disintegration energy and risk of slide retrogression in sensitive clays*. Symposium on Slopes in Soft Clays, Linköping, Sverige.

Thakur, V., Degago, S. A., Oset, F., Aabøe, R., Dolva, B. K., Aunaas, K. og L'Heureux, J. S. (2013). *Characterization of Post-failure Movements of Landslides in Soft Sensitive Clays*. Landslides in Sensitive Clays (s.91-103). Springer Nederland.

Thakur, V., Degago, S., Gylland, A.S. og Sandven, R. (2015). *In-situ measurement of remolding energy of sensitive clay*. GEOQuebec 2015 – Challenges from north to south, Quebec, Canada, september 2015.

Torrance, J. K. (1974). *A Laboratory Investigation of the Effect of Leaching on the Compressibility and Shear Strength of Norwegian Marine Clays*. Norges Geotekniske Institutt, NGI Publikasjon 104.

8 Øvrig litteratur

8.1 Tidligere NIFS rapporter - Detekteringsstudiet

NIFS (2012). Etatsprogrammet NATURFARE – Infrastruktur, Flom og Skred (NIFS). Delprosjekt 6: Kvikkleire. Deloppgave SM 6.4.2 *Detektering av sprøbruddmateriale fra ulike sonderingsmetoder. Status og forslag til videre utviklingsoppgaver*. NIFS rapport nr. R46-2012, Multiconsult/SINTEF, 20.01.2012.

NIFS (2013). Etatsprogrammet NATURFARE – Infrastruktur, Flom og Skred (NIFS). Delprosjekt 6: Kvikkleire. Deloppgave SM 6.4.2 *Detektering av sprøbruddmateriale ved hjelp av R-CPTU. State-of-the-art rapport*. NIFS rapport nr. R47-2014, Multiconsult, 06.12.2013.

NIFS (2015). Etatsprogrammet NATURFARE – Infrastruktur, Flom og Skred (NIFS). Delprosjekt 6: Kvikkleire. Deloppgave SM 6.4.2 *Detektering av sprøbruddmateriale ved hjelp av R-CPTU og elektrisk vingebor. Feltstudie*. NIFS rapport nr. R101-2015, Multiconsult, 06.10.2015.

8.2 Tekniske rapporter, standarder og veiledninger

NIFS (2014). Anbefalinger fra NGI om krav knyttet til effekt av sprøbruddoppførsel. NIFS Rapport nr. 88/2014.

Norsk Geoteknisk Forening (NGF) (2013). Melding nr. 2 *Symboler og definisjoner i geoteknikk*.

Norsk Geoteknisk Forening (NGF) (1989). Melding nr. 3 *Dreiesondering*.

Norsk Geoteknisk Forening (NGF) (1981). Melding nr. 4 *Vingeboring (under revisjon)*.

Norsk Geoteknisk Forening (NGF) (2010). Melding nr. 5 *Trykksondering med poretrykksmåling (CPTU)*.

Norsk Geoteknisk Forening (NGF) (1989). Melding nr. 7 *Dreietrykksondering*.

Norsk Geoteknisk Forening (NGF) (1994). Melding nr. 9 *Totalsondering (under revisjon)*.

Norges Geologiske Undersøkelse (NGU) (2011). *Veiledning for bruk av resistivitetsmålinger i potensielle kvikkleireområder*. Rapport nr. 2010.048, 17.01.2011.

Norges Geotekniske Institutt (NGI) (2014). *Metodebeskrivelse AEM og eksempler på prosjekter*. NGI Rapport 20130058-02-R_NO. Oslo.

Norges Vassdrags- og Energidirektorat (NVE). *Flaum- og skredfare i arealplanar*, NVE, Oslo, NVE Retningslinjer nr. 7, 2014.

Standard Norge (2006). NS-EN ISO 22475-1 *Prøvetaking og grunnvannsmålinger*.

Standard Norge (2012). NS-EN ISO 22476-1 *Trykksondering med poretrykksmåling*.

Standard Norge (2009). NS-EN ISO 14688-1 og -2 *Klassifisering og identifisering av jord*.

Standard Norge (1987). NS 8015 *Skjærfasthet ved konusforsøk*.

Trondheim kommune (2015). *Flatåsen kvikkleiresone*. Rapport R-1622, 25.07.2015.

8.3 Prosjekt-, masteroppgaver og PhD-avhandlinger

Aasland, R. A. (2010). *Kartlegging av kvikkleire med 2D resistivitet og R-CPT i Rissa*. Masteroppgave (in Norwegian), Institutt for Bygg, anlegg og transport, NTNU, Trondheim.

Berger, B. (1983). *Geofysiske metoder anvendt i ingeniørgeologiske undersøkelser*. PhD avhandling, Institutt for petroleumsteknologi og anvendt geofysikk, NTH (nå NTNU), Trondheim.

Hundal, E. (2014). *CPTU med målt total sonderingsmotstand. Nye muligheter for å detektere kvikkleire*. Masteroppgave, Institutt for Bygg, anlegg og transport, NTNU, Trondheim.

King, J. (2013). *Testing of clays at landslide site at Esp, Byneset*. Masteroppgave, Institutt for Bygg, anlegg og transport, NTNU, Trondheim.

Knutsen, M. (2014). *On determination of G_{max} by bender element and cross-hole testing*. Masteroppgave, Institutt for Bygg, anlegg og transport, NTNU, Trondheim.

Kornbrekke, H.A. (2012). *Stability evaluation of Rissa clay slopes based on block samples*. Masteroppgave, Institutt for Bygg, anlegg og transport, NTNU, Trondheim.

Montafia, A. (2013). *Influence of Physical Properties of Marine Clays on Electric Resistivity and Basic Geotechnical Parameters*. Masteroppgave, Institutt for Bygg, anlegg og transport, NTNU, Trondheim.

Ottesen H.B. (2009). *CPTU med resistivitetsmåling*. Masteroppgave, Institutt for Bygg, anlegg og transport, NTNU, Trondheim.

Puakowski, S. (2015). *Interpretation methods of CPTU and R-CPTU with special focus on soft soils in Norway*. Masteroppgave, Institutt for Bygg, anlegg og transport, NTNU, Trondheim.

Sandven, R. (1990). *Strength and deformation properties of fine grained soils obtained from piezocone tests*. PhD avhandling, Institutt for Geoteknikk, Bygningsingeniøravdelingen: Norges Tekniske Høgskole (nå NTNU), Trondheim.

Solberg, I-L. (2007). *Geological, geomorphological and geophysical investigations of areas prone to clay slides: Examples from Buvika, Mid Norway*. PhD avhandling, Institutt for geologi og bergteknikk, NTNU, Trondheim.

Takle-Eide, H. (2015). *On shear wave velocity testing in clay*. Masteroppgave, Institutt for Bygg, anlegg og transport, NTNU, Trondheim.

Tilahun, T. (2013). *Detection of quick clay from various sounding methods*. Masteroppgave, Institutt for Bygg, anlegg og transport, NTNU, Trondheim.

Torpe, G.R. (2014). *Utvikling og evaluering av prosedyrer for gjennomføring av udrenerte skjærkryppforsøk i kvikkleire*. Masteroppgave, Institutt for Bygg, anlegg og transport, NTNU, Trondheim.

9 SYMBOLER OG TERMINOLOGI

Greske symboler

Symbol		Enhet
α	Helningsvinkel	°
α_p	Normaliseringsforhold udrenert skjærfasthet	-
β	Helning på skjærplan med horisontalplan som referanse	°
ε	Tøyning	%
ϕ	Friksjonsvinkel	°
γ	Tyngdetetthet	kN/m ³
γ'	Effektiv tyngdetetthet	kN/m ³
γ_d	Tørr tyngdetetthet	kN/m ³
γ_M	Materialfaktor	-
γ_{M0}	Initiell materialfaktor	-
ρ	Resistivitet	ohm m
σ'_{ho}	In situ horisontal effektiv spenning	kPa
σ'_{vo}	In situ vertikal effektiv spenning = p'_0	kPa
σ_{vo}	In situ vertikal totalspenning	kPa
σ_{ho}	In situ horisontal totalspenning	kPa
σ_1	Største hovedspenning	kPa
σ'_c	Forkonsolideringsspenning = p'_c	kPa
σ'_A	Referansespenning CPTU klassifisering	kPa
τ_f	Skjærspenning ved brudd	kPa

Latinske symboler

Symbol		Enhet
a	Attraksjon	kPa
A_c	Tverrsnittsareal av trykksonde (CPTU)	mm ²
B_q	Poretrykksparameter referanseporetrykk $\Delta u / (q_t - \sigma_{vo}) = B_{q2}$	-
B_{q1}	Poretrykksparameter spissporetrykk $\Delta u_1 / (q_t - \sigma_{vo})$	-
c	Kohesjon	kPa
C_u	Udrenert skjærfasthet	kPa
C_r	Omrørt skjærfasthet	kPa
C_{rv}	Omrørt skjærfasthet, vingebor	kPa
C_{uA}, C_{uD}, C_{uP}	Udrenert skjærfasthet (A=aktiv, D=direkte, P=passiv)	kPa
C_{uv}	Udrenert skjærfasthet, vingebor	kPa
I_A	Aktivitet $I_p / \% < 2 \mu m$	-
I_L	Flyteindeks	%
I_p	Plastisitet(indeks)	%
k	Empirisk korreksjonsfaktor, poretrykk CPTU	-
K_0'	Effektiv hviletrykkskoeffisient	-
m	SpenningsekspONENT SHANSEP	-
M	Ødometermodul	MPa
N_m	Spissmotstandstall = $q_n / (\sigma_{vo}' + a)$	-
N_{mc}	Spissmotstandstall revidert = $q_n / (\sigma_A' + a)$, σ_A' = referansespenning	-
p'_0	Effektivt vertikalt overlagingstrykk (= σ_{vo}')	kPa
p'_c	Effektiv vertikal forkonsolideringsspenning (= σ_c')	kPa
p_f	Sannsynlighetsfaktor	%
Q_s	Mobilisert stangfriksjon CPTU	kN
Q	Spissmotstandsforhold CPTU = $q_n / (\sigma_{vo}' + a)$	-
q_t	Korrigert spissmotstand CPTU	kPa
q_n	Netto spissmotstand	kPa
R_f	Friksjonsforhold CPTU, spissmotstandsbasert = $f_s * 100 / q_n$	%

R_{fu}	Friksjonsforhold CPTU, poretrykksbasert = $f_s \cdot 100 / \Delta u_1$	%
S_t	Sensitivitet	-
u	Poretrykk	kPa
u_o	In situ poretrykk	kPa
Δu	Endring i poretrykk	kPa
Δu_2	Endring i poretrykk, referansenivå CPTU	kPa
Δu_1	Endring i poretrykk ved spiss CPTU	kPa
w_L	Atterbergs flytegrense	%
w_p	Atterbergs plastisitetsgrense	%
z	Dybde	m

Forkortelser

ADP	Aktiv, direkte, passiv, avansert totalspenningsanalyse
AEM	Airborne Electromagnetic Measurements
CAUa	Aktivt, anisotrop konsolidert, udrenert treaksialforsøk
CAUp	Passivt, anisotrop konsolidert, udrenert treaksialforsøk
COV	Variasjonskoeffisient
CPTU	Trykksondering med poretrykksmåling
DSS	Direkte skjærforsøk
DRT	Dreietrykksondering
EFVT	Electric Field Vane Test = Elektrisk vingebor
ERT	Electric Resistivity Tomography
FoU	Forskning og utvikling
FVT	Field Vane Test = Vingebor
GV	Grunnvannstand
JBV	Jernbaneverket
NGI	Norges Geotekniske Institutt
NIFS	Etatsattningsprosjektet Naturfare, Infrastruktur, Flom og Skred
NTNU	Norges teknisk- naturvitenskapelige universitet
NVE	Norges vassdrags- og energidirektorat
OCR	Overkonsolideringsgrad
R-CPTU	Trykksondering med resistivitetsmåling
SVV	Statens vegvesen
TOT	Totalsondering

10 VEDLEGG

VEDLEGGSLISTE

- Vedlegg A Detaljert oversikt over utvalgte forsøksfelt
- Vedlegg B Sonderingsprofiler og grunnlagsdata for utvalgte forsøksfelt
- Vedlegg C Eksempler på grunnundersøkelser med bruk av geofysiske og geotekniske metoder

VEDLEGG A

Detaljert oversikt over utvalgte forsøksfelt

Østlandet

E16 Kløfta, strekning Nybakk - Slomarka

Smørgrav/Vestfossen

Trøndelag

Tiller

Esp, Byneset

Klett sør

Klett nord

Dragvoll

Fallan

Rein, Rissa

Nidarvoll

Rødde

Ranheim Vestre

Hommelvik sjøside

Tabell A1. Oppsummering av egenskaper for utvalgte forsøksfelt.

Forsøksfelt	w (%)	ρ (Mg/m ³)	< 2 μ m (%)	I _p (%)	S _t (-)	OCR (-)
ØSTLANDET						
E16 Kløfta, strekning Nybakk- Slomarka	32 - 49	1.78 - 1.87	35 - 55	15 - 22	5 - 73	1.5 - 3.0
Smørgrav/Vestfossen	35 - 45	1.80 - 1.93	36 - 60	9 - 22	5 - 77	1.2 - 1.8
TRØNDELAG						
Tiller	30 - 45	1.80 - 2.00	35 - 40	2 - 8	5 - 1000	2.0 - 4.0
Esp, Byneset	30 - 50	1.75 - 1.95	30 - 40	3 - 15	10-115	2.0 - 4.0
Klett sør	25 - 35	1.92 - 1.94	30 - 35	4 - 10	10-240	1.5 - 3.0?
Klett nord	25 - 35	1.92 - 1.94	30 - 35	5 - 10	120-350	1.5 - 3.0?
Fallan	30 - 38	1.92 - 1.96	30 - 35	5 - 10	55 - 145	1.5 - 3.0
Dragvoll	30 - 42	1.88 - 2.00	28 - 48	4 - 12	16 - 152	1.0 - 2.0
Rein, Rissa	28 - 40	1.85 - 2.00	42 - 47	7 - 12	10 - 60	2.0 - 4.0
Nidarvoll	25 - 45	1.78 - 2.04	N/A	1 - 20	5 - 200+	5.0 - 6.5
Rødde	27 - 32	1.96 - 2.01	30 - 48	5 - 10	5 - 200+	1.7 - 2.4
Ranheim Vestre	10 - 40	1.87 - 2.10	30 - 50	4 - 13	5 - 100	3.0 - 3.5
Hommelvik sjøside	5 - 32	1.83 - 2.24	2 - 35	5 - 12	2 - 28	1.5 - 2.0

Tabell A2. Resistivitetmålinger - oppsummering av informasjon for utvalgte forsøksfelt.

Forsøksfelt	Jordart	Anvendte metoder	Referanser for beskrivelse
ØSTLANDET			
E16 Kløfta, strekning Nybakk-Slomarka	Bløt, kvikk leire	R-CPTU, ERT, AEM	Christensen, C.W. m.fl. (2015) Anschütz, H. m.fl. (2015) NGI rapport 20120491-01-R (2013)
Smørgrav/Vestfossen	Bløt, kvikk leire	R-CPTU, ERT	NGI rapport 20081135-1 (2009) NGI rapport 20100136-1-R (2010) Donohue m.fl. (2009) Donohue m.fl. (2012) Pfaffhuber m.fl. (2010) Bazin m.fl. (2013)
TRØNDELAG			
Tiller	Bløt til fast, kvikk leire	R-CPTU, ERT	NTNU PhD- og masteroppgaver: Sandven (1990) Ørbech (1999) Seierstad (2000) Long (2005) Yesuf (2008) Gylland (2011/2012) Sandene (2010) Holsdal (2012)
Esp, Byneset	Bløt til fast, kvikk leire	R-CPTU, ERT	Thakur (2012) NTNU masteroppgaver Hundal (2014) (Rambøll/MC) Torpe (2014) NGI filer
Klett sør	Bløt, siltig, kvikk leire	R-CPTU, ERT	Multiconsult 415531-RIG-RAP-003 (2014) NIFS rapport R101-2015
Klett nord	Bløt, siltig, kvikk leire	R-CPTU, ERT	NGF seminar prøvetaking 2014
Fallan	Bløt, siltig, kvikk leire	R-CPTU, ERT	NTNU masteroppgaver: Montafia (2013) NIFS rapport R101-2015
Dragvoll	Meget bløt, kvikk leire	R-CPTU, ERT	Multiconsult r414622-1 (2011) Multiconsult n414622-1 (2011) Multiconsult r414622-2 (2011)
Rein, Rissa	Bløt, kvikk leire	R-CPTU, ERT	NTNU masteroppgaver: Kåsin (2011) Multiconsult r414792-2 (2012)
Nidarvoll	Bløt, kvikk leire	R-CPTU, ERT	NTNU masteroppgaver Hundal (2014) (Rambøll/MC)
Rødde	Bløt til fast, siltig, kvikk leire	R-CPTU, ERT	NGI rapport
Ranheim vestre	Fast, siltig, delvis kvikk leire	R-CPTU, ERT	Multiconsult 416235-RIG-RAP-002 (2014)
Hommelvik sjøside	Sand og fast leire silt, ikke-kvikk	R-CPTU, ERT	NGI rapport 20130532 (2013) NGI rapport 20140383 (2014)

Tabell A3. Resistivitetmålinger - oppsummering av erfaringer.

Forsøksfelt	Jordart	ERT elektrode- avstand (m)	Maksimal penetrasjon for ERT (m)	Maksimal dybde R-CPTU (m)	ERT v R-CPTU	Merknad
ØSTLANDET						
E16 Kløfta, strekning Nybygg- Slomarka	Bløt leire	5.0		40.0	Godt samsvar	
Smørgrav/ Vestfossen	Bløt, kvikk leire	5.0		25.5	Godt samsvar	
TRØNDELAG						
Tiller	Bløt til fast kvikk leire	2.0	25.0	16.4	God til 10 m, ERT høyere under dette nivå	To parallele R-CPTU målinger viser veldig godt samsvar
Esp, Byneset	Bløt til fast, kvikk leire	2.0 (5.0)	15.0 60.0	16.7	God overensstemmelse. ERT er høyere i et kvikkleirelag	
Klett sør	Bløt, siltig, kvikk leire	5.0	32.0	40.0	God overensstemmelse	
Klett nord	Bløt, siltig, kvikk leire	5.0	57.0	30.1	Meget god overensstemmelse	
Fallan	Bløt, siltig kvikk leire	5.0	57.0	31.0	Meget god overensstemmelse	
Dragvoll	Meget bløt, kvikk leire	0.5	7.5	25.4	Meget god overensstemmelse	
Rein, Rissa	Bløt, kvikk leire	5.0	≈ 60.0	31.6	Meget god overensstemmelse	
Nidarvoll	Bløt, kvikk leire	5.0	50.0	27.0	ERT generelt høyere, unntatt i ett lag	
Rødde	Bløt til fast, kvikk leire	5.0 (10.0)	60.0 (120.0)	25.7	Meget god overensstemmelse	
Ranheim vestre	Fast, siltig leire	5.0	33.0 (B2) 20.0 (E5) 25.0 (I1)	13.7 24.0 10.2	God overensstemmelse	
Hommelvik sjøside	Sand, fast leire/ silt	5.0	30.0	29.2	ERT generelt høyere	

VEDLEGG B

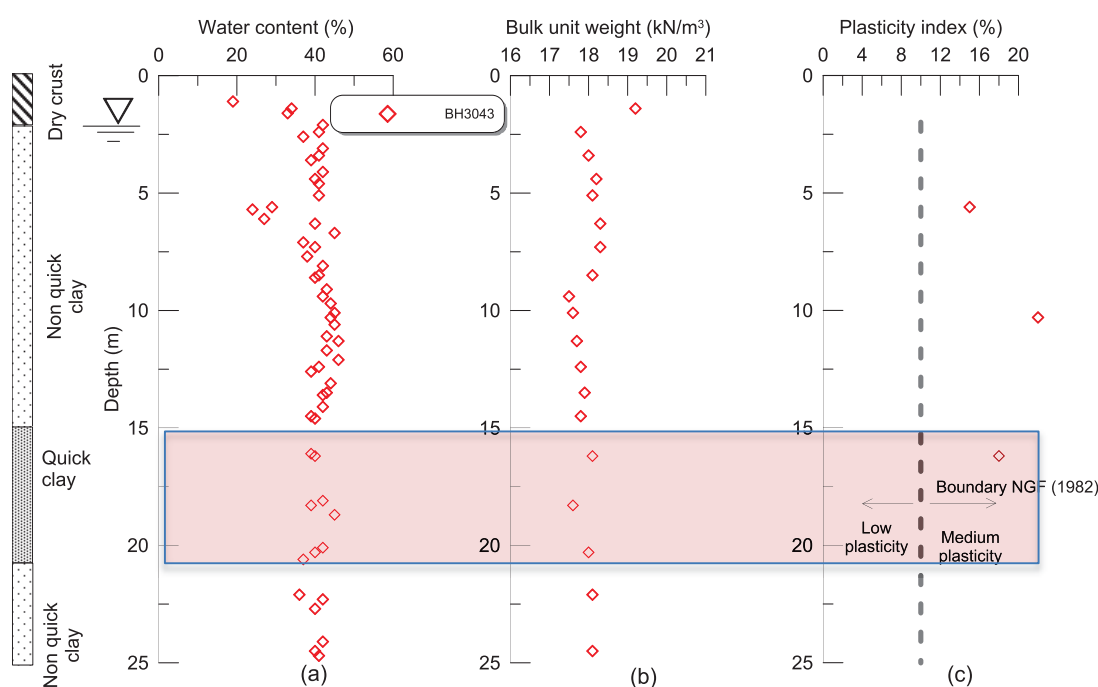
Sammendrag av grunnlagsdata fra utvalgte forsøksfelt

VEDLEGG B1	E16 Kløfta, strekning Nybakk – Slomarka
VEDLEGG B2	Smørgrav/Vestfossen
VEDLEGG B3	Tiller
VEDLEGG B4	Esp, Byneset
VEDLEGG B5	Klett sør
VEDLEGG B6	Klett nord
VEDLEGG B7	Dragvoll
VEDLEGG B8	Fallan
VEDLEGG B9	Rein, Rissa
VEDLEGG B10	Nidarvoll
VEDLEGG B11	Rødde
VEDLEGG B12	Ranheim Vestre
VEDLEGG B13	Hommelvik sjøside
VEDLEGG B14	Sammenstilling av resistivitetsdata fra alle prøvefelt

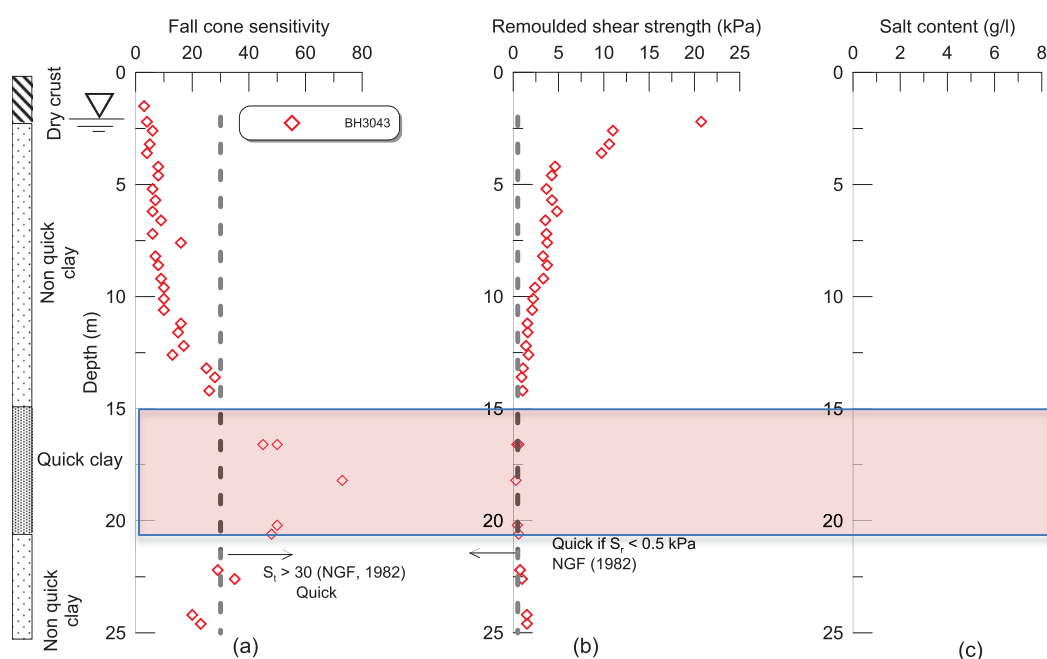
Vedlegg B1

E16 Kløfta, strekning Nybakk – Slomarka (Borhull BH 3043)

Arbeidet på dette feltet er utført som en del av opprustningen av E16 mellom Kløfta og Slomarka. Borhull BH 3043 har blitt valgt ut som referansepunkt da det ble utført en rekke undersøkelser i dette punktet. Grunnforholdene består av mektige avsetninger av bløt leire, med tykkelse opp til minst 40 m. Den bløte leiren er typisk for denne regionen, med gjennomsnittlig vanninnhold (w), densitet (ρ) og plastisitet (I_p) på henholdsvis 40%, 18,3 kN/m³ og 18%, se Figur B1.1. Leiren kan klassifiseres med middels plastisitet, i motsetning til Trøndelags-leirene som er mer siltige og med lavere plastisitet.



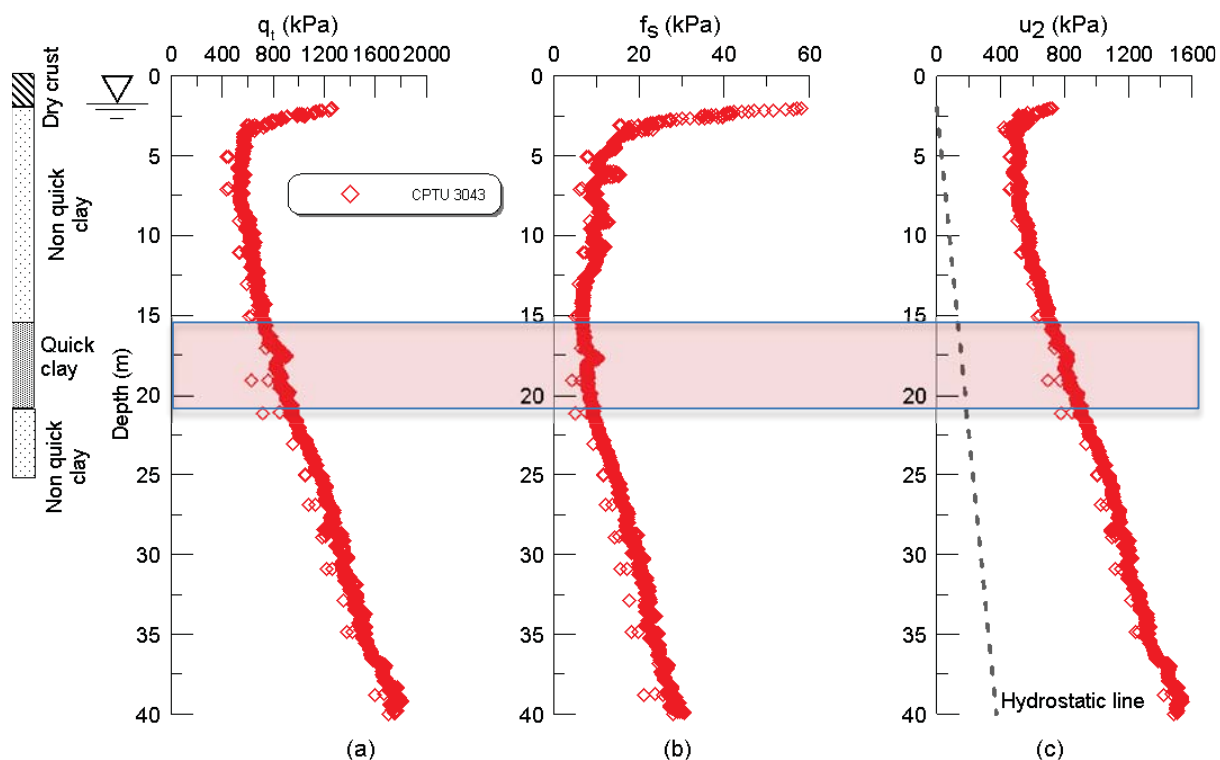
Figur B1.1. Kløfta (borhull BH3043) – grunnleggende rutinedata.



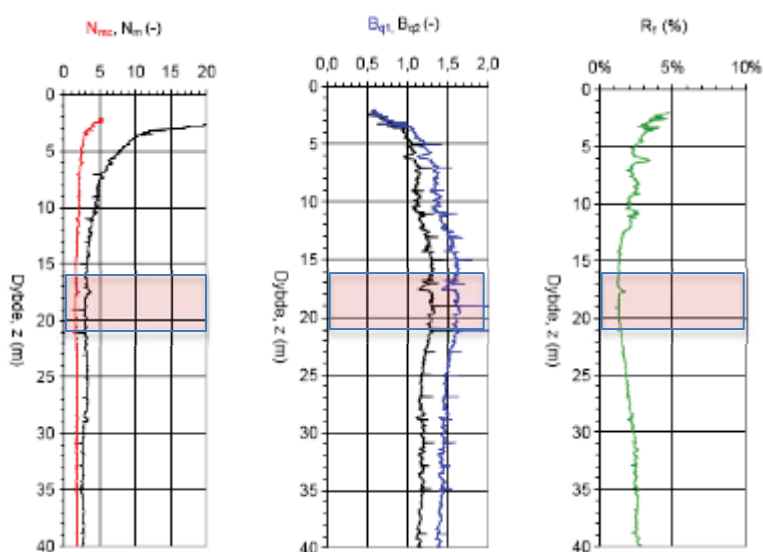
Figur B1.2. Kløfta (borhull BH 3043) – sensitivitet, omrørt skjærfasthet og saltinnhold.

Leiren på stedet er generelt ikke sensitiv, bortsett fra et kvikkleirelag mellom ca. 15 m og 21 m, se Figur B1.2.

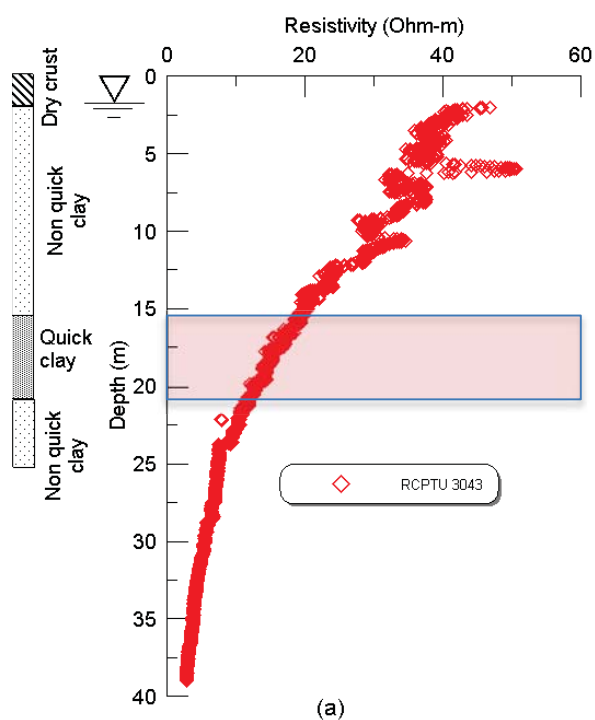
CPTU data fra området er karakteristiske for materialet med korrigert spissmotstand (q_t) økende fra ca. 500 kPa i toppen av det bløte leirlaget til ca. 1800 kPa på 40 m dybde. Sidefriksjonen viser også en økning fra omtrent 5 kPa til 25 kPa i dybden. Poretrykket (u_2) er generelt høyt og langt over hydrostatisk verdi, se Figur B1.3.



Figur B1.3. Kløfta (borhull BH 3043) – CPTU data, q_t , f_s og u_2 .

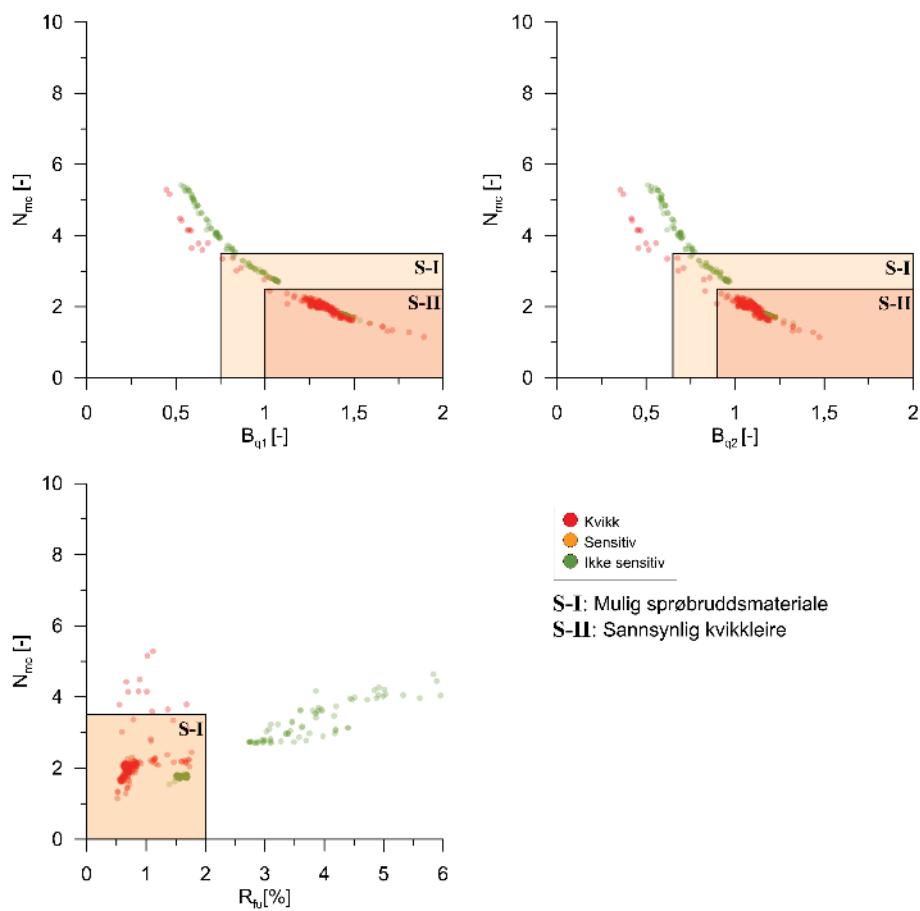


Figur B1.4. Kløfta (borhull BH 3043) – CPTU data, N_m , B_q , R_f .



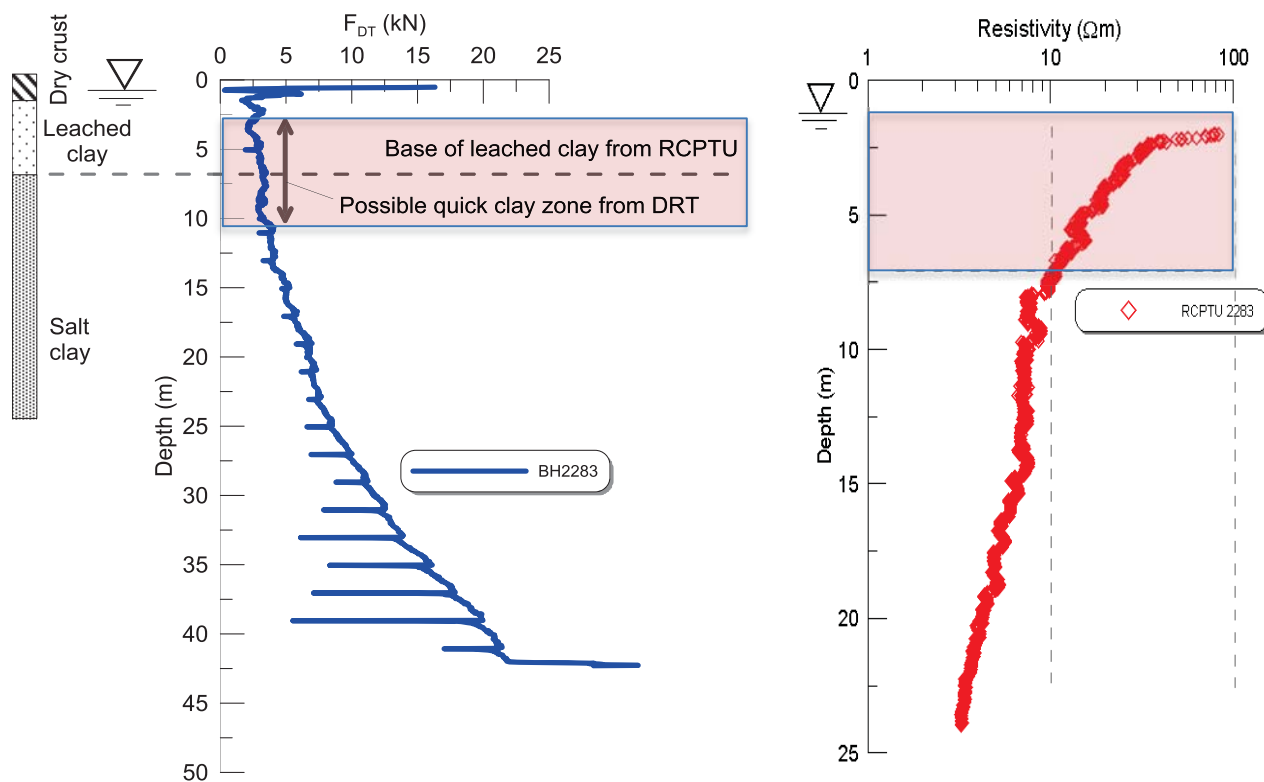
(a)

Figur B1.5. Kløfta (borhull BH 3043) – resultater fra R-CPTU målinger.



Figur B1.6. Kløfta (borhull BH 3043) – nytt identifikasjonsdiagram CPTU.

Resistivetsdata fra R-CPTU vist i Figur B1.5 viser verdier som avtar fra ca. 40 Ωm i toppen av leirlaget til meget lave verdier i dybden. Resistivetsverdiene viser ikke noe distinkt skille mellom ikke-kvikke og kvikke lag. Figur B1.7 viser sammenligning mellom sonderingsprofil fra DRT og et resistivetsprofil fra R-CPTU. Resistivetsverdiene indikerer et noe tykkere kvikkleirelag enn det sonderingen og laboratorieresultatene viser.



(a) Rotary pressure sounding (DRT)

Figur B1.7. Kløfta (borhull BH2283) – sammenligning mellom sonderingsprofil (DT) og resistivetsprofil (R-CPTU). NB! Forskjellig fra BH3043 i de øvrige figurene.

Viktige referanser

Publikasjoner:

1. Christensen, C. W., Pfaffhuber, A.A., Anschütz, H. og Smaavik, T.F. (2015). *Combining airborne electromagnetic and geotechnical data for automated depth to bedrock tracking*. Journal of Applied Geophysics 119, s.178-191.
2. Anschütz, H., Bazin, S. og Pfaffhuber, A.A. (2015). *Towards Using AEM for Sensitive Clay Mapping – A Case Study from Norway*. First European AEM conference, Turin, Italy, Mo AEM 04.

Tekniske rapporter:

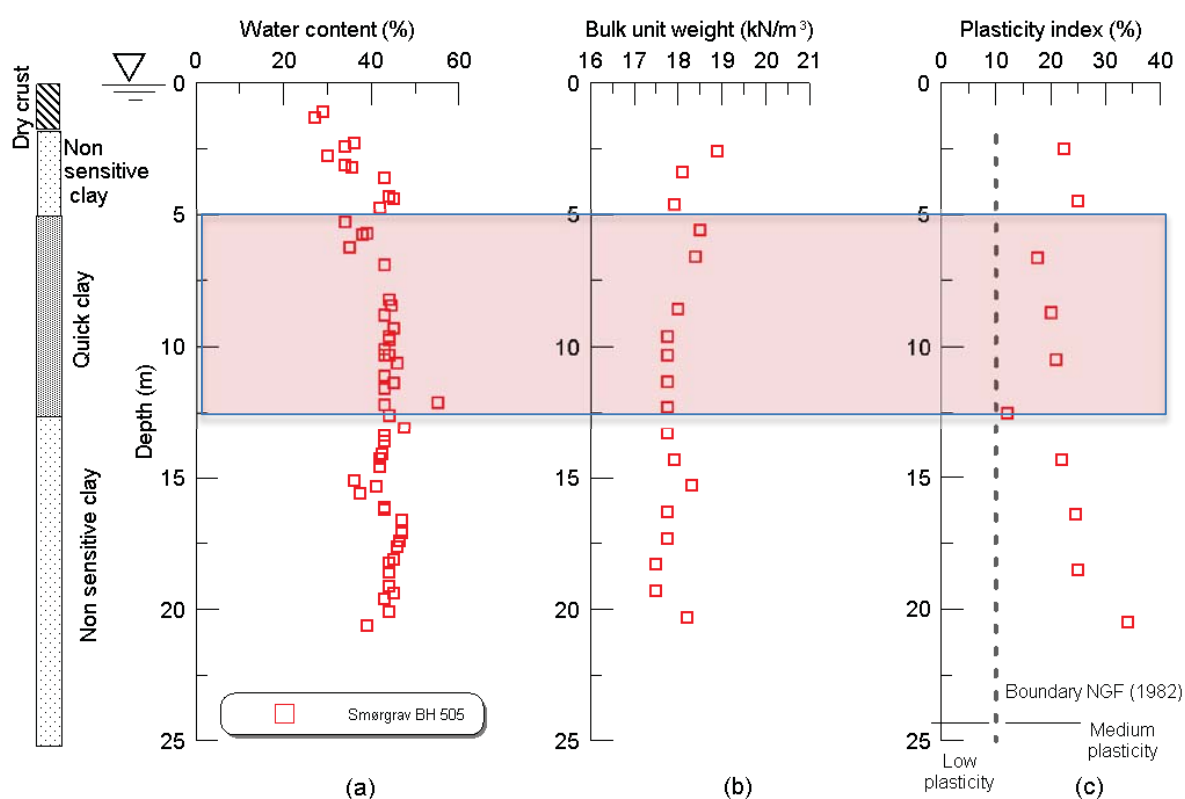
1. Norges Geotekniske Institutt (2013). *E16, strekning Nybakk-Slomarka. Datarapport*. NGI rapport nr. 20120491-01-R. Oppdragsgiver: Statens vegvesen.

Vedlegg B2

Smørgrav/Vestfossen

Forsøksfeltet er svært godt dokumentert og er et av de tidlige feltene som ble etablert for å forstå geofisikkens rolle i kvikkleirekartlegging. Forsøksfeltet er lokalisert i Vestfossen, ca. 1,2 km sørvest for Vålen forsøksfelt. I denne presentasjonen er det fokusert på forholdene i borhull BH 505 på Smørgrav, der det ble påvist et tydelig kvikkleirelag i de stedlige massene. Denne lokaliteten er også interessant ettersom det ble utført resistivitetsforsøk på prøver i laboratoriet.

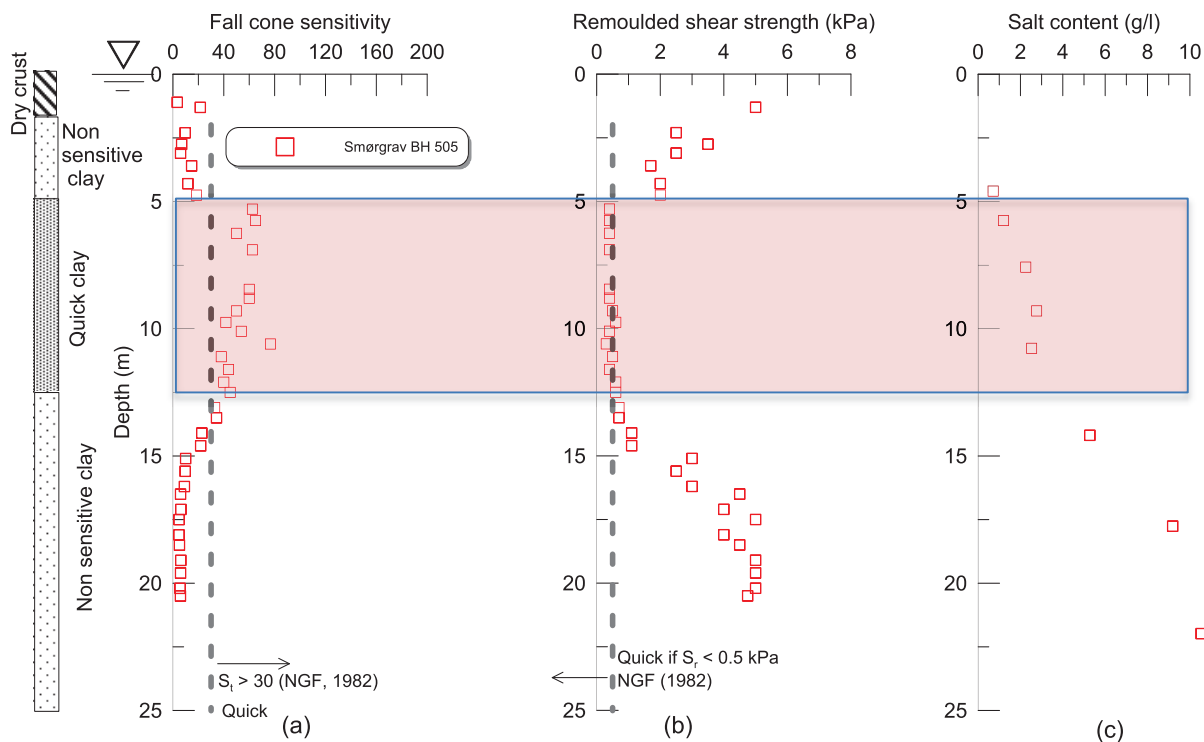
Rutinedata for opptatte prøver er vist i Figur B2.1. Den bløte leiren på denne lokaliteten er typisk for regionen, med et midlere vanninnhold (w), densitet (ρ_b) og plastisitetsindeks (I_p) på henholdsvis 42%, 18,3 kN/m³ og 22%, det vil si forholdsvis like egenskaper som lokaliteten på Kløfta. Leiren er altså klassifisert med middels plastisitet.



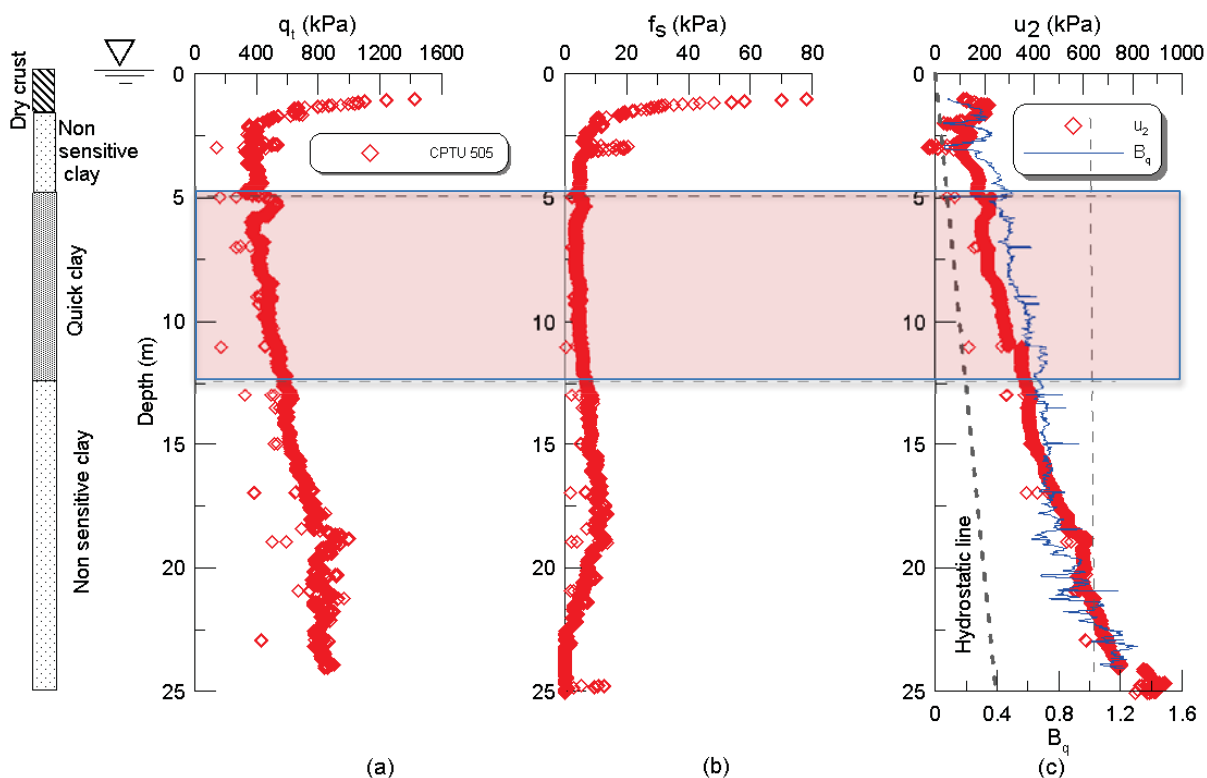
Figur B2.1. Smørgrav – grunnleggende rutinedata (BH 505).

Figur B2.2 viser et distinkt kvikkleirelag i borhull BH 505. Saltinnholdet øker omtrent lineært med dybden, fra veldig lave verdier i starten til omtrent 10.5 g/l ved 22 m dybde. Dette viser at intens utvasking har pågått i hele laget.

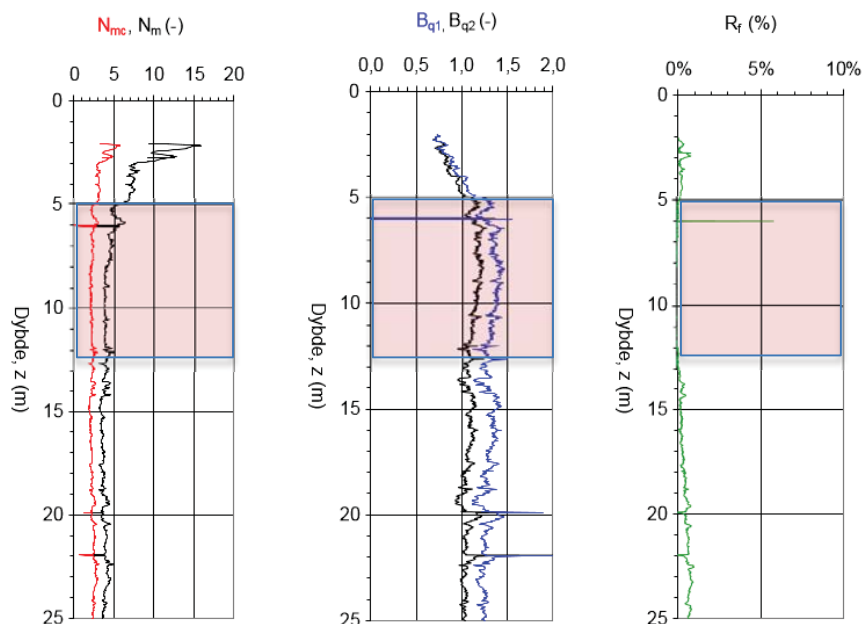
CPTU-data for forsøksfeltet er karakteristisk for leirer fra det sørlige Norge, med en korrigert spissmotstand (q_t) som øker fra ca. 400 kPa på toppen av det bløte leirlaget til omtrent 800 kPa ved 20 m dybde. Sidefriksjonen (f_s) er spesielt lav i laget med kvikkleire. Poretrykket (u_2) viser overtrykk over det hydrostatiske i hele profilet, se Figur B2.3. Figur B2.4 viser de avledede verdiene N_m , B_q og R_f .



Figur B2.2. Smørgrav – sensitivitet, omrørt skjærfasthet og saltinnhold (BH 505).

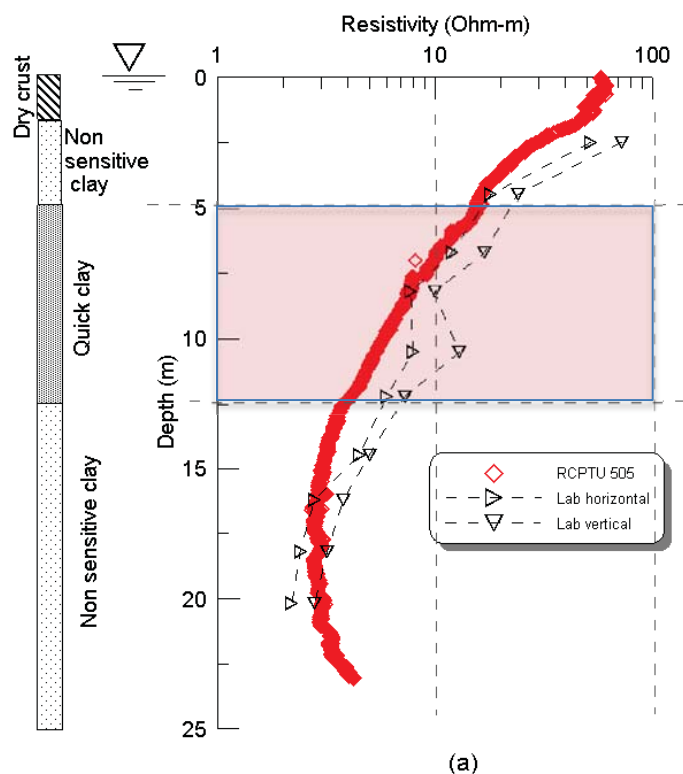


Figur B2.3. Smørgrav – CPTU data, q_t , f_s og u_2 (BH 505).



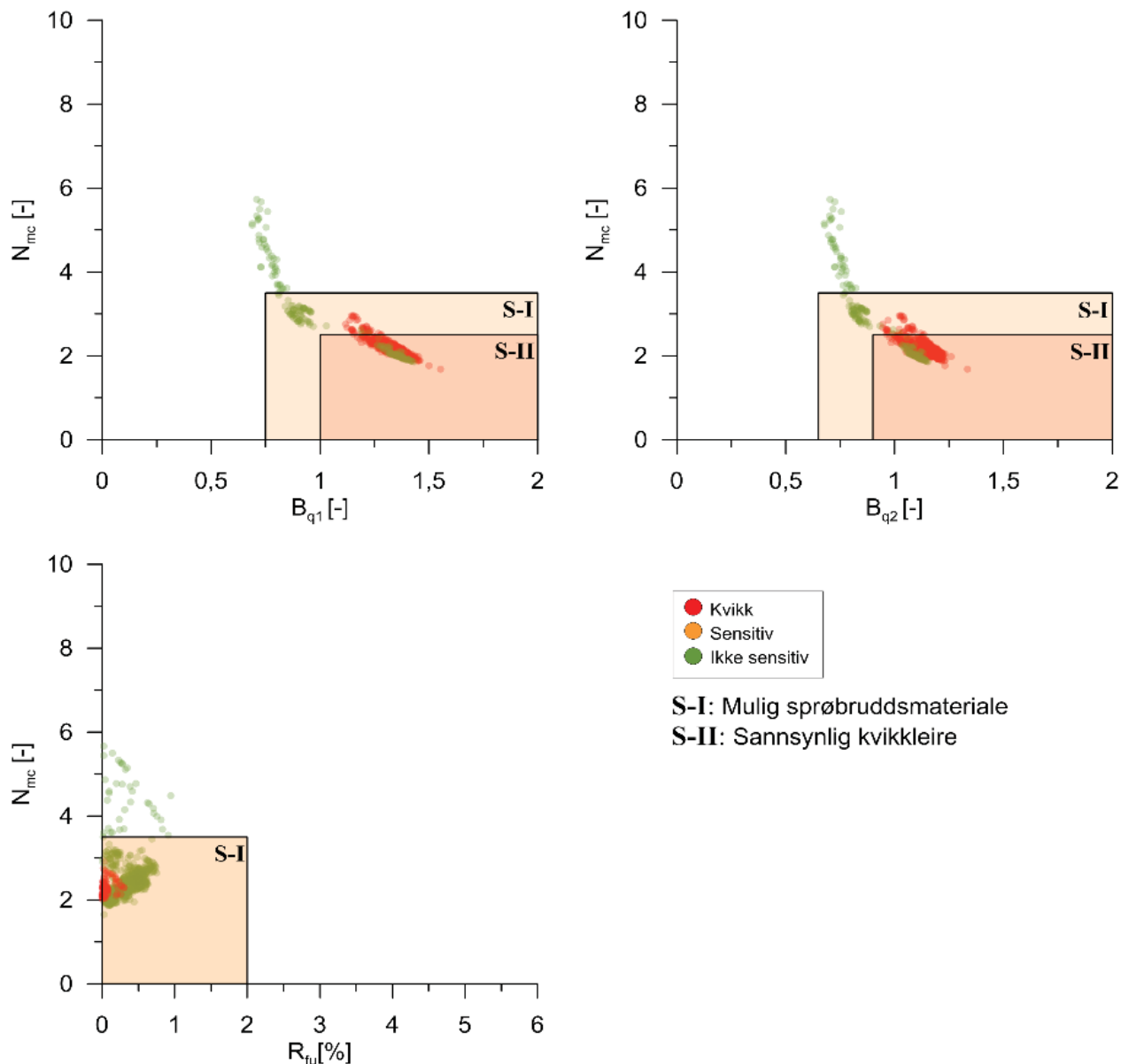
Figur B2.4. Smørgrav – CPTU data, N_m , B_q , R_f .

Resistiviteten fra R-CPTU og laboratorieforsøk er vist i Figur B2.5. Det observeres en kontinuerlig økning av resistiviteten fra ca. 65 Ωm øverst i profilet til ca. 4 Ωm i bunn av kvikkleirelaget. I den ikke-sensitive leiren er resistiviteten tilnærmet konstant rundt 3 Ωm . Laboratiemålte verdier er svært like feltverdiene, både i størrelse og fordeling i profilet. Disse målingene bekrefter altså de målte verdiene i R-CPTU. Laboratiemålingene viser også at resistivitetsverdiene for vertikale prøver er omtrent 25 % høyere enn de horisontale verdiene, noe som indikerer en viss anisotropi i resistiviteten.



(a)

Figur B2.5. Smørgrav – sammenligning mellom resistivitet fra laboratorie- og R-CPTU målinger.



Figur B2.6. Smørgrav – nytt identifikasjonsdiagram CPTU.

Viktige referanser

Publikasjoner:

1. Donohue, S. m.fl. (2012). *Geophysical mapping of quick clay: A case study from Smørgrav, Norway*. Journal of Near Surface Geophysics, EAGE, Vol. 10, No. 3, s.207 - 219.
2. Pfaffhuber, A.A. m.fl. (2010). *Multi - method high resolution geophysical and geotechnical quick clay mapping*. Near Surface 2010 - 16th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics Zurich.
3. Bazin S. og Pfaffhuber, A.A. (2013). *Mapping of quick clay by electrical resistivity tomography under structural constraint*. Journal of Applied Geophysics 98, s.280-287.
4. Rømoen, M., Pfaffhuber, A.A., Karlsrud, K. og Helle, T.E. (2010). *Resistivity on marine sediments retrieved from RCPTU-soundings: a Norwegian case study*. Proceedings, CPT'10, s.289-296, Huntington beach, USA.

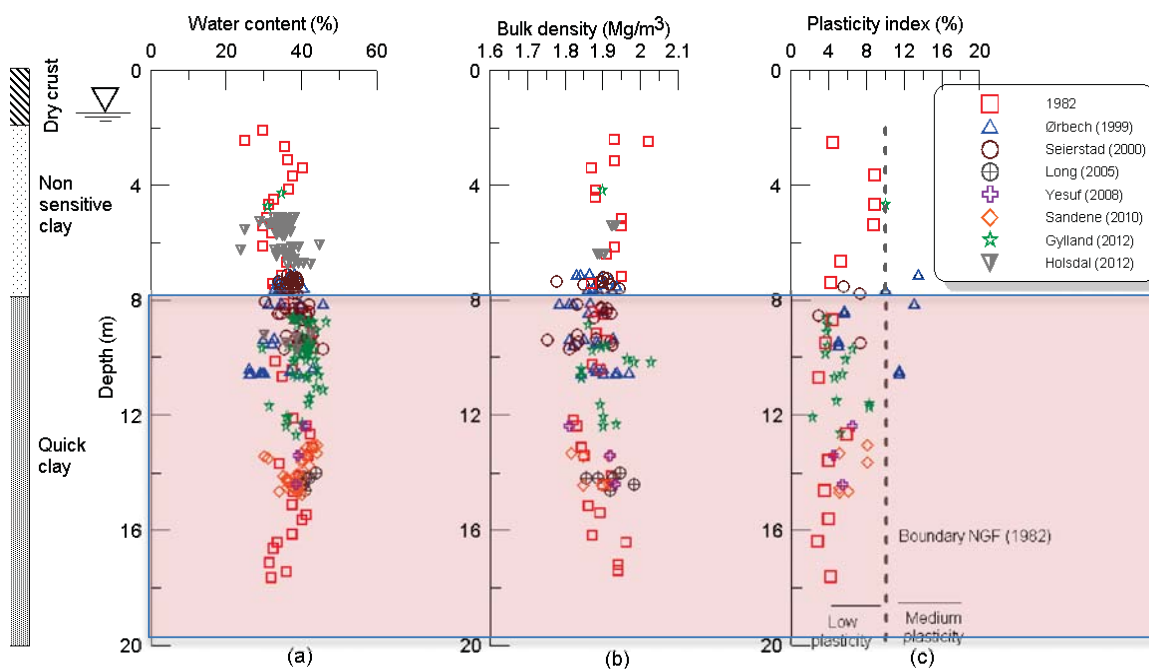
Tekniske rapporter:

1. Norges Geotekniske Institutt (2009). *SIP12 - Correlation between horizontal and vertical resistivity measurements*. NGI rapport nr.20081135-1, 15.09.2009. Oppdragsgiver: Intern (NFR-SIP).
2. Norges Geotekniske Institutt (2010). *Field monitoring of quick clay slope 2010. Datarapport – grunnundersøkelser*. NGI rapport nr.20100136-1-R, 22.07.2010. Oppdragsgiver: Intern (NFR-SIP).

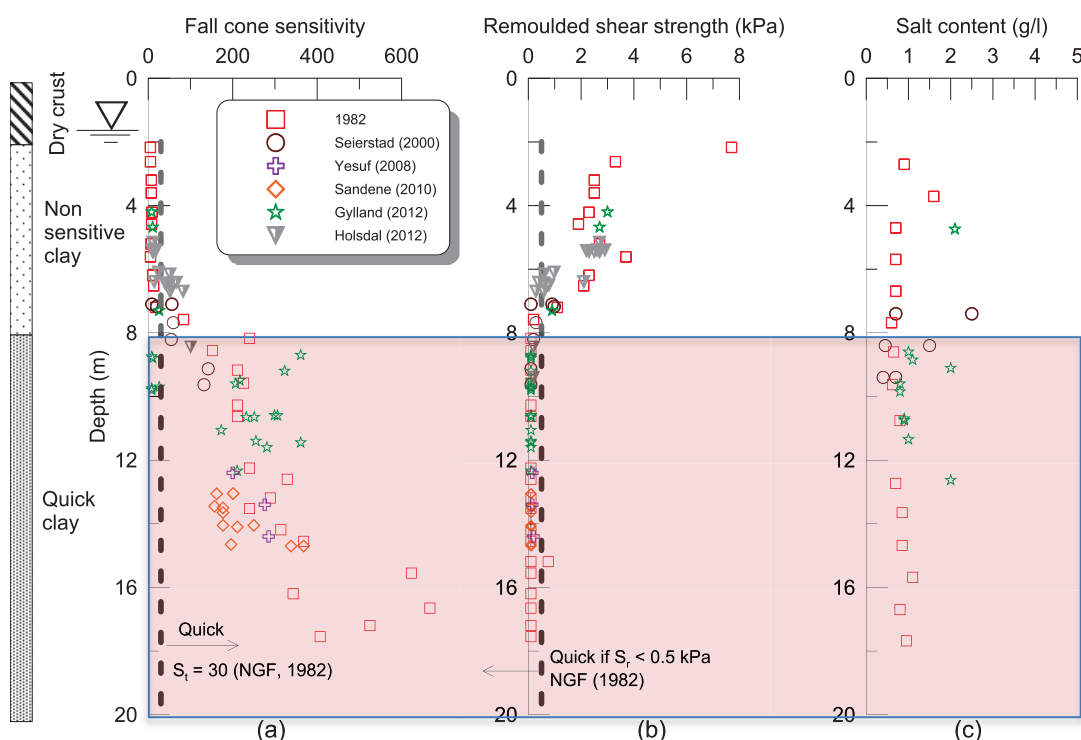
Vedlegg B3

Tiller

Kvikkleiren på Tiller forsøksfelt er benyttet som forskningsmateriale for NTNU Geoteknikk i en årrekke. Området er lokalisert like sør for Trondheim, og grunnforholdene er beskrevet som ca. 8 m med ikke-kvikk leire over kvikkleire, se Figur B3.1. Den bløte Tiller leiren er typisk for regionen med gjennomsnittlig vanninnhold (w), densitet (ρ_b) og plastisitet (I_p) på henholdsvis 38 %, 18,9 kN/m³ og 6,3 %. Det er en tendens til en reduksjon i I_p med dybden, spesielt i kvikkleiren.



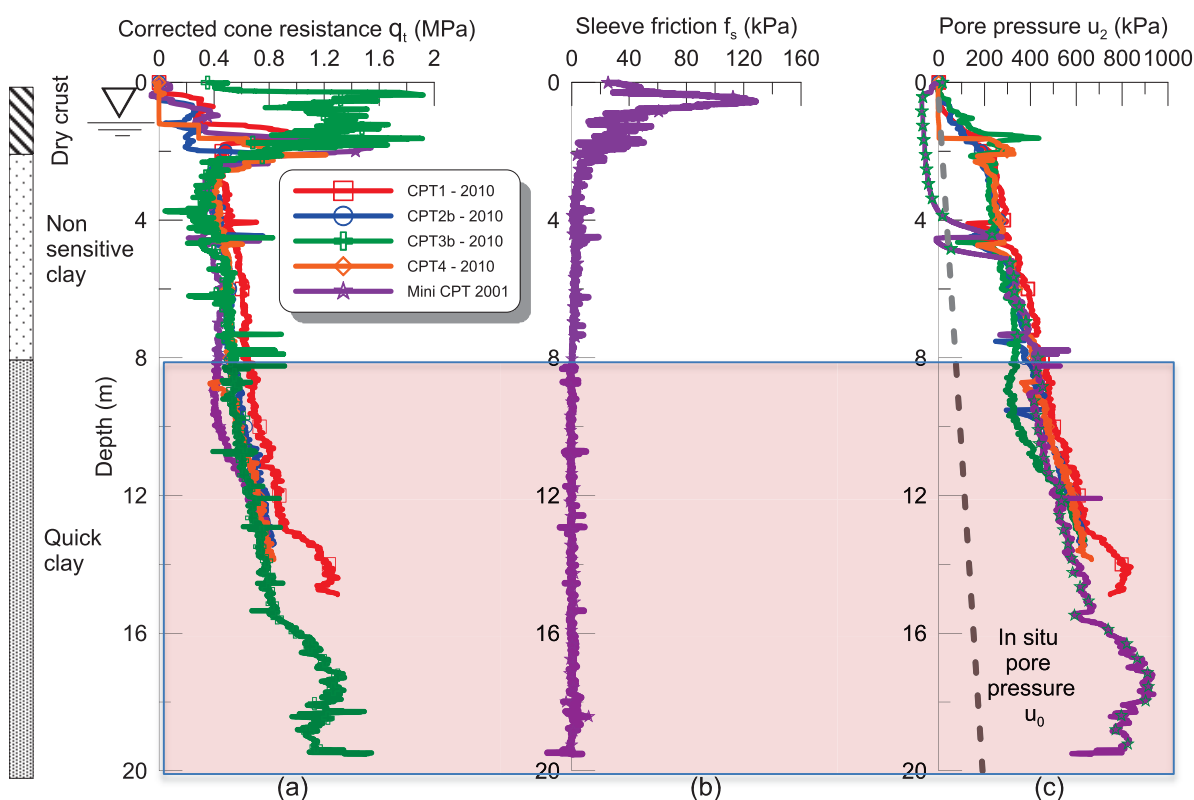
Figur B3.1. Tiller – grunnleggende rutinedata (data for hele området).



Figur B3.2. Tiller – sensitivitet, omrørt skjærfasthet og saltinnhold (data fra hele området).

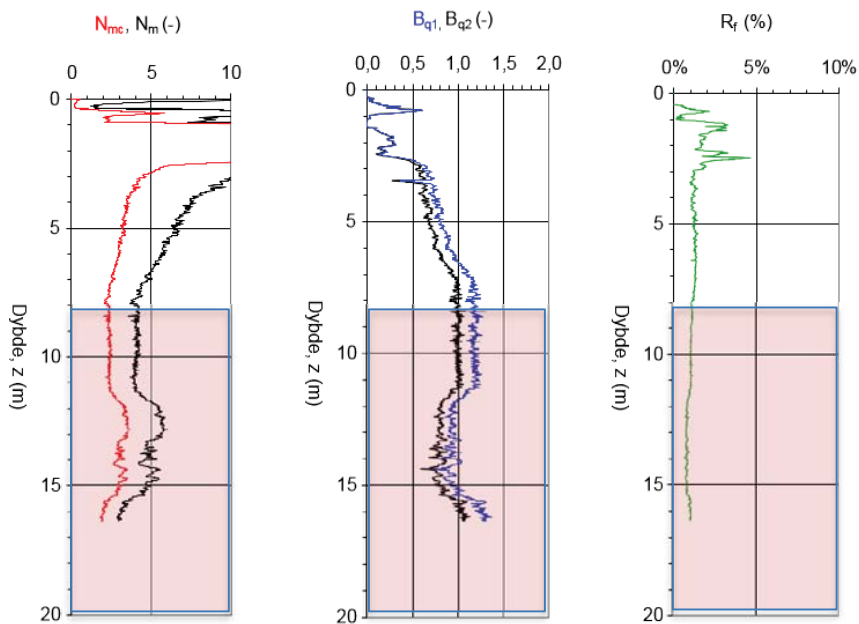
Konusforsøkene i Figur B3.2 viser at leiren over ca. 8 m dybde ikke er kvikk, men at det påtreffes kvikkleire under dette nivået. Det antas generelt at sensitiviteten øker og den omrørte skjærfastheten avtar med dybden. Det er godt samsvar med hensyn på grunnforholdsbestemmelse mellom de ulike forsøksmetodene som er anvendt på feltet. Det er imidlertid interessant å observere at det ikke er signifikante variasjoner i vann- og saltinnhold mellom ikke-kvikk og kvikk leire. Porøsiteten i de to lagene er også lik. De ikke-sensitive lagene har således blitt utvasket etter avsetning på tilsvarende måte som kvikkleiren.

Utvalgte CPTU data for Tiller forsøksfelt er vist i Figur B3.3. Under tørrskorpen er spissmotstandsverdiene svært lave og øker fra ca. 400 kPa til ca. 1200 kPa på 20 m dybde. Sidefriksjonen er svært lav, mens poretrykksverdiene øker lineært med dybden, godt over hydrostatisk fordeling. Det synes ikke å være særlige forskjeller på CPTU-registreringene i kvikk og ikke-kvikk leire, unntatt for sidefriksjonen som er svært lav i kvikkleirelaget.

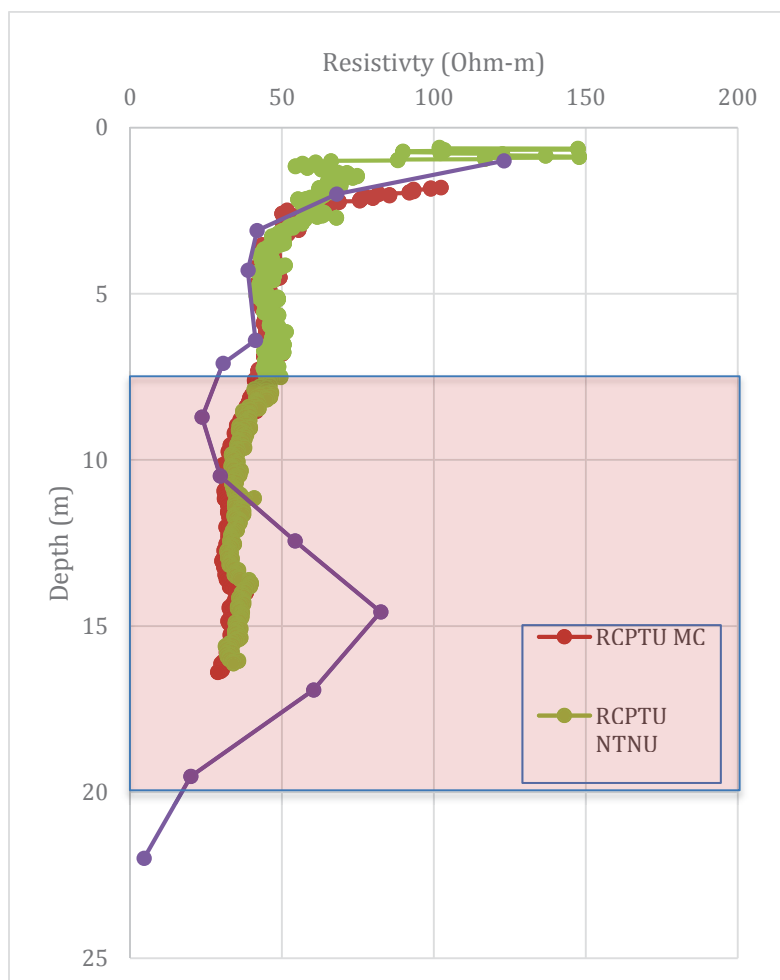


Figur B3.3. Tiller – CPTU profil, q_t , f_s og u_2 (data for hele området).

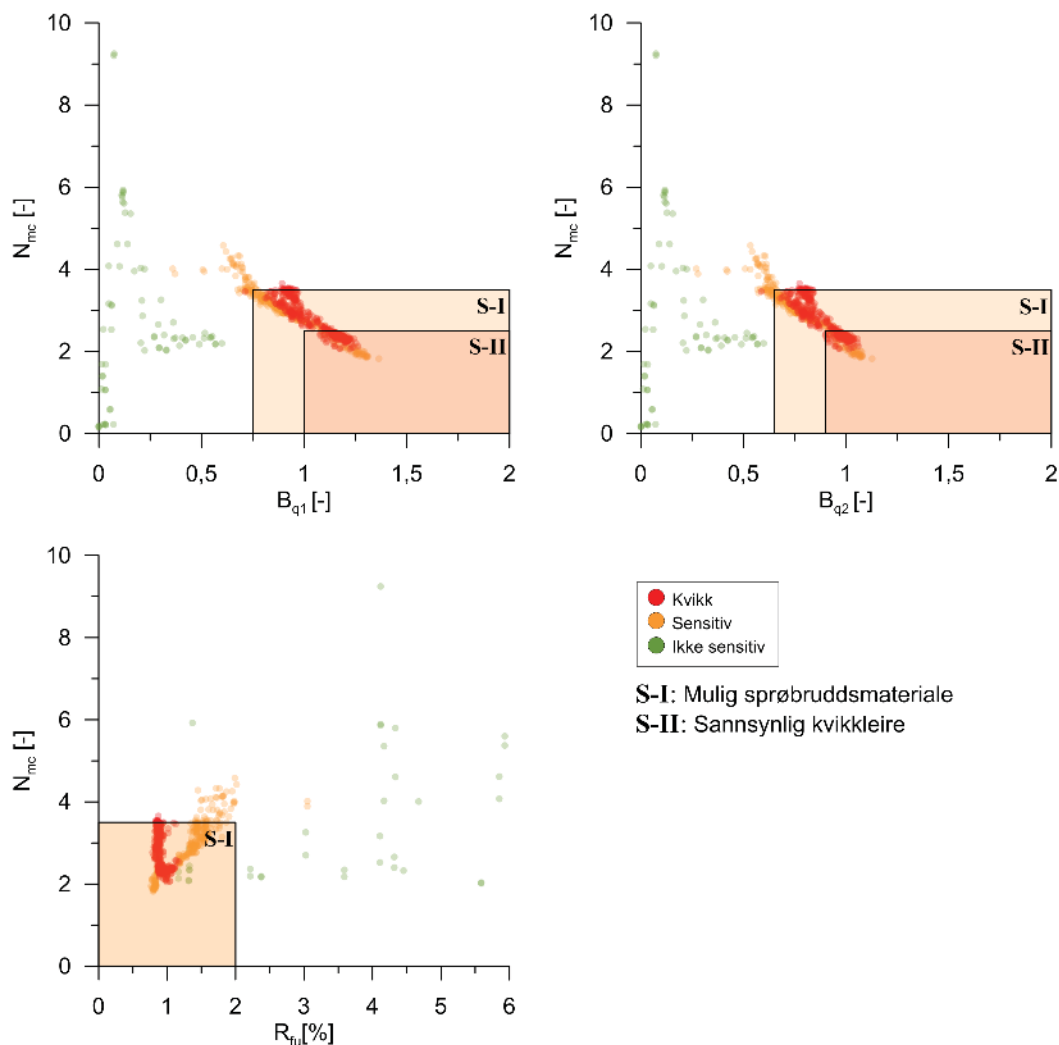
En sammenligning mellom ERT og R-CPTU målinger for området er vist i Figur B3.5. R-CPTU forsøkene ble kjørt parallelt med sonder av likt fabrikat, og resultatene er svært like. Det samme er tilfelle ved sammenligning mellom ERT og R-CPTU data ned til ca. 7 m. Under dette nivået er det noe avvik mellom målingene, særlig under 12 m dybde der ERT gir høyere resistivitetsverdier.



Figur B3.4. Tiller – CPTU profil, N_m , B_q , R_f (data fra hele området).



Figur B3.5. Tiller – sammenligning mellom ERT og R-CPTU målinger.



Figur B3.6. Tiller – nytt identifikasjonsdiagram CPTU.

Viktige referanser

Publikasjoner:

1. Gylland, A. m.fl. (2013). *Characterisation and engineering properties of Tiller clay*. Engineering Geology (Elsevier), Vol. 164, s.86 - 100.
2. Sandven, R. m.fl. (2004). *Sample disturbance in highly sensitive clay*. Proceedings of the 2nd International Conference on Geotechnical and Geophysical Site Characterisation - ISC'2. Porto. Millpress, Rotterdam, s.1861-1868.

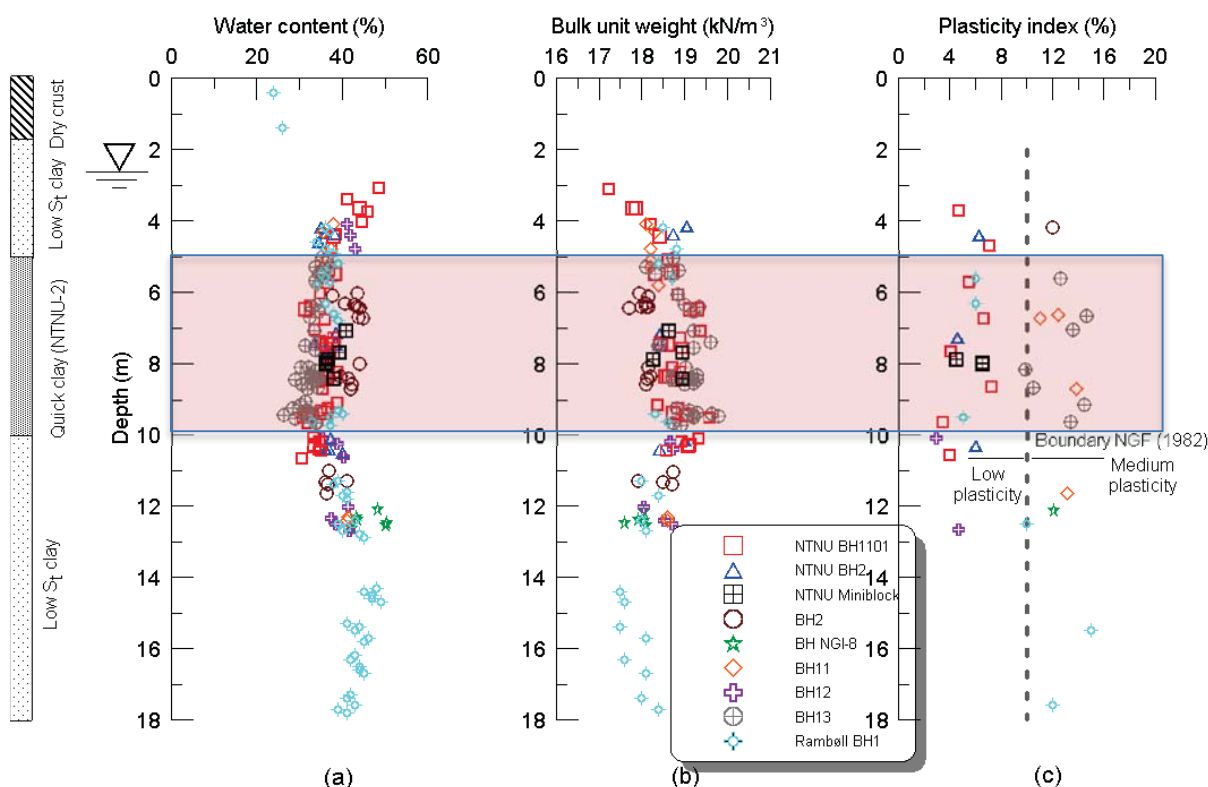
PhD- og Masteroppgaver:

1. Sandven, R. (1990). *Strength and deformation properties of fine grained soils obtained from piezocone tests*. PhD avhandling, Institutt for Geoteknikk, NTH (nå NTNU), Trondheim.
2. Puakowski, S. (2015). *Interpretation methods of CPTU and R-CPTU with special focus on soft soils in Norway*. Masteroppgave, Institutt for bygg, anlegg og transport, NTNU, Trondheim.
3. Ørbech, T. (1999). *Prøveforstyrrelse i leire og silt*. Masteroppgave, Institutt for geoteknikk, NTH (nå NTNU), Trondheim

Vedlegg B4

Esp, Byneset

Forsøksfeltet på Esp er undersøkt i etterkant av skredulykken julen 2012, og det er påvist både kvikk og ikke-kvikk leire i området, se Figur B4.1. Materialet har tilsvarende egenskaper som Tiller leire, med et gjennomsnittlig vanninnhold på $w = 39\%$, gjennomsnittlig densitet (ρ) på $18,5 \text{ kN/m}^3$ og plastisitet $I_p = 8\%$. Leirinnholdet er forholdsvis lavt, med et gjennomsnitt på $35,7\%$.

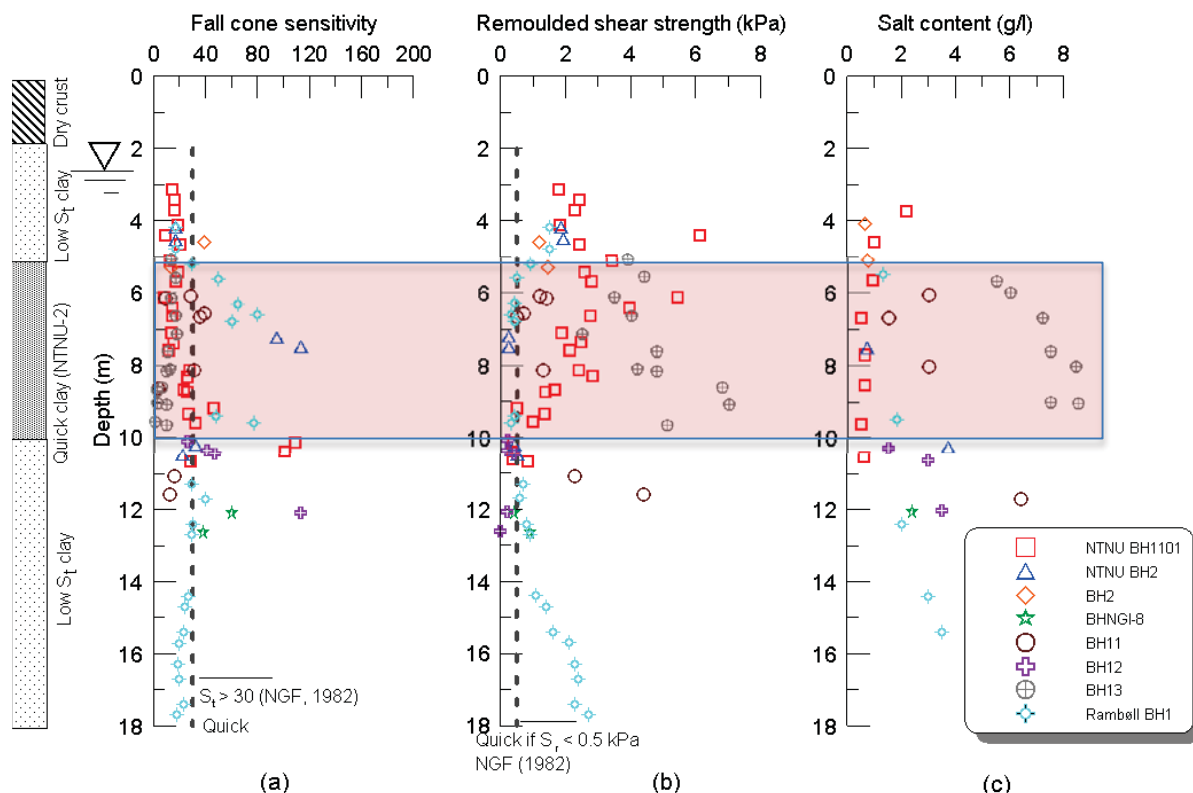


Figur B4.1. Esp, Byneset – grunnleggende rutinedata (alle borhull i området).

I dette studiet har resultater fra borpunktene BH NTNU2 og Rambøll BH 1 blitt prioritert. I disse borpunktene påvises et kvikkleirelag mellom ca. 5,5 m og 10,5 m dybde, se Figur B4.2. Som for Tiller leire er det målt lave saltinnholdsverdier i både de kvikke og ikke-kvikke lagene.

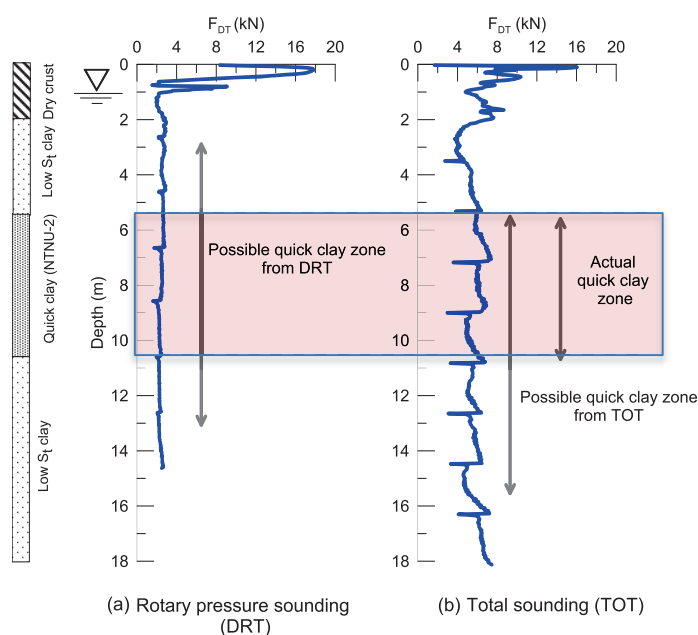
CPTU data for dette forsøksfeltet er karakteristiske for dette materialet, med en korrigert spissmotstand (q_t) som øker fra omtrent 400 kPa i toppen av det bløte leirlaget, til ca. 1100 kPa på 17 m dybde. Sidefriksjonsverdier (f_s) er generelt veldig lave, i størrelsesorden 5 kPa. Poretrykket (u_2) øker lineært med dybden og er betydelig større enn hydrostatisk verdi, se Figur B4.4.

R-CPTU og ERT data er sammenlignet i Figur B4.5. Samsvaret mellom målingene utført med ulike R-CPTU sonder er meget godt. ERT-målingene er svært like R-CPTU resultatene, bortsett fra en sone mellom 6 og 8 m i kvikkleiren der ERT-målingene er høyere.

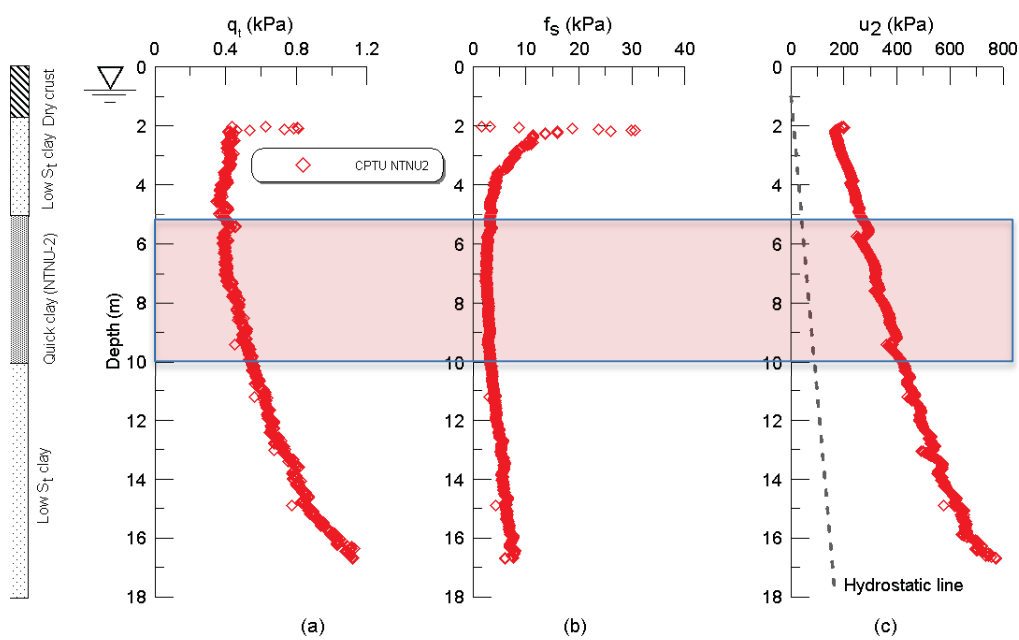


Figur B4.2. Esp, Byneset – sensitivitet, omrørt skjærfasthet og saltinnhold (alle borhull i området).

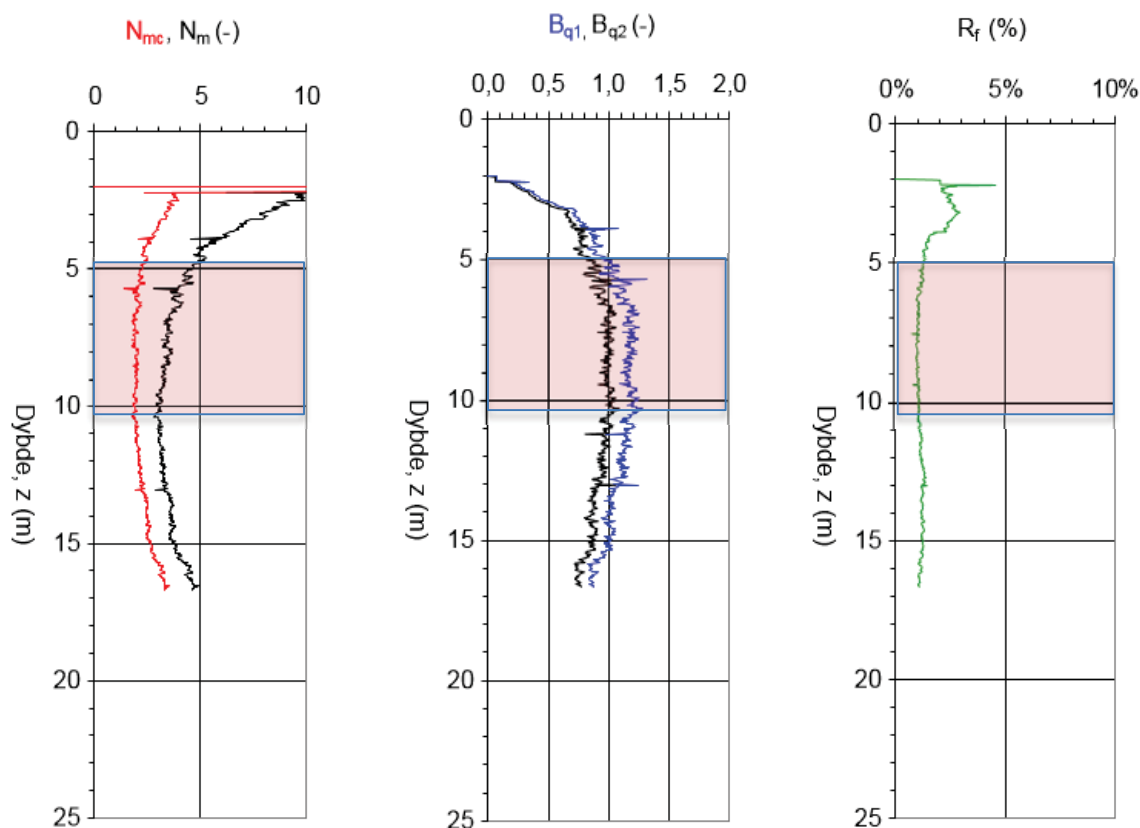
Figur B4.3 viser en sammenligning mellom dreietrykk (DRT)- og totalsonderingsprofiler (TOT) for borhull BH NTNU2. Profilene gir relativt entydig og lik identifikasjon om kvikkleirelaget mellom 5,5 og 10,5 m, der nedpressingskraften er omtrent konstant (vertikal helning). Totalsonderingsprofilen er i dette tilfellet noe forstyrret av stangskifte, men helhetsinntrykket viser til tross for dette en konstant eller svakt avtagende nedpressingskraft. Størrelsesmessig er nedpressingskraften i gjennomsnitt noe større for totalsonderingen på grunn av annen stangdiameter og bruk av krone i stedet for dreiet spiss.



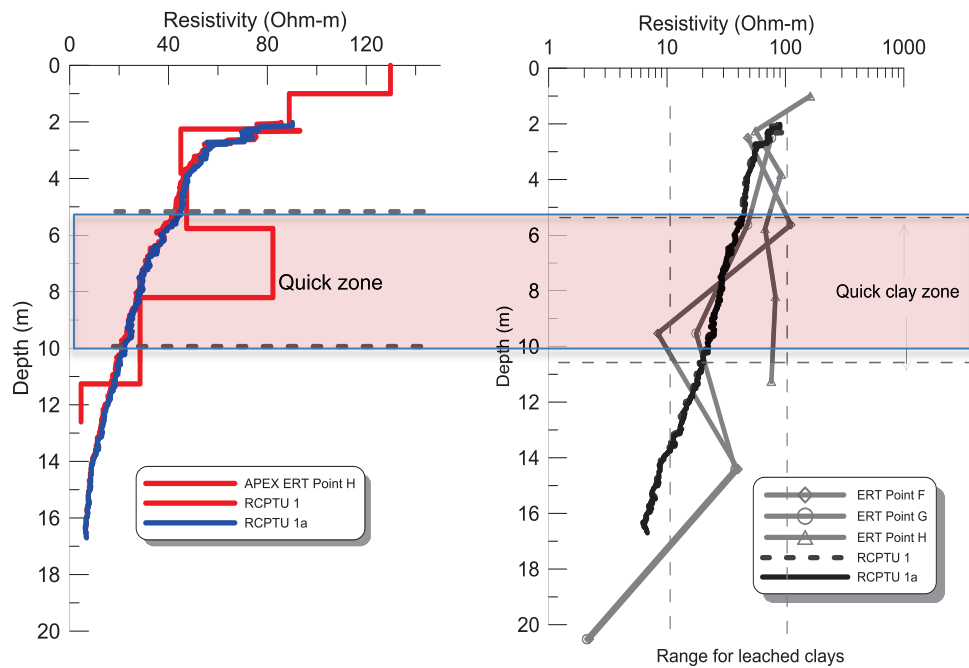
Figur B4.3. Esp, Byneset – sammenligning mellom dreietrykksondering (DRT) og totalsondering (TOT) (BH NTNU2).



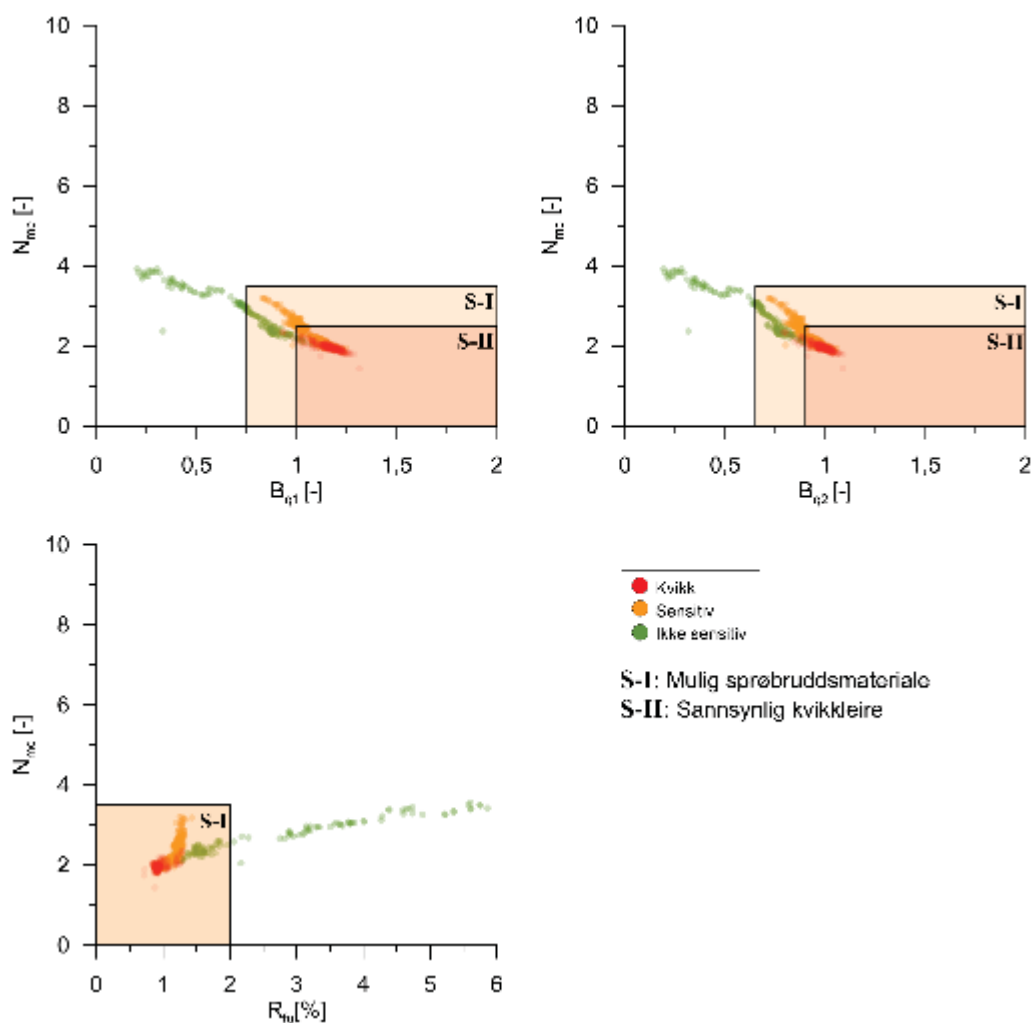
Figur B4.4. Esp, Byneset – CPTU data, q_t , f_s og u_2 (BH NTNU2).



Figur B4.5. Esp, Byneset – CPTU data, N_m , B_q , R_f (BH NTNU2).



Figur B4.6. Esp, Byneset - (a) sammenligning av ERT og R-CPTU målinger (BH NTNU2).



Figur B4.7. Esp, Byneset – nytt identifikasjonsdiagram CPTU (BH NTNU2).

Viktige referanser

Publikasjoner:

1. Lyche, E. (2012). *Kvikkleireskredet på Esp ved Byneset i 2012*. Statens vegvesen, Teknologidagene 2012.

Tekniske rapporter:

1. Thakur, V. (2012). *Datarapport fra kvikkleireskredet på Esp, Byneset*. Norges Vassdrags- og Energidirektorat, Statens vegvesen og Jernbaneverket. NIFS rapport nr. 34/2012.

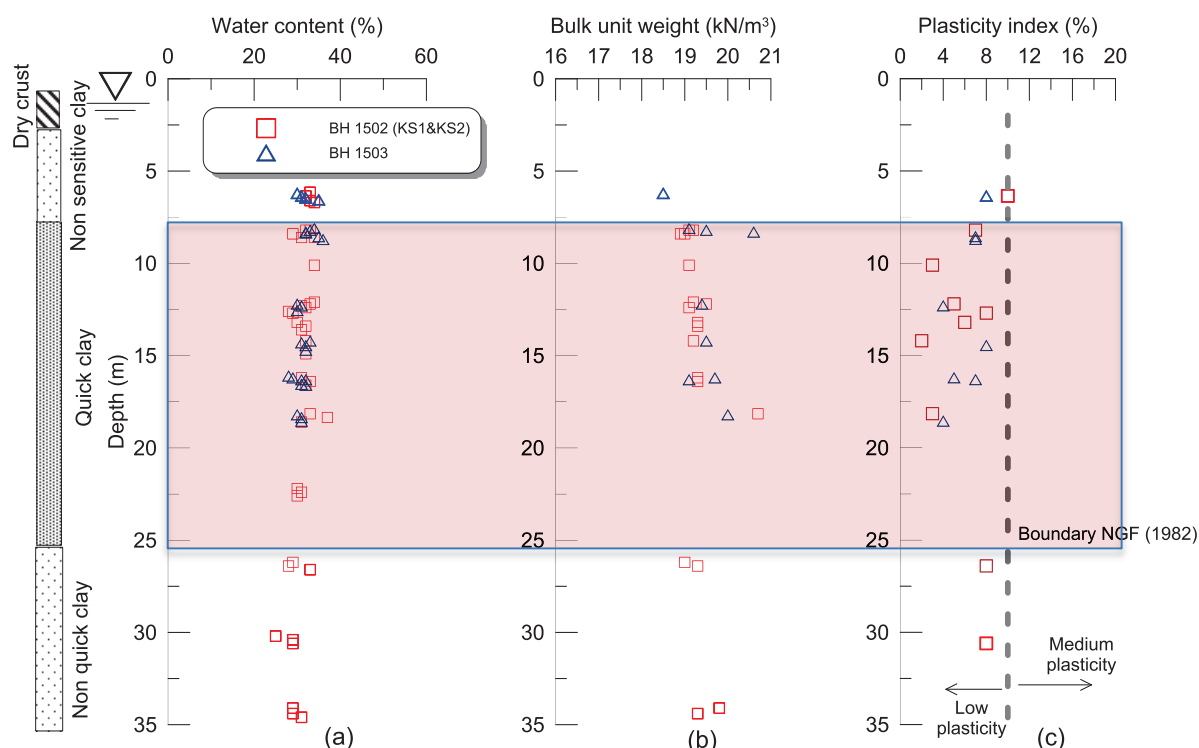
Masteroppgaver:

1. King, J. (2013). *Testing of clays at landslide site at Esp, Byneset*. Masteroppgave, Institutt for Bygg, anlegg og transport, NTNU.
2. Hundal, E. (2014). *CPTU med målt total sonderingsmotstand. Nye muligheter for å detektere kvikkleire?* Masteroppgave, Institutt for Bygg, anlegg og transport, NTNU.
3. Montafia, A. (2013). *Influence of physical properties of marine clays on electric resistivity and basic geotechnical parameters*. Masteroppgave, Institutt for Bygg, anlegg og transport, NTNU, Trondheim.

Vedlegg B5

Klett sør

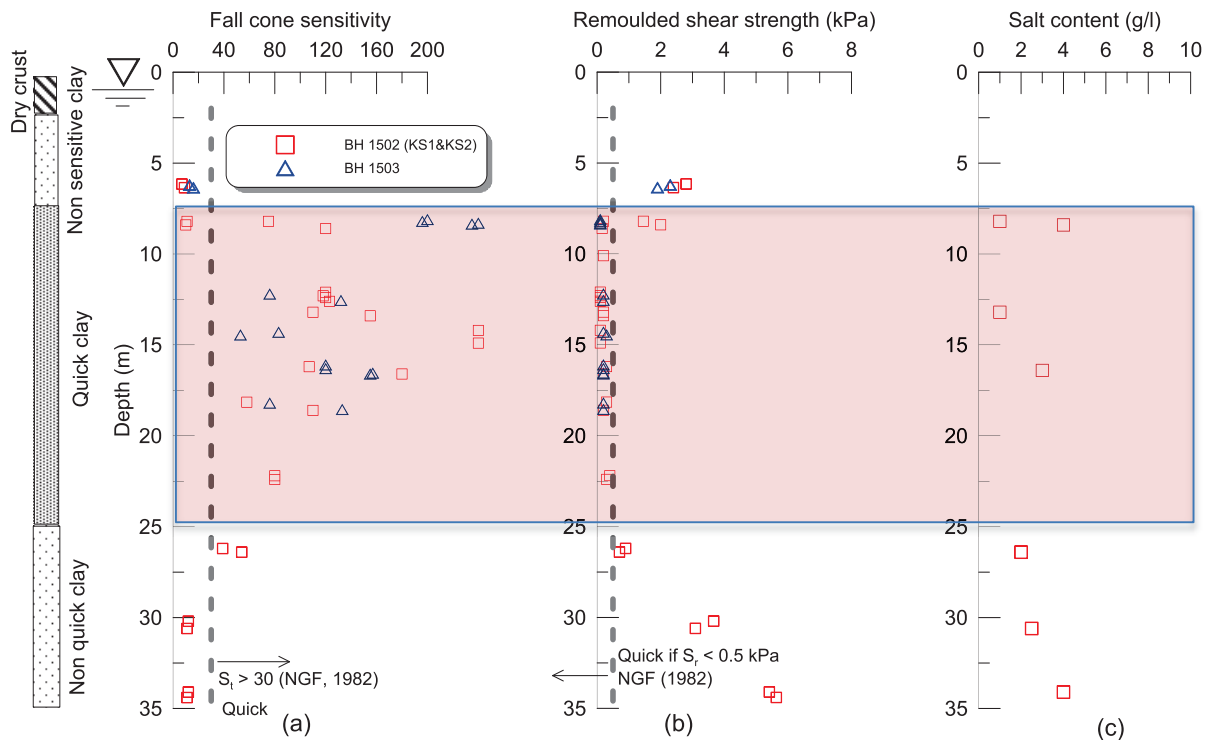
Klett forsøksfelt ble utviklet av Statens vegvesen, NGI og Multiconsult i sammenheng med utbygging av ny E6 Sør. Feltet ligger på sørsiden av eksisterende E6. Et tilsvarende forsøksfelt ligger på nordsiden av E6 og er omtalt i vedlegg B5. Flere aspekter ved oppførsel av kvikkleire har blitt undersøkt i studiet, inkludert bruk av CPTU og R-CPTU, vingebooring, samt tillaging av kalk-sement prøver. Gjennomsnittlig vanninnhold w er lavere enn for Tiller leire ($w = 32\%$), mens midlere densitet ρ er høyere ($\rho = 1,95 \text{ g/cm}^3$). Gjennomsnittlig I_p er forholdsvis lik som for Tiller leire med omtrent 5,8% (i BH1503).



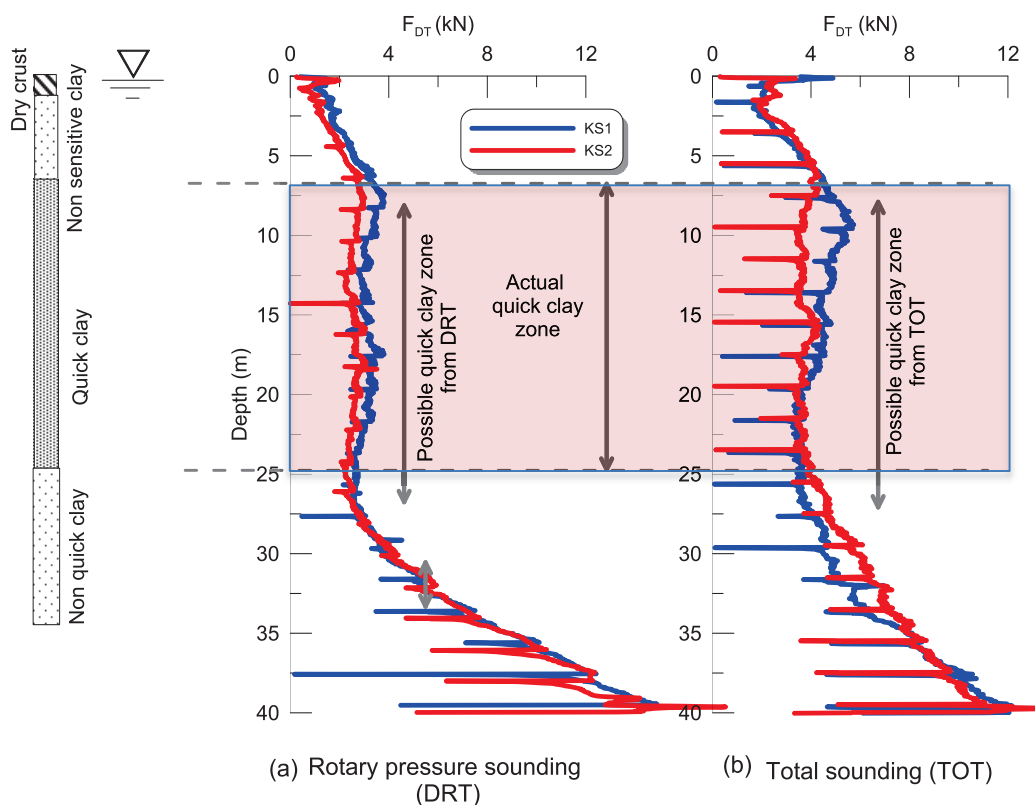
Figur B5.1. Klett sør – grunnleggende rutinedata.

Feltet inneholder ikke-sensitiv leire til omtrent 6 m - 8 m, med kvikkleire under dette nivået, se Figur B5.2.

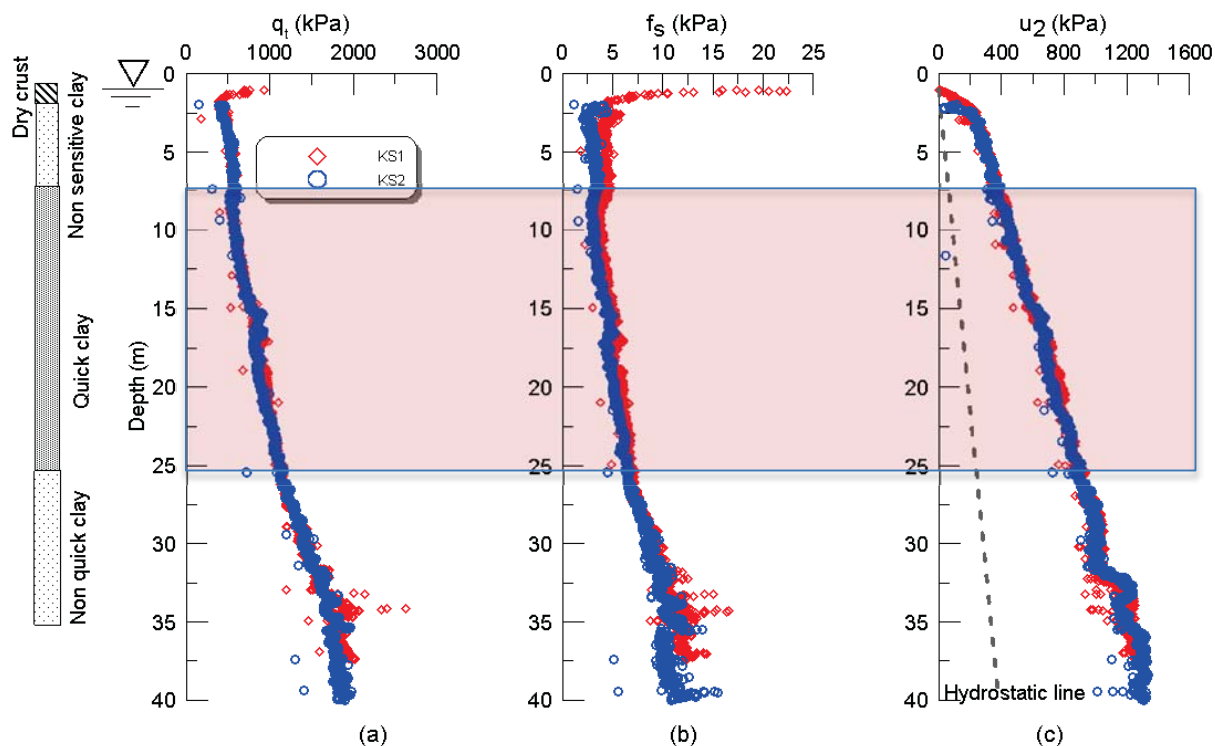
CPTU data for borhullene KS1 og KS2 viser meget god repeterbarhet, se Figur B5.4 Korrigert spissmotstand (q_t) øker fra ca. 500 kPa på toppen av det bløte leirlaget til ca. 2000 kPa på 35 m dybde. Sidefriksjonen (f_s) er liten og viser en svak økning med dybden, samt en svak reduksjon på toppen av kvikkleirelaget. Poretrykket er generelt høyt og ligger godt over hydrostatisk poretrykksfordeling.



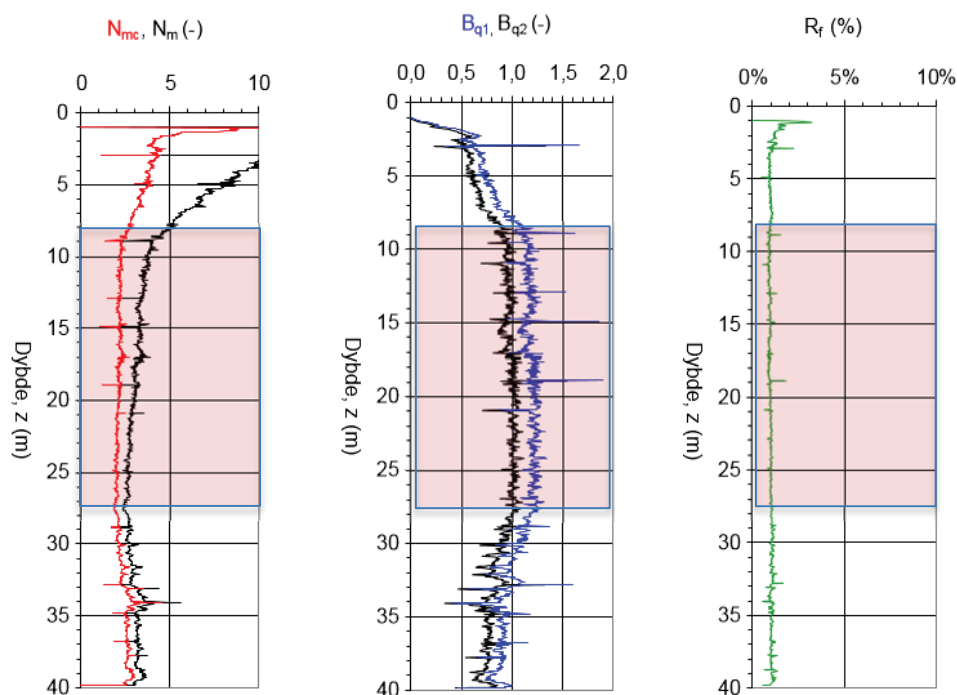
Figur B5.2. Klett sør – sensitivitet, omrørt skjærfasthet og saltinnhold.



Figur B5.3. Klett sør – sammenligning mellom dreietrykk- og totalsonderingsprofil.

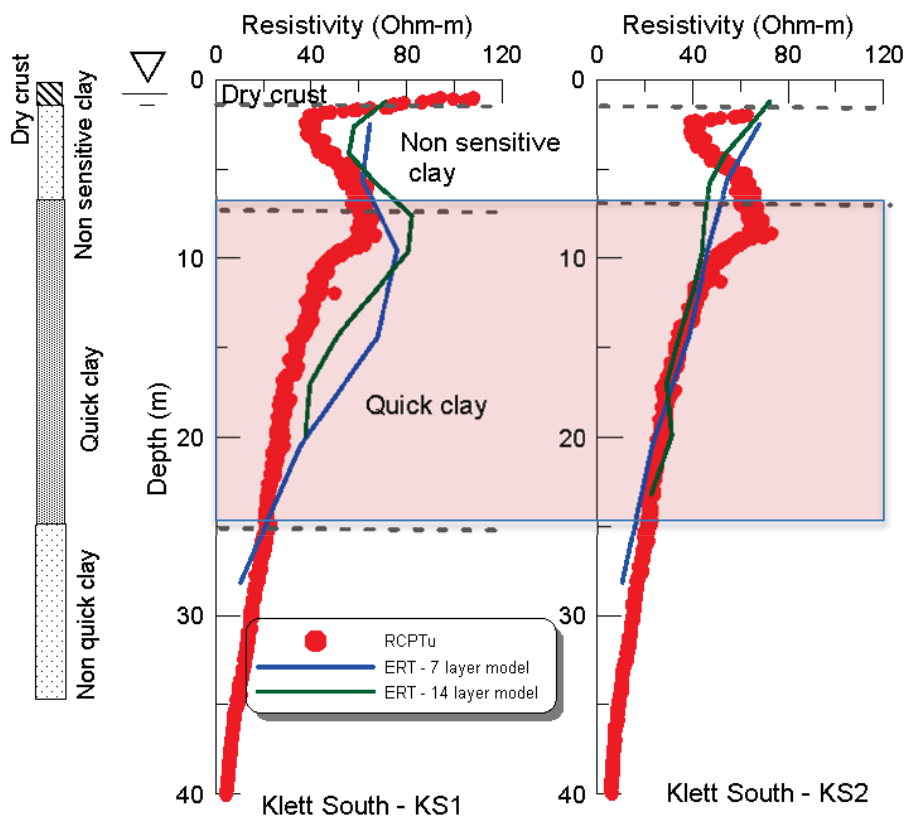


Figur B5.4. Klett sør – CPTU data, q_t , f_s og u_2 .

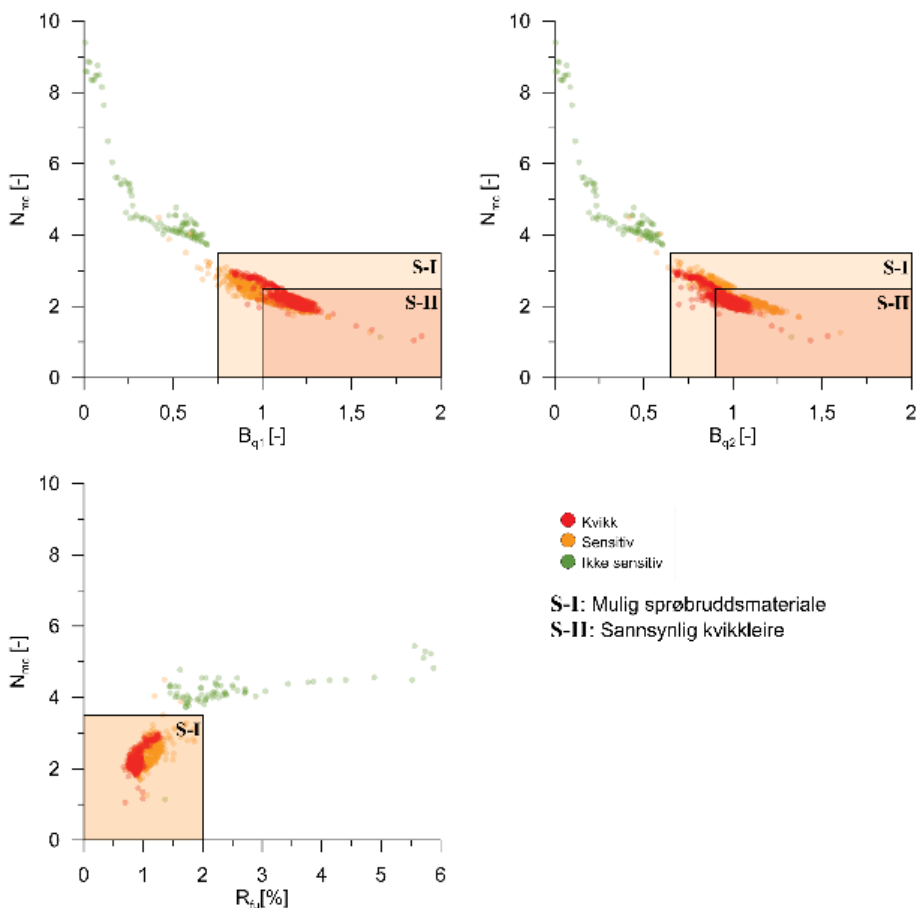


Figur B5.5. Klett sør – CPTU data, N_m , B_q , R_f .

Det er generelt veldig godt samsvar mellom R-CPTU og ERT målinger på de to lokasjonene KS1 og KS2, se Figur B5.6.



Figur B5.6. Klett sør – a) sammenligning mellom ERT og R-CPTU målinger.



Figur B5.7. Klett sør – nytt identifikasjonsdiagram CPTU.

Viktige referanser

Publikasjoner:

1. Amundsen, H.A. m.fl. (2015). *On engineering characterisation of a low-plastic sensitive soft clay*. Proceedings, GeoQuebec 2015 – - Challenges from North to South. Québec, Canada.

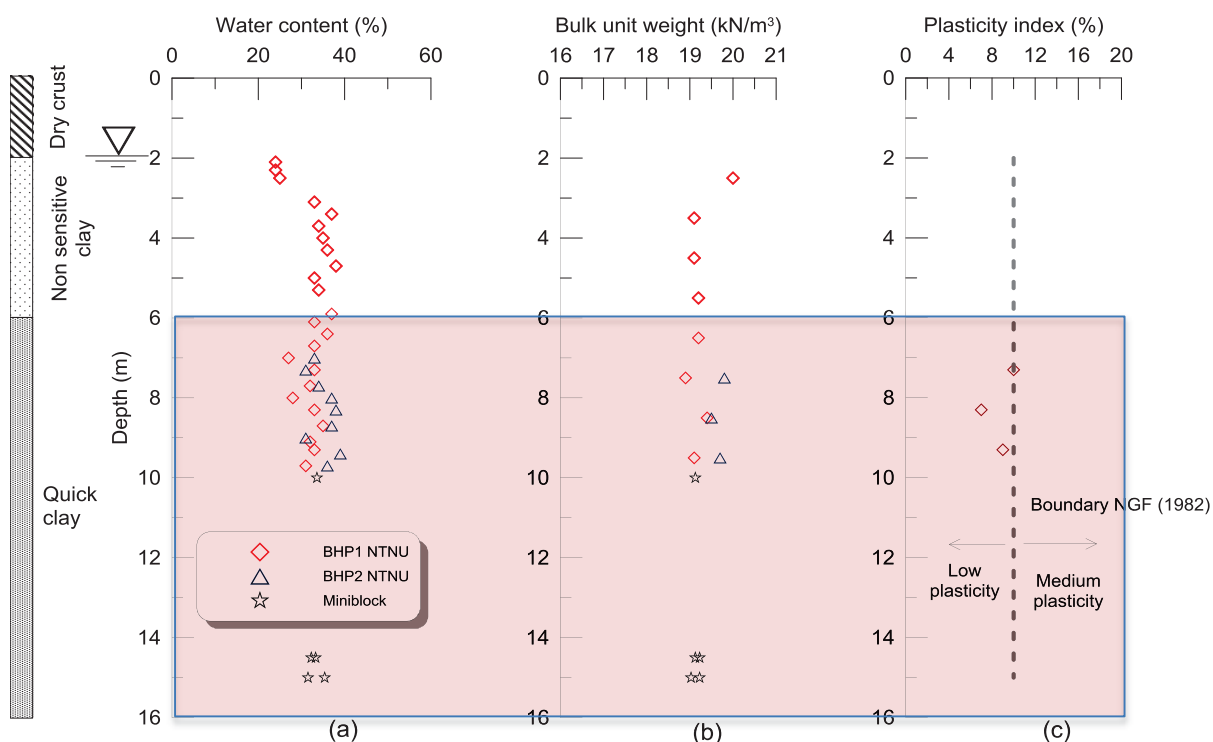
Tekniske rapporter:

1. Multiconsult (2015). *Detektering av kvikkleire ved hjelp av R-CPTU og elektrisk vingebor. Resultater fra feltstudie.*
Multiconsult rapport nr. 415559-2-RIG-RAP-003rev01.
NIFS rapport nr. R101-2015.

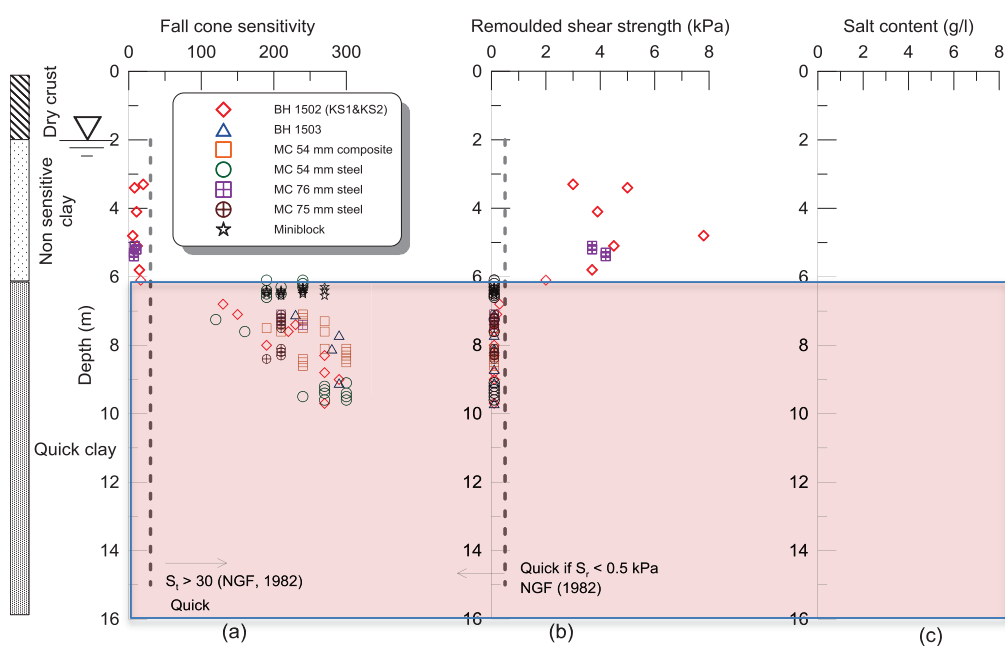
Vedlegg B6

Klett nord

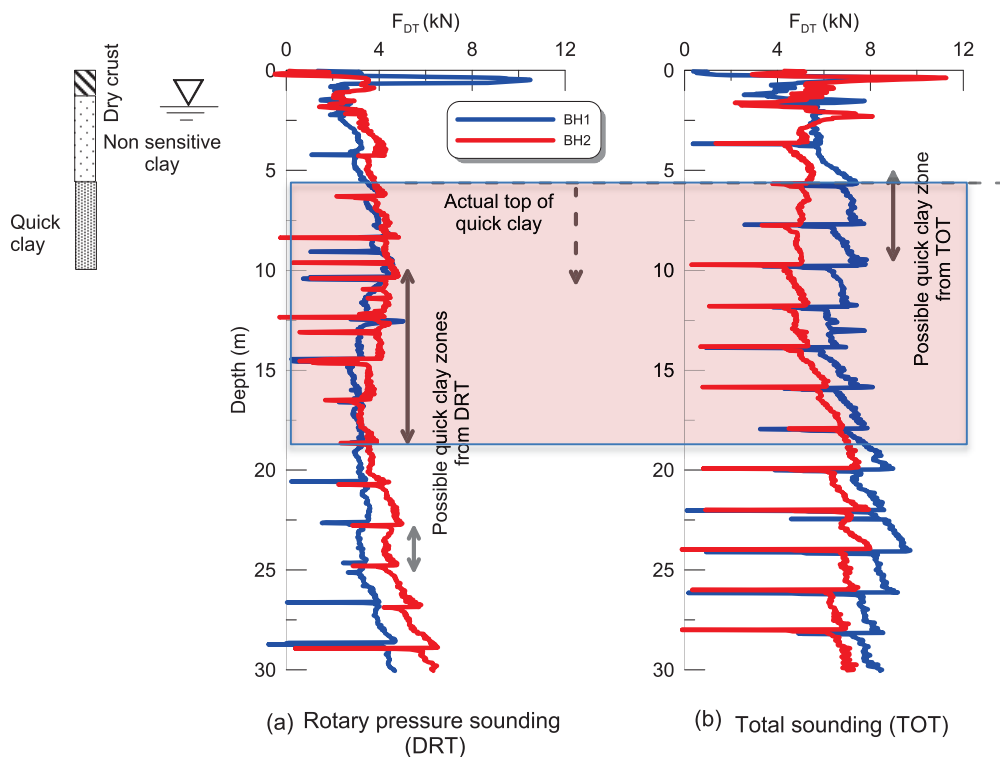
Feltet på Klett nord er ikke undersøkt like godt som nabofeltet Klett sør. Feltet er imidlertid interessant fordi blokkprøvedata er tilgjengelige, sammen med ERT og R-CPTU data. Grunnleggende rutinedata for feltet er samlet i Figur B6.1. Gjennomsnittlige verdier av w , ρ_b and I_p er henholdsvis 33,1 %, 19,3 kN/m³ og 8,7 %. For alle praktiske formål er dette tilsvarende forhold som på Klett sør feltet.



Figur B6.1. Klett nord – grunnleggende rutinedata.

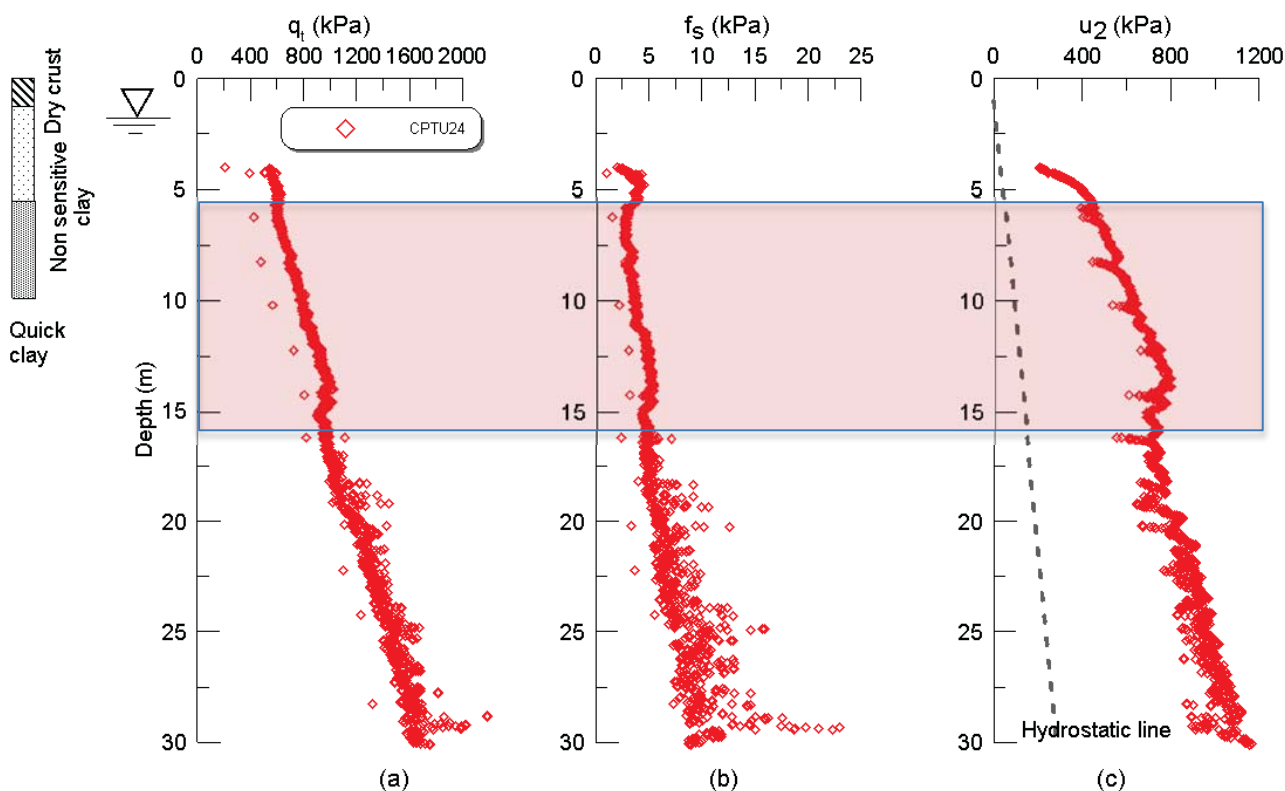


Figur B6.2. Klett nord – sensitivitet, omrørt skjærfasthet og saltinnhold (ikke utført).

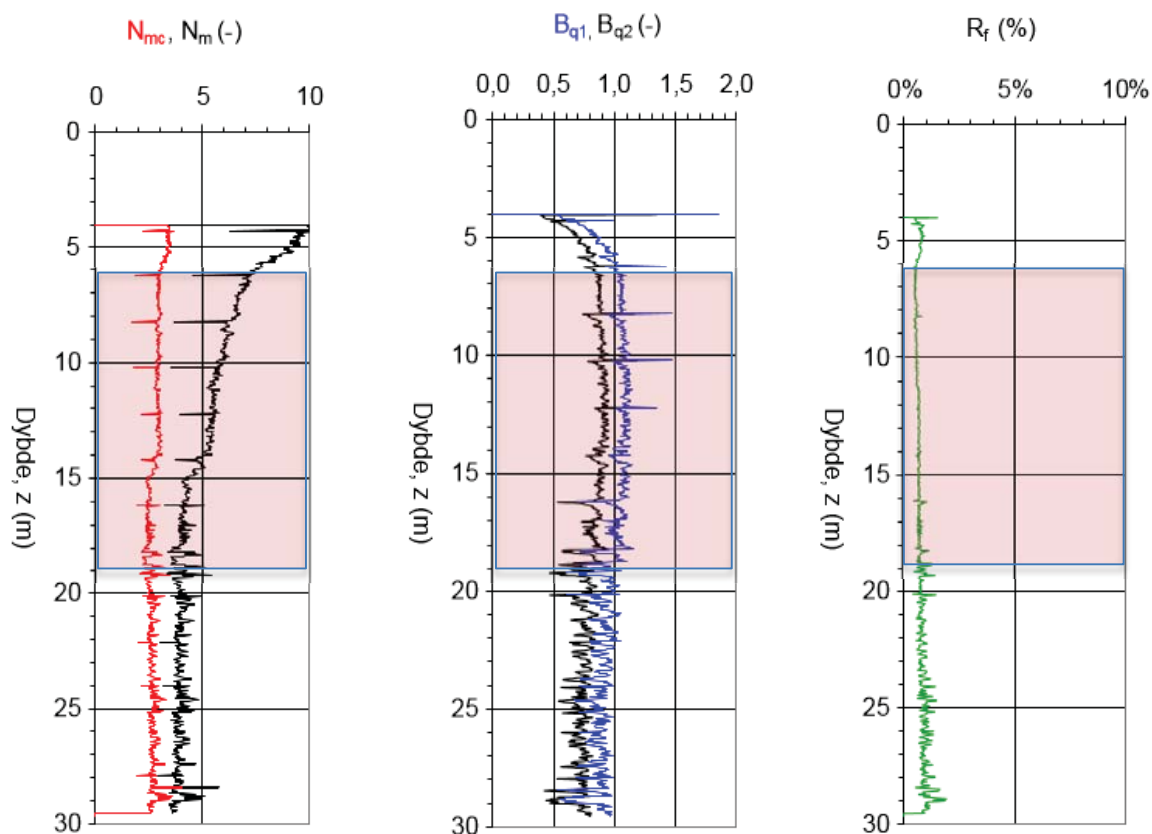


Figur B6.3. Klett nord – sammenligning mellom dreietrykk- og totalsonderingsprofil.

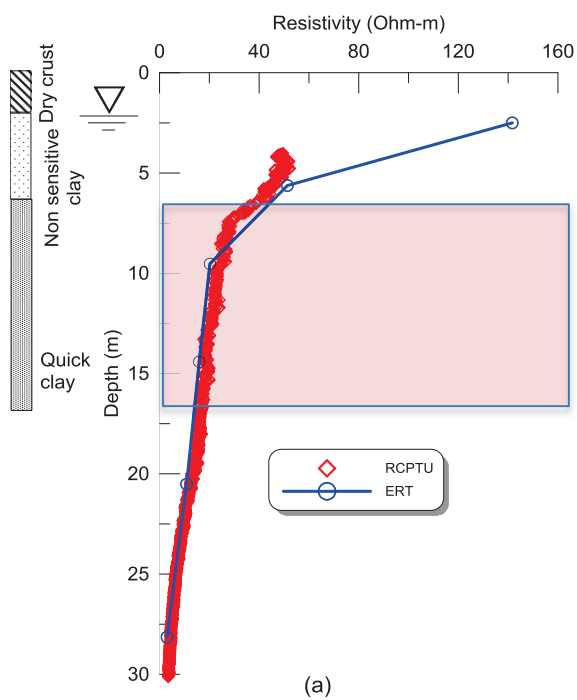
For Klett nord er det lettere å definere kvikkleireområde enn for Klett sør på grunn av det store antall kvikkleireprøver tilgjengelige, se Figur B6.2. Grunnforholdsmodellen kan beskrives som et 2 m tykt topplag av tørrskorpe over ikke-sensitiv, plastisk leire ned til ca. 4 m dyp, og derfra kvikkleire ned til ca. 10 m.



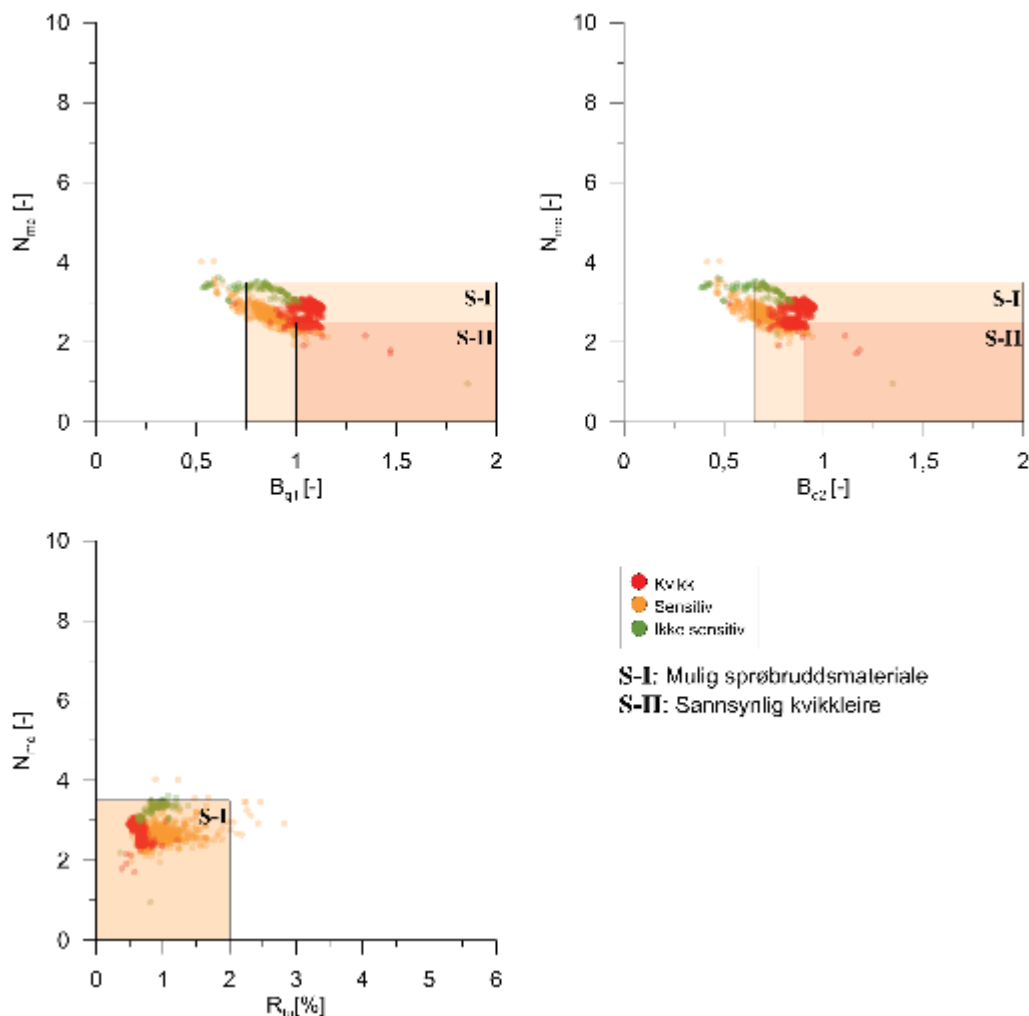
Figur B6.4. Klett nord – CPTU data, q_t , f_s og u_2 .



Figur B6.5. Klett nord – CPTU data, N_m , B_q , R_f .



Figur B6.6. Klett nord – sammenligning mellom ERT og R-CPTU målinger.



Figur B6.6. Klett nord – nytt identifikasjonsdiagram CPTU.

CPTU profiler for Klett nord er ganske like som på Klett sør, se Figur B6.4, med q_t verdier litt større og noe mer variable på grunn av et større innslag av silt og siltlinser. De noe større variasjonene er tydeligere i profilene for sidefriksjon f_s og poretrykk u_2 , særlig under 15 m. Også i dette profilet bemerkes en endring i f_s -profilet på toppen av kvikkleirelaget.

ERT og R-CPTU data for Klett nord er sammenlignet på Figur B6.6. Det er svært godt samsvar mellom de to metodene, både i kvikke og ikke-sensitive lag.

Viktige referanser

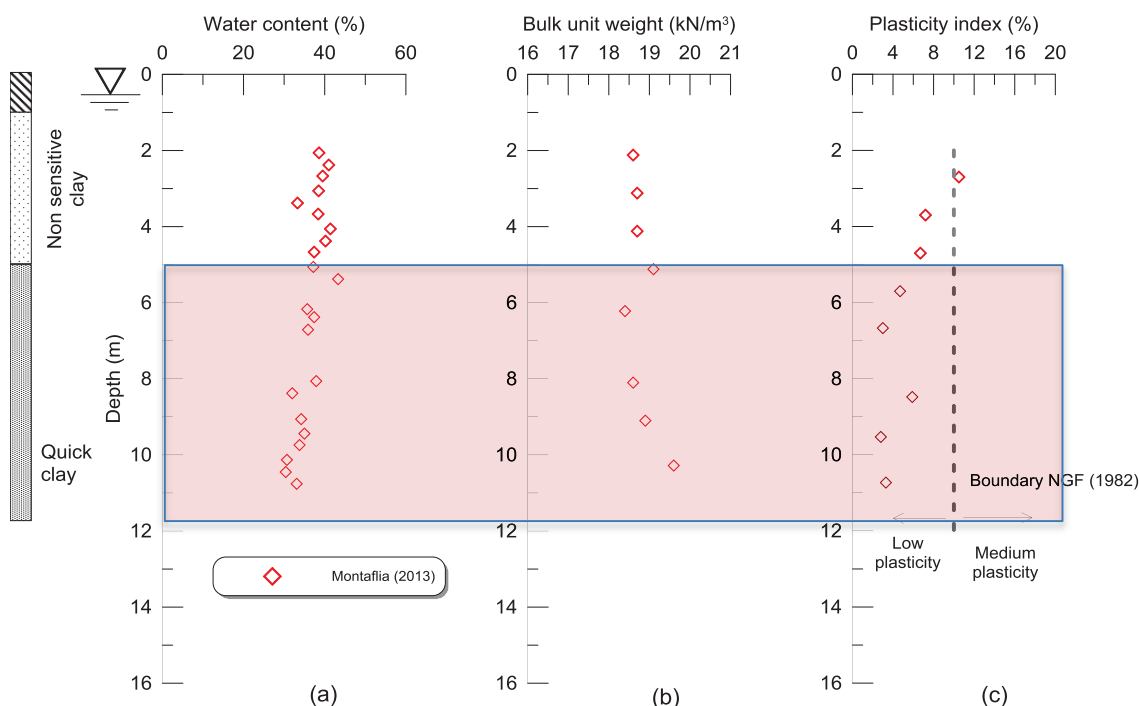
Tekniske rapporter:

1. Sandven, R. (2014). *Sammenstilling av feltresultater*. Kursnotat NGF Seminar om Prøvetaking og laboratorieundersøkelser, mai 2014 (www.ngf.no).

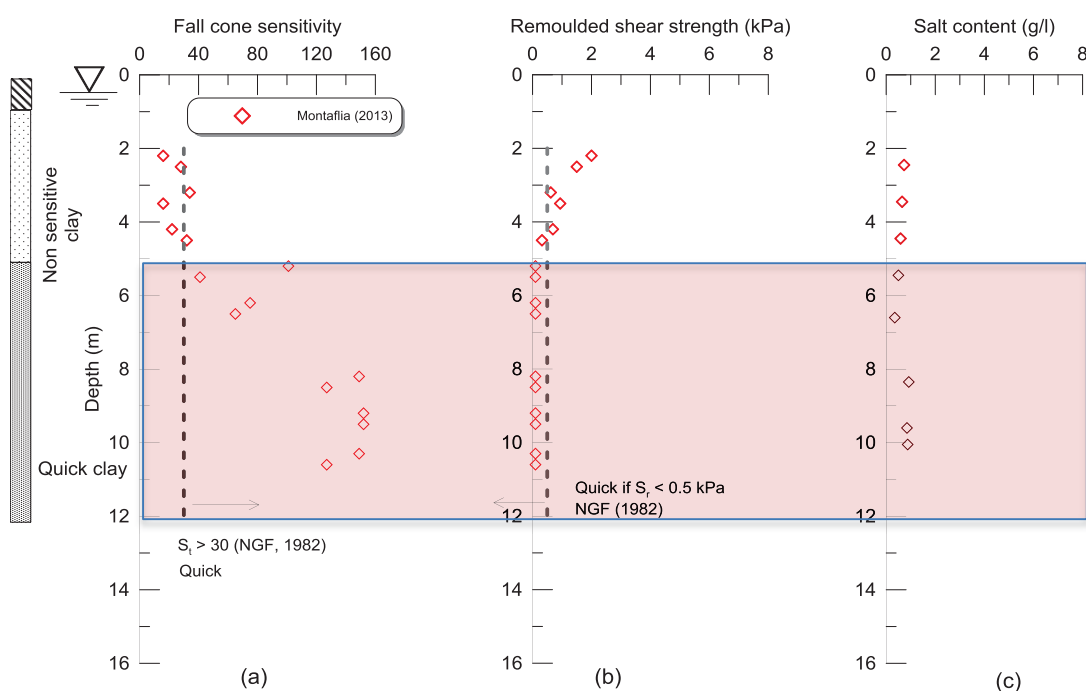
Vedlegg B7

Dragvoll (Forskningsområde saltdiffusjon)

Forskningsområdet på Dragvoll benyttes nå i forbindelse med et doktorgradsarbeid på saltdiffusjon for behandling av kvikkleire (PhD student Tonje Eide Helle). Grunnforholdene i området består av ca. 4,5 m ikke-sensitiv leire over kvikkleire, se Figur B7.1. Kvikkleiren er meget bløt og vanskelig å behandle i laboratoriet. Gjennomsnittlige verdier for w og ρ er henholdsvis 36,6 % og 18,8 kN/m³. Gjennomsnittlig plastisitet I_p for Dragvoll leire er 5,5 %, noe som representerer en lavere plastisitet enn for de andre forskningsfeltene.

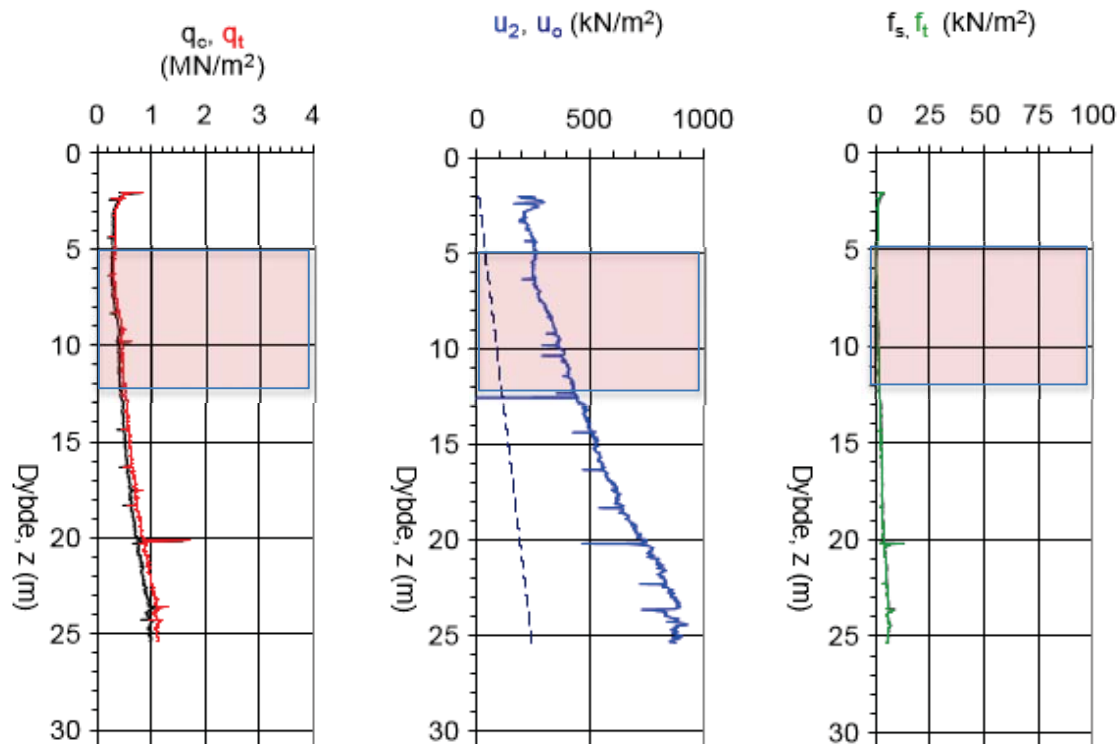


Figur B7.1. Dragvoll – grunnleggende rutinedata.

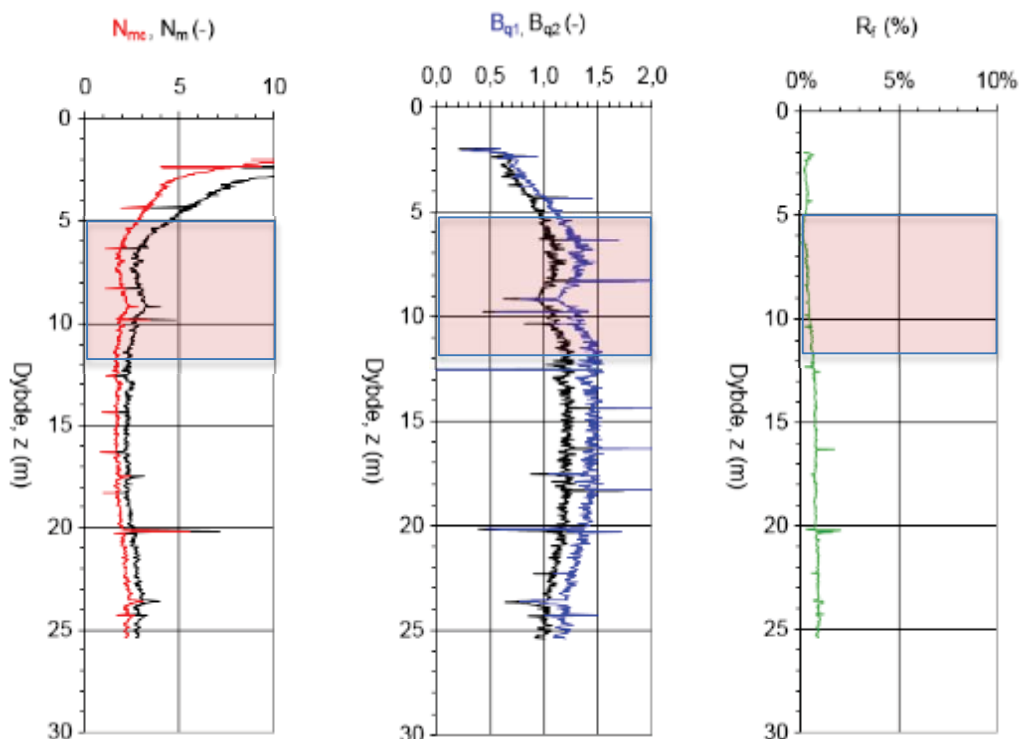


Figur B7.2. Dragvoll – sensitivitet, omrørt skjærfasthet og saltinnhold.

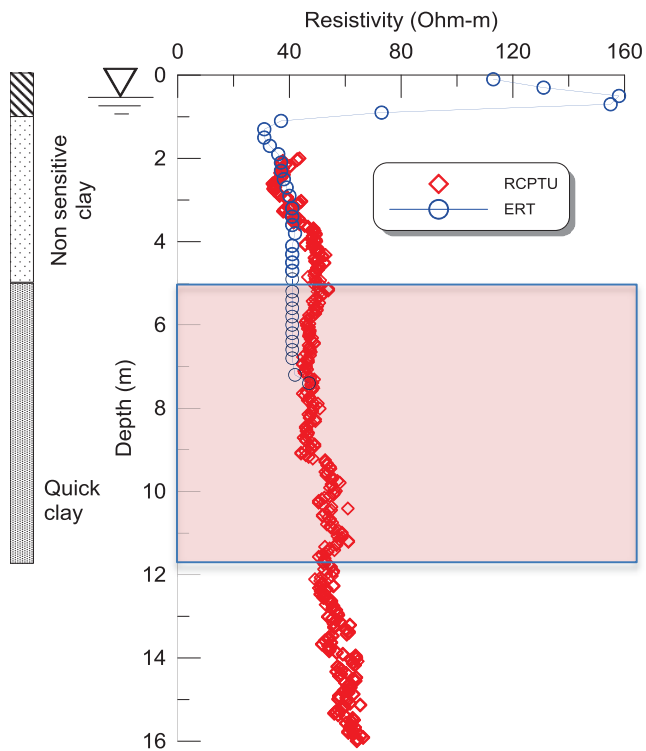
Tilsvarende som for de andre feltene, Tiller og Esp, er saltinnholdet lavt gjennom hele lagpakken. Det ikke-sensitive laget har blitt saltutvasket på samme måte som den dypereliggende kvikkleiren.



Figur B7.3. Dragvoll – CPTU profil, q_t , f_s og u_2 .

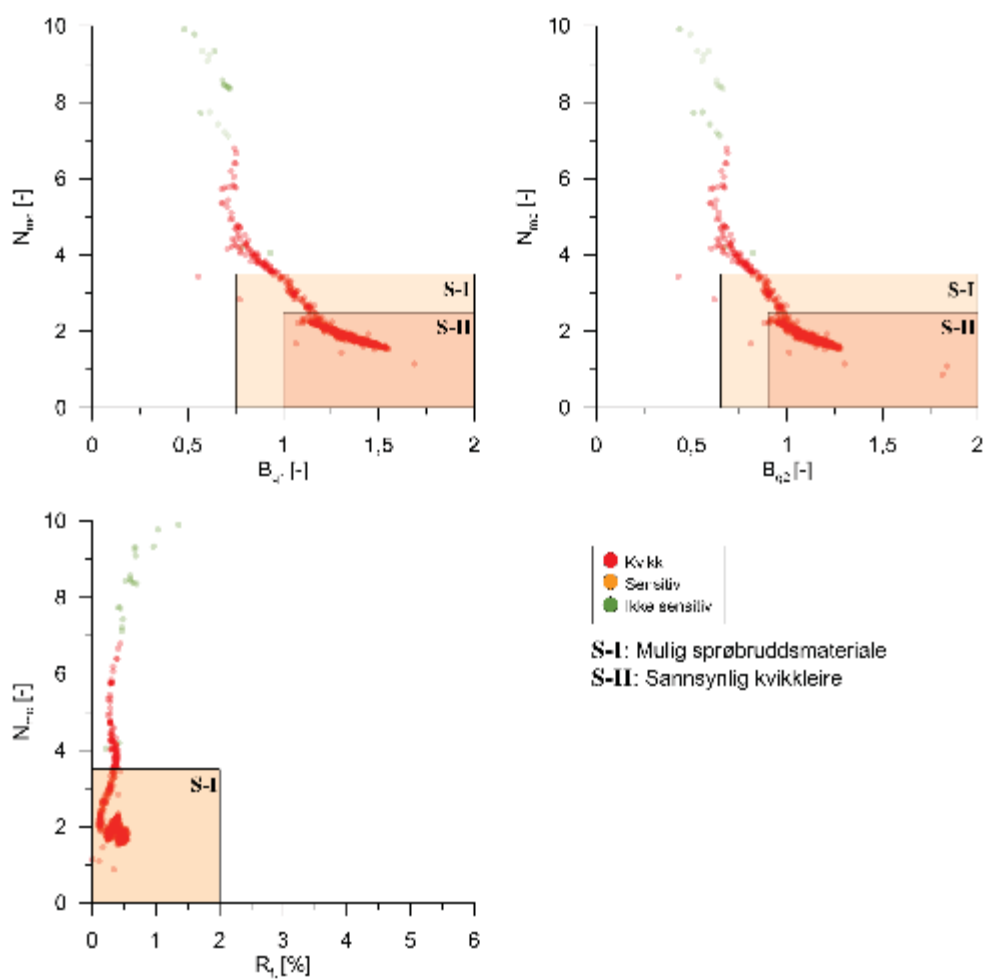


Figur B7.4. Dragvoll – CPTU profil, N_m , B_q , R_f .



(a)

Figur B7.5. Dragvoll – sammenligning mellom ERT og R-CPTU målinger.



Figur B7.6. Dragvoll – nytt identifikasjonsdiagram CPTU.

CPTU data for Dragvoll forsøksfelt er vist på Figur B7.3. Spissmotstandsverdiene er bemerkelsesverdige lave og øker fra ca. 100 kPa til like over 300 kPa med dybden. Sidefriksjonsverdiene er også ekstremt lave og signaliserer en kvikkleire som lett lar seg omrøre. Poretrykket er betydelig høyere enn hydrostatisk verdi. Helningen på kurvene for q_t , f_s and u_2 data ser ut til å endre seg ved overgangen fra kvikt til ikke-sensitivt materiale.

ERT og R-CPTU målingene for Dragvoll er sammenlignet i Figur B7.5. For ERT-målingene bemerkes at elektrodeavstanden var 0,5 m, noe som gir svært god oppløsning i profilet. Det er svært god overensstemmelse mellom målingene i både ikke-sensitiv og kvikk leire.

Viktige referanser

Publikasjoner:

1. Eide – Helle, T. m.fl. (2015). *Laboratory setup to evaluate the improvement of geotechnical properties from potassium chloride saturation of a quick clay from Dragvoll, Norway*. GEOQuébec 2015 - Challenges from North to South. Québec, Canada.
2. Emdal, A. m.fl. (2012). *Characterisation of Quick Clay at Dragvoll, Trondheim, Norway*. Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA Vol. 43, No. 4 (December), s.11 - 23.

Masteroppgaver:

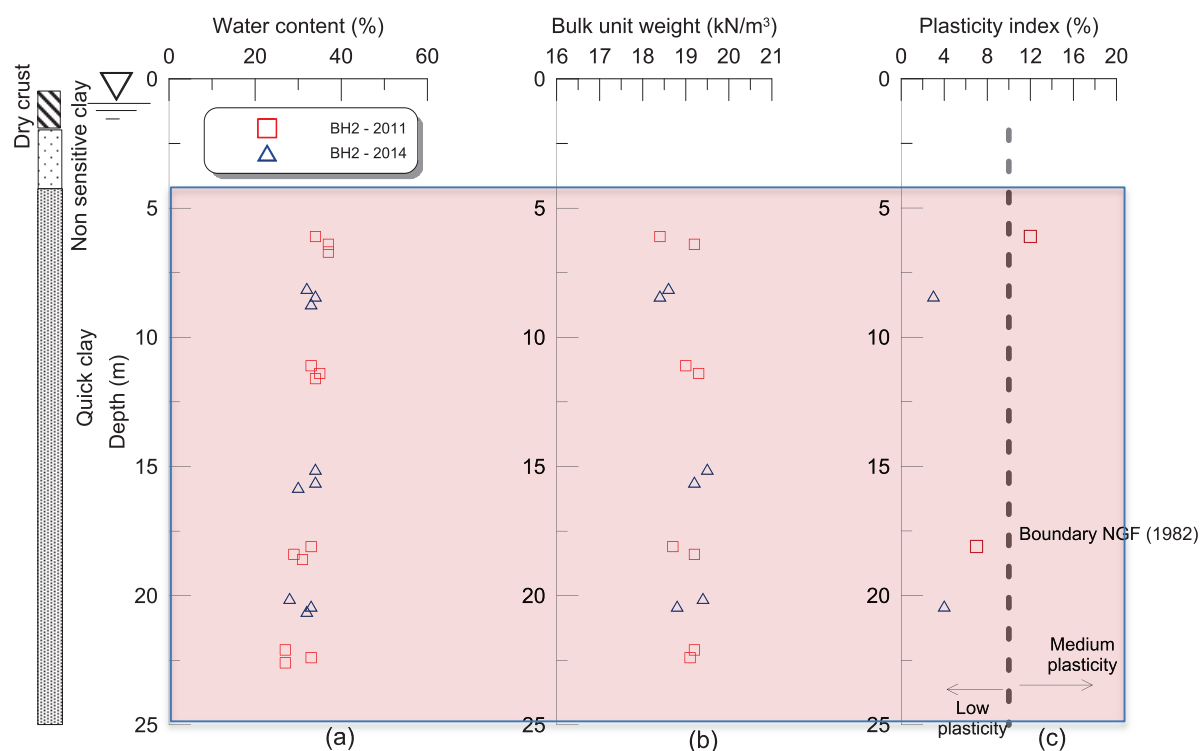
1. Montafia, A. (2013). *Influence of physical properties of marine clays on electric resistivity and basic geotechnical parameters*. Masteroppgave, Institutt for Bygg, anlegg og transport, NTNU, Trondheim.

Vedlegg B8

Fallan

Fallan ligger i Melhus kommune, øst for E6 og ca. 5 km nord-nordøst for tettstedet Lundamo. Området ble utredet av Multiconsult i 2012 som en del av et gjennomførbarhetsstudium for en ny vegtrasé for E6 mellom Haga og Skjerdingsstad. Det aktuelle forsøksfeltet ligger i et område med marine avsetninger mellom to bergrygger, Valderåsen og Rognbrauta. Hele området Fallan er en stor skredgrop, der hovedskredet er datert til ca. 1665.

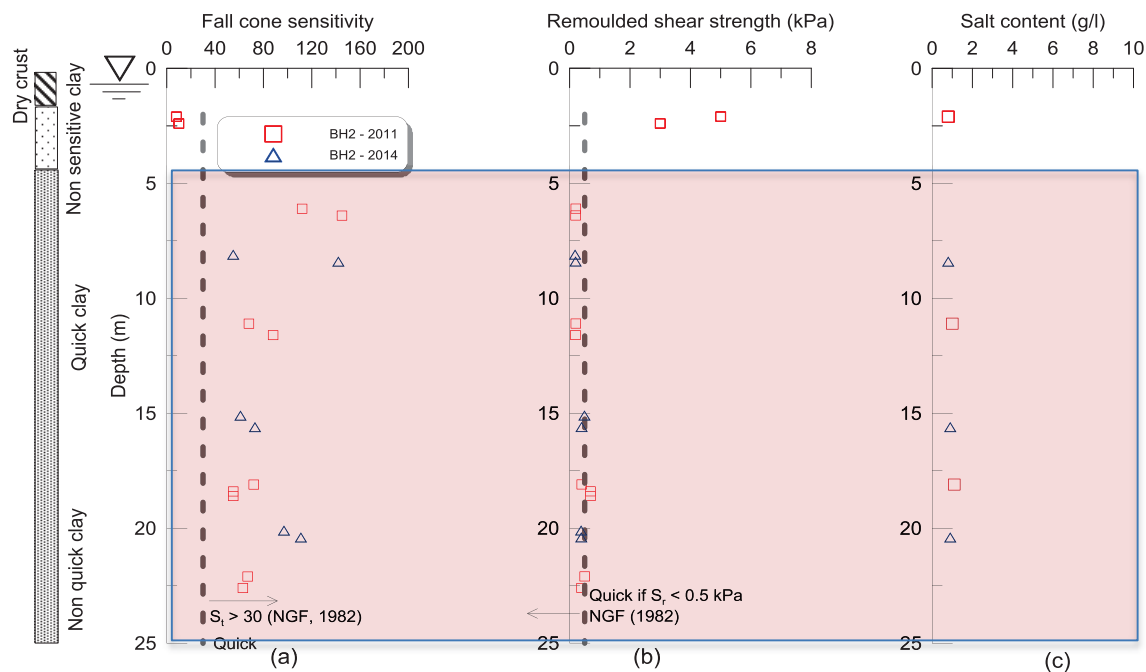
Som grunnlag for gjennomførbarhetsstudiet ble det utført grunnundersøkelser i området langs planlagt trasé. Statens vegvesen utførte feltundersøkelser med dreietrykk- og totalsonderinger, poretrykkmålinger, $\phi 54$ mm prøvetaking og trykksondring med poretrykkmåling (CPTU). Multiconsult og Statens vegvesen utførte laboratorieundersøkelser på opptatte prøver, med rutineundersøkelser, treaksial- og ødometerforsøk. NTNU utførte saltinnholdsbestemmelser på materiale fra samtlige prøvesylindre. En oversikt over de vanligste rutinedata er vist i Figur B8.1.



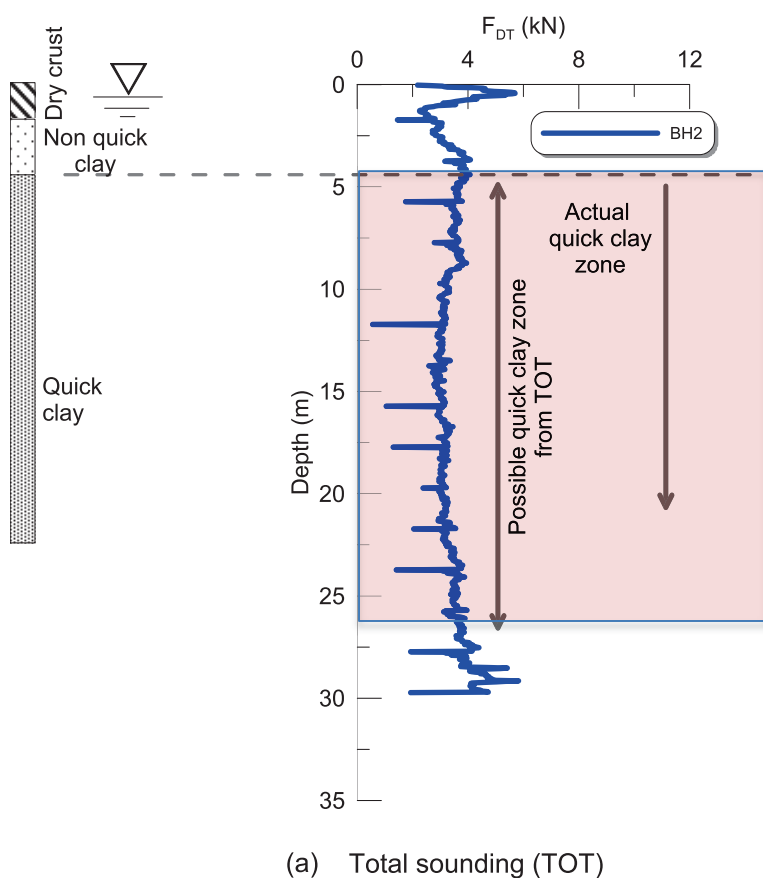
Figur B8.1. Fallan – grunnleggende rutinedata.

Grunnundersøkelser viser generelt at grunnforholdene i området består av et tynt topplag av matjord/vegetasjonsdekke med mellom 0,5 og 2,0 m tykkelse. Under dette laget påtreffes mektige avsetninger av marine sedimenter, med bløt og til dels sensitiv/kvikk leire over store deler av området. Kvikkleirelaget strekker seg fra ca. 4 m under terrengoverflaten ned til ca. 22,5 m dybde, se Figur 8.2. Leiren synes å være homogen, men med enkelte siltlag og siltige partier.

Vanninnhold ligger mellom 30 % og 35 % og avtar svakt med dybden. Densiteten varierer mellom 1,92 og 1,95 g/cm³, mens plastisiteten ligger mellom 5 og 10 %. Rutinemessig udrenert skjærfasthet bestemt ved konus og enaksialt trykkforsøk øker omtrent lineært med dybden, mens sensitiviteten er gjennomgående mellom 50 og 110. Saltinnholdet i opptatte prøver varierer mellom 0,4 og 0,9 g/l og tilsier vanligvis kvikk leire.

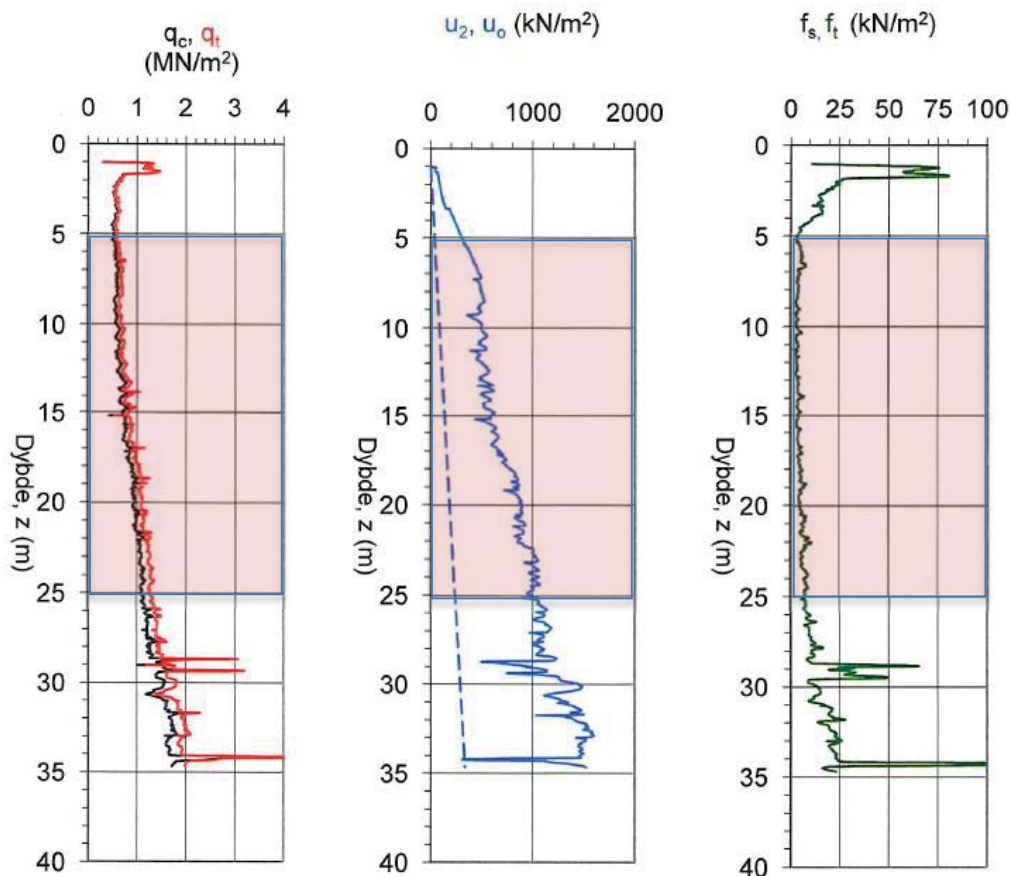


Figur B8.2. Fallan – sensitivitet, omrørt skjærfasthet og plastisitet.

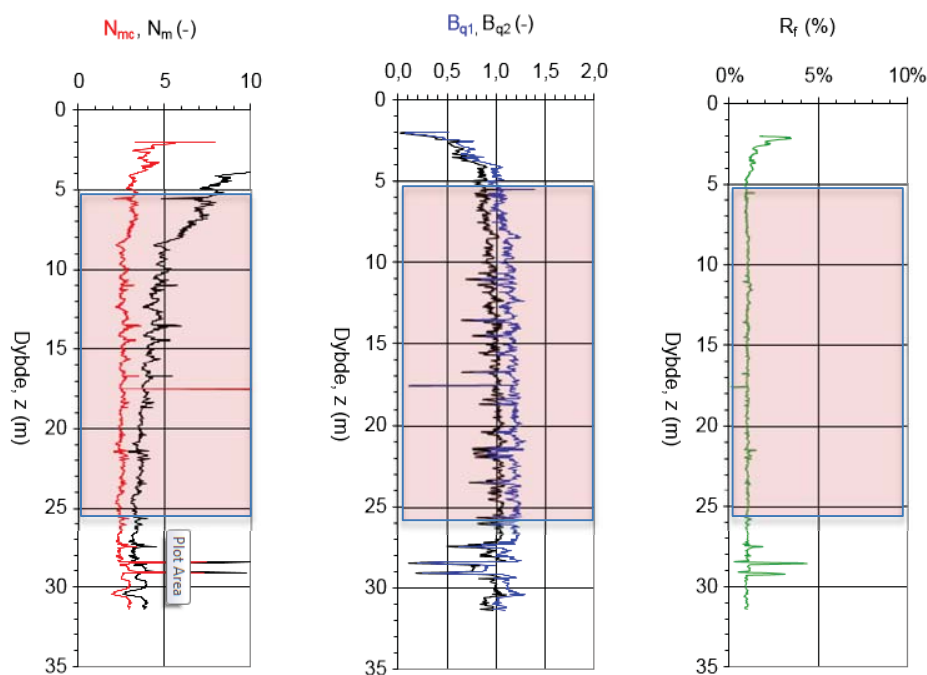


(a) Total sounding (TOT)

Figur B8.3. Fallan – totalsonderingsprofil.



Figur B8.4 Fallan – CPTU profiler, q_t , f_s og u_2 .

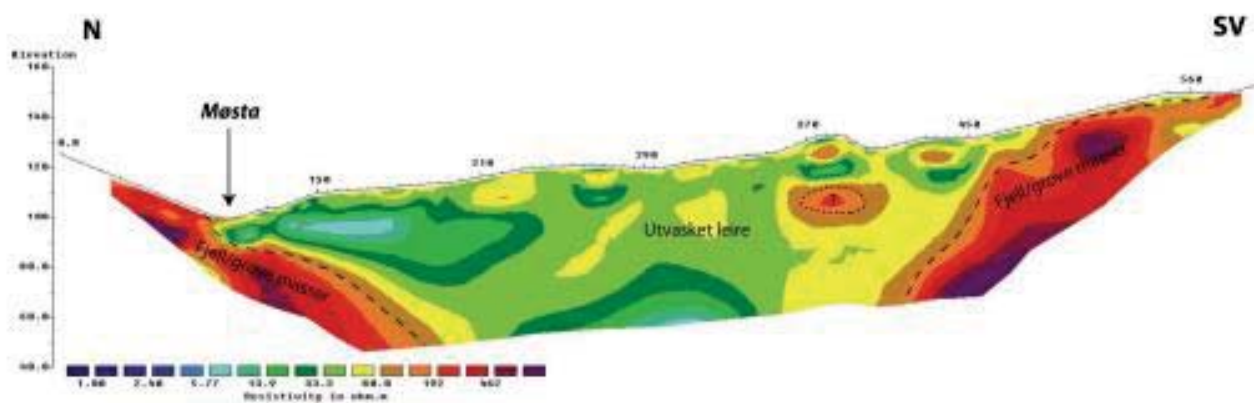


Figur B8.5 Fallan – CPTU profiler, N_m , B_q , R_f .

Figur B8.4 viser et CPTU-profil fra området. Profilene er karakteristiske for leirer i denne regionen, med en korrigeret spissmotstand q_t som øker fra omtrent 500 kPa i toppen til ca. 1800 kPa ved 30 m

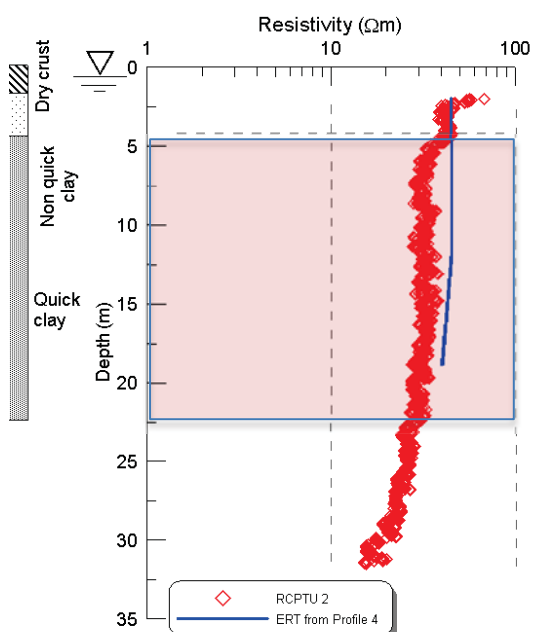
dybde. Sidefriksjonen er gjennomgående lav og ligger rundt 5-10 kPa i kvikkleirelaget. Poretrykket u_2 er relativt høy og i verdier godt over hydrostatisk fordeling, noe et poretrykksforhold $B_q = 1,6-1,7$ illustrerer. Resultatene gir inntrykk av en forholdsvis siltig leire med tynne siltlinser og lag i hele kvikkleirelaget.

Norges Geologiske Undersøkelser (NGU) gjennomførte ERT målinger langs foreslått veglinje over det meste av løsmasseområdet, se ERT profil i Figur B8.6. Profilet er 600 m langt og starter ved bekken Møsta i nord og ender litt sørvest for gården Fallan. I nord ligger profilet nær en bratt skråning hvor løsmasseoverdekningen trolig er liten. Også i den sørvestlige delen av profilet er det trolig grunt til berg. Mellom ytterpunktene av profilet er det sedimenter med resistivetsverdier fra ca. 6 Ωm til 80 Ωm , med hovedvekt på resistivitet rundt $\pm 30 \Omega\text{m}$. Mellom profilpunkt 370 og 450 er det noen linser med høyere motstand (opp til 300 Ωm). Trolig består det meste av løsmassene i profilet av utvasket leire.

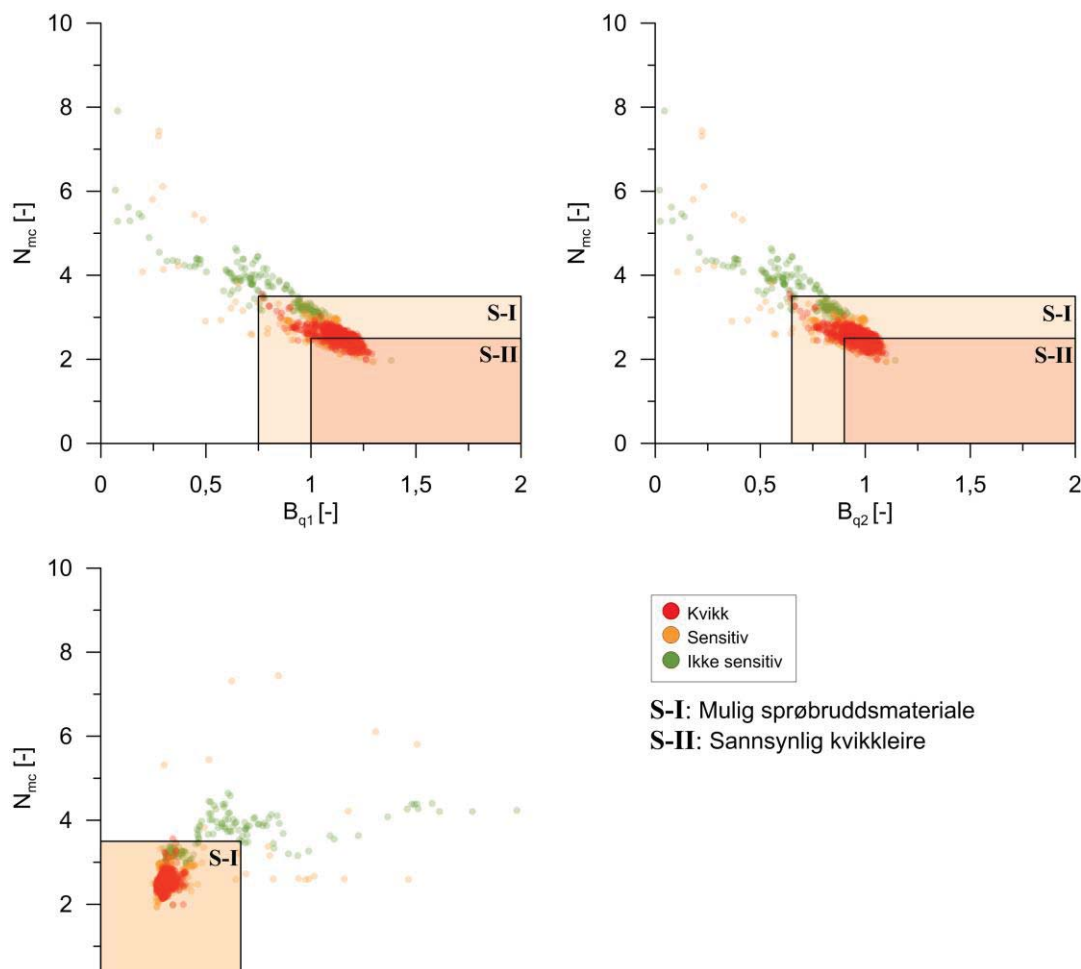


339

Figur B8.6. Fallan – ERT profil langs planlagt vegtrasé.



Figur B8.7. Fallan – Sammenligning mellom ERT og R-CPTU målinger.



Figur B8.8. Fallan – Nytt identifikasjonsdiagram CPTU.

En sammenligning mellom R-CPTU og ERT data for Fallan er vist i Figur B8.7. Profilene stemmer godt overens, men ERT-verdiene er i gjennomsnitt noe høyere, tilsvarende det som er funnet for de andre forskningsfeltene.

Viktige referanser

Publikasjoner:

1. Sandven, R. m.fl. (2013). *Geophysical and geotechnical investigations for a major highway in a quick clay area*. J-S. L'Heureux, m.fl. eds., Proceedings of the International Workshop on Landslides in Sensitive Clays (IWLSC) "From Geoscience to Risk Management". University of Laval, Québec City, Canada. Springer, Dordrecht.

Tekniske rapporter:

1. Multiconsult (2015). *Detektering av kvikkeleire ved hjelp av R-CPTU og elektrisk vingebor*. Resultater fra feltstudie. Multiconsult rapport nr. 415559-2-RIG-RAP-003rev01. NIFS rapport nr. R101-2015.
2. Multiconsult (2013). *Ny E6 Haga – Skjeringstad. Utredning for kommuneplan. Datarapport grunnundersøkelser*. Multiconsult rapport nr. r414622. 2013.

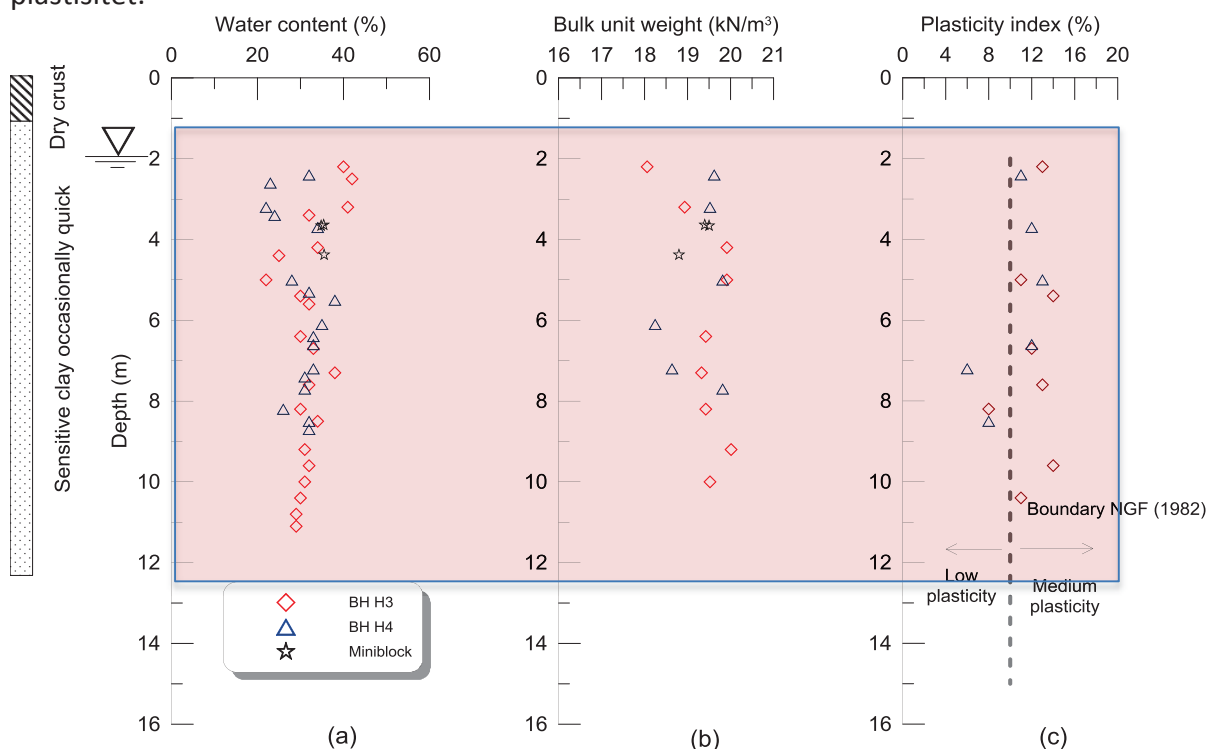
Masteroppgaver:

1. Montafia, A. (2013). *Influence of physical properties of marine clays on electric resistivity and basic geotechnical parameters*. Masteroppgave, Institutt for Bygg, anlegg og transport, NTNU, Trondheim.

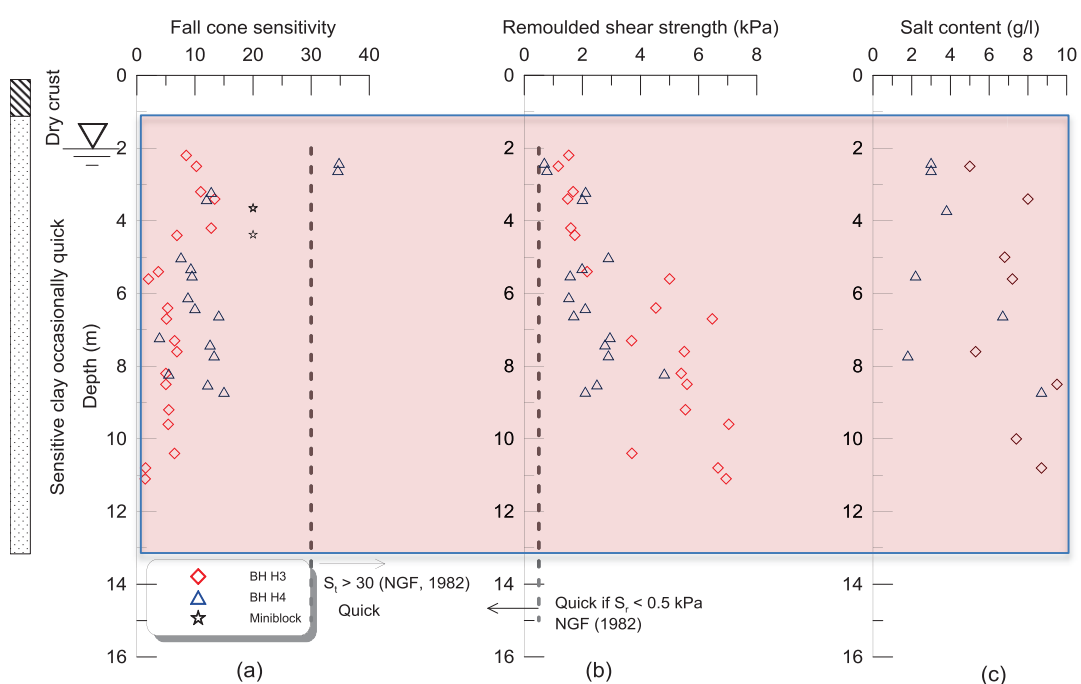
Vedlegg B9

Rein, Rissa

Rissa forsøksfelt ligger øst for Rein kirke og vest for brakkvannsjøen Botn. Grunnforholdene er forholdsvis komplekse, som vist på Figur B9.1, og egenskapene varierer noe fra borhull til borhull. Borhullene BH3 og BH 4 da det i disse lokalitetene også er tatt opp miniblokkprøver og utført ERT. Vanninnhold og densitet viser større variasjon enn de andre feltene, men de gjennomsnittlige verdiene er tilsvarende. Plastisiteten er litt høyere og materialet er klassifisert med middels til lav plastisitet.

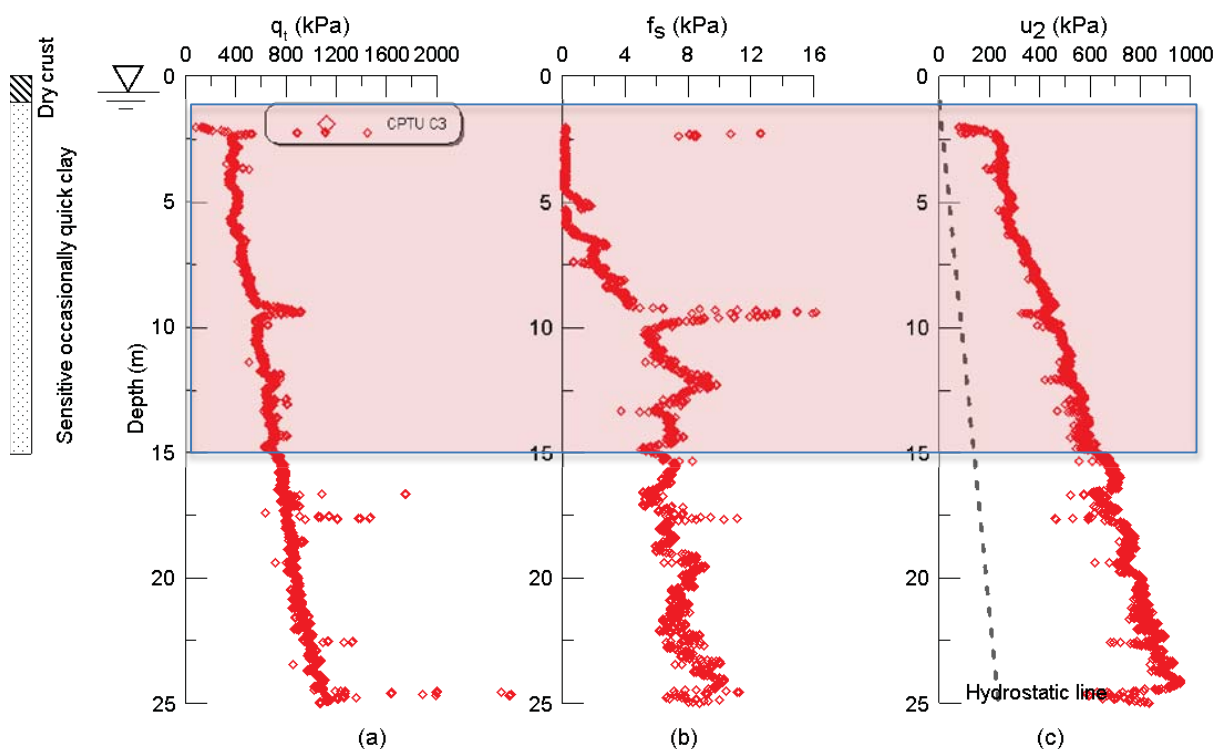


Figur B9.1. Rissa – grunnleggende rutinedata (BH3/BH4).

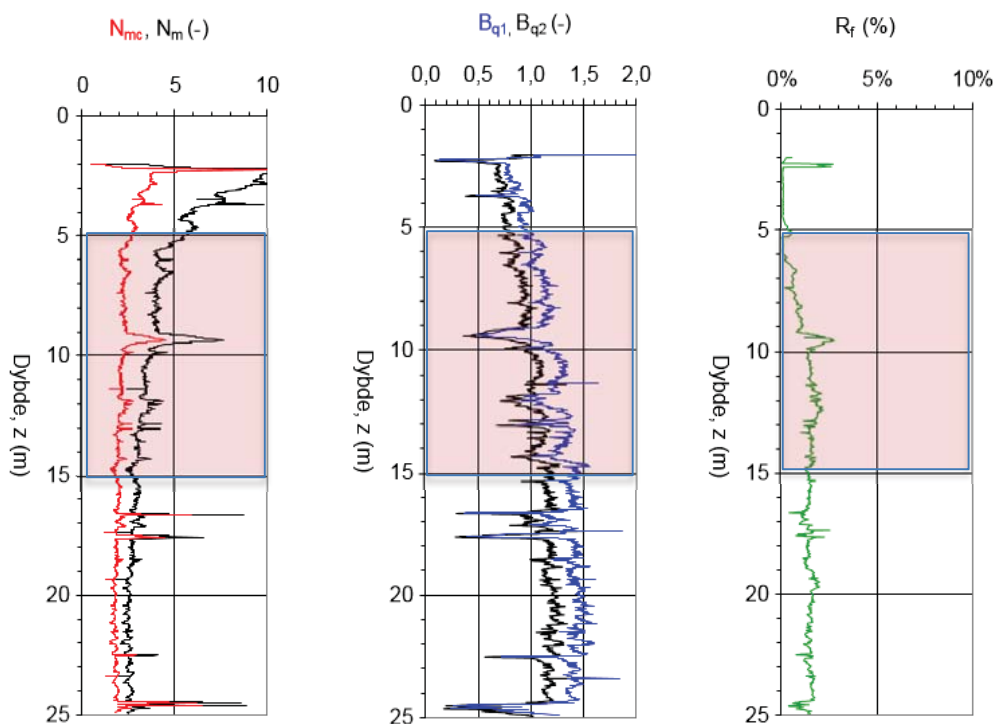


Figur B9.2. Rissa – sensitivitet, omrørt skjærfasthet og saltinnhold (BH3/BH4).

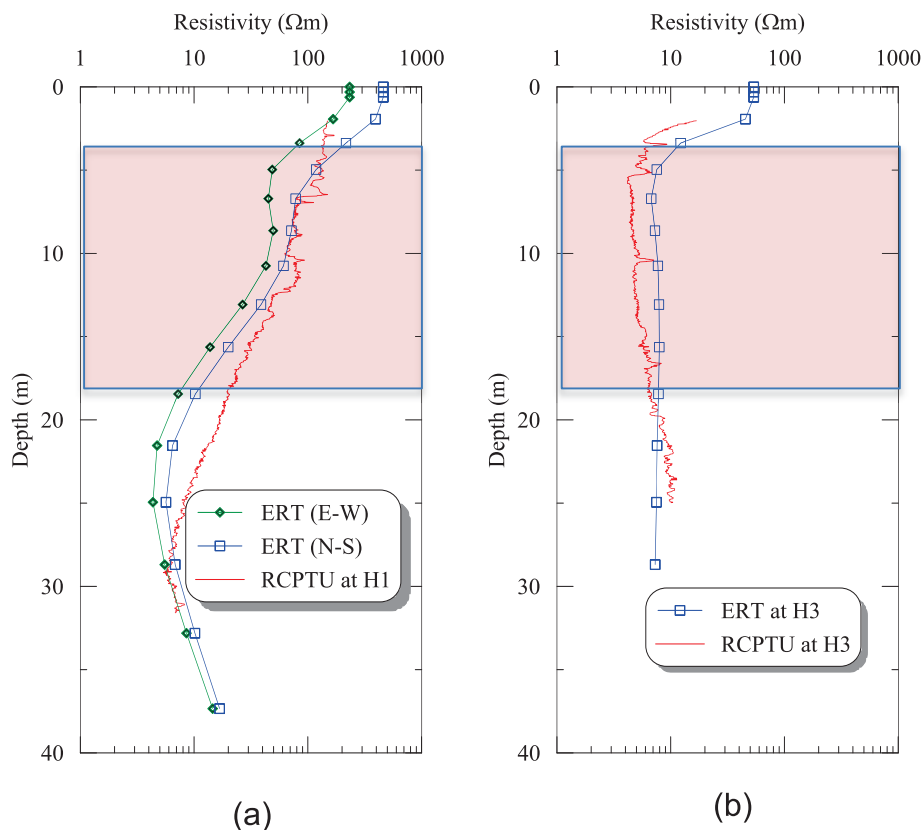
Som vist i Figur B9.2 er det ikke noe klart definert kvikkleirelag, denne påtreffes i avgrensede lommer og diskontinuerlige lag. Omrørt skjærfasthet viser en klar økning med dybden. Saltinnholdet er relativt høyt sammenlignet med de øvrige feltene og ligger i området 2 g/l til 10 g/l.



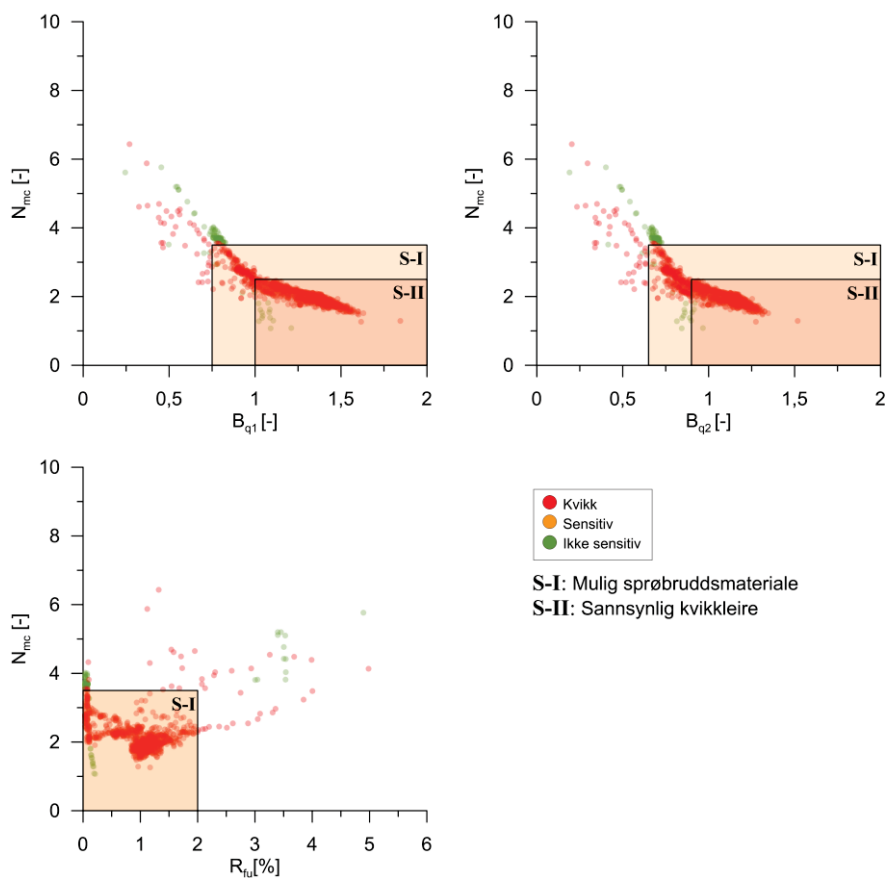
Figur B9.3. Rissa – CPTU profiler, q_t , f_s og u_2 (BH3/BH4).



Figur B9.4. Rissa – CPTU profiler, N_m , B_q , R_f (BH3/BH4).



Figur B9.5. Rissa – sammenligning mellom ERT og R-CPTU målinger.



Figur B9.6. Rissa – nytt identifikasjonsdiagram CPTU.

CPTU profilene i Figur B9.3 viser at både q_t og u_2 øker tilnærmet lineært med dybden. De målte verdiene er karakteristiske for Trøndelagsleire. Sidefriksjonen øker ned til ca. 10 m og er deretter tilnærmet konstant. Det er klare tegn på innhold av siltige lag i den marine leiren.

På tross av de uregelmessige grunnforholdene er det godt samsvar mellom ERT og R-CPTU målingene, se Figur B9.5. Data fra borhull BH3 og BH4 er gitt, men borhull BH1 er også inkludert i figuren, selv om det ikke foreligger prøveresultater fra dette borhullet.

Viktige referanser

Tekniske rapporter:

1. Statens vegvesen (2008). *RV 717 Sund – Bradden. Grunnundersøkelse datarapport*. Statens vegvesen rapport nr.2008/036571-1
2. Norges Geotekniske Institutt (2009). *RV 717 Sund – Bradden. Grunnundersøkelse datarapport*. NGI rapport nr.20091264-00-36-R.
3. Norges Geotekniske Institutt (2009). *RV 717 Sund – Bradden. Tolking av grunnundersøkelser, karakteristiske materialparametre*. NGI rapport nr.20091264-00-38-R.
4. Multiconsult (2011). *Tolkningsrapport - tidligere grunnundersøkelser*. Multiconsult rapport nr. 414792-RIG-RAP-001.
5. Multiconsult (2011). *Tolkningsrapport - nye grunnundersøkelser*. Multiconsult rapport nr. 414792-RIG-RAP-002.

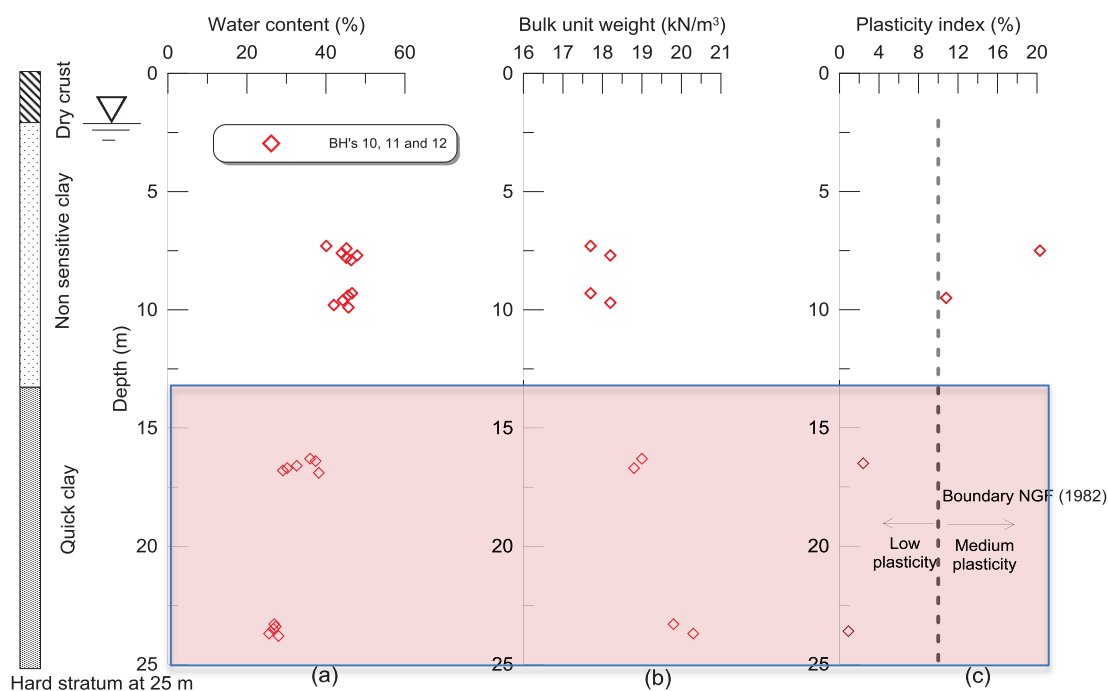
Masteroppgaver:

1. Aasland, R. (2010). *Kartlegging av kvikkleire med 2D resistivitet og R-CPTU i Rissa*. Masteroppgave, Institutt for Bygg, anlegg og transport, NTNU, Trondheim.
2. Kåsin, K. (2010). *CPTU i kvikkleire i Rissa*. Masteroppgave, Institutt for Bygg, anlegg og transport, NTNU, Trondheim.
3. Kornbrekke, H.A. (2012). *Stability evaluation of Rissa clay slopes based on block samples*. Masteroppgave, Institutt for Bygg, anlegg og transport, NTNU, Trondheim.

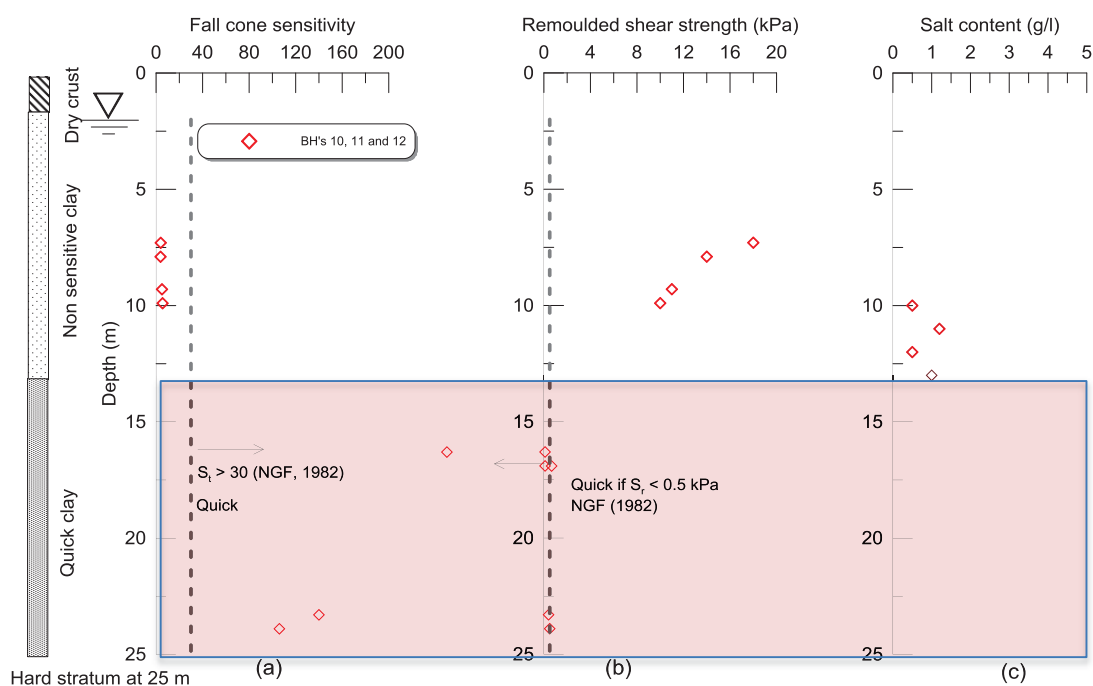
Vedlegg B10

Nidarvoll

Nidarvoll forsøksfelt er litt uvanlig i forhold til de øvrige Trondheimsfeltene da det består av to distinkte leirlag. Det øverste laget er middels plastisk, har relativt høyt vanninnhold ($w = 44,8\%$) og relativt lav densitet ($\rho_{avg} = 1,80 \text{ g/cm}^3$). Det nederste laget er kvikt og har lavere gjennomsnittlig vanninnhold ($w = 30,7\%$), høyere densitet ($\rho_{avg} = 1,95 \text{ g/cm}^3$) og har meget lav plastisitet, se Figurene B10.1 og B10.2. Et fast lag er påvist ved omtrent 25 m dybde.

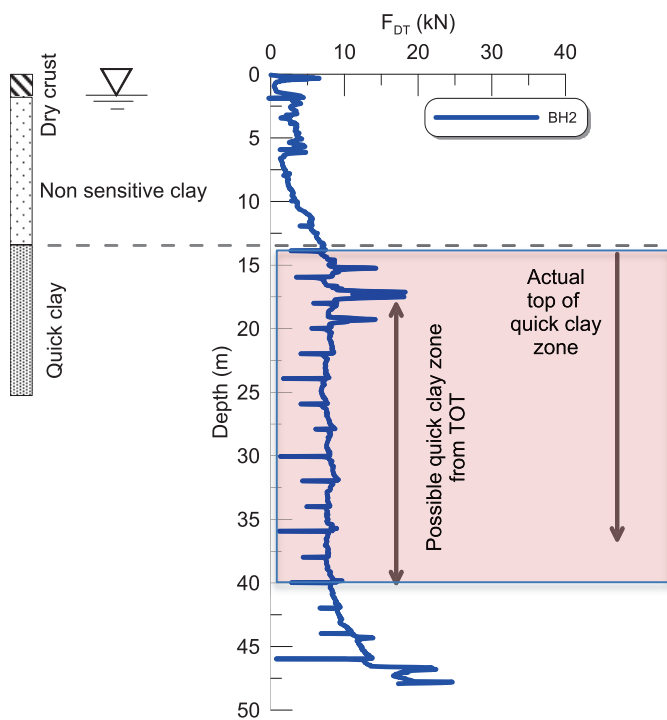


Figur B10.1. Nidarvoll – grunnleggende rutinedata.



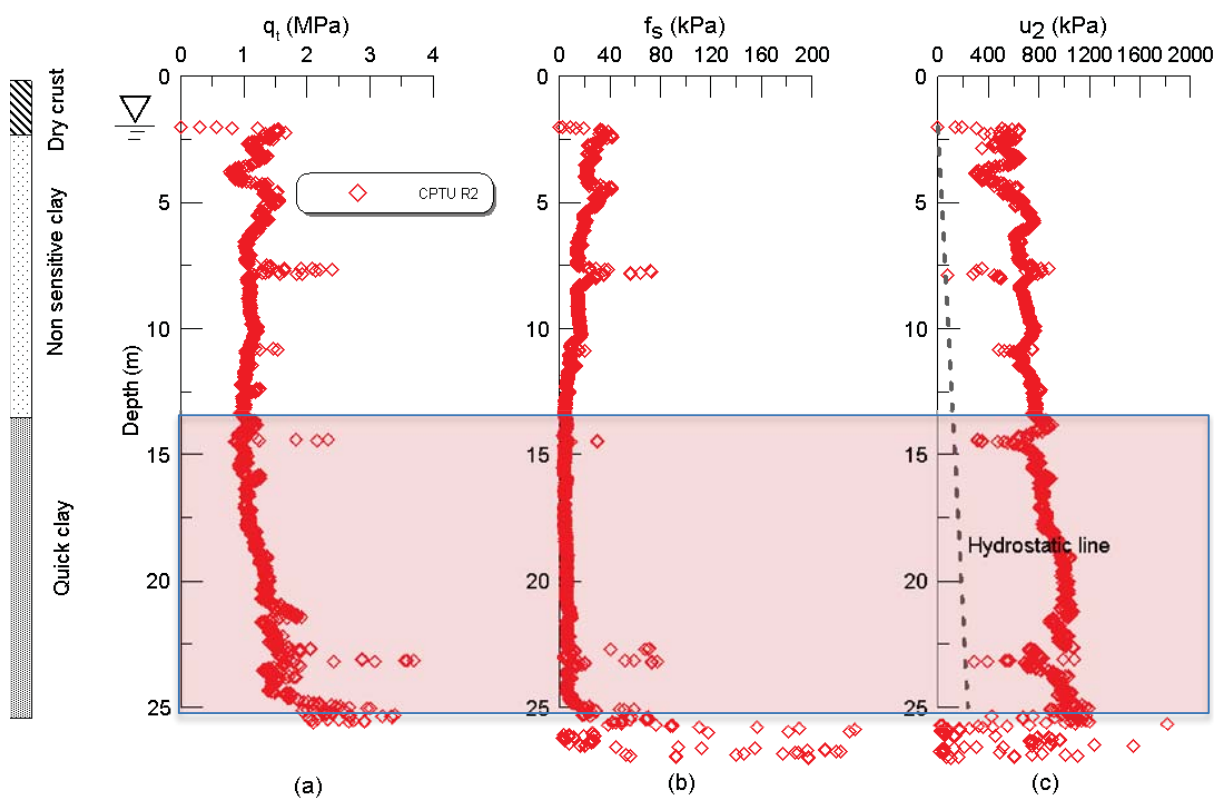
Figur B10.2. Nidarvoll – sensitivitet, omrørt skjærfasthet og saltinnhold.

Tilgjengelige saltinnholdsmålinger for Nidarvoll viser relativt lave verdier, se Figur B10.2.

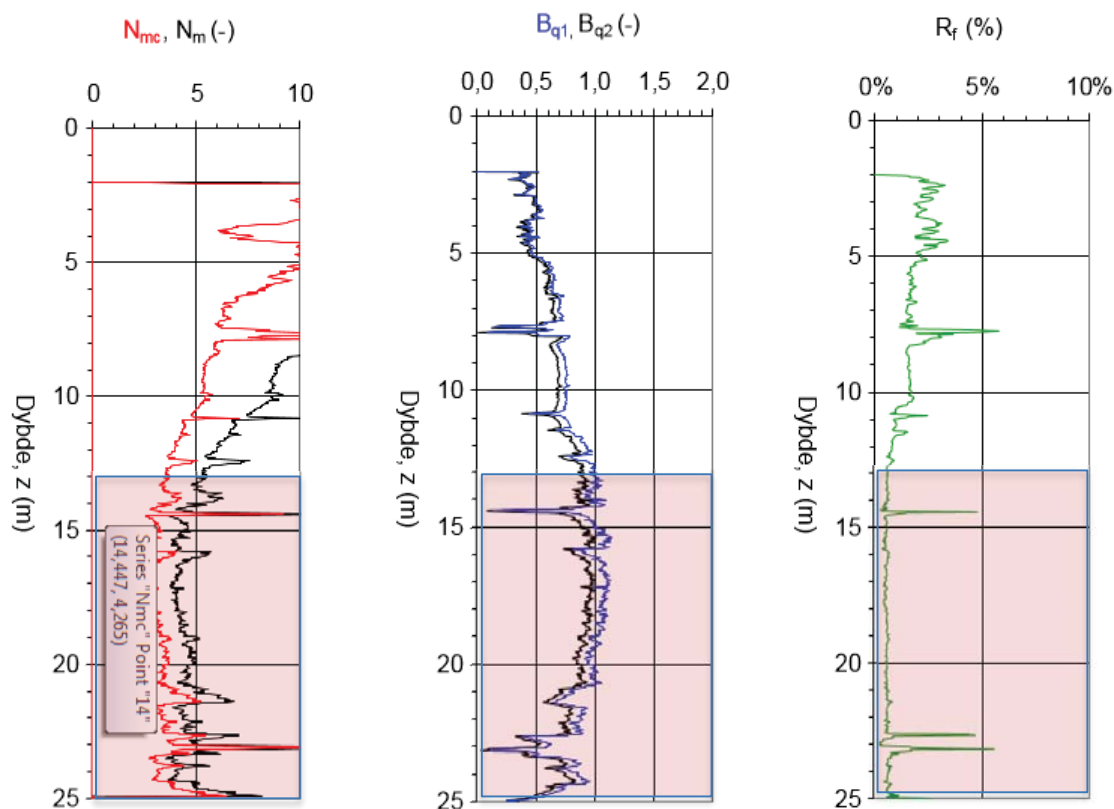


(a) Rotary pressure sounding (DRT)

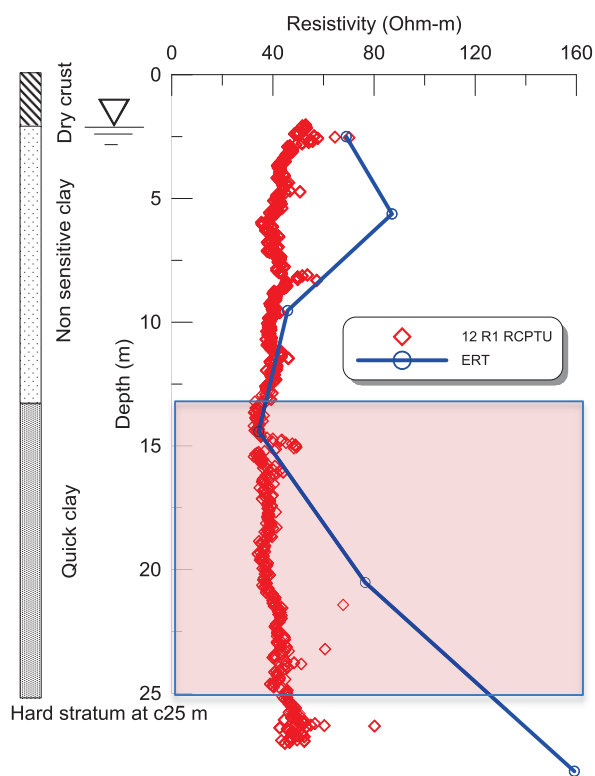
Figur B10.3. Nidarvoll – dreietrykksonderingsprofil.



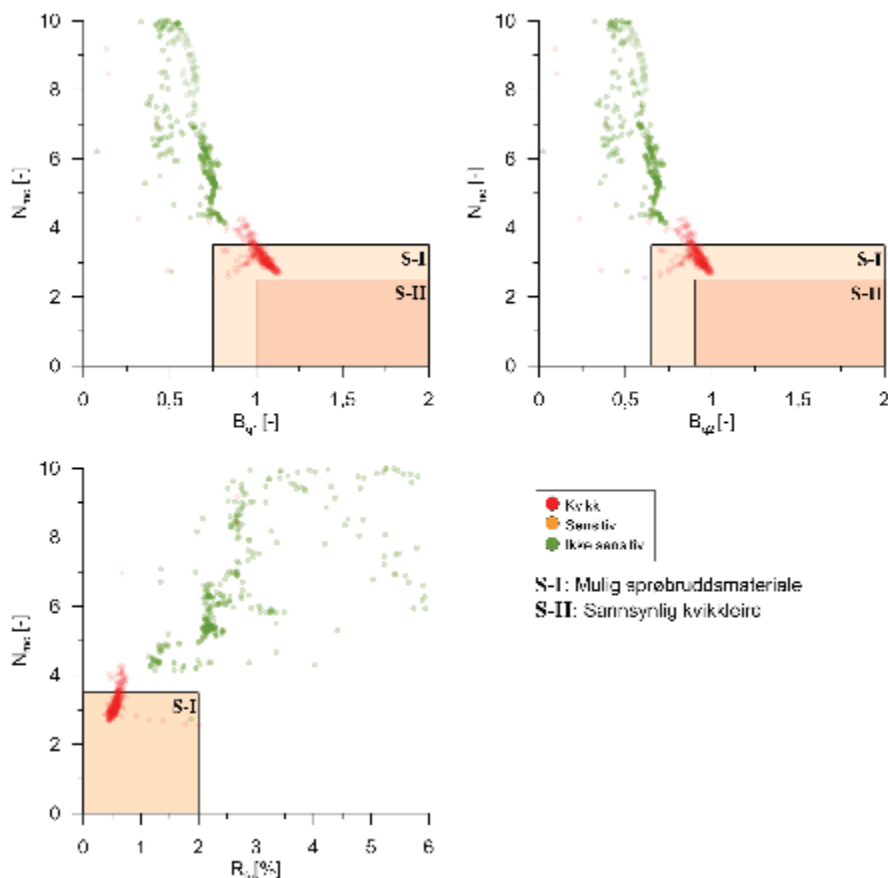
Figur B10.4. Nidarvoll – CPTU data, q_t , f_s og u_2 .



Figur B10.5. Nidarvoll – CPTU data, N_m , B_q , R_f .



Figur B10.6. Nidarvoll - sammenligning mellom ERT og R-CPTU målinger.



Figur B10.6. Nidarvoll – nytt identifikasjonsdiagram CPTU.

CPTU resultater fra Nidarvoll er vist på Figur B10.4. Resultatene er noe forskjellige fra øvrige Trondheimsleirer i det korrigert spissmotstand (q_t) er høyere, ikke viser økning med dybden og har også en del indikasjoner på silt- og sandlag i profilene. Sidefriksjonen (f_s) er lav men høyere i det øvre ikke-sensitive laget. Poretrykksverdiene (u_2) er som vanlig langt høyere enn hydrostatisk verdi, men reduseres nær silt- og sandlagene. Poretrykksoppbyggingen viser heller ingen markert økning med dybden som for de andre Trondheimsfeltene.

En sammenligning mellom ERT og R-CPTU målinger for Nidarvoll er vist på Figur B10.6. I det øvre laget er ERT-verdiene noe høyere enn det som er målt med R-CPTU. I den nedre del av laget og i den øvre del av kvikkleiren er samsvaret meget godt, men i den nedre del av kvikkleirelaget er igjen ERT-verdiene høyere. Det er sannsynlig at målingene her blir noe påvirket av det dypereliggende faste laget ved ca. 25 m dybde (antatt morene).

Viktige referanser

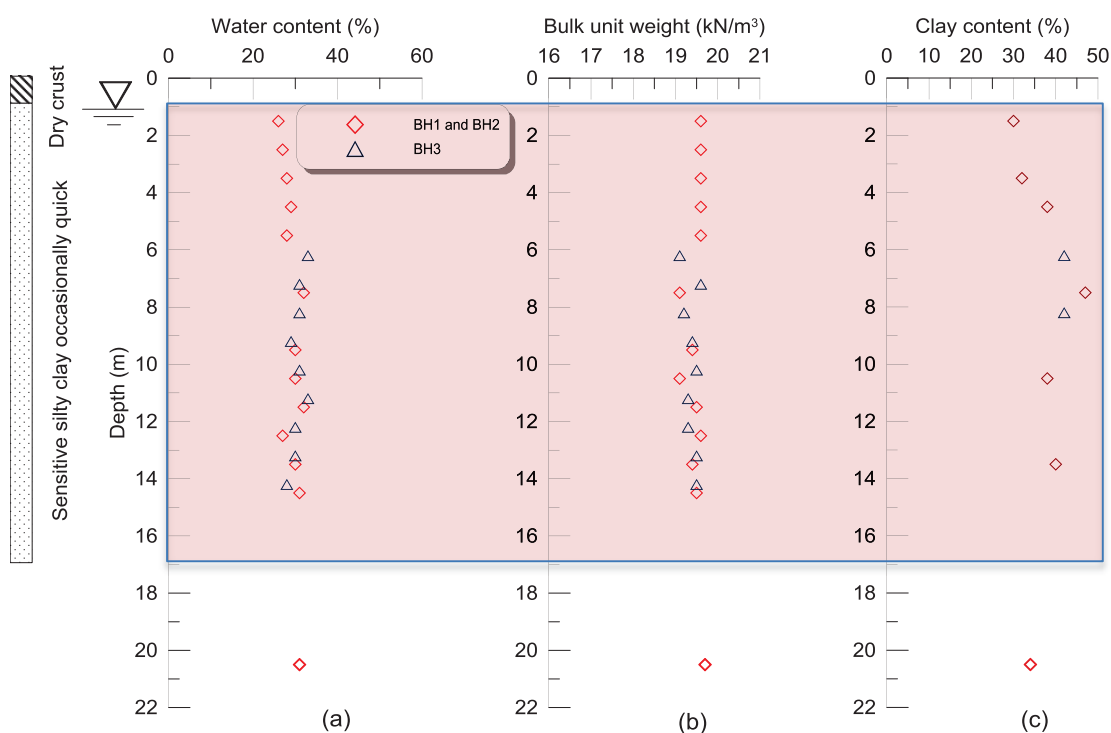
Masteroppgaver:

1. Hundal, E. (2014). *CPTU med målt total sonderingsmotstand, Nye muligheter for å detektere kvikkleire?*. Masteroppgave, Institutt for Bygg, anlegg og transport, NTNU, Trondheim.

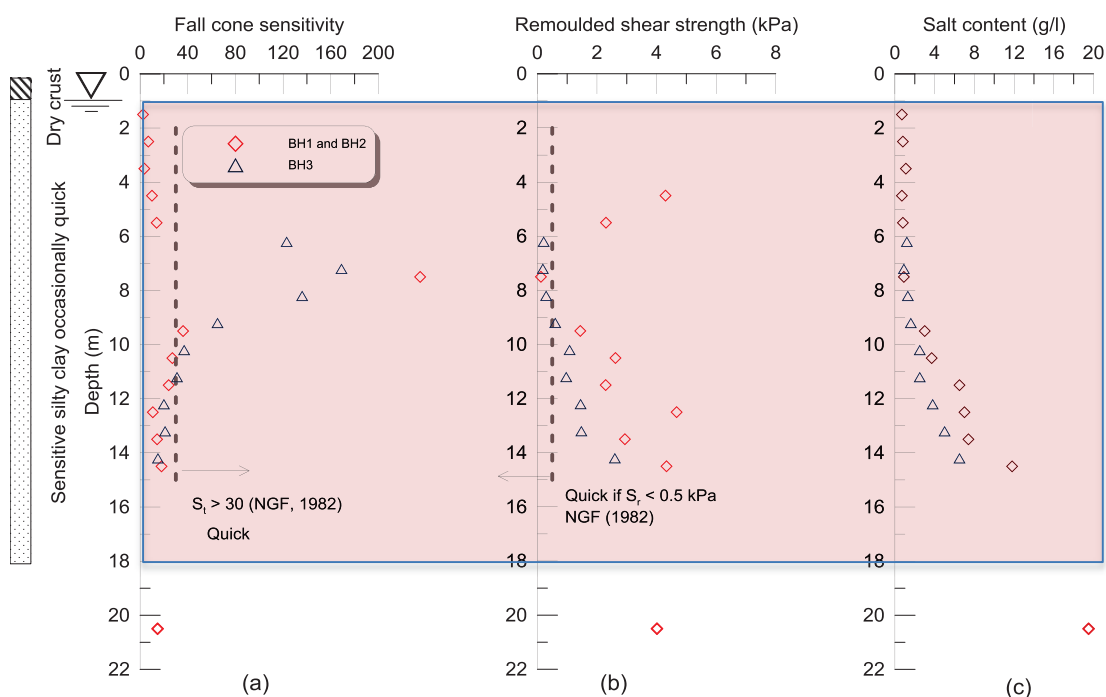
Vedlegg B11

Rødde

Rødde er lokalisert på Melhus i Gauldalen, omtrent 15 km sør for Trondheim. Området er karakterisert med mektige leir- og siltavsetninger fra siste istid. Terrenget er typisk for norske leirområder, med hyppige spor etter skred og med utstrakt ravinerings. Området er interessant på grunn av stort innslag av silt i sedimentene, og området er derfor noe utypisk i forhold til de andre feltene.

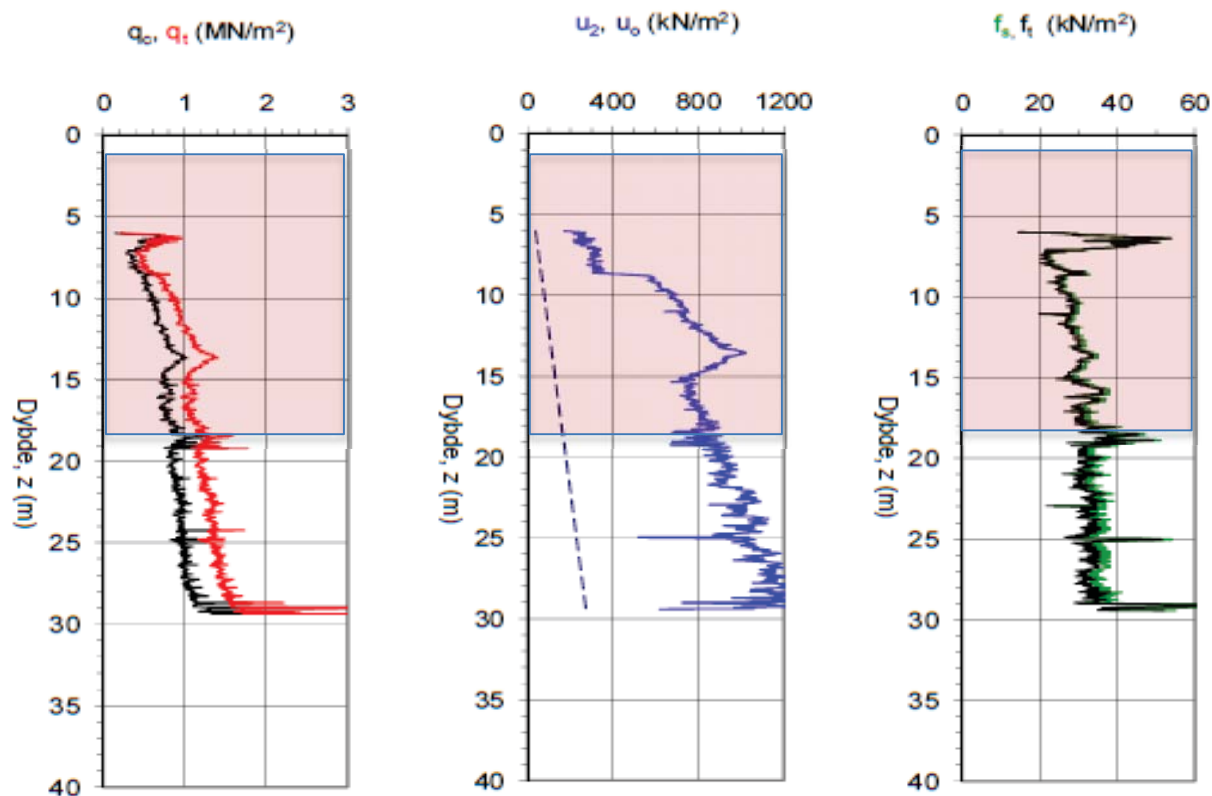


Figur B11.1. Rødde – grunnleggende rutinedata.

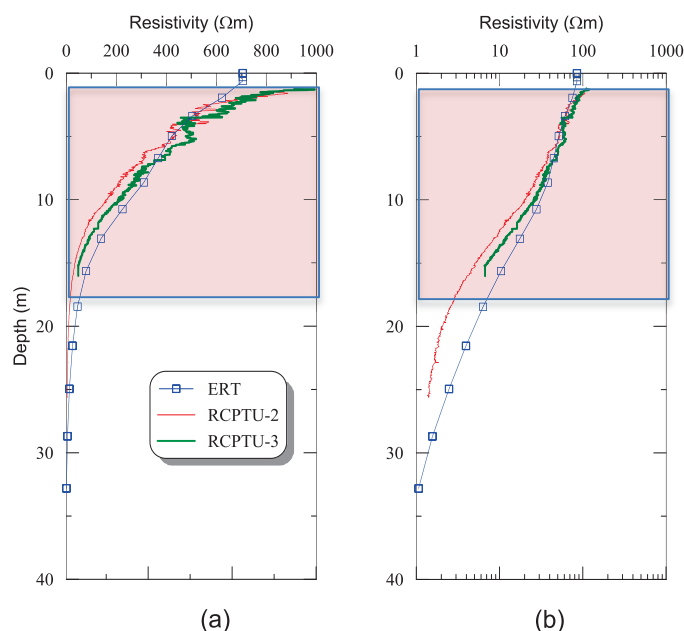


Figur B11.2. Rødde – sensitivitet, omrørt skjærfasthet og saltinnhold.

Grunnleggende rutinedata er vist i Figur B11.1. Det gjennomsnittlige vanninnholdet er ca. 29,9 %, som er lavt i forhold til de andre feltene. Tilsvarende er gjennomsnittlig densitet på $1,94 \text{ g/cm}^3$ relativt høy. Det gjennomsnittlige leirinnholdet er på 38,1 %. Med hensyn på kvikkleire er forholdene relativt komplekse, som vist i Figur B11.2. Det synes å være et lag av kvikkleire mellom ca. 6,0 m og 9,5 m i enkelte borhull. Omrørt skjærfasthet og siltinnhold synes å øke med dybden. Figur B11.3 viser et typisk CPTU-profil fra området.



Figur B11.3. Rødde – CPTU profiler, q_t , f_s og u_2 .



Figur B11.4. Rødde – Sammenligning mellom ERT og R-CPTU målinger.

Data fra ERT og R-CPTU forsøk på Rødde er sammenlignet i Figur B11.4 med resistiviteten i logaritmisk og aritmetisk skala. Resultatene viser svært godt samsvar mellom ERT og R-CPTU data.

Viktige referanser

Tekniske rapporter:

1. Multiconsult (2010). *Kvikkleirekartlegging Melhus og Trondheim. Grunnundersøkelser – datarapport*. Multiconsult rapport nr.r413809-1, februar 2010.
2. Norges Geotekniske Institutt (2009). *Sone Litj-Ler, Sørnypan, Asgarden, Stokkaunet og Rødde i Melhus kommune. Kvikkleirekartlegging og stabilitetsvurdering*. NGI rapport nr.20091127-00-73-R.

Masteroppgaver:

1. Ottesen, H.B. (2009). *CPTU med resistivitetmåling*. Masteroppgave, Institutt for Bygg, anlegg og transport. NTNU, Trondheim.

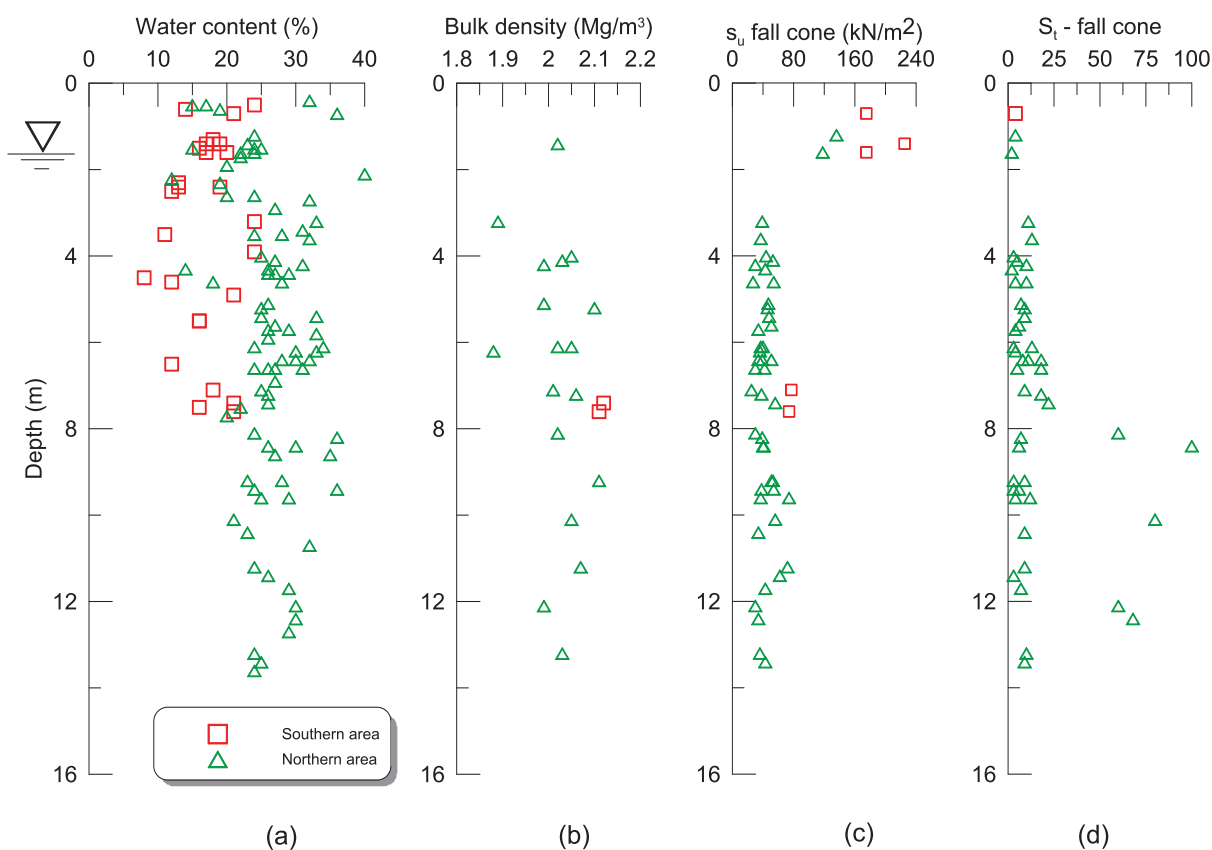
Vedlegg B12

Ranheim Vestre (Borhull E5)

Ranheim vestre er vesentlig mer komplisert grunnforholdsmessig enn de øvrige forsøksfeltene. Området består delvis av strandsedimenter sentralt og nord i forsøksfeltet, og tykke marine avsetninger i sør.

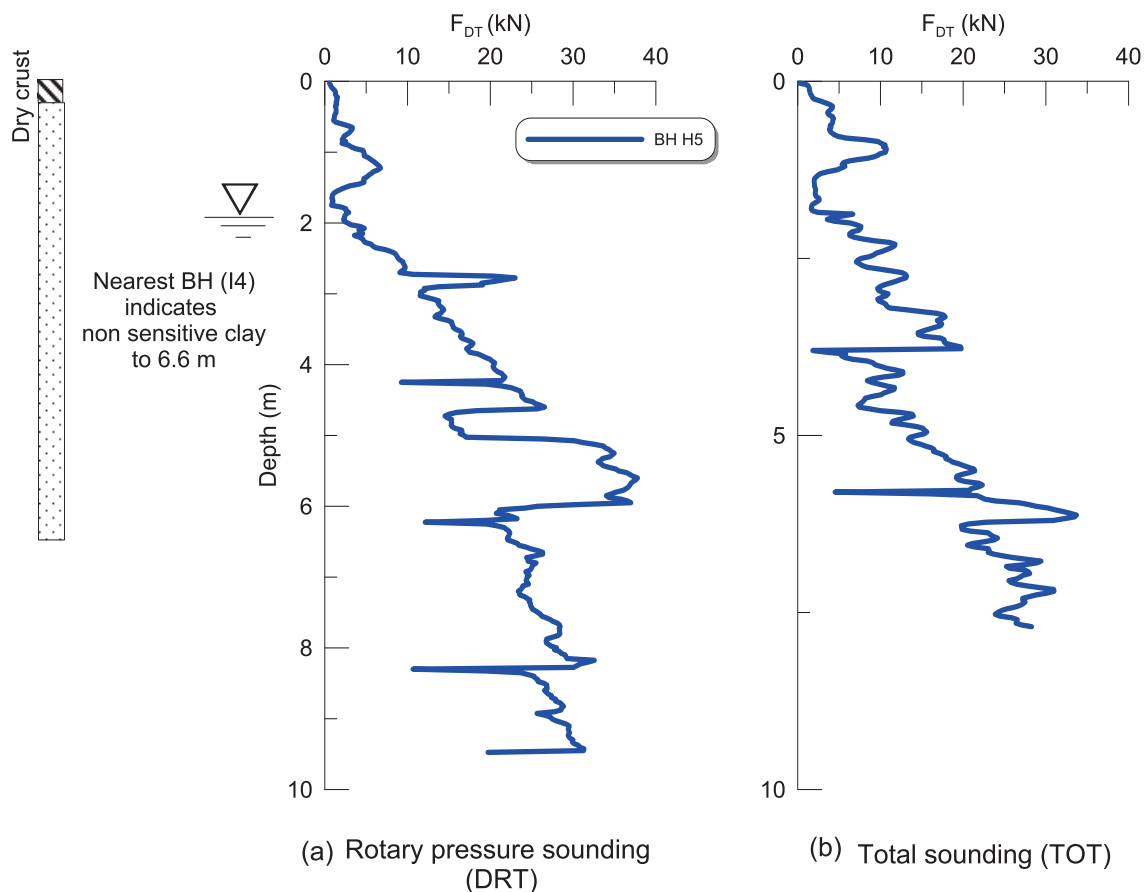
Grunnleggende rutinedata er vist i Figur B12.1 og gir grunnlag for følgende observasjoner:

- Materiale fra det sørlige området har lavere vanninnhold, høyere densitet og høyere udrenert skjærfasthet enn tilsvarende materialer i nord. Dette er muligens motsatt av hva som kan forventes.
- Selv om verdiene fra det nordlige området er høyere, har jordartene lavere vanninnhold enn det som er vanlig for norske leirer (gjennomsnittlig $\approx 26\%$). De har også relativt høy densitet (gjennomsnittlig $\approx 2,02 \text{ g/cm}^3$).
- Kvikkleire er kun påtruffet i ett borhull (E5 på den nordlige delen av feltet).



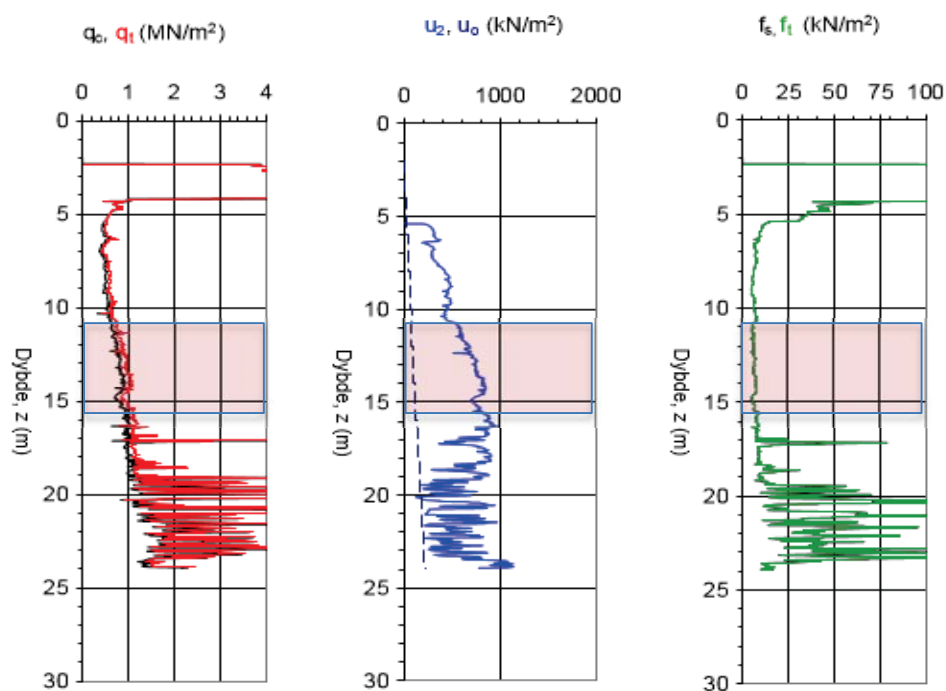
Figur B12.1. Ranheim Vestre – grunnleggende rutinedata (område sør og nord).

Figur B12.2 viser sammenligning mellom DRT og TOT sonderingsprofiler for de øverste 10 m av profilet. En sammenligning mellom ERT og R-CPTU data er vist i Figur B12.4. De to typer målinger viser svært like resultater. De relativt høye resistivitetsverdiene er trolig begrunnet av et stort silt- og sandinnhold i sedimentene.

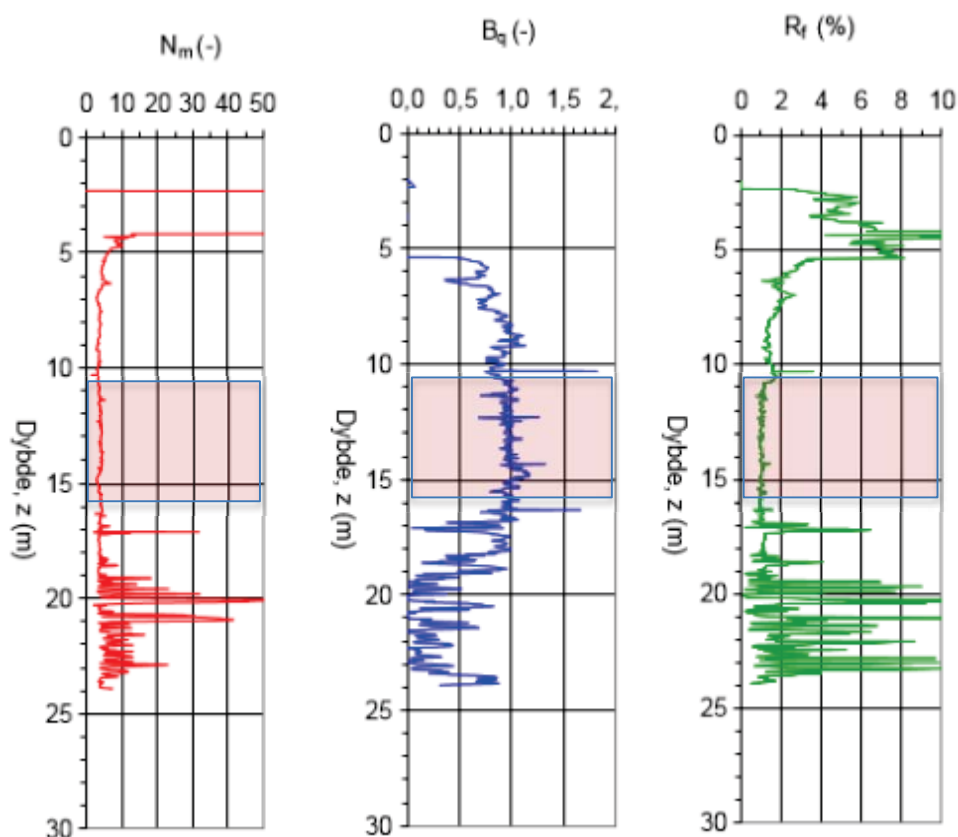


Figur B12.2. Ranheim Vestre – sammenligning mellom grunne dreietrykk- og totalsonderingsprofiler uten påvisning av kvikkleirelag (0-10 m) (borhull E5).

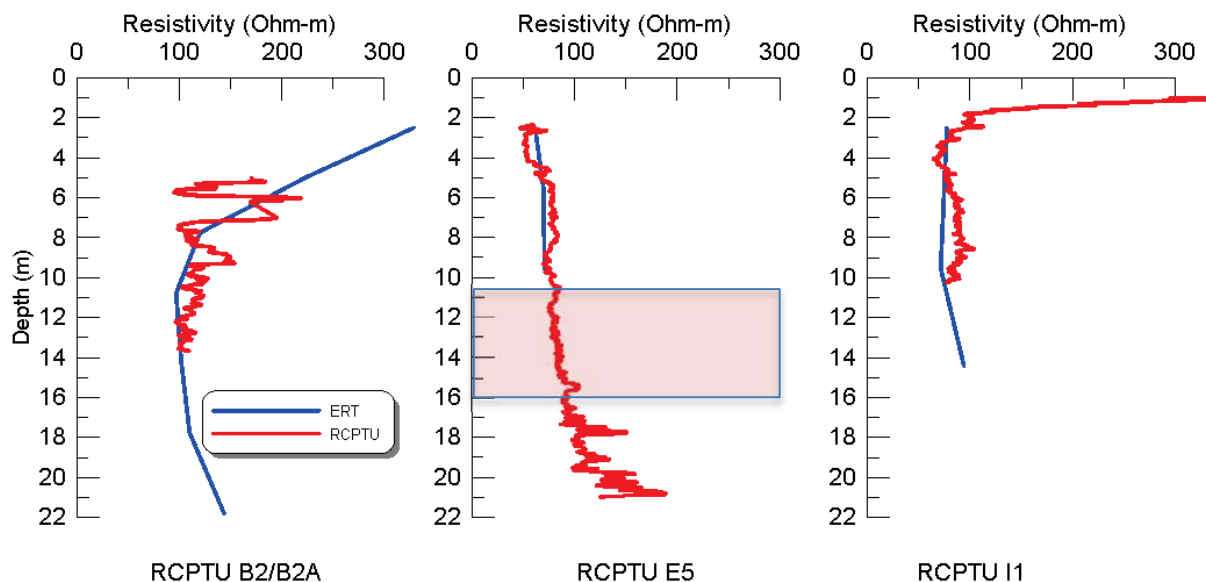
Figur B12.3 viser et typisk CPTU-profil fra området.



Figur B12.3 Ranheim vestre – CPTU profiler, q_t , f_s og u_2 (borhull E5).

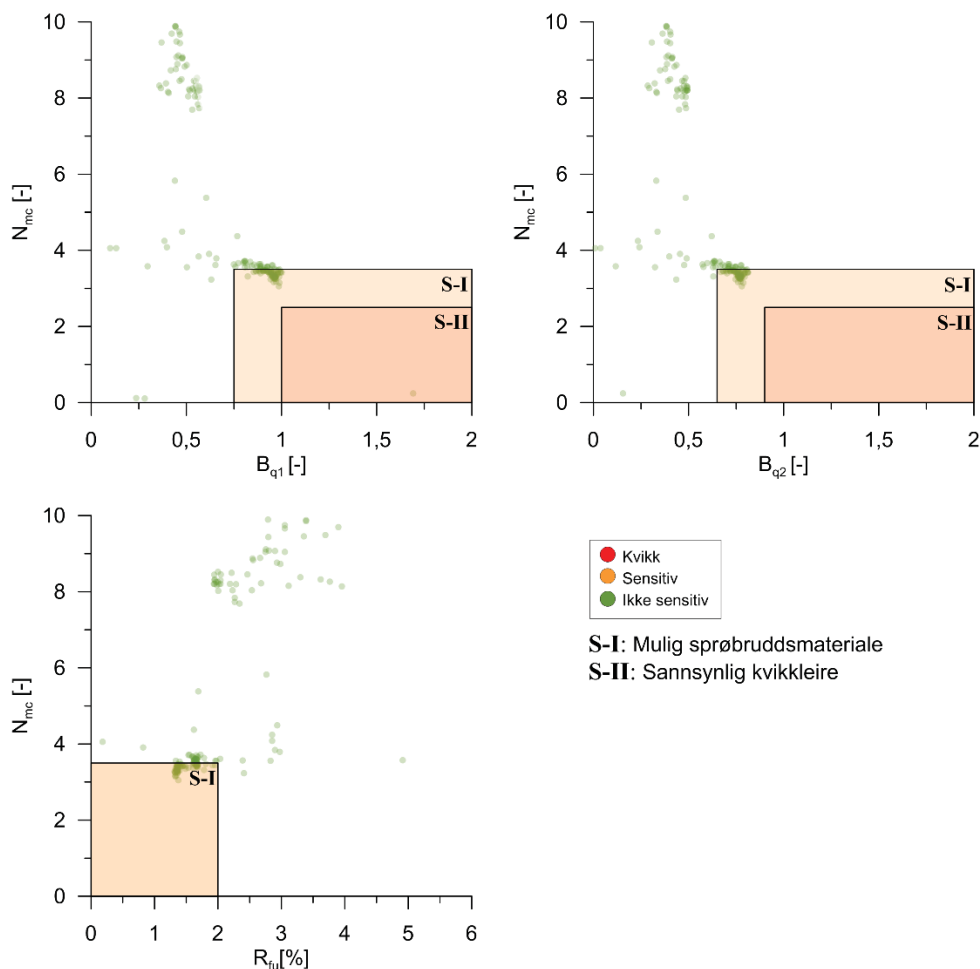


Figur B12.4 Ranheim vestre – CPTU profiler, N_m , B_q , R_f (borhull E5).



Figur B12.5. Ranheim Vestre – sammenligning mellom ERT og R-CPTU målinger.

Merknad: Borhull B2/B2A er i den sørlige del av feltet, borehull E5 ligger i den sør-østre delen og viser noe kvikkleire mellom 11-16 m, mens borehull I1 er i den nordlige delen.



Figur B12.6. Ranheim Vestre – nytt identifikasjonsdiagram CPTU. (Merk: Eventuell kvikkleire eller sprøbruddmateriale er ikke verifisert med laboratedata for dette profilet).

Viktige referanser

Tekniske rapporter:

1. Multiconsult (2014). *Ranheim Eiendomsutvikling AS. Geoteknisk vurdering for reguleringsplan*. Multiconsult rapport nr.416235-RIG-RAP-002.

Masteroppgaver:

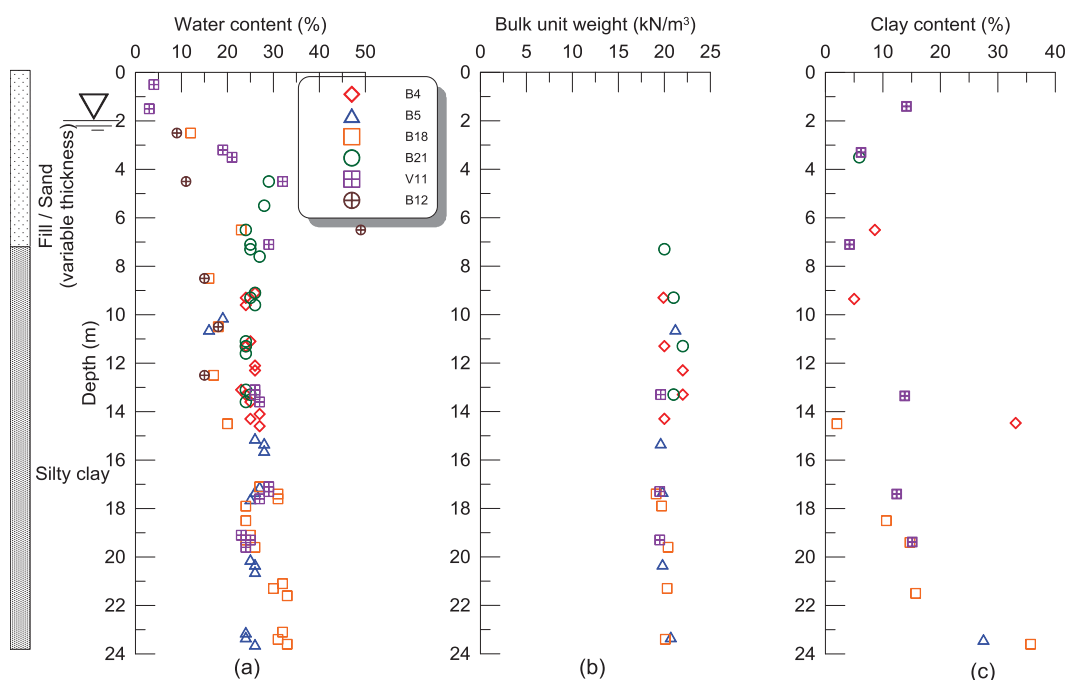
1. Hundal, E. (2014). *CPTU med målt total sonderingsmotstand, Nye muligheter for å detektere kvikkleire?* Masteroppgave, Institutt for Bygg, anlegg og transport, NTNU, Trondheim.

Vedlegg B13

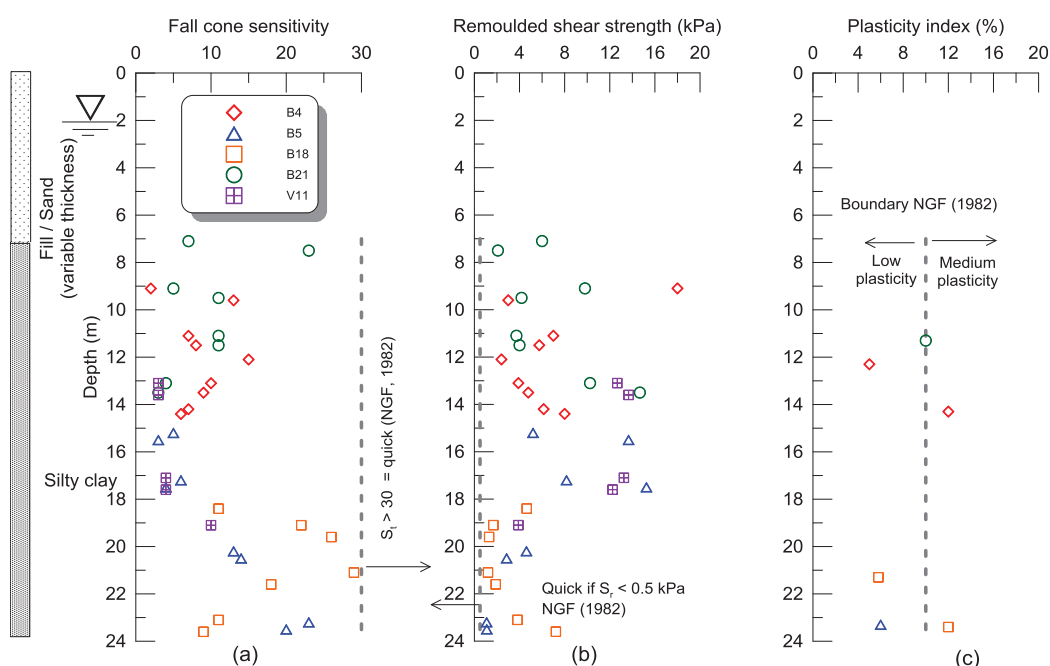
Hommelvik sjøside

Inneholder ikke kvikkleire

Forsøksfeltet på Hommelvik sjøside har en helt annen geologisk opprinnelse enn de øvrige feltene. Grunnforholdene består av en kompleks sammensetning av deltaavsetninger og inneholder vekslende lag av leire, silt og sand. Det er også utført fyllingsarbeider med innspyling av masse i området. Generelt er området sammensatt av lag med grovt material av varierende tykkelse over en siltig leire, se Figur B13.1. Den siltige leiren har et gjennomsnittlig vanninnhold w_{avg} på omtrent 25% og densitet ρ_{avg} på ca. $2,10 \text{ g/cm}^3$.



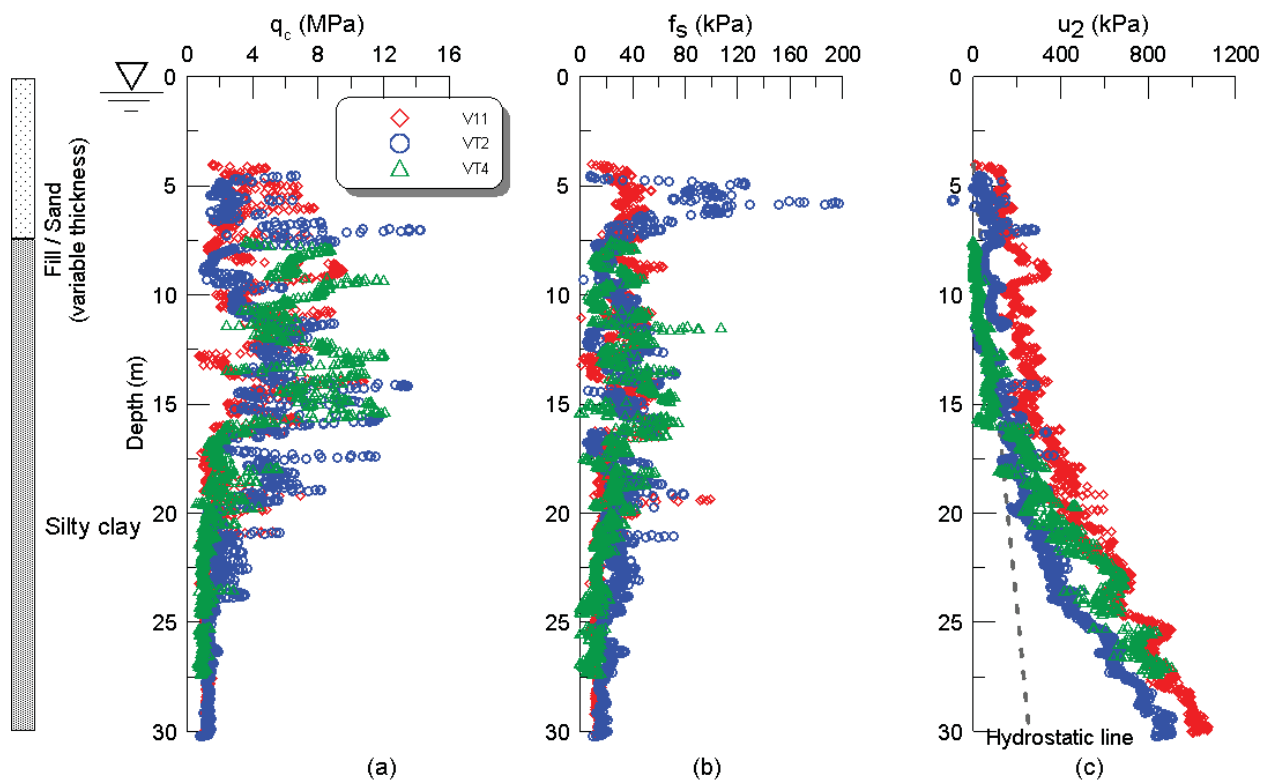
Figur B13.1. Hommelvik sjøside – grunnleggende rutinedata.



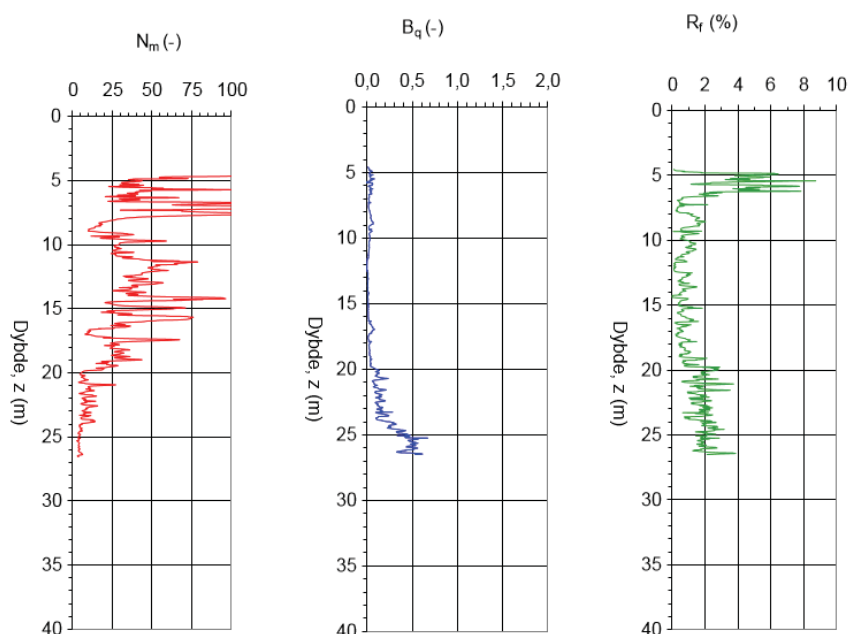
Figur B13.2. Hommelvik sjøside – sensitivitet, omrørt skjærfasthet og plastisitet.

Leiren har lav til middels sensitivitet og er lite til middels plastisk, se Figur B13.2.

CPTU resultatene på Figur B13.3 bekrefter denne lagdelingen. Grovt materiale, med relativt høye q_t og f_s verdier, overlagerer mer finkorning silt og leire. Disse lagene påvises best med forskjellen mellom u_2 og u_0 verdier.

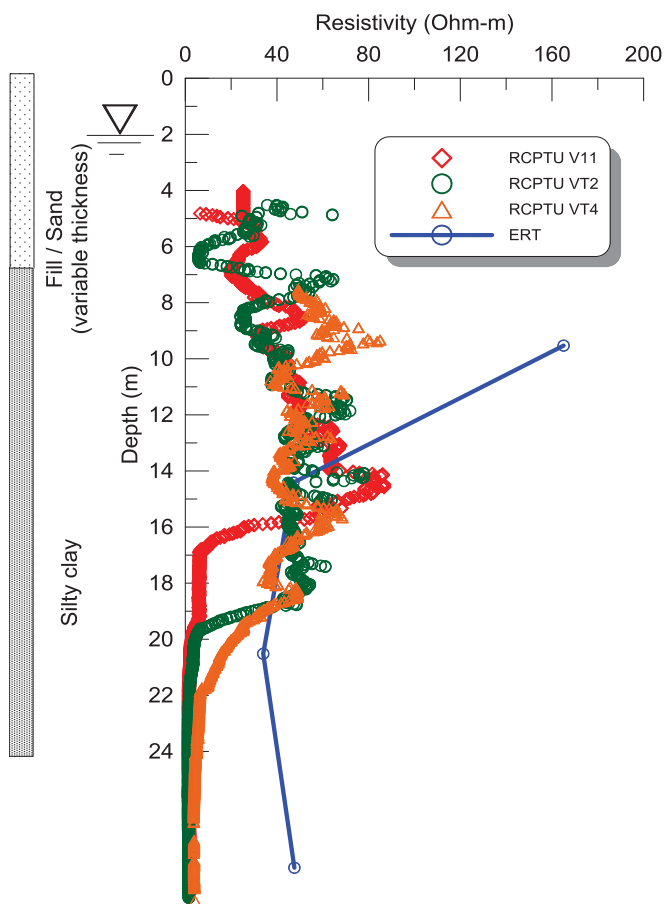


Figur B13.3. Hommelvik sjøside – CPTU profiler, q_t , f_s og u_2 (borhullene V11, VT2, VT4).



Figur B13.4. Hommelvik sjøside – CPTU profiler, N_m , B_q , R_f (borhull VT2).

En sammenligning mellom ERT og R-CPTU resultater for området er vist i Figur B13.5. Resultatene bekrefter beliggenheten av et grovt lag med høy resistivitet over et finere lag med meget lav resistivitet. Tykkelsen av det øvre laget varierer betydelig på feltet. ERT-verdiene er generelt høyere enn de som er målt med R-CPTU i begge lagene.



Figur B13.5. Hommelvik sjøside – sammenligning mellom ERT og R-CPTU målinger.

Merknad: R-CPTU v/11 ligger nærmest ERT profilet.

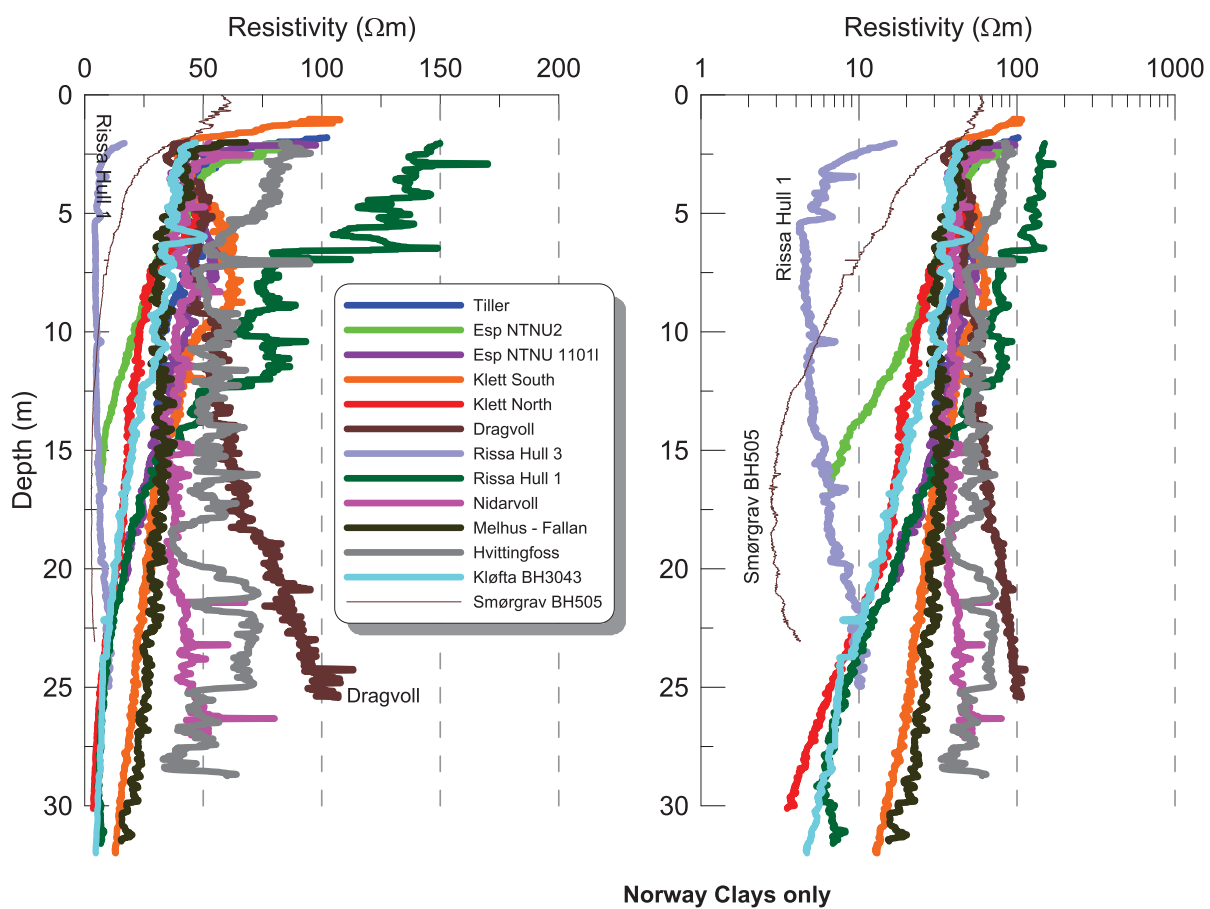
Viktige referanser

Tekniske rapporter:

1. Norges Geotekniske Institutt (2013). *Hommelvik sjøside. Geoteknisk datarapport*. NGI rapport nr.20130532-02-R.
2. Norges Geotekniske Institutt (NGI) (2011). *Hommelvik sjøside AS. Skredmassers utløp ved eventuelt kvikkleireskred i området Lia-Skjeldbreda*. NGI rapport nr. 20091622-00-28-TN
3. Rambøll (2014). *Malvik kommune, Lia Hommelvik, Kvikkleireområde*. Rambøll rapport nr. 1350004692-Geo-R01.

Vedlegg B14

Sammenstilling av alle resistivetsmålinger (R-CPTU)



Figur B14.1. Sammenstilling av alle resistivetsmålinger med R-CPTU.

VEDLEGG C

Eksempler på grunnundersøkelser med bruk av geofysiske og geotekniske metoder

Eksempel C1: Undersøkelser langs traséer og i terrengkorridorer

*Prosjekt: Ny E16 Kløfta, strekning Nybakk – Slomarka (NGI)
(NGI rapport 20130058-01-R, Anschütz m.fl. 2015).*

Eksempel C2: Undersøkelser for større arealer

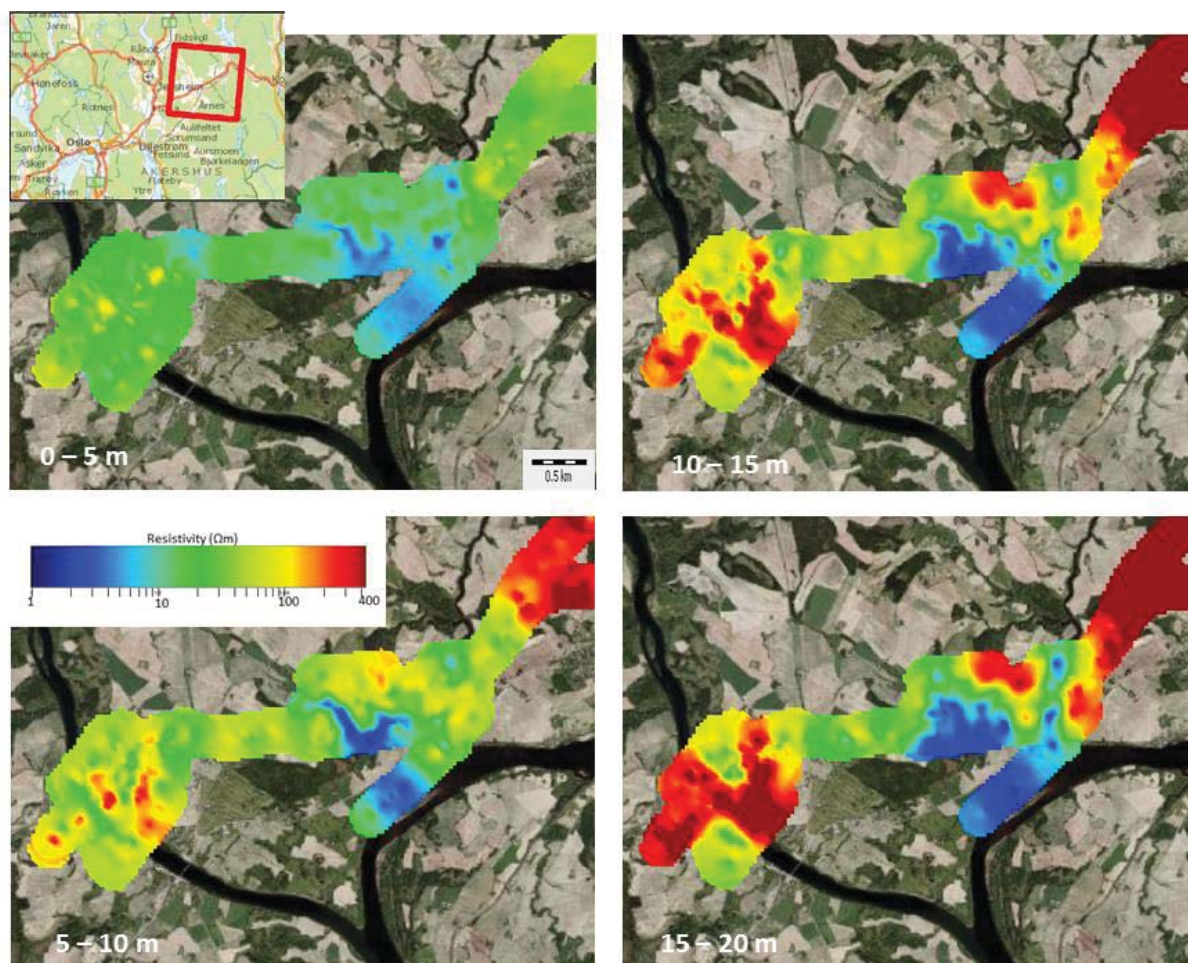
*Prosjekt: Utredning av stabilitetsforholdene langs Göta älv
(GÄU delrapport 30 Løfroth m.fl., Linköping 2011)*

Eksempel C1: Undersøkelse langs traséer og i terrengkorridorer

Prosjekt: Ny E16 Kløfta – Kongsvinger, strekning Nybakk – Slomarka.
Kombinasjon av AEM, boringer og ERT som effektiv grunnundersøkelse
(NGI rapport nr.20130058-01-R, Anschütz m fl. 2015).

En strekning med 32 km ny motorveg mellom Nybakk og Slomarka, rundt 50 km nordøst for Oslo, er siste gjenstående del av den nye E16 mellom Kløfta og Kongsvinger. Som en del av den geotekniske utredningen ble det bestemt å supplere boreprogrammet for grunnundersøkelsene med en AEM-undersøkelse. Totalt ble det flydd 178 km med helikopter utstyrt med AEM-system for å kartlegge dybder til berg, og mulige indikasjoner på kvikkleireforekomst. En integrering av 3D-modeller av elektrisk resistivitet og data fra flere hundre borehull bekreftet muligheten for kartlegging av berg med AEM. På denne måten kan man potensielt oppnå store kostnadsbesparelser om AEM-data blir innhentet i planleggingsfasen av et grunnundersøkelsesprogram. AEM har også potensiale til å indikere sensitiv leire, men er avhengig av målinger på bakken og boringer for å oppnå tilstrekkelig oppløsning. For å undersøke dette ble det innhentet ERT data langs et profil i et område med påvist sensitiv leire. Sammenstilling med AEM viser meget god overenstemmelse med ERT-resultatene.

Airborne electromagnetic measurements (AEM eller AEM – surveys) er en velkjent geofysisk metode innen mineralindustrien. I løpet av de siste 15 årene har AEM-metoden blitt betydelig videreutviklet for å kunne kartlegge grunnen med høy dybdeoppløsning og nøyaktighet. Denne nøyaktigheten er nødvendig for å kartlegge løsmasselagene i forbindelse med hydrogeologisk kartlegging.



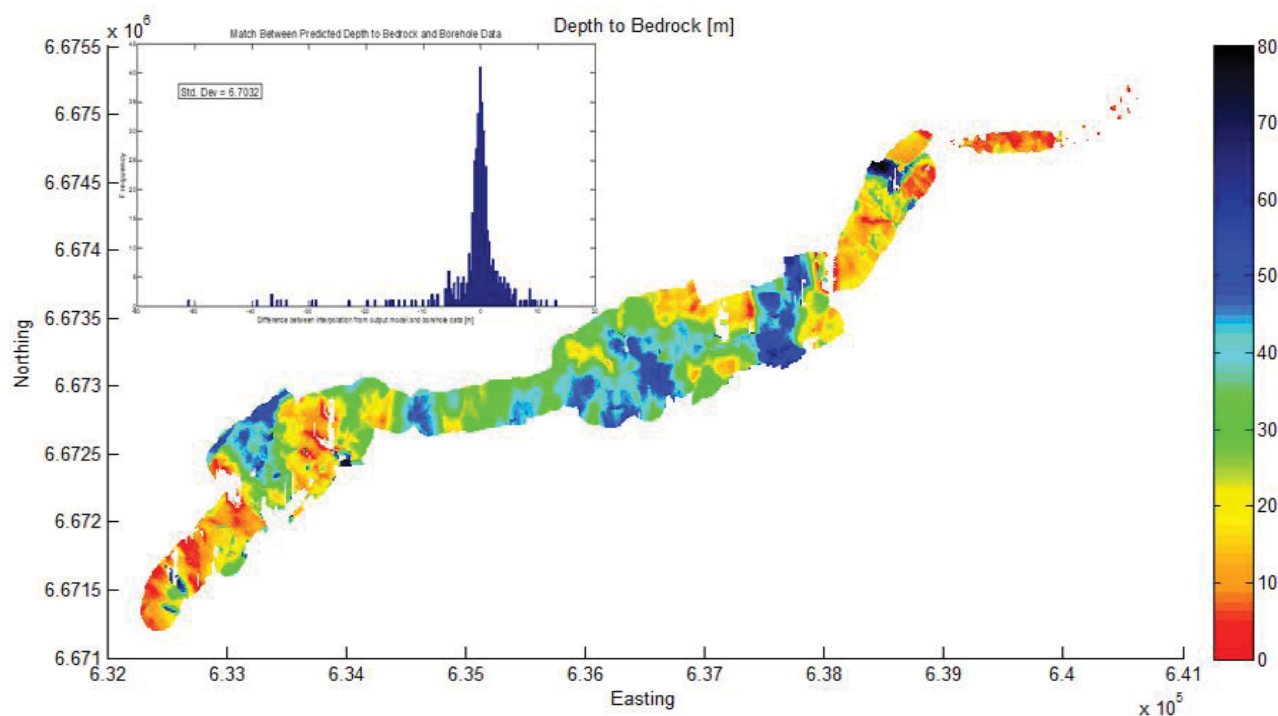
Figur C1.1 Resistivitetskart i 4 forskjellige dybdeintervaller (0-5, 5-10, 10-15 og 15-20 m under bakken) som viser heterogeniteten av løsmasselaget nær Vormo og Uåa.

I norsk geoteknikk er refraksjonsseismikk den mest kjente og tradisjonelle geofysiske metoden, men resistivitetmålinger har i senere tid fått en større rolle. 2D overflate-resistivitetmålinger (ERT) er en kjent metode, men blir relativt dyr når det gjelder å kartlegge store områder. E16-prosjektet ga en unik mulighet til å prøve om et av verdens beste AEM-systemer kunne gi bra nok dybdeoppløsning med målinger fra helikopter. Helikopteret flyr da langs en trasé som skal planlegges geoteknisk og byggeteknisk.

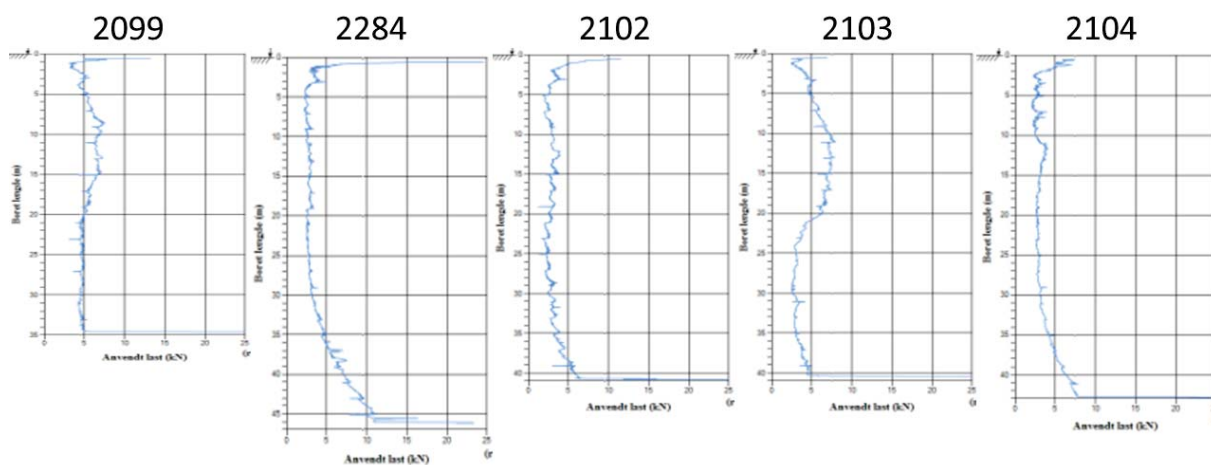
I slutten av januar 2013 ble det målt 178 linjekilometer med et SkyTEM 304 AEM-system langs den planlagte traséen på E16. Tre linjer ble målt med en innbyrdes avstand mellom linjene på 25 m. Ytterligere korte linjer ble målt nær Vormo (15 linjer) og Uåa (9 linjer) med en avstand på 125 m. Her er det forventet forekomst av kvikkleire, og det var derfor ønskelig med flere linjer. Rådataene ble prosessert og invertert med "Aarhus Workbench" programpakke, som er basert på "Spatially constrained inversion" (SCI) for å gi resistivetsverdier langs profillinjene og med dybden (se Figur C1.1). Under prosessering ble data i nærheten av kraftlinjer og andre forstyrrende kilder slettet, og det ble korrigert for varierende flyhøyde og tretopper.

Figur 2.12 i hovedteksten i denne rapporten viser et AEM profil langs den samme vegkorridoren. De gule og røde fargene antyder høy resistivitet og dermed berg eller overgang til berg. Blå farge tilsvarer mulig marin leire, mens grønn farge tilsvarer resistivetsintervaller der det kan finnes kvikkleire. Siden andre materialer kan ha samme resistivitet, behøver det ikke bety at alle grønnfargede områder i profilene nødvendigvis er kvikkleire/sensitiv leire. For å sammenligne AEM-resultatene med borehullsdata ble sistnevnte superponert fremstillingen av AEM data. Alle borehull ender på antatt berg. Ved sammenligning med borehullsdata kan det således avgrenses områder med stor sannsynlighet for kvikkleireforekomst.

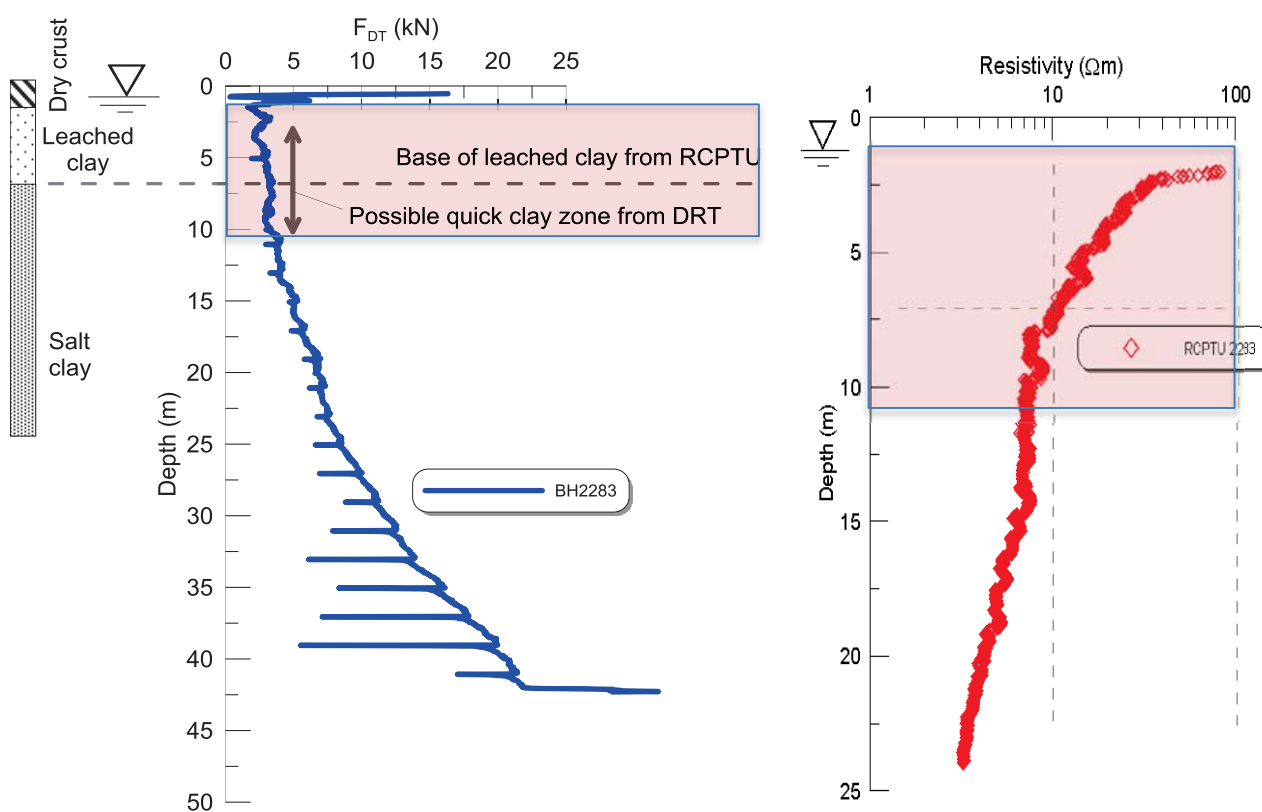
Figur 2.12 i rapporten viser at dybde til berg er svært variabel i undersøkelsesområdet. I noen områder er det imidlertid mye mindre variasjon i bergdybde. Basert på disse data kan man redusere ytterligere boringer på disse stedene hvor dybde til berg ikke er kritisk, og spare betydelige kostnader. Dybde til berg over hele området ble til slutt bestemt med en sammenstilling av AEM modellene og boringer. Det er åpenbart i Figur 2.12 at grenseverdien i resistivitet mellom løsmasse og berg er svært variabel. For å finne en endelig bergkote mellom boringene ble det først etablert en database for resistivetsgrenseverdier ved alle boringer. Deretter ble den brukt til å produsere en integrert bergoverflate for hele området (se Figur C1.2).



Figur C1.2 Kart av AEM dybde til berg basert på en variabel terskelverdi og sammenstilling av AEM-resultater, og boringer (histogrammet viser et standardavvik mellom boringer og AEM på 6 m).



Figur C1.3 Dreietrykkssonderinger langs ERT / AEM profil.



(a) Rotary pressure sounding (DRT)

Figur C1.4 Dreietrykkssondering og R-CPTU ved borhull BH2283.

I områder hvor løsmassemekktigheten er 10 m eller mer, antyder resultatene at AEM leverer høy nok oppløsning til å skille mellom salt leire og utvasket leire. Dette ble fulgt opp i mer detalj med 2D ERT målinger som leverer høy oppløsning. Figur 3.16 i denne rapporten viser god overenstemmelse mellom AEM og ERT profilene nært Vorma. I dette området ble det generelt påtruffet stor mektighet av sensitiv leire, stedvis kvikk. Dreietrykkssonderinger langs profilet (se Figur C1.3) illustrerer dette godt med reduksjon eller ingen økning i motstand med dybden. Laboratorieresultater fra prøvetaking i borhull 2284 viser bløt, men ikke

sensitiv leire fra 0-13 m, deretter kvikk leire fra 13-23 m hvor den dypeste prøven er hentet fra. Ut fra dreietrykksonderinger kunne man anta overgang til ikke-sensitiv leire fra 27 m. Et borehull ca. 100 m fra profilet viser sammenheng mellom resistivetsverdier og dreietrykksonderingen. Dreietrykksonderingen indikerer forekomst av sensitive masser, men dette ble ikke påvist med prøvetaking og laboratorieundersøkelser. R-CTPU målt resistivitet er typisk for kvikkleire i dette området (se Figur C1.4), og resistivetsmodellene fra ERT og AEM viser tilsvarende resistivitet.

Hovedkonklusjonen er at AEM skaffer en rask oversikt over grunnforholdene og kan deretter brukes for en justert og kostnadseffektiv borplan. Moderne AEM systemer (SkyTEM) og nøyaktig prosessering og invertering leverer resistivetsmodeller som nesten tilsvarer nøyaktigheten og oppløsningen av bakkemålinger (ERT). Det vil si at AEM klarer å fange opp finstrukturer i resistivetsmodellen i tykke løsmasselag. Empirisk er mindre enn 10 m et tynt lag, men dette burde undersøkes med numerisk modellering. Ved dybder til berg mindre enn 10 m kan bergkoten fortsatt godt bestemmes, men selve resistiviteten og dermed datagrunnlaget for sannsynlig utvasket leire vil bli forstyrret.

AEM er generelt best egnet i åpen mark, og bruken er underlagt restriksjoner nær infrastruktur og i bebygget område.

Eksempel C2: Undersøkelse for større arealer

Prosjekt: Utredning av stabilitetsforholdene langs Göta älv. (GÄU delrapport 30 Løfroth et al, Linköping 2011).

For å møte et forandret klima og kunne håndtere økte vannmengder gjennom Göta älv, har den svenske regjeringen gitt Statens geotekniske institutt (SGI) i oppdrag å gjennomføre en kartlegging av stabiliteten og skredrisikoen langs hele Göta älv-dalen. Det ble i prosjektet først gjennomført en sammenstilling av alle tidligere utførte undersøkelser i dalen, som grunnlag for nye geotekniske og geofysiske undersøkelser.

En hovedhensikt med prosjektet var å undersøke hvordan bruk av 2D resistivitetsmåling utført på overflaten (ERT), bruk av trykksonderinger med resistivitetsmåling (R-CPTU) og kunnskap om jordartenes geokjemi kunne bidra til en mer rasjonell og komplett grunnundersøkelse. I tillegg ble det lagt vekt på å registrere total nedpressingsmotstand i R-CPTU slik at stangfriksjonen langs hele stangsystemet, og ikke bare langs sonden, kunne benyttes til å vurdere kvikkleireforholdene. Dette ble utført på tilsvarende måte som beskrevet i kap.3.2.2 i denne rapporten.

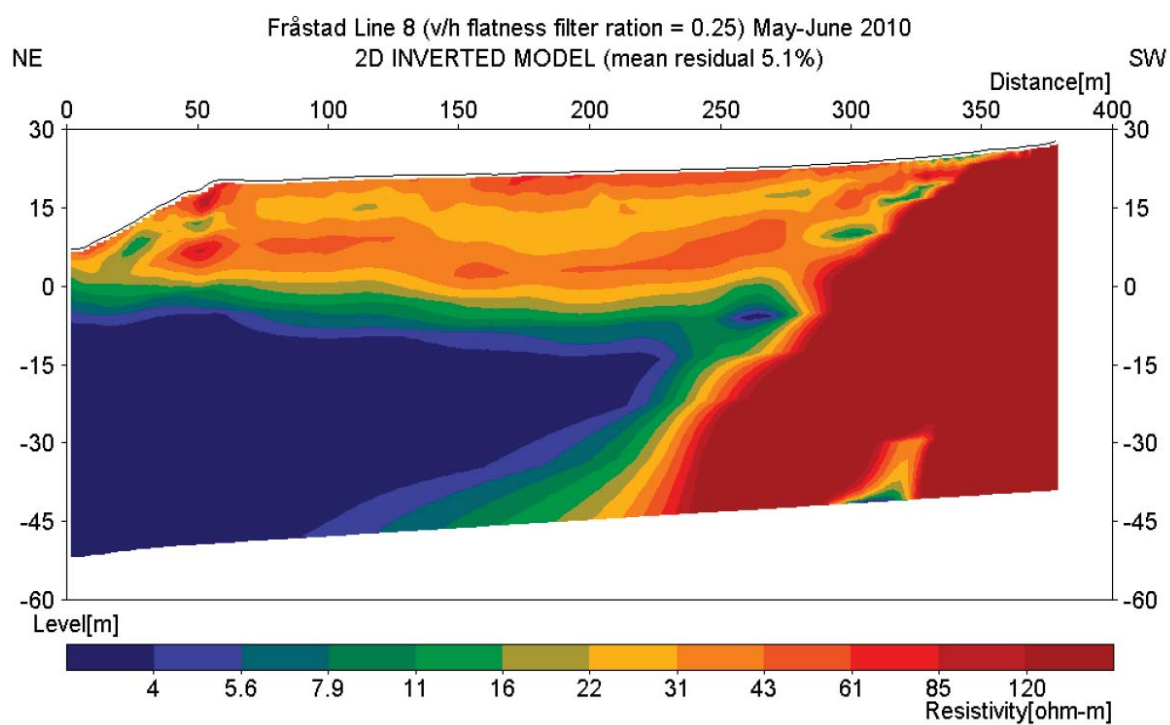
I prosjektområdet ble resistivitetsmålinger på overflaten (ERT) utført innledningsvis i profiler på tvers ned mot elveløpet. Plassering av R-CPTU og borpunkter for prøvetaking ble så fastlagt basert på resultatene fra resistivitetsmålingene, samt informasjon fra tidligere boreresultater. På denne måten kunne man oppnå optimal bestemmelse av grunnforholdene ved at boringene først og fremst ble plassert der det var mistanke om sensitiv og/eller kvikk leire. På denne måten ble grunnundersøkelsene gjennomført med høy kost-nytte verdi i forhold til påvisning av mulig sensitiv/kvikk leire.

Resultatene fra 2D overflatemålinger (ERT) viser fordelingen av resistivitet i jordvolumet langs et profil på overflaten. Fremstillingen er et resultat av invertering av et syntetisk profil med lagdeling og resistivitetsverdier tilegnet knutepunkter (noder) i jorden. Den syntetiske modellen tilpasses målte verdier av potensialet gjennom en iterasjonsprosess, inntil samsvar mellom prosesserte og målte resultater er oppnådd. Fremstillingen er noe mer unøyaktig nær endene av profilet. Hver fargekode i profilet representerer et erfaringsbasert resistivitetsintervall som tilsvarer en bestemt jordartsgruppe. For eksempel vil resistivitetsverdier mellom 1 og 5-10 Ωm i dette tilfelle tilsvare salt, marin leire, mens intervallet 10 (5) - 30 Ωm normalt tilsvarer utvasket leire, som da kan være kvikk.

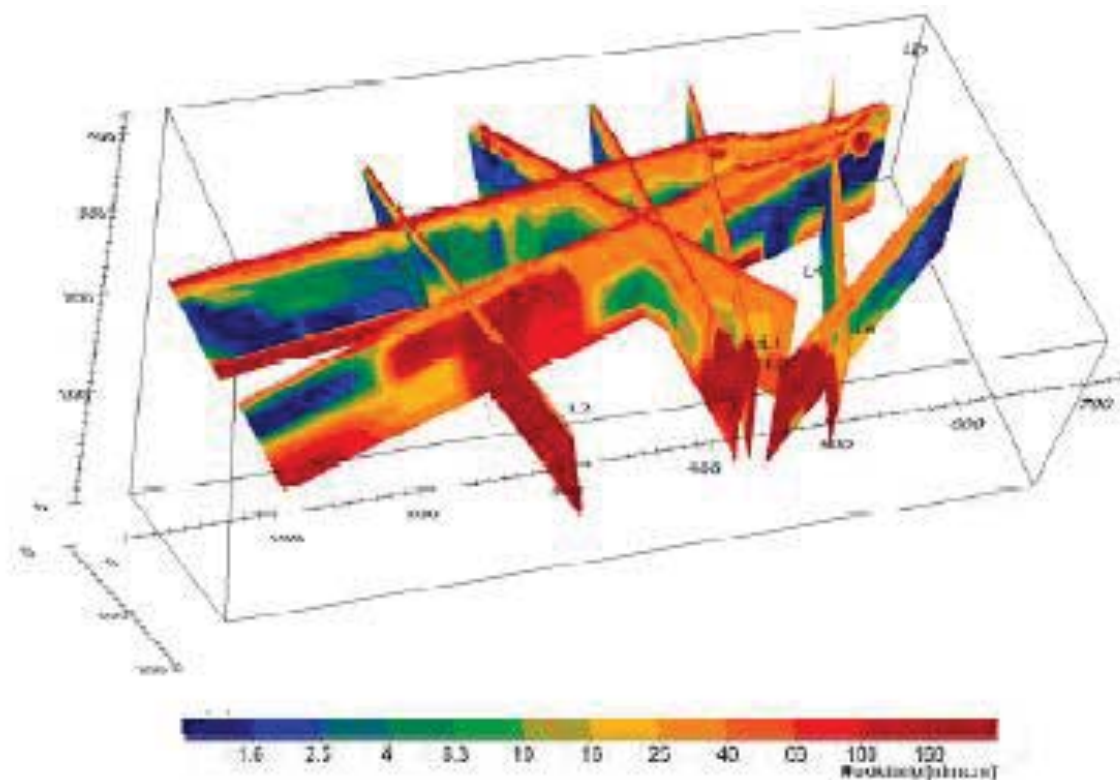
Figur C2.1 viser et typisk resultat av et ERT-profil fra undersøkelsen, der de grønne/gul-grønne områdene representerer utvasket, mulig kvikk/sensitiv leire med resistivitet mellom 5 og 100 Ωm . De blå feltene indikerer intakt, saltholdig leire med resistivitetsverdier mellom 1 og 5 Ωm .

Det er vanlig å gjennomføre en 2D resistivitetsmåling ved å måle både i langsgående og tversgående profiler. Ved å sette disse sammen i et såkalt «fence»-diagram kan man kontrollere tolkning av enkeltprofilene i skjæringsaksen mellom to profiler. Avvik i resistivitetstolkningen langs disse aksene vil indikere større usikkerhet i tolkningen enn normalt. Figur C2.2 viser et eksempel på tolkning der samsvaret i skjæringsaksene er meget godt.

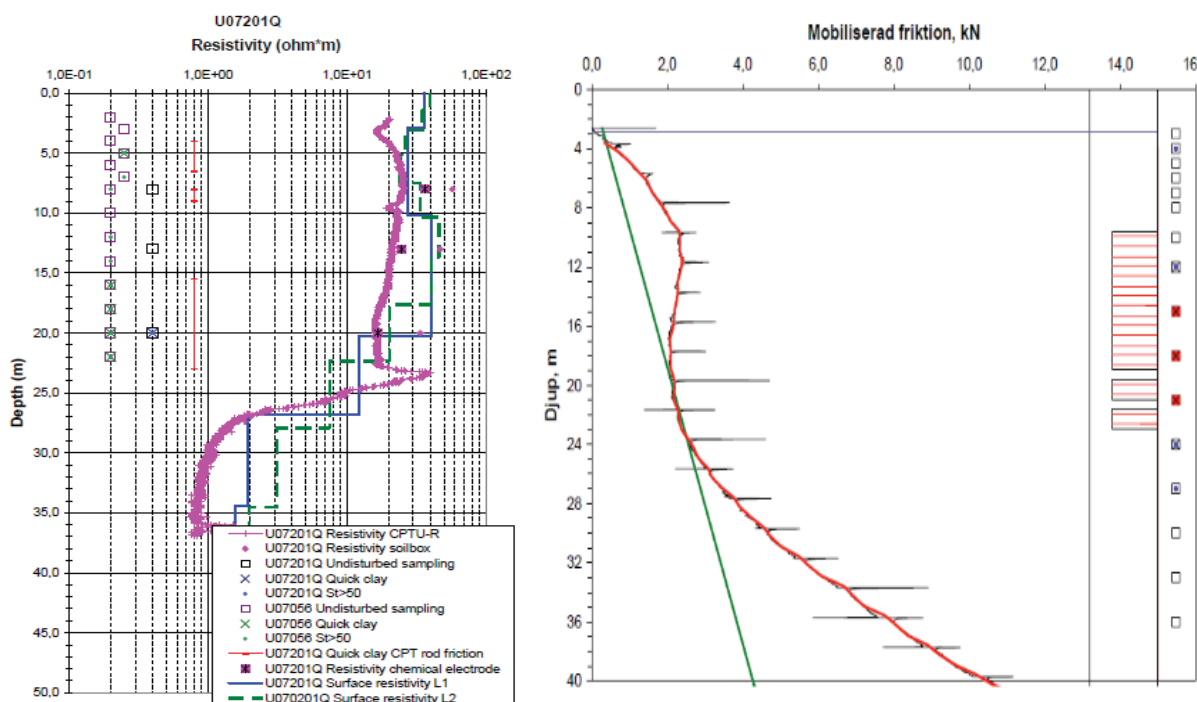
Bruk av resistivitetsdata fra R-CPTU målinger kan i prinsippet benyttes til å styre tolkningen av ERT-profilene i enkeltpunkt. Dette kan være en fordel der R-CPTU profilene er kjørt til større dyp, ettersom oppløsningen i ERT-profilene normalt vil være noe dårligere på større dyp. Sammenligningen er imidlertid ikke uten kompliserende faktorer, særlig ved inhomogene forhold og uryddig lagdeling i grunnen. Her vil 3D-effekter kunne påvirke tolkning av ERT-profilene betydelig, idet resistiviteten påvirkes av forholdene horisontalt ut fra målelinjen. Slike effekter fanges bare i begrenset grad opp av R-CPTU målingene, som bare påvirkes av forholdene i en sone tilsvarende ca. 2,5 ganger sondediameteren.



Figur C2.1 Typisk resultat fra 2D ERT resistivitetsprofil (Løfroth m.fl., 2011).



Figur C2.2 Sammenstilling av alle ERT resistivitetsprofiler innenfor et prosjektområde. Kvasi-3D fremstilling i et «fence»-diagram for kontroll av tolkningen (Løfroth m.fl., 2011).



Figur C2.3 Sammenstilling av vurderingsdata i en utvalgt del av prosjektområdet
a) resistivitetsbasert, b) stangfriksjonsbasert (Løfroth m.fl., 2011).

For å kontrollere og sammenligne alle målinger med tanke på identifisering av kvikkleirelag, kan det være hensiktsmessig å samle informasjon som vist på Figur C2.3a (t.v.). Her er resultatene fra ERT og R-CPTU sammenholdt, og sammenlignet mot kvikkleireinformasjon fra laboriemålt resistivitet, omrørt skjærfasthet og sensitivitet fra konus og bestemmelse av mobilisert stangfriksjon fra CPTU.

Det ble registrert meget godt samsvar mellom tolkning av kvikkleire fra mobilisert sidefriksjon og resultater fra øvrige forsøk, se Figur C2.3b (t.h.). Tendensen var at tolkning fra mobilisert stangfriksjon førte til noe overvurdering av kvikkleireforekomstene.

Som en del av utredningsprosjektet ble det også gjennomført omfattende geokjemiske analyser av porevann og fast stoff. Det var spesielt viktig å få klarlagt porevannskjemen og porevannets innhold av mengde og type oppløste salter. Resultater fra de geokjemiske analysene viste at utvaskede leirer som ikke var kvikke/sensitive, hadde et forhøyet magnesium- og karbonatinnhold (CO_3) som sannsynligvis har blitt utvekslet fra leirmineralenes overflate gjennom forvitring.



Norges
vassdrags- og
energidirektorat

Norges vassdrags- og energidirektorat

Middelthunsgate 29
Postboks 5091 Majorstuen
0301 Oslo

Telefon: 09575
Internett: www.nve.no

