

# CPTU med målt total sonderingsmotstand

Nye muligheter for å detektere kvikkleire?

**Erlend Hundal**

Bygg- og miljøteknikk (2-årig)

Innlevert: juni 2014

Hovedveileder: Arnfinn Emdal, BAT

Medveileder: Even Øiseth, Rambøll Norge AS

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





Oppgavens tittel: CPTU med målt total sonderingsmotstand – nye muligheter for å detektere kvikkleire?	Dato: 10.06.2014		
	Antall sider (inkl. bilag): 163		
Navn: Erlend Hundal	Masteroppgave	X	Prosjektoppgave
Faglærer/veileder: Arnfinn Emdal			
Eventuelle eksterne faglige kontakter/veiledere:	Even Øiseth (Rambøll)		

Ekstrakt:

De siste årene har det vært økt fokus på forebyggende tiltak mot kvikkleireskred. Her har det dukket opp flere studier på hvordan kvikkleire kan detekteres på en rasjonell og pålitelig måte. I den forbindelse er det ønskelig å utnytte også informasjon fra total sonderingsmotstand målt ved CPTU-sonderinger, for utledning av total stangfriksjon. Den totale stangfriksjonen utledes ved å trekke fra den målte spissmotstanden. Stangfriksjonen kan da relateres til omrørt skjærfasthet og dermed også vurdering av kvikkleireforekomster.

En direkte tolkning fra kurvehelning har blitt utviklet i et tolkningsark, basert på tidligere studier. Direkte tolkning av kvikkleireforekomst fra total stangfriksjon kan føre til feiltolking. Det må derfor benyttes manuelle tolkningslinjer i tolkningsarket.

Resistivetsmålinger fra R-CPTU har sammen med andre relevante tolkninger fra CPTU blitt brukt for å skape et bredere bilde av tolkningen. Det er vurdert muligheter for tolkning av sensitivitet fra den total stangfriksjonen, samt sett etter sammenheng mellom total stangfriksjon og akkumulert hylsefriksjon.

Vurderinger av sensitivitet fra total stangfriksjon ser ikke ut til å ha noen direkte sammenheng. Det er heller ikke funnet noen direkte sammenheng for total stangfriksjon og akkumulert hylsefriksjon.

Det har vært et mål å kunne vurdere påliteligheten av de ulike tolkningsmetodene for kvikkleireforekomst. Generelt har de fleste metodene overestimert forekomsten. Tolkningsmetoden som ga best pålitelighet er spissmotstandstallet  $N_m$ .

Tolkning av kvikkleireforekomst fra resistivetsmålinger ga overestimering ved bruk av intervallet 10 – 100  $\Omega m$  som definisjon for mulig kvikkleire.

Stikkord

1. CPTU
2. Stangfriksjon
3. Resistivitet
4. Kvikkleire
5. Grunnundersøkelser

(sign.)





TBA4900 Geoteknikk Masteroppgave, vår 2014

Stud. techn.  
Erlend Hundal

## CPTU med målt total sonderingsmotstand – nye muligheter for å detektere kvikkleire?

*CPTU with registered total penetration force – new possibilities for detection of quick clay?*

### Bakgrunn

Forekomster av kvikkleire utgjør en betydelig risiko for samfunnet. Et kvikkleireskred kan involvere store mengder løsmasser og skape voldsomme ødeleggelser. I verste fall kan kvikkleireskred ta liv. Det er derfor viktig å kunne detektere kvikkleire på en rasjonell og pålitelig måte. Det er ønskelig å utnytte også informasjon fra total sonderingsmotstand målt under CPTU-sonderinger til å vurdere sidefriksjon, og dermed omrørt skjærfasthet. Metoden gir mulighet for å kunne utlede total stangfriksjon ved å trekke fra målt spissmotstand, og økningen i total stangfriksjon kan benyttes til å vurdere størrelsesorden for omrørt skjærfasthet. Rambøll har tatt initiativ til å se på dette gjennom denne masteroppgaven. I oppgaven ønskes det i tillegg å trekke inn resistivitetmålinger fra R-CPTU, samt andre relevante tolkninger fra CPTU-parametere. Dette for å skape et større bilde og å kunne se etter sammenhenger fra de ulike tolkningene.

### Innhold

Oppgaven skal inneholde et litteraturstudium på relevant teori og tidligere forskning. Videre skal det utføres tolkning og analyse av innsamlede data, både målt sonderingsmotstand og andre relevante parametere som normalt tolkes ut fra CPTU-sonderinger. Det skal så vurderes hvorvidt påliteligheten med tolkning fra CPTU-sonderinger med målt sonderingsmotstand er bedre enn med andre sonderingsmetoder. I tillegg skal det undersøkes om det finnes noen sammenhenger mellom den totale stangfriksjonen og andre målte parametere.

### Omfang og levering

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



Even Øiseth  
Fagsjef Geoteknikk  
Rambøll Norge AS



Arnfinn Emdal  
Amanuensis  
Institutt for bygg, anlegg og transport  
Faggruppe for geoteknikk



# FORORD

---

Dette er den avsluttende oppgaven for undertegnedes masterstudium ved studieprogrammet Bygg- og miljøteknikk ved NTNU. Oppgaven er skrevet våren 2014 og har et omfang på 30 studiepoeng.

Opgaven er skrevet i samarbeid med og støtte fra Rambøll i Trondheim. Målsetningen med oppgaven har vært å se nærmere på nye tolkningsmuligheter for CPTU med målt nedpressingskraft.

Først og fremst ønsker jeg å takke mine veiledere, Arnfinn Emdal (NTNU) og Even Øiseth (Rambøll) for støtte og innspill gjennom arbeidet. Takk til Rolf Sandven og Multiconsult for datamateriale fra Ranheim Vestre, og gode innspill og diskusjoner rundt temaet.

Jeg ønsker også sende en takk til Kurt Arild Helgemo, Olav Svegård, Allan Husby, Eilif Skjærvik, Vegar Røsand og Kristian Bøkseth Hansen ved Felt- og laboratorieavdelingen hos Rambøll for stor hjelp med felt- og laboratorieundersøkelser.

Trondheim, 10. juni 2014

---

Erlend Hundal  
Stud. techn.



## SAMMENDRAG

---

De siste årene har det vært økt fokus på forebyggende tiltak mot kvikkleireskred. Her har det dukket opp flere studier på hvordan kvikkleire kan detekteres på en rasjonell og pålitelig måte. I den forbindelse er det ønskelig å utnytte også informasjon fra total sonderingsmotstand målt ved CPTU-sonderinger, for utledning av total stangfriksjon. Den totale stangfriksjonen utledes ved å trekke fra den målte spissmotstanden. Stangfriksjonen kan da relateres til omrørt skjærfasthet og dermed også vurdering av kvikkleireforekomster.

En direkte tolkning fra kurvehelning har blitt utviklet i et tolkningsark, basert på tidligere studier. Direkte tolkning av kvikkleireforekomst fra total stangfriksjon kan føre til feiltolkning. Det må derfor benyttes manuelle tolkningslinjer i tolkningsarket.

Resistivetsmålinger fra R-CPTU har sammen med andre relevante tolkninger fra CPTU blitt brukt for å skape et bredere bilde av tolkningen. Det er vurdert muligheter for tolkning av sensitivitet fra den total stangfriksjonen, samt sett etter sammenheng mellom total stangfriksjon og akkumulert hylsefriksjon.

Vurderinger av sensitivitet fra total stangfriksjon ser ikke ut til å ha noen direkte sammenheng. Det er heller ikke funnet noen direkte sammenheng for total stangfriksjon og akkumulert hylsefriksjon.

Det har vært et mål å kunne vurdere påliteligheten av de ulike tolkningsmetodene for kvikkleireforekomst. Generelt har de fleste metodene overestimert forekomsten. Tolkningsmetoden som ga best pålitelighet er spissmotstandstallet  $N_m$ .

Tolkning av kvikkleireforekomst fra resistivetsmålinger ga overestimering ved bruk av intervallet  $10 - 100 \Omega m$  som definisjon for mulig kvikkleire.



## SUMMARY

---

In recent years, there has been an increased focus on preventive measures against quick clay slides. It has been done several studies on how quick clay can be detected in a rational and reliable manner. In relation to this, it is wanted to utilize the registered total penetration force from CPTU-soundings to derive the total rod friction. The total rod friction is derived by subtracting the measured tip resistance. The total rod friction can then be related to the remoulded shear strength and thus the assessment of quick clay deposits.

A direct interpretation from total rod friction has been developed in a spreadsheet, based on previous studies (Löfroth, 2011). Direct interpretation of quick clay deposit from the total rod friction could lead to misinterpretation. Therefore, manual interpretation lines must be used.

Resistivity measurements from R-CPTU, together with other relevant interpretations from CPTU has been used to create a broad picture of interpretation. It has been considered possibilities for interpretation of the sensitivity from the total rod friction, as well as correlation between total rod friction and accumulated sleeve friction.

The interpretation of sensitivity from total rod friction does not seem to have any direct relation. It is also not found any direct relation between the total rod friction and accumulated sleeve friction.

One goal of this study has been to evaluate the reliability of the different interpretation methods for quick clay deposits. In general, most methods have overestimated these deposits. The interpretation method that has shown the best reliability is the cone resistance number,  $N_m$ .

Interpretation of quick clay deposits from resistivity measurements showed overestimation of the deposits when using the interval 10-100  $\Omega m$  as a definition of possible quick clay.





# INNHold

---

<b>1</b>	<b>Innledning.....</b>	<b>1</b>
1.1	Bakgrunn for oppgaven .....	1
1.2	Oppgavens omfang.....	1
1.3	Undersøkellessteder .....	1
<b>2</b>	<b>Kvikkleire .....</b>	<b>3</b>
2.1	Dannelse av kvikkleire .....	3
2.2	Definisjon.....	4
<b>3</b>	<b>CPTU.....</b>	<b>5</b>
3.1	Grunnleggende om CPTU .....	5
3.2	Målte parametere .....	6
3.3	Utledele parametere .....	7
3.4	Kvalitetssikring av CPTU-forsøk .....	8
3.4.1	Korrigeriug av dybdenivå .....	8
3.4.2	Anvendelsesklasser .....	8
3.4.3	Geometriske krav til sonden .....	9
3.5	Empiriske korrelasjoner fra CPTU .....	10
3.5.1	Udrenert skjærfasthet .....	11
3.5.2	Overkonsolideringsgrad .....	12
3.5.3	Sensitivitet .....	13
3.6	R-CPTU .....	13
3.6.1	Resistivitet .....	13
3.6.2	Prosjektutstyr .....	15
3.6.3	Tidligere forskning og erfaringer .....	16
<b>4</b>	<b>Tolkning for kvikkleire fra ulike sonderingsmetoder .....</b>	<b>19</b>
4.1	Dreietrykkssondering og totalsondering.....	19
4.2	Korrelasjoner mellom sonderingsmotstand og sensitivitet.....	21
4.3	Jordartsklassifisering .....	23
4.4	Spissmotstandstallet, $N_m$ .....	24
<b>5</b>	<b>CPTU med målt total sonderingsmotstand.....</b>	<b>25</b>
5.1	Tolkning av total stangfriksjon .....	25
5.2	Tidligere forskning .....	26
5.3	Utviklet tolkningsark.....	29
5.3.1	Referansefriksjon .....	30
5.3.2	Kurveutjevning.....	31
5.3.3	Sonderingsstenger .....	31
5.4	Vurdering av omrøringsgrad.....	33

5.5	Sensitivitet.....	34
5.6	Tolkningsmetoders pålitelighet.....	35
<b>7</b>	<b>Resultater.....</b>	<b>50</b>
7.1	Total stangfriksjon.....	50
7.2	Vurdering av omrøringsgrad.....	50
7.3	Sensitivitet.....	50
7.4	R-CPTU.....	51
7.5	Jordartsklassifisering.....	52
7.6	Tolkningsmetoders pålitelighet.....	53
<b>8</b>	<b>Diskusjon.....</b>	<b>57</b>
8.1	Total stangfriksjon.....	57
8.1.1	Tolkningskurve.....	57
8.1.2	Sonderingsmotstand.....	59
8.2	Vurdering av omrøringsgrad.....	62
8.3	Sensitivitet.....	63
8.4	Tolkningsmetoders pålitelighet.....	63
8.5	Sammenstilling av tolkninger.....	64
<b>9</b>	<b>Konklusjon.....</b>	<b>67</b>
<b>10</b>	<b>Videre arbeid.....</b>	<b>69</b>
	<b>Bibliografi.....</b>	<b>71</b>
	<b>Vedlegg A – Felt- og laboratedata Esp, Byneset.....</b>	<b>75</b>
	<b>Vedlegg B – Felt- og laboratedata Nidarvoll.....</b>	<b>95</b>
	<b>Vedlegg C – Felt- og laboratedata Ranheim Vestre.....</b>	<b>109</b>
	<b>Vedlegg D – Jordartsklassifisering.....</b>	<b>125</b>
	<b>Vedlegg E – Tolkning fra total stangfriksjon, CPTU.....</b>	<b>137</b>

# FIGURER

<b>Figur 1:</b> Illustrasjon av kornstruktur i kvikkleire (Husbyn et al., 2002).....	3
<b>Figur 2:</b> Illustrasjon av tøyning/spennings-kurve for sprøbruddmaterialer (NVE, 2014).....	4
<b>Figur 3:</b> Geotech Novasonde (GeoTech, 2014b).....	5
<b>Figur 4:</b> Identifisering av poretrykk (NGF, 2010).....	6
<b>Figur 5:</b> Toleransekrav for en trykksonde (NGF, 2010).....	10
<b>Figur 6:</b> Prinsippskisser over et utvalg elektrodekonfigurasjoner (Solberg et al., 2011).....	15
<b>Figur 7:</b> Novasonde med påmontert konduktivitetsadapter (GeoTech, 2014a).....	15
<b>Figur 8:</b> Spiss for dreietrykksondering (venstre) og Totalsondering (NGF, 1989, NGF, 1994) ...	19
<b>Figur 9:</b> Grunnlag for materialtolkning ved dreietrykksondering (NGF, 1989).....	20
<b>Figur 10:</b> Parallellboring av dreietrykksondering og totalsondering (NGF, 1994).....	21
<b>Figur 11:</b> Spiss for totaltrykksondering (Bergdahl, 1984).....	22
<b>Figur 12:</b> Tolkingsdiagrammer for sensitivitet fra sonderinger (Möller og Bergdahl, 1982)....	22
<b>Figur 13:</b> Klassifiseringsdiagram basert på Robertson et al. (1986).....	23
<b>Figur 14:</b> Eksempel på tolkning fra $N_m$ sammen med flere parametere (Sandven, 2013).....	24
<b>Figur 15:</b> Kraftmodell for CPTU med målt totalkraft.....	25
<b>Figur 16:</b> Teoretisk stangfriksjonsfordeling.....	26
<b>Figur 17:</b> Prinsipp økning i stangfriksjon.....	26
<b>Figur 18:</b> Treffsikkerhet for CPT-stangfriksjon og totaltrykksondering (Löfroth, 2011).....	27
<b>Figur 19:</b> Stangfriksjonskurve og (Rankka et al., 2004).....	28
<b>Figur 20:</b> Kvikkleiretolkning for CPTU med totalkraft (Löfroth, 2011).....	29
<b>Figur 21:</b> Stangfriksjonstolkning fra CPTU med totalkraft. Data fra Nidarvoll.....	30
<b>Figur 22:</b> Prinsipp for glidende gjennomsnitt.....	31
<b>Figur 23:</b> Eksempel på utledning av total stangfriksjon (Nidarvoll).....	32
<b>Figur 24:</b> Tolkning for omrøringsgrad (Nidarvoll).....	33
<b>Figur 25:</b> Kontroll av tolkning for omrøringsgrad (Nidarvoll).....	34
<b>Figur 26:</b> Oversiktskart undersøkelsessteder (norgeskart.no).....	37
<b>Figur 27:</b> Flyfoto over skredområdet ved Esp. Undersøkelsespunkt markert (norgebilder.no).38	
<b>Figur 28:</b> Bilde av skredgropa på Esp, retning nord-øst (Foto: Olav Svegård, Rambøll).....	38
<b>Figur 29:</b> Kvartærgeologisk kart, Esp, Byneset (ngu.no/kart/losmasse/).....	39
<b>Figur 30:</b> Oversiktskart med kvikkleiresoner, Esp (skrednett.no).....	39
<b>Figur 31:</b> Grunnundersøkelser i nærheten av skredgropa pr. 9.1.2012 (Nyheim et al., 2012) .	40
<b>Figur 32:</b> Boring på Esp, Byneset januar 2014. (Foto: Olav Svegård, Rambøll).....	41
<b>Figur 33:</b> Oversiktskart ved undersøkelsessted på Nidarvoll (norgeskart.no).....	43
<b>Figur 34:</b> Kvartærgeologisk kart, Nidarvoll (ngu.no/kart/losmasse/).....	44
<b>Figur 35:</b> Oversiktskart med kvikkleiresoner, Nidarvoll (skrednett.no).....	44
<b>Figur 36:</b> Utsnitt av situasjonsplan ved Nidarvoll.....	46
<b>Figur 37:</b> Kvartærgeologisk kart, Ranheim Vestre (ngu.no/kart/losmasse/).....	47
<b>Figur 38:</b> Oversiktskart over undersøkelsessteder, Ranheim Vestre (norgeskart.no).....	48
<b>Figur 39:</b> Oversiktskart med kvikkleiresoner, Ranheim Vestre (skrednett.no).....	48
<b>Figur 40:</b> Tolkning av sensitivitet (Venstre: Nidarvoll, Høyre: Ranheim Vestre).....	51
<b>Figur 41:</b> Tolkning fra ulike sonderingsmetoder (Esp).....	53

<b>Figur 42:</b> Vurdering av pålitelighet av tolkningsmetoder (Esp).....	54
<b>Figur 43:</b> Samlet vurdering for kvikkleire (Nidarvoll). .....	55
<b>Figur 44:</b> Vurdering av pålitelighet av tolkningsmetoder fra samlet vurdering (Nidarvoll). .....	55
<b>Figur 45:</b> Tolkning av total stangfriksjon fra R-CPTU(1) (Esp).....	57
<b>Figur 46:</b> Tolkning av total stangfriksjon fra CPTU (Nidarvoll). .....	59
<b>Figur 47:</b> Total stangfriksjon med og uten resistivitetsadapter (Nidarvoll). .....	60
<b>Figur 48:</b> Total stangfriksjon med og uten resistivitetsadapter (Esp). .....	61
<b>Figur 49:</b> Sonderingsmotstand Esp og Nidarvoll .....	62
<b>Figur 50:</b> Eksempel på samleplott. Data fra Esp, Byneset. ....	65

## TABELLER

<b>Tabell 1:</b> Krav til anvendelsesklasser for CPT/CPTU (NGF, 2010).....	9
<b>Tabell 2:</b> Tekniske spesifikasjoner for resistivitetssonde (GeoTech, 2014a).....	16
<b>Tabell 3:</b> Utgangspunkt for klassifisering fra resistivetsverdier (Solberg et al., 2011).....	16
<b>Tabell 4:</b> Typiske resistivetsverdier i forskjellige jordarter (Sandven og Montafia, 2014).....	17
<b>Tabell 5:</b> Orienterende faktorer for matekraftsutslag (NGF, 1994). .....	20
<b>Tabell 6:</b> Sammendrag av rutinedata, Esp, Byneset.....	42
<b>Tabell 7:</b> Koordinater og høyde for borpunkt, Esp, Byneset (King, 2013).....	42
<b>Tabell 8:</b> Sammendrag av rutinedata, Nidarvoll .....	45
<b>Tabell 9:</b> Koordinater og høyde for borpunkt, Nidarvoll.....	46
<b>Tabell 10:</b> Koordinater og høyder for borpunkt, Ranheim Vestre. ....	49
<b>Tabell 11:</b> Forholdstall for omrøringsgrad .....	50
<b>Tabell 12:</b> Vurdering av konstantverdier, $N_s$ , for sensitivitet. ....	51
<b>Tabell 13:</b> Jordartsklassifisering .....	52

## SYMBOLLISTE

Symboler og benevnelser er i henhold til Norsk Geoteknisk Forenings veiledninger for symboler og definisjoner i geoteknikk (NGF, 2011).

a	Attraksjon	[kPa]
a	Netto arealforhold, spissmotstandskorreksjon	[-]
$A_c$	Tverrsnittsareal av CPT-sonde	[mm <sup>2</sup> ]
$A_s$	Overflateareal av friksjonshylse på CPT-sonde	[mm <sup>2</sup> ]
$B_q$	Poretrykksforhold	[-]
$C_u$	Udrenert skjærfasthet	[kPa]
$C_{uA}$	Udrenert, aktiv skjærfasthet	[kPa]
$C_{ufc}$	Udrenert skjærfasthet i uforstyrret tilstand målt fra konusforsøk	[kPa]
$C_{ur}$	Udrenert skjærfasthet i omrørt tilstand	[kPa]
$C_{urfc}$	Udrenert skjærfasthet i omrørt tilstand målt fra konusforsøk	[kPa]

F	Målt nedpressingskraft	[kN]
F <sub>s</sub>	Målt kraft på friksjonshylse	[kN]
f <sub>s</sub>	Sidefriksjon på friksjonshylse	[kPa]
G	Tyngdekraft av sonderingsutstyr	[kN]
N <sub>ke</sub>	CPT konfaktor basert på effektiv spissmotstand	[-]
N <sub>kt</sub>	CPT konfaktor basert på netto spissmotstand	[-]
N <sub>m</sub>	Spissmotstandstall	[-]
N <sub>Δu</sub>	CPT konfaktor basert på poreovertrykk	[-]
OCR	Overkonsolideringsgrad ( $= \sigma'_c / \sigma_{v0}'$ )	[-]
Q <sub>c</sub>	Målt kraft mot CPT-kon	[kN]
q <sub>c</sub>	Spissmotstand	[kPa]
q <sub>n</sub>	Netto spissmotstand	[kPa]
Q <sub>s</sub>	Total stangfriksjon	[kN]
q <sub>t</sub>	Korrigert spissmotstand	[kPa]
Q <sub>t</sub>	Kraftkomponent for korrigert spissmotstand	[kN]
R <sub>f</sub>	Friksjonsforhold	[-]
S <sub>t</sub>	Sensitivitet	[-]
u <sub>0</sub>	Initielt in-situ poreovertrykk	[kPa]
u <sub>2</sub>	Poretrykk i spalten mellom kon og friksjonshylse	[kPa]
α	Vinkel mellom vertikalaksen og trykksonden (en-akset helningsmåler)	[°]
α	Utjevningfaktor ved glidende gjennomsnitt	[-]
σ <sub>c</sub> '	Effektiv prekonsolideringsspenning	[kPa]
σ <sub>v0</sub> '	Effektivt vertikalt overlagringstrykk	[kPa]

## FORKORTELSER

Forkortelse	Forklaring norsk/oversettelse	Forklaring engelsk/oversettelse
CPTU	Trykksondering (med poretrykksmåling)	Cone penetration test undrained
ERT	Elektrisk resistivitetstomografi	Electrical Resistivity Tomography
NTNU	Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet	Norwegian University of Science and Technology
R-CPTU	CPTU med resistivitetsmåling	CPTU with resistivity measurements



# 1 INNLEDNING

---

## 1.1 BAKGRUNN FOR OPPGAVEN

Kvikkleire forbindes med risiko. Dette er ikke uten grunn. Kvikkleireskred kan skape voldsomme ødeleggelser og kan i ytterste konsekvens ta liv. De siste årene har det vært en økt fokus på forebyggende tiltak mot kvikkleireskred, hvor kartlegging av kvikkleireforekomster har vært et viktig tema. Her har det dukket opp flere studier på hvordan kvikkleire kan detekteres på en rasjonell og pålitelig måte. I den forbindelse er det ønskelig å utnytte også informasjon fra total sonderingsmotstand målt ved CPTU-sonderinger for utledning av total stangfriksjon. Den totale stangfriksjonen kan da relateres til omrørt skjærfasthet og dermed også vurdering av kvikkleireforekomster.

## 1.2 OPPGAVENS OMFANG

Med måling av total sonderingsmotstand ved CPTU-sonderinger gir dette flere muligheter. Direkte utledning av total stangfriksjon og dermed omrørt skjærfasthet er utgangspunktet for oppgaven. Fra dette utgangspunktet er det sett på muligheten for tolkning av sensitivitet basert på den utledede omrørte skjærfastheten og empiriske korrelasjoner for aktiv, udrenert skjærfasthet.

Målingene som blir gjort ved friksjonshylsen på CPTU-sonderinger vil sjelden være av materiale som er fullstendig omrørt. På bakgrunn av dette og mulighetene til å se på den totale stangfriksjonen, er det sett på sammenhengen mellom disse to sidefriksjonene.

Det har vært et ønske om å trekke inn flest mulig tolkningsmetoder for kvikkleire ved ulike sonderingsmetoder for å kunne vurdere påliteligheten av de ulike metodene. Resultater fra dreietrykksonderinger, totalsonderinger, resistivitetsmålinger med R-CPTU og utledede parametere fra CPTU-sonderinger er vurdert opp mot laboratorieresultater.

## 1.3 UNDERSØKELSESTEDER

Denne oppgaven bygger på grunnundersøkelser fra tre steder i Trondheim. Dette er Esp på Byneset, Nidarvoll og Ranheim Vestre. Undersøkelsesomfanget på Esp har vært betydelig større enn ved de andre undersøkelsesstedene. Undersøkelsene på Esp ble utført av Rambøll direkte for denne oppgaven. Undersøkelsene på de andre stedene er utført i forbindelse med prosjekter av henholdsvis Rambøll og Multiconsult.





## 2 KVIKKLEIRE

### 2.1 DANNELSE AV KVIKKLEIRE

Istider har oppgjennom historien ført til mye forvitring av berggrunnen. Ved isavsmeltinger har så løsmasser blitt transportert med is og smeltevann og blitt avsatt i forskjellige sorteringer. De groveste materialene er blitt avsatt nært isbreene, mens de finere sedimentene har ofte blitt transportert lengre. Mye leir- og siltpartikler har derfor blitt avsatt i sjøen slik at marin leire har blitt dannet. Leirpartikler avsatt i sjøen flokulerer, slik at det skapes en åpen kornstruktur. Ionene i saltvannet binder partiklene sammen slik at kornstrukturen blir stabil.

Issmeltingen har også ført til landheving, og områder med marin leire har havnet over havnivå. Generelt har leire lav permeabilitet, men over lang tid fører grunnvannstrømning til utvasking av salt i leira. I utgangspunktet har den marine leira et saltinnhold i porevannet tilsvarende sjøvann, 35 g/l. Når porevannets saltinnhold blir vasket ut til ca. 2 g/l (Torrance, 1974), vil bindingene mellom partiklene ha blitt svært svake og kornstrukturen blitt ustabil. Dermed har kvikkleire blitt dannet. Overbelastning kan nå føre til at kornstrukturen kollapser totalt, og leira vil bli flytende som suppe i sitt eget porevann. Man får her en såkalt sprøbruddoppførsel. Figur 1 viser en illustrasjon av kornstrukturen før og etter ras.

Enkelte områder hvor strømningsforhold er bedre, for eksempel der det er drenerende sandlag, kan utvaskingen ha skjedd raskere. Dermed oppstår det soner og lommer med kvikkleire.



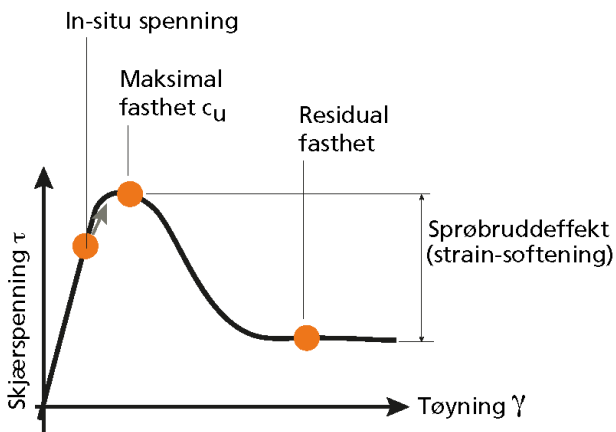
Figur 1: Illustrasjon av kornstruktur i kvikkleire (Husbyn et al., 2002)

## 2.2 DEFINISJON

Den norske definisjonen for leire er når leirinnholdet i en jordart er større enn 30 %. Leirinnholdet beregnes av hvor mye massen av leirpartikler (partikler < 2  $\mu\text{m}$ ) utgjør av den totale massen faste partikler. Videre defineres kvikkleire som leire med en udrenert skjærfasthet i omrørt tilstand  $c_{ur} \leq 0,5$  kPa. Typisk har kvikkleire også en høy sensitivitet,  $S_t$ , som er forholdstallet mellom maksimal udrenert skjærfasthet og udrenert skjærfasthet i omrørt tilstand.

$$S_t = \frac{c_u}{c_{ur}} \quad (2.1)$$

Sprøbruddmateriale er en annen definisjon som benyttes om materialer med lav skjærfasthet og høy sensitivitet. I henhold til NVEs veileder «Sikkerhet mot kvikkleireskred» (NVE, 2014) defineres sprøbruddmateriale som et materiale med  $c_{ur} < 2,0$  kPa og  $S_t > 15$ . Altså et materiale som får en betydelig reduksjon i fasthet ved tøyninger utover tøyning ved maksimal fasthet (Figur 2). Alle materialer som havner innunder denne definisjonen skal under prosjektering behandles på samme måte som kvikkleire. Derfor er denne definisjonen vel så viktig.



Figur 2: Illustrasjon av tøyning/spennings-kurve for sprøbruddmaterialer (NVE, 2014).

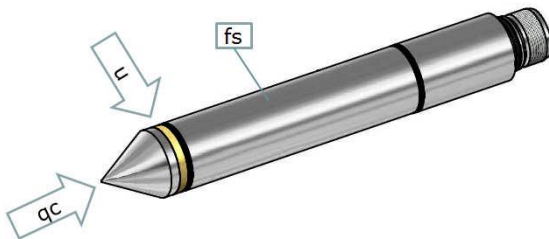
## 3 CPTU

### 3.1 GRUNNLEGGENDE OM CPTU

Trykksondering med poretrykksmåling, eller CPT (Cone penetration test undrained), er en testmetode som i dag benyttes ofte ved geotekniske grunnundersøkelser. Metoden er velkjent rundt omkring i hele verden, og er blant de mest presise in-situ-undersøkelsene. Metoden gir mye informasjon i form av flere typer kontinuerlige målinger nedigjennom borprofilet. Her måles spissmotstand, sidefriksjon og poretrykk, og disse parameterne kan ved empiriske tilnærminger benyttes til tolkninger og geoteknisk design. Dette gjør metoden svært kostnadseffektiv (Lunne et al., 1997).

CPTU-sonden er sylindrisk med en konisk spiss og ser typisk ut som i Figur 3. Dens dimensjoner og plassering av måleinstrumenter kan variere fra produsent til produsent. I dette studiet er alle CPTU-sonderinger utført med en Novasonde fra Geotech. Den har en diameter på 35 mm og en lengde på 230 mm, målt fra spissen til påkoblingen (GeoTech, 2014b).

Med borstenger presses sonden ned uten rotasjon og med konstant hastighet, ca. 2 cm/sekund, hvor målinger registreres hver 2 – 5 cm. Geotechs Novasonde registrerer målinger hver 2 cm. Måledataene kan registreres på flere måter. De kan lagres på en minnebrikke i sonden eller sendes via borstengene med kabel eller akustiske signaler til en registreringsenhet på overflaten. Akustiske signaler gjennom borstengene er ofte det meste praktiske. Da har man mulighet til å følge registreringene i sanntid når det bores, og man slipper å dra kabel gjennom alle borstengene.



Figur 3: Geotech Novasonde (GeoTech, 2014b).

## 3.2 MÅLTE PARAMETERE

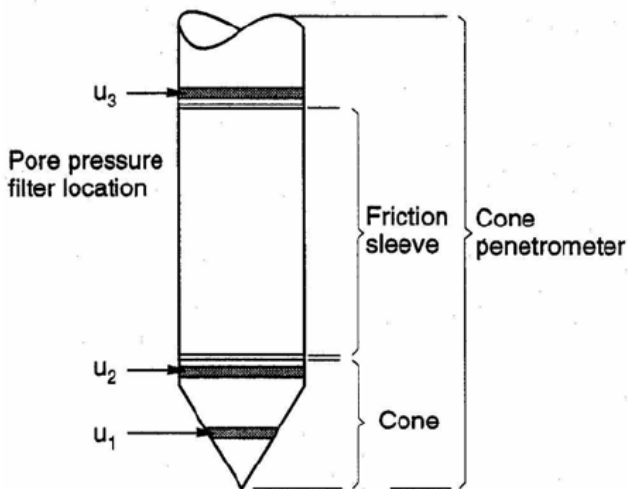
For å bestemme spissmotstanden måles den totale kraften mot den koniske delen av sonden. Spissmotstanden,  $q_c$ , finnes så ved å dividere den målte kraften  $Q_c$  på tverrsnittsarealet  $A_c$ . Denne transformasjonen gjøres som oftest i loggeprogrammet.

$$q_c = \frac{Q_c}{A_c} \quad (3.1)$$

Bestemmelse av sidefriksjonen gjøres på tilsvarende måte som for spissmotstanden. Her måles den totale kraften på friksjonshylsen. Og sidefriksjonen  $f_s$  finnes ved å dividere på overflatearealet av friksjonshylsen,  $A_s$ .

$$f_s = \frac{F_s}{A_s} \quad (3.2)$$

Plassering av poretrykksmålere varierer mellom sondetyper. I henhold til NGF (2010) er det tre posisjoner som er standardiserte for identifisering av poretrykk. Disse er vist i Figur 4.



Figur 4: Identifisering av poretrykk (NGF, 2010).

På Novasonden som er benyttet i dette studiet er det én poretrykksmåler, plassert mellom spissen og friksjonshylsen, slik som vist i Figur 3. Dette tilsvarer poretrykket  $u_2$  – poretrykk målt umiddelbart bak den koniske delen. Målt poretrykk består av in-situ poretrykk,  $u_0$ , og tilleggsporetrykket forårsaket av penetreringen.

### 3.3 UTLEDEDE PARAMETERER

På sonder med spalte til poretrykksmålert i bakkant av spissen vil den målte spissmotstanden bli påvirket av det allsidige vanntrykket, siden det også virker på spissen. Dermed må spissmotstanden korrigeres ettersom hvor stort areal poretrykket virker i bakkant av spissen. Uttrykket for korreksjonen blir dermed som vist i likning 3.3.

$$q_t = q_c + (1 - a)u_2 \quad (3.3)$$

hvor

$$a = \frac{A_n}{A_c}$$

$A_n$  = Areal av lastcelle eller stamme

$A_c$  = Projisert areal av sonden

Det er flere standardiserte parametere som benyttes i forskjellige sammenhenger for tolkning fra CPTU. Viktige parametere i dette studiet er  $q_n$ ,  $B_q$ ,  $R_f$  og  $N_m$ .

Netto spissmotstand,  $q_n$  er differansen mellom korrigert spissmotstand og teoretisk overlagingstrykk.

$$q_n = q_t - \sigma_{v0} \quad (3.4)$$

Poretrykkparameteren  $B_q$  baseres på poreovertrykket som forårsakes av penetrering i løsmassene. Denne gjøres dimensjonsløs ved å dividere på netto spissmotstand.

$$B_q = \frac{\Delta u_2}{q_n} \quad (3.5)$$

hvor

$$\Delta u_2 = u_2 - u_0$$

Friksjonsforholdet  $R_f$  er et forholdstall mellom målt sidefriksjon og korrigert spissmotstand.

$$R_f = \frac{f_s}{q_t} \quad (3.6)$$

Spissmotstandstallet  $N_m$  er en dimensjonsløs parameter som i all hovedsak blir benyttet til tolkning av effektivspenningsparametere. Parameteren baseres på netto spissmotstand,  $q_n$ , og er gjort dimensjonsløs ved å dividere på effektivt overlagingstrykk og attraksjon. I dette studiet er en attraksjon på 15 kPa valgt som en representativ verdi for norske leirer.

$$N_m = \frac{q_n}{\sigma'_{vo} + a} \quad (3.7)$$

## 3.4 KVALITETSSIKRING AV CPTU-FORSØK

### 3.4.1 Korrigering av dybdenivå

I tillegg til spissmotstand, sidefriksjon og poretrykk kan det også måles temperatur og inklinasjon av sonden. Dette for å kunne kvalitetssikre målingene og for å kunne korrigere målingene til riktig dybde. Korrigering til riktig dybdenivå gjøres enkelt ved å akkumulere korrigert dybdeøkning, slik som vist i likning 3.8.

$$d = d_0 + \sum_{n=1}^i \Delta d_n \cdot \cos \alpha \quad (3.8)$$

*hvor*

$d_0$  = *forboret dybde*

$\Delta d_n$  = *dybdeøkning per måling*

$\alpha$  = *målt inklinasjon av sonden*

### 3.4.2 Anvendelsesklasser

CPTU-forsøk kategoriseres i anvendelsesklasser ut i fra krav til minimumsnøyaktighet. Disse kravene er gjengitt i Tabell 1 (NGF, 2010). Nøyaktigheten for spissmotstand, sidefriksjon og poretrykk beregnes ut fra nullpunktavlesninger før og etter sondering, nøyaktighet for gitt oppløsning og en maksimal temperatureffekt. Nøyaktighet for oppløsning og maksimal temperatureffekt beregnes ut fra kalibreringsverdier. Samlet nøyaktighet kontrolleres mot gitte krav, og anvendelsesklasse kan bestemmes. Samlet nøyaktighet kan uttrykkes slik:

$$\Delta_{TOT} = \Delta N + \Delta R + \Delta T \cdot \frac{TE_{maks}}{TO} \quad (3.9)$$

*hvor:*

$\Delta N$  = *Avvik fra nullpunktkontroll*

$\Delta R$  = *Oppløsningsavvik*

$\Delta T$  = *Temperaturendring*

$TE_{maks}$  = *Maksimum temperatureffekt, ubelastet*

$TO$  = *Temperaturområde*

Nøyaktigheten for helning kan kontrolleres mot en fast vertikalakse før og etter sondering. Denne kontrollen blir ofte neglisjert i praksis. Under utførelsen er det et krav til en maksimum helning på 15 ° fra vertikalaksen. Dersom helningen overskrider dette, skal forsøket avbrytes.

Kravet til minimumsnøyaktighet for nedtrengingslengde kontrolleres mot en kontrollskriver på boreriggen.

**Tabell 1:** *Krav til anvendelsesklasser for CPT/CPTU (NGF, 2010).*

Anvendelsesklasse	Forsøkstype	Målestørrelse	Tillatt minimumsnøyaktighet	Maksimum avstand mellom målinger
1	CPT	Spissmotstand	35 kPa eller 5%	20 mm
	CPTU	Sidefriksjon	5 kPa eller 10%	
		Poretrykk	10 kPa eller 2%	
		Helning	2°	
	Nedtrengingslengde	0.1 m eller 1%		
2	CPT	Spissmotstand	100 kPa eller 5%	20 mm
	CPTU	Sidefriksjon	15 kPa eller 15%	
		Poretrykk	25 kPa eller 3%	
		Helning	2°	
	Nedtrengingslengde	0.1 m eller 1%		
3	CPT	Spissmotstand	200 kPa eller 5%	50 mm
	CPTU	Sidefriksjon	25 kPa eller 15%	
		Poretrykk	50 kPa eller 5%	
		Helning	5°	
	Nedtrengingslengde	0.2 m eller 2%		
4	CPT	Spissmotstand	500 kPa eller 5%	50 mm
		Sidefriksjon	50 kPa eller 20%	
		Nedtrengingslengde	0.2 m eller 2%	

### 3.4.3 Geometriske krav til sonden

Over tid slites CPTU-sonden slik at målingene etter hvert blir påvirket av dette. Derfor stilles det krav til dens geometri for å eliminere dette som en feilkilde. Kravene for spissgeometrien er vist grafisk i Figur 5 (NGF, 2010).

Krav til diameter på den sylindriske delen av spissen:

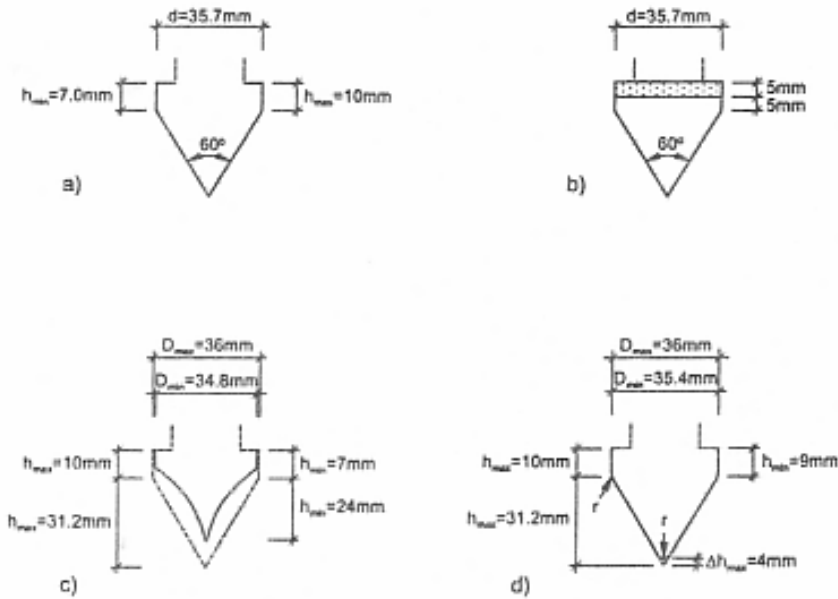
$$35,3 \text{ mm} \leq d_c \leq 36,0 \text{ mm}$$

Krav til lengde av den sylindriske delen av spissen:

$$7,0 \text{ mm} \leq h_e \leq 10 \text{ mm}$$

Krav til høyden på den koniske delen av spissen:

$$24,0 \text{ mm} \leq h_c \leq 31,2 \text{ mm}$$



Figur 5: Toleransekrav for en trykksonde (NGF, 2010).

Krav til diameter av friksjonshylsen:

$$d_c \leq d_2 < d_c + 0,35 \text{ mm}$$

og

$$d_2 < 36,1 \text{ mm}$$

Krav til lengden av friksjonshylsen:

$$132,5 \text{ mm} < l_s \leq 135,0 \text{ mm}$$

Krav til diameter på filterelement  $u_2$ :

$$d_2 - 0,02 \text{ mm} \leq d_{\text{filter}} \leq d_2$$

$$d_c \leq d_{\text{filter}} \leq d_c + 0,02 \text{ mm}$$

det vil si:

$$d_{\text{friksjonshylse}} \geq d_{\text{filter}} \geq d_{\text{kon}}$$

### 3.5 EMPIRISKE KORRELASJONER FRA CPTU

Ut fra de målte CPTU-parametrene har det blitt utviklet flere empiriske korrelasjoner for bestemmelse ulike materialparametere. Karlsrud et al. (2005) gjorde et slikt studie for å finne nye korrelasjoner fra CPTU til udrenert skjærfasthet og overkonsolideringsgrad for bløte til middels faste leirer. Korrelasjonene ble gjort mot aktive treaksialforsøk og ødometerforsøk fra blokkprøver av god kvalitet.



Prøvematerialet ble tatt fra 17 forskjellige steder, hvorav 16 var i Norge. Leira hadde varierende plastisitet fra 10 til 50 % og sensitivitet fra 3 til ca. 200.

### 3.5.1 Udrenert skjærfasthet

Karlsrud et al. (2005) tok utgangspunkt i eksisterende metoder for korrelasjoner mellom udrenert skjærfasthet og målte parametere. Dette er metoder basert på konfaktorer for poreovertrykk, netto spissmotstand og effektiv spissmotstand (Lunne et al., 1997). Metodene er vist under.

Udrenert skjærfasthet basert på poreovertrykk:

$$c_{uA} = \frac{u_2 - u_0}{N_{\Delta u}} \quad (3.10)$$

hvor:

$N_{\Delta u}$  = konfaktor basert på poreovertrykk

Udrenert skjærfasthet basert på netto spissmotstand:

$$c_{uA} = \frac{q_n}{N_{kt}} \quad (3.11)$$

hvor:

$N_{kt}$  = konfaktor basert på netto spissmotstand

Udrenert skjærfasthet basert på effektiv spissmotstand.

$$c_{uA} = \frac{q_t - u_2}{N_{ke}} \quad (3.12)$$

hvor:

$N_{ke}$  = konfaktor basert på effektiv spissmotstand

For å finne korrelasjoner til konfaktorer ble det tatt i betraktning overkonsolideringsgrad, sensitivitet og plastisitet. Resultatet ble konfaktorer gruppert for sensitivitet større og mindre enn 15. Følgende konfaktorer ble foreslått for leire med sensitivitet større enn 15:

$$N_{\Delta u} = 9,8 - 4,5 \log OCR \quad (3.13)$$

$$N_{kt} = 8,5 + 2,5 \log OCR \quad (3.14)$$

$$N_{ke} = 12,5 - 11,0 B_q, N_{ke} > 2,0 \quad (3.15)$$

Konfaktorer for leire med sensitivitet mindre enn 15:

$$N_{\Delta u} = 6,9 - 4,0 \log OCR + 0,07I_p \quad (3.16)$$

$$N_{kt} = 7,8 + 2,5 \log OCR + 0,082I_p \quad (3.17)$$

$$N_{ke} = 11,5 - 9,05B_q, N_{ke} > 2,0 \quad (3.18)$$

De målte parameterne fra CPTU-sonderinger har sine styrker og svakheter i de ulike jordartene. I dette studiet ble det konkludert med at målt poretrykk gir den beste og mest konsistente korrelasjonen for udrenert skjærfasthet i bløte til middels faste leirer.

### 3.5.2 Overkonsolideringsgrad

Overkonsolideringsgraden kan finnes av den udrenerte skjærfastheten etter følgende uttrykk (Sandven, 2010):

$$OCR = \frac{1}{\sigma'_{v0}} \left( \frac{c_{uA}}{\alpha} - a \right) \quad (3.19)$$

hvor:

$\sigma'_{v0}$  = effektivt overlagingstrykk

$$\alpha \approx \frac{\sin \varphi}{2}, \alpha \in [0,22, 0,30]$$

$a$  = attraksjon

Karlsrud et al. (2005) gjorde også forsøk på å finne andre korrelasjoner for overkonsolideringsgraden. Her var ikke korrelasjonene like gode, og spredningen mellom datapunktene relativt sett større. Den beste korrelasjon som ble funnet for leire med sensitivitet over 15 er vist under.

$$OCR = \left( \frac{Q_t}{2} \right)^{1,11} \quad (3.20)$$

hvor:

$$Q_t = \frac{q_t - \sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}}$$

Korrelasjon for leire med sensitivitet mindre enn 15:

$$OCR = \left( \frac{Q_t}{3} \right)^{1,20} \quad (3.21)$$

### 3.5.3 Sensitivitet

Korrelasjoner for sensitiviteten i leire fra CPTU-sonderinger er blitt foreslått av flere opp igjennom historien. Den målte hylsefriksjonen er avhengig av den omrørte skjærfastheten, og sensitiviteten har derav blitt foreslått som en funksjon av friksjonsforholdet  $R_f$  ved følgende formel.

$$S_t = \frac{N_s}{R_f} \quad (3.22)$$

*hvor  $N_s$  er en konstant*

Lunne et al. (1997) presenterte et forslag for konstanten  $N_s$ , med en gjennomsnittsverdi på 7,5 som utgangspunkt, og et sannsynlig spekter på 6 – 9. Det ble videre kommentert at denne korrelasjonen ikke kunne forventes å stemme for alle leirer, siden det vil avhenge av mineralogi, OCR og andre faktorer.

## 3.6 R-CPTU

Resistivetsmålinger i forbindelse med geotekniske undersøkelser er en metode som stadig tas mer i bruk. Det er i hovedsak to metoder som benyttes, ERT overflatemålinger som gir 2D resistivetsprofiler og R-CPTU som gir et mer nøyaktig én-dimensjonalt profil. I dette studiet er R-CPTU tatt med som et ekstra holdepunkt for tolkning av kvikkleire.

### 3.6.1 Resistivitet

Jordas elektriske resistivitet,  $\rho$ , er en materialegenskap som forteller hvor stor motstand et materiale har for elektrisk strøm. Fra Ohms lov har vi:

$$R = \frac{U}{I} \quad [\Omega] \quad (3.23)$$

*hvor:*

*$R$  = Elektrisk motstand*

*$U$  = Spenning*

*$I$  = Strøm*

Den elektriske motstanden avhenger med lengden og tverrsnittsarealet av det medium strømmen passerer gjennom mellom to elektroder. Resistiviteten er så definert som:

$$\rho = R \cdot \frac{A}{L} \quad [\Omega m] \quad (3.24)$$

*hvor*

*$A$  = tverrsnittsareal*

*$L$  = lengde*

Konduktivitet er en annen betegnelse som benyttes i forbindelse med resistivitetsmålinger. Den betegner ledningsevnen til et materiale, og er den inverse av resistiviteten. Dens SI-enhet er mS/m (milliSiemens/meter).

For å kunne beregne resistiviteten i jord må man gjøre følgende antakelser (Lunne et al., 1997):

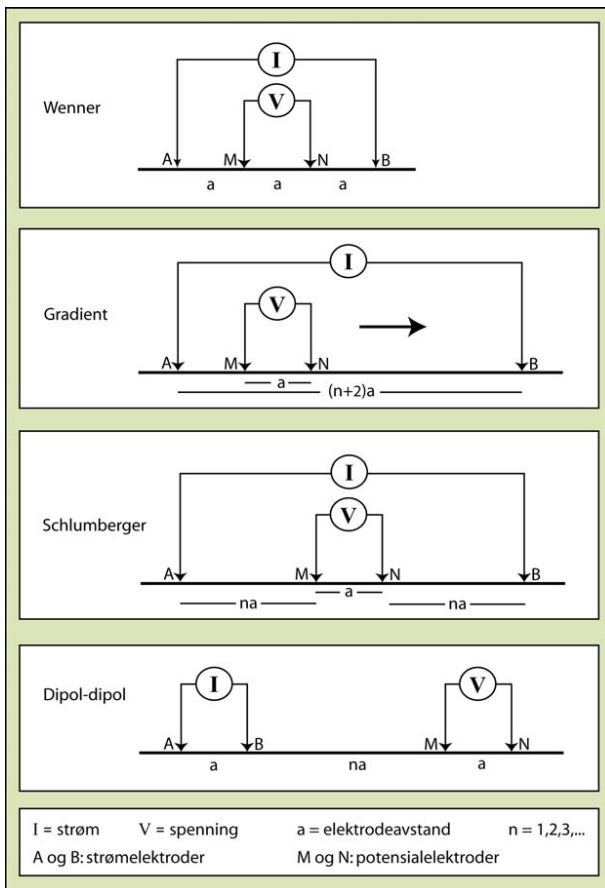
- Jorda oppfører seg som et homogent, isotropt materiale
- Elektrodene fungerer som perfekte ledere
- Resistivetsmodulens strømkrets oppfører seg som en perfekt strømforsyning
- Forholdstallet  $A/L$  er konstant

Med antakelsen  $K = A/L$  får man:

$$\rho = R \cdot \frac{A}{L} = R \cdot K = K \cdot \frac{U}{I} \quad (3.25)$$

Konstanten  $K$  påvirkes av elektrodernes geometri og konfigurasjon. For en bestemt sonde kan man bestemme denne konstanten ved å senke den ned i en væske med kjent resistivitet. Med bestemt konstant kan man senere bestemme resistiviteten ved måling av potensialdifferanse (spenning) ved en påsatt strømintensitet.

Det er utviklet en rekke forskjellige elektrodekonfigurasjoner. Disse baserer seg på to elektrodepar, hvor det påsettes strøm mellom ett par og det måles potensialdifferanse mellom det andre paret. Elektrodeparene er også kjent som henholdsvis strømelektroder og potensialelektroder. De forskjellige konfigurasjonene har ulike egenskaper, slik at valg av konfigurasjon må vurderes for hvilke egenskaper en er ute etter. Kort avstand mellom elektrodene gir bedre følsomhet for oppdagelse av tynne lag med ulik resistivitet. Større avstand gir større penetrasjon av det elektriske feltet inn i uforstyrret jord, og dermed en bedre bestemmelse av resistiviteten. Konfigurasjonen påvirker også signalstyrke og dermed påvirkning av bakgrunnsstøy. Noen vanlige konfigurasjoner er vist i Figur 6.



Figur 6: Prinsippkisser over et utvalg elektrodekonfigurasjoner (Solberg et al., 2011).

### 3.6.2 Prosjektutstyr

Resistivitetsadapteret som er brukt i grunnundersøkelsene for denne oppgaven er levert av GeoTech BA (Figur 7). Sonden er utstyrt med fire ringelektroder med en Wenner-Alpha-konfigurasjon, senteravstand  $a = 3,5$  cm.

Diameteren av resistivitetssonden er 44 mm, noe som er en del tykkere enn CPTU-sonden. Teoretisk vil sonden da fungere som en rømmer og redusere friksjonen på borstenger, gitt at borstengene har mindre diameter.



Figur 7: Novasonde med påmontert konduktivitetsadapter (GeoTech, 2014a).

De tekniske egenskapene for sonden er gjengitt i Tabell 2, hentet fra GeoTechs datablad (GeoTech, 2014a).

**Tabell 2:** Tekniske spesifikasjoner for resistivitetssonde (GeoTech, 2014a).

<b>Måleintervall</b>	0,1 – 5 000 mS/m (millisiemens per meter) 0,5 – 10 000 $\Omega$ /m
<b>Tverrsnittsareal</b>	15 cm <sup>2</sup>
<b>Total lengde</b>	500 mm
<b>Vekt</b>	3,5 kg
<b>Strømforsyning</b>	4 alkaliske batterier, type C

### 3.6.3 Tidligere forskning og erfaringer

Resistivetsmodul på en CPT-sonde ble første gang introdusert i 1981 (Kroezen, 1981). Den gang var tanken å måle densiteten til sand in-situ. Men etter hvert har studier fokusert mer på bruk av resistivetsmålinger som tolkningsgrunnlag for lagdeling av løsmasser. Flere studier er også blitt gjort i Norge, spesielt på kvikkleire, deriblant av Solberg et al. (2008) og Rømoen et al. (2010). Flere masteroppgaver de siste årene viser aktualiteten for temaet (Ottesen, 2009, Aasland, 2010, Montafia, 2013, Tilahun, 2013).

De tidligere studiene har blitt utført på forskjellige lokasjoner i Norge, og det har blitt foreslått ulike resistivetsintervaller for tolkning av kvikkleire. Det kommenteres at klassifiseringsintervallene har gradvis overgang og at det kan være lokale variasjoner avhengig av for eksempel porevannskjemi, metningsgrad og mineralsammensetning. NGUs veileder for bruk av resistivetsmålinger i potensielle kvikkleireområder (Solberg et al., 2011) gir et utgangspunkt for tolkning (Tabell 3). Her settes intervallet for potensiell kvikkleire til 10 – 100  $\Omega$ m. Usikkerheten Studiet av Rømoen et al. (2010) viste resistivetsmålinger ned mot 5  $\Omega$ m for kvikkleire, men også opp til 20  $\Omega$ m for saltholdig leire.

**Tabell 3:** Utgangspunkt for klassifisering fra resistivetsverdier (Solberg et al., 2011).

<b>Intervall</b>	<b>Jordart</b>
1 – 10 $\Omega$ m	Saltholdig leire
10 – 100 $\Omega$ m	Potensiell kvikkleire
> 100 $\Omega$ m	Tørrskorpeleire, grovere masser

Et viktig poeng er at også andre jordarter overlapper disse intervallene. Et eksempel på dette er vist i Tabell 4. Her har Sandven og Montafia (2014) satt sammen en tabell med

typiske resistivitetsverdier i forskjellige jordarter basert på Berger (1983) og Solberg et al. (2012).

**Tabell 4:** Typiske resistivitetsverdier i forskjellige jordarter (Sandven og Montafia, 2014)

<b>Intervall</b>	<b>Jordart</b>
1 – 10 $\Omega\text{m}$	Saltholdig leire
10 – 100 $\Omega\text{m}$	Utvasket leire
70 – 300 $\Omega\text{m}$	Tørrskorpeleire
50 – 200 $\Omega\text{m}$	Mettet silt
200 – 1000 $\Omega\text{m}$	Mettet sand



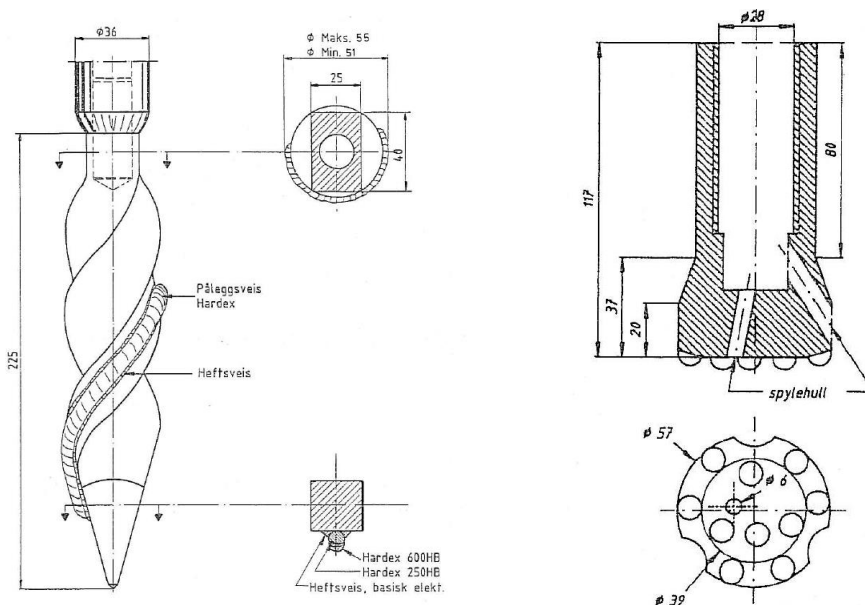


## 4 TOLKNING FOR KVIKKLEIRE FRA ULIKE SONDERINGSMETODER

### 4.1 DREIETRYKKSONDERING OG TOTALSONDERING

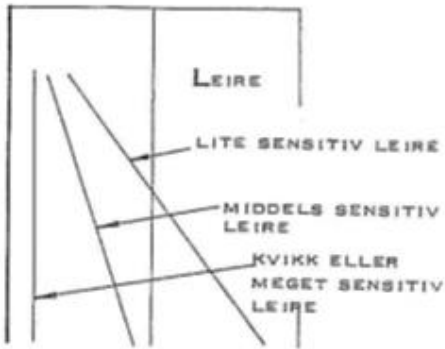
Dreietrykksondering og totalsondering er to av de mest brukte sonderingsmetodene i Norge i dag, og begge metodene baseres seg på å måle total sonderingsmotstand ved en konstant rotasjon på 25 omdreininger pr. min og penetrasjonshastighet på 3 m pr. min. Resultatene av sonderingsmotstanden gir da et bilde av den totale motstanden ved boringen, altså spissmotstand og friksjonen langs stangsystemet samlet.

Dreietrykksonderingen utføres med en vridd spiss og med borstenger á 36 mm diameter, mens totalsondering utføres med en borkrone og med borstenger á 45 mm diameter. Figur 8 viser spissgeometrien for begge metodene.



**Figur 8:** Spiss for dreietrykksondering (venstre) og Totalsondering (NGF, 1989, NGF, 1994)

For begge metodene plottes matekraftskurven mot dybden, og denne kurven benyttes til tolkning av masser det sonderes igjennom. Tolkningene baserer seg på erfaringer, og for kvikkleiretolkning er praksisen at man ser etter tilnærmet vertikale eller negative helninger på motstandskurven. Et grunnlag for materialtolkning av leire er vist i Figur 9 (NGF (1989) basert på Rygg (1978)).



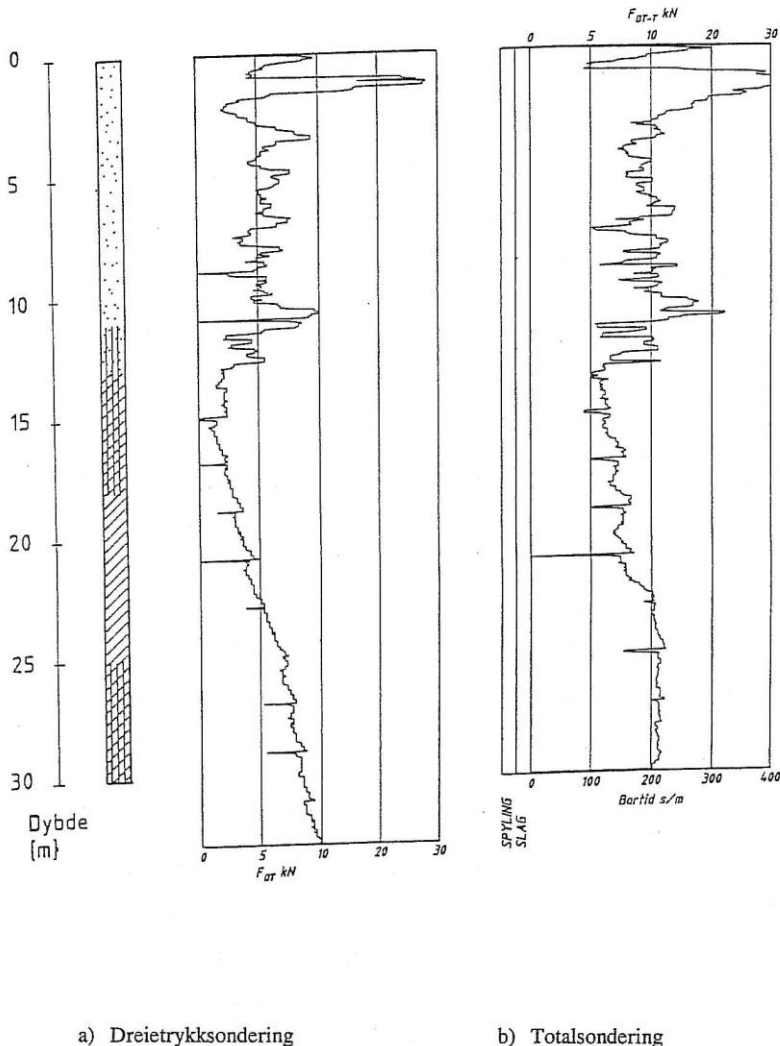
Figur 9: Grunnlag for materialtolkning ved dreietrykksondering (NGF, 1989).

Det er fordeler og ulemper med begge sonderingsmetodene. For eksempel gir dreietrykksonderingen mindre motstand ved sondering. Dette skyldes blant annet effekten dreietrykkspissen skaper ved å bli skrudd ned, samt en mindre diameter på borstengene som gir mindre friksjonsareal. En fordel med totalsondering er at det også er mulig å benytte spyling og slag. Dette gjør det mulig å komme gjennom fastere masser, og i tillegg gir det mulighet for fjellkontrollboring.

Forskjellen mellom matekraftutslaget på de to metodene varierer for de ulike materialene det sonderes i. Tabell 5 viser orienterende korrelasjonsfaktorer for matekraftutslag for de to metodene. Matekraftutslaget på utstyret påvirker i mindre grad selve formen på kurvene. Altså ser man de samme tendensene, men i andre skalaer. Et eksempel er vist grafisk ved en parallellboring i Figur 10 (NGF, 1994).

Tabell 5: Orienterende faktorer for matekraftutslag (NGF, 1994).

Materiale	$F_{totalsondering}$
	$F_{dreietrykksondering}$
Siltig leire/leirig silt	1 – 1,5
Kvikkleire	1 – 1,5
Leire, middels fast, lite sensitiv	1 – 1,5
Meget fast leire	3 – 5
Ensgradert sand, grusig sand	2 – 3

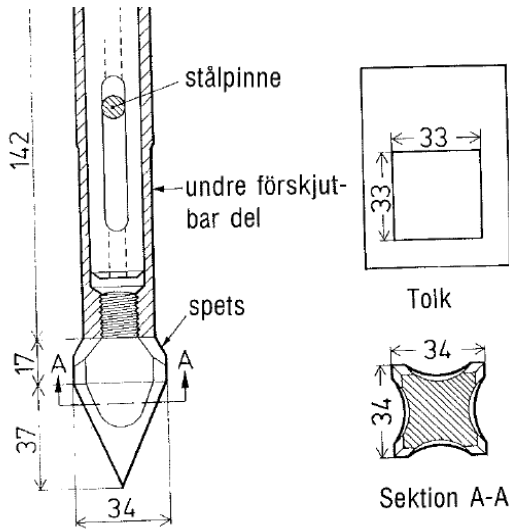


Figur 10: Parallellboring av dreietrykkssondering og totalsondering (NGF, 1994).

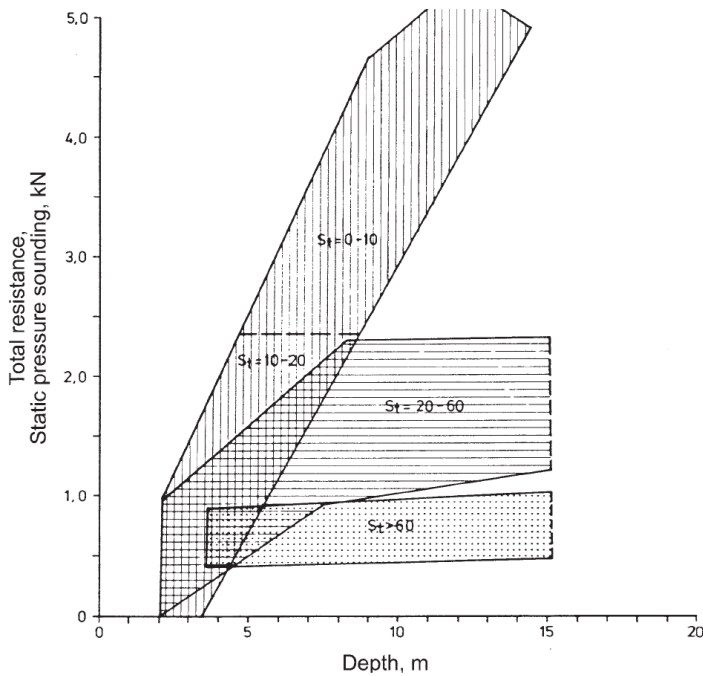
## 4.2 KORRELASJONER MELLOM SONDERINGSMOTSTAND OG SENSITIVITET

Tidligere studier har sett på korrelasjoner mellom sonderingsmotstand og sensitivitet, deriblant Möller og Bergdahl (1982) og Rygg (1978). Her ble korrelasjonene basert på totaltrykkssonderinger. Dette er en svensk metode utviklet på 1950-tallet hvor sonderingsmotstand måles ved at en pyramideformet spiss med projisert tverrsnittareal på 1000 mm<sup>2</sup> blir presset ned med konstant hastighet. Spissens geometri er vist i Figur 11. Borstengene som benyttes skal ha en diameter på 22 eller 25 mm diameter (Bergdahl, 1984). Möller og Bergdahl (1982) foreslo omtrentlige tolkningsdiagrammer for sensitivitet fra sonderingsmotstand med totaltrykkssondering,

som vist i Figur 12. Det ble også uttalt at dersom kurven har en helning brattere enn en økning tilsvarende 0,07 kN/m, er det sannsynlig at leira er meget sensitiv eller kvikk.



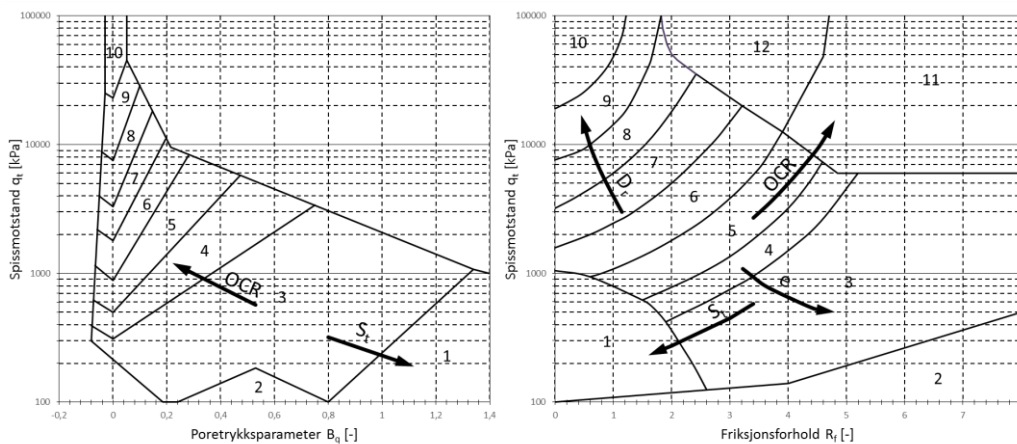
Figur 11: Spiss for totaltrykksondering (Bergdahl, 1984).



Figur 12: Tolkingsdiagrammer for sensitivitet fra sonderinger (Möller og Bergdahl, 1982).

### 4.3 JORDARTSKLASSIFISERING

Det er blitt utviklet flere typer klassifiseringsdiagrammer for identifisering av jordarter. Noen av de bedre ble utviklet av Robertson et al. (1986), som er diagrammer basert på korrigert spissmotstand  $q_t$ , poretrykkparameteren  $B_q$  og friksjonstallet  $R_f$ . I Figur 13 er diagrammene gjengitt. Her er det angitt soner for ulike typer jordarter, basert på store mengder erfaringsdata. Diagrammene kan gi en god pekepinn på hvilke materialer man sonderer gjennom, men er likevel kun ment for å være veiledende, siden klassifiseringsparameterne kan påvirkes mye av lokale variasjoner. For eksempel er  $B_q$  påvirket av blant annet forkonsolideringsgraden. Normalkonsolidert kvikkleire har gjerne en  $B_q$  mellom 1 – 1,5, mens overkonsolidert leire kan ha  $B_q$ -verdier mellom 0,6 – 0,9. Dette skyldes at poretrykket ikke vil ha så store bidrag fra skjærspenningsinduserte poretrykk som man får i normalkonsoliderte leirer (Sandven, 1990). Friksjonsforholdet  $R_f$  har også en stor usikkerhet i seg. Dette fordi den målte friksjonen på friksjonshylsa har en dårlig nøyaktighet,  $\pm 2$  kPa på de fleste nøyaktige CPT-sondene (Rankka et al., 2004).



**Zone: Soil Behaviour Type:**

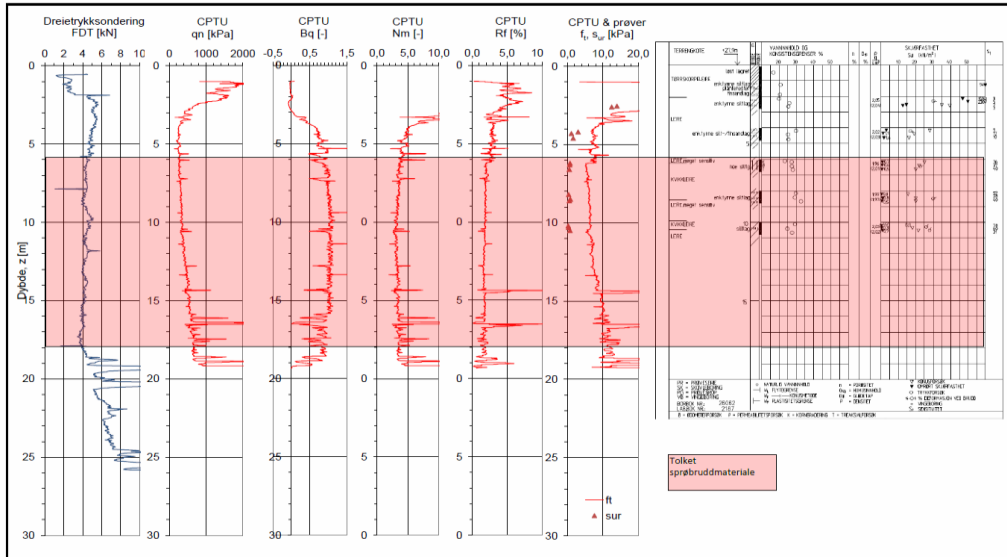
1	Sensitive fine grained	5	Clayey silt to silty clay	9	sand
2	Organic material	6	Sandy silt to clayey silt	10	gravelly sand to sand
3	Clay	7	Silty sand to sandy silt	11	very stiff fine grained (*)
4	Silty clay to clay	8	sand to silty sand	12	sand to clayey sand (*)

(\*) overconsolidated or cemented

Figur 13: Klassifiseringsdiagram basert på Robertson et al. (1986).

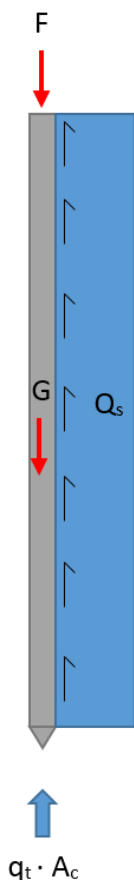
#### 4.4 SPISSMOTSTANDSTALLET, $N_m$

En mindre brukt metode for tolkning av kvikkleire er spissmotstandstallet  $N_m$ . Spissmotstandstallet beregnes som vist i likning (3.7). Plott av  $N_m$ -kurver mot dybde har vist en tilsvarende tendens som dreietrykksonderinger i områder med kvikkleire, altså tilnærmet vertikal helning (Sandven, 2014). Et eksempel er vist under.



Figur 14: Eksempel på tolkning fra  $N_m$  sammen med flere parametere (Sandven, 2013).

## 5 CPTU MED MÅLT TOTAL SONDERINGSMOTSTAND



### 5.1 TOLKNING AV TOTAL STANGFRIKSJON

Normalt måles ikke nedpressingskraften, det vil si total sonderingsmotstand, når det utføres CPTU-sonderinger. Derimot måles som kjent spissmotstanden, poretrykk og lokal sidefriksjon. Likevel kan nedpressingskraften ved CPTU-sonderinger måles relativt enkelt ved å gjøre små tiltak på borerigger som normalt også utfører blant annet dreietrykk- og totalsonderinger. Måling av nedpressingskraften vil da gjøre det mulig å utlede den totale stangfriksjonen langsmed stangsystemet. Dette gjøres enkelt ved å sette opp en kraftmodell som vist i Figur 15. Kraftmodellen er i prinsippet den samme som benyttes for peler. Den totale stangfriksjonen finnes så ved å addere nedpressingskraften med vekten av stangsystemet, for så å subtrahere kraftkomponenten fra den korrigerte spissmotstanden.

$$Q_s = F + G - Q_t \quad (5.1)$$

hvor:

$Q_s =$  Netto stangfriksjon

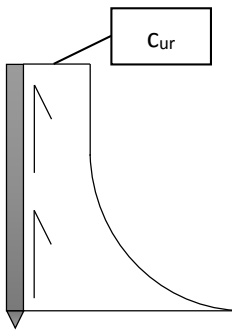
$F =$  Totalkraft

$G =$  Egenvekt av sonderingsutstyr

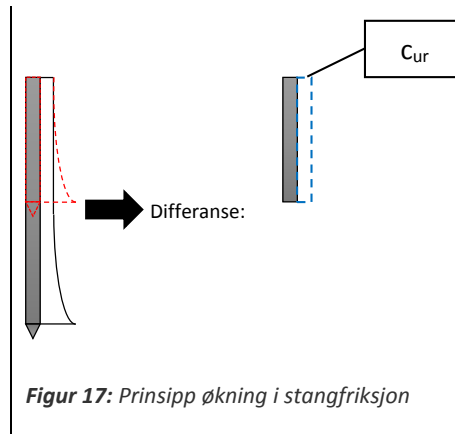
$Q_t = q_t \cdot A_c =$  Korrigert spissmotstand

**Figur 15:** Kraftmodell for CPTU med målt totalkraft

Etter hvert som stangsystemet penetreres ned i jorda, vil massene rundt bli gradvis mer omrørt. I teorien vil man omsider oppnå en friksjon tilsvarende den omrørte skjærfastheten. Prinsipielt kan det tenkes at friksjonsfordelingen har en form som vist i Figur 16. Dersom man da tar for seg et homogent felt kan det antas at denne fordelingen vil ha samme fasong fortløpende nedover borprofilet. Ser man så på økningen av den totale stangfriksjonen i et gitt intervall, vil denne endringen tilsvare en friksjonsøkning lik den omrørte skjærfastheten over dette intervallet. Figur 17 viser en skisse av dette prinsippet.



Figur 16: Teoretisk stangfriksjonsfordeling



Figur 17: Prinsipp økning i stangfriksjon

## 5.2 TIDLIGERE FORSKNING

Det er tidligere gjort noen få studier på metoden med tolkning av total stangfriksjon for CPTU-sonderinger. De mest kjente er hovedsakelig gjort i Sverige. Studiet «Quick clay in Sweden» av Statens Geotekniska Institut (SGI) (Rankka et al., 2004) omhandler blant annet hvilke metoder som finnes for å detektere kvikkleire. Her ble metoden CPTU med målt nedpressingskraft presentert og sammenliknet med tolkning fra andre sonderingsmetoder.

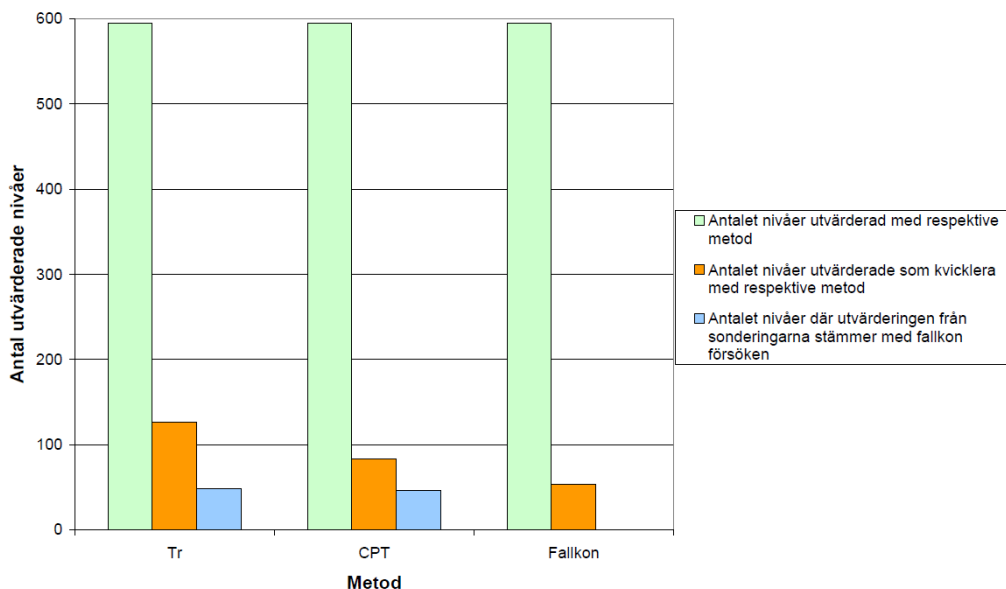
I hovedsak konkluderte Rankka et al. (2004) med at CPTU-sonderinger med målt nedpressingskraft er mer pålitelig enn andre sonderingsmetoder når det kommer til identifisering av kvikkleire. Men det ble påpekt at tid- og kostnadseffektiviteten for CPTU-sonderinger er betraktelig lavere enn for enklere sonderinger. Likevel gir CPTU-sonderinger som kjent muligheter for andre metoder for tolkning også, slik at en vurdering av kost-nytte vil være nødvendig for hvert formål.

Et annet studie om CPTU med målt nedpressingskraft ble gjort av Löfroth et al. (2011). Dette var også et studie gjennom SGI, og var en utredning av stabilitetsforholdene langs Göta älv. Det ble satt fokus på å få en mest mulig kostnadseffektiv undersøkelse, hvor tidligere geotekniske undersøkelser og nye 2D resistivetsprofiler ble brukt for at man bedre kunne planlegge videre grunnundersøkelser.

Löfroth (2011) utførte et forstudie til Göta älv-utredningen for å se nærmere på tolkning for kvikkleire fra sonderingsmotstand. I prosjektet skulle det i all hovedsak benyttes CPTU-sonderinger og totaltrykksondering. Resultatene fra studiet ble at nesten alle prøver som ble bestemt som kvikkleire fra konusforsøk, ble også vurdert som kvikkleire fra begge sonderingsmetodene. Men tolkningene førte også til en overestimering av hvor det faktisk var kvikkleire. Tolkningen fra totaltrykksonderingen viste her at over



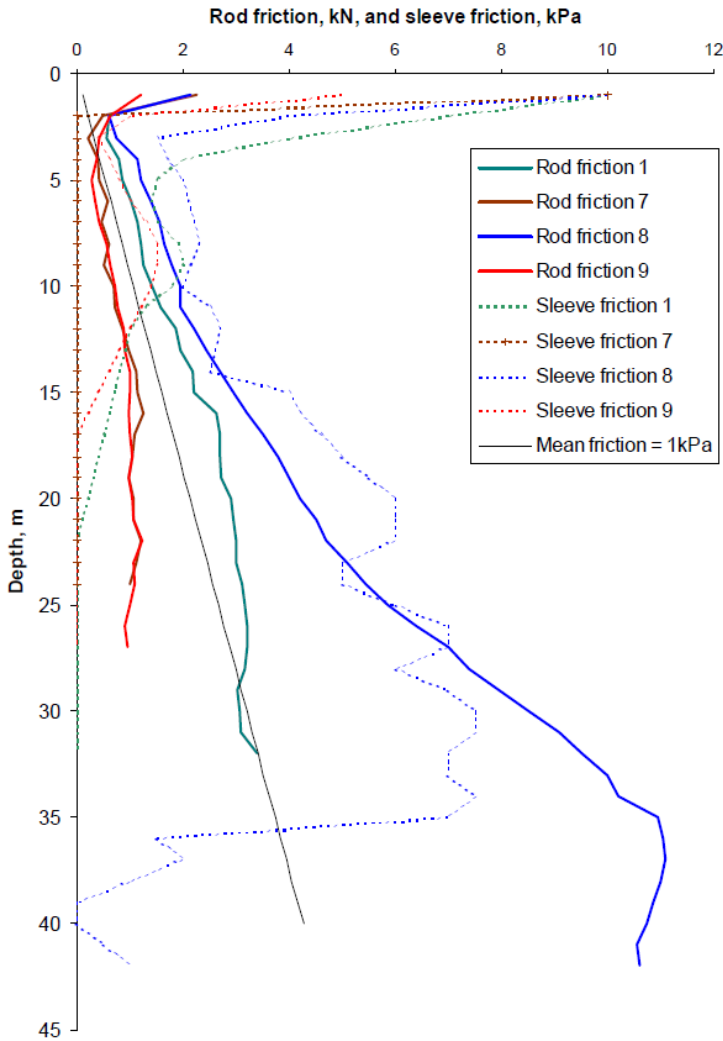
dobbelt så mange nivåer ble tolket som kvikkleire enn det som faktisk var tilfellet. Derimot hadde tolkningen fra CPTU-sonderingene en betraktelig bedre treffsikkerhet, noe som er vist i Figur 18.



Figur 18: Treffsikkerhet for CPT-stangfriksjon og totaltrykksondering (Löfroth, 2011).

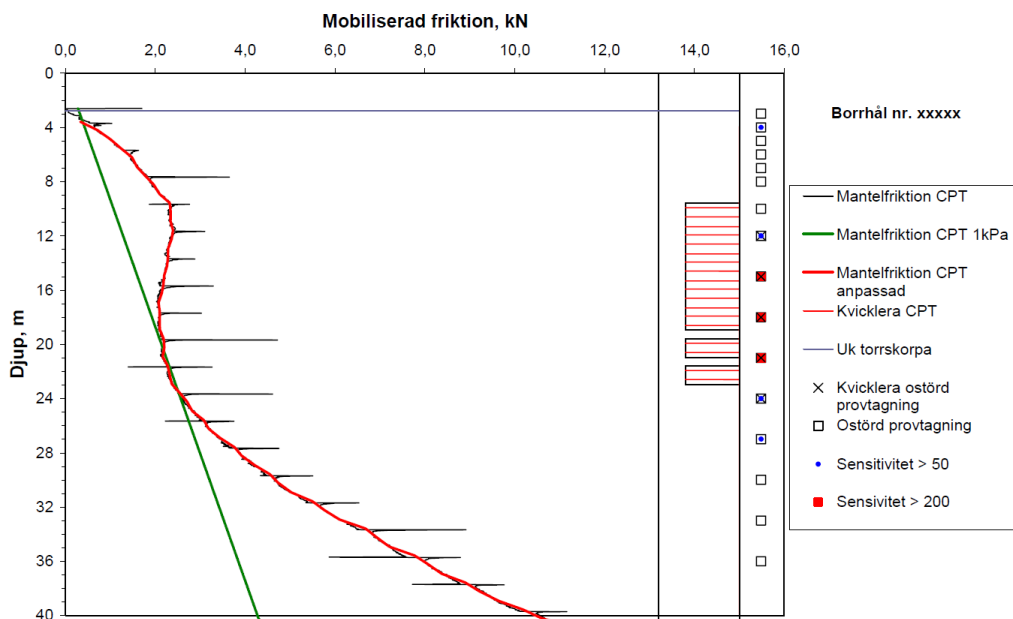
I de nevnte studiene av Rankka et al. (2004) og Löfroth et al. (2011) ble den totale stangfriksjonen tolket mot en referansefriksjon tilsvarende stangfriksjonsøkning på 1 kPa. Visuelt sett ble helningen av den totale stangfriksjonskurven sammenliknet mot helningen av kurven til referansefriksjonen. Det vil si, der hvor den totale stangfriksjonskurven hadde en brattere helning enn referansefriksjonskurven, indikerte det veldig sensitiv leire, og sannsynligvis kvikkleire. Figur 19 og Figur 20 viser stangfriksjonskurver fra de respektive studiene.

Definisjonen på kvikkleire i Sverige er udrenert skjærfasthet i omrørt tilstand mindre eller lik 0,4 kPa og en sensitivitet større eller lik 50. Valget om å sette referanselinjen til 1 kPa er ikke videre begrunnet i rapportene. Derimot ble det i løpet av begge rapportene referert til Möller og Bergdahl (1982) og deres konklusjon om en referanse på 0,7 kN/m for sensitivitetstolkning fra totaltrykksondering, slik som beskrevet i kapittel 4.2. Totaltrykksondering benytter borstenger med 25 mm diameter, og en økning på 0,7 kN/m vil da tilsvare ca. 1 kPa. Det er derfor rimelig å anta at de tidligere studiene har tatt utgangspunkt i dette.



Figur 19: Stangfriksjonskurve og (Rankka et al., 2004).

Löfroth (2011) ønsket å gjøre tolkning fra total stangfriksjon på en enkel og rasjonell måte. Det ble derfor utviklet et tolkningsprogram i Excel, et program som tolker input-parametere fra sonderingene direkte mot referansfriksjonen som er valgt. Resultatene av tolkningen blir så presentert som vist i Figur 20. Til venstre er stangfriksjonen presentert sammen med referanselinjen, og til høyre for kurvene er det skravert områder som tolkes som kvikkleire. Helt til høyre i diagrammet er det markert hvor det er utført konusforsøk og hvor disse viser kvikkleire, sensitivitet > 50 og sensitivitet > 200.

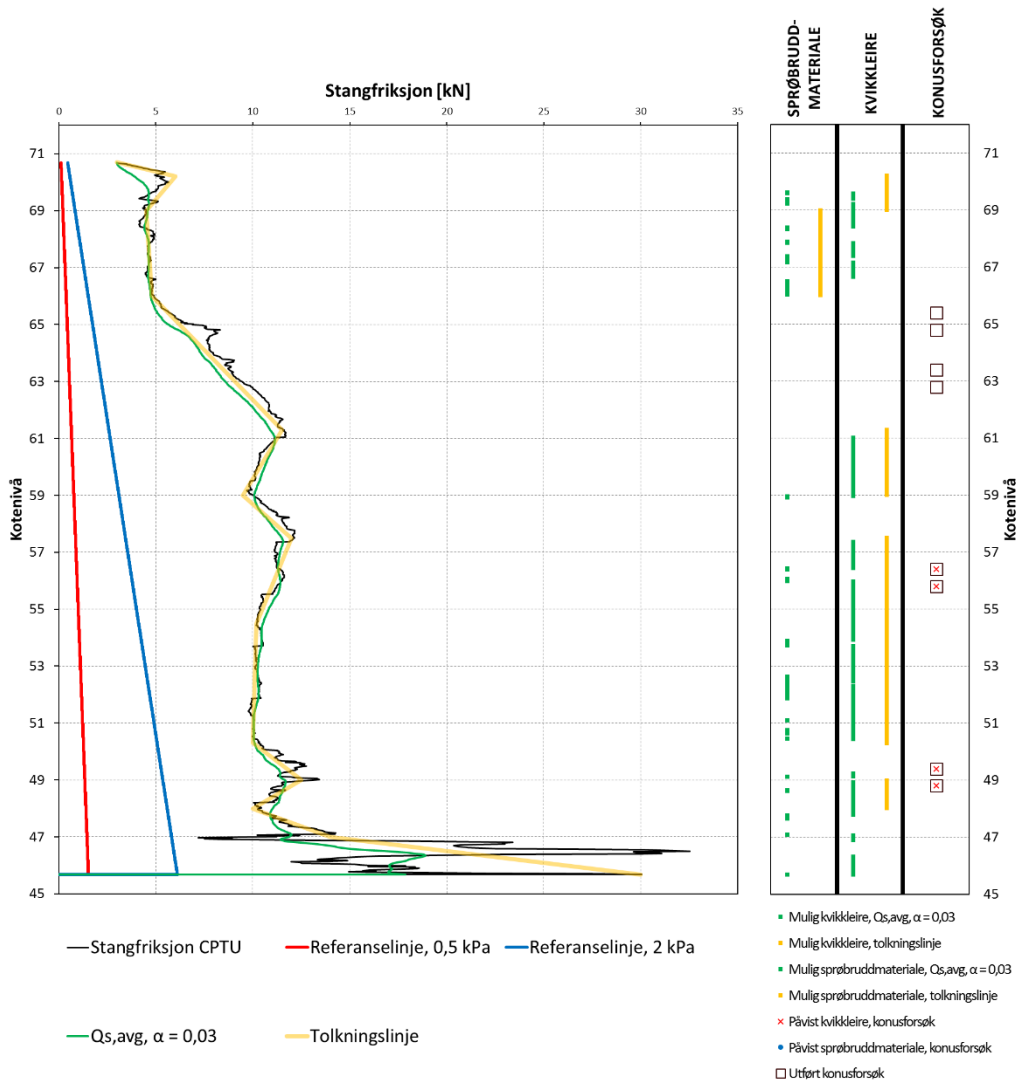


Figur 20: Kvikkleiretolkning for CPTU med totalkraft (Löfroth, 2011).

Et problem med direkte tolkning fra helningen på kurven for sonderingsmotstand er peak-verdier som oppstår. Dette skjer på grunn av tiksotropiske effekter og leiras rekonsolidering under sonderingsstopp ved stangbytter. Denne effekten kan også til en viss grad påvirke sonderingsmotstanden gjennom hele borprofilet. Nettopp derfor kommenterte Rankka et al. (2004) at borstengene minimum bør være 2 meter lange for å få gode data. For å unngå at peak-verdiene skal feiltolkes som kvikkleire, brukte Löfroth (2011) en gjennomsnittskurve hvor alle verdier utenfor et halvt standardavvik ble tatt bort. Likevel kunne mindre ujevnheter forekomme på kurven på grunn av tynne sjikt av grovere materialer. Det ble derfor kommentert at en ingeniørmessig bedømming av resultatene fortsatt var nødvendig.

### 5.3 UTVIKLET TOLKNINGSARK

Tolkningen fra total stangfriksjon i dette studiet baserer seg i hovedsak på metodene som ble brukt i Göta älv-utredningen (Löfroth, 2011). Det er også her et ønske om å gjøre tolkningene mest mulig rasjonelle, samt å få presentert resultatene på en god og oversiktlig måte. Et tilsvarende tolkningsark har blitt utviklet for direkte tolkning fra målte sonderingsverdier fra CPTU mot laboratedata. Det er i tillegg valgt å gjøre noen modifikasjoner. Figur 21 viser et eksempel av det utviklede tolkningsarket, med data fra Nidarvoll.



Figur 21: Stangfriksjonstolkning fra CPTU med totalkraft. Data fra Nidarvoll.

### 5.3.1 Referansefriksjon

Etter hvert som borstengene penetreres dypere antas det at økningen av stangfriksjonen vil gå mot den omrørte skjærfastheten til materialet, slik som vist i kapittel 1. Det er derfor valgt å gå bort fra en referansefriksjon på 1 kPa. Dessuten har de tidligere studiene vist at tolkning med referanse til 1 kPa gitt noe overestimering av kvikkleireforekomster. I Norge behandles sprøbruddmaterialer like strengt som kvikkleire. På bakgrunn av dette er det valgt å implementere tolkning både mot en referansefriksjon på 0,5 kPa for kvikkleire og 2,0 kPa for sprøbruddmaterialer. Tolkningene er markert i hver sin kolonne i tolkningsarket (Figur 21).

### 5.3.2 Kurveutjevning

For å unngå peak-verdier i tolkningskurven er det i dette studiet valgt å benytte glidende gjennomsnitt i stedet for en gjennomsnittskurve uten verdier over et halvt standardavvik. Glidende gjennomsnitt beregnes som vist i likning 5.2. Metoden benytter en utjevningsfaktor,  $\alpha$ , som velges fritt ettersom hvordan kurvetilpassing man ønsker. Jo større utjevningsfaktor man velger, jo nærmere havner utjevningsskurven de målte verdiene. Figur 22 viser prinsippet av en slik utjevning. En utjevningsfaktor for bruk til tolkning av stangfriksjon er typisk i størrelsesorden 0,01 – 0,3.

$$Q_{s_{avg}} = \alpha \cdot Q_s + (1 - \alpha)Q_{s_{avg}, t-1} \quad (5.2)$$

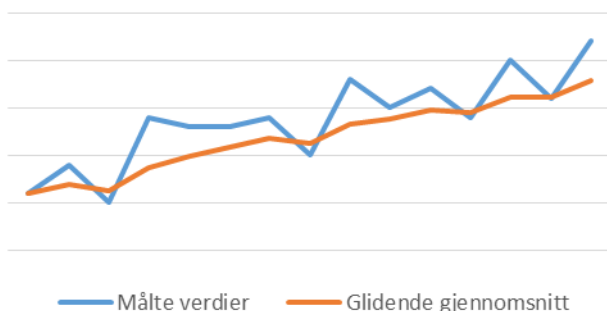
hvor:

$\alpha$  = utjevningsfaktor

$Q_s$  = målt verdi

$Q_{s_{avg}}$  = utjevnet verdi

$Q_{s_{avg}, t-1}$  = forrige utjevnet verdi



Figur 22: Prinsipp for glidende gjennomsnitt.

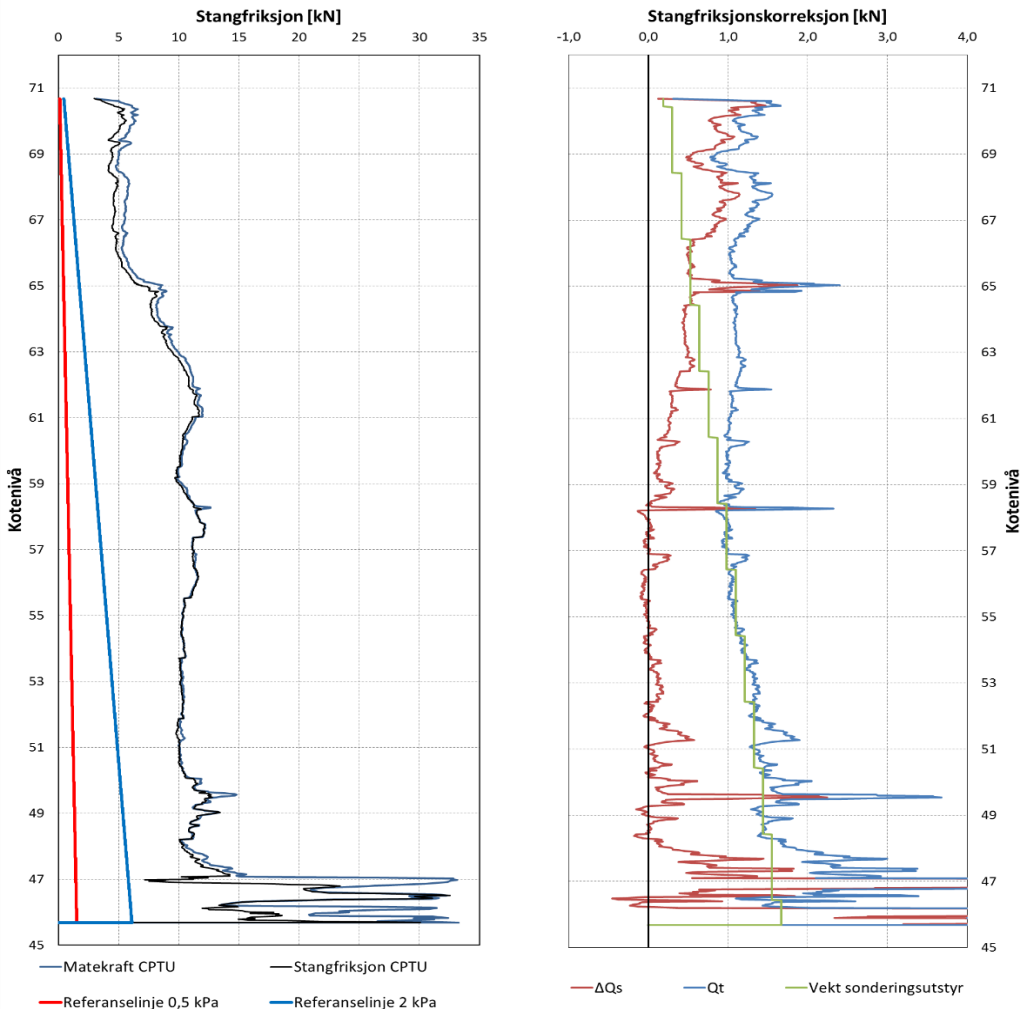
Helningen av den utjevnete kurven blir vurdert direkte mot referansefriksjonen i tolkningsarket. I eksempelet i Figur 21 er det skravert med grønt i områdene hvor denne kurven har en brattere helning enn referansefriksjonen. Den utjevnete kurven kan fremdeles gi feil utslag på tolkningen på grunn av ujevnheter. Det er derfor valgt å legge til en egen tolkningslinje som kan styres manuelt. Denne er markert gult i tolkningsarket.

### 5.3.3 Sonderingsstenger

Den totale stangfriksjonen avhenger som kjent av overflatearealet på sonderingsstengene. Normalt utføres CPTU-sonderinger med stenger som har 36 mm diameter, men blir ofte utført med totalsonderingsstenger dersom lastekapasiteten for borerigg eller fraktesbil er begrenset. Totalsonderingsstenger har en diameter på 45 mm, og det må dermed tas høyde for denne variasjonen i tolkningen. De forskjellige typene

sonderingsstenger har også ulik egenvekt og lengde, og vil derfor påvirke egenvektsbidraget som legges til den totale sonderingsmotstanden. Dette må også tas høyde for. Derfor er valg av sonderingsutstyr implementert i det utviklede tolkningsarket.

Som vist i kapittel 5.1 finnes den totale stangfriksjonen ved å addere vekten av sonderingsutstyret til matekraften for så subtrahere spissmotstanden. Ved utførelse presses stangsystemet ned fra toppen av øverste sonderingsstang, slik at for hver stang som kobles til, økes egenvekta med en konstant verdi tilsvarende egenvekta av borstanga. Dermed vil tillegget for egenvekt få en trappeform i et plott mot dybden, slik som vist i Figur 23. Dette er den grønne kurven i diagrammet til høyre.



Figur 23: Eksempel på utledning av total stangfriksjon (Nidarvoll).

## 5.4 VURDERING AV OMRØRINGSGRAD

Målingene som blir gjort ved friksjonshylsen vil sjelden være på materiale som er fullstendig omrørt. Derimot vil friksjonen langs stangsystemet etter hvert bli det. Med muligheten til å bestemme den totale stangfriksjonen fra CPTU-sonderinger, vil det være interessant å se på sammenhengen mellom den totale stangfriksjonen og friksjonen på hylsen. Ved å akkumulere hylsefriksjonen for hvert dybdeintervall vil man da teoretisk ende opp med en kraft som er større enn den totale stangfriksjonen. Spørsmålet er, hvor mye større? Tanken er at et forholdstall mellom den akkumulerte friksjonen og den total stangfriksjonen, kan gi et bilde på hvor mye energi som skal til for å gjøre et materiale fullstendig omrørt. I dette studiet tas det utgangspunkt i å bestemme dette forholdstallet på følgende måte.

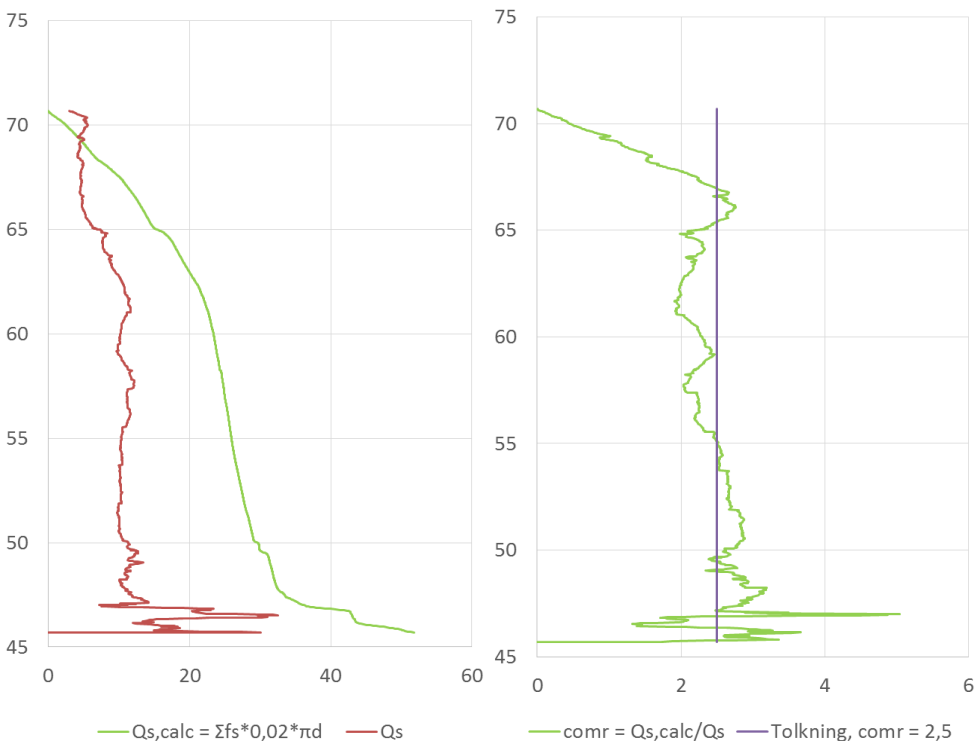
$$c_{omr} = \frac{Q_{s,calc}}{Q_s} \quad (5.3)$$

hvor:

$$Q_{s,calc} = \sum f_s \cdot \Delta z \cdot \pi \cdot d$$

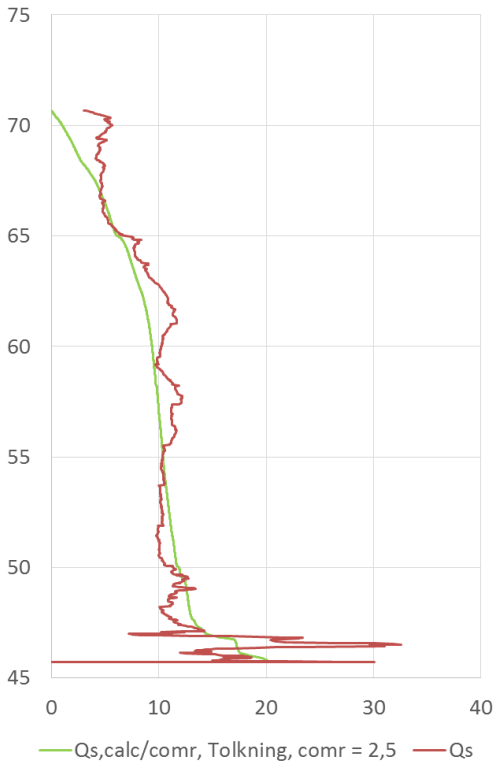
$\Delta z$  = dybdeøkning mellom hver måling

$d$  = stangdiameter



Figur 24: Tolkning for omrøringsgrad (Nidarvoll).

Til venstre i Figur 25 er den akkumulerte kraften fra friksjonshylsen vist sammen med den totale stangfriksjonen. Den grønne kurven til høyre er forholdstallet mellom verdiene i kurvene til venstre, altså det teoretiske forholdstallet  $c_{omr}$ . Man se at kurven til høyre har en tilnærmet konstant verdi etter en viss penetrasjon. Ut i fra denne verdien kan forholdstallet bestemmes. En kontrollberegning kan videre gjøres ved å dividere den akkumulerte kraften fra friksjonshylsen på forholdstallet  $c_{omr}$ . Man vil da få en tilnærming til den total stangfriksjonen, slik som vist i Figur 25.



**Figur 25:** Kontroll av tolkning for omrøringsgrad (Nidarvoll)

## 5.5 SENSITIVITET

Teorien om at økningen av den totale stangfriksjonen vil gå mot den omrørte skjærfastheten i et materiale, utløser et spørsmål om muligheten til å bestemme sensitiviteten av materialet. Ved å benytte forskjellige korrelasjoner for aktiv, udrenert skjærfasthet (Karlsrud et al., 2005), er det i dette studiet gjort forsøk på å bestemme sensitiviteten som vist i likning (5.4).



$$S_t = \frac{c_{uA} f(N_{\Delta u}/N_{kt}/N_{ke})}{c_{ur} f(\Delta Q_s)} \quad (5.4)$$

hvor:

$\Delta Q_s$  = økning i stangfriksjon

## 5.6 TOLKNINGSMETODERS PÅLITELIGHET

Det skal vurderes hvorvidt påliteligheten med tolkning fra CPTU-sonderinger med målt total sonderingsmotstand er bedre enn med andre sonderingsmetoder. For å gjøre dette på en god og oversiktlig måte er det valgt å presentere dette på samme måte som som Löfroth (2011) gjorde i Göta älv-utredningen. Ved å definere dybdeintervaller som kvikkleire og ikke kvikkleire basert på konusforsøk, kan tolkningsmetoders treffsikkerhet vurderes etter dette. Resultatene for hver tolkningsmetode kan da presenteres som:

- Hvor stort dybdeintervall som er vurdert
- Hvor stort dybdeintervall som er vurdert som kvikkleire
- Hvor stort dybdeintervall som er vurdert som kvikkleire og samtidig definert som kvikkleire fra konusforsøk.

Dette vil da gi et bilde på hvor godt hver metode treffer, og hvorvidt den overestimerer eller underestimerer.



## 6 UNDERSØKELSESTEDER OG OMFANG

I dette studiet er det brukt data fra tre undersøkelsessteder, alle i Trondheim kommune. Undersøkelsesstedene er Esp på Byneset, Nidarvoll og Ranheim Vestre. Områdene er vist i kartutsnittet under.



Figur 26: Oversiktskart undersøkelsessteder (norgeskart.no).

### 6.1 ESP, BYNESET

#### 6.1.1 Områdebeskrivelse

Natt til 1. januar 2012 gikk det et kvikkleireskred ved Esp på Byneset utenfor Trondheim. Skredet ble trolig utløst som følge av erosjon i et bekkefar. Et skred som utviklet seg til å bli ca. 150 meter bredt og 450 meter langt. Utløpet av skredmassene endte på omtrent 870 m. Byneset er et område som er kjent for store forekomster av kvikkleire, og de siste 100 årene er det datert flere skred, også i nærheten av undersøkelsesstedet.

Det er sett på data fra ett punkt på Esp, beliggende på toppen av skredkanten sør-vest for skredgropen, se Figur 27. Kanten står trolig igjen på grunn av skredmassene som har kommet motstrøms fallretningen på skråningen. Undersøkelsespunktet er på en gjenstående del av en åker som har en slak helning retning sør/sør-vest, men generelt kan terrenget i området beskrives som kupert og mye preget av gamle skredkanter, raviner og bekkefar.



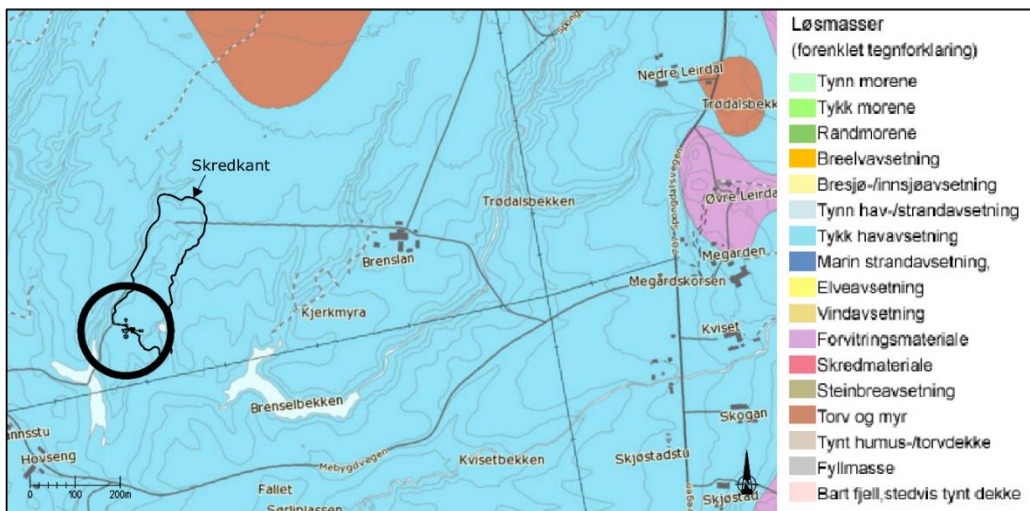
**Figur 27:** Flyfoto over skredområdet ved Esp. Undersøkelsespunkt markert (norgebilder.no).



**Figur 28:** Bilde av skredgrova på Esp, retning nord-øst (Foto: Olav Svegård, Rambøll).

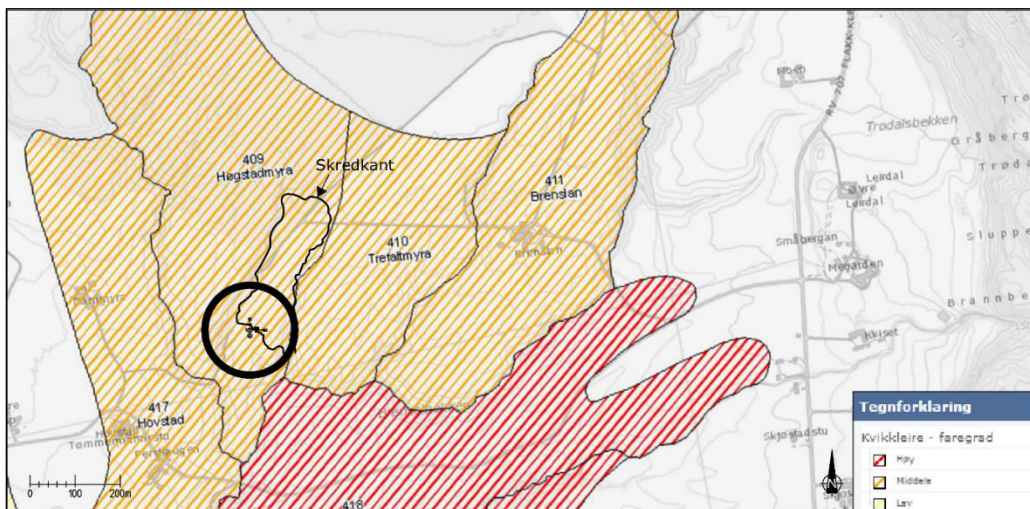


Kvartærgeologiske kart viser området rundt undersøkelsesstedet hovedsakelig består av tykk havavsetning. Tidligere grunnundersøkelser i punktet bekrefter dette.



Figur 29: Kvartærgeologisk kart, Esp, Byneset ([ngu.no/kart/losmasse/](http://ngu.no/kart/losmasse/)).

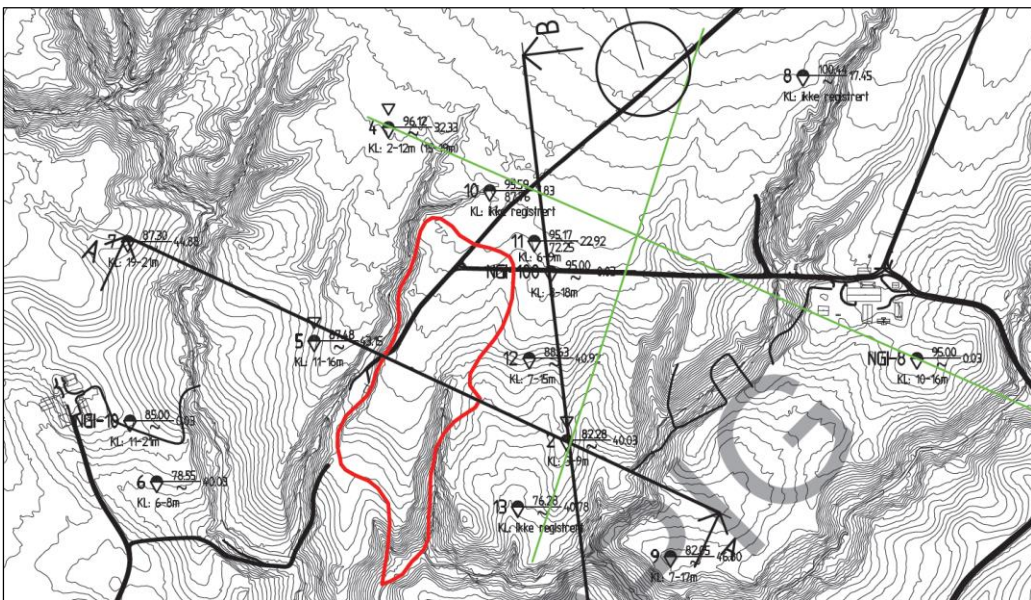
Figur 30 viser et utsnitt fra NVEs karttjeneste (skrednett.no). Her kan man se at skredgropa ligger innenfor kvikkleiresone 409 Høgstadmyra, som er klassifisert med faregrad middels. Figuren viser også at det er flere kvikkleiresoner i området rundt skredgropa, og skredkanten mot øst flukter omtrent med grensa til kvikkleiresone 410 Trefaltmyra.



Figur 30: Oversiktskart med kvikkleiresoner, Esp (skrednett.no).

### 6.1.2 Tidligere undersøkelser

Etter skredet som gikk den 1. januar 2012 ble det straks etter utført en rekke grunnundersøkelser rundt om skredgropen for å vurdere lokal- og områdestabilitet. Figur 31 viser en oversikt over grunnundersøkelser som er gjort i umiddelbar nærhet av skredgropen pr. 9.1.2012 (Thakur, 2012). I ettertid er det blitt utført flere undersøkelser, og i punktet som er undersøkt i dette studiet ble det i 2013 utført undersøkelser av NTNU, blant annet i forbindelse med masteroppgaver (King, 2013). Det ble da utført en dreietrykksondering, en CPTU-sondering og en prøveserie á 3 prøver i dette punktet. Dreietrykksondering og laboratorieresultater fra prøveserien er vist i henholdsvis vedlegg A – 2 og A – 13. Dreietrykksonderingen antyder kvikkleire fra ca. 3 til 14 meters dybde. Prøvene er fra dybdene 4,0 – 4,8 m, 7,0 – 7,8 m og 10 – 10,8 m. Fra den grunneste prøven ble den omrørt skjærfasthet bestemt til like under 2 kPa og sensitivitet på 17, altså innenfor definisjonen som sprøbruddmateriale. Fra de to andre prøvene ble det påvist kvikkleire med omrørt skjærfasthet ned mot 0,2 kPa. Prøvematerialet ble beskrevet som en meget homogen, høyt overkonsolidert, siltig leire med få gruskorn og skjellrester.



Figur 31: Grunnundersøkelser i nærheten av skredgropa pr. 9.1.2012 (Nyheim et al., 2012).

### 6.1.3 Utførte undersøkelser

I forbindelse med dette studiet har Rambøll bistått med borerigg og boremannskap i to dager på Esp. Dette var 23. og 24. januar 2014. Første dag ble det utført en totalsondering, to stk. R-CPTU og to stk. CPTU. Den andre dagen ble det gjennomført en prøveserie á 12 prøver ned til 18 meters dyp, hvorav de to grunneste prøvene var

poseprøver tatt opp med auger, og de andre 10 ble tatt opp med 54 mm prøvetaker med stålsylindere. Alle utførte undersøkelser er vist i vedlegg A.



*Figur 32: Boring på Esp, Byneset januar 2014. (Foto: Olav Svegård, Rambøll)*

Laboratorieundersøkelser på prøver 1 – 4 og 6 – 10 er utført på Ramølls laboratorium på Kvenhildmyra i Trondheim. Prøvesylinder 5 ble overlevert til NTNU. Rutinedata fra denne sylindere er også plottet inn i borprofilet. Saltinnholdsmålinger er utført på NTNUs geotekniske laboratorium. En oversikt over rutinedataene er vist i tabellen under.

**Tabell 6:** Sammendrag av rutinedata, Esp, Byneset

Egenskaper	Verder
Vanninnhold, $w$	24,6 – 49,7 %
Plastisitetsgrense, $w_p$	18,6 – 23,5 %
Flytegrense, $w_L$	24,6 – 38,5 %
Plastisitetsindeks, $I_p$	5,3 – 15,3 %
Saltinnhold	1,3 – 4,7 g/l
Tyngdetetthet, $\gamma$	17,5 – 18,7 kN/m <sup>3</sup>
Udrenert skjærfasthet fra enkelt trykkforsøk, $c_{uuc}$	25 – 65 kPa
Uomrørt, udrenert skjærfasthet fra konusforsøk, $c_{ufc}$	19 – 120 kPa
Omrørt, udrenert skjærfasthet fra konusforsøk, $c_{urfc}$	0,29 – 18 kPa
Sensitivitet, $S_t$	17 - 80

Borpunktets koordinater og høyde er ikke målt inn i etterkant. Undersøkelsene ble utført like i nærheten av NTNUs undersøkelser på stedet (King, 2013), slik at det vises til disse koordinatene som orienterende plassering. Koordinatene er vist i Tabell 7, referert til Euref 89, UTM sone 32. Høyde er hentet fra digitale kartgrunnlag, og må derfor også betraktes som orienterende. Høydereferanse er NN2000.

**Tabell 7:** Koordinater og høyde for borpunkt, Esp, Byneset (King, 2013).

Borpunkt	Nord	Øst	Terrengkote
			NN2000
1	7029902	556787	83

#### 6.1.4 Grunnforhold

Sonderinger og prøver viser et øvre lag med tørrskorpeleire i ca. 2 – 3 meters dybde under terreng. Derunder viser resultatene homogen, overkonsolidert leire med økende skjærfasthet ned til sonderingsstopp ca. 18 meter under terreng. Fra ca. 12 – 18 meters dyp er det også påvist noe innslag av små skjellrester og gruskorn. Innenfor dybdeintervallet 4 – 15,5 meter under terreng defineres leira som sprøbruddmateriale, og mellom dybde 5,5 – ca. 10 m er leira påvist å være kvikk.

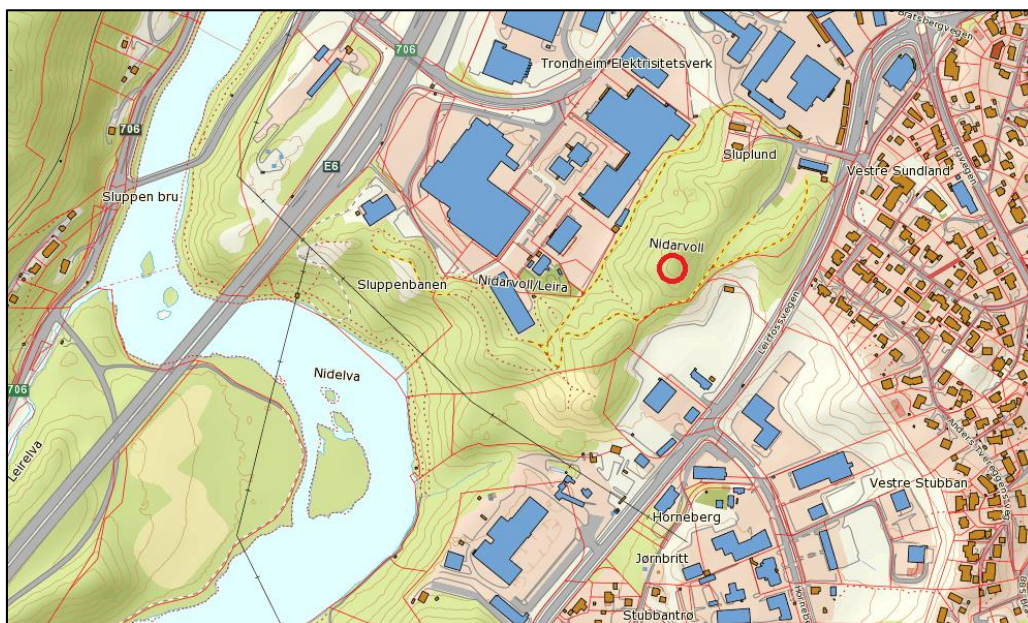


## 6.2 NIDARVOLL

Rambøll har i 2014 et oppdrag med detaljprosjektering innenfor kvikkleiresone 228 Nidarvoll. I forbindelse med tilhørende grunnundersøkelser er det utført tilpassede grunnundersøkelser for dette studiet i ett punkt.

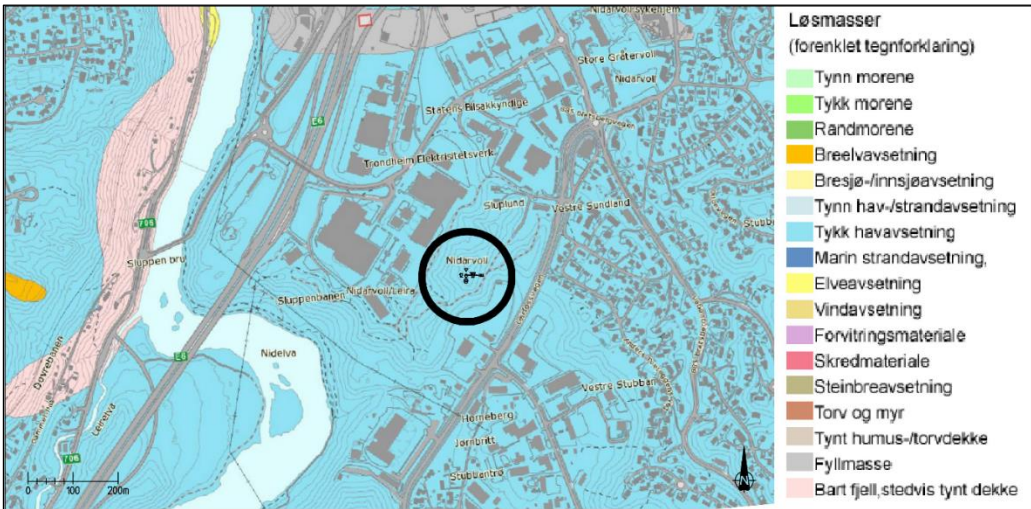
### 6.2.1 Områdebeskrivelse

Terrenget i området er sterkt kupert og preget av ravinedaler og gamle gjenstående skredkanter. Borpunktet som er benyttet for tolkning i dette studiet ligger på toppen av en åskam mellom Postterminalen i Trondheim og Leirfossvegen. Punktets plassering er vist på oversiktskartet i Figur 33. Like sør for undersøkelsespunktet går Nidelva, som akkurat er erosjonssikret i dette området. Det er store høydeforskjeller i området, og høydeforskjellen mellom undersøkelsespunktet og elva er omtrentlig 60 meter, over en avstand på ca. 3-400 meter.



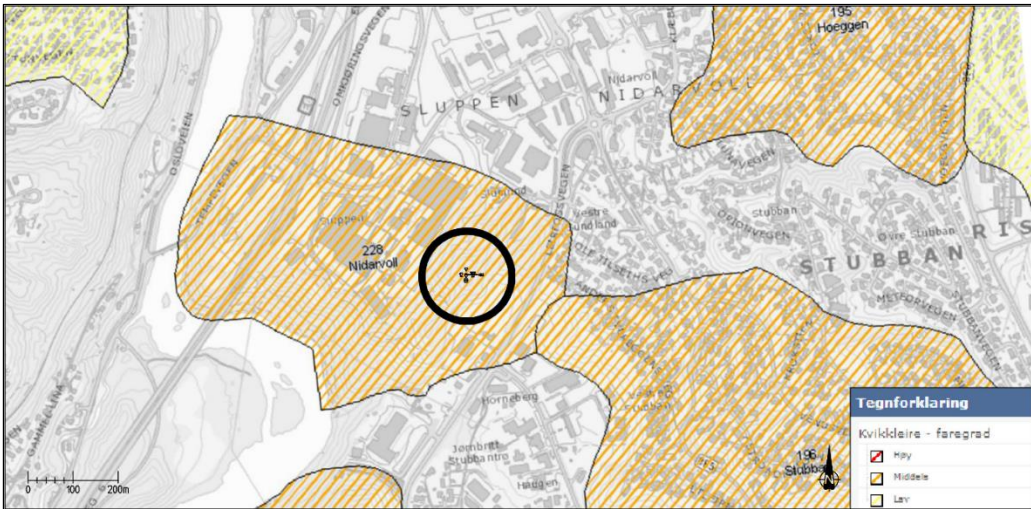
**Figur 33:** Oversiktskart ved undersøkelsesstedet på Nidarvoll (norgeskart.no).

Kvartærgeologiske kart viser at området rundt undersøkelsesstedet består av tykk havavsetning, og generelt liten variasjon i området (Figur 34).



Figur 34: Kvartærgeologisk kart, Nidarvoll ([ngu.no/kart/losmasse/](http://ngu.no/kart/losmasse/)).

Kvikkleiresone 228 Nidarvoll er klassifisert med faregrad middels fra NVEs kvikkleirekartlegging. I området er det også flere andre kvikkleiresoner, blant annet sone 195 Hoeggen og 196 Stubban (Figur 35).



Figur 35: Oversiktskart med kvikkleiresoner, Nidarvoll ([skrednett.no](http://skrednett.no)).

### 6.2.2 Tidligere undersøkelser

Fra et tidligere prosjekt hos Rambøll i 2009 er det i samme punkt utført en dyp dreietrykksondering, ned til ca. 48 meters dybde. Sonderingen antyder sprøbruddmaterialer fra ca. 12 – 24 meter under terreng. Området er ellers godt dekket

med grunnundersøkelser som gir et godt tolkningsgrunnlag. Et utsnitt av situasjonsplan med samlede grunnundersøkelser per 08.04.2014 er vist i Figur 36.

### 6.2.3 Utførte undersøkelser

I det aktuelle borpunktet ble det i løpet av uke 9 i 2014 følgende supplerende grunnundersøkelser utført:

- CPTU-sondering til ca. 27,5 meters dybde (sondering 12)
- R-CPTU-sondering til ca. 14,5 meters dybde (sondering 12R1)
- R-CPTU-sondering til ca. 27 meters dybde (sondering 12R2)
- Prøveserie á 4 prøver tatt med 54 mm stålsylindere ved dybder:
  - 7,2 – 8,0 m
  - 9,2 – 10,0 m
  - 16,2 – 17,0 m
  - 23,2 – 24,0 m

R-CPTU-sonderingen måtte repeteres på grunn kommunikasjonsproblemer med sonden. Det er likevel valgt å benytte registrerte data fra denne sonderingen som kontroll mot den andre sonderingen. Alle utførte grunnundersøkelser er vist i vedlegg B. Laboratorieundersøkelser er alle utført på Rambølls laboratorium bortsett fra saltinnholdsmålinger. Disse er utført på NTNUs laboratorium. En oversikt over rutinedataene er vist i Tabell 8.

*Tabell 8: Sammendrag av rutinedata, Nidarvoll*

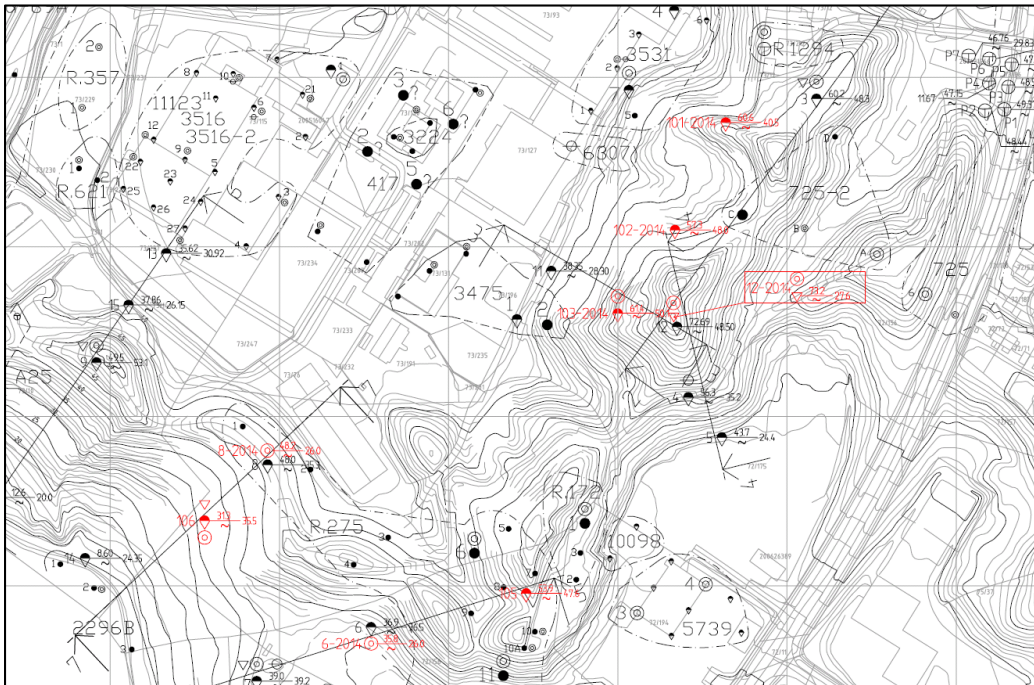
Egenskaper	Verder
Vanninnhold, $w$	25,6 – 47,9 %
Plastisitetsgrense, $w_p$	17,1 – 32,6 %
Flytegrense, $w_L$	18,0 – 51,6 %
Plastisitetsindeks, $I_p$	0,9 – 20,3 %
Saltinnhold	0,5 – 1,2 g/l
Tyngdetetthet, $\gamma$	17,7 – 20,3 kN/m <sup>3</sup>
Udrenert skjærfasthet fra enkelt trykkforsøk, $c_{uuc}$	60,0 – 65,0 kPa
Uomrørt, udrenert skjærfasthet fra konusforsøk, $c_{ufc}$	25,0 – 72,0 kPa
Omrørt, udrenert skjærfasthet fra konusforsøk, $c_{urfc}$	0,1 – 18,0 kPa
Sensitivitet, $S_t$	3,9 – 340



Borpunktets koordinater og høyde er innmålt av Rambøll etter dreietrykkssonderingen som ble utført i 2009. Dette er gjengitt i Tabell 9. Målingene av koordinater er referert til Euref 89, UTM sone 32. Høyden er referert til høydesystem Trondheim lokal.

Tabell 9: Koordinater og høyde for borpunkt, Nidarvoll

Borpunkt	Nord	Øst	Terrengkote
			Trondheim lokal
12	7030352.9	569934.9	72.7



Figur 36: Utsnitt av situasjonsplan ved Nidarvoll.

## 6.2.4 Grunnforhold

Sonderinger og prøvetaking viser et lag av tørrskorpeleire over leire med enkelte gruskorn. De opptatte prøvene viser fast leire til ca. 10 meters dybde, og fra sonderingen antydes det samme tendens ned til ca. 12,5 meters dybde. Derunder antyder sonderingen et bløtere lag ned til ca. 25 meters dybde. I prøver ved ca. 16,5 og 23,5 meter under terreng er det påvist meget sensitiv kvikkleire.

## 6.3 RANHEIM VESTRE

Multiconsult AS har i november 2013 utført grunnundersøkelser på Ranheim Vestre i forbindelse med ett av sine prosjekter. Her har det blitt utført R-CPTU-sonderinger med målt total sonderingsmotstand. Undersøkellesstedet og plassering av borpunkt er vist i oversiktskartet i Figur 38.

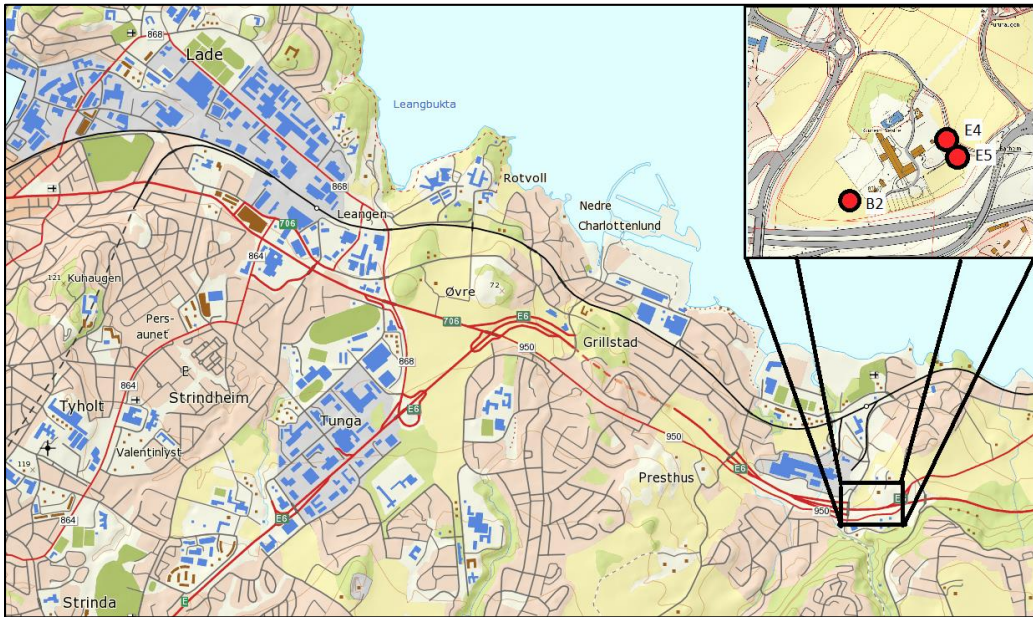
### 6.3.1 Områdebeskrivelse

Terrenget i området omkring Ranheim Vestre kan betegnes som relativt flatt, med en slak helning ned mot fjorden som ligger ca. 800 meter nord.

Kvartærgeologisk kart (Figur 37) viser både «Tykk havavsetning» og «Marin strandavsetning» for prosjektområdet. Her ligger punkt B2 innenfor et område klassifisert som tykk havavsetning og punkt E4 og E5 innenfor et område klassifisert som marin strandavsetning. Noen hundre meter nord for prosjektområdet ligger en sone som er antydnet som forvitningsmateriale. Sør for prosjekteringsområdet antydes det et belte med randmorene.

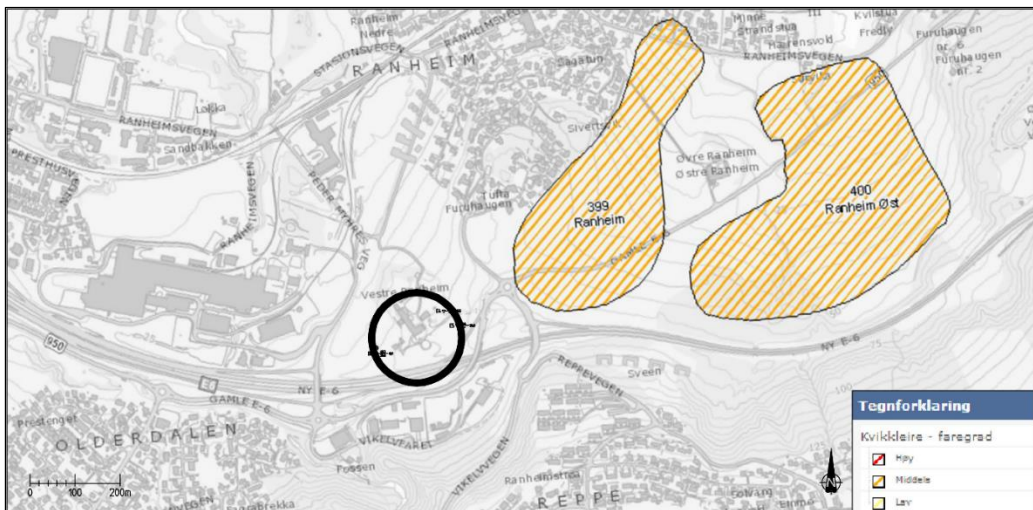


Figur 37: Kvartærgeologisk kart, Ranheim Vestre ([ngu.no/kart/losmasse/](http://ngu.no/kart/losmasse/)).



Figur 38: Oversiktskart over undersøkelsessteder, Ranheim Vestre (norgeskart.no)

Figur 39 viser kartlagte kvikkleiresoner ved undersøkelsesstedet. Dette er kvikkleiresone 399 Ranheim og 400 Ranheim Øst. Disse ligger noen hundre meter nordøst for undersøkelsesstedet.



Figur 39: Oversiktskart med kvikkleiresoner, Ranheim Vestre (skrednett.no).

### 6.3.2 Utførte undersøkelser

Følgende grunnundersøkelser er tilgjengelige i hvert punkt:



- Borpunkt B2
  - R-CPTU-sondering til ca. 14 meters dybde med 5 meter forboring.
  - Prøveserie á 3 prøver til 8 meters dybde.
- Borpunkt E4
  - R-CPTU-sondering til ca. 16 meters dybde med 3 meter forboring.
  - Prøveserie á 8 prøver til 14 meters dybde.
- Borpunkt E5
  - R-CPTU-sondering til ca. 24 meters dybde.
  - Prøveserie á 8 prøver til 13 meters dybde.

Alle grunnundersøkelsene er gjengitt i vedlegg C.

Borpunktens koordinater og høyder er innmålt i forbindelse Multiconsults prosjekt. Dette er gjengitt i Tabell 10. Målingene av koordinater er referert til Euref 89, UTM sone 32. Høydene er referert til høydesystem NN2000.

*Tabell 10: Koordinater og høyder for borpunkt, Ranheim Vestre.*

Borpunkt	Nord	Øst	Terrengkote
			NN2000
B2	7033614.1	576684.2	40.3
E4	7033708.3	576834.5	49.6
E5	7033676.3	576863.7	51.6

### 6.3.3 Grunnforhold

Borpunktene E4 og E5 viser ganske forskjellige grunnforhold sammenliknet med borpunkt B2. I B2 viser sonderinger og prøver et fast lag i toppen til ca. 6 meter under terreng. Prøver viser grusig sand fra 1 – 2 meters dybde. Videre går det over til fast leire med sand- og gruskorn til sonderingsstopp.

Borpunktene E4 og E5 viser mye de samme grunnforholdene, med et fast tørrskorpelag i de øverste 4 – 5 meterne under terreng, og derunder middels fast, lagdelt leire med tynne sand- og siltlag. I Borpunkt E5 er det også påvist sprøbruddmateriale fra 6,5 – 10,5 meter under terreng, hvor det i mellom 7,5 – 9,5 meter under terreng defineres som kvikkleire. I dybdeintervallet 12 – 13 meter under terreng er leira også påvist som kvikk.

## 7 RESULTATER

---

### 7.1 TOTAL STANGFRIKSJON

Utleddning og tolkning av total stangfriksjon er utført for alle CPTU-sonderinger som har vært tilgjengelig gjennom denne oppgaven. Disse er presentert i tolkningsdiagrammer i Vedlegg E.

### 7.2 VURDERING AV OMRØRINGSGRAD

Som beskrevet i kapittel 5.4 om metoden for vurdering av omrøringsgrad, er det gjort vurdering fra alle CPTU-sonderinger i dette studiet. En samlet vurdering av forholdstall  $C_{omr}$ , gruppert på borhull, har gitt resultater som vist i tabellen under.

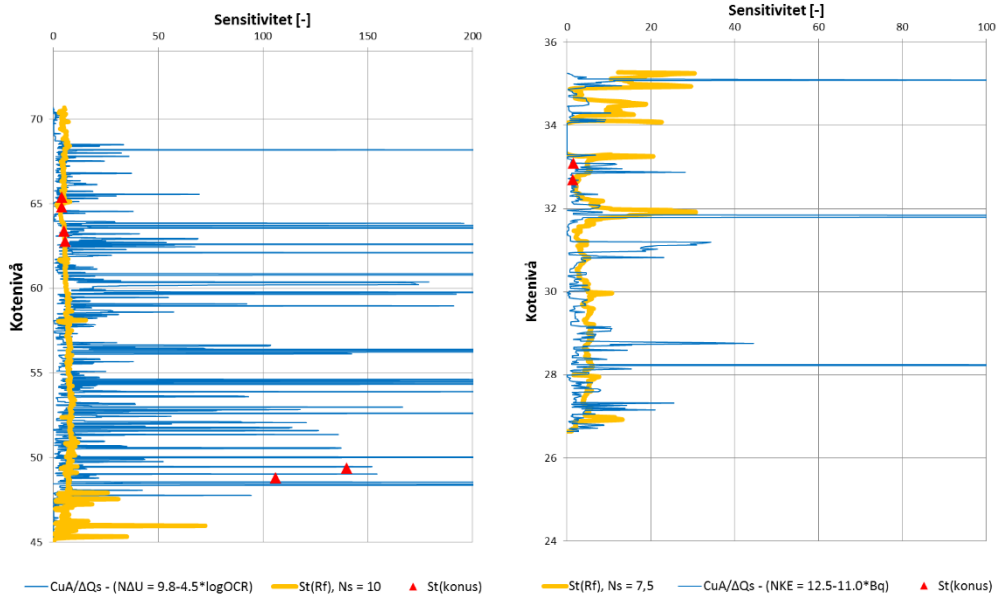
*Tabell 11: Forholdstall for omrøringsgrad*

<b>Borhull</b>	<b><math>C_{omr}</math></b>
1 – Esp	1
12 – Nidarvoll	2,5
B2 – Ranheim Vestre	1
E4 – Ranheim Vestre	2,5
E5 – Ranheim Vestre	7

### 7.3 SENSITIVITET

Tolkning av sensitivitet fra total stangfriksjon er gjort for alle sonderinger i studiet. Generelt ble resultatet av dette at den utledede sensitiviteten ga veldig store spredninger og dårlig korrelasjon mot målte verdier fra konusforsøk. Kun borpunkt B2 på Ranheim Vestre viste antydninger til korrelasjon. Et eksempel er vist i Figur 40. Her er tolkninger fra Nidarvoll og borpunkt B2 på Ranheim vist. I samme figur er det også vist tolkning for sensitivitet fra friksjonsforholdet,  $R_f$ , samt sensitivitetsmålinger fra konusforsøk. Tolkningsmetode basert på friksjonsforholdet er beskrevet i kapittel 3.5.3.





Figur 40: Tolkning av sensitivitet (Venstre: Nidarvoll, Høyre: Ranheim Vestre).

Tolkning av sensitivitet fra friksjonsforholdet avhenger av konstanten  $N_s$ . Som Lunne et al. (1997) kommenterte, er denne påvirket av lokale variasjoner. Det er gjort et forsøk på bestemme konstanten som passer best for hvert borpunkt i studiet. Resultatet er vist i tabellen under.

Tabell 12: Vurdering av konstantverdier,  $N_s$ , for sensitivitet.

Borhull	Konstant $N_s$
1 – Esp	20
12 – Nidarvoll	10
B2 – Ranheim Vestre	7,5
E4 – Ranheim Vestre	20
E5 – Ranheim Vestre	20

## 7.4 R-CPTU

Utførte resistivetsmålinger har blitt tolket mot intervallet 10 – 100  $\Omega\text{m}$ , som gitt NGIs veileder for resistivetsmålinger (Solberg et al., 2011).

Målingene som ble gjort på Esp, som er vist i vedlegg A – 4, viser en jevn redusering av resistivitet med dybden. Hele sonderingsintervallet ned til ca. 14 meter under terreng havner innenfor intervallet på 10 – 100  $\Omega\text{m}$ . Laboratorieprøver viser kvikkleire fra 5,5 – 11 meter under terreng.

Vedlegg B – 3 viser resistivitetsprofilen for sonderinger utført på Nidarvoll. Målingene viser nærmest konstant resistivitet i området 40 – 50  $\Omega\text{m}$ . Fra prøver og tolkninger fra sonderinger antas kvikkleire å forekomme i dybdeintervallet 12 – 25 meter under terreng.

Resistivitetsprofil fra borpunkt B2 på Ranheim Vestre er vist i vedlegg C – 2. Her viser målingene grovt sett verdier over 100  $\Omega\text{m}$ . Sonderinger og opptatt prøve antyder at dette er faste masser, uten forekomst av kvikkleire.

Vedlegg C – 5 viser resistivitetsverdier fra borpunkt E4 på Ranheim Vestre. Her viser målingene tilnærmet lineært økende resistivitet fra ca. 60  $\Omega\text{m}$  fra starten av sonderingen til 140  $\Omega\text{m}$  ved sonderingsslutt. Ved ca. 10 meter under terreng passerer resistiviteten 100  $\Omega\text{m}$ . Det er ikke påvist noe kvikkleire fra opptatte prøver.

Målinger fra borpunkt E5 på Ranheim Vestre er vist i vedlegg C – 8. Profilen har tilsvarende tendens som borpunkt E4, hvor det går fra ca. 50  $\Omega\text{m}$  fra to meter under terreng, til ca. 150  $\Omega\text{m}$  ca. 24 meter under terreng. Målingene passerer 100  $\Omega\text{m}$  ca. 17 meter under terreng. Opptatte prøver viser kvikkleire og sprøbruddmateriale i dybdeintervallet 6 – 13 meter under terreng. Sondering antyder kvikkleire videre ned til ca. 17 meter under terreng.

## 7.5 JORDARTSKLASSIFISERING

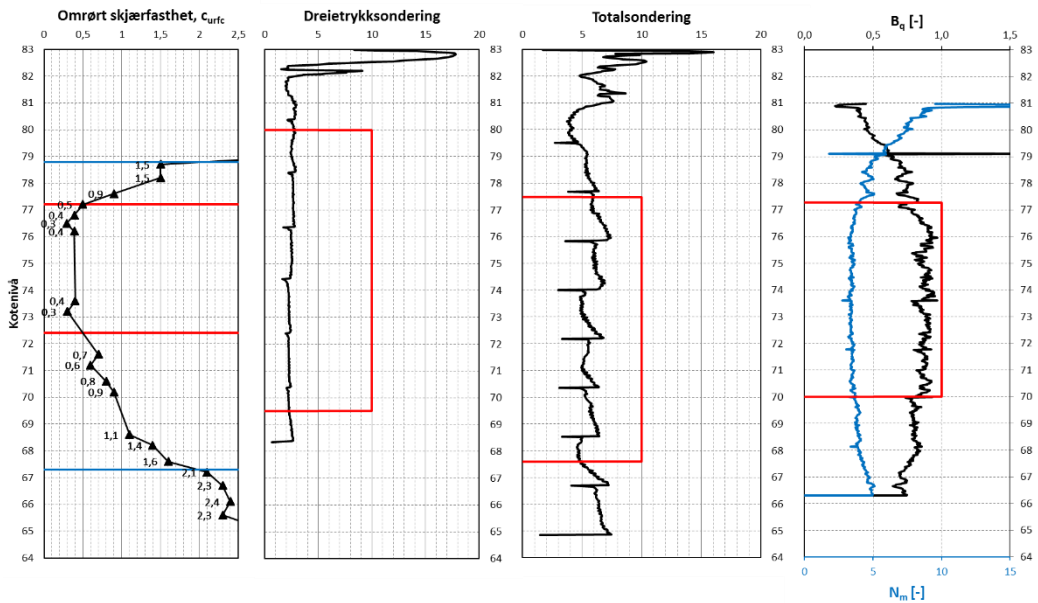
Jordartsklassifiseringer er vist i Vedlegg D. Kommentarer er vist i Tabell 13.

*Tabell 13: Jordartsklassifisering*

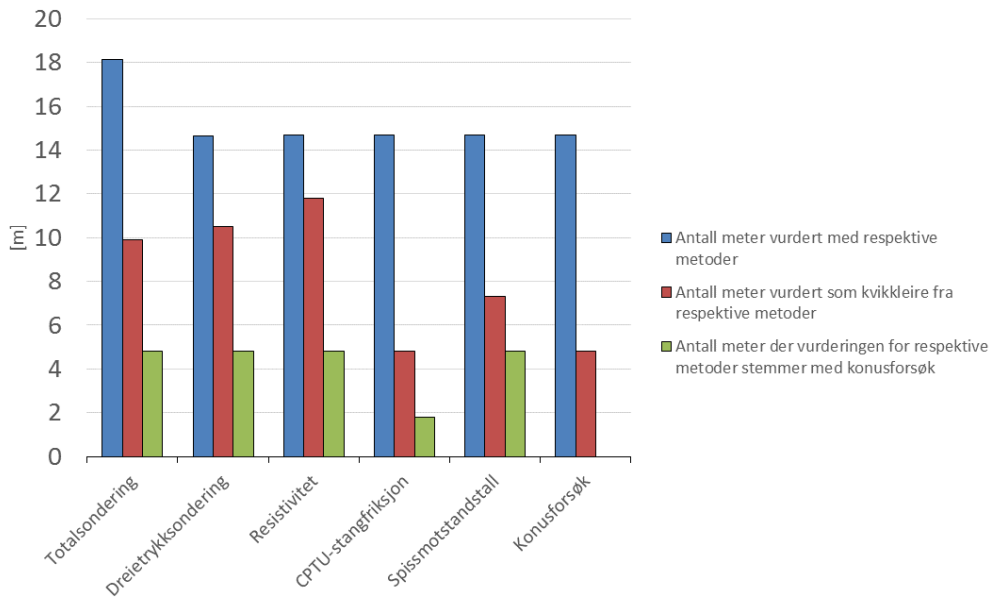
Borpunkt	Klassifisering
1	Leire, sensitiv finkornet
1a	Leire, sensitiv finkornet
1b	Leire, sensitiv finkornet
1c	Leire, sensitiv finkornet
12R1	Leire, siltig leire
12R2	Leire, siltig leire, sensitiv leire
12	Leire, siltig leire, sensitiv leire
B2	Leire, siltig leire
E4	Leire, siltig leire
E5	Leire, siltig leire

## 7.6 TOLKNINGSMETODERS PÅLITELIGHET

For undersøkelsene som er utført på Esp er det gjort en vurdering av pålitelighet. Tolkninger fra totalsondering, dreietrykksondering, resistivitet, total stangfriksjon fra CPTU-sondering og spissmotstandstall er vurdert mot konusforsøk. Figur 41 viser hvilke vurderinger som er lagt til grunn for spissmotstandstall, dreietrykk- og totalsondering. Her er områder tolket som kvikkleire markert med rødt. Tolkninger fra CPTU-stangfriksjon er vist i vedlegg E – 1, og fra resistivitet vist i vedlegg A – 4. Resultatet av pålitelighetsvurderingen er vist i Figur 42.

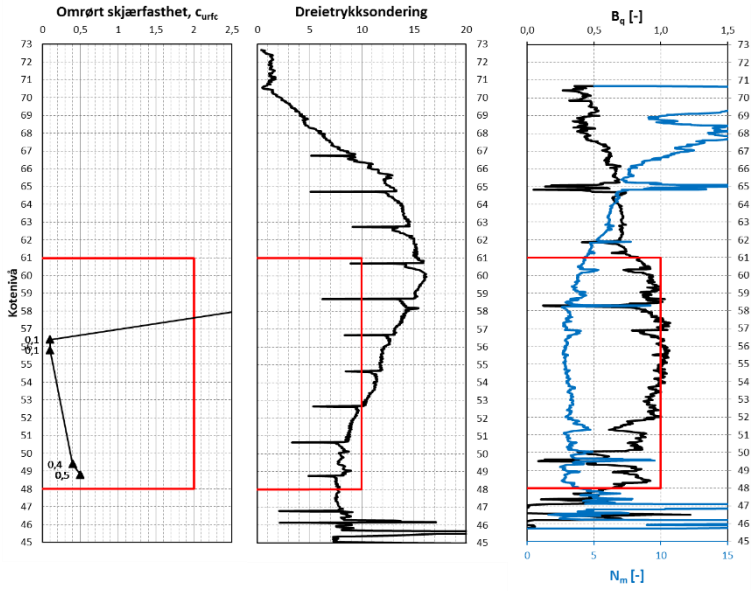


Figur 41: Tolkning fra ulike sonderingsmetoder (Esp).

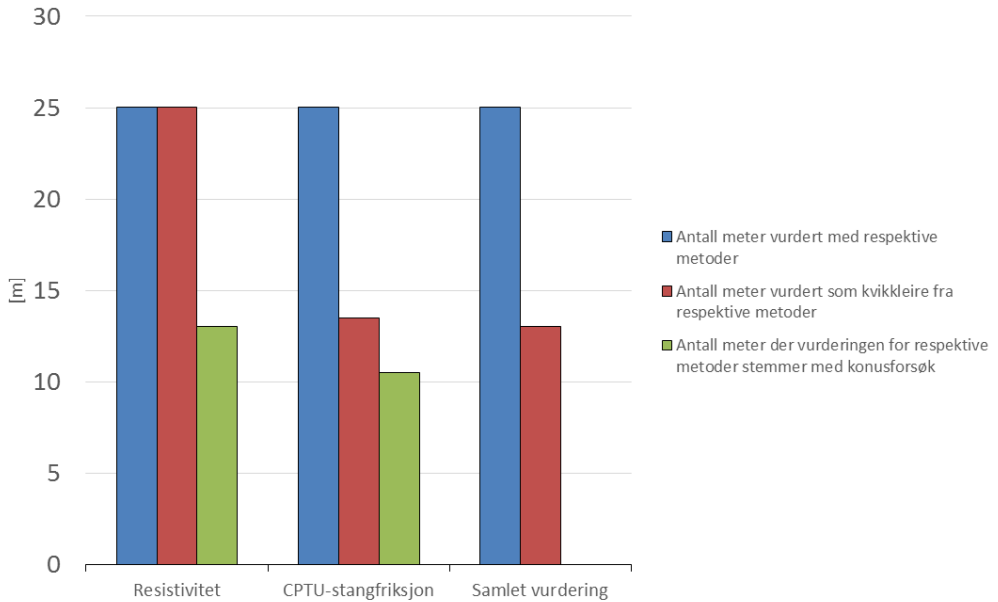


**Figur 42:** Vurdering av pålitelighet av tolkningsmetoder (Esp).

De andre undersøkelsesstedene er ikke like godt dekt med grunnundersøkelser som på Esp, men på Nidarvoll er det utført en dreietrykksondering i tillegg til CPTU-sondering. Dersom man tar utgangspunkt i en samlet vurdering fra dreietrykksonderingen, Bq, Nm og de tilgjengelige prøvene, kan en viss pålitelighet fra CPTU-stangfriksjonen vurderes. Figur 43 viser den samlede vurderingen som er lagt til grunn for tolkning av pålitelighet. Her er det definert kvikkleireforekomst fra kote 61 til kote 48. Ut i fra dette kan påliteligheten for CPTU-stangfriksjon og R-CPTU vurderes. Dette er gjort i Figur 44.



Figur 43: Samlet vurdering for kvikkleire (Nidarvoll).



Figur 44: Vurdering av pålitelighet av tolkningsmetoder fra samlet vurdering (Nidarvoll).

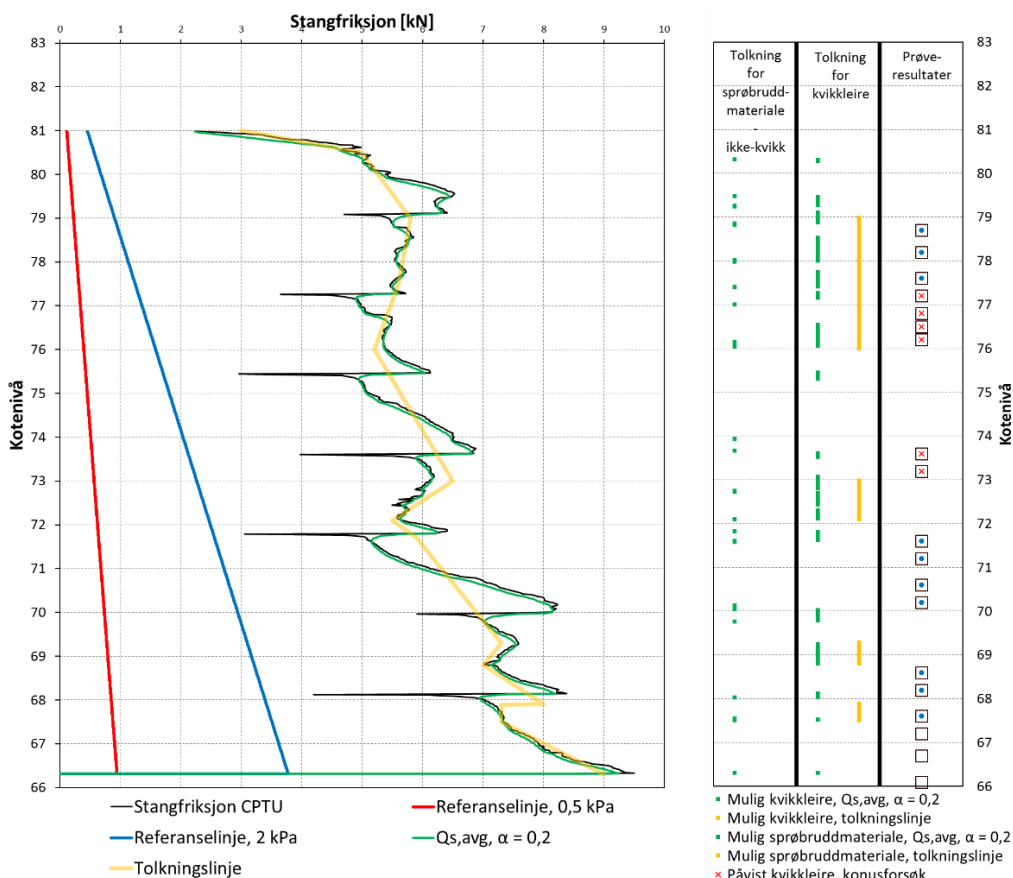


## 8 DISKUSJON

### 8.1 TOTAL STANGFRIKSJON

#### 8.1.1 Tolkningskurve

På alle CPTU-sonderingene som ble utført på Esp kan man se at formen på kurven for stangfriksjon har en «juletrefasjon», slik som Figur 45 viser. Med dette menes at stangfriksjonen øker betydelig med dybden, før den gjør et innrykk som er omtrent like stort som økningen siden forrige innrykk. Disse innrykkene skjer ved stangskiftene og er mest markante for sonderingene utført med resistivitetsadapter. Effekten med bruk av resistivitetsadapteret er vurdert i kapittel 8.1.2.



Figur 45: Tolkning av total stangfriksjon fra R-CPTU(1) (Esp).

På grunn av denne ujevne kurvaturen på stangfriksjonskurven har det vært nødvendig å benytte den manuelle tolkningslinjen. Det er blitt forsøkt å fange opp trendene til

kurvene for så å gjøre tolkninger mot dette. Likevel er dette en utfordring, med tanke på valg av helning på tolkningslinjen.

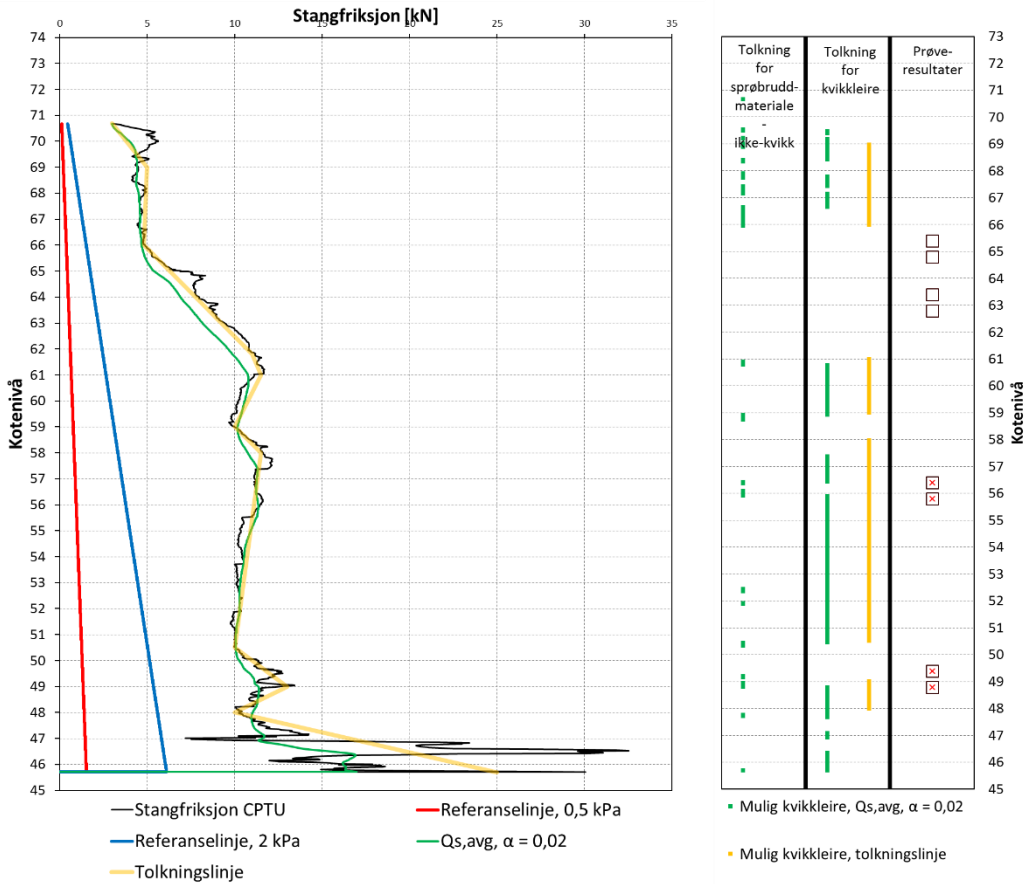
Grunnen til at denne kurvaturen oppstår kan være så mangt. Feil ved utførelse er alltid en feilkilde, men her har sonderingene blitt gjentatt med 4 ganger, hvor spissmålingene viste tilnærmet identiske resultater (Vedlegg A – 3). Et alternativ kan være skjev oppstilling. Da kan dette føre til at borstengene presses sideveis når det sonderes, slik at sonderingsmotstanden blir større. Dette ville igjen kunne blitt oppdaget på helningsvinkelen fra inklinometeret. Dessuten er terrenget tilnærmet flatt der undersøkelsene ble utført.

Totalsonderingen som ble utført på samme sted fikk også denne oppførselen på matekraftskurven, derimot fikk ikke dreietrykkssonderingen fra 2013 en slik kurvatur. CPTU-sonderingene på Esp ble utført med totalsonderingsstenger. En mulighet kan være skjevheter i disse stengene, slik at det skaper en «wobbling»-effekt.

Denne «juletreformede» kurvaturen kan også skyldes stedlige egenskaper som tiksotropi. Dette kan undersøkes ved å gjennomføre nye sonderinger med annet boreutstyr.

Sonderingene på Nidarvoll og Ranheim Vestre ga jevnere kurver enn på Esp. Likevel ble det også her valgt å benytte den manuelle tolkningslinjen, da de utjevnedde linjene fremdeles førte til noe feiltolkninger. Figur 46 viser tolkning fra total stangfriksjon på en CPTU-sondering på Nidarvoll.

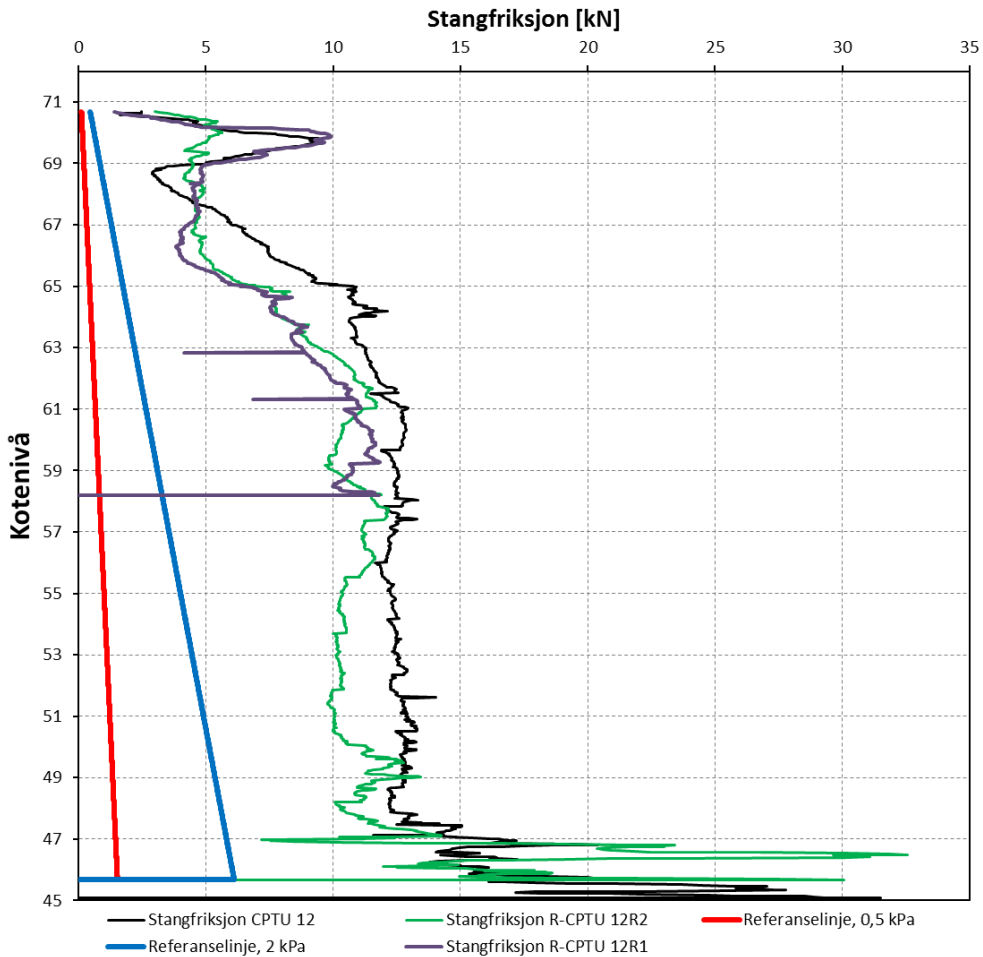




Figur 46: Tolkning av total stangfriksjon fra CPTU (Nidarvoll).

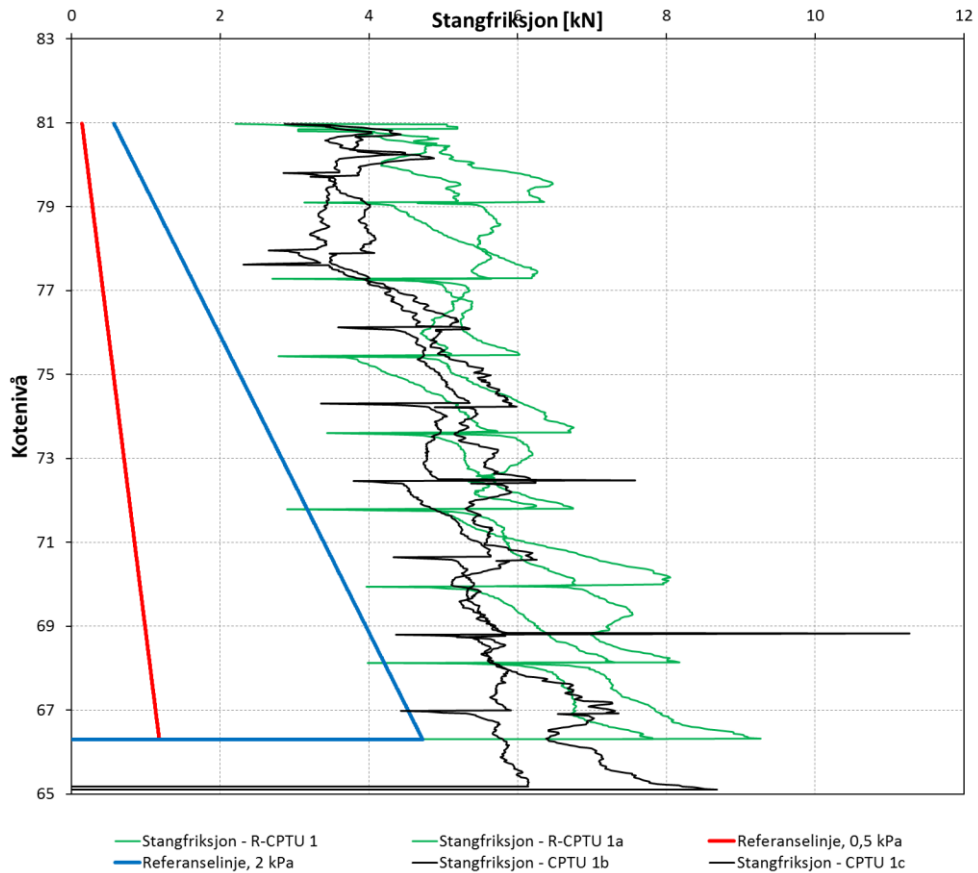
### 8.1.2 Sonderingsmotstand

Resistivetsadapteret som er benyttet i dette studiet har en diameter på 44 mm. Dette er 8 mm større enn resten av CPTU-sonden og standard CPTU-sonderingsstenger. Teoretisk vil adapteret da fungere som en rørmmer og skape lavere sonderingsmotstand ettersom dette vil utvide borhullet. I bløtere masser, spesielt i sensitive leirer, vil dette gi økt forstyrrelse av massene rundt sonderingsstengene. På Nidarvoll og Esp ble det utført sonderinger med og uten resistivetsadapter for å se på denne effekten. Figur 47 viser sonderingene som ble utført på Nidarvoll. Disse viser altså lavere total stangfriksjon med resistivetsadapteret påmontert. Her er sonderingene utført med dreitrykkstenger som har samme diameter som CPTU-sonderingsstenger, altså 36 mm.



Figur 47: Total stangfriksjon med og uten resistivitetsadapter (Nidarvoll).

Figur 48 viser den totale stangfriksjonen fra sonderingene utført på Esp. Her ser man en motsatt tendens sammenliknet med resultatene fra Nidarvoll. Altså, sonderingsmotstanden ser ut til å være noe høyere med resistivitetsadapteret påmontert. Sonderingene ble her utført med totalsonderingsstenger. Disse har som kjent samme diameter som resistivitetssonden, slik at effekten av hullutvidelse og omrøringsgrad ikke påvirker resultatene noe særlig.

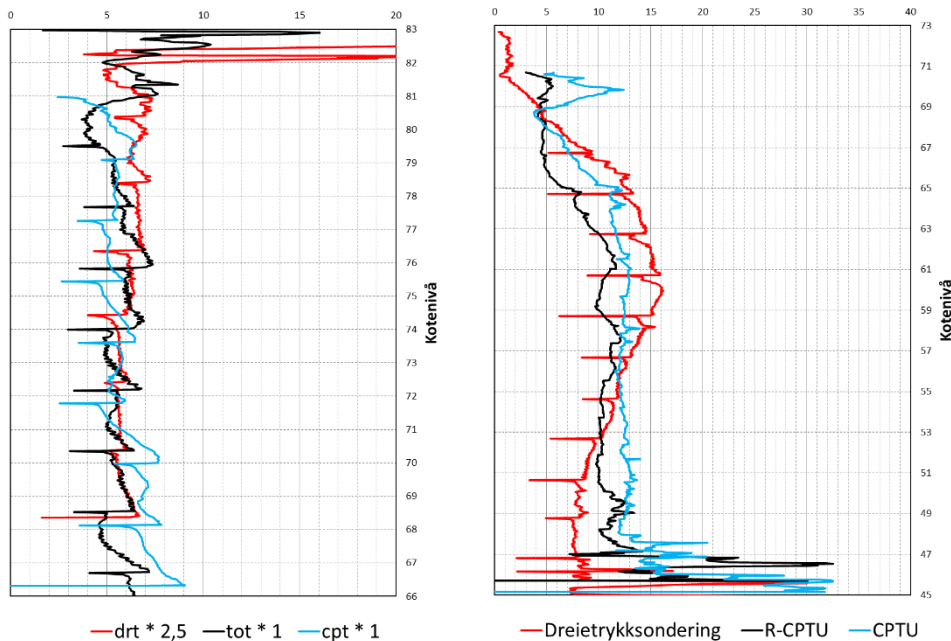


Figur 48: Total stangfriksjon med og uten resistivitetsadapter (Esp).

Bruken av resistivitetssonden påvirker naturlig nok ikke de målte verdiene på CPTU-sonden. Dette bekreftes i vedlegg A – 3 og B – 2 hvor de registrerte spissmålingene for hvert sted er sammenliknet for henholdsvis Esp og Nidarvoll. Her ser man at spissmålingene sammenfaller meget godt begge steder.

Som nevnt i kapittel 4.1 er det blitt funnet orienterende faktorer fra sammenlikning mellom matekraftutslaget for dreietrykk- og totalsondering ettersom hvilket materiale det sonderes gjennom (NGF, 1994). Ved måling av total sonderingsmotstand for CPTU-sonderinger kan denne sonderingsmotstanden sammenliknes. Til venstre i Figur 49 er sonderinger fra Esp vurdert sammen. Her er sonderingsmotstanden fra dreietrykksonderingen multiplisert med en faktor på 2,5 for å oppnå omtrent samme verdier som total- og CPTU-sonderingen. Et viktig poeng her er at CPTU-sonderingen er utført med totalsonderingsstenger og dermed har tilnærmet likt friksjonsareal rundt stangsystemet.

Til høyre i Figur 49 er sonderinger fra Nidarvoll satt sammen. Sonderingsmotstanden fra R-CPTU-, CPTU- og dreietrykksondering er sammenliknet uten noen skaleringsfaktor. Siden CPTU-sonderingene på Nidarvoll ble utført med dreietrykkstenger, hadde CPTU-sonderingen uten resistivitetsadapter konstant diameter, slik som dreietrykksonderingen. En kan se at sonderingsmotstanden for de nevnte metodene er ganske lik ned til det som kan antas å være kvikkleire, men derifra har dreietrykksonderingen lavere motstand. At dreietrykksonderingen har lavere sonderingsmotstand i kvikkleira skyldes trolig at dreietrykkspissen skaper større omrøring på grunn av en noe større diameter, i tillegg til at dreietrykksonderingen roteres ved penetrasjon.



Figur 49: Sonderingsmotstand Esp og Nidarvoll

## 8.2 VURDERING AV OMRØRINGSGRAD

Fra resultatene med vurdering av omrøringsgrad ser man at Både Esp og Ranheim Vestre B2 blir vurdert til forholdstall  $c_{omr} = 1$ . Borpunkt B2 er av grovere masser med lav sensitivitet. Esp derimot, har store forekomster av kvikkleire, og skulle gitt en høyere verdi for forholdstallet. Effekten av den spesielle kurveformen på sonderingene på Esp spiller nok en rolle her. Videre kan man se at borpunkt 12 på Nidarvoll og E4 på Ranheim Vestre begge har forholdstall 2,5. Det er ingen klare sammenhenger mellom grunnforholdene på stedene. Nidarvoll har et mektig fast lag i toppen, før det går over til meget sensitiv kvikkleire til stort dyp. På Ranheim E4 er middels fast, lagdelt leire

gjennom hele sonderingsintervallet. Det siste punktet, Ranheim E5, får et forholdstall på 7. Her er det relativt mye kvikkleire i forhold til sonderingsintervallet, men det er ikke sammenlignbart med de andre resultatene i studiet.

### 8.3 SENSITIVITET

Tolkningen av sensitivitet fra total stangfriksjon viste generelt dårlig korrelasjon til laboratorieverdier fra konusforsøk. Borpunkt B2 viste antydninger til korrelasjon, men resultatet var ikke overveldende bra. Dessuten var dette i meget faste masser, med lav sensitivitet.

Grunnen til den spredningen av de beregnede sensitivetsverdiene skyldes den store variasjonen i kurvene for udrenert skjærfasthet og total stangfriksjon. Et bedre resultat kan være mulig å oppnå dersom man benytter konstante og lineære tolkningskurver for begge parameterne.

For sensitivitetstolkning basert på friksjonsforholdet ble det gjort vurderinger av konstanten  $N_s$  for de forskjellige områdene. Her ser man at konstanten 20 ble vurdert i for borpunktet på Esp og E4 og E5 på Ranheim. På alle disse punktene er det påvist kvikkleire eller sprøbruddmateriale. Likevel er konstanten vurdert etter korrelasjon mot prøver som viste lav sensitivitet. Dette gjelder også for de andre to borpunktene, men her ble konstantene vurdert til 7,5 og 10 for henholdsvis Ranheim B2 og Nidarvoll.

Vurderingene av konstantverdiene har blitt gjort mot sensitivitet beregnet fra konusverdier. Det bemerkes at sensitiviteten derfor kan avvike noe, da dette avhenger av prøve kvalitet.

### 8.4 TOLKNINGSMETODERS PÅLITELIGHET

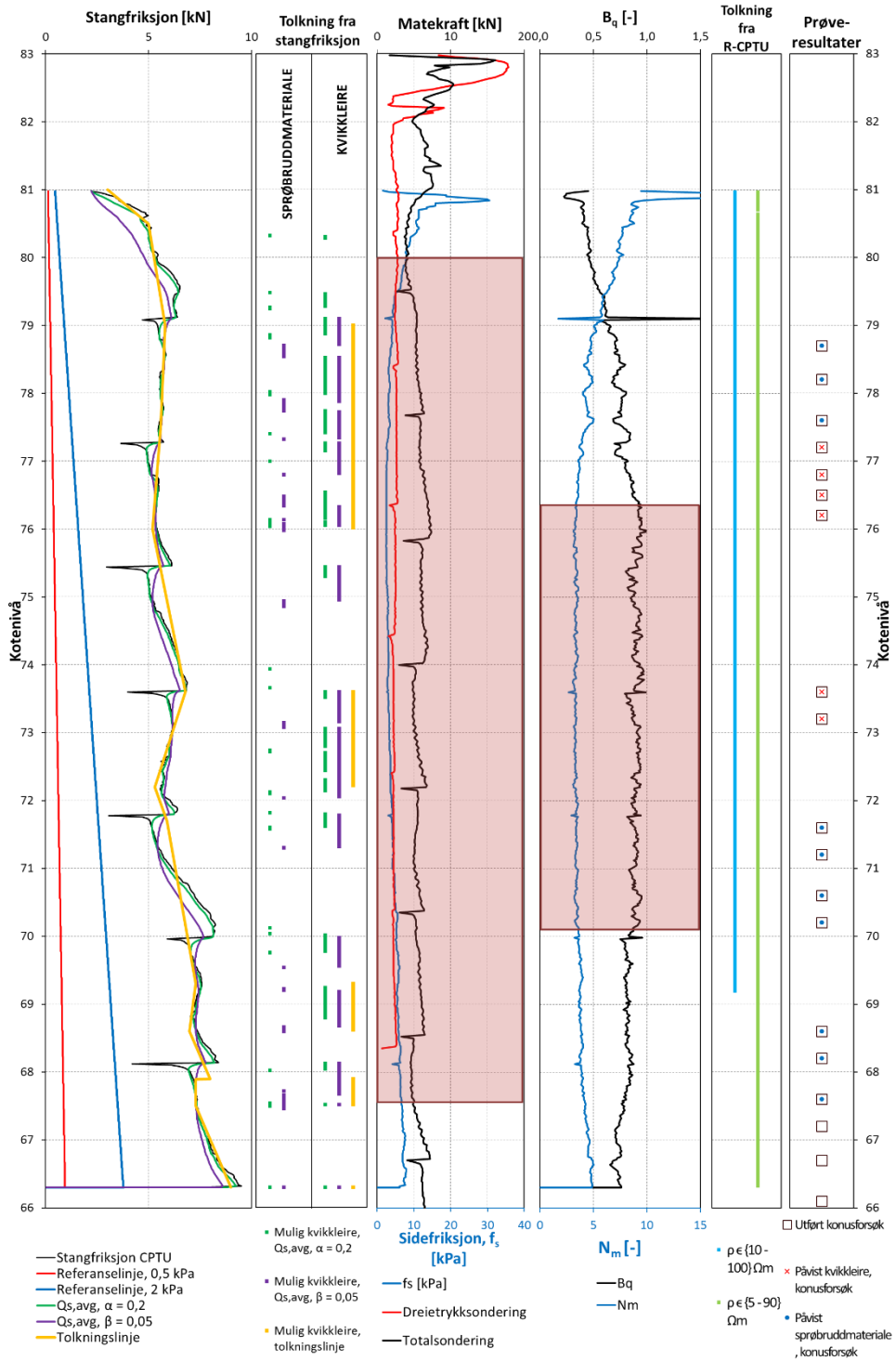
Ut i fra resultatene av pålitelighetsvurderingen fra Esp ser man at alle tolkningsmetoder bortsett fra CPTU-stangfriksjonen antyder kvikkleire i området som er definert som kvikkleire fra prøver. Men man ser også at disse metodene overestimerer forekomsten av kvikkleire veldig mye. Resistivetsmålingen, dreietrykk- og totalsonderingen antyder kvikkleire i et dobbelt så stort intervall enn hva som er tilfellet. CPTU-stangfriksjonen antyder riktig mektighet av kvikkleireforekomsten, men under halvparten er i riktig dybdenivå. Spissmotstandstallet gir her den beste påliteligheten. Den antyder riktig i hele kvikkleireintervallet, men overestimerer med omtrent 30 – 40 %.

Resultatene fra Nidarvoll ble adskillig bedre for CPTU-stangfriksjonstolkningen. Her antydes ca. 80 % av kvikkleira innenfor riktig dybdeintervall. Men det må her tas i betraktning at det er tatt alt for lite prøver til å kunne gi et godt vurderingsgrunnlag.

Alt i alt er dette et veldig tynt grunnlag å vurdere påliteligheten på. Påliteligheten som ble funnet for CPTU-stangfriksjonen på Esp kan dessuten forkastes med tanke på den «juletreformede» kurvaturen på stangfriksjonskurven.

## 8.5 SAMMENSTILLING AV TOLKNINGER

For å gjøre en tolkning av grunnforhold er det som regel ønskelig å ha mest mulig informasjon. Ved bruk av R-CPTU med målt total sonderingsmotstand vil man få mye informasjon til å gjøre en vurdering, og det kan fort bli uoversiktlig. Da kan det være praktisk å sette opp en sammenstilling av alle tolkninger for å ta den endelige avgjørelsen. En slikt kan se ut som i Figur 50.



Figur 50: Eksempel på samleplott. Data fra Esp, Byneset.





## 9 KONKLUSJON

---

I dette studiet skulle det vurderes hvor pålitelig CPTU-stangfriksjon er til å detektere kvikkleire i forhold til andre sonderingsmetoder. Her må det konkluderes med at mengden og kvaliteten på datamateriale er for knapp til å kunne vurdere dette. Så langt kan det se ut som om metodene er likestilte.

En direkte tolkning fra utjevninglinjer for stangfriksjonen gir feiltolkninger til tider. Det er derfor nødvendig å bruk manuell tolkning fra stangfriksjonskurven.

Den målte matekraften på CPTU-sonderinger skaper ikke noen merkostnader på utførelsen. Den vil derfor kunne anses som gratis ekstrainformasjon som bør benyttes hver gang CPTU-sondering utføres.

Resistivetsmålingene fra R-CPTU har for det meste overestimert forekomster av kvikkleire ved bruk av grenseverdiene 10 – 100  $\Omega$ m. Det er derimot ikke påvist kvikkleireforekomst utenfor dette intervallet.

Vurderinger av sensitivitet fra total stangfriksjon ser ikke ut til å ha noen direkte sammenheng. Det er heller ikke funnet noen direkte sammenheng for total stangfriksjon og akkumulert kraft fra friksjonshylsen.

Tolkningsmetoden som er funnet å ha størst pålitelighet er spissmotstandstallet  $N_m$ .



## 10 VIDERE ARBEID

---

Først og fremst vil det være viktig å få vurdert påliteligheten av total stangfriksjon fra CPTU. Det er da nødvendig å gjøre vurderinger med undersøkelsesdata i mye større skala.

Det er flere aspekter med tolkningen som bør undersøkes nærmere. Dette er effekten med bruk av R-CPTU-sonde med større diameter enn stangsettet, samt effekten med bruk av ulik stangdiameter. En vurdering må gjøres hvorvidt det er ønskelig med større omrøringseffekt på grunn av R-CPTU som rømmer.

Et nytt aspekt som kan implementeres, er bruk av strekkklapper i borstengene. Dette vil kunne gjøre det mulig å følge kraftfordelingen i stengene. Dermed kan det være mulig å bedømme når og hvor leira er fullstendig omrørt.



## BIBLIOGRAFI

---

- AASLAND, R. A. 2010. *Kartlegging av kvikkleire med 2D resistivitet og RCPT i Rissa*. Masteroppgave NTNU, Institutt for bygg, anlegg og transport.
- BERGDAHL, U. 1984. *SGL: Geotekniska undersökningar i fält*. Statens Geotekniska Institut.
- BERGER, B. 1983. *Geofysiske metoder anvendt i ingeniørgeologiske undersøkelser*. Doktor ingeniøravhandling, Institutt for petroleumsteknologi og anvendt geofysikk, NTH.
- GEOTECH. 2014a. *Datasheet - Electric Conductivity Adapter*. Hentet fra: <http://www.geotech.eu/images/datasheets/new/ecpt.pdf> [Lastet ned 20.1.2014].
- GEOTECH. 2014b. *Datasheet - Geotech CPT Probes*. Hentet fra: [http://www.geotech.eu/images/manual/NOVA\\_manual.pdf](http://www.geotech.eu/images/manual/NOVA_manual.pdf) [Lastet ned 22.04.2014].
- HUSBYN, G., SKJELSTAD, L. & PETERSSON, K. E. 2002. *Bygda og raset: leirras i Skjelstadmark og Hegra*. Hegra historielag.
- KARLSRUD, K., LUNNE, T., KORT, D. A. & STRANDVIK, S. 2005. CPTU correlations for clays. *Proceedings of the XVIth International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, ICSMGE, Osaka, Japan, Vol. 2*, pp. 693-702.
- KING, J. R. 2013. *Udrenert skjærkryp i kvikkleire : Utvikling av treksialrigg og vurdering av Esp, Byneset, som forsøksfelt*. Masteroppgave NTNU, Institutt for bygg, anlegg og transport.
- KROEZEN, H. 1981. Measurement of in-situ density in sandy/silty soils. *Canadian Geotechnical Society, Newsletter*, Vol. 18, Issue 4, pp. 13-15.
- LUNNE, T., ROBERTSON, P. K. & POWELL, J. J. M. 1997. *Cone penetration testing in geotechnical practice*. London, Blackie.
- LÖFROTH, H. 2011. *SGL-rapport: Kartering av kvicklereförekomst för skredrisikanalyser inom Göta älvutredningen - Utvärdering av föreslagen metod samt preliminära riktlinjer*. Göta älvutredningen, delrapport 29. Linköping, Sverige, Statens Geotekniska Institut.
- LÖFROTH, H., SUER, P., DAHLIN, T., LEROUX, V. & SCHÄLIN, D. 2011. *SGL-rapport: Quick clay mapping by resistivity - Surface resistivity, CPTU-R and chemistry to complement other geotechnical sounding and sampling*. Göta älvutredningen, delrapport 30. Linköping, Sverige, Statens Geotekniska Institut.
- MONTAFIA, A. 2013. *Influence of Physical Properties of Marine Clays on Electric Resistivity and Basic Geotechnical Parameters*. Masteroppgave NTNU, Institutt for bygg, anlegg og transport.
- MÖLLER, B. & BERGDAHL, U. 1982. *Proceedings of the second European Symposium on Penetration Testing, ESOPT II, Amsterdam, 24-27 May 1982*. Rotterdam, Balkema.

- NGF 1989. *NGF-melding 7: Veiledning for utførelse av dreietrykksondering 1982, Rev.1. 1989.* Norsk Geoteknisk Forening.
- NGF 1994. *NGF-melding 9: Veiledning for utførelse av totalsondering.* Norsk Geoteknisk Forening.
- NGF 2010. *NGF-melding 5: Veiledning for utførelse av trykksondering 1982, Rev.3. 2010.* Norsk Geoteknisk Forening.
- NGF 2011. *NGF-melding 2: Veiledning for symboler og definisjoner i geoteknikk. Presentasjon av geotekniske undersøkelser. 1982, Rev.2. 2011.,* Norsk Geoteknisk Forening.
- NVE 2014. *Veileder 7-2014: Sikkerhet mot kvikkleireskred - Vurdering av områdestabilitet ved arealplanlegging og utbygging i områder med kvikkleire og andre jordarter med sprøbruddegenskaper.,* Norges vassdrags- og energidirektorat.
- NYHEIM, T., WIIG, T. & TRAAE, E. 2012. *NIFS-rapport 1-2012: Kvikkleireskred ved Esp på Byneset i Trondheim.* Norges vassdrags- og energidirektorat, Statens vegvesen og Jernbaneverket.
- OTTESEN, H. B. 2009. *CPTU med resistivitetsmåling.* Masteroppgave NTNU, Institutt for bygg, anlegg og transport.
- RANKKA, K., ANDERSSON-SKÖLD, Y., HULTÉN, C., LARSSON, R., LEROUX, V. & DAHLIN, T. 2004. *Quick clay in Sweden.* Linköping, Sverige, Statens Geotekniska Institut.
- ROBERTSON, P. K., CAMPANELLA, R. G., GILLESPIE, D. & GREIG, J. 1986. Use of Piezometer Cone Data. *Proceedings of the ASCE Specialty Conference In Situ '86: Use of In Situ Tests in Geotechnical Engineering, Blacksburg,* pp. 1263-80. American Society of Engineers (ASCE).
- RYGG, N. 1978. *Dreietrykksondering: Tolkning av sonderingsresultat.* Vegdirektoratet, Veglaboratoriet, Intern rapport nr. 816, Oslo.
- RØMOEN, M., PFAFFHUBER, A. A., KARLSRUD, K. & HELLE, T. E. 2010. Resistivity on marine sediments retrieved from RCPTU soundings: a Norwegian case study. *Proceedings of 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing : CPT'10, Huntington Beach, CA, May 9-11, 2010.*
- SANDVEN, R. 1990. *Strength and deformation properties of fine grained soils obtained from piezocone tests.* Doktor ingeniøravhandling 1990:3, Institutt for geoteknikk, NTH.
- SANDVEN, R. 2010. *Kompendium NTNU: Geoteknikk, felt- og laboratorieundersøkelser.*
- SANDVEN, R. 2013. *Detektering av kvikkleire.* Presentasjon teknologidagene 2013, Naturfareprosjekt - delprosjekt kvikkleire, Norges vassdrags- og energidirektorat.
- SANDVEN, R. 2014. *Personlig kommunikasjon.*
- SANDVEN, R. & MONTAFIA, A. 2014. *Detektering av sprøbruddmateriale ved hjelp av R-CPTU.* Naturfareprosjekt - delprosjekt kvikkleire, Trondheim, Norges vassdrags- og energidirektorat.

- SOLBERG, I.-L., HANSEN, L., RØNNING, J. S. & DALSEGG, E. 2011. *NGU-rapport 2010.048: Veileder for bruk av resistivitetsmålinger i potensielle kvikkleireområder*. Norges Geologiske Undersøkelse.
- SOLBERG, I.-L., HANSEN, L., RØNNING, J. S., HAUGEN, E., DALSEGG, E. & 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*, Vol. 71, Issue 1, pp. 119-133.
- SOLBERG, I.-L., RØNNING, J. S., DALSEGG, E., HANSEN, L., ROKOENGEN, K. & SANDVEN, R. 2008. Resistivity measurements as a tool for outlining quick-clay extent and valley-fill stratigraphy: a feasibility study from Buvika, central Norway. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 45, Issue 2, pp. 210-225.
- THAKUR, V. 2012. *NIFS-rapport 46-2012: Datarapport for kvikkleireskred ved Esp i Byneset i januar 2012*. Norges vassdrags- og energidirektorat, Oslo, Norges vassdrags- og energidirektorat.
- TILAHUN, T. K. 2013. *The identification of quick clay layers from various sounding methods*. Masteroppgave NTNU, Institutt for bygg, anlegg og transport.
- TORRANCE, J. K. 1974. A laboratory investigation of the effect of leaching on the compressibility and shear strength of Norwegian marine clays. *Géotechnique*, Vol 24, Issue 2, pp. 155-173.



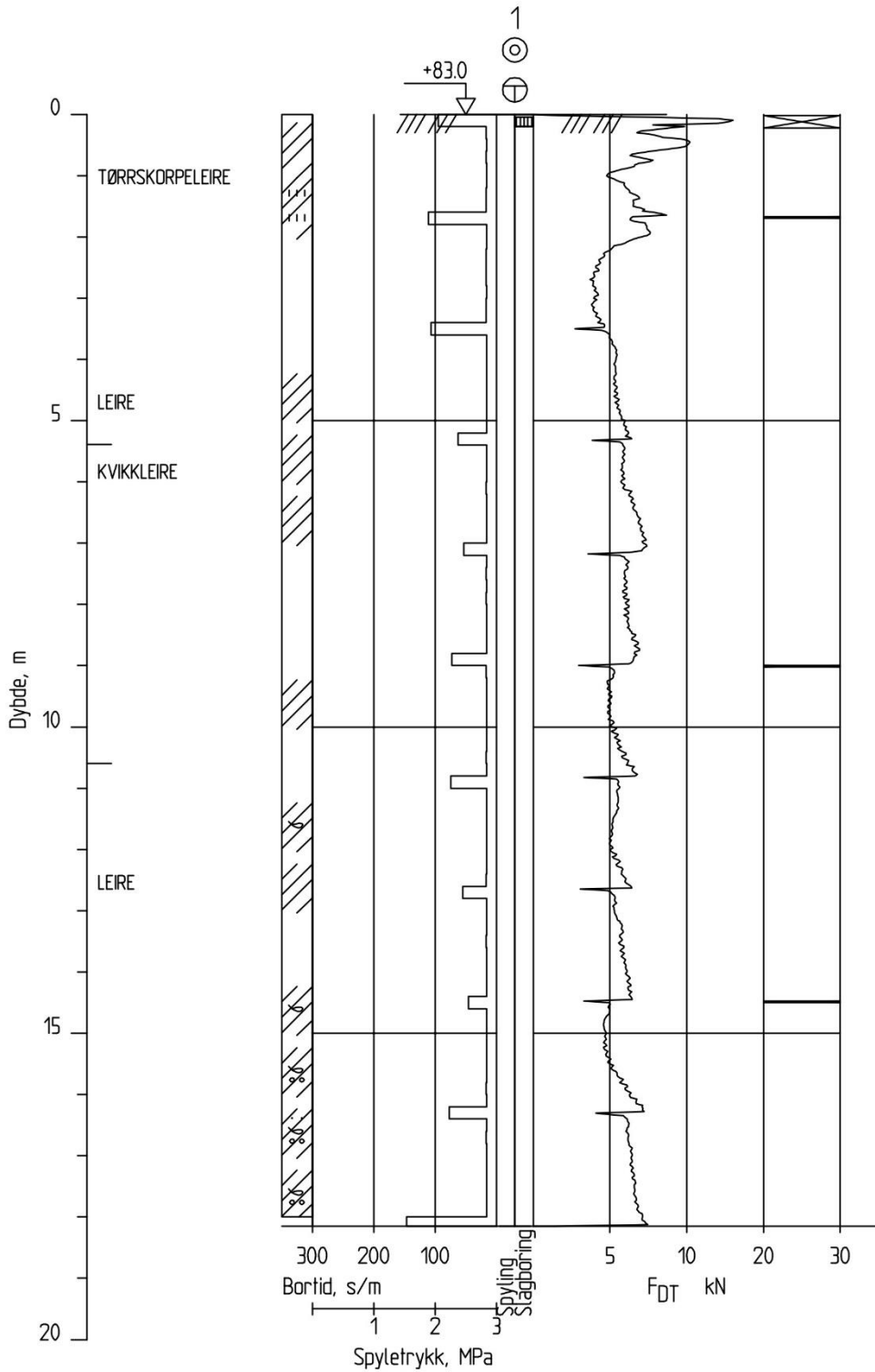


## VEDLEGG A – FELT- OG LABORATORIEDATA ESP, BYNESET

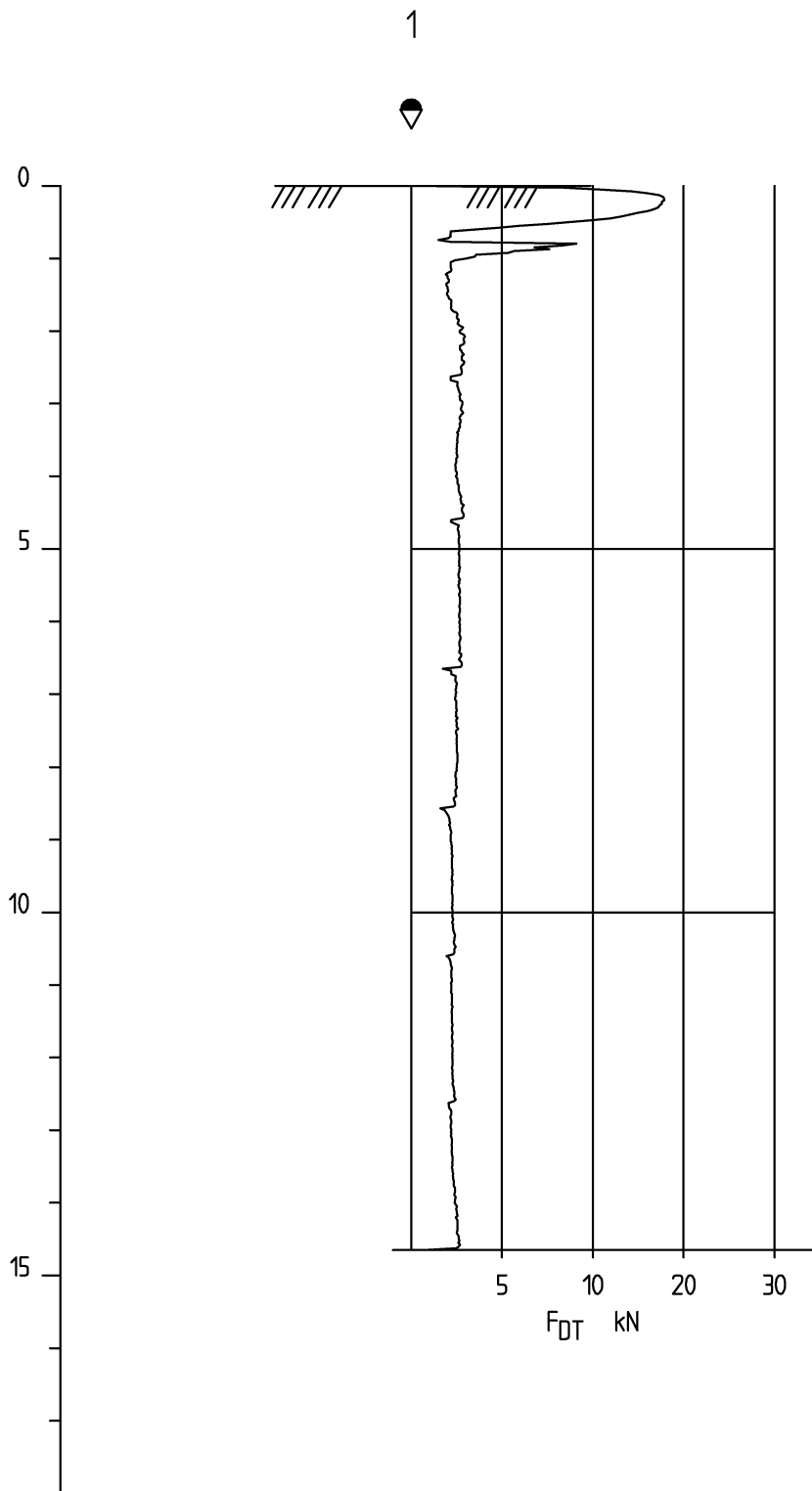
---

A – 1: Totalsondering, pkt.1 .....	76
A – 2: Dreietrykkssondering, pkt. 1 (04.04.2013) .....	77
A – 3: Spissmålinger fra CPTU-sonderinger .....	78
A – 4: Resistivitetsprofiler og saltinnholdsmålinger .....	79
A – 5: R-CPTU(1), pkt. 1, stangfriksjon .....	80
A – 6: R-CPTU (1a), pkt. 1, stangfriksjon .....	81
A – 7: CPTU (1b), pkt. 1, stangfriksjon .....	82
A – 8: CPTU (1c), pkt. 1, stangfriksjon .....	83
A – 9: Kontroll anvendelsesklasse R-CPTU (1), pkt. 1 .....	84
A – 10: Kontroll anvendelsesklasse R-CPTU (1a), pkt. 1 .....	85
A – 11: Kontroll anvendelsesklasse CPTU (1b), pkt. 1 .....	86
A – 12: Kontroll anvendelsesklasse CPTU (1c), pkt. 1 .....	87
A – 13: Laboratorieresultater 2013 (King, 2013) .....	88
A – 14: Borprofil, pkt. 1 .....	89
A – 15: Ødometerforsøk borpunkt 1, lab.nr. 4, dybde 5,65 m .....	90
A – 16: Ødometer krypforsøk borpunkt 1, lab.nr. 6, dybde 9,65 m .....	91
A – 17: Ødometerforsøk borpunkt 1, lab.nr. 8, dybde 12,65 m .....	92
A – 18: Ødometerforsøk borpunkt 1, lab.nr. 10, dybde 15,65 m .....	93
A – 19: Tolkning av overkonsolideringsgrad, Esp .....	94

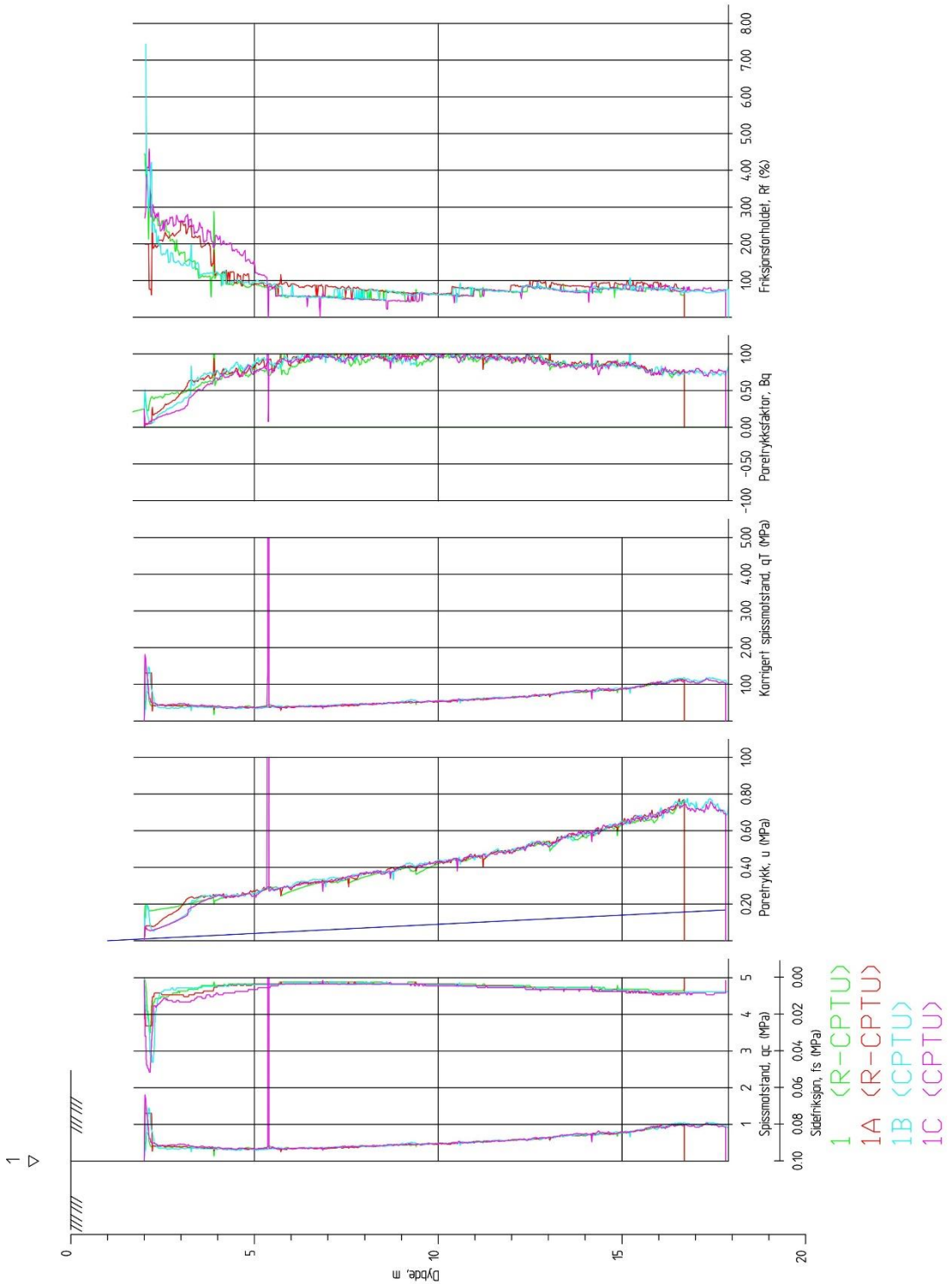
### A – 1: Totalsondering, pkt.1



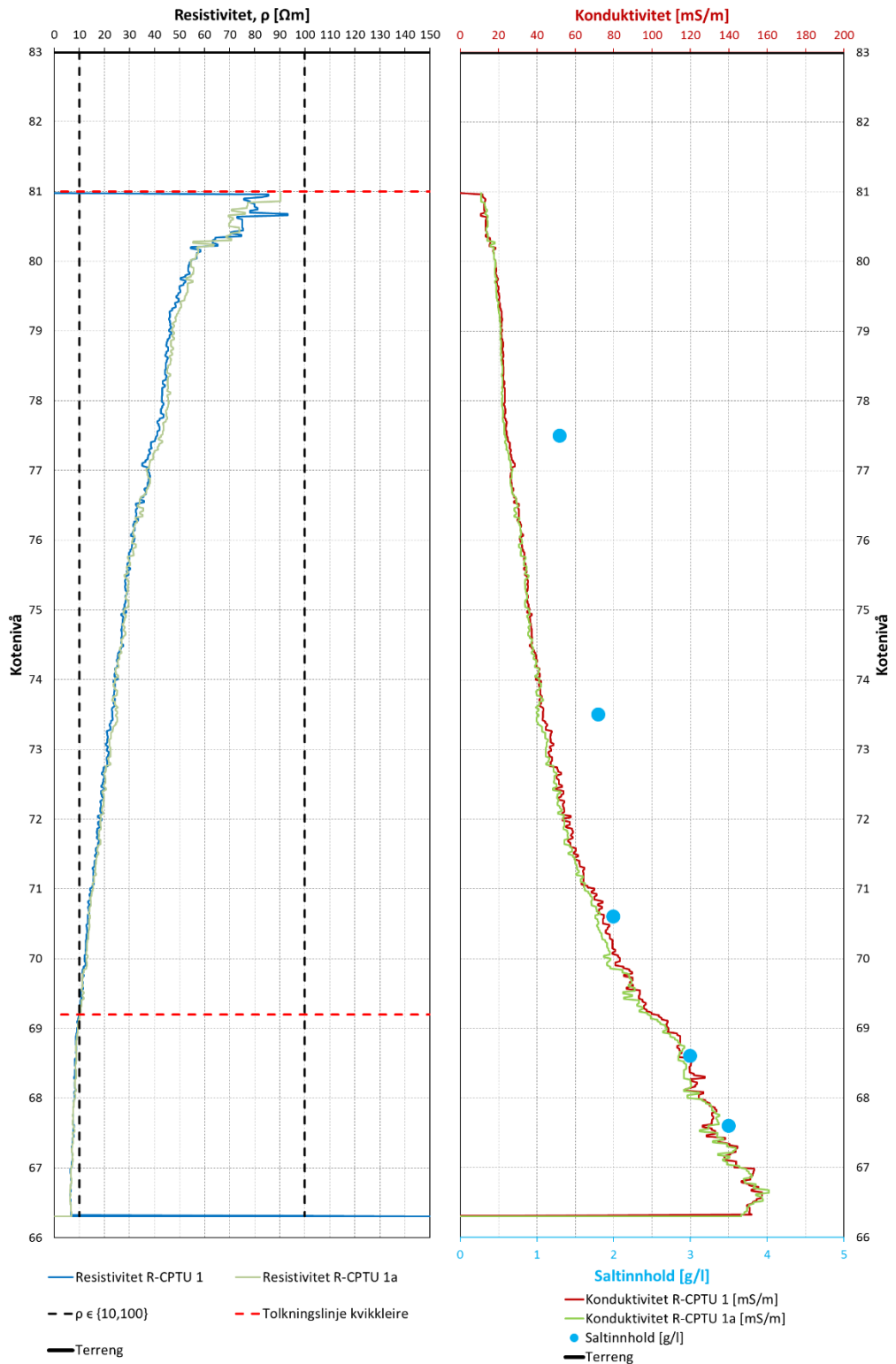
## A – 2: Dreietrykksondering, pkt. 1 (04.04.2013)



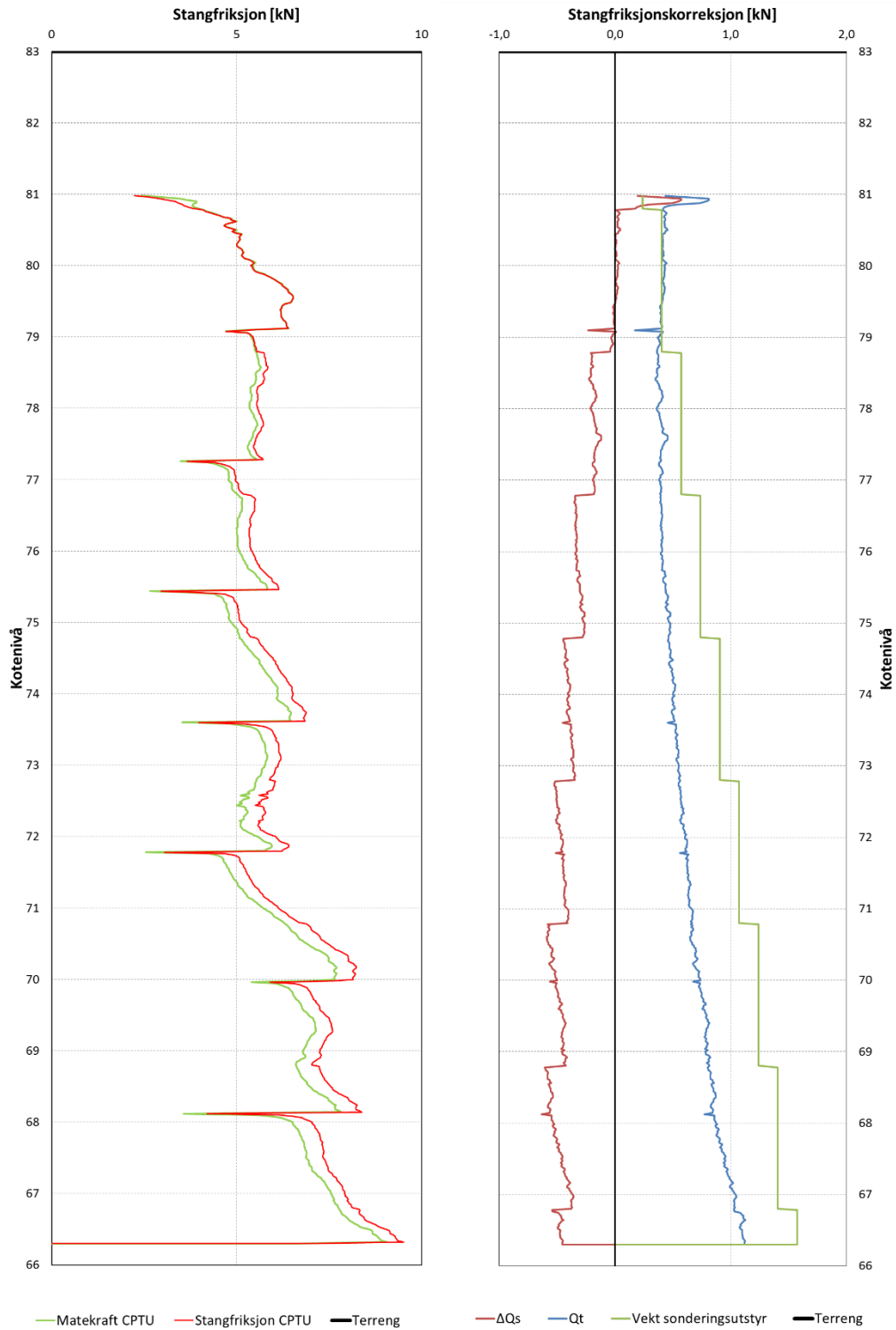
### A – 3: Spissmålinger fra CPTU-sonderinger



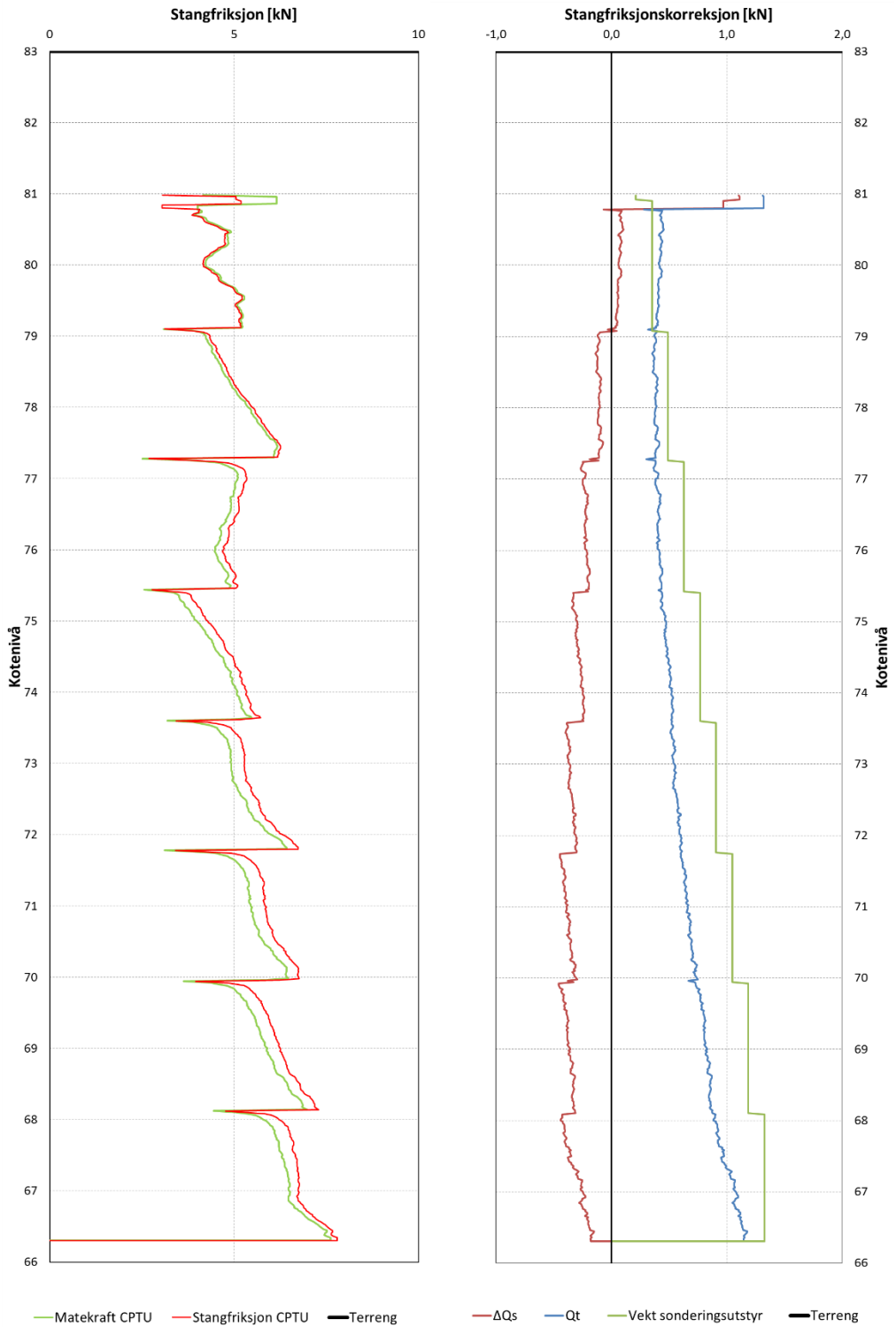
## A – 4: Resistivetsprofiler og saltinnholdsmålinger



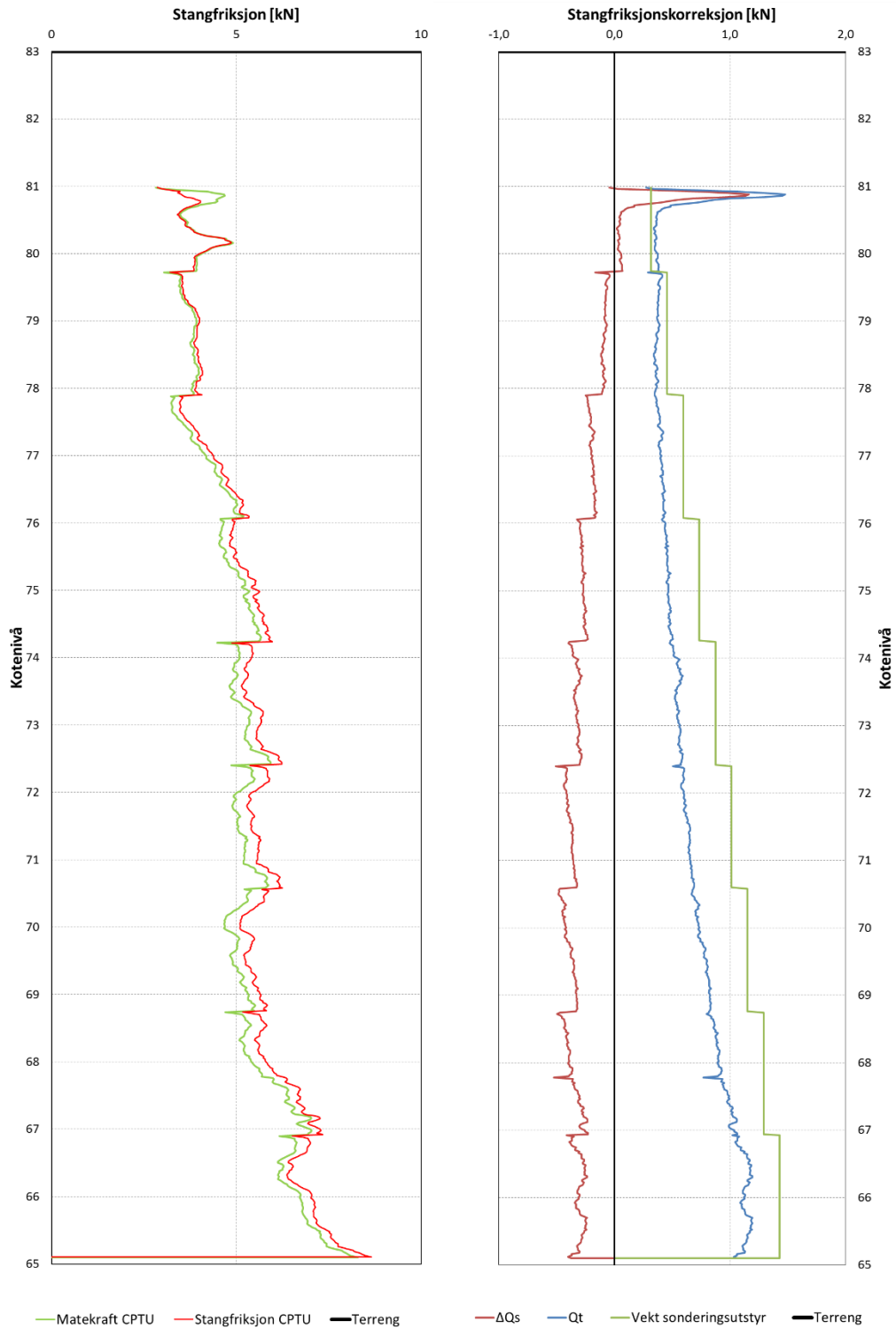
### A – 5: R-CPTU(1), pkt. 1, stangfriksjon



### A – 6: R-CPTU (1a), pkt. 1, stangfriksjon

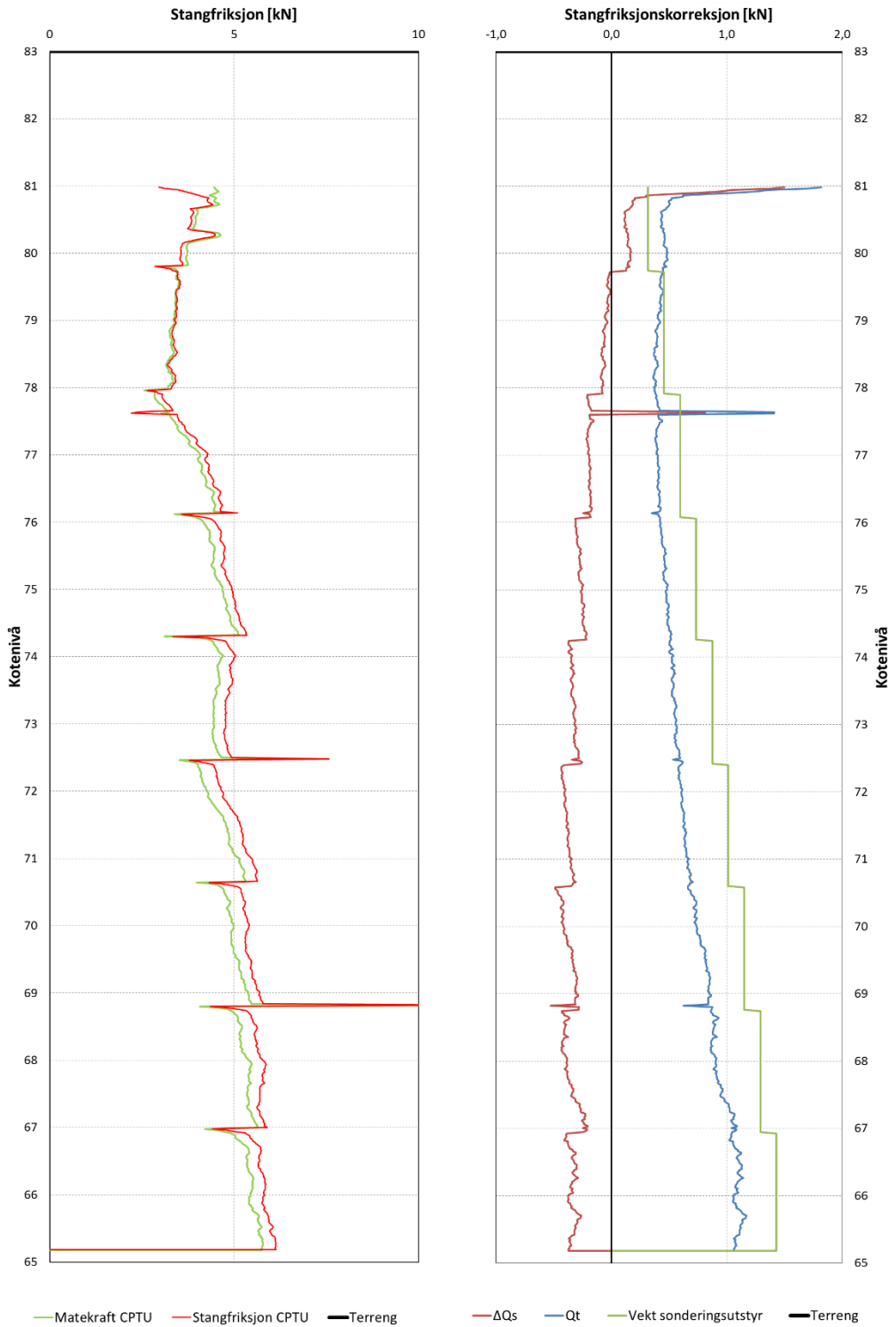


### A – 7: CPTU (1b), pkt. 1, stangfriksjon





### A – 8: CPTU (1c), pkt. 1, stangfriksjon



## A – 9: Kontroll anvendelsesklasse R-CPTU (1), pkt. 1

VURDERING AV ANVENDELSESKLASSE - CPTU			
Sonde nr.:	4492	Oppløsning:	18-bit
SONEDATA			
Arealforhold, a:	0,838	Arealforhold, b:	0
Kalibreringsdato:	15.04.2013		
EGENSKAP (fra kaliberingsark)	SPISSMOTSTAND	SIDEFRIKSJON	PORETRYKK
Maksimum spenning [MPa]	50	0,5	2
Måleområde [MPa]:	50	0,5	2
Oppløsning 12-bit [kPa]:	-	-	-
Oppløsning 18-bit [kPa]:	0,5745	0,0102	0,0226
Max. temp.effekt, ubelastet [kPa]:	49,407	1,0098	0,5424
Temperaturområde [°C]:	0-40	0-40	0-40
UTFØRELSE			
Borpunkt nr.:	1	Sondetemperatur start [°C]:	1,5
Max. helning [°]:	2,1	Sondetemperatur slutt [°C]:	6,8
Avstand mellom målinger [mm]:	20		
MÅLEVARIALE			
EGENSKAP	SPISSMOTSTAND	SIDEFRIKSJON	PORETRYKK
Maksimal temperatureffekt [kPa]:	6,5464	0,1338	0,0719
NULLPUNKTKONTROLL			
FAKTOR	NA (q)	NB (f)	NC (u)
Avvik [MPa/kPa/kPa]:	0,0097	-0,4	-1,4
VURDERING AV ANVENDELSESKLASSE			
MÅLESTØRRELSE	SPISSMOTSTAND	SIDEFRIKSJON	PORETRYKK
Samlet nøyaktighet, $\Delta_{TOT}$ [kPa]:	16,8209	0,5440	1,4945
Tillatt nøyaktighet A1, $\Delta_1$ [kPa]:	35	5	10
Tillatt nøyaktighet A2, $\Delta_2$ [kPa]:	100	15	25
Tillatt nøyaktighet A3, $\Delta_3$ [kPa]:	200	25	50
ANVENDELSESKLASSE:	1	1	1
Borested:		Borpunkt	Anvendelsesklasse
<b>Esp, Byneset</b>		<b>1</b>	<b>1</b>

**A – 10: Kontroll anvendelsesklasse R-CPTU (1a), pkt. 1**

VURDERING AV ANVENDELSESKLASSE - CPTU			
Sonde nr.:	4492	Opplysning:	18-bit
SONEDATA			
Arealforhold, a:	0,838	Arealforhold, b:	0
Kalibreringsdato:	15.04.2013		
EGENSKAP (fra kalibreringsark)	SPISSMOTSTAND	SIDEFRIKSJON	PORETRYKK
Maksimum spenning [MPa]	50	0,5	2
Måleområde [MPa]:	50	0,5	2
Opplysning 12-bit [kPa]:	-	-	-
Opplysning 18-bit [kPa]:	0,5745	0,0102	0,0226
Max. temp. effekt, ubelastet [kPa]:	49,407	1,0098	0,5424
Temperaturområde [°C]:	0-40	0-40	0-40
UTFØRELSE			
Borpunkt nr.:	1a	Sondetemperatur start [°C]:	1,7
Max. helning [°]:	2,38	Sondetemperatur slutt [°C]:	6,7
Avstand mellom målinger [mm]:	20		
MÅLEVARIALE			
EGENSKAP	SPISSMOTSTAND	SIDEFRIKSJON	PORETRYKK
Maksimal temperatureffekt [kPa]:	6,1759	0,1262	0,0678
NULLPUNKTKONTROLL			
FAKTOR	NA (q)	NB (f)	NC (u)
Avvik [MPa/kPa/kPa]:	0,0133	-0,3	-1,9
VURDERING AV ANVENDELSESKLASSE			
MÅLESTØRRELSE	SPISSMOTSTAND	SIDEFRIKSJON	PORETRYKK
Samlet nøyaktighet, $\Delta_{TOT}$ [kPa]:	20,0504	0,4364	1,9904
Tillatt nøyaktighet A1, $\Delta_1$ [kPa]:	35	5	10
Tillatt nøyaktighet A2, $\Delta_2$ [kPa]:	100	15	25
Tillatt nøyaktighet A3, $\Delta_3$ [kPa]:	200	25	50
ANVENDELSESKLASSE:	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>
Borested:		Borpunkt	Anvendelsesklasse
<b>Esp, Byneset</b>		<b>1a</b>	<b>1</b>

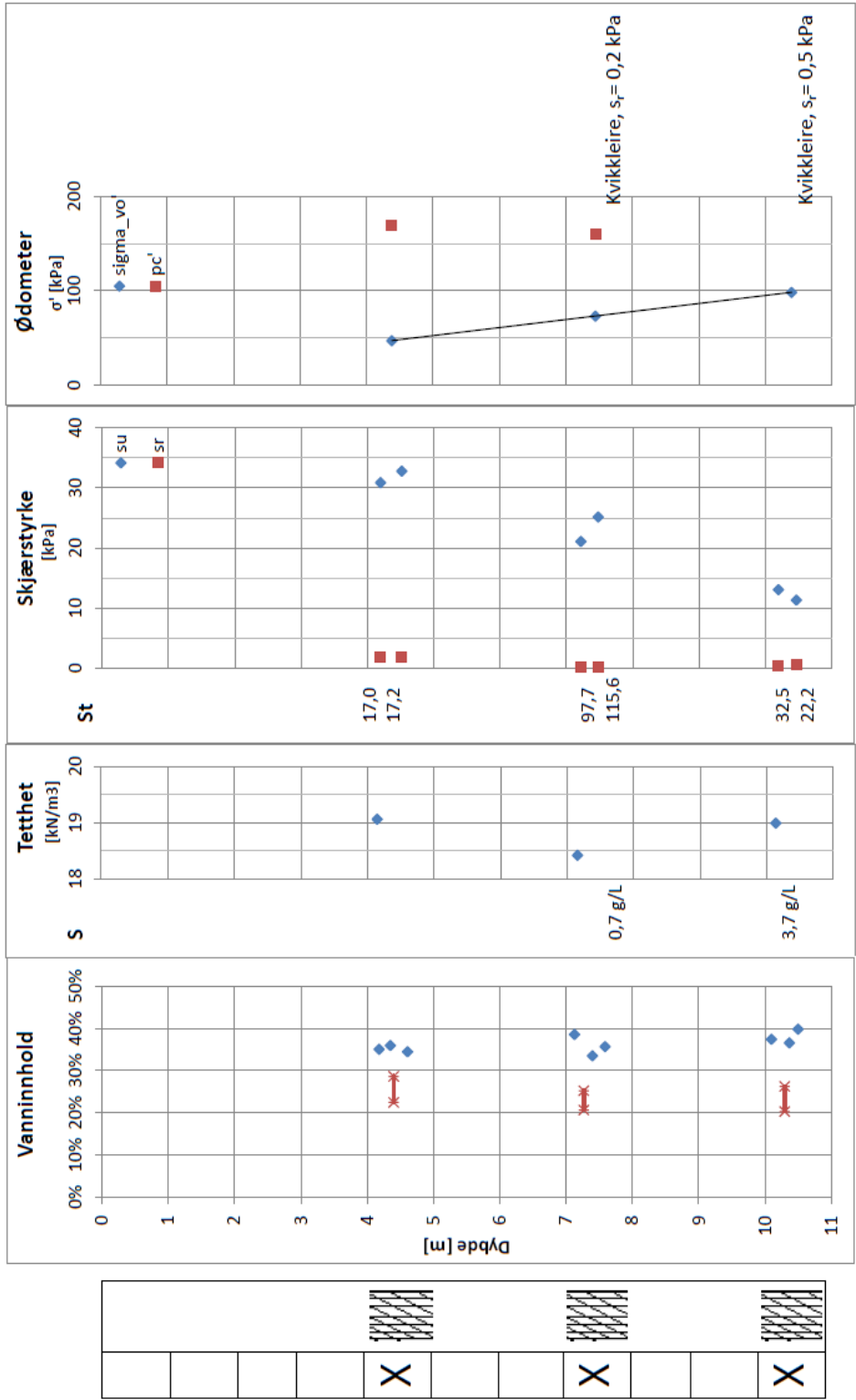
## A – 11: Kontroll anvendelsesklasse CPTU (1b), pkt. 1

VURDERING AV ANVENDELSESKLASSE - CPTU			
Sonde nr.:	4492	Oppløsning:	18-bit
SONEDATA			
Arealforhold, a:	0,838	Arealforhold, b:	0
Kalibreringsdato:	15.04.2013		
EGENSKAP (fra kalibreringsark)	SPISSMOTSTAND	SIDEFRIKSJON	PORETRYKK
Maksimum spenning [MPa]	50	0,5	2
Måleområde [MPa]:	50	0,5	2
Oppløsning 12-bit [kPa]:	-	-	-
Oppløsning 18-bit [kPa]:	0,5745	0,0102	0,0226
Max. temp.effekt, ubelastet [kPa]:	49,407	1,0098	0,5424
Temperaturområde [°C]:	0-40	0-40	0-40
UTFØRELSE			
Borpunkt nr.:	1b	Sondetemperatur start [°C]:	1,5
Max. helning [°]:	0,68	Sondetemperatur slutt [°C]:	6,7
Avstand mellom målinger [mm]:	20		
MÅLEVARIALE			
EGENSKAP	SPISSMOTSTAND	SIDEFRIKSJON	PORETRYKK
Maksimal temperatureffekt [kPa]:	6,4229	0,1313	0,0705
NULLPUNKTKONTROLL			
FAKTOR	NA (q)	NB (f)	NC (u)
Avvik [MPa/kPa/kPa]:	0,0109	-0,7	1,4
VURDERING AV ANVENDELSESKLASSE			
MÅLESTØRRELSE	SPISSMOTSTAND	SIDEFRIKSJON	PORETRYKK
Samlet nøyaktighet, $\Delta_{TOT}$ [kPa]:	17,8974	0,8415	1,4931
Tillatt nøyaktighet A1, $\Delta_1$ [kPa]:	35	5	10
Tillatt nøyaktighet A2, $\Delta_2$ [kPa]:	100	15	25
Tillatt nøyaktighet A3, $\Delta_3$ [kPa]:	200	25	50
ANVENDELSESKLASSE:	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>
Borested:		Borpunkt	Anvendelsesklasse
<b>Esp, Byneset</b>		<b>1b</b>	<b>1</b>

**A – 12: Kontroll anvendelsesklasse CPTU (1c), pkt. 1**

VURDERING AV ANVENDELSESKLASSE - CPTU			
Sonde nr.:	4492	Oppløsning:	18-bit
SONEDATA			
Arealforhold, a:	0,838	Arealforhold, b:	0
Kalibreringsdato:	15.04.2013		
EGENSKAP (fra kalibreringsark)	SPISSMOTSTAND	SIDEFRIKSJON	PORETRYKK
Maksimum spenning [MPa]	50	0,5	2
Måleområde [MPa]:	50	0,5	2
Oppløsning 12-bit [kPa]:	-	-	-
Oppløsning 18-bit [kPa]:	0,5745	0,0102	0,0226
Max. temp. effekt, ubelastet [kPa]:	49,407	1,0098	0,5424
Temperaturområde [°C]:	0-40	0-40	0-40
UTFØRELSE			
Borpunkt nr.:	1c	Sondetemperatur start [°C]:	1,8
Max. helning [°]:	1,51	Sondetemperatur slutt [°C]:	6,7
Avstand mellom målinger [mm]:	20		
MÅLEVARIALE			
EGENSKAP	SPISSMOTSTAND	SIDEFRIKSJON	PORETRYKK
Maksimal temperatureffekt [kPa]:	6,0524	0,1237	0,0664
NULLPUNKTKONTROLL			
FAKTOR	NA (q)	NB (f)	NC (u)
Avvik [MPa/kPa/kPa]:	0	-0,3	0,8
VURDERING AV ANVENDELSESKLASSE			
MÅLESTØRRELSE	SPISSMOTSTAND	SIDEFRIKSJON	PORETRYKK
Samlet nøyaktighet, $\Delta_{TOT}$ [kPa]:	6,6269	0,4339	0,8890
Tillatt nøyaktighet A1, $\Delta_k$ [kPa]:	35	5	10
Tillatt nøyaktighet A2, $\Delta_k$ [kPa]:	100	15	25
Tillatt nøyaktighet A3, $\Delta_k$ [kPa]:	200	25	50
ANVENDELSESKLASSE:	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>
Borested:		Borpunkt	Anvendelsesklasse
<b>Esp, Byneset</b>		<b>1c</b>	<b>1</b>

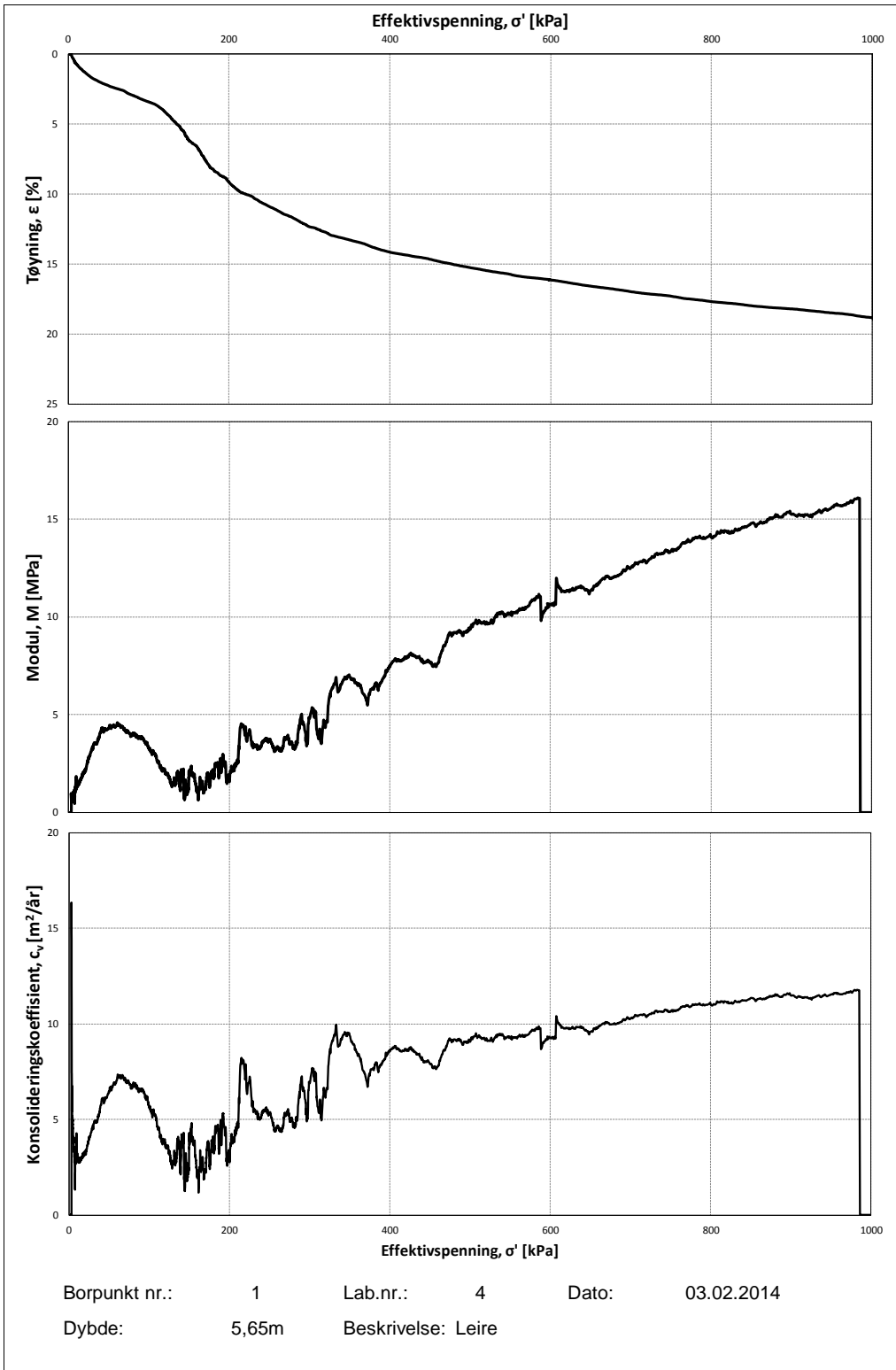
**A – 13: Laboratorieresultater 2013 (King, 2013)**



Esp, Byneset Koordinater: 556787 (UTM)	Hull NTNU 2 7029902, 556787 (UTM)	Prøvetaker: 54 mm stålsylinder Utført våren 2013, i forbindelse med masteroppgave	Forsøk utført av: Jeremy Raymond King, ved NTNU
--	---	---	---

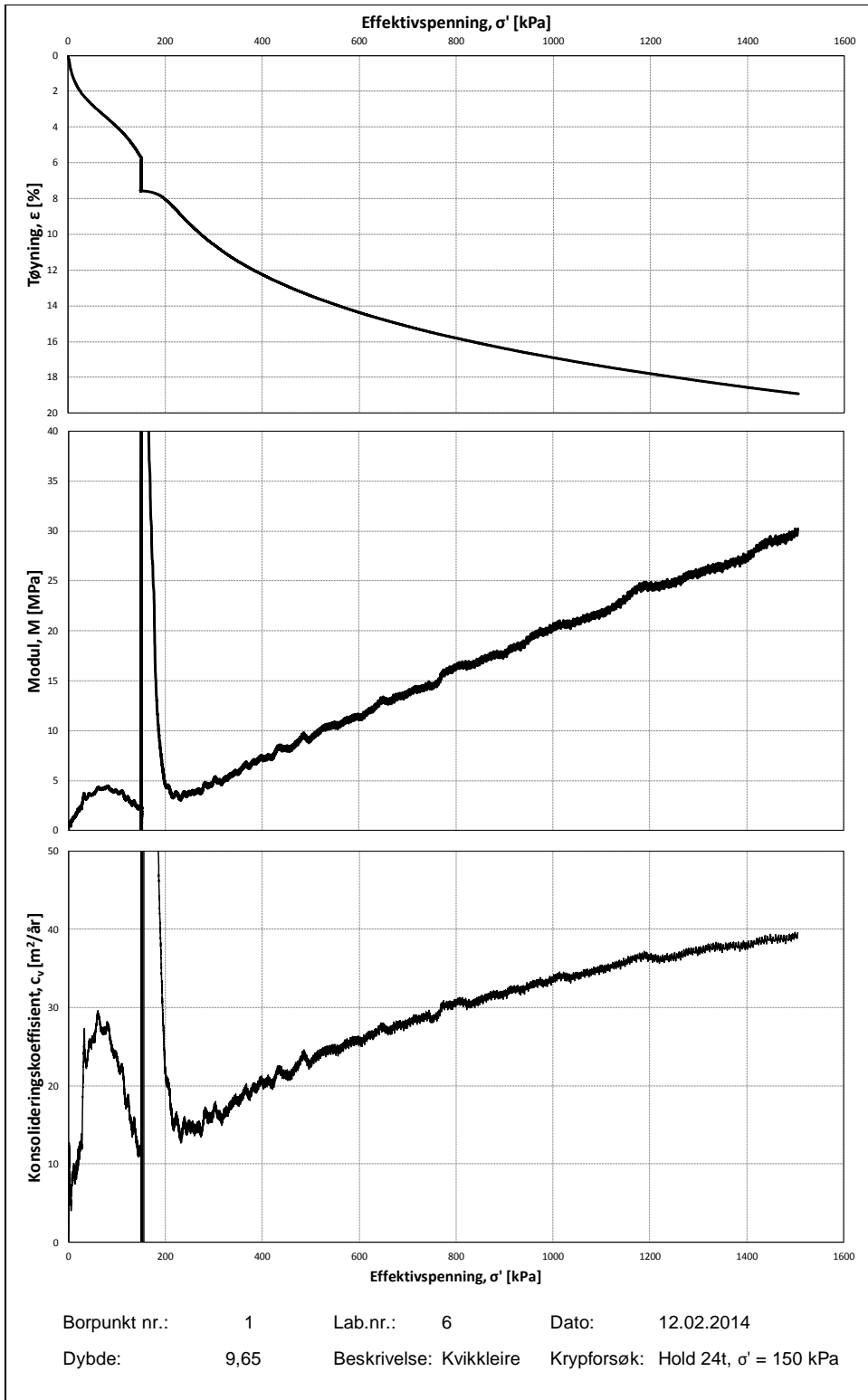


### A – 15: Ødometerforsøk borpunkt 1, lab.nr. 4, dybde 5,65 m

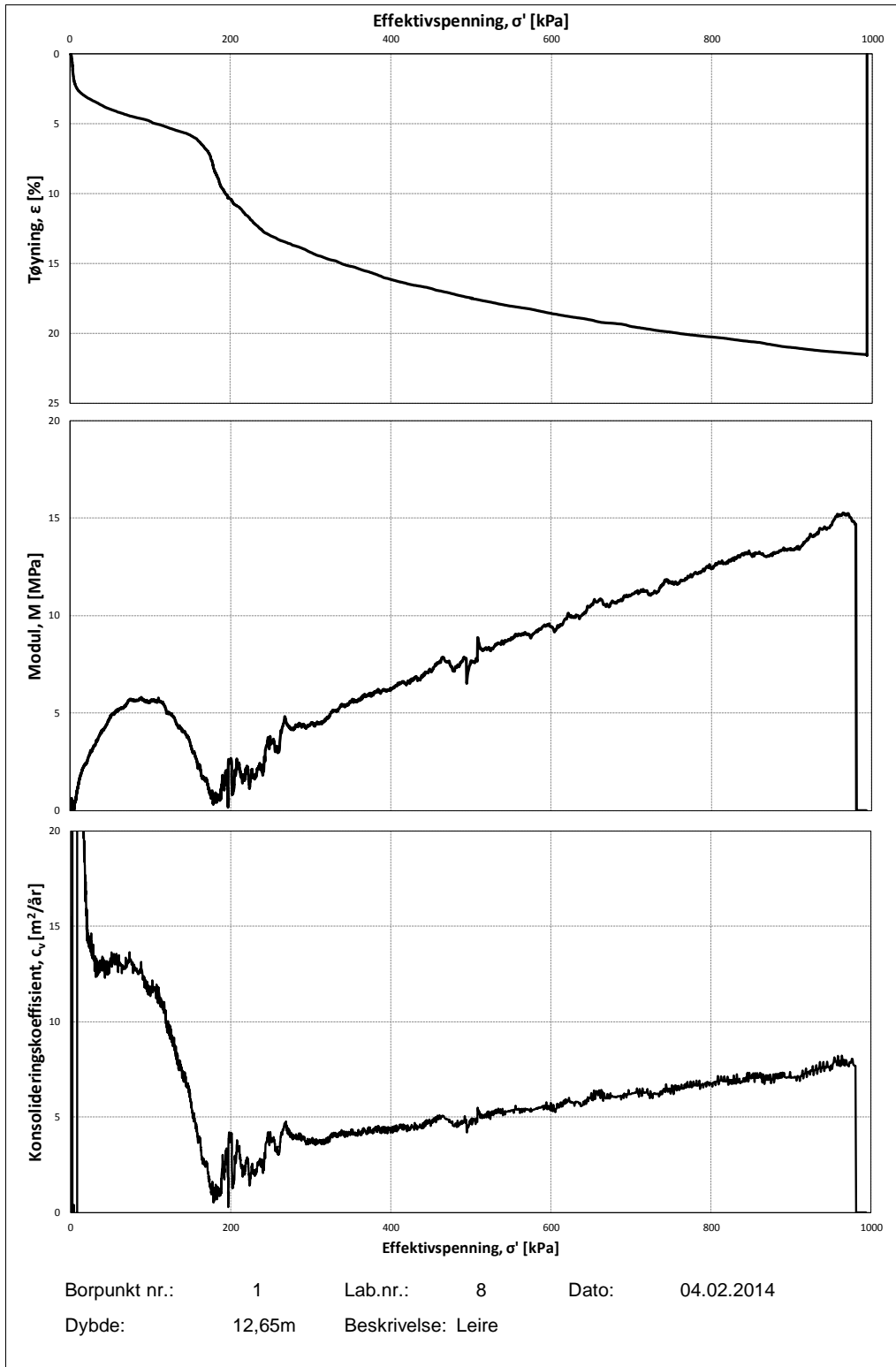




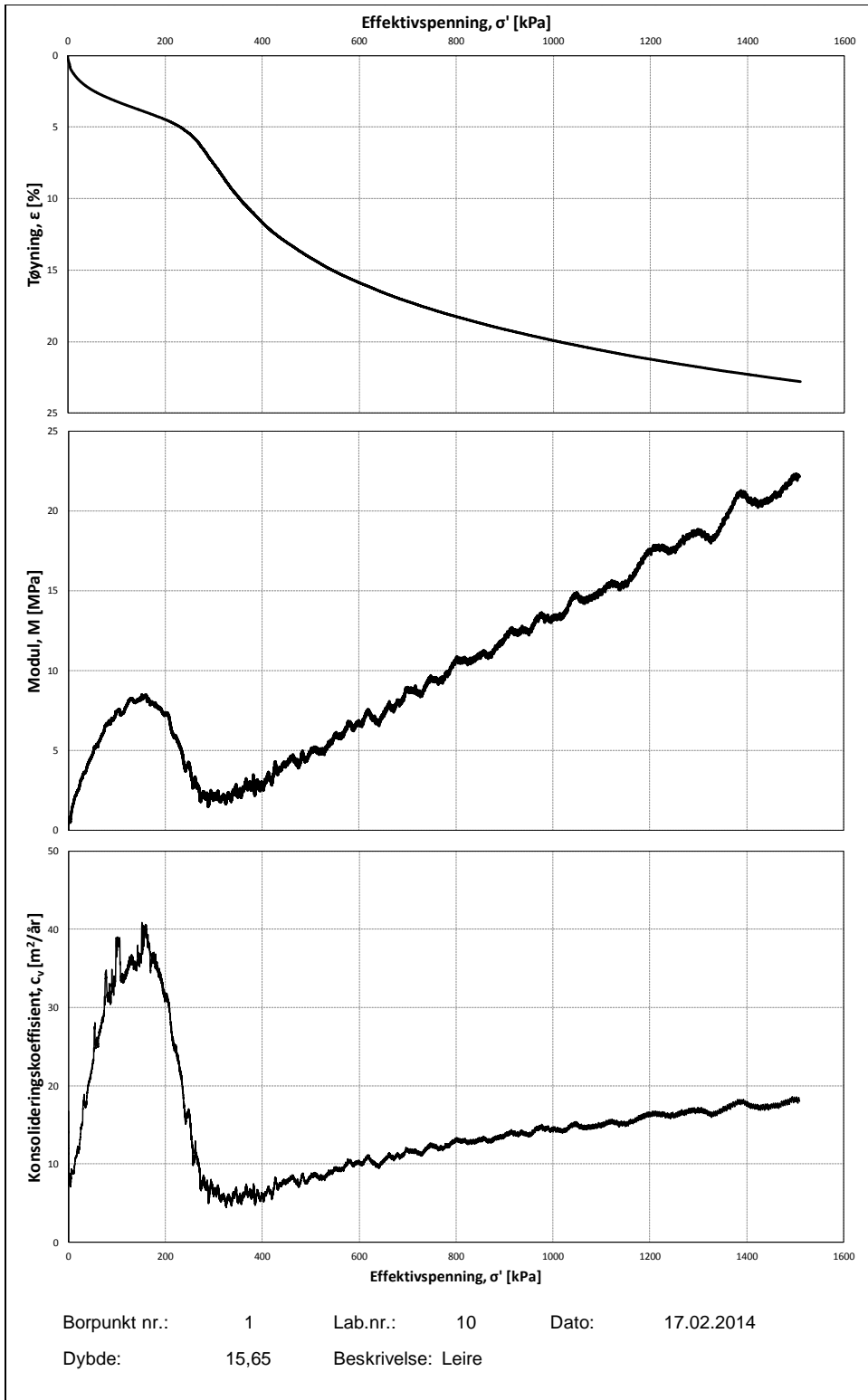
### A – 16: Ødometer krypforsøk borpunkt 1, lab.nr. 6, dybde 9,65 m



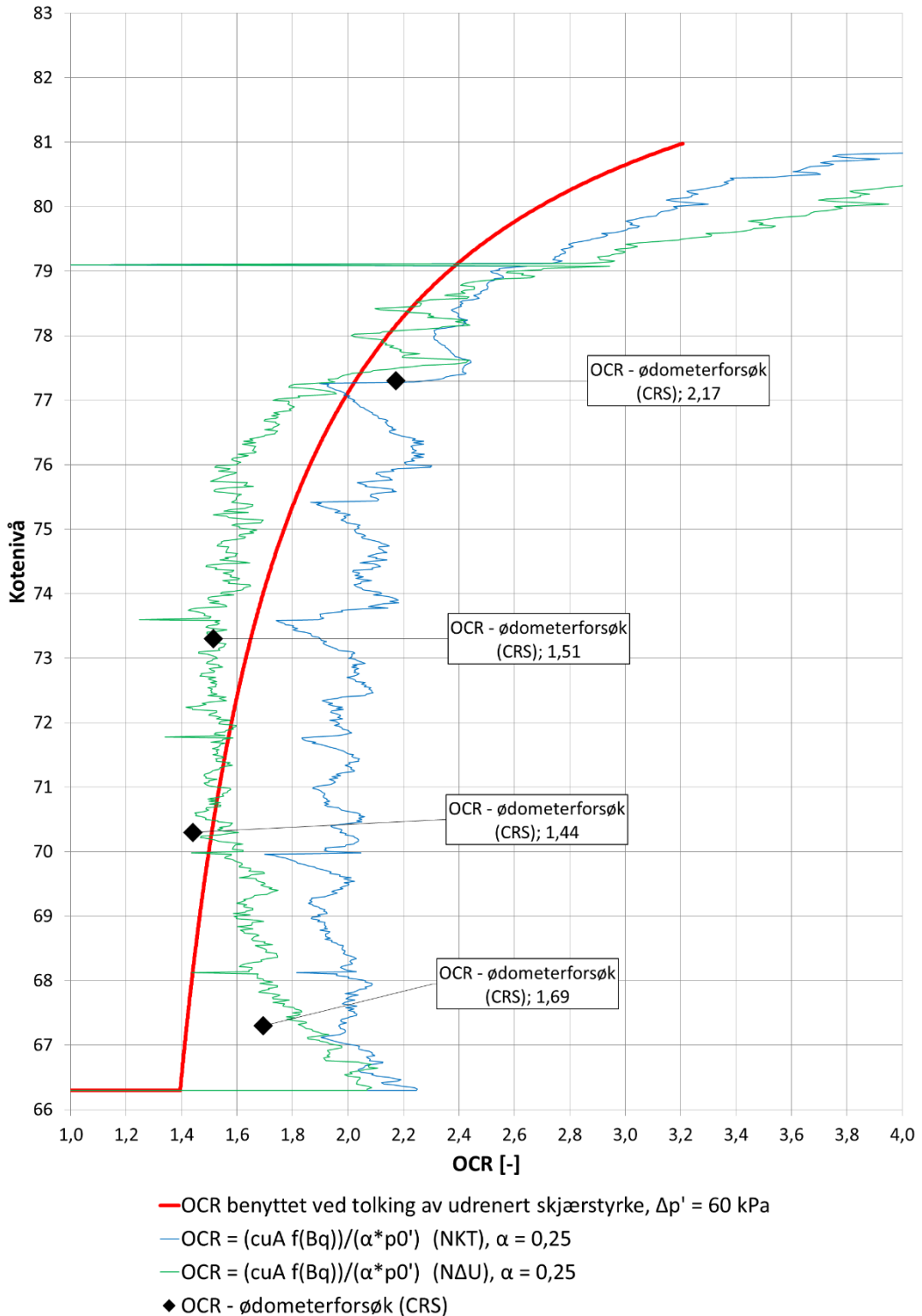
### A – 17: Ødometerforsøk borpunkt 1, lab.nr. 8, dybde 12,65 m



A – 18: Ødometerforsøk borpunkt 1, lab.nr. 10, dybde 15,65 m



### A – 19: Tolkning av overkonsolideringsgrad, Esp

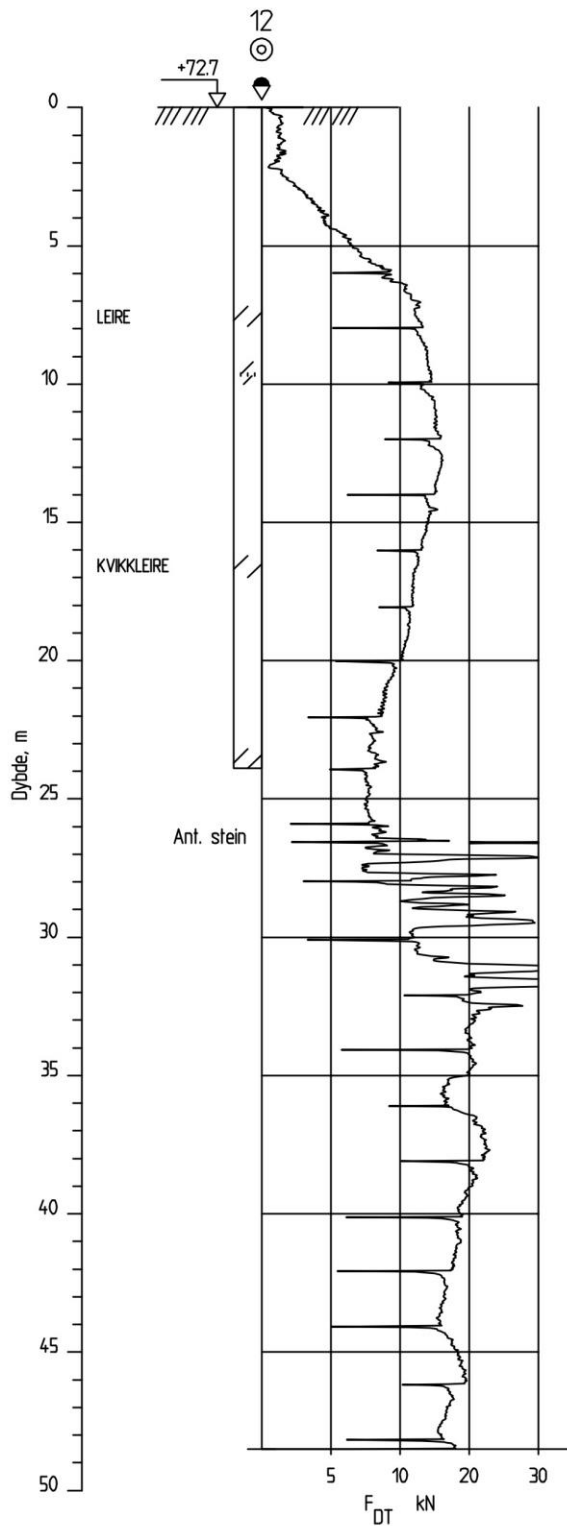


## VEDLEGG B – FELT- OG LABORATORIEDATA NIDARVOLL

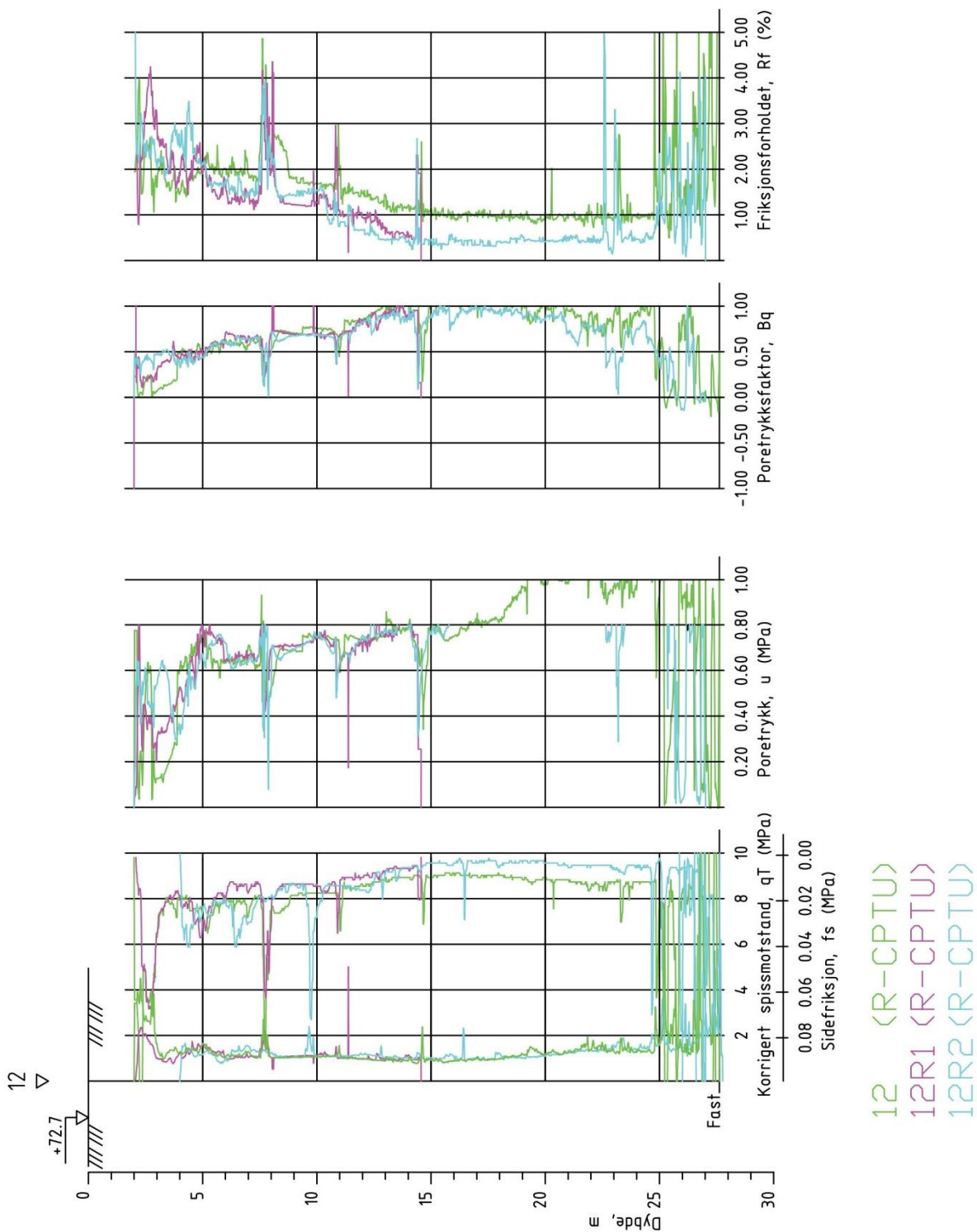
---

<b>B – 1: Dreietrykkssondering, pkt. 12 (10.06.2009)</b> .....	96
<b>B – 2: Spissmålinger fra CPTU-sonderinger</b> .....	97
<b>B – 3: R-Resistivetsprofiler og saltinnholdsmålinger</b> .....	98
<b>B – 4: R-CPTU (12R1), pkt. 12, stangfriksjon</b> .....	99
<b>B – 5: R-CPTU (12R2), pkt. 12, stangfriksjon</b> .....	100
<b>B – 6: CPTU (12), pkt. 12, stangfriksjon</b> .....	101
<b>B – 7: Kontroll anvendelsesklasse R-CPTU (12R1), pkt. 12</b> .....	102
<b>B – 8: Kontroll anvendelsesklasse R-CPTU (12R2), pkt. 12</b> .....	103
<b>B – 9: Kontroll anvendelsesklasse CPTU (12), pkt. 12</b> .....	104
<b>B – 10: Borprofil, pkt. 12</b> .....	105
<b>B – 11: Ødometerforsøk borpunkt 12, lab.nr. 10, dybde 7,50 m</b> .....	106
<b>B – 12: Ødometerforsøk borpunkt 12, lab.nr. 12, dybde 16,55 m</b> .....	107
<b>B – 13: Tolkning av overkonsolideringsgrad, Nidarvoll</b> .....	108

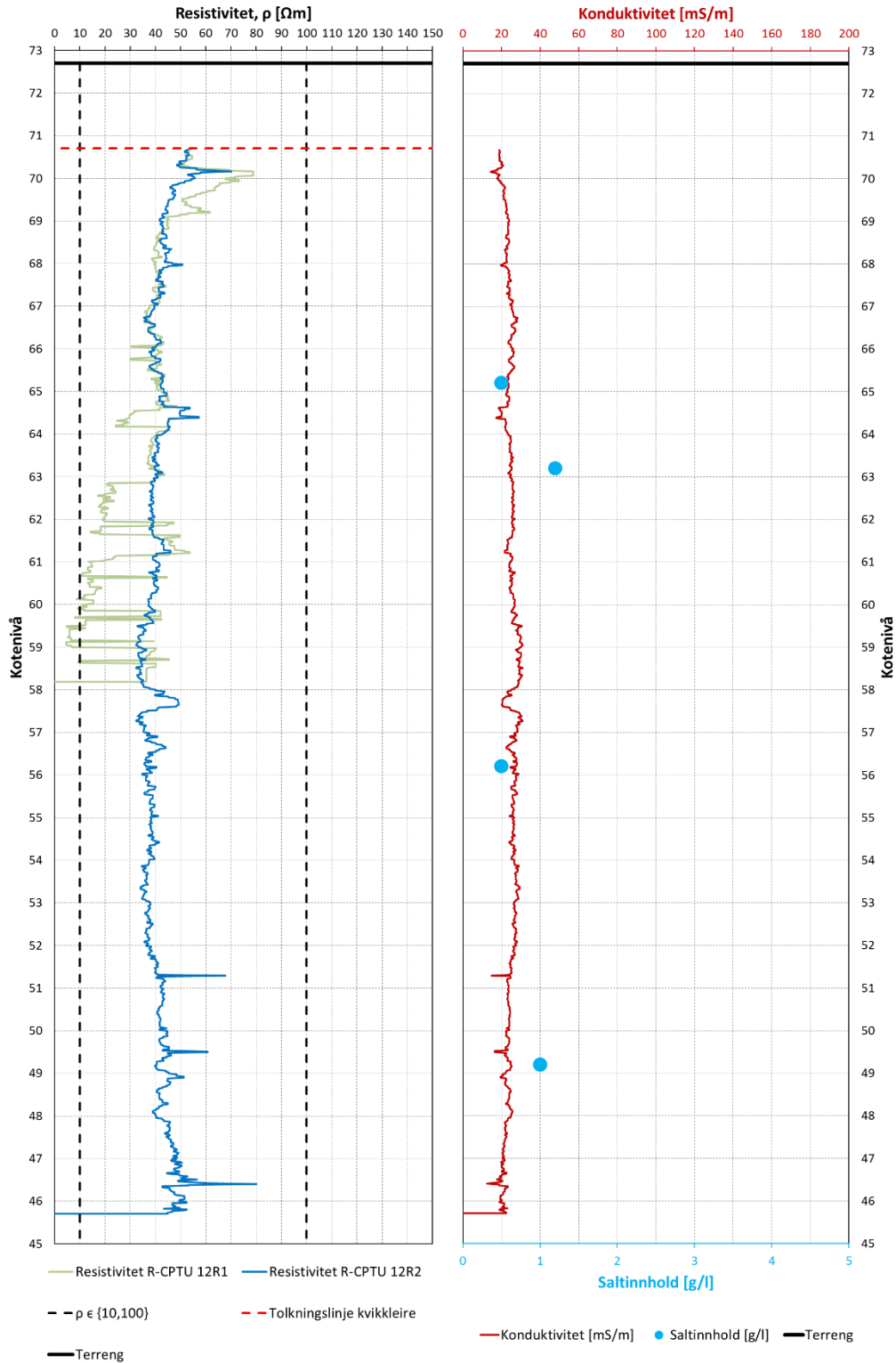
### B – 1: Dreietrykkssondering, pkt. 12 (10.06.2009)



## B – 2: Spissmålinger fra CPTU-sonderinger

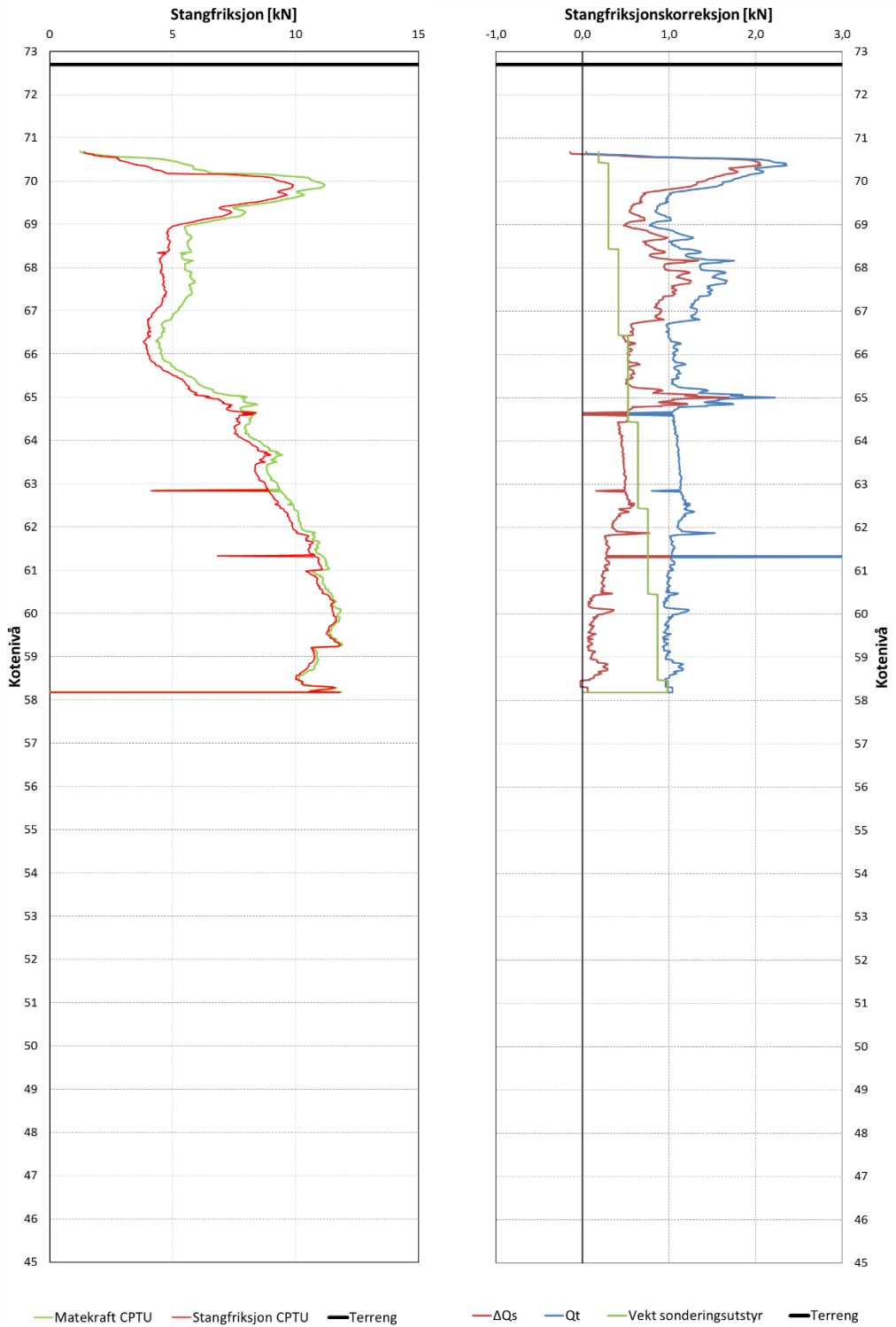


### B – 3: R-Resistivetsprofiler og saltinnholdsmålinger

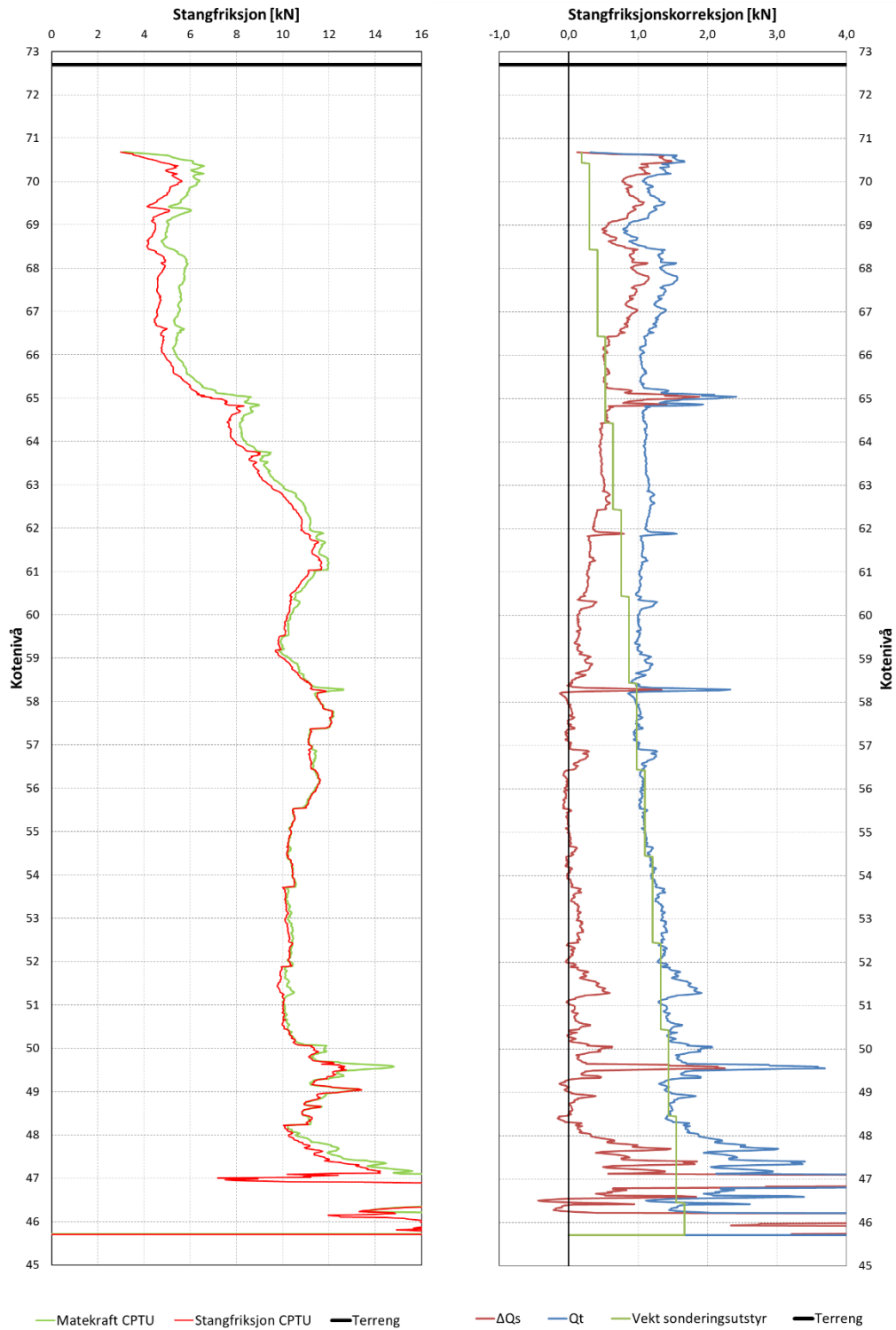




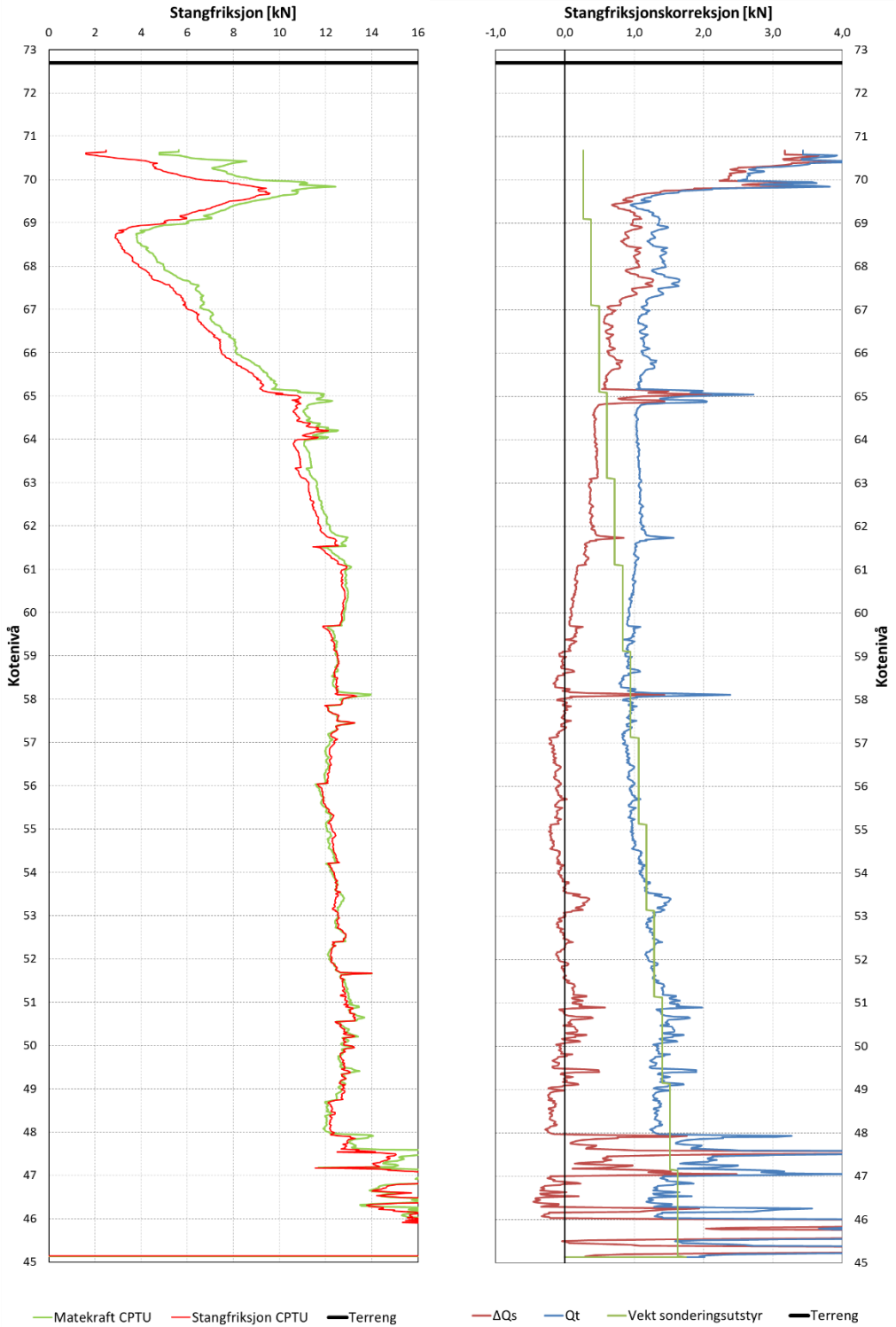
### B – 4: R-CPTU (12R1), pkt. 12, stangfriksjon



### B – 5: R-CPTU (12R2), pkt. 12, stangfriksjon



### B – 6: CPTU (12), pkt. 12, stangfriksjon



## B – 7: Kontroll anvendelsesklasse R-CPTU (12R1), pkt. 12

VURDERING AV ANVENDELSESKLASSE - CPTU			
Sonde nr.:	4492	Oppløsning:	18-bit
SONDEDATA			
Arealforhold, a:	0,838	Arealforhold, b:	0
Kalibreringsdato:	15.04.2013		
EGENSKAP (fra kaliberingsark)	SPISSMOTSTAND	SIDEFRIKSJON	PORETRYKK
Maksimum spenning [MPa]	50	0,5	2
Måleområde [MPa]:	50	0,5	2
Oppløsning 12-bit [kPa]:	-	-	-
Oppløsning 18-bit [kPa]:	0,5745	0,0102	0,0226
Max. temp. effekt, ubelastet [kPa]:	49,407	1,0098	0,5424
Temperaturområde [°C]:	0-40	0-40	0-40
UTFØRELSE			
Borpunkt nr.:	12R1	Sondetemperatur start [°C]:	12
Max. helning [°]:	29,51	Sondetemperatur slutt [°C]:	7,4
Avstand mellom målinger [mm]:	20		
MÅLEVARIALE			
EGENSKAP	SPISSMOTSTAND	SIDEFRIKSJON	PORETRYKK
Maksimal temperatureffekt [kPa]:	5,6818	0,1161	0,0624
NULLPUNKTKONTROLL			
FAKTOR	NA (q)	NB (f)	NC (u)
Avvik [MPa/kPa/kPa]:	-0,0121	0,1	-0,6
VURDERING AV ANVENDELSESKLASSE			
MÅLESTØRRELSE	SPISSMOTSTAND	SIDEFRIKSJON	PORETRYKK
Samlet nøyaktighet, $\Delta_{\text{TOT}}$ [kPa]:	18,3563	0,2263	0,6850
Tillatt nøyaktighet A1, $\Delta_1$ [kPa]:	35	5	10
Tillatt nøyaktighet A2, $\Delta_2$ [kPa]:	100	15	25
Tillatt nøyaktighet A3, $\Delta_3$ [kPa]:	200	25	50
ANVENDELSESKLASSE:	1	1	1
Borested:		Borpunkt	Anvendelsesklasse
<b>Nidarvoll</b>		<b>12R1</b>	<b>For stor helning</b>

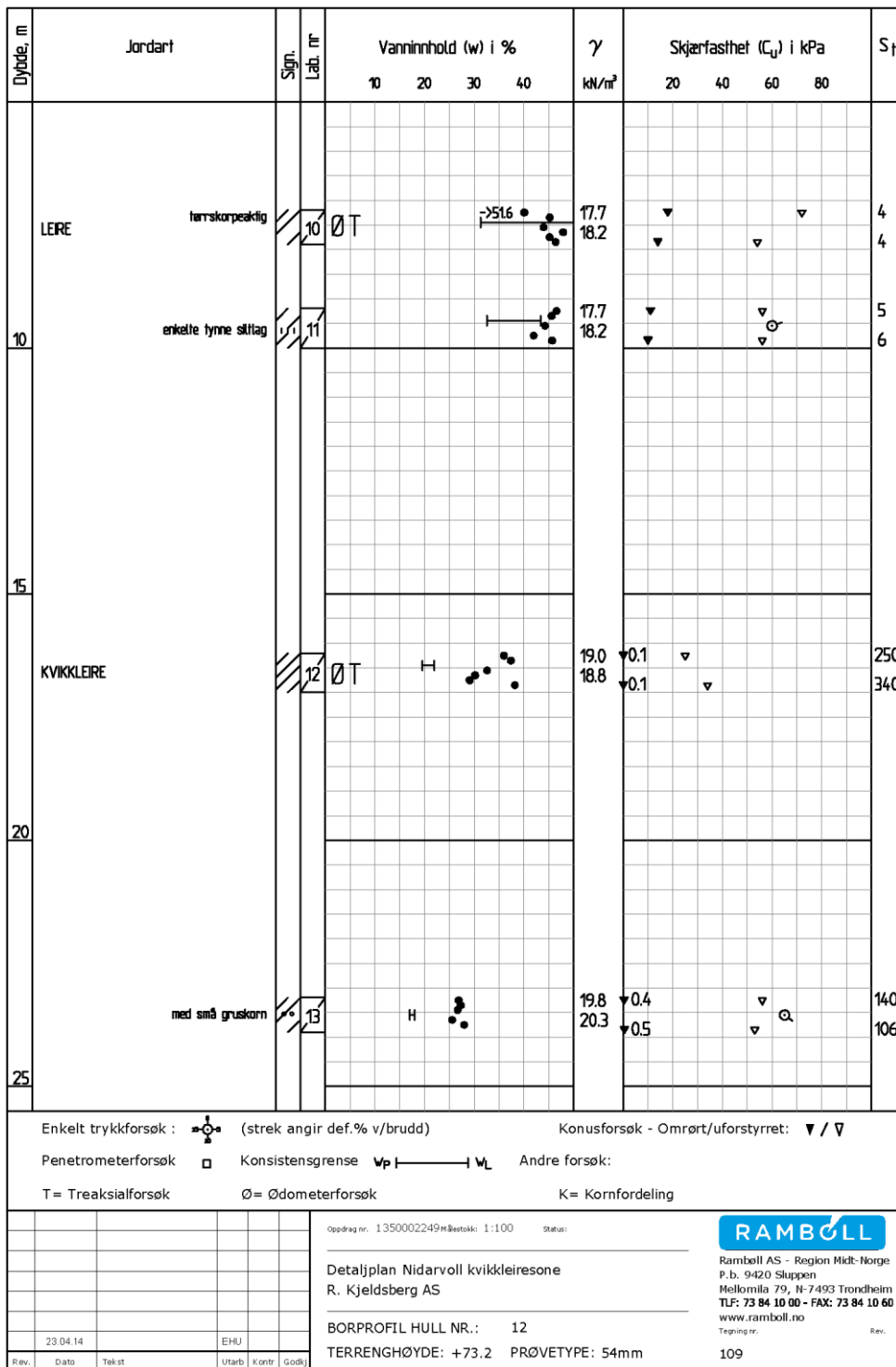
**B – 8: Kontroll anvendelsesklasse R-CPTU (12R2), pkt. 12**

VURDERING AV ANVENDELSESKLASSE - CPTU			
Sonde nr.:	4492	Oppløsning:	18-bit
SONEDATA			
Arealforhold, a:	0,838	Arealforhold, b:	0
Kalibreringsdato:	15.04.2013		
EGENSKAP (fra kalibreringsark)	SPISSMOTSTAND	SIDEFRIKSJON	PORETRYKK
Maksimum spenning [MPa]	50	0,5	2
Måleområde [MPa]:	50	0,5	2
Oppløsning 12-bit [kPa]:	-	-	-
Oppløsning 18-bit [kPa]:	0,5745	0,0102	0,0226
Max. temp. effekt, ubelastet [kPa]:	49,407	1,0098	0,5424
Temperaturområde [°C]:	0-40	0-40	0-40
UTFØRELSE			
Borpunkt nr.:	12R2	Sondetemperatur start [°C]:	14
Max. helning [°]:	5,22	Sondetemperatur slutt [°C]:	6,3
Avstand mellom målinger [mm]:	20		
MÅLEVARIALE			
EGENSKAP	SPISSMOTSTAND	SIDEFRIKSJON	PORETRYKK
Maksimal temperatureffekt [kPa]:	9,5108	0,1944	0,1044
NULLPUNKTKONTROLL			
FAKTOR	NA (q)	NB (f)	NC (u)
Avvik [MPa/kPa/kPa]:	0,0144	-1,7	-5,3
VURDERING AV ANVENDELSESKLASSE			
MÅLESTØRRELSE	SPISSMOTSTAND	SIDEFRIKSJON	PORETRYKK
Samlet nøyaktighet, $\Delta_{TOT}$ [kPa]:	24,4853	1,9046	5,4270
Tillatt nøyaktighet A1, $\Delta_1$ [kPa]:	35	5	10
Tillatt nøyaktighet A2, $\Delta_2$ [kPa]:	100	15	25
Tillatt nøyaktighet A3, $\Delta_3$ [kPa]:	200	25	50
<b>ANVENDELSESKLASSE:</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>
Borested:		Borpunkt	Anvendelsesklasse
<b>Nidarvoll</b>		<b>12R2</b>	<b>1</b>

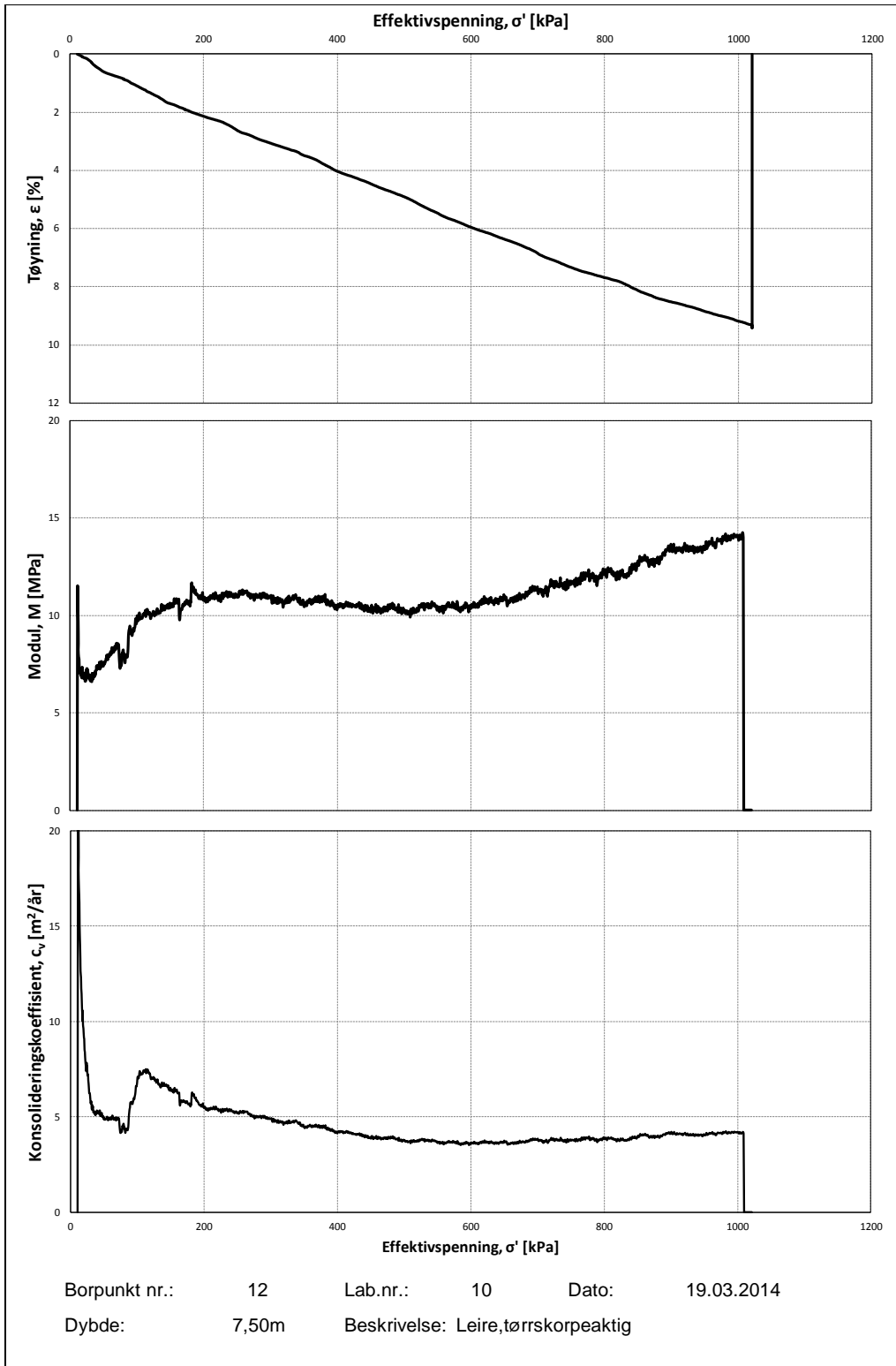
## B – 9: Kontroll anvendelsesklasse CPTU (12), pkt. 12

VURDERING AV ANVENDELSESKLASSE - CPTU			
Sonde nr.:	4492	Oppløsning:	18-bit
SONDEDATA			
Arealforhold, a:	0,838	Arealforhold, b:	0
Kalibreringsdato:	15.04.2013		
EGENSKAP (fra kaliberingsark)	SPISSMOTSTAND	SIDEFRIKSJON	PORETRYKK
Maksimum spenning [MPa]	50	0,5	2
Måleområde [MPa]:	50	0,5	2
Oppløsning 12-bit [kPa]:	-	-	-
Oppløsning 18-bit [kPa]:	0,5745	0,0102	0,0226
Max. temp.effekt, ubelastet [kPa]:	49,407	1,0098	0,5424
Temperaturområde [°C]:	0-40	0-40	0-40
UTFØRELSE			
Borpunkt nr.:	12	Sondetemperatur start [°C]:	12
Max. helning [°]:	5,07	Sondetemperatur slutt [°C]:	7,4
Avstand mellom målinger [mm]:	20		
MÅLEVARIALE			
EGENSKAP	SPISSMOTSTAND	SIDEFRIKSJON	PORETRYKK
Maksimal temperatureffekt [kPa]:	5,6818	0,1161	0,0624
NULLPUNKTKONTROLL			
FAKTOR	NA (q)	NB (f)	NC (u)
Avvik [MPa/kPa/kPa]:	-0,0344	-0,1	-1,5
VURDERING AV ANVENDELSESKLASSE			
MÅLESTØRRELSE	SPISSMOTSTAND	SIDEFRIKSJON	PORETRYKK
Samlet nøyaktighet, $\Delta_{TOR}$ [kPa]:	40,6563	0,2263	1,5850
Tillatt nøyaktighet A1, $\Delta_k$ [kPa]:	35	5	10
Tillatt nøyaktighet A2, $\Delta_k$ [kPa]:	100	15	25
Tillatt nøyaktighet A3, $\Delta_k$ [kPa]:	200	25	50
ANVENDELSESKLASSE:	2	1	1
Borested:		Borpunkt	Anvendelsesklasse
<b>Nidarvoll</b>		<b>12</b>	<b>2</b>

**B – 10: Borprofil, pkt. 12**

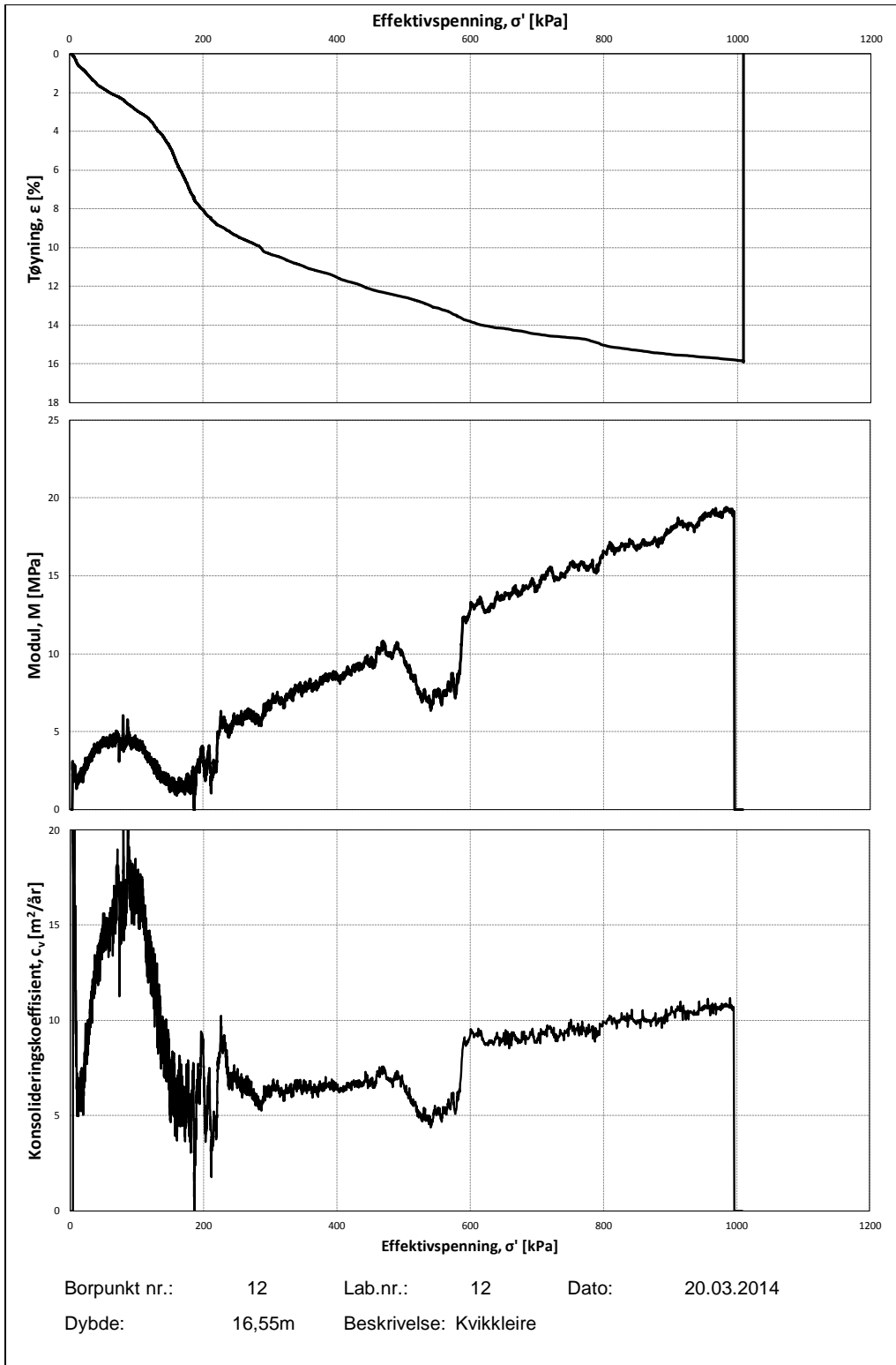


### B – 11: Ødometerforsøk borpunkt 12, lab.nr. 10, dybde 7,50 m

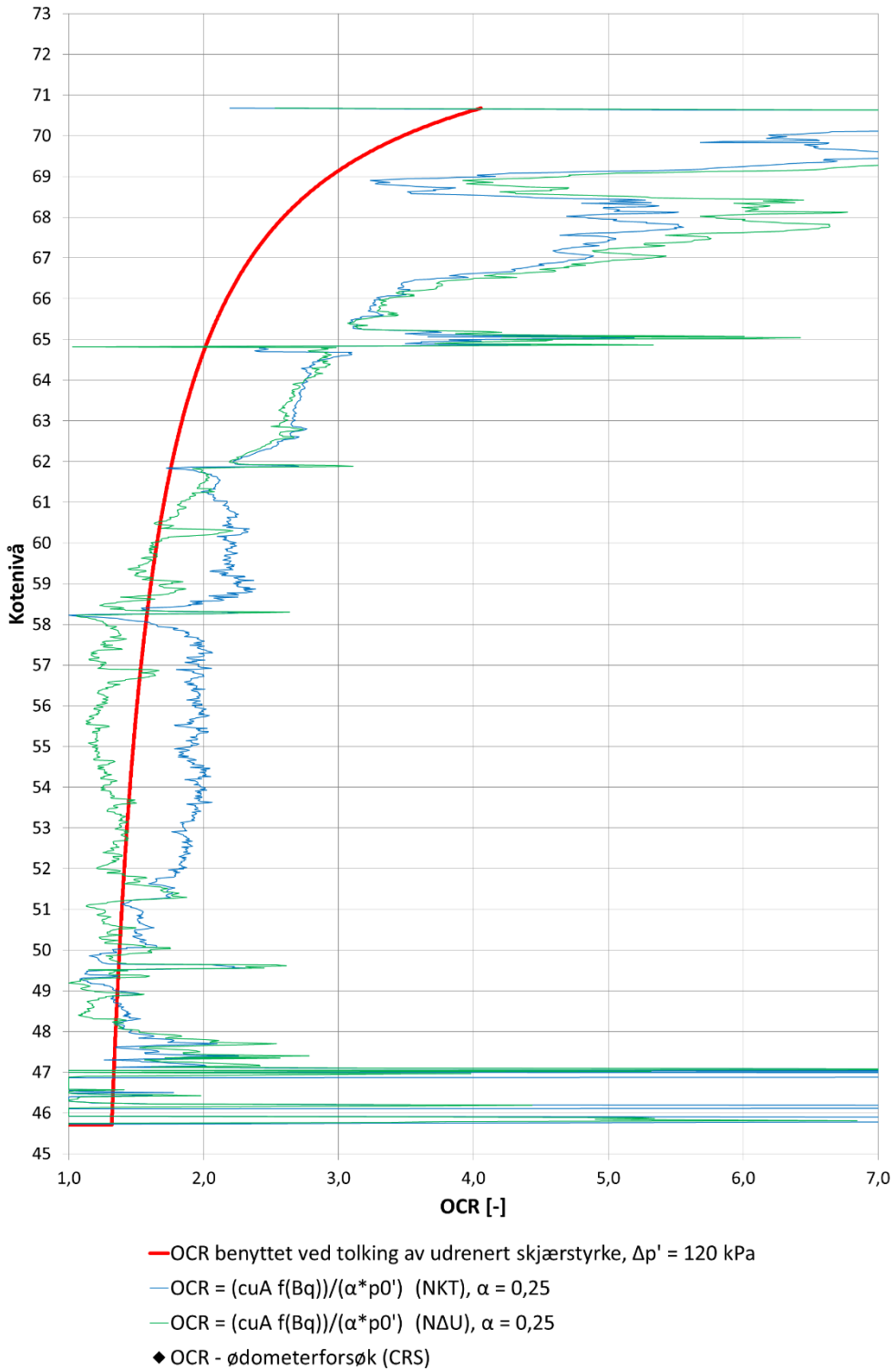




### B – 12: Ødometerforsøk borpunkt 12, lab.nr. 12, dybde 16,55 m



### B – 13: Tolkning av overkonsolideringsgrad, Nidarvoll

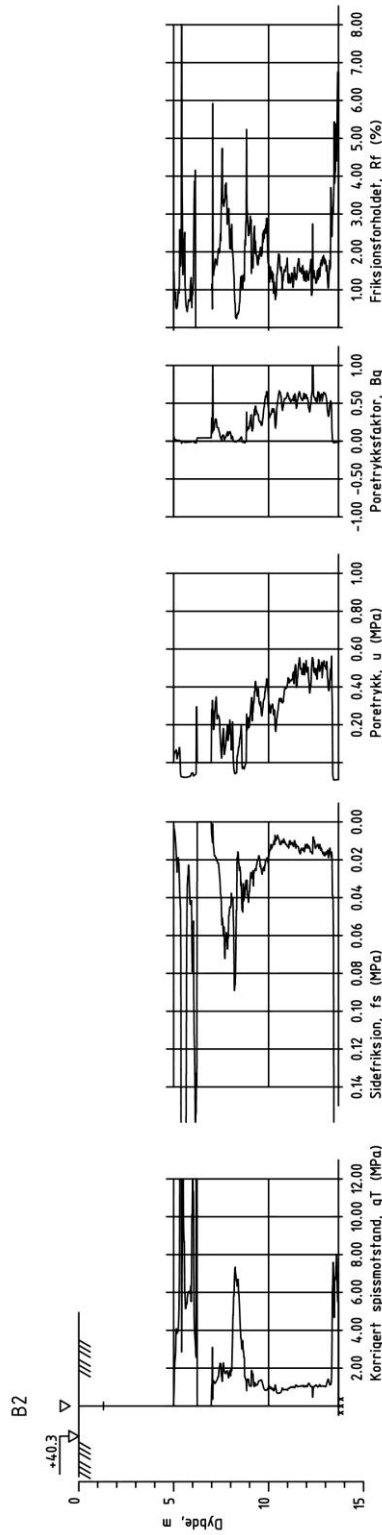


## VEDLEGG C – FELT- OG LABORATORIEDATA RANHEIM VESTRE

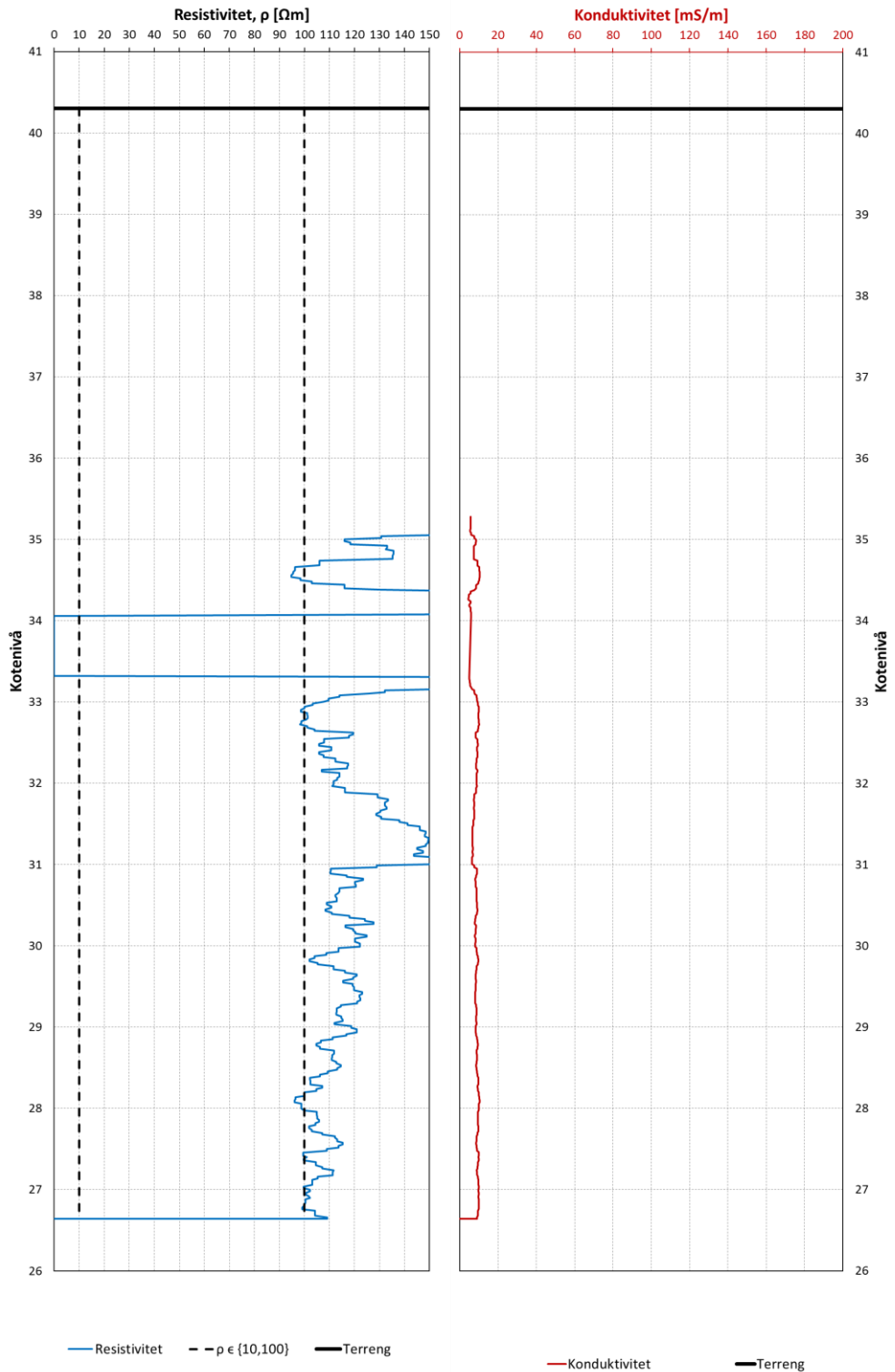
---

C – 1: R-CPTU, pkt. B2, spissmålinger .....	110
C – 2: R-CPTU, pkt. B2, resistivetsprofil .....	111
C – 3: R-CPTU, pkt. B2, stangfriksjon .....	112
C – 4: R-CPTU, pkt. E4, spissmålinger .....	113
C – 5: R-CPTU, pkt. E4, resistivetsprofil .....	114
C – 6: R-CPTU, pkt. E4, stangfriksjon .....	115
C – 7: R-CPTU, pkt. E5, spissmålinger .....	116
C – 8: R-CPTU, pkt. E5, resistivetsprofil .....	117
C – 9: R-CPTU, pkt. E5, stangfriksjon .....	118
C – 10: Kontroll anvendelsesklasse R-CPTU, pkt. B2 .....	119
C – 11: Kontroll anvendelsesklasse R-CPTU, pkt. E4 .....	120
C – 12: Kontroll anvendelsesklasse R-CPTU, pkt. E5 .....	121
C – 13: Borprofil, pkt. B2 .....	122
C – 14: Borprofil, pkt. E4 .....	123
C – 15: Borprofil, pkt. E5 .....	124

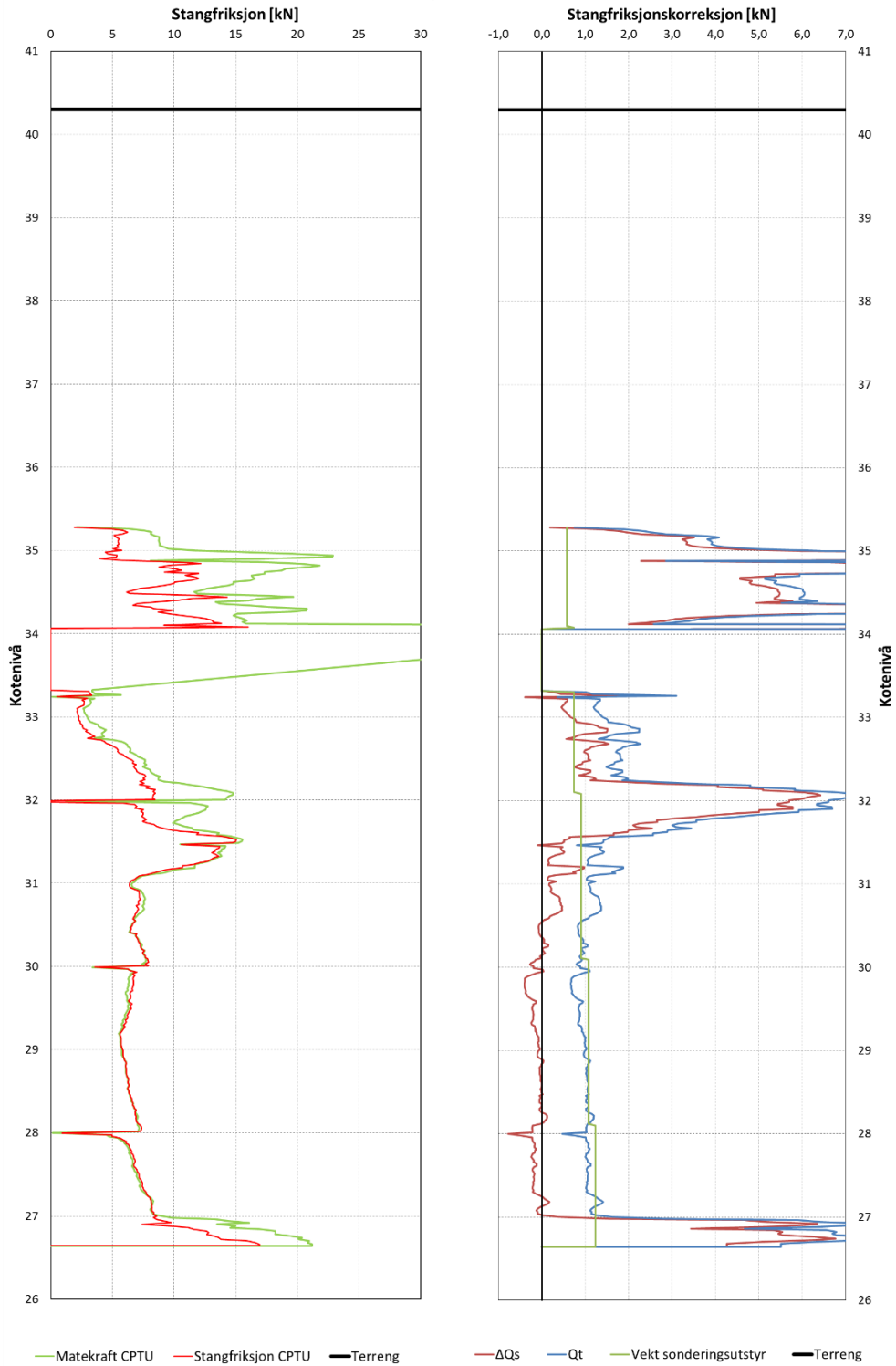
### C – 1: R-CPTU, pkt. B2, spissmålinger



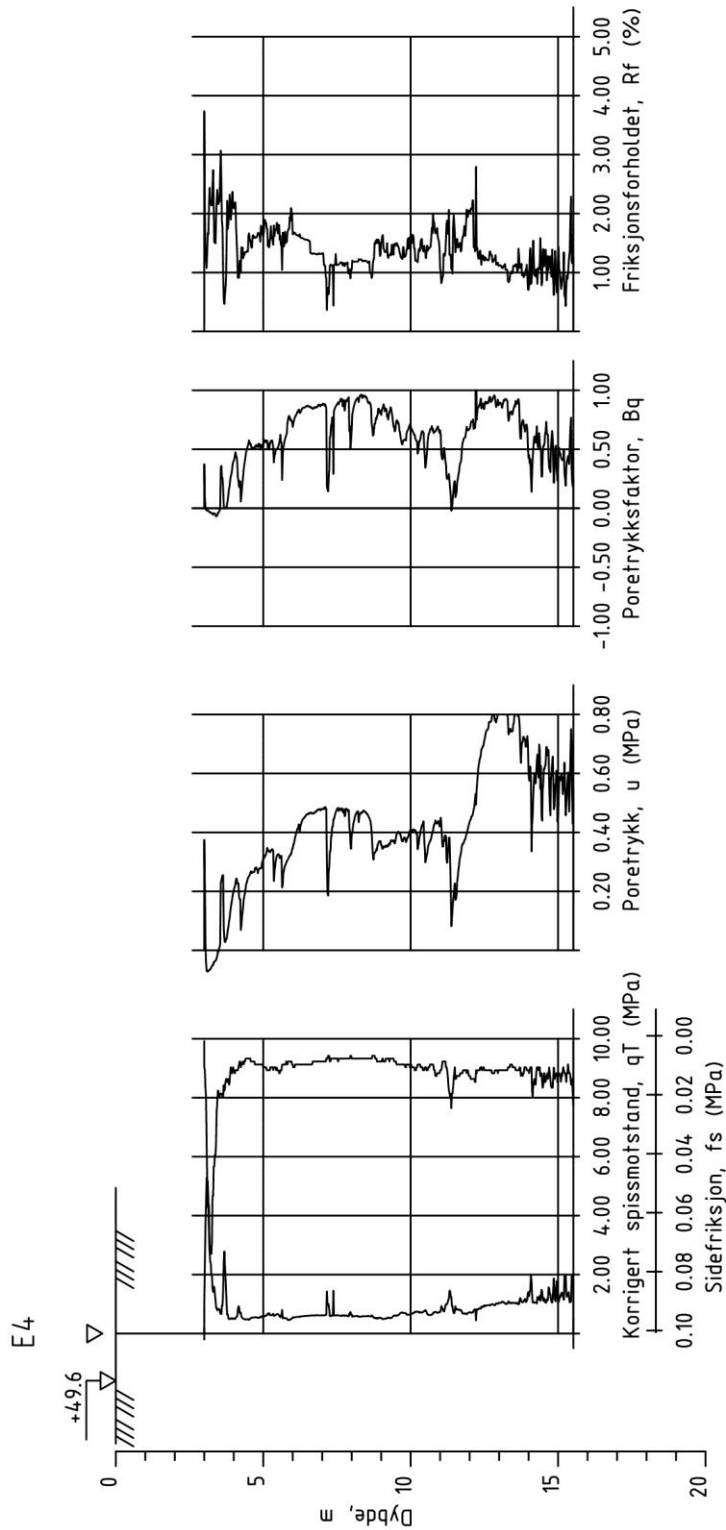
## C – 2: R-CPTU, pkt. B2, resistivetsprofil



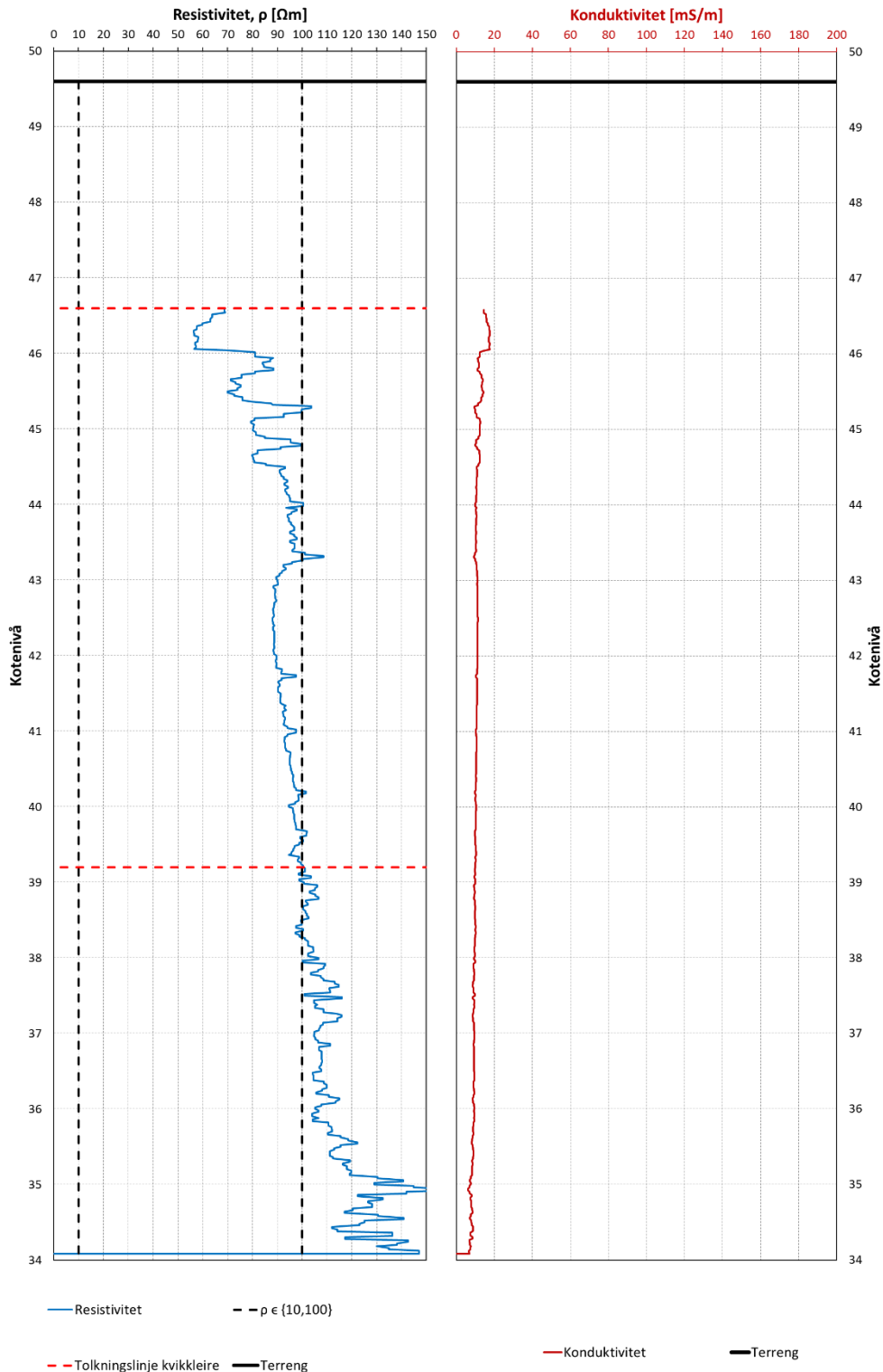
### C – 3: R-CPTU, pkt. B2, stangfriksjon



### C – 4: R-CPTU, pkt. E4, spissmålinger

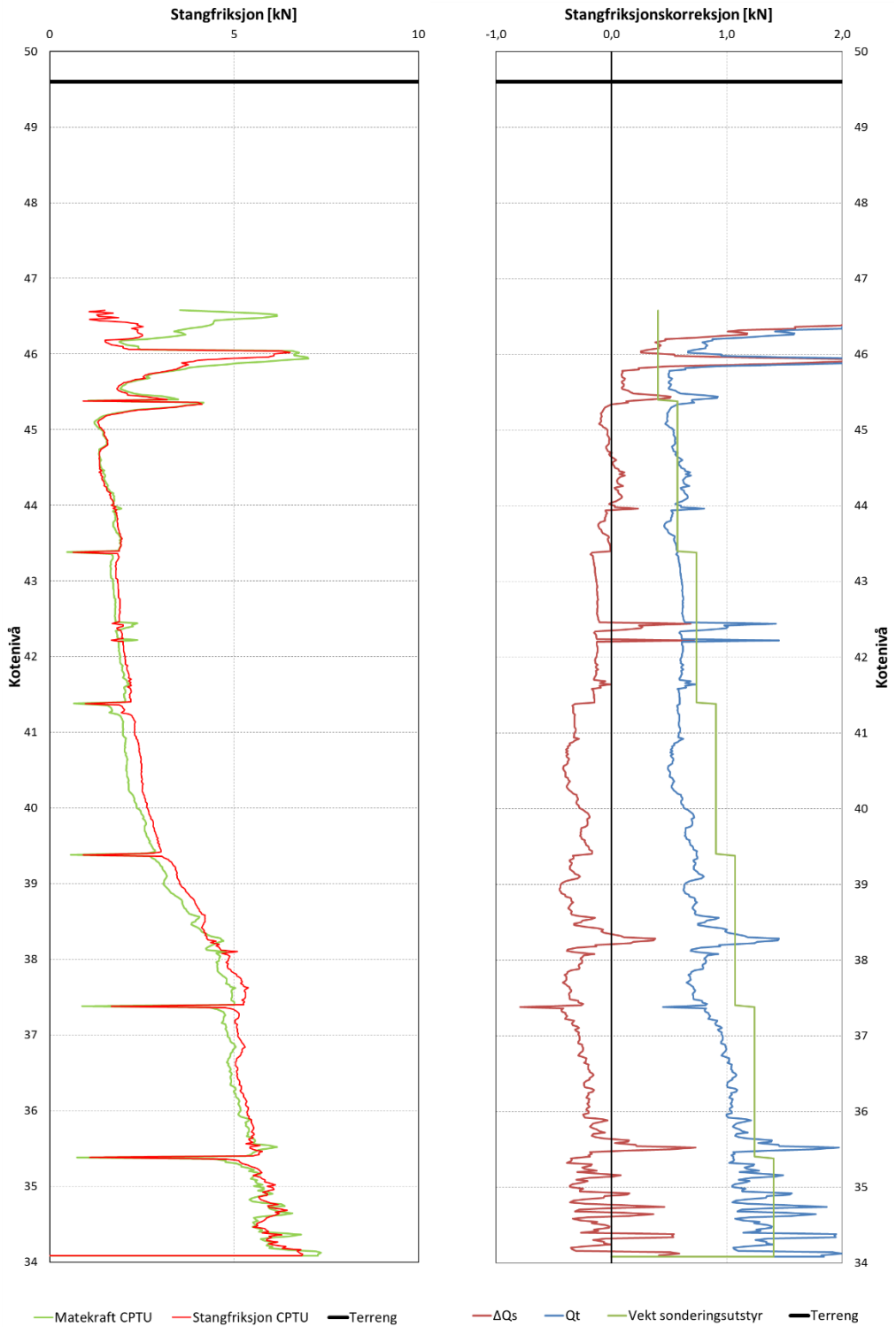


### C – 5: R-CPTU, pkt. E4, resistivetsprofil

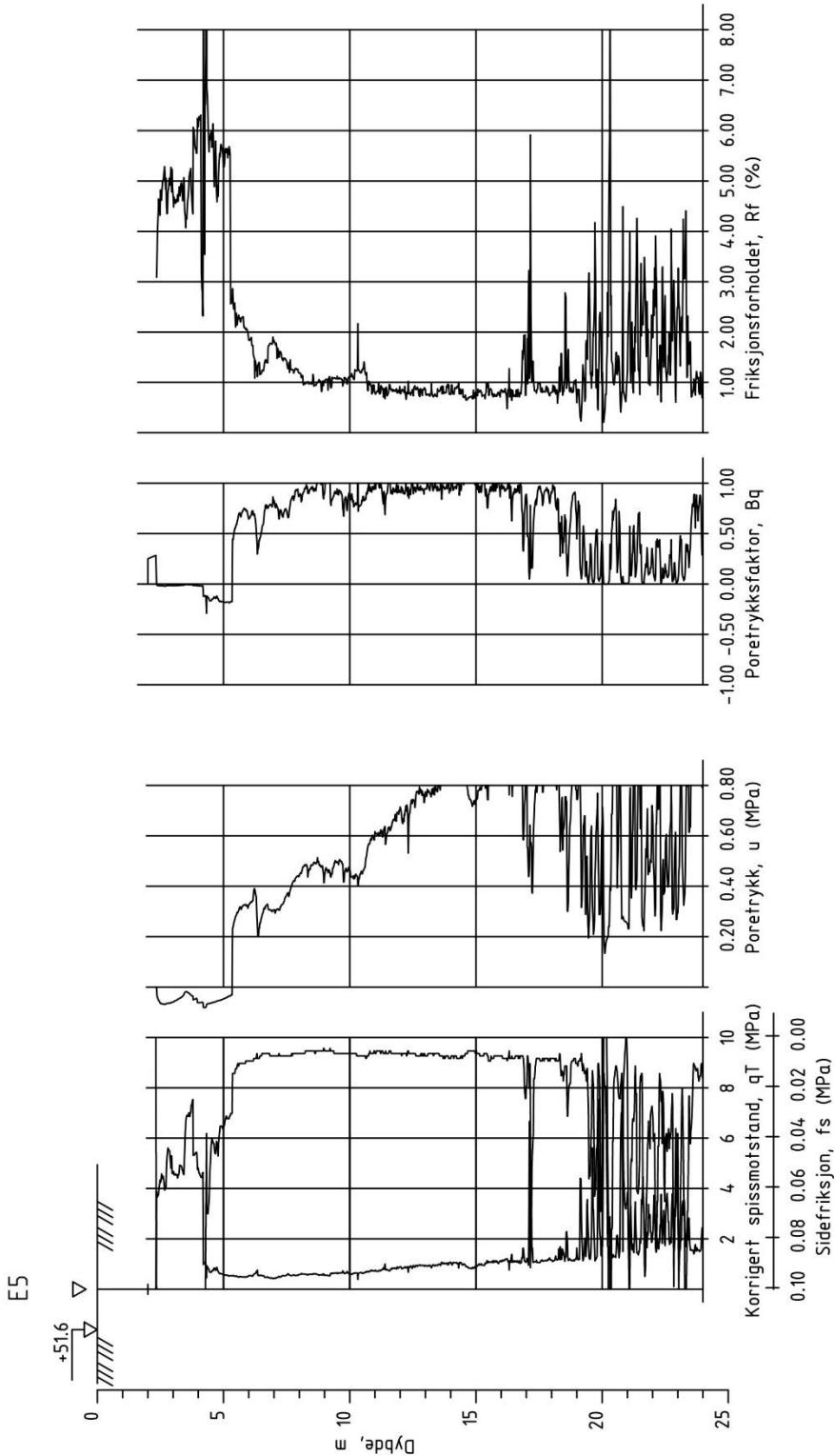




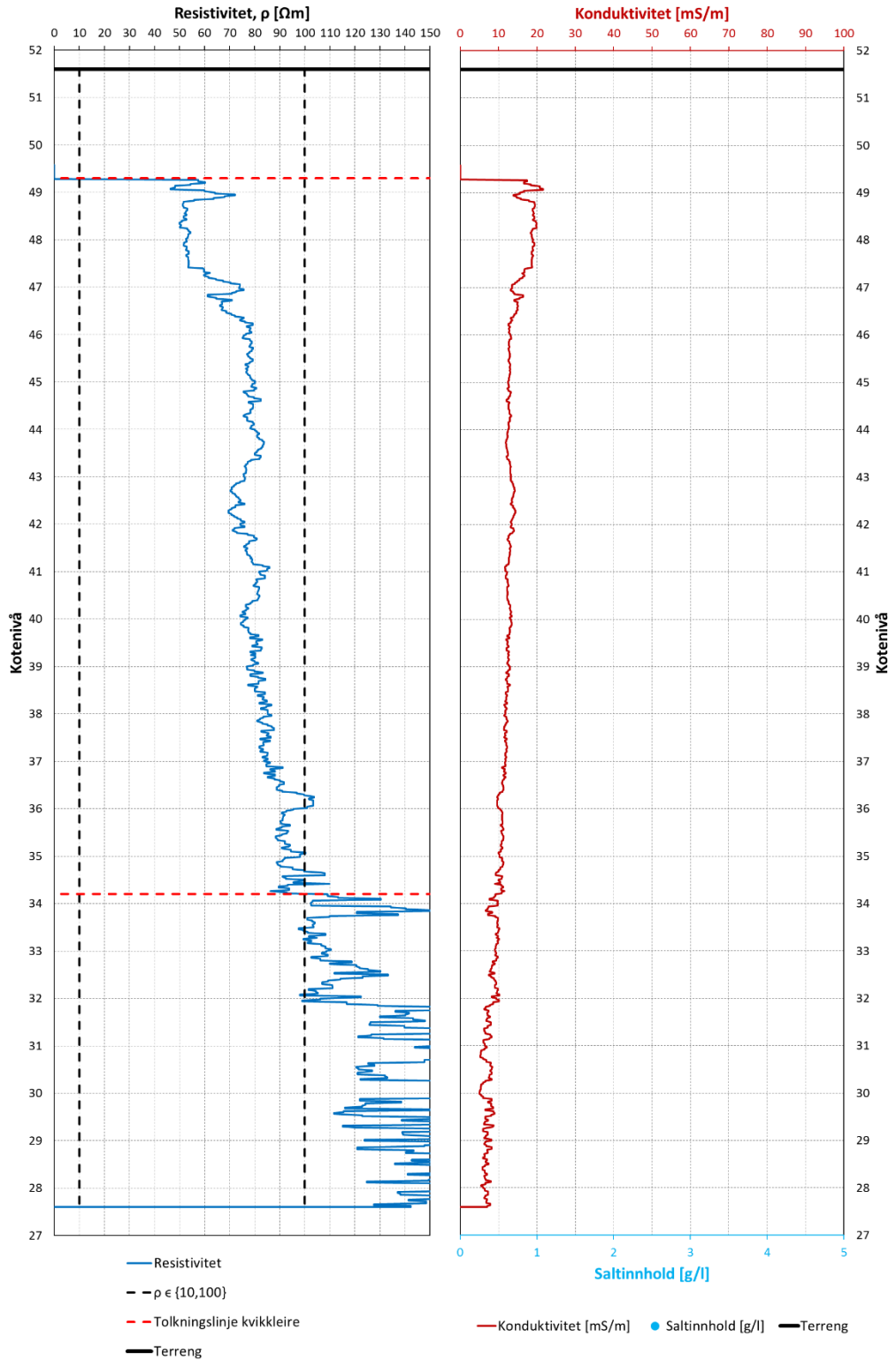
### C – 6: R-CPTU, pkt. E4, stangfriksjon



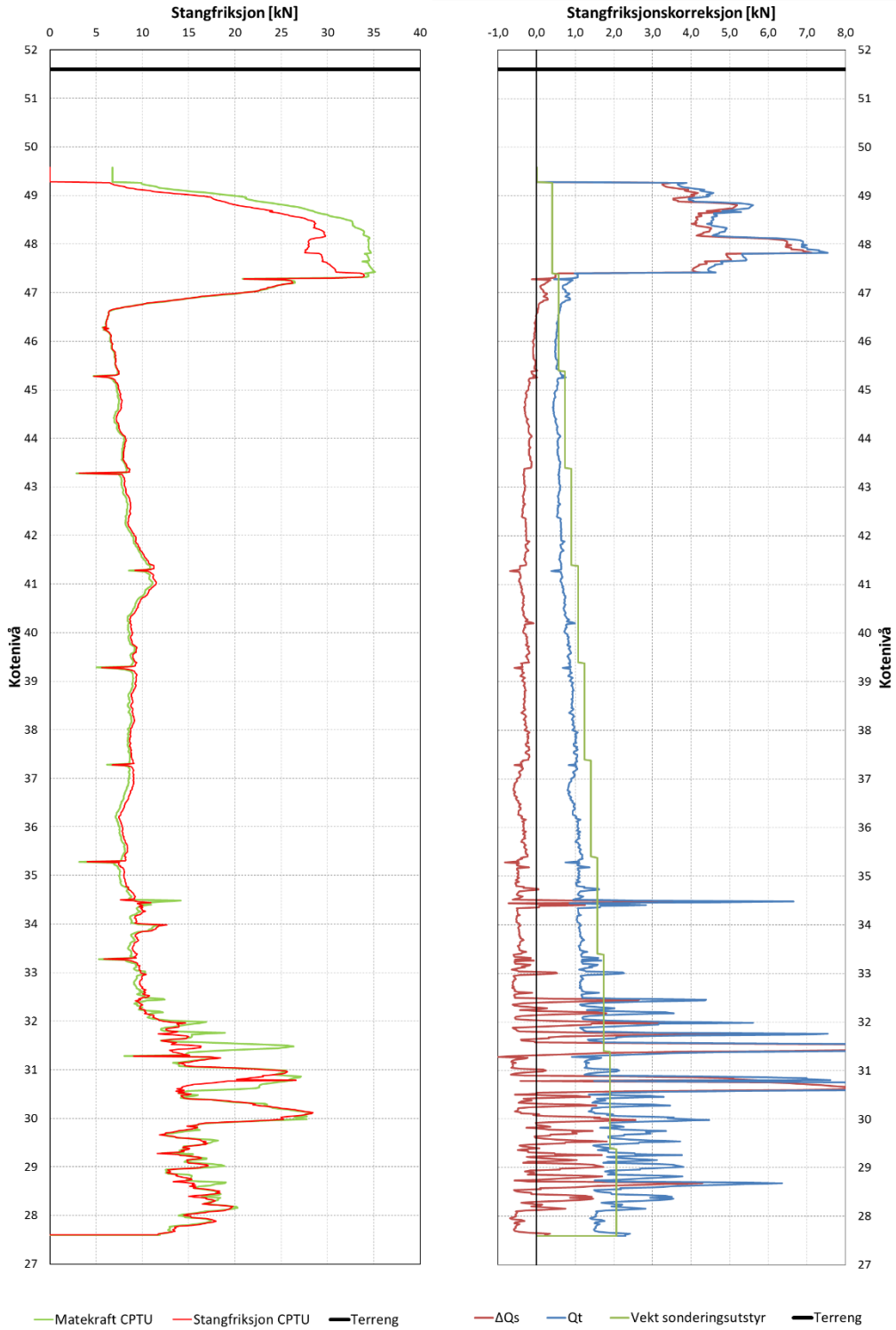
### C – 7: R-CPTU, pkt. E5, spissmålinger



### C – 8: R-CPTU, pkt. E5, resistivetsprofil



### C – 9: R-CPTU, pkt. E5, stangfriksjon



**C – 10: Kontroll anvendelsesklasse R-CPTU, pkt. B2**

VURDERING AV ANVENDELSESKLASSE - CPTU			
Sonde nr.:	4354	Oppløsning:	18-bit
SONEDATA			
Arealforhold, a:	0,819	Arealforhold, b:	0,002
Kalibreringsdato:	16.05.2013		
EGENSKAP (fra kalibreringsark)	SPISSMOTSTAND	SIDEFRIKSJON	PORETRYKK
Maksimum spenning [MPa]	50	0,5	2
Måleområde [MPa]:	50	0,5	2
Oppløsning 12-bit [kPa]:	-	-	-
Oppløsning 18-bit [kPa]:	0,582	0,0101	0,0197
Max. temp. effekt, ubelastet [kPa]:	16,878	0,2828	0,6698
Temperaturområde [°C]:	0-40	0-40	0-40
UTFØRELSE			
Borpunkt nr.:	B2	Sondetemperatur start [°C]:	8,6
Max. helning [°]:	4,86	Sondetemperatur slutt [°C]:	7,2
Avstand mellom målinger [mm]:	20		
MÅLEVARIALE			
EGENSKAP	SPISSMOTSTAND	SIDEFRIKSJON	PORETRYKK
Maksimal temperatureffekt [kPa]:	0,5907	0,0099	0,0234
NULLPUNKTKONTROLL			
FAKTOR	NA (q)	NB (f)	NC (u)
Avvik [MPa/kPa/kPa]:	0,0082	0	-1,1
VURDERING AV ANVENDELSESKLASSE			
MÅLESTØRRELSE	SPISSMOTSTAND	SIDEFRIKSJON	PORETRYKK
Samlet nøyaktighet, $\Delta_{TOT}$ [kPa]:	9,3727	0,0200	1,1431
Tillatt nøyaktighet A1, $\Delta_1$ [kPa]:	35	5	10
Tillatt nøyaktighet A2, $\Delta_2$ [kPa]:	100	15	25
Tillatt nøyaktighet A3, $\Delta_3$ [kPa]:	200	25	50
<b>ANVENDELSESKLASSE:</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>
Borested:		Borpunkt	Anvendelsesklasse
<b>Ranheim Vestre</b>		<b>B2</b>	<b>1</b>



## C – 11: Kontroll anvendelsesklasse R-CPTU, pkt. E4

VURDERING AV ANVENDELSESKLASSE - CPTU			
Sonde nr.:	4354	Oppløsning:	18-bit
SONEDATA			
Arealforhold, a:	0,819	Arealforhold, b:	0,002
Kalibreringsdato:	16.05.2013		
EGENSKAP (fra kaliberingsark)	SPISSMOTSTAND	SIDEFRIKSJON	PORETRYKK
Maksimum spenning [MPa]	50	0,5	2
Måleområde [MPa]:	50	0,5	2
Oppløsning 12-bit [kPa]:	-	-	-
Oppløsning 18-bit [kPa]:	0,582	0,0101	0,0197
Max. temp. effekt, ubelastet [kPa]:	16,878	0,2828	0,6698
Temperaturområde [°C]:	0-40	0-40	0-40
UTFØRELSE			
Borpunkt nr.:	E4	Sondetemperatur start [°C]:	11,5
Max. helning [°]:	1,36	Sondetemperatur slutt [°C]:	6,5
Avstand mellom målinger [mm]:	20		
MÅLEVARIALE			
EGENSKAP	SPISSMOTSTAND	SIDEFRIKSJON	PORETRYKK
Maksimal temperatureffekt [kPa]:	2,1098	0,0354	0,0837
NULLPUNKTKONTROLL			
FAKTOR	NA (q)	NB (f)	NC (u)
Avvik [MPa/kPa/kPa]:	-0,0134	0,2	-0,2
VURDERING AV ANVENDELSESKLASSE			
MÅLESTØRRELSE	SPISSMOTSTAND	SIDEFRIKSJON	PORETRYKK
Samlet nøyaktighet, $\Delta_{\text{tot}}$ [kPa]:	16,0918	0,2455	0,3034
Tillatt nøyaktighet A1, $\Delta_1$ [kPa]:	35	5	10
Tillatt nøyaktighet A2, $\Delta_2$ [kPa]:	100	15	25
Tillatt nøyaktighet A3, $\Delta_3$ [kPa]:	200	25	50
ANVENDELSESKLASSE:	1	1	1
Borested:		Borpunkt	Anvendelsesklasse
<b>Ranheim Vestre</b>		<b>E4</b>	<b>1</b>

## C – 12: Kontroll anvendelsesklasse R-CPTU, pkt. E5



VURDERING AV ANVENDELSESKLASSE - CPTU			
Sonde nr.:	4354	Oppløsning:	18-bit
SONEDATA			
Arealforhold, a:	0,819	Arealforhold, b:	0,002
Kalibreringsdato:	16.05.2013		
EGENSKAP (fra kalibreringsark)	SPISSMOTSTAND	SIDEFRIKSJON	PORETRYKK
Maksimum spenning [MPa]	50	0,5	2
Måleområde [MPa]:	50	0,5	2
Oppløsning 12-bit [kPa]:	-	-	-
Oppløsning 18-bit [kPa]:	0,582	0,0101	0,0197
Max. temp. effekt, ubelastet [kPa]:	16,878	0,2828	0,6698
Temperaturområde [°C]:	0-40	0-40	0-40
UTFØRELSE			
Borpunkt nr.:	E5	Sondetemperatur start [°C]:	8,5
Max. helning [°]:	4,23	Sondetemperatur slutt [°C]:	6,7
Avstand mellom målinger [mm]:	20		
MÅLEVARIALE			
EGENSKAP	SPISSMOTSTAND	SIDEFRIKSJON	PORETRYKK
Maksimal temperatureffekt [kPa]:	0,7595	0,0127	0,0301
NULLPUNKTKONTROLL			
FAKTOR	NA (q)	NB (f)	NC (u)
Avvik [MPa/kPa/kPa]:	0,007	0,6	0,4
VURDERING AV ANVENDELSESKLASSE			
MÅLESTØRRELSE	SPISSMOTSTAND	SIDEFRIKSJON	PORETRYKK
Samlet nøyaktighet, $\Delta_{TOT}$ [kPa]:	8,3415	0,6228	0,4498
Tillatt nøyaktighet A1, $\Delta_1$ [kPa]:	35	5	10
Tillatt nøyaktighet A2, $\Delta_2$ [kPa]:	100	15	25
Tillatt nøyaktighet A3, $\Delta_3$ [kPa]:	200	25	50
ANVENDELSESKLASSE:	1	1	1
Borested:		Borpunkt	Anvendelsesklasse
<b>Ranheim Vestre</b>		<b>E5</b>	<b>1</b>

**C – 13: Borprofil, pkt. B2**

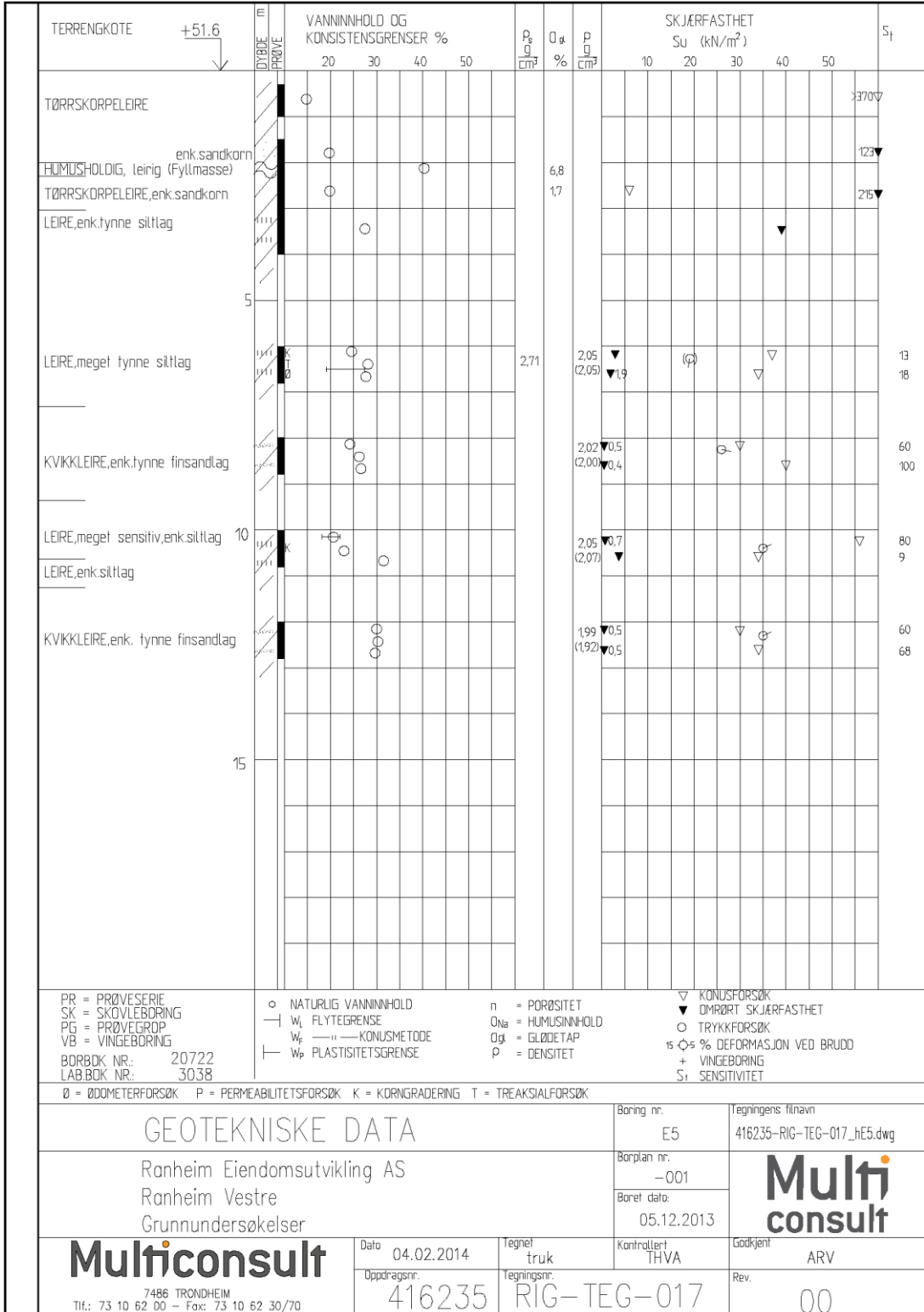
TERRENGKOTE	+40.3 ↓	DYBDE PRØVE	VANNINNHOLD OG KONSISTENSGRENSER %				p <sub>u</sub> cm <sup>2</sup>	q <sub>gl</sub> %	p <sub>g</sub> cm <sup>2</sup>	SKJÆRFESTHET Su (kN/m <sup>2</sup> )					S <sub>t</sub>
			20	30	40	50				10	20	30	40	50	
SAND,grusig															
LEIRE m/sand- og gruskorn		5						2,12 (2,1)						7,7 15,9 7,4	1 1
SAND,siltig,leirig		10													
		15													
PR = PRØVESERIE SK = SKOVLEBORING PG = PRØVEGRUPP VB = VINGEBORING BORBOK NR.: 20722 LAB.BOK NR.: 3038		○ NATURLIG VANNINNHOLD — w <sub>f</sub> FLYTEGRENSE — w <sub>f</sub> — KONSUSMETODE — w <sub>p</sub> PLASTISITETSGRENSE		n = PORØSITET Q <sub>Na</sub> = HUMUSINNHOLD Q <sub>gl</sub> = GLØDETAP ρ = DENSITET		▼ KONDSFORSØK ▼ OMRØRT SKJÆRFESTHET ○ TRYKKFORSØK 15 ○ 5 % DEFORMASJON VED BRUDD + VINGEBORING S <sub>t</sub> SENSITIVITET					Ø = ØDOMETERFORSØK P = PERMEABILITETSFORSØK K = KORNGRADERING T = TREAKSIALFORSØK				
GEOTEKNISKE DATA								Boring nr. B2	Tegningens filnavn 416235-RIG-TEG-012_hB2.dwg						
Ranheim Eiendomsutvikling AS Ranheim Vestre Grunnundersøkelser								Borplan nr. -001							
								Boret dato: 04.12.2013							
 7486 TRONDHEIM Tlf.: 73 10 62 00 – Fax: 73 10 62 30/70		Dato 31.01.2014	Tegnet truk	Kontrollert THVA	Godkjent ARV										
		Oppdragsnr. 416235	Tegningsnr. RIG-TEG-012	Rev. 00											



**C – 14: Borprofil, pkt. E4**

TERRENGKOTE +49.6	BYBØIE PRØVE	VANNINNHOLD OG KONSISTENSGRENSER %				$\rho_s$ cm <sup>3</sup>	$\rho_{gl}$ %	$\rho$ cm <sup>3</sup>	SKJÆRFESTHET Su (kN/m <sup>2</sup> )					S <sub>t</sub>	
		20	30	40	50				10	20	30	40	50		
HUMUS, leirholdig, teglrester Fyllmasse															
SILT, grov, sandig	leirlag														
LEIRE, tørrskorpig															
?															
LEIRE m/tynne finsandlag	5							2,10 (2,04)							9 9
LEIRE m/tynne fin-/middels sandlag							2,78	2,06 (1,96)							18 22
LEIRE m/enk.tynne finsandlag, enk.gruskorn	10							2,11 (2,07)							9 6 12
LEIRE m/enk.meget tynne silt-/ finsandlag								2,07 (2,06)							9 3 7
LEIRE m/finsandlag,enk.gruskorn	15							2,03 (2,01)							10 9
PR = PRØVESERIE SK = SKOVLEBORING PG = PRØVEGROP VB = VINGEBORING BORBOK NR.: 20722 LABBOK NR.: 3038		○ NATURLIG VANNINNHOLD — w <sub>i</sub> FLYTEGRENSE w <sub>f</sub> — — — KONUSMETODE — w <sub>p</sub> PLASTISITETSGRENSE				n = PORØSITET O <sub>Na</sub> = HUMUSINNHOLD O <sub>gl</sub> = GLØDETAP ρ = DENSITET			▼ KONUSFORSØK ▽ OMRØRT SKJÆRFESTHET ○ TRYKKFORSØK ⊕ 5% DEFORMASJON VED BRUDD + VINGEBORING S <sub>t</sub> SENSITIVITET						
Ø = ØDOMETERFORSØK P = PERMEABILITETSFORSØK K = KORNGRADERING T = TREAKSIALFORSØK								Borings nr.: E4		Tegningens filnavn: 416235-RIG-TEG-016_hE4.dwg					
GEOTEKNISKE DATA Ranheim Eiendomsutvikling AS Ranheim Vestre Grunnundersøkelser								Boringsplan nr.: -001							
								Boret dato: 05.12.2013							
 7486 TRONDHEIM Tlf.: 73 10 62 00 – Fax: 73 10 62 30/70				Dato: 04.02.2014		Tegnet: truk		Kontrollert: THVA		Godkjent: ARV					
				Oppdragsnr.: 416235		Tegningsnr.: RIG-TEG-016			Rev.: 00						

**C – 15: Borprofil, pkt. E5**



## VEDLEGG D – JORDARTSKLASSIFISERING

---

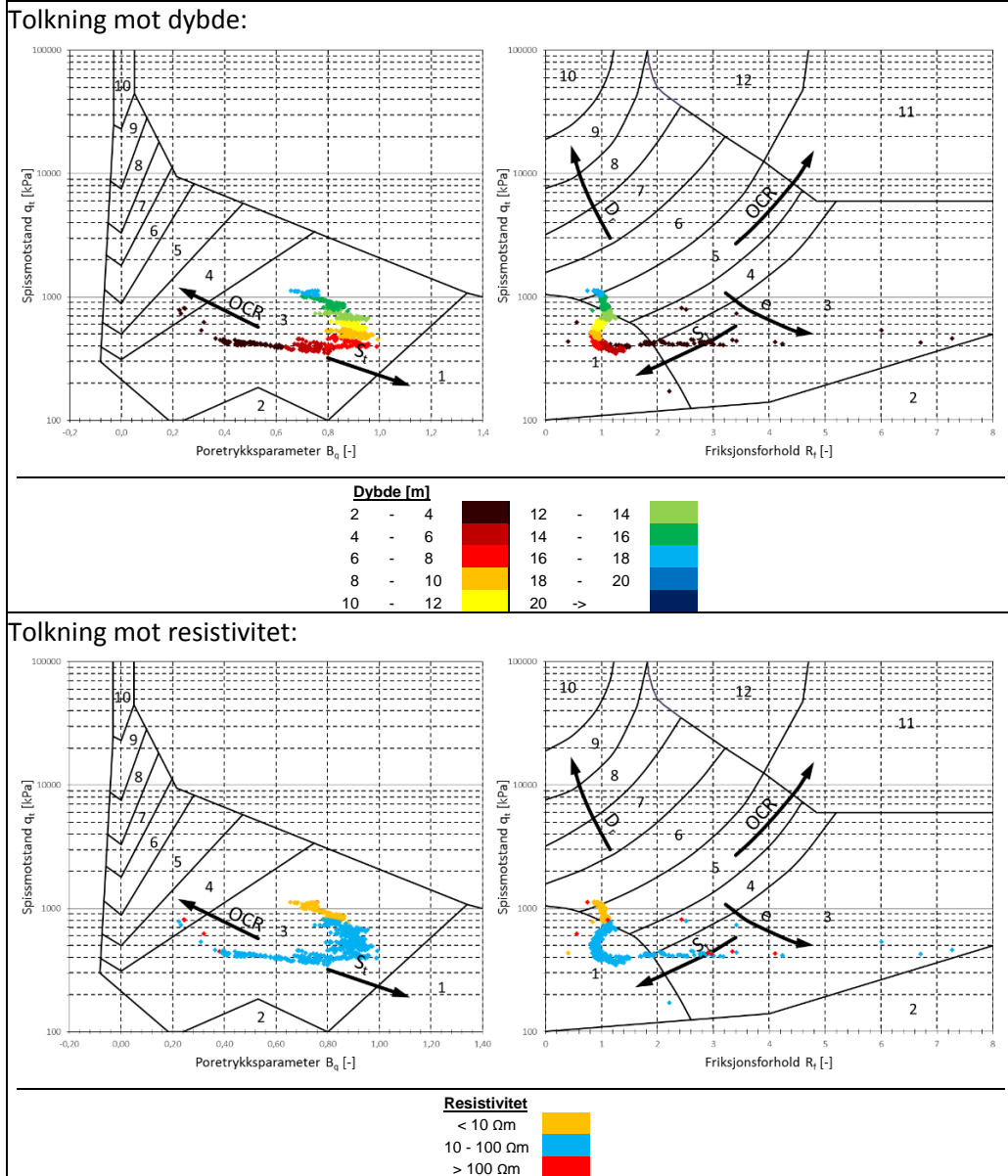
D – 1: Jordartsklassifisering, Esp, R-CPTU (1), pkt. 1 .....	126
D – 2: Jordartsklassifisering, Esp, R-CPTU (1a), pkt. 1.....	127
D – 3: Jordartsklassifisering, Esp, CPTU (1b), pkt. 1 .....	128
D – 4: Jordartsklassifisering, Esp, CPTU (1c), pkt. 1 .....	129
D – 5: Jordartsklassifisering, Nidarvoll, R-CPTU (12R1), pkt. 12.....	130
D – 6: Jordartsklassifisering, Nidarvoll, R-CPTU (12R2), pkt. 12.....	131
D – 7: Jordartsklassifisering, Nidarvoll, CPTU (12), pkt. 12.....	132
D – 8: Jordartsklassifisering, Ranheim Vestre, R-CPTU, pkt. B2 .....	133
D – 9: Jordartsklassifisering, Ranheim Vestre, R-CPTU, pkt. E4 .....	134
D – 10: Jordartsklassifisering, Ranheim Vestre, R-CPTU, pkt. E5 .....	135

## D – 1: Jordartsklassifisering, Esp, R-CPTU (1), pkt. 1

**Zone:** **Soil Behaviour Type:**

- |                          |                             |                                |
|--------------------------|-----------------------------|--------------------------------|
| 1 Sensitive fine grained | 5 Clayey silt to silty clay | 9 sand                         |
| 2 Organic material       | 6 Sandy silt to clayey silt | 10 gravelly sand to sand       |
| 3 Clay                   | 7 Silty sand to sandy silt  | 11 very stiff fine grained (*) |
| 4 Silty clay to clay     | 8 sand to silty sand        | 12 sand to clayey sand (*)     |

(\*) overconsolidated or cemented



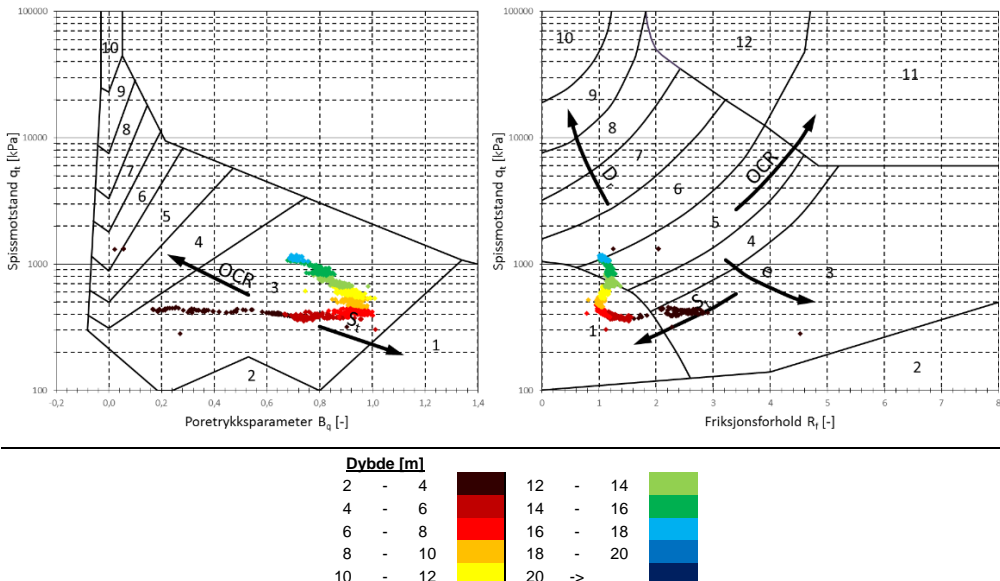
## D – 2: Jordartsklassifisering, Esp, R-CPTU (1a), pkt. 1

**Zone:**    **Soil Behaviour Type:**

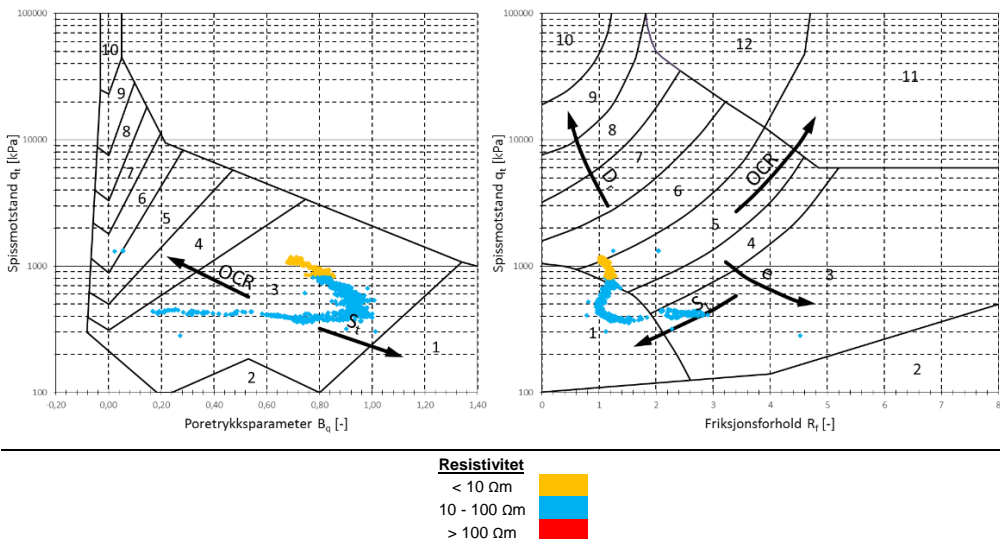
1	Sensitive fine grained	5	Clayey silt to silty clay	9	sand
2	Organic material	6	Sandy silt to clayey silt	10	gravelly sand to sand
3	Clay	7	Silty sand to sandy silt	11	very stiff fine grained (*)
4	Silty clay to clay	8	sand to silty sand	12	sand to clayey sand (*)

(\*) overconsolidated or cemented

### Tolkning mot dybde:



### Tolkning mot resistivitet:



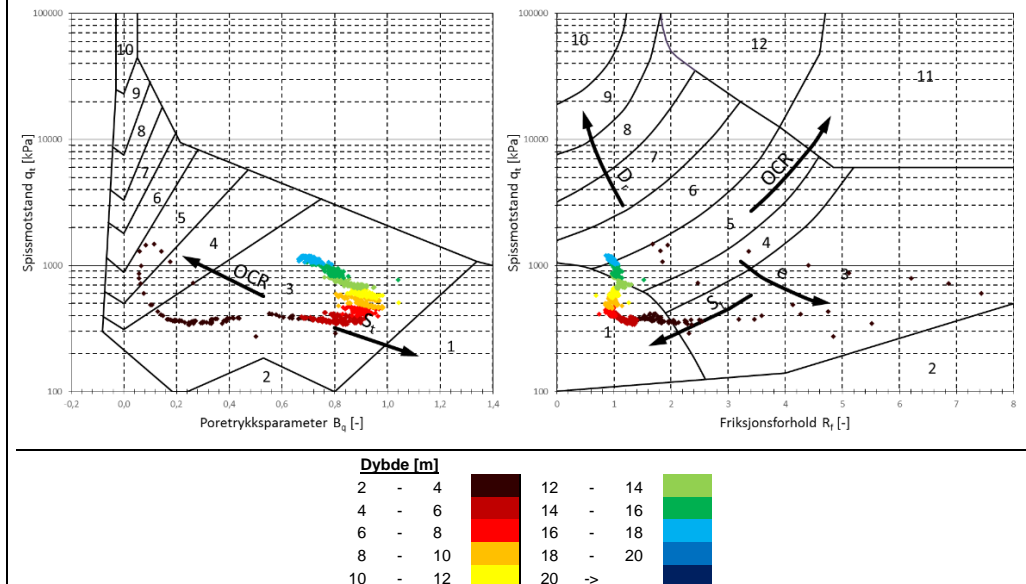
### D – 3: Jordartsklassifisering, Esp, CPTU (1b), pkt. 1

**Zone:** **Soil Behaviour Type:**

- |   |                        |   |                           |    |                             |
|---|------------------------|---|---------------------------|----|-----------------------------|
| 1 | Sensitive fine grained | 5 | Clayey silt to silty clay | 9  | sand                        |
| 2 | Organic material       | 6 | Sandy silt to clayey silt | 10 | gravelly sand to sand       |
| 3 | Clay                   | 7 | Silty sand to sandy silt  | 11 | very stiff fine grained (*) |
| 4 | Silty clay to clay     | 8 | sand to silty sand        | 12 | sand to clayey sand (*)     |

(\*) overconsolidated or cemented

#### Tolkning mot dybde:



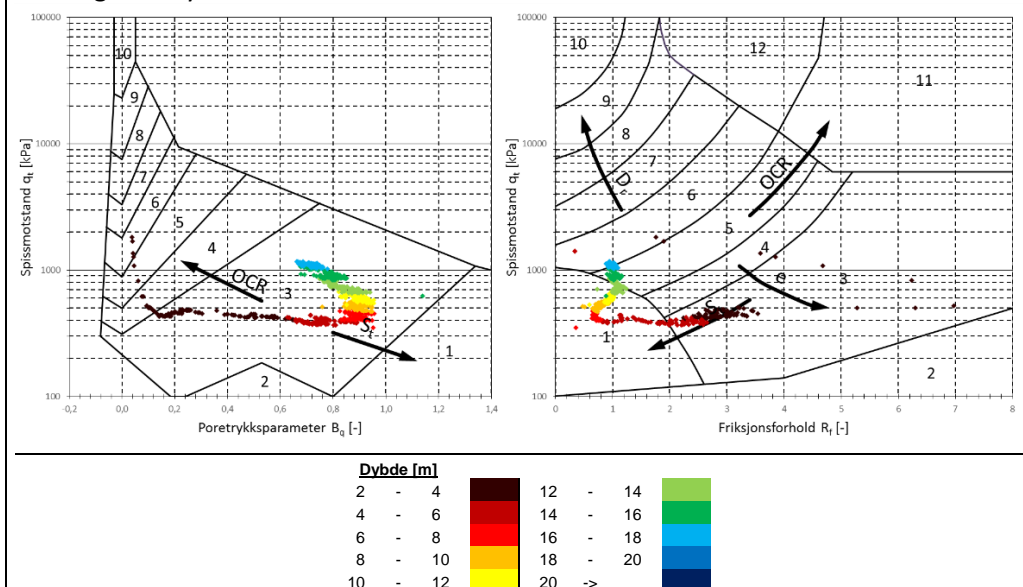
## D – 4: Jordartsklassifisering, Esp, CPTU (1c), pkt. 1

**Zone: Soil Behaviour Type:**

1	Sensitive fine grained	5	Clayey silt to silty clay	9	sand
2	Organic material	6	Sandy silt to clayey silt	10	gravelly sand to sand
3	Clay	7	Silty sand to sandy silt	11	very stiff fine grained (*)
4	Silty clay to clay	8	sand to silty sand	12	sand to clayey sand (*)

(\*) overconsolidated or cemented

**Tolkning mot dybde:**



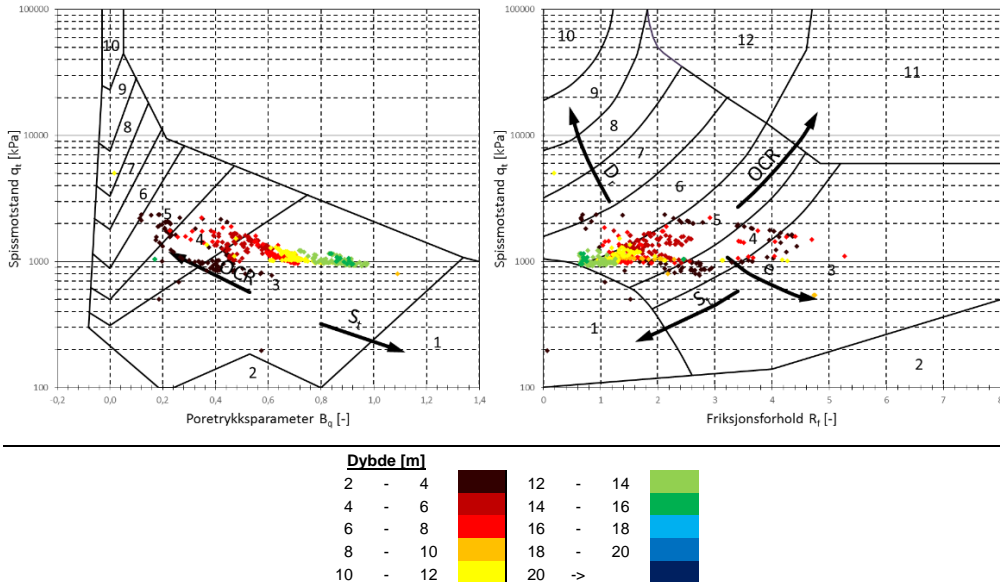
## D – 5: Jordartsklassifisering, Nidarvoll, R-CPTU (12R1), pkt. 12

**Zone:** **Soil Behaviour Type:**

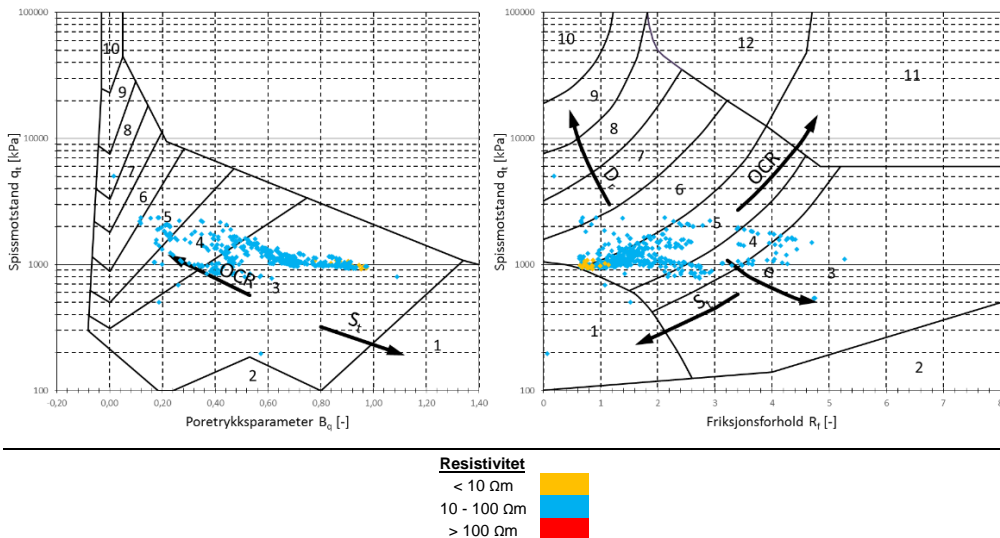
- |                          |                             |                                |
|--------------------------|-----------------------------|--------------------------------|
| 1 Sensitive fine grained | 5 Clayey silt to silty clay | 9 sand                         |
| 2 Organic material       | 6 Sandy silt to clayey silt | 10 gravelly sand to sand       |
| 3 Clay                   | 7 Silty sand to sandy silt  | 11 very stiff fine grained (*) |
| 4 Silty clay to clay     | 8 sand to silty sand        | 12 sand to clayey sand (*)     |

(\*) overconsolidated or cemented

### Tolkning mot dybde:



### Tolkning mot resistivitet:





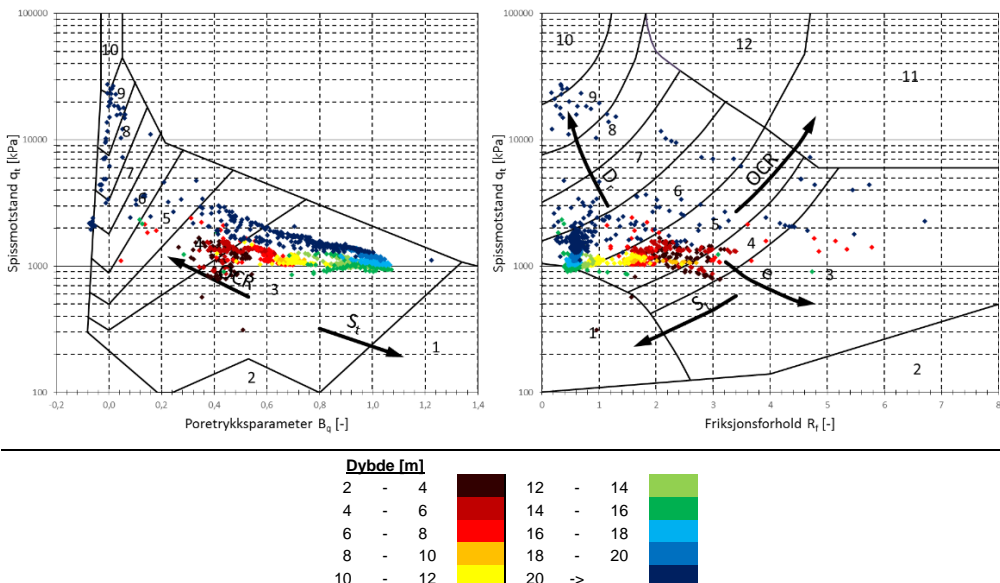
## D – 6: Jordartsklassifisering, Nidarvoll, R-CPTU (12R2), pkt. 12

**Zone:**    **Soil Behaviour Type:**

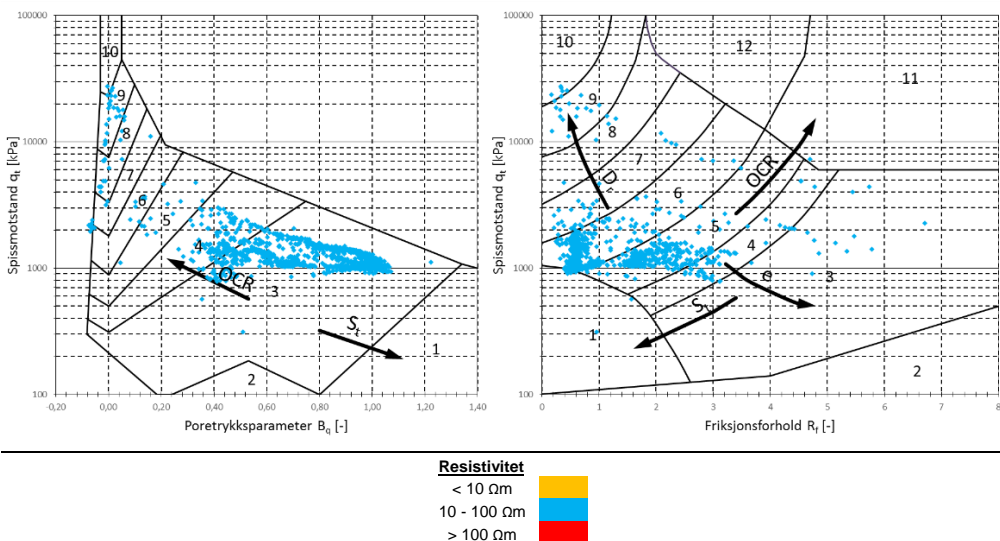
1	Sensitive fine grained	5	Clayey silt to silty clay	9	sand
2	Organic material	6	Sandy silt to clayey silt	10	gravelly sand to sand
3	Clay	7	Silty sand to sandy silt	11	very stiff fine grained (*)
4	Silty clay to clay	8	sand to silty sand	12	sand to clayey sand (*)

(\*) overconsolidated or cemented

### Tolkning mot dybde:



### Tolkning mot resistivitet:



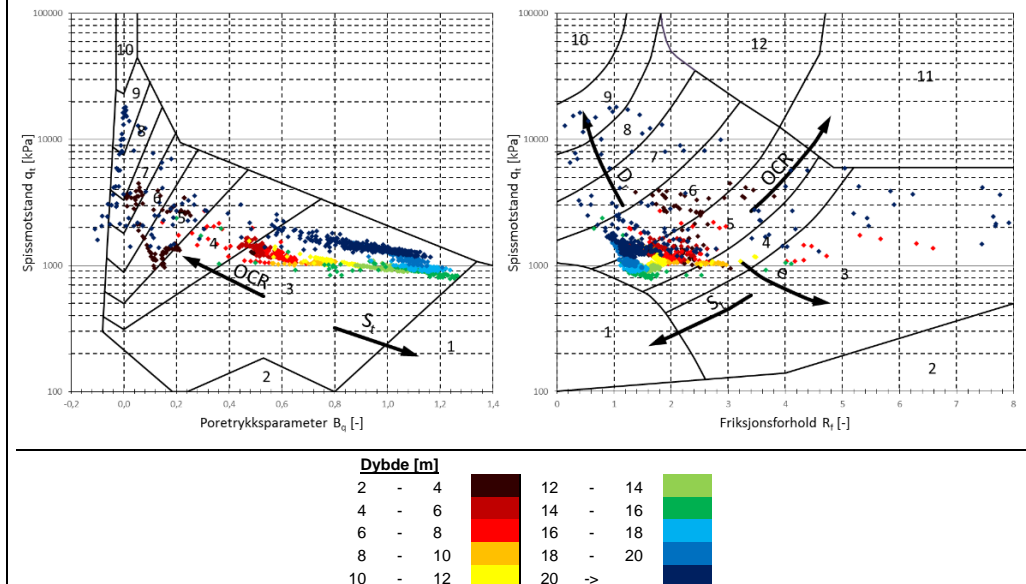
## D – 7: Jordartsklassifisering, Nidarvoll, CPTU (12), pkt. 12

**Zone:** **Soil Behaviour Type:**

- |   |                        |   |                           |    |                             |
|---|------------------------|---|---------------------------|----|-----------------------------|
| 1 | Sensitive fine grained | 5 | Clayey silt to silty clay | 9  | sand                        |
| 2 | Organic material       | 6 | Sandy silt to clayey silt | 10 | gravelly sand to sand       |
| 3 | Clay                   | 7 | Silty sand to sandy silt  | 11 | very stiff fine grained (*) |
| 4 | Silty clay to clay     | 8 | sand to silty sand        | 12 | sand to clayey sand (*)     |

(\*) overconsolidated or cemented

### Tolkning mot dybde:



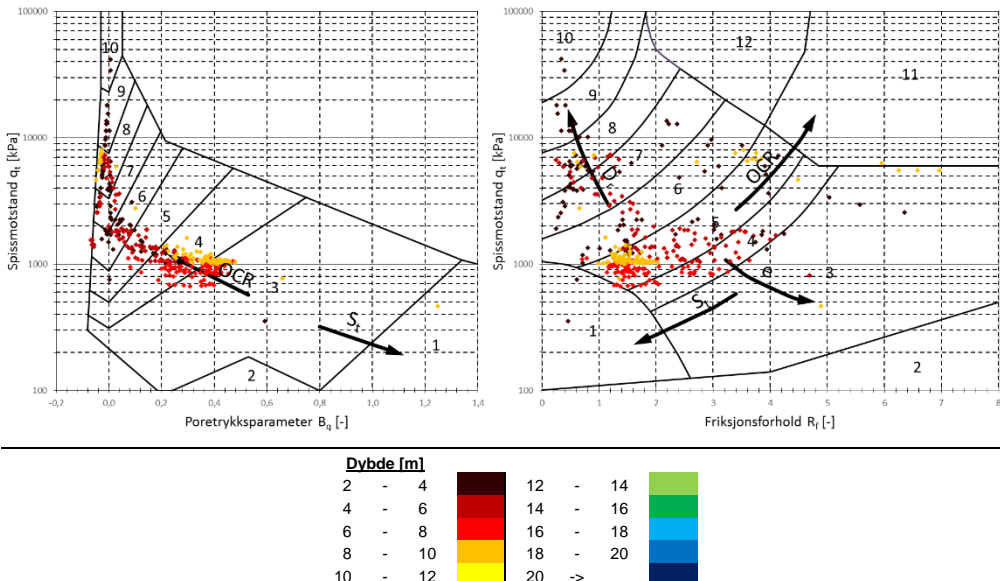
## D – 8: Jordartsklassifisering, Ranheim Vestre, R-CPTU, pkt. B2

**Zone:**    **Soil Behaviour Type:**

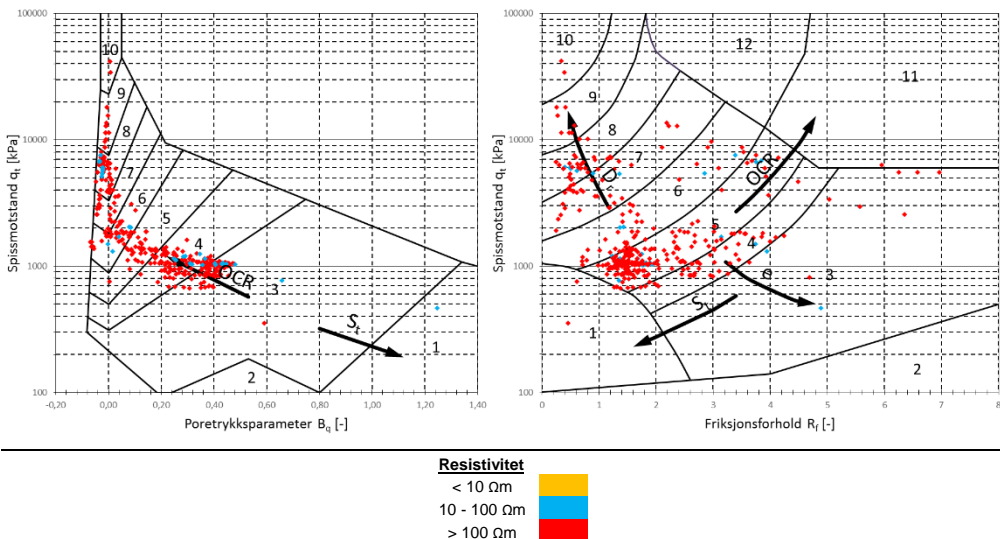
- |   |                        |   |                           |    |                             |
|---|------------------------|---|---------------------------|----|-----------------------------|
| 1 | Sensitive fine grained | 5 | Clayey silt to silty clay | 9  | sand                        |
| 2 | Organic material       | 6 | Sandy silt to clayey silt | 10 | gravelly sand to sand       |
| 3 | Clay                   | 7 | Silty sand to sandy silt  | 11 | very stiff fine grained (*) |
| 4 | Silty clay to clay     | 8 | sand to silty sand        | 12 | sand to clayey sand (*)     |

(\*) overconsolidated or cemented

### Tolkning mot dybde:



### Tolkning mot resistivitet:



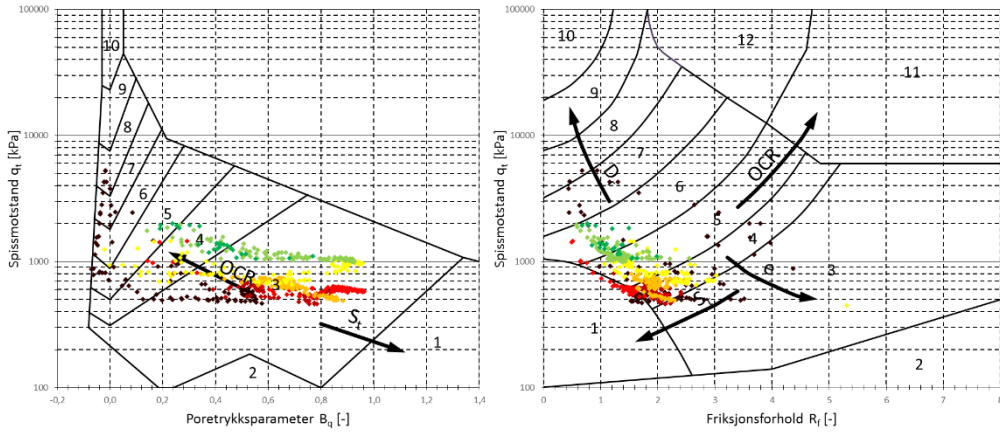
## D – 9: Jordartsklassifisering, Ranheim Vestre, R-CPTU, pkt. E4

**Zone:** **Soil Behaviour Type:**

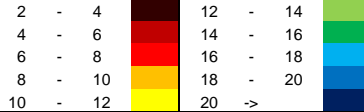
- |                          |                             |                                |
|--------------------------|-----------------------------|--------------------------------|
| 1 Sensitive fine grained | 5 Clayey silt to silty clay | 9 sand                         |
| 2 Organic material       | 6 Sandy silt to clayey silt | 10 gravelly sand to sand       |
| 3 Clay                   | 7 Silty sand to sandy silt  | 11 very stiff fine grained (*) |
| 4 Silty clay to clay     | 8 sand to silty sand        | 12 sand to clayey sand (*)     |

(\*) overconsolidated or cemented

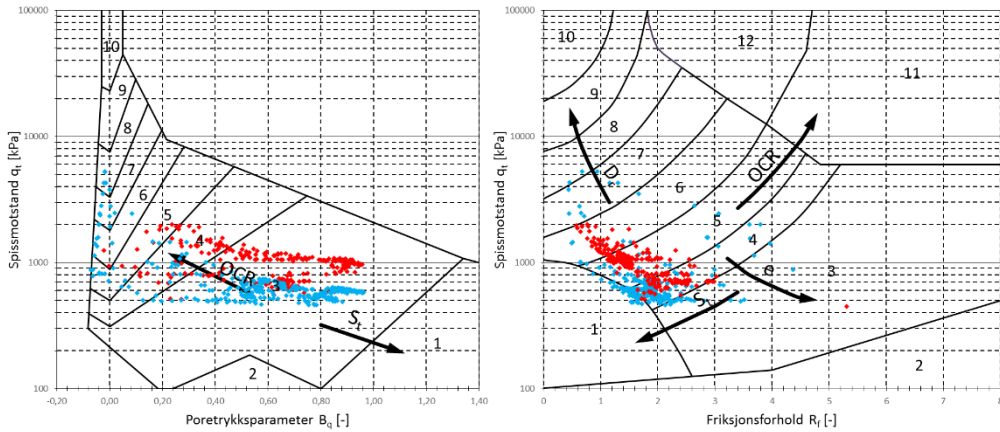
### Tolkning mot dybde:



**Dybde [m]**



### Tolkning mot resistivitet:



**Resistivitet**



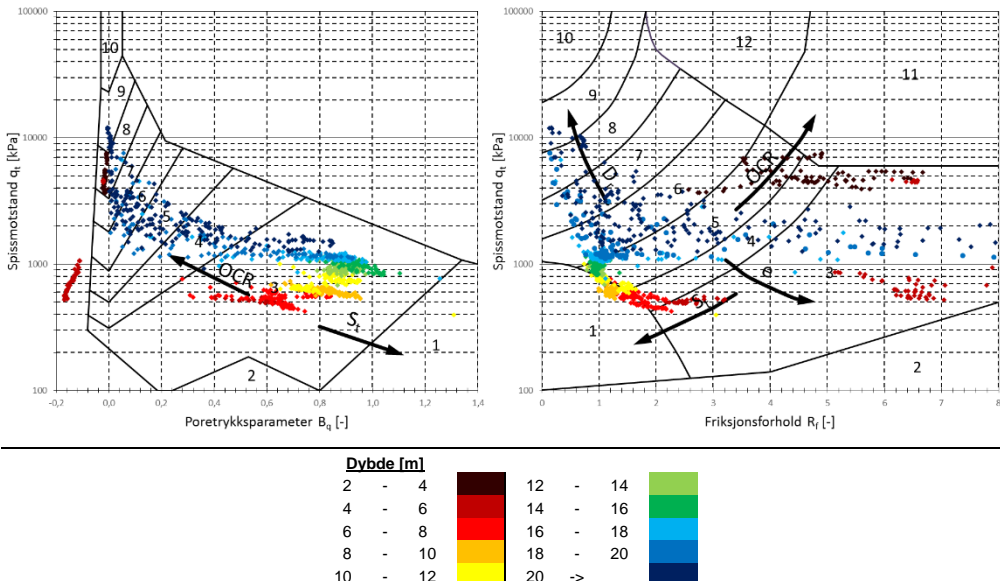
## D – 10: Jordartsklassifisering, Ranheim Vestre, R-CPTU, pkt. E5

**Zone:**    **Soil Behaviour Type:**

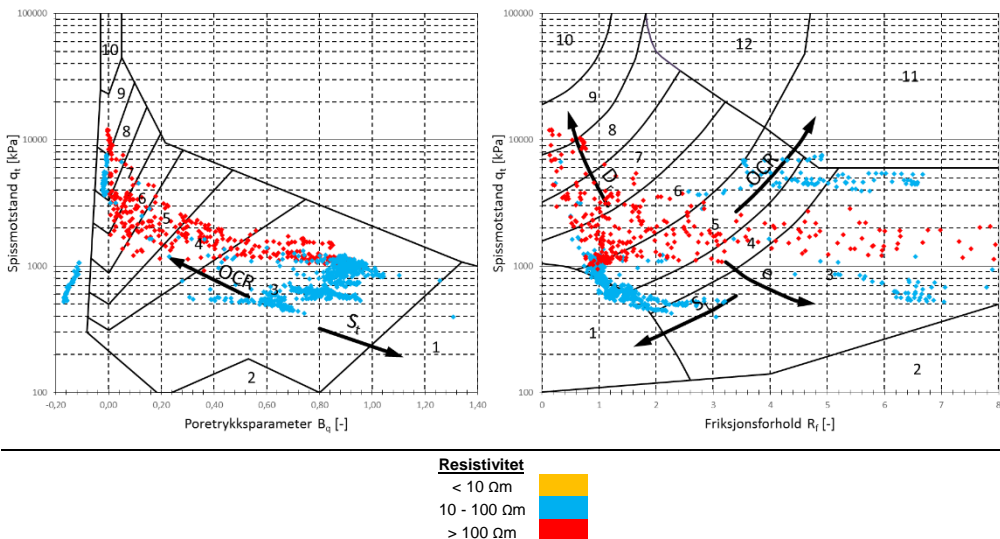
1	Sensitive fine grained	5	Clayey silt to silty clay	9	sand
2	Organic material	6	Sandy silt to clayey silt	10	gravelly sand to sand
3	Clay	7	Silty sand to sandy silt	11	very stiff fine grained (*)
4	Silty clay to clay	8	sand to silty sand	12	sand to clayey sand (*)

(\*) overconsolidated or cemented

### Tolkning mot dybde:



### Tolkning mot resistivitet:





## VEDLEGG E – TOLKNING FRA TOTAL STANGFRIKSJON, CPTU

---

E – 1: Stangfriksjonstolkning, Esp, R-CPTU (1), pkt. 1 .....	138
E – 2: Stangfriksjonstolkning, Esp, R-CPTU (1a), pkt. 1 .....	139
E – 3: Stangfriksjonstolkning, Esp, CPTU (1b), pkt. 1 .....	140
E – 4: Stangfriksjonstolkning, Esp, CPTU (1c), pkt. 1 .....	141
E – 5: Stangfriksjonstolkning, Nidarvoll, R-CPTU (12R1), pkt. 12 .....	142
E – 6: Stangfriksjonstolkning, Nidarvoll, R-CPTU (12R2), pkt. 12 .....	143
E – 7: Stangfriksjonstolkning, Nidarvoll, CPTU (12), pkt. 12 .....	144
E – 8: Stangfriksjonstolkning, Ranheim Vestre, R-CPTU, pkt. B2 .....	145
E – 9: Stangfriksjonstolkning, Ranheim Vestre, R-CPTU, pkt. E4 .....	146
E – 10: Stangfriksjonstolkning, Ranheim Vestre, R-CPTU, pkt. E5 .....	147











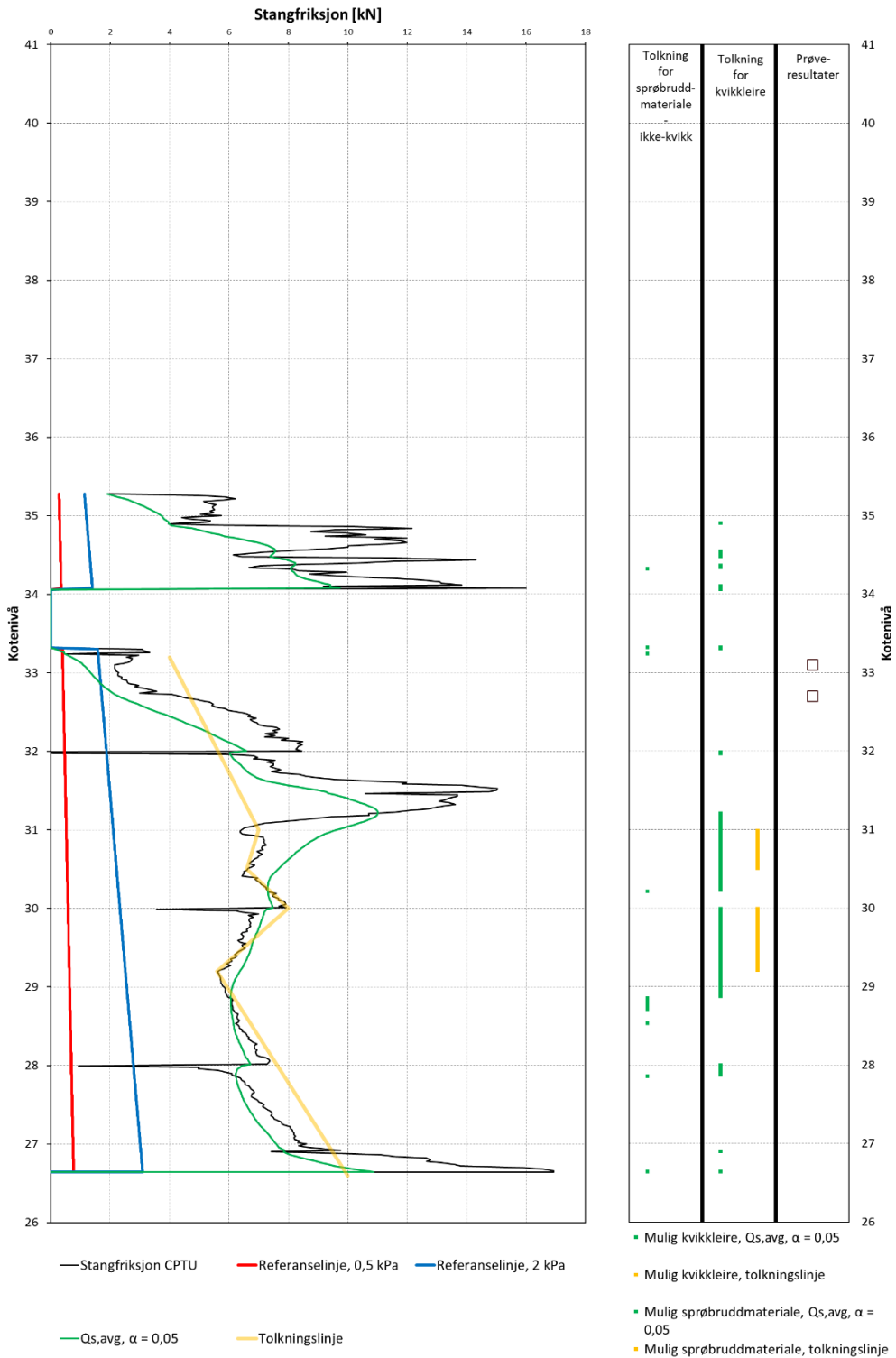








### E – 9: Stangfriksjonstolkning, Ranheim Vestre, R-CPTU, pkt. E4





### E – 10: Stangfriksjonstolkning, Ranheim Vestre, R-CPTU, pkt. E5

