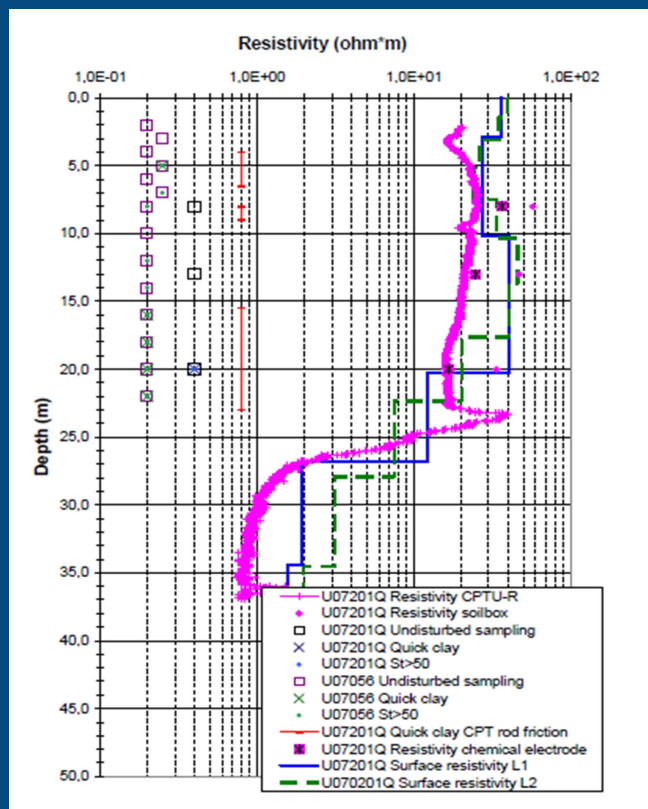




Naturfareprosjektet Dp. 6 Kvikkleire Detektering av sprøbruddmateriale ved hjelp av R-CPTU

47
2014



R
A
P
P
O
R
T

Naturfareprosjektet: Delprosjekt Kvikkleire

Detektering av sprøbruddmateriale ved hjelp av R-CPTU

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

2014

Rapport nr. 47/2014

Detektering av sprøbruddmateriale ved hjelp av R-CPTU

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

Utarbeidet av: Samarbeidsgruppen SINTEF/Multiconsult

Forfattere: Alberto Montafia, Rolf Sandven (Multiconsult)

Dato: 06.12.2013

Opplag: P.O.D.

ISBN: 978-82-410-0996-9

Avrop:

I 2012 gjennomførte SINTEF-Multiconsult gruppen et FoU oppdrag knyttet til detektering av kvikkleire ved bruk av ulike sonderingsmetoder. Dette oppdraget beskrevet dagens bransjepraksis i forhold til påvisning av kvikkleire fra ulike feltmetoder. Oppdraget dekker de utvalgte metodene dreiesondering, dreietrykksondering, totalsondering, CPTU og vingeboring, med sammenstilling mot laboratorieresultater fra opptatte prøver. Det var beskrevet også mulige feilkilder og avvik i tolkningen for de ulike metodene, belyst med reelle eksempler fra praksis. Eksempelene viste at dagens sonderingsmetoder ikke gir entydig og riktig informasjon om kvikkleireforholdene i alle tilfeller, og at dette i noen grad påvirkes av de opptredende grunnforholdene. Dette er også sammenholdt med svenske erfaringer som viser noenlunde samme mønster. Oppdraget anbefaler å inkludere resistivitetsmålinger og bruk av R-CPTU i forskningsarbeidet. I våren 2013 levert to studenter sine hovedoppgaver knyttet til d knyttet til detektering av kvikkleire fra ulike sonderingsmetoder

Kvikkleiregruppen ser nytten og verdien i resistivitetsmålinger i store kartleggingsoppgaver, hvor det også utføres andre relevante "punkt"-undersøkelser som R-CPTU som kan benyttes til kalibrering av både 1- og 2-dimensjonale resistivitetsmålinger. Prosjektforslaget fra Sintef-Multiconsult gruppen Notat fra Multiconsult, Oppdrag nr. 415559 datert 12.03.2013 deles opp i to trinn der første trinn (i 2013) vil være en arkivstudie og oppsummering av tilgjengelig materiale og resultater fra tidligere undersøkelser. Etatene kan supplere med rapporter knyttet til resitivitetsmålinger fra sine arkiver. Det er ønskelig at resultater er publisert/presentert av SINTEF-Multiconsult gruppen i Teknologidagene den 22. oktober 2013. Timer knyttet til forberedelsen og deltagelsen på Teknologidagene er inkludert i det foreslåtte budsjettet. Omfang av trinn to (i 2014) vil være avhengig av resultater fra første trinn, men det er sannsynlig at tilgjengelig data må suppleres med nye feltundersøkelser for å få tilstrekkelig grunnlag for anbefalinger og konklusjoner. Anbefalingen bør underbygges med sammenstilling av forsøksresultater og konkrete referanser samt forslag til arbeidsprogram for trinn 2. Vi ber om at leveransen også har synspunkter knyttet til resultatene/konklusjonene: Hva skal, bør eller kan tas i bruk? Hvordan skal det brukes?

Emneord: sprøbruddmateriale, kvikkleire, R-CPTU, vingebor, laboratorieforsøk, FoU-oppgaver

Rapport

NIFS – Naturfare-infrastruktur, flom og skred

OPPDRAK

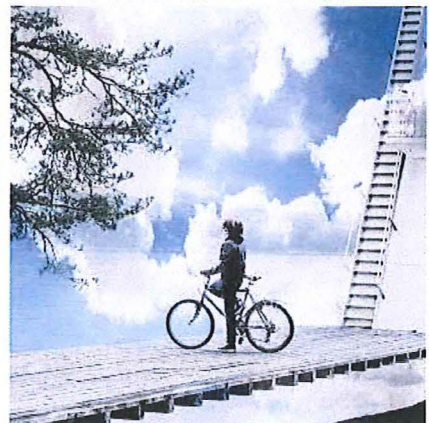
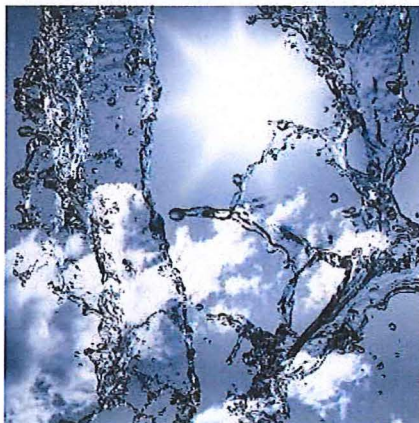
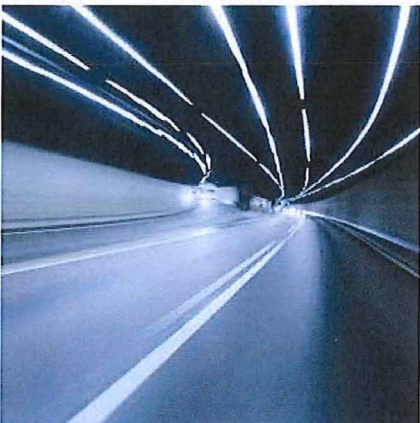
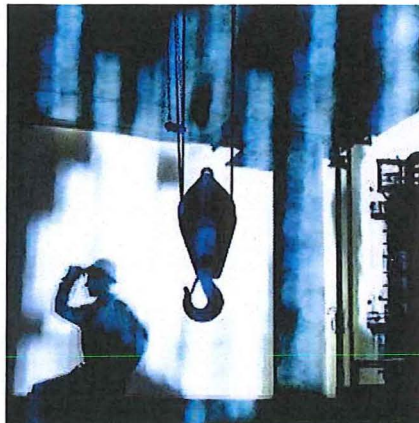
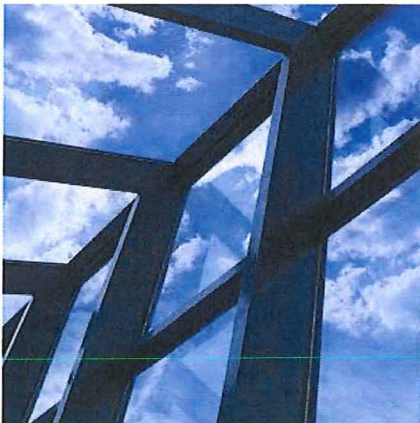
Delprosjekt 6 Kvikkleire. SM3 (6.4)

EMNE

Detektering av sprøbruddmateriale ved hjelp av R-CPTU.

DOKUMENTKODE

415559-RIG-RAP-002rev00



Multiconsult

REV.	DATO	BESKRIVELSE	UTARBEIDET AV	KONTROLLERT AV	GODKJENT AV
00	06.12.2013	Endelig rapport oversendt oppdragsgiver for sluttbehandling.	Alberto Montafia, Rolf Sandven <i>AM</i>	Rolf Sandven <i>RS</i>	Arne Vik <i>AV</i>
00	18.11.2013	Foreløpig rapport. Oversendt kunde for kommentarer	Alberto Montafia, Rolf Sandven	Rolf Sandven	Arne Vik

Med mindre annet er skriftlig avtalt, tilhører alle rettigheter til dette dokument Multiconsult.

Innholdet – eller deler av det – må ikke benyttes til andre formål eller av andre enn det som fremgår av avtalen. Multiconsult har intet ansvar hvis dokumentet benyttes i strid med forutsetningene. Med mindre det er avtalt at dokumentet kan kopieres, kan dokumentet ikke kopieres uten tillatelse fra Multiconsult.

RAPPORT

OPPDRAG	NIFS – naturfare-infrastruktur, flom og skred. Delprosjekt 6 Kvikkleire.	DOKUMENTKODE	415559-RIG-RAP-002rev00
EMNE	.Detektering av sprøbruddmateriale ved hjelp av R-CPTU.	TILGJENGELIGHET	Åpen
OPPDRAGSGIVER	Statens vegvesen, Jernbaneverket og NVE	ANSVARLIG ENHET	3012 Trondheim Geoteknikk
KONTAKTPERSON	Vikas Thakur, Statens vegvesen		

SAMMENDRAG

Etatsatningsprosjektet NIFS (Naturfare – infrastruktur, flom og skred) er et samarbeid mellom Norges Vassdrags- og Energidirektorat (NVE), Jernbaneverket og Statens vegvesen. Delprosjekt 6 i dette prosjektet har hovedfokus på kvikkleire. SINTEF og Multiconsult AS samarbeider i dette prosjektet som den ene av to kontraktsfestede parter. I en av arbeidsoppgavene i prosjektet vurderes detekteringsmetoder for påvisning av sprøbruddmateriale fra ulike felt- og laboratoriemetoder. Sprøbruddmateriale defineres som kvikkleire ($s_r < 0,5$ kPa) og sensitiv leire ($s_r < 2,0$ kPa, $S_t > 15$). Hensikten med dette studiet er å vurdere ulike felt- og laboratoriemetoders egnethet i forhold til påvisning av slike materialer på en rasjonell og pålitelig måte.

Bruk av 2D resistivetsmålinger på terrengoverflaten, kjent som Elektrisk Resistivitet Tomografi (ERT) har vist seg å være en anvendelig metode for kartlegging av sprøbruddmateriale, særlig i Norge og Sverige. Ved å kombinere nedhulls resistivetsbestemmelse og tradisjonell utførelse av trykksondering med poretrykksmåling (R-CPTU) kan ytterligere informasjon om lagdeling og lagenes egenskaper oppnås. R-CPTU har allerede blitt benyttet for påvisning av kvikkleire her til lands, særlig i FoU-prosjekter men også i en del kommersielle prosjekter. Det eksisterer imidlertid fremdeles noe usikkerhet knyttet til resultatolkning, blant annet resistivetsintervall for kvikkleirer, forståelse av hvorfor noen utvaskede leirer ikke blir kvikke, samt mulige sammenhenger mellom resistivitet og geotekniske egenskaper som kan benyttes i geotekniske korrelasjoner.

Jord er et komplekst tre-fase system der fast stoff og væskefasen virker sammen. Når jordpartikler blir avsatt i saltvann vil det være et stort antall oppløste ioner i porevannet. Sammen med mineralogien for fast stoff avgjør dette den elektriske ledningsevnen for jorden. Utvaskede marine leirer har fått redusert antall oppløste ioner betydelig på grunn av grunnvannsstrømning og tilrenning av overflatevann fra nedbør og snøsmelting. Disse leirene vil derfor ha mye lavere ledningsevne og mye større elektrisk motstand enn de intakte, marine leirene. I denne rapporten er det vist at resistiviteten i marine leirer avhenger av en rekke faktorer foruten porevannets saltinnhold, blant annet leirinnhold (korngradering), mineralogi og vanninnhold.

Resistivitet i jord kan bestemmes ved hjelp av geofysiske metoder, og bruk av disse i geotekniske undersøkelser har vist seg å være en rasjonell og kostnadseffektiv strategi i større prosjekter. Mer forskning og innhenting av erfaring med metodene i bruk er imidlertid nødvendig. Det er derfor foreslått en ny arbeidsoppgave innenfor NIFS-prosjektet, der man tar sikte på å utvide den nasjonale databasen over områder der det både er benyttet geofysiske og geotekniske undersøkelsesmetoder. En detaljert beskrivelse av prosjektforslaget er vedlagt denne rapporten.

ENGLISH SUMMARY

The NIFS project is a joint venture between the Norwegian Directorate for Waterfalls and Energy (NVE), The Norwegian Railroad Administration (Jernbaneverket) and the Norwegian Public Road Administration (Statens vegvesen). Part 6 of this project has its main focus on quick clay. SINTEF and Multiconsult AS, in co-operation, are one of the two contracted parties within the NIFS project. In one of their tasks, major efforts are put into detection of quick clay from various field and laboratory investigation methods. The main objective is to evaluate if the methods are potentially able to identify quick clays in a fast and reliable way.

The use of 2D geo-electrical investigations using electrical resistivity tomography (ERT) has proven to be a useful tool for quick clay mapping, particularly in Norway and Sweden. Adding resistivity measurements to classical cone penetration tests (R-CPTU) provides further information useful for stratigraphy interpretation, and R-CPTU has already been used for quick clay mapping, particularly for R&D –projects. However, uncertainties still exist related to the interval of resistivity values corresponding to quick clays, why some leached clays do not turn into quick clays and whether or not resistivity is able to give information on geotechnical parameters to be used in geotechnical correlations.

Soil is a complex three-phase system where a solid and a fluid phase interact with each other. When soil particles are deposited in seawater, the abundance of electrolytes in its pore water determines the electrical conductivity of the bulk soil volume. After being exposed to groundwater gradients and percolating water from rainfall and snow melting, leached marine clays have significantly less electrolytes dissolved in their pore water, and can therefore be distinguished from un-leached marine clays due to their higher resistivity. In this report, resistivity in marine clays is shown to depend upon a wide range of factors, including pore water salinity, clay content, mineralogy and water content.

Resistivity in soils can be measured with geophysical methods, and the integration of these methods in geotechnical site investigations has proven to be a viable and efficient way to obtain information representing large soil volumes. However, more research and experience with the integration of resistivity methods in geotechnical site investigations is needed. A project task proposal is hence appended to this report to increase the national database of test sites where both conventional geotechnical and geophysical methods will be used. The detailed project proposal is enclosed to this report.

INNHALDSFORTEGNELSE

Sammendrag

English summary

Symbolliste

1	Innledning	8
1.1	Bakgrunn	8
1.2	Problemstilling	8
1.3	Hensikt med studiet	8
2	Jordartsdannelse og geokjemi.....	9
2.1	Dannelse av leire	9
2.2	Porevann	10
2.3	Interaksjon mellom faste partikler og porevann.....	10
2.3.1	Elektrisk dobbeltlag	10
2.3.2	Flokkulering	11
2.4	Sensitiv leire	12
3	Resistivitet.....	13
3.1	Teori.....	13
3.2	Typiske resistivetsverdier i jordarter	13
3.3	Faktorer som påvirker resistivitet	14
3.3.1	Saltinnhold	15
3.3.2	Kornfordeling	16
3.3.3	Mineralogi	16
3.3.4	Vanninnhold	16
3.3.5	Andre mulige faktorer	17
3.4	Resistivetsmodeller	17
3.4.1	Grovkornede jordarter	17
3.4.2	Leire.....	18
4	Metoder for måling av resistivitet.....	19
4.1	2D resistivetsmålinger	19
4.2	R-CPTU	20
4.3	Laboratoriemålinger.....	20
5	R-CPTU	21
5.1	Kalibrering	22
5.2	Tidligere erfaringer med R-CPTU.....	24
5.3	Samsvar mellom R-CPTU og ERT	25
6	Praktisk bruk av resistivetsmålinger for detektering av utvasket leire.....	26
6.1	Eksempel på integrert bruk av resistivetsmålinger i geotekniske undersøkelser	26
7	Forslag til videre utvikling av R-CPTU	30
7.1	Videre arbeid.....	30
7.2	Videre planer i NIFS: Feltstudie R-CPTU	30
8	Referanser	32
9	Vedlegg	35
	Vedlegg 1 Opplegg for og gjennomføring av feltstudie i NIFS	
	Vedlegg 2 Avrop SM-3 6.4 Detektering av kvikkleire ved bruk av R-CPTU	

SYMBOLLISTE

Latinske symboler

A	Krumningskoeffisient	-
a	Tilpasningskoeffisient (Rhoades et al. (1976))	-
a _c	Aktivitetsindeks	-
B	Ekvivalent ledningsevne av ionene i det elektriske dobbeltlaget	Ωm/m
b	Tilpasningskoeffisient (Rhoades et al. (1976))	-
B _q	Poretrykksforhold	-
C	Leirinnhold	%
c	Sementeringskoeffisient (Shah & Sing (2005))	-
D	Relativ permittivitet	-
e	Elementærladning	C
E	Elektrisk felt	V/m
F	Formasjonsfaktor	-
f _s	Sidfriksjon CPTU	kPa
I	Strømintensitet	A
i	Imaginær enhet	
I _L	Flyteindeks	%
I _p	Plastisitetsindeks	%
J	Elektrisk strømtetthet	A/m ²
k	Boltzmanns konstant	eV/K
K	Geometrisk faktor	m
m	Sementeringssekspont	-
n	Porøsitet	%
n ₀	Ionekonsentrasjon	
Q	Spissmotstandstall CPTU	-
q _t	Korrigert spissmotstand CPTU	kPa
Q _v	Jordens ionebyttekapasitet	meq/ml
R	Elektrisk motstand	Ω
R _f	Sidfriksjonsforhold CPTU	-
s _r	Omrørt skjærfasthet	kPa
S _t	Sensitivitet	-
t	Tykkelse av elektrisk dobbeltlag	m
T	Temperatur	K
u	Poretrykk	kPa
v	Ionevalens	-
X	Proporsjonalitetsfaktor(Waxman & Smits (1968))	-
ΔV	Potensialdifferanse	V

Greske symboler

ε	Permittivitet	F/m
ε*	Kompleks permittivitet	F/m
ε''	Imaginærdelen av kompleks permittivitet	F/m
ε ₀	Vakuums permittivitet	F/m
θ	Volumetrisk vanninnhold	%
Λ	Lengdeparameter (Johnson (1986))	m
ρ	Resistivitet	Ωm
ρ _w	Porevannets resistivitet	Ωm
σ	Elektrisk ledningsevne	S/m
σ*	Kompleks ledningsevne	S/m
σ'	Reell del av kompleks ledningsevne	S/m
σ _s	Faste partiklers elektriske ledningsevne	S/m
σ _w	Porevannets elektrisk ledningsevne	S/m
ω	Vinkelfrekvens	rad/s

Forkortelser

AEM	Airborne Electromagnetic Measurements
CPTU	Trykksondering med poretrykksmåling
ERT	Elektrisk resistivitet tomografi
IP	Indusert polarisasjon
R-CPTU	Trykksondering med resistivitetsmåling (CPTU-R også benyttet)
TDR	Time domain reflectometry

1. Innledning

1.1. Bakgrunn

Etatene Statens vegvesen (SVV), Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE) og Jernbaneverket (JBV) har tildelt samarbeidspartnerne SINTEF og Multiconsult samlet en rammeavtale under etatsatsningsprosjektet Naturfare - Infrastruktur, flom og skred (NIFS). Arbeidsoppgavene gjennomføres innenfor delprosjekt 6 som omhandler kvikkleire. Hovedmålsettingen med NIFS-prosjektet er i henhold til /24/ og "Samordne retningslinjer og bedre verktøy for geoteknisk prosjektering i kvikkleireområder".

Innenfor denne rammeavtalen er det tildelt en oppgave med tittelen "Detektering av kvikkleire". En del av denne aktiviteten går ut på å gjennomgå og sammenstille kriterier for detektering av mulig sprøbruddmateriale fra ulike felt- og laboratoriemetoder. Denne rapporten har hovedfokus på en vurdering av trykksøndering med resistivitetsmåling, R-CPTU.

1.2. Problemstilling

Den store innsatsen for kartlegging av faresoner for kvikkleire har ført til økende behov for raskere og mer pålitelig identifisering av kvikkleireområder. Geofysiske grunnundersøkelser utført med geo-elektriske metoder har gitt bevis på at slike metoder kan være godt egnet til kvikkleirekartlegging. Tradisjonelt har den mest brukte geo-elektriske metoden for detektering av kvikkleire vært 2D-resistivitetsmålinger på terrengoverflaten (ERT, Electrical Resistivity Tomography). Metoden er benyttet også i bergteknikk og i forbindelse med malmløsing. Metodikken som benyttes til å bestemme resistivitetsfordelingen i grunnen er dog i noen grad preget av usikkerhet, spesielt på større dyp og nær endene av måleseksjonen.

For å fjerne en del av usikkerheten kan resistiviteten også bestemmes i borehull ved hjelp av trykksønderinger med resistivitetsmåling (R-CPTU). Med dette utstyret er det mulig å måle jordens elektriske egenskaper i et borehull, i tillegg til at jordens lagdeling bestemmes meget nøyaktig. Når 2D-resistivitetsmålinger blir integrert med nedhulls R-CPTU målinger, vil tolkning av hele profilet kunne bli mer pålitelig. I denne sammenhengen er relasjonen mellom jordartenes kjemiske, fysiske og geotekniske egenskaper og resistivitet viktig, og det er behov for videre forskning og erfaringsinnhenting for å bedre forståelsen på dette feltet.

1.3. Hensikt med studiet

Dette studiet oppsummerer tidligere kunnskap og erfaringer knyttet til resistivitetsmålinger i kvikkleire, spesielt ved bruk av R-CPTU, men også i noen grad ERT. For å få en bedre forståelse av hvordan disse geo-elektriske metodene er til nytte for identifisering av kvikkleire, vil de grunnleggende prinsippene vedrørende jordartsdannelse, geo-kjemi og leirpartiklenes elektriske egenskaper bli gjennomgått innledningsvis.

Videre vil dagens «state-of-the art» og «state-of-the-practice» bli beskrevet, både når det gjelder utstyr, feltprosedyrer, tolkning av resultater og usikkerheter forbundet med dette.

I siste delen av rapporten er det foreslått videre forskningsaktiviteter innen NIFS-prosjektet som kan bidra til å videreutvikle R-CPTU og anvendelsen av metoden til detektering av kvikkleire.

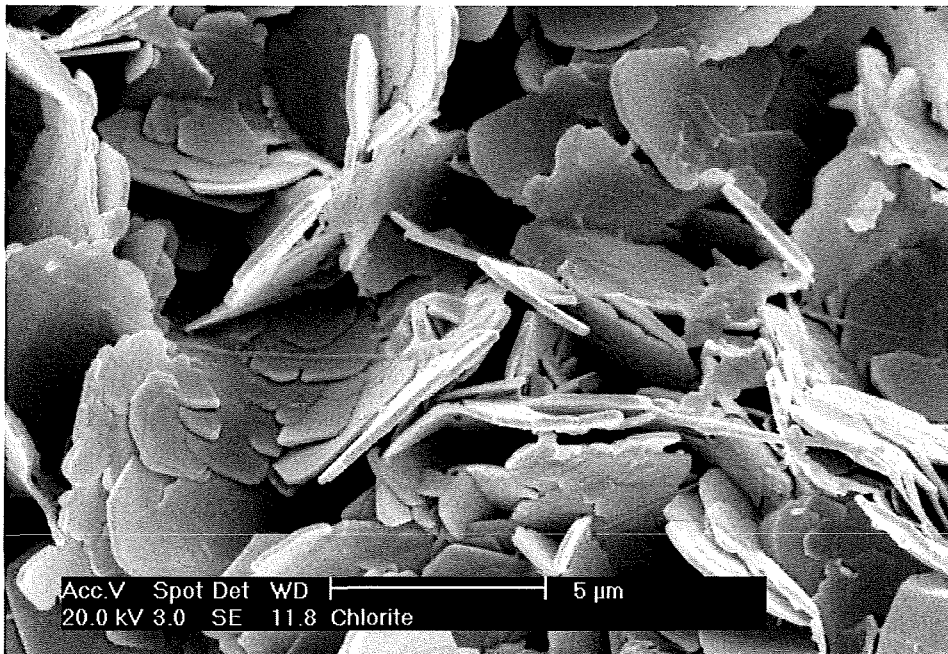
2. Jordartsdannelse og geokjemi

Jord består av en blanding av faste partikler, flytende og gassformige substanser. Jordpartiklene danner en struktur hvor porene er fylt med væske. Jords egenskaper er avhengige av den gjensidige påvirkningen mellom disse tre komponentene. Når forholdet mellom fasene endrer seg, blir også jordartens egenskaper forandret.

2.1. Dannelse av leire

I Norge defineres en jordart som leire når leirinnholdet ($\% < 2 \mu\text{m}$) er større enn 30 %. Leirinnhold beregnes som forholdet mellom vektprosent av alle faste partikler med størrelse $< 2 \mu\text{m}$ og vekt av alle faste partikler i jordprøven. Begrepet leire indikerer egentlig både en jordart og en familie av silikatmineraler (leirmineraler).

Leirmineraler er sekundære mineraler, det vil si at de oppstår som følge av forvittringsprosesser som finner sted i silikater. Et særtrekk for leirmineralene er formen: De framstår oftest som flate, tynne plater mens andre mineraler som danner jordpartikler vanligvis er klumpete. Dermed er forholdet mellom leirmineralers overflate og deres masse noen størrelsesordener større for leirmineraler enn det er for ikke-leirige mineraler. Dessuten er leirmineraler negativt elektrisk ladet, og de samhandler med vann når de blir blandet sammen.



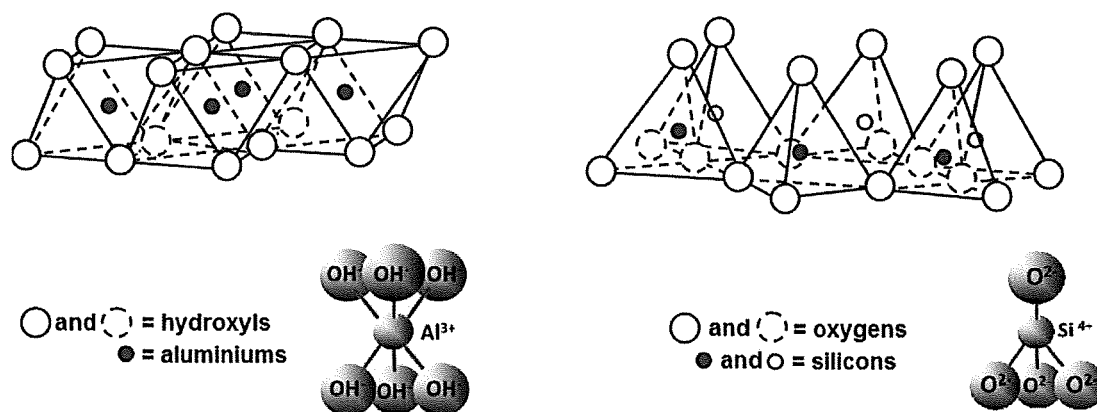
Figur 2-1: Elektronmikroskopimage av klorittpartikler (minersoc.org).

Leirmineraler omfatter bestanddeler av kaolinit, illitt, vermikulitt, smektitt og kloritt. Denne gruppen mineraler består av tetraedriske og oktaedriske sjikt av silikater. Hver type mineraler har forskjellige egenskaper når det gjelder ionebyttekapasitet og svelling. Svellingsevnen er ofte kvantifisert av aktiviteten, som er definert som forholdet mellom plastisitetsindeks I_P og leirinnhold C :

$$a_c = \frac{I_P}{C} \quad [2-1]$$

Bergartene disse mineralene stammer fra bidrar til å bestemme porevannets alkalitet, samt mengde og type av oppløste elektrolytter. Kationer som ligger i det mineralske gitteret (de svarte prikkene i Figur 2-2) kan utveksles med andre kationer som vanligvis har mindre valens. Dermed er leirmineralene negativt elektrisk ladet. Prosessen er kjent som isomorf substitusjon.

Den elektriske ubalansen på leirens overflate kan utjevnes både med indre justeringer i det mineralske gitteret, og med kohesjon med andre leirpartikler. Det som oftest foregår er at positivt ladede partikler blir trukket til leirmineralenes overflate fra den tilstøtende fasen.



Figur 2-2: Tetraedriske og oktaedriske silikatsjikt (claymin.geoscienceworld.org).

2.2. Porevann

Væsken som finnes i grunnvannet består vanligvis av vann og en rekke typer av oppløste elektrolytter i varierende mengder. Jord forurenset av sigevann vil ofte være rikt på organiske forbindelser og tungmetaller. Type og mengde av ioner som finnes i porevannet til en jordforekomst er direkte avhengig av det opprinnelige avsetningsmiljøet, og av de geologiske prosessene som senere har påvirket avsetningen.

Marine leirer avsettes opprinnelig i sjøvann. Natrium (Na) utgjør den aller største andelen av oppløste kationer, mens magnesium (Mg), kalsium (Ca) og kalium (K) finnes i mindre, men fortsatt betydelige mengder. Klor (Cl) er den rikeligste typen av anioner som er oppløst i sjøvann, fulgt av sulfat (SO_4). I norske marine leirer er disse ionene de som finnes i størst mengder, men i forskjellige proporsjoner i forhold til i sjøvann. Blant anionene i porevannet finnes det også uorganiske karbonater (CO_3), som utgjør en mye større andel av anioner enn i vanlig sjøvann.

Porevannets kjemiske komposisjon kan altså forvandles og vil kunne variere over tid. Under bestemte forhold fører forvitring og kjemiske reaksjoner til at leirmineralene utveksler kationer med porevannet. Innhold av kalsium, kalium og karbonater i porevannet er et tegn på at disse forvitningsprosessene pågår. Noen av disse reaksjonene påvirker ikke strukturen til mineralene, selv om de kan påvirke jordens egenskaper.

Det er imidlertid ikke bare kjemiske prosesser og reaksjoner som forandrer porevannet. Utvasking som følge av grunnvannstrømmer eller infiltrasjon av nedbør og vann fra snøsmelting kan fjerne elektrolytter fra porevannet slik at porevannets ioneinnhold endres.

2.3. Interaksjon mellom faste partikler og porevann

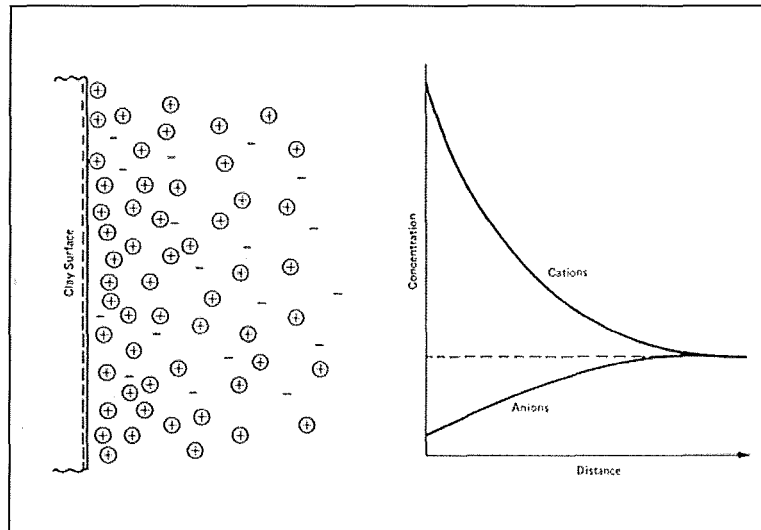
Interaksjoner i partikkel-porevann systemet begynner mens jordarten dannes, og de er hovedsakelig styrt av elektrolyttkonsentrasjonen og andre fysisk-kjemiske forhold i porevannet. Med unntak av forvitringjordarter, avsettes sjelden jordartene på samme sted de blir dannet, og dermed blir jordarten utsatt for et miljø som er forskjellig fra det opprinnelige. I det nye miljøet kan derfor mekaniske, kjemiske og biologiske forvitningsprosesser potensielt sett fullstendig endre de fysiske og kjemiske egenskapene til en jordart. Prosessene gjelder både for de faste jordpartiklene og porevannet, slik at nye leirmineraler kan dannes og forskjellige elektrolytter oppløses.

De to viktigste elementene som har innvirkning på en leires fysiske og geotekniske egenskaper er det elektriske dobbeltlaget og flokkuleringsprosessen.

2.3.1. Elektrisk dobbeltlag

For å balansere en leires negative ladning er konsentrasjonen av kationer høyere på leirmineralenes overflate enn den gjennomsnittlige verdien i porevannet, mens anioners konsentrasjon er vesentlig mindre. Tendensen i porevannet er å oppnå en jevn fordeling av de elektriske ladningene. Dermed avtar kationekonsentrasjonen med økende distanse fra leirmineralets overflate. Samtidig øker konsentrasjonen av anioner, slik at i en viss avstand fra leirmineralets overflate er ladningen av positive og negative ioner lik (se Figur 2-3).

Systemet som dannes av leirpartikkelens overflateladninger og distribusjon av ioner i det overflatenære porevannet er kjent som det elektriske dobbeltlaget. Kationene som blir adsorbent kan også byttes med andre kationer som finnes oppløst i porevannet. Derfor er de kjent som utbyttbare kationer. Adsorbente, monovalente kationer som natrium eller kalium er de mest utbyttbare ionene, det vil si at bi- eller trivalente kationer som kalsium eller aluminium lett kan erstatte dem. Som regel har flervalente kationer bedre evne til å bli adsorbent i det elektriske dobbeltlaget enn de monovalente.



Figur 2-3: Det elektriske dobbeltlaget (*appliedgeophysics.lbl.gov*).

Ifølge den såkalte DLVO teorien, utviklet av Derjaguin & Landau (1941) og utvidet av Verwey & Overbeek (1948), kan dobbeltlagets tykkelse beregnes som:

$$t = \sqrt{\frac{\epsilon_0 D k T}{2 n_0 e^2 v^2}} \quad [2-2]$$

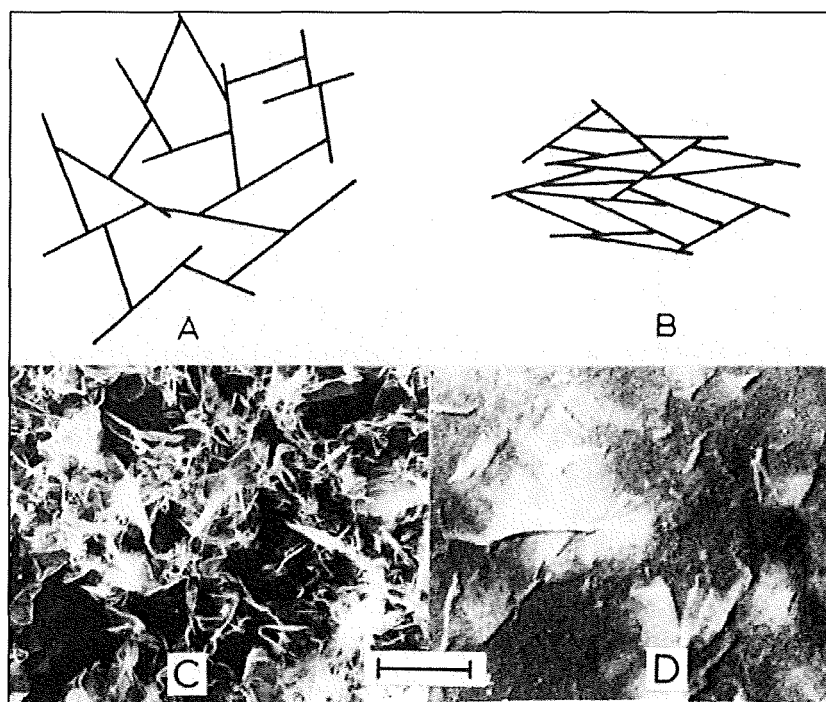
Her er:

- ϵ_0 = vakuumets permittivitet (konstant)
- D = relativ permittivitet, som defineres som forholdet mellom et stoffs permittivitet ϵ og vakuumets permittivitet ϵ_0
- k = Boltzmanns konstant
- T = temperatur
- n_0 = ionekonsentrasjon
- e = elementærladning (konstant)
- v = ionevalens

Det vil si at dobbeltlagets tykkelse er omvendt proporsjonal med kvadratroten av ionekonsentrasjonen og også omvendt proporsjonal med ionenes valens, forutsatt at de andre faktorene forblir konstant. Selv om formel [2-2] ikke gir noen nøyaktig beskrivelse av dobbeltlagets oppførsel, er faktorene som inngår i formelen de som styrer fenomenet.

2.3.2. Flokkulering

Dobbeltlagets tykkelse avgjør en leires tekstur. Når leirpartikler avleires i vann, er det mengden av oppløste elektrolytter som bestemmer dobbeltlagets tykkelse i henhold til formel [2-2]. Jo tynnere dobbeltlaget er, jo mindre er de frastøtende elektrostatiske kreftene mellom leirpartiklene. Når de frastøtende kreftene mellom leirpartiklene er små, vil leirpartiklene vanligvis flokkulere. Det vil si at de arrangeres enten kant mot kant eller kant mot flate som vist i Figur 2-4.



Figur 2-4: Mikrobilder av flokkulert (A og C) og dispersert (B og D) struktur (*dl.sciencesocieties.org*).

Som følge av denne måten å arrangere partiklene på, dannes en porøs struktur med relativt store og åpne porer. I ferskvann, og generelt i vannmiljøer med få oppløste elektrolytter, vil leirpartiklene ordnes flate mot flate, og dette medfører en struktur som i prinsippet er mindre porøs. Slike forhold vil prege avsatte ferskvanns leirer (lakustrine leirer).

2.4. Sensitiv leire

De aller fleste norske kvikkleireforekomster består av ikke-svellende leirmineraler som ble avleiret i saltvann under siste istid, og som etterpå er blitt utvasket av nedbør og grunnvann gjennom tusener av år. Den mer eller mindre konstante strømmen av grunnvann gjennom jord er blant annet en direkte konsekvens av landhevingen som har foregått over størstedelen av Skandinavia siden siste istid. Leire er svært lite permeabel og gjennomstrømningsprosessen tar dermed lang tid. Det finnes likevel geologiske og topografiske forhold som fremskynder utvaskingen, som for eksempel tilstedeværelse av lag med høy permeabilitet og, ikke minst, artesiske grunnvannsforhold med poreovertrykk i grunnen.

På grunn av den høye forekomsten av oppløste kationer i sjøvann, der saltinnholdet er ca. 35 g/l, flokkulerte leirpartiklene da de ble avleiret. Strukturen for partiklene i jorden er i prinsippet ikke berørt av utvasking, selv om forholdet mellom de tiltrekkende og de frastøtende elektrostatiske kreftene som holder strukturen sammen blir stadig mindre. Det som står igjen når saltinnholdet i porevannet når en konsentrasjon på ca. 2 g/l (Torrance, 1974), er et sprøtt kornskjelett med relativt stort porevolum. Når strukturen ødelegges ved overbelastning eller omrøring, bryter den sammen i sitt eget porevann og leiren blir i disse tilfellene til en flytende væske. Mangelen på oppløste kationer i porevannet gjør re-flokkuleringsprosessen umulig og dermed blir skjærfastheten i denne tilstanden ekstremt lav.

Under disse forutsetningene kan marine leirer utvikle egenskaper som karakteriserer oppførselen til disse materialene. I henhold til norske retningslinjer defineres en leire som kvikk når omrørt skjærfasthet (s_r) er mindre enn 0,5 kPa. Kvikkleirene har ofte meget høy sensitivitet ($s_u/s_r = S_t > 30$), men i praksis kan ofte sensitiviteten gi et misvisende inntrykk på grunn av prøvforstyrrelse som reduserer s_u . Selv om mange leireforekomster som blir utsatt for lang utvasking ikke har slike ekstreme egenskaper, viser de en liknende sprø oppførsel ved brudd. Disse materialene betegnes etter NVEs retningslinjer som sprøbruddmaterialer med sensitivitet $S_t > 15$ og omrørt skjærfasthet $s_r < 2,0$ kPa. Begge kriteriene må være tilfredsstillt for at materialer skal kunne ha denne betegnelsen. Basert på nyere forskning og studier av omrørt leires flyteegenskaper, diskuteres det nå om sensitivitetsgrensen skal tas ut og verdien for omrørt skjærfasthet skal senkes til 1,0 kPa (Thakur et al., 2013).

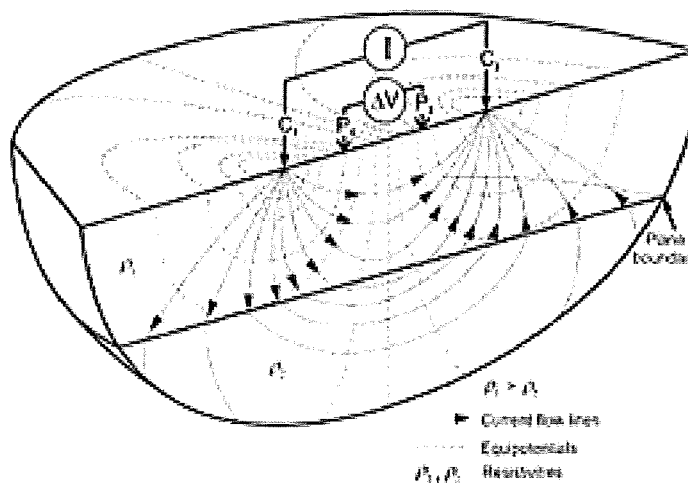
3. Resistivitet

3.1. Teori

Elektrisk resistivitet ρ er en materialegenskap som kvantifiserer hvor sterkt et materiale hindrer flyten av elektrisk strøm. Det kan defineres som forholdet mellom elektrisk feltintensitet og elektrisk strømtetthet, som vist i formel [3-1].

$$\rho = \frac{E}{J} \quad [3-1]$$

Denne materialegenskapen kan måles med to parvise sett med elektroder, to som sender elektrisk strøm ned i jorden med en bestemt intensitet I [A] og to som måler potensialdifferansen ΔV [V], se Figur 3-1.



Figur 3-1: Fordeling av strømlinjer rundt et potensialfall (www.ngi.no).

I praksis finnes det en sammenheng mellom den målte elektriske motstanden R [Ω] og resistiviteten. R er definert etter følgende forhold:

$$R = \frac{\Delta V}{I} \quad [3-2]$$

Dermed kan resistiviteten uttrykkes som:

$$\rho = KR \quad [3-3]$$

der K [m] er en geometrisk faktor som er avhengig av elektrodene geometri. Resistivitetens SI-enhet blir da [Ωm].

3.2. Typiske resistivitetsverdier i jordarter

Forskjellige jordarter har typiske resistivitetsintervaller som i teorien kan benyttes til å skille dem fra hverandre. Bestemmelsen vil være nyttig blant annet ved kartlegging av kvikkleire. Imidlertid viser jordartenes vanlige resistivitetsintervaller noe overlapping, og tolkning av målte resultater kan derfor være vanskelig og villedende uten sammenligning med resultater fra ordinære geotekniske grunnundersøkelser.

Elektrisitet i jordforekomster som ikke inneholder mineraler med høy ledningsevne skyldes som regel strømmer av ioner. Ioner finnes hovedsakelig oppløst i porevannet og porevannets ledningsevne vil derfor være en svært viktig, men ikke den eneste påvirkningsfaktor for jordens målte resistivitet.

Elektrolytter finnes imidlertid også i det elektriske dobbeltlaget. Kationene som finnes i dobbeltlaget kan mobiliseres og lede elektrisitet på leirpartiklens overflate. Derfor kan man hevde at jordpartiklens bidrag til resistiviteten stort sett er styrt av kornfordelingen på grunn av leirmineralenes elektriske egenskaper. Man

kan imidlertid ikke utelukke at andre egenskaper har innflytelse på dette fenomenet, som for eksempel partiklens mineralogi, opptredende porevolum, metningsgrad og eventuelt innhold av organiske substanser. Mekanismer som styrer resistiviteten i grovkornete jordarter er bedre forstått enn de tilsvarende i finkornete jordarter, fordi de ledende egenskapene til leirpartiklene kompliserer bildet. Det som fortsatt ikke er helt forstått i leirige jordarter er i hvilken grad de forskjellige nevnte innflytelsesfaktorene påvirker resistiviteten.

I utgangspunktet er følgende resistivitetsintervaller benyttet for å karakterisere jordartene:

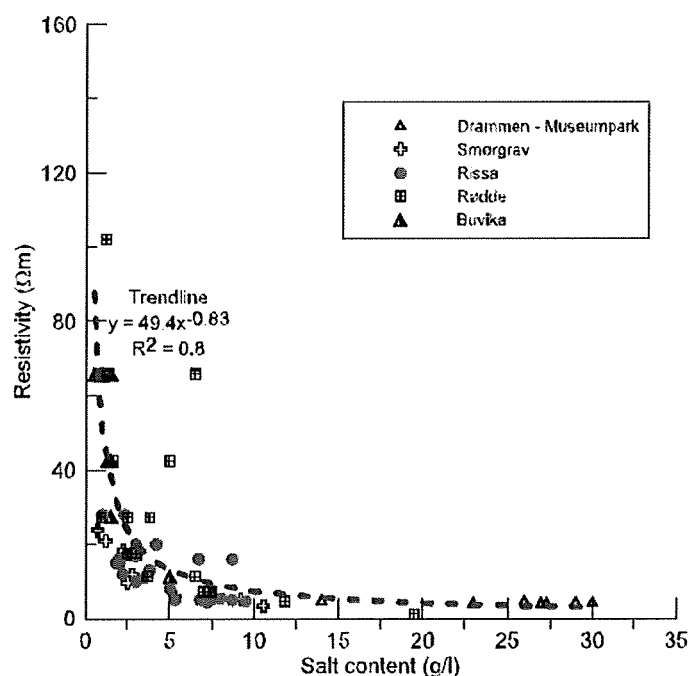
Tabell 3-1: Typiske resistivitetsverdier i forskjellige jordarter (basert på Berger, 1983 og Solberg, 2012).

Intervall	Jordart
1-10 Ωm	Saltholdig leire
10-100 Ωm	Utvasket leire
70-300 Ωm	Tørrskorpeleire
50-200 Ωm	Mettet silt
200-1000 Ωm	Mettet sand

Det finnes imidlertid flere eksempler der det er målt verdier som ikke er i samsvar med klassifiseringen i denne tabellen. Lundström (2009) påpekte at resistiviteten i svenske kvikkleirer kan være så lav som 5 Ωm . Hvor grensen går mellom forskjellige jordarter, spesielt mellom saltholdig og utvasket leire, må derfor sies å være under utforskning.

3.3. Faktorer som påvirker resistiviteten

I kapittel 2 ble en rekke fysiske egenskaper som karakteriserer jordforekomster diskutert som mulige faktorer som kan påvirke jordens geotekniske egenskaper og resistivitet. Teoretisk sett er det imidlertid forholdet mellom fasene og fasenes egenskaper som bestemmer resistivitetsens størrelse. Noen av disse fysiske parameterne kan måles i vanlige geotekniske laboratorier, mens andre trenger utstyr som bare finnes i spesialiserte laboratorier.



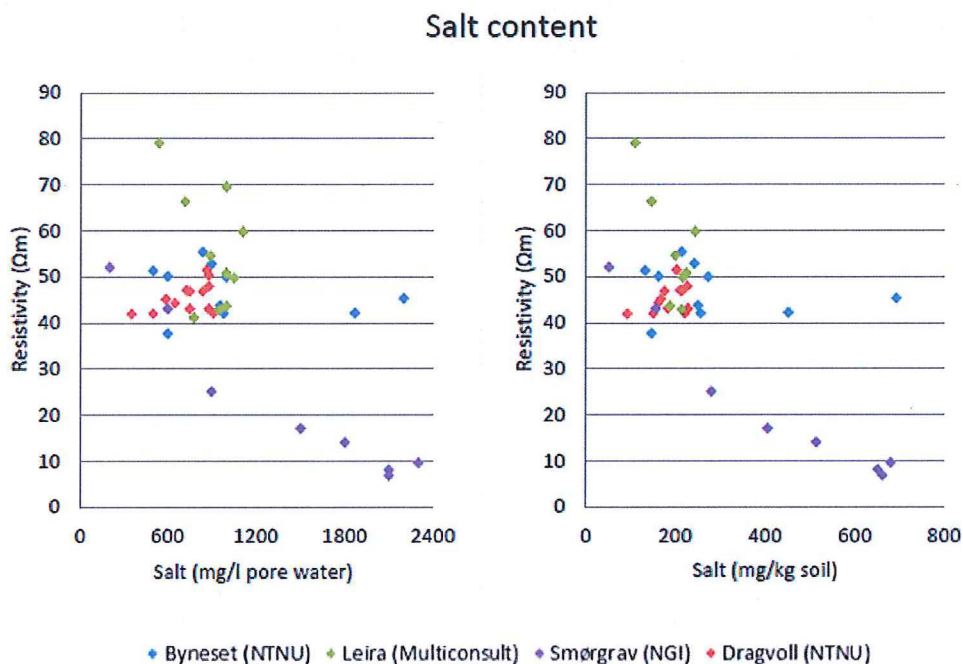
Figur 3-2: Forhold mellom saltinnhold og resistivitet i utvalgte norske leirer (Long et al., 2012).

Det er i dag akseptert at resistivitet i jord hovedsakelig påvirkes av porevannskjemi, kornstørrelse, vanninnhold og vannmetningsgrad, men også av andre faktorer som mineralogi, mobilitet av ionene i porevannet, innhold av organisk stoff og ikke minst temperatur. Den relative innflytelse av hver faktor er imidlertid fortsatt uklar.

3.3.1. Saltinnhold

Porevannets saltinnhold blir ofte trukket frem som den faktoren som har størst innvirkning på resistiviteten. I dag er det generelt akseptert at porevann med saltkonsentrasjon mindre enn ca. 2 g/l er en nødvendig forutsetning for at utvasket marin leire skal omdannes til kvikkleire. Likevel finnes det eksempler på marin leire med veldig lavt saltinnhold som ikke viser kvikk oppførsel, sannsynligvis på grunn av forvittringsprosesser og forhøyet innhold av spesielle ioner som for eksempel magnesium- eller karbonationer (CO_3). Det finnes også eksempler på leire med saltinnhold høyere enn 2 g/l som viser seg å være kvikk.

Det antas også at saltinnhold under en viss grense ikke lenger er den viktigste parameter som styrer resistiviteten i leire. Resultater presentert av Montafia (2013) antyder at resistiviteten avtar jevnt for saltinnhold over ca. 1 g/l, mens det for lavere saltinnhold tilsynelatende ikke synes å være noen sammenheng mellom saltinnhold og resistivitet, som vist i Figur 3-3.



Figur 3-3: Sammenheng mellom saltinnhold og resistivitet (Montafia, 2013).

Saltinnhold i porevannet kan måles med forskjellige metoder. Kjemiske laboratorieanalyser kan både identifisere hvilke elektrolytter som finnes oppløst i porevannet og kvantifisere disse. Andre laboratorier som er utstyrt for å måle vannets ledningsevne beregner saltinnholdet direkte fra ledningsevne målingene. Begge metoder har både fordeler og ulemper.

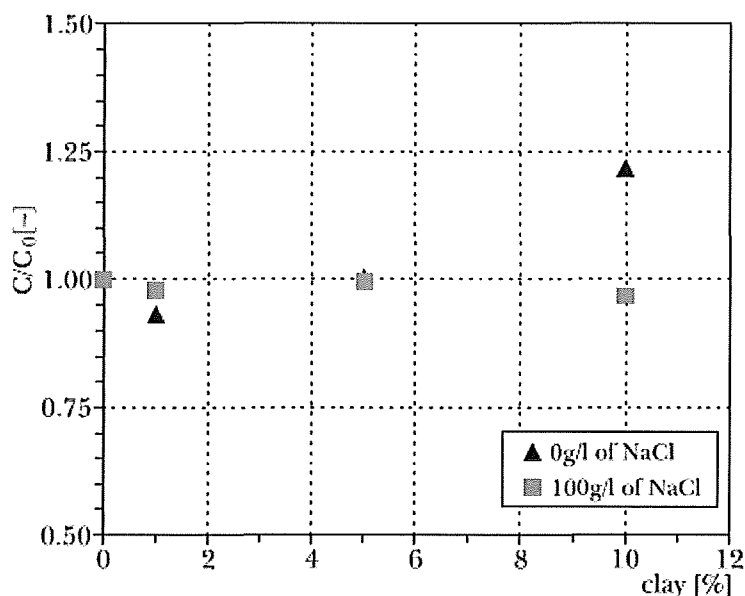
Kjemisk analyse av porevannet er en kostbar og tidskrevende metode, men gir en komplett oversikt over hvilke salter som er oppløst. Ledningsevne målinger er vesentlig billigere og raskere, men saltinnholdet må da beregnes ut i fra korrelasjoner. Porevannets ledningsevne kan også oppnås fra korrelasjoner basert på saltanalyser. Den siste metoden er åpenbart mer utsatt for feilkilder idet forskjellige elektrolytter gir forskjellige bidrag til porevannets ledningsevne, mens tabeller og korrelasjoner vanligvis er utarbeidet fra kunstige løsninger (f.eks. NaCl i vann) eller sjøvann. Dessuten er vannets ledningsevne avhengig av temperaturen i løsningen.

Man må også ta hensyn til at porevannet bare utgjør en fraksjon av jorden som helhet. Det vil si at det fins mer salt i 1 kg jord med høyere vanninnhold enn i 1 kg jord med lavere vanninnhold, forutsatt at saltinnholdet (vekt av elektrolytter oppløst per enhet volum porevann) er likt.

3.3.2. Kornfordeling

Jordarter klassifiseres etter kornfordeling og i utgangspunkt har hver jordart et typisk intervall av resistivitetsverdier. I marin leire kan man måle verdier mellom 1 og 100 Ωm , avhengig av utvaskingsgraden. Saltinnholdet i porevannet kan bare delvis forklare hvorfor dette intervallet er så stort, og hvorfor verdiene har så stor spredning ved lavere saltinnhold.

På grunn av leirmineralers elektriske egenskaper beskrevet i kapittel 2.1, har sannsynligvis leirinnholdet en viss innflytelse i denne sammenhengen. Teoretisk sett har leire med høyere leirinnhold også høyere ledningsevne enn leire med lavere leirinnhold. Simoni og Vannucchi (2006) viste at effekten av leirpartiklene er betydningsfull ved lavt saltinnhold. For det ekstreme tilfellet av saltinnhold lik 0 g/l, øker ledningsevnen i en blanding av sand og leire med ca. 20 % når leirinnholdet øker fra 0 % til 10 % (se Figur 3-4). Sannsynligvis er denne innvirkningen ved høyere leirinnhold i noen grad begrenset og ikke like tydelig.



Figur 3-4: Forhold mellom ledningsevne i en blanding av sand/leire ved forskjellige leirinnhold og forskjellige saltinnhold i porevannet (Simoni og Vannucchi, 2006).

Man må imidlertid være oppmerksom på at leirinnhold er definert som forholdet mellom vektprosent av alle faste partikler med størrelse $< 2 \mu\text{m}$ og vekt av alle faste partikler i jordprøven. Alle de mindre partiklene trenger ikke å bestå av leirmineraler, og ikke alle leirmineralene har størrelse mindre enn $2 \mu\text{m}$. Også de andre fraksjonene (silt og sand) påvirker sannsynligvis resistiviteten i en leirig jord, slik at det egentlig er det innbyrdes forholdet mellom leire-, silt- og sandfraksjonen som blir viktig.

3.3.3. Mineralogi

Leirmineraler omfattes i hovedsak av kaolinit, illitt, smektitt, vermikulitt og kloritt. I de fleste skandinaviske og kanadiske kvikkleirene er det nesten ingen spor av svellende leirmineraler, men kanadiske kvikkleirer kan inneholde ikke-svellende smektitt. Illitt og kloritt er påpekt som de vanligste leirmineralene i norske leirer, også i de sensitive og kvikke leirene. Smektitt har imidlertid blitt påvist i vesentlige mengder (mer enn 30 % av de faste partiklene $< 2 \mu\text{m}$) i japanske kvikkleirer. Heller ikke i dette tilfellet hadde smektitten typiske sveleegenskaper (Egashira og Ohtsubo, 1982).

Mineralogiens betydning når det gjelder resistivitet i jord må imidlertid fortsatt utforskes. Det finnes indikasjoner på at den kan påvirke de kjemiske forvitningsreaksjonene og dermed indirekte porevannskjemien. Imidlertid synes mineralogien å ha begrenset innflytelse på strømmen av kationer gjennom dobbeltlaget.

3.3.4. Vanninnhold

Vanninnhold for jord bestemmes fra vektforholdet mellom flytende og fast stoff i naturlig tilstand. Som regel er jordens resistivitet høyere enn porevannets resistivitet, og man kan derfor forvente at høyere vanninnhold medfører lavere resistivitet. Vanninnholdets bidrag er tydelig når leiren ikke er vannmettet. Under en grenseverdi i vanninnholdet som ligger nær 20 % øker resistiviteten vesentlig. De fleste norske leirene har et vanninnhold som varierer mellom 30 % og 40 %.

Tyngdetettheten er også relatert til mengden av vann i jorden. Sammenhengen mellom tyngdetetthet og resistivitet er imidlertid svakere enn den mellom vanninnhold og resistivitet, men denne parameteren blir muligens noe viktigere når saltinnholdet blir mindre avgjørende.

De geologiske prosessene som danner kvikkleire påvirker også noen andre geotekniske parametere, som for eksempel materialets flytegrense. Prosessene som bidrar til å svekke forbindelsen mellom jordpartikler, som for eksempel utvasking, fører til lavere vanninnhold i flytegrensetilstanden. Disse prosessene har ikke stor påvirkning på det naturlige vanninnholdet, og vanligvis er det bare noen få prosent i vanninnhold som skiller utvasket leire fra ikke-utvasket leire av samme opprinnelse. Forholdet mellom vanninnhold i naturlig tilstand og ved flytegrensen blir da høyere enn 100 % (flyteindeks $I_L > 1,0$). I Canada benyttes i større grad verdien for flyteindeksen til å klassifisere kvikkleire. Det er mulig at det kan være en sammenheng mellom en leires flytegrense (flyteindeks) og variasjoner i materialets resistivitet, selv om det ikke synes å være åpenbare fysiske eller kjemiske forklaringer på dette.

3.3.5. Andre mulige faktorer

Temperaturen påvirker resistivitet i jord i mindre grad enn andre faktorer, i det temperaturen i jorden er tilnærmet konstant året rundt (under ca. 5 m fra terrengoverflaten). Likevel er porevannet ganske følsomt for temperaturendringer, og variasjoner i porevannets resistivitet er noe høyere når saltinnholdet er lavt. Dette må det tas hensyn til ved målinger av resistiviteten i laboratoriet og ved kalibrering av utstyr for resistivitetsmåling (R-CPTU).

Effekten av organisk stoff på resistivitetsmålinger bør også vurderes. Jord med høyt innhold av organisk materiale har som regel høyere vanninnhold og lavere densitet enn vanlige jordarter, men mye av dette vannet kan være bundet til det organiske stoffet. Om disse jordartene kan detekteres med resistivitetsmålinger må verifiseres, da det er liten erfaring med målinger i denne type materialer. Noen organiske substanser som hydrokarboner og alkoholer kan svekke forbindelsene mellom jordpartiklene. I disse væskene finnes det veldig få eller ingen oppløste elektrolytter, og det vil derfor være forholdsvis enkelt å spore forurensede lommer i grunnen på grunn av svært lave ledningsevneverdier.

3.4. Resistivetsmodeller

Det er en utfordrende oppgave å beregne resistiviteten i jorden teoretisk, blant annet fordi det er vanskelig å behandle de faktorene som beskriver effekten av jords struktur og tekstur kvantitativt. Det finnes likevel empiriske korrelasjoner og forenklete modeller som med godt samsvar estimerer en jords elektriske ledningsegenskaper. For dette formålet inkluderer modellene de av jordens fysiske egenskaper som er enklest å måle, som for eksempel porevannets ledningsevne.

3.4.1. Grovkornete jordarter

Modellene som beskriver grovkornete jordarter er de som samsvarer best med virkeligheten. Den viktigste forutsetningen i disse modellene er at elektrisiteten bare strømmer gjennom porevannet (ionevandring), det vil si at de faste partiklene ikke har noen elektrisk ledningsevne i seg selv.

En teoretisk modell som ble påvist å ha godt samsvar med målt oppførsel ble innført av Archie (1942). Ifølge modellen er forholdet mellom den totale resistiviteten og porevannets resistivitet, i rene, vannmettede grovkornete jordarter og sandstein konstant. Dette forholdet definerer en formasjonsfaktor, betegnet med bokstaven F:

$$\rho = F * \rho_w \quad [3-4]$$

Her er ρ den målte resistiviteten i forekomsten, mens ρ_w tilsvarende porevannets resistivitet. Formasjonsfaktoren F kan knyttes til andre jordegenskaper som porøsitet n etter følgende uttrykk:

$$F = a * n^{-m} \quad [3-5]$$

Her er a og m er to empiriske parametere kjent som krumningskoeffisient og sementeringssekspont. Koeffisienten a tar hensyn til at materialets porekanaler ikke samsvarer med en rett linje og settes til 1 i normalkonsoliderte jordarter. Sementeringskoeffisienten m varierer mellom 1,3 i løs sand til 2 i sementert sandstein. Med denne modellen kan man beregne porevannets resistivitet ut i fra resistivitetsmålingene, forutsatt at jordens porøsitet er kjent.

Andre modeller beskriver mer kompliserte sammenhenger mellom formasjonsfaktoren F og jordens egenskaper. I noen tilfeller kan verdien av F også benyttes til å estimere jordens hydrauliske konduktivitet (permeabilitet).

3.4.2. Leire

Modeller for leire inkluderer også ledningsevnen til de faste partiklene, og mange av dem innfører resistiviteten til partiklene ρ_s , som en egen parameter. Hvis man prøver å anslå en leires resistivitet med formel [3-5] blir imidlertid beregnede verdier adskillig høyere enn de målte når porevannets resistivitet øker.

En modell som definerer to parallelle motstander, ble utviklet av Waxman og Smits (1968). Den beskriver jordens totale resistivitet som et system bestående av en motstand som representerer porevannet og en som representerer de faste partiklene. Formuleringen av modellen er enklere for bestemmelse av ledningsevne enn for resistivitet:

$$\sigma = X(\sigma_w + \sigma_s) \quad [3-6]$$

Faktoren X tilsvarer den inverse av F, og σ_s er $1/\rho_s$. Usikkerhetene er i størst grad knyttet til σ_s , som er beregnet som $\sigma_s = B \cdot Q_v$. Parameteren B [$\Omega m/m$] er den ekvivalente ledningsevnen av ionene i det elektriske dobbeltlaget. Størrelsen er ikke konstant, men er avhengig av porevannets ledningsevne. Parameteren Q_v [meq/ml] er jordens kationbyttekapasitet per enhet av porevannets volum.

Johnson (1986) innfører en lengdeparameter, Λ , som er definert som forholdet mellom jordens volum og overflate, og som uttrykker i hvilken grad porene er sammenkoblet. Parameteren er inkludert i følgende formel, og gir et lineært forhold når porevannets ledningsevne er høy:

$$\sigma = \frac{1}{F} \sigma_w + \frac{2\sigma_s}{\Lambda} \quad [3-7]$$

Her bestemmes F fra plottet av σ mot σ_w .

Det finnes likevel noen som argumenterer mot en innføring av ρ_s som egen parameter. Shah og Singh (2005) påstår at leirmineralers ledningsevne er ivaretatt i sementeringseksponenten m i Archies formulering. Dermed blir en leires resistivitet, og faktoren F, omvendt proporsjonal til jordens volumetriske vanninnhold:

$$\rho = \frac{\rho_w}{c} * \theta^{-m} \quad [3-8]$$

Parameterne m og c er to tilpassede sementeringskoeffisienter som avhenger av leirinnholdet når dette er mindre enn 5 %, ellers er disse koeffisientene konstante (c=1,45 og m=1,25). Rhoades et al. (1976) bruker et uttrykk som inkluderer både volumetrisk vanninnhold og ledningsevne til de faste partiklene:

$$\sigma = \sigma_w(a\theta^2 + b\theta) + \sigma_s \quad [3-9]$$

Koeffisientene a og b kan korreleres til egenskapene for fast stoff, for eksempel jordartens tekstur og mineralogi.

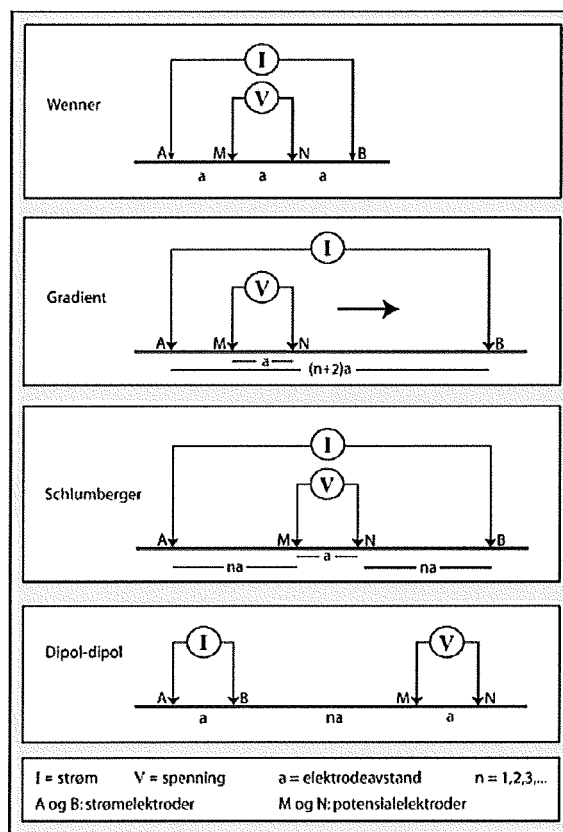
4. Metoder for måling av resistivitet

For geotekniske formål kan resistiviteten i jorden måles med forskjellige metoder, både i felt og i laboratorium.

4.1. 2D resistivetsmålinger (ERT Electric Resistivity Tomography)

I felt er resistivetsmålinger på terrengoverflaten (ERT, Electric Resistivity Tomography) blitt benyttet i flere år til forskjellige anvendelser innen bergteknikk og geoteknikk. Metoden blir nå vurdert som svært nyttig og aktuell i forbindelse med kartlegging av kvikkleireområder. Innen bergteknikk er ERT ofte benyttet for å finne oppsprukne, vannbærende svakhetssoner i bergmasser. ERT gir i prinsippet et kontinuerlig resistivetsprofil som kan være flere hundre meter langt, og som også kan nå de dypeste lagene. Oppløselighet av målingen er i noen grad avhengig av den penetrasjonsevnen som er ønskelig, og dette må vurderes ved bestemmelse av geometri for elektrodeutlegget. Det er imidlertid ingen begrensning i forhold til lengden av det resistivetsprofilet som gjennomføres. Ofte vil noen deler av profilet identifiseres som mer interessante eller verdt å undersøke dypere.

Elektrodene kan settes i bakken med diverse konfigurasjoner som er godt egnet til forskjellige formål og grunnforhold. Et valgt antall elektroder, med en bestemt innbyrdes avstand mellom elektrodene, blir innrettet på profillinjen. Målingene med den første elektrodeavstanden når bare til en viss dybde, og elektrodeavstanden må økes for å kunne sondere dypere i grunnen. De vanligste elektrodekonfigurasjonene er Wenner- α , Schlumberger, gradient og dipol-dipol, se Figur 4-1.

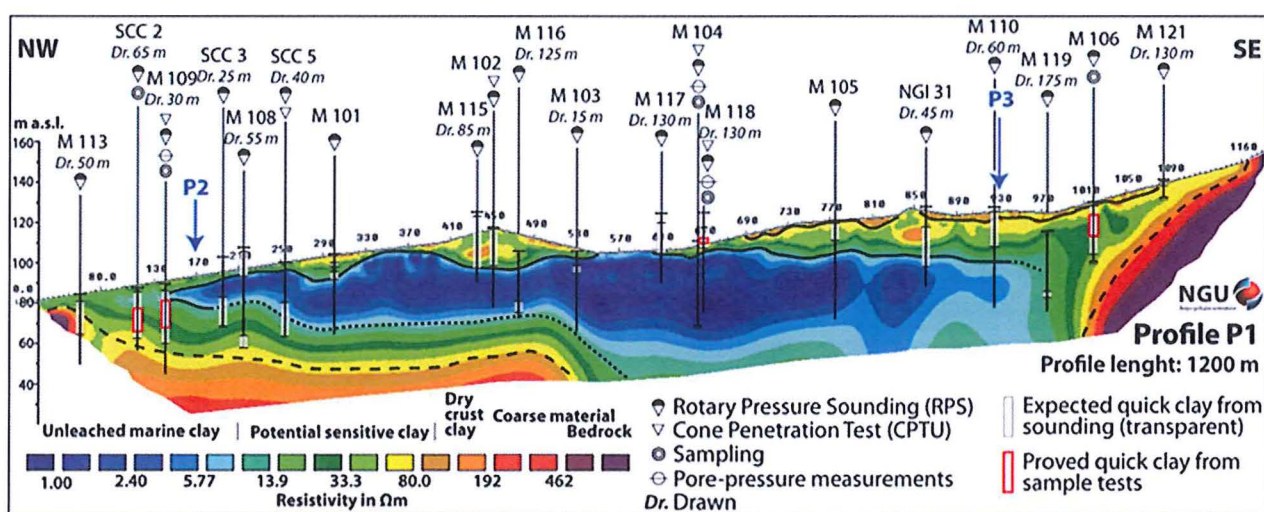


Figur 4-1: Prinsippskisse over Wenner- α , gradient, Schlumberger og dipol-dipol konfigurasjoner (NGU, Veiledning for utførelse av resistivetsmålinger).

Strøm påføres jorden som likestrøm slik at IP-effekten (Indusert polarisasjon) også kan måles. NGU (Rapport 2012.004) beskriver utførelsen av ERT målinger i forbindelse med kvikkleireskredet på Byneset i Trondheim (2012). Der ble det benyttet strømpulser på 1 sekund og alternerende polaritet, med intensitet lik 200 mA.

Man trenger å invertere en kunstig jordmodell for å beregne resistiviteten ut i fra en antatt lagdelings- og jordartsmodell. Hvis inversjonen er vellykket er det godt samsvar mellom reelle og kunstige verdier. Hvis ikke gjennomføres en iterasjonsprosedyre i inverteringen til avviket mellom syntetisk modell og målt profil

er tilfredsstillende. Tolkede resultater presenteres så i et profilplott som viser fordelingen av resistivitet i jorden langs måleprofilen, se Figur 4-2.



Figur 4-2: Resultater fra 2D resistivitetsmålinger sammenlignet med geotekniske data. Resultater fra E6 Haga-Skjerdingstad (Sandven og Solberg, 2013).

Ved utlegging av profilene er det viktig å ha enkeltprofiler som krysser hverandre. Dette gir mulighet for å sammenligne tolkningen i kryssingspunktene, som bør samsvare ved gode inverteringsmodeller. Hvis det måles i et tilstrekkelig antall kryssende profiler, blir det mulig å ekstrapolere resultatene til en kvasi-3D grunnmodell.

Når det utføres ERT målinger kan man også måle IP-effekten (Indusert polarisasjon), som kvantifiserer jordens ladbarhet. IP-effekten måles når strømmen blir slått av: Elektrisk ledende mineraler vil da sørge for at strømmen ikke forsvinner med engang, men avtar med tid. Selv om leirmineraler kan gi IP-effekt, er det for tiden uklart om den kan benyttes for karakterisering av leire.

4.2. R-CPTU

For å utføre direkte målinger av jordens elektriske motstand må elektrodene være i kontakt med jordvolumet det skal måles i. Dette kan også oppnås ved å utføre R-CPTU sonderinger, der elektrodene blir kjørt ned i borhullet sammen med en vanlig CPTU sonde. Elektrodene er montert på en egen resistivetsmodul som er festet i bakkant av selve CPTU-sonden. Denne må være tilpasset bruk av resistivetsmodulen, slik at målesignalene kan overføres til en minnebrikke i sonden eller via stangsystemet opp til en registreringsenhet på overflaten. Resistivetsmodulen har vanligvis samme diameter som CPTU-sonden.

R-CPTU metoden er hovedsakelig anvendt for kvikkleirekartlegging i Norden, mens den i verden for øvrig benyttes ved sporing av forurensninger i grunnen. Bruk av R-CPTU til kartlegging av kvikkleire blir nærmere beskrevet i kapittel 0.

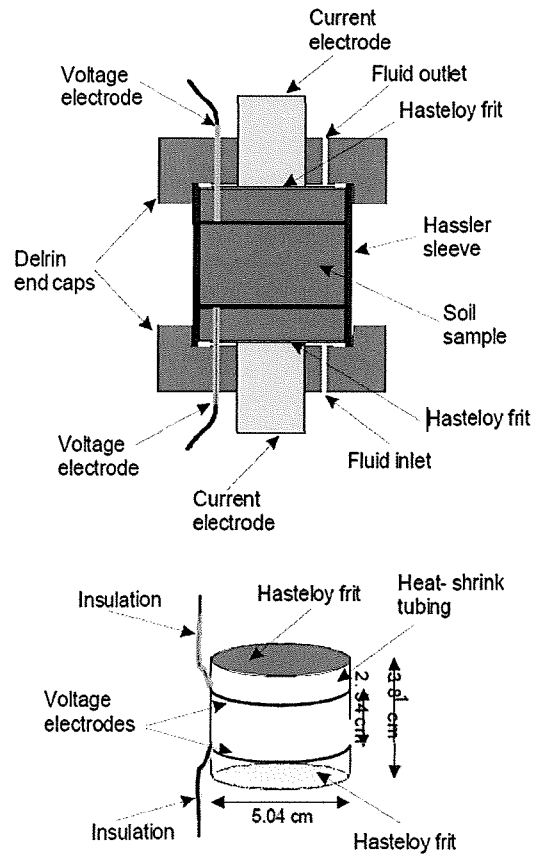
4.3. Laboratoriemålinger

Resistivetsmålinger kan også utføres i laboratoriet. Den enkleste måten er å plassere en uforstyrret prøve mellom to metallplater, påføre strøm og måle motstanden i jordprøven. Geometrien av systemet er kjent og resistivitet kan da beregnes enkelt. Den største ulempen med denne metoden er at resistiviteten i forstyrrede og omrørte prøver ikke kan måles. For å overvinne hindringen må man da bruke enten en såkalt «soil box», som fungerer etter samme prinsipp, men består av en lukket boks utstyrt med elektroder eller spesielle celler som anvender vekselstrøm eller er basert på elektromagnetiske teknikker (for eksempel TDR, Time-Domain-Reflectometry).

Teoretisk sett kan man benytte både likestrøm og vekselstrøm i målingen, men i praksis bør man bruke vekselstrøm for å unngå polariseringseffekter og påvirkning av leirmineralenes struktur. Videre er resistivitetsmålinger i leire avhengig av strømmens frekvens. Jordens kompleks elektrisk ledningsevne og kompleks dielektrisk permittivitet er knyttet til hverandre etter følgende ligning:

$$\sigma^* = i\omega\varepsilon^* \quad [4-1]$$

Imaginærdelen ε'' av ε^* er relatert til hvor mye den dielektriske permittiviteten avtar som funksjon av målingsfrekvensen. Denne variasjonen skyldes hovedsakelig vibrasjoner av vannmolekylene i jorden. Ved måling på mange ulike frekvenser kan man verifisere hvor σ' , den reelle delen av σ^* , er størst.



Figur 4-3: Laboratorieapparat for måling av resistivitet (Wildenschild, Roberts og Carlberg (1999)).

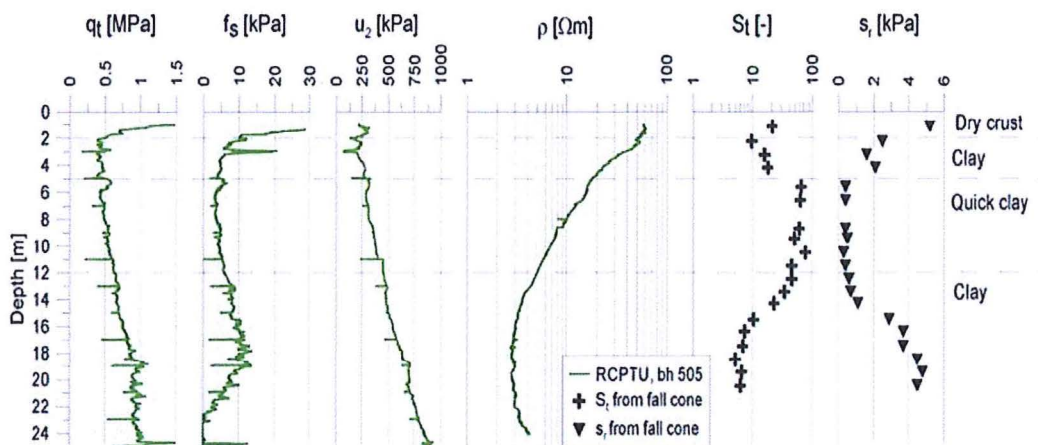
5. R-CPTU

Sonderingsutstyret som benyttes til R-CPTU består som oftest av en vanlig CPTU sonde, der en resistivitetsmodul kan monteres bak spissen, se Figur 5-1. Modulen er drevet av batterier, og den kan som regel lese, lagre og sende måledata til en mottakerenhet på overflaten eller et minnekort montert i sonden. Produsenter i Skandinavia (Geotech og ENVI) har valgt å utstyre sine moduler med fire ringelektroder. De to ytre elektrodene sender elektrisk strøm gjennom jorden, mens de to indre måler potensialdifferansen. Avstanden mellom elektrodene avgjør konfigurasjonen. Både Geotech og ENVI setter elektrodene med lik avstand mellom hverandre i en konfigurasjon kjent som Wenner- α . Andre produsenter utenfor Norden markedsfører moduler som bare har to elektroder. Dette trenger nødvendigvis ikke å være ringelektroder, se for eksempel utstyr fra ConeTec (USA) eller Gouda Geo-Equipment (Nederland).

Tilleggstiden det tar for å utføre en R-CPTU sondering i forhold til en vanlig CPTU-sondering dreier seg bare om noen få minutter. Dette vil være tiden man trenger for å montere resistivitetsmodulen på batteripakken. Ellers er sonderingsprosedyren i felt tilsvarende en vanlig CPTU. Den eneste forskjellen er at loggeprogrammet må være tilpasset til de nye målingene for å kunne observere og registrere måledata under utførelse.



Figur 5-1: R-CPTU utstyr produsert av Geotech (øverst) og av Gouda Geo-Equipment (nederst).



Figur 5-2: Resultater fra R-CPTU sonderinger på Smørgrav (Rømoen et al., 2010).

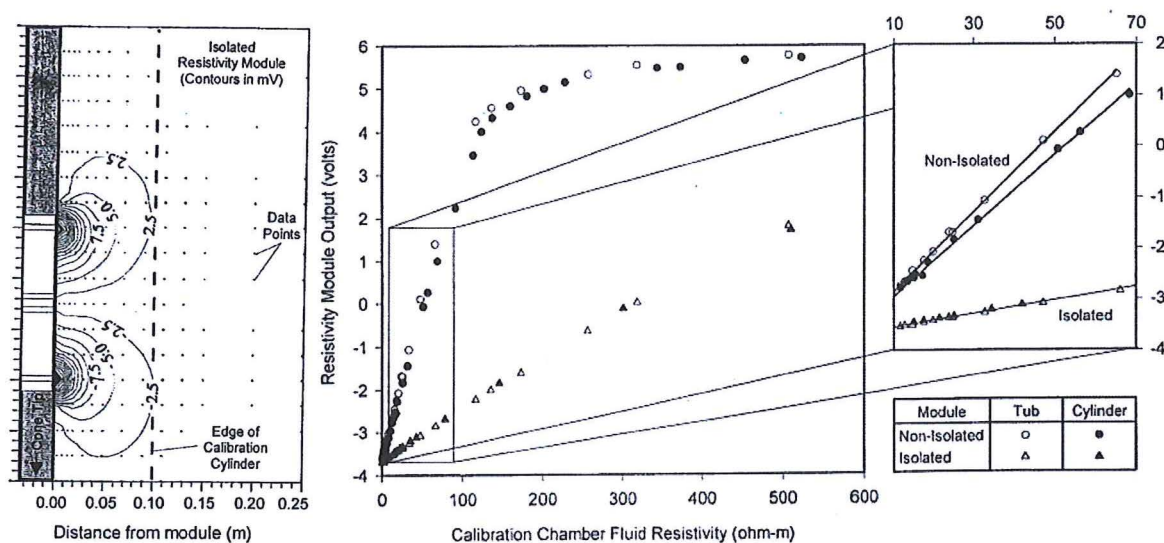
Når R-CPTU sonderingen er utført, har man fått registrert de vanlige CPTU resultatene, korrigert spissmotstand q_t , poretrykk u og sidefriksjon f_s , samt måledata for resistivitet (Ωm) og konduktivitet (mS/m), alle som funksjon av dybden. Det anbefales å fremstille resistivitet ved siden av de øvrige målingene, som vist i Figur 5-2, dog på lineær og ikke logaritmisk skala.

Påføring av strøm i jorden er ikke lik for alle sondetyper. Sonden produsert av Geotech sender korte impulser av likestrøm inn i jorden, alle med lik intensitet 200 ganger pr. sekund. Sonden utviklet av Daniel m. fl. (2003) benytter i stedet vekselstrøm på 1000 Hz som kan justeres i intensitet (0,025, 0,25 eller 2,5 mA)

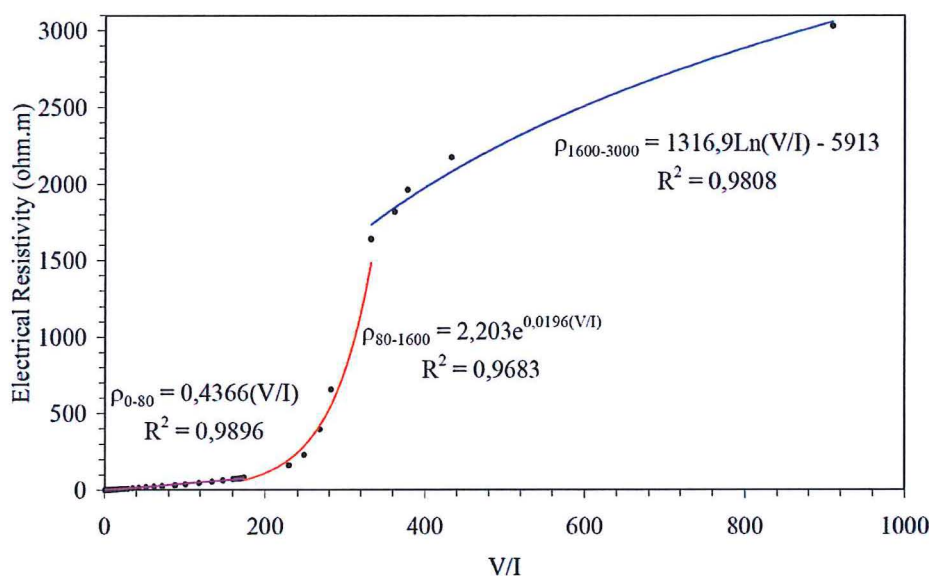
5.1. Kalibrering

Resistivitetsmodulen blir vanligvis kalibrert i løsninger av salt og vann. Når saltkonsentrasjon er kjent og temperaturen er målt, kan man bestemme løsningens elektriske konduktivitet. Sonden må settes i saltlaken, og tanken som inneholder saltløsningen må være stor nok for å unngå at tanken påvirker målingene. Det er derfor anbefalt å bruke sylindriske beholdere på 1m x 1m x 1m. I praksis spiller formen av kalibreringstanken ingen rolle, forutsatt at elektrodene blir isolert slik at strøm ikke tapes i stengene.

Når man sender inn strøm med en bestemt intensitet gjennom de to ytre elektrodene, måler egentlig utstyret potensialdifferansen mellom de to indre elektrodene og ikke saltlakens konduktivitet. Hvis prosedyren gjentas flere ganger med forskjellige saltkonsentrasjoner, blir det imidlertid mulig å fastsette forholdet mellom potensialverdiene og saltlakens ledningsevne, forutsatt at strømmens intensitet er kjent. Konverteringsfaktorene er avhengige av modulens geometri og av saltkonsentrasjonen selv, og forholdet er ikke konstant. Figur 5-4 viser resultater fra kalibreringsprosedyren utført av Peixoto m.fl. (2010), som er godt egnet for å fremstille denne ikke-lineære oppførselen.



Figur 5-3: Venstre: Omfang av det elektriske feltet nær isolerte elektroder; Høyre: Betydning av formen av kalibreringstanken på kalibreringskorrelasjoner (Daniel et al., 2003).



Figur 5-4: Kalibreringskurver for resistivitetssonde (Peixoto m. fl., 2010).

Alternativt kan man benytte tilsvarende prosedyre som beskrevet av Schälin og Tornborg (2009) for en Geotech-sonde. Denne sonden måler en digital størrelse som kan korreleres direkte med saltløsningens ledningsevne. Fordelen med denne teknikken er at man ikke trenger strømmens intensitet. Hvis sonden blir ødelagt vil det fortsatt være mulig å bruke utstyret.

Det ville sannsynligvis være riktigere å kalibrere sonden i en jordprøve med kjent mineralogi, lagringstilstand og porevannskjemi, ettersom alle disse faktorene har vist seg å påvirke oppnådde resistivitetsverdier. Et problem med en slik kalibreringsprosedyre er imidlertid at den er vanskeligere rent praktisk. Prosedyren måtte også gjentas hvis en eller flere av disse faktorene skulle endre seg, noe de utvilsomt ville kunne gjøre i praksis. Det vil si at det ikke er mulig på nåværende tidspunkt å verifisere målingene i felt, på samme måte som man gjør med de andre CPTU-målingene (null-verdi avlesning).

Siden sonden kalibreres ved bruk av potensialdifferansen, vil en bestemt verdi av potensialdifferansen tilsvare en viss resistivitet og dette forholdet vil være unikt. Om materialet er flytende eller ei burde ikke ha noe å si i denne sammenhengen, siden det er mediets resistivitet man er interessert i under kalibreringsprosedyren, og ikke de øvrige jordegenskapene som for eksempel porøsiteten. Imidlertid er det ikke mulig å utelukke at fenomener som finner sted i grensesnittet mellom mediet og elektrodene i jorden, og som ikke kan gjenskapes under kalibreringsprosedyren, kan påvirke målingene.

5.2. Tidligere erfaringer med R-CPTU

R-CPTU har så langt vært lite brukt til detektering av sprøbruddmateriale i Norge og Norden, fordi ERT oftere blir foretrukket for å måle resistiviteten over større områder. I nesten alle studier som er gjennomført har R-CPTU sonderinger blitt utført der resistivitetsprofiler fra ERT allerede var tilgjengelige, slik at resultatene kunne sammenlignes.

I Norge:

- **Ottesen (2009)**, Rødde kvikkleiresoner, Melhus (masteroppgave NTNU). R-CPTU målinger ble sammenlignet med resistivitetsmålinger utført på kubiske 4 cm x 4 cm x 4 cm jordprøver. Resistivitet på prøvene ble målt både i vertikal og horisontal retning. Det ble oppdaget at metalltypen som elektrodene besto av påvirket måleresultatene.
- **Rømoen m. fl. (2010)**, flere forsøksfelt. NGI testet sitt nye utstyr i fem forskjellige steder i Midt-Norge og på Østlandet. Hensikten med studiet var å verifisere resultatene fra anvendt resistivitetsmodul, og fastsette resistivitetsintervallene som tilsvarer utvasket, ikke utvasket og utvasket, men forvitret marin leire.
- **Aasland (2010)**, Rissa (masteroppgave NTNU). I denne masteroppgaven ble resistiviteten målt i marin leire, og resultater fra ERT og R-CPTU ble sammenlignet. Ved hjelp av laboratorieanalyser ble det verifisert om leire som var innenfor det vanlige kvikkleire-intervallet (10-100 Ω m) egentlig var kvikk eller ikke. Resultatene av studiet i Rissa viser at intervallene benyttet for tolkning må justeres for å oppnå bedre samsvar mellom resistivitet og forekomst av kvikk leire.
- **Montafia (2013)**, flere forsøksfelt (masteroppgave NTNU). I dette studiet ble resistivitetsmålinger sammenlignet med geotekniske egenskaper og salinitetsmålinger utført i laboratoriet. Det ble også gjort et forsøk å finne en sammenheng mellom tradisjonelle CPTU parametere som B_q (poretrykksforhold), R_f (sidefriksjonsforhold) og Q (spissmotstandstall) og resistivitet. Dersom en slik sammenheng kan vises, vil den være nyttig ved tolkning av lagdeling og påvisning av kvikkleire.

I Sverige:

- **Schälin og Tornborg (2009)**, Agnesberg, Sverige (masteroppgave Chalmers, Göteborg). Målet med denne oppgaven var å vurdere hvordan R-CPTU og 2D-resistivitetsmålinger kunne kombineres i kvikkleirekartlegging. I tillegg vurderte forfatterne det potensielle bidraget bruk av R-CPTU kan gi for geotekniske formål.
- **Göta älv utredningen (2011)**, Fråstad, Sverige (GÄU delrapport 30): I dette studiet ble ERT, R-CPTU, geokjemiske analyser og tradisjonelle geotekniske undersøkelser kombinert for å få en mest mulig omfattende forståelse av kvikkleires oppførsel. Alle R-CPTU sonderinger ble tilpasset slik at den totale nedpressingskraften kunne måles, med påfølgende utledning av stangfriksjonen langs borstengene. Denne ble så sammenlignet med en referansekurve tilsvarende konstant stangfriksjon på 1 kPa.

Når det gjelder grenseverdiene som skiller utvasket leire fra andre jordarter (se Tabell 3-1), finnes det relativt godt samsvar mellom de fleste norske studiene. I noen tilfeller ble det funnet at den nedre grensen for mulig kvikkleire ligger så lavt som 5 Ωm , mens andre ganger ble det foreslått å flytte bunnverdien opp til ca. 15 Ωm . Det er tilsynelatende noe mer uenighet om hvor øvre grenseverdi bør plasseres, og variasjoner på 10-20 Ωm i forhold til vanlig grenseverdi på 100 Ωm kan forventes som stedsspesifikke variasjoner.

De ovennevnte svenske studiene viser at svensk kvikkleire kan bli karakterisert av enda lavere resistivitetsverdier. I Schälin og Tornborg (2009) ble det påvist kvikkleire med målte resistivitetsverdier ned mot 3 Ωm . Dette skyldtes sannsynligvis et høyt sulfatinnhold i de nevnte leirene.

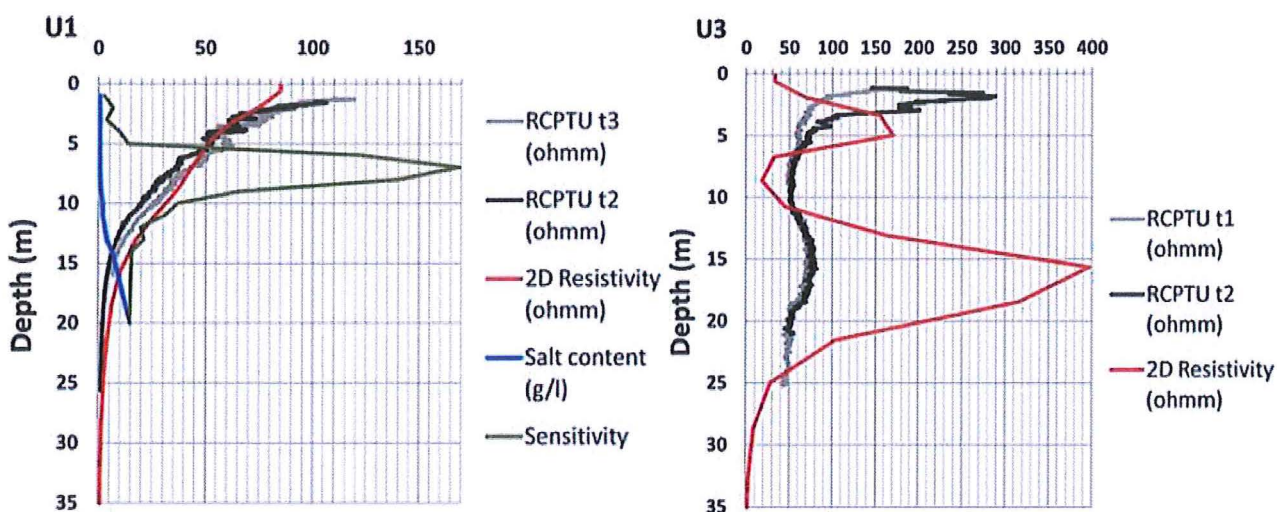
Erfaringer fra andre land er vanligvis ikke knyttet til kvikkleireproblematikk, men helst til sporing av hydrokarbonforurensete lag. I noen tilfeller har R-CPTU også blitt anbefalt som metode for å verifisere komprimeringstiltak i sand ved bruk av korrelasjonene i kapittel 3.4.1.

5.3. Samsvar mellom R-CPTU og ERT

Selv om både R-CPTU og ERT bestemmer elektrisk resistivitet i jorden, kan disse to metoder bare sammenlignes i noen tilfeller. Omfanget av det elektriske feltet som produseres av en R-CPTU sonde er ekstremt lite sammenlignet med det som forårsakes av ERT-elektrodene, selv når avstanden mellom elektrodene i ERT reduseres til en minimumsverdi. Den mest direkte konsekvensen av feltets størrelse er at man må lage en kunstig grunnmodell for å kunne beregne den reelle resistiviteten med ERT. Verdiene man får ut av inversjonen er dermed et resultat av beregningsbetingelsene som anvendes. Det finnes teknikker som gjør det mulig å fremheve horisontale eller vertikale strukturer fra samme sett med måldata. En annen konsekvens er at oppløsningen som kan oppnås med denne metoden er vesentlig mindre enn den som kan oppnås med R-CPTU, spesielt på større dybder. Skarpe kontraster er for eksempel umulig å fremstille realistisk, og må alltid forstås som gradvise endringer.

Det er også store forskjeller i strømpåføring mellom de to metodene (se kapitlene 4.1 og 0), og man kan ikke utelukke at disse forskjellene påvirker resultatene. Man må også regne med at det elektriske feltet som stammer fra elektrodene på overflaten har form av en halvkule. Det vil i praksis si at 2D-målingene også er følsomme for horisontale variasjoner i jordens egenskaper perpendikulært på profilretningen (3D-effekter).

Når avvik mellom 2D og R-CPTU målingene blir store, er det ofte på grunn av foreliggende jordartsstrukturer i grunnen som ikke ligger direkte under elektrodekablene. Det er mulig å begrense disse 3D-effektene ved bruk av forskjellige elektrodekonfigurasjoner som er spesielt godt egnet når grunnforholdene påvirker målingene med denne type feil. Innvirkning av strukturer som ligger nær sonderingsprofiler er godt synlig når man sammenligner resultatene fra to kryssende profiler («fence»-diagram). Store avvik mellom tverr- og lengdeprofiler tyder på vesentlige horisontale variasjoner loddrett på profilretningen.



Figur 5-5: Eksempler av godt (venstre) og dårlig (høyre) samsvar mellom ERT og R-CPTU (Solberg et al., 2011).

R-CPTU og ERT kan altså kun sammenlignes direkte under optimale og forholdsvis homogene grunnforhold. Der hvor lagdelingen eller andre forhold gjør grunnforholdene uryddige, er samsvaret mellom metodene mye dårligere, og i de beste tilfellene begrenset til de grunneste lagene. Det blir også observert at R-CPTU målinger ofte gir litt lavere resistivitet enn ERT når de kan sammenlignes direkte. Årsaker til avvik mellom metodene kan altså være forstyrrelse av jorden rundt modulen (Söderblom, 1958) eller spesielle kjemiske sammensetninger av leiren (Schälin og Tornborg, 2009).

I en lite lagdelt, homogen grunn vil imidlertid de målte verdiene være forholdsvis like, forutsatt at kontakten mellom elektroder og jorden er god. Hvis grunnen er lite lagdelt, men med lag som er karakterisert av veldig forskjellige verdier, vil denne forskjellen kunne føre til avvik mellom verdiene målt ved de to metodene. Elektrisitet strømmer mot minste motstand, og hvis laget med minst motstand ligger øverst kan responsen fra det nedre laget bli dempet. Også når topplaget har veldig høy resistivitet kan de underliggende lagene være skjult i målingene.

Forutsatt at R-CPTU målinger er riktige, kan de under gode forhold benyttes ved invertering av 2D målingene slik at en oppnår en bedre oppløsning i og styring av profilet i enkeltpunkt. Med disse betingelser kan ERT profiler få en mer detaljert oppløsning, særlig i overgangsområder mellom to lag med svært forskjellig ledningsevne og ved større dyp. Her reduseres omfanget av overgangsområdet, og grensen mellom ulike lag vises tydeligere.

6. Praktisk bruk av resistivitetsmålinger for detektering av utvasket leire

Det er en økende tendens i dag å bruke kombinerte geofysiske og geotekniske undersøkelser i forbindelse med ulike geotekniske formål, ikke bare kvikkleirekartlegging. Denne praksisen gir fordeler når det gjelder tolkningen av resultatene, både for geoteknikere og geofysikere.

Generelt kan man si at geofysiske metoder dekker store områder på forholdsvis liten tid sammenlignet med geotekniske grunnundersøkelser. Geotekniske borhull gir kun informasjon som er typisk for borpunktet, og informasjon om grunnforholdene oppnås som regel gjennom interpolering av informasjonen i to eller flere borhull. Når det gjelder resistivitetsbestemmelser har 2D-resistivitetsmålinger en større grad av usikkerhet i tolkningen enn R-CPTU målinger, spesielt ved kompliserte grunnforhold.

Ved integrerte målinger, kan geoteknikere og geofysikere sammen avgjøre hvor sonderinger og prøvetakinger skal plasseres når resultater av de geofysiske grunnundersøkelsene er tilgjengelige. Nytteverdien til de geotekniske grunnundersøkelsene kan da optimaliseres. Resultater av de geotekniske grunnundersøkelsene kan på sin side benyttes av geofysikerne i etterkant til en mer detaljert tolkning av resistivitetsmålingene. Et tett samarbeid er fortsatt ikke så vanlig, og den vanlige praksisen er ofte å sammenligne resultatene etter at begge typer undersøkelser er utført.

Selvfølgelig finnes det noen områder hvor resistivitetsmålinger ikke kan utføres på grunn av topografiske eller andre begrensninger. Støykilder som strømkabler og togspor er ganske viktige eksempler der resistivitetsmålingene kan ha begrenset nøyaktighet. I urbaniserte områder kan det derfor være vanskelig eller umulig å utføre 2D-resistivitetsmålinger av høy kvalitet. Her kan imidlertid R-CPTU være en praktisk løsning. Kartlegging av store vegprosjekter er imidlertid godt egnet til anvendelse av ERT og R-CPTU i kombinasjon. Med ERT kan man dekke store deler av vegens trasé, eventuelt ulike traséforslag, på forholdsvis kort tid, og samtidig finne kritiske områder som trenger detaljerte geotekniske undersøkelser. I noen tilfeller, når det oppstår et behov for å undersøke spesielt store områder, kan også luftbårne resistivitetsmålinger være aktuelle (AEM Airborne Electromagnetic Measurements).

Når det gjelder detektering av sprøbruddmateriale har flere forskere påvist at ERT-målinger har potensialet til å skille utvasket marin leire fra saltholdig marin leire. I tillegg kan metoden benyttes til å påvise barrierer av ikke-sensitivt materiale i grunnen, for eksempel oppstikkende berghorisonter, mektige sand og gruslag eller kontinuerlige lag av ikke-sensitiv leire. Denne informasjonen vil være veldig verdifull for å kunne bedømme utstrekningen av retrogressivt kvikkleireskred. Når et kvikkleireområde skal utredes er ofte stabilitetsberegninger utført. Kombinasjonen av geofysiske og geotekniske grunnundersøkelser kan gi en stor mengde informasjon over hele område når det gjelder geometri og lagdeling. Når 2D-resistivitetsmålinger er «kalibrert» mot geotekniske data vil geoteknikere ha et meget godt grunnlag for utredningen som vist i kapittel 6.1.

6.1. Eksempel på integrert bruk av resistivitetsmålinger i geotekniske undersøkelser

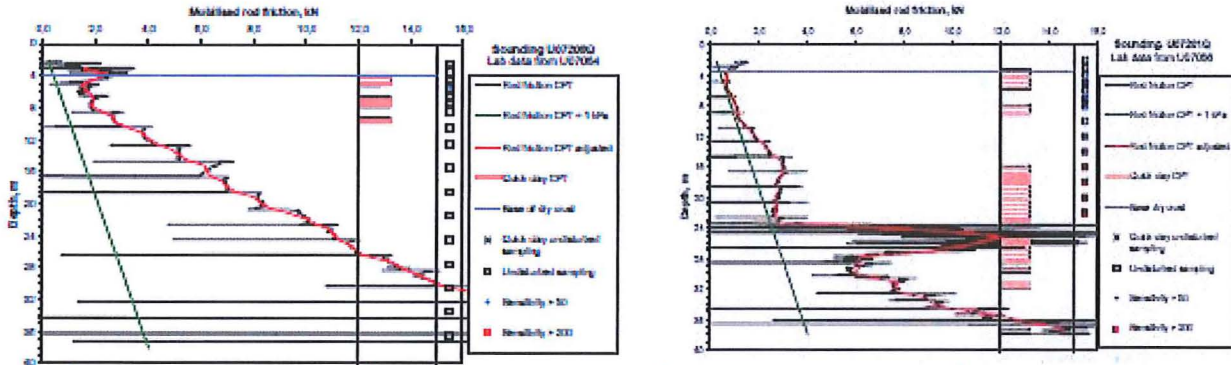
Prosjekt: Utredning av stabilitetsforholdene langs Göta älv. (GÅU delrapport 30 Løfroth et al, Linköping 2011).

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

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

1. Mobilisert sidefriksjonskraft F bestemmes ved å benytte total nedpressingskraft Q , legge til vekt av stenger og subtrahert spisskraft $q_t \cdot A_t$, der A_t er tverrsnittsarealet av CPTU-sonden.
2. Mobilisert sidefriksjonskraft F plottes mot dybde.

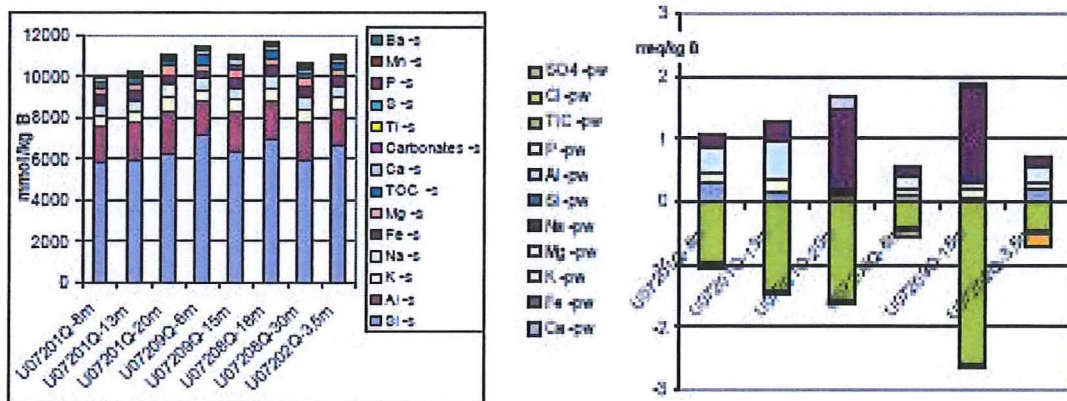
- Sidefriksjonskraften F sammenlignes med en teoretisk, valgt friksjonskraft, der det i prosjektet ble benyttet en jevnt fordelt sidefriksjon på 1 kPa. Dette gir en lineært økende friksjonskraft som benyttes som referansekraft i vurderingen, se eksemplet i figur 6.1.
- Der kurven for mobilisert friksjonskraft F har brattere helning enn referansekurven er leiren trolig kvikk. Denne vurderingen sammenholdes med annen informasjon fra resistivitetsmålinger (R-CPTU), andre feltmetoder og resultater fra konusforsøk og geokjemiske analyser i laboratoriet.



Figur 6-1 Tolkning av kvikkleire fra mobilisert sidefriksjon. Profil uten kvikkleire til venstre, profil med kvikkleire til høyre.

I prosjektområdene ble overflateresistivitetsmålinger utført innledningsvis i profiler på tvers mot elveløpet. Plassering av R-CPTU og borpunkter for prøvetaking ble så fastlagt basert på resultatene fra resistivitetsmålingene, samt informasjon fra tidligere boreresultater. På denne måten kunne man oppnå optimal bestemmelse av grunnforholdene. Boringene ble først og fremst plassert der det var mistanke om sensitive og/eller kvikke leirer. På denne måten ble boringene plassert med større kost-nytte verdi i forhold til påvisning av mulig sensitiv/kvikk leire.

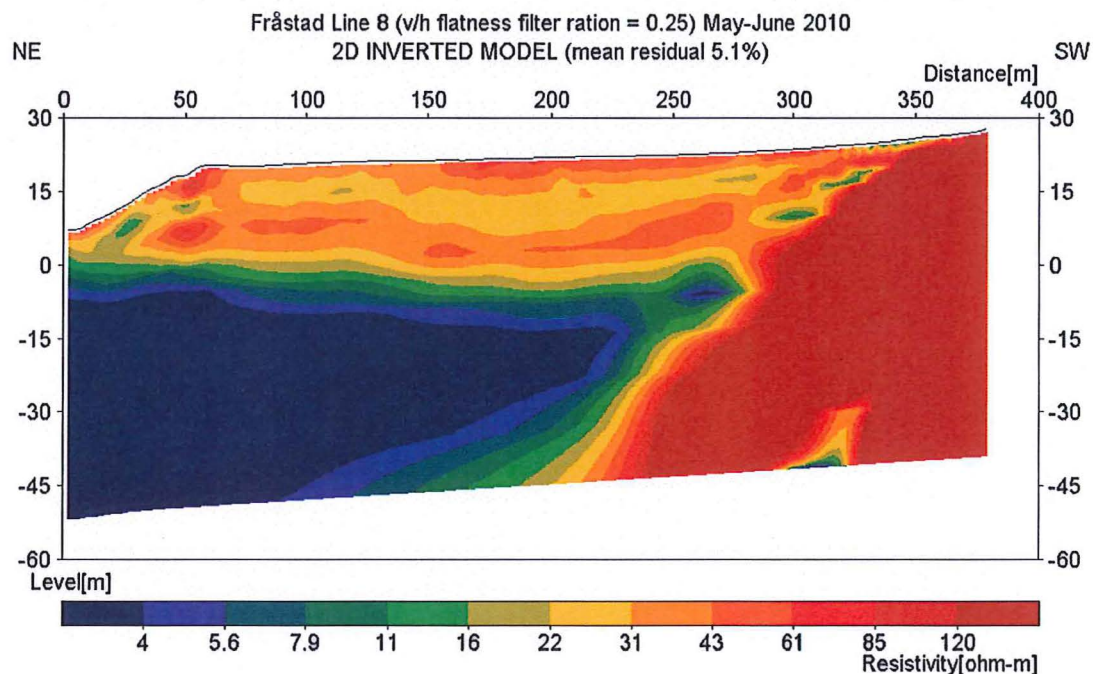
Det ble også registrert meget godt samsvar mellom tolkning av kvikkleire fra mobilisert sidefriksjon og resultater fra øvrige forsøk. Tendensen var at tolkning fra mobilisert stangfriksjon førte til noe overvurdering av kvikkleireforekomstene.



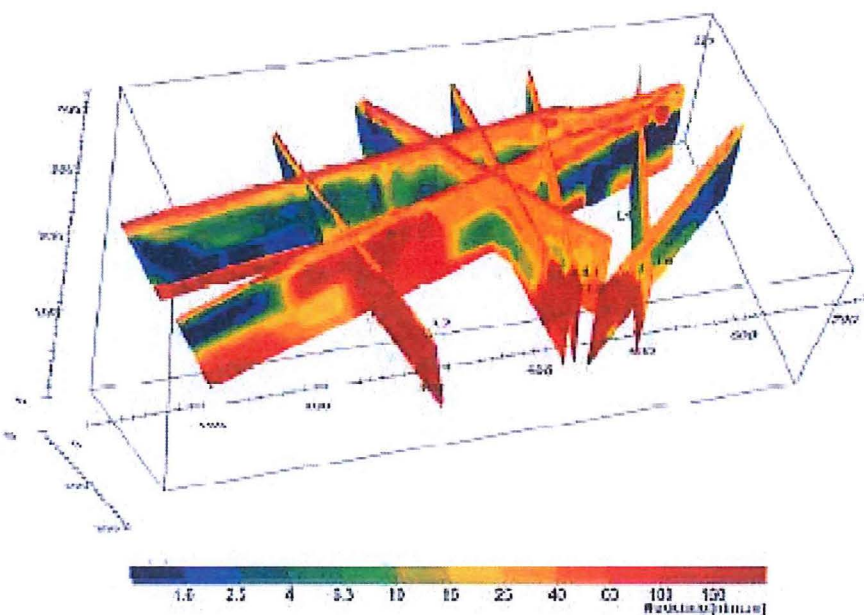
Figur 6-2 Resultater fra geokjemiske analyser med innhold av ulike salter i porevannet (Lofroth et al., 2011).

Som en del av utredningsprosjektet ble det også gjennomført omfattende geokjemiske analyser av porevann og fast stoff. Det var spesielt viktig å få klarlagt porevannskjemien og porevannets innhold av mengde og type oppløste salter. Resultater fra de geokjemiske analysene viste at utvaskede leirer som ikke var kvikke/sensitive, hadde et forhøyet magnesium- og karbonatinnhold (CO_3) som sannsynligvis har blitt utvekslet fra leirmineralenes overflate gjennom forvitring. Figur 6.2 viser resultatene fra en slik geokjemisk analyse.

Resultatene fra 2D overflatemålinger (ERT) viser fordelingen av resistivitet i jordvolumet langs et profil på overflaten. Fremstillingen er et resultat av invertering av et syntetisk profil med lagdeling og resistivitetsverdier tilegnet knutepunkter (noder) i jorden. Hver fargekode representerer et erfaringsbasert resistivitetsintervall som tilsvarer en bestemt jordartsgruppe. For eksempel vil resistivitetsverdier mellom 1 og 5-10 Ωm i følge forfatterne vanligvis tilsvare salt, marin leire, mens intervallet 10 (5)-30 Ωm normalt tilsvarer utvasket leire, som kan være kvikk.



Figur 6-3 Typisk resultat fra 2D ERT resistivitetsprofil (Løfroth et al., 2011).

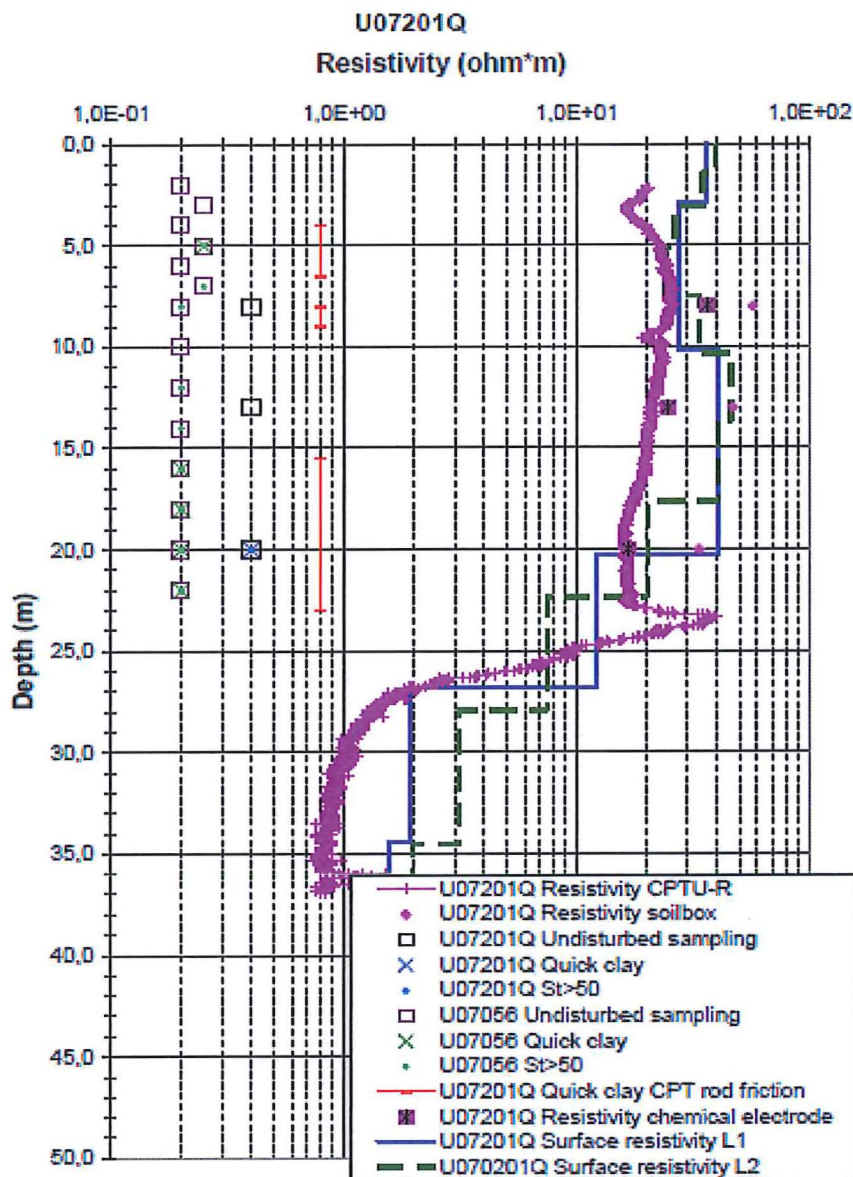


Figur 6-4 Sammenstilling av alle ERT resistivitetsprofiler innenfor et prosjektområde. Kvasi-3D fremstilling i et «fence»-diagram for kontroll av tolkningen (Løfroth et al., 2011).

Den syntetiske modellen tilpasses målte verdier av potensialet gjennom en iterasjonsprosess inntil tilsvarende samsvar er oppnådd. Fremstillingen er noe mer unøyaktig mot endene av profilet. Figur 6-3 viser et typisk resultat av et ERT-profil fra undersøkelsen, der de grønne/gul-grønne områdene representerer

utvasket, mulig kvikk/sensitiv leire med resistivitet mellom 5 og 100 Ωm . De blå feltene indikerer intakt, saltholdig leire med resistivitetsverdier mellom 1 og 5 Ωm .

Det er vanlig å gjennomføre en 2D resistivitetsmåling ved å måle både i langsgående og tversgående profiler. Ved å sette disse sammen i et såkalt «fence»-diagram kan man kontrollere tolkning av enkeltprofilene i skjæringsaksen mellom to profiler. Avvik i resistivitetstolkningen langs disse aksene vil indikere større usikkerhet i tolkningen enn normalt. Figur 6-4 viser et eksempel på tolkning der samsvaret i skjæringsaksene er meget bra.



Figur 6-5 Sammenstilling av alle vurderingsdata i et prosjektområde.

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

For å kontrollere og sammenligne alle målinger med tanke på identifisering av kvikkleirelag, kan det være hensiktsmessig å samle informasjon som vist på Figur 6-5. Her er resultatene fra ERT og R-CPTU sammenholdt, og sammenlignet mot kvikkleireinformasjon fra laboriemålt resistivitet, omrørt skjærfasthet og sensitivitet fra konus og bestemmelse av mobilisert stangfriksjon fra CPTU.

7. Forslag til videre utvikling av R-CPTU

7.1. Videre arbeid

For å kunne utnytte potensialet av R-CPTU i sin helhet, må det forskes videre på noen områder av problemfeltet. Det er uten tvil viktig å bedre forstå hvilke faktorer påvirker resistiviteten i jorden, og hvilke effekter dette kan ha for resistivitetmålinger. Det synes åpenbart at komplette geokjemiske undersøkelser i laboratoriet må gjennomføres som en nødvendig del av resistivitetmålingen. Dette er kun utført i noen få tilfeller, av mange ulike grunner. Hovedfokus i disse analysene må være å gjennomføre en detaljert bestemmelse av porevannets kjemi, slik at resistivitet (og muligens også noen geotekniske parametere), kan korreleres til innholdet av mono- og multivalente oppløste kationer. Selv om dette tiltaket ikke er direkte relatert til R-CPTU, vil en slik undersøkelse også bidra til en bedre forståelse av tolkningsprosessen for denne metoden.

Det kan også være nyttig og måle resistivitet på andre måter enn det gjøres i dag. Her kan for eksempel elektrodekonfigurasjon i R-CPTU, strømpåføring og kalibreringsprosedyren mulige faktorer som kunne varieres for å se hvilken effekt det har på målingene. Det kunne også vært interessant å måle IP-effekt (indusert polarisasjon) i R-CPTU målinger, på samme måte som det gjøres ved ERT. Polarisasjonseffekter er vanskeligere å måle enn resistivitet fordi signalene er vesentlig mindre, og resultatene er ofte ubrukelige på grunn av for mye støy. Med «lokale» målinger rundt sonden, kan mye av støyen reduseres og måleverdiene blir mer karakteristiske for jorden som omgir sonden. Dette kan kanskje utnyttes i forbindelse med karakterisering av (kvikk)leire.

7.2. Videre planer i NIFS: Feltstudie R-CPTU

Det er ønskelig å gjennomføre et videre studium på tolkning og bruk av R-CPTU i NIFS. I studiet foreslås nye feltmålinger på utvalgte og godt dokumenterte forsøksfelter, primært med kvikk eller sensitiv leire i grunnen. Det henvises til Vedlegg 1 for en mer detaljert beskrivelse av prosjektforslaget.

Ettersom det foreligger få målinger med R-CPTU på godt dokumenterte forsøksfelter, vil studiet kunne gi bedre og bredere forståelse av metodens anvendelse og tolkning i kvikke og sensitive leirer. Det er også ønskelig å sammenligne resultater oppnådd med ulike typer resistivitetssonder, for eksempel ENVI og Geotech som er utformet på litt forskjellige måter. Det finnes veldig få tilfeller hvor enten resultatene av disse to konseptene, eller to enheter av samme fabrikat har blitt sammenlignet direkte.

Det er også ønskelig å knytte resultatene opp mot andre typer undersøkelser på de utvalgte forsøksfeltene, som for eksempel elektrisk vingeboing, vanlige sonderingsmetoder, høy-kvalitets prøvetaking, ERT m.m. Spesielt er det ønskelig å vurdere bruk av total nedpressingskraft og friksjonsgradient for CPTU-sonden som supplerende bidrag ved detektering av sprøbruddmateriale. Denne metodikken er nylig blitt benyttet av svenske forskere i Göta älv utredningen med svært godt resultat (Löfroth et al., 2011). På de utvalgte forsøksfeltene ønskes også utført en geokjemisk undersøkelse av jord og porevann i R-CPTU profilene for å oppnå et bedre grunnlag for tolkning og forståelse av resistivitetmålingene. Spesielt er det viktig å kartlegge type og fordeling av ioner i porevannet og mineralogien for de faste partiklene.

For å oppnå et størst mulig erfaringsgrunnlag med R-CPTU metoden, inviteres til et samarbeid med flere NIFS partnere, som NGI, Statens vegvesen, NTNU/SINTEF og NGU. Det er også ønskelig med kontakt mot våre naboland Sverige (SGI) og Finland (TUT Tampere) som har utført eller planlegger feltaktiviteter med bruk av R-CPTU og/eller ERT. NGI har tidligere utført R-CPTU i en rekke Østlandsleirer (bl.a. Vestfossen/Smørgrav, Onsøy og Kløfta) og kan utfylle resultater fra de forsøksfeltene som planlegges i prosjektforslaget. Statens vegvesen har nylig tatt i bruk R-CPTU og har blant annet utført forsøk på Åby i Telemark. NTNU/SINTEF-miljøet har flere interessante forsøksfelt som kan tenkes benyttet, blant annet på Byneset, Tiller og Dragvoll i Trondheim. NGU har utført en rekke ERT-målinger på interessante områder som Melhus og Byneset, og besitter stor kompetanse på denne metoden.

Feltstudiet foreslås å omfatte nødvendige felt- og laboratorieundersøkelser på i alt 4 forsøksfelt. Disse er nærmere beskrevet i Vedlegg 1. I tillegg ønskes benyttet resultater fra resistivitetmålinger fra andre godt dokumenterte forsøksfelt fra aktuelle samarbeidspartnere, mot at disse får tilgang til resultater fra de nye forsøksfeltene. Resultatene bearbeides og sammenstilles i forhold til følgende vurderinger:

- Registrerte resistivetsverdier fra R-CPTU og ERT-målinger
- Sammenligning mellom R-CPTU og ERT-profiler i forhold til erfaringsdata fra utvaskede leirer
- Sammenligning med resultater fra øvrige sonderingsmetoder og laboratoriedata
- Sammenligning med resultater fra tolket friksjonsgradient fra CPTU
- Vurdering av resistivetsverdier i forhold til resultater fra geokjemiske analyser
- Oppsummering, konklusjoner og videre arbeid

Det vil være ønskelig å fordele det foreslåtte studiet over perioden 2014-2015. For tidsplanlegging og budsjettall, se Vedlegg 1.

8. Referanser

- /1/ Aasland, R. A. (2010). *Kartlegging av kvikkleire med 2D resistivitet og R-CPT i Rissa*. Master thesis (in Norwegian), NTNU.
- /2/ Andersson-Sköld Y., Torrance J.K., Lind B., Odén K., Stevens R.L., Rankka K. (2005). *Quick clay – A case study of chemical perspective in Southwest Sweden*. *Engineering geology*, 82(2), 107-118.
- /3/ Archie, G. E. (1942). *The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics*. *Trans. AIME*, 146(99), 54-62.
- /4/ Arulanandan, K. (1991). *Dielectric Method for Prediction of Porosity of Saturated Soil*. *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 117, No. 2, February 1991, 319-330.
- /5/ Bennett R.H., Hulbert M.H. (1986). *Clay Microstructure*. International Human Resources Development Corporation.
- /6/ Bennett, R. H., Bryant, W. R., & Hulbert, M. H. (Eds.). (1991). *Microstructure of fine-grained sediments: From Mud to Shale*. Springer publisher.
- /7/ Berger, B. (1983). *Geofysiske metoder anvendt i ingeniørgeologiske undersøkelser*. Ph. D. thesis, Institutt for petroleumsteknologi og anvendt geofysikk, Norwegian Institute of Technology, Trondheim, Norway (in Norwegian).
- /8/ Calvert, H.T., and Hyde, C.S.B. (2002). *Assessing landslide hazard in the Ottawa Valley using electrical and electromagnetic methods*. In *Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (SAGEEP)*. Las Vegas, Nevada, 10–14 February 2002. Environmental and Engineering Geophysical Society. Wheat Ridge, Colo.
- /9/ Cerato, A. B., & Lin, B. (2012). *Dielectric measurement of soil-electrolyte mixtures in a modified oedometer cell using 400 kHz to 20 MHz electromagnetic waves*. *Geotechnical Testing Journal*, 35(2), 261-269.
- /10/ Daniel, C. R., Campanella, R. G., Howie, J. A., & Giacheti, H. L. (2003). *Specific depth cone resistivity measurements to determine soil engineering properties*. *Journal of Environmental & Engineering Geophysics*, 8(1), 15-22.
- /11/ Eberl, D. D., Farmer, V. C., & Barrer, R. M. (1984). *Clay Mineral Formation and Transformation in Rocks and Soils [and Discussion]*. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 311(1517), 241-257.
- /12/ Egashira, K., & Ohtsubo, M. (1982). *Smectite in marine quick-clays of Japan*. *Clay Mineralogy*, 30(4), 275.
- /13/ Johnson, D. L., Koplik, J., & Schwartz, L. M. (1986). *New pore-size parameter characterizing transport in porous media*. *Physical Review Letters*, 57, 2564-2567.
- /14/ Kalscheuer T, Bastani M, Donohue S, Persson L, Pfaffhuber AA, Reiser F, Ren ZY (2013) *Delineation of a quick clay structure at Smørgrav, Norway, with electromagnetic methods under geotechnical constraints*. *Journal of Applied Geophysics*, 92:121–136.
- /15/ Locat, J., Berube, M. A., Chagnon, J. Y., & Gelinat, P. (1985). *The mineralogy of sensitive clays in relation to some engineering geology problems - an overview*. *Applied clay science*, 1(1), 193-205.
- /16/ Long, M., Donohue, S., L'Heureux, J. S., Solberg, I. L., Rønning, J. S., Limacher, R. & Lecomte, I. (2012). *Relationship between electrical resistivity and basic geotechnical parameters for marine clays*. *Canadian Geotechnical Journal*, 49(10), 1158-1168.
- /17/ Lundström, K., Larsson, R., & Dahlin, T. (2009). *Mapping of quick clay formations using geotechnical and geophysical methods*. *Landslides*, 6(1), 1-15.
- /18/ Löfroth, H., Suer, P., Dahlin, T., Leroux, V., and Schälin, D. (2011). *Quick clay mapping by resistivity - Surface resistivity, CPTU-R and chemistry to complement other geotechnical sounding and sampling*. In *Statens Geotekniska Institut, SGI. Göta älv utredningen. GÄU. Delrapport 30*. Swedish Geotechnical Institute, Linköping, Sweden.

- /19/Løken, T. (1968). *Kvikkleiredannelse og kjemisk forvitring i norske leirer*. Norwegian Geotechnical Institute, Oslo. Publication No. 75, pp. 19–26 (in Norwegian).
- /20/Matsui, T., Park, S. G., Park, M. K., & Matsuura, S. (2000). *Relationship between electrical resistivity and physical properties of rocks*. In Proceedings of An International Conference on Geotechnical & Geological Engineering, “GeoEng2000”, Melbourne, Australia G (Vol. 987).
- /21/Mitchell J. K., Soga K. (2005). *Fundamentals of Soil Behavior (3rd edition)*. John Wiley & Sons.
- /22/Montafia, A. (2013). *Influence of Physical Properties of Marine Clays on Electric Resistivity and Basic Geotechnical Parameters*. Master thesis, NTNU.
- /23/Muñoz-Carpena, R., Regalado, C. M., Ritter, A., Alvarez-Benedi, J., & Socorro, A. R. (2005). *TDR estimation of electrical conductivity and saline solute concentration in a volcanic soil*. *Geoderma*, 124(3), 399-413.
- /24/NIFS rapport (2012). *Etatsprogrammet NATURFARE – Infrastruktur, Flom og Skred (NIFS). Delprosjekt 6: Kvikkleire*. Datert 20-01-2012.
- /25/Ottesen H.B. (2009). *CPTU med resistivitetsmåling*. Master thesis (in Norwegian), NTNU.
- /26/Peixoto, A. S. P., Pregnolato, M. C., Silva, A. C. C. L., Yamasaki, M. T., & Junior, F. C. (2010). *Development of an electrical resistivity measure for geotechnical and geoenvironmental characterization*. Proceedings CPT’10, 1-7, Huntington beach, USA.
- /27/Rankka, K., Andersson-Sköld, Y., Hultén, C., Larsson, R., Leroux, V., & Dahlin, T. (2004). *Quick clay in Sweden*. Swedish Geotechnical Institute (SGI), Report 65, 145.
- /28/Reynolds, J. M. (2011). *An introduction to applied and environmental geophysics*. John Wiley & Sons.
- /29/Rhoades, J. D., Raats, P. A. C., & Prather, R. J. (1976). *Effects of liquid-phase electrical conductivity, water content, and surface conductivity on bulk soil electrical conductivity*. *Soil Science Society of America Journal*, 40(5), 651-655.
- /30/Rømoen, M., Pfaffhuber, A. A., Karlsrud, K., & Helle, T. E. (2010, May). *Resistivity on marine sediments retrieved from R-CPTU-soundings: A Norwegian case study*. In Proceedings of 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing (pp. 9-11).
- /31/Sandven, R. & Solberg, I-L. (2013). *Geophysical and geotechnical investigations for a major highway in a quick-clay area*. In Proceedings 1st International Workshop for landslides in Sensitive Clays. Quebec, Canada.
- /32/Schälin, D., and Tornborg, J. (2009). *Evaluation of CPT-R and resistivity measurements in quick clay area*. M.Sc. thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Division of GeoEngineering, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden.
- /33/Shah, P. H., & Singh, D. N. (2005). *Generalized Archie’s law for estimation of soil electrical conductivity*. *Journal of ASTM International*, 2(5), 1-20.
- /34/Simoni, G., & Vannucchi, G. (2006). *Use of a resistivity cone and a fuel fluorescence detector for the detection and mapping of contaminated sites*.
- /35/Solberg I.L., Dalsegg E., L’Heuereux J.S., Rønning J.S. (2012). *Resistivitetsmålinger for løsmassekartlegging ved skredgrop på Byneset, Sør-Trøndelag*. NGU Rapport nr. 2012.004
- /36/Solberg, I. L., Hansen, L., Rønning, J. S., Haugen, E. D., 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*, 71(1), 119-133.
- /37/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*, 45(2), 210-225.
- /38/Thakur, V., Degago, S. A., Oset, F., Aabøe, R., Dolva, B. K., Aunaas, K., ... & L’Heureux, J. S. (2013). *Characterization of Post-failure Movements of Landslides in Soft Sensitive Clays*. In *Landslides in Sensitive Clays* (pp. 91-103). Springer Netherlands.

- /39/Torrance, J. K. (1974). *A Laboratory Investigation of the Effect of Leaching on the Compressibility and Shear Strength of Norwegian Marine Clays*. Norwegian Geotechnical Institute Publication, (104).
- /40/Van Olphen, H. (1977). *An introduction to clay colloid chemistry, for clay technologists, geologists, and soil scientists (2nd edition)*. John Wiley & Sons.
- /41/Waxman, M. H., & Smits, L. J. M. (1968). *Electrical Conductivities in Oil-Bearing Shaly Sands*. *Oil SPE Journal*, 8(2), 107-122.
- /42/Wildenschild, D., Roberts, J. J., & Carlberg, E. D. (1999). *Electrical properties of sand-clay mixtures: The effect of microstructure*. In *Proceedings of the Society of Exploration Geophysicists 1999 International Exposition and 69th Annual Meeting, Houston, Texas*. Vol. 31, pp. 461-464.

Vedlegg 1 Opplegg for og gjennomføring av feltstudie i NIFS

Bakgrunn

Hensikten med prosjektforslaget er å utføre R-CPTU i flere ulike leirsedimenter for å vinne mer erfaring med nedhulls resistivitetsmålinger, hovedsakelig i kvikke og sensitive leirer. Det er blant annet ønskelig å sammenligne R-CPTU profilene med resultater fra andre typer sonderinger og in situ målinger, 2D resistivitetsmålinger på overflaten (ERT) og andre relevante undersøkelser i laboratoriet. 2D resistivitetsmålinger vil være et nyttig sammenligningsgrunnlag ved tolkningen.

Som en del av studiet gjennomføres også en forbedret tolkning av mobilisert stangfriksjon for CPTU for detektering av kvikk/sensitiv leire, som nå er praktisert i Sverige og beskrevet i Multiconsult/SINTEFs hovedrapport 415559-RIG-RAP-002.

Utførelse av oppgaven

For videre arbeid med resistivitetsmålinger er det først og fremst viktig å få oppsummert og systematisert erfaringene som er gjort med R-CPTU og 2D resistivitetsmålinger så langt, hovedsakelig fra norske og svenske undersøkelser. Dette gjelder ikke minst om hvorvidt måleresultatene i de to metodene er kompatible og gir rimelig samsvar i tolkningen. Videre er det viktig å sammenstille erfaringer med generell tolkning av kvikkeleire fra andre sonderingsmetoder, CPTU og elektrisk vingebor, og sammenligne disse observasjonene med målte resistivitetsdata. Særlig forventes at bruk av R-CPTU vil kunne styrke detektering av kvikkeleire gjennom kombinasjon av resistivitet og andre parametere fra CPTU (spissmotstand, poretrykk, friksjon og friksjonsgradient).

I oppgaven tas det sikte på å gjennomføre følgende aktiviteter etter at state-of-the-art rapporten ferdigstilles høsten 2013:

1. **Data fra tidligere feltundersøkelser.** Innhenting og bearbeiding av tidligere resultater fra grunnundersøkelser på utvalgte forsøksfelt i Trondheimsområdet og på Østlandet. Dette finner sted i samarbeid med øvrige samarbeidspartnere i NIFS (NGI, Statens vegvesen, NTNU/SINTEF, NGU).
2. **Data fra nye feltundersøkelser.** Utførelse av nye feltundersøkelser på utvalgte forsøksfelt
3. **Vurdering og tolkning.** Systematisering, tolkning og bearbeiding av måledata fra R-CPTU og eventuelt 2D overflatemålinger.
4. **Oppsummering, konklusjoner og behov for videre arbeid.** Vurdere sammenheng mellom målinger fra R-CPTU, ERT, elektrisk vingebor, CPTU-parametere for detektering av kvikkeleire.

I tillegg er det ønskelig å sammenligne med resultater fra målinger med elektrisk vingebor. Dette kan med fordel finne sted i samarbeid med andre aktiviteter i NIFS-prosjektet (post-doc studium Anders Gylland, NTNU). Resultater fra disse målingene kan også benyttes i andre aktiviteter innen NIFS-prosjektet, for eksempel ved vurdering av sprøbruddoppførsel, nødvendig omrøringsenergi for utløsning av kvikkeleireskred og vurdering av utløpsdistanser.

Feltundersøkelser – supplerende målinger

Følgende forsøksfelt er aktuelle for nye resistivitetsmålinger nærmere studier:

- a) **Åby forsøksfelt, Telemark (Statens vegvesen Region Sør).** Det er her nylig utført en rekke typer felt- og laboratorieforsøk, blant annet R-CPTU. Resultater fra konvensjonelle sonderinger er behandlet i masterstudie på NTNU (Tefaye Tilahun). Det er også planlagt høy-kvalitets prøvetaking med blokkprøvetaker og bruk av mobil laboratoriecontainer (SVV Geomobil 1). Det må gjennomføres et undersøkelsesprogram med supplerende R-CPTU, ERT og elektrisk vingebor.
- b) **Fallan, E6 Haga – Skjerdingsstad, Melhus, Sør-Trøndelag (Statens vegvesen, region midt/Multiconsult).** Det er her utført en omfattende grunnundersøkelse i meget homogen kvikkeleire som ligger godt til rette for et supplerende feltprogram. Det er tidligere utført 2D resistivitetsmålinger i området, men foreløpig ikke R-CPTU eller elektrisk vingebor. Resultater fra konvensjonelle

sonderinger er behandlet i masterstudie på NTNU (Tesfaye Tilahun). Det må gjennomføres et undersøkelsesprogram med R-CPTU, supplerende høy-kvalitets prøvetaking og elektrisk vingebor.

- c) **Dragvoll universitetsområde, Trondheim, Sør-Trøndelag (NTNU).** Dette området har tidligere vært benyttet som forskningsfelt av NTNU og inneholder svært bløt kvikkleire i store forekomster. Området benyttes nå som forsøksfelt i forbindelse med PhD-studie om saltdiffusjon v/Tonje Eide-Helle. NTNU har gjennomført fullt profil med mini-blokkprøvetaker og NGI har gjennomført ERT. Det må gjennomføres et undersøkelsesprogram med dreietrykk-/totalsondering supplerende R-CPTU og elektrisk vingebor.
- d) **E6 Klett–Jagtøien, Melhus, Sør-Trøndelag (Statens vegvesen, region midt/Multiconsult).** Det er her utført en omfattende grunnundersøkelse, delvis i meget homogen kvikkleire. Det er ikke utført 2D resistivitetsmålinger, R-CPTU eller elektrisk vingebor i området. Statens vegvesen planlegger blant annet høy-kvalitets prøvetaking i området våren 2014. Det må i tillegg gjennomføres et undersøkelsesprogram med R-CPTU, elektrisk vingebor og ERT.

Omfang av nødvendige felt- og laboratorieundersøkelser på de ulike feltene fremgår av Tabell 0-1. Øvrige felt kan også være aktuelle for ytterligere utvidelse av databasen.

Tabell 0-1: Grunnundersøkelser utført på utvalgte prøvefelt pr. 01.11.2013.

Prøvefelt	Sondering	CPTU	R-CPTU	2D-RES	El.vingebor	Prøvetaking
Åby	x	x	x	o	o	x
E6 Fallan	x	x	o	x	o	o/x
Dragvoll	x	x	o/x	x	o	x
E6 Klett	o/x	x	o	o	o	o

Utført: Merket med x

Ikke utført: Merket med o

Dette betyr at en god del informasjon allerede er tilgjengelig fra de utvalgte forsøksfeltene, selv om denne må kvalitetssikres før bruk i prosjektet.

Bearbeiding av resultater – tolkning og vurdering

Resistivitetsmålinger

Resultatene fra nye R-CPTU- og ERT-målinger vil bearbeides, presenteres og sammenlignes med øvrige tilgjengelige data fra forsøksstedet: Resultater fra sonderinger, CPTU, elektrisk vingebor og laboratorieklassifisering. Dette vil gi en sikrere tolkning av påvisning av sprøbruddmateriale for R-CPTU i ulike materialer, noe som vil kunne medføre en forbedring av dagens klassifiserings- og identifiseringsmetodikk.

Vingebormålinger

Resultatene fra elektrisk vingebor vil i hovedsak benyttes til bestemmelse av kvikkleire/sprøbruddmateriale fra omrørt skjærfasthet. Arbeidskurver fra vingebormålinger kan også benyttes til å vurdere sprøbruddoppførsel, nødvendig omrøringsenergi og utløpsdistanse av skredmasser fra last-deformasjonskurven. Disse resultatene vil bli stilt til rådighet også for andre aktiviteter i NIFS-prosjektet.

Budsjett

Budsjettet for prosjektforslaget fordeler seg delvis på utførelse av nye og supplerende grunnundersøkelser, i hovedsak med R-CPTU, ERT, høy-kvalitets prøvetaking og målinger med elektrisk vingebor i felt, se Tabell 0-1.

Kostnadene for grunnundersøkelsene er basert på timeleie av borrrigg med nødvendig standard- og tilleggsutstyr. På hvert forsøkssted vil det anslagsvis utføres 2-3 R-CPTU og 2 vingeborprofiler i verifiserte kvikkleirelag fra tidligere prøvetaking.

Tabell 0-1: Antatt omfang og kostnad av nye felt- og laboratorieundersøkelser (kostnadstall må bearbejds videre).

Prøvefelt	Omfang feltundersøkelser	Estimert kostnad
Åby	Mobilisering, supplerende R-CPTU, elektrisk vingebor, 2D resistivitetsmåling (ERT), geokjemiske analyser.	150,000
Fallan	Mobilisering, R-CPTU, elektrisk vingebor, supplerende høy-kvalitets prøvetaking, geokjemiske analyser.	100,000
Dragvoll	Mobilisering, dreietrykk-/totalsondering, R-CPTU, elektrisk vingebor.	75,000
E6 Klett	Mobilisering, supplerende dreietrykk-/totalsondering, R-CPTU, elektrisk vingebor, supplerende høy-kvalitets prøvetaking, 2D resistivitetsmåling, geokjemiske analyser.	150,000
Totalt	Feltundersøkelser	500,000

I tillegg vil det være behov for saksbehandlertid i forbindelse med innhenting og systematisering av tidligere og nye felldata, tolkning og vurdering av resultater samt utarbeidelse av data- og vurderingsrapporter, se Tabell 0-2.

Utførelse av 2D resistivitetsmålinger (ERT) er ikke inkludert i tilbudet over. Enhetspris pr.m. målt profil tilsvarer ca. 85,- NOK pr. lm. Totalkostnader er estimert til **NOK 50.000 eks.mva.** pr forsøksfelt med det omfang som anses nødvendig (gjelder for Åby og E6 Klett).

Tabell 0-2: Estimert antall timer saksbehandlertid for oppfølging og rapportering av prosjektaktiviteter (kostnadstall må bearbejds videre).

Aktivitet	Utførende	Antall timer	Estimert kostnad
Innsamling og bearbejding av eksisterende forsøksdata fra utvalgte forsøksfelt samt fra samarbeidspartnere.	Rolf Sandven, Multiconsult Alberto Montafia, Multiconsult	40	50000
Innsamling og bearbejding av nye forsøksdata. Administrasjon av felt- og laboratorieundersøkelser.	Rolf Sandven, Multiconsult Alberto Montafia, Multiconsult	40	50000
Utarbeidelse av datarapport med nye felt- og laboratoriedata.	Rolf Sandven, Multiconsult Alberto Montafia, Multiconsult	40	50000
Tolkning, bearbejding og evaluering av felt- og laboratoriedata.	Rolf Sandven, Multiconsult Alberto Montafia, Multiconsult Teskfaye Tilahun, Multiconsult	80	100000
Utarbeidelse av vurderingsrapport med oppsummering og konklusjoner.	Rolf Sandven, Multiconsult Alberto Montafia, Multiconsult	60	85000
Totalt	Saksbehandling	260	335000

I forslaget er det ikke tatt med eventuelle kostnader vedrørende samarbeid med øvrige NIFS-partnere. Det må påregnes noen kostnader i forbindelse med utveksling av data og andre tjenester. Innleide tjenester, som for eksempel assistanse ved høykvalitets prøvetaking, er inkludert i aktuelle kostnadstall.

Foreslåtte aktiviteter i prosjektforslaget tilbys utført for en total kostnad på **NOK.835.000 eks. mva.** Dette omfatter innsamling av tidligere forsøksdata, klargjøring og utførelse av nye feltundersøkelser, bearbejding og presentasjon av resultater, samt utarbeidelse av data- og vurderingsrapporter.

Det er fullt mulig å fordele estimerte kostnader for R-CPTU studiet over flere år og følgende fordeling foreslås i så fall slik:

Tabell 0-3: Fordeling av kostnader ved gjennomføring over 2 år 2014-2015.

Fase	Periode	Beskrivelse	Estimert kostnad
Trinn 1	2013	State-of-the-art introduksjonsstudie med vurdering av dagens status for R-CPTU	250.000
Trinn 2	2014	Feltstudier del 1 med utførelse av nye forsøk på 2 av 4 forsøksfelt. Innsamling og systematisering av aktuelle data fra samarbeidspartnere i NIFS.	400.000
Trinn 3	2015	Feltstudier del 2 med utførelse av nye forsøk på resterende 2 av 4 forsøksfelt. Utarbeidelse av data- og vurderingsrapport med oppsummering og systematisering av alle data. Oppsummering, konklusjoner og behov for videre arbeid.	435.000

Leveranser

Leveranser fra foreslått aktivitet til NIFS-prosjektet vil være følgende:

- Datarapport med presentasjon av alle relevante data fra utvalgte forsøksfelt og supplerende data fra eventuelle samarbeidspartnere.
- Vurderingsrapport med tolkning og vurdering av data fra resistivitetmålinger og øvrige felt- og laboratorieresultater. Oppsummering og konklusjoner fra studiet.

Samarbeid

For å oppnå et størst mulig erfaringsgrunnlag med R-CPTU metoden, inviteres til et samarbeid med flere NIFS partnere, som NGI, Statens vegvesen, NTNU/SINTEF og NGU. Det er også ønskelig med kontakt mot våre naboland Sverige (SGI) og Finland (TUT Tampere) som har utført eller planlegger feltaktiviteter med bruk av R-CPTU og/eller ERT.

NGI har tidligere utført R-CPTU i en rekke Østlandsleirer (bl.a. Vestfossen/Smørgrav, Onsøy og Kløfta) og kan utfylle resultater fra forsøksfeltene som planlegges i Trøndelag og Telemark. Statens vegvesen har nylig tatt i bruk R-CPTU og har blant annet utført forsøk på Åby i Telemark. NTNU/SINTEF-miljøet har flere interessante forsøksfelt som kan tenkes benyttet, blant annet på Byneset, Tiller og Dragvoll i Trondheim. NGU har utført en rekke ERT-målinger på interessante områder som Melhus og Byneset, og besitter stor kompetanse på metoden.

En forutsetning for samarbeid i prosjektet er at resultater fra nye undersøkelser fritt stilles til disposisjon for samarbeidspartnerne, mot at data fra tidligere undersøkelser i avtalt omfang kan benyttes i prosjektet.

Fremdrift

Studiet gjennomføres sannsynligvis mest praktisk over en 2-årsperiode med oppstart av undersøkelsene våren 2014. Gjennomføringen legges da opp med utførelse av feltundersøkelser på to av de utvalgte forsøksfeltene i 2014 og to i 2015. Nye feltundersøkelser vil kunne utføres fra mars/april 2014, forutsatt avgjørelse i løpet av januar 2014 slik at aktiviteten kan inkluderes i våre ressursplaner.

Med denne gjennomføringen leveres en felles datarapport, eventuelt oppdelt i trinnvise rapporter for 2014 og samlerapport for alle målinger, samt en egen vurderingsrapport innen 01.12.2015.

Vedlegg 2 Avrop S-M3 6.4 Detektering av kvikkleire ved bruk av R-CPTU

Oppdrag: Detektering av kvikkleire ved bruk av R-CPTU		Til SINTEF/Multiconsult gruppen	Oppdragsnummer: SM-6.6.4	Prioritet Høy
Budsjett (INK. MVA) 250 000 kr	Leveranse: Teknisk rapport	Leveransefristen: 15-11-2013		
<p>Bakgrunn for oppgaven: I 2012 gjennomførte SINTEF-Multiconsult gruppen et FoU oppdrag knyttet til detektering av kvikkleire ved bruk av ulike sonderingsmetoder. Dette oppdraget beskrevet dagens bransjepraksis i forhold til påvisning av kvikkleire fra ulike feltmetoder. Oppdraget dekker de utvalgte metodene dreiesondering, dreietrykksondering, totalsondering, CPTU og vinge boring, med sammenstilling mot laboratorieresultater fra opptatte prøver. Det var beskrevet også mulige feilkilder og avvik i tolkningen for de ulike metodene, belyst med reelle eksempler fra praksis. Eksemplene viste at dagens sonderingsmetoder ikke gir entydig og riktig informasjon om kvikkleireforholdene i alle tilfeller, og at dette i noen grad påvirkes av de opptredende grunnforholdene. Dette er også sammenholdt med svenske erfaringer som viser noenlunde samme mønster. Oppdraget anbefaler å inkludere resistivitetmålinger og bruk av R-CPTU i forskningsarbeidet. I våren 2013 levert to studenter sine hovedoppgaver knyttet til d knyttet til detektering av kvikkkleire fra ulike sonderingsmetoder</p> <p>Kvikkleiregruppen har mottatt et prosjektforslag (<i>Notat fra Multiconsult, Oppdrag nr. 415559 dato 12.03.2013</i>) den 15.03.2013. Vi har gått gjennom forslaget og vårt forslag til oppgaven og ønsket resultat er beskrevet under;</p> <p>Oppgavebeskrivelse: Kvikkleiregruppen ser nytten og verdien i resistivitetmålinger i store kartleggingsoppgaver, hvor det også utføres andre relevante "punkt"-undersøkelser som R-CPTU som kan benyttes til kalibrering av både 1- og 2-dimensjonale resistivitetmålinger.</p> <p>Prosjektforslaget fra Sintef-Multiconsult gruppen <i>Notat fra Multiconsult, Oppdrag nr. 415559 dato 12.03.2013</i> deles opp i to trinn der første trinn (i 2013) vil være en arkivstudie og oppsummering av tilgjengelig materiale og resultater fra tidligere undersøkelser. Etatene kan supplere med rapporter knyttet til resitivitetmålinger fra sine arkiver. Det er ønskelig at resultater er publisert/presentert av SINTEF-Multiconsult gruppen i Teknologidagene den 22.okt. 2013. Timer knyttet til forberedelsen og deltagelsen på teknologidagene er inkludert i det foreslåtte budsjettet. Omfang av trinn to (i 2014) vil være avhengig av resultater fra første trinn, men det er sannsynlig at tilgjengelig data må suppleres med nye feltundersøkelser for å få tilstrekkelig grunnlag for anbefalinger og konklusjoner. Anbefalingen bør underbygges med sammenstilling av forsøksresultater og konkrete referanser samt forslag til arbeidsprogram for trinn 2. Vi ber om at leveransen også har synspunkter knyttet til resultatene/konklusjonene: Hva skal, bør eller kan tas i bruk? Hvordan skal det brukes?</p>				
<p>Referanse: 1. Rammeavtale- DP6 kvikkleire til Etatsprogrammet NIFS (Sveis nr. 2012073568) 2. Forslag fra SINTEF-Multiconsult gruppen den 15.03.2013 – Notat (Multiconsult – Oppdrag nr. 415559 dato 12.03.2013) 3. NIFS-rapport 46/2012 " Detektering av kvikkleire fra ulike sonderingsmetoder" utarbeidet av Sintef/Multiconsult</p>				

Utgitt i Rapportserien i 2014

- Nr. 1 Analyse av energibruk i forretningsbygg. Formålsdeling. Trender og drivere
- Nr. 2 Det høyspente distribusjonsnett. Innsamling av geografiske og tekniske komponentdata
- Nr. 3 Naturfareprosjektet Dp. 5 Flom og vann på avveie. Dimensjonerende korttidsnedbør for Telemark, Sørlandet og Vestlandet: Eirik Førland, Jostein Mamen, Karianne Ødemark, Hanne Heiberg, Steinar Myrabø
- Nr. 4 Naturfareprosjektet: Delprosjekt 7. Skred og flomsikring. Sikringstiltak mot skred og flom Befaring i Troms og Finnmark høst 2013
- Nr. 5 Kontrollstasjon: NVEs gjennomgang av elsertifikatordningen
- Nr. 6 New version (v.1.1.1) of the seNorge snow model and snow maps for Norway. Tuomo Saloranta
- Nr. 7 EBO Evaluering av modeller for klimajustering av energibruk
- Nr. 8 Erfaringer fra ekstremværet Hilde, november 2013
- Nr. 9 Erfaringer fra ekstremværet Ivar, desember 2013
- Nr. 10 Kvartalsrapport for kraftmarknaden. 4. kvartal 2013. Ellen Skaansar (red.)
- Nr. 11 Energibruksrapporten 2013
- Nr. 12 Fjernvarmens rolle i energisystemet
- Nr. 13 Naturfareprosjektet Dp. 5 Flom og vann på avveie. Karakterisering av flomregimer. Delprosjekt. 5.1.5
- Nr. 14 Naturfareprosjektet Dp. 6 Kvikkleire. En omforent anbefaling for bruk av anisotropifaktorer i prosjektering i norske leirer
- Nr. 15 Tilleggsrapport: Oppsummering av Energimyndighetens og NVEs gjennomgang av elsertifikatordningen
- Nr. 16 Flomberegning for Nesttunvassdraget (056.3Z). Thomas Væringstad
- Nr. 17 Årsrapport for tilsyn
- Nr. 18 Verktøyprosjektet - hydrologi 2010-2013. En oppsummering av aktiviteter og resultater. Erik Holmqvist (red.)
- Nr. 19 Flom og jordskred i Nordland og Trøndelag desember 2013. Elin Langsholt, Erik Holmqvist, Delia Welle Kejo
- Nr. 20 Vindkraft i produksjon i 2013
- Nr. 21 FoU-prosjekt 81072 Pilotstudie: Snøskredfarekartlegging med ATES (Avalanche Terrain Exposure Scale) Klassifisering av snøskredterreng for trygg ferdsel
- Nr. 22 Naturfareprosjektet: Delprosjekt 3.1. Hvordan beregne ekstremverdier for gitte gjentaksintervaller? Manual for å beregne returverdier av nedbør for ulike gjentaksintervaller (for ikke-statistikker)
- Nr. 23 Flomsonekart Delprosjekt Tuv. Kjartan Orvedal, Julio Pereira
- Nr. 24 Summary of the review of the electricity certificates system by the Swedish Energy Agency and the Norwegian Water Resources and Energy Directorate (NVE)
- Nr. 25 Landsomfattende mark- og grunnvannsnett. Drift og formidling 2011. Jonatan Haga Per Alve Glad
- Nr. 26 Naturfareprosjektet: Delprosjekt 1 Naturskadestrategi. Sammenligning av risikoakseptkriterier for skred og flom. Utredning for Naturfareprogrammet (NIFS)
- Nr. 27 Naturfareprosjektet Dp. 6 Kvikkleire. Skredfarekartlegging i strandsonen
- Nr. 28 Naturfareprosjektet Dp. 5 Flom og vann på avveie. "Kvistdammer" i Slovakia. Små terskler laget av stedegent materiale, erfaringer fra studietur for mulig bruk i Norge
- Nr. 29 Reestablishing vegetation on interventions along rivers. A compilation of methods and experiences from the Tana River valley
- Nr. 30 Naturfareprosjektet Dp. 5 Flom og vann på avveie. Karakterisering av flomregimer
- Nr. 31 Småkraftverk: Tetthet og reproduksjon av ørret på utbygde strekninger med krav om minstevannføring Svein Jakob Saltveit og Henning Pavels
- Nr. 32 Kanalforvaltningen rundt 1814 – del av en fungerende statsadministrasjon for det norske selvstendighetsprosjektet. Grunnlovsjubileet 2014
- Nr. 33 Museumsordningen 10 år

- Nr. 34 Naturfareprosjektet Dp. 6 Kvikkleire. Skredfarekartlegging i strandsonen -videreføring
- Nr. 35 Naturfareprosjektet Dp. 5 Flom og vann på avveie. Karakterisering av flomregimer
Delprosjekt. 5.1.5. Revisjon av rapport 13-2014
- Nr. 36 Kvartalsrapport for kraftmarknaden 1. kvartal 2014. Gudmund Bartnes (red.)
- Nr. 37 Preliminary regionalization and susceptibility analysis for landslide early warning purposes in Norway
- Nr. 38 Driften av kraftsystemet 2013
- Nr. 39 Naturfareprosjektet Dp. 6 Kvikkleire. Effekt av progressivbruddutvikling for utbygging i områder med kvikkleire: Sensitivitetsanalyse basert på data fra grunnundersøkelser på vegstrekningen Sund-Bradden i Rissa
- Nr. 40 Naturfareprosjektet DP. 6 Kvikkleire. Effekt av progressiv bruddutvikling for utbygging i områder med kvikkleire: Sensitivitetsanalyse-1
- Nr. 41 Bioenergi i Norge
- Nr. 42 Naturfareprosjektet Dp. 5 Flom og vann på avveie. Dimensjonerende korttidsnedbør for Møre og Romsdal, Trøndelag og Nord-Norge. Delprosjekt. 5.1.3
- Nr. 43 Terskelstudier for utløsning av jordskred i Norge. Oppsummering av hydrometeorologiske terskelstudier ved NVE i perioden 2009 til 2013. Søren Boje, Hervé Colleuille og Graziella Devoli
- Nr. 44 Regional varsling av jordskredfare: Analyse av historiske jordskred, flomskred og sørpeskred i Gudbrandsdalen og Ottadalen. Nils Arne K. Walberg, Graziella Devoli
- Nr. 45 Flomsonekart. Delprosjekt Hemsedal, Martin Jespersen, Rengifo Ortega
- Nr. 46 Naturfareprosjektet Dp. 6 Kvikkleire. Mulighetsstudie om utvikling av en nasjonal blokkprøvedatabase
- Nr. 47 Naturfareprosjektet Dp. 6 Kvikkleire. Detektering av sprøbruddmateriale ved hjelp av R-CPTU



Norges
vassdrags- og
energidirektorat

Norges vassdrags- og energidirektorat

Middelthunsgate 29
Postboks 5091 Majorstuen
0301 Oslo

Telefon: 09575
Internett: www.nve.no

