


NGU Rapport 2010.048

Veileder for bruk av resistivitetsmålinger i
potensielle kvikkleireområder. Versjon 1.0

Rapport nr.: 2010.048	ISSN 0800-3416	Gradering: Åpen
Tittel: Veileder for bruk av resistivitetsmålinger i potensielle kvikkleireområder. Versjon 1.0		
Forfattere: Inger-Lise Solberg, Louise Hansen, Jan Steinar Rønning og Einar Dalsegg	Oppdragsgiver: NGU, SINTEF, NVE, Statens vegvesen, Jernbaneverket og Statens landbruksforvaltning (Statens naturskadefond).	
Prosjektnr.: SINTEF-prosjekt 3C0234 (RiG) NGU-prosjekt 323800 (REMA)	Sidetall: 93 (inkl. vedlegg) Pris: 250 kr	
Rapportdato: 17.01.2011	Ansvarlig: Reginald Hermanns 	
Sammendrag: <p>Denne rapporten er en veileder som omhandler bruk av 2D resistivitetsmålinger for å kartlegge kvikkleireområder (også 1D-målinger i sonderingshull er berørt). Veilederen tar for seg de eksisterende erfaringer knyttet til bruk av 2D resistivitetsmålinger for kvikkleirekartlegging, med eksempler fra prosjekter hvor metoden har vært brukt. Metoden er ikke en erstatning for tradisjonelle geotekniske undersøkelser som prøvetaking og sonderboringer, men kan være et verdifullt supplement.</p> <p>Formålet med veilederen er å vise hvordan man kan:</p> <ul style="list-style-type: none"> vurdere egnethet og planlegge bruken av 2D resistivitetsmålinger utføre 2D resistivitetsmålinger tolke resistivetsprofiler både geologisk og geoteknisk bruke resultater fra 2D resistivitetsmålingene som grunnlag for videre undersøkelser sammenligne data fra ulike typer undersøkelser <p>I tillegg vil veilederen vise:</p> <ul style="list-style-type: none"> eksempler på mulige resistivetsverdier for typiske geologiske forhold anvendeligheten av resistivetsmetoden for ulike problemstillinger eksempler fra prosjekter der resistivetsmetoden er brukt utfordringer knyttet til tolkning av resistivetsprofiler <p>Målgruppa for denne veilederen er alle som skal utrede forekomst av kvikkleire. Dette kan være i forbindelse med arealplanlegging og prosjektering av aktivitet/utbygging/sikring i områder på marin leire der man skal utføre grunnundersøkelser, stabilitetsberegninger, og/eller bearbeidelse av aktsomhetssoner/faresoner. Resistivetsmålinger kan i tillegg benyttes hvis man ønsker en mer helhetlig og økt forståelse av den geologiske oppbyggingen og utviklingen til et område.</p> <p>Resistivetsprofiler vil gi informasjon om type sedimenter, deres fordeling og eventuelt lagdeling (i grov skala). Dataene vil også kunne indikere dyp til fjell. Informasjon om potensiell kvikkleire (ca. 10-100 Ωm), saltholdig leire (under ca. 10 Ωm), andre typer løsmasse og fjelltopografi er nyttig for å forstå dreneringsforhold og begrensningen til en eventuell skredutbredelse. Når resistivetsprofiler brukes i en tidlig fase av grunnundersøkelser, vil de kunne gi nyttig innspill til plassering av boringer. Dette vil potensielt begrense antall boringer, i tillegg til at informasjonen fra boringene vil kunne bli mer verdifull. Under tolkning av data vil profilene kunne benyttes ved interpolasjon mellom borepunkt, og således gi mer realistiske profiler av grunnforholdene som grunnlag for stabilitetsberegninger.</p>		
Emneord: Fagrapport	Resistivetsmålinger	Geofysikk
	Kvikkleire	Geoteknikk

Forord

Bakgrunnen for denne veilederen er ønsket om å utvide/supplere undersøkelsesmetodene for å kartlegge kvikkleireområder i Norge hvor skred kan forekomme og føre til skader på mennesker, bygninger, infrastruktur og andre verdier. 2D resistivitetsmålinger er ikke en ny metode, men anvendelsen av den for å kartlegge kvikkleire har vært beskjeden. Dette har forandret seg de siste årene, da metoden har blitt benyttet i flere prosjekter, både i Norge, Sverige og Canada. Det er i hovedsak disse landene i verden som har vært utsatt for store ødeleggelser grunnet skred i kvikkeleire.

Denne veilederen tar for seg de eksisterende erfaringer knyttet til bruk av 2D resistivitetsmålinger for kvikkleirekartlegging, med eksempler fra prosjekter hvor metoden har vært brukt. Den er ment som en håndbok for hvordan man kan gå fram der metoden potensielt kan brukes for å kartlegge kvikkleireforekomster. Metoden er ikke en erstatning for tradisjonelle geotekniske undersøkelser som prøvetaking og sonderboringer, men kan være et verdifullt supplement. Dette er første versjon av en slik veileder, som tenkes oppdatert etter hvert som metoden utvikles og erfaringen med bruken av den øker.

Arbeidet med veilederen har foregått i et samarbeid mellom SINTEF Byggforsk Geoteknikk og Norges geologiske undersøkelse (NGU). Følgende bedrifter har bistått med finansiering av SINTEF-delen (RiG): Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE), Statens vegevesen Vegdirektoratet (SVV), Jernbaneverket (JBV) og Statens landbruksforvaltning (SLF) (Styret for Statens naturskadefond). NGU-delen av prosjektet er finansiert av NGU og NVE.

Følgende personer har gitt innspill til veilederen: Einar Lyche (NVE), Isabelle Lecomte (ICG/NORSAR) og Torleif Dahlin (Lunds Universitet).

Innhold

Forord	5
1. INNLEDNING.....	11
1.1 FORMÅL.....	11
1.2 MÅLGRUPPE	12
1.3 VEILEDERENS INNHOLD OG OPPBYGGING	13
DEL I.....	15
2. KVIKKLEIRE.....	15
2.1 DANNELSE AV KVIKKLEIRE	15
2.2 GEOTEKNISK DEFINISJON	15
2.3 KVIKKLEIRESKRED	16
2.4 GEOKJEMI OG ELEKTRISK LEDNINGSEVNE.....	16
3. RESISTIVITETSMETODEN.....	17
3.1 INNLEDNING	17
3.2 UTSTYR OG MÅLEPROSEDYRE.....	19
3.3 BEARBEIDING/INVERTERING AV RÅDATA	23
3.4 KLASSIFISERING AV DATA	25
3.5 FEILKILDER.....	27
3.6 INDUSERT POLARISASJON.....	28
3.7 1D RESISTIVITETSMÅLINGER I SONDERINGSHULL (RCPTU).....	30
DEL II.....	31
4. INNLEDENDE OPPGAVER I PROSJEKTER HVOR RESISTIVITETSMETODEN BENYTTES.....	31
4.1 INNHENTING AV EKSISTERENDE DATA FRA OMRÅDET	31
4.2 BEFARING I OMRÅDET	33
5. PLANLEGGING OG MÅLING AV RESISTIVITETSPROFILER	36
5.1 VALG AV ELEKTRODEAVSTAND	36
5.2 VALG AV PROFILLENGDE OG -PLASSERING.....	37
6. FØRSTE TOLKNING AV PROFILER.....	40
7. SAMMENLIGNING MED EKSISTERENDE, TIDLIGERE INNSAMLEDE DATA.....	41

7.1	GEOTEKNISKE DATA	41
7.2	GEOFYSISKE DATA	42
8.	STRATEGI FOR INNSAMLING AV SUPPLERENDE GRUNNUNDERSØKELSER	42
8.1	GEOTEKNISKE DATA	42
8.2	GEOFYSISKE DATA	43
9.	EKSEMPLER PÅ TOLKNING AV RESISTIVITETSPROFILER.....	44
9.1	GEOLOGI OG MATERIALEGENSKAPER.....	44
9.1.1	<i>Ikke-utvaskede marine leiravsetninger ("Saltholdig leire", ca. 1-10 Ωm)</i>	<i>44</i>
9.1.2	<i>Utvaskede marine leiravsetninger (ca. 10-100 Ωm).....</i>	<i>46</i>
9.1.3	<i>Tørreskorpeleire</i>	<i>50</i>
9.1.4	<i>Sand/grus</i>	<i>50</i>
9.1.5	<i>Fjell.....</i>	<i>53</i>
9.1.6	<i>Grunnvannsforhold.....</i>	<i>55</i>
9.2	KRYSSENDE PROFILER.....	57
9.3	TOLKNING VED HJELP AV RCPTU	59
10.	ANVENDELIGHETEN AV RESISTIVITETSMETODEN MHT VIDERE BEARBEIDELSE AV FARESONER FOR KVIKKLEIRESKRED	63
11.	TIDSBRUK OG KOSTNADER KNYTTET TIL 2D RESISTIVITETSMÅLINGER	65
12.	UTVIKLINGSPOTENSIAL.....	66
12.1	FORBEDRET INVERSJON	66
12.2	FORBEDRET TOLKNING	67
12.3	UTVIDET DATAINNSAMLING.....	69
DEL III.....	71	
13.	HENVISNINGER TIL PROSJEKTER/STUDIER HVOR RESISTIVITETSMÅLINGER ER BENYTTET FOR KARTLEGGING AV KVIKKLEIRE	71
13.1	HISTORISK TILBAKEBLIKK I NORGE.....	71
13.2	RESISTIVITET OG KARAKTERISERING AV LEIRE I NORGE.....	72
13.3	RESISTIVITET OG KARAKTERISERING AV LEIRE I SVERIGE OG CANADA	74
14.	REFERANSER.....	75

VEDLEGG	81
<i>Vedlegg A Geotekniske undersøkelsesmetoder</i>	<i>83</i>
<i>Vedlegg B NGU's prosedyrer ved datainnsamling med LUND-systemet og invertering av data med Res2DInv....</i>	<i>85</i>
<i>Vedlegg C Leirklassifisering fra resistivetsverdier i Norge, Sverige og Canada</i>	<i>87</i>
<i>Vedlegg D Eksempler på vanlige geologiske forhold i områder under marin grense</i>	<i>89</i>
<i>Vedlegg E Tidsbruk og kostnader knyttet til måling av 2D resistivitet</i>	<i>91</i>

1. Innledning

1.1 Formål

Områder på Østlandet, i Trøndelag, i Nord-Norge og langs enkelte deler av den norske kysten blir nesten årlig rammet av skred i kvikkleire. I de fleste tilfeller er det kun små utglidninger knyttet til erosjon i bekker og elver, som ikke nødvendigvis får store konsekvenser. Av og til går det skred av en slik størrelse, eller i en slik sammenheng, at det får store konsekvenser, som skade på eller tap av menneskeliv, eller materielle ødeleggelse. For å kunne forebygge kvikkleireskred er det vesentlig å ha informasjon om kvikkleireforekomstens geometri, som for eksempel tykkelse, lateral utbredelse og helning, i tillegg til de geotekniske egenskapene til kvikkleira (f.eks. graden av sensitivitet, poretrykksforhold m.m.).

For å få oversikt over grunnforholdene i et område starter man gjerne med utarbeidelse av løsmassekart som viser utbredelsen av bl.a. marine avsetninger. Det er i disse avsetningene kvikkleire kan forekomme. Topografiske kart og feltbefaringer vil gi informasjon om kritiske skråninger og andre forhold som har betydning for stabiliteten, og videre vil grunnundersøkelser utdype denne vurderingen. Tradisjonelt har disse undersøkelsene vært sonderboringer av ulike slag og prøvetaking. Prøvetaking med testing av geotekniske egenskaper i laboratorium er den eneste sikre metode for å verifisere kvikkleire. Disse ulike metodene gir likevel bare punktvis informasjon om grunnforholdene, og det ekstrapoleres fra og interpoleres mellom disse punktene for å finne lagdeling og sammenheng. Denne formen for grunnundersøkelser er i tillegg både kostbar og tidkrevende, noe som kan resultere i få, spredte datapunkter. 2D resistivitetsmålinger indikerer i sammenhengende profiler hvor det potensielt kan finnes kvikkleire og andre materialer, og vil i så måte være et meget nyttig supplement til geotekniske undersøkelser. Metoden vil gi en oversikt over grunnforholdene på relativt kort tid, og rimelig, sammenlignet med å dekke tilsvarende areal med boringer. Hvis man ønsker å kartlegge et område som for eksempel skal brukes til vegutbygging, kan man starte med resistivitetsmålinger og bruke disse som utgangspunkt for videre undersøkelser. På den måten vil man kunne få en mer gunstig plassering av borepunkter, i noen tilfeller kanskje færre boringer – i tillegg til en total økt informasjon om grunnforholdene.

Tolkning av verdiene man får fra 2D resistivitetsmålinger vil kunne gi informasjon om type sedimenter, deres fordeling og eventuelt lagdeling (i grov skala). Dataene vil også kunne indikere

dyp til fjell. Informasjon om oppstikkende fjell og/eller andre typer løsmasser enn kvikkleire vil være nyttig for å forstå dreneringsforholdene og den geometriske begrensningen til en eventuell skredutbredelse. Siden profilene kan dekke et relativt stort område, vil det lette en mer helhetlig geologisk forståelse av området – noe som kan ha stor betydning for bedre å kunne forutsi bl.a. mulig stabilitetskritisk utvikling av et område.

Veilederen vil primært omhandle 2D resistivitetsmålinger, men 1D-målinger i sonderingshull er også berørt. Formålet med veilederen er å vise hvordan man kan:

- vurdere egnethet og planlegge bruken av 2D resistivitetsmålinger
- utføre 2D resistivitetsmålinger
- tolke resistivetsprofiler både geologisk og geoteknisk
- bruke resultater fra 2D resistivitetsmålingene som grunnlag for videre undersøkelser
- sammenligne data fra ulike typer undersøkelser

I tillegg vil veilederen vise:

- eksempler på mulige resistivetsverdier for typiske geologiske forhold
- anvendeligheten av resistivetsmetoden for ulike problemstillinger
- eksempler fra prosjekter der resistivetsmetoden er brukt
- utfordringer knyttet til tolkning av resistivetsprofiler

1.2 Målgruppe

Målgruppa for denne veilederen er alle som skal utrede forekomst av kvikkleire. Dette kan være knyttet til arealplanlegging og prosjektering av aktivitet/utbygging/sikring i et område der det skal utføres grunnundersøkelser, stabilitetsberegninger, og/eller bearbeidelse av aktsomhetssoner/faresoner. Resistivetsmålinger kan i tillegg benyttes hvis man ønsker en helhetlig og økt forståelse av den geologiske oppbyggingen og utviklingen til et område.

I forbindelse med kvikkleireproblemstillinger vil 2D resistivitetsprofiler kunne benyttes som forundersøkelser i forhold til:

- bygging/oppgradering av veger/jernbane
- terrengarrondring (fylling/planering) og massedeponering (store tomtearbeider, bakkeplanering)
- forbedring av skråningsstabilitet (i forbindelse med ovenstående punkt, bygging av annen infrastruktur (f.eks. bygninger og veger), erosjonssikring eller generell stabilitetsforbedring)
- bearbeidelse av aktsomhetssoner/faresoner for kvikkleireskred

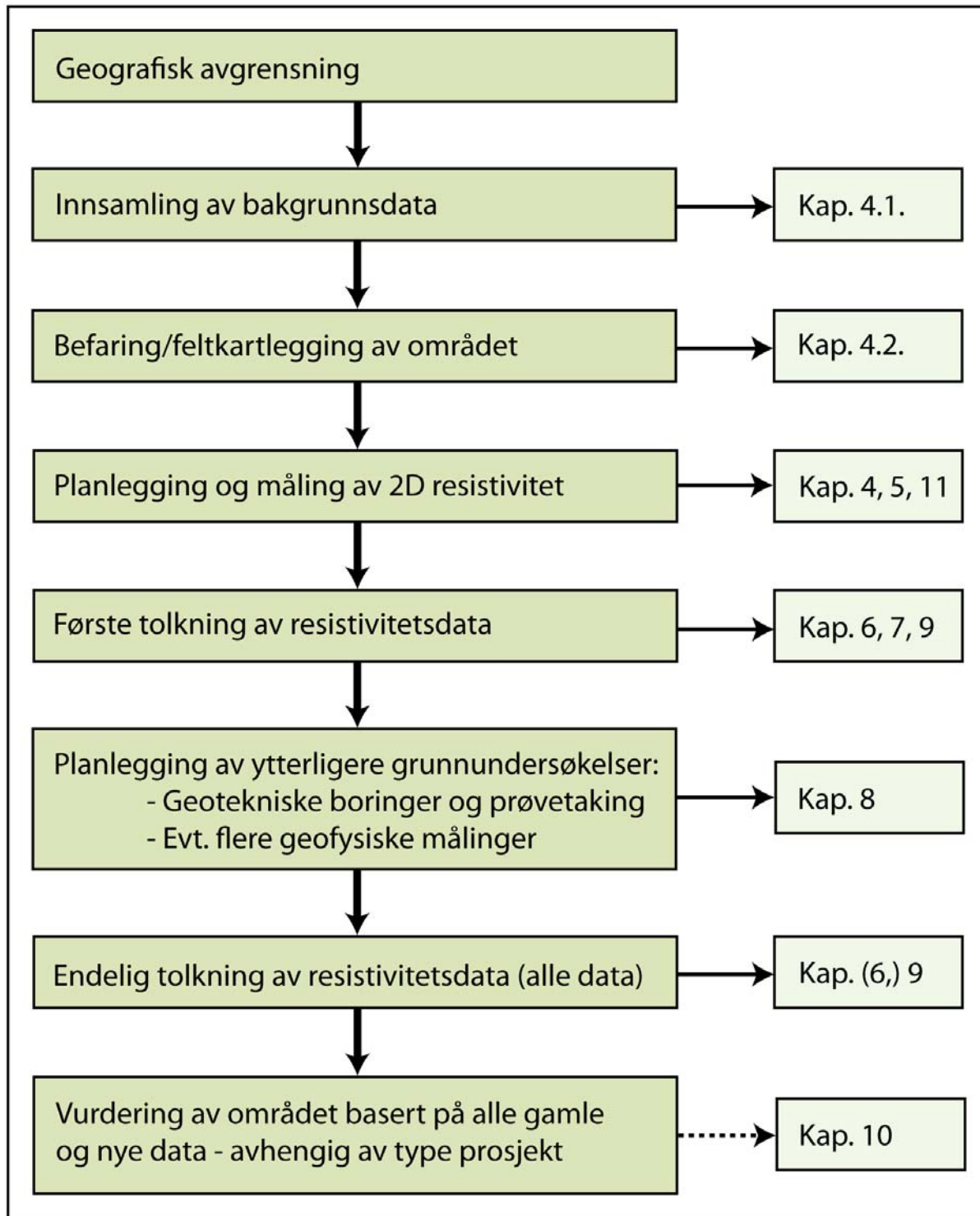
1.3 Veilederens innhold og oppbygging

Veilederen er etter innledningen delt inn i tre deler (I-III). Den første delen (del I: kap. 2-3) gir en kort innføring i hva kvikkleire er, både når det gjelder dannelse og geoteknisk definisjon av materialet. I tillegg blir resistivitetsmetoden beskrevet i forhold til måleutstyr, bearbeidelse og tolkning/klassifisering av data.

Den andre delen av veilederen (del II: kap. 4-12) tar for seg planlegging av prosjekter der resistivitetsmetoden benyttes, metodiske aspekter, mer om bearbeidelse og tolkning av resistivitetsdata, strategi for videre grunnundersøkelser og anvendelse av metoden for ulike problemstillinger. I tillegg vil tidsbruk og kostnader ved å bruke metoden diskuteres. Underveis illustreres veilederen med eksempler fra resistivitetsprosjekter. Disse er hovedsakelig fra prosjekter knyttet til kvikkleirekartlegging i Norge, men det er også noen eksempler fra Sverige og Canada.

Del tre (del III: kap. 13) består av henvisninger til noen prosjekter/studier der resistivitetsmetoden er benyttet for kvikkleirekartlegging, både i Norge, Sverige og Canada.

Figur 1 viser mulige steg for et prosjekt hvor 2D resistivitetsmålinger skal utføres. Til de ulike fasene av gjennomføringen er det en henvisning til kapitler i veilederen (del II) som omhandler vurderinger og framgangsmåter/angrepsmåter knyttet til hver fase.



Figur 1: Venstre kolonne: mulig oppbygging av et prosjekt hvor resistivitetsmålinger skal utføres; Høyre kolonne: henvisning til kapitler knyttet til hver fase i prosjektet. Stiplet pil: kap. 10 er et eksempel på en type prosjekt.

Del I

2. Kvikkleire

2.1 Dannelse av kvikkleire

Under istidene ble store mengder løsmasser erodert fra berggrunnen, fraktet ut til brekanten og avsatt i sjøvann. Grovt materiale som sand, grus og morene ble avsatt nær eller under isen, mens finere sedimenter som silt og leir ble typisk avsatt lenger fra breen. Leirpartiklene i sjøvann flokkulerer, noe som gir en åpen struktur når de avsettes på sjøbunnen som marin leire (korthusstruktur). Etter hvert som isen trakk seg tilbake førte landhevingen til at sedimenter som var avsatt på sjøbunnen ble tørt land. Med tiden har grunnvannstrømningen gjennom leirsedimentene ført til at salt porevann har blitt byttet ut med ferskvann, og kvikkleire har blitt dannet. Siden leire er lite permeabel vil utvaskingen ta lang tid, noen steder vil det ta flere hundre/tusen år før leira blir kvikk. Likevel vil deler av en leiravsetning kunne utvikle kvikkleire i soner/ lommer raskere enn andre på grunn av geologiske og topografisk forhold som øker grunnvannsgjennomstrømningen: nær berggrunnen, nær overflata hvor den hydrologiske grunnvannsgradienten er stor (f.eks. i skråninger), ved artesiske grunnvannsforhold og i soner hvor leira er gjennomsatt av silt-/sand-/gruslag (lagdelt) (f.eks. Janbu et al. 1993). Kvikkleire er ikke et endelig stadium. Ved videre utvasking kan andre, mer stabiliserende ioner tilføres kvikkleira, og igjen kunne gjøre leira mer stabil. Nær terrengoverflata utvikles ofte en flere meter tykk tørrskorpeleire som ikke er kvikk, som oftest avgrenset ned til nivå noe under normal grunnvannsstand.

2.2 Geoteknisk definisjon

I henhold til norske standarder har jordarten leire minst 30 % leirinnhold. Leire kan derfor inneholde store mengder andre kornstørrelser som silt og sand. Generelt er naturlig saltinnhold i sjøvann ca. 35 g/l, og ionene i porevannet gjør strukturen av leirkorn stabil. Ved utvasking av marin leire vil det bli færre stabiliserende ioner i porevannet. Marin leire hvor saltinnholdet i porevannet er mindre enn 5 g/l kan være meget sensitiv/kvikk (Rosenqvist 1953; Bjerrum 1954). Når omrørt skjærstyrke (s_r) er mindre enn $0,5 \text{ kN/m}^2$ defineres leira som kvikk. Sensitivitet (S_t) er forholdet mellom udrenert, uforstyrret skjærstyrke (s_u) og s_r , og standard norsk klassifisering av

sensitiv leire er som følger (NGF 1975): lav sensitivitet $S_t < 8$; middels sensitivitet: $8 < S_t < 30$; høy sensitivitet (kvikkleire): $S_t > 30$. Likevel, NVE har utviklet retningslinjer som anbefaler å benytte $S_t \geq 15$ og $s_r < 2 \text{ kN/m}^2$ for potensielt kollapsibelt leirmateriale (dvs. leire som utviser sprøbruddegenskaper) (NVE 2009). Dette gir en bredere klassifisering av sensitivitet enn den klassiske. I kvikkleire er vanninnholdet større enn flytegrensa til materialet. Disse geotekniske egenskapene til leire finnes i hovedsak ved testing av uforstyrrede prøver i laboratoriet. Noen vanlige geotekniske undersøkelsesmetoder er kort beskrevet i vedlegg A.

2.3 Kvikkleireskred

Kvikkleire som ikke er påkjent er i utgangspunktet stabil. Dersom kvikkleira blir utsatt for hurtige spenningsendringer, kan imidlertid brudd oppstå langs en påkjent glideflate. I bruddsonen langs glideflata mister leira all styrke (blir flytende), og bruddet forplanter seg som en progressiv kollaps. Slik kan brudd over store områder oppstå plutselig, og skape skred. Skredbevegelsen medfører ytterligere omrøring av kvikkleira omkring, som også blir flytende, og renner ut i skredet. Slike hurtige spenningsendringer kan oppstå ved at et lite initialscred – som ikke behøver å berøre kvikkleira direkte – utløses. Kvikkleirescred kan ha ulike bruddutviklinger som for eksempel retrogressive (bruddflaten utvikler seg motsatt bevegelsesretningen) og progressive (bruddflaten utvikler seg vanligvis med bevegelsesretningen). Type bruddutvikling avhenger av lokaliseringen til kvikkleira og type utløsende årsak. Kvikkleirescred skjer ofte uten forvarslar, og skredmassene kan oppnå ganske høy hastighet. Den vanligste naturlige utløsende årsaken er elve-/bekkeerosjon (initialscred). I moderne tid har menneskelige inngrep vært en mer vanlig årsak, f.eks. ved at fyllinger blir lagt på toppen av en skråning eller ved at det graves i foten av en skråning slik at skråningens likevekt blir forstyrret.

2.4 Geokjemi og elektrisk ledningsevne

I mange jord- og bergartstyper vil mineralkornene isolere mot elektrisk strøm (dårlig ledningsevne). Tilstedeværelse grunnvann vil derfor bestemme den elektriske motstanden der porøsitet i jorda, mengde vann og fordeling/mengde av oppløste ioner i porevannet er viktige faktorer. Leirmineraler er til en viss grad ledende, og leirpartikler vil derfor redusere den elektriske

motstanden (Dahlin 1993; Dahlin et al. 2001). Elektrisk ledningsevne øker med konsentrasjonen av kationer, som også er knyttet til materialets sensitivitet (Andersson-Sköld et al. 2005).

I marin leire med saltholdig porevann er det både bindende og frastøtende elektriske krefter, men de bindende kreftene er sterkest. I kvikkleire er det totale elektrolyttinnholdet typisk mindre enn 5 g/l. Innholdet av kalium og flervalente kationer er redusert, mens det fremdeles er høyt innhold av natriumioner. Med utvaskingen øker de frastøtende kreftene (Rosenqvist 1953; Hilmo 1989; Andersson-Sköld et al. 2005). Strukturen er da ustabil, og sensitiv for mekanisk påvirkning. Ved fortsatt grunnvannsgjennomstrømning vil mer stabiliserende ioner (flervalente, som magnesium og kalsium) kunne dominere i porevannet. Dette styrker bindingskreftene mellom leirpartiklene, men den totale ionekonsentrasjonen i porevannet vil fremdeles være lav (Hilmo 1989). Tørrskorpeleire dannes ovenfra ved at leira tørker opp og sprekker. Det foregår en forvitring, sementering og/eller utfelling av jern og aluminium som endrer egenskapene til leira. Tørrskorpeleire kan være opptil 4 m tykk, under spesielle forhold enda tykkere.

3. Resistivitetsmetoden

3.1 Innledning

Resistivitetsmetoden blir brukt til en rekke ulike formål, som kartlegging av løsmasser, grunnvann (ressurser, kvalitet og forurensning), mineralleting, og lokalisering av svakhetssoner i berggrunnen. Metoden kan også benyttes for arkeologiske undersøkelser og kartlegging av jordas egenskaper som sensitiviteten til leire og mektigheten av permafrost (Reynolds 1997).

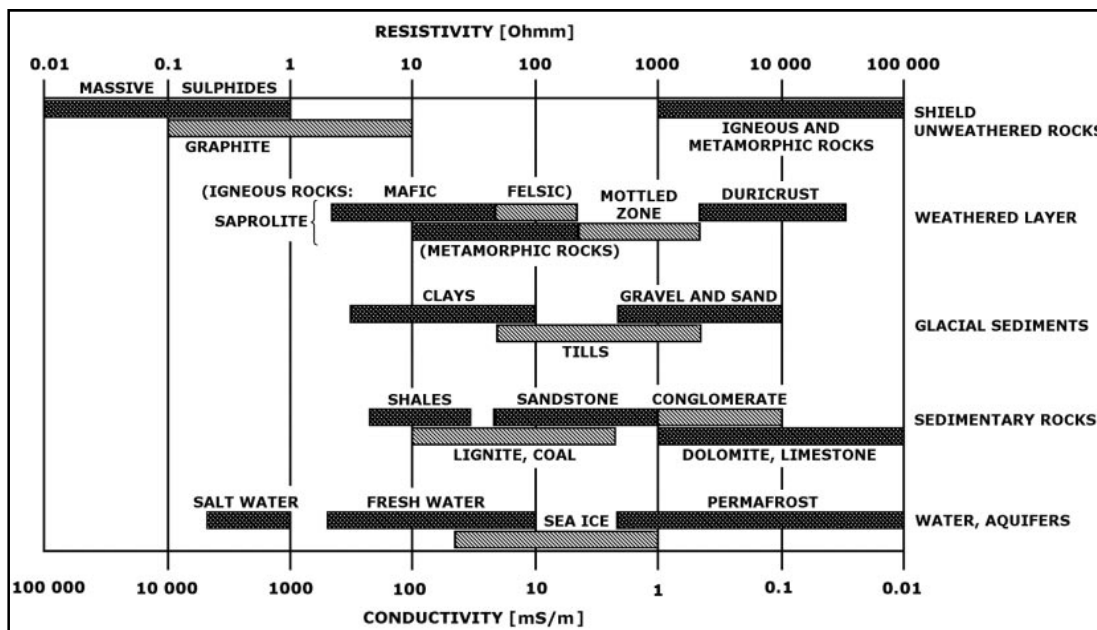
Når resistivitetsmetoden benyttes for bl.a. ingeniør-, hydro- og miljøgeologiske formål, er det som regel ønskelig med god oppløsning både horisontalt og vertikalt. Dette forutsetter gjerne at målingene gir resultater i minst to retninger slik at man får 2D-profiler (Dahlin 1993). Med riktig utstyr kan også 3D-målinger utføres, eller som erstatning, sette sammen 2D-profiler til en kvasi-3D-modell av undergrunnen. 1D resistivitetsmålinger i sonderingshull (RCPTU) kan i tillegg være nyttig for kontroll i enkelte punkter.

2D resistivitetsmålinger er en elektrisk metode som gir informasjon om grunnforholdene uten å forstyrre disse. Det er hovedsakelig variasjoner i porøsitet, vanninnhold og oppløste ioner som bestemmer ledningsevnen i bakken, og dermed resistiviteten (ρ) – som er den inverse av

ledningsevnen (σ) ($\rho=1/\sigma$) (Dahlin 1993; Reynolds 1997). Resistivitetsverdiene for sedimenter er i prinsippet mye lavere enn for berggrunnen, se tabell 1 og figur 2. I det følgende beskrives resistivitetsmetoden.

Tabell 1: Omtrentlige resistivitetsverdier for utvalgte geologiske materialer (etter Dahlin 1993 og Reynolds 1997).

Materiale		Elektrisk resistivitet (Ωm)
Bergarter	Massive sulfider	0.01-1
	Grafitt	0.1-10
	Magmatiske og metamorfe bergarter	1000-100 000
	Sedimentære bergarter	7-100 000
	Forvitrede bergarter	5-50 000
Sedimenter	Leire	1-100
	Grus og sand (tørr)	> 1400
	Grus og sand (vanmettet)	> 100
Vann	Saltvann	0.5-1
	Ferskvann	5-100
	Sjøis	50-1000
	Permafrost	70-100 000



Figur 2: Resistivitetsverdier i geologiske materialer (Palacky 1987).

3.2 Utstyr og måleprosedyre

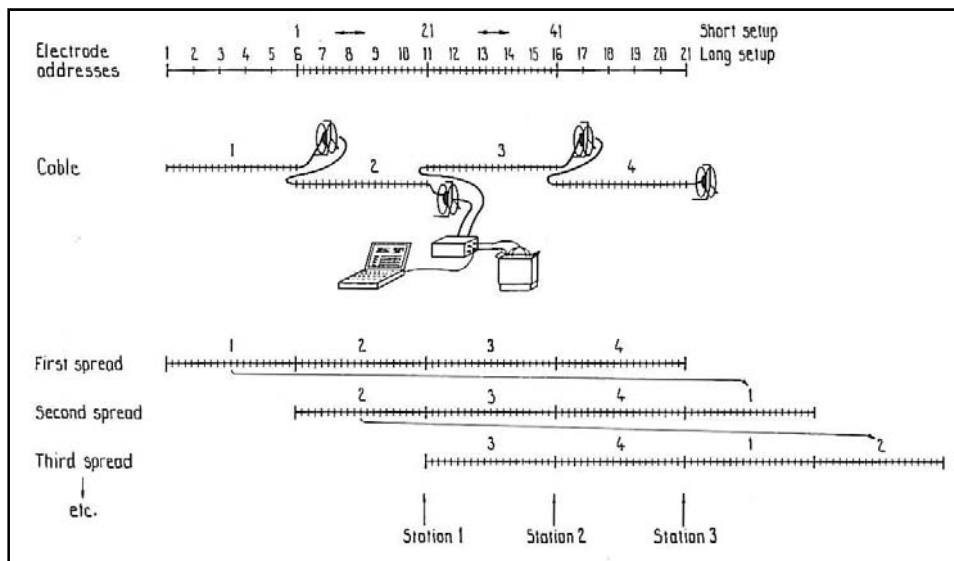
2D resistivitetsmålinger utføres ved å legge ut elektriske kabler og koble til stålelektroder som stikkes ned i bakken (fig. 3, 4). Det benyttes vanligvis 4 kabler, og antall elektroder kan være fra 20 og opp til 80, gjerne mer. Når utlegget er etablert, startes en automatisk styrt måleprosess der forskjellige elektrodepar benyttes som strømelektroder (I) mens den oppsatte elektriske spenningen (V) måles mellom to andre elektroder. Antall strøm- og potensialelektroder kan variere avhengig av type konfigurasjon. Ved å la en slik elektrodekonfigurasjon vandre langs kabelutlegget kartlegges resistiviteten sideveis (fig. 5). Strømmen brer seg i et halvrøm i undergrunnen, og man bruker enten direktestrøm i pulser (DC) eller vekselstrøm (AC) med lav frekvens. Metoden kalles ofte DC-resistivitet (Dahlin 1993). Det settes til en konstant strøm (f.eks. 200 mA), og det registreres hvordan denne strømmen går gjennom bakken. Ved tørre forhold kan det være vanskelig å få ut like mye strøm som ved fuktige, godt ledende forhold (f.eks. 50 mA). Dette kan kompenseres ved å benytte flere strømelektroder på hvert sted og/eller ved fukting av bakken omkring elektrodene med saltvann. Standardprosedyrer som benyttes ved NGU er kort omtalt i vedlegg B.



Figur 3: Elektroder knyttet til kabler for resistivitetsmålinger settes ned i leira. Man bruker 1-4 stålelektroder i hvert målepunkt avhengig av hvor god kontakt man får med grunnen (Foto: IL Solberg).

Den tilsynelatende motstanden i bakken beregnes ved å benytte en variant av Ohms lov: $R=V/I^1$, og resistivitet fås ved å multiplisere motstanden med en geometrisk faktor (se kap. 3.3). For å få et lengre profil, kan kablene flyttes og legges etter hverandre underveis i måleprosessen (CVES, se fig. 4). Brukes parallelle målelinjer kan en 3D-modell av resistivitetsforholdene konstrueres. Kryssende profiler vil også gi en indikasjon på grunnforholdene i 3D.

Under målingene kjøres det to måleserier som standard. Hvis måledataene i de to målingene er tilnærmet like, avsluttes måleprosessen. Er det derimot store forskjeller kjøres flere målinger for å bedre signal/støy-forholdet. Mye støy i dataene vil påvirke måletiden med opp til 50-100 % (se kap. 3.5 for eksempler på feilkilder som kan gi støy).



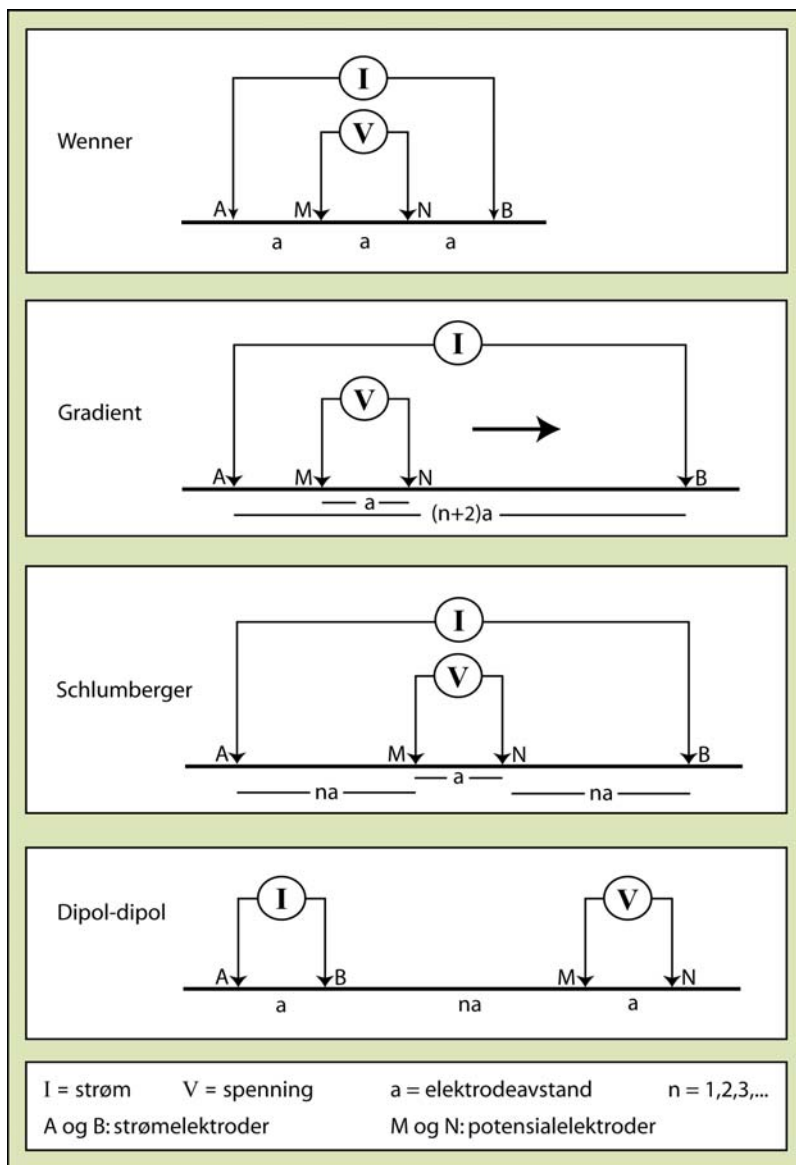
Figur 4: Utleggsprinsipp for måling av 2D resistivitet (Continuous vertical electrical sounding, CVES) (Dahlin 1993).

Hvilken type konfigurasjon og elektrodeavstand man bruker avhenger av tilgjengelig utstyr, formålet med undersøkelsene, området som skal undersøkes og hvor arbeidskrevende hver metode er (tabell 2-4). En kan teoretisk fritt velge elektrodeavstand, men det er mest praktisk å benytte de avstander som er på de kablene man disponerer. De vanligste elektrodekonfigurasjonene er: Wenner, Schlumberger og Dipol-dipol (Reynolds 1997) (fig. 5). Gradient elektrodekonfigurasjon er en kombinasjon av flere konfigurasjoner. Både Gradient og Wenner favoriserer

¹ R = motstand, V = spenning, I = strøm

horisontale strukturer i grunnen, men Gradient gir flere datapunkt og dermed bedre oppløsning og flere detaljer (Dahlin & Zhou 2004, 2006). I praksis vil det være en avveining mellom dybderekkevidde og dataoppløsning ved valg av elektrodeavstand. Hvis man ønsker å se dypt bruker man lange utlegg med stor avstand mellom elektrodene, men da vil oppløsningen bli dårligere enn hvis det er kortere mellom elektrodene.

For den konkrete framgangsmåten ved målinger i felt henvises det til manualen for det måleutstyret man har tilgjengelig, for eksempel ABEM Terrameter SAS 4000 (ABEM 1999) (se også vedlegg B). Kap. 5 har praktiske råd knyttet til målinger i felt.



Figur 5: Prinsippkisser over et utvalg elektrodekonfigurasjoner.

Tabell 2: Eksempler på elektrodekonfigurasjoner (se fig. 5 for prinsippskisse) (delvis basert på Reynolds 1997; Dahlin & Zhou 2004, 2006).

Elektrodekonfigurasjon	Beskrivelse	Fordeler/ulemp(er) (se også tabell 3)
Wenner	Samme avstand mellom alle elektroder. Dybdesondering ved å øke avstanden mellom elektrodene. (Finnes ulike varianter men Wenner- α er den mest vanlige)	Gunstig for lagdelte sedimenter, noe dårligere oppløsning, men høyere signalstøy forhold. Datainnsamling på kun én kanal.
Schlumberger	Stor avstand mellom strømelektrodene sammenlignet med mellom potensialelektrodene. Dybdesondering ved å øke avstanden mellom strømelektrodene.	God lateral oppløsning, tidkrevende, noe støy.
Gradient	En kombinasjon av flere elektrodekonfigurasjoner. Potensialelektroder ”vandrer” mellom strømelektrodene. Varierende dybderækkevidde ved forskjellig avstand mellom strømelektroder og potensialelektroder.	Gunstig for lagdelte sedimenter, god oppløsning, rask datainnsamling og høy datatetthet. Datainnsamling på flere kanaler.
Dipole-Dipole	Strøm- og potensialelektroder står parvis sammen. Dybdesondering oppnås ved å flytte elektrodeparene fra hverandre.	God lateral oppløsning. Rask metode og datainnsamling på flere kanaler. Problem med signalstyrke.

Tabell 3: Sammenligning av noen elektrodekonfigurasjoner. Alle metodene er like arbeidskrevende (delvis basert på Reynolds 1997).

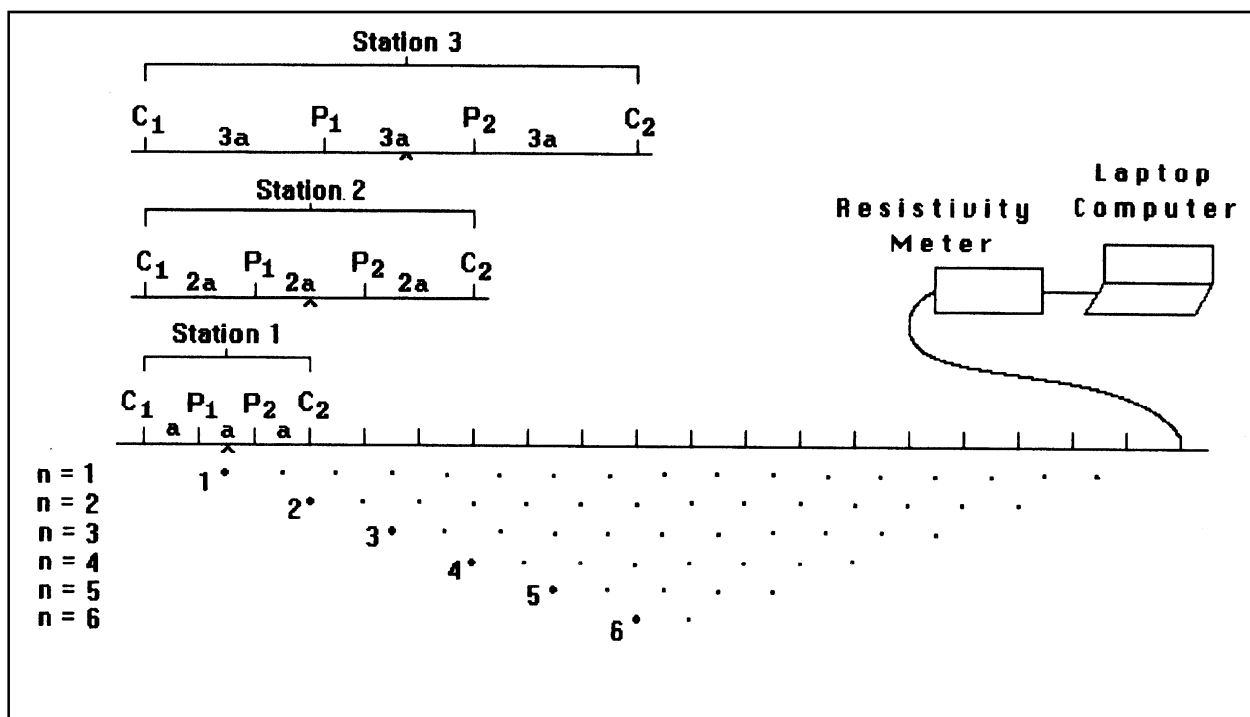
	Wenner	Schlumberger	Gradient	Dipol-dipol
Vertikal oppløsning	++ (+)	++	+++	+
Nedtrengningsdyp	+	++	++	+++
Gunstig for 2D-kartlegging	++	+++	+++	+
Følsom for orientering	Ja	Ja	Ja	Moderat
Følsomhet for laterale inhomogeniteter	Høy	Moderat	Høy	Høy
Tidkrevende	Ja	Ja	Moderat	Moderat

Tabell 4: Eksempler på elektrodeavstander med Lund-systemet (Dahlin 1993).

Elektrodeavstand (m)	Dybderækkevidde (m)	Relativ oppløsning	Kommentar
2	25	Høy	Minst 160 m profillengde, kan forlenges
5	60	Moderat	Minst 400 m profillengde, kan forlenges
10	130	Lav	Minst 800 m profillengde, kan forlenges

3.3 Bearbeiding/invertering av rådata

Rådata fra resistivitetsmålinger gir bakkens *tilsynelatende resistivitet* (ρ_a) og fordelingen av ulike resistiviteter innenfor målevolumet. Den tilsynelatende resistiviteten beregnes som produktet av en målt resistans ($R=U/I$) og en geometrisk faktor bestemt av elektrodeplassingene. ρ_a representerer et vektet gjennomsnitt av alle resistivetsverdier som faller innenfor den enkelte målings influensvolum. Fordelingen av tilsynelatende resistivitet (målte data) settes sammen til en såkalt pseudoseksjon, hvor tilsynelatende resistivitet med en bestemt målekonfigurasjon plottes i et fiktivt dyp mellom potensialelektrodene. Når strømelektrodeavstanden øker, flyttes plottepunktet ett nivå ned (fig. 6). Pseudoseksjonen reflekterer da kvalitativt variasjonen i undergrunnens resistivitet, og omtrentlige strukturer og dyp til laggrenser kan estimeres. Det er viktig å være klar over at dypet til et lag i en pseudoseksjon ikke tilsvarer virkelig dyp. Hvis jorda er homogen, vil den tilsynelatende resistiviteten være lik den reelle resistiviteten til jorda (Dahlin 1993).



Figur 6: Konstruksjon av pseudoseksjon fra målte resistivitetsdata. C1 og C2 angir strømelektroder, P1 og P2 potensialelektroder. n angir multipler av minste elektrodeavstand, a er elektrodeavstand (etter Loke et al. 2003).

Den geometriske faktoren (K) er definert ved følgende uttrykk (Reynolds 1997) (se også fig. 5):

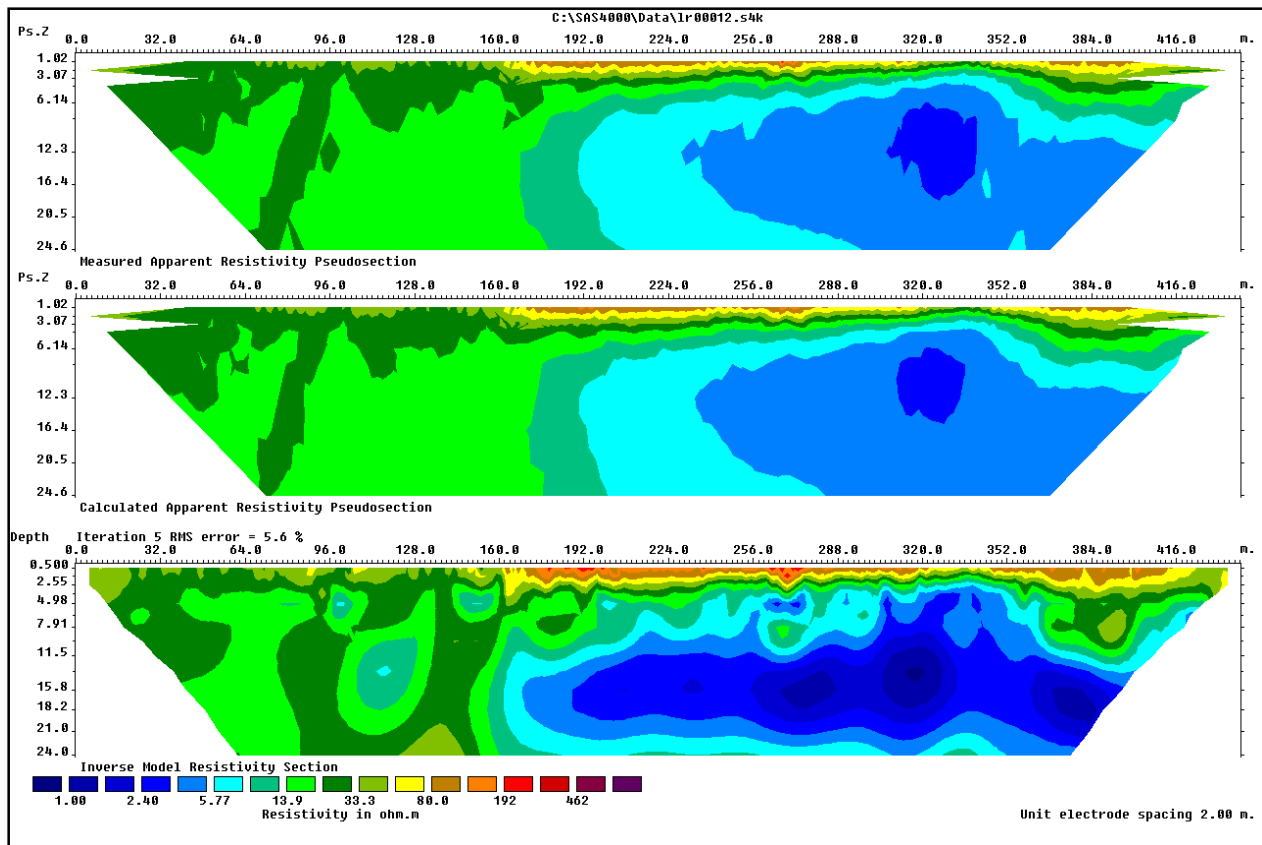
$$K = 2\pi \left[\frac{1}{AM} - \frac{1}{MB} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{NB} \right]^{-1} \quad [\text{m}]$$

Tilsynelatende resistivitet (ρ_a) beregnes så på følgende måte:

$$\rho_a = RK \quad [\Omega\text{m}]$$

$$\text{hvor } R = \frac{\delta V}{I} \quad [\Omega] \quad (\delta V \text{ er spenningsforskjell, } I \text{ er strømstyrke})$$

For å finne *spesifikk resistivitet* (ρ) i Ωm fra de ulike delene av undergrunnen må rådataene inverteres. Dette utføres ved at profilet deles opp i blokker som tilordnes en bestemt resistivitetsverdi. Tykkelsen til det øverste laget av blokker er 0,5 ganger elektrodeavstanden, og i de påfølgende lagene økes tykkelsen vanligvis med 10 %. Dette betyr at oppløsningen til profilet er bedre jo kortere elektrodeavstanden er, og i den øverste delen av profilet. Under inverteringen blir modellen justert i flere trinn (iterasjoner) inntil responsen fra den teoretiske modellen blir mest mulig lik de målte data (fig. 7). Formålet med inverteringen er altså å finne en sann resistiviteitsmodell som tilfredsstillende de målte data. Under prosessering av data legger man inn topografien langs profillinja, og det er viktig at denne er detaljert siden det påvirker inverteringen. Man kan under prosesseringen også velge å sette på et filter som fremhever horisontale strukturer – f.eks. et vertikalt-horisontalt filterforhold på 0,5. Det finnes også mulighet for å bruke ulike typer inversjoner som vil gi ulik informasjon avhengig av formålet (f.eks. ”Smooth” og ”Robust”, se vedlegg B og kap. 9.1.5). For tolkning av den fysiske modellen, se kap. 6.



Figur 7: Eksempel på invertering av et profil (Wenner) i ulike trinn ved bruk av programmet Res2DInv (se vedlegg B). Øverst vises en pseudoseksjon med målt tilsynelatende resistivitet. I midten vises pseudoseksjonen konstruert fra den inverterte modellen (vist nederst). Ved en god inversjon vil de to pseudoseksjonene være nokså like, og den inverterte modellen ansees som vellykket.

3.4 Klassifisering av data

Klassifisering av materiale ut fra resistivitetsverdier er basert på tidligere studier og erfaringsverdier i Norge, Sverige og Canada (f.eks. Berger 1980, 1983; Calvert og Hyde 2002; Rankka et al. 2004; Solberg et al. 2008b; Donohue et al. 2009; Lundström et al. 2009; Rømoen et al. 2010; Solberg et al. (in press)). Klassifiseringen i løsmasser er bl.a. gjort ut fra sammenligning av resistivitetsverdier og geotekniske data (laboratorietestede prøver og sonderinger).

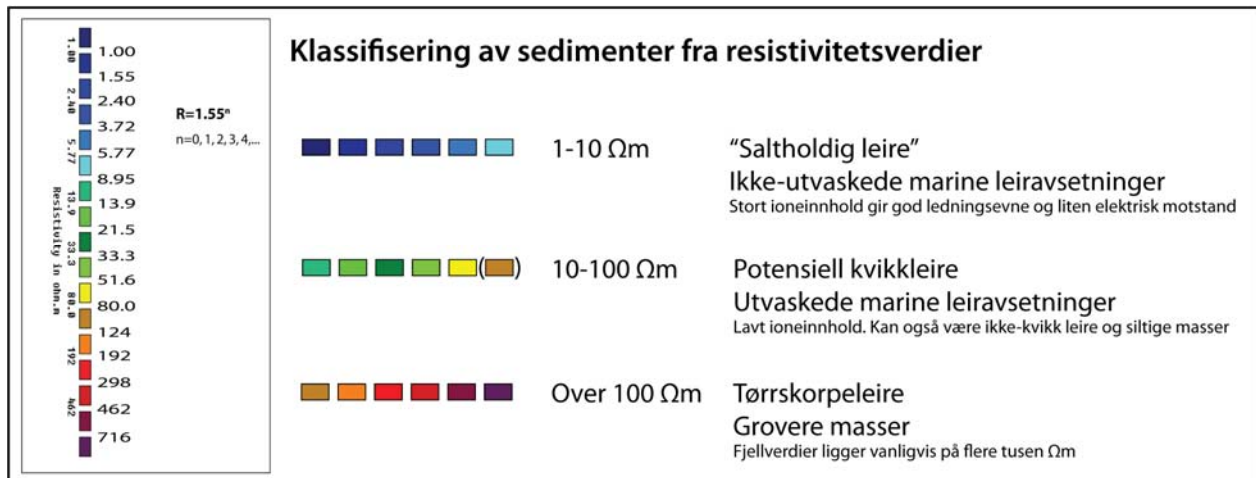
2D resistivetsprofiler viser data fra et volum langs profillinja, og data påvirkes fra et ganske stort område. Verdiene som kommer fram på profilet er derfor gjennomsnittlige, men mest preget av de deler av undergrunnen som har minst elektrisk motstand. Det vil alltid være en gradvis overgang mellom lave og høye verdier på et profil, d.v.s. at dersom saltholdig leire med lav

resistivitet ligger direkte over fjell med høy resistivitet, vil det komme ut som en gradvis overgang, ikke som en skarp kontrast. Man kan derfor ikke estimere nøyaktig dyp til lag kun ut fra resistivetsprofiler, spesielt for dyptliggende lag.

Når man har målt et profil, og foreløpig har lite andre data fra området, kan man bruke klassifiseringen i tabell 5 og figur 8 som utgangspunkt for tolkningen. Det er viktig å være klar over at det er gradvise overganger mellom klassene, slik det gjerne også er i sedimentene selv. Det kan også være lokale variasjoner avhengig av f.eks. porevannskjemi, metningsgrad og mineralsammensetning. Etter supplerende undersøkelser vil klassifiseringsgrensene for den aktuelle lokaliteten kunne bli justert. Den foreløpige klassifiseringen vist i tabell 5 kan derfor bli noe endret etter hvert som man får flere erfaringsverdier fra 2D resistivitetsmålinger i løsmasser. Se vedlegg C for en oversikt over klassifisering av leiregenskaper fra resistivitetsverdier fra ulike studier i Norge, Sverige og Canada.

Tabell 5: Utgangspunkt for løsmasseklassifisering fra resistivitetsverdier. Merk at det er gradvise overganger mellom klassene, og at det kan være lokale variasjoner avhengig av f.eks. porevannskjemi, metningsgrad og mineralsammensetning. Se også fig. 8 (modifisert fra Solberg et al. 2008b).

Resistivitet (Ωm)	Hoved-karakterisering	Kommentar	Fargekode for NGUs kvikkleire-prosjekter
1-10	Ikke-utvaskede marine leiravsetninger	Leira har vært lite utsatt for utvasking etter avsetning. Porevannet inneholder fremdeles mye ioner som stabiliserer strukturen og gir god ledningsevne og dermed lav resistivitet. Godt ledende mineraler som sulfider og grafitt, og andre sedimenter mettet med ionerikt vann, kan også gi lave resistivitetsverdier.	blåtoner
10-100	Utvaskede leiravsetninger	Utvasking av leire fører til færre ioner i porevannet og ved et saltinnhold på mindre enn ca. 5 g/l kan kvikkleire dannes. Resistiviteten er fremdeles lav, men mindre enn for ikke-utvasket leire. Utvasket, men ikke-kvikk leire, leirig morene og siltige sedimenter kan også ligge i dette intervallet.	grønn-gul
Over 100	Tørskorpeleire, grovere masser eller berggrunn	Tørskorpeleire, leirskredmasser, grov morene, sand og grus vil generelt ha høyere resistivitetsverdier. Vanninnhold i sedimentene vil ha betydning for resistiviteten. Berggrunnen har som regel resistivitetsverdier på flere tusen ohmm.	(gul)-orange-rød-(lilla)



Figur 8: Fargeskala som brukes i NGU-prosjekter knyttet til kartlegging av potensiell kvikkleire. Blå farge for saltholdig marin leire er valgt p.g.a. assosiasjonen til den blå fargen for marine avsetninger på kvartærgeologiske kart.

3.5 Feilkilder

Resistivitetmetoden er følsom for små variasjoner i ledningsevnen til materialet nær overflata, og lokale variasjoner i f.eks. vanninnhold kan påvirke målingene. De beste måleforholdene er naturlig grunn, homogen leire, fuktige forhold og tynn tørrskorpe. Områder med høy elektrisk motstand (tørr sand, steinrike områder, grusfyllinger, veidekker o.l.) kan gi høy overgangsmotstand og vanskelige måleforhold.

Ved måling langs sjøen (saltvann) eller ved nærliggende metalliske objekter/tekniske installasjoner som rør, peler, spunt, uisolerte kabler, gjerder, autovern eller jernbaneskiner vil strømbanene påvirkes og en kan få direkte feilmålinger (nivåfeil). Også godt ledende geologisk materiale som f.eks. grafitt kan gi misvisende resultater hvis man ikke har kunnskap om tilstedeværelsen av dette. Saltholdig leire i toppen av profilet vil også delvis kunne "skjule" underliggende lag. Grove, umettede sedimenter over leire, tykk tørrskorpe og lavt grunnvannspeil vil kunne redusere kvaliteten på målingene. Det må også nevnes at uriktige måleprosedyrer som feilkoblinger vil være en feilkilde (Telford et al. 1990; Loke 2007; Lundström et al. 2009).

Resultatet er også avhengig av valg av elektrodekonfigurasjon, og orienteringen til måleutlegget i forhold til geologien/lagdelingen. Geometrien til materiale med ulik elektrisk motstand kan ha stor betydning (Reynolds 1997). Strømmen vil foretrekke å gå gjennom godt

ledende materiale i undergrunnen, spesielt hvis måleretningen er parallell med dette. Dette vil påvirke resistivitetsmålingene, og vil kunne gi feil bilde av grunnforholdene. 3D-effekter vil kunne oppstå hvis godt ledende materiale ligger til siden for profilet, da strømmen vil kunne ta en omvei gjennom dette i stedet for gjennom massene under profilet. Som nevnt under kap. 3.4 vil det alltid være en gradvis overgang mellom lave og høye verdier på et profil, og dyp til lag må derfor tolkes forsiktig.

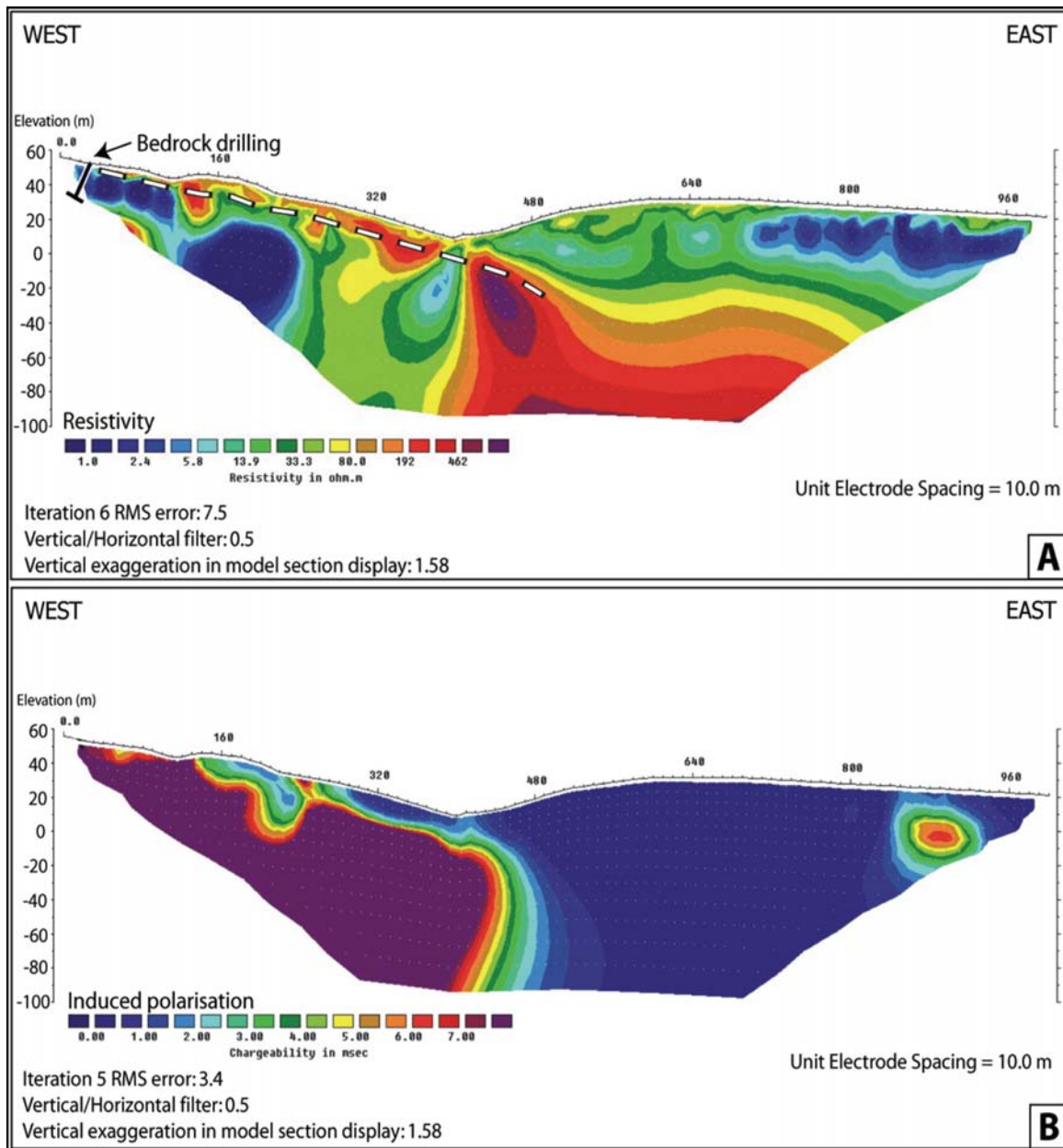
Ujevnt terreng og tett vegetasjon kan også påvirke resistivitetsmålingene (gi nivåfeil) ved at elektrodeavstanden kan bli feil. Strømmen mellom elektroder konsentreres i forsenkninger og spres under en høyde. Som et resultat kan ekvipotensiale overflater bli forvrengt og lage falske anomalier kun på grunn av topografien. Denne effekten kan forvrengte eller maskere en ekte anomali. Terrengeffekten øker med topografivariasjonen, men er ubetydelig for skråninger slakere enn 10° (Telford et al. 1990). Ved inversjon av data tas det hensyn til terrengvariasjoner, og effekten minimaliseres.

Av andre feilkilder er telluriske strømmer men vanligvis gir ikke dette noen feil da målingene skjer med alternerende polaritet. Knekk på målelinja (i horisontalplanet) vil gi nivåfeil, så denne må ikke overstige 20° (p.g.a. feil i strømrretning og elektrodeavstand). Også sterke elektriske felt fra kraftlinjer kan påvirke elektronikken slik at målingene blir feil.

3.6 Indusert polarisasjon

Indusert polarisasjon (IP) er en variant av elektriske målinger som opprinnelig ble utviklet for malmleting. IP-effekten måles ”samtidig” med resistivitet ved at en registrerer restspenningen i bakken etter at strømpulsen er slått av. Dersom det er elektrisk ledende mineraler i berggrunnen (sulfider, oksider eller grafitt), kan en få IP-effekt (Reynolds 1997). Også leirmineraler kan gi samme effekt (Reynolds 1997; Dahlin et al. 2001). IP-effekten blir ofte angitt med enhet ms (integreert spenning over tid/spenning i bakken ved strøm). Selv om leirmineraler kan gi IP-effekt, er det foreløpig uklart om metoden kan benyttes for karakterisering av leire. IP-målingene har vanligvis en signalstyrke på noen få prosent av hva en måler med ved resistivitetsmetoden. I godt ledende marine leirer, ofte i områder med tekniske installasjoner, kan signal/støy-forholdet være lavt, og IP-metoden gir ikke pålitelige resultater. Metoden kan imidlertid benyttes til kvalitetssikring slik eksemplet i figur 9 viser. Ved denne undersøkelsen fremstod et område med

resistivitet tilsvarende det en finner i saltholdig marin leire, hvor sonderingsdata viste grunntliggende fjell og hvor det var en fjellblotning i nærheten. IP-data viste her høye verdier som indikerer elektrisk ledende mineraler. Dette ble bekreftet ved kjerneboring som viste grafittlag i fyllitt (Dalsegg et al. 2006; Solberg et al. 2008b).



Figur 9: Eksempel på resistivitet (Wenner) (A) og industert polarisasjon (IP) (B) langs samme profilinje. Stiplet linje i A indikerer fjelloverflate fra andre undersøkelser, mens resistiviteten her viser godt ledende materiale. IP-målingene viser god oppladbarhet til venstre i profilet, og berggrunnsprøver viste at det var en rekke grafittlag i fyllitten. Grafitt leder strøm godt og har god oppladbarhetsevne (Solberg et al. 2008b).

3.7 1D resistivitetsmålinger i sonderingshull (RCPTU)

Resistivitet kan også måles endimensjonalt ved for eksempel å koble en spesialsonde til konvensjonelt CPT-utstyr (vedlegg A). Det er gjort forsøk med dette både i Norge, Sverige og Canada (f.eks. Calvert & Hyde 2002; Daniel et al. 2003; Schälin & Tornborg 2009; Rømoen et al. 2010; Aasland 2010).

Resistivitetssonden som brukes ved NTNU er fra Geotech (Geotech 2010), og er satt opp med en Wenner elektrodekonfigurasjon (fig. 10). Datapunkt med tilsynelatende resistivitet blir logget for hver 2. cm (hvert 2. sekund) i sonderingen (Aasland 2010). Sonden er 44 mm i diameter, og skyves ned i bakken som en del av CPT-sonden. Elektrodeavstanden er 3,5 cm, influensområdet til sonden er derfor lite og den måler i relativt homogent materiale for hver avlesning. Den tilsynelatende resistiviteten blir dermed tilnærmet lik spesifikk resistivitet, og man behøver ikke å inverttere måledata.

Siden detaljeringsgraden mellom 1D- og 2D-målinger er såpass forskjellig, kan klassifiseringen av resultatene variere noe – men samme klassifisering kan brukes som utgangspunkt for tolkningene (tabell 5). Sonden vil kunne påvirke leira ved at den blir omrørt ved nedpressingen. I tillegg er det mulighet for at materiale kan klebe seg fast til sonden og trekkes med til underliggende lag. Begge deler kan være mulige feilkilder i resultatene ved bruk av RCPTU (Aasland 2010).



Figur 10: RCPT-sonde.
Fra venstre: CPT-spiss, resistivitetssonde (4 elektroder: 3,5 cm elektrodeavstand), batteripakke (Aasland 2010).

Del II

4. Innledende oppgaver i prosjekter hvor resistivitetsmetoden benyttes

Innhenting av eksisterende data og feltbefaring er typiske innledende oppgaver knyttet til kartlegging av kvikkleireforekomster. Mer detaljert kartlegging og analyse av terreng, sedimenter og geologisk utvikling til lokaliteten kan være fordelaktig i noen sammenhenger, men graden av dette avhenger av prosjektets budsjett, tidsplan og hensikt. Vedlegg D gir en kort oversikt over typiske geologiske forhold i leirområder.

4.1 Innhenting av eksisterende data fra området

Uavhengig av hvilke metoder man ønsker å bruke ved kartlegging av kvikkleire i et område er det av vesentlig betydning å innhente alle tilgjengelige data fra tidligere undersøkelser. På den måten får man et godt grunnlag for å planlegge undersøkelser, og omfanget av nye undersøkelser kan bli mindre. En slik gjennomgang vil også gi en bedre oversikt over området og gi en mer helhetlig tilnærming til oppgaven. Typer informasjon som kan innhentes:

- *Kartmateriale*
 - Topografiske kart av ulik målestokk (www.statkart.no).
 - Geologiske kart – løsmasser og berggrunn. Finnes i ulike målestokker og detaljeringsgrader (www.ngu.no/no/hm/kart-og-data/kart/).
 - Andre temakart – f.eks. tekniske installasjoner over og under bakken, vegetasjonstyper, drenering, erosjon. Disse kartene er ikke nødvendigvis vesentlige for prosjektet, men kan gi viktig tilleggsinformasjon.
 - Batymetriske kart – ved prosjekter langs sjø/innsjø vil det være nyttig å ha gode batymetriske data (sjøbunnstopografi).
- *Flybilder*
 - Vertikalfoto studert med stereoskop gir en god oversikt over terrengformer og dermed et første bilde av de geologiske forhold. Gamle flyfoto er ofte de beste – før bakkeplanering og andre terrenginngrep, og bebyggelse. Nye flyfoto er gjerne digitale, og drapert på terrengmodeller (DEM) gis det mulighet for 3D-visning

(www.norgebilder.no, www.norgei3d.no). IR-flybilder er infrarøde bilder som kan gi tilleggsinformasjon om jord/vegetasjonstype.

- *Terrengmodeller fra laserscanningsdata*

Her kan vegetasjon "skrelles bort" ved å fokusere på bakkepunkter slik at terrengformene kommer tydeligere fram.

- *Litteratur om området*

Diverse historiske dokumenter, rapporter, geologisk litteratur (inkludert beskrivelser til kart der disse foreligger). Dette kan gi informasjon om tidligere geologiske hendelser som kan være av betydning for forståelse av området og dets utvikling.

- *Geotekniske rapporter*

Geotekniske datarapporter inneholder data fra ulike typer sonderboringer og, hvis gjennomført, prøvetaking med påfølgende laboratorietester. I tillegg kan det foreligge vurderingsrapporter med beregning av stabilitet til utvalgte profiler som ansees som kritiske, og med beregninger av sikkerhet mot skred for situasjonen før og etter tiltak/bygging.

- *Geofysiske rapporter*

Ulike geofysiske undersøkelser kan ha vært utført tidligere (oversikt over NGU sine undersøkelser finnes her: <http://aps.ngu.no/kart/geophysicsngu/>). Eksempler på slike typer data:

- Seismiske profiler kan antyde ulike typer løsmasser, grunnvannsnivå i friksjonsmasser og dyp til fjell.
- Georadarprofiler kan også antyde ulike typer løsmasser, grunnvannsnivå i friksjonsmasser og dyp til fjell, og har bedre oppløsning/viser strukturer bedre enn seismiske profiler. Dybderekkevidden avtar med økende elektrisk ledningsevne i bakken, og signalene dempes derfor kraftig i leirmasser.
- Tyngdemålinger (gravimetri) kan benyttes til å bestemme dyp til fjell.
- "Ohm-mapper" (resistivitetsmålinger) og elektromagnetiske måledata (samlet inn med f.eks. EM-31) kan gi verdifull informasjon om resistivitetsforholdene i de øverste jordlagene i et område.

4.2 Befaring i området

I forkant av studie av tidligere innsamlede data, eller helst etter, er det viktig å befare området som skal undersøkes. Formålet med dette er å få et tidlig, godt bilde av forholdene, og for enklere å vurdere hvor resistivetsprofilene bør plasseres og hvilken oppløsning de bør ha. Befaring vil også være nyttig for vurdering av tilleggsundersøkelser og for den senere tolkningen av resultatene. Befaringen vil kunne bli styrt av detaljgraden av den tilgjengelige informasjonen, f.eks. kvartærgeologiske kart (løsmassekart). Et detaljert kvartærgeologisk kart kan si noe om hvor kompleks lagdeling man kan forvente, i tillegg til eventuelle geologiske inhomogeniteter. Dette vil kunne ha betydning for hvor tette profiler/god oppløsning man trenger. Ved befaringen kan man merke seg følgende faktorer som kan ha innflytelse på bl.a. valg av profilplassering:

- Lokalisering av kritiske skråninger

Generelt bør man være oppmerksom på høye og bratte skråninger. I retningslinjene knyttet til kartlegging av skredfarlige områder, er følgende topografiske kriterier lagt til grunn (Gregersen 2008):

- "Jevnt hellende terreng" brattere enn 1:15 vurderes
- "Ravineterreng" med høydeforskjeller på 10 m eller mer vurderes
- Skred vil maksimalt få en lengde tilsvarende $15 \times H^2$

Høyeste og/eller bratteste skråninger kan brukes som utgangspunkt for profilplassering, selv om det vil kunne gå skred ved mindre kritiske topografiske forhold. Se også NVEs veileder "Planlegging og utbygging i fareområder langs vassdrag" (NVE 2009).

- Aktiv erosjon

Elver og bekker eroderer i hovedsak i yttersvingen, og erosjon vises i form av utglidde sedimenter og/eller vegetasjon (fig. 11). Sår i skråningen kan være av ulik størrelse, fra kun små undergravinger eller overflateutglidninger, til grunne utglidinger. Aktiv erosjon kan også vises i bekken ved sedimenter i suspensjon. Sig i en skråning indikeres ved at trestammer er bøyd i nedre del. Man bør være ekstra observant i forhold til aktiv erosjon dersom det er bratte skråninger og/eller påvist kvikkleire i området, da grunne utglidninger kan fungere som initialskred for kvikkleireskred. Erosjon kan også foregå på elvebunnen.

² H = skråningshøyde

Dette sees ikke nødvendigvis fra land, bortsett fra hvis det vises at det lokalt produseres sedimenter som transporteres videre i suspensjon. I noen tilfeller kan også grunnvannsutslag erodere i en skråning over elve-/bekkenivå (indre erosjon). Skråninger med aktiv erosjon er i forandring mht stabilitet, og i slike skråninger kan det derfor være relevant med geotekniske undersøkelser, inklusive 2D resistivitetmålinger. Ved problemstillinger i strandsonen (sjø/innsjø) vil det være viktig å avdekke erosjon som pågår også der (f.eks. bølgeerosjon).



Figur 11: Eksempler på skråningserosjon: (A) Overflateutglidninger/grunne utglidninger langs ei lita elv, (B) overflateutglidninger i ei ravine, (C) Grunne, til dels dype, utglidninger i yttersvingen av ei stor elv (Foto: IL Solberg).

- Tidligere skredhendelser

Det er viktig å være oppmerksom på eventuelle tidligere skredhendelser i området, siden dette vil si noe generelt om stabiliteten. Noen hendelser kan være referert til i litteraturen, og noen vil lokalbefolkningen ha kjennskap til. Likevel er det ofte spor etter en rekke hendelser av ukjent alder. Disse vises som gropformer i terrenget og/eller som skredmasser som har fylt ut et område. Det sistnevnte kan i noen tilfeller sees ved forlatte bekke-/elveløp. Gamle flybilder vil kunne være til god hjelp for å se spor etter skred tydeligere, før bakkeplanering og utstrakt bygging tok til. Skredmasser av omrørt kvikkleire vil være faste og stabile masser, og vil være av betydning for tolkningen. Resistivitetsprofiler kan krysse skredgropper for å vurdere de gjenstående massene, eller mellom skredgropper for å vurdere forholdene der.

- Raviner

Raviner kan være dype eller grunne, velutviklede eller nye, stabile eller med aktiv erosjon. Noen raviner har jevn vannføring, mens andre har kun vannføring i nedbørsperioder eller under snøsmeltningen. I jordbruksområder vil en del raviner kunne være helt eller delvis planert ut. Gamle flybilder vil kunne være til hjelp for å identifisere spor etter tidligere erosjon i området. I forhold til stabilitet vil skred kunne gå inn mot en ravine eller mellom to raviner. Det er sjelden en skredhendelse fjerner en hel ravine – men dette avhenger av skredets/ravinens størrelse. Lange resistivetsprofiler kan gjerne krysse en eller flere raviner, slik at man får en indikasjon på grunnforholdene på begge sider av ravinen. Alternativt kan profilet legges parallelt med og mellom to parallelle raviner.

- Annet

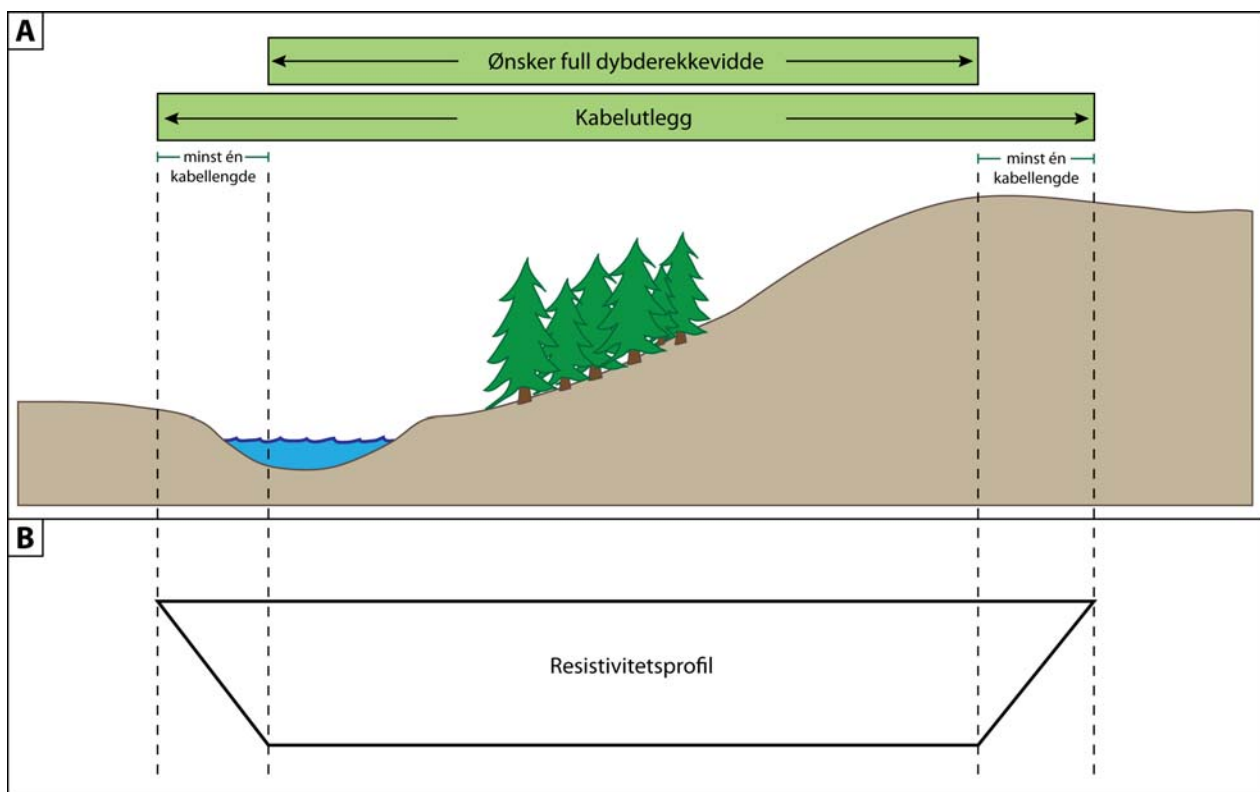
Andre observasjoner under befarings som kan være nyttige for profilplassering og senere tolkning av profilene kan være: sedimenttyper og deres utbredelse (detaljer som evt. ikke er registrert på kvartærgeologisk kart), fjellblotninger, type bergarter og deres beskaffenhet (oppsprekking, forvitring o.l.). I tillegg vil det kunne være nyttig å merke seg spor etter menneskelig aktivitet som f.eks. erosjonssikring langs elver, fyllinger, spuntvegger og andre tekniske installasjoner (der dette er synlig).

5. Planlegging og måling av resistivetsprofiler

Formålet med grunnundersøkelsene vil være styrende for lengde, elektrodekonfigurasjon, elektrodeavstand og plassering av resistivetsprofilene – og vil derfor bestemmes ut fra hvert enkelt prosjekt. Antall profiler vil være avhengig av prosjektets omfang, størrelse på lokaliteten, i tillegg til tidsmessige og økonomiske aspekter.

5.1 Valg av elektrodeavstand

Mulige elektrodeavstander vil være 10 m i lange oversiktsprofiler med god dybderekkevidde, og 2 m eller 5 m for mer detaljerte profiler (se også tabell 4). Andre avstander kan benyttes, men det vil som regel være mer arbeidskrevende. Profillengde avhenger blant annet av prosjektets omfang (tid/kostnad og områdets størrelse).



Figur 12: Prinsippkisse for utlegg av kabel ved resistivitetsmålinger. Hvis man vil ha full dybderekkevidde og maksimal kvalitet over et konkret område, må man måle minst én kabellengde ekstra før og etter den konkrete lengden man vil ha informasjon om. Resistivetsprofilen i (B) er formen på rådataprofilen før topografi er lagt inn.

For full dybderekkevidde og maksimal kvalitet over et avgrenset område, må man måle minst én kabellengde ekstra foran og etter den konkrete lengden man vil ha informasjon om (fig. 12). Nødvendigheten av en ekstra kabellengde er stort sett uavhengig av hvilken konfigurasjon man bruker og helt uavhengig av elektrodeavstand. Ved 5 m elektrodeavstand må man måle 400 m (4x100 m kabler), ved 10 m elektrodeavstand må man måle minst 800 m (4x200 m) for å få full dybderekkevidde (henholdsvis 60 m og 120 m).

5.2 Valg av profillengde og -plassering

Profillengde og -plassering av resistivitetsprofiler vil kunne påvirkes av områdets fysiske egnethet for målinger:

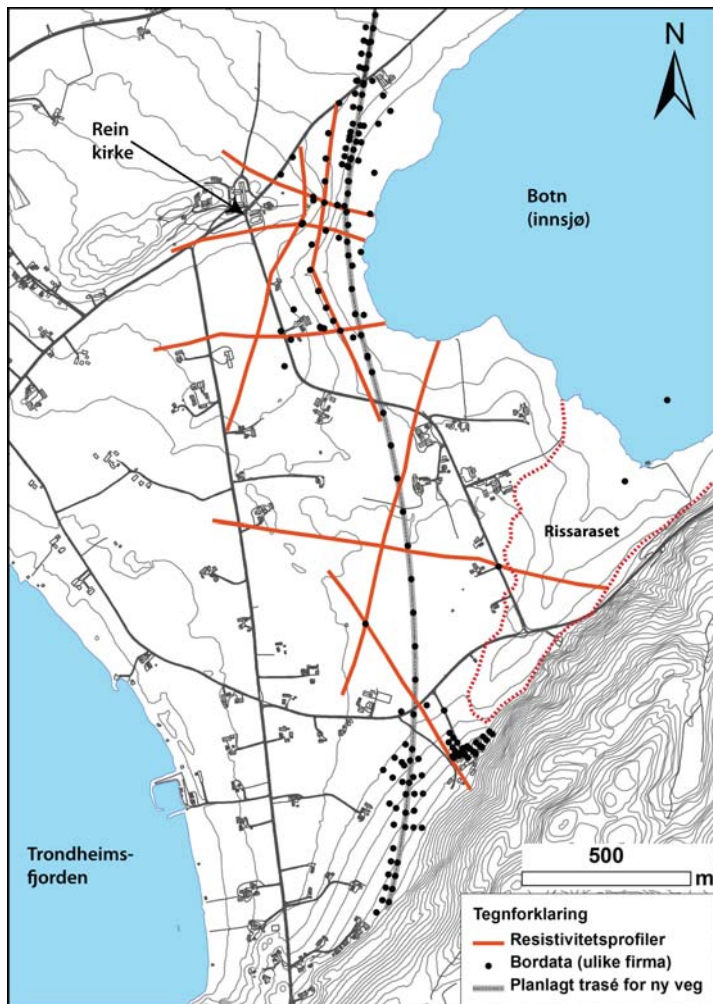
- Store asfalterte områder kan være vanskelig å krysse på grunn av dårlig kontakt mellom elektroder og overflate. Hvis vei skal krysses må kablen beskyttes. Vanlig trafikk vil kunne krysse en beskyttet kabel, men den vil ikke tåle anleggsmaskiner av noe slag (f.eks. maskiner som utfører vegskraping/børsting/brøyting).
- Jernbane vil ikke kunne krysses. I tillegg vil skinnene kunne påvirke måleresultatene hvis det måles for nært/parallelt med disse. Hvis man er "tvunget" til å måle parallelt/delvis parallelt en jernbane, bør man legge kablen minst 100 m unna ved elektrodeavstand 10 m, og minst 50 m unna ved elektrodeavstand 5 m.
- Tett bebygde områder vil kunne inneholde nedgravde gjenstander/rør av metall som vil kunne påvirke målingene. Generelt bør man legge kablen mest mulig vinkelrett på elektrisk ledende objekter (f.eks. spuntvegger, metallrør, autovern, metalliske nettinggjerder) for å unngå at strømmen hovedsakelig går gjennom disse. Isolerte kabler vil ikke påvirke målingene.
- Sterke elektriske felt fra kraftlinjer kan påvirke elektronikken slik at målingene blir feil. Profilene bør legges minst 50 meter fra kraftige høyspenningslinjer (400 kV).
- Måling i sjøkanten må tilpasses tidevannssyklusen, siden kabelskjøtene/elektrodene ikke skal oversvømmes av saltvann. Ved måling langs sjøen bør man være oppmerksom på at spesielt de dypeste delene av profilet vil være påvirket av det godt ledende saltvannet.

- Årstidsvariasjoner – utlegget av kabler og elektroder vil kunne forsinkes ved tykt snødekke og frossen jord. Det vil ikke være mulig å måle ved tykt telelag (tykkere enn ca. 5 cm, fordi det vil være vanskelig å få ned elektrodene).
- Svært bratte skråninger og/eller tett vegeterte områder vil kunne forsinke utleggingen av kabler/elektroder.
- I jordbruksområder må innmålingene tilpasses årstidsbestemte aktiviteter: før pløying/såing og våren, etter innhøsting om sommeren/høsten.
- Elver/bekker kan godt krysses, men kabelskjøtene skal ikke ligge i vann.
- Knekk på målelinja (i horisontalplanet) vil gi nivåfeil, så denne må ikke overstige 20°.

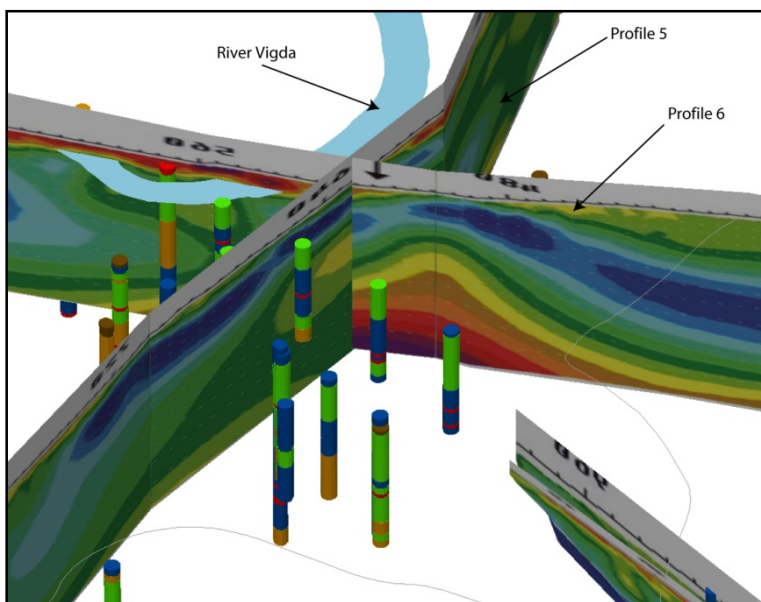
I noen tilfeller vil det finnes grunnundersøkelser fra før i det området man skal undersøke. Da kan det være nyttig å plassere noen av resistivetsprofilene på en slik måte at de enkelt kan sammenlignes med de eksisterende dataene. Utover dette bør plasseringen være hensiktsmessig med tanke på hva som skal gjøres i området, hvilke andre undersøkelser som skal utføres, og for å få mest mulig ut av dataene samlet. Figur 13 viser et eksempel på plassering av profillinjer. Her er profilene lagt slik at tidligere geotekniske undersøkelser i området kan utnyttes for sammenligning, og i forhold til kritiske skråninger knyttet til planlegging av ny veg gjennom området.

En spesielt god oversikt over et område vil man kunne få ved å måle resistivetsprofilene i et rutenett. Dette vil åpne mulighetene for 3D eller kvasi-3D-tolkning av grunnforholdene. Tolkningen av sammensatte profiler gjøres i så fall enklest i 3D programvare, hvor man også kan legge inn terreng og andre data som tolkede boredata, m.m. (fig. 14). Det finnes programvare for å tvinge inverteringen sammen av kryssende profiler. Likevel kan det være nyttig å invertere profilene hver for seg før man setter dem sammen, for å unngå å miste informasjon om romlige geologiske variasjoner (Solberg et al. 2008b). Se kap. 9.2 for mer informasjon om kryssende profiler.

Utstyret for og gjennomføring av resistivetsmålinger kan betjenes av én person, men den totale feltarbeidsperioden vil kunne gå noe raskere med to personer. For ytterligere informasjon om tidsbruk og kostnader, se kap. 11.



Figur 13: Eksempel på profillinjer i Rissa, Sør-Trøndelag. Profilene er lagt for å utnytte boringer som er gjort tidligere, og i forhold til kritiske skråninger knyttet til planlegging av ny veg gjennom området.



Figur 14: Kryssende resistivetsprofiler, vist sammen med tolkede geotekniske bordata (søylor), i et 3D-program (ArcScene fra ESRI). I dette tilfellet er det ikke god overensstemmelse mellom de kryssende resistivetsprofilene. Dette skyldes trolig geologiske 3D-variasjoner (se kap. 9.2).

6. Første tolkning av profiler

Etter at data er invertert og en fysisk modell av undergrunnen er laget kan man vise den som et 2D-profil (se kap. 3.3). De ulike resistivitetsverdiene vises i en skala f.eks. med ulike farger, se kap. 3.4. Det vil alltid være glidende overganger mellom verdier for materialer med ulik resistivitet, ikke skarpe skiller eller store hopp i resistivitetsverdi.

Ved bruk av ferdig inverterte/prosesserte resistivitetsdata er det viktig for tolkningen å være oppmerksom på følgende punkter som vil framgå av profilet:

- Hvilken elektrodeavstand er benyttet – sier noe om dybderekkevidde og oppløsning til data
- Hvilken fargeskala som er benyttet (hvilke resistivitetsverdier har hvilken farge – om lave resistivitetsverdier er gitt f.eks. blå eller rød farge)
- Valgte skalaverdier (hvilke typer detaljer kommer fram): for å skille mellom egenskaper til leire brukes gjerne skalaen ca. 1-700 Ωm ("kort skala": alt over 700 Ωm får samme farge), mens for å finne svakhetssoner i fjell kan f.eks. skalaen 1-50 000 Ωm ("lang skala") benyttes)
- Filter – hvis det er benyttet vertikalt/horisontalt filter på 0,5, er horisontal lagdeling favorisert og kommer tydeligere fram
- Root-mean-square (rms) error, kvadratisk middelfeil (effektverdi), sier noe om hvor god inversjonen av måledata er. Det kan være nødvendig med flere iterasjoner, men det vil ikke være hensiktsmessig med flere enn 5-6 iterasjoner.

Når man tolker et 2D resistivetsprofil vil de beste dataene ligge i de øverste og sentrale delene av profilet, hvor det er mest måledata. I ytterkantene og dype delene av profilet er det lite målinger, og disse delene av profilet må derfor tolkes med forbehold.

Et 2D-profil viser et gjennomsnittlig bilde av grunnforholdene i et belte parallelt med utlegget, siden strømmen brer seg i et halvrom i undergrunnen og ikke i et smalt profil. Strømmen tar minste motstands vei, noe som f.eks. kan resultere i at et lag med lav resistivitet ser tykkere ut på profilet enn det i realiteten er. Dyp til laggrenser bør derfor ikke tolkes som absolutte. Hvis tykkelsen av et sedimentlag er mindre enn oppløsningen på resistivetsprofilet, vil ikke dette laget kunne vises. For å oppdage dette vil det være nødvendig med f.eks. trykksondering (CPTU). Den fysiske modellen kan framvises med en fargeskala som fremhever ulike deler av dataene. Ønsker man å jobbe med materialer hvor det er små variasjoner i

resistivitet, kan man vise data i en ”kort” fargeskala. I forbindelse med kvikkleirekartlegging vil det være naturlig å bruke skalaen ca. 1-700 Ωm (fig. 8). Skillet mellom saltholdig leire og mulig kvikkeleire vil da komme tydeligere fram. I så fall vil grove masser og verdier for berggrunnen kunne komme i samme kategori/klasse. I en del tilfeller vil det kunne være nyttig å vise de samme dataene med ulike fargeskalaer – hvis man mistenker at det er store variasjoner (f.eks. både leire og fjell). Det understrekes at man ikke endrer eller bruker andre rådata, det er kun fremvisningsmåten som varierer.

Det er blitt laget en rekke syntetiske modeller for ulike typer geologiske forhold som kan være til hjelp ved tolkning av resistivitetsdata målt i felt (Reiser et al. 2010). Disse gir også innspill til muligheter og begrensninger ved bruk av metoden. Se kap. 12.2.

Til tross for at det er noen begrensninger i detaljeringsgraden av det man kan lese ut av et resistivetsprofil, vil det gi et raskt overblikk over en relativt stor del av undergrunnen – når det gjelder lagdeling, type materialer, materialegenskaper og dreneringsforhold. Dette vil kunne være et meget nyttig utgangspunkt for og supplement til videre undersøkelser. For konkrete eksempler knyttet til tolkning av et resistivetsprofil, se kap. 9.

7. Sammenligning med eksisterende, tidligere innsamlede data

7.1 Geotekniske data

Alle typer geotekniske undersøkelser vil kunne gi viktig informasjon for å styrke tolkningen til resistivetsprofilene. Verken geotekniske sonderingsprofiler eller resistivetsprofiler kan tolkes absolutt, siden man innenfor de ulike metodene kan oppnå samme data/resultat for ulike materialer. Likevel vil en samtolkning av dataene fra disse metodene gi et klart bedre resultat, siden de baserer seg på ulike egenskaper til sedimentene. Alle sonderingsprofiler i nærheten av eller langs resistivetsprofillinjen(e) bør tilpasses vertikal skala på resistivetsprofilet, og legges over for å lette samtolkningen. Her bør en i så fall være oppmerksom på og notere avstand til geoteknisk datapunkt dersom det ikke ligger på den aktuelle profillinja. I noen tilfeller vil det fungere godt å trekke inn boringer som ligger et stykke unna profillinja, men spesielt ved raskt skiftende geologiske forhold bør man være mer forsiktig med dette (Solberg et al. 2011). Uansett

er det viktig med en romlig tilnærming til dataene for å forstå geometrien til avsetningene og hvordan eventuell kvikkleirutvikling har foregått i området.

Boring med prøvetaking og laboratorietesting gir de mest pålitelige jordartsegenskapene, og resultater fra disse bør selvfølgelig også sammenholdes med resistivetsprofilene. Hvis saltinnholdet i porevannet er målt, vil denne informasjonen være av stor betydning for sammenligning med resistivetsverdiene da disse følger hverandre. Informasjon om poretrykksforhold vil gi informasjon om de hydrologiske/hydrogeologiske forholdene i avsetningen. Som eksempel vil artesisk grunnvann kunne ha betydning for kvikkleireutviklingen og for grunnvannserosjon.

7.2 Geofysiske data

Undersøkelser med georadar, gravimetri og/eller refraksjonsseismikk kan gi noe informasjon om sedimenttyper, grunnvannsnivå og dyp til fjell. Siden absolutte dyp og tykkelser til lag kan være noe misvisende på resistivetsprofil, vil tolkningen kunne bli styrket av andre geofysiske undersøkelser. Fjelltopografien under sedimentene og/eller store forekomster av sand/grus gir informasjon om drenerings- og utvaskingsforhold. I tillegg vil de kunne være med å begrense størrelsen og styre utviklingen til et eventuelt kvikkleireskred, så denne informasjonen er viktig.

8. Strategi for innsamling av supplerende grunnundersøkelser

8.1 Geotekniske data

Hvis området som skal undersøkes har få/ingen tidligere grunnundersøkelser, og man har utført resistivetsmålinger, vil disse være et godt grunnlag for planlegging av geotekniske undersøkelser. Resistivetsprofilene vil kunne angi lommer eller lag av mulig kvikkleire-utbredelse. Geotekniske undersøkelser som planlegges ut fra den oversikten man har skaffet seg ved resistivetsmålingene kan nå plasseres gunstig fordi 2D-profilet angir geometriene og dermed et hint om horisontale variasjoner i sedimentene og deres egenskaper. Langs profillinjene er det derfor nå tilgjengelig en interpolasjon mellom mulige borehull/sonderingshull, noe som vil være til nytte for stabilitetsvurderinger. Man kan bruke geotekniske data både som bekreftelse på antatt/mulig kvikkleire og for det man antar er mer stabile områder. Begge deler vil være nyttig

informasjon. Det er *mulig* at mengden av boringer kan reduseres, hvis forholdene viser seg å være relativt homogene. Da kan trolig avstanden mellom boringer forlenges, og boringene benyttes som en verifisering av forhåndstolkningen. Det gjøres imidlertid oppmerksom på at dette er avhengig av type prosjekt og dets vanskelighetsgrad. Det presiseres igjen at laggrensene på resistivetsprofilen er indikative, og at profilen viser et gjennomsnitt av grunnforholdene i et belte langs profilen.

Siden saltinnholdet i porevannet har stor betydning for ledningsevnen til materialet, og derfor også for resistivetsverdien, anbefales det å måle dette på prøver i prosjekter hvor det brukes resistivetsmålinger. Dette vil gi en viktig tilleggsinformasjon for tolkningen.

Hvis CPTU skal benyttes i prosjektet, anbefales det å kombinere denne med en resistivetssonde (RCPTU). På den måten får man detaljerte resistivetsverdier også i enkeltpunkter, som man så kan sammenligne med 2D-verdiene fra samme sted. Dette kan styrke tolkningene, og/eller gi ekstra informasjon om grunnforholdene.

Etter at nye undersøkelser er utført analyserer man alle data og sammenstiller dem for å få en best mulig tolkning av grunnforholdene som grunnlag for stabilitetsvurderinger – avhengig av prosjektets hensikt. Eksempler på tolkning av resistivetsprofiler er gitt i kap. 9.

8.2 Geofysiske data

Resistivetsprofilen vil kunne vise tilstedeværelse av berggrunn, men et refraksjonsseismisk profil vil kunne gi mer eksakt dyp og topografi i tilfeller hvor dette er viktig informasjon. Også ulike typer sedimenter vil kunne fremgå på det seismiske profilen, men jordartsegenskaper vil være vanskeligere å tolke. Dette gjelder også for georadarprofiler. Leire har elektriske egenskaper som georadar vanskelig vil trenge gjennom. Men fra for eksempel sand- og grusavsetninger kan man få gode signaler og informasjon om bl.a. utbredelse og avsetningsretning.

Her kan det også nevnes at ved problemstillinger i strandsonen vil detaljerte batymetriske data fra sjøbunnen, fra for eksempel multistrålekkolodd og/eller interferometrisk sonar, være viktig for å avdekke eventuell erosjon, kanaldannelser og skredhendelser. Dette vil kunne være av betydning for stabiliteten i strandsonen (L'Heureux et al. 2010). I tillegg kan multistråledata/sonardata gi informasjon om sedimenttyper, og marin seismikk kan vise dyp til fjell/fjelltopografi og eventuelle svake lag i sedimentene.

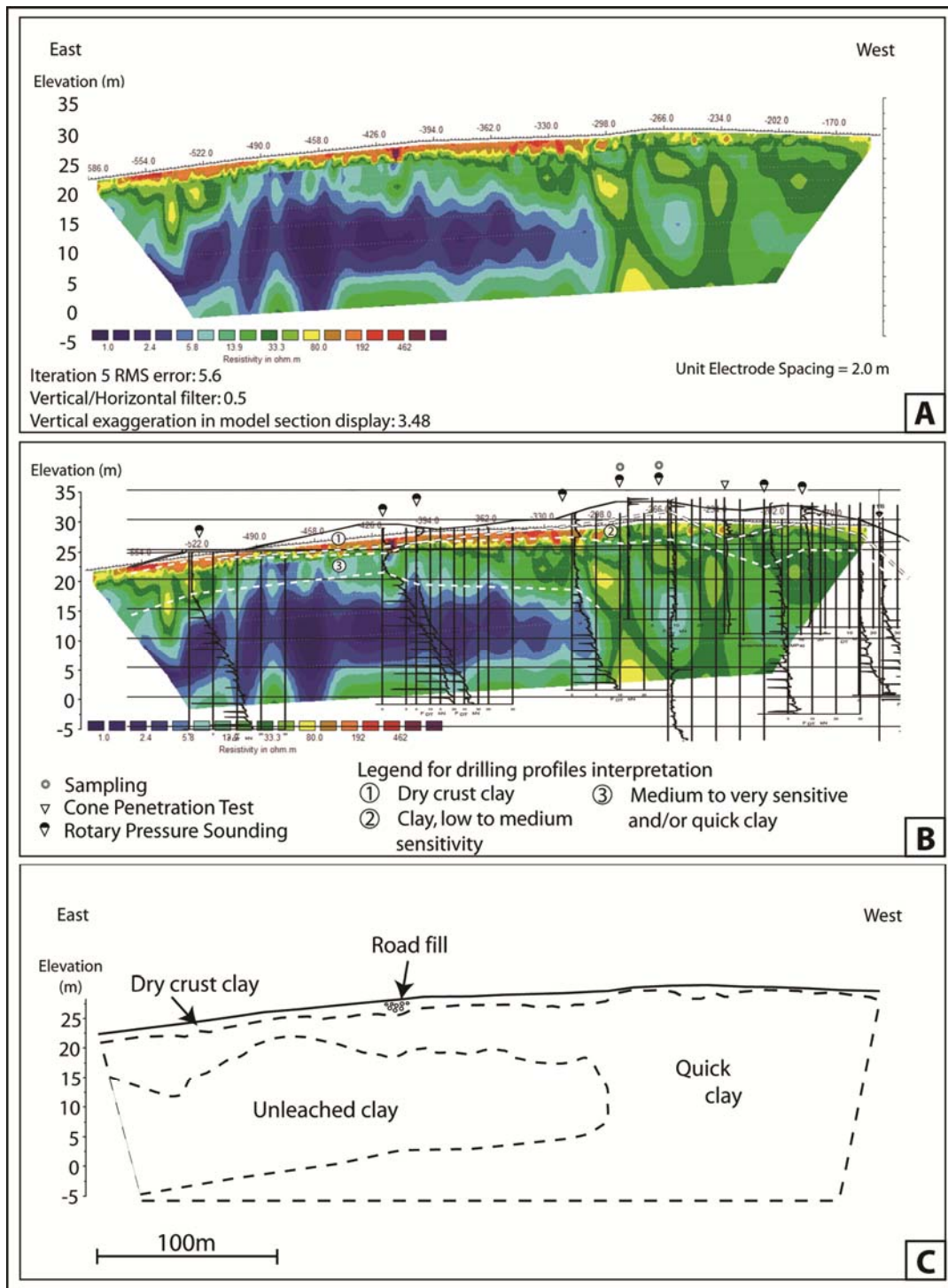
9. Eksempler på tolkning av resistiviteitsprofiler

Som tidligere nevnt vil et 2D resistiviteitsprofil være basert på mest data i øvre og sentrale deler, og tolkningen i ytterkanten og dype deler av profilet må derfor gjøres mer forsiktig. Eksemplene under ekstraherer erfaringer fra prosjekter hvor resistiviteitsmetoden er brukt for å kartlegge potensiell kvikkleire, hovedsakelig norske prosjekter, men også noen fra Sverige/Canada (se kap. 13 for litt mer informasjon om prosjektene). Noen av eksemplene som gis viser sammenligning av 2D-data og geotekniske data. Kapittel 9.1 tar for seg tolkning av geologi og materialegenskaper basert på resistiviteitsverdier, inkludert grunnvannsforhold. Kapittel 9.2 forklarer fordeler med og viser informasjon man kan få fra kryssende 2D-profiler. Tilslutt tar kap. 9.3 for seg litt om tolkning av RCPTU (1D) sammen med 2D-data. Se også kap. 3.4 for bakgrunn for klassifisering av materialer fra resistiviteitsverdier.

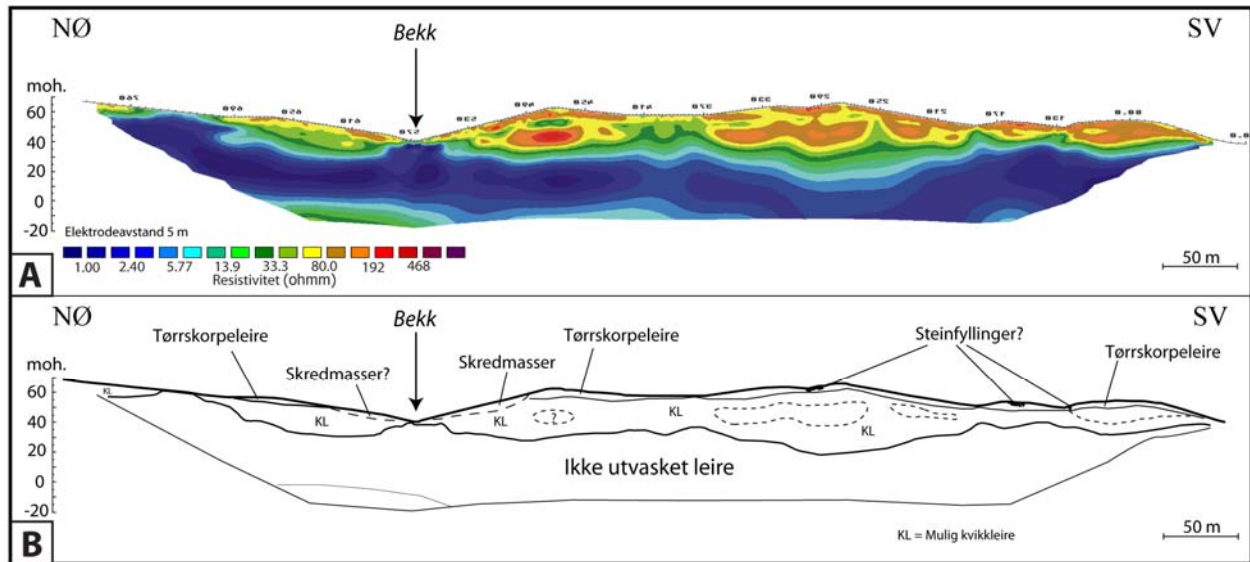
9.1 Geologi og materialegenskaper

9.1.1 Ikke-utvaskede marine leiravsetninger ("Saltholdig leire", ca. 1-10 Ω m)

De laveste resistiviteitsverdiene i sedimenter fås typisk i marin leire som har vært lite utsatt for utvasking etter avsetning. Porevannet inneholder fremdeles mye ioner som stabiliserer strukturen og gir god ledningsevne og dermed lav resistivitet. Også andre sedimenter mettet med ionerikt vann kan gi lave resistiviteitsverdier, f.eks. sjøvann-mettede sandavsetninger. Figurene 15-17 viser eksempler på hvordan saltholdig leire kan vises som blåtoner med lave resistiviteitsverdier. I utgangspunktet er det resistiviteitsverdiene 1-10 Ω m som representerer saltholdig leire, selv om det kan være lokale variasjoner. Sonderingsprofiler i dette materialet viser økende boremotstand mot dypet (sonderingsprofiler til venstre i fig. 15b og sonderingsprofil M21 i fig. 17).



Figur 15: Resistivitetsprofil (Wenner) fra Buvika, Sør-Trøndelag: (A) Ei lomme med lave resistivitetsverdier (blå) ligger i et lag med noe høyere verdier (grønn). På toppen er et lag med relativt høye verdier (orange-rød). **(B)** Geotekniske sonderingsprofiler i nærheten av resistivitetsprofilen viser god overensstemmelse med resistivitetsdata. Saltholdig leire har lave resistivitetsverdier og økende boremotstand, kvikkleire har noe høyere resistivitetsverdier og liten/minkende boremotstand. **(C)** Endelig tolkning av profilen (Solberg et al. 2008b).



Figur 16: (A) Resistiviteitsprofil P3 (Gradient) fra Rødde, Sør-Trøndelag. (B) Tolket resistiviteitsprofil viser et utholdende lag med lave resistiviteitsverdier hovedsakelig under bekknivå tolket som ikke utvasket leire (Solberg et al. (in press)).

9.1.2 Utvaskede marine leiravsetninger (ca. 10-100 Ω m)

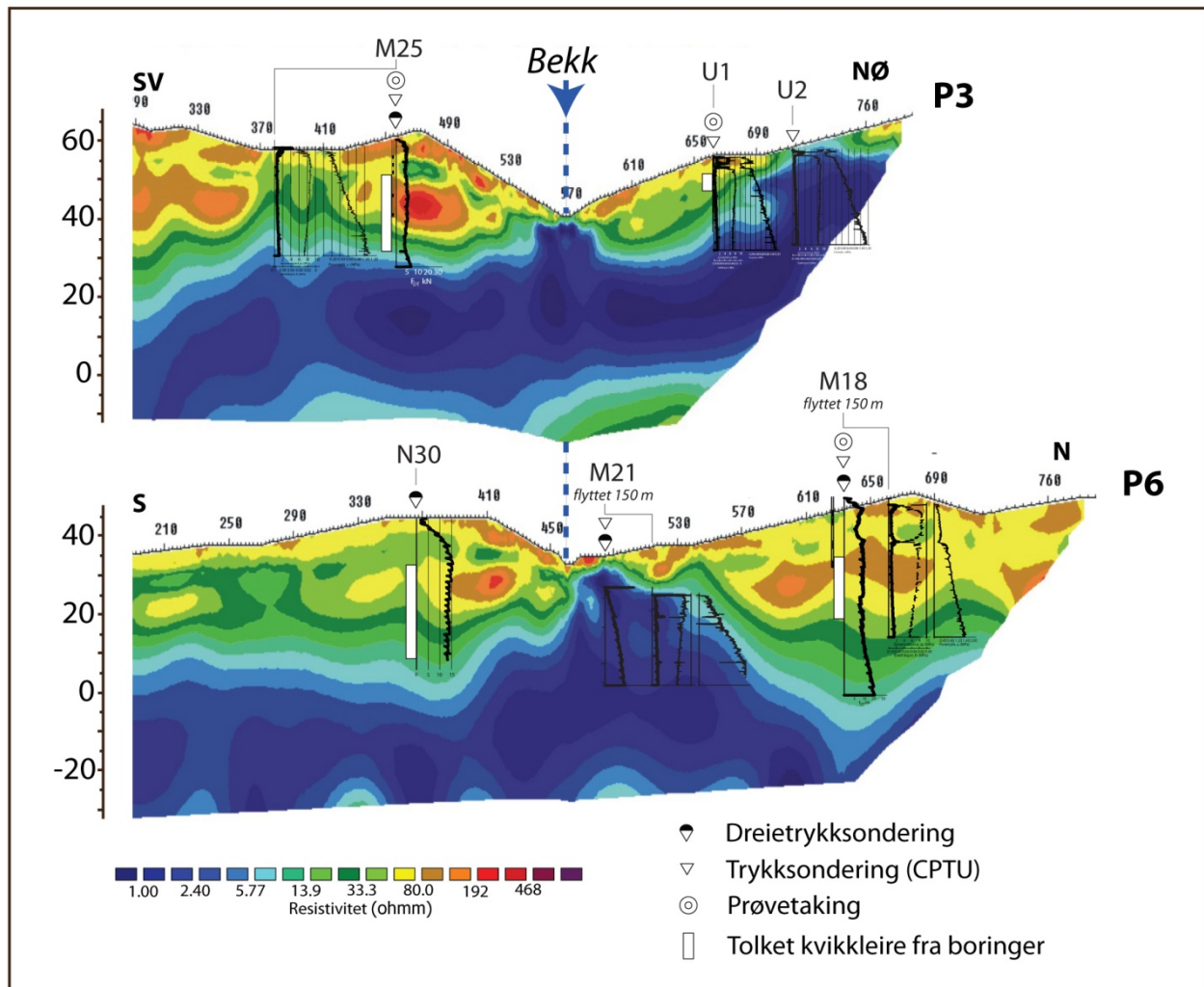
Mulig kvikkleire

Utvasking av leire fører til færre ioner i porevannet og ved et saltinnhold på mindre enn ca. 5 g/l kan kvikkleire dannes. Resistiviteten er fremdeles lav, men høyere enn for ikke-utvasket leire. Siden noen andre typer sedimenter kan ha samme resistiviteitsverdier som kvikkleire, kan ikke metoden *påvise* kvikkleire. Det vil likevel gis indikasjoner på hvor kvikkleire kan finnes, noe som kan benyttes som et nyttig utgangspunkt for videre undersøkelser. Figur 15b viser sonderingsprofiler som ligger på eller i nærheten av profillinja til resistiviteitsmålingene. Disse hjelper tolkningen, og i dette tilfellet representerer trolig det meste av resistiviteitsverdiene mellom 10-100 Ω m kvikkleire.

De to profilene i figur 17 viser kvikkleireutvikling som for det meste foregår i skråningene og øvre del av profilene. Her er det dypt til fjell, slik at eventuell kvikkleireutvikling nedenfra ikke vises tydelig på profilene. Et utholdende lag av saltholdig leire ligger for det meste under bekknivå, og utgjør de dypeste delene av profilene. En gradvis overgang mot høyere verdier er indikert dypest i profilene – dette *kan* være utvasket leire, eller det skyldes den metodiske

gradvise overgangen mot f.eks. fjellverdier med høy resistivitet, som nevnt tidligere. Så dypt på profilet skal man uansett tolke med forsiktighet.

Sonderinger som viser konstant eller synkende boremotstand med dybden tolkes ofte til å være kvikkleire. Påvisning av kvikkleire er likevel mest sikker ved opptak av uforstyrrede prøver som testes i laboratoriet hvor geotekniske materialegenskaper bestemmes (kap. 2.2).



Figur 17: Resistivetsprofil (Gradient) fra Rødde, Sør-Trøndelag, med fokus på kvikkleireutvikling. Her er det dypt til fjell, og kvikkleireutviklingen foregår i hovedsak i skråningene/øvre del av sedimentene, mens de dypere deler er lite utvasket (Solberg et al. (in press)).

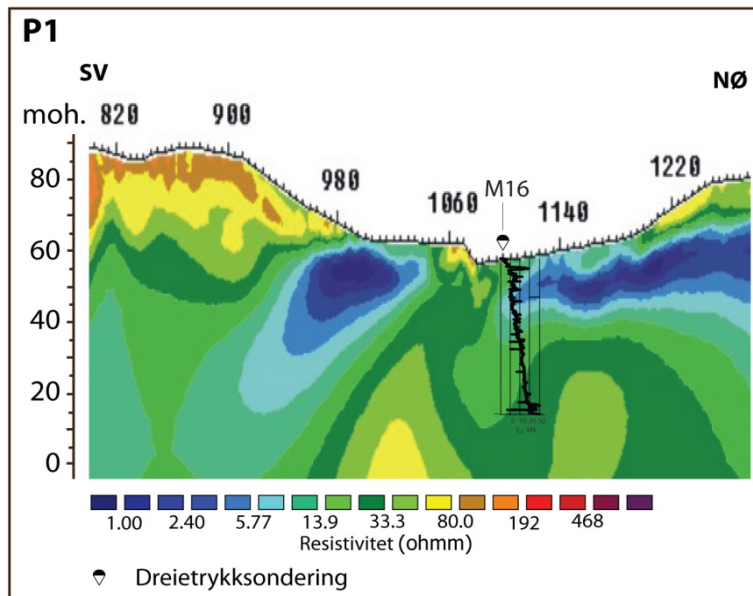
Utvasket leire – ikke kvikk

Det finnes finkornige materialer som har resistivetsverdier innenfor intervallet for mulig kvikkleire (ca. 10-100 Ωm), men som viser seg ikke å være kvikke ut fra sonderinger/prøvetaking. Det finnes ulike tolkninger for dette materialet:

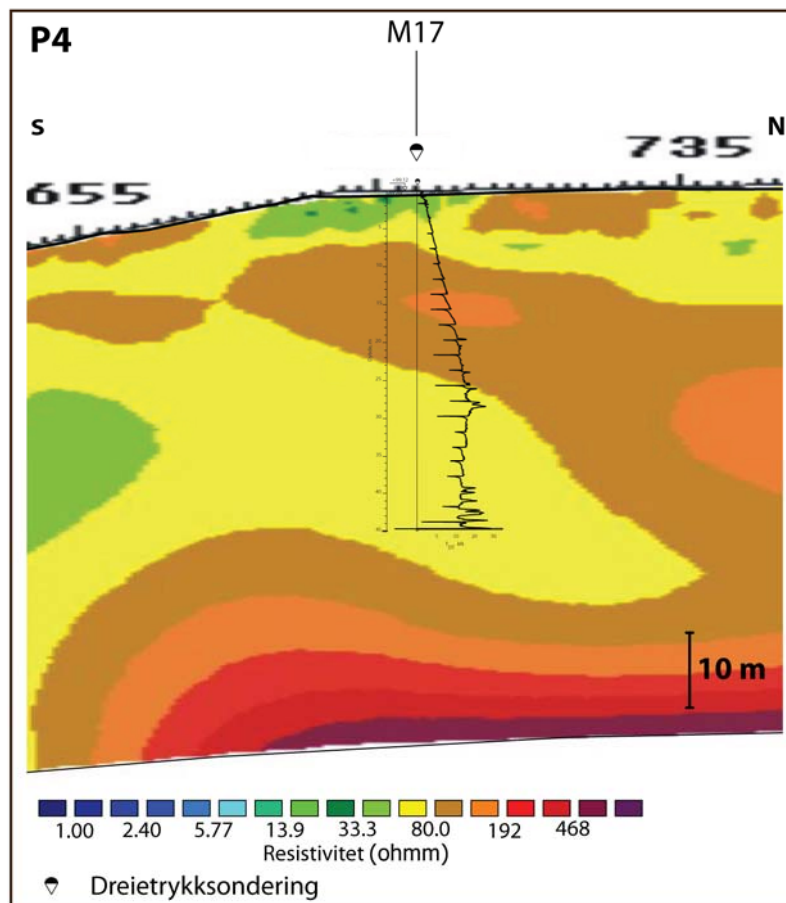
- Leire kan være utvasket i noen grad, men saltinnholdet i porevannet er ikke lavt nok til at leira er kvikk enda. Dette kan være indikert med nærliggende lave resistivetsverdier (blått i nærheten av grønt). Et eksempel på dette er vist i figur 18 hvor sonderingsprofilen viser økende boremotstand, selv om resistiviteten i deler av profilen indikerer mulig kvikkleire.
- Kvikkleire som blir utsatt for videre utvasking av grunnvannet vil etter hvert kunne få andre, mer stabiliserende ioner i porevannet, avhengig av grunnvannskjemi, og leira er ikke lenger kvikk (se kap. 2.4). Det vil fremdeles være få ioner som gir relativt høy resistivitet, og sonderinger vil vise økende boremotstand med dypet. I figur 19 viser sonderingen økende boremotstand i øvre del (ikke-kvikk leire, resistivitet $\pm 100 \Omega\text{m}$ (kan ha vært kvikk tidligere)) og deretter avtagende boremotstand (trolig kvikkleire, resistivitet 50-80 Ωm).

→ For begge disse tilfellene kan resistivetsprofilen gi ekstra informasjon til tolkningen av sonderingsprofilene. Sonderingsprofilene i seg selv sier ikke noe utover at det trolig er stabile masser der det er økende boremotstand, men resistivetsverdiene kan indikere på hvilket stadium i utvaskinga leira er på (om den er saltholdig, trolig er på vei til å bli kvikk, eller om den trolig har vært kvikk).

- Skredmasser i leirterreng kan få ulike resistivetsverdier avhengig av skredprosessen og hva som har rast ut. I et klassisk kvikkleireskred hvor mesteparten av kvikkleira blir omrørt, vil mye av overskuddsvannet renne bort. Når de gjenværende massene er drenert og tørker opp, vil de kunne få resistivetsverdier som ligner tørrskorpeverdier (over 100 Ωm). Nylig omrørte masser vil fremdeles kunne ha en del fuktighet i massene og dermed få lavere, kvikkleirelignende verdier. I noen skredhendelser vil blokker av uomrørt leire gli ut eller roteres, og resistivetsverdien til disse massene kan ligge i kvikkleireintervallet, og kan fremdeles gli ut/omrøres.
- Det skal også nevnes at siltige sedimenter og leirig morene kan få resistivetsverdier som ligger i kvikkleireintervallet.



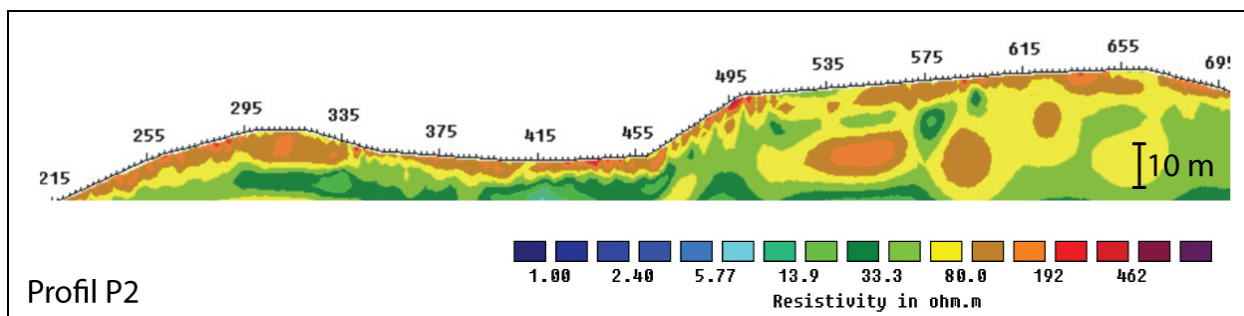
Figur 18 Utsnitt av resistivetsprofil (Gradient) fra Rødde, Sør-Trøndelag. Sonderingsprofilen viser økende boremotstand, selv om resistiviteten i deler av profilet indikerer mulig kvikkleire. Dette kan være noe utvasket leire som ikke enda er kvikk, indikert med de nærliggende lave resistivetsverdier (Solberg et al. (in press)).



Figur 19 Utsnitt av resistivetsprofil (Gradient) fra Rødde, Sør-Trøndelag. Sonderingsprofilen er 45 m dypt og viser først økende boremotstand, deretter minkende boremotstand (trolig kvikkleire). Resistivetsverdiene er i øvre del av skalaen for mulig kvikkleire (Solberg et al. (in press)).

9.1.3 Tørrskorpeleire

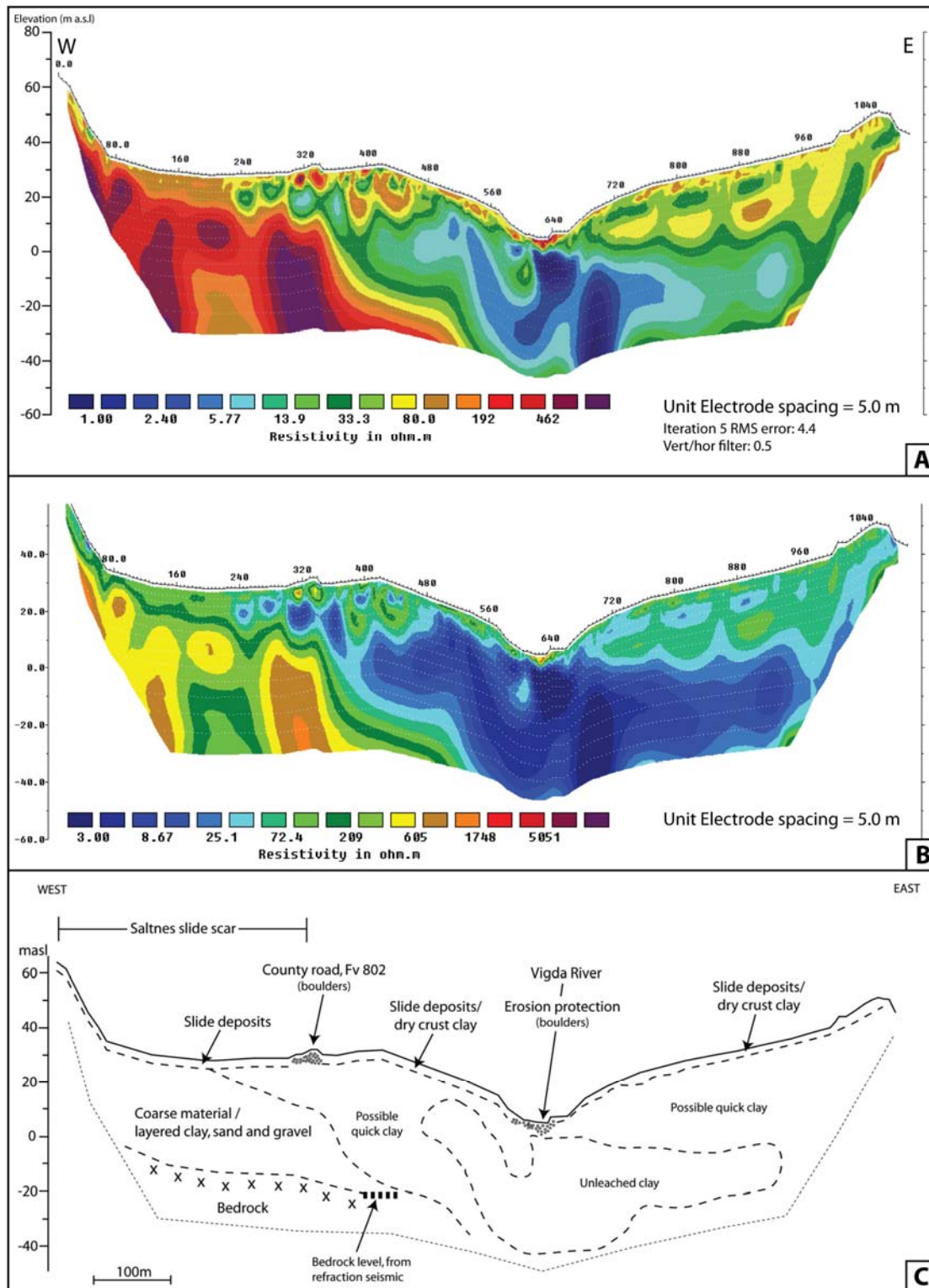
Tørrskorpeleire dannes ved jordoverflata når leira tørker opp og sprekker, og denne leira er ikke kvikk. Tørrskorpa kan være av ulik tykkelse, avhengig av hvor god dreneringen er og om deler av den har blitt fjernet ved menneskelig aktivitet (jordbruksplanering, byggeaktivitet) eller av naturlige årsaker (erosjon, skred). Tørrskorpe har generelt resistivitetsverdier over 100 Ωm . Figur 20 viser eksempel på et relativt godt utviklet tørrskorpelag. Topografien i området sørger for god drenering av sedimentene på grunn av isolerte hauger. Også sedimentene under tørrskorpa har vært utsatt for stor grad av utvasking. I sonderingsprofiler er det ofte nokså stor boremotstand i tørrskorpeleire.



Figur 20: Utsnitt av resistivetsprofil (Gradient) fra Rødde, Sør-Trøndelag som viser godt utviklet tørrskorpelag. Topografiske forhold sørger for god drenering av sedimentene under tørrskorpa (Dalsegg 2008b).

9.1.4 Sand/grus

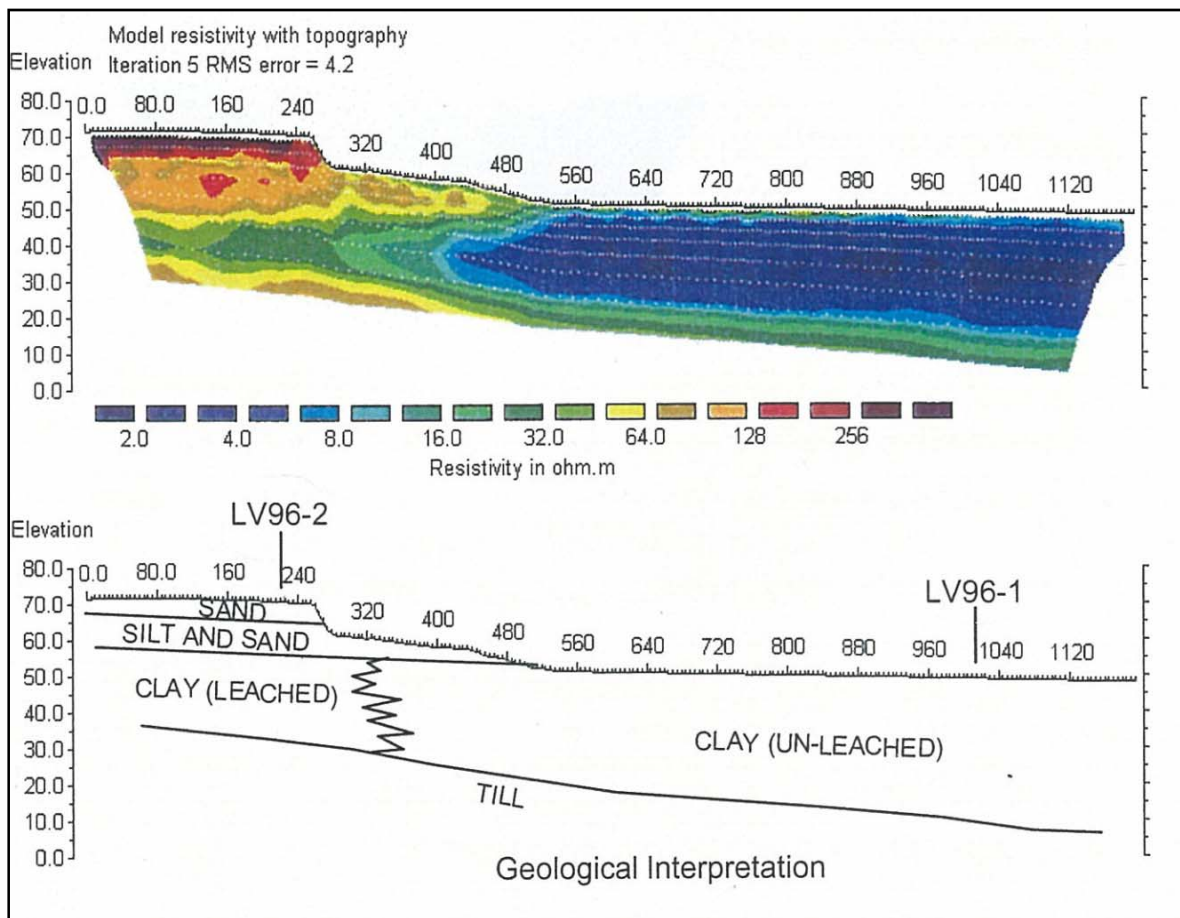
Vannmettet sand og grus har resistivitetsverdier fra ca. 100 Ωm og oppover, i tørr tilstand over ca. 1400 Ωm (tabell 1; fig. 2). Også morene med relativt lite leirinnhold vil ha resistivitetsverdier fra ca. 100 Ωm og oppover (Berger 1983). Figur 21a viser et profil med høye resistivitetsverdier til venstre. Siden den valgte visningsskalaen er ”kort” for bedre å kunne skille de lave verdiene, er det samme profilet vist med justert (”lang”) skala i figur 21b. I dette tilfellet ligger det grove masser under et leirlag i bunnen av ei grop fra en førhistorisk skredhendelse (beskrevet i Solberg et al. 2008a,b).



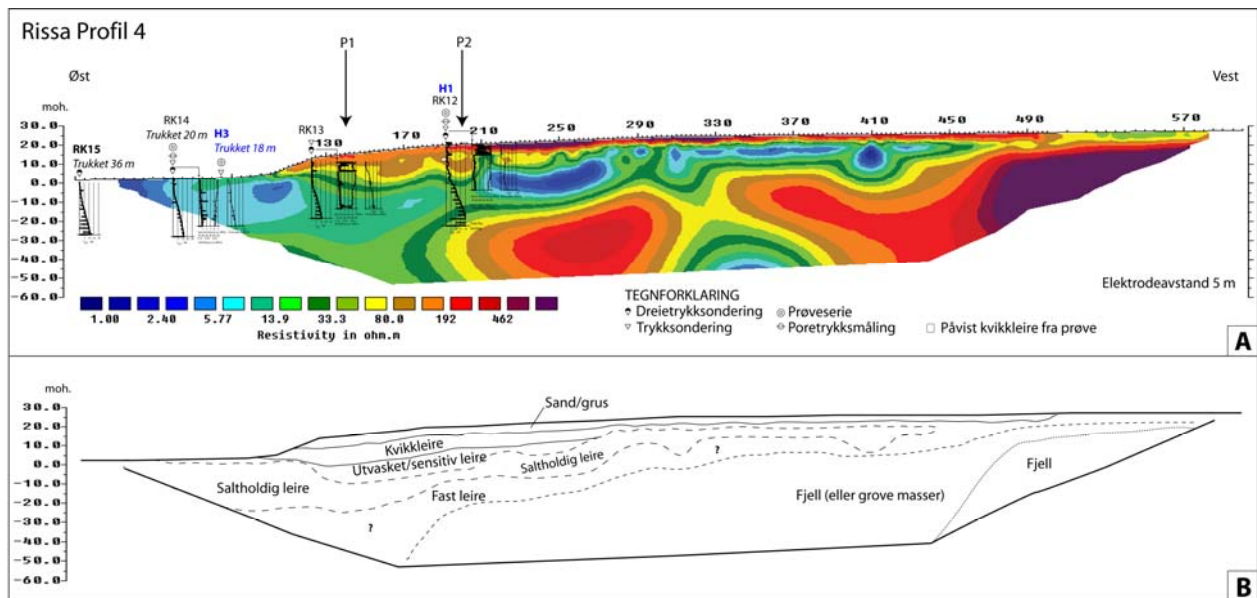
Figur 21: (A) Resistivetsprofil (Wenner) fra Buvika, Sør-Trøndelag. (B) Samme profil med justert skala for å få fram høye verdier bedre. (A-C) Profilet viser høye resistivetsverdier i vest, tolket som sand/grus under leire (senere bekreftet med sondering) over fjell (figur delvis fra Solberg et al. 2008b).

Sand- og gruslag i leire kan finnes av varierende tykkelse og antall. Som tidligere nevnt vil man på et resistivetsprofil ikke kunne vise et sedimentlag som er tynnere enn profilets oppløsning (i prinsippet elektrodeavstanden). Geotekniske undersøkelser vil da være nødvendig for oppdage dette, og trykksondering (CPTU) egner seg godt. Hvis materialet er svært lagdelt, f.eks. i en relativ tykk pakke med vekslende leir- og gruslag, vil dette kunne influere resistivetsverdiene ved at disse vil kunne bli noe høyere enn for en mer homogen leiravsetning (se Reiser et al. 2010).

I figur 22 ligger sand over leire i den venstre delen av profilet. Det øverste laget er grovere og trolig bedre drenert og får derfor noe høyere verdier enn det underliggende sandlaget som også inneholder silt (Calvert & Hyde 2002). Dette er også vist i eksemplet i figur 23 hvor sand/grus over leire er godt drenert, og derfor gir relativt høye resistivetsverdier (200-5000 Ωm).



Figur 22: Resistivetsprofil (Wenner) fra Canada. Øverst: resistivetsmodell med topografi lagt inn. Nederst: geologisk tolkning (Calvert & Hyde 2002).



Figur 23: (A) Resistivetsprofil P4 (Gradient) fra Rissa, Sør-Trøndelag, som bl.a. viser sand/grus over leire. Geotekniske data som ligger langs eller nær profillinja er lagt over. (B) Geologisk modell/tolkning av data (Solberg et al. 2010a).

9.1.5 Fjell

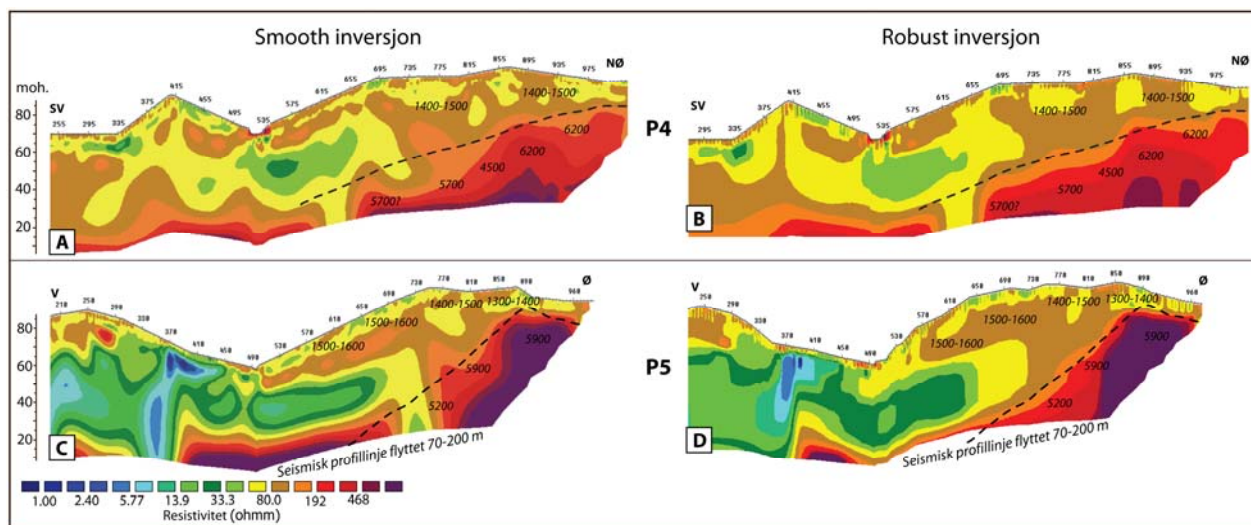
Generelt vil intakt fjell ha resistivetsverdier på flere tusen ohmm, men det finnes unntak. Resistiviteten vil minke hvis fjellet er mye oppsprukket og forvitret bl.a. fordi det her vil kunne finnes mer grunnvann. I tillegg finnes godt ledende mineraler/malmer som kan ha like lav eller lavere resistivitet enn saltholdig marin leire. Dette er vist i figur 9.

Ved "normale forhold" (fjellverdier på flere tusen ohmm) er det stor forskjell i resistivetsverdiene for leire og berggrunn. Siden leire leder strøm godt vil mesteparten av strømmen gå gjennom denne og "fortreng" fjellverdiene, eventuelt vil de forskyves dypere ned i profilet. Strømmen vil foretrekke å gå i leire til siden for profilet slik at mindre går i dypere liggende fjell – og dermed ser det ut til at det er leire der det er fjell. Eksakt dyp til fjell må derfor verifiseres med andre metoder. Figurene 21c, 24 og 25 viser eksempler hvor det er utført refraksjonsseismikk langs eller i nærheten av resistivetsprofilene. I disse tilfellene viser det seg at resistivetsverdiene er for lave i fjell i forhold til hva man forventer. Modellering viser at man relativt sjelden oppnår reelle fjellverdier når tykke leirlag ligger over, i tillegg til at dyp til fjell blir noe overestimert (Reiser et al. 2010; kap. 12.2). Hvis leire ligger rett på fjell, vil overgangen

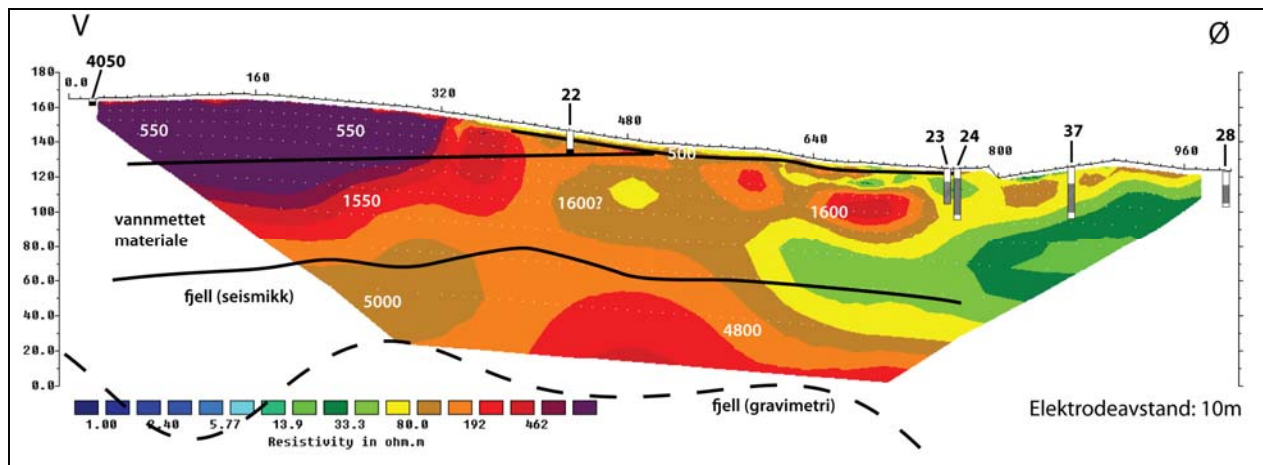
som før nevnt vises gradvis, med resistivitetsverdier mellom leirverdier og fjellverdier. I denne overgangen vil det kunne "skjule seg" lag med verdier mellom leire og fjell (f.eks. sand og grus). Dette må undersøkes ved hjelp av boringer (og evt. refraksjonsseismikk).

Figur 24 viser to resistivitetsprofiler som er invertert med både "Smooth" (standard) og "Robust" inversjon (vedlegg B; kap. 3.3). Robust inversjon kan ofte takle materialer med store kontraster i resistivitet bedre enn Smooth inversjon (Loke et al. 2003). I eksemplet framkommer ikke fjellverdier bedre i den Robuste inversjonen men formen til overgangen blir skarpere, og en kan noe lettere tolke fjelloverflata.

I en del tilfeller ligger berggrunnen nokså dypt, og selve inversjonsprosessen med stadig dårligere oppløsning i de dype delene av et profil, vil også bidra til mer usikker tolkning (se kap. 3.3). I tillegg er det få måleverdier som er grunnlag for bestemmelse av resistivitet i de dypere delene av profilet.



Figur 24: To resistivitetsprofiler (Gradient) fra Rødde, Sør-Trøndelag, med Smooth inversjon (standard) (A og C) og Robust inversjon (B og D) (i D er mer detaljert terrengoverflate lagt inn). Refraksjonsseismikk er utført helt/delvis langs profilinjene, og tolkning av fjell er lagt inn som stiplet linje (tallverdi er seismisk hastighet i m/s) (delvis fra Solberg et al. (in press)).



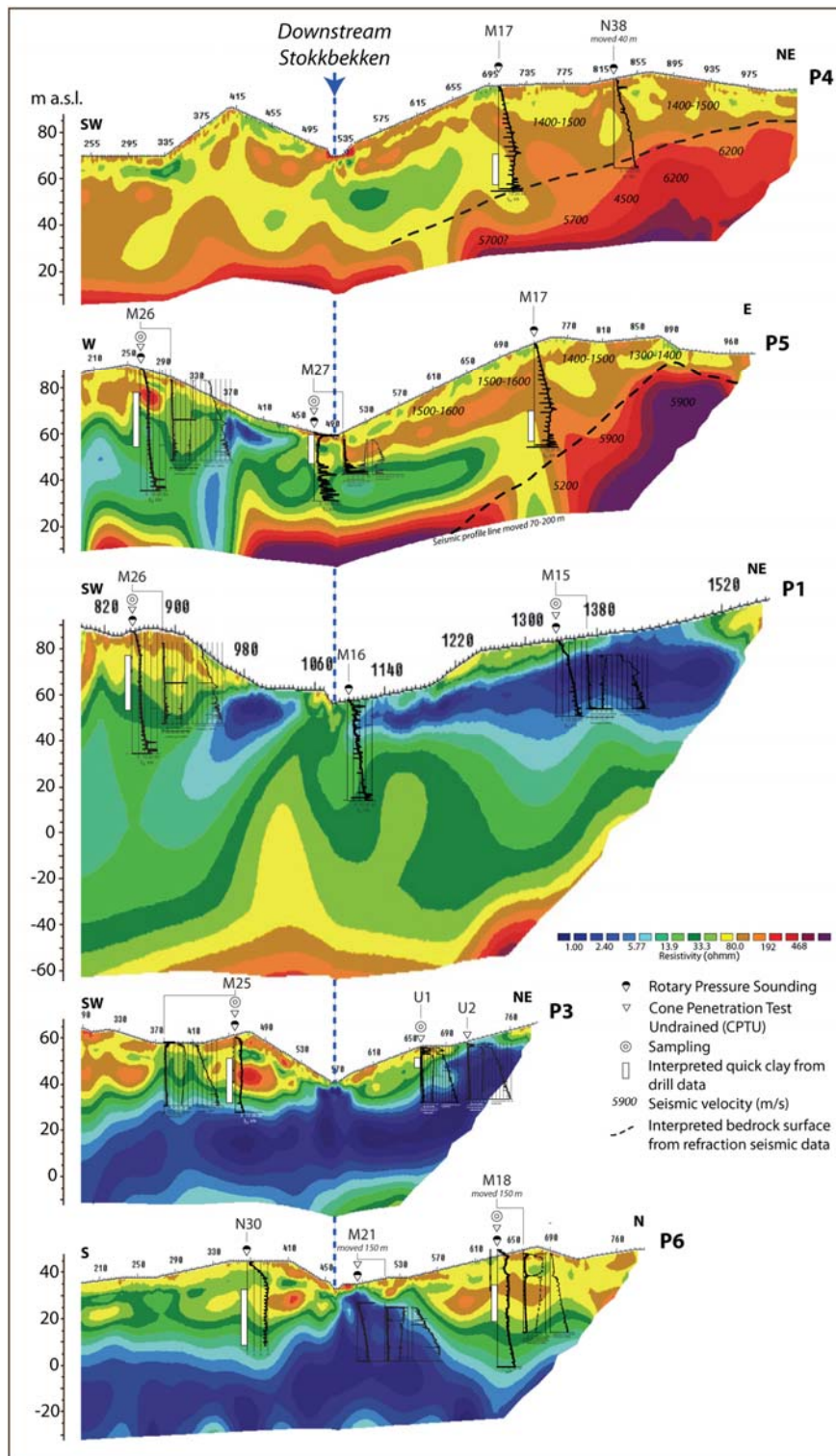
Figur 25: 2D resistivetsprofil ved Løvaasvegen, Sør Trøndelag. Tolkning av geotekniske data langs eller nær resistivetsprofilen vises i de grunne delene av profilet (skravert: antatt kvikkleire, hvit: leire, svart: sand/grus). Det er god overensstemmelse mellom geotekniske data og resistivetsdata. Tallverdiene (hvite) på profilet er seismiske hastigheter (m/s). Seismikken viser relativt grunt fjell som delvis kan være et resultat av siderefleksjoner. Dyp ned til fast fjell kan dermed være undervurdert, siden gravimetrimålingene viser dypere liggende fjell. Resistivetsverdiene her er lave til å være fjellverdier, som vanligvis er på flere tusen Ωm . Dette kan skyldes de dominerende, godt ledende marine sedimentene over en fjelloverflate som varierer på tvers av profilet. Resultatet blir en overvurdering av dyp til fjell. (Solberg et al. 2010c).

9.1.6 Grunnvannsforhold

Et resistivetsprofil kan gi indikasjoner på grunnvannsnivå og dreneringsforhold. Vannmettede, grove masser vil ha en lavere resistivitet enn tørre, og således indikere grunnvannsnivå. I finkornige masser er ikke dette like tydelig på grunn av kapillær stigning av vannet.

Dreneringsmønsteret i sedimenter vil ofte være styrt av berggrunnstopografi og fordelingen av ulike sedimenttyper. Graden av utvasking i leire vil si noe om dreneringsforholdene. Informasjon om den grunnleggende geologien i et område vil også ha betydning for tolkingen av resistivetsprofil. Et eksempel på dette kan være når leiravsetningen ligger i nærheten av en rygg avsatt nær breen, bestående av sand/grus. I et slikt tilfelle vil det trolig finnes tynne sandlag i leiravsetningen, selv om de ikke vil vises på et resistivetsprofil (kan verifiseres med f.eks. trykksonderinger). Dette har betydning for utvaskingen av leire.

Figur 21 viser et eksempel hvor forholdene lå til rette for kvikkleireutvikling grunnet en bratt fjellside i bakkant (til venstre for profilet i figuren) hvor artesiske trykk bygdes opp i grove masser overdekket av leire (mer beskrevet i Solberg et al. 2008a,b).



Figur 26: Resistivitetsprofiler (Gradient) fra Rødde, Sør-Trøndelag. For P4, P5 og P1: gjennomgående utvasking av sedimentene både nedenfra (oppadgående grunnvann p.g.a. relativt grunt til fjell) og ovenfra i skråningene ned mot bekken. For P3 og P6: drenering i skråningene er hovedprosessen for kvikkleireutvikling, bl.a. fordi det er dypt til fjell og nokså homogen leire. Stiplet linje i P4 og P5: Fjelloverflate fra refraksjonsseismikk (Solberg et al. (in press)).

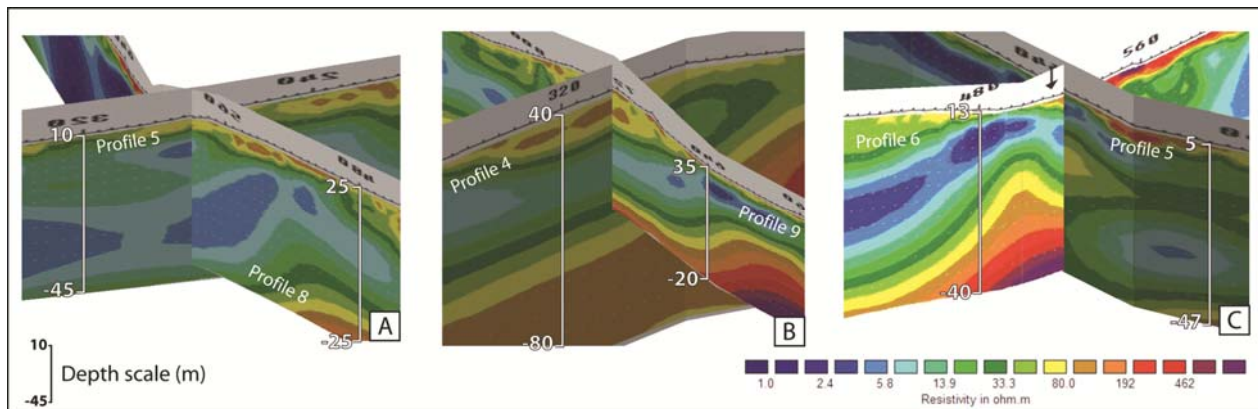
Oppstikkende fjell under sedimentene, og/eller bratt fjell i nærheten av avsetningen vil kunne gi muligheter for artesiske forhold. Dette kan antydes på resistivitetsprofil. Det viser seg at på noen resistivitetsprofiler hvor fjellet ligger relativt grunt er store deler av profilet utvasket, d.v.s. en kombinasjon av utvasking over fjell og utvasking fra overflaten i skråninger. Dette avhenger av de geologiske forhold: hvis man har oppstikkende fjell, og det samtidig er ugunstig geologi/grunnvannsforhold slik at den oppadrettede grunnvannsgradient er liten, trenger ikke utvaskingen nedenfra bli gjennomgripende. Der det er dypt til fjell, og fjell ikke antydes på resistivitetsprofilet, består gjerne store deler av profilet under elvenivå av saltholdig leire. Da har utvaskingen i hovedsak foregått ovenfra, og gjerne i skråninger ned mot elv/bekk (fig. 26, se også kap. 9.1.2) (Solberg et al. 2010a; Solberg et al. (in press)).

9.2 Kryssende profiler

For å få en indikasjon på grunnforholdene i 3D, er det nyttig å planlegge kryssende profiler. Alle profiler i et område kan med stor fordel legges inn i et 3D-visualiseringsprogram (f.eks. ArcScene fra ESRI), for å lette sammenligningen av profilene, og få en helhetlig/romlig oversikt over området. Det finnes programvare som tillater å invertere kryssende data sammen, men da må man være oppmerksom på at noe geologisk informasjon kan gå tapt. Grunnen til dette er at måleretningen vil ha noe å si for hva som fanges opp og framkommer på profilene.

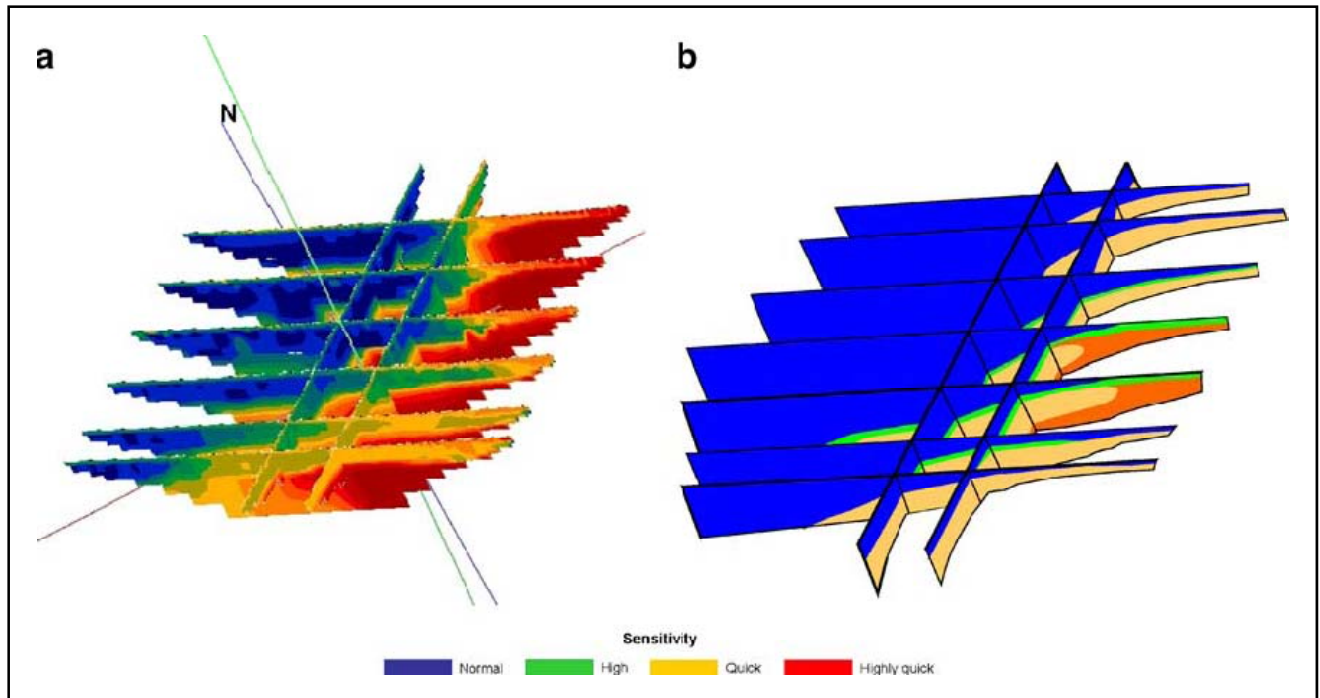
Hvor godt overlapp det er mellom to kryssende profiler vil si noe om de geologiske avsetningene, deres form og utbredelse. Figur 27 viser tre eksempler på kryssende profiler, hvor det i 27a er godt overlapp mellom profilene og nokså like forhold i begge retninger. I figur 27b forekommer de samme geofysiske "lagene", men på noe ulikt dyp. Profil 4 er målt med 10 m elektrodeavstand, mens profil 9 har 5 m elektrodeavstand. Manglende samsvar i dypere deler er delvis knyttet til inverteringsmetoden, der tykkelsen til de geofysiske "lagene" øker med dypet (se kap. 3.3). Denne typen manglende samsvar forekommer i hovedsak i de dypere deler av profilene, hvor det er mindre data og derfor en noe usikker inversjon. En annen type manglende overlapp mellom kryssende profiler vises i figur 27c, hvor helt ulike resistivitetsverdier vises på de to profilene. De to profilene er målt vinkelrett på hverandre, og en forklaring på dårlig samsvar kan tilskrives varierende geologi, f.eks. en geologisk kropp med form og utbredelse som varierer i ulike retninger. Dette vil kunne påvirke resistivitetsprofilene ut fra retningen disse er

målt i. I dette tilfellet ligger profil 6 trolig parallelt en rygg av grovt materiale, dekket av leire. Den er likevel stor nok til å innvirke på resultatene. I profil 5, som er vinkelrett på den samme ryggen, går mindre deler av strømmen gjennom det grove materialet, og profilet domineres derfor av den godt ledende leira.



Figur 27: Kryssende resistivitetsprofiler med (A) godt samsvar: geologisk homogene forhold horisontalt, (B) dårligere samsvar: ulike elektrodeavstander og dermed ulik dybderekkevidde, og (C) dårligere samsvar: geologisk inhomogene forhold (Solberg et al. 2008b).

Figur 28 viser resultater fra geofysiske og geotekniske undersøkelser på en lokalitet i Sverige. Kryssende resistivitetsprofiler er invertert sammen og gir et kvasi-3D-bilde av grunnforholdene (fig. 28a). Den geotekniske modellen i figur 28b er basert på interpolasjon/ekstrapolasjon av data i enkeltpunkter. De to modellene sees fra samme vinkel, og tilnærmet samme fargekode er benyttet for å kunne sammenligne datasettene. ”Normal og Høy sensitivitet” (blå og grønn) betyr her jordarter med resistivitet lavere enn $6,3 \Omega\text{m}$ (sensitiviteter opp til 50, litt annen inndeling enn den norske), gul farge representerer resistivitet mellom $6,3 \Omega\text{m}$ og $16 \Omega\text{m}$ hvor det er mulig at forutsetningene for kvikkleire er tilstede (sensitivitet over 50), mens rød farge er resistivitet over $16 \Omega\text{m}$ hvor leira er nok utvasket til å kunne være kvikk (sensitivitet på flere hundre, omrørt skjærstyrke på under $0,4 \text{ kPa}$). Denne fargen kan også representere tørrskorpe, berggrunn eller annet fast materiale. Figuren viser at kvikkleire fra den geotekniske modellen samsvarer med utvaskede deler i resistivitetsmodellen, og at leire med normal sensitivitet finnes der resistiviteten er lav/høyt saltinnhold. De sammensatte modellene gir et godt bilde av grunnforholdene på lokaliteten. For mer informasjon om dette studiet, se bl.a. Dahlin et al. 2001; Leroux & Dahlin (2003) og Lundström et al. (2009).



Figur 28: Kvasi-3D-modell av sedimenter i Skepplanda, Sverige: (A) Resistivitetsmodell og (B) geoteknisk modell. Se tekst for beskrivelse (Lundström et al. 2009).

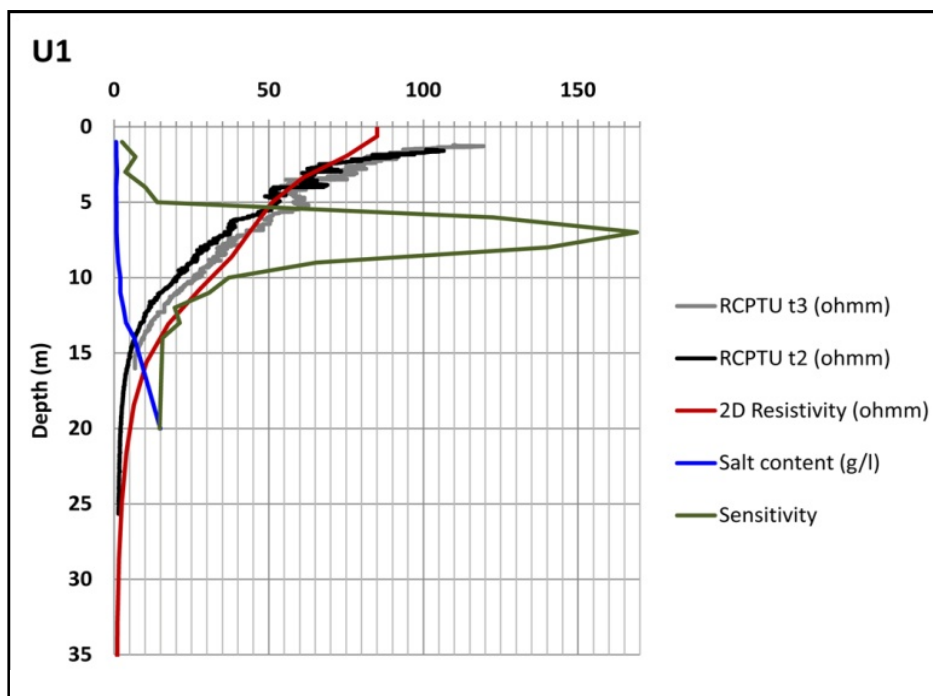
9.3 Tolkning ved hjelp av RCPTU

RCPTU gir, i tillegg til konvensjonelle CPTU-data, resistivitetsdata i et sonderingshull (1D) (kap. 3.7). Influensområdet til resistivitetsverdiene som fremkommer er lite, sammenlignet med 2D-målinger. Kombinasjon av 1D-målinger i sonderingshull og 2D-målinger på bakken vil være svært nyttig i et område hvor kvikkleire skal kartlegges. Resistivitetsdata fra sonderingshull vil også hjelpe tolkningen av resten av CPTU-dataene i tillegg til andre undersøkelser gjort på samme sted (prøvetaking, andre typer sondering). Ved kompliserte geologiske forhold vil det kunne være store forskjeller mellom 1D- og 2D-målinger, i forhold til ved enklere forhold. Dette er bl.a. knyttet til influensområdet og oppløsning til hver metode.

Det er foreløpig ikke utført så mange prosjekter i Norge hvor RCPTU og 2D-resistivitetsmålinger er kombinert (se kap. 13.2 og vedlegg C). I figur 29 er data fra 2D-målinger, data fra sondering med RCPTU og data fra prøvetaking kombinert. Sensitiviteten til prøven viser kvikkleire, hvor den korresponderende resistiviteten er 25-50 Ωm for 2D-målingene og 15-60 Ωm i RCPTU-dataene. Målingene av saltinnhold i porevannet stemmer godt overens med resistivitetsverdiene. Saltinnholdet øker med dypet til over 5 g/l fra ca. 14 m, der resistivitets-

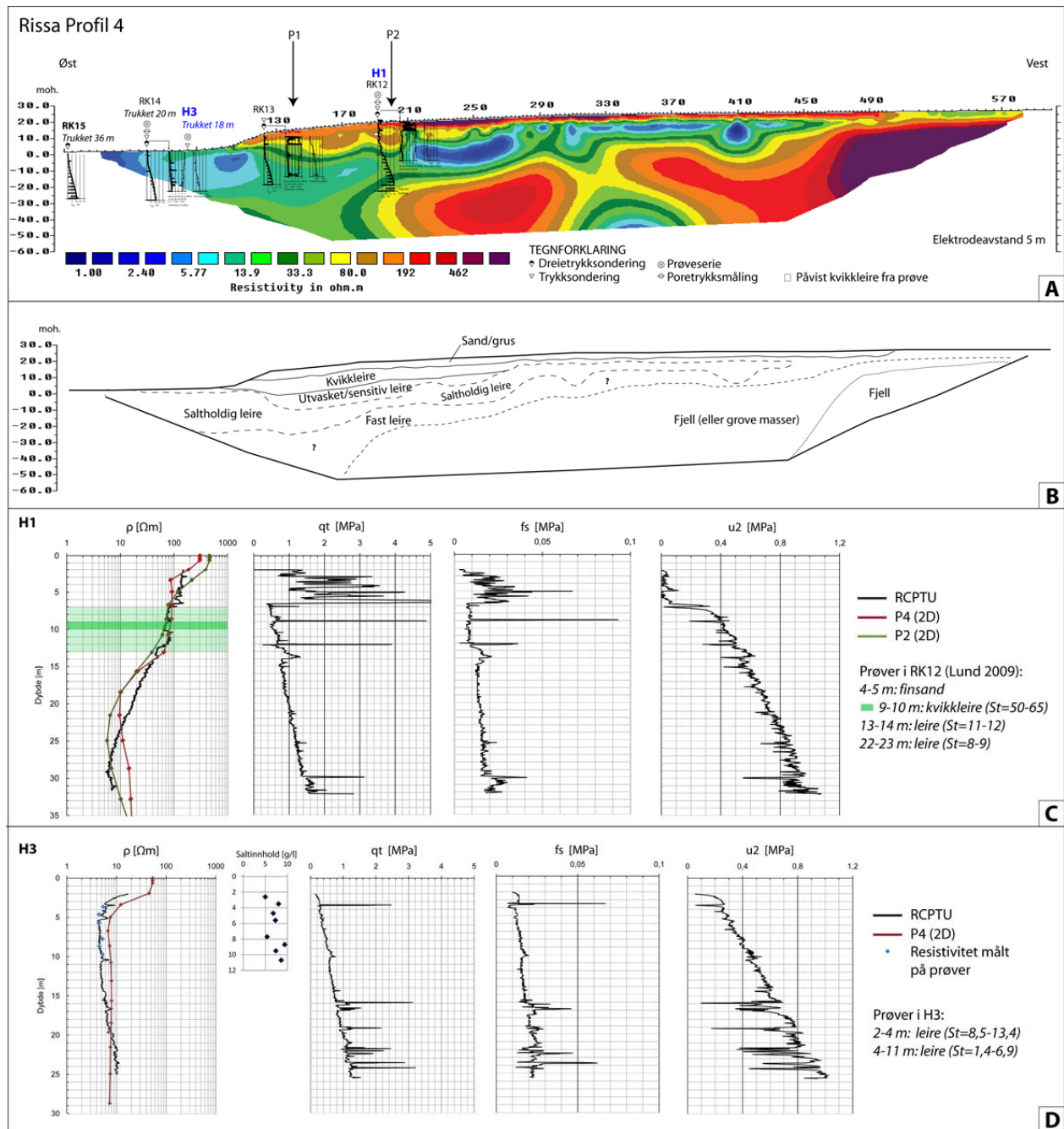
verdiene synker fra 15 Ωm (2D) og 8-10 Ωm (1D). Kurvene for resistivitet følger hverandre nokså godt for de to metodene. På en annen lokalitet i samme område var samsvaret dårligere, trolig på grunn av mer kompliserte geologiske forhold (se Solberg et al. (in press)).

Både innsamlingsmåte og dataprosessering for 1D- og 2D-målinger er ulik, og klassifiseringen av materialet vil derfor kunne variere. I endel tilfeller viser det seg at 1D-data er noe lavere enn 2D-data på samme lokalitet. Årsaken til dette kan være at de kjemiske bindingene mellom leirkornene blir brutt når leira blir omrørt under nedpressing av sonden. I følge Fukue et al. (1999) vil den omrørte leira gi en noe lavere resistivitet enn leire med intakte bindinger.



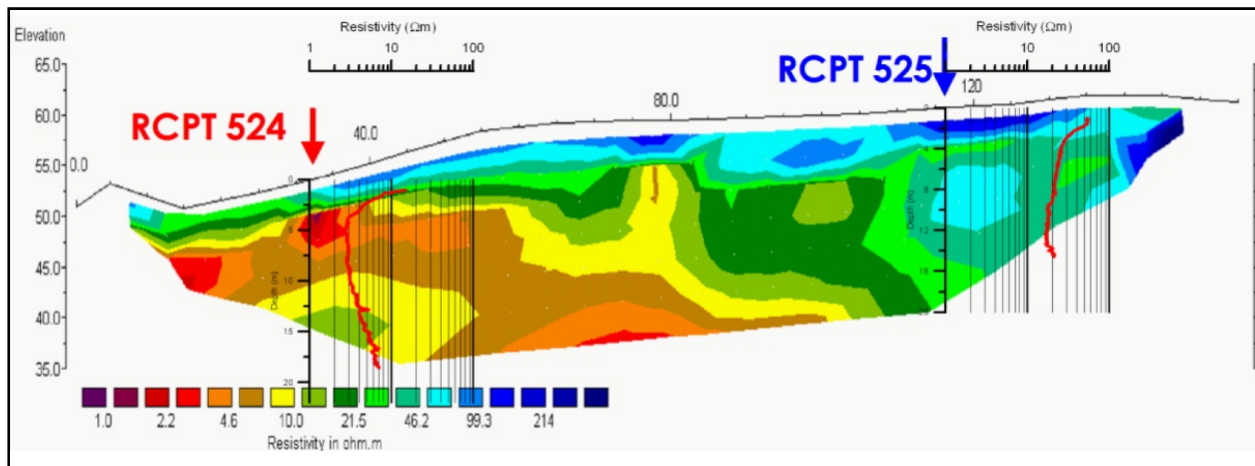
Figur 29: Data fra Rødde, Sør-Trøndelag: Sammenligning av 2D-resistivitet, RCPTU, saltinnhold og sensitivitet viser godt samsvar (Solberg et al. (in press)).

I et annet studieområde er det utført 8 RCPTU-målinger som ligger på eller nær profillinjene for 2D resistivitetmålinger, hvor metodene er sammenlignet (Aasland 2010; Solberg et al. 2010a). I tillegg er det målt resistivitet på noen prøver. Studiet viser at det generelt er godt samsvar mellom metodene, se eksempel i figur 30. I H3 er 1D-verdiene noe lavere enn 2D-verdiene, i H1 er ikke dette like entydig.



Figur 30: (A) Resistivetsprofil (Gradient) fra Rissa, Sør-Trøndelag med sonderingsdata. (B) Geologisk modell/tolkning av data. (C, D) Sonderingsprofiler (RCPTU) og prøvedata fra to borehull sammenlignet med 2D-data viser generelt meget godt samsvar mellom metodene (Solberg et al. 2010a).

Figur 31 viser et tredje eksempel fra et studium hvor resistivitetsdata målt i sonderingshull og på bakken er kombinert (Pfaffhuber & Rømoen 2009). I punkt 525 viser RCPTU-målingene lavere verdier enn 2D-profilet, mens i punkt 524 er det relativt godt samsvar (NB: rødt er her brukt som lav resistivitet, blått som høy resistivitet).

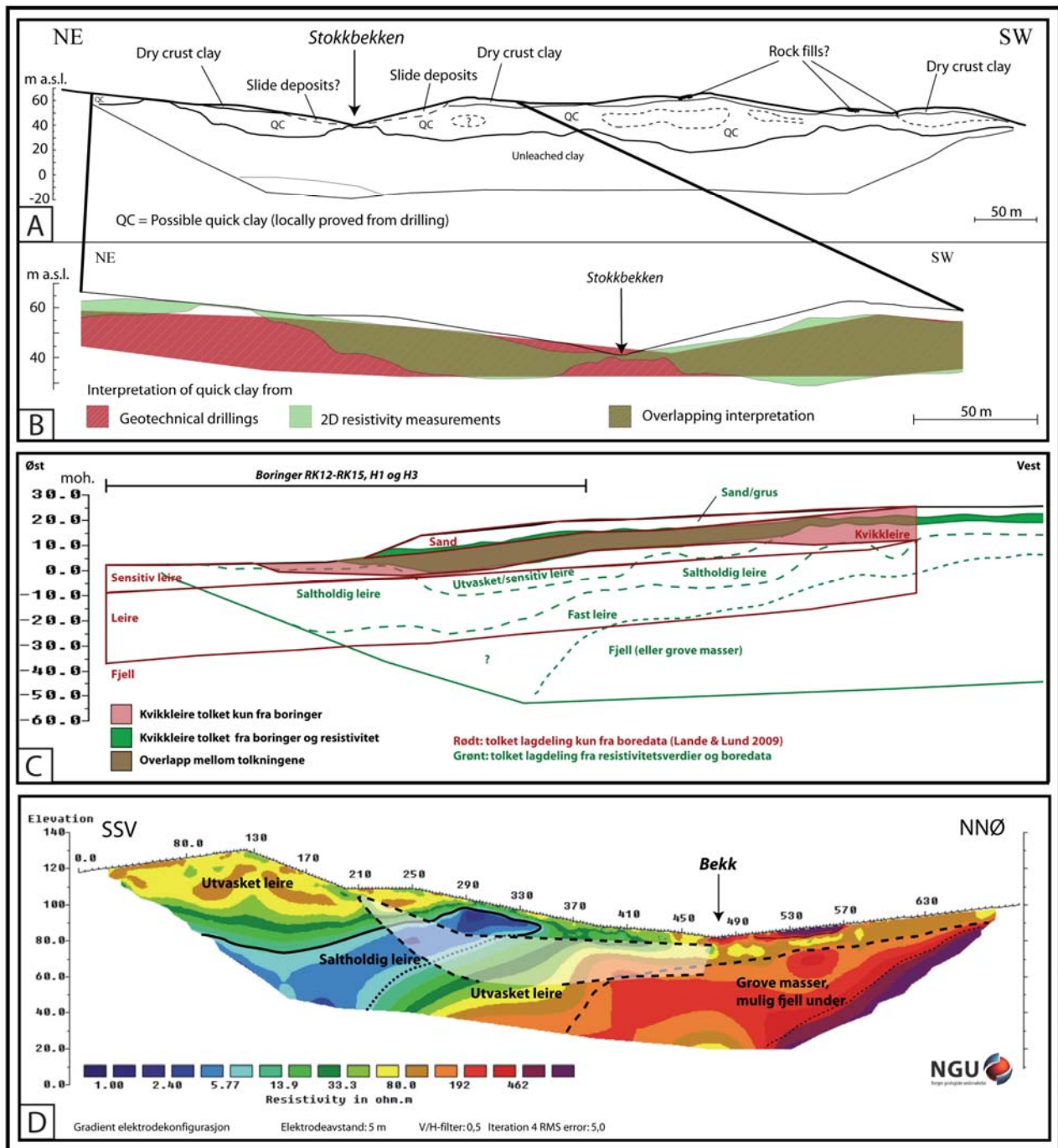


Figur 31: 2D-resistivetsprofil fra Smørgrav, Østlandet, sammenlignet med RCPT-profiler. For deler av profilene viser RCPT lavere verdier enn 2D-profilet. NB: her er en annen fargeskala brukt enn for de fleste andre profiler vist i denne rapporten. Blåtoner er høye resistivetsverdier, rødtoner er lave verdier (Pfaffhuber & Rømoen 2009).

10. Anvendeligheten av resistivitetsmetoden mht videre bearbeidelse av faresoner for kvikkleireskred

I forbindelse med evaluering av eksisterende faresoner for kvikkleireskred, eller opprettelsen av nye, kan resistivetsprofil gi nyttig informasjon om grunnforholdene. Man får en rask oversikt over området som et godt utgangspunkt for videre vurderinger. I områder med allerede etablerte soner som evalueres, vil det være riktig å legge profiler som går ut over sonegrensene. Da vil man kunne vurdere om antatt utbredelse av kvikkleire og andre masser er riktig i forhold til sonegrensene. Et resistivetsprofil gir mulighet til å tolke det som ligger mellom geotekniske datapunkt for å kunne få en mer riktig interpolasjon, som igjen kan gi et mer realistisk utgangspunkt for stabilitetsvurderingene. Resistivetsverdiene i et profil kan også indikere om økende boremotstand skyldes saltholdig leire eller leire som ikke er kvikk men trolig utvasket (se kap. 9.1.2). Det vil også være viktig å lokalisere masser som kan fungere som barrierer for kvikkleireskred. Dette kan være oppstikkende fjell under løsmassene, grove masser som sand og grus, og saltholdig leire. I forbindelse med kartlegging av kvikkleire er det hovedsakelig avstanden fra overflata og ned til litt under elvenivå/dalbunn som er mest interessant. Dette bør tas hensyn til ved valg av elektrodeavstand (Solberg et al. (in press)).

Figur 32 viser hvordan tolkningen av grunnforholdene kan bli bedre/mer nyansert ved kombinasjon av 2D resistivetsmålinger og geotekniske undersøkelser. I noen tilfeller gir resistivetsdata en nokså forandret tolkning av forholdene mellom borepunktene (fig. 32b og 32d).



Figur 32: For alle profilene er en kombinert tolkning av 2D resistivetsdata og geotekniske data sammenlignet med tolkning kun fra geotekniske data. Resistivetsprofil for (A og B) finnes i fig. 16, og for (C) i fig. 30. I (D) er det transparente laget kvikkleireutbredelse tolket kun fra interpolasjon mellom geotekniske data. Resistivetsprofilen viser at kvikkleira ikke er sammenhengende gjennom skråningen, men avskjæres av et saltholdig, stabilt leirlag. (A og B: Solberg et al. (in press), C: Solberg et al. 2010a, D: foreløpig upubliserte data målt av NGU).

11. Tidsbruk og kostnader knyttet til 2D resistivitetsmålinger

Kostnader knyttet til gjennomføring av 2D resistivitetsmålinger avhenger av en rekke faktorer. De primære kostnadene er knyttet til selve målingene og til å utføre geologisk/geoteknisk tolkning i etterkant. Dette forutsetter at man selv har nødvendig måle- og inverteringsutstyr, mannskap, og sørger for vedlikehold av utstyr. Den første tabellen i vedlegg E viser eksempler på mulige utgiftsposter knyttet til utføring av resistivitetsmålinger. De to andre tabellene viser eksempler på hvor lang tid målingene vil kunne ta, ut fra fire prosjekter utført de siste årene.

Tidsbruken i felt vil variere noe avhengig av vær- og føreforhold og hvor tilgjengelig området er. I skogsområder hvor man ikke kommer fram med bil, vil det bli mye bæring av utstyr, i forhold til arbeid på dyrka mark hvor forholdene *kan* ligge til rette for å kjøre langs profillinja. Kryssing av bekker/elver og større bilveger vil innvirke på tidsbruken, og det vil antall elektroder i hvert punkt også gjøre (avhenger av hvor god kontakt man får). Hvis kabelutlegget kjøres med flere enn en elektrodekonfigurasjon, og IP i tillegg måles, vil også selve måleprosessen ta noe lenger tid. Store mengder støy i dataene vil kunne påvirke måletiden med opp til 50-100 %.

Tabell 6 er en oppsummering og sammenligning av de fire eksempelprosjektene (hvor detaljer er vist i vedlegg E). Til tross for at feltoperatøren arbeidet alene på det første prosjektet, var tidsbruken per meter minst her. Prosjekt 3 og 4 tok lengst tid per meter. I prosjekt 3 var det en del utfordringer knyttet til målingene: to profiler gikk gjennom bløte skredmasser i ei relativt fersk kvikkleireskredgrop og tre profiler gikk gjennom skogsområde hvor utstyret måtte bæres nokså langt. I tillegg var det mye anleggsvirksomhet i området. Disse faktorene var med på å forlenge tiden i felt. I prosjekt 4 var det kalde måleforhold og snødekt mark. I forhold til antall profiler per dag, var det tredje prosjektet mest effektivt, selv om noen av profilene var relativt korte. I forhold til timekostnadene vil det derfor kunne bli litt dyrere med assistent i tillegg til feltoperatør, men feltarbeidet totalt vil kunne ta noe kortere tid (i antall dager).

Tabell 6: Oppsummering av fire eksempelprosjekter i forhold til tidsbruk for 2D-resistivitetsmålinger i felt. Med unntak av ett profil i prosjekt 1, er alle profilene målt med 5 m elektrodeavstand. Se vedlegg E for detaljer fra hvert prosjekt.

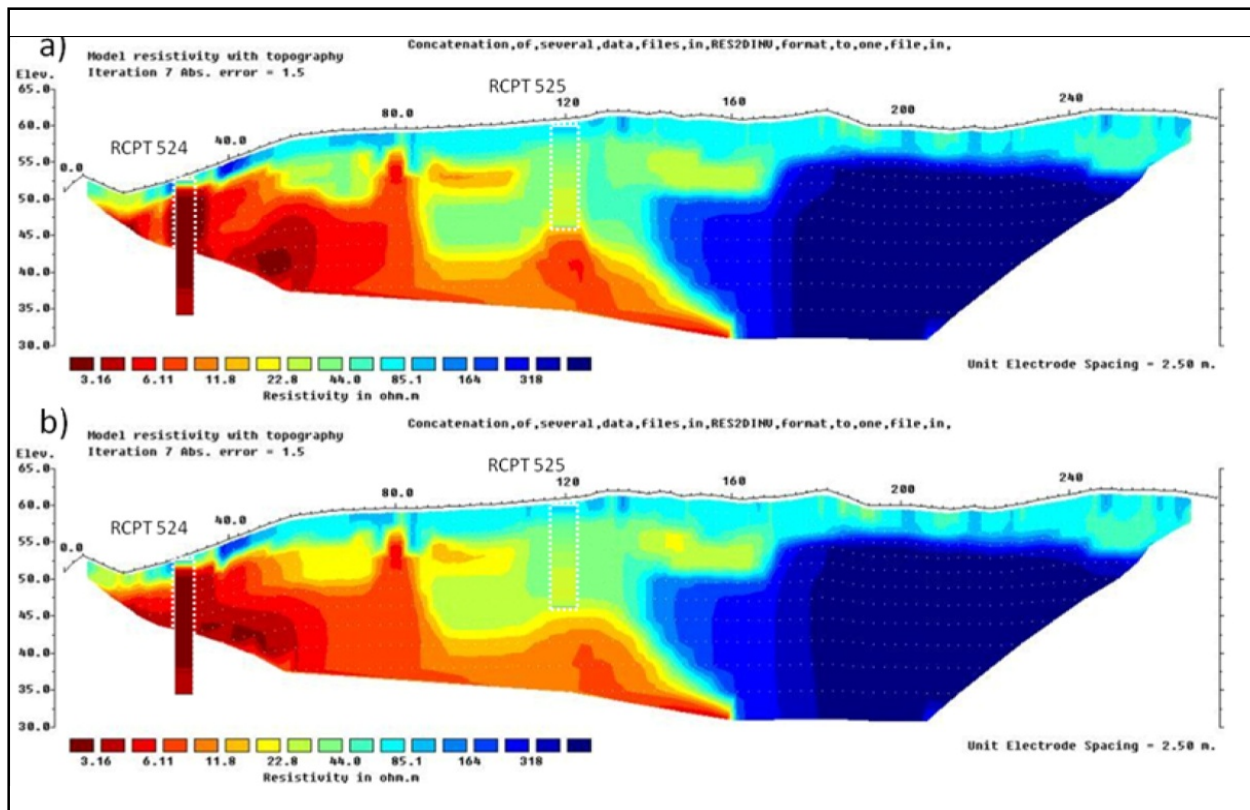
	Prosjekt 1	Prosjekt 2	Prosjekt 3	Prosjekt 4
Antall personer i felt	1	1-2	2	2
Totalt antall målemeter:	6500	6800	4600	3200
Total måletidsbruk (timer):	88	113	104	75
Antall timer/100 meter:	1,4	1,7	2,3	2,3
Meter/time:	74	60	44	43
Meter/dag:	591	618	657	640
Profiler/dag	0,6	0,7	1,0	0,8

Det vil på sikt være hensiktsmessig å analysere hvor mye man vil kunne redusere mengden geotekniske undersøkelser på bakgrunn av informasjonen man får fra et 2D resistivetsprofil. Dette kan gjøres når man etter hvert har brukt metoden i flere prosjekter, og ser hvordan den fungerer ved noe ulike grunnforhold/forutsetninger. Om man kan redusere antall boringer vil uansett være påvirket av hvor krevende prosjektet er, hvilke inngrep man skal gjøre (f.eks. ved bygging av veg), og hvilken vanskelighetsgrad det har. Det vil være en stor kostnadsbesparelse for et prosjekt å kunne redusert antall sonderingspunkt/prøvehull på bakgrunn av at man har utført 2D resistivitetsmålinger. Informasjonen mellom potensielle sonderingspunkt som 2D-data gir er også viktig, i tillegg til den styrkede tolkning av grunnforholdene en kombinasjon av 2D resistivetsdata og geotekniske data gir.

12. Utviklingspotensial

12.1 Forbedret inversjon

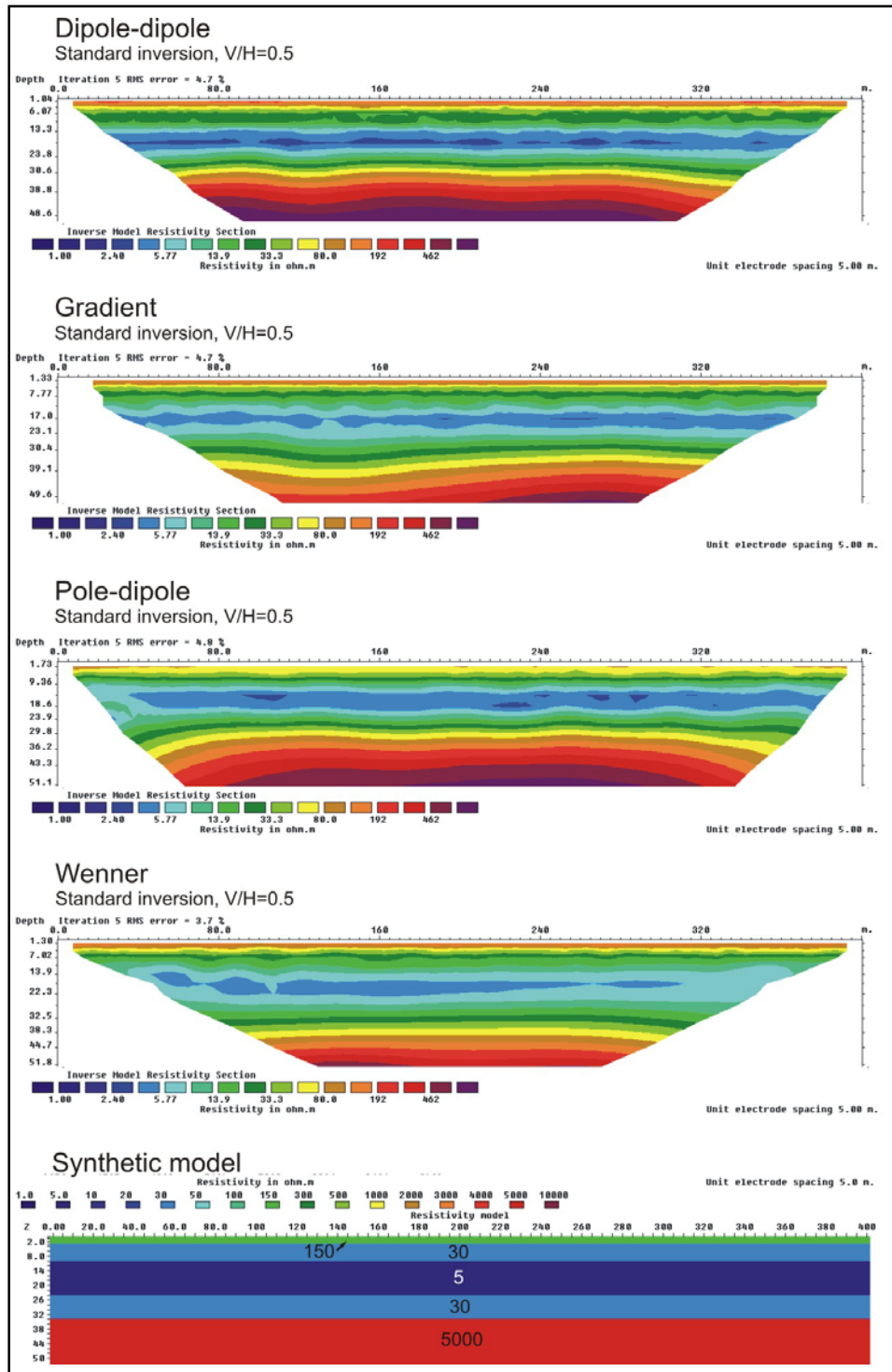
Det finnes muligheter for å legge inn informasjon fra sonderingspunkt/prøvehull eller andre undersøkelser inn i inverteringsprogrammet og dermed delvis låse modellen der resistivetsverdiene er kjente. Dette kan f.eks. være dyp til fjell. Man kan også invertere sammen data fra 1D- og 2D-målinger, og på den måten fastsette deler av resistivetsverdiene, som vist i figur 33.



Figur 33: (A) 2D-resistivitetsdata invertert sammen med RCPT-data fra to sonderingshull og (B) ikke invertert sammen. Eksempel fra Smørgrav, Østlandet. NB: her er en annen fargeskala brukt enn for de fleste andre profiler vist i denne rapporten. Blåtoner er høye resistivetsverdier, rødtoner er lave verdier (Pfaffhuber & Rømoen 2009).

12.2 Forbedret tolkning

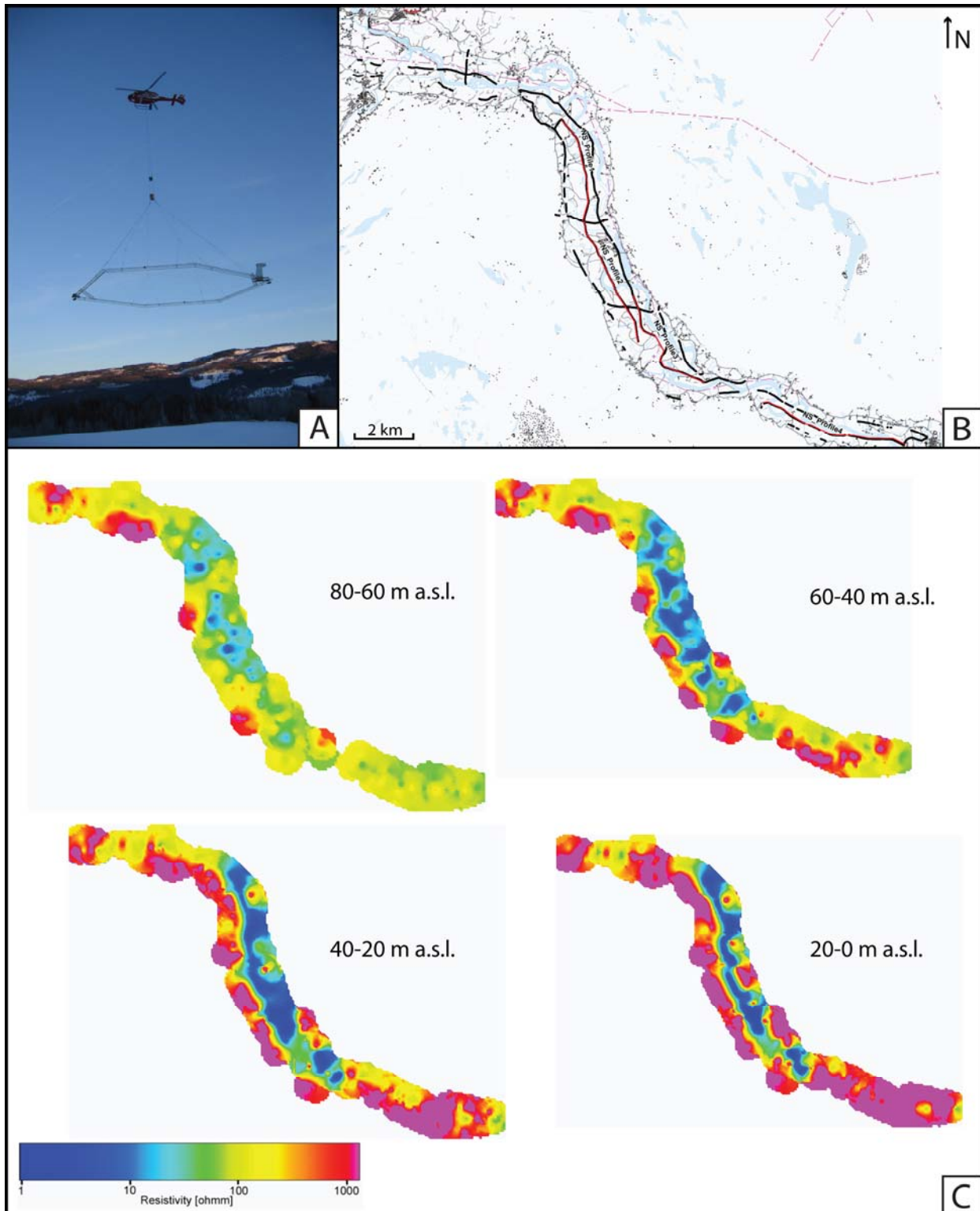
For å kunne bedre tolkningen av resistivitetsdata kan man utføre syntetisk modellering av ulike geologiske forhold. I Reiser et al. (2010) vises en rekke syntetiske modeller med forskjellige oppsett av resistivetsverdier som svarer til ulike sedimenttyper og/eller fjell. Modellene inneholder lag med ulik geometri. Inversjonen er gjort for fire ulike elektrodekonfigurasjoner (Wenner, Gradient, Dipol-dipol og Pol-dipol), med standard (Smooth) og Robust inversjon, og med to typer filter ($V/H=0,5$ og $V/H=1,0$). Modelleringen viser at standard inversjon er best for å få fram kvikkleire når resistiviteten generelt er lav, mens Robust inversjon gir bedre kontrast ved skarpe overganger (f.eks. leire over fjell). Siden inversjon av reelle data sjelden gir helt entydige resultater, er slik modellering svært nyttig for å bedre tolkning av resistivetsverdier. Figur 34 viser et eksempel fra modelleringen.



Figur 34: Syntetisk modell (nederst) invertert med standard (Smooth) inversjon for fire ulike elektrodekonfigurasjoner (Dipol-dipol, Gradient, Pol-dipol og Wenner) og med filter $V/H=0,5$. Geologisk modell er tørrskorpelag på toppen (150 Ωm) over horisontale lag av 30 Ωm (utvasket leire) over og under et lag av 5 Ωm (saltholdig leire), og nederst 5000 Ωm (fjell). Modelleringen viser at de fleste lagene fremkommer på de ulike konfigurasjonene, men at de ikke nødvendigvis ligger på riktig dyp. Spesielt dyp til fjell blir overestimert (Reiser et al. 2010).

12.3 Utvidet datainnsamling

Med elektromagnetiske målinger fra helikopter kan man gjøre en oversiktskartlegging av resistiviteten i grunnen i 3D på kort tid. Energisering av bakken skjer ved å sende strømpulser gjennom en stor senderspøle (se fig. 35a). Etter at strømpulsen er brutt, foretas målinger med en mindre spøle i flere tidsvindu og på denne måten kan resistivitetsforholdene mot dypet kartlegges. Det er hittil foretatt en slik undersøkelse av løsmasser i Norge. Som et ledd i NGUs hydrogeologiske kartlegging i Numedalen, utførte det danske firmaet SkyTEM målinger langs dalbunnen fra Hvitvingfoss og opp mot Kongsberg (Westergaard 2006). En sammenstilling av resistivitetsforholdene mot dypet er vist i figur 35c. Dagnært (60-80 moh) finnes elveavsetninger med resistivitet i området 100 Ωm og høyere (gul farge). Noe dypere finnes marine avsetninger med resistivitet i området 1-50 Ωm . Ut fra vår tolkingsmodell kan dette være intakt marin leire, men også mulig kvikkleire. Mot dypet (0-20 moh) øker innslaget av høyere resistivitet, og dette utgjør trolig fjell. Etter at disse målingene ble utført er metoden forbedret og en kan i dag oppnå enda større oppløsning. I dette området er det også kjente kvikkleireforekomster, men sammenligning av SkyTEM-data og bakkegeofysikk/geotekniske data i forhold til kvikkleire-problemstillinger er foreløpig ikke utført.



Figur 35: SkyTEM-målinger i Numedalen. (A) Datainnnsamling med helikopter. (B) Profiler målt for grunnvannskartlegging i Numedalen. (C) Noen av dataene som er samlet inn, fra ulike nivå i undergrunnen. Data vises i resistivitet (Ωm) (Westergaard 2006).

Del III

13. Henvisninger til prosjekter/studier hvor resistivitetsmålinger er benyttet for kartlegging av kvikkleire

13.1 Historisk tilbakeblikk i Norge

Utdrag/sitat fra Solberg et al. (2010c):

”Fra 1D til 3D på 100 år

Elektriske motstandsmålinger, eller resistivitetsmålinger som metoden gjerne kalles i dag, er ikke noe nytt. Conrad Schlumberger (1878-1936) eksperimenterte allerede tidlig på 1900-tallet med å sende strøm i bakken mellom to elektroder og måle oppsatt spenning ved to andre. På denne måten var han i stand til å få et bilde av de elektriske egenskapene i undergrunnen.

I Norge begynte de første forsøkene med å benytte teknikken i malmleting mot slutten av 60-tallet. Ole Bernt Lile tok i 1971 sin licentiatgrad på en spesialversjon av elektriske målemetoder kalt ”Oppladet Potensial”. I løpet av 70-årene ble det vanlig å lete etter malm med elektriske målinger. Gode elektriske ledere i bakken kunne avdekkes enten ved å måle den elektriske ledningsevnen (invers av resistivitet), mens impregnasjonsmalmer kunne kartlegges med induisert polarisasjon (IP). Sistnevnte gir respons på malmer, selv om mineraliseringen ikke har sammenhengende metalliske mineraler som bidrar til elektrisk ledningsevne.

Etter hvert ble det vanlig å benytte metoden til løsmassekartlegging. I sin dr.ing-grad fra NTH i 1983 studerte Bjørn Berger bl.a. elektriske egenskaper i kvikkleire ved hjelp av Vertikale Elektriske Sonderinger (VES). Han viste at man kan skille kvikkleire fra intakt saltholdig leire ved bruk av elektriske målemetoder, og han var kanskje den første i landet som inverterte sine data slik at sann resistivitet kunne beregnes. Riktignok måtte han forutsette horisontal lagdeling (1D modell), men metoden fungerte.

Moderne resistivitetsmålinger i 2D og 3D ble for alvor aktuelt tidlig på 90-tallet. Thorleif Dahlin utviklet et kabelsystem for effektive målinger i både 2D og 3D i sitt dr.gradsarbeide fra Lund i 1993 (Lund-systemet). Parallelt med dette arbeidet M.H. Loke med inversjonsrutiner både for 2D og 3D i sin doktorgrad ved universitetet i Birmingham (1994). Etter at disse to arbeidene ble kommersialisert, ble det mulig å investere i effektive målesystem og inversjonsprogramvare.

Norges geologiske undersøkelse (NGU) introduserte, i et samarbeid med Universitetet i Lund, 2D resistivitetsmålinger for kartlegging av svakhetssoner i fjell innenfor prosjektet "Miljø og Samfunnstjenlige tunneler" i 2001. Etter at NGU anskaffet det første utstyret i 2002, er metoden også benyttet ved kartlegging av svakhetssoner i fjell (se GEO 05, 2000, GEO 05, 2004), kartlegging av ustabile fjellparti (bl.a. Åknes og Nordnes), generell løsmassekartlegging, permafrostundersøkelser, grunnvannsundersøkelser, miljøundersøkelser, grusundersøkelser og til å karakterisere leiravsetninger.

Innen rammene av ICG (International Centre for Geohazards) tok NGU i 2003 det første initiativet til 2D resistivitetsmålinger i norske kvikkleireområder. Inger-Lise Solberg fikk finansiering fra ICG, NGU, NVE og NTNU til å gjennomføre et doktorgradsarbeide hvor bl.a. resistivitetsmålinger ble benyttet til karakterisering av marine avsetninger i Buvika, sørvest for Trondheim (GEO 03, 2006). Planlegging av ny E39 gjennom dalen hvor kvikkleire var hyppig forekommende, ga tilgang på mye geotekniske boredata som kunne korreleres med resultater fra resistivitetsmålinger. Som en fortsettelse av dette ble metoden også brukt for kvikkleirekartlegging i strandsonen i Finneidfjord (Nordland) i 2007 (ICG-prosjektet "Offshore Geohazards"). Det ble etterhvert etablert en gruppe innen ICG som kalles "Geofysikk for Geohazards", og som ledes av Isabelle Lecomte. Formålet er å teste og anvende geofysiske metoder, deriblant resistivitet, i potensielt skredfarlige områder. "

13.2 Resistivitet og karakterisering av leire i Norge

Tabell 7 er en oversikt over prosjekter fra 2002 til 2010 hvor resistivitetsmetoden er brukt for kvikkleirekartlegging i Norge.

Tabell 7: Oversikt over noen av de nyeste norske prosjekter hvor resistivitetsmetoden er brukt for kvikkleirekartlegging og dokumentert i rapport e.l. (2D resistivitetsmålinger og 1D-målinger i sonderingshull (RCPTU)).

Lokalitet	År	Prosjekttype	Metode	Kort beskrivelse	Referanser
Verdal, Nord-Trøndelag	2002	Dr.grad (bl.a.) (NTNU)	2D	Testing av resistivitetsmetoden (2 profiler) i kvikkleireområde viste større variasjoner i grunnforholdene enn antatt ut fra geotekniske undersøkelser.	Roth 2002 (artikkel); Larsen 2002 (Dr.grads-avhandling)
Buvika, Sør-Trøndelag	2003-2007	PhD (NTNU, NGU, ICG, NVE)	2D	13 profiler ble målt i et område hvor ny E39 ble bygget. Store mengder geotekniske grunnlagsdata ga muligheten til å vurdere om resistivitetsmetoden egnet seg for kvikkleirekartlegging.	Dalsegg et al. 2006 (datarapport); Solberg 2007 (PhD-avhandling); Solberg et al. 2008b (artikkel)
Buvika, Sør-Trøndelag	2004	Prosjekt-oppgave (NTNU)	2D	Noen av profilene fra Buvika-prosjektet ble benyttet (se over).	Helle 2004
Finneidfjord, Nordland	2007-2008	Forsknings-prosjekt (ICG, NGU)	2D	3 2D-profiler målt for kvikkleirekartlegging.	Dalsegg 2008a; Lecomte et al. 2008
Rødde, Sør-Trøndelag	2007-2010	Forsknings-prosjekt (SINTEF, NGU)	2D, 1D	7 2D-profiler ble målt i et område med faresoner for kvikkleire som skulle evalueres av NVE. 3 RCPTU-målinger.	Dalsegg 2008b (datarapport); Solberg et al. (in press) (artikkel)
Rødde, Sør-Trøndelag	2008, 2009	Prosjekt-oppgave og Master-oppgave (NTNU)	2D, 1D	Ett av profilene fra Rødde-prosjektet ble benyttet (se over). 3 RCPTU-målinger.	Ottesen 2008; 2009
Smørgrav, Buskerud	2008-2009	Forsknings-prosjekt (SIP) (NFR, ICG, NGI)	2D, 1D	Studie i ei faresone med bruk av ulike metoder for å kartlegge kvikkleire. Det gjøres fortsatt nye undersøkelser her.	Pfaffhuber & Rømoen 2009 (Samlerapport som inneholder flere publikasjoner, bl.a. Donohue et al. 2009; Rømoen et al. 2010)
Rissa, Sør-Trøndelag	2009-2010	Forsknings-prosjekt (NGU)	2D, 1D	Kvikkleirekartlegging i område med kjente geotekniske utfordringer, bl.a. knyttet til planlegging av ny veg gjennom området. 8 2D-profiler, 8 RCPTU-målinger.	Solberg et al. 2010a,b (artikkel og datarapport)
Rissa, Sør-Trøndelag	2010	Master-oppgave (NTNU)	2D, 1D	Profilene fra Rissa-prosjektet (se over) er benyttet, og sammen-lignet med data fra 8 RCPTU-målinger.	Aasland 2010
Namsos, Nord-Trøndelag	2010	Forsknings-prosjekt (NGU)	2D	Kartlegging i, og i områdene rundt, skredgropa etter skredet i Kattmarka 2009. 7 2D-profiler.	Solberg et al. 2011

13.3 Resistivitet og karakterisering av leire i Sverige og Canada

Både i Sverige og Canada har 2D resistivitetsmålinger blitt benyttet for å kartlegge marine avsetninger og i forbindelse med skredproblematikk (tabell 8 og 9).

Tabell 8: Oversikt over noen svenske prosjekter hvor resistivitetsmetoden er brukt for kvikkleirekartlegging (2D resistivitetsmålinger og 1D-målinger i sonderingshull).

Beskrivelse	Metode	Type publikasjon	Referanser
Forsøk med en "salt probe".	1D	Rapport	Söderblom 1969
Skråningsstabilitet: Skepplanda, Utby og/eller andre lokaliteter.	2D	Rapporter, artikler	Dahlin et al. 2001; Leroux & Dahlin 2003; Rankka et al. 2004; Dahlin et al. 2005; Lundström et al. 2009
Skråningsstabilitet: Bruk av "laterally constrained inversion" og "smooth inversion" på resistivetsprofiler i Vagnhärad.	2D	Artikkel	Wisén et al. 2003
Rapport om "kvikkleire i Sverige", viser også eksempler fra resistivitetsmålinger.	2D	Rapport	Rankka et al. 2004
Sammenligning av resistivitet og andre geofysiske metoder for å identifisere leire under sand, to studieområder i Sverige.	2D	Artikkel	Turesson & Lind 2005
Evaluerer av resistivitetsmetoden i kvikkleireområder ved Göta älv.	2D	Masteroppgave	Brinkhoff 2007
Kombinasjon av CPT-R og 2D-målinger i kvikkleireområder ved Göta älv.	2D, 1D	Masteroppgave	Schälin & Tornborg 2009

Tabell 9: Oversikt over noen kanadiske prosjekter hvor resistivitetsmetoden er brukt for kvikkleirekartlegging (2D resistivitetsmålinger og 1D-målinger i sonderingshull).

Beskrivelse	Metode	Type publikasjon	Referanser
Geofysiske undersøkelser i et skredområde i Ottawa.	2D, 1D	Artikler	Hyde & Hunter 1998; Calvert & Hyde 2002
Kartlegging av et skred ved hjelp av geofysiske metoder, ved Quesnel River.	2D	Artikkel	Bichler et al. 2004
Erfaringer knyttet til bruk av RCPTU (siden 1989) ved University of British Columbia (jordegenskaper, kalibrering, ionemobilitet og -konsentrasjon).	1D	Artikkel	Daniel et al. 2003

14. Referanser

- Aasland, R. 2010: Kartlegging av kvikkleire med 2D resistivitet og RCPT i Rissa. Masteroppgave ved Faggruppe Geoteknikk, Institutt for bygg, anlegg og transport, NTNU, Trondheim
- ABEM 1999: ABEM Terrameter SAS 4000/SAS 1000. Instruction Manual. ABEM Printed Matter 93101. ABEM, Sverige
- 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: 107-118
- Berger, B. 1980: Rapport om vertikale elektriske sonderinger i Verdal. NTH, Trondheim
- Berger, B. 1983: Geofysiske metoder anvendt i ingeniørgeologiske undersøkelser. Dr.Thesis, Institutt for petroleumsteknologi og anvendt geofysikk, NTNU
- Bergström, B., Reite, A., Sveian, H. & Olsen, L. 2001: Feltrutiner, kartleggingsprinsipper og standarder for kvartærgeologisk kartlegging ved NGU. NGU Intern Rapport 2001.018
- Bichler, A., Bobrowsky, P., Best, M., Douma, M., Hunter, J., Calvert, T. & Burns, R. 2004: Three-dimensional mapping of a landslide using multi-geophysical approach: the Quesnel Fork landslide. *Landslides* 1: 29-40
- Bjerrum, L. 1954: Geotechnical properties of Norwegian marine clays. *Géotechnique* 4: 49-69
- Brinkhoff, P. 2007: Evaluation of the resistivity method as a tool for locating potential quick clay areas in the Göta älv River valley, south western Sweden. Masteroppgave ved Avdelingen for Geologi, Göteborgs Universitet
- Calvert, H.T. og Hyde C.S.B. 2002: Assessing landslide hazard in the Ottawa Valley using electrical and electromagnetic methods. In Symposium on The application of geophysics to environmental and engineering problems (SAGEEP). Environmental and Engineering Geophysical Society. Wheat Ridge, CO, USA
- Dahlin, T. 1993: On the automation of 2D resistivity surveying for engineering and environmental applications. Dr. thesis, Lunds Universitet, Sverige
- Dahlin, T., Larsson, R., Leroux, V. Svensson, M. & Wisén, R. 2001: Geofysik i släntstabilitetsutredningar. Statens geotekniska institut Rapport 62

Dahlin, T., Leroux, V., Larsson, R. & Rankka, K. 2005: Resistivity imaging for mapping of quick clays for landslide risk assessment. I: Proceedings of 11th Annual Meeting EAGE - Environmental and Engineering Geophysics, Palermo, Italy, 4-7 September, 2005. A046

Dahlin, T. & Zhou, B. 2004: A numerical comparison of 2D resistivity imaging with 10 electrode arrays. *Geophysical prospecting* 52: 379-398

Dahlin, T. & Zhou, B. 2006: Multiple-gradient array measurements for multi-channel 2D resistivity imaging. *Near Surface Geophysics* 4: 113-123

Dalsegg, E. 2008a: Geofysiske målinger Finneidfjord, Hemnes kommune, Nordland. NGU Rapport 2008.032

Dalsegg, E. 2008b: Geofysiske målinger for løsmassekartlegging ved Rødde i Melhus kommune, Sør-Trøndelag. NGU Rapport 2008.084

Dalsegg, E., Elvebakk, H., Rønning J.S., Solberg, I.L., Solli, A. & Tønnesen, J.F. 2006: Geofysiske målinger for løsmassekartlegging i Buvika, Skaun kommune, Sør-Trøndelag. NGU Rapport 2006.006

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 and engineering geophysics* 8(1): 15-22

Donohue, S., Long, M., O'Connor, P., Helle, T.E., Pfaffhuber, A. & Rømoen, M. 2009: Geophysical mapping of quick clay - a case study from Smørgrav, Norway. I: Proceedings of Near Surface 2009, Dublin, Ireland, Expanded Abstracts C17

Fukue, M., Minato, T., Horibe, H. & Taya, N. 1999: The micro-structures of clay given by resistivity measurements. *Engineering Geology* 54: 43-53

GeoTech 2010: CPT Electric Conductivity Adapter. Datablad. Tilgjengelig fra www.geotech.se [sistert desember 2010]

Gregersen, O. 2008: Kartlegging av skredfarlige kvikkleireområder. I: Proceedings of 15. Nordisk geoteknikermøte, Sandefjord 2008, pp 178-186

Helle, T.E. 2004: ICG 5 - E39 Vigda, Buvika. Natural slope - profile 3. Prosjektoppgave ved Faggruppe Geoteknikk, Institutt for bygg, anlegg og transport, NTNU, Trondheim

Hilmo, B.O. 1989: Marine sensitive leirers mineralsammensetning, kolloidkjemi og mekaniske egenskaper. Dr. Thesis, Institutt for geologi og bergteknikk, NTH, Trondheim

- Hyde C.S.B. & Hunter J.A. 1998: Formation electrical conductivity - porewater salinity relationships in Quaternary sediments from two Canadian sites. I: Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, March 22-26, 1998, Chicago, IL. Environmental and Engineering Geophysics Society, pp 499-510
- Janbu, N., Nestvold, J., Røe, Ø. & Sveian, H. 1993: Leirras - årsaksforhold og rasutvikling. I: Walberg, Ø. (red): Verdalsboka. Ras i Verdal, vol B. Verdal kommune, s. 739-784
- Larsen, J.O. 2002: Some aspects of physical weather related slope processes. Dr. Thesis, Institutt for geoteknikk, NTNU, Trondheim
- Lecomte, I., Bano, M., Hamran, S.E., Dalsegg, E., Nielsen, K.M., Nielsen, M.H., Douillet, G., Frery, E., Guy, A. & Volesky, S. 2008: Submarine Slides at Finneidfjord (Norway): Geophysical Investigations. I: Proceedings of the 21st Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (SAGEEP), April 6-10, 2008, Philadelphia, PA.
- Leroux, V. & Dahlin, T. 2003: Resistivity mapping of quick clay. Field study at Skepplanda, Utby and Munkedal in Bohuslän, Sweden. Department of Engineering Geology, Lund University, Sverige
- L'Heureux, J.S., Hansen, L., Longva, O., Emdal, A., & Grande, L. O. 2010: A multidisciplinary study of submarine landslides at the Nidelva fjord delta, Central Norway, - Implications for the assessment of geohazards. Norwegian Journal of Geology 90: 1-20
- Loke, M.H. 2007: Res2DInv ver. 3.56. Geoelectrical Imaging 2D and 3D. Instruction Manual. Geotomo Software, www.geoelectrical.com [sitert desember 2010]
- Loke, M.H., Acworth, I. & Dahlin, T. 2003: A comparison of smooth and blocky inversion methods in 2D electrical imaging surveys. Exploration Geophysics 34: 182-187
- Lundström, K., Larsson, R. & Dahlin, T. 2009: Mapping of quick clay formations using geotechnical and geophysical methods. Landslides 6: 1-15
- Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE) 2009: Retningslinjer for planlegging og utbygging i fareområder langs vassdrag. Retningslinjer nr. 1/2008, revidert 5. mars 2009
- Norsk Geoteknisk Forening (NGF) 1975: Retningslinjer for presentasjon av geotekniske undersøkelser
- Ottesen, H.B. 2008: Kvikkleire tolkning - Labundersøkelser kombinert med resistivitetsmålinger. Prosjektoppgave ved Institutt for bygg, anlegg og transport, NTNU, Trondheim
- Ottesen, H.B. 2009: CPTU med resistivitetsmåling. Masteroppgave ved Institutt for bygg, anlegg og transport, NTNU

- Palacky, G.J. 1987: Resistivity characteristics of geological targets. I: Nabighian, M.N.: Electromagnetic methods in applied geophysics. Soc. Of Expl. Geoph., Tulsa
- Pfaffhuber, A.A. & Rømoen, M. 2009: SIP12 - Resistivity anisotropy in quick clay. Multi-method Quick Clay mapping at Smørgrav, Øvre Eiker. NGI Rapport 20091013-00-24-R
- Rankka, K., Anderssen-Sköld, Y., Hultén, C., Larsson, R., Leroux, V. & Dahlin, T. 2004: Quick clay in Sweden. Statens geotekniska institut Rapport 65
- Reiser, F., Dahlin, T., Rønning, J.S. & Solberg, I.L. 2010: Resistivity modelling for clay layer characterisation, possibilities and limitations. NGU Rapport 2010.047
- Reynolds, J.M. 1997: An introduction to applied and environmental geophysics. John Wiley and Sons, Inc, England
- Rosenqvist, I.T. 1953: Considerations on the sensitivity of Norwegian clays. Géotechnique 3: 195-200
- Roth, M.J.S. 2002: Earth resistivity testing: two case studies from Norway. I: Symposium on The application of geophysics to environmental and engineering problems (SAGEEP). Environmental and Engineering Geophysical Society. Wheat Ridge, CO, United States
- Rømoen, M., Pfaffhuber, A.A., Karlsrud, K. & Helle, T.E. 2010: Resistivity on marine sediments retrieved from RCPTU-soundings: a Norwegian case study. I: Proceedings of 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing 9-11 May 2010, Huntington Beach, CA, USA
- Sandven, R. 2002: Geoteknikk, materialeegenskaper. Utstyr, prosedyrer og parameterbestemmelser. Kompendium i faget SIG 2020. Faggruppe for Geoteknikk, Institutt for bygg, anlegg og transport, NTNU
- Schälin, D. & Tornborg, J. 2009: Evaluation of CPT-R and resistivity measurements in quick clay area. Master of Science Thesis at Department of Civil and Environmental Engineering, Chalmers University of Technology
- Solberg, I.L. 2007: Geological, geomorphological and geophysical investigations of areas prone to clay slides: Examples from Buvika, Mid Norway. PhD Thesis. Institutt for geologi og bergteknikk, NTNU, Trondheim, 213 s.
- Solberg, I.L., Aasland, R., Dalsegg, E., Hansen, L., L'Heureux, J.S. & Rønning, J.S. 2010a: Kvikkleireproblematikk i Rissa - bruk av resistivitetsmålinger. I: Proceedings for Fjellspreningsdagen, Bergmekanikk- og geoteknikkdagen i Oslo 25.-26.11.2010, 37
- Solberg, I.L., Dalsegg, E. & Hansen, L. 2010b: Geofysiske målinger for løsmassekartlegging ved Rissa, Sør-Trøndelag. NGU Rapport 2010.045
- Solberg, I.L., Dalsegg, E. & Hansen, L. 2011: Geofysiske målinger for løsmassekartlegging i Namsos, Nord-Trøndelag. Data og tolkninger. NGU Rapport 2010.046

Solberg, I.L., Hansen, L. & Rokoengen, K. 2008a: Large, prehistoric clay slides revealed in road excavations in Buvika, mid-Norway. *Landslides* 5:291-304

Solberg, I.L., Hansen, L., Rønning, J.S., Haugen, E.D., Dalsegg, E. & Tønnesen, J.F. (in press): Combined geophysical and geotechnical approach for ground investigations and hazard zonation of a quick-clay area, Mid Norway. Akseptert for *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*

Solberg, I.L., Rønning, J.S., Dalsegg, E., Hansen, L., Rokoengen, K. & Sandven, R. 2008b: Resistivity measurements as a tool for outlining quick clay extents and valley fill stratigraphy: feasibility study from Buvika, Central Norway. *Canadian Geotechnical Journal* 45: 210-225

Solberg, I.L., Rønning, J.S. & Hansen, L. 2010c: Finner kvikkleire på billigste måte. *Geo* 13(7): 34-38

Söderblom, R. 1969: Salt in Swedish clays and its importance for quick clay formation. Results from some field and laboratory studies. *Statens geotekniska institut Proceedings* 22

Telford, W.M., L.P. Geldart, & R.E. Sheriff 1990: *Applied Geophysics*. 2nd ed., Cambridge University Press, United Kingdom

Turesson, A. & Lind, G. 2005: Evaluation of electrical methods, seismic refraction and ground-penetrating radar to identify clays below sands - Two case studies in SW Sweden. *Near Surface Geophysics* 3: 59-70

Westergaard, J.H. 2006: SkyTEM survey - Numedalen, Data report. Department of Earth Sciences, University of Aarhus. Rapport 2006.01.02

Wisén, R., Christiansen, A.V., Auken, A. & Dahlin, T. 2003: Application of 2D laterally constrained inversion and 2D smooth inversion of CVES resistivity data in a slope stability investigation. I: Proceedings of 9th Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, Prague 31.08-04.09, 2003. O-002

Vedlegg

Vedlegg A Geotekniske undersøkelsesmetoder

Vedleggstabell 1 gir en oversikt over noen vanlige typer geotekniske undersøkelsesmetoder. Ved sonderboringer indikeres kvikkleire ved konstant eller synkende boremotstand, mens ikke-sensitive leire indikeres ved økende boremotstand med dybden. Påvisning av kvikkleire er likevel bare sikker ved opptak av uforstyrrede prøver (prøvetaking) som testes i laboratoriet hvor geotekniske materialeegenskaper bestemmes. For flere undersøkelsesmetoder og mer utfyllende informasjon henvises det til standarder innen fagdisiplinen Geoteknikk.

Vedleggstabell 1: Noen vanlige typer geotekniske undersøkelsesmetoder, med kort beskrivelse av metode og hvilken informasjon man kan få (basert på Sandven 2002).

Undersøkelsesmetode	Beskrivelse	Informasjonstype
<i>Trykksondering (Cone Penetration Test Undrained, CPTU)</i>	Stangsystemet med en sonde presses kontinuerlig ned i grunnen med konstant penetrasjonshastighet. Spissmotstand, sidefriksjon og poretrykk registreres kontinuerlig.	Lagdeling, poretrykksrespons, jordartsindikasjon, mekaniske jordparametre.
<i>Dreietrykksondering</i>	Stangsystemet med en spesiallaget spiss presses ned i bakken ved bruk av både rotasjon og statisk nedpressing. Både rotasjons- og penetrasjonshastigheten er konstant. Nedpressingskraften registreres kontinuerlig (sonderingsmotstanden).	Indikert lagdeling, noen ganger jordart, kan indikere (ikke påvise) dyp til fjell.
<i>Totalsondering</i>	Konvensjonell dreietrykksondering i kombinasjon med fjellkontrollboring (spiss med fjellkrone). Inkluderer rotasjon, ramming og spyling.	Indikert lagdeling, noen ganger jordart, påvise dyp til fjell ved kontrollboring ned i fjell.
<i>Prøvetaking</i>	Prøver (L=0,8 m) tas vanligvis opp med en $\phi 54$ mm stempelprøvetaker for å gi uforstyrrede leirprøver med påfølgende testing i laboratoriet. Blokkprøvetaking kan også utføres.	Lagdeling, skjærstyrke, romvekt, vanninnhold, sensitivitet, plastisitetsgrenser, deformasjonsegenskaper, permeabilitet, og andre egenskaper bestemt ved rutineundersøkelser. Kvikkleire identifiseres ved konusforsøk.

Vedlegg B NGU's prosedyrer ved datainnsamling med LUND-systemet og invertering av data med Res2DInv

Ved NGU blir måledata samlet inn med et kabelsystem utviklet ved den tekniske høgskolen i Lund (LUND-systemet, Dahlin 1993). Systemet består av en reléboks (Electrode Selector ES10-64C), fire multi-elektrode kabler og et måleinstrument ABEM Terrameter SAS 4000 (ABEM 1999). Ved undersøkelsene blir det vanligvis benyttet kabler med 2, 5 og 10 m elektrodeavstand. Maksimal dybderekkevidde er omtrent 120 m med 10 m elektrodeavstand, 60 m med 5 m og 25 m med 2 m elektrodeavstand. Oppløsning, og dermed nøyaktigheten, er størst i den øvre halvdel av en pseudoseksjon, noe en må ta hensyn til ved valg av elektrodeavstand. I eksemplene hvor dette systemet er brukt, er elektrodekonfigurasjonene Wenner og Gradient benyttet. Begge metodene har vist seg å være godt egnet til kartlegging av horisontale strukturer.

Strømstyrken som har blitt benyttet er 200 mA for stort sett alle målingene (batteri som strømkilde). Datakvaliteten har i prosjektene NGU har gjennomført for kvikkleirekartlegging vært gjennomgående meget god, med bare noen få målinger over akseptabelt støynivå (20 %) som ble slettet før prosessering.

Resistivitets- og IP-data blir invertert ved bruk av dataprogrammet Res2DInv (Loke 2007). Invertingen med denne programvaren går raskt, og man kan gjøre dette like etter at data er samlet inn for å vurdere/justere plasseringen av de neste profiler. "Least Square" blir hovedsakelig benyttet som inversjonsmetode, også kalt "standard" eller "Smooth" inversjon. Smooth inversjon vil gi myke overganger og det trolig mest geologisk riktige bildet. En annen type inversjon kalles "Robust" hvor overgangene mellom materiale med høy og lav resistivitet blir skarpere (for eksempel leire over fjell). Med denne inversjonsmetoden blir resistivitetsvariasjonene ofte kantete, og virker geologisk usannsynlige. Det vil likevel kunne være en fordel å invertere data med begge inversjonsmetodene, for å få fram ulike typer informasjon i tolkningsprosessen, selv om Smooth ofte foretrekkes for å vise fram data (Loke et al. 2003). Vertikalt/horisontalt filter er ved inversjonen ofte satt til 0,5, noe som til en viss grad favoriserer horisontal lagdeling.

Vedlegg C Leirklassifisering fra resistivitetsverdier i Norge, Sverige og Canada

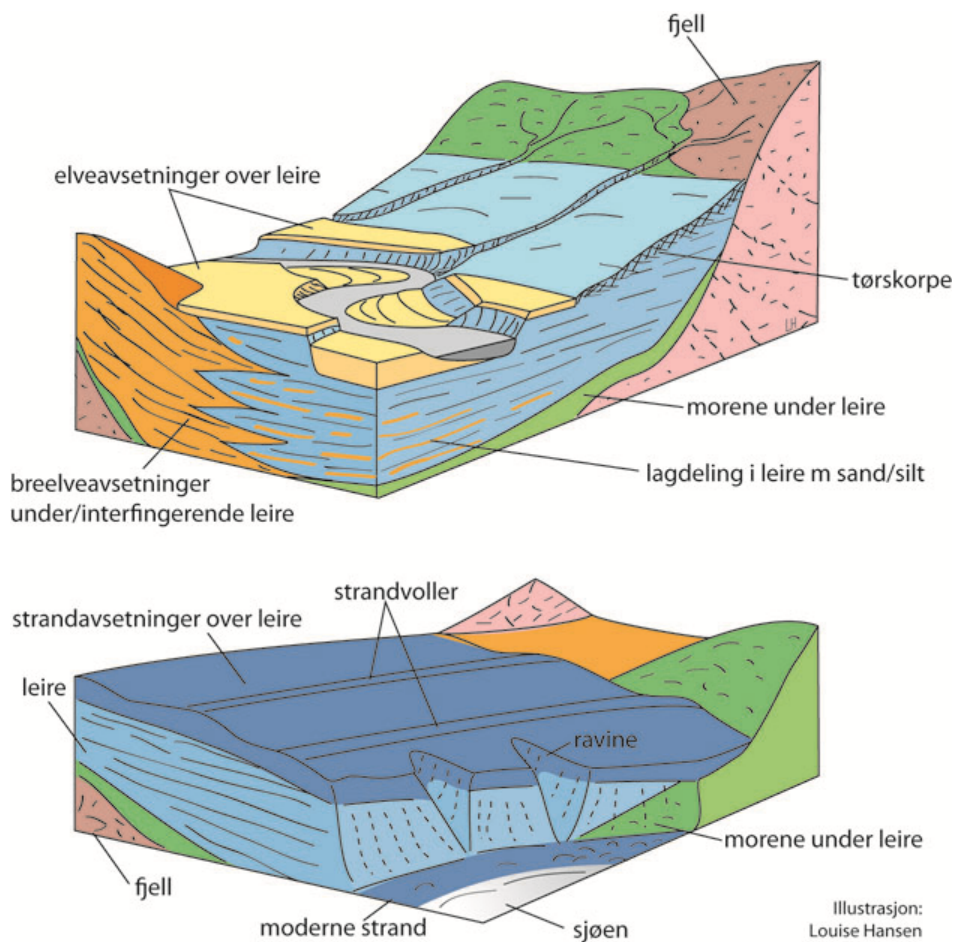
Vedleggstabell 2 Klassifisering av leiregenskaper fra resistivitetsverdier fra kvikkleirestudier i Norge, Sverige og Canada. Foreslåtte resistivitetsintervall for ulike typer materiale er gitt (hvis laget) (Solberg et al. (in press)).

Material (Ωm)		Method	Country	Comment (e.g. data amount)	Reference
Unleached marine clay	Leached clay (potential quick)	Dry crust clay			
1-20	>5-10	1D	Sweden	Measurements with "salt probe"	Söderblom (1969)
	20-90	1D	Norway		Berger (1980)
	(ca) 10-100	1D, 2D	Canada	2D: 2 profiles 1D: 2 drill holes	Hyde & Hunter (1998); Calvert & Hyde (2002)
	> 7	2D	Sweden	3+5 profiles (two sites)	Dahlin et al. (2001); Leroux & Dahlin (2003)
1-10	10-80	2D	Norway	13 profiles	Solberg et al. (2008b)
	10-80	2D	Norway	6 profiles	Donohue et al. (2009)
	>(6.3-16)	2D	Sweden	Data from different projects	Lundström et al. (2009)
	>3* (1D)	1D, 2D	Sweden	<i>Suggested classification:</i> Possible quick clay >5 2D: 5 profiles 1D: 11 drill holes	Schälin & Tornborg (2009)
				*possible sulphide content in the clay or wrong calibration	
				Corresponding 2D values are in general higher than 1D	
>5	5-20	1D	Norway	5 drill holes (one showing quick clay) <i>Suggested classification:</i> Unleached clay: 1-20, leached clay: 5-90, leached and weathered clay: 8-300	Rømøen et al. (2010)
	13-80	1D	Norway	8 drill holes (three showing quick clay). 1D are compared with 2D	Aasland (2010)
	14-80* (2D)	2D, 1D	Norway	2D: 7 profiles	Solberg et al. (in press)
	15-60 (1D)	1D	Norway	1D: 3 drill holes	
				* a few locations indicate quick clay where resistivity is down to 10 and as high as 200	
				<i>Suggested classification:</i> see text	

Vedlegg D Eksempler på vanlige geologiske forhold i områder under marin grense

Kvartærgeologiske kart viser primært løsmassenes beskaffenhet i overflaten hvor fargen angir avsetningens dannelse mens forskjellige symboler angir kornstørrelser og landformer med henholdsvis punkt og linjesymboler gitt i norske standarder (Bergstrøm et al. 2001).

Hav- og fjordavsetninger, som potensielt kan inneholde kvikkleire, er angitt med blått på et kvartærgeologisk kart. Kjennskap til landskapets oppbygging er en hjelp til å ”forutsi” hvilke typer løsmasser man kan finne i dybden, og dermed hvor hav- og fjordavsetninger kan ligge skjult under overflaten. Dette er illustrert i figuren under med blokkdiagrammer av et typisk dalføre og kystområde. Fargene refererer til de som brukes på et kvartærgeologisk kart. Hav- og fjordavsetninger (blå) kan opptre under elveavsetninger (gul), breelveavsetninger (oransje) og strandavsetninger (mørk blå). Andre typer løsmasser som kan ligge over hav- og fjordavsetninger er myr, vindavsetninger, innsjøavsetninger, fyllmasser med mer.



Illustrasjon: Louise Hansen

Vedlegg E Tidsbruk og kostnader knyttet til måling av 2D resistivitet

De primære kostnadene er knyttet til selve målingene og til å utføre geologisk/geoteknisk tolkning i etterkant. Dette forutsetter at man selv har nødvendig måle- og inverteringsutstyr, mannskap, og sørger for vedlikehold av utstyr. Vedleggstabell 3 viser eksempler på mulige utgiftsposter knyttet til utføring av resistivitetsmålinger. Den oversikten som presenteres her er ikke fullstendig, men vil gi en pekepinn på hvilke utgifter som må påregnes. Vedleggstabellene 4 og 5 viser detaljer knyttet til tidsbruk for 2D-resistivitetsmålinger i felt fra fire prosjekter.

Vedleggstabell 3: Mulige utgiftsposter knyttet til gjennomføring av resistivitetsmålinger.

Utgiftspost	Beskrivelse
Planlegging av målingene	Innhenting av eksisterende data (kartmateriale, rapporter), evt. befaringsplanlegging av utlegg (plassering, lengde, elektrodeavstand)
Reise/transport	Bil (Varebil med firhjulstrekk) + drivstoff, bomavgift Fly + kostnader knyttet til frakt av utstyr Ferge
Oppholdssted	Overnatting Diett
Feltarbeid	Arbeidstimer i felt Småutgifter (f.eks. bensin til aggregat)
Databearbeiding	Bearbeiding og invertering av rådata
Tolkning	Tolkning av resistivitetsdata, sammenligning med eksisterende og etter hvert eventuelle nye data (geotekniske data, annen geofysikk)
Rapportering	

Vedleggstabell 4: Detaljer om tidsbruk for 2D-resistivitetsmålinger i felt fra to eksempelprosjekter på Rødde og i Rissa (Sør-Trøndelag) (utført i 2008 og 2009/2010).

Prosjekt 1 Rødde								
Antall dager: 11								
Årstid: Vår								
Værforhold: Oppholdsvær								
Måleforhold: Dyrka mark, noe skog, kryssing av bekker, gårdsveger								
Profil-nr	Profil-lengde (meter)	Elektrode-avstand	Elektrode-konfigurasjon	IP-måling	Antall feltarbeidere	Tidsbruk feltoperatør (timer)	Tidsbruk medhjelper (timer)	Total tidsbruk (timer)
1	1600	10	Wenner + Gradient	Nei	1	18,5	0	18,5
2	800	5	Wenner + Gradient	Nei	1	11,5	0	11,5
3	800	5	Wenner + Gradient	Nei	1	14	0	14
4	1100	5	Gradient	Nei	1	12	0	12
5	1000	5	Gradient	Nei	1	11	0	11
6	800	5	Gradient	Nei	1	16	0	16
7	400	5	Gradient	Nei	1	5	0	5
I tillegg kommer: Kjøring til/fra feltområde, Databearbeiding, Rapportering, Bil + drivstoff, småinnkjøp (materiell)								
Prosjekt 2 Rissa								
Antall dager: 11								
Årstid: Vinter (Profil 1, 3, 5-7) Vår (Profil 2, 4,8)								
Værforhold: Vinter: Oppholdsvær, kaldt, noe tele Vår: Oppholdsvær/sol, ikke tele i øvre lag (muligens noe tele dypere)								
Måleforhold: Krysser bygdeveger, fylkesveger og riksveger								
Profil-nr	Profil-lengde (meter)	Elektrode-avstand	Elektrode-konfigurasjon	IP-måling	Antall feltarbeidere	Tidsbruk feltoperatør (timer)	Tidsbruk medhjelper (timer)	Total tidsbruk (timer)
1	1000	5	Gradient	Ja	1-2	13	7,5	20,5
3	500	5	Gradient	Ja	1	6,5	0	6,5
5	700	5	Gradient	Ja	1-2	9	2	11
6	1100	5	Gradient	Ja	1	12,5	0	12,5
7	800	5	Gradient	Ja	1	10	0	10
4	600	5	Gradient	Ja	2	6	6	12
2	900	5	Gradient	Ja	2	10	10	20
8	1200	5	Gradient	Ja	1-2	14	6,5	20,5
I tillegg kommer: Kjøring til/fra feltområde, Databearbeiding, Rapportering, Bil + drivstoff, småinnkjøp (materiell) Tele gjorde jordene kjørbare stort sett over alt. Dette reduserte måletiden en del, og arbeidet på leirjorda ble mer "renslig".								

Vedleggstabell 5: Detaljer om tidsbruk for 2D-resistivitetsmålinger i felt fra to eksempelprosjekter i Namsos (Nord-Trøndelag) og Melhus (Sør-Trøndelag) (begge utført i 2010).

Prosjekt 3 Namsos								
Antall dager: 7								
Årstid: Vår								
Værforhold: Oppholdsvær/sol, ikke tele i øvre lag (muligens noe tele dypere), stedvis litt snødekke								
Måleforhold: Bløt leire i skredgropa, ellers dyrka mark eller skog, kryssing av bygdeveger og boligområde								
Profilnr.	Profil-lengde (meter)	Elektrode-avstand	Elektrode-konfigurasjon	IP-måling	Antall feltarbeidere	Tidsbruk feltoperatør (timer)	Tidsbruk medhjelper (timer)	Total tidsbruk (timer)
K1	1000	5	Gradient	Ja	2	11,5	11,5	23
K2	500	5	Gradient	Ja	2	5	5	10
G1	800	5	Gradient	Ja	2	10	10	20
G2	900	5	Gradient	Ja	2	10,5	10,5	21
K3	400	5	Gradient	Ja	2	4	4	8
K4	500	5	Gradient	Ja	2	5	5	10
G3	500	5	Gradient	Ja	2	6	6	12
I tillegg kommer: Kjøring til/fra feltområde, Databearbeiding, Rapportering, Bil + drivstoff, småinnkjøp (materiell)								
Prosjekt 4 Melhus								
Antall dager: 5								
Årstid: Vinter								
Værforhold: Kaldt/oppholdsvær, snødekke, ingen tele								
Måleforhold: Dyrka mark, kryssing av gårdsveger								
Profil-nr	Profil-lengde (meter)	Elektrode-avstand	Elektrode-konfigurasjon	IP-måling	Antall feltarbeidere	Tidsbruk feltoperatør (timer)	Tidsbruk medhjelper (timer)	Total tidsbruk (timer)
1	1200	5	Gradient	Ja	2	15	15	30
2	700	5	Gradient	Ja	2	8	8	16
3	700	5	Gradient	Ja	2	7,5	7,5	15
4	600	5	Gradient	Ja	2	7	7	14
I tillegg kommer: Kjøring til/fra feltområde, Databearbeiding, Rapportering, Bil + drivstoff, småinnkjøp (materiell)								