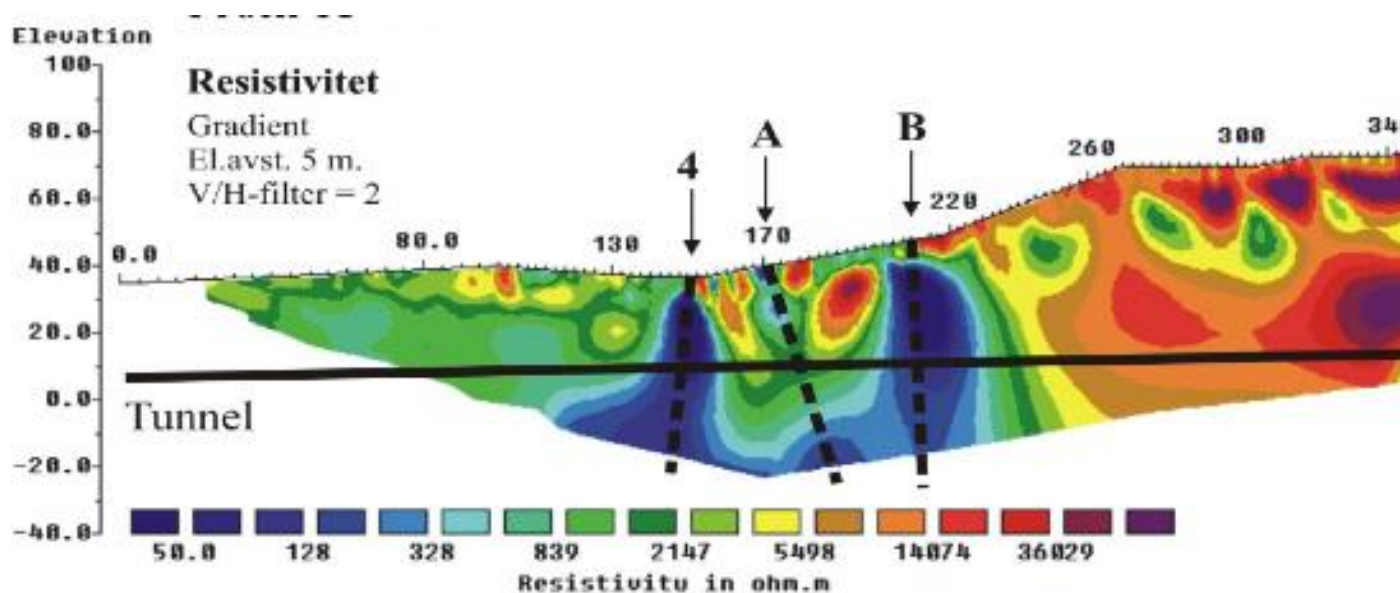


Kartlegging av svakhetssoner i berg med 2D resistivitet

Veiledning

STATENS VEGVESENS RAPPORTER

Nr. 305



Tittel

Kartlegging av svakhetssoner i berg med 2D resistivitetsmålinger

Undertittel

Veiledning

Forfatter

Norges geologiske undersøkelse

Avdeling

Vegavdelingen

Seksjon

Tunnel og betong

Prosjektnummer

600550

Rapportnummer

Nr. 305

Prosjektleder

Mona Lindstrøm

Godkjent av

Alf Kveen

Emneord

Tunnel. Forundersøkelser. Geofysikk

Sammendrag

Norges geologiske undersøkelse (NGU) og Statens vegvesen har et samarbeidsprosjekt med tema «forundersøkelser for tunneler». Denne rapporten omhandler kartlegging med 2D resistivitetsmålinger, med veiledende informasjon om utførelse og rapportering av disse undersøkelsene. Innholdet i rapporten er utarbeidet av NGU.

Title

Guidelines for the use of 2D resistivity to locate fracture zones in bedrock

Subtitle**Author**

Geological Survey of Norway

Department

Roads Department

Section

Tunnels and Concrete

Project number

600550

Report number

No. 305

Project manager

Mona Lindstrøm

Approved by

Alf Kveen

Key words

Tunnels. Geophysics.

Summary

The Geological Survey of Norway and the Norwegian Public Roads Administration are cooperating in a research programme on how to improve the quality and efficiency of geological and geophysical surveys for tunnel excavation projects. This report, by the Geological Survey of Norway, describes the use of 2D resistivity measurements to locate and characterize fractured zones in bedrock.



Forord

Dette dokumentet gir veiledende informasjon om utførelse av resistivitetmålinger for kartlegging av svakhetssoner i berg.

Veiledningen

- gir en oversikt over i hvilke geologiske miljø (på land) metoden kan benyttes
- beskriver hvordan god datakvalitet sikres, hvordan målingene bør utføres i felt, hvordan data bør prosesseres, og hvordan data bør tolkes og rapporteres.

Veiledningen bygger i stor grad på forskning og utviklingsarbeid utført ved Norges geologiske undersøkelse (NGU) og Universitetet i Lund, men også på tilsvarende veiledning for resistivitetmålinger for grunnvannskartlegging i Danmark (Geofysiksamarbeidet 2008). Veiledningen er utviklet i samarbeid med Statens vegvesen Vegdirektoratet, og har vært på høring hos:

- Hydrogeofysik-gruppen på Geologisk Institut ved Aarhus Universitet (Anders Vest Christiansen, Espen Auken)
- Avdeling for Ingeniørgeologi ved Universitetet i Lund (Torleif Dahlin)
- SINTEF Byggforsk, faggruppe Geologi og bergteknikk (Kristin H. Holmøy)
- NGI, Avdeling for Geokartlegging (Andreas Pfaffhuber)
- Rambøll Danmark (Roger Wisén).

Forundersøkelser skal utføres i henhold til Statens vegvesens håndbok N500 Vegtunneler, veiledning for undersøkelser og rapportering er gitt i håndbok V520 Tunnelveiledning. Dette dokumentet er en veiledning for en spesiell metode, resistivitetmålinger.

Veiledningen er utarbeidet for det vanligste utstyret for resistivitetmålinger i Norden i dag: Lund-kabelsystemet, multiple gradient elektrodekonfigurasjon, ABEM måleutstyr og inversjonsprogrammet Res2DInv. Andre tilsvarende systemer fra andre leverandører kan også benyttes forutsatt at utstyret er dokumentert.

Innhold

Forord.....	1
1 Innledning	3
1.1 Bakgrunn – resistivitetsmålinger i tunnelplanlegging	3
2 Forarbeid og geologiske forhold.....	4
2.1 Forarbeid.....	4
2.2 Geologiske forhold og begrensninger med metoden	5
3 Måleutstyr og tester.....	5
3.1 Test av måleinstrument	5
3.2 Test av målekabler	6
4 Utførelse av målinger i felt.....	6
4.1 Måleutstyr og metodikk.....	6
4.2 Kabelutlegg	7
4.3 Elektroder og elektrodekontakt	7
4.4 Elektrodekonfigurasjoner og elektrodeavstand.....	8
4.5 Posisjonering.....	8
5 Prosessering og presentasjon av måldata	9
6 Tolkning av måleresultater	10
7 Rapportering (prosjektrapport)	13
8 Etterarbeid.....	14
9 Referanser	15

1 Innledning

Hensikten med denne veiledningen for resistivitetsmålinger ved kartlegging av svakhetssoner i berg er å gi en beskrivelse av

- hvor metoden fungerer
- hvordan målingene bør utføres
- prosessering og visualisering av data
- tolkning av data, og
- dokumentasjon av arbeidet

Målgruppen er ingeniørgeologer som bestiller 2D resistivitetsmålinger – hvor datafangst, prosessering, tolkning og dokumentasjon er inkludert.

I kapittel 7 er innholdet i rapporteringen (prosjektrapport) fra måling av resistivitet oppsummert.

1.1 Bakgrunn – resistivitetsmålinger i tunnelplanlegging

Resistivitetsmålinger eller elektriske motstandsmålinger kartlegger den elektriske motstanden i bakken (den inverse størrelsen av elektrisk ledningsevne). 2D resistivitet for kartlegging av svakhetssoner i berg i Norge ble introdusert av Norges geologiske undersøkelse (NGU) i prosjektet «Miljø- og samfunnstjenlige tunneler» (Rønning 2003). Senere er metoden videreutviklet i samarbeid med Statens vegvesen Vegdirektoratet og Universitetet i Lund.

Resistivitetsmålinger kan gi supplerende informasjon til refraksjonsseismikk om sprekkesoners forløp mot dypet. Metoden er ikke-destruktiv og er billigere å utføre enn tradisjonelle refraksjonsseismiske målinger. Metoden kan også gi informasjon om løsmasser (type og mektighet) og bergartsgrenser. Det er utført mange målinger i felt, og modellberegninger har kartlagt muligheter og begrensninger med metoden både på land (Reiser et al. 2009) og i marine miljø (Tassis et al. 2013). Det er også foreslått en modell for mineralogisk karakterisering av sprekkesoner i berg (Rønning et al. 2009, Ganerød et al. 2010, Rønning et al. 2011) og denne er testet på flere tunnelprosjekt i Norge (Rønning et al. 2013).

2D resistivitetsmålinger for kartlegging av svakhetssoner i berg fungerer godt under gitte forutsetninger. Metoden kan påvise svakhetssoner, indikere bredde og fall, og i tillegg gi informasjon om hvor dypt sonene går (Reiser et al. 2009). Det pågår et arbeid med å sammenligne resistivitetsdata med kartleggingsdata fra ferdig bygde tunneler for å verifisere metodens muligheter og begrensninger (Rønning et al. 2016). Metoden er etter hvert etablert som et supplement til tradisjonelle refraksjonsseismiske målinger. Det kan være en fordel å benytte metoden i forkant av refraksjonsseismikk, gjerne som en «screening» av tunneltraseen.

Bruk av 2D resistivitet for påvisning og karakterisering av svakhetssoner i berg bygger på at økt oppsprekking i en sone gir økt (sekundær) porøsitet. Når sonen fylles med vann øker den

elektriske ledningsevnen, og resistiviteten reduseres sammenlignet med resistiviteten til omkringliggende berggrunn. Leire i sprekkene vil øke ledningsevnen ytterligere. Se eksempel på et tolket resistivitetsprofil i kapittel 6.

Tolkning av 2D resistivetsdata ved utbygging av anlegg i berg bygger på følgende forutsetninger:

- økt oppsprekning gir lavere resistivitet i sonene
- leiromvandling i sprekkene bidrar til lavere resistivitet og ustabile masser
- lavere resistivitet skyldes svakhetssoner og ikke elektronledende mineraler

Samtidig med resistivetsmålinger kan det utføres måling av induert polarisasjon (IP). Målingene utføres med det samme utstyret som ved resistivetsmålinger. IP-effekten måles som en restspenning i bakken etter at en strømpuls er sendt. Metoden ble opprinnelig utviklet for malmløsting (Reynolds 2011).

I forbindelse med kartlegging av svakhetssoner i berg kan IP bidra til informasjon om

- mineraliseringer av elektronledende mineraler (sulfider, jernoksider eller grafitt)
- tekniske anlegg som kan forstyrre resistivetsverdiene (Rønning et al. 2011)
- mulige gangbergarter (syenitt, diabas og lignende)
- mulig leire i sprekkene

2 Forarbeid og geologiske forhold

Før resistivetsmålinger for kartlegging av svakhetssoner i berg iverksettes, er det viktig at arbeidet planlegges godt, og at det gjøres vurderinger av muligheten for å oppnå vellykkede resultater. Regionalgeologiske vurderinger og innledende geologisk kartlegging i felt danner basis for å avklare om resistivitet er aktuell metode for prosjektet.

2.1 Forarbeid

Flere forhold må avklares før målinger igangsettes:

- Forventede svakhetssoner og sannsynlig orientering på disse ut fra en regionalgeologisk forståelse og geologisk feltkartlegging.
- Gjelder undersøkelsene kun lokalisering og karakterisering av svakhetssoner i berg, eller skal undersøkelsene inkludere andre forhold som for eksempel løsmassetykkelse? 2D resistivitet er ikke den sikreste metode for angivelse av dyp til berg, men metoden gir en god indikasjon. Dette har betydning for hvordan data prosesseres og presenteres.
- Topografi: varierende terreng kan forstyrre målte resistivetsverdier og vanskeliggjøre gjennomføringen i felt.
- Tilstedeværelse av tekniske anlegg: de fysiske forholdene på et målested kan innvirke på muligheten for å oppnå høykvalitets måledata. Forhold som påvirker datakvaliteten kan være tekniske anlegg som jernbane, metallgjerder og uisolerte elektrisk ledende objekter i bakken.
- Åpent vann: ferskvann og spesielt sjøvann i nærheten av planlagt målelinje kan påvirke resultatene.

Som hovedregel legges resistivitetslinjer langs en tunneltrasé. Dette vil fange opp svakhetssoner som krysser tunnelen mer eller mindre vinkelrett.

Der langsgående svakhetssoner kan gi problemer ved tunneldrivingen, er det aktuelt å legge målelinjer på tvers av tunneltrasé for å vurdere om soner har fall mot tunnelen (Ganerød et al. 2006).

2.2 Geologiske forhold og begrensninger med metoden

Det er visse geologiske forhold der 2D resistivitet ikke fungerer eller der metoden gir usikre resultater. Følgende må avklares før arbeider settes i gang:

- Metoden krever at kontrasten i resistivitet mellom svakhetszone og vertsbergart er større enn 1:5 (Reiser et al. 2009). Dette betyr at resistiviteten bør være høyere enn 2000 Ωm i vertsbergarten for å få en sikker identifikasjon og karakterisering av svakhetssonen. Lavere resistivitet i vertsbergarten kan gi nyttig informasjon, men påvisningen blir ikke like sikker. Informasjon om resistivitet i noen ikke-oppsprukne norske bergarter er kartlagt ved borehullslogging (Elvebakk 2011, Rønning et al. 2011).
- Bergarter som inneholder elektronledende mineraler som sulfider, oksider eller grafitt kan ha redusert resistivitet, noe som kan føre til feiltolkning. For å vurdere om mineralene er til stede i større omfang bør det måles induert polarisasjon (IP) samtidig med resistivitet.
- Modellering har vist at 5 meter med marin leire hindrer strømmen i å gå ned i berg og gir dermed en skjerming av svakhetssoner (Reiser et al. 2009). Tilsvarende kan sies om svakhetssoner i berg under sjøvann (Tassis et al. 2013).

3 Måleutstyr og tester

Moderne 2D (og 3D) resistivitetmålinger på land foretas ved bruk av en eller flere multielektrodekabler. Mest vanlig i de nordiske land er å benytte «Lund-systemet», utviklet av Torleif Dahlin (Dahlin 1993). Lund-systemet benytter 4 kabler med 21 elektroder på hver. Med felles elektrode i slutten på en kabel og starten på neste gir dette 81 elektroder totalt langs utlegget. Andre tilsvarende systemer kan benyttes.

3.1 Test av måleinstrument

Test av måleinstrumentets funksjoner skal utføres regelmessig for å kvalitetssikre måledata. Testing og kalibrering av måleutstyr skal følge dokumenterte rutiner i instrumentets brukermanual. Instrumenter med funksjonsfeil skal ikke benyttes. Funksjonstest utføres før og etter et måleoppdrag, og resultatene dokumenteres i prosjektrapporten.

3.2 Test av målekabler

Kablene kan tøyes ved gjentatt bruk. For å sikre korrekt avstand mellom elektroder måles lengden av kablene årlig. En økning bør være på maks. 1 % i forhold til original kabellengde. Dersom feilen er større må hver enkelt elektrode i et utlegg måles inn.

I multielektrodekabler kan det lett oppstå brudd i enkeltledere som gjør det vanskelig eller umulig å sende ut strøm. Moderne måleinstrumenter har egne testrutiner for å avdekke slike brudd. Slike feil kan også avdekkes ute i felt ved at det er gjentakende problemer med å sende ut strøm på en bestemt elektrode.

I multielektrodekabler kan det lett oppstå skade på enkeltledere og kontakter som igjen gir kortslutning eller kryptstrømmer slik at strøm går ut på feil elektrode(r). Moderne måleutstyr har en egen «cable isolation test» for dette. En og en kabel kobles til instrumentet og elektrodetilkoblingene holdes vekk fra hverandre og bakken under testen. Denne testen foretas før og etter et måleoppdrag.

Resultater fra kabeltestene dokumenteres i prosjektrapporten. Kabler med funksjonsfeil skal ikke benyttes.

4 Utførelse av målinger i felt

For å oppnå best mulig datakvalitet er det viktig at kablene legges ut og kobles sammen på riktig måte i henhold til valgt system (her: Lund-systemet), – at det oppnås best mulig elektrisk kontakt med bakken – og at elektrodene får korrekt posisjon. Metode for utlegg dokumenteres.

Forhold som kan ha betydning for tolkningen av måledata skal være kartlagt på forhånd. Dette kan være (se 2.1):

- blottet massivt/oppstrukket/forvitret berg
- løsmassetype (myr, tørr sand, leire, fuktige områder m.m.)
- avstand til åpent vann, ferskvann og saltvann
- tekniske anlegg som jernbane, metallgjerde o.l. og avstand til disse

Denne type data dokumenteres i prosjektrapporten.

4.1 Måleutstyr og metodikk

Forskjellig måleutstyr kan benyttes. Denne rapporten er basert på bruk av måleutstyr fra ABEM i Sverige, ABEM SAS4000/ES1064 eller ABEM Terrameter LS (ABEM 2005, ABEM 2011). Annet egnet utstyr kan benyttes ved kartlegging av svakhetssoner i berg. Hvilket utstyr som benyttes dokumenteres i prosjektrapporten.

I tillegg til å måle resistivitet, kan moderne instrumenter måle induert polarisasjon (IP) med samme kabelutlegg. Det er vanlig å sende strøm i pulser på ett eller to sekund med alternerende polaritet. Når IP måles, bør det benyttes 2 sekunders strømtid. ABEM

Terrameter LS kan måle IP i flere tidsvindu etter strømbrudd, men inversjonsprogrammet Res2DInv (se kap.5) kan pr. nå kun behandle det integrerte IP-signalet. Det er viktig at IP-målinger i flere tidsvindu tas vare på for eventuell etterprosessering med andre programsystem. Hvordan strøm sendes ut og resistivitet og IP-effekt er målt, skal dokumenteres i prosjektrapporten.

4.2 Kabelutlegg

Ved utlegg og inntak av kabler er det viktig å følge en bestemt prosedyre slik at kablene blir liggende i korrekt retning. Dette oppnås ved å legge ut alle kabler med kabeltrommel lengst ute på profilet, og at kablene tas inn i motsatt retning. Feil retning på kabler kan under måling gi negative resistivitetsverdier, og for å oppdage dette overvåkes måleprosessen. Foreløpig prosessering av måledata må foretas for å avdekke mulige feil i kabelutlegg før et område forlates.

Skjøtestykker mellom to kabler kan snus i feil retning. Dette oppdages ved at en ikke får kontakt med den aktuelle kabelen (kabel nr. 1 eller nr. 4 ved bruk av Lund-systemet). Ved andre målesystemer enn Lund-systemet må tilsvarende prosedyrer følges.

4.3 Elektroder og elektrodekontakt

Ved 2D resistivitetsmålinger der det også måles IP bør det fortrinnsvis benyttes upolariserbare elektroder for potensialmålinger og separate kabelutlegg for strømutsending og potensialmålinger. Begge disse forholdene er relativt tidkrevende. Det er mulig å oppnå akseptable måleresultater både for resistivitet og IP ved bruk av stålelektroder og felles multielektrodekabel for strøm og potensialmålinger (Dahlin et al. 2002, Dahlin & Leroux 2012 og Dahlin et al. 2013). Dette forutsetter tilstrekkelig strømstyrke (> 50 mA).

For å oppnå lavest mulig overgangsmotstand, er det viktig å benytte stålelektroder med lengde 40 – 50 cm og med diameter minst 8 mm. Korte og tynne elektroder øker overgangsmotstanden og mindre strøm kan sendes ut. Før målinger starter, utføres tester av elektrodene, kabler og koblinger for å avdekke brudd og/eller dårlig kontakt.

Ved eventuelle problemer med å få ut ønsket strømstyrke, må det gjøres tiltak for å redusere overgangsmotstanden. Tiltakene kan være:

- rense kontakter for skitt (ikke ledende materiale)
- trykke elektrodene dypere ned i bakken
- benytte flere elektroder på hvert sted
- vanne elektrodene med saltvannsløsning
- tildekke elektroder med saltvannsfuktede svamper, torv eller bentonitt
- vente med målingene til etter en nedbørsperiode

Ved måling av IP med stålelektroder skal strømstyrken være minst 50 mA. Strømstyrke og derved høyere signal/støy-forhold kan også oppnås ved kraftigere senderutstyr. Oppnådd strømstyrke skal dokumenteres i prosjektrapporten. Kontaktmotstand for samtlige elektroder dokumenteres i prosjektrapporten.

4.4 Elektrodekonfigurasjoner og elektrodeavstand

Elektrodekonfigurasjonen «Multiple gradient» foretrekkes ved kartlegging av svakhetssoner i berg.

Dette er basert på det følgende: måling av resistivitet og IP-effekt kan utføres med flere ulike elektrodekonfigurasjoner (Reynolds 2011). Modellering med 10 forskjellige konfigurasjoner på fem syntetiske modeller utført av Dahlin & Zhou (2004) anbefalte følgende konfigurasjoner ved 2D resistivitetskartlegging: multiple gradient, pol-dipol, dipol-dipol og schlumberger. Modellering utført ved NGU (Reiser et al. 2009) konkluderte med at multiple gradient og dipol-dipol fungerte best ved kartlegging av svakhetssoner i berg. Erfaringer viser at dipol-dipol ofte kan ha et lavt signal/støy-nivå, og denne konfigurasjonen er meget følsom overfor støy (Zhou & Dahlin 2003, Dahlin & Zhou 2006).

Endelig valg av konfigurasjon avhenger av forventet geologi, formålet med undersøkelsen og logistikk. Elektrodekonfigurasjonen skal sentralt ha minst 400 målepunkter pr. 100 meter profil ved 5 meter elektrodeavstand eller minst 400 målepunkter pr. 200 meter profil ved 10 meter elektrodeavstand. Valg av annen elektrodekonfigurasjon enn multiple gradient begrunnes i prosjektrapporten.

Elektrodeavstanden ved kartlegging av svakhetssoner bør være 1/3 av svakhetssonens bredde (Tassis et al. 2013). Av praktiske årsaker må dette imidlertid avveies mot måledybde. I mange situasjoner vil en elektrodeavstand på 5 meter gi en fornuftig romlig oppløsning og en brukbar dybderekkevidde (ca. 60 meter med Lund-systemet). For større dybderekkevidde må en større elektrodeavstand benyttes; 10 meter elektrodeavstand gir en dybderekkevidde på ca. 120 meter. Elektrodeavstand må ikke overstige:

- 5 meter ved kartlegging av soner med bredde ca. 5 meter, og
- 10 meter for soner som er bredere enn 10 meter.

Elektrodekonfigurasjon og elektrodeavstand skal dokumenteres i prosjektrapporten. Antall målepunkter og fordelingen av disse skal dokumenteres i prosjektrapporten.

4.5 Posisjonering

For å oppnå god datakvalitet er det viktig at elektrodene har konstant avstand, og at hele utlegget er mest mulig rettlinjet. Konstant avstand oppnås ved å strekke kablene helt ut, slik at elektrodeavstanden blir lik avstanden mellom elektrodeuttak på kablene.

Enkelte ganger er det nødvendig å gjøre en knekk på profilet på grunn av hindringer, noe som fører til endret elektrodeavstand og strømretning. Dette vil gi feil i beregnet tilsynelatende resistivitet og dermed feil i inverterte seksjoner (Zhou & Dahlin 2003). Ett enkelt profilknekk må ikke overstige 20°. Summen av flere knekkpunkter må heller ikke overstige 20°. Dersom det er nødvendig med store knekk og mange knekkpunkter, bør et profil avsluttes og et nytt profil legges ut i ny retning.

Ved sterkt varierende terrengformer vil det være umulig å oppnå konstant kjent avstand mellom elektrodene, noe som påvirker datakvaliteten. I slike tilfeller er det viktig å

bestemme korrekt posisjon til alle elektrodene. Det må gjøres notater om terrengformer som vil påvirke de beregnede resistivitetsverdiene og benytte dataene i prosesseringen.

For å vite eksakt hvor et målt profil ligger i terrenget, må viktige punkter på et profil måles inn. Et minstekrav er at start, slutt og eventuelle knekkpunkt på profilene måles inn. Punkter for hver 100 meter, eventuelt hver 200 meter, bør måles inn. Dersom terrengformene er sterkt varierende og det er mistanke om lengdefeil på kablene, må hver enkelt elektrode måles inn. Nøyaktighet i innmålte koordinater må være ned mot 0,1 m.

Metalliske rør i bakken, gjerder av metall, jernbanespor og andre elektrisk ledende gjenstander kan «stjele strøm» og i verste fall kortslutte måleopplegget. Beregnede resistivitetsverdier blir da for lave, men kontraster langs profilene kan registreres. Profilene bør ha en avstand fra slike tekniske anlegg lik dybderekkevidden for den aktuelle målingen. Ofte kan det være nødvendig å måle tettere inn til tekniske anlegg, og informasjon om anleggene noteres for bruk ved senere tolkning av resultatene. Det samme gjelder avstand til åpent vann, spesielt saltvann. Isolerte kabler i bakken påvirker ikke målingene. I mange tilfeller kan måling av IP være nyttig for påvisning av metalliske ledere i bakken som ikke er synlige fra overflaten (Rønning et al. 2011).

5 Prosessering og presentasjon av måledata

Ved 2D resistivitetsmålinger måles en tilsynelatende resistivitet som er avhengig av resistivitetsverdier og volum av kropper som faller innenfor de enkelte målingers influensvolum. For å finne en tilnærmet sann resistivitet i bakken, må måledata inverteres. Denne veiledningen er basert på inversjon ved bruk av Res2DInv, versjon 3.59 eller senere (Loke 2013, 2014).

Ved datafangsten skal hver enkelt måling med et bestemt elektrodeoppsett gjentas minst to ganger. Dersom feil på to påfølgende målinger overstiger 5 % slettes målepunktet. Det foretas også en visuell inspeksjon av alle måledata, og tydelig avvikende punkter slettes. Andel av slettede målepunkter skal dokumenteres i prosjektrapporten. Dersom totalt mer enn 10 % av alle enkeltmålinger slettes, skal årsaken kartlegges og beskrives.

Ved inversjonen med Res2DInv kan en av to inversjonsrutiner velges; Robust (L1-norm) eller Standard (L2-norm). Disse to viser i hovedsak de samme hovedstrukturene, men de avviker på detaljnivå. Robust inversjon fungerer best ved mye støy på dataene og ved store resistivitetskontraster. Metoden gir skarpere grenser mellom strukturene og er mindre følsom overfor støypunkter (Zhou & Dahlin 2003). Samtidig kan bildet få et mer «ikke-geologisk» preg av rektangulære strukturer. Standard inversjon gir et glattere bilde. Ved lite støy på måledataene er det ikke kritisk hvilken inversjonsmetode som benyttes for kartlegging av svakhetssoner i berg. Hvilken inversjonsmetode som velges skal dokumenteres i prosjektrapporten.

Topografien langs et profil innvirker på den inverterte resistiviteten og det kan korrigeres for dette med flere metoder (Loke 2013). Informasjon om dette må derfor legges inn før inversjon av måledata. Høyden over havet langs profilet kan fremskaffes ved å lese ut fra

konturene på egnet kartverk, lese ut fra egnet digital terrengmodell med et GIS-verktøy (angi cellestørrelse), og/eller å nivellere alle elektroder langs profilet i felt.

Hvordan høydeinformasjonen er hentet inn og oppløsningen i denne skal dokumenteres i prosjektrapporten. Det samme gjelder metoden som er benyttet ved terrengkorreksjonen.

Ved presentasjonen av inverterte data med Res2DInv kan det benyttes filtre som fremhever vertikale eller horisontale strukturer (V/H-filtre). Modelleringer har vist at et V/H-filter på 2 kan benyttes ved vertikale svakhetssoner (Reiser et al. 2009). Fallsonene 45 grader eller mindre kan horisontale strukturer favoriseres (V/H-filter lik 0,5). Det kan også velges flere dempningsfaktorer. Anbefalinger er gitt i manualen (Loke 2013). Hvilke V/H-filtre og dempningsfaktorer som benyttes skal dokumenteres i prosjektrapporten.

Inverterte resistivetsdata fremstilles vanligvis som fargekodete profiler i to dimensjoner. Ved valg av fargeskala skal det legges vekt på god oppløsning for resistivetsverdier fra resistiviteten i ikke-oppsprukket vertsbergart og en dekode ned. Eksempel: når resistiviteten i vertsbergarten er 5000 Ωm skal det gis en god oppløsning ned til 500 Ωm . Fargekodene følger en logaritmisk fordeling. Eventuelle avvik fra dette må begrunnes i prosjektrapporten.

Som en standard plottes profiler fra vest mot øst eller fra sør mot nord. Retning vises på kart og profil, og planlagt tunneltrasé tegnes inn i profilet. I tilfeller der det er målt flere profiler i et måleområde bør data visualiseres i pseudo 3D-seksjoner eller som «fence diagram». Det benyttes samme fargeskala på samtlige profiler både for 2D resistivitet og induert polarisasjon (IP).

6 Tolkning av måleresultater

Tilgjengelig geologisk informasjon skal benyttes i tolkningen av resistivetsprofiler. Lokalisering av svakhetssoner angis i UTM-koordinater (UTM-sone og datum). Sonenes bredde, fall og dyptgående angis kvalitativt (klassifiseres i klasse 0–4). Klassifiseringen kan variere fra område til område, men graderingen skal dokumenteres. Tabell 1 viser eksempel på slik gradering og tabell 2 viser eksempel på karakterisering.

Sonenes fall klassifiseres som følger:

- Steil: vertikal $\pm 10^\circ$
- Moderat: fall mellom 60° og 80°
- Slak: mindre enn 60°

Tabell 1 Eksempel på klassifisering av soner. Sonene er indikert ved hjelp av 2D resistivitet og er klassifisert i en klasse 0-4 for sonens dybde (A), bredde (B) og resistivitet (C)

A Dybde på sone	B Bredde på sone	C Resistivitet i sone	Klasse
-	-	> 2000 Ω m	0
0 – 20 m	0 – 10 m	2000 - 1000 Ω m	1
20 – 40 m	10 – 20 m	1000 - 500 Ω m	2
40 - 60 m	20 – 40 m	500 - 200 Ω m	3
> 60 m	> 40 m	< 200 Ω m	4

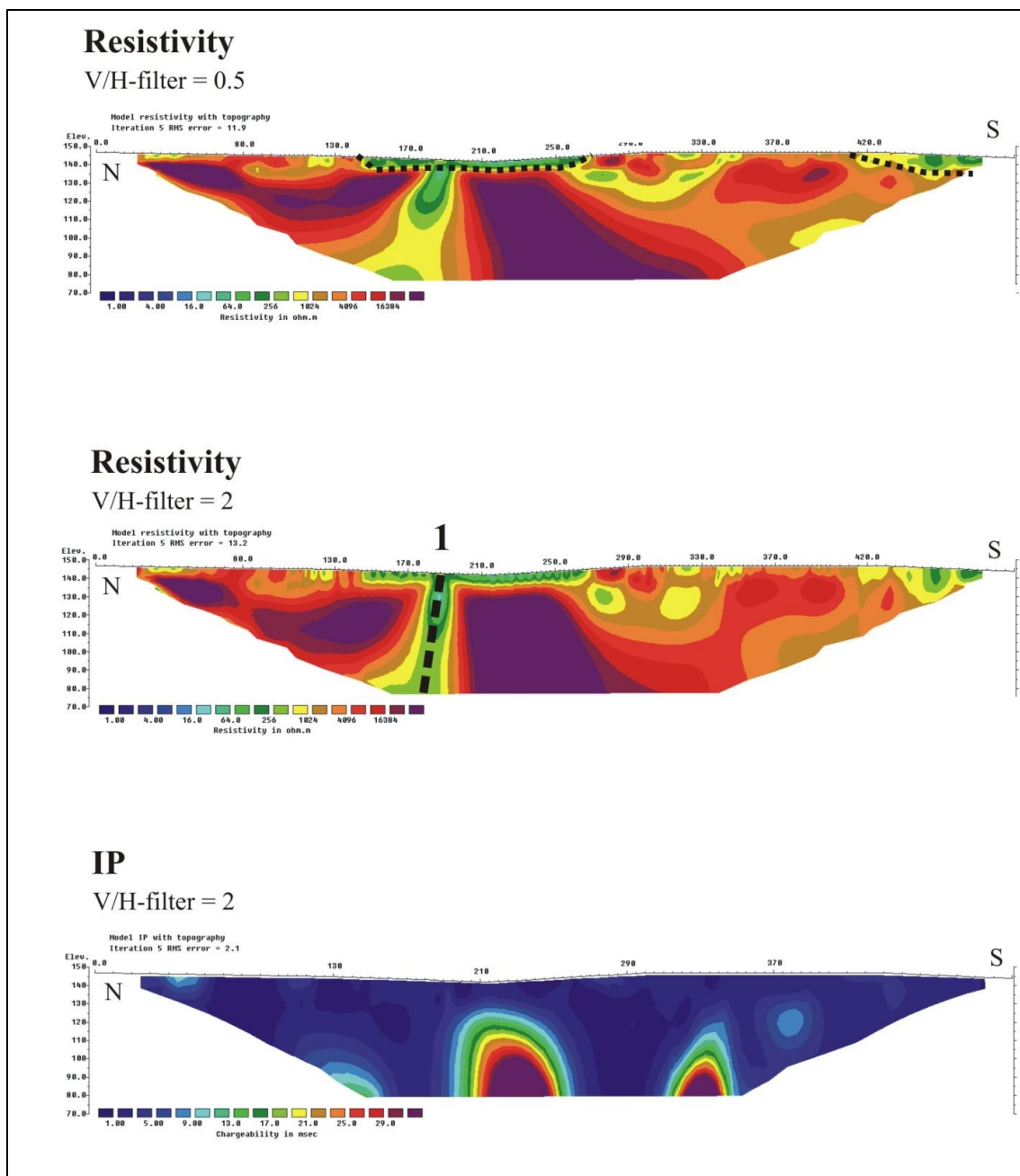
Tabell 2 Eksempel på karakterisering av soner. Sonene er indikert ved hjelp av 2D resistivitet og er klassifisert i en klasse 0-4 (iht. tabell 1) for sonens dybde (A), bredde (B) og resistivitet (C).

Koordinat langs profilet (m)	Sone	Øst-koord. WGS-84 UTM sone 33	Nord-koord. WGS-84 UTM sone 33	Fall-retning	A Dybde (klasse)	B Bredde (klasse)	C Resistivitet (klasse)	Tolkning/kommentar
Pel-nr. (eksempel)	1	562589	7653387	Steilt mot SØ	4	2	1	Sulfider?
Pel-nr. (eksempel)	2	562673	7653317	Steilt mot NV	4	1	3	

NGU har foreslått en tolkningsmodell som gjør en mineralogisk karakterisering av svakhetssoner med henblikk på rene vannførende sprekker, og soner med leiromvandling og mulige stabilitetsproblemer (Rønning et al. 2009, Ganerød et al. 2010, Rønning et al. 2011). Modellen er under uttesting, men ser så langt ut til å være gyldig (Rønning et al. 2013). For å videreføre uttestingen karakteriseres svakhetssoner i henhold til denne modellen på følgende måte:

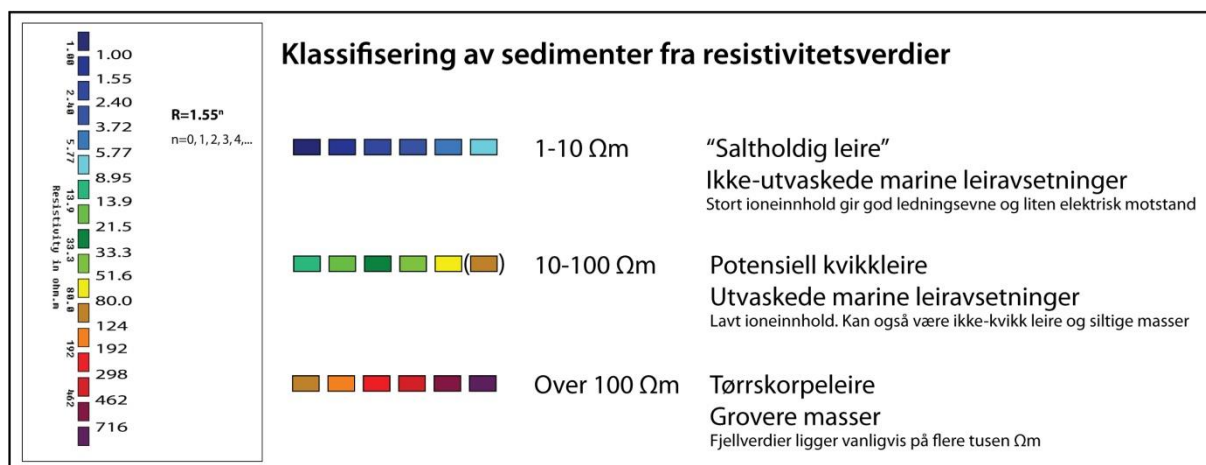
- Krystalline bergarter med resistivitet høyere enn 3000 Ω m vurderes som stabilt berg uten spesielle vannproblemer.
- Svakhetssoner med resistivitet mellom 3000 og 500 Ω m kan være oppsprukket berg med vann.
- Resistivitet lavere enn 500 Ω m i sonen kan representere oppsprukket berg med leire i sprekken som kan forårsake ustabilitet.

Eksempel på tolket resistivitets- og IP-profil er vist i figur 1. Profilet er målt med gradient elektrodekonfigurasjon og elektrodeavstand 5 meter. Planlagte tunneltraseer er ikke vist i profilene.



Figur 1: Eksempel på tolket resistivitets- og IP-profil. **Øverst:** standard inversjon (L2-norm) av resistivitetsdata med V/H filter lik 0,5 for å fremheve løsmassemekthet som tolkes til ca. 5 meter (sort prikket linje). **I midten:** standard inversjon med V/H filter 2 som gir en klarere respons på en svakhetsone (sort stiplet linje). Sonen faller steilt mot nord, går dypere enn metodens dybderekkevidde på ca. 60 meter og er ca. 15 meter bred. En tilsynelatende økt bredde av sonen mot dypet er en kunstig effekt (se Reiser et al. 2009). **Nederst:** standard inversjon av induert polarisasjon (IP) som sier at det ikke er sulfider, oksider eller grafitt eller tekniske anlegg som gir lav resistivitet ved den indikerte svakhetssonen (fra Rønning et al. 2011).

I mange tilfeller er det aktuelt å tolke løsmassemektighet og -type ut fra resistivitetsdata, se eksempel i figur 2. Det er utarbeidet en egen veileder for bruk av resistivitetsmålinger i potensielle kvikkleireområder (Solberg et al. 2011). Ved karakterisering av leire bør denne veilederen benyttes.



Figur 2 Eksempel på klassifisering av løsmasser ut fra resistivitetsverdi, angitt med standard NGU fargeskala (fra Solberg et al. 2011).

Tolkningsmodell og referanse til originalpublikasjon hvor modellen er hentet fra, oppgis i prosjektrapporten.

7 Rapportering (prosjektrapport)

For å oppnå god dokumentasjon av oppnådde resultater som lett kan vurderes, er det viktig at rapporteringen er standardisert. En prosjektrapport skal derfor inneholde dokumentasjon av det følgende

Sikring av datakvalitet

- Testing av kabellengder, når og med hvilket resultat.
- Testing av kabelbrudd, når og resultat.
- Testing av strømlekkasje i kabler, når og resultat.
- Funksjonstest av måleinstrument, når og resultat.

Målinger i felt

- Benyttet måleutstyr, strømforløp og måletider for resistivitet og ev. IP.
- Benyttet kabelsystem og antall elektroder.
- Benyttet elektrodekonfigurasjon og -avstand.
- Total lengde på profilene og dybderekkevidde.
- Totalt antall måleverdier i profilene.
- Kontaktmotstand ved elektrodene, om mulig.
- Oppnådd strømstyrke, maksimum og minimum.

- Innmåling av profilene, metode og nøyaktighet.
- Observerte geologiske forhold langs profilene.

Prosessering av måledata

- Datakvalitet, antall negative måleverdier og andel punkter slettet før inversjon.
- Hvordan er informasjon om høyder langs profilene hentet inn, nøyaktighet.
- Benyttet inversjonsprogram med versjonsnummer (f.eks. Res2DInv ver. 3.59).
- Benyttet inversjonsrutine, Robust eller Standard (L1 – eller L2-norm).
- Antall «iterasjoner» og absolutt feil (%) ved modelltilpasning.
- Benyttede V/H-filtre og dempningsfaktorer (iht. Loke 2013).
- Dokumentasjon av kvalitet ved bruk av andre inversjonsprogram enn Res2DInv.

Tolkning av prosesserte data

- Posisjon av påviste svakhetssoner dokumenteres i tabell.
- Fallretning angis kvalitativt (se kap. 6).
- Dybderekkevidde, bredde og resistivitetsnivå i sone klassifiseres.
- Klassifikasjonssystem for dybde, bredde og resistivitet (jf. kap. 6).
- Observerte forhold i terrenget som har betydning for tolkningen av måledata.
- Tolket løsmassetykkelser og -typer.
- Anvendte tolkningsmodeller dokumenteres med referanse til originalpublikasjon.

Dataveranse

- Alle tolkninger sammenstilles digitalt og overleveres oppdragsgiver i egnet (bestilt) standard for videre bruk i GIS-systemer.
- Hvert resistivetsprofil skal vise aktuelle pelnummer, retningsbeskrivelse og riktig topografi for enkel sammenligning med geologiske kartleggingsdata m.m. Tolkede soner tegnes/ stiples inn i profilene. Planlagt tunneltrasé tegnes inn i profilene.
- Alle måledata overleveres eller oppbevares hos geofysisk entreprenør iht. kontrakt, for ev. senere bruk eller behandling.

8 Etterarbeid

Erfaring har vist at det er viktig at resultater fra en undersøkelse diskuteres underveis, som en del av rapporteringen. Geofysisk entreprenør og utbygger med samarbeidspartnere bør gjennomgå følgende temaer:

- Svarer rapporten på de oppgaver som skulle undersøkes.
- Eventuelle usikkerheter i måledata og mulige årsaker.
- Er det påvist spesielle forhold utbygger må være oppmerksom på.
- Er det forhold som kan gi problemer ved byggingen som ikke lar seg påvise.
- Eventuelle behov for tilleggsundersøkelser.

9 Referanser

- ABEM 2005: Terrameter SAS 4000 / SAS 1000. Instruction manual. ABEM Printed Matter No 93109.
- ABEM 2011: Terrameter LS. Instruction manual. ABEM 20110130.
- Dahlin, T. 1993: On the Automation of 2D Resistivity Surveying for Engineering and Environmental Applications. Dr. Thesis, Department of Engineering Geology, Lund Institute of Technology, Lund University. ISBN 91-628-1032-4.
- Dahlin, T., Leroux, V. & Nissen, J. 2002: Measuring techniques in induced polarization imaging. *Journal of Applied Geophysics* 50, pp. 279–298.
- Dahlin, T. & Zhou, B. 2004: A numerical comparison of 2D resistivity imaging with 10 electrode arrays. *Geophysical Prospecting* Vol 52, Issue 5, pp. 379 – 398. DOI: 10.1111/j.1365-2478.2004.00423.x
- Dahlin, T & Zhou, B. 2006: Multiple-Gradient array measurements for multichannel 2D resistivity imaging. *Near Surface Geophysics*, pp. 113 – 123.
- Dahlin T. & Leroux, V. 2012: Improvement in the time-domain induced polarization data quality with multi-electrode systems by separating current and potential cables. *Near Surface Geophysics* no. 6, pp. 545 – 565.
- Dahlin, T., Sundström, T. & Dalsegg, E. 2013: Data Quality Quantification for Time domain IP Data Acquired along a Planned Tunnel near Oslo, Norway. In *Proceedings: Near Surface Geoscience Bochum, Germany, 9–11 September, 2013*, 4p.
- Elvebakk, H. 2011: Sammenstilling av resistivitet, seismisk hastighet og naturlig gammastråling i norske bergarter. NGU rapport 2011.042.
http://www.ngu.no/upload/Publikasjoner/Rapporter/2011/2011_042.pdf
- Ganerød, G.V., Rønning, J.S., Dalsegg, E., Elvebakk, E., Holmøy, K., Nilsen, B. & Braathen A. 2006: Comparison of geophysical methods for sub-surface mapping of faults and fracture zones in a section of the Viggja road tunnel, Norway. *Bill. Eng. Geol, Env.* 65: pp. 231 – 243. DOI 10.1007/s10064-006-0041-6.
- Ganerød, G.V, Dalsegg, E., Olesen, O., Rønning, J.S., Saintot, A. & Tønnesen, J.F. 2010: Kartlegging av svakhetssoner i fjell; Eksempler fra tunnelprosjektene Eikrem (SVV) og Holmestrand (JBV). *Fjellsprengningsteknikk/Bergmekanikk/Geoteknikk 2010*. Artikkel 30.
- Geofysiksamarbeidet 2008: Vejledning og kravspesifikasjon for MEP-målinger. Geofysisk Afdeling, Geologisk Institut, Aarhus Universitet. <http://gfs.au.dk/standarder/mep/>
- Loke, M.H. 2013: RES2DInv ver. 3.59. Geoelectrical Imaging 2D & 3D. Instruction manual. <http://www.geoelectrical.com>
- Loke, M.H. 2014: RES2DInv x64 ver. 4.03.32. Geoelectrical Imaging 2D & 3D. Instruction manual. <http://www.geoelectrical.com>
- Reiser, F., Dalsegg, E., Dahlin, T., Ganerød, G.V. & Rønning, J.S. 2009: Resistivity Modelling of Fracture Zones and Horizontal Layers in Bedrock. NGU Report 2009.070.
http://www.ngu.no/upload/Publikasjoner/Rapporter/2009/2009_070.pdf

- Reynolds, J.M. 2011: An introduction to applied and environmental geophysics. 2nd Edition, John Wiley and Sons, Inc, England
- Rønning, J.S. 2003: Miljø- og samfunnstjenlige tunneler. Sluttrapport delprosjekt A, Forundersøkelser. Statens vegvesen, Publikasjon nr. 102.
- Rønning, J.S., Dalsegg, E., Elvebakk, H., Ganerød, G.V. & Heincke, B.H. 2009: Characterisation of fracture zones in bedrock using 2D resistivity. Proceedings from 5th Seminar on Strait Crossings, Trondheim, June 21 – 24 2009, pp. 439 – 444 (SINTEF/NTNU).
- Rønning, J.S., Dalsegg, E., Elvebakk, H., de Beer, H., Ganerød, G.V., Gundersen, P. & Reiser, F. 2011: Forbedrede forundersøkelser for tunneler – Oppsummering av et samarbeidsprosjekt med Vegdirektoratet. Fjellsprengningsteknikk/Bergmekanikk/Geoteknikk 2011, Artikkel 25, 19 s.
- Rønning, J.S., Ganerød, G.V., Dalsegg, E. & Reiser, F. 2013: Resistivity mapping as a tool for identification and characterisation of weakness zones in bedrock – definition and testing of an interpretational model. Bull. Eng. Geol. Environment, DOI: 10.1007/s10064-013-0555-7.
- Rønning, J.S., Tassis, G., Kirkeby, T. & Wåle, M. 2016: Retolkning av geofysiske data og sammenligning med resultater fra tunneldriving, Knappetunnelen ved Ringveg Vest i Bergen. NGU rapport 2016.048.
http://www.ngu.no/upload/Publikasjoner/Rapporter/2016/2016_048.pdf
- Solberg, I.L., Hansen, L., Rønning, J.S. & Dalsegg, E. 2011: Veileder for bruk av resistivitetmålinger i potensielle kvikkleireområder. Versjon 1.0. NGU rapport 2010.048
http://www.ngu.no/upload/Publikasjoner/Rapporter/2010/2010_048.pdf
- Statens vegvesen håndbok N500 Vegtunneler. Vegdirektoratet 2016.
- Statens vegvesen håndbok V520 Tunnelveiledning. Vegdirektoratet 2016.
- Tassis, G., Dalsegg, E., Rønning, J.S & Tsourlos, P. 2013: Detection and characterisation of fracture zones in marine environment. NGU Report 2013.017.
http://www.ngu.no/upload/Publikasjoner/Rapporter/2013/2013_017.pdf
- Zhou, B. & Dahlin, T. 2003: Properties and effects of measurement errors on 2D resistivity imaging surveying. Near Surface Geophysics, pp. 105–117.



Statens vegvesen
Vegdirektoratet
Publikasjonsekspedisjonen
Postboks 8142 Dep 0033 OSLO
Tlf: (+47) 22073000
publvd@vegvesen.no

ISSN: 1893-1162

vegvesen.no

Trygt fram sammen