

MILJØ- OG SAMFUNNSTJENLIGE TUNNELER

Rapport nr: **12**

Forundersøkelser tunneler Nyere undersøkelsesmetoder



A



Intern rapport nr. 2273



Statens vegvesen

Miljø- og samfunnstjenlige tunneler.

Rapport nr. 12

Forundersøkelser tunneler. Nyere undersøkelsesmetoder.

Sammendrag

I forbindelse med NFR-prosjektet "Miljø- og samfunnstjenlige tunneler" er nye teknikker ved forundersøkelser utprøvd. Sommeren 2001 ble det foretatt 2D resistivitetsskartlegging over planlagt tunnel ved Gualia, Lunner kommune. Samme høst ble det boret 4 brønner, og disse ble logget med bl.a. optisk televiewer. I forbindelse med prøvepumping av brønnene ble vanngiverevne (lekkasjepotensiale) i forskjellige deler av borehullene kartlagt ved hjelp av målesonde for vannstrømning. Detaljerte resultater er beskrevet i tidligere rapporter (Miljø- og samfunnstjenlige tunneler, rapport nr. 7 og 8).

Under NIF Kursdagene 2002, "Injeksjon av tunneler og bergrom" ble erfaringene fra de nevnte undersøkelser presentert. Forliggende rapport beskriver innholdet i foredraget. Metodene "2D resistivitet" og "optisk televiewer" blir kort presentert og det gis eksempler på resultater. Oppfølgende geofysiske, hydrogeologiske og ingeniørgeologiske undersøkelser er også beskrevet.

Rapporten er utarbeidet ved Norges geologiske undersøkelse av Jan Steinar Rønning.

Emneord: Tunnel, forundersøkelser, geofysikk, resistivitet, optisk televiewer, prøvepumping, NFR-prosjekt.

Jan Steinar Rønning, Programleder NGU, 7491 Trondheim..

Foredrag NIF Kursdagene 2002, INJEKSJON AV TUNNELER OG BERGROM.

Forundersøkelser tunneler. Nyere undersøkelsesmetoder.

Jan Steinar Rønning, Programleder NGU, 7491 Trondheim..

INNLEDNING.

Som et resultat av de problemene som ble avdekket ved driften av Romeriksporten, ble det i ettertid fokusert på forbedring av tunnelarbeider. I løpet av 1999 ble det gjennomført et forprosjekt som hadde som mål å definere et prosjekt som skulle fremmes overfor forskningsrådet, "Miljø- og samfunnstjenlige tunneler". Det ble foreslått et 4-delt prosjekt som gikk på forundersøkelser, miljøpåvirkning, tetting og organisering.

Gjennom forprosjektet ble det i samarbeid med de største geofysiske miljøene i Norge utarbeidet en oversikt over aktuelle metoder, deres informasjonspotensiale og hvor mye de ble benyttet ved tunnelarbeider. Ut fra denne analysen ble det valgt 6 geofysiske tema som burde være med i prosjektfasen: Helikoptermålinger, Retolking av refraksjonsseismikk, Seismisk tomografi, Elektrisk tomografi, Georadar i borehull og Inspeksjon av borehull. Det ble utarbeidet kortfattede prosjektforslag på disse tema, men dessverre var det ikke mulig å få finansiering fra Forskningsrådet. I stedet ble det reist finansiering fra Vegdirektoratet, Jernbaneverket, Samferdselsetaten i Oslo og enkelte entreprenører slik at et redusert prosjekt kunne startes i løpet av 2000 (Statens Vegvesen 2001). En reorganisering av forundersøkelsene i prosjektet ble fortatt tidlig i 2001, og dette resulterte i en objektrettet vinkling men hvor de fleste tema nevnt tidligere var med.

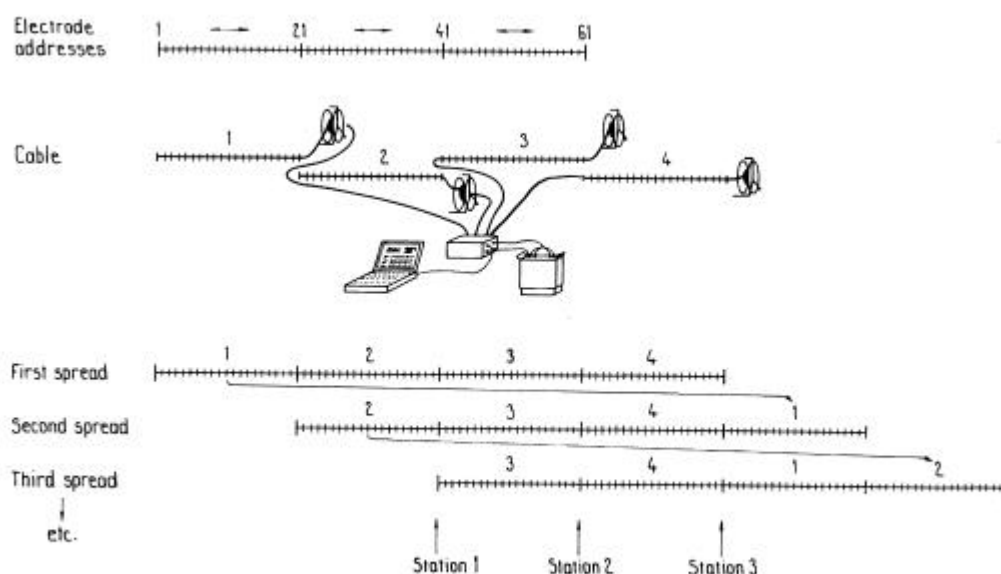
Gjennom forprosjektet fikk NGU, med støtte fra Forskningsrådet, testet forskjellige teknikker for inspeksjon av borehull (optisk og akustisk televiewer), og dette resulterte i anskaffelse av optisk televiewer (OPTV) i 2000. Resultater fra uttestingen av de forskjellige teknikkene er fremstilt i egen rapport (Elvebakk og Rønning 2001). Høsten 2000 ble det gjennomført et nordisk forskerkurs ved Universitetet i Oslo. Her bidro den Tekniske Høgskolen i Lund med 2D resistivitetsmålinger langs et profil over Romeriksporten. Disse målingene ga meget interessante resultater (se bl.a. Nordgulen og Rønning 2000), og den samme teknikken ble benyttet sist sommer ved undersøkelser over en ny tunnel ved Gualia i Lunner kommune (Rønning og Dalsegg 2001). Det foreliggende dokument beskriver de to aktuelle undersøkelsesteknikkene, og viser eksempler på oppnådde resultater.

METODEBESKRIVELSE 2D RESISTIVITET.

Det er tidligere gjort forsøk med resistivitetsmålinger over svakhetssoner i Norge både av forskningsmiljøene og av konsulenter (se bl.a. Rønning 1985). Felles for disse var at det ble benyttet en elektrodekonfigurasjon, og en var ikke i stand til å tolke hvor mye av de kartlagte effekter som skyldtes oppsprukket fjell, og hvor mye som var effekt av løsmasseoverdekket. I ettertid er det utviklet teknikker som effektiviserer datainnsamlingen (bl.a. LUND-systemet, Dahlin 1993), og nye rutiner for inversjon av data (Loke 2001). 2D resistivitet er hittil benyttet ved 2 anledninger ved kartlegging av svakhetssoner i Norge, over Romeriksporten og ved Gualia. I det følgende blir undersøkelsen ved den ca. 3,8 km lange tunnelen ved Gualia benyttet som eksempel.

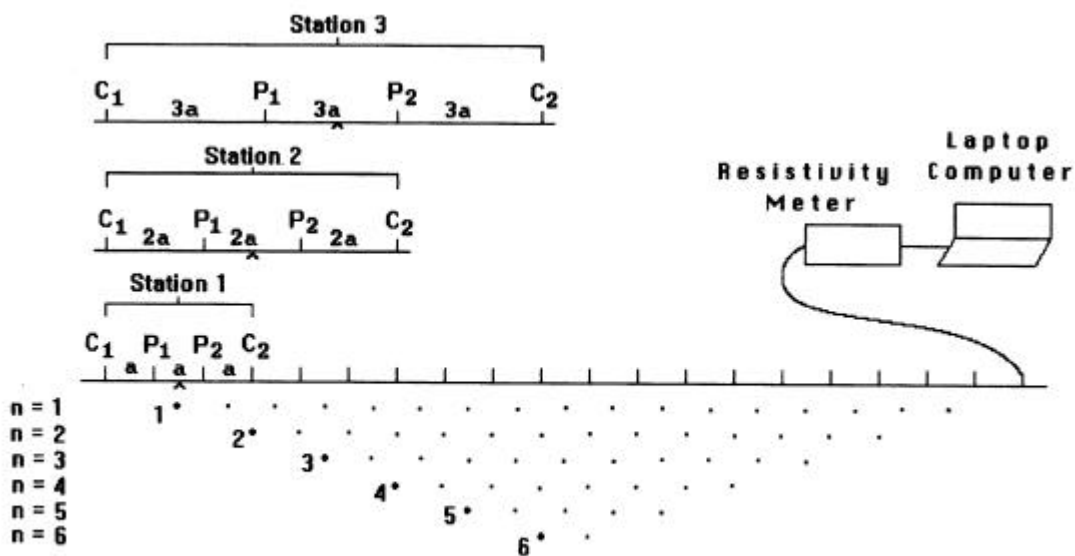
Datainnsamling.

Resistivitetsmålinger (elektriske motstandsmålinger) i 2 dimensjoner kan utføres med et system der kabler legges ut på bakken og elektroder knyttes til (Figur 1). Når alt er etablert, kan en PC-styrt måleprosess begynne. Forskjellige elektrodepar kobles inn som strøm- og potensialelektroder etter et fastsatt mønster. Ved å øke avstanden mellom strømelektroden, vil strømmen trenge dypere, og en får respons fra dypere områder (dybdesondering). Ved å flytte elektrodesettet til side oppnås en lateral kartlegging (profilering). Til sammen gir dette en todimensjonal (2D) kartlegging av resistiviteten i bakken.



Figur 1: Prinsippskisse av kabelsystem bestående av kabler med elektroder, bryterboks, måleutstyr og PC (fra Dahlin 1993).

Når måleprosessen er avsluttet, kan en pseudoseksjon av måledata konstrueres som vist i figur 2. Målt tilsynelatende resistivitet med en målekonfigurasjon plottes i et gitt dyp mellom de to potensialelektroden. Når strømelektrodeavstanden øker, flyttes plottepunktet ett nivå ned. Dette gir et bilde av fordelingen av tilsynelatende resistivitet i et fiktivt dyp, en pseudoseksjon.



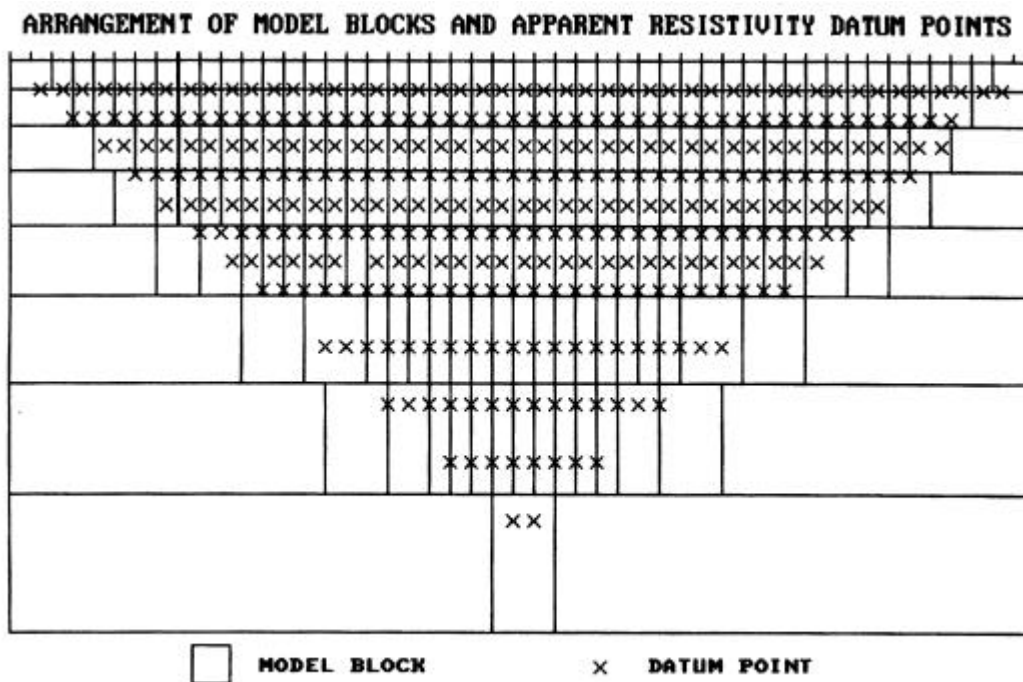
Figur 2: Konstruksjon av pseudoseksjon. C1 og C2 angir strømelektroder, P1 og P2 potensialelektroder. N angir multipler av minste elektrodeavstand.

Ved undersøkelsen ved Gualia ble LUND-systemet med 8 aktive kabler benyttet, alle med lengde 100 meter slik at utlegget ble totalt 800 meter. Sentralt i utlegget (de 4 kablene i midten) ble det benyttet en elektrodeavstand på 10 meter. I utleggets perifere deler (ytterste 200 meter til hver side) var elektrodeavstanden 20 meter. Selve målingene, som ble styrt av en PC, ble foretatt med en kombinasjon av Wenner og Schlumberger elektrodekonfigurasjon. For hver 100 meter langs profilet ble det foretatt 190 målinger med forskjellige elektrodekonfigurasjoner. Ved å utnytte dette utlegget maksimalt kan en kartlegge resistiviteten ned til ca 120 meters dyp. Størst oppløsning oppnås i de øverste 50 – 60 metrene.

Inversjon.

Ved alle resistivitetsmålinger måles en tilsynelatende resistivitet. Denne representerer et veid middel av alle resistiviteter som er innenfor målingens influensområde. For å finne den spesifikke resistivitet i ulike deler av undergrunnen må data inverteres. Dette utføres ved at undergrunnen deles opp i blokker som tilordnes en bestemt resistivitetsverdi. Denne blir så justert i flere trinn (iterasjoner) inntil responsen (pseudoseksjonen) fra den teoretiske modellen blir mest mulig lik pseudoseksjonen fra de målte data.

Resistivitetsmålingene ble invertert ved bruk av dataprogrammet RES2DINV (Loke 2001). Datakvaliteten må karakteriseres som meget god, men et fåtall måleverdier som så ut til å være feil ble tatt ut av datasettet før inversjonen av data startet. Det ble gjort forsøk med forskjellige inversjonsmetoder (Least Square og Robust) og det ble eksperimentert med forskjellige inversjonsparametre, dempningsfaktorer og forskjellige filtre som favoriserte vertikale strukturer. Dette ga ikke noen endringer i hovedtrekkene i de inverterte profilene, men mindre avvik i detaljer.



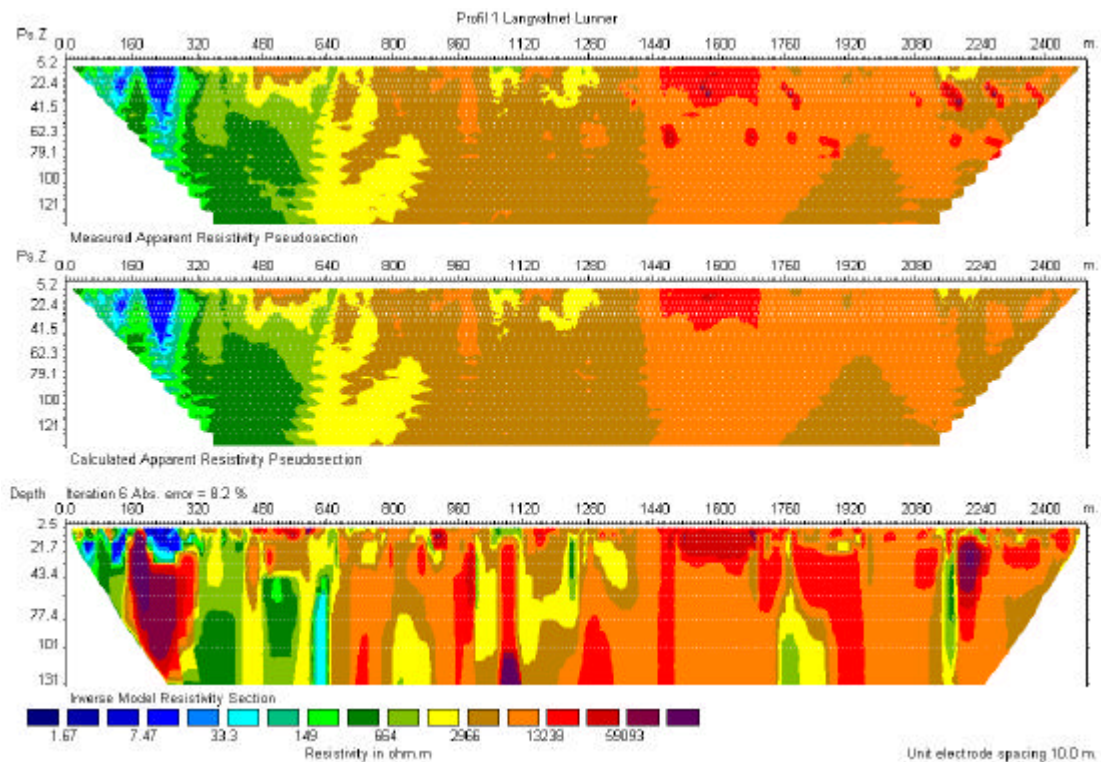
Figur 3: Oppdeling av bakken i blokker og tilordning av målte verdier av tilsynelatende resistivitet.

Resultater.

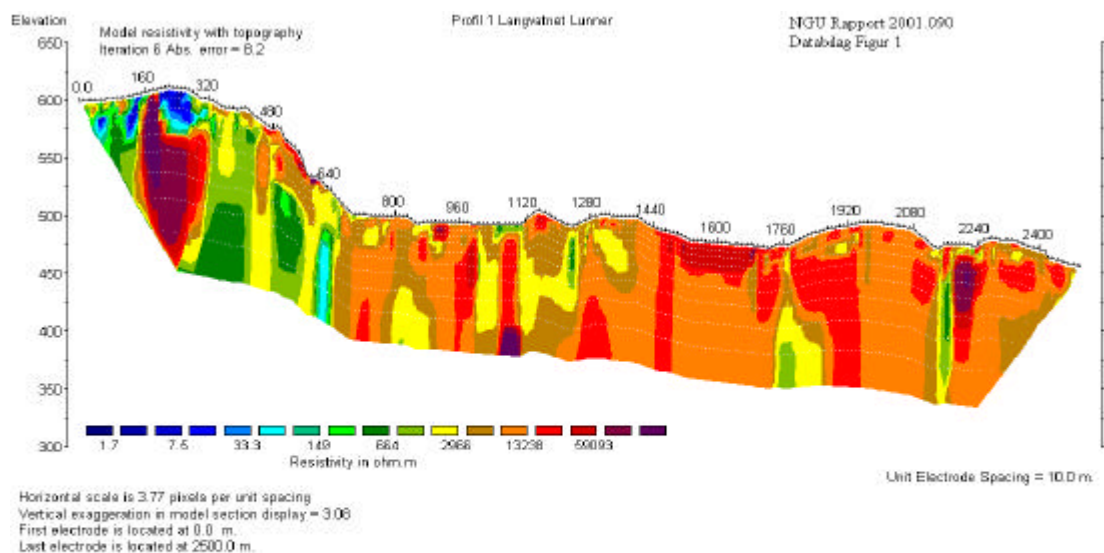
Figur 4 viser resultater fra et profil målt mer eller mindre langs den planlagte tunneltraséen ved Gualia i Lunner kommune. Øverste del av figuren viser pseudoseksjonen av de målte data. Denne viser store variasjoner i måleverdi, men en kan ikke indikere noen klare svakhetssoner. Lavere tilsynelatende resistivitet i starten av profilet (mot vest) representerer kambrosilursk hornfels. Fra ca koordinat 600 og østover er Oslofeltets bergarter (syenitt og noe vulkanitter) representert ved jevnt over høyere tilsynelatende resistivitet.

Det inverterte bildet av spesifikk ("sann") resistivitet nederst viser langt flere detaljer. Her ser en klart soner med redusert resistivitet som strekker seg mot dypet. Pseudoseksjonen av denne modellen, vist i midten, er til forveksling lik pseudoseksjonen av de målte data. Dette viser at modelltilpasningen har vært relativt vellykket.

Figur 5 viser det inverterte profilet fra Gualia med terrengkorreksjon. Legg merke til at enkelte soner går til bunns i plottet, mens andre synes å kile ut på et grunnere nivå. På grunnlag av oppnådde resultater og plasseringen av tunnelen, ble det foreslått boring mot svakhetssoner ved koordinatene 640, 1760 og 2160. For at disse boringene skulle ha verdi for tunnelarbeidet, ble boringen ved koordinat 640 trukket inn mot tunneltraséen ca 400 meter mot sør. Langs profilet er det også påvist lange strekk med til dels meget høy resistivitet. Dette kan indikere problemfrie bergarter, men først ved tunneldrivingen får en svar på dette.



Figur 4: Eksempel på 2D resistivitetsdata fra Grualia, Lunner kommune. Øverst pseudoseksjon av målte data, i midten pseudoseksjon av modellerte data og nederst selve modellen.



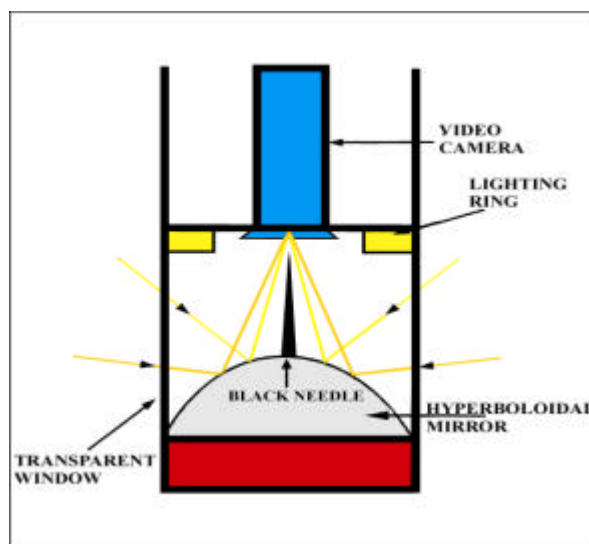
Figur 5: Invertert modell fra Grualia med terrengkorreksjon. Soner med lav resistivitet faller sammen med depresjoner i terrenget og tidligere geologisk kartlegging (Rønning og Dalsegg 2001).

METODEBESKRIVELSE OPTISK TELEVIEWER (OPTV)

I det følgende blir måleprinsipp for optisk televiewer beskrevet. Analyse av data blir illustrert ved eksempler fra borehull som er boret på grunnlag av resultater fra 2D resistivitetsmålinger ved Gualia.

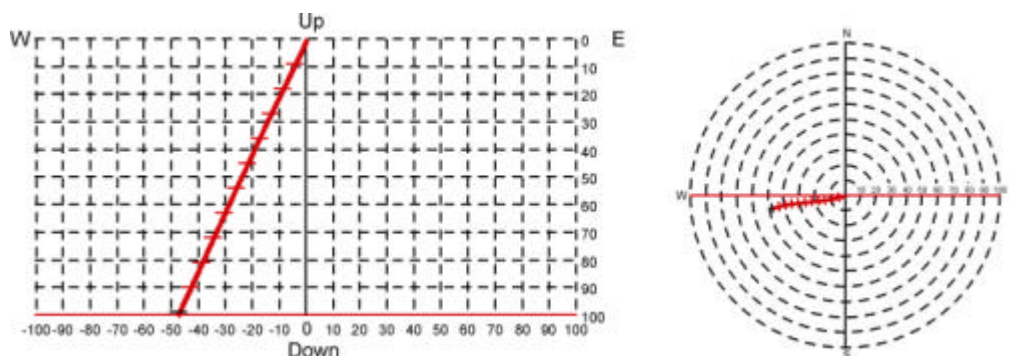
Måleprinsipp og utførelse.

Optisk televiewer består av et digitalt kamera som filmer mot et hyperbolsk eller konvex speil. Kameraet "ser" vinkelrett en større del av borehullsveggen, men bare en sirkel med høyde 1 mm registreres. Sonden senkes med en maksimal hastighet 1 meter pr minutt ned i borehullet, og for hver millimeter gjøres en registrering. Det kan samples 360 eller 720 punkter sirkelen rundt, og i vanlige fjellbrønner gir dette en pikselstørrelse på ca. 1mm x 1 mm. Med en slik oppløsning kan metoden påvise sprekker med tykkelse ned mot 0,5 mm. Metoden kan benyttes i tørre og vannfylte hull, men krever selvsagt relativt klart vann.



Figur 6: Prinsipp-skisse av optisk televiewer.

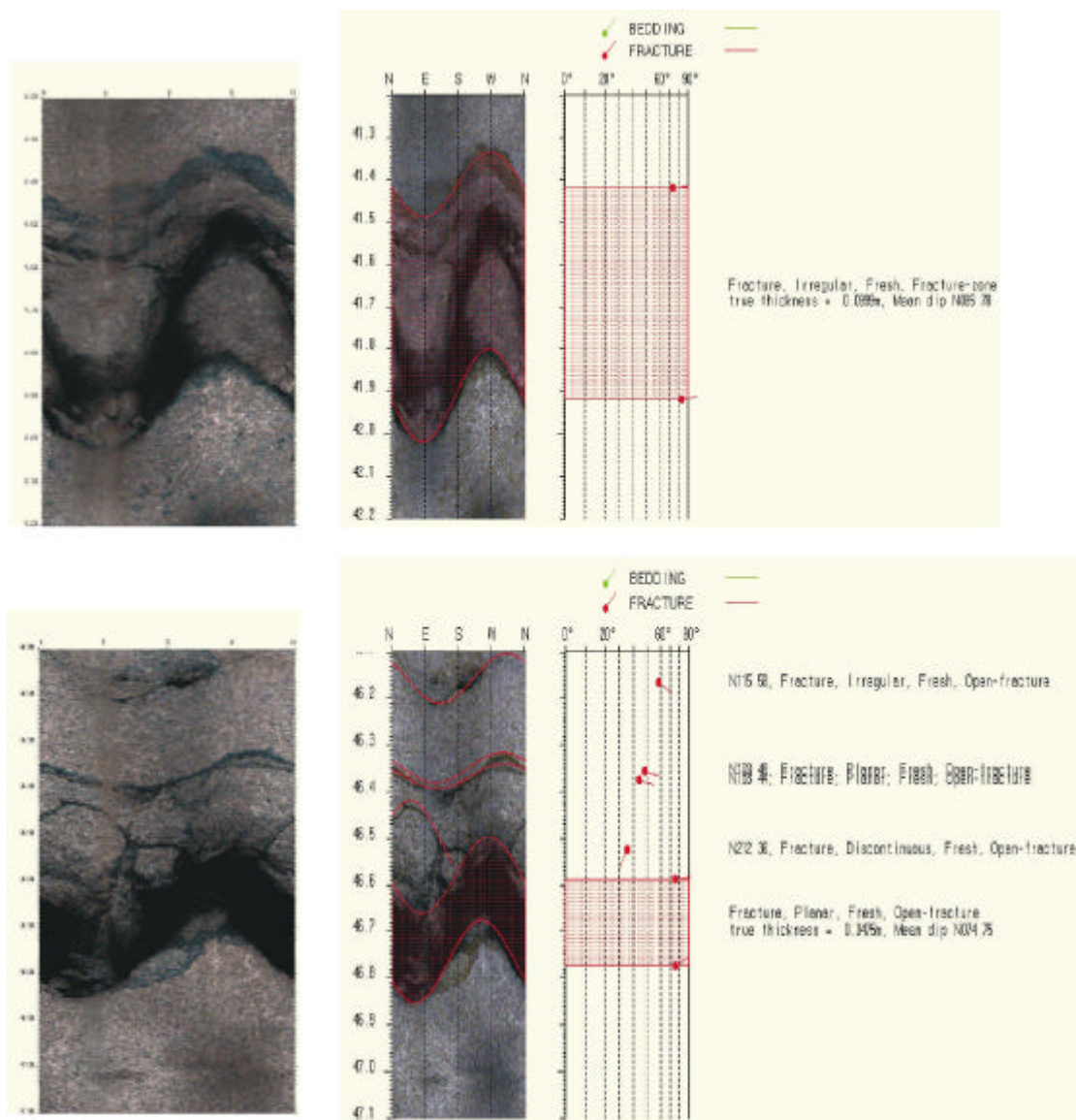
Sonden har innebygget et trekomponent magnetometer, og dette sammen med tre akselerometre sørger for å orientere sonden uansett borehullets forløp. På denne måten kan det kartlagte bildet orienteres, og strøk, fall og sann tykkelse av kryssende strukturer beregnes. Med data fra denne instrumenteringen kan også borehullets forløp (avvik) beregnes (Figur 7).



Figur 7: Eksempel på borehullsforløp, Bh 6 Gualia, Lunner.

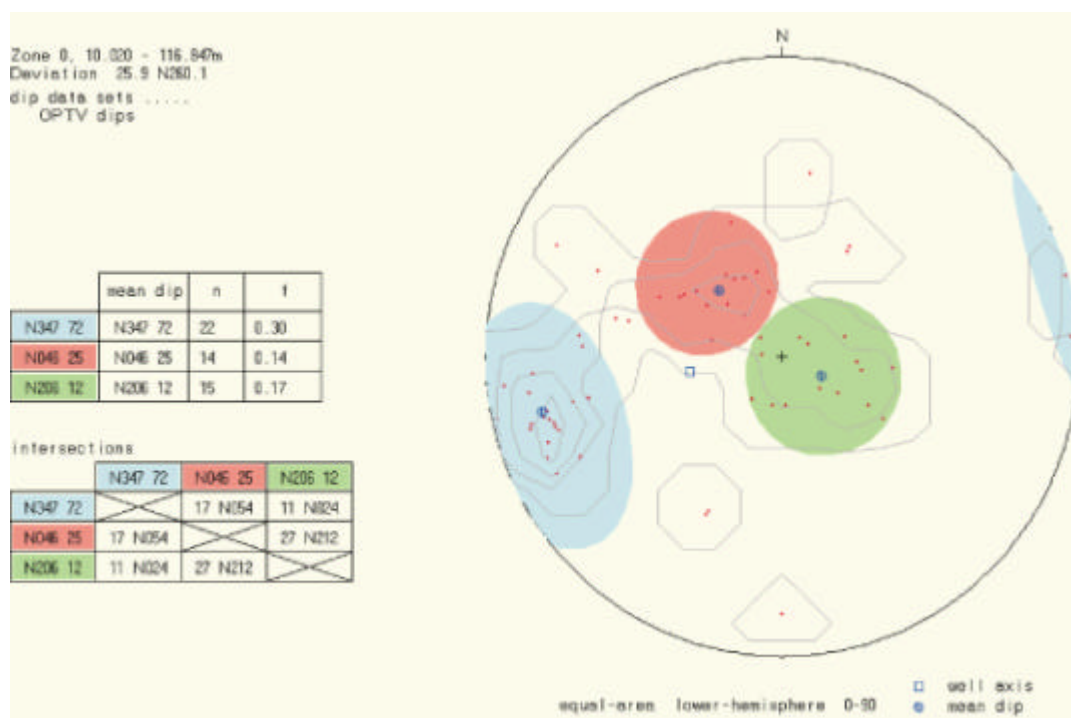
Analyse av data.

Ved analyse brettes det orienterte digitale bildet ut (se figur 8). Plane sprekker vil da indikeres som en sinusformet kurve. Steile sprekker vil indikeres med store amplituder ved loddrette hull. Dersom borehullet skjærer sprekkene vinkelrett, vil disse vises som rette linjer. Siden bildet er orientert, kan sprekkenes retning og fall beregnes ved å tilpasse (digitalisere) en sinuskurve til hver av dem. Har sprekkene en viss utbredelse, kan både topp og bunn digitaliseres, og derved kan den sanne tykkelsen beregnes. Analyseprogrammet inneholder en menystyrt beskrivelse av de enkelte hendelser. Tilsvarende analyse kan gjøres for primære geologiske strukturer (ganger, lagdeling).



Figur 8: Eksempel på opptak og analyse, Bh6 Gualia, Lunner. Til venstre er originale opptak vist. Til høyre er de samme opptakene analysert. Enkelstående sprekker er tilordnet sinusfunksjon og fallretning og -vinkel beregnet. Pilhode angir individuelle sprekkers fall mens halen viser fallretning (nord opp). Ved større åpne sprekker er topp og bunn digitalisert og sann åpning på sprekkene er beregnet.

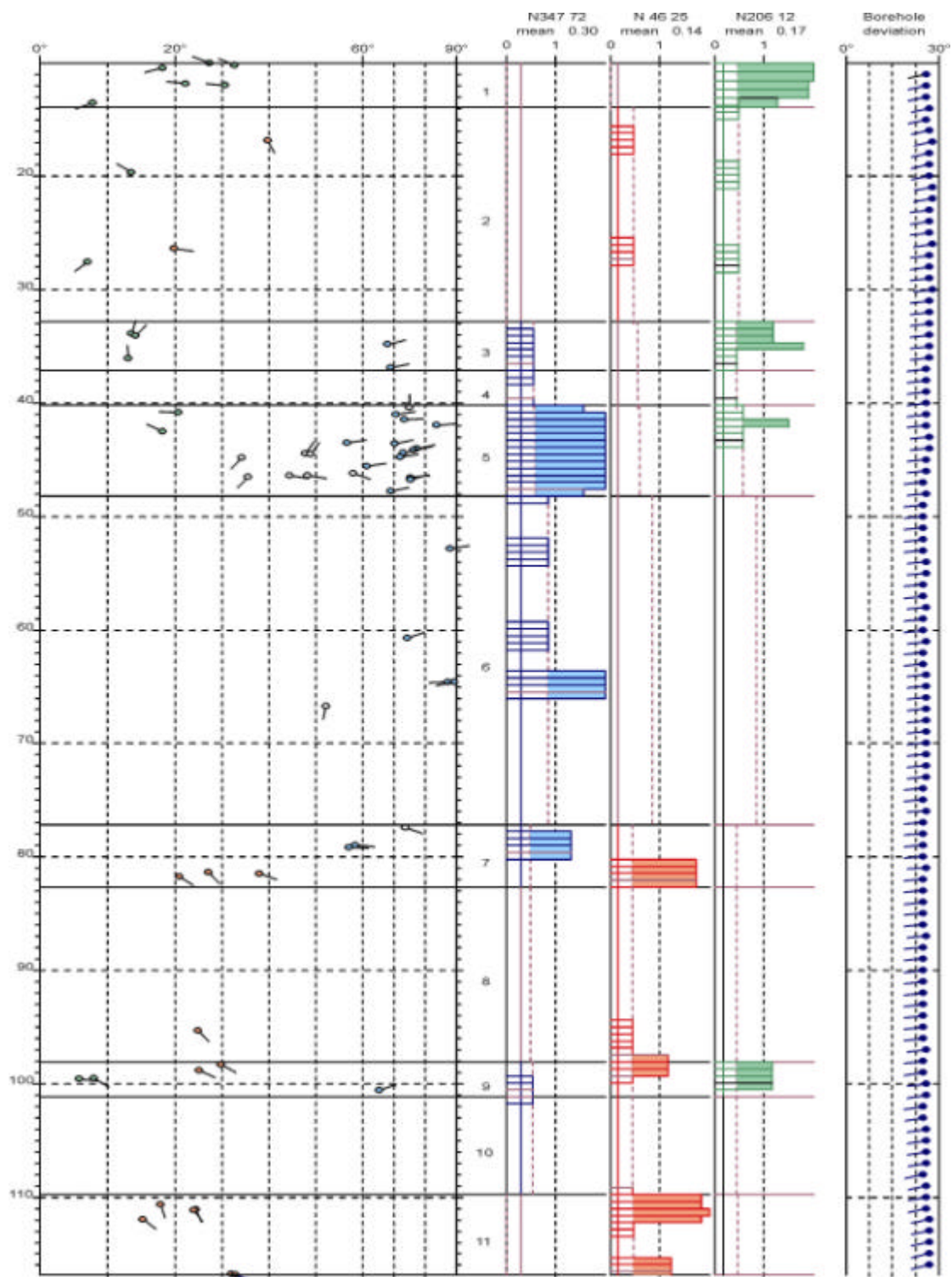
Når alle hendelser er digitalisert, kan en utføre sprekke- og strukturanalyse. Etter å ha plottet polen (normalvektoren) til alle digitaliserte sprekker i et stereogram (figur 9), kan forskjellige sprekkegrupper defineres. Disse får tildelt en farge, og sprekkegruppens middelværdi for strøk og fall beregnes. Det kan også gjøres analyse på skjæringslinjer mellom midlere sprekkeplan.



Figur 9: Eksempel på analyse av sprekker i stereogram, Bh7 Gualia, Lunner. I øverste tabell er midlere sprekkeretning og -fall for hver sprekkegruppe beregnet, og antall sprekker og sprekkefrekvens for hele hullet beregnet for hver av gruppene. Nederste tabell viser retning og fall på skjæringslinjen mellom de midlere sprekkeplanene.

Neste steg er å plote alle digitaliserte hendelser, nå med tilordnet gruppefarge, som funksjon av dyp. De forskjellige sprekkemønstrene tilordnes histogrammer, og på grunnlag av disse kan hullet deles inn i soner som hver er karakterisert med spesielle sprekkemønstre. Sprekkefrekvens for alle definerte grupper kan deretter beregnes innenfor hver sone i borehullet. Tilsvarende analyser kan også gjøres for bergartsganger og eventuelt bergartsgrenser. I tillegg til grafisk presentasjon kan alle data listes i tabellform.

Figur 10 viser et eksempel på sprekkelogg fra Bh 6 ved Gualia. Analysen viser at sprekkene opptrer i soner. Relativt steile sprekker (blå type, midlere strøk 347° og midlere fall 72°) opptrer i første del av hullet, mens i dypere deler dominerer sprekker med et slakere fall (rød type, midlere retning 46° og fall 25°). Et tredje sprekkemønster (grønn type, midlere retning 206° og fall 12°) opptrer hovedsakelig i hullets grunnere deler.

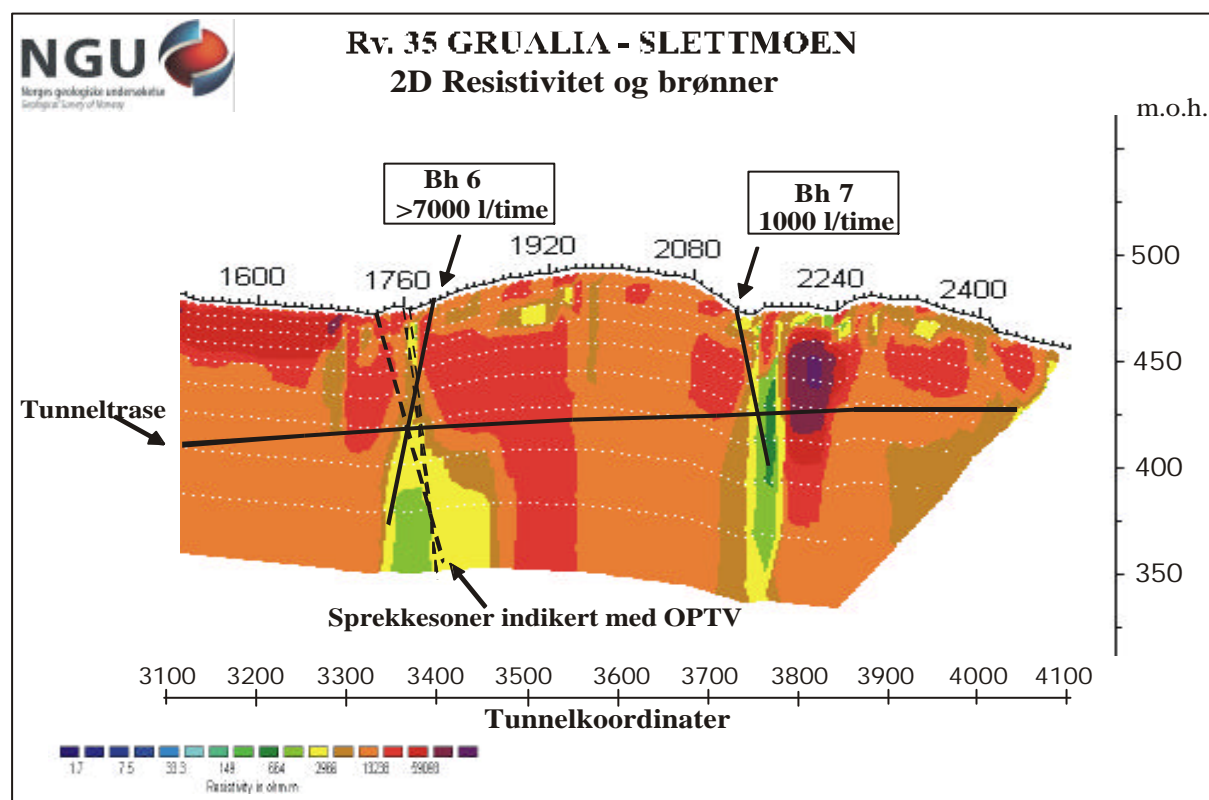


Figur 10: Sprekkelogg for borehull 6, Gualia, Lunner. Til venstre vises de individuelle sprekkene som pilplott. Histogrammene viser hvor i borehullet de forskjellige sprekkemønstrene opptrer. Høyre kolonne viser et stabilt borehullsforløp med fall på ca 25° mot vest. Heltrukne horisontale linjer angir grenser mellom definerte soner.

GEOFYSISK, HYDRO- OG INGENIØRGEOLOGISK OPPFØLGING.

Som nevnt ble det boret 3 brønner på grunnlag av resistivitetsmålingene. I to av disse, Bh 5 (v/ koordinat 640, se figur 5) og Bh 7 (v/ koordinat 2130, se figur 10) ble det påvist ustabile masser ved at hullene raste (Elvebakk og Braaten 2001). Bh5 ble forsøkt åpnet igjen, men dette mislyktes. Det ble derfor boret en noe steilere brønn (Bh8) ved samme lokalitet, i håp om at denne skulle være tilgjengelig for videre testing. Dessverre gikk det også ras i denne og bare den øvre delen ble tilgjengelig for inspeksjon og prøvepumping.

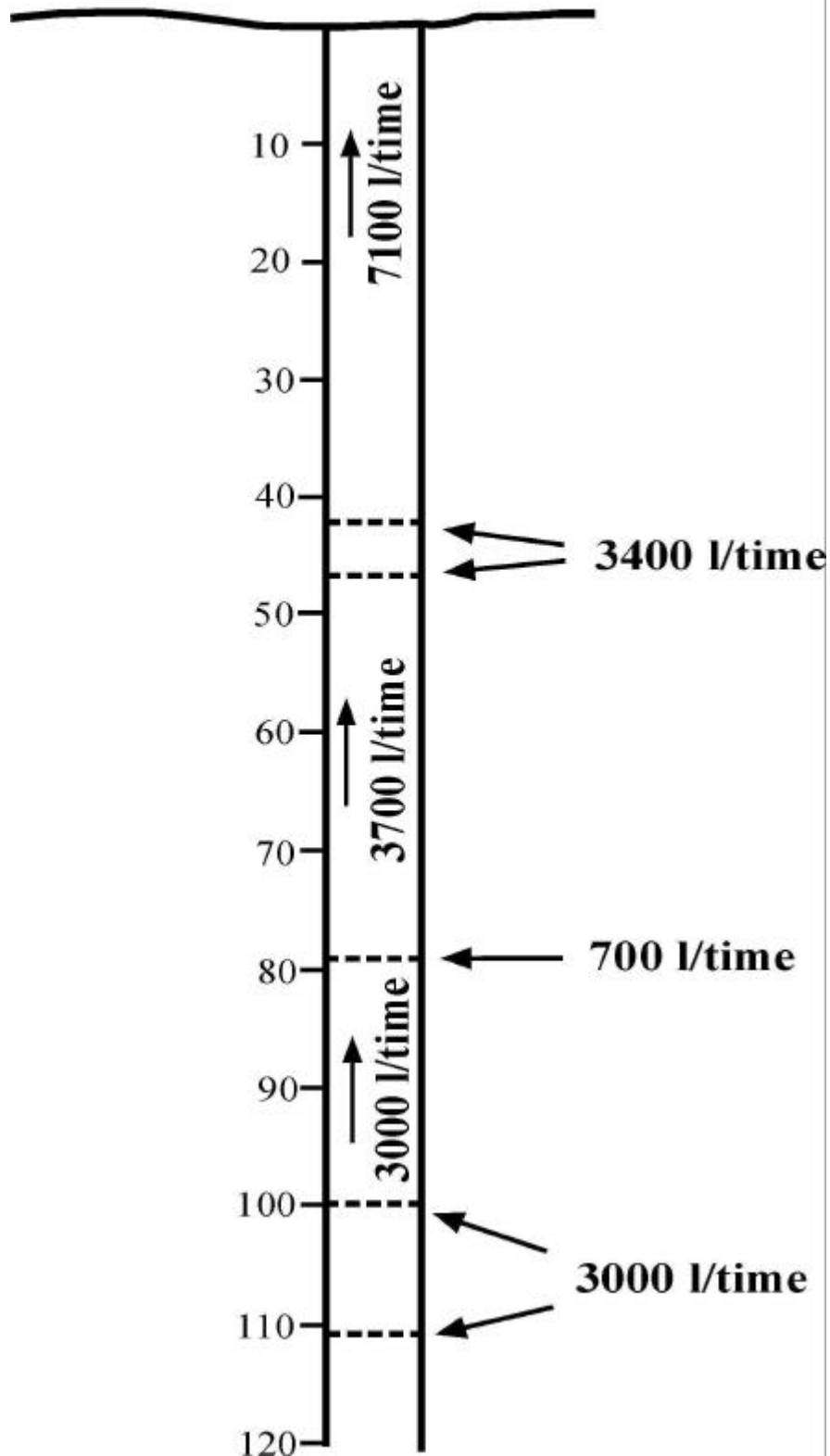
I figur 11 er to av brønnene plottet inn på resistivitetsbildet. Målt resistivitet i brønnene stemmer meget godt over ens med hva som ble kartlagt fra overflaten (Elvebakk og Braaten 2001). Pumpetester anslår vanngiverevne på ca 7000 l/h for Bh5, mer enn 7000 l/h for Bh 6, mens Bh 7 var det eneste hvor vanngiverevnen kunne fastslås noenlunde eksakt til ca 1000 l/h (Storrø og Elvebakk 2002). Påvist vanngiverevne i disse hullene ligger klart over gjennomsnittet for aktuelle bergarter.



Figur 11: Resistivitetsbilde med inntegnede brønner. På grunnlag av kartlagt fall er åpne enkeltstående sprekker i Bh6 projisert inn.

Kartlagte enkeltstående, åpne sprekker i Bh 6 er studert i mer detalj (Storrø og Elvebakk 2002). Under prøvepumping ble utstyr for måling av vertikal strømning plassert 20 meter under selve pumpa. Dette systemet ble senket til forskjellig dyp i borehullet, og på denne måten kunne individuell vanngiverevne for de forskjellige åpne sprekke kartlegges (Figur 12).

Strømning i Bh 6



Figur 12: Individuell vanngiverevne på sprekker i Bh 6 Gualia (dybde angitt som lengde langs borehullet som har et fall på ca 25° mot vest).

I skrivende stund er tunnelen drevet gjennom sonen ved koordinat 2150. I en lengde av 40 meter var det nødvendig å sette opp sikringsbuer av sprøytebetong samt forbolting for hver 5 meter pga dårlig fjell og ustabile forhold. Sentralt i sonen fikk en ras fra hengen (Moksnes 2002, personlig meddelelse).

KONKLUSJON.

Kartlegging av resistivitet i 2 dimensjoner synes å gi meget interessant informasjon om fjellkvalitet og påvising av vannførende sprekkesoner. På grunnlag av denne type informasjon kan en plassere brønner optimalt. Inspeksjon av brønner med optisk televierer gir et detaljert bilde av geologien. I tillegg gir metoden meget detaljert informasjon om sprekkers retning, fall, frekvens og åpning. Prøvepumping i kombinasjon med strømningsmåling kan gi detaljert informasjon om vanngiverevne (lekkasjepotensiale) på individuelle sprekker.

REFERANSER.

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.

Elvebakk, E. og Rønning, J.S. 2001: Borehullsinspeksjon. En utprøving og sammenstilling av Optisk og Akustisk televierer NGU Rapport 2001.011.

Elvebakk, E. og Braaten, A. 2001: Tunnelprosjektet. Borehullslogging og strukturgeologiske studier Gualia, Lunner kommune. NGU Rapport 2001.117.

Loke, M.H. 2001: RES2INV ver. 3.4. Geoelectrical Imaging 2D & 3D. Instruction manual. www.geoelectrical.com.

Moksnes, S. 2002: Ingeniørgeologiske observasjoner under tunneldriving. Tunnelprosjekt Gualia – Slettmoen.

Nordgulen, Ø. og Rønning, J.S. 2000: Tunnelproblemer løses ikke på stuff. Geobergverksnytt Nr.5, 2000, s 17 – 20.

Rønning, J.S. 1985: Geofysikk i vannprospektering fra sprekkesoner i fjell. Resultater fra et forprosjekt. NGU Rapport 85.103.

Rønning, J.S. og Dalsegg, E. 2001: Tunnelprosjektet. Geofysiske målinger ved Langvatnet, Lunner, Oppland. NGU Rapport 2001.090.

Statens Vegvesen 2001: Samfunnstjenlige vegtunneler 1998 – 2001, Sluttrapport. Statens Vegvesen Publikasjon nr. 97.

Storrø, G. og Elvebakk, H. 2002: Tunnelprosjektet. Hydraulisk testing av fjellbrønner ved Gualia, Lunner kommune. NGU Rapport under utarbeidelse.