

Rapport nr.: 2003.077		ISSN 0800-3416	Gradering: Åpen
Tittel: "Miljø- og samfunnstjenlige tunneler". Sluttrapport delprosjekt A, Forundersøkelser.			
Forfatter: Jan S. Rønning		Oppdragsgiver: "Miljø- og samfunnstjenlige tunneler"	
Fylke: Flere		Kommune: Flere	
Kartblad (M=1:250.000) Hamar, Oslo og Trondheim		Kartbladnr. og -navn (M=1:50.000) Flere	
Forekomstens navn og koordinater:		Sidetall: 65    Pris: kr 320,-	
Feltarbeid utført: 2000 - 2003	Rapportdato: 30. september 2003	Prosjektnr.: 2827.02	Ansvarlig:
<p><b>Sammendrag:</b></p> <p>Formålet med delprosjekt A: Forundersøkelser av "Miljø- og samfunnstjenlige tunneler" var å vurdere om nyere ikke utnyttede teknikker kunne forbedre forundersøkelsene både kvalitets- og kostnadmessig, samt å vurdere tradisjonelle metoder utført på ulike anlegg. En håpet med dette å kunne oppnå reduserte kostnader ved tunneldriften, større sikkerhet ved gjennomføringen av tunnelprosjekter, større sikkerhet mot miljøskader og sikrere tids- og kostnadsoverslag.</p> <p><b>Analyse av satellittbilder</b> viser at digital strukturanalyse gir et godt bilde av den regionale tektonikken i et område. Mer detaljert informasjon om forkastninger og sprekkesoner kan ekstraheres fra digitale høydedata. Geofysiske data målt fra fly eller helikopter vil kunne gi viktige bidrag i en tidlig fase av forundersøkelser for anlegg i fjell. Metodene som benyttes, gir viktig informasjon om bergrunnsgeologien, og i tillegg kan lineamenter forårsaket av forkastninger og sprekkesoner tolkes frem. Det foreligger mye digitale data for de sentrale delene av Østlandet, men mer sparsomt i landet for øvrig.</p> <p><b>Seismisk modellering</b> har vist at tolkningene kan være beheftet med større usikkerheter enn det brukerne har vært klar over. Uttesting av <b>2D resistivitetmålinger</b> har vist at metoden effektivt kan påvise svakhetssoner i fjell dersom resistiviteten i berggrunnen i utgangspunktet er over 5000 ohmm. Under gitte geologiske betingelser indikeres også en evne til å karakterisere sonene. Metoden har vist seg å være relativt følsom, og har påvist flere soner enn f.eks. VLF. I alle områder unntatt ved Jong-Asker, hvor resistiviteten generelt er lavere enn 5000 ohmm, har resistivetsdata gitt like klar informasjon om svakhetssoner i overflaten av berggrunnen som refraksjonsseismikk. Metoden kan i motsetning til refraksjonsseismikk, til en viss grad følge sonene mot dypet, men dersom det er tynne soner, kan disse gå dypere enn indikert på resistivetsbildene. I noen tilfeller kan lav resistivitet som skyldes ledende mineraler forveksles med svakhetssoner. <b>Indusert polarisasjon</b> synes ikke å gi informasjon som kan bidra til karakterisering av svakhetssoner. Tidligere foreslått tolkningsmodell er ikke bekreftet. Metoden kan bidra til påvisning av elektronisk ledende mineraler som årsak til lav resistivitet.</p> <p><b>Optisk televiewer</b> gir informasjon om sprekkeres strøk, fall, frekvens og åpning. Tilsvarende data om gangbergarter, lag og foliasjon kan også ekstraheres. I tillegg produseres et løpende bilde av geologien og borehullsforløpet kan bestemmes. Slagboring av brønner med påfølgende inspeksjon og logging av geofysiske parametere som <b>resistivitet, temperatur, vannets ledningsevne og naturlig gammastråling</b> er, så lenge en ikke trenger kjernene for analyser, et meget godt alternativ til kjerneboring. Andre loggemetoder er også aktuelle men ikke utprøvd gjennom dette prosjektet. Prøvepumping av brønner i kombinasjon med strømningsmålinger gir informasjon om total vanngiverevne i et borehull, og hvor vannet strømmer inn. Den prosedyre som er valgt er et billig og godt alternativ til kjerneboring og tidkrevende vanntapsmålinger.</p> <p><b>Spesielle ingeniørgeologiske studier</b> ved Frøyatunnelen og T-baneringen har ikke kunnet påvise noen klare sammenhenger mellom registrerte injeksjonsmasser og lekkasjer på den ene side og geologiske parametere som bergart, oppsprekning og Q-verdi på den andre. Disse parameterene er kun egnet til meget grove prognoser. Q-verdi beregnet på grunnlag av trykkbølg hastighet målt med refraksjonsseismikk ved Frøyatunnelen og T-baneringen, gav høyere verdier enn de som ble kartlagt i tunnelen. Detaljerte studier av vanninnslag sett i lys av en bruddsonemodell viser at sonenes sentrale deler ikke gir vann, men at vanninnslagene kommer i sonens distale deler hvor den hydrauliske konduktiviteten er større. Det er behov for flere undersøkelser på dette.</p> <p>Analyse av <b>radardata målt fra satellitt</b> kan gi informasjon om naturlige og menneskeskapt vertikale setninger i et område. Metoden kan gå tilbake i tid og se om bevegelsene er kontinuerlig, eller om de inntraff ved et spesielt tidspunkt. Metoden har kanskje størst potensiale ved karakterisering av løsmasser.</p> <p><b>Automatisk analyse av boreparametere</b> målt under boring viser gode korrelasjoner med bergets hardhet og til dels oppsprekning. Kvantifisering av vannlekkasjer synes derimot å være mer komplisert. Ved å videreutvikle dette verktøyet kan sikkerheten på stoff økes og planleggingen av arbeidet kan forbedres. Programvaren må imidlertid bli mer brukervennlig før metoden kan bli operativ på boreriggen.</p> <p><b>Generelt</b> kan en si at de nye teknikkene viser ny og supplerende informasjon som er relevant for utbyggere av anlegg i berg, og at kvaliteten på forundersøkelser kan heves. Det ligger et potensiale i disse teknikkene som før "Miljø- og samfunnstjenlige tunneler" lå utnyttet. Ekstrahering av informasjon fra regionale digitale datasett (satellittbilder, fly- og helikoptergeofysikk, digital topografi) bør bli en del av tidlig fase av forundersøkelser for større og mer kompliserte anlegg. Oppfølging på bakken med 2D resistivitet er i mange sammenhenger et bedre og billigere alternativ til tradisjonell refraksjonsseismikk og eventuelt andre målinger. Boring av vannbrønner med påfølgende inspeksjon, logging og prøvepumping kombinert med strømningsmåling, har vist seg å gi mer data til en lavere pris enn kjerneboring, kjerne logging, orientering av kjerner og vanntapsmåling.</p> <p>Innenfor "Miljø- og samfunnstjenlige tunneler" er det foretatt uttesting av metoder på et fåtall objekter. For å få klare konklusjoner om metodenes foretrekkelighet, er det nødvendig med mer erfaring, både fra de geologiske miljøene en har arbeidet og selvsagt også fra andre. Resistivetsmåling i marine miljø bør videreutvikles. Det samme gjelder akustisk tomografi og radartomografi, begge teknikker som ble vurdert ved starten av prosjektet, men som en ikke fikk plass for verken kapasitetsmessig eller økonomisk.</p>			
Emneord:			
Geologi	Geofysikk	Hydrogeologi	
Helikoptermåling	Bakkemåling	Borehullsmåling	
Tunneler	Forundersøkelser	Fagrapport	

## INNHOOLD

1. INNLEDNING .....	6
2. GRUNNLAG FOR VALG AV METODER .....	7
3. TRADISJONELLE METODER .....	8
3.1 Ingeniørgeologiske metoder .....	8
3.2 Refraksjonsseismikk.....	9
3.3 VLF-EM, Very Low Frequency Electro-Magnetic .....	10
3.4 Magnetiske målinger .....	11
3.5 Kombinerte elektriske målinger .....	12
4. NYERE GEOFYSISKE METODER.....	13
4.1 Seismisk modellering .....	13
4.2 Geofysiske målinger fra fly og helikopter.....	15
4.3 Geofysiske målinger på bakken .....	17
4.3.1 To-dimensjonal Resistivitet.....	17
4.3.2 To-dimensjonal Indusert Polarisasjon.....	18
4.4 Geofysiske målinger i borehull .....	19
4.4.1 Videologging, Optisk Televiewer (OPTV) .....	20
4.4.2 Resistivitetslogging .....	23
4.4.3 Temperatur, vannets elektrisk ledningsevne, naturlig gammastråling.....	24
4.5 Prøvepumping kombinert med strømningsmålinger .....	25
5. ANDRE METODER.....	28
5.1 Spesielle ingeniørgeologiske studier .....	28
5.1.1 Forundersøkelser og bergmassekvalitet .....	28
5.1.2 Sprekkemodell og vanninnslag .....	30
5.2 Digital strukturanalyse .....	31
5.2.1 Regionale lineamenter.....	31
5.2.2 Detaljerte lineamenter .....	31
5.3 Analyse av setninger ut fra radardata målt fra satellitt.....	33
5.4 Automatisk logging og analyse av boreparametere .....	35
6. VURDERING AV UTPRØVDE METODER.....	38
6.1 Fly- og helikoptermålinger.....	38
6.1.1 Magnetiske målinger .....	38
6.1.2 Elektromagnetiske målinger.....	39
6.1.3 Radiometriske målinger .....	40
6.1.4 Fly- og helikoptermålinger generelt.....	40
6.2 Bakkemålinger .....	41
6.2.1 Refraksjonsseismikk.....	41
6.2.2 To-dimensjonal Resistivitet.....	41
6.2.3 To-dimensjonal Indusert Polarisasjon.....	47
6.2.4 Bakkemålinger generelt.....	48
6.3 Borehullsmålinger .....	49
6.3.1 Optisk televiewer (OPTV) .....	49
6.3.2 Resistivitet og indusert polarisasjon.....	50
6.3.3 Temperatur, vannets ledningsevne og naturlig gammastråling.....	51
6.3.4 Prøvepumping og strømningsmåling .....	51
6.3.5 Borehullsmålinger generelt .....	52
6.4 Andre metoder.....	52
6.4.1 Spesielle ingeniørgeologiske studier .....	52
6.4.2 Digital strukturanalyse .....	53
6.4.3 Analyse av setninger ut fra radardata målt fra satellitt.....	53
6.4.4 Automatisk logging og analyse av boreparametere .....	54

7. KONKLUSJONER OG ANBEFALINGER.....	55
8. REFERANSER .....	57

## FIGURER

Figur 1: Oversiktskart østlige del av Lunnertunnelen. ....	8
Figur 2: Refraksjonsseismiske data østlige del av Lunnertunnelen (fra Geomap 2003). ....	9
Figur 3: Eksempel på VLF-data med tolkning over østlige del av Lunnertunnelen.....	10
Figur 4: Eksempel på magnetiske data med tolkning over østlige del av Lunnertunnelen. ....	11
Figur 5: Prinsipp for kartlegging med Gradient elektrodekonfigurasjon og tilhørende resistivetskurve. ....	12
Figur 6: Illustrasjon av problemstillingen: Kan refraksjonsseismikk se svakhetssoner under depresjoner.....	13
Figur 7: Modell (øverst) brukt under beregningen av syntetiske data og resultat av tolkning (nederst). ....	14
Figur 8: Magnetisk totalfelt (venstre) og beregnet magnetisk andrederiverte (høyre), Krokskogen.....	15
Figur 9: Geofysiske lineamenter over Lunnertunnelen (etter Beard 2001). ....	16
Figur 10: Kartlagt resistivitet langs østligste del av Lunnertunnelen. ....	18
Figur 11: Resistivitet og Indusert polarisasjon langs østligste del av Lunnertunnelen. ....	19
Figur 12: Prinsippskisse optisk televiwer.....	20
Figur 13: Eksempel på borehullsforløp, vertikal- og horisontalsnitt, Bh 6 Lunner.....	20
Figur 14: Eksempel på opptak og analyse, Bh6 Lunner.....	21
Figur 15: Eksempel på analyse av sprekker i stereogram, Bh7 Lunner. ....	21
Figur 16: Sprekkelogg for borehull 6, Lunnertunnelen.....	22
Figur 17: Målt resistivitet i borehull 6, Lunner sammen med sprekelogg fra optisk televiwer. ....	23
Figur 18: Temperatur, vannets ledningsevne og total naturlig gammastråling, Bh 11 Romeriksporten . ....	25
Figur 19: Prinsippskisse, prøvepumping i kombinasjon med strømningsmåling (fra Barton 2003). ....	26
Figur 20: Individuell vanngiverevne på sprekker i Bh 6 Lunner. ....	27
Figur 21: Kontinuerlig strømningslogg for borehull ved Skaugum. ....	27
Figur 22: Analyse av topografiens helningsvinkel over Romeriksporten. ....	32
Figur 23: Digitaliserte lineamenter ved T-baneringen. ....	33
Figur 24: Indikerte vertikale bevegelser på bygninger over Romeriksporten ved Golia og Hellerud.....	34
Figur 25: Innsynkning over tid for utvalgte punkter over Romeriksporten.....	35
Figur 26: Analyse av fjellets hardhet og oppsprekning i østlige deler av Lunnertunnelen. ....	36
Figur 27: Beregnet vanninnslag i sonder-/injeksjonshull (relative verdier) i Lunnertunnelen. ....	37
Figur 28: Eksempel på VLF-data målt fra helikopter (A), VLF-data på bakken (B) og resistivitet på bakken (C), profil 3 Krokskogen.....	39
Figur 29: Lunnertunnelen. Sammenstilling av ingeniørgeologiske forundersøkelser, lavresistivitetssoner og erfaringer under tunneldrivingen. ....	43
Figur 30: Påviste sprekker og målt resistivitet i brønn ved Åstad (Jong-Asker) og Bh 6 Lunnertunnelen. ....	46

## TABELLER

Tabell 1: Tolkningsmodell for resistivitet og IP målinger (Etter Pedersen og Veslegaard 1985). ....	12
Tabell 2: Oversikt over geologiske parametere som har betydning for injeksjon, stabilitet og som inngår i Q-verdi og hvilke av disse som kan skaffes ved bruk av kjerneboring og optisk televiwer (fritt etter Bhasin 2002).....	50

## VEDLEGG

- Vedlegg 1: Miljø – og samfunnstjenlige tunneler" – Oversikt over aktuelle geofysiske metoder. Tabell utarbeidet som en del av "Forprosjektet" i 1999.
- Vedlegg 2: Oversikt over høyopløselig fly- og helikoptergeofysikk i Norge.
- Vedlegg 3: Oversikt over lineamenter tolket fra satellittdata (Gabrielsen m. fl. 2002).

## FORORD

Denne rapporten er utarbeidet for å samle de erfaringer som er oppnådd gjennom "*Miljø- og Samfunnstjenlige tunneler*" delprosjekt A: Forundersøkelser. Rapporten går ikke inn i detaljer om hver enkelt metode, og heller ikke alle utførte undersøkelser blir beskrevet i detalj. Det gis utførlige referanser til teori og til de enkelte rapporter som beskriver hver undersøkelse mer inngående. Den interesserte leser kan derfor søke annen litteratur for mer utførlige beskrivelser.

Undertegnede ble tidlig i prosjektperioden tillagt ansvar for gjennomføringen av Delprosjekt A: Forundersøkelser. Det var derfor naturlig at ansvaret for sammenstilling av en sluttrapport ble lagt på samme person. Det meste av det utførte arbeidet har vært geofysikk på land, og rapporten bærer preg av dette.

Tolkning av geofysiske data målt fra helikopter, det meste av bakkegeofysikken og borehullsloggingen er utført ved NGU av geofysikerene Les Paul Beard, Einar Dalsegg, og Harald Elvebakk. Alvar Braathen, John Dehls og Øystein Nordgulen ved Faggruppe for berggrunnsgeologi NGU, har vært ansvarlig for strukturgeologiske studier og setningsanalyser ved å benytte radarata målt fra satellitt. Gaute Storrø (NGU) har vært ansvarlig for hydrogeologiske vurderinger og prøvepumper av brønner. NGI ved geofysiker Harald Westerdahl har utført seismiske modelleringer og vurdert usikkerheter knyttet til tolkning av refraksjonsseismikk. Geomap as ved Ole Christian Pedersen har utført en del refraksjonsseismiske målinger i tillegg til å tolke syntetiske data. Ingeniørgeolog Vidar Kveldsvik har vært ansvarlig for undersøkelser ved Frøyatunnelen og T-baneringen, og er også ansvarlig for beskrivelsene som her presenteres. Dr. Ing-student Kristin Hilde Holmøy (NTNU) har vurdert nytten av automatisk analyse av boreparametere, og har ellers sett på prognoser for vannlekkasjer. De nevnte personer og professorene Odleiv Olesen (NGU), Ole Bernt Lile (NTNU) og Bjørn Nilsen (NTNU) har alle lest og foreslått forbedringer til denne sluttrapporten. Alle takkes for godt samarbeide.

Prosjektet "*Miljø- og samfunnstjenlige tunneler*" er finansiert av Norges Forskningsråd, Vegdirektoratet, Jernbaneverket, Samferdselsetaten i Oslo, NCC Anlegg AS, Selmer Skanska AS og Vegdekke AS. I tillegg kommer egeninnsats hos de utførende institusjoner som ved forundersøkelser hovedsakelig var NGI og NGU. Uten den økonomiske støtten fra alle disse institusjonene og bedriftene har det ikke vært mulig å få til et så interessant og forhåpentligvis nyttig prosjekt, og undertegnede benytter anledningen til å takke for finansieringen.

Hele prosjektet har vært ledet av Vegdirektoratet, med Kjell Inge Davik og Alf Kveen som ansvarlige og Mona Lindstrøm som trofast støttespiller. Undertegnede vil rette en honnør til disse personer for vel utført arbeid, og til Vegdirektoratet for å ha dekket administrasjonen av prosjektet i tillegg til direkte pengebidrag.

Trondheim 30. september 2003

Jan S. Rønning  
Prosjektansvarlig.

## 1. INNLEDNING

Formålet med delprosjekt A: Forundersøkelser av "*Miljø- og samfunnstjenlige tunneler*" var å vurdere om nyere ikke utnyttede teknikker kunne forbedre forundersøkelsene både kvalitets- og kostnadmessig, samt å vurdere tradisjonelle metoder utført på ulike anlegg. En håpet med dette å kunne oppnå reduserte kostnader ved tunneldriften, større sikkerhet ved gjennomføringen av tunnelprosjekter, større sikkerhet mot miljøskader og sikrere tids- og kostnadsoverslag.

Drivingen av Romeriksporten førte til store forsinkelser, store økonomiske overskridelser og alvorlige miljømessige påvirkninger. Anleggsbransjen ble satt i et dårlig lys. Dette resulterte i at det ble satt fokus på grunnlagsarbeidene forut for anleggstart. Mange fagmiljøer hadde forslag til bedre forundersøkelser, hvordan unngå påvirkning av miljøet og hvordan gjøre bedre tettearbeider. Dette resulterte i at forskningsrådet ønsket å koordinere alle disse forslagene og det ble bedt om et samlet prosjektforslag fra hele det geofaglige miljøet. Gjennom et forprosjekt i 1999 ble det utarbeidet et forslag til forskningsoppgaver innen forundersøkelser, miljøpåvirkning og tetteteknikk. Dessverre kunne ikke forskningsrådet finansiere alle de gode forslagene, men de kom opp med noen midler, spesielt rettet mot tetteteknikk. Med støtte fra de store utbyggerne (Statens Vegvesen, Jernbaneverket og Samferdselsetaten i Oslo), noen entreprenører og egeninnsats fra deltagende institusjoner, kom prosjektet "*Miljø- og samfunnstjenlige tunneler*" etter hvert i gang. Delprosjekt A: Forundersøkelser startet først i 2001. Foreliggende rapport gir en oppsummering av arbeidet som er utført innenfor denne delen av prosjektet.

Enkelte ingeniørgeologiske og geofysiske metoder ble benyttet som referanseteknikker i løpet av prosjektet, og disse beskrives kort som tradisjonelle metoder. Nye geofysiske teknikker som det har vært arbeidet med er: Geofysiske målinger fra helikopter, Seismisk modellering, 2D resistivitet og induert polarisasjon målt på bakken og Borehullsinspeksjon/-logging. I tillegg er det gjort noe arbeid på prøvepumping i kombinasjon med strømningsmåling i borebrønner. Disse undersøkelsene presenteres under kapitlet "Nyere geofysiske metoder". Andre aktiviteter som har sortert under forundersøkelser er: Spesielle ingeniørgeologisk studier, Digital sprekke- og strukturanalyse, Analyse av setninger fra radardata målt fra satellitt og Automatisk logging og analyse av parametere under boring.

Lunnertunnelen, som ble drevet i løpet av prosjektperioden, har vært et hovedsatsningsområde. Mye av de metodiske presentasjonene viser derfor eksempler herfra. Det har også vært arbeidet ved følgende andre tunneler: Frøyatunnelen, Romeriksporten, T-baneringen mellom Ullevål stadion og Nydalen, Jong-Asker, Øysand-Thamshavn og Krokskogen. Under forprosjektet ble det også arbeidet noe på grunnfjellsbergarter i Askvoll kommune. Erfaringer fra disse undersøkelsene bygges inn i de metodiske drøftingene.

I prosjektfasen har det hovedsakelig vært arbeidet med forundersøkelser mot anlegg i fjell på land. Dette betyr ikke at en vurderer forundersøkelser for undersjøiske tunneler og undersøkelser mot løsmasser som fullgode. Årsaken til prioritering av anlegg på land er at det finnes ferdig utviklede teknikker som kan gi mye relevant geologisk informasjon til utbyggere, men som ikke er testet eller tatt i bruk. Automatisk logging og analyse av boreparametere på tunnelrigg er tatt med i denne rapporten da dette kan ses på som forundersøkelser på stoff.

## 2. GRUNNLAG FOR VALG AV METODER

Et forprosjekt til "*Miljø- og Samfunnstjenlige tunneler*" ble gjennomført i 1999. Dette var delt i 4 med følgende delprosjekter og prosjektledere:

- A. Forundersøkelser, Peer Richard Neeb, NGU
- B. Samspill med omgivelsene. Tor Simon Pedersen, NVE
- C. Tetteteknikk, Oddbjørn Aasen, NVK
- D. Prosjektledelse og organisering, Bjørn Helge Klüver, Vegdirektoratet.

På grunnlag av intensivt arbeid ble det høsten 1999 utarbeidet en rapport hvor i alt 14 tema for videre arbeid innen forundersøkelser ble foreslått og beskrevet (Grøv og Neeb 1999). Totale kostnader for et fireårig prosjekt innen forundersøkelser var beregnet til ca. 19.5 mill. kroner. Temaene var som følger: Riktig omfang av forundersøkelser, Regionalgeologi, Q-verdi – trykkbølger, Tunnelgeologibok, Inspeksjon av borehull, Helikoptermålinger, Retolkning seismikk, Elektrisk tomografi, Seismisk tomografi, Georadar i borehull, Spenningsmålinger, Usikkerhets- og sikkerhetsanalyse, Hammerboring og Numerisk modellering. Rapporten ble benyttet som et grunnlag for søknad til Norges Forskningsråd (NFR).

For de geofysiske metodene var det på forhånd foretatt en analyse av hvilke metoder som var tilgjengelige, hvilket potensiale de hadde for å gi relevant informasjon, hvor mye de ble benyttet, om de kunne lokalisere og karakterisere svakhetssoner, og hvilke utviklings-områder en så for seg (se vedlegg 1). For gruppen som gjorde dette arbeidet, Les P. Beard (NGU), Ole Christian Pedersen (Geomap), Ole Bernt Lile (NTNU), Jan S. Rønning (NGU) og Harald Westerdahl (NGI), var det viktig at metodene skulle gi anvendbare resultater i løpet av prosjektperioden (3 – 4 år). Det ble derfor fokusert på teknikker som allerede var utviklet, men hittil lite benyttet i Norge.

Søknaden til "Forskningsrådet" ga minimal uttelling. I et spleiselag mellom Jernbaneverket, Vegdirektoratet, Utbygningsetaten i Oslo og 3 entreprenører ble en årlig bevilgning på til sammen ca. kr 2,2 mill. for perioden 2001 til 2003 stilt til disposisjon. Dette sammen med egenandel fra NGI og NGU (henholdsvis 20 % og 50 % av timekostnader) gjorde at en fra 2001 kom i gang med prosjektet, dog med redusert innsats. På prosjektmøte i januar 2001 ble det lagt frem et forslag til omstrukturering av delprosjekt A, Forundersøkelser. En gikk da bort fra den tematiske inndelingen og fokuserte i stedet på å anvende et utvalg av de foreslåtte teknikker på enkelte tunnelprosjekt. De tunnelene en valgte å fokusere på var: Frøyatunnelen, Romerikssporten, T-baneringen (Oslo), Lunnertunnelen, Jong-Asker og Krokskogen. De fleste av disse tunnelene ligger på land, og det ble derfor naturlig at det ble fokusert på terrestriske teknikker. I løpet av prosjektets gang ble også riksveg 39, Øysand-Thamshavn i Sør-Trøndelag tatt med i prosjektet. Det ble også innenfor "Forprosjektet" foretatt noe relevant arbeid ved Folvåg og Holmedal, Askvoll kommune i Sogn og Fjordane. Delprosjekt "Riktig omfang av forundersøkelser" ble beholdt som tema, men aktiviteten ble utsatt til siste år av prosjektperioden (2003). Dette arbeidet rapporteres separat (Palmstrøm m. fl. 2003). Undertegnede ble i starten av 2001 tildelt ansvaret for gjennomføring og rapportering av metodestudiene innen delprosjekt A, "Forundersøkelser".

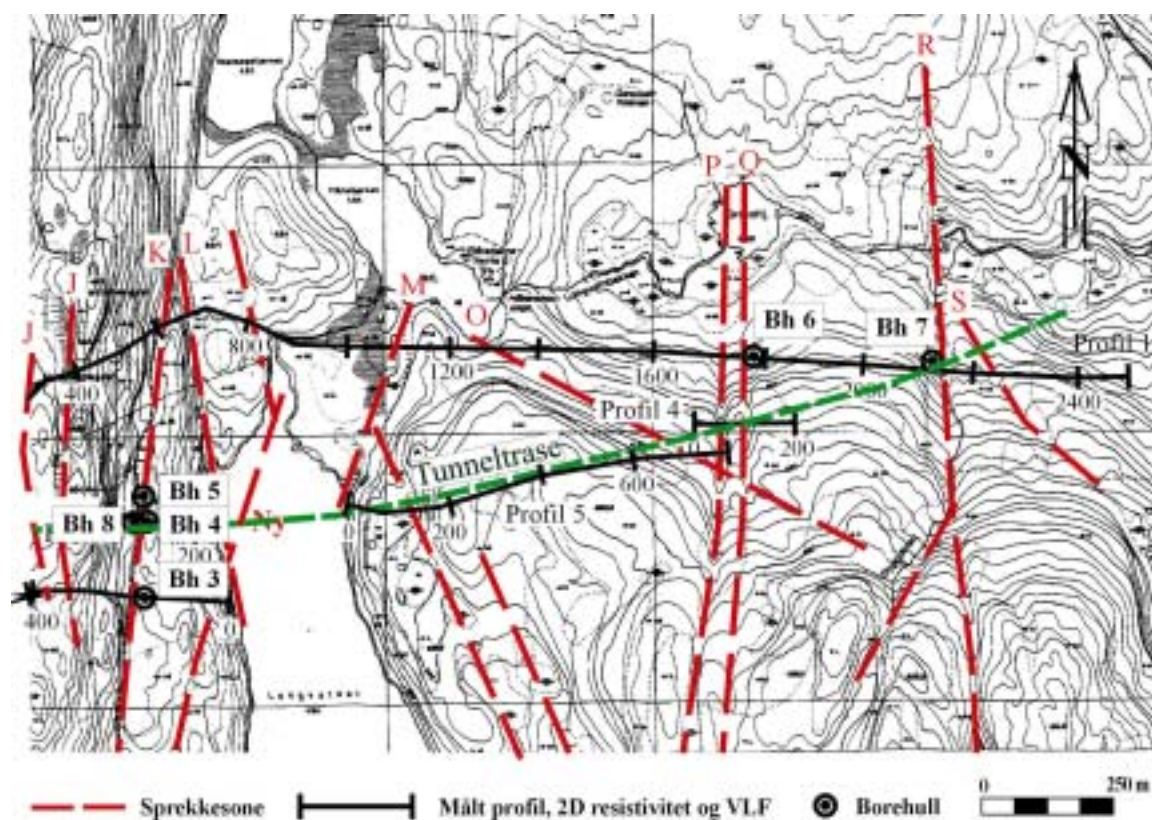
### 3. TRADISJONELLE METODER

Ved vurderingen av metoder har en her valgt å skille mellom tradisjonelle metoder og nyere metoder som hittil er lite benyttet. I dette kapitlet gis en kort beskrivelse av tradisjonelle metoder, og en oppsummering av hva som er gjort med eksempler på resultater. Som tradisjonelle metoder regnes ingeniørgeologiske metoder, refraksjonsseismikk, VLF-EM, magnetiske målinger og kombinerte elektriske målinger (resistivitet og induisert polarisasjon). Metodene omtales her fordi de er benyttet som referanseteknikker innenfor "Delprosjekt A: Forundersøkelser".

#### 3.1 Ingeniørgeologiske metoder

Ved de tunnelprosjektene som inngår i "*Miljø- og samfunnstjenlige tunneler*" er det selvsagt foretatt tradisjonelle ingeniørgeologiske undersøkelser. Disse har i hovedsak fulgt beskrivelsene i kapittel 2 – 3 og vedlegg A i rapporten "Riktig omfang av undersøkelser" (Palmstrøm m. fl. 2003). På grunnlag tilgjengelige topografiske kart, berggrunnsgeologiske kart, flyfoto og det som måtte finnes av rapporter og publikasjoner om geologien, er det foretatt en foreløpig ingeniørgeologisk tolkning. Det er deretter foretatt oppfølging ute i felt. Det er ofte foretatt refraksjonsseismiske målinger og kjerneboring for å få kontroll med geologi og svakhetssoner. Vannproblemer er i noen tilfeller evaluert ved å foreta vanntapsmålinger (Lugeon-testing).

En oversikt over svakhetssoner kartlagt ved de ingeniørgeologiske forundersøkelsene ved Lunnertunnelen er vist i figur 1. De enkelte sonene er navngitt med bokstaver, og disse blir



Figur 1: Oversiktskart østlige del av Lunnertunnelen.

benyttet ved alle senere beskrivelser. Rapporten karakteriserer ikke svakhetssonenes (bredde, dybderekkevidde og eventuell sprekkefylling, Kirkeby og Iversen 1996). Sone benevnt "Ny" er kun påvist ved refraksjonsseismiske målinger på isen over Langvatnet (Geomap 1997). For å kunne overvåke grunnvanns nivået under tunneldrivingen, ble det boret to brønner (Bh 3 og Bh 4). I tillegg var det boret et ca. 450 meter langt kjerne hull mer eller mindre langs tunneltraséen fra Bh 4 og under Langvatnet. Det påvises en ca. 90 meter bred svakhetssone i skråningen like vest for Langvatnet, men under selve vatnet beskrives fjellet som "godt til svært godt" (Iversen 1998). Dette hullet ble fulgt opp med vanntapsmålinger, og disse rapporteres til å være "små til moderate også i de dårlige partiene". Figur 1 viser også plasseringen av geofysiske profiler (Profilene 1, 4 og 5) og borehull (Bh 5 – 8) utført i regi av "Miljø- og samfunnstjenlige tunneler".

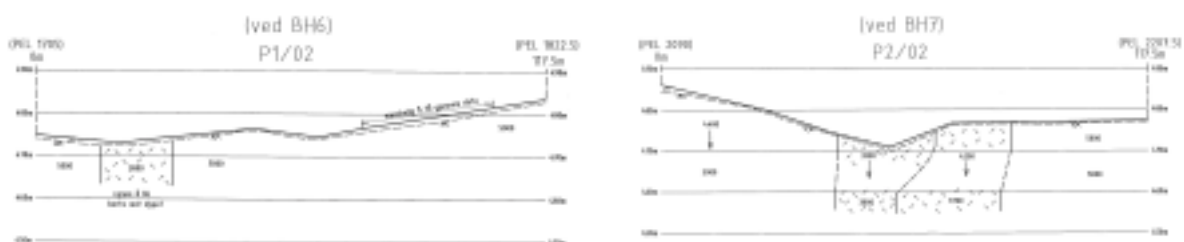
### 3.2 Refraksjonsseismikk

Tradisjonelt har refraksjonsseismikk vært den mest benyttede metode ved forundersøkelser for anlegg i fjell. NGU (daværende Geofysisk Malmleting) startet med denne type målinger for anleggsbransjen her i Norge allerede tidlig i 50-årene. Registreringsteknikken har endret seg gjennom årene, men tolkningsprinsippene har stort sett vært de samme.

Ved målingene legges seismiske kabler ut langs en linje, og geofoner kobles til. Som energikilde benyttes vanligvis dynamitt. Det kan avfyres skudd sentralt i utlegget, ved endene og utenfor selve kabelutlegget. Ut fra målt gangtid til først ankomne lydbølge (P-bølgen), kan hastigheter og mektigheter for forskjellige geologiske lag bestemmes. Metoden er ansett for å være relativt sikker på bestemming av løsmassemektighet og vurdering av fjellkvalitet. Det finnes imidlertid metodiske svakheter som kan gi tolkningsfeil. Metoden krever at hastigheten øker mot dypet, og at de enkelte lagene har en viss mektighet for å kunne påvises. Som vi skal se under seismisk modellering (avsnitt 4.1), kan det være store usikkerheter i angitte tolkninger.

For å få et sammenligningsgrunnlag, er det i regi av "Tunnelprosjektet" utført tradisjonelle refraksjonsseismiske målinger ved Lunnertunnelen (Geomap as) og ved Øysand – Thamshavn (NGU). Ved Jong-Asker forelå måledata som en del av de innledende forundersøkelsene.

Resultat fra refraksjonsseismiske målinger over de samme sonene som har gitt utslag på resistivitetsdata (se senere) er vist i figur 2. Sone Q (ved Bh 6), som viste en moderat resistivitets-anomali (se senere), indikeres på refraksjonsseismikken, men sonen synes å bli borte mot dypet. Sone R (ved Bh 7), som viste meget lav resistivitet i ca. 40 meters bredde, fremstår som en ca. 40 meter bred sone med seismiske hastigheter ned mot 3000 m/s. Planlagte målinger på sonen nede i tunnelen ble ikke utført.



Figur 2: Refraksjonsseismiske data østlige del av Lunnertunnelen (fra Geomap 2003).

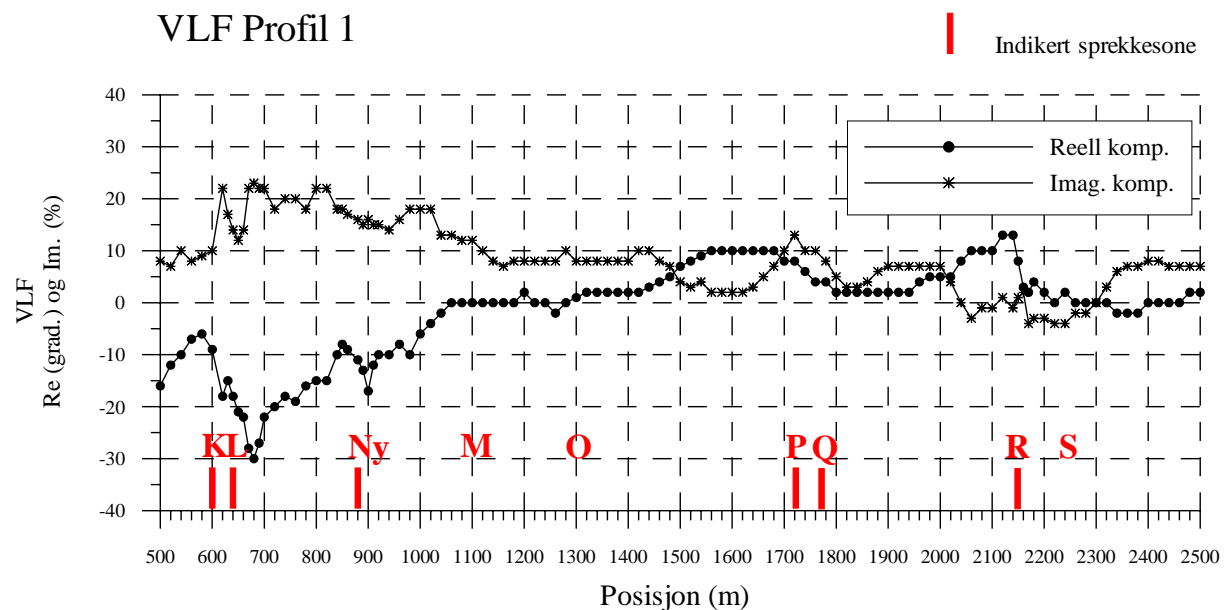


### 3.3 VLF-EM, Very Low Frequency Electro-Magnetic

VLF-målinger er en enkel og billig metode som har vært benyttet en del ved grunnvannsundersøkelser ved sprekkesoner i fjell både i Norge og internasjonalt. Det er blitt antydnet at denne teknikken til en viss grad kan forutsi muligheter for vannuttak i brønner (Müllern og Ericsson 1982, Rønning 1985). I dette prosjektet har en valgt å ta med VLF for å kunne vurdere denne metoden opp mot 2D resistivitetsmålinger (se avsnitt 4.1).

VLF er en elektromagnetisk metode som benytter fjerntliggende militære radiostasjoner som energikilde. EM-feltet fra disse, som i utgangspunktet har et horisontalt magnetfelt, setter opp strømmer i elektrisk ledende strukturer i bakken (svakhetssoner og mineraliseringer). Effekten av disse sekundære strømmene kartlegges ved å måle det totale magnetfeltets dipvinkel (realdel) og en størrelse som er avhengig av sonenes elektriske ledningsevne (imaginærdel). Ledende strukturer påvises ved at dipvinkelen (Real-delen) bygger seg opp positivt mot en sone, bryter ned og ideelt passerer 0 over sonen, for deretter å bli negativ. Metoden er meget følsom for tekniske anlegg, spesielt kraftlinjer. Innenfor "tunnelprosjektet" er metoden benyttet ved Lunner-tunnelen, på Krokskogen og ved Øysand-Thamshavn.

Resultater fra målingene er beskrevet i respektive rapporter (Rønning og Dalsegg 2001, Dalsegg m. fl. 2003a, Dalsegg m. fl. 2003c). Eksempler på resultater fra Lunnertunnelen er vist i figur 3. Data viser svake men klare anomalier på svakhetssonene K, L, Ny og R. Sonene P og Q viser sammen en meget svak anomali. Det kan se ut som disse interfererer med hverandre. Sonene M, O og S indikeres ikke. Her er det ikke noe støy fra tekniske anlegg, men i urbane områder har dette vist seg å være et betydelig problem. En sammenligning av resultater oppnådd med VLF-målinger og 2D resistivitet blir diskutert i kapittel 6.

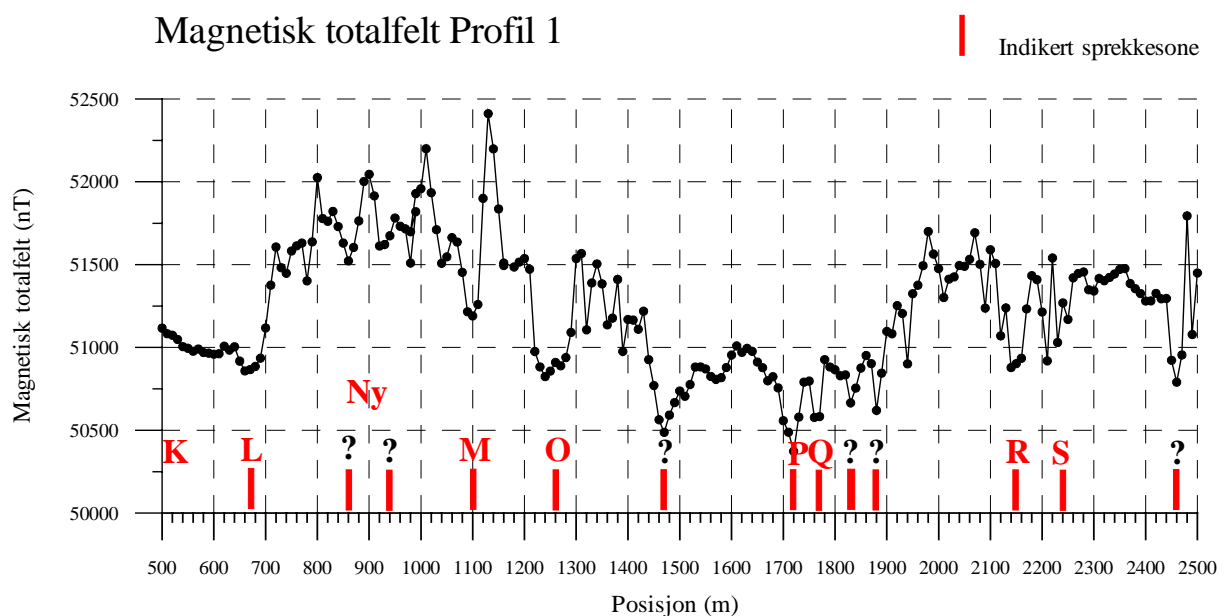


Figur 3: Eksempel på VLF-data med tolkning over østlige del av Lunnertunnelen.

### 3.4 Magnetiske målinger

Magnetiske målinger for kartlegging av svakhetssoner kan med godt resultat benyttes både ved regionale studier (Henkel & Guzmán 1977, Olesen og Sandstad 1993) og ved mer detaljerte studier (Olesen m. fl.1992, Banks & Robins 2002).

Metoden kan påvise bergartsgrenser og forkastninger, men også sprekkesoner i en ellers homogen bergart. Det siste bygger på oksydering av magnetitt til mineralet martitt (en variant av hematitt) som er mindre magnetisk (Henkel & Guzman 1977). Vannførende sprekkesoner fremstår på grunn av dette som magnetiske minimum. Metoden forutsetter at bergarten i utgangspunktet inneholder noe magnetitt. Magnetiske målinger ble benyttet ved Lunner-tunnelen og Øysand-Thamshavn.



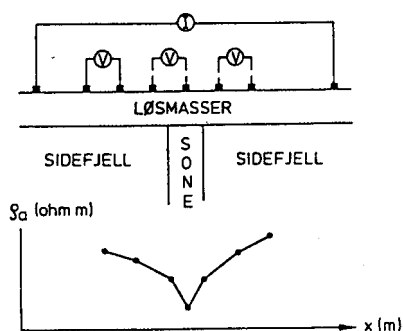
Figur 4: Eksempel på magnetiske data med tolkning over østlige del av Lunnertunnelen.

Figur 4 viser målt magnetisk totalfelt langs østlige del av Lunnertunnelen. I hovedtrekk avspeiler måledata geologien med kambrosilurisk hornfels frem til ca. koordinat 650 (lavmagnetisk) og noe mer variert innenfor Oslofeltets intrusiver og vulkanitter. Tidligere geologisk kartlagte soner M, O, P, Q, R og S viser klare magnetiske minimum. Sone L viser et beskjedent avvik, mens sone K ikke indikeres. En sone benevnt som "Ny" synes å ligge på et magnetisk maksimum (posisjon usikker). Profilet viser ellers klare minima hvor det ikke er kartlagt noen soner, verken ved de geologiske forundersøkelsene eller gjennom arbeidet innenfor "Miljø- og samfunnstjenlige tunneler". Det magnetiske bildet preges ellers av enkelte topper som trolig representerer naturlige variasjoner i bergartenes magnetittinnhold. Utslag på bare ett målepunkt oppfattes som støy.

Ved Øysand-Thamshavn ga ingen av de påviste svakhetssonene anomali ved magnetiske målinger. Årsaken til dette er at bergartene i utgangspunktet inneholder lite magnetitt.

### 3.5 Kombinerte elektriske målinger

I løpet av første halvdel av 80-tallet arbeidet flere miljøer i Norge med resistivitetsmålinger (geoelektriske målinger) ved kartlegging av svakhetssoner. Disse rettet seg både mot problemer knyttet til tunneldrift og mot vannforsyning (Pedersen og Veslegaard 1985, Rønning 1985). Det ble hovedsaklig arbeidet med en elektode-konfigurasjon (Wenner eller Gradient) og disse målingene hadde ikke mulighet til å skille horisontale og vertikale variasjoner i resistivitet (inverse av elektrisk ledningsevne).



Figur 5: Prinsipp for kartlegging med Gradient elektodekonfigurasjon og tilhørende resistivitetskurve.

Ved gradientmålinger ble strømelektroder plassert 100 – 200 meter til hver side for en svakhetszone. Strøm med alternerende polaritet ble sendt i pulser (vanligvis 2 sekunder). Oppsatt elektrisk potensial ble målt med to potensialelektroder som ble flyttet trinnvis mellom strømelektrodene (se figur 5). Ut fra målt potensial i strømtiden og en geometrisk faktor bestemt av elektodeplasseringene, kan en tilsynelatende resistivitet beregnes. Ordet tilsynelatende gjenspeiler at dette er en verdi sammensatt av effekter fra volumer med forskjellig størrelse og spesifikk resistivitet. Ved Indusert Polarisasjon, IP, måles et utladningspotensial like etter strømbrudd. Divisjon med potensialet i strømtiden, gir den såkalte IP-effekten i prosent (promille) eller i millisekund (ms).

Ut fra oppnådde resultater i første halvdel av 80-årene ble det satt opp en tolkningsmodell som vist i tabell 1 (Pedersen og Veslegaard 1985). Ved presentasjon av modellen ble det påpekt at ledende mineraler som kis og grafitt kunne vanskeliggjøre tolkningene, og at marin leire i søkkene over sonene kunne påvirke målingene.

SONETYPE	RESISTIVITET	IP-EFFEKT
Leirførende svakhetszone	Lav	Lik eller høyere enn sidefjellet
Svakhetszone med vann og leire	Lav	Lavere enn sidefjellet
Rene vannsoner	Høyere enn leirsoner	Lavere enn sidefjellet
Oppsprukket fjell uten fritt bevegelig vann	Høyere enn vannsoner	Sammenlignbar med massivt fjell av samme bergart
Intakt massivt fjell	Høy	Avhengig av bergart

Tabell 1: Tolkningsmodell for resistivitet og IP målinger (Etter Pedersen og Veslegaard 1985).

Ved NGU ble resistivitetsmålinger forsøkt brukt til å evaluere muligheter for grunnvannsuttak fra sprekkesoner. En kunne imidlertid ikke finne noen klar korrelasjon mellom vann-giverevne og resistivitetsanomali (Rønning 1985). En fikk imidlertid et inntrykk av at de sonene med lavest resistivitet ofte ga lite vann (tette leirsoner?).

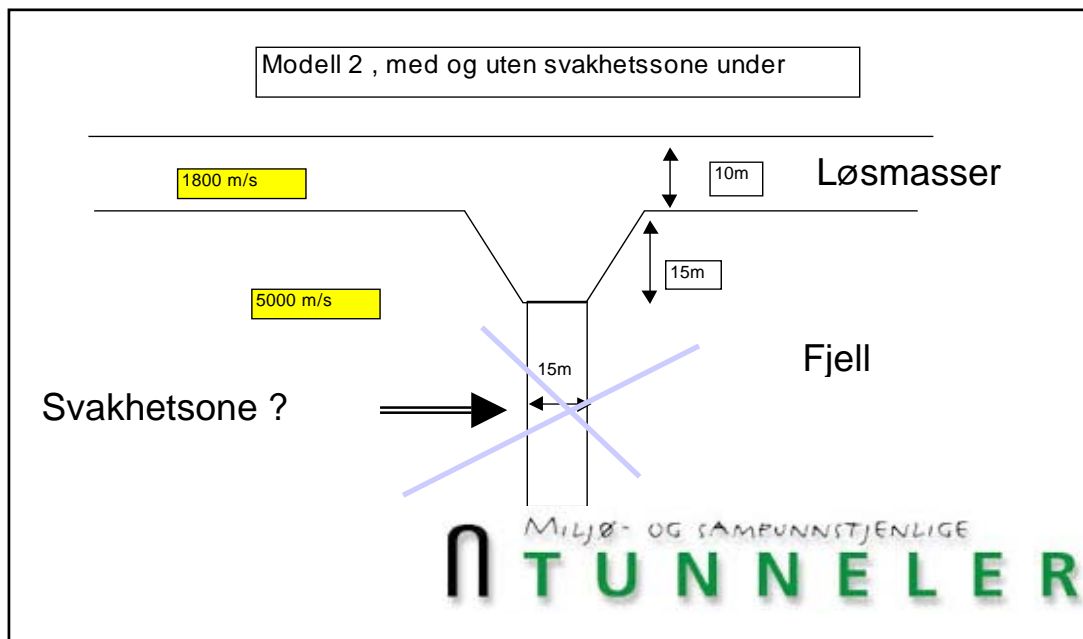
## 4. NYERE GEOFYSISKE METODER

Under kapitlet nyere geofysiske metoder sorterer de teknikkene som har vært utprøvd innenfor "*Miljø- og samfunnstjenlige tunneler*". Bakgrunn for valget av disse metodene er beskrevet i kapittel 2. I det følgende gis en kort historisk presentasjon av bruken av teknikken i Norge, en kort metodebeskrivelse og deretter eksempler på oppnådde resultater. Det foretas også en kort vurdering av metoden. En bredere diskusjon av metoden, sett i lys av andre metoder og senere erfaringer fra tunneldriving, blir gitt i kapittel 6.

### 4.1 Seismisk modellering

Den teknologiske utviklingen har etter hvert gjort det mulig å simulere seismisk bølgeforplantning i komplekse modeller på en effektiv måte. En kan ta utgangspunkt i reelle geologiske modeller og studere hvordan bølgene brer seg utover i jordmodellen; hvordan de brytes og endrer hastighet i de ulike lagene. En forenklet modellering kalt "Raytracing", beregner den raskeste gangvegen mellom et skudd og mottagere i forskjellige posisjoner. Ved å simulere ulike geologiske modeller, kan styrke og svakheter ved seismiske metoder studeres.

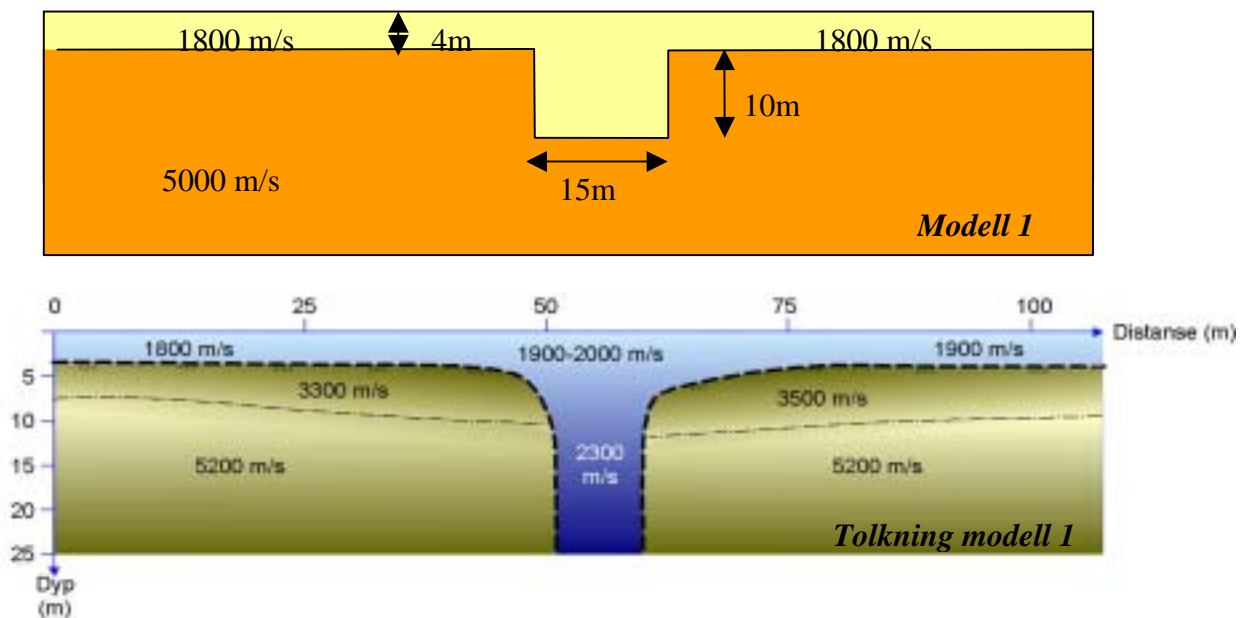
Metodiske svakheter ved refraksjonsseismikken knyttet til blindsonelag og hastighetsinversjon, har lenge vært kjent. Ofte er datagrunnlaget tvetydig, og en må gjøre et modellvalg ved tolkningen. For å gi et bilde av hvilke usikkerheter det er knyttet til dette, er det foretatt et eksperiment der en simulerer måledata fra en gitt modell. Data ble tillagt støy og senere tolket automatisk og manuelt. Tolkningen ble senere sammenlignet med opprinnelige modell. Simuleringene og sammenligningen er utført av Harald Westerdahl ved NGI mens selve tolkningen ble utført av Geomap as ved Ole C. Pedersen (Westerdahl 2003).



Figur 6: Illustrasjon av problemstillingen: Kan refraksjonsseismikk se svakhetssoner under depresjoner.

I modelleringen er det fokusert på mulighetene for å påvise svakhetssoner i fjell i bunnen av en depresjon i fjelloverflaten (figur 6). I korthet viser den automatiske tolkningen at en modell som kun består av en depresjon i fjelloverflaten under et løsmasseoverdekke, ofte kan indikere nedsatt hastighet i fjellet under (Westerdahl 2003, figur 6 og 7). Simuleringene viser også at dersom en har en svakhetszone med begrenset dybderekkevidde, er det i praksis umulig å finne dypet av denne med mindre en tar i bruk mer tidkrevende seismiske målinger (refleksjonsseismikk, tomografi, "tett refraksjon") (Westerdahl 2003). Kabelheng i steil undersjøisk topografi vil kunne tolkes som løsmasselag og svakhetszone i fjellskrenten (Westerdahl 2003, figur 16).

For å undersøke hvordan en erfaren tolker velger å presentere modellusikkerheter, ble det foretatt en blindtest. Simulerte data fra en enkel modell med kun en depresjon i fjelloverflaten, ble av erfaren seismisk tolker presentert som svakhetszone i underliggende fjell (figur 7). I tillegg ble det også lagt inn en forvitringssone i fjellet. En tilsvarende modell med skrå flanker i depresjonen ble også presentert som svakhetszone i tillegg til en fortegning av fjelloverflaten.



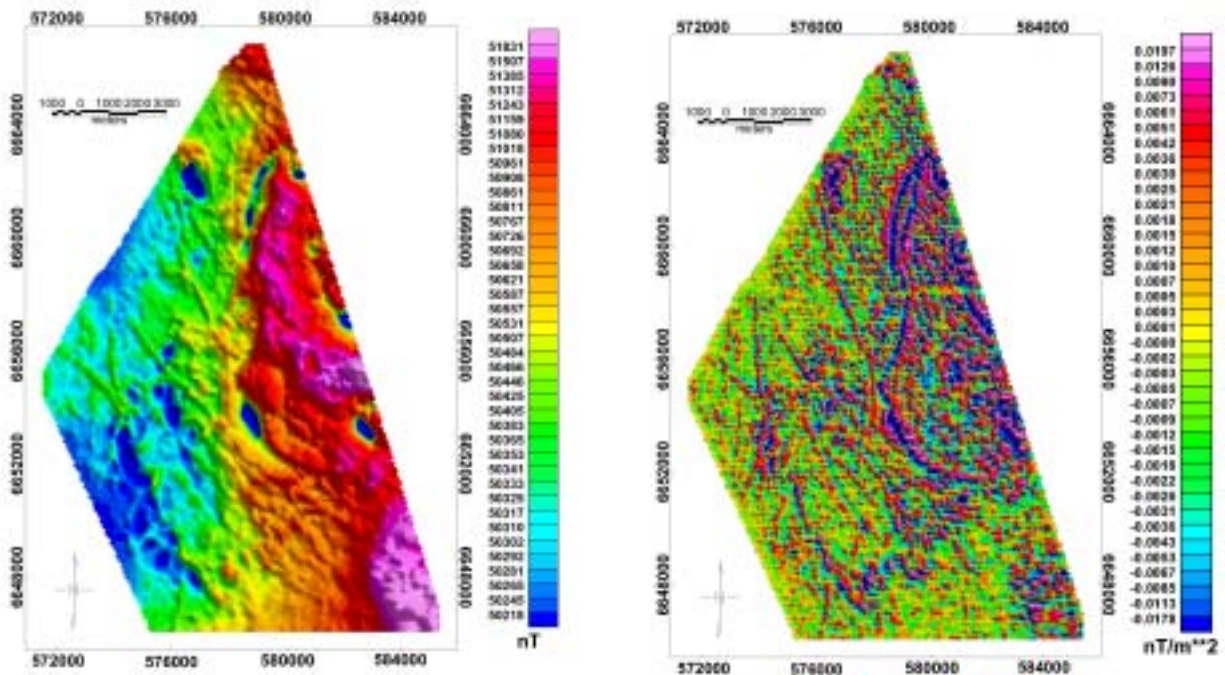
Figur 7: Modell (øverst) brukt under beregningen av syntetiske data og resultat av tolkning (nederst).

Modelleringene og blindtesten viser at tolkninger av refraksjonsseismikk kan være beheftet med større usikkerheter enn det brukerne er klar over. Dette er det viktig å kjenne til slik at feilvurderinger kan unngås. Testen viser også at tolkningen på en måte presenterer det verst tenkelige tilfellet: Svakhetszone tolkes inn, det angis en mulig forvitring i de øverste delene av fjellet og løsmassemektigheten overdrives. Dersom alle refraksjonsseismiske tolkninger gjøres på denne måten, kan de virkelige forholdene være bedre enn det som skisseres i den seismiske tolkningen.

## 4.2 Geofysiske målinger fra fly og helikopter

Geofysiske målinger fra fly og helikopter er ved ett tilfelle tidligere benyttet ved tunnelundersøkelser. Dette var i en tidlig fase av planleggingen av jernbanetunnel under Krokskogen fra Sandvika mot Hønefoss. Data ble samlet inn av NGU i 1997 (Beard og Rønning 1997). Tolkninger av data ble sammenstilt sammen med regional geologi høsten 1997 (Beard m. fl. 1997). Ved oppstart av undersøkelsene ved Lunnertunnelen ble tilgjengelige data målt fra helikopter (Beard 1998, Beard og Mogaard 2001) tolket og rapportert (Beard 2001). Som en del av "tunnelprosjektet" ble det opprinnelig planlagt å gjøre nye målinger over Romeriksporten. Av økonomiske grunner ble dette ikke realisert.

Data målt fra helikopter kan omfatte målt magnetisk totalfelt, beregnet vertikal magnetisk gradient, radiometriske data (totalstråling og bakkekonsentrasjon av Uran, Thorium og Kalium), elektromagnetiske data (reell- og imaginærkomponent) målt ved flere frekvenser/spoleorienteringer og VLF totalfelt målt ved bruk av to stasjoner som favoriserer strukturer i to forskjellige retninger. Nærmere beskrivelse er gitt i faglitteraturen og i innsamlings-/prosesseringsrapporter. Ved tolkning av disse datasettene er det utarbeidet lineamentskart som viser hvor de forskjellige geofysiske anomaliene finnes. Hva de enkelte anomaliene betyr for tunneldrivere, er lite kjent, og en bedre forståelse av dette var en av hovedgrunnene for å inkludere helikoptermålte geofysiske data i "Tunnelprosjektet".



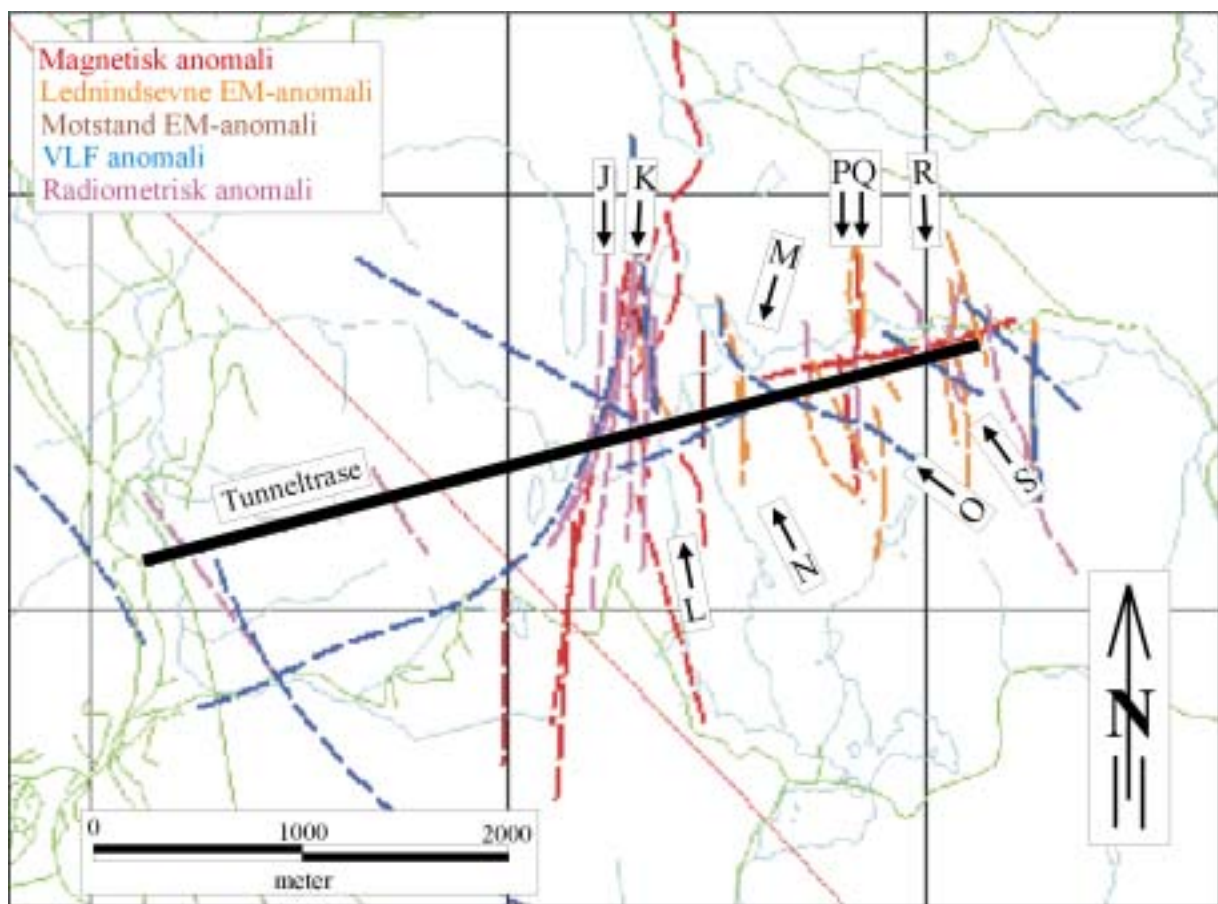
Figur 8: Magnetisk totalfelt (venstre) og beregnet magnetisk andrederiverte (høyre), Krokskogen.

Figur 8 viser hvilken informasjon som kan ligge i data over magnetisk totalfelt, i dette tilfellet over Krokskogen. Nivåforskjeller avspeiler berggrunnsgeologien. Lineamenter i kartbildet representerer trolig forkastninger og/eller svakhetssoner. I den prosesserte versjonen til høyre (magnetisk andrederiverte) fremstår disse lineamentene klarere, og ut fra dette bildet ble det digitalisert 73 magnetiske lineamenter. Tilsvarende ble det markert 22 lineamenter fra de radiometriske data, 39 fra EM-data og 26 fra VLF-data. De fleste av disse kunne korreleres



med kjente forkastninger og svakhetssoner eller bergartsgrenser, mens andre ikke hadde umiddelbar forklaring (Beard m. fl. 1997). Manglende forklaring på anomalier og tvilsomme forløp på enkelte VLF-anomalier var årsak til at Krokskogen ble tatt opp som objekt innen "Miljø- og samfunnstjenlige tunneler".

Tolkningskart for geofysiske lineamenter over Lunnertunnelen er vist i figur 9. Anomali-dragene fra de forskjellige metodene er vist med forskjellig farge. Til sammen er det tolket 12 lineament ut fra magnetiske data, 15 fra radiometriske data, 17 fra EM-data og 10 fra VLF-data. Magnetiske lineament kan skyldes bergartsgrense, forkastning eller svakhetszone i fjellet. Alle disse representerer relevant informasjon for tunneldrivere. Radiometriske linamenter kan skyldes bergartsgrenser, men også variasjoner i løsmassetykkelsen, og en må derfor være mer forsiktig i tolkningen av disse. EM- og VLF-data viser respons på elektrisk ledende strukturer i bakken. Dette kan være metalliske mineraliseringer, karbonrike skifere (alunskifer) eller svakhetssoner. Sistnevnte gir respons fordi oppsprekking gir større porevolum som fylles med vann og/eller leirmineraler. I noen tilfeller kan også løsmassene gi respons på elektromagnetiske målinger.



Figur 9: Geofysiske lineamenter over Lunnertunnelen (etter Beard 2001).

Tolkningskartet ved Lunnertunnelen viser en konsentrasjon av linamenter sentralt i tunneltraséen, like vest for Langvatnet (figur 9). Her går kontakten mellom kambrosilurisk hornfels på vestsiden og Oslofeltets permiske intrusiver og vulkanitter mot øst (sone K). I tillegg var det på forhånd kartlagt en forkastning/svakhetszone i dette området. Her var en videre oppfølging med geofysiske målinger på bakken selvskrevet. Øst for Langvatnet finnes også flere konsentrasjoner av linamenter. Posisjoneringen av disse er på grunn av anvendte

målestokk usikker, men det synes klart at de fleste geologisk kartlagte sonene (M til S, se også figur 1) gir respons ved en eller flere av de geofysiske metodene. Opprinnelig var det ikke planlagt videre oppfølging med målinger på bakken her, men på grunnlag av beskrevne tolkninger ble det besluttet å utvide bakkemålingene østover i hele tunnelens lengde. Det fremkom her flere svakhetssoner, hvorav to soner ga spesielt store problemer ved tunneldriften ( se avsnitt 6.2.2).

Geofysiske målinger fra helikopter er relativt ressurskrevende. For at målingene skal ha noen verdi, må større områder måles slik at en kan tolke strukturer fra et større kartbilde. Magnetiske data har vist seg å være mest anvendelig for kartlegging av bergartsgrenser, forkastninger og svakhetssoner. Radiometriske data gir mest informasjon om utbredelsen av de ulike bergartene. VLF og elektromagnetiske data vil i praksis gi respons på større svakhetssoner. Modell-beregninger viser at elektromagnetiske målinger i krystallinsk bergrunn normalt gir respons på soner med mer enn 10 meters tykkelse (Beard m. fl.1997).

### **4.3 Geofysiske målinger på bakken**

Resistivitet og induert polarisasjon har vært benyttet ved malmundersøkelser og til dels kartlegging av svakhetssoner i fjell (se avsnitt 3.5) gjennom flere 10-år her i Norge. I løpet av 90-årene er det utviklet nye systemer for datainnsamling og invertering av denne type data. Dette har gitt nye muligheter for kartlegging i to dimensjoner (2D) som før arbeidet med "*Miljø- og samfunnstjenlige tunneler*" startet, var lite utnyttet i Norge.

#### 4.3.1 To-dimensjonal Resistivitet

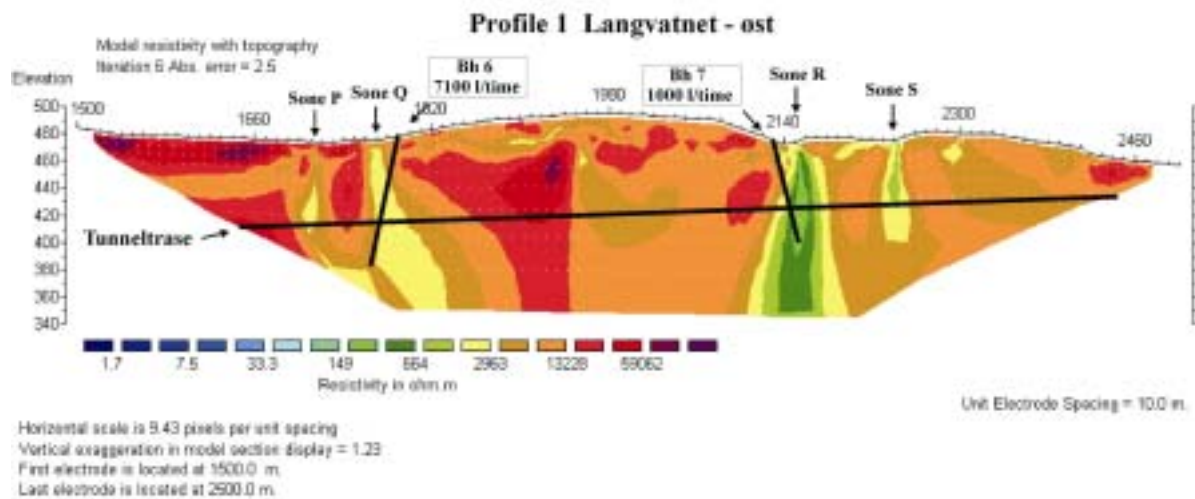
I løpet av 1990-årene ble det utviklet effektive multikabel-systemer som samtidig kunne kartlegge variasjoner i resistiviteten både horisontalt og vertikalt (se bl.a. Dahlin 1993). Gjennombruddet for denne type målinger kom med utviklingen av effektive inverteringsrutiner (Loke og Barker 1995). Disse nye 2D resistivitetsmålingene ble først benyttet i Norge under et Nordisk Forskerkurs (NorFA) som ble arrangert i Oslo i august 2000. Det ble da målt et ca. 1500 meter langt profil over Romeriksporten (NorFA 2000). Disse målingene påviste fire soner med lav resistivitet ned til dyp tilsvarende målingenes rekkevidde (ca. 130 meter). Resultatene var så oppmuntrende at 2D resistivitet ble en av hovedmetodene innenfor "Tunnelprosjektet" og metoden er senere benyttet ved Lunnertunnelen, Jong-Asker, Krokskogen og Øysand-Thamshavn.

Målingene er utført ved at kabler med elektrodeuttak for hver 10 meter legges ut på bakken. Elektroder kobles til kablene som igjen er koblet til en releboks. Denne sørger for at strøm sendes mellom parvise elektroder samtidig som spenningen måles mellom parvise elektroder langs kabelen. Prosessen styres av en integrert PC i sender-/mottagerboksen. Tilsynelatende resistivitet beregnes ut fra kjente formler. Ved å la en konfigurasjon med fast avstand mellom elektrodene flytte seg langs kabelen, kartlegges tilsynelatende resistivitet til et gitt dyp langs utlegget. Ved å øke avstanden mellom strømelektrodene kartlegges variasjonene mot dypet. På denne måten bygges opp en pseudoseksjon av tilsynelatende resistivitet i 2 dimensjoner. Ved å invertere disse måledata, finne den sanne resistiviteten i forskjellige dyp, kan en fysisk



resistivetsmodell for undergrunnen beregnes. Denne fysiske modellen må deretter tolkes for å finne en geologisk modell som kan passe til de målte data.

Metodens dybderekkevidde avhenger av hvor mange kabler som benyttes og lengden av disse. To kabler på til sammen 400 meter "ser" ca. 65 meter ned i bakken. Ved fire kabler kan dybderekkevidden økes til ca. 130 meter. På grunn av liten følsomhet i de dypeste partiene, er den "praktiske dybderekkevidden" mindre enn dette.



Figur 10: Kartlagt resistivitet langs østligste del av Lunnertunnelen.

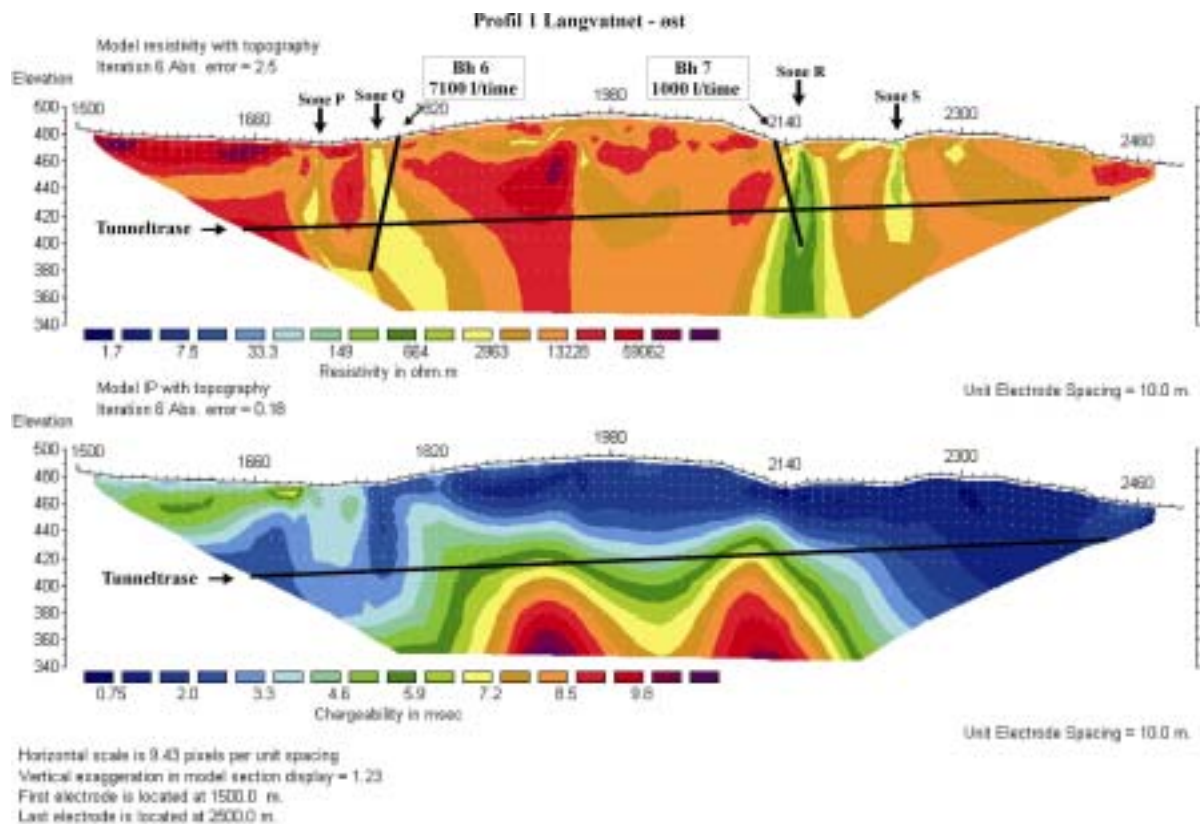
Figur 10 viser eksempel på en resistivetsmodell over østlige del av Lunnertunnelen. Alle de 4 geologisk kartlagte svakhetssonene (sonene P, Q, R og S) indikeres med lavere resistivitet enn omgivelsene. Sone R har spesielt lav resistivitet, og denne synes å ha en bredde på ca. 40 meter i tunnelnivå. Denne sonen ga spesielt vanskelige driftsproblemer i tunnelen (se avsnitt 6.2.2). Store partier av dette profilet viser relativt høye resistivetsverdier (>5000 ohmm) og i disse delene ble det under tunneldriften rapportert om gode driftsforhold. Brønnenes vann-giverevne er bestemt ved prøvepumping (se avsnitt 4.5).

#### 4.3.2 To-dimensjonal Indusert Polarisasjon (IP)

Samtidig med resistivetsmålingene, som ble studert tidlig på 80-tallet, ble det også målt Indusert Polarisasjon (IP). Også ved disse målingene ble det benyttet en elektrode-konfigurasjon (Wenner eller Gradient), og en kunne ikke skille mellom laterale og vertikale variasjoner i målte verdier. Det ble likevel utarbeidet en tolkningsmodell som skilte mellom leirfylte svakhetssoner og rene vannsoner (se avsnitt 3.5). Metoden har ikke slått gjennom, og i fagmiljøet er det reist tvil om IP kan benyttes for karakterisering av svakhetssoner i berg. Siden en nå kan foreta kartlegging i to (og tre) dimensjoner, og fordi målingene kan gjøres samtidig med resistivetsmålinger uten ekstra tidkrevende kabelarbeid, ble metoden tatt med i undersøkelsene over Lunnertunnelen, ved Jong-Asker, på Krokskogen og ved Øysand-Thamshavn.

Ved IP-målinger benyttes samme kabel- og elektrodeoppsett som ved resistivetsmålingene. IP-målingene gir et bilde av bergartenes evne til å polariseres når det sendes strøm gjennom.

Leirmineraler har generelt denne egenskapen som gir IP-effekt, men effekten er mye svakere enn IP-effekten fra malmmineraler. Leirmineraler i svakhetssoner skal altså i teorien kunne påvises ved IP-målinger.



Figur 11: Resistivitet og Indusert polarisasjon langs østligste del av Lunnertunnelen.

I figur 11 er det ikke mulig å korrelere IP-effekt til de påviste svakhetssonene. Sone Q, som her viser moderat resistivitetsanomali, og som ved optisk inspeksjon viser rene åpne vanngivende sprekker, indikerer litt lavere IP-effekt enn omgivelsene. Ved sone R, som viser en meget lav resistivitet, er det imidlertid ikke noen utslag som kan korreleres med svakhetssonen. Dette til tross for at sonen hadde betydelige stabilitetsproblemer ved drivingen, trolig på grunn av høyt leirinnhold i sonen. Positive IP-anomalier i de dypere deler av profilet ser ikke ut til å ha noen kobling til svakhetssonene. Det må altså konkluderes med at IP-effekten ikke er en pålitelig indikator for karakterisering av svakhetssoner under de gjeldende geologiske forhold.

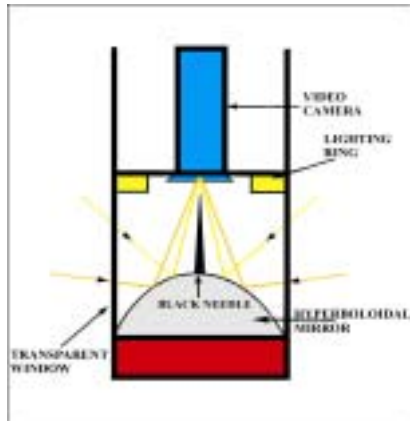
#### 4.4 Geofysiske målinger i borehull

Geofysisk logging av borebrønner i fjell er et relativt nytt tema innen anleggsbransjen. Borehullslogging er helt vanlig og meget nødvendig for oljeindustrien, og har også til dels vært vanlig i mineralprospektering. I dette avsnittet beskrives loggeteknikker som video-inspeksjon med optisk televiewer, logging av resistivitet, temperatur, vannets ledningsevne og naturlig gammastråling. Andre loggeteknikker kan også gi relevant informasjon om bergrunnsgeologi, sprekkeforløp og vanninnhold, men her omtales kun de metodene som er benyttet i "Tunnelprosjektet".

#### 4.4.1 Videologging, Optisk Televiever (OPTV)

Akustisk og optisk televiever ble testet ut innenfor forprosjektet til "*Miljø- og samfunnstjenlige tunneler*" i 1999, og det ble tidlig klart at optisk televiever var å foretrekke fremfor akustisk (Elvebakk og Rønning 2001a). Metoden er benyttet ved Lunner, Romeriksporten, Krokskogen, Jong-Asker og Øysand-Thamshavn. Undertegnede kjenner bare til en internasjonal publikasjon på bruk av metoden (Siddans 2002).

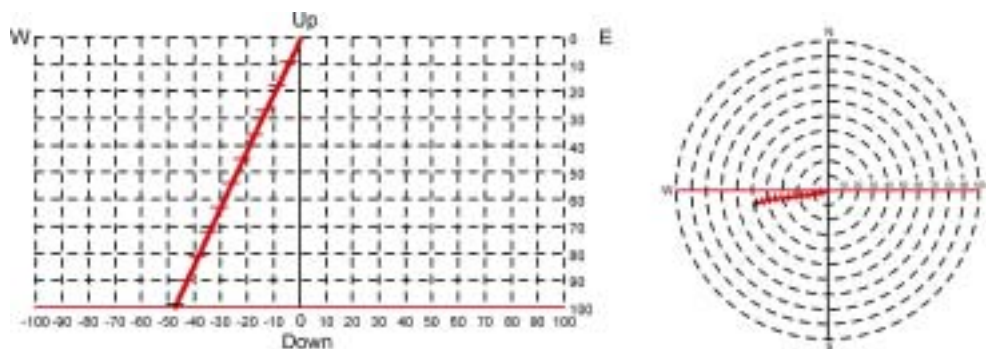
#### Måleprinsipp og utførelse



Optisk televiever består av et digitalt kamera som filmer mot et hyperbolsk speil (se figur 12). 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 mindre enn 0,5 mm. Metoden kan benyttes i tørre og vannfylte hull, men krever selvsagt relativt klart vann.

Figur 12: Prinsippkisse optisk televiever

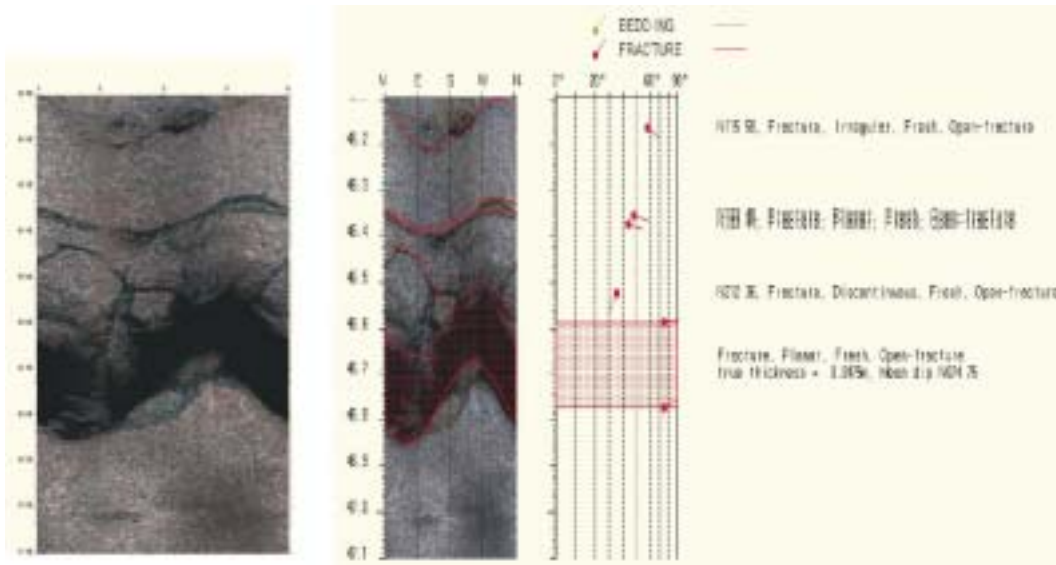
Utstyret har innebygget følere som kan orientere sonden uansett borehullets forløp. På denne måten kan det kartlagte bildet orienteres, og strøk, fall og sann tykkelse av kryssende strukturer beregnes. Med data fra denne instrumenteringen kan også borehullets forløp (avvik) beregnes (Figur 13).



Figur 13: Eksempel på borehullsforløp, vertikal- og horisontalsnitt, Bh 6 Lunner.

#### Analyse av data

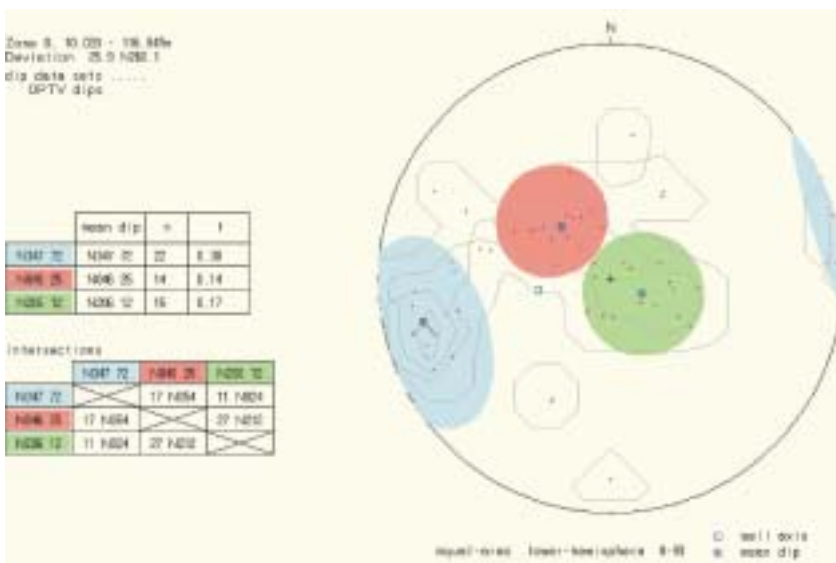
Ved analyse brettes det orienterte digitale bildet av borehullsveggen ut (se figur 14). Plane sprekker som skjærer borehullet på skrå, vil da indikeres som en sinusformet kurve. Steile sprekker vil indikeres med store amplituder ved loddrette hull. Dersom borehullet skjærer sprekken vinkelrett, vil disse 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 sprekken en viss utbredelse, kan både topp og bunn digitaliseres, og derved kan den sanne åpning (true thickness) beregnes. Analyseprogrammet inneholder en menystyrt beskrivelse av de enkelte hendelser. Tilsvarende analyse kan gjøres for primære andre geologiske strukturer (ganger, lagdeling, foliasjon).



Figur 14: Eksempel på opptak og analyse, Bh6 Lunner.

Til venstre i figur 14 er det originale opptaket vist. Til høyre er det samme opptaket analysert. Enkeltstående 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 sprekkenes er beregnet.

Når alle observasjoner er digitalisert, kan en utføre sprekke- og strukturanalyse. Etter å ha plottet polen (normalvektoren) til alle digitaliserte sprekker i et stereogram (figur 15), kan forskjellige sprekkegrupper defineres. Disse får tildelt en farge, og sprekkegruppens middelverdi for strøk og fall beregnes. Det kan også gjøres analyse på skjæringslinjer mellom midlere sprekkeplan.



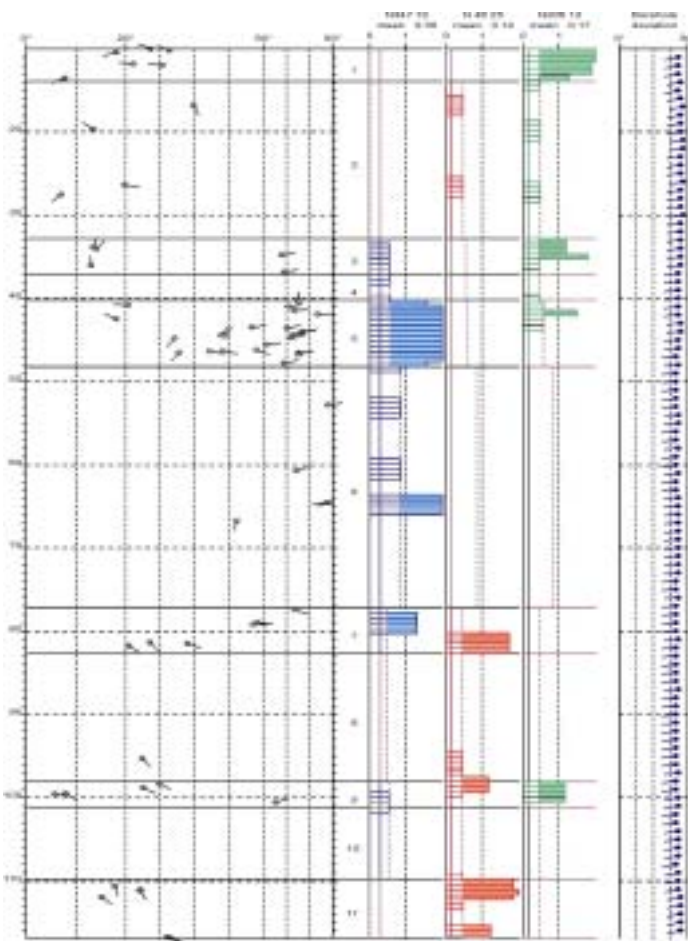
Figur 15: Eksempel på analyse av sprekker i stereogram, Bh7 Lunner.



Øverste tabell i figur 15 viser midlere sprekkeretning/fall, antall sprekker og sprekkfrekvens beregnet for hver av gruppene. Nederste tabell viser retning og fall på skjæringslinjen mellom de midlere sprekkeplanene.

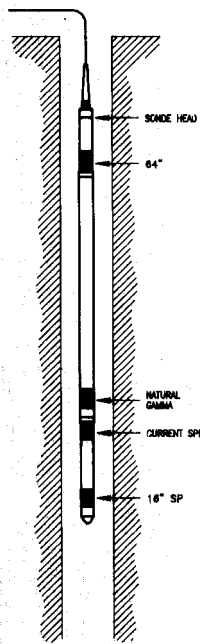
Neste trinn er å plote alle digitaliserte observasjoner, nå med tilordnet gruppefarge, som funksjon av dyp. De forskjellige sprekkemønstrene tilordnes histogrammer, og på grunnlag av disse kan hullet deles inn i soner som hver er karakterisert med et spesielt sprekkemønster. Sprekkfrekvens for alle definerte grupper kan deretter beregnes innenfor hver sone i borehullet. Tilsvarende analyser kan også gjøres for gangbergarter, foliasjon og eventuelt bergartsgrenser. I tillegg til grafisk presentasjon kan alle data listes i tabellform.

Figur 16 viser et eksempel på sprekkelogg fra Bh 6 ved Lunnertunnelen. Til venstre vises de individuelle sprekkene som pilplott. Hodet angir sprekkens fall, mens halen angir fallets retning (Nord rett opp). Histogrammene viser hvor i borehullet de forskjellige sprekkemønstrene opptrer. Heltrukne horisontale linjer angir grenser mellom definerte soner. Borehullets forløp er angitt som pilplott helt til høyre. Analysen viser at sprekkene opptrer i soner. Relativt steile sprekker (blå type, midlere strøk  $347^{\circ}$  og midlere fall  $72^{\circ}$ ) opptrer i første del av hullet, mens i dypere deler dominerer sprekker med et slakere fall (rød type, midlere retning  $46^{\circ}$  og fall  $25^{\circ}$ ). En tredje populasjon (grønn type, midlere retning  $206^{\circ}$  og fall  $12^{\circ}$ ) opptrer hovedsakelig i hullets grunnere deler.



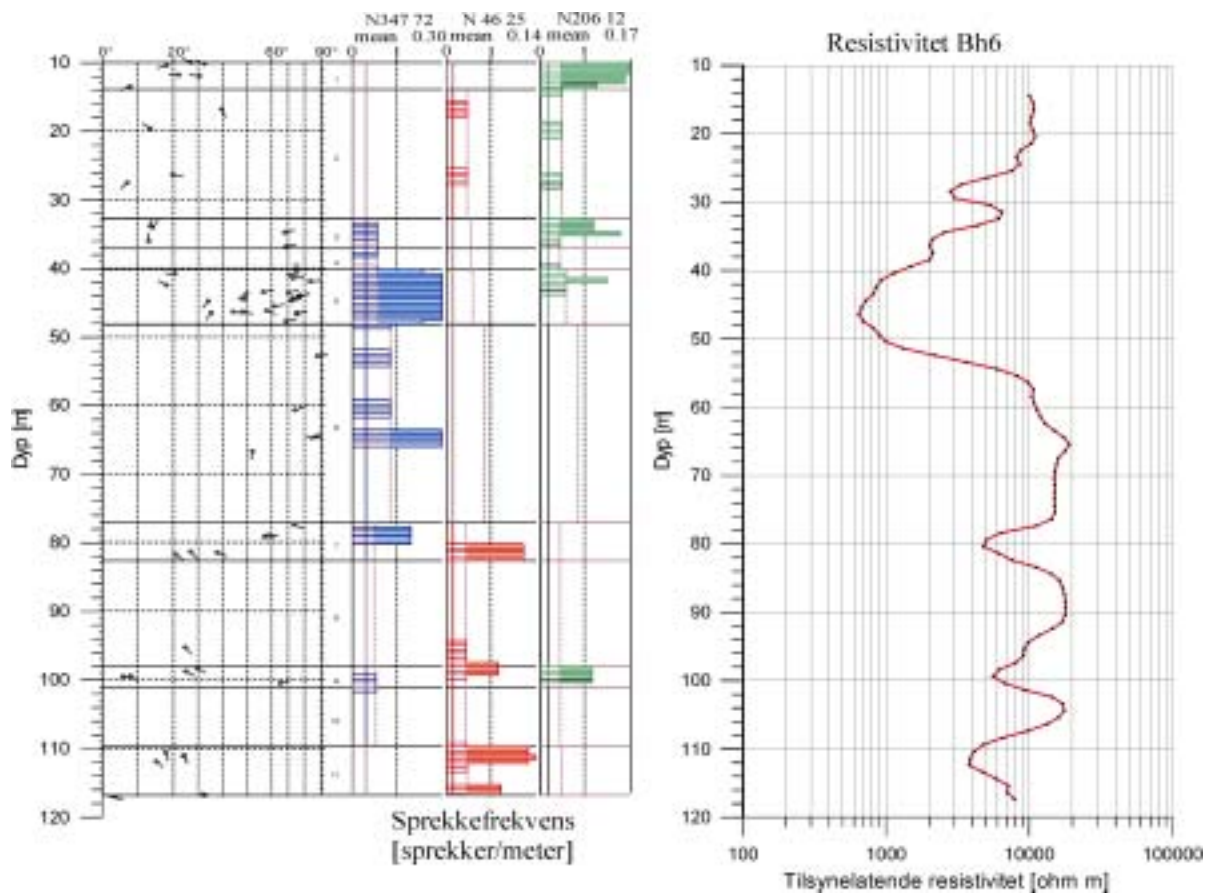
Figur 16: Sprekkelogg for borehull 6, Lunnertunnelen.

#### 4.4.2 Resistivitetslogging



Logging av bergartenes resistivitet har også til en viss grad vært utført av NGU og NTNU (NTH) siden midten av 80-årene. Innenfor "tunnelprosjektet" har disse målingene vært benyttet ved Lunner-tunnelen, Krokskogen, Jong-Asker og Øysand- Thamshavn.

Fjelllets tilsynelatende resistivitet nedover i borehull kan måles med flere elektrodekonfigurasjoner. Mest vanlig er to konfigurasjoner kalt "Short Normal" og "Long Normal". Her benyttes en strøm- og en potensialelektrode nede i borehullet og avstanden mellom de to er henholdsvis 16" (ca. 40 cm) og 64" (ca. 163 cm). Med en så kompakt sonde kan en kartlegge resistiviteten rundt borehullet, men samtidig så detaljert at den målte tilsynelatende resistivitet er mest mulig lik den spesifikke resistiviteten i berget. Ut fra målt strømstyrke og spenning og en geometrisk faktor, kan bergets resistivitet bestemmes. Denne påvirkes av porøsiteten, porevannets ledningsevne, porenes form og eventuelt ledende mineraler. Økt oppsprekning (større porøsitet) gir redusert resistivitet (økt elektrisk ledningsevne). Overgangsmotstand ved strømelektroden (Single Point Resistance, SPR) måles også, og denne er mest følsom på enkeltsprekker.

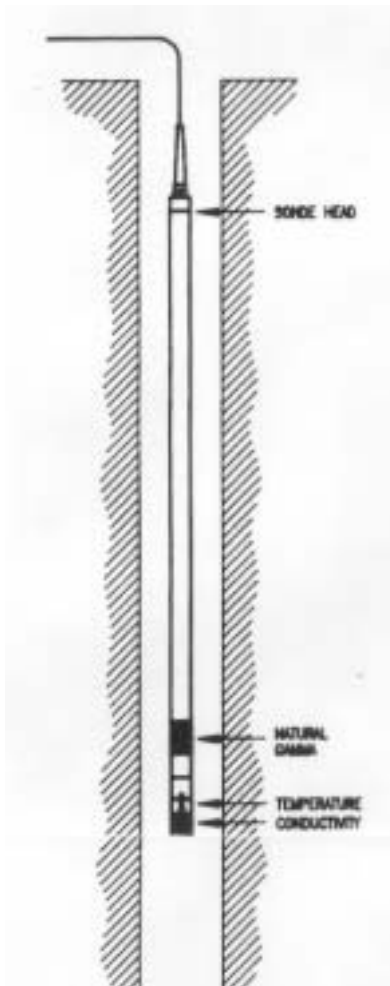


Figur 17: Målt resistivitet i borehull 6, Lunner sammen med sprekkelogg fra optisk televiewer.

Eksempel på resistivitetslogg er vist i figur 17. Denne viser en relativt god korrelasjon mellom påviste sprekker og den målte resistiviteten i borehullet. Sammenligninger med inverterte fysiske modeller (se avsnitt 4.3.1) viser at de motstandsverdier som en kan finne ved målinger på bakken, stemmer godt med målinger i borehull.

#### 4.4.3 Temperatur, vannets elektrisk ledningsevne, naturlig gammastråling

I forbindelse med grunnvannsundersøkelser har NGU og NTNU (NTH) fra slutten av 80-årene utført enkel logging av temperatur og vannets elektriske ledningsevne. Logging av gamma-stråling (naturlig radioaktivitet), ble først foretatt mot slutten av 90-årene av NGU (Elvebakk og Rønning 1998). Ved anskaffelse av optisk televiewer i 2000, ble også sonde som logger alle de tre omtalte parameterene anskaffet. Denne er senere benyttet ved Lunnertunnelen, Romeriksporten, Krokskogen, Jong-Asker, Øysand-Thamshavn og en del andre prosjekter ved NGU.



Temperatur, vannets ledningsevne og naturlig gammastråling logges med en og samme sonde med en loggehastighet på 3 m/min. Måling av vanntemperatur og vannets elektriske ledningsevne kan gi opplysninger om fjellets oppsprekking og om vanninnstrømning i borehullet. Den naturlige gammastrålingen gir informasjon om geologien generelt.

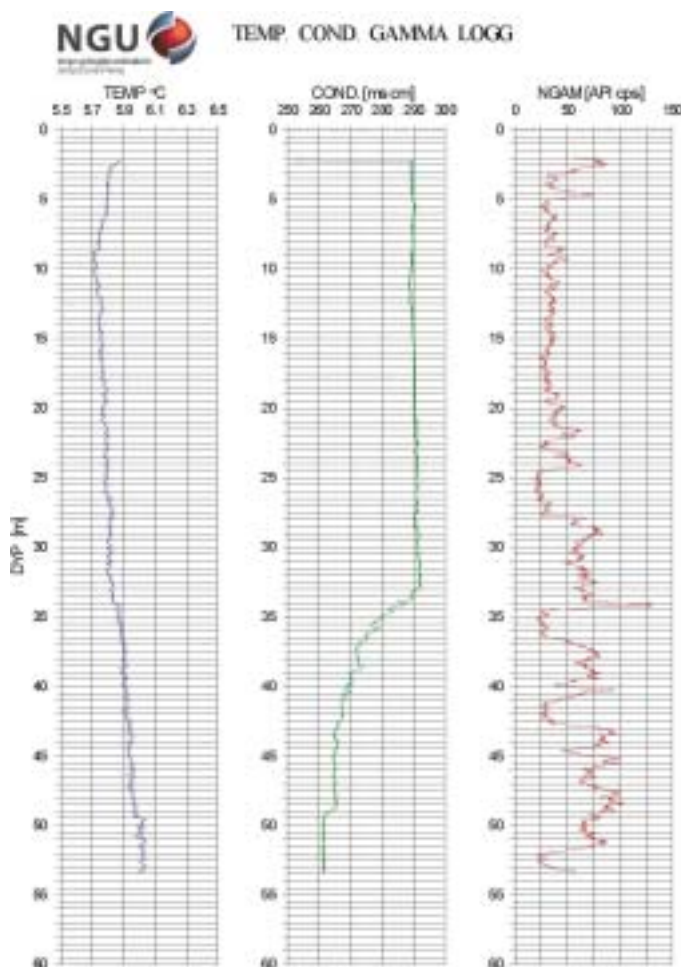
Temperatursensoren produserer en elektrisk strøm som er proporsjonal med temperaturen og kan måle temperaturer i området 0 – 70 °C. Ledningsevnen i vannet måles ved å måle strømmen i en vannfylt celle. Strømstyrken er avhengig av ledningsevnen og det kan måles i området 50 – 50,000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Naturlig gammastråling måles med en NaI-krystall (50 x 25 mm) i "counts per second" (cps), API standard. API er en internasjonal standard som sonden er kalibrert etter, slik at målinger med ulike sonder kan sammenlignes.

Forandring i vanntemperatur og elektrisk ledningsevne kan indikere innstrømning av vann med andre egenskaper enn i brønnen forøvrig. Temperaturgradienten mot dypet har betydning for grunnvarmekapasiteten. Økt ledningsevne i vannet betyr økt ioneinnhold. Lavere ledningsevne kan tyde på innstrømning av overflatevann, da slikt vann vanligvis har noe lavere ioneinnhold enn vann som har oppholdt seg lenge i fjellet.

Med gammalogg kartlegges den naturlige gammastrålingen (totalstråling) langs borehullet. Forandringer i gammastråling er knyttet til endringer i den mineralogiske sammensetningen i bergartene. Det er i hovedsak elementene kalium, uran og thorium som bidrar til gammastråling. Mest vanlig er kalium i kalifeltspat som finnes i de vanligste bergartene og i leirmineraler. Sandstein har liten gammastråling (mye kvarts), mens noen granitter har

sterkere stråling da de inneholder mye kalifeltspat og i enkelte tilfeller forhøyet innhold av uran og thorium. Alunskifer har høy stråling på grunn av forhøyet uraninnhold.

Figur 18 viser eksempel på logg av temperatur (TEMP), vannets elektriske ledningsevne (COND) og naturlig gammastråling (NGAM) (Elvebakk og Rønning 2001b) . Litt høyere temperatur dagnært skyldes påvirkning fra overflaten. En svak økning ved 33 m skyldes trolig innstrømning av vann med høyere temperatur. En tydelig nedgang i den elektriske ledningsevnen ved samme dyp bekrefter dette, og hendelsen kan korreleres med en åpen sprekk påvist ved den optiske inspeksjonen. Gammaloggen viser variasjoner fra 20 meter noe som indikerer sterkt vekslende berggrunnsgeologi.

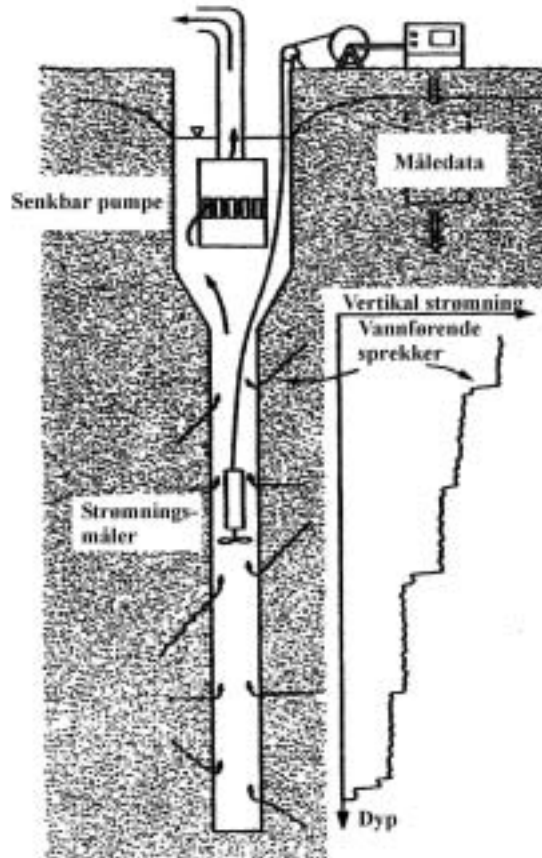


Figur 18: Temperatur, vannets ledningsevne og total naturlig gammastråling, Bh 11 Romeriksporten .

#### 4.5 Prøvepumping kombinert med strømningsmålinger

Prøvepumping av brønner har vært vanlig i Norge, men kombinasjonen med strømningsmålinger er relativt nytt. NGU anskaffet strømningsmåler i 2001, og denne er senere benyttet ved Lunnertunnelen, Krokskogen, Jong-Asker, Øysand-Thamshavn i tillegg til en del andre prosjekter ved NGU.

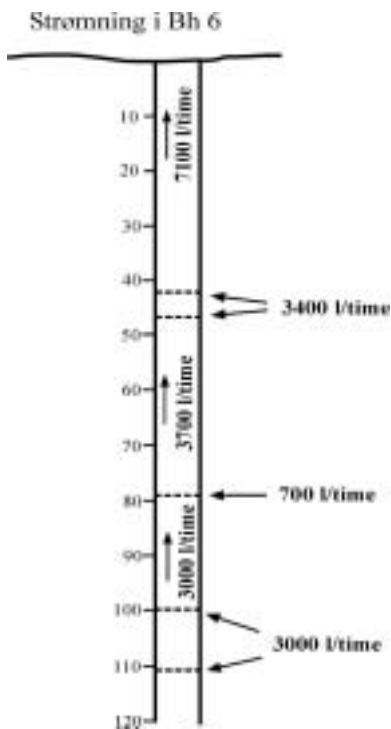




Figur 19: Prinsippskisse, prøvepumping i kombinasjon med strømningsmåling (fra Barton 2003).

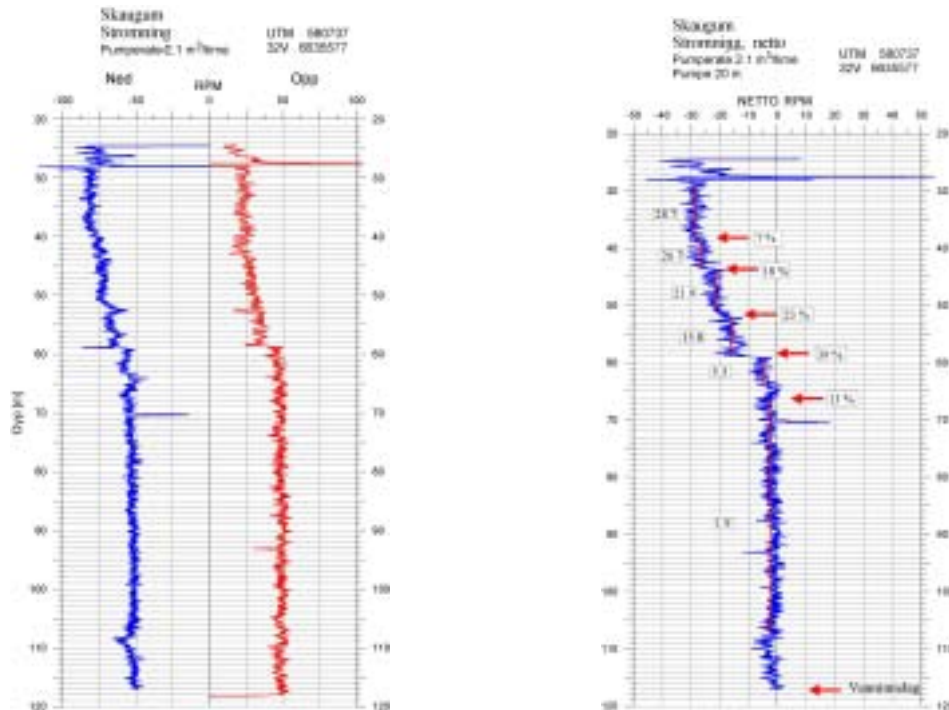
Strømningsmåler består av en propell som roterer med en hastighet som er proporsjonal med vannstrømmen langs et borehull (se figur 19). Sonden kan kalibreres slik at en kan kvantifisere strømmingen, noe som forutsetter at sonden står sentralt i hullet og at strømningsprofilen er kjent. Målingene kan utføres statisk ved at sonden står i bestemte posisjoner hvor vannstrømmen måles. Dynamiske målinger foretas ved at sonden senkes og heves i borehullet med samme hastighet, og gjerne med forskjellige hastigheter. Ved å bearbeide data etter gitte prosedyrer kan et kontinuerlig strømningsprofil nedover borehullet beregnes. På grunn av at propellen har en viss oppstartsfriksjon, gir dynamiske målinger det beste resultatet ved svake strømminger. Målingene forutsetter selvsagt en viss strømming, noe som oppnås enten ved at brønnen er artesisk, eller ved at målingene kombineres med pumping av borehullet. Kombinasjonen av strømningsmåling og pumping kan foretas ved å flytte både pumpe og sonde med fast avstand nedover i borehullet eller ved at pumpen står fast og at strømningsmåleren flyttes. Av praktiske grunner må pumpen være øverst i hullet.

Eksempel på statiske målinger av vannstrøm i borehull 6 ved Lunnertunnelen er vist i figur 20 (Storrø m. fl. 2002). Dybde er angitt som lengde langs borehullet som har et fall på ca. 25° mot vest. Ved disse målingene ble både pumpe og strømningsmåler flyttet med innbyrdes avstand 20 meter nedover borehullet. Pumpens kapasitet var ved denne testen 7100 l/time. Brønnens kapasitet ble vurdert til å være betydelig større, og ut fra enkle pumpetester kunne en forutsi meget stort lekkasjepotensial over, i og under tunnelnivå ved 75 meters dyp. Sprekkene faller 75° mot øst, og tunnelen ville sannsynligvis krysse alle de vanngivende sprekkene.



Figur 20: Individuell vanngiverevne på sprekker i Bh 6 Lunner.

Figur 21 viser et eksempel på kontinuerlige strømningsmålinger fra borehull ved Skaugum (Dalsegg m. fl. 2003b). Til venstre vises telletall for logging ned og opp i borehullet. Til høyre vises netto rotasjon som skyldes vannstrømning langs etter borehullet. Netto rotasjonstall avdekker en trinnvis reduksjon av vannstrømmen, og ved å anta laminær strømning og at strømningsmåleren hele tiden står sentralt i hullet kan vanninnslagene kvantifiseres.



Figur 21: Kontinuerlig strømningslogg for borehull ved Skaugum.

## 5. ANDRE METODER

Under andre metoder sorterer spesielle ingeniørgeologiske studier i regi av "*Miljø- og samfunnstjenlige tunneler*", analyse av digital topografi, analyse av radardata målt fra satellitt og automatisk analyse av boreparametere.

### 5.1 Spesielle ingeniørgeologiske studier

Under dette avsnittet presenteres resultater fra spesielle studier utført av NGI ved Frøyatunnelen og T-baneringen hvor resultater fra forundersøkelser er sammenholdt med erfaringer fra tunneldrivingen. NGU har studert hvordan vanninnslagene kommer i forhold til de forskjellige sonene i en teoretisk sprekkemodell. Sistnevnte ble presentert på NGUs hydrogeologidag i 2003 (Braathen m. fl. 2003).

#### 5.1.1 Forundersøkelser og bergmassekvalitet

Kartlegging i felt ved bruk av Q-metoden er ikke foretatt ved noen av de objektene som inngår i prosjektet. En medvirkende årsak til dette er trolig liten blotningsgrad, noe som gjør det vanskelig å få kontinuerlige beskrivelser av geologien. I ettertid er det i regi av "*Miljø- og samfunnstjenlige tunneler*" foretatt analyser av tilgjengelige data både fra Frøya-tunnelen og T-baneringen i Oslo.

#### **Frøyatunnelen**

Tunnelsambandet mellom Frøya og Hitra i Sør-Trøndelag er 5,3 km langt hvorav 3,6 km går under sjøen. Tunnelen går i dypbergarter og metasedimenter og krysser en rekke forkastningssoner.

De tradisjonelle ingeniørgeologiske forundersøkelsene for Frøyatunnelen var omfattende og trolig noe av det mest grundige som er gjort for noe tunnelprosjekt i Norge. En medvirkende årsak til at dette prosjektet ble så vellykket, var uten tvil grundige forundersøkelser og god planlegging. Det ble bl.a. målt 10 450m med refraksjonsseimikk og boret 1 850m med kjerneborhull i tillegg til geologisk kartlegging og vurdering av eksisterende geologiske data.

Det viste seg at det kun var mindre avvik mellom prognosert bergmassekvalitet basert på forundersøkelsene og de virkelige forhold i tunnelen. Vurderingen av bergmassekvaliteten var for en stor del basert på seismiske hastigheter, og storparten av de svakhetssonene som ble forutsagt fra seismikken, ble også funnet i tunnelen. Ved tunnelkartleggingen ble bergmassene klassifisert etter Q-metoden. Q-verdier fra tunnelen har vist seg å avvike lite fra prognosen. Det er rapportert at noen svakhetssoner har vært bedre enn antatt, og at sikringsarbeidene ble mindre enn forventet. Dette kan ha sammenheng med at injeksjonssementen har tettet sprekker og limt sammen bergmassene slik at behovet for annen sikring er blitt redusert. Det viste seg også at det er en tydelig sammenheng mellom de seismiske hastighetene og Q-verdiene i tunnelen (Bhasin 2002, figur 20), men Q-verdiene er gjennomgående noe høyere enn det man skulle forvente ut fra tidligere publiserte sammenhenger av N. Barton ( $V_P$  (km/s) =  $\log Q_C + 3,5$ , hvor  $Q_C = Q \times \sigma_C/100$ ).

Ved passering av de første store svakhetssonene ble det benyttet kjerneboring i tillegg til sonderboring for å undersøke forholdene i sonen best mulig. Erfaringer fra Frøyatunnelen viste at resultater fra kjerneboringen kan tolkes mer ugunstig for tunneldrift enn det som viste seg å være tilfellet i tunnelen. Dette kan for eksempel skyldes at borhullet fulgte horisontale eller langsgående, vertikale strukturer eller ”linsler” av forvitret materiale, som ikke hadde særlig stor utbredelse. De store svakhetssonene besto ofte i små biter av berg blandet med et jordaktig materiale. Dette materialet var ofte godt konsolidert slik at det kunne stå en god stund etter utspregning. Ved kjerneboring med bruk av spylevann kunne materialet mer eller mindre gå i oppløsning slik at det kunne se svært dårlig ut i kjernematerialet. Kjerneboring fra tunnelen i anleggstiden hadde en begrenset nytteverdi fordi det tok for lang tid.

Kostnadene forbundet med injeksjon ble betydelig lavere enn antatt og gjenspeilet i kontraktens mengde. Dette skyldes i første rekke at sonene generelt var mindre vannførende, og at omfanget av tensjonssprekker var mindre enn forventet.

Sett i forhold til injeksjonsprogrammet, kan man si at seismiske undersøkelser og sonderboringer ga den mest verdifulle informasjonen. I tillegg ga strukturgeologisk analyse og kjerneboringer fra land og sjø supplerende informasjon om lekkasjeforholdene i berggrunnen.

For Frøyatunnelen ble det også som en del av delprosjekt A, forundersøkelser, foretatt en vurdering av injeksjon i forhold til de forskjellige parametrene i Q-metoden (Bhasin 2002). Det ble ikke påvist noen klar korrelasjon mellom injeksjonsmasser og de enkelte parametrene i Q-metoden. En tillempet Q-verdi,  $Q_i$ , hvor det siste leddet JW/SRF er erstattet av 1/lekkasje per meter sonderhull, gir en forholdsvis god korrelasjon med medgatte injeksjonsmengder Q:

$$Q_i = 240 \times S_i, \text{ hvor } S_i = \text{sementmengden i kg/tunnelmeter}$$

Om dette resultatet skal brukes til å prognosere injeksjonsmengder er man avhengig av resultater fra lekkasjemålinger i sonderhull, altså kan den kun anvendes under tunneldrivingen. Men siden viktige parametre som oppnådd tetthet, injeksjonstrykk og type injeksjonsmasse (sementtype, v/c-forhold) ikke inngår, kan den neppe brukes direkte på andre anlegg under andre betingelser. Tilsvarende prognosemetoder bør imidlertid kunne brukes på et anlegg etter en tids tunneldriving med injeksjon, dvs. når man har fått en del data fra det spesifikke anlegget.

## **T-baneringen**

Også ved T-baneringen, en 1260 meter lang tunnel fra Ullevål Stadion til Nydalen, er det foretatt en analyse av injeksjon og geologiske forhold (Løset og Kveldsvik 2003). Tunnelen er drevet i kambrosilurisk leirskifer og knollekalk. Ved T-baneringen ble det som en del av byggeplanen utført meget omfattende grunnundersøkelser og laboratorietesting rettet mot å beregne setninger i løsmassene som funksjon av poretrykksfall, for derved å kunne etablere tetthetskrav langs tunnelen. Tetthetskravene varierte mellom 7 og 14 liter/minutt per 100 m tunnel og oppnådd resultat var 8 l/min per 100 m for én delstrekning, rundt 3 l/min per 100 m for fire andre delstrekninger (Løset og Kveldsvik 2003). Poretrykksfallet var begrenset til 1 m, noe som føyer seg pent inn i tidligere erfaringer for sammenheng mellom lekkasje og poretrykksfall for tunneler i kambrosiluriske bergarter i Oslo-området. Som forventet ble det ikke setninger ved et så lavt poretrykksfall.

Bergmassekvaliteten i T-baneringen var som forventet, noe som ikke er særlig overraskende da prognosen var basert på en nærliggende tunnel som ble bygget noen få år tidligere (Tåsentunnelen). Det ble utført i alt 1750 m refraksjonsseismikk for tunnelen, primært rettet mot løsmassetykkelser til sidene for tunnelen, så kun et profil lå over traseen. En etteranalyse viser at de laveste hastighetene målt i dyprennene stort sett ble gjenfunnet som dårligere bergmasse i tunnelen, men bredden på sonene fra tunnelkartleggingen kan avvike en del fra seismikktolkningen. Ellers viser tunnelkartleggingen, i likhet med Frøyatunnelen, at Q-verdiene generelt er høyere enn det som fås fra  $VP \text{ (km/s)} = \log Q_C + 3,5$ .

Det er en viss sammenheng mellom injeksjonsmengder og registrerte lekkasjer i borehull og geologiske parametere som bergartstype, oppsprekingsgrad, Q-verdi. Dataene viser imidlertid generelt stor spredning og synes i hovedtrekk kun å fange opp ekstreme utslag i injeksjonsmengder. Forholdet mellom hydraulisk konduktivitet før og etter injeksjon viser imidlertid en tydelig økning med økt injeksjonsinnsats. I forhold til bruk ved fremtidige anlegg, synes den mest robuste prognosemetoden for anlegg i de kambrosiluriske bergartene i Oslo-området å være å ta utgangspunkt i rene injeksjonsdata fra T-baneringen og andre ferdige anlegg, og eventuelt bruke geologiske parametere til justeringer av prognosen.

NGUs analyse av digitale høydedata (avsnitt 5.2.2) påviste den største forkastningssonen som viste seg å ha betydning både for injeksjonen og stabiliteten.

### 5.1.2 Sprekkemodell og vanninnslag

Norsk berggrunn er gjennomgått av sprekker/brudd. De varierer både i opptreden (bredde, lengde) og intensitet, noe som gjenspeiler den arealmessig fordeling av slike strukturer. Studeres Norge fra en satellitt, er det klart at landet er gjennomskåret av lineære soner i berggrunnen, som oftest vist som daler og forsenkninger. Disse topografiske trekkene er betinget av svak berggrunn som har vært lettere eroderbar enn omliggende bergarter. Gjennom feltstudier er det dokument at disse sonene i de langt fleste tilfellene består av sterkt oppsprukket fjell, også kalt bruddsoner.

Norsk berggrunn består hovedsakelig av metamorfe og magmatiske bergarter uten primær porøsitet. I disse bergartene vil all strømming av grunnvann foregå langs brudd. Fordelingen av brudd er derfor avgjørende for strømmingen av grunnvann, hvor strømming foregår langs foretrukne løp ut fra fordelingen av åpne brudd og opptreden av impermeable soner/lag og sprekkefyllinger (forkastningsbergarter, sekundære mineraliseringer).

Ut fra en den enkle betraktningen at det i områder med flere brudd er større potensial for grunnvannstrømming, kan en gjøre kvalitative vurderinger av grunnvannspotensialet. I en statistisk vurdering av bruddfordeling inn mot – og langs mer enn 100 bruddsoner i Norge, framkommer et generelt mønster (Braathen & Gabrielsen 1998; 2000): Sonene består av en *forkastningskjerner* i sentrum. Den er normalt mellom noen cm og 20 m bred, og inneholder gjerne tette, bløte forkastningsbergarter. Bruddtettheten varierer mellom 5 og 100 eller flere korte brudd per snittmeter. Utenfor kjernen finner en *distaldelen*, som er fra 5 til mer enn 50 meter bred. Bruddtettheten er vanligvis mellom 3 og 8 brudd per snittmeter. *Overgangssonen*, opptil 200 m bred, utgjør den ytterste delen av bruddsonen, hvor en påviselig høyere bruddfrekvens gradvis avtar ut mot områder med *bakgrunns-oppsprekning* med 1-2 brudd per snittmeter. Sistnevnte oppsprekningsmønster opptrer over store områder mellom bruddsoner.

Med basis i disse kvalitative studiene, er det foreslått en modell for grunnvannsstrømning i og rundt bruddsoner. Modellen påpeker at distaldelen med relativt høy bruddfrekvens og mange lange brudd har høyest permeabilitet og derfor størst grunnvannspotensiale, mens forkastningskjernen og overgangssonen bidrar mest til porøsitet i berggrunnen. Modellen har vært forsøkt testet gjennom flere typer studier med forskjellig grad av oppløsning:

1. Analyser av avstand mellom fjellbrønner og bruddsoner, hvor NGUs Grunnvannsdatabase og Strukturdatabase har vært samkjørt.
2. Logging av tunneler, hvor vanninnstrømning og injeksjon av sement har vært vurdert ut fra fordeling av bruddsoner i tunnelen.
3. Avansert logging (televiwer, strømningsmåler mm) av brønner som gjennomfører bruddsoner.

Førstnevnte analyser har ikke gitt positive resultater, sannsynligvis fordi posisjonering av brønner og bruddsoner i databasene ikke har god nok oppløsning i forhold detaljgraden av grunnvannsmodellen. Som en del av forundersøkelsene til "*Miljø- og samfunnstjenlige tunneler*" ble modellen testet med positivt resultat ved Oslofjordtunnelen (Braathen m. fl. 2003) og i en borebrønn ved Folvåg i Askvoll kommune, Sogn og Fjordane (Elvebakk m. fl. 2002).

## 5.2 Digital strukturanalyse

Muligheter for analyse av digital topografi som et ledd i forundersøkelser er også et produkt av nyere teknologi. Datamaskinenes kapasitet har økt, og moderne nivelleringssteknikker har gitt oss langt mer detaljerte terrengmodeller. NGU har gjennom flere år brukt digitale høydemodeller for å tolke geologiske forhold på land, i fjorder og på sokkelen. For anlegg i fjell er teknikken tidligere benyttet ved forundersøkelser for ny jernbanetrase vest for Larvik (Solli m. fl. 2001) .

### 5.2.1 Regionale lineamenter.

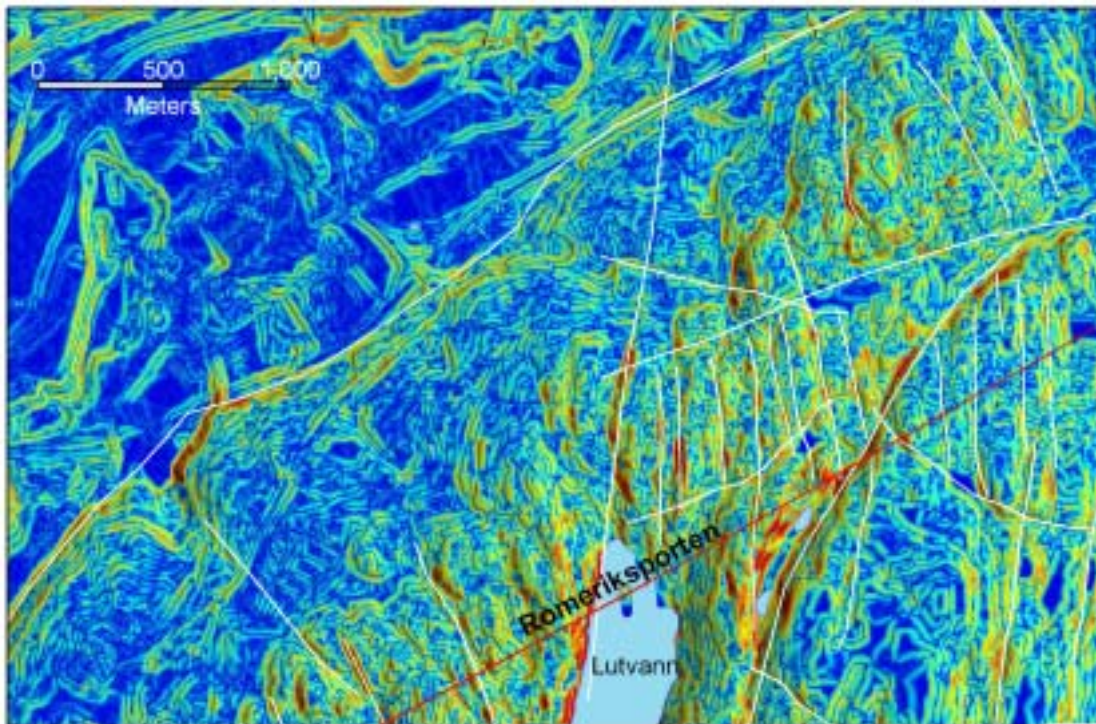
NGU har i samarbeid Universitet i Bergen laget et nytt, digitalt lineamentkart over Norge (Gabrielsen m. fl. 2002). Kartet representerer en regional tolkning og inneholder ca. 7800 lineamenter som er identifisert fra et sammensatt Landsat TM 7 datasett (15 m pikselstørrelse) tolket i målestokk 1: 750.000. Datasettene kan legges over alle andre typer digitale datasett (flyfoto, topografi, geofysiske kart). Undersøkelser i felt viser at tolkede lineamenter som regel viser seg å være forkastninger eller viktige sprekkesoner. Det er viktig å merke seg at tolkningen er skalaavhengig og at datasettet ikke er tenkt brukt direkte i detaljundersøkelser. Datasettet er ment benyttet til å få et regionalt bilde av tektonikken i et område og kan være et grunnlag for mer detaljerte forundersøkelser.

Den landsdekkende databasen er vist i vedlegg 3. Databasen vil bli lagt ut på NGUs nettsider med det første. Mer detaljert informasjon kan da ekstraheres på den enkelte brukers egen PC.

### 5.2.2 Detaljerte lineamenter

I regi av "*Miljø- og samfunnstjenlige tunneler*" er digitale data som dekker T-baneringen og Romeriksporten innenfor Oslo kommune analysert (Nordgulen og Dehls 2003).

Datagrunnlaget består av knapt 20 millioner ujevnt fordelte punktmålinger hvor den vertikale oppløsningen er på 10 cm. Målingene ble overført til triangulært, irregulært nettverk ved hjelp av programsystemet ArcInfo. Den enkleste analysen av datasettet benytter en kunstig lyskilde som kaster skygge og fremhever topografien. Ved å variere lysvinkelen kan en fokusere på ulike topografiske trekk. En annen type bilde kan lages ved å kalkulere terrengets helning og kartfremstille denne. Ved å sette terskelverdier for den kalkulererte helningen kan en fokusere på forskjellig helning. Ut fra de bildene som skapes, må en digitalisere de lineamentene en mener avspeiler svakhetssoner, forkastninger eller bergartsgrenser.

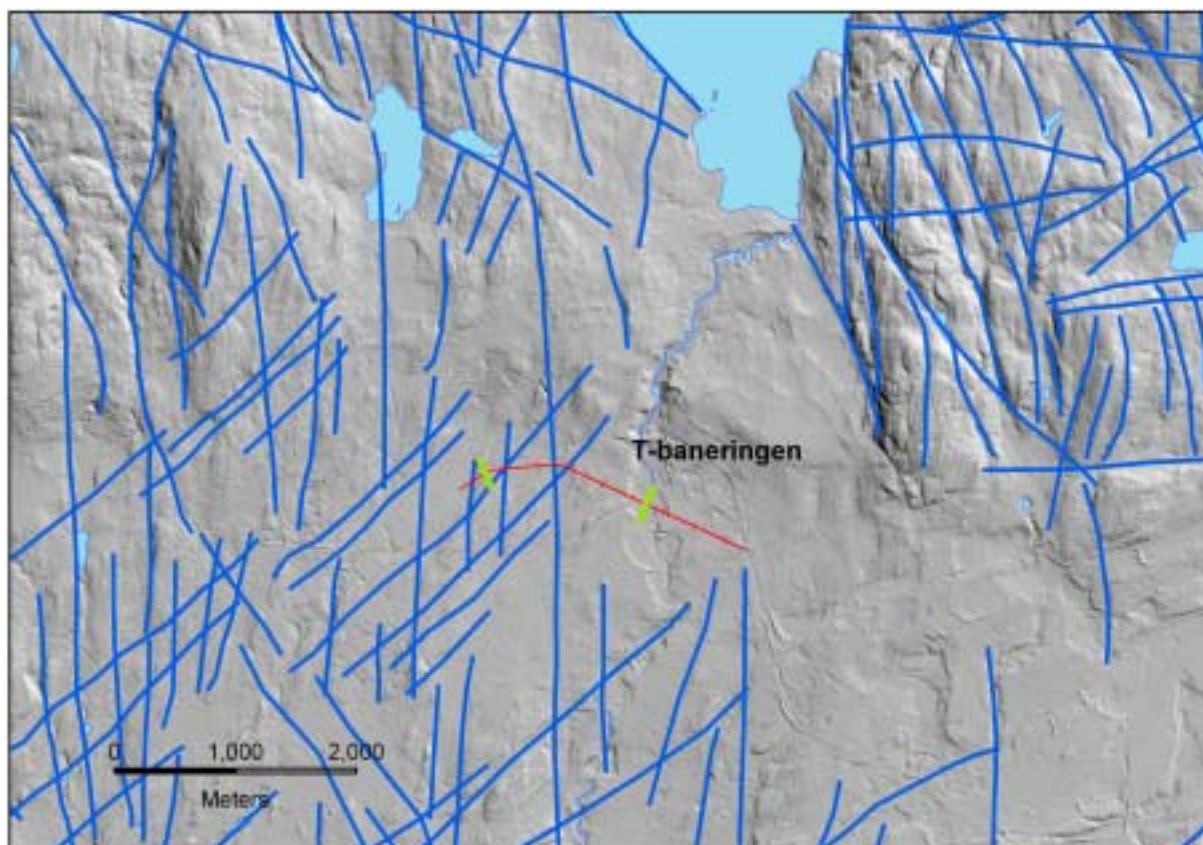


Figur 22: Analyse av topografiens helningsvinkel over Romeriksporten.

Figur 22 viser et utsnitt av topografiens helningsvinkel over deler av Romeriksporten. De prekambriske bergartene viser meget tett oppsprekning rundt Lutvann. De mest fremtredende linamentene er digitalisert og lagt opp på kartbildet. Det indikeres mindre lokale lineamenter, men også mer gjennomgående større strukturer. Som bakgrunn kan selvsagt et hvilket som helst bilde benyttes.

I figur 23 er de digitaliserte lineamentene lagt over den digitale topografien i området rundt T-baneringen. Fjelltunnelen mellom Ullevål Stadion og Nydalen ligger mellom delstrekene. Flere lineamenter krysser tunnelen, og en gjennomgående sone i NS-retning er påvist i tunnelen som en forkastning ledsaget av en syenittgang (Løset og Kveldsvik 2003). Denne sonen skapte store problemer med lekkasjer under tunneldrivingen, og det ble utført en ekstremt omfattende injeksjon her. Undersøkelsen viser at det er mulig å tolke lineamenter fra de digitale høydedata selv om området er sterkt planert og nedbygd. Dersom det ikke er for tykke løsmasser, er det ved bruk av denne type data mulig å se strukturer i berggrunnen selv i urbane områder.





Figur 23: Digitaliserte lineamenter ved T-baneringen.

### 5.3 Analyse av setninger ut fra radardata målt fra satellitt

Analyse av radaradata målt fra satellitt for bestemmelse av vertikale bevegelser i bakken er også en ny teknikk. De første resultatene av en slik analyse ble publisert i "Nature" i 1993, hvor effekten av et jordskjelv ved Landers i California ble beskrevet (Massonnet m. fl. 1993). Siden den gang er teknikken utviklet videre av en gruppe ved det tekniske universitetet i Milano, og en kan i dag påvise vertikale bevegelser ned til 1 mm/år. I Norge er metoden benyttet ved tektoniske studier i Rana (Dehls m. fl. 2002) og ved fjellskredstudier på Nordvest-landet (under publisering). I forbindelse med NGUs satsning på geologisk kartlegging i Oslo-området er det våren 2003 foretatt grunnleggende prosessering av tilgjengelige data i og rundt Oslo. "Miljø- og Samfunnstjenlige tunneler" har finansiert deler av denne undersøkelsen og en spesialprosessering av data over Romeriksporten hvor en viste det var betydelige setninger delvis forårsaket av tunnelarbeidene.

#### Metode

Teknikken, som kalles radar interferometri, går ut på å sammenligne refleksjoner av radarbølger som sendes ut fra satellitt i bane 780 km over jordoverflaten. Bølgene spres på spesielle punkter på bakken ("Permanent Scatterers", PS). Disse punktene kan være steinblokker, hushjørner, murpiper, antenner, master og lignende, noe som kan bety flere registreringer på en og samme bygning. Bølgelengden er 5,66 cm, men ved å analysere fasen, kan vertikale bevegelser ned til 1 mm/år detekteres. Ved å benytte to gjentatte målinger kan en digital terrengmodell med nøyaktighet på 1 meter konstrueres. Ved å studere flere målinger over tid kan tidsserier for bevegelser konstrueres. Spesielle teknikker benyttes til å korrigere for variasjoner i luftens fuktinnhold. Det eksisterer data fra perioden 1992 frem til



høsten 2000 med repetisjon hver 35. dag, noe som gjør det mulig å se tilbake i tid. Høsten 2000 mistet den aktuelle satellittens gyrostabiliseringen, og data ble ikke gode nok for analyse. I fremtiden vil målingene bli overtatt av nye satellitter, men det vil være mulig å sammenligne nye og gamle data.

Ved analysen må det legges inn en modell som beskriver endringene. I en standard analyse benyttes en lineær modell. For å kunne påvise bevegelser som skjer i rykk og napp, må en bruke mer avansert prosessering hvor en benytter ikke-lineære modeller for bevegelsene. Avansert prosessering gir flere punkter og den beregnede hastighet for setningene blir mer nøyaktig.

## Resultater

Den grunnleggende prosesseringen av radardata over Romeriksporten, viste kun et fåtall punkter hvor det var mulig å beregne tidsserier i dette området (Dehls og Nordgulen 2003). Resultatene fra avansert prosessering ved Golia og Hellerud (figur 24) viser totalt langt flere punkter og det er påvist setninger på flere av disse punktene. Av de punktene som hadde setninger kunne det påvises ikke-lineære bevegelser ved 7 punkter (røde kvadrater).



Figur 24: Indikerte vertikale bevegelser på bygninger over Romeriksporten ved Golia og Hellerud.

Figur 25 viser eksempler på tidsserier fra Godlia (lengst vest), Hellerud og Ellingsrud (lengst øst). De to første viser stabile forhold frem til sommeren 1995 (Godlia) og vinteren 1996 (Hellerud) hvorefter det foregår en innsynkning på i størrelsesorden 15 mm. Dette faller sammen med tunneldrivingen på de respektive stedene, og gir en klar indikasjon på at dette skyldes tunneldrivingen. Aktuelle bygning på Ellingsrud viser en kontinuerlig innsynkning over hele tidsperioden, og representerer trolig naturlige setninger i bakken.



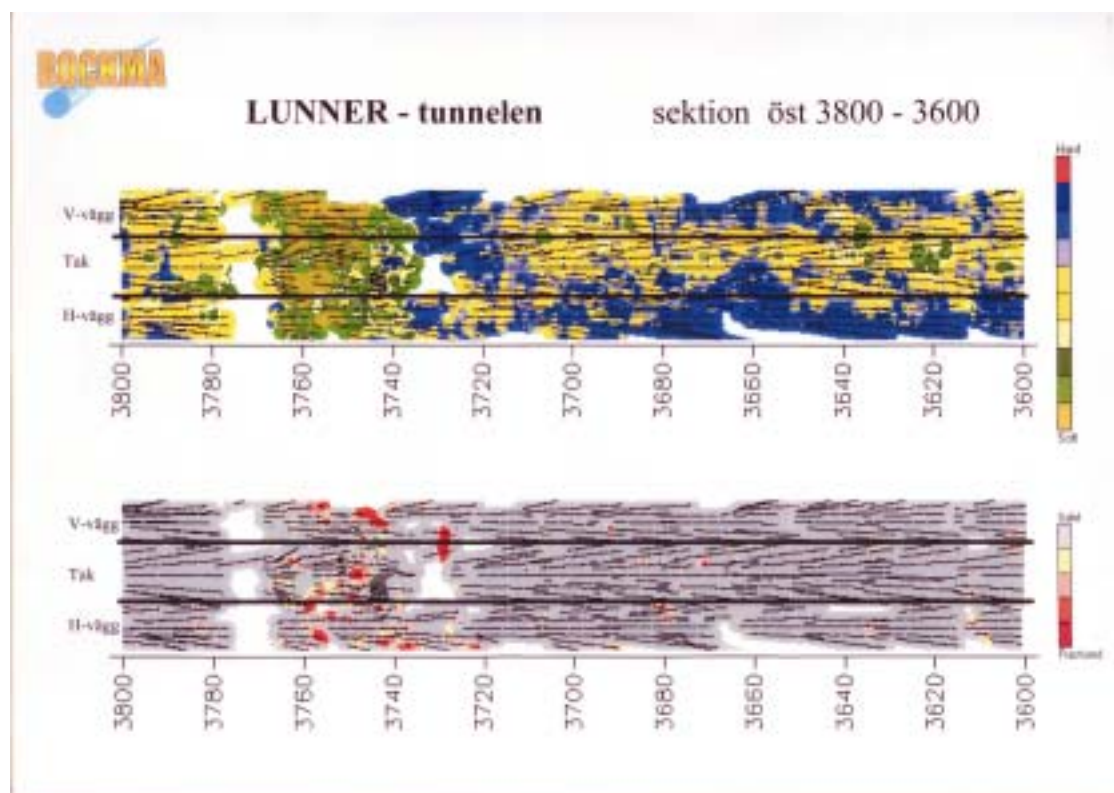
Figur 25: Innsynkning over tid for utvalgte punkter over Romeriksporten.

#### 5.4 Automatisk logging og analyse av boreparametere

Som et resultat av den teknologiske utviklingen er moderne borerigger blitt utrustet med automatisk loggeutstyr for boreparametere, "Measuring While Drilling", MWD. Under boring kan data som borsynk, matetrykk, rotasjonstrykk, hammertrykk, rotasjonshastighet, vanntrykk, vannmengde og tid registreres. Disse parameterene kan gi viktig informasjon om oppsprekking, hardhet og vannforhold. Teknikken er relativt ny og benyttet kun ved et fåtall tunnelanlegg, bl. a. Lunnertunnelen, T-baneringen i Oslo og Baneheiatunnelen i Kristiansand. Automatisk logging av boreparametere var foreslått som en del av det opprinnelige prosjektet under forundersøkelser. Tanken var da å utstyre en rigg for boring fra dagen med denne teknologien.

Ved **Lunnertunnelen**, som ble drevet av NCC fra øst og Statens Vegvesen Tunnelproduksjon (SVT) fra vest, var det kontraktfestet at boreriggene skulle være utstyrt for logging av boreparametere. Da Lunnertunnelen ble valgt som referanse-prosjekt for "*Miljø- og samfunnstjenlige tunneler*", ble det bestemt at MWD-data skulle registreres. På SVTs side ble dette ikke utført tilfredsstillende i starten, og resultatet er at det kun finnes registreringer fra pel 2200 til østenden av tunnelen ved pel 3926. Det svenske firmaet Rockma har mottatt alle registreringene, og utført tolkning og presentasjon for byggherren, Statens Vegvesen Akershus. Disse data benytter Kristin Holmøy i sitt doktorgradsarbeide ved NTNU.

Tolkningsprogrammet (GPM – 2) fra Rockma hjelper brukerne til å få et visuelt bilde av bergmassens oppsprekking og vekslende hardhet. I utgangspunktet er det kun mulig å få frem relative variasjoner. Det er mulig å kalibrere dette mot tester av hardhet (enaksiell trykkfasthet eller Schmidt-hammer) fra utvalgte deler av tunnelen og på denne måten få en tallverdi på hardhet langs tunnelen. På samme måte er det mulig å kalibrere resultatene mot oppsprekking, ved å registrere for eksempel RQD, sprekker pr. løpemeter eller pr. m<sup>3</sup>, på utvalgte områder i tunnelen. Dette er ikke blitt utført i Lunnertunnelen. Registreringene gir likevel en god oversikt over hvor det er soner med ekstra oppsprukket bergmasse eller lav hardhet i bergmassen.

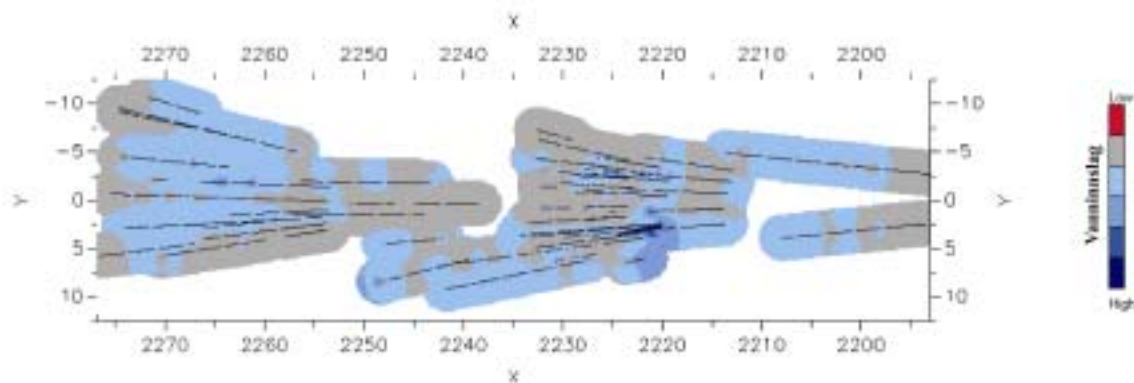


Figur 26: Analyse av fjellets hardhet og oppsprekning i østlige deler av Lunnertunnelen.

Figur 26 viser analyse av hardhet og oppsprekning i østlige deler av Lunnertunnelen. Profilet presenteres hovedsaklig som middels til relativt hardt fjell bortsett fra en sone fra pel 3770 til pel 3734 hvor fjellet indikeres som meget mykt. Dette er den tidligere kartlagte sone R med resistivitetsverdier ned mot 300 ohmm og med en seismisk hastighet i overflaten ned mot 3000 m/s. Begge metodene indikerte ca. 40 meters mektighet. I det samme området indikeres til dels intens oppsprekning.

Det er i forbindelse med "*Miljø- og samfunnstjenlige tunneler*" kjøpt inn en ekstra vannmodul som gjør at det er mulig å prosessere registreringene av vanntrykk og vannmengde. Et eksempel på utskrift fra vannforholdene er vist i figur 27. Dette profilet dekker kontaktsonen mellom kambrosilurisk hornfels vest for pel 2200 og permiske intrusiver (syenitt) i øst. I en lengde av 75 meter indikeres meget store vanninnslag i syenitten. Modellen er ikke kalibrert slik at vannmengde angis kun relativt. I dette området ble det målt opptil 1200 l/min på en tetningsskjerm (Andersson 2003), noe som representerer de største lekkasjene som ble påvist i hele tunnelen. Vannproblemene ble også påpekt ved de arbeidene som NGU har utført som en del av "*Miljø- og samfunnstjenlige tunneler*" (Storrø m. fl. 2002).





Figur 27: Beregnet vanninnslag i sonder-/injeksjonshull (relative verdier) i Lunnertunnelen.

For **T-baneringen** mellom Ullevål Stadion og Nydalen er data fra tunnelkartleggingen og lekkasjeregistreringer i injeksjonshull sammenlignet med tolkningen av boreloggen (hardhet, oppsprekking og vannforhold). Disse tunneldataene er: Bruddfrekvens, dvs antall sprekker per m<sup>3</sup> registrert på stoff, Q-verdier, Vannlekkasje i borehull ved første sonderboring og Bergart.

Følgende konklusjoner er trukket:

- Det er god korrelasjon mellom logget hardhet og bergartene som er kartlagt på stoff.
- Variasjonen i bergmassekvalitet er ikke særlig stor i tunnelen. Trolig ville det vært lettere å tolke dataene dersom variasjonene hadde vært større. I ettertid finner man igjen for eksempel den ene markerte sonen ved P740, men det er ikke sikkert det ville vært like lett å tolke dette like sikkert i forkant, da utslagene i loggene ikke er veldig markerte.
- For både vannforhold og oppsprekking er det ikke en tydelig/entydig sammenheng mellom de loggede dataene og det som er registrert på stoff. Det er dårligst korrelasjon for vannforhold. For logget oppsprekking ser det ut til å være mye ”støy” i dataene fra for eksempel stangbytte.

Trolig ville tolkningen av dataene vært bedre/mer tydelig med et tettere loggeintervall enn 8 cm, for eksempel 2 cm, som foreslått av Rockma på anlegget.

## 6. VURDERING AV UTPRØVDE METODER

I dette kapitlet blir de enkelte metodene diskutert opp mot hverandre og mot andre tilgjengelige data. Det blir konkludert over nytten av metodene ved forundersøkelser for anlegg i fjell. Vurderingen starter med fly- og helikoptergeofysikk, fortsetter med bakkemålinger og borehullsmålinger, og til slutt vurderes de andre nye teknikkene som er utprøvd gjennom prosjektet.

### 6.1 Fly- og helikoptermålinger

I det følgende blir hver enkelt metode som benyttes ved fly- og helikoptermålinger diskutert hver for seg. Til slutt gis en samlet vurdering og anbefaling for fremtidige forundersøkelser for anlegg i fjell. Felles for alle de aktuelle metodene er at målingene kan foretas både fra luften og på bakken.

#### 6.1.1 Magnetiske målinger

Styrken til magnetiske målinger er at metoden kan "se" igjennom løsmasser og gi et godt bilde av bergartenes magnetiske egenskaper, og derved et bilde av geologien. Erfaring tilsier at geologisk kartlegging kan effektiviseres dersom en har magnetiske data tilgjengelig på forhånd. Geologiske oversiktskart kan langt på vei konstrueres på forhånd og feltoppfølging kan begrenses til utvalgte kritiske områder. Metoden stiller store kompetansekrav til den som skal tolke resultatene.

I tillegg til selve berggrunnskartet kan en tolke forkastninger og svakhetssoner ut fra det magnetiske bildet. På Krokskogen kunne en tolke frem 73 lineamenter som trolig er forårsaket av bergartsgrenser, forkastninger eller svakhetssoner. Tilsvarende tall for Lunner var 12, men her var området som ble tolket svært begrenset. Selv om en ikke alltid kan si hva som er årsaken til et lineament, viser data at her er det noe uregelmessig som kan skape problemer ved arbeider i fjellet.

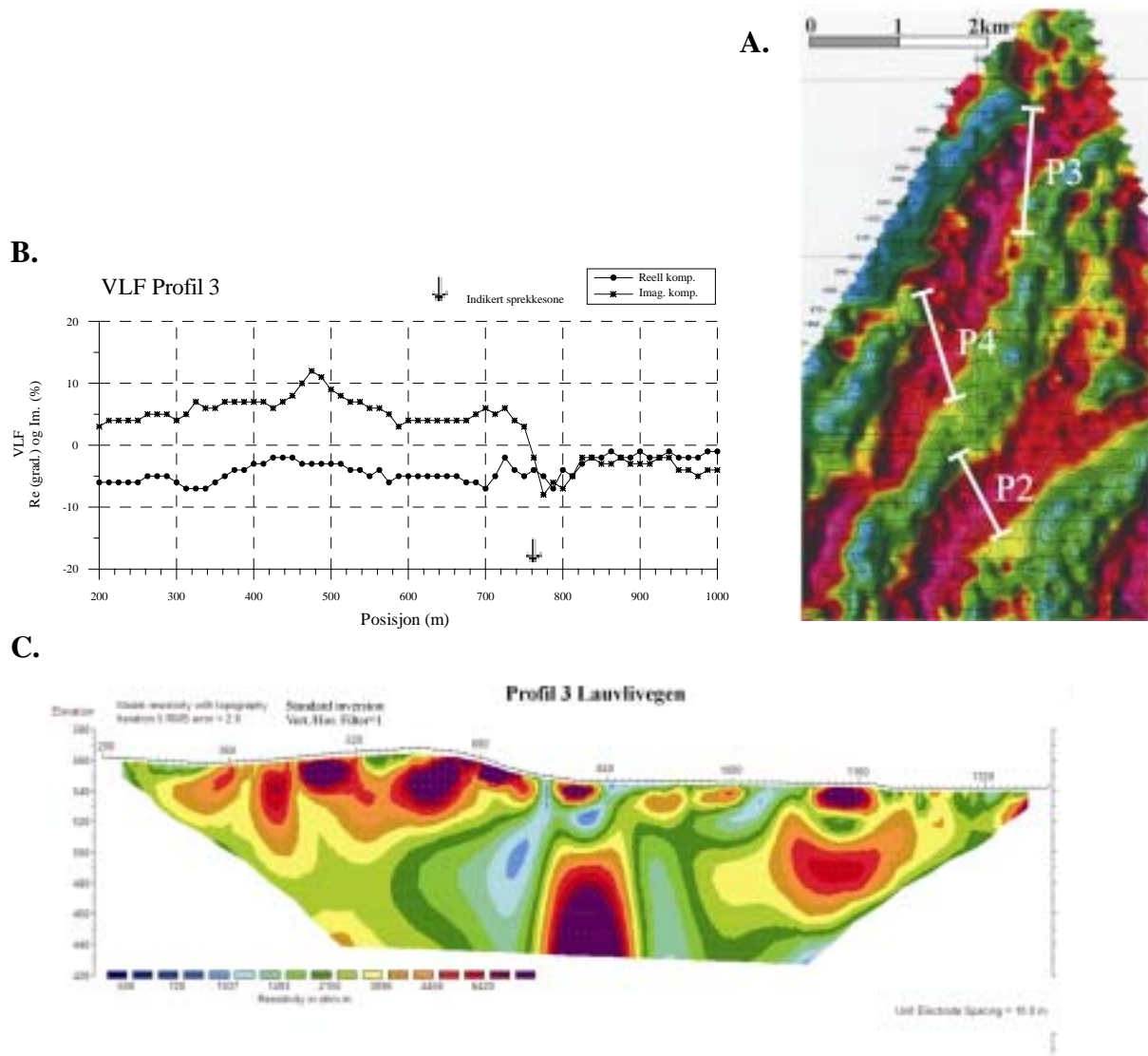
Magnetiske målinger på bakken ved Lunner påviste ikke svakhetssoner entydig. En viktig sone, som ga betydelig problemer under tunneldrivingen, ble ikke påvist. Årsaken til dette er trolig at sonen går i umagnetisk hornfels, og at det ikke finnes magnetitt som kan omdannes og gi redusert magnetisering (Henkel & Guzman 1977). Det ble også påvist magnetiske minima som ikke kan relateres til kjente svakhetssoner, og heller ikke til problemer under drivingen av tunnelen. Enkeltstående magnetiske profiler som dette, er derfor mindre egnet som grunnlag alene for å tolke frem svakhetssoner. Ved flatedekkende kartlegging (fly-, helikopter- eller bakkemålinger) kan en imidlertid korrelere mønstre mellom parallelle profiler og en kan da lettere ekskludere minima som skyldes naturlige variasjoner av magnetiske mineraler i bergartene på enkeltstående profil.

Ved Øysand-Thamshavn ga ingen av de påviste svakhetssonene anomali ved magnetiske bakkemålinger. Årsaken er trolig manglende magnetitt i den oppsprukne bergarten. Problemet som oppstår når bergarten i utgangspunktet ikke inneholder magnetitt, kan ikke overkommes.

## 6.1.2 Elektromagnetiske målinger

Under dette avsnittet diskuteres både ordinære elektromagnetiske data og VLF-data. Den første er meget ressurskrevende, både når det gjelder utstyr til datafangst og prosessering av data. VLF kan måles med enkelt utstyr både fra fly og helikopter, og prosesseringen er rimelig enkel.

Tolkningen av elektromagnetiske data over Krokskogen viste 39 lineamenter. Lav resistivitet påvist ved helikoptermålinger ved Småvann/Byvann bekreftes ved resistivitetsmålinger på bakken. Bakkemålingene indikerer faktisk to soner med innbyrdes avstand ca. 180 meter. Den østligste av disse ble bekreftet ved brønnboring og oppfølgende borehullsinspeksjon/-logging. På grunn av vannene i området ble ikke det oppfølgende profilet plassert der helikoptermålingene ga maksimalt utslag, og en kraftlinje forhindret fornuftige VLF-data i dette området. Elektromagnetiske data kan samles både ved bruk av fly og helikopter som bærer av utstyret. I Norge er de fleste tilgjengelige data samlet inn med hjelp av helikopter.



Både ved Lunner og over Krokskogen har VLF fra helikopter påvist anomalier som kan knyttes til svakhetssoner i fjell (Beard 2001, Beard m. fl. 1997). Tolkningen over Krokskogen viste flere VLF-anomalier som krysser hovedretningen for de kjente geologiske strukturerne i området. Oppfølgingen av disse anomaliene kunne bekreftes både med VLF-målinger på bakken og med 2D resistivitetsmålinger (se figur 28). Anomalier som det på forhånd var reist tvil om, viste seg å være reelle og var forårsaket av en porøs bergart bestående av breksje/konglomerat/sandstein med resistivitet ned mot 1000 ohmm (Dalsegg m. fl. 2003a).

En undersøkelse utført av NGU tidlig i 1990-årene viste at 67 % av alle sprekkesoner eller forkastninger innenfor grunnfjellsdelen av kartblad Andorsjøen (Nord-Trøndelag) ga respons på VLF målt fra helikopter (Skilbrei 1993). Metoden kan bidra med relevant informasjon i en tidlig fase av forundersøkelser for anlegg i fjell, og ved de fleste fly og helikoptermålinger på land i Norge er VLF-data tilgjengelig. På grunn av liten militær aktivitet de senere årene, har få sendere vært aktive, og anvendte stasjoner for energisering er ikke alltid optimal med hensyn til retning til senderen.

### 6.1.3 Radiometriske målinger

Radiometriske målinger bidrar til bergrunnskartleggingen, men i liten grad til kartleggingen av svakhetssoner. I tillegg skjermes data av fuktig mark, og metoden kan på denne måten gi et kunstig bilde av geologien. Det er derfor meget viktig å være klar over dette ved tolkningen av dataene. Metoden kan bidra til miljøundersøkelser knyttet til anlegg i fjell ved at radon-produserende bergarter kan kartlegges. I Oslofeltet kan dette være spesielt interessant ved at alunskiferen, i tillegg til å være kilde til radon, også er svært vanskelig å bygge i.

Ved tolkningen av data fra Krokskogen og Lunner ble det indikert henholdsvis 22 og 15 radiometriske lineamenter. Ved Lunner kan noen av disse knyttes til kontakten mellom kambrosilurisk hornfels og permisk syenitt.

### 6.1.4 Fly- og helikoptermålinger generelt

De to områdene som er analysert i regi av "*Miljø- og samfunnstjenlige tunneler*" viser at geofysiske data målt fra helikopter eller fly kan være et nyttig supplement til tradisjonell ingeniørgeologisk kartlegging i en tidlig fase av forundersøkelsene. Ut fra regionale kartbilder kan en riktig trace for et tunnelanlegg velges. Ved de to undersøkelsene er kjente forkastninger og svakhetssoner indikert i tillegg til flere nye. Tvilsomme anomalier er bekreftet ved målinger på bakken. Styrken i denne angrepsmåten ligger i at analysen gjøres systematisk, og en kan derved sikre at svakhetssoner med betydning for tunneldrivingen og eventuelt andre arbeider, fanges opp. Påvisingen av geofysiske anomalier i Oslofeltets permiske intrusiver og vulkanitter ved Lunner er et eksempel på at videre undersøkelser kan styres på grunnlag av mer regionale tolkninger.

Geofysiske målinger fra fly eller helikopter er relativt ressurskrevende og dette er trolig hovedårsaken til at metoden ikke er mer benyttet ved forundersøkelser for anlegg i fjell. Datainnsamlingen krever innleie av fly eller helikopter, måldata krever mye prosessering, og data må selvsagt tolkes. Dersom en beregner pris pr. målte linjekm kommer fly- og helikoptermålinger meget gunstig ut. NGU har tatt konsekvensen av at geofysiske målinger fra luften kan bli kostbare for den enkelte utbygger. I egen regi, og delvis i samarbeid med lokale interessenter er store deler av de tettest befolkede områder på Østlandet dekket av

høyoppløselige geofysiske målinger fra fly eller helikopter. Data er fritt tilgjengelig, men skreddersydde tolkninger for brukere utføres som oppdrag. En oversikt over tilgjengelige data finnes i vedlegg 2. Detaljer om hver enkelt undersøkelse (målemetoder, linjeavstand flyhøyde o.a.) kan lastes ned fra [www.ngu.no](http://www.ngu.no).

## 6.2 Bakkemålinger

I dette avsnittet blir det foretatt en samlet vurdering av de anvendte bakkemetodene basert på testing under forskjellige geologiske betingelser. Der det er naturlig blir det foretatt sammenligninger av metodene.

### 6.2.1 Refraksjonsseismikk

Refraksjonsseismiske tolkninger blir ofte oppfattet som fasit på hvordan de ingeniør-geologiske forholdene er. Modellering av refraksjonsseismikk (avsnitt 4.1) har vist at tolkningene kan være beheftet med større usikkerheter enn det brukerne er klar over. Blindtesten viste at syntetiske data fra en enkel modell med kun en depresjon i fjelloverflaten, ble tolket som en svakhetszone i fjellet, og i tillegg ble det lagt inn en forvittringszone i den øverste delen av fjellet. Det var også en tendens til at løsmasseoverdekket ble fortegnet, og at tykkelsen ble overdrevet. Uoverensstemmelsen skyldes at datagrunnlaget ikke er tilstrekkelig til å beskrive geologien fullt ut, og at en derfor må gjøre visse modellvalg. Valg av riktig modell for tolkningen er helt avgjørende fordi flere modeller kan tilfredsstille de målte data.

Det kan diskuteres hvor mye feil det er å legge inn svakhetszone i fjellet dersom en har kraftige depresjoner i overflaten. I de aller fleste tilfellene vil det antagelig være en svakhetszone som er årsak til depresjonen i isskurt terreng, og tolkningen vil derved som oftest være riktig. Noen statistikk over hvor ofte dette er tilfelle finnes imidlertid ikke.

En alvorlig svakhet med refraksjonsseismiske data som grunnlag for bergtekniske arbeider, er at de uansett beskriver situasjonen i de øverste metrene av berggrunnen, og kan ikke vise forholdene i bergvolumet under. Modelleringen viste at det i praksis ikke er mulig å se bunnen av en svakhetszone i tilfeller der en har et rektangulært forløp på sonen. I de fleste tilfellene vil nok svakhetssonene ha et mer uregelmessig forløp, og etter all sannsynlighet kile ut på ett eller annet dyp. I slike tilfeller vil det ikke være mulig å følge sonen uten å måle seismisk tomografi mellom to borehull eller mellom ett borehull og overflaten. Dette forholdet var årsak til at det under det aktuelle prosjekt ble fokusert mye på 2D resistivitet, en teknikk der den elektriske strømmen "gjennomlyser" et bergvolum og som derfor er i stand til å "se" mot dypet.

De usikkerheter som ble avdekket ved modelleringene av refraksjonsseismikk er viktig å kjenne til, slik at feilvurderinger kan unngås. Testen viste også at tolkeren presenterer det verst tenkelige tilfellet med svakhetszone, mulig forvitring i de øverste delene av berget, og overdreven løsmassemekthet. Etter prosjektgruppens oppfatning er en slik tolkning å foretrekke; det er bedre å beskrive alle mulige hindre og vanskeligheter ved prosjektering av anlegg i berg for deretter å registrere bedre situasjoner ved arbeidene enn det motsatte.

### 6.2.2 To-dimensjonal Resistivitet

I det følgende blir erfaringene med resistivitetmålingene fra Lunnertunnelen diskutert inngående. Deretter følger en kort oppsummering av erfaringene ved de øvrige tunnelene og til slutt foretas en generell diskusjon.



## Datagrunnlag for Lunnertunnelen

Resultater fra den ingeniørgeologiske kartleggingen, resistivitetsmålingene og erfaringene fra tunneldrivingen i den østlige del av Lunnertunnelen er sammenstilt i figur 29. Geologien er tegnet på grunnlag av kartlegging i tunnelen etter at tunnelen er sikret med sprøytebetong (Kirkeby og Kveen 2003). Produksjonsdata er hentet fra tunneldrivers oppgjørsskjema og ukerapporter (NCC 2003, Statens Vegvesen 2003). Fjellkvalitet er hentet fra driftsingeniørenes subjektive rapporter, og informasjonen kan dermed ha ujevn kvalitet. Ukesproduksjon (inndrift) er godt bestemt ut fra ukerapportene. De to entreprenørene møttes ved pel 2393, og ved forskjell i utstyr og bemanning kan det være feil å sammenligne driftsresultatene. Injeksjonsskjermene har overlapp, og siden en ikke har informasjon om hvor i skjermen massene har gått inn i fjellet (skjerm lengde 24 meter), er all masse plassert mellom skjermens start og neste skjermens start. Det er i rapportene ikke angitt hvor alle boltene er satt inn. Oversikten viser derfor kun bolter som er satt på stuff og som er plassert for å ta hånd om den umiddelbare sikkerhet (sikringsbolting). Vanninnslag er hentet fra sammenstilling utført som en del av "*Miljø- og samfunnstjenlige tunneler*" (Holmøy 2003).

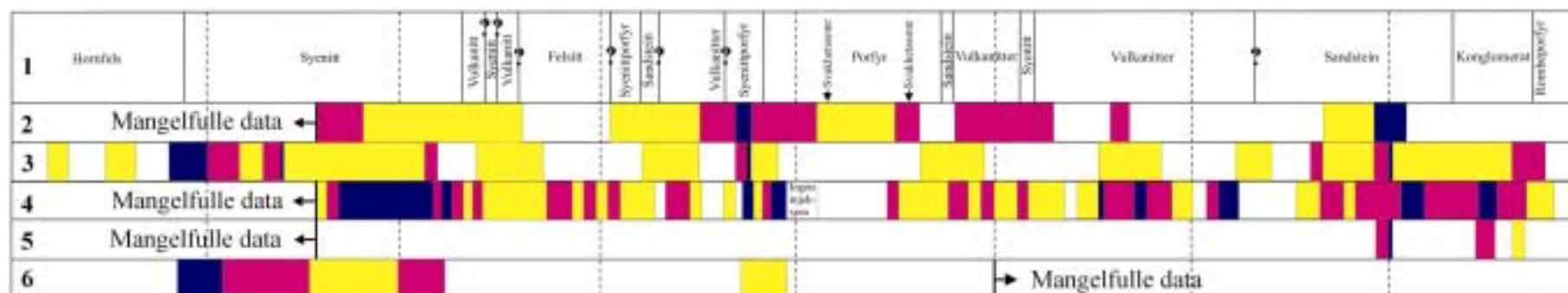
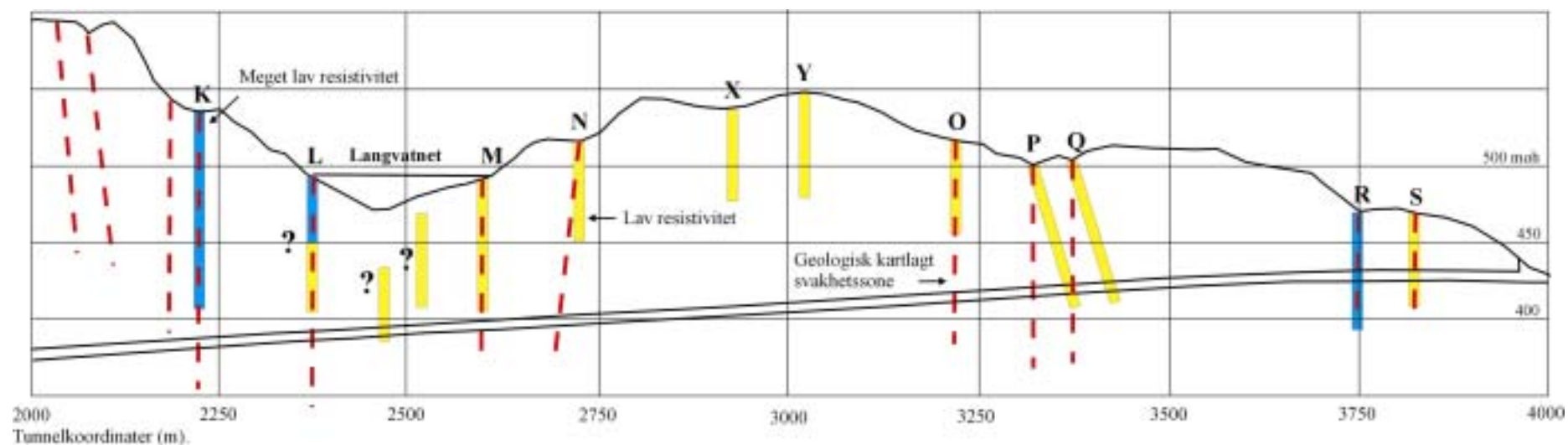
Figur 29 viser følgende:

- Alle sonene fra den ingeniørgeologiske kartleggingen gir resistivitetsutslag. Sone L vet en lite om siden denne løper sammen med sone K ved det målte profilet.
- Sonene X og Y ble ikke påvist ved den innledende ingeniørgeologiske kartleggingen. Sone X var spesielt vanskelig å tette, og en måtte benytte trippel injeksjonsskjerm.
- Sonene K og R viste ved målinger på bakken og i borehull spesielt lav resistivitet (< 500 ohmm) og brønner mot disse raste før de ble logget. Disse to sonene skapte størst stabilitetsproblemer og forsinkelser under drivingen, 39 meter på 7 uker for sone K, 36 (10) meter på 3 (2) uker for sone R.
- Sone P og Q er vist med fall mot øst. Tilsvarende fall indikeres i resistivitetsprofilet, med det er først og fremst på grunnlag av den optiske loggen at fallet er tegnet inn. Sonenes skjæring med tunnelen kjennetegnes med spesielt store injeksjonsmasser, men uten spesielle vannproblemer eller forsinkelser.
- Enkelte soner er indikert ned til tunnelnivå mens andre er grunnere. Sone K og R går definitivt ned til tunnelnivå og har skapt store problemer ved tunneldrivingen. Sone X ga store lekkasjeproblemer uten at lav resistivitet ble påvist ned til tunnelnivå.
- Lengre strekk med høy resistivitet (bl.a. fra pel 3400 til pel 3700) rapporteres som bra fjellkvalitet og inndriften var god.
- Under og vest for Langvatnet vises meget store vannlekkasjer, og det er benyttet store mengder injeksjonsmasser. Resistivitetsprofilet går her 3 – 400 meter nord for tunnelen og direkte sammenligning kan ikke gjøres. Det indikeres imidlertid flere soner med lav resistivitet rett nord for Langvatnet

## Positive erfaring fra Lunnertunnelen

Ut fra sammenstillingen av data fra Lunner (figur 29) må en kunne konkludere med at under de gitte geologiske betingelser, fungerer resistivitetsmålinger meget godt for **påvisning av svakhetssoner i fjell**. Alle soner som var kartlagt geologisk på forhånd, ble indikert i tillegg til to nye soner hvorav ei ga store lekkasjeproblemer.

Det kan også konkluderes med at under de samme betingelser kan resistivitetsdata langt på vei **karakterisere sonene**. To borehull satt på mot sone K og ett mot sone R, som alle viste spesielt lav resistivitet (<500 ohmm), raste sammen før logging og pumping ble foretatt.



**1 Geologi**

Kartlagt etter sikting.  
(Kirkely og Kveen 2003).

**2 Fjellkvalitet**

Ingen kommentar  
Bra  
Dårlig  
Svært dårlig

**3 Inndrift (m/uke)**

>40  
20 - 40  
10 - 20  
< 10

**4 Injeksjonsmasse (kg/m)**

< 500  
500 - 1000  
1000 - 2000  
> 2000

**5 Bolter (m<sup>-1</sup>)**

< 2  
2 - 4  
4 - 8  
> 8

**6 Vanninnslag (l/min/100m)**

< 1000  
1 - 2000  
2 - 4000  
> 4000

Figur 29: Lunnertunnelen. Sammenstilling av ingeniørgeologiske forundersøkelser, lavresistivitetssoner og erfaringer under tunneldrivingen.

Årsaken til dette er trolig sterk oppknusning og leiromvandling. Sone K indikerte i tillegg store vannproblemer (Storrø m. fl. 2002) som senere er bekreftet ved tunneldrivingen. Borehull mot sone R ga noe vann (ca. 1000 l/time). Soner med moderat lav resistivitet ga mer rene vannproblemer. Sone X, som ikke ble påvist ved geologiske forundersøkelser, viser resistivitet ned mot 1000 ohmm, og her var det store problemer med vannlekkasjer. Sonene P og Q viste sprekker med åpning opp mot 5 cm på den optiske loggen, og det ble under pumping påvist stor vanngiverevne (lekkasjepotensial) i tunnelnivå. En aner her konturene av tolkningsmodellen som ble fremsatt på midten av 80-årene (Pedersen og Veslegaard 1985), hvor moderat resistivitetsanomali indikerer rene vannsoner, mens spesielt lav resistivitet gir både vannproblemer og ustabile masser på grunn av ekstremt oppknust fjell og leiromvandling.

Fra sone K og inn under Langvatnet er det også betydelige vanninnslag. Kjerneborehullet, fra dagen ved sone K, på skrå inn under Langvatnet og forbi sone M, viste en 90 meter bred svakhetszone vest for sone L, men ellers "godt til svært godt fjell" (Iversen 1998). Vanntapmålingene ble rapportert til å være "små til moderate også i de dårlige partiene". Dette rimer dårlig med store injeksjonsmengder og til dels store vanninnslag rett under Langvatnet (se også Andersson 2003, figur 1). På grunn av at det målte profilet går 3-400 meter nord for tunnelen, kan en ikke korrelere data direkte. Det må imidlertid nevnes at det er påvist to soner med resistivitet ned mot 1000 ohmm ned mot tunnelnivå rett nord for Langvatnet.

Refraksjonsseismikk er målt på isen over Langvatnet (Geomap 1997) og over sonene Q og R (Geomap 2003). De førstnevnte indikerte en 20 m bred sone med hastighet 3300 m/s, som også kommer frem på resistivitetsmålingene (Rønning og Dalsegg 2001). Sone Q indikeres på seismikken (figur 2), men "synes å bli borte mot dypet". Denne sonen fremstår klart på resistiviteitsprofilen (figur 9), og den påvises ved målinger i borehull 6 (figur 17). Sone R trer frem med lydshastigheter ned mot 3000 m/s og resistivitet ned mot 300 ohmm både ved bakkemåling og i borehull. Ved begge metodene indikeres en mektighet på ca. 40 meter, noe som stemmer meget bra med rapportert dårlig fjell under drivingen av tunnelen (figur 29). Ved dette tilfellet er resistivitet et minst like godt redskap for påvisning og karakterisering av svakhetssoner som refraksjonsseismikk.

En viktig observasjon er at partier med høy resistivitet viste gode driftsforhold. Dette viser at teknikken også kan fortelle om gode partier, og derved gi nyttige bidrag til kostnadsberegninger.

### **Svakheter erfart ved Lunnertunnelen**

Sone X som viste store vannlekkasjer, ble ikke indikert ned til tunnelnivå, men dette skyldes trolig at sonen blir for tynn til å kunne følges mot dypet ved målinger på bakken. De sonene som kan følges helt ned i resistiviteitsprofilen, viser ofte en tendens til utvidelser. Effekten er spesielt stor mot enden av profilene der dybderekkevidden avtar. Dette er en metodisk svakhet en må være klar over. Den romlige oppløsningen avtar med økende elektrodeavstand, dvs. mot dypet. Dette gjør at forholdsvis tynne soner kan indikeres på grunt dyp, men blir borte på større dyp. I tillegg kommer manglende datadekning mot endene av profilene. Ved den geologiske tolkningen av resistiviteitsdata må en være klar over dette forholdet slik at feiltolkninger unngås.

I tilfellet ved Lunner var det på grunn av selve Langvatnet og en meget steil topografi vanskelig å legge profilet langs tunneltraséen. På grunn av dette ligger hovedprofilen 3- 400 meter nord for tunnelen ved Langvatnet. Det er derfor vanskelig å korrelere resultatene direkte. Lengre mot øst ble dette kompensert ved å legge ett nytt profil, denne gangen rett over tunnelen som vist i figur 1 (Dalsegg og Rønning 2002). Borehull 6, ansatt mot sone P og Q, ligger ca. 120 meter nord for tunnelen med topp borehull ca. 60 meter høyere tunnelnivå. Hullet viste sprekker med åpning opp mot 5 cm og disse ga spesielt mye vann. Ved tunneldrivingen ble det ikke registrert nevneverdig vanninnslag under boring av tetningsskjermer i aktuelle område (Andersson 2003). Sonen endrer tydeligvis karakter, og dette bekrefter at en må tilstrebe å gjøre detaljerte undersøkelser i tunneltraséen dersom en vil oppnå pålitelige resultater.

Retten under og vest for Langvatnet viser driftsrapportene store vannlekkasjer, og det gikk med store mengder injeksjonsmasse. Korrelering med resistivitetsdata er som tidligere nevnt vanskelig, men det synes som dette er knyttet til syenitt i tunnelen. Denne bergarten kan ha en primær porøsitet (Ole Lutro, personlig meddelelse), men trolig må det være en oppsprekning i tillegg for å skape kommunikasjon mellom hulrommene. Dette harmonerer dårlig med "godt til svært godt fjell" indikert ved kjerneboringen (Iversen 1998).

Innenfor hornfelsen lengst vest i det målte området ved Lunnertunnelen, er resistiviteten lavere enn 5000 ohmm, og her blir ikke svakhetssoner påvist like klart. Det er i tillegg kartlagt ekstremt lave resistivitetsverdier som ble tolket å være forårsaket av sulfidmineraliseringer på sprekker (Rønning og Dalsegg 2001). Analyse av disse viste elektrisk kontakt mellom sulfidkornene, noe som gir meget god elektrisk ledningsevne (meget lav resistivitet).

### **Erfaring fra andre tunneler**

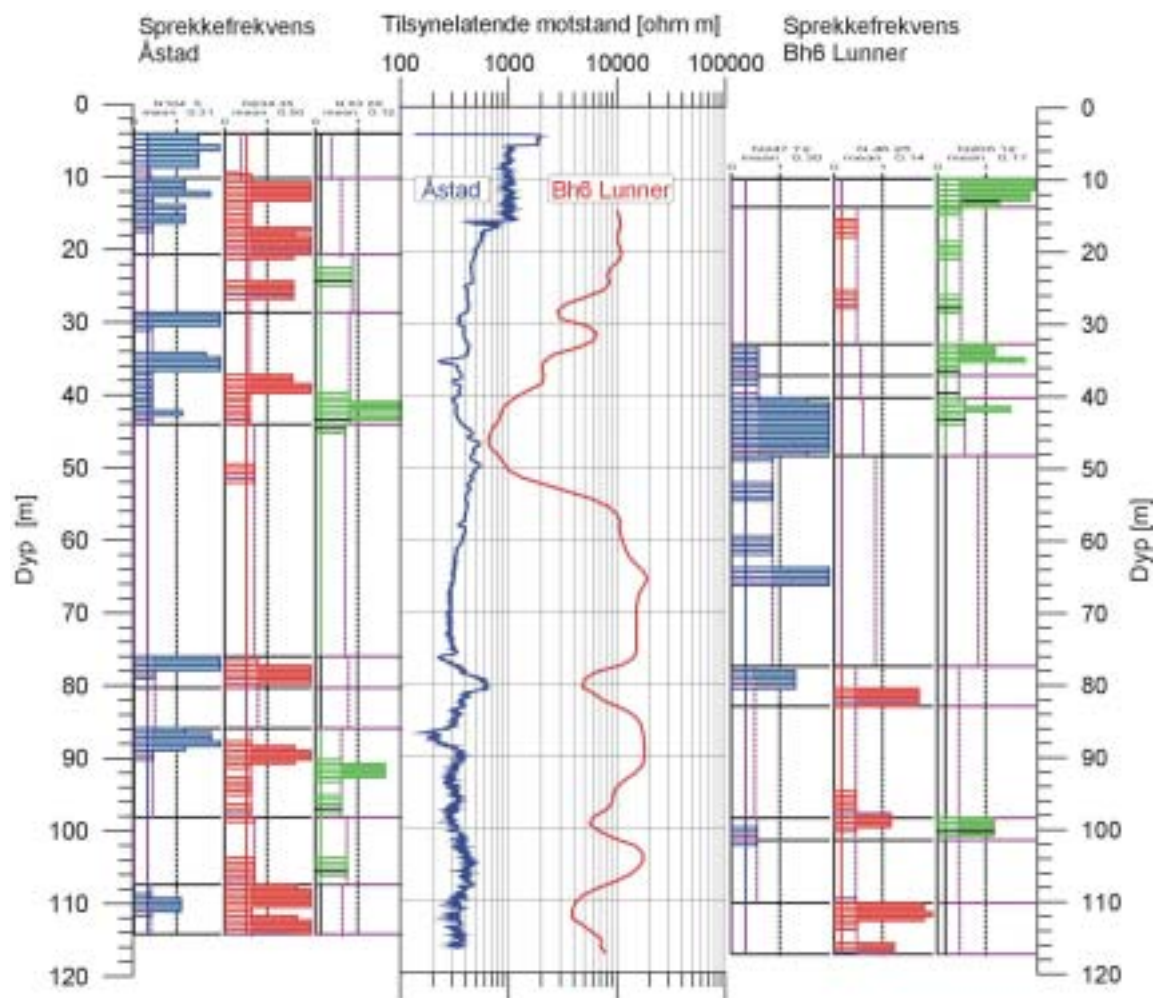
Over **Romeriksporten** viste resistivitetsdata fire klare soner med lav resistivitet som går mot dypet (NorFA 2000). Generelt ligger resistiviteten i området 5000 til 15000 ohmm, mens sonene er nede mot 500 ohmm. Ved Kjerringmyr indikeres spesielt lav resistivitet (<500 ohmm), her har det i ettertid vært nødvendig å bygge infiltrasjonsanlegg for å opprettholde vannballansen. En detaljert gjennomgang av situasjonen ved Romeriksporten er planlagt innenfor Kristin Hilde Holmøys doktorgradsarbeide.

På **Krokskogen**, hvor resistiviteten var generelt høy (> 5000 ohmm), ga også resistivitetsmålingene klare data på svakhetssoner (Dalsegg m. fl. 2003a). Her ble bare en sone fulgt opp med boring, brønnen ga noe vann, men bare i de grunne deler av borehullet. I dette området var oppgaven først og fremst å bekrefte anomalier fra helikoptermålinger, og dette var vellykket. Antatt tvilsomme VLF-anomalier ble bekreftet ved både VLF- og resistivitetsmålinger på bakken.

Ved **Asker–Jong** er resistiviteten i bergartene i utgangspunktet veldig lav (1000 – 5000 ohmm, Dalsegg m. fl. 2003b). Det er i dette miljøet påvist områder med lav resistivitet, men bare unntaksvis klare svakhetssoner. Et borehull mot en sone med spesielt lav resistivitet ved Skaugum, ga relativt mye vann (ca. 2000 l/time), og det kunne påvises vanninnslag i tunnelnivå. Målinger i borehull ved Staverhagan viser at sulfidimpregnasjoner bidrar sterkt til meget lav resistivitet, men samtidig er dette med på å tette en ellers porøs sandstein fra sen karbon tid. Ved Skaugum påvirkes målingene av metallgjerder som går langs profilene, og her er det målt lavere resistivitetsverdier på bakken enn i borehullet.

Ved refraksjonsseismiske målinger er det indikert flere lavhastighetssoner. Disse faller sammen med områder med lav resistivitet, men resistiviteten påviser ikke like klart veldefinerte svakhetssoner. Noen av de påviste lavhastighetssonene skyldes en forvitret eruptivgang, og er heller ikke veldefinert på seismikken.

Figur 30 illustrerer problemene med å påvise sprekkesoner i en bergart som i utgangspunktet har meget lav resistivitet. Den generelle resistiviteten i kambrosiluriske kalksteiner ved Åstad ligger lavere enn hva en finner i et oppsprukket parti ved Bh 6 ved Lunner-tunnelen. Det indikeres en viss sammenheng mellom lavere resistivitet og spesielt den blå gruppen av sprekker ved Åstad, men kontrasten er for lav og sprekkeene er for få til at dette kan påvises ved målinger på bakken.



Figur 30: Påviste sprekker og målt resistivitet i brønn ved Åstad (Jong-Asker) og Bh 6 Lunnertunnelen.

Ved Øysand – **Thamshavn** ligger resistiviteten i ikke oppsprukket fjell i området 8000 til 15000 ohmm (Dalsegg m. fl. 2003c). Her er det i hovedsak meget godt samsvar mellom geologisk kartlagte soner og påvist lav resistivitet. Uoverensstemmelser forekommer, men disse kan forklares. Det er boret tre brønner mot utvalgte soner, men disse ga beskjedne vannmengder. En må imidlertid vente til tunnelene er drevet før en kan konkludere klart hvilken relevant informasjon resistivitetsmålingene har gitt.



## Resistivitetmålinger generelt

Ved alle undersøkelsene unntatt ved Skaugum, kunne de inverterte resistivitetsdata bekrefte ved målinger i borehull. Ved Skaugum skyldes avviket påvirkning fra et metaltgjerde langs profilet. Dette betyr at teknisk fungerer disse målingene meget bra, og utfordringen blir å tolke hvilke geologiske forhold de kartlagte resistivitetsverdier (den fysiske modellen) representerer. Gjennom dette prosjektet har en arbeidet med grunnfjellsbergarter (Romeriksporten), Oslofeltets permiske intrusiver og vulkanitter (Lunner og Krokskogen), kambrosilurisk kalkstein og sandstein fra sen karbon (Asker) og kaledonske dekkebergarter (grønnskifer og glimmerskifer) i Trondheimsfeltet (Øysand–Thamshavn). En har kommet et stykke på veg i forståelsen av hva ulike resistivitetsverdier betyr rent geologisk. Det gjenstår å få bekreftet erfaringene på andre områder med tilsvarende geologi, og ikke minst, skaffe erfaring fra andre geologiske miljøer.

Målingene ved Lunner viste at ikke alle sonene som ga resistivitetsanomalier, viste respons på VLF (figurene 3 og 10). Tilsvarende sammenligning er gjort over Romeriksporten, ved Krokskogen og ved Øysand-Thamshavn. Av 36 soner indikert ved resistivitetmålinger, ga bare 24 soner respons på VLF. I fem tilfeller ble VLF forstyrret av kraftlinjer slik at påvisning av svakhetssoner ble umulig. Dette viser at resistivitet er mer følsom for påvisning av svakhetssoner enn VLF, resistivitet kan bedre karakterisere sonene (bredde, dybderekkevidde og resistivitetsverdi), og i tillegg påvirkes metoden ikke på samme måte av tekniske anlegg.

I de aller fleste tilfellene har metoden svart til forventningene og kjente svakhetssoner er blitt kartlagt. I noen tilfeller er det påvist soner som ikke har kommet med i den innledende ingeniørgeologiske kartleggingen. I andre tilfeller har resistivitetmålinger ikke gitt indikasjoner på geologisk kartlagte soner, noe som kan tolkes slik at disse sonene ikke vil gi vanskeligheter for de etterfølgende bergtekniske arbeider. Metoden har også påvist partier langs tunneler som ut fra meget høy resistivitet kunne karakteriseres som problemfrie. Ved Lunner har soner med spesielle stabilitetsproblemer skilt seg ut med meget lav resistivitet. Under disse geologiske betingelsene ser det ut som om metoden kan **karakterisere** sonene.

### 6.2.3 To-dimensjonal Indusert Polarisasjon

Måling av Indusert Polarisasjon (IP) har ikke innfridd forventningene. Ved Jong-Asker, hvor resistiviteten i fjellet generelt var lav og hvor det var mye kulturell støy, var det ikke mulig å få tolkbare resultater på 2 av 3 områder p.g.a. lavt signal-/støyforhold. Dette kunne vært rettet på ved å benytte utstyr med større utgangseffekt, men da har mye av hensikten med å benytte samme måleprosedyre som ved resistivitetmålingene falt bort.

I områder hvor en har hatt tilstrekkelig signal-/støyforhold, har ikke målingene vist konsistente resultater. Ved Lunner, der en har en meget klar ren vannsone og en kombinert vann-leirsoner var det ikke mulig å se noen klar effekt av forhøyet IP på leirsonen slik en skulle forvente ut fra tidligere foreslåtte tolkningsmodell (Pedersen og Veslegaard 1985). Ved Skaugum (Jong-Asker) i et meget begrenset område hvor en ledende sone ble påvist på 3 profiler, kom det frem motstridende resultater. Heller ikke ved Øysand-Thamshavn kom det frem informasjon som kan bidra til å karakterisere påviste svakhetssoner. Generelt kan en si at ikke i noen tilfeller har en greid å påvise noen IP-effekt som på en eller annen måte kan knyttes til svakhetssoner. Prosjektgruppen vil derfor ikke anbefale å arbeide videre med IP for påvisning av leirfylling i svakhetssoner.

I to tilfeller er det indikert sulfider som årsak til lave resistivitetsverdier, i hornfels ved Lunner og i Askergruppens nedre del. I sistnevnte tilfelle ble dette bekreftet ved IP-målinger i borehull. IP kan være et nyttig verktøy for å avklare om lav resistivitet kan skyldes kis eller andre ledende mineraler, og bør anvendes dersom det er mistanke om dette.

#### 6.2.4 Bakkemålinger generelt

Ved resistivitets- og IP-målingene ble det benyttet en elektrodeavstand på 10 meter. Sammenlignet med refraksjonsseismikk med geofonavstand 5 meter og i noen tilfeller 2,5 meter, gir dette mindre lateral oppløsning. Kortere avstand mellom elektrodene kan også benyttes ved resistivitet/IP. Slik utstyret er utformet, vil mindre elektrodeavstand gå på bekostning av dybderekkevidde. Halvert elektrodeavstand gir halvert dybderekkevidde. Innenfor "*Miljø- og samfunnstjenlige tunneler*" har en valgt å fokusere på stor dybderekkevidde. Dette for å se om resistivitet bedre kan beskrive forholdene mot dypet enn det refraksjonsseismikk gjør.

Ved refraksjonsseismikk kan en i praksis kun se i toppen av berggrunnen. Resistivitetsmålingene har vist at denne metoden kan følge sonene mot dypet. Det finnes gode eksempler på at sonene indikeres ned til tunnelnivå og at de også har skapt problemer under tunneldrivingen (Lunner sone K og sone R). Hvor langt en sone kan følges, avhenger av kontrast i resistivitet og sonens størrelse. Målingene ved Jong-Asker viser at kontrasten kan være et problem. Det finnes også eksempler på at sonene er for tynne til å følges mot tunnelnivå, men likevel har de forårsaket store problemer (Lunnertunnelen sone X). Resistivitet har gitt mer informasjon om forholdene mot dypet enn det tradisjonell refraksjonsseismikk kan bidra med.

Resistivitetsmålinger er prøvd med lovende resultat i marine miljø i Norge (Lile m. fl.1994). Svakhetssoner med lav resistivitet ble påvist under sedimenter på sjøbunnen i Maursundet i Troms. På dette tidspunkt hadde en ikke rutiner for å invertere data, men sonene kom fram på pseudoseksjonen over tilsynelatende resistivitet. Med dagens inversjonsprosedyrer ville en trolig få et langt klarere bilde av svakhetssonene. Den lave resistiviteten i sjøvannet "stjeler" mye av strømmen, og en må derfor ha relativt kraftige sendere ved denne type måling. Også under marine forhold kan resistivitet være et alternativ til refraksjonsseismikk, men det kreves en videreutvikling av utstyr og prosedyrer.

Med 10 meters elektrodeseparasjon, kan 2 personer produsere 5-600 meter resistivitetsprofil pr. dag. Langs veg kan 1 person gjøre det samme. Data kan inverteres med full topografisk kontroll i løpet av 3 - 4 timer. Metoden er derved langt mindre ressurskrevende enn refraksjonsseismikk. Metoden gjør ikke skade på naturen, og nedgravde tekniske anlegg er vanligvis ikke noe hinder for gjennomføringen. Målt resistivitet påvirkes av metallgjerder eller andre tekniske anlegg med elektrisk kontakt til bakken, men relative resistivitetsverdier kan fremdeles kartlegges.

Selv om en har erfaring fra bare et fåtall objekter, synes det klart at resistivitetsmålinger kan være et godt alternativ til tradisjonell refraksjonsseismikk. Uttestingen av teknikken bør derfor fortsette slik at en kan høste erfaringer fra flere geologiske miljø samt etterprøve de erfaringer en har så langt.

### 6.3 Borehullsmålinger

Innenfor prosjektet "*Miljø- og samfunnstjenlige tunneler*" er følgende metoder for målinger i borehull testet: Akustisk televiwer, optisk televiwer, logging av resistivitet, temperatur og vannets elektriske ledningsevne samt naturlig gammastråling. I tillegg er det foretatt strømningsmåling i kombinasjon med prøvepumping av borehull.

#### 6.3.1 Optisk televiwer (OPTV)

Allerede etter forprosjektet til "*Miljø- og samfunnstjenlige tunneler*" var det klart at optisk televiwer var å foretrekke fremfor akustisk televiwer (Elvebakk og Rønning 2001a). Optisk televiwer gir informasjon om sprekkers strøk, fall, frekvens og åpning. Tilsvarende data om gangbergarter, lagdeling og foliasjon kan også ekstraheres. I tillegg gis et bilde av geologien. Siden sonden er orientert til enhver tid, kan borehullsforløpet bestemmes. Dette har vist seg å være meget viktig. En brønn som over Romeriksporten skulle være vertikal, viste et horisontalt avvik på 28 meter ved 95 meters dyp (Elvebakk og Rønning 2001b). Ved alle de undersøkte områdene har metoden gitt viktig informasjon om opptreden til enkeltstående og grupper av sprekker. Metoden har også bidratt til å nøste opp geologien nedover borehullene, spesielt ved Staverhagan i Asker.

Ved Lunner kunne teknikken på forhånd beskrive et fåtalls åpne sprekker med sann tykkelse opp mot 5 cm (Elvebakk m. fl. 2001, se også figur 14). I seg selv dokumenterer dette et stort lekkasjepotensial. Borehullet mot nabosonen kjennetegnes med en langt mer intens oppsprekning, nærmest en oppmaling av fjellet. Tunneldrivingen viste at dette virkelig var en problemsone med hensyn på stabilitet. I dette tilfelle ble det foretatt systematisk injeksjon, men i tilfeller dette ikke er aktuelt, vil informasjon fra optisk televiwer være svært nyttig for å bestemme hvordan en sone skal angripes. Ikke minst vil dette være interessant for beregning av kostnader.

I figur 29 er sonene P og Q tegnet med fall 75° mot øst. Resistivitet indikerte også fall mot øst, men det var først og fremst informasjon fra optisk televiwer som ga grunnlaget for en slik detaljert opptegning. Erfaringene fra tunneldrivingen viser at store injeksjonsmengder gikk med nettopp der sonene skjærer tunnelen. Dette er et eksempel på at optisk televiwer kan bidra til bedre å forutsi hvor en sone kommer inn i tunnelen.

Optisk inspeksjon kan ha en ulempe ved at det kreves klar sikt i borehullene. Av i alt ca. 100 brønner som er inspisert til nå, har dette vært et problem kun i et fåtalls tilfeller. Ved å vente lenge nok (1-2 uker) vil vannet i de fleste brønnene bli klart slik at inspeksjon kan foretas. I tørre brønner er dette ikke noe problem, men det kan ofte være lettere å se strukturer i vannfylte hull. De største problemene med å ekstrahere informasjon er erfart ved Jaren i Oppland der meget mørk alunskifer gjorde det vanskelig å se både sprekker og geologisk lagdeling. En annen svakhet er at metoden på samme måte som kjerneboring, kun kan gi informasjon om de sprekke som skjærer borehullet.

For å kunne legge opp til et godt injeksjonsprogram samt vurdere stabilitet, bør en ha utført forundersøkelser som gir svar på flest mulig av punktene angitt i tabell 2 (Bhasin 2002). Deler av disse parameterene danner også grunnlag for beregning av Q-verdi. Tabellen viser at inspeksjon av borehull med optisk televiwer kan gi tilsvarende informasjonen som kjerneboring.

Parameter	Betydning for injeksjon	Betydning for stabilitet	Betydning for Q-verdi	Informasjon fra Kjerneboring	Informasjon fra optisk televiwer
1. Bergart	Ja	Ja	Delvis <sup>1)</sup>	Ja	Ja
2. Oppsprekning					
• sprekkefrekvens	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
• sprekkeorientering	Ja	Ja	Delvis	Ja <sup>2)</sup>	Ja
• sprekkegrupper	?	Ja	Ja	Ja <sup>2)</sup>	Ja
• gjennomsettende	Ja	Ja	Delvis	Nei	Nei
• kommunikasjon	Ja	Ikke relevant	Nei	Nei	Nei
3. Sprekkekarakteristikk					
• sprekkeåpning	Ja	Ja	Ja	Delvis	Ja
• sprekkefylling	Ja	Ja	Ja	Delvis <sup>3)</sup>	Delvis
• ruhet	Ja	Ja	Ja	Delvis	Delvis
4. Spenningstilstand					
• totalspenning	Ja	Ja	Ja	Nei	Nei
• spenningsretning	Ja	Ja	Ja	Nei	Nei
• vannstrykk	ja	Ja	Ja	Nei	Nei

<sup>1)</sup> Bergartens styrke i forhold til spenning. <sup>2)</sup> Krever orienterte kjerner. <sup>3)</sup> Kan spyles bort.

Tabell 2: Oversikt over geologiske parametere som har betydning for injeksjon, stabilitet og som inngår i Q-verdi og hvilke av disse som kan skaffes ved bruk av kjerneboring og optisk televiwer (fritt etter Bhasin 2002).

Inspeksjon med optisk televiwer kan også bidra til en større forståelse om hvordan vann opptrer i fjell. Undersøkelser i grunnfjellsbergarter på Vestlandet (Askvoll kommune) viser hvor en får vanninnslag i forhold til ulike soner i en sprekkemodell (se avsnitt 5.1.2) og hvordan vannførende sprekker opptrer i forhold til største spenningsretning i området (Elvebakk og Rønning 2002).

### 6.3.2 Resistivitet og induisert polarisasjon

Resistivitetmålinger i borehull bekrefter i de aller fleste tilfellene bakkemålingene, og har vist at det kan være en klar sammenheng mellom oppsprekning og målt resistivitet (figur 17). Disse målingene kan derfor benyttes til å vurdere om et borehull virkelig treffer den aktuelle sonen. I to tilfeller (Lunner sone K og sone R) indikerer spesielt lav resistivitet ustabile masser. Selv om det her er påvist en intens oppsprekning, er det ikke noen klar sammenheng mellom oppsprekningsgrad og resistivitet. Det ble her indikert bidrag til redusert resistivitet fra leirmineraliseringer. Ved Staverhagan, hvor en finner nær horisontal lagdeling, har resistivitetesloggen bidratt til en detaljert berggrunnskartlegging nedover borehullet.

Som diskutert under bakkemåling, ser det ikke ut til at Indusert Polarisasjon (IP) kan bidra til karakteriseringen av svakhetssoner ved påvisning av leirmineraler. Metoden er benyttet ved et fåtall borehull. Ved Staverhagan i Asker kunne kismineralisering i Askergruppen påvises. Ved Øysand-Thamshavn har IP-målinger i borehull ekskludert sulfidmineralisering som årsak til tre soner med lav resistivitet, men samtidig indikert sulfider i andre deler av borehullene. I tilfeller en har mistanke om at lav resistivitet kan være forårsaket av metallisk ledende mineraler (kis, jernoksyder eller grafitt), bør metoden anvendes for å avklare dette.

### 6.3.3 Temperatur, vannets ledningsevne og naturlig gammastråling

Måling av vannets temperatur og elektrisk ledningsevne kan indirekte gi informasjon om innstrømming av vann i et borehull. Dette ble demonstrert klart over Romeriksporten hvor ledningsevne avtok trinnvis, og hvor en hadde en tilsvarende liten økning i temperatur. Ut fra dette kunne en slutte at det var overflatevann som strømmet inn og som strømmet videre nedover i hullet. Uregelmessigheter i disse to parameterene forekommer meget ofte på steder hvor det ved pumping er påvist vanninnslag. Tilsvarende har en sett at dersom brønnen ikke gir vann, forløper både temperaturen og ledningsevnen normalt uten avvik.

Naturlig gammastråling (radioaktivitet) bidrar først og fremst til berggrunnskartleggingen. Veldig ofte ser en samsvar mellom økt stråling og fargen på bergarten. Dette tilskrives økt kaliuminnhold, og derved lysere bergart. Ved de logginger som er foretatt, er det kun målt totalstråling. En kan derfor ikke med sikkerhet si om strålingen skyldes uran, thorium eller kalium. Ved å benytte et gammaspektrometer, kan en imidlertid bestemme innholdet av de nevnte elementer relativt nøyaktig, vel å merke hvis de finnes i tilstrekkelige mengder og hvis instrumentet er riktig kalibrert (Elvebakk og Rønning 1998).

### 6.3.4 Prøvepumping og strømningsmåling

Ved de første forsøkene på prøvepumping, ble det benyttet en pumpe som hadde kapasitet til å løfte 6800 liter ved en løfthøyde på 100 meter. Brønnene ble forsøkt pumpet tørre og avvik i senkningshastigheten ble benyttet til å si hvor vanninnslagene i brønnen kom (Storrø m. fl. 2002). Vanninnslag ble påvist i tilknytning til indikerte åpne sprekker i borehullene, men pumpe, slanger og strømkabel var så tunge at en måtte ha kran for å senke og heve utstyret i borehullet. Teknikken er for ressurskrevende til å kunne få noen praktisk anvendelse.

Etter de første forsøkene gikk en over til å benytte en mindre pumpe med løftekapasitet 5000 liter på 60 meter. Denne plasseres oppe i borehullet og kombineres med strømningsmålinger langs borehullet under pumpa (se figur 18). Denne pumpa er lettere, det trengs ikke så mye slanger og kabler, og utstyret kan derfor håndteres av to personer. Denne prosedyren er benyttet ved Krokskogen, Jong-Asker og Øysand-Thamshavn i tillegg til flere undersøkelser utenom "*Miljø- og samfunnstjenlige tunneler*".

Ved pumping i kombinasjon med strømningsmåling kan vanninnslag på forskjellig dyp kvantifiseres (se avsnitt 4.5). Dette forutsetter i praksis at strømningsmåleren står sentralt i borehullet og at strømmingen er laminær. Dette er selvsagt ikke alltid tilfelle, og resultatene må derfor betraktes som omtrentlige. Metoden er lite ressurskrevende; to personer kan gjennomføre en slik test i løpet av en halv dag. Det synes klart at en ved denne prosedyren på en rask og effektiv måte kan skaffe informasjon om lekkasjepotensialet i tunnelnivå.

Hittil har det vært vanlig å skaffe tilsvarende data ved å foreta vanntapsmåling (Lugeon-testing) av borehull. En benytter da 10 bars overtrykk og sprekker som ellers er tette kan åpnes. En beskriver da en ikke naturlig situasjon. Prosjektgruppen mener prøvepumping med trykkavlastning slik en får ved lekkasjer i en tunnel, kan være en likeså god måte å kartlegge lekkasjepotensialet på. Prøvepumping og strømningsmålinger gir kanskje ikke så klare kvantitative data, men metoden er mye raskere i bruk enn detaljert Lugeon-testing. Prosjektet har imidlertid påvist at også vanntapsmåling kan være beheftet med store usikkerheter.



Kjerneborehullet ved Lunnertunnelen viste moderate Lugeon-verdier, men det ble påvist store vanninnslag ved tunneldrivingen (se figur 29).

### 6.3.5 Borehullsmålinger generelt

Tradisjonelt har det vært vanlig å teste berggrunnen med kjerneboring og vanntapsmålinger. I tilfeller der en ikke trenger kjernemateriale for spesielle tester, kan ofte brønnboring og borehullslogging være et like godt og billigere alternativ. Kjerneboring inklusive kjernelogging, avviksmåling, vanntapsmåling og orientering av kjerner koster vanligvis 800 til 1000 kroner pr. meter. Brønnboring koster ca. 200 kroner pr. meter, og brønnlogging inklusive pumpe-testing ca. 250 kroner pr. meter. Dette betyr at brønnboring inklusive inspeksjon og logging koster ca. halvparten av hva det vil koste med kjerneboring. Informasjon om borehullsforløp og hvilke deler av brønnen som lekker vann vil da foreligge. Liggende lange borehull langs en tunneltrasé vil være problematisk ved brønnboring.

I Tabell 2 ovenfor er det antatt at borehullsinspeksjon med optisk televiwer ikke gir grunnlag for bestemmelse av retning på bergspenning. Teoretisk bør det være mulig å si noe om hovedspenning ut fra sprekkens retning og påvist åpning. Siden forholdet ikke er undersøkt innenfor "*Miljø- og samfunnstjenlige tunneler*", bør dette tas opp i et senere forskningsprosjekt.

## **6.4 Andre metoder**

I dette avsnittet vurderes de metodene som ble beskrevet i kapittel 5, Andre metoder: Spesielle ingeniørgeologiske studier, digital strukturanalyse, analyse av setninger ut fra radardata målt fra satellitt samt automatisk logging og analyse av boreparametere.

### 6.4.1 Spesielle ingeniørgeologiske studier

Både ved Frøyatunnelen og ved T-baneringen er det utført refrasjonsseismiske målinger for bl.a. å påvise svakhetssoner i berggrunnen. En etteranalyse viser at de laveste hastighetene målt i dyprennene stort sett ble gjenfunnet som dårligere bergmasse i tunnelene, men bredden på sonene kunne variere. Q-verdier beregnet på grunnlag av refrasjonsseismiske målinger viser generelt høyere verdier enn det som er påvist i tunnelene. Det kan derfor være grunn til å se på den teoretiske sammenhengen på nytt. Generelt kan en si at geofysiske målinger er et meget nyttig verktøy for påvisning av svakhetssoner, men en kommer likevel ikke utenom sonderboringer på stoff for å være på den sikre side.

Kjerneboringer på Frøyatunnelen viste dårligere fjellkvalitet enn det som ble påtruffet i tunnelen. Dette kan forklares ved at boringene kanskje fulgte strukturer eller "linser" av forvitret materiale. Ved Lunnertunnelen ble det motsatte påvist. Her ble fjellet vurdert som godt til svært godt, mens en ved tunneldrivingen fikk påvist store vannlekkasjer og det ble brukt store injeksjonsmengder. Noen tilfredsstillende forklaring på dette er ikke kjent. Dette viser at en ved kjerneboring, og heller ikke ved annen boring, kan være sikker på å ha fått et riktig bilde av bergmassekvaliteten.

Generelt har det vært vanskelig å finne klare sammenhenger mellom injeksjonsmengder og registrerte lekkasjer på den ene side og geologiske parametere som bergartstype, oppsprekningsgrad og Q-verdi. Et forsøk på å korrelere injeksjonsmasser og enkelte parametere i Q-metoden viste heller ingen klare sammenhenger. Bedre korrelasjoner ble oppnådd ved å benytte innlekkasje på sonderhull, og kan derfor kun benyttes for prognoser på stuff. Det kan se ut som om de sikreste prognosene kan utarbeides ved å benytte erfaring fra andre anlegg i tilsvarende bergarter.

Detaljerte undersøkelser på vanninnslag i forhold til ulike soner i en bruddsonemodell viser at den største hydrauliske konduktivitet ligger i sonens distale deler. Dette er imidlertid foreløpig påvist i to tilfeller, borebrønn ved Folvåg og Oslofjordtunnelen, og det er behov for flere data til å kunne si noe sikkert om dette.

#### 6.4.2 Digital strukturanalyse

Strukturgeologisk database, utviket av NGU i samarbeid med UiB, vil kunne gi et bilde av den regionale tektonikken i et område før en starter detaljerte forundersøkelser. Digitale høydedata kan være et viktig supplement til andre datasett, både analoge og digitale. Største fordelene er at analysene kan gjøres digitalt og at en hurtig kan teste ulike visualiseringer. En kan til en viss grad gjennomføre tolkninger på ulike detaljeringsnivå. Dette avhenger selvsagt av detaljeringsgraden i den foreliggende topografiske modell. Analysen har vist at det er mulig å tolke frem informasjon selv i urbane områder der tekniske anlegg kan forstyrre geofysiske data og hvor bygningsaktivitet har visket ut mye av det opprinnelige topografiske relieff.

#### 6.4.3 Analyse av setninger ut fra radardata målt fra satellitt

Analyse av radardata målt fra satellitt viser meget interessante resultater. Vertikale setninger er påvist over Romeriksporten, og de synes å være knyttet til tunneldrivingen. Det er også påvist naturlige setninger som er kontinuerlige i aktuelle periode og som ikke kan være noen effekt av tunnelarbeidene.

Avansert prosessering har total gitt respons på flere punkter og det er påvist setninger på flere enkeltobjekt enn ved standard analyse. Undersøkelsen viser også at tidsseriene viser mindre støy. Ved tilsvarende analyser i fremtiden anbefales derfor en avansert prosessering, der en ikke kun ser på lineære vertikale bevegelser.

Siden måledata repeteres i beste fall ca. hver 35. dag, kan teknikken ikke benyttes til daglig å overvåke eventuelle setninger som oppstår som følge av inngrep i naturen. Metoden kan imidlertid benyttes til å påvise naturlige setninger, og i ettertid relatere hendelser til eventuelle inngrep. Metoden kan på denne måten skille mellom naturlige og menneskelagde setninger.

Metoden krever mye data og de er tidkrevende å prosessere og den må derfor karakteriseres som relativt dyr. Undersøkelsen over Romeriksporten kostet i størrelsesorden hundre tusen kroner. Data kan imidlertid benyttes av flere brukere, og en samfinansiering av slike prosjekter bør derfor være aktuelt. NGU har allerede investert i datasett i indre del av Oslofjorden (Drammen – Lillestrøm) og områder rundt Trondheim (Stjørdal – Orkanger).

#### 6.4.4 Automatisk logging og analyse av boreparametere

Ved Lunnertunnelen ble det påvist en god korrelasjon mellom hardhet og oppsprekning fra MWD-analyser og svakhetssoner påvist ved andre metoder. Analyser av vanninnslag var ikke kalibrert, men kvalitativt viste metoden gode resultater.

Ved T-baneringen viser tilsvarende analyser god korrelasjon mellom logget hardhet og bergartene som er kartlagt på stuff (Løset og Kveldsvik 2003). For oppsprekning og vanninnhold er det dårligere sammenheng mellom MWD-data og det som er registrert på stuff. Spesielt synes vannforhold ikke å være fanget opp særlig godt med MWD. At variasjonen i oppsprekning og bergmassekvalitet generelt ikke er særlig stor i tunnelen, kan ha gjort det vanskeligere å fange opp de variasjonene som finnes.

Som dokumentasjon på de faktiske forhold, er automatisk logging og analyse av boreparametere interessant i ettertid. Det synes imidlertid klart at dette er analyser som bør være tilgjengelig på rigg rett etter at sonderhull eller en injeksjonsvifte er boret ferdig. En visualisering av bergmassekvalitet og vannforhold på et panel i boreriggen vil lette kommunikasjonen mellom boreoperatør og representant for byggherren. Som et resultat av dette kan sikkerheten på stuff økes, det blir enklere å starte forbolting på rette tidspunkt og sikringsarbeidet kan optimaliseres.

For at boreoperatører skal kunne benytte seg av dette, må programvaren videreutvikles og forenkles. Den enkelte operatør må gis god opplæring og han/hun må motiveres til å benytte dette verktøyet.

## 7. KONKLUSJONER OG ANBEFALINGER

Analyse av satellittbilder viser at **digital strukturanalyse** gir et godt bilde av den regionale tektonikken i et område. Mer detaljert informasjon om forkastninger og sprekkesoner kan ekstraheres fra digitale høydedata. **Geofysiske data målt fra fly eller helikopter** vil kunne gi viktige bidrag i en tidlig fase av forundersøkelser for anlegg i fjell. Metodene som benyttes, gir viktig informasjon om berggrunnsgeologien, og i tillegg kan lineamenter forårsaket av forkastninger og sprekkesoner tolkes frem. Det foreligger mye digitale data for de sentrale delene av Østlandet, men mer sparsomt i landet for øvrig.

**Seismisk modellering** har vist at tolkningene kan være beheftet med større usikkerheter enn det brukerne har vært klar over. I korthet viser automatisk tolkning av en modell som kun består av en depresjon i fjelloverflaten, ofte kan indikere redusert hastighet i berggrunnen. Flere modeller kan tilfredsstille data, og en blindtest viste at en erfaren tolker ofte vil presentere det verst tenkelige tilfellet med svakhetszone, mulig forvitring i de øverste delene av berggrunnen og overdreven løsmassemektighet.

Uttesting av **2D resistivitetsmålinger** har vist at metoden effektivt kan **påvise** svakhetssoner i fjell dersom resistiviteten i berggrunnen i utgangspunktet er over 5000 ohmm. Under gitte geologiske betingelser indikeres også en evne til å **karakterisere** sonene. Metoden har vist seg å være relativt følsom, og har påvist flere soner enn f.eks. VLF. I alle områder unntatt ved Jong-Asker, hvor resistiviteten generelt er lavere enn 5000 ohmm, har resistivitetsdata gitt like klar informasjon om svakhetssoner i overflaten av berggrunnen som refraksjonsseismikk. Metoden kan i motsetning til refraksjonsseismikk, til en viss grad følge sonene mot dypet, men dersom det er tynne soner, kan disse gå dypere enn indikert på resistivitetsbildene. I noen tilfeller kan lav resistivitet som skyldes ledende mineraler forveksles med svakhetssoner. **Indusert polarisasjon** synes ikke å gi informasjon som kan bidra til karakterisering av svakhetssoner. Tidligere foreslått tolkningsmodell er ikke bekreftet. Metoden kan bidra til påvisning av elektronisk ledende mineraler som årsak til lav resistivitet.

**Optisk televiewer** gir informasjon om sprekkers strøk, fall, frekvens og åpning. Tilsvarende data om geologiske ganger, lag og foliasjon kan også ekstraheres. I tillegg produseres et løpende bilde av geologien og borehullsforløpet kan bestemmes. Slagboring av brønner med påfølgende inspeksjon og logging av geofysiske parametere som **resistivitet, temperatur, vannets ledningsevne og naturlig gammastråling** er, så lenge en ikke trenger kjernene for analyser, et meget godt alternativ til kjerneboring. Andre loggemetoder er også aktuelle men ikke utprøvd gjennom dette prosjektet. **Prøvepumping** av brønner i kombinasjon med **strømningsmålinger** gir informasjon om total vanngiverevne i et borehull, og hvor vannet strømmer inn. Den prosedyre som er valgt er et billig og godt alternativ til kjerneboring og tidkrevende vanntapsmålinger.

**Spesielle ingeniørgeologiske studier** ved Frøyatunnelen og T-baneringen har ikke kunnet påvise noen klare sammenhenger mellom registrerte injeksjonsmasser og lekkasjer på den ene side og geologiske parametere som bergart, oppsprekning og Q-verdi på den andre. Disse parameterene er derfor kun egnet til meget grove prognoser. Q-verdi beregnet på grunnlag av trykkbølgehastighet målt med refraksjonsseismikk, ga høyere verdier enn de som ble kartlagt i tunnelene. Detaljerte studier av vanninnslag sett i lys av en bruddsonemodell viser at sonenes sentrale delene ikke gir vann, men at vanninnslagene kommer i sonens distale deler hvor den hydrauliske konduktiviteten er større. Det er behov for flere undersøkelser på dette.

**Analyse av radardata målt fra satellitt** kan gi informasjon om naturlige og menneskelagde vertikale setninger ned mot 1 mm pr. år i et område. Metoden kan gå tilbake i tid og se om bevegelsene er kontinuerlig, eller om de inntraff ved et spesielt tidspunkt. Teknikken kan ikke benyttes til daglig overvåking av setningsskader.

**Automatisk analyse av boreparametere** målt under boring viser gode korrelasjoner på bergets hardhet og til dels oppsprekning. Kvantifisering av vannlekkasjer synes derimot å være mer komplisert. Ved å videreutvikle dette verktøyet kan sikkerheten på stuff økes og planleggingen av arbeidet kan forbedres. Programvaren må imidlertid bli mer brukervennlig før at metoden kan bli operativ på boreriggen.

**Generelt** kan en si at de nye teknikkene viser at ny og supplerende informasjon som er relevant for utbyggere av anlegg i berg, og at kvaliteten på forundersøkelser kan heves. Det ligger et potensiale i disse teknikkene som før "*Miljø- og samfunnstjenlige tunneler*" lå uutnyttet. Ekstrahering av informasjon fra regionale digitale datasett (satelittbilder, fly- og helikoptergeofysikk, digital topografi) bør bli en del av tidlig fase av forundersøkelser for større og mer kompliserte anlegg. Oppfølging på bakken med 2D resistivitet er i mange sammenhenger et bedre og billigere alternativ til tradisjonell refraksjonsseismikk og eventuelt andre målinger. Det er meget viktig at undersøkelser gjøres langs tunneltraséene. Boring av vannbrønner med påfølgende inspeksjon, logging og prøvepumping kombinert med strømningsmåling, har vist seg å gi tilsvarende data til en lavere pris enn kjerneboring, kjernelogging, orientering av kjerner, avviksmåling og vanntapsmåling.

Innenfor "*Miljø- og samfunnstjenlige tunneler*" er det foretatt uttesting av metoder på et fåtall objekter. For å få klare konklusjoner om metodenes fortreffelighet, er det nødvendig med mer erfaring, både fra de geologiske miljøene en har arbeidet og selvsagt også fra andre. Resistivitetsmåling i marine miljø bør videreutvikles. Det samme gjelder akustisk tomografi og radartomografi, begge teknikker som ble vurdert ved starten av prosjektet, men som en ikke fikk plass for verken kapasitetsmessig eller økonomisk.

## 8. REFERANSER

Andersson, H. 2003: Injeksjon – erfaringer fra Lunnertunnelen. "*Miljø- og samfunnstjenlige tunneler*", Rapport nr. 23.

Banks D. & Robins, N. 2002: An Introduction to Groundwater in Crystalline bedrock. Norges geologiske undersøkelse, ISBN 82 7386 100 1

Barton, N. 2003: Teoretisk og empirisk forståelse av forinjisering og mulighet for redusert sikringsmengde i utvalgte tunnelstrekninger. "*Miljø- og samfunnstjenlige tunneler*", Rapport nr. 29.

Beard, L.P. 1998: Data Acquisition and Processing – Helicopter Geophysical Survey, Oppkuven og Gran, 1997. NGU Report 98.079.

Beard, L.P. 2001: Assessment of Geophysical Anomalies near Langvatnet, Lunner, Oppland Fylke. NGU Report 2001.046. "*Miljø- og samfunnstjenlige tunneler*", Rapport nr. 5.

Beard, L.P. & Rønning, S. 1997: Data Acquisition and Processing Report – Helicopter Survey, Krokskogen. NGU Report 97.134.

Beard, L.P., Lutro, O., Nordgulen, Ø., Rønning, J.S. og Siedlecka, A. 1997: Geologiske og geofysiske undersøkelser for Jernbaneverket på Ringerricke og Krokskogen. NGU Rapport 97.153.

Beard, L.P. og Mogaard, J.O. 2001: Data Acquisition and Processing – Helicopter Geophysical Surveys, Hurdal. NGU Report 2001.018.

Bhasin, R. 2002: Frøyatunnelen – Vurdering av injeksjon i forhold til Q-parametere. "*Miljø- og samfunnstjenlige tunneler*", Rapport nr. 11.

Braathen, A & Gabrielsen, R.H. 1998: Lineament architecture and fracture distribution in metamorphic and sedimentary rocks, with application to Norway. NGU Report 98.043.

Braathen, A & Gabrielsen, R.H. 2000: Bruddsoner I fjell – oppbygning og definisjoner. NGU Gråsteinen nr. 7.

Braathen, A., Elvebakk, H., Wissing, B., Rønning, J.S., Storrø, G. og Gabrielsen, R.H. 2003: Bruddsoner og vanninnslag - verifisering av grunnvannsmodell i tunneler og borehull. Det "12. seminar om hydrogeologi og miljøgeokjemi" på NGU, 4.-5. februar 2003. Sammendrag i NGU Rapport 2003.015.

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.

Dalsegg, E. og Rønning, J.S. 2002: Geofysiske målinger, Langvatnet – øst. Lunner , Oppland. NGU Rapport 2002.106. "*Miljø- og samfunnstjenlige tunneler*", Rapport nr. 21.



- Dalsegg, E., Elvebakk, H. og Rønning, J.S. 2003a: Tunnelprosjektet. Geofysiske bakkemålinger og borehullslogging. Krokskogen, Ringerike og Hole, Buskerud. NGU Rapport 2003.007. "*Miljø- og samfunnstjenlige tunneler*", Rapport nr. 35.
- Dalsegg, E., Elvebakk, H. og Rønning, J.S. 2003b: Tunnelprosjektet. Geofysiske bakkemålinger og borehullslogging, Jong-Asker, Asker og Bærum, Akershus. NGU Rapport 2003.006. "*Miljø- og samfunnstjenlige tunneler*", Rapport nr. 34 .
- Dalsegg, E. Elvebakk, H. og Storrø, G. 2003c: Tunnelprosjektet. Geofysiske bakkemålinger og borehullsmålinger ved E 39 Øysand Thamshavn, NGU Rapport 2003-067. "*Miljø- og samfunnstjenlige tunneler*", Rapport nr. 36.
- Dehls, J.F., Basilico, M. & Colesanti, C. 2002; Ground deformation monitoring in the Ranafjord area of Norway by means of the permanent scatterers technique. Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2002. 2002 IEEE International, Volume: 1, 24-28 June 2002, Page(s): 203 -207 vol.1
- Dehls, J.F. og Nordgulen, Ø. 2003: Analyse av INSAR-data over Romeriksporten. NGU Rapport 2003.076. "*Miljø- og samfunnstjenlige tunneler*", Rapport nr. 37.
- Elvebakk, H. og Rønning, J.S. 1998: Testing of borehole Gamma-ray Spectrometry in the North Calote Region. NGU Rapport 98.091.
- Elvebakk E. og Rønning, J.S. 2001a: Borehullsinspeksjon. En utprøving og sammenligning av Optisk og Akustisk televiewer. NGU Rapport 2001.011. "*Miljø- og samfunnstjenlige tunneler*", Rapport nr. 9.
- Elvebakk E. og Rønning, J.S. 2001b: Tunnelprosjektet. Inspeksjon og logging av brønner over Romeriksporten. Vurdering av lekkasjepotensial og stabilitet. NGU Rapport 2001.094. "*Miljø- og samfunnstjenlige tunneler*", Rapport nr. 8.
- Elvebakk E. og Rønning, J.S. 2002: Borehullslogging i fjellbrønn, Holmedal, Sunnfjord. Verifisering av hydrogeologisk modell med hensyn til bergspenning, oppsprekning og strømningsretning. NGU Rapport 2002.093. "*Miljø- og samfunnstjenlige tunneler*", Rapport nr. 26.
- Elvebakk E., Rønning, J.S. og Storrø, G. 2002: Borehullslogging i fjellbrønn, Folvåg, Sunnfjord. En verifisering av lineamentsmodell med hensyn til oppsprekning og vanngiverevne. NGU Rapport 2002.078. "*Miljø- og samfunnstjenlige tunneler*", Rapport nr. 25.
- Elvebakk, E., Braathen, A., Rønning, J.S. og Nordgulen, Ø. 2001: Tunnelprosjektet. Borehullslogging og strukturgeologiske studier Gualia, Lunner kommune. NGU Rapport 2001.117. "*Miljø- og samfunnstjenlige tunneler*", Rapport nr. 10.
- Gabrielsen, R.H., Braathen, A., Dehls, J., and Roberts, D. 2002: Tectonic lineaments of Norway. *Norwegian Journal of Geology (NGT)* 82, 153-174.
- Geomap 1997: Refraksjonsseismiske målinger over Langvatnet, Lunner. Geomap as. Rapport nr. 97.943 nr. 1.

- Geomap 2003: Refraksjonsseismiske målinger over Lunnertunnelen, Gualia. Oppdragsrapport, "*Miljø- og samfunnstjenlige tunneler*".
- Grøv, E. og Neeb, P.R. 1999: NFR-prosjekt, Miljøsikre og samfunnstjenlige tunneler. Rapport for delprosjekt "Forundersøkelser". Utgitt av NGU/Vegdirektoratet.
- Henkel, H. & Guzmán, M. 1977: Magnetic Features of Fracture Zones. *Geoexploration*, 15, 173-181.
- Holmøy, K.H. 2003: Lunnertunnelen, -hvilken informasjon ga de enkelte undersøkelsesmetodene? – sammenligning mellom prognoser og faktiske forhold. Kursdagene ved NTNU 2003, Undersøkelse for anlegg i berg. , innlegg nr. 14.
- Iversen, E. 1998: Rv.35. Gualia Slettmoen. Kjerneboring for tunnel under Langvann. Veglaboratoriet, Oppdragsrapport nr. E-218 A nr. 3.
- Kirkeby, T. og Iversen, E. 1996: Rv. 35 Gualia – Slettmoen, tunnel gjennom Tveitmarktoppen. Geologiske undersøkelser for detaljplan. Veglaboratoriet, Oppdragsrapport nr. E-218 A nr 2.
- Kirkeby, T. og Kveen, A. 2003: Geologisk kartlegging langs Lunnertunnelen. Kartlegging som en del av "*Miljø- og samfunnstjenlige tunneler*". Vegdirektoratet.
- Lile, O.B., Backe, K.R., Elvebakk, H. & Buan, J. E. 1994: Resistivity measurements on the sea bottom to map fracture zones in the bedrock underneath sediments. *Geophysical Prospecting*, 42, 813-824.
- Loke, M.H. & Barker, R.D. 1995: Least-squares deconvolution of apparent resistivity pseudosections. *Geophysics*, 60, 1682 – 1690.
- Løset, F. og Kveldsvik, V. 2003: T-bane Ullevål Stadion – Nydalen: forundersøkelser og injeksjon. NGI Rapport 2001042-5. "*Miljø- og samfunnstjenlige tunneler*", Rapport nr. 33.
- Massonnet, D., Rossi, M., Carmona, C., Adragna, F., Peltzer, G., Feigl, K., and Rabaute, T., 1993: The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry: *Nature* 364, 138-142.
- Müllern, C.F. og Ericsson, L. 1982: Möjligheter till analys av VLF-anomalier vid prospektering efter grundvatten i berg. Slutrapport. STU-rapport 80-4151. SGU
- NCC 2003: Tunnelrapport/oppgjørsskjema. Brovoll tunnel R35. NCC tunnelproduksjon.
- NorFA 2000: Geophysical Investigations at the Tunnel Site. NorFA research course, Oslo August 6-18, 2000.  
[ftp://ftp.geologi.uio.no/pub/norfa/reports/Geotech\\_tunnel\\_area/Geotech\\_report.doc](ftp://ftp.geologi.uio.no/pub/norfa/reports/Geotech_tunnel_area/Geotech_report.doc)
- Nordgulen, Ø. og Dehls, J. 2003: Bruk av digitale høydedata i strukturgeologisk analyse: Eksempel fra Oslo kommune. NGU Rapport 2003.013. "*Miljø- og samfunnstjenlige tunneler*", Rapport nr. 24.

Olesen, O., Henkel, H., Lile, O.B., Muring, E., & Rønning, J.S. 1992: Geophysical investigations of the Stuoragurra postglacial fault, Finnmark, northern Norway. *Journ. Appl. Geophysics* 29, 95-118.

Olesen, O. & Sandstad, J.S. 1993: Interpretation of the Proterozoic Kautokeino Greenstone Belt, Finnmark, Norway from combined geophysical and geological data. *Nor. geol. unders. Bull.* 425, 41-62.

Palmstrøm, A., Grudt, L., Nilsen, B. og Pedersen, K.B. 2003: Riktig omfang av undersøkelser for berganlegg. Vegdirektoratet Publikasjon nr. 101.

Pedersen, O. Chr. og Veslegaard, G. 1985: Kombinerte geoelektriske målinger på svakhetssoner i fjell – statusrapport. Fjellspregningskonferansen 1985. ISBN 82-519-0698-9.

Rønning, J.S. 1985: Geofysikk i vannspespektering fra sprekkesoner i fjell. Resultater fra et forprosjekt. NGU Rapport 85.181.

Rønning, J.S. og Dalsegg, E. 2001: Tunnelprosjektet. Geofysiske målinger ved Langvatnet, Lunner, Oppland. NGU Rapport 2001.090. "*Miljø- og samfunnstjenlige tunneler*", Rapport nr. 7.

Siddans, A.W.B. 2002: Structural geology using borehole wall imaginary: case study of an OPTV log in flagstone, North Scotland. *First Break* 20, Oct. 2002.

Skilbrei, J.R. 1993: Helikopter VLF-EM kartlegging av forkastninger og sprekkesoner på kartblad Andorsjøen. NGU Rapport 93.109.

Solli, A., Dehls, J. og Nordgulen, Ø. 2001: Geologiske forhold langs tre planlagte tunneler i Larvik kommune. NGU Rapport 2001.040.

Statens Vegvesen 2003: Ukeplan-/rapport, Brovoll. Statens Vegvesen, Tunnelproduksjon.

Storrø, G., Elvebakk, H. og Rønning, J.S. 2002: Tunnelprosjektet: Hydraulisk testing av borehull i fjell i Grualia, Lunner kommune. NGU rapport 2002.051. "*Miljø- og samfunnstjenlige tunneler*", Rapport nr. 20.

Westerdahl, H. 2003: Seismisk modellering. Modellering av seismiske data over løsmassefylte depresjoner, svakhetssoner og ved kabelheng. NGU Rapport 2001042-3. "*Miljø- og samfunnstjenlige tunneler*", Rapport nr. 32.

**Vedlegg 1: Miljø – og samfunnstjenlige tunneler" – Oversikt over aktuelle geofysiske metoder.  
Tabell utarbeidet som en del av "Forprosjektet" i 1999**

**Potensiale (Pot.)** angir hvilket informasjonsgehalt metoden har grupperes som *meget stort (4)*, *stort (3)*, *middels (2)* og *lite (1)*. **Om metode benyttes i dag (Ben.)** grupperes som *mye (4)*, *noe (3)*, *lite (2)* og *ikke (1)*. **Tema** angir om metoden er egnet for lokalisering av svakhetssoner (*Lok*) og om den er egnet for karakterisering av svakhetssoner/fjellkvalitet (*Kar*). **Kolonnen utviklingsområde** angir hva geofysikkgruppen anser som mest interessante område for forsknings-/utviklingsinnsats. *"HK"* angir helikoptergeofysikk, *"Marin"* målt fra båt, *"Bakke"* angir bakkemåling mens *"BH"* refererer til målinger i eller mellom borehull.

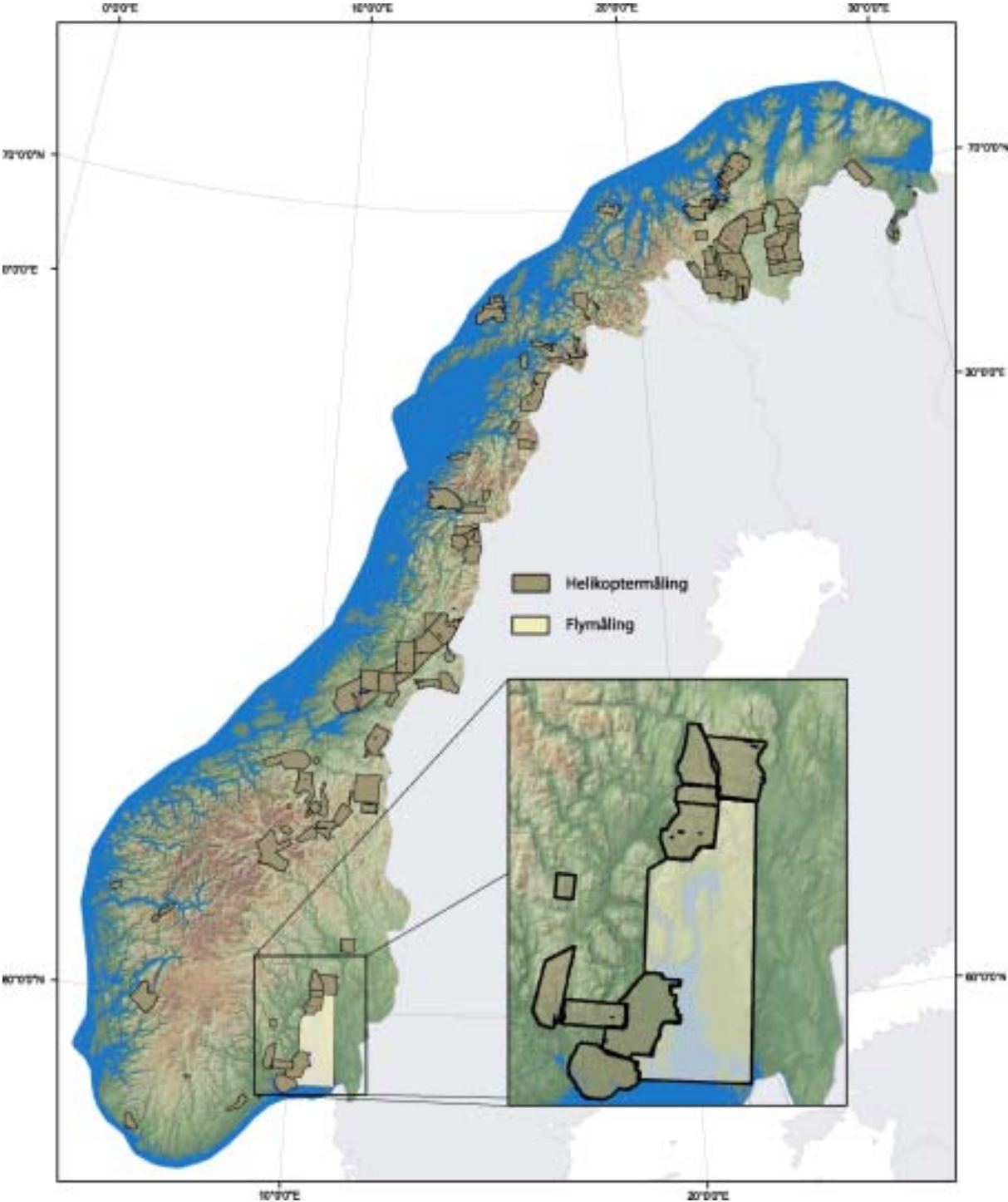
Tilgjengelige metoder	Pot.	Ben.	Pot./Ben.	Tema	Utviklingsområde	Kommentar
HK Magnetometri	3	2	1,5	Lok, Kar	Tolkningskompetanse 2D, 3D modellering	Ressurskrevende, flatedekkende, reduert oppløsning
HK Elektromagnetisk inkl. VLF	3	2	1,5	Lok, Kar	Tolkningskompetanse 2 D, 3D Modellering	Ressurskrevende, flatedekkende, reduert oppløsning
HK Radiometri	1	1	1,0			Mindre aktuell
Marin Refraksjonsseismikk	3	4	<1	Lok, Kar	Anisotropi, tolkning	Ressurskrevende, lite detaljer
Marin Refleksjonsseismikk	3	4	<1	Lok	Prosessering,	Ressurskrevende, detaljert
Marin Magnetometri	2	2	1,0	Lok	Tolkningskompetanse	Ressurskrevende, lite detaljert
Marin Elektrisk resistivitet RP	2	2	1,0	Lok, Kar	Forbedre teknikk	Middels ressurser, vanskelig ved saltvann
Marin multistråle batymetri	2	2	1,0	Lok	Påvise aktive forkastninger	Ressurskrevende, detaljert,
Marin sidesøkende sonar	1	1	1,0	Lok		Ressurskrevende, detaljert
Marin gravimetri	1	1	1,0			Lite følsom, uaktuell

Bakke Refraksjonsseismikk	3	4	<1	Lok, Kar	Anisotropi, S-bølger, dempning, bedre tolkning	Ressurskrevende, lite detaljer
Bakke Refleksjonsseismikk	2	1	2,0	Lok		Ressurskrevende, detaljert Begrenset anvendelse
Bakke Elektrisk, Resistivitet RP	4	2	2,0	Lok, Kar	Modellering, Inversjon, Tolkning	Kombinert profilering – sondering (Tomografi), Ressurskrevende
Bakke Elektrisk, Indusert polarisasjon IP	2	2	1,0	Kar	Påvise leirfyllinger	Kombinert profilering – sondering (Tomografi), Ressurskrevende
Bakke Elektrisk, Selv potensial SP	1	1	1,0	Lok, Kar	Teste metode	Kombinert med salt tracer.
Bakke Elektromagnetisk TEM	2	1	2,0	Lok, Kar	Modellering, Inversjon	Ressurskrevende, tidsmålinger
Bakke Elektromagnetisk CSAMT, RMT	2	1	2,0	Lok, Kar	Modellering, Inversjon	Ressurskrevende, frekvensmålinger
Bakke Georadar (GPR)	2	2	1,0	Lok	3D Visualisering Modellering	Rask metode, detaljert, begrenset penetrasjon
Bakke Elektromagnetisk VLF	3	3	1,0	Lok	Stabil energisering	Rask metode, problem med sendere
Bakke Magnetometri	2	2	1,0	Lok	Tolkningskompetanse	Rask metode, begrenset anvendelse
Bakke Gravimetri (mikro)	2	2	1,0	Lok		Hulrom i fjell, dyp til fjell
Bakke Radiometri	1	1	1,0			Uaktuell
Bakke Magnetisk Resonans-Sondering MRS	2	1	2,0	Lok, Kar	Påvise (fritt?) vann	Ny metode, lovende resultater internasjonalt

BH Log. Akustisk, Sonisk log/VSP	3	1	3,0	Lok, Kar	Anisotropi	Jfr. refraksjonsseismikk bakke
BH Log. Elektrisk, Resistivitet RP	3	2	1,5	Lok, Kar	Automatisering	Litologi, Sprekkefrekvens
BH Log. Elektrisk, Indusert polarisasjon IP	1	1	1,0	Kar	Vurdere metode	Påvising av leire
BH Log. Elektrisk, Selvpotensial SP	1	1	1,0	Lok		Påvise porøse bergarter
BH Log. Elektromagnetisk (Induction probe)	3	1	3,0	Lok, Kar	Ta i bruk metode	Litologi, Sprekkefrekvens
BH Log. Caliper, "Borehullsdiаметer"	3	1	3,0	Lok	Ta i bruk metode	Enkel metode, Sprekkefrekvens
BH Log. Tetthetslogg (gamma-gamma)	2	1	2,0	Lok, Kar	Ta i bruk metode	Litologi
BH Log. Porøsitet (Nøytronlogg)	2	1	2,0	Lok, Kar	Ta i bruk metode	Litologi
BH Log. Naturlig gamma-spectrometri	2	1	2,0	Kar	Ta i bruk metode	Litologi, leirmineraler i sprekker
BH Log. Strømningsmåling (Flow-meter)	2	1	2,0	Lok	Ta i bruk metode	Vannstrømning i sprekker
BH Tomografi, Akustisk	4	3	1,3	Lok, Kar	Prosessering, diffraksjon P- og S-bølger, depning	Ressurskrevende, Påvise svakhets-soner
BH Tomografi, Elektrisk	4	2	2,0	Lok, Kar	Kartlegge vannstrømning i sprekker	Ressurskrevende, saltvann som tracer
BH Tomografi, Georadar	3	2	1,5	Lok, Kar	Kartlegge vannstrømn. i sprekker	Ressurskrevende, saltvann som tracer
BH Inspeksjon, Videokamera CCTV	3	2	1,5	Lok, Kar		Rask metode, Ingen analyse
BH Inspeksjon, Optisk televiewer OPTV Borehole Image Processing BIP	4	1	4,0	Lok, Kar	Ta i bruk metode	Ressurskrevende, angir sprekkfrekvens, -strøk. –fall og –åpning. Krever klar sikt.
BH Inspeksjon, Akustisk televiewer (BHTV)	4	1	4,0	Lok, Kar	Ta i bruk metode	Ressurskrevende, angir sprekkfrekvens, -strøk. –fall og –åpning. Krever vannfylt hull
BH Inspeksjon, Elektrisk Formation Microscanner, (FEM)	4	1	4,0	Lok, Kar	Ta i bruk metode	Ressurskrevende, angir sprekkfrekvens, -strøk. –fall og –åpning. Krever vannfylt hull



**Vedlegg 2: Oversikt over høyoppløselig fly – og helikoptergeofysikk i Norge.**



Vedlegg 3: Oversikt over lineamenter tolket fra satellittdata (Gabrielsen m. fl. 2002).

