



Statens vegvesen

Resistivitetmålinger og retolkning av seismikk langs E6 og Dovrebanen ved Mjøsa

RAPPORT

Teknologiavdelingen

Nr. 2622

Tunnel- og betongseksjonen
Dato: 2010-12-15



Statens vegvesen

TEKNOLOGIRAPPORT nr. 2622

Tittel

Resistivitetmålinger og retolkning av seismikk langs E6 og Dovrebanen ved Mjøsa

Vegdirektoratet
Teknologiavdelingen

Postadr.: Postboks 8142 Dep
0033 Oslo

Telefon: (+47 915) 02030

www.vegvesen.no

Utarbeidet av

J.S. Rønning, E. Dalsegg, B.H. Heincke, J.F. Tønnesen og R. Wisen, NGU

Dato:

2010-12-15

Saksbehandler

Mona Lindstrøm

Prosjektnr:

600550

Kontrollert av

Alf Kveen

Antall sider og vedlegg:

45 s. / 2

Sammendrag

Vegdirektoratet (ved Tunnel- og betongseksjonen) og Norges geologiske undersøkelse (NGU) har i perioden 2009 - 2011 et samarbeidsprosjekt med temaet forundersøkelser. Et mål er å finne metoder for forundersøkelser som gir mer informasjon og bidrar til større forutsigbarhet ved planlegging og bygging av tunneler. Denne rapporten inngår i en rapportserie utarbeidet i prosjektet.

Tolkning av refraksjonsseismiske data fra forundersøkelsene langs Mjøsa viste til dels store sprik i resultatene. Data fra tre profiler er retolket med ulike teknikker: Hagedoorns +/- metode, GRM-metoden og Tomografisk inversjon. I tillegg har NGU utført resistivitetmålinger langs de samme profilene.

Rapporten er utarbeidet av Norges geologiske undersøkelse (NGU-rapport 2009.064).

Summary

Emneord:

Tunnel, forundersøkelser

NGU Rapport 2009.064

Resistivitetsmålinger og retolking av seismikk
langs E6 og Dovrebanen ved Mjøsa.

Rapport nr.: 2009.064		ISSN 0800-3416	Gradering: Åpen
Tittel: Resistivitetmålinger og retolking av seismikk langs E6 og Dovrebanen ved Mjøsa.			
Forfatter: J.S. Rønning, E. Dalsegg, B.H. Heincke, J.F.Tønnesen og R. Wisen		Oppdragsgiver: Statens Vegvesen Vegdirektoratet, Jernbaneverket og NGU	
Fylke: Akershus - Hedmark		Kommune: Eidsvoll	
Kartblad (M=1:250.000) Hamar		Kartbladnr. og -navn (M=1:50.000) 1915 I Eidsvoll - 1916 II Tangen	
Forekomstens navn og koordinater: Ørbekk 32V 623390 6700545 Korslund 32V 623310 6702030 Morskogen 32V 622850 6709520		Sidetall: 50 Kartbilag: 1	Pris: Kr 260,-
Feltarbeid utført: Mai 2008 og juli 2009	Rapportdato: 12.12.2009	Prosjektnr.: 329500	Ansvarlig: <i>Euri V. Ganerød</i>
Sammendrag: Tolkning av refraksjonsseismiske data samlet inn som en del av forundersøkelsene for samarbeidsprosjekt mellom Statens Vegvesen og Jernbaneverket langs Mjøsa, viste til dels store sprik i resultatene. NGU har, som et ledd i prosjektet Forbedrede Forundersøkelser for Tunneler, retolket data fra tre profiler med to andre teknikker. Metodene som er sammenlignet i denne rapporten er Hagedoorns +/- metode (tradisjonell metode), GRM- metoden (automatisk tolkning) og Tomografisk Inversjon. I tillegg har NGU utført resistivitetmålinger langs de samme profilene. En sammenligning av seismiske tolkninger viser at det er relativt godt samsvar i tolkning av løsmassemekthet og seismiske hastigheter i løsmasser og massivt fjell utført manuelt med Hagedoorn's +/-metode og automatiske tolkninger med GRM-metoden. Det er imidlertid noe avvik ved bestemmelse av fjellhastighet knyttet til svakhetssoner i fjell. Tomografisk inversjon av de samme data viser også godt samsvar innbyrdes, men det er stort sprik i tolkningene når en sammenligner med resultatene fra de andre to metodene (Hagedoorn's +/-metode og GRM-metoden). Avviket kan delvis forklares med forskjellig modellvalg. Ved tomografisk inversjon deles bakken opp i celler og hastigheten i disse beregnes fritt, mens de to andre metodene bygger på lagdelte modeller. På grunn av dette kan tomografisk inversjon gi større detaljrikdom. En svakhet med den tomografiske inversjonen er at skarpe hastighetskontraster har en tendens til å komme ut som gradvise overganger, noe som gjør det vanskelig å påvise f.eks. overgangen fra løsmasser til fjell. Tolkning av seismisk hastighet i svakhetssoner i fjell viser til dels store sprik mellom de forskjellige tolkningsmetodene inklusive Hagedoorn's +/- og GRM-metoden. Dette viser at det er meget viktig å vite hvilken metode som er benyttet dersom seismisk hastighet skal benyttes for tolkning av fjellkvalitet. Resistivitetmålinger viser at metoden er mer følsom når det gjelder påvisning av mulige svakhetssoner. Innenfor samme strekninger har resistivitetmålingene indikert i alt 21 sikre og usikre svakhetssoner, mens tilsvarende for seismikken med alle tolkningsmetoder er 12 svakhetssoner. Dersom en begrenser den seismiske tolkningen til den tradisjonelle Hagedoorn's +/-metode, kommer det fram bare fire svakhetssoner, noe som viser at mer moderne tolkningsteknikker kan være mer følsomme. Det må imidlertid bemerkes at mange av de indikerte sonene ved resistivitetmålingen fremstår som grunne, relativt tynne soner der resistiviteten ikke er spesielt lav. Disse behøver ikke nødvendigvis gi store problemer ved en fremtidig tunneldriving. Resistivitetmetoden har større mulighet til å påvise soners dyptgående og fall. Denne undersøkelsen viser at tomografisk inversjon kan være mer følsom enn tradisjonelle seismiske tolkningsmetoder. Arbeide med uttesting av disse tolkingsteknikkene bør derfor videreføres.			
Emneord: Sprekkesoner i fjell	Geofysikk	Seismikk	
Resistivitet	Retolking		
		Fagrapport	

Innhold

1. INNLEDNING	7
2. METODEBESKRIVELSE.....	7
2.1 Refraksjonsseismiske målinger	8
2.2 Resistivitets- og IP-målinger	8
3. RESULTATER	10
3.1 Ørbekk	10
3.1.1 Tidligere seismiske tolkninger	11
3.1.2 Retolking seismisk tomografi.....	12
3.1.3 Tradisjonelle refraksjonsseismiske tolkninger	13
3.1.4 Nye resistivitetsmålinger.....	14
3.2 Korslund	16
3.2.1 Tidligere seismiske tolkninger	17
3.2.2 Retolking seismisk tomografi.....	18
3.2.3 Tradisjonelle refraksjonsseismiske tolkninger	19
3.2.4 Nye resistivitetsmålinger.....	20
3.3 Morskogen.....	22
3.3.1 Tidligere seismiske tolkninger	23
3.3.2 Retolking seismisk tomografi.....	24
3.3.3 Tradisjonelle refraksjonsseismiske tolkninger	25
3.3.4 Nye resistivitetsmålinger.....	26
4. DISKUSJON	27
4.1 Sammenstilling seismiske data.....	27
4.1.1 Seismiske tolkninger ved Ørbekk	27
4.1.2 Seismiske tolkninger ved Korslund.....	30
4.1.3 Seismiske tolkninger ved Morskogen	32
4.2 Sammenstilling seismikk- og resistivitetsdata.....	34
4.2.1 Sammenstilling av svakhetssoner Ørbekk.....	34
4.2.2 Sammenstilling av svakhetssoner Korslund.....	37
4.2.3 Sammenstilling av svakhetssoner Morskogen	40
4.3 Vurdering av metodene	42
5. KONKLUSJONER	43
6. REFERANSER	44

DATABILAG:

Databilag 1: UTM-koordinater for de målte resistivitetsprofil.....	46
--	----

KARTBILAG.

Kartbilag 2010.064-01: Oversiktskart Ørbekk, Korslund og Morskogen.....	47
---	----

1. INNLEDNING

Som et ledd i forundersøkelser knyttet til oppgradering av veg (E6) og jernbane langs strekningen Eidsvoll-Kleiverud ved Mjøsa, er det utført refraksjonsseismiske målinger (Wisén 2008). Under tolkingene av disse data ble det benyttet to automatiske tolknings-teknikker som hittil er lite brukt i Norge. Den ene metoden er kalt "General Reciprocal Method" (GRM), og denne benytter en tolagsmodell der en kan beregne hastighetene i løsmasser og fjell i tillegg til tykkelsen av løsmassene (Reynold 1997). Den andre tolkingsmetoden var tomografisk inversjon hvor programmet "RayFract" ble benyttet (Intelligent Resources 2009). Ved denne metoden bygges opp en modell der bakken deles opp i celler som alle tilordnes en valgt seismisk hastighet. Denne hastigheten endres gjennom flere beregninger (iterasjoner) inntil alle gangtider fra skudd til geofoner fra denne modellen blir mest mulig lik de tilsvarende målte data. Tolkingen produserer en 2D modell over hastighetsfordelingen langs profilet.

En kritisk vurdering av resultatene fra de to tolkingsmetodene viste stedvis store uoverensstemmelser mellom metodene, og i enkelte tilfeller ved den tomografiske inversjonen syntes tolkingen å gi tvilsomme resultater når det gjelder lokalisering og fall til svakhetssoner. Som et ledd i NGUs arbeid med å forbedre forundersøkelsene for tunneler, er det foretatt en retolking av disse refraksjonsseismiske data langs tre utvalgte profiler. Det er foretatt en ny tomografisk inversjon av data med et program utviklet av tidligere NGU-medarbeider Bjørn Heincke (Heincke et al. 2006), og i tillegg er data tolket på tradisjonell måte med Hagedoorns +/- metode (Reynolds 1997).

Tidligere undersøkelser har vist at elektriske resistivitetsmålinger kan gi supplerende informasjon, spesielt om sprekkesoners forløp mot dypet men også om det er leire på sprekkeleiene (Rønning 2003, Ganerød et al. 2006, Rønning m.fl. 2007, Reiser et al. 2009, Rønning et al. 2009, Rønning m.fl. 2009). De tre valgte profilene for retolking ble derfor supplert med resistivitetsmålinger.

Ved den refraksjonsseismiske undersøkelsen ble det totalt målt 19 profiler (Wisén 2008). NGU har valgt ut tre av disse for videre oppfølging, Ørbekk, Korslund og Morskogen. Ved Ørbekk viste de opprinnelige tolkingene et godt samsvar mellom den tomografiske inversjonen og GRM-tolkingene, og det ble indikert en svakhetszone som falt sammen med en depresjon i terrenget. Tolkingen av data fra Korslund viste stedvis dårlig samsvar mellom de to metodene med hensyn på påvisning av svakhetssoner og spesielt store avvik i tolkingen av løsmassemektigheten. Ved Morskogen ble det indikert fire klare svakhetssoner med fall i forskjellige retninger ved den tomografiske inversjonen, og disse hadde en tvilsom lokalisering ved at de så ut til å ha utgående på fjellknauser. Tilsvarende informasjon kom ikke frem ved GRM-tolkingene.

2. METODEBESKRIVELSE

I det følgende blir utførelsen av de refraksjonsseismiske målingene og resistivitetsmålingene beskrevet. En mer utfyllende beskrivelse finnes på <http://www.ngu.no/no/hm/Norges-geologi/Geofysikk/Bakkegeofysikk/>.

2.1 Refraksjonsseismiske målinger

De refraksjonsseismiske målingene er utført av Rambøll i København (Wisén 2008). Det ble benyttet en 300 meter lang geofonkabel med innbyrdes geofonavstand 5 meter. Geofonene ble gravd ned i løsmasser eller plassert på plater direkte på fjell. Som energikilde ble det hovedsakelig benyttet dynamitt (50 – 250 g), men i enkelte punkter der kabler gjorde det umulig med dynamitt, ble en hammer benyttet som energikilde. Langs geofonrekken ble det skutt for hver 25 meter, og i tillegg ett skudd i hver ende av profilet. Det ble foretatt kvalitetsvurderinger kontinuerlig, og dårlige skudd ble repetert.

Første ankomster av p-bølge ble plukket automatisk, men korrigert etter manuell kontroll. Datasettet ble opprinnelig tolket som tolagsmodell ved bruk av programet IxRefrax (Interpex 2009) etter metoden kalt "General Reciprocal Method" (GRM, Reynolds 1997). Tomografisk inversjon av det samme datasettet ble utført med programmet RayFract (Intelligent Resources Inc. 2009).

2.2 Resistivitets- og IP-målinger

Datainnsamling.

Måledata ble samlet inn med et kabelsystem utviklet ved den Tekniske Høgskolen i Lund (LUND-systemet, Dahlin 1993). Systemet består av fire multielektrodekabler og en relé-boks (Electrode Selector ES 10-64). Måleprosessen styres av et ABEM Terrameter SAS 4000 (ABEM 1999).

Strøm ble sendt i pulser på ca. 1 sekund med alternerende polaritet. Dette gir en målesyklus på 3.8 sekund. Målingene av resistiviteten starter 0,3 sekund etter påslått strøm og måletiden er 0,5 sekund. Indusert Polarisasjon (IP) ble målt 10 millisekund etter strømbrudd og i et tidsvindu på 100 millisekund.

Ved de undersøkelser som her rapporteres, ble det benyttet gradient elektrodekonfigurasjon og elektrodeavstand 5 meter. Med fire kabler gir dette utlegg på 400 meter, og den maksimale dybderekkevidden blir da ca. 60 meter. På de ytterste kablene benyttes bare annenhver elektrode. Oppløsningen blir derved størst sentralt i profilet, og i den øverste halvdel. Profilenes beliggenhet er innmålt med GPS (se databilag 1).

Strømstyrke og datakvalitet.

Strømstyrken varierte stort sett fra 20 til 100 mA, med overvekt av målinger i området 50 til 100 mA. Datakvaliteten var god, og kun et fåtall måledata måtte fjernes før inversjon.

Inversjon.

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

Resistivitetsmålinger ble invertert ved bruk av dataprogrammet RES2DINV (Loke 2007). Det ble gjort forsøk med forskjellige inversjonsparametre, dempningsfaktorer og forskjellige filtre. Dette ga ikke noen endringer i hovedtrekkene i de inverterte profilene, men mindre avvik i detaljer.

Tolking.

Ved tolking av resistivitetsdata benyttes en modell som er etablert på grunnlag av tilsvarende målinger ved Lunnertunnelen (Rønning et al. 2009). Ut fra denne modellen kan svakhetssoner påvises, geometriske parametre som bredde, fall og dyptgående tolkes, og en kan i tillegg si om svakhetssonene har leire på sprekkene eller om dette er rene oppsprekninger med vannproblemer. Under denne tolkingen klassifiseres sonene etter kriteriene vist i tabell 1. Soner med stor dybderekkevidde og bredde antas å være mer utpreget i tunnelnivå, og jo lavere resistiviteten i sonen er jo større er sannsynligheten for at det er leire på sprekkene i sonen. NGU tar forbehold om at modellen er under uttesting, og det er usikkert om det siste punktet kan overføres til andre geologiske miljø.

Inndelingen av modellen tar utgangspunkt i at resistivitetsverdier >3000 ohmm gjenspeiler massivt fjell med god kvalitet men at det kan indikeres soner her, resistivitetsverdier 3000-1000 ohmm viser svakhetszone som er vannførende og kan gi lekkasje i tunnelen, resistivitetsverdier 1000-500 ohmm trolig er svakhetssoner med både vann og leire, mens resistivitetsverdier <500 ohmm gjenspeiler leirfylt sone eller leire på som skaper ustabilitet.

A - Dybde på sone	B - Bredde på sone	C - Resistivitet på sone	Klasse
0-20 m	0-10 m	$> 3000 \Omega\text{m}$	1
20-40 m	10-20 m	3000-1000 Ωm	2
40-60 m	20-40 m	1000-500 Ωm	3
> 60 m	> 40 m	$< 500 \Omega\text{m}$	4

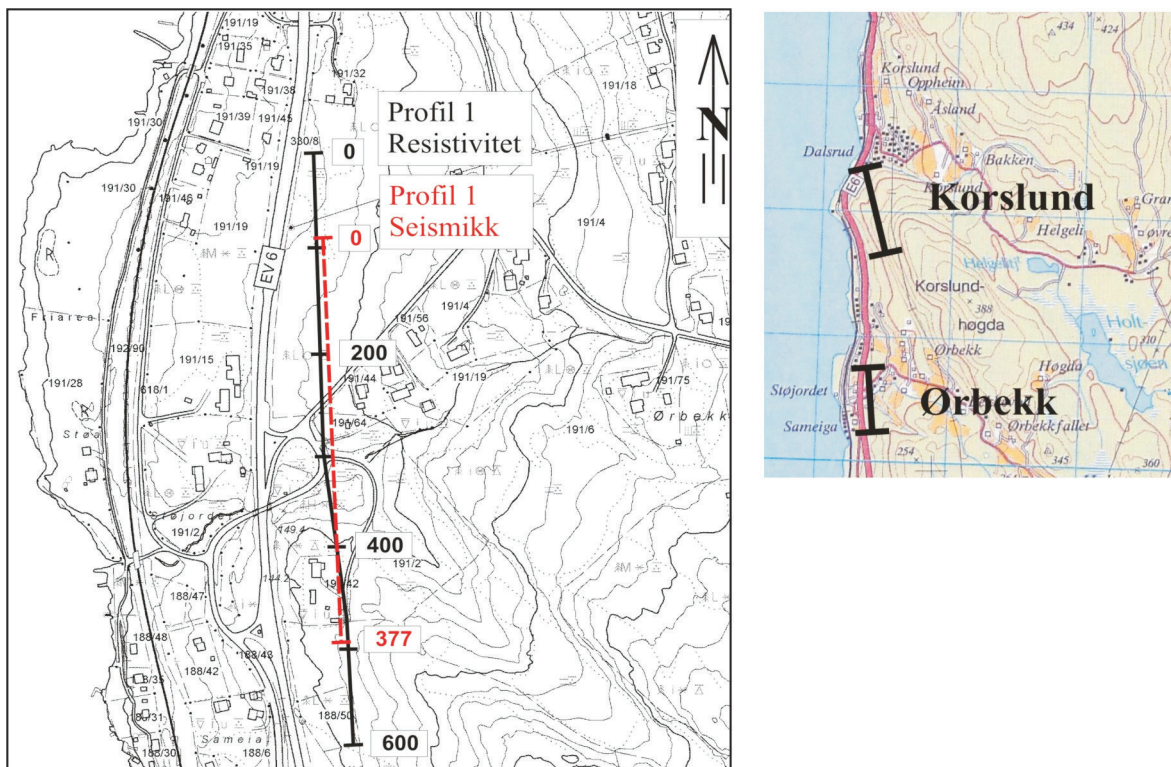
Tabell 1. Klassifisering av soner. Sonene som er indikert ved hjelp av 2D resistivitet er klassifisert i klasse 1-4 ut i fra dybde (A), bredde (B) og resistivitet (C) i sonen.

3. RESULTATER

I det følgende blir resultater fra tidligere seismiske tolkinger, retolkning av seismikken og nye resistivitetsmålinger for de tre valgte områdene Ørbekk, Korslund og Morskogen presentert. Profilenes beliggenhet fremgår av kartbilag bakerst i rapporten. Alle geografiske koordinater er gitt med Geodetisk datum WGS 1984 og posisjon UTM sone 32N.

3.1 Ørbekk

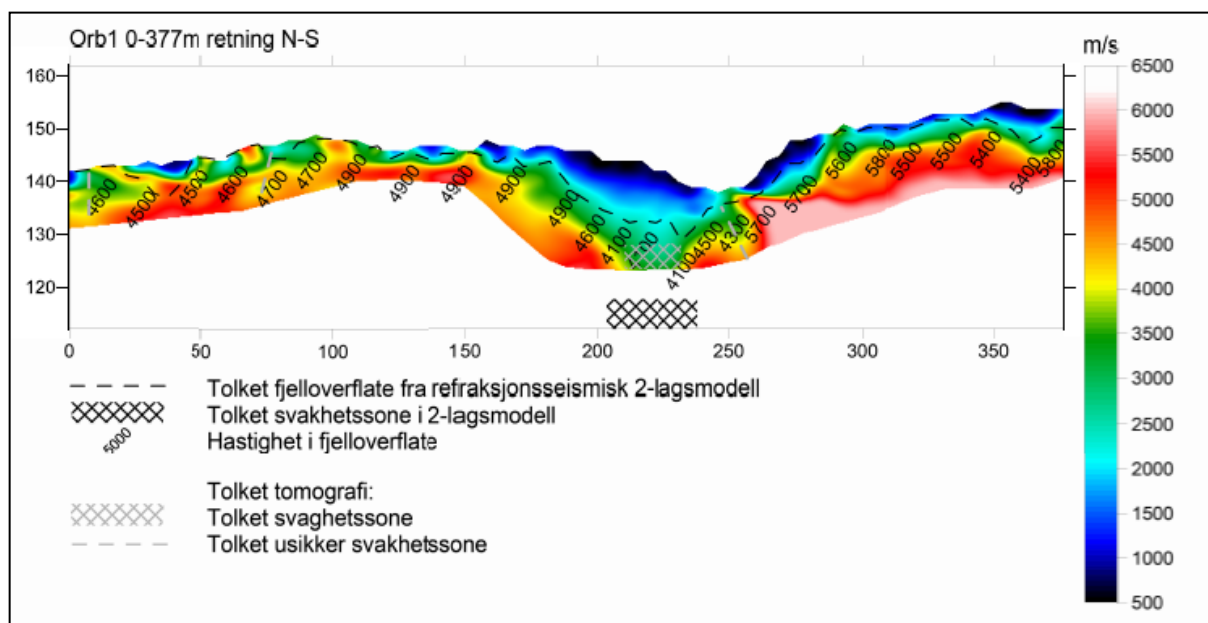
Ved Ørbekk var det tidligere målt et 377 meter (horisontal lengde) langt refraksjonsseismisk profil (Figur 1). Parallelt med dette, og så nært opptil som mulig, har NGU målt et 600 meter langt resistivetsprofil (lengde langs bakken). Seismikkprofilen starter ved posisjon 95 på resistivetsprofilen, og slutter tilsvarende ved posisjon 495. Profilet ble valgt som en referanse hvor det var godt samsvar mellom de to anvendte tolkingsmetodene for seismikk, og hvor tolkingene så fornuftige ut.



Figur 1: Lokalisering av refraksjonsseismisk profil og resistivetsprofil ved Ørbekk. Profilet med refraksjonsseismikk er markert med rød, stiplet linje (377 m), mens resistivetsprofilen er markert med svart linje (600 m).

3.1.1 Tidligere seismiske tolkninger

Opprinnelig tolking av det refraksjonsseismiske profilet ved Ørbekk er vist i figur 2.



Figur 2: Opprinnelig tolking av refraksjonsseismisk profil ved Ørbekk (Wisén 2008). Overgangen fra løsmasser til fjell, hastighet i fjell og svakhetssoner fra GRM-metoden er fremstilt med stiplet linje, svartetall og svart skravur. Hastigheter fra tomografisk inversjon er angitt med fargekode og svakhetssoner er angitt med grå skravur.

Påvisning av svakhetssoner.

Figur 2 viser resultatet fra tolkingen av to seismiske tolkningsmetoder; GRM-tolkingen og tomografi tolkingen for profilet ved Ørbekk. GRM-tolkingen antyder en ca. 35 meter bred svakhetszone med P-bølge hastighet ca. 4000 m/s fra ca. koordinat 205 til ca. koordinat 240 (angitt med svarte tall og svart skravur i figur 2). Den tomografiske inversjonen indikerer en noe smalere sone (ca. 25 m) hvor hastigheten er nede i ca. 3500 m/s (grønn farge i figur 2). Ut fra tomografien indikeres også usikre svakhetssoner ved koordinatene 10, 75 og 250. Lokaliseringen av den sikre svakhetssonen er sammenfallende ved de to metodene, men det er noe avvik i detaljer både med hensyn på bredde og seismisk hastighet.

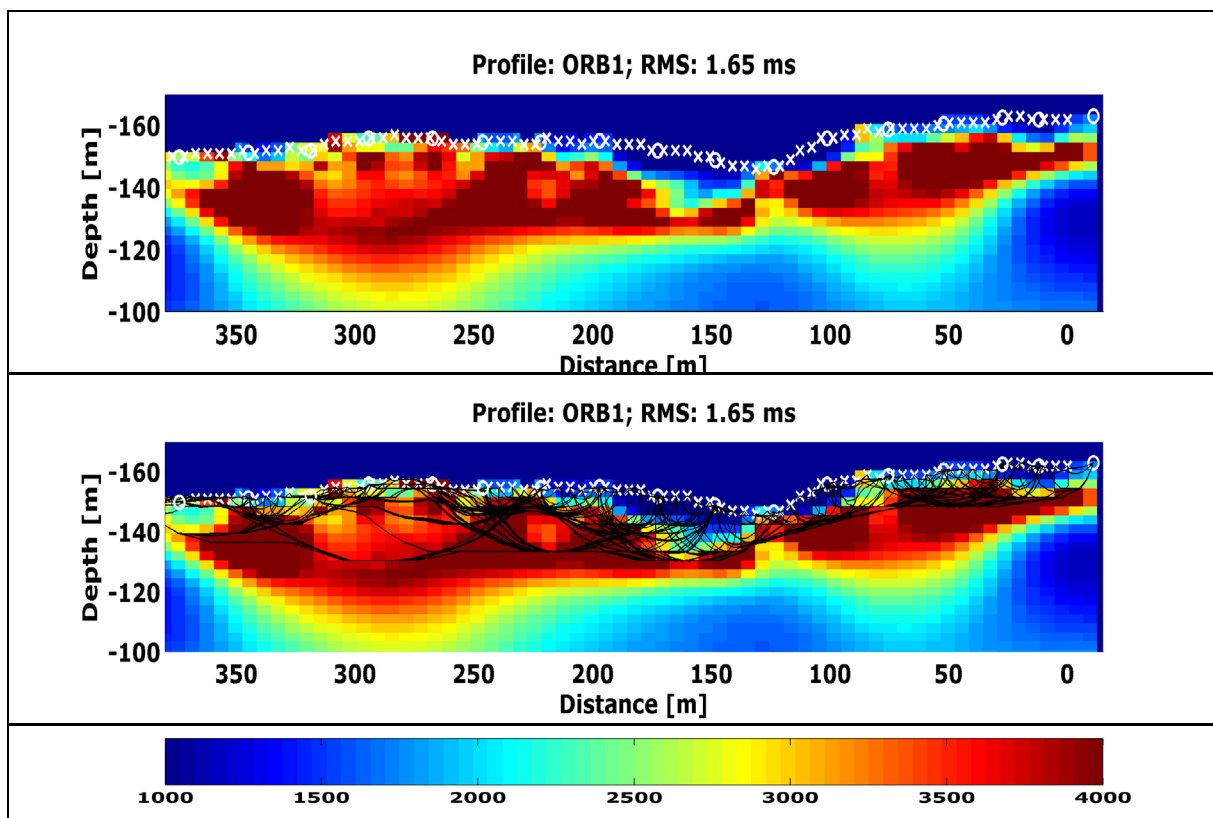
Hastighetsanalyser.

GRM-metoden viser overgangen mellom løsmasser og fjell med sort stiplet linje. Hastigheten i løsmassene fra GRM-tolkingen er ikke angitt i figur 2, men disse stemmer meget bra med verdiene fra den tomografiske inversjonen (Wisén 2008). Det kan sies at det er godt samsvar mellom det som tolkes som løsmasser med GRM-metoden og hastigheter fra 500 til 2000 m/s i løsmassene fra tomografiberegningene. Dette kan være løse og tørre grusige masser (500 m/s) over tett morene (2000 m/s). Når vi beveger oss ned i fjell, er det imidlertid store avvik. GRM-metoden viser fjellhastigheter fra ca. 4000 m/s i svakhetssonen til opp mot 5800 m/s ved ca. koordinat 250. Stedvis kan en ved den tomografiske inversjonen se hastigheter ned mot 3000 m/s og delvis 2500 m/s i det som GRM-metoden angir som fjell med hastighet fra 4500 til 5700 m/s. Årsaken til dette kan være flere. Modellberegning med forskjellige

program for tomografisk inversjon inklusive "Ray-Fract", har vist at modeller med en klar kontrast i seismisk hastighet fremstilles som en gradvis overgang ved tomografisk inversjon (Sheehan 2005), og dette anses som den mest sannsynlige årsak til avviket. En eller begge metodene kan gi et feil bilde av hastighetene. "Blindsone-problematikk" (Reynolds 1997) er også vurdert som årsak, men dette vil slå ut likt ved de to tolkingsmetodene.

3.1.2 Retolking seismisk tomografi

Tomografisk inversjon av det refraksjonsseismiske profilet ved Ørbekk med Heincke's program (Heincke 2006) er vist i figur 3. Ved denne inversjonen er det benyttet en cellestørrelse på 3 m x 6 m (vertikalt x horisontalt).



Figur 3: Ny tomografisk inversjon av profilet ved Ørbekk. Øverst vises hastighetsprofil og nederst hastighetsprofil med strålebaner. Skuddpunkt er angitt med hvite sirkler og geofoner med hvite kryss. Merk at koordinatene er snudd i forhold til profilet vist i figur 2.

Ved denne tomografiske inversjonen er det benyttet en fargeskala fra 1000 til 4000 m/s. Dette betyr at en ikke kan nyansere hastighetene over 4000 m/s, men klare svakhetssoner kan påvises. Det kan være vanskelig å angi hvilken hastighet en finner i de enkelte soner da dette må gjøres med fargegjenkjenning. Metoden angir hvordan strålebanene går, og under nederste strålebane er det ikke grunnlag for å si noe som helst om hastighetene. Hastigheten i celler med få strålebaner og i celler hvor disse går i bare en retning er også usikker.

Det ser ut til å ligge en svakhetsone ved koordinat 160 (Merk at koordinatene er snudd!). Bredden tolkes til ca. 12 meter og hastigheten ligger i området 3800 m/s. Det er ikke grunnlag for å si noe om fallet. Det indikeres også en sone ved ca. koordinat 130. Denne er også ca 12 m bred og hastigheten ligger i området 3000 - 3500 m/s. Rent umiddelbart kan det

se ut som den faller mot høyre (mot sør), men opptegningen av strålebanene viser at det ikke er grunnlag for å si noe om dette. Det indikeres også en ca. 12 m bred sone med hastighet ned mot 3500 m/s ved ca. koordinat 80. Det er heller ikke her grunnlag for å si noe om fallet.

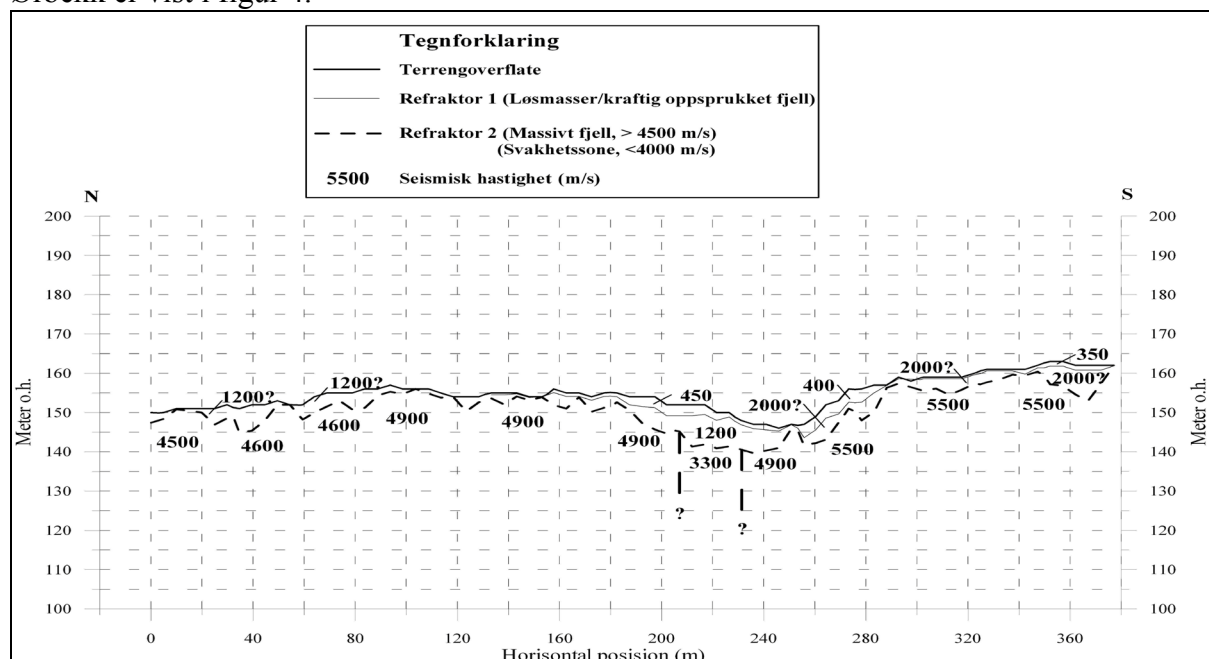
Ved koordinatene 220 og 250 - 300 opptrer celler med lav hastighet under delvis høyere hastighet. På grunn av få bestemmende strålebaner gjøres det ikke forsøk på å tolke hva dette betyr.

Ca. koordinat	Ca. hastighet (m/s)	Ca. bredde (m)	Mulig fall
160	3800	12	Steil
130	3000 – 3500	12	Mot sør ?
80	3500	12	Steil

Tabell 2: Mulige svakhetssoner ved Ørbekk tolket fra Heinckes tomografiske inversjon.

3.1.3 Tradisjonelle refraksjonsseismiske tolkinger

Tradisjonell tolking (Hagedoorns +/- -metode) av det refraksjonsseismiske profilet ved Ørbekk er vist i figur 4.



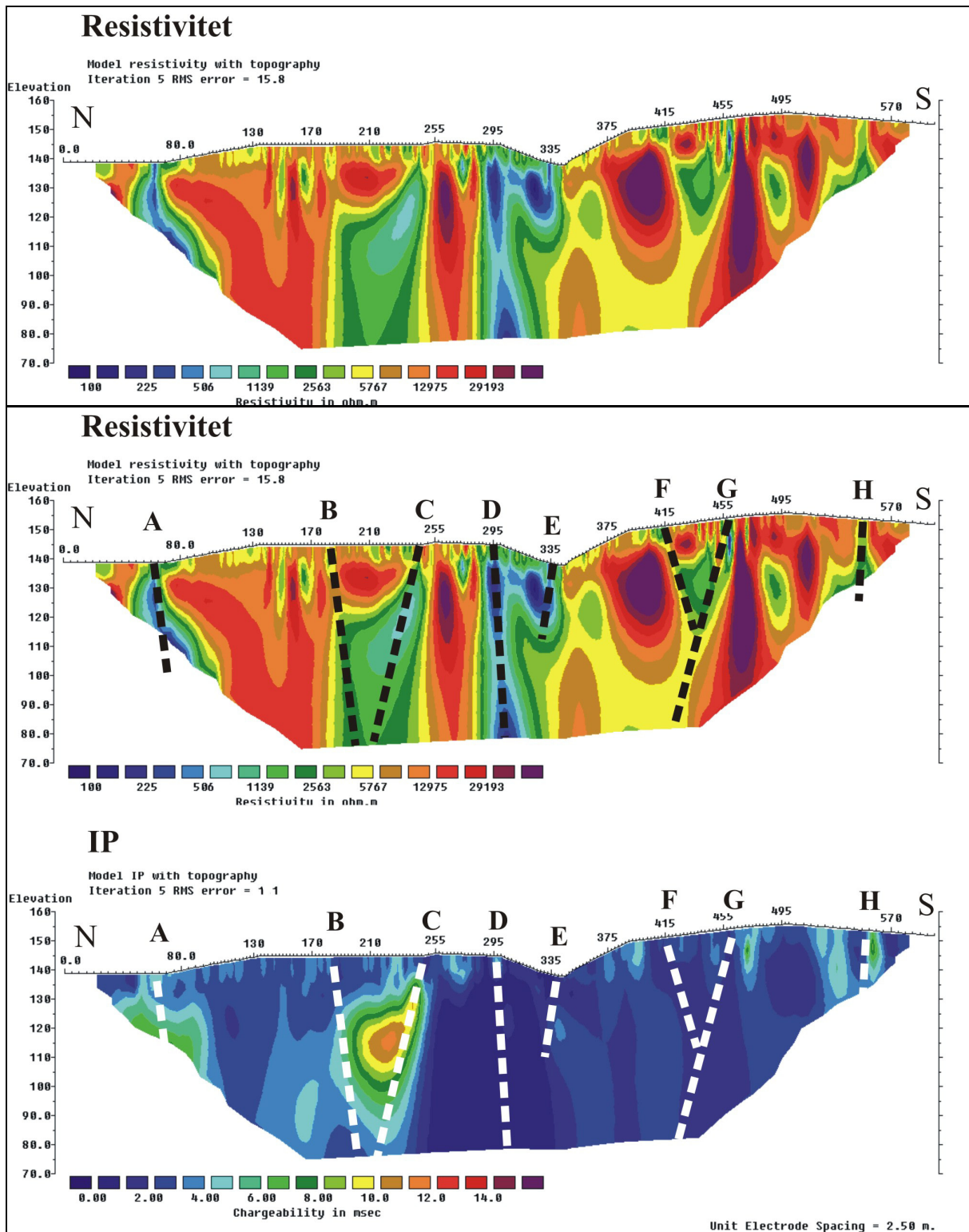
Figur 4: Tradisjonell tolking med Hagedoorns +/- metode av refraksjonsseismisk profil ved Ørbekk.

Den tradisjonelle tolkingen av dette profilet indikerer en ca. 25 m bred sone med seismisk p-bølgehastighet 3300 m/s mellom ca koordinat 208 og 232. Det er ikke grunnlag for å si noe om fallet på denne sonen. Hastigheten i fjell varierer ellers fra 4500 til 4900 m/s nord for sonen og fra 4900 til 5500 m/s sør for sonen. Ut fra dette er det ingen flere markerte svakhetssoner.

Løsmassemektheten varierer fra nær null meter til opp mot 10 meter. Øverst finnes stedvis et lag med hastighet 400 – 450 m/s, noe som kan være løse og tørre masser. Under dette finner vi også stedvis et usikkert lag med hastighet ca 2000 m/s som kan tolkes som tett morene. En usikker lagpakke med hastighet ca. 1200 m/s kan være løs og tørr morene eller delvis vannmettet sand/grus.

3.1.4 Nye resistivitetmålinger

NGUs resultater fra resistivitetmålinger og måling av Indusert Polarisasjon (IP) ved Ørbekk er vist i figur 5. Data for tolkede soner er listet tabell 3.



Figur 5: Resistivitet og induert polarisasjon langs resistivitetsprofil ved Ørbekk. Tolkede svakhetssoner er angitt med svarte og hvite stiplede linjer.

Resistivetsdata langs Ørbekk-profilen indikerer i alt 8 svakhetssoner. Sone A ligger på flanken av det målte profilet, og kan av denne grunn være noe usikker, men sonen fremstår såpass klart ved et knekkpunkt i topografien at en velger å tolke den som reell. Bredden tolkes til ca 5 m og fallet er steilt mot sør. På grunn av metodens begrensede dybderekkevidde her kan en ikke si noe om hvor dypt sonen går. Resistivetsverdien i sonen er <500 ohmm som kan indikere at dette er en "leirsoner" (Rønning et al. 2009).

Ved sone B og C er det påvist IP-effekt, og dette er en indikasjon på at elektronisk ledende mineraler (sulfider, oksider eller grafitt) kan være en årsak til redusert resistivitet. Det er derfor usikkert om dette er svakhetssoner i fjellet.

Sone D fremstår som en ca 10 m bred sone med steilt fall. Sonen ser ut til å strekke seg dypere enn metodens dybderekkevidde (ca. 60 m). Resistivetsverdien i sonen kan indikere at dette er en "leirsoner".

Sone E fremstår som en steil sone med begrenset dybderekkevidde (ca. 30 m). De seismiske målingene viste at en her finner ca. 10 m med løsmasser og øvre del av sonen er derfor forstyrret av løsmassenes resistivitet. Det er derfor vanskelig å anslå sonens bredde, og om det kan være leire på sprekke.

Sone F fremstår som en tynn sone (< 5 m) med steilt fall mot sør. Denne sonen synes å stoppe mot sone G på ca. 40 meters dyp. Resistivetskontrasten indikerer at dette kan være en ren vannfylt oppsprekning.

Sone G fremstår som en tynn sone (< 5 m) med steilt fall mot nord. Sonen synes å strekke seg mot dypet (> 60 m), og resistivetskontrasten indikerer at dette kan være en ren vannfylt oppsprekning.

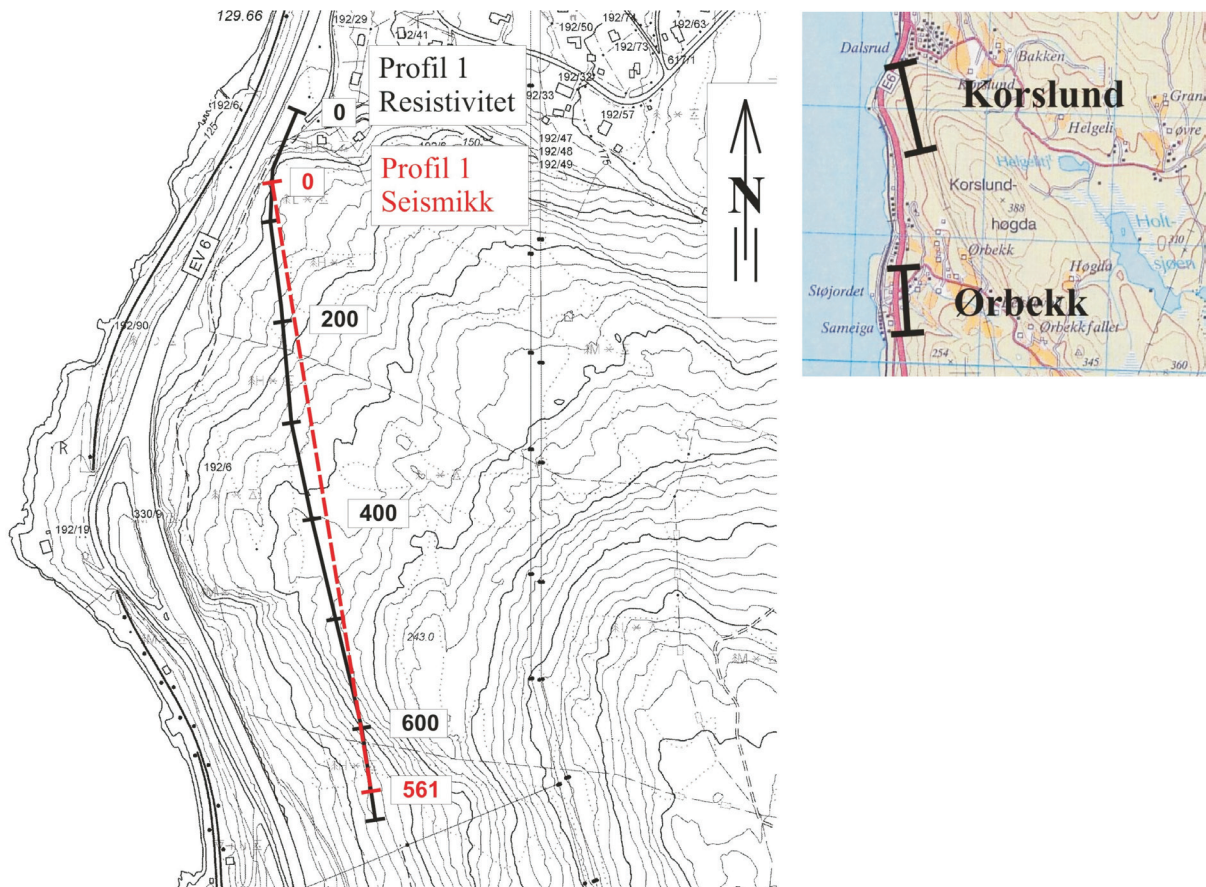
Sone H ligger på flanken av det målte profilet, men også denne sonen fremstår så klart at den synes reell. Sonen er steil, ca. 5 m bred og resistivetskontrasten indikerer at dette kan være en ren vannfylt oppsprekning uten leire på sprekke.

Posisjon	UTM- øst	UTM- nord	Sone	Fall (retning)	Leir- sone?	A dybde	B bredde	C RES	Kommen- tar
60	62340 2	6700776	A	Steil mot sør	Mulig	4?	1	4	
185	62339 8	6700750	B	Steil mot sør		4	1	2	Usikker IP-effekt
245	62338 9	6700592	C	Steil mot nord		4	1	3	Usikker IP-effekt
295	62339 3	6700549	D	Steil mot sør	Mulig	4	1	4	
335	62339 9	6700512	E	Steil mot nord	Mulig	2	1	4	Lavhast. sone
415	62341 1	6700437	F	Steil mot sør		3	1	2	
460	62341 5	6700396	G	Steil mot nord		4	1	3	
550	62342 3	6700308	H	Steil mot nord		4?	1	2	

Tabell 3: Klassifisering av svakhetssoner ved Ørbekk ut fra resistivetsdata. Se også tabell 1.

3.2 Korslund

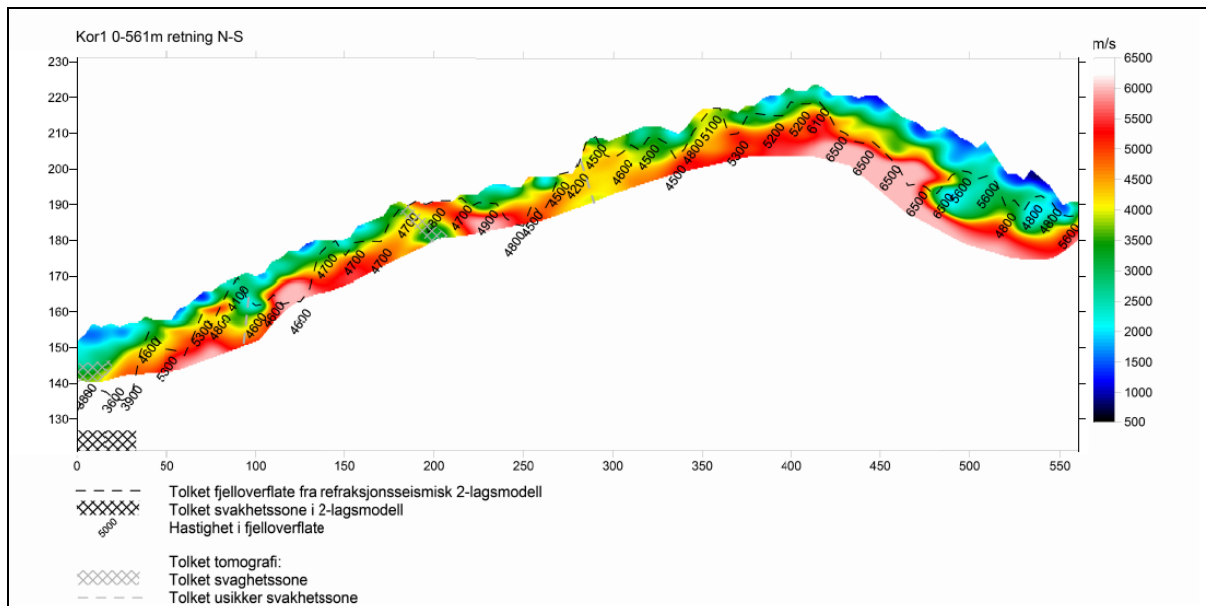
Ved Korslund var det tidligere målt et 561 meter langt refraksjonsseismisk profil. NGU målte et 700 m langt resistiviteitsprofil som går mer eller mindre langs seismikkprofilen (se figur 6). Profilet ble valgt ut på grunnlag av store sprik i hastighetsangivelser i fjell, men også uoverensstemmelser ved påvisning av svakhetssoner i fjell.



Figur 6: Lokalisering av refraksjonsseismisk profil og resistiviteitsprofil ved Korslund. Profilet med refraksjonsseismikk er markert med rød, stiplet linje (561 m), mens resistiviteitsprofilet er markert med svart linje (700 m).

3.2.1 Tidligere seismiske tolkninger

Opprinnelig tolking av det refraksjonsseismiske profilet ved Korslund er vist i figur 7.



Figur 7: Opprinnelige tolking av refraksjonsseismisk profil ved Korslund (Wisén 2008). Overgangen fra løsmasser til fjell, hastighet i fjell og svakhetssoner fra GRM-metoden er fremstilt med stiplede linje, svartetall og svart skraver. Hastigheter fra tomografisk inversjon er angitt med fargekode og svakhetssoner er angitt med grå skraver.

Påvisning av svakhetssoner.

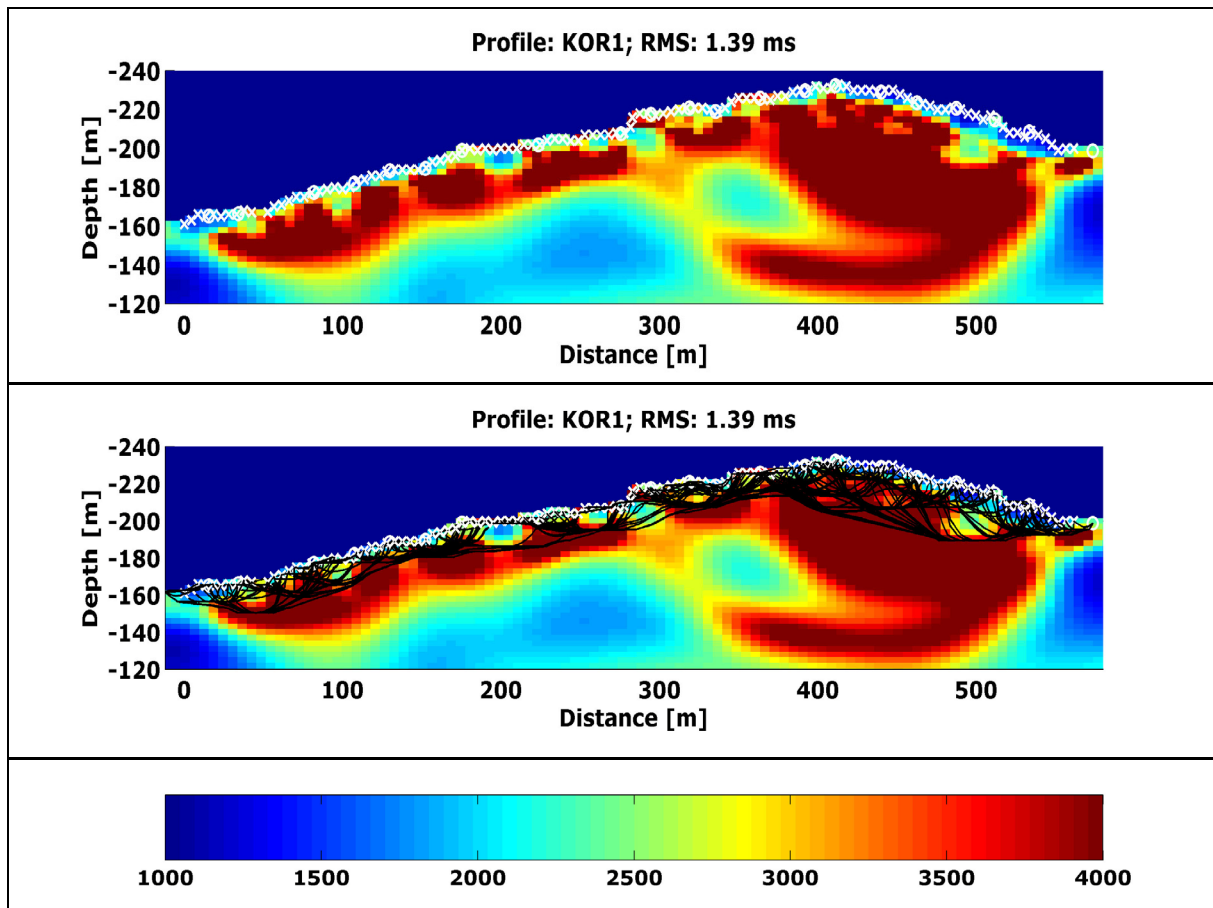
I starten av profilet, mot nord, fremstår en klar svakhetszone hvor hastigheten er ca 3600 – 3900 m/s fra GRM tolkingen og ca. 2500 ved den tomografiske inversjonen (figur 7). Bredden på sonen er usikker siden den ligger helt på kanten av det målte profilet. Ved ca. koordinat 200 indikeres en sone med fall mot høyre (sør) hvor hastigheten er ca. 3200 m/s ved den tomografiske inversjonen. GRM-tolkingen viser en hastighet på 4700 m/s i hele dette området, en hastighet som ikke indikerer noen markert svakhetszone. Usikre svakhetssoner fra den tomografiske inversjonen ved ca. koordinater 95 og 290 faller sammen med noe lavere hastigheter (ca. 4200 m/s) ved GRM-tolkingen.

Hastighetsanalyse.

Ved sørenden av profilet, mellom koordinatene 450 og 550 er det et betydelig sprik i hastighetene. På et gitt dyp mellom ca. koordinatene 450 og 490, er hastigheten fra den tomografiske inversjonen høyere enn 5500 m/s mens GRM-tolkingen indikerer løsmasser, dvs. lavere enn ca 2200 m/s. Hastigheten i løsmassene fra GRM-tolkingen er ikke oppgitt her. Sør for dette, fra koordinat 490 og ut profilet viser GRM-tolkingen hastigheter fra 4800 m/s via 5600 m/s til 6500 m/s mens den tomografiske inversjonen viser hastigheter fra 3500 m/s (grønn farge) ned mot 2000 m/s (lys blåfarge). Her er det stort sprik i de to tolkingene.

3.2.2 Retolking seismisk tomografi

Tomografisk inversjon av det refraksjonsseismiske profilet ved Korslund med Heincke's program (Heincke 2006) er vist i figur 8. Også ved denne inversjonen er det benyttet en cellestørrelse på 3 m x 6 m (vertikalt x horisontalt).



Figur 8: Ny tomografisk inversjon av profilet ved Korslund. Øverst vises hastighetsprofil og nederst hastighetsprofil med strålebaner. Skuddpunk er angitt med hvite sirkler og geofoner med hvite kryss.

Ved denne tomografiske inversjonen er det benyttet en fargeskala fra 1000 til 4000 m/s. Dette betyr at en ikke kan nyansere hastighetene over 4000 m/s, men klare svakhetssoner kan påvises. Metoden angir hvordan strålebanene går, og under nederste strålebane er det ikke grunnlag for å si noe om hastighetene. Hastigheten i celler med få strålebaner og hvor disse går kun i en retning er også usikker.

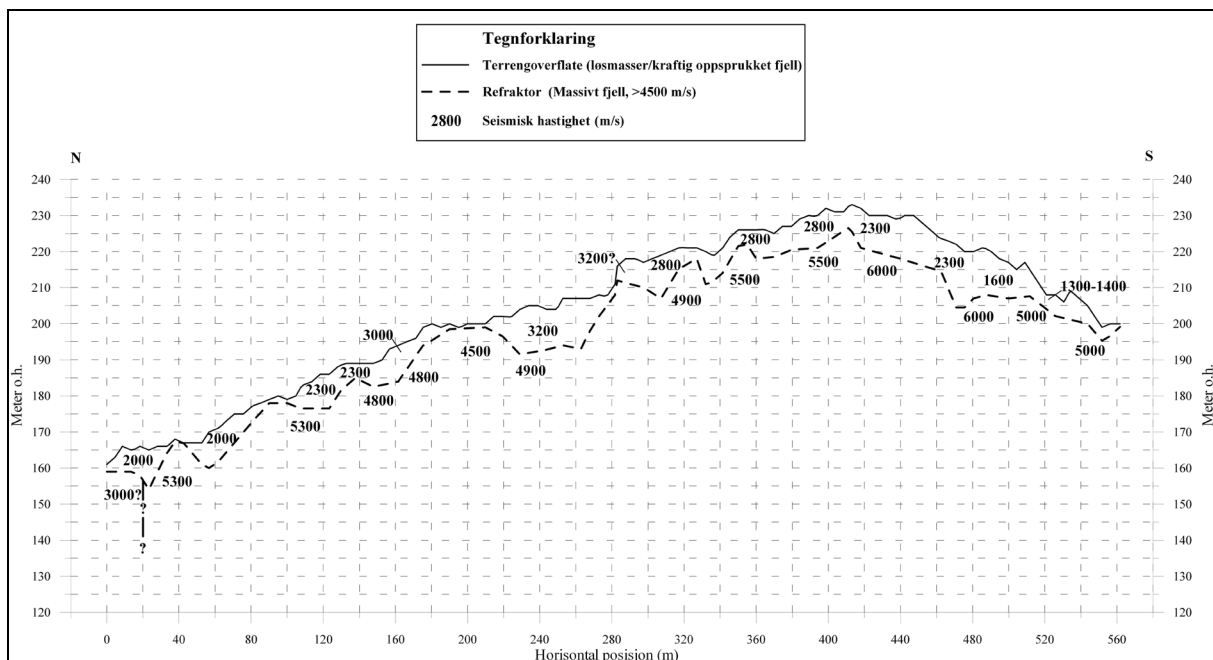
Dersom en benytter lavhastighet ved laveste strålebane som kriterium for å påvise svakhetssoner i fjell, kan en tolke svakhetssoner som vist i tabell 4. Det er i alt påvist 7 soner med lavere seismisk hastighet i fjellet. Bredden på sonene er mulig å angi og mulig fall kan gis ved noen av sonene.

Ca. koordinat	Ca. hastighet (m/s)	Ca. bredde (m)	Mulig fall
0	2200	30	?
100	3500	15	Steil
140	3500	12	Steil mot sør
200	3600	18	Steil
300	2800	30	?
360	3600	18	Steil
540	2800	24	Steil mot sør

Tabell 4: Mulige svakhetssoner ved Korslund tolket fra Heinckes tomografiske inversjon.

3.2.3 Tradisjonelle refraksjonsseismiske tolkinger

Tradisjonell tolking (Hagedoorns +/- metode) av det refraksjonsseismiske profilet ved Korslund er vist i figur 9.



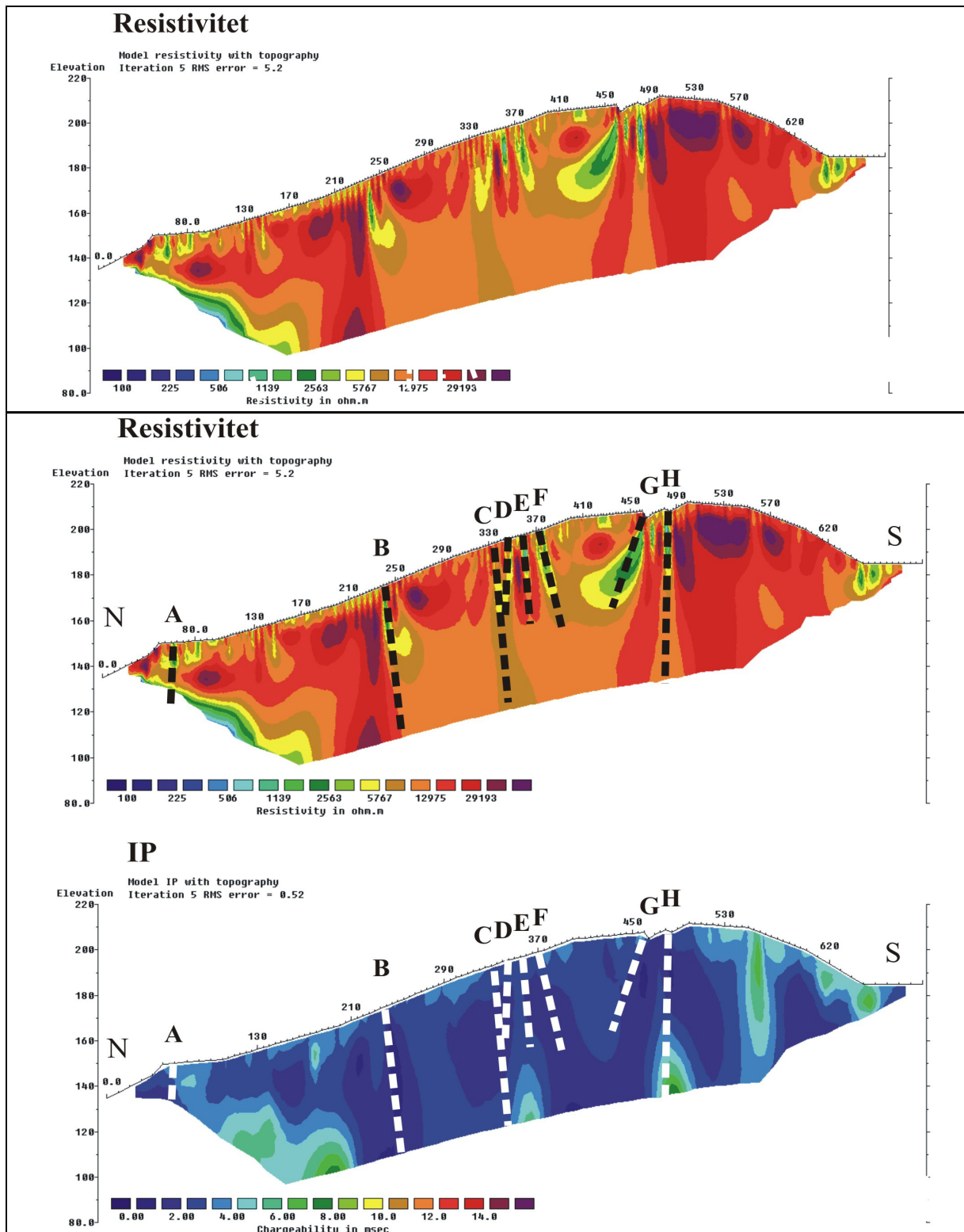
Figur 9: Tradisjonell tolking med Hagedoorn's +/--metode langs refraksjonsseismisk profil ved Korslund.

Tradisjonell tolking av de refraksjonsseismiske data ved Korslund viser en svakhetssone med hastighet ca. 3000 m/s i starten av profilet. På grunn av skudd- og geofonplasseringer er det ikke mulig å tolke eksakt bredde på denne annet enn at den er minst 20 meter bred. Ellers er hastigheten i fjell fra 4500 m/s til 6000 m/s, og dette skulle ikke tilsi noen større svakhetssoner.

Hastigheten i det øverste laget varierer fra 1300 m/s til opp mot 3000 m/s og kanskje 3200 m/s. De siste stammer åpenbart ikke fra løsmasser, og dette kan derfor være forvitret fjell. Mektigheten av det øverste laget skifter raskt og varierer fra null til opp mot 12 m.

3.2.4 Nye resistivitetmålinger

NGUs resultater fra resistivitetmålinger og måling av Indusert Polarisasjon (IP) ved Korslund er vist i figur 10. Data for tolkede soner er listet i tabell 5.



Figur 10: Resistivitet og indusert polarisasjon langs resistivitetsprofil ved Korslund.

Langs resistivetsprofilen ved Korslund fremkommer ingen større svakhetssoner. Det er indikasjonar på 8 svake soner med resistivetsverdier fra 1000 til 6000 ohmm, der bredden på sonene er < 5 m og hvor bare tre av disse kan følges mot et større dyp. Det kan ikke påvises noen IP-effekt knyttet til sonene og en kan derfor se bort fra elektronisk ledende mineraler som årsak for resistivetsanomaliene. Resistiviteten i de tolkede sonene er ikke lavere enn 1000 ohmm, og ut i fra tolkingsmodellen (tabell 1, Rønning et al. 2009), kan dette tilsvare vannfylte oppsprekninger.

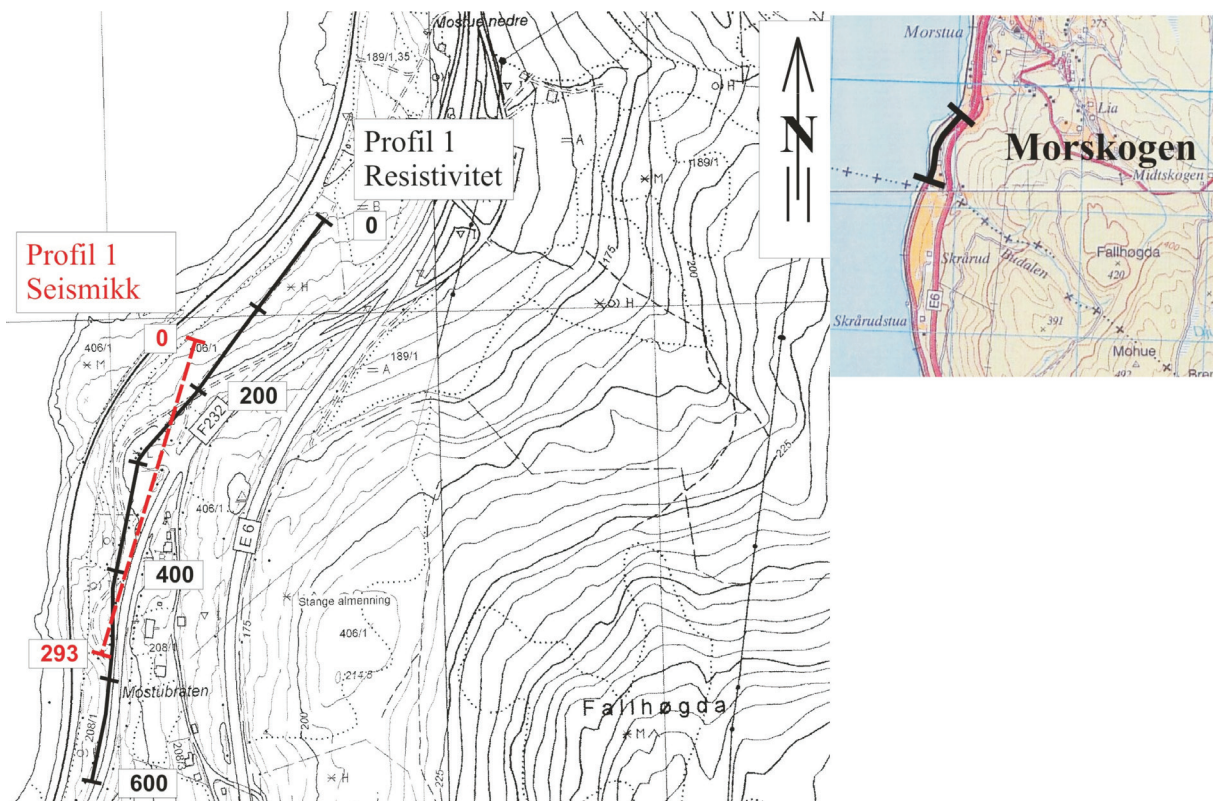
Tolkningen av de seismiske data viste store sprik mellom koordinatene 450 og 550. I dette området ligger resistiviteten på 15000 til 20000 ohmm. Dette kan representere massivt krystallinsk fjell, men også tørre sand- og grusmasser. I dette området kan derfor resistivetsdata ikke bidra med noen oppklarende informasjon.

Posisjon res.-profil	UTM-øst	UTM-nord	Sone	Fall (retning)	Leir-sone?	A dybde	B bredde	C RES	Kommentar
60	623293	6702331	A	≈ Steil		4?	1	2	Lavhast. sone
240	623298	6702179	B	≈ Steil		4	1	2	
335	623305	6702090	C	≈ Steil		4	1	1	
345	623306	6702080	D	Steil mot nord		2	1	1	
360	623307	6702066	E	≈ Steil		2	1	2	
375	623309	6702052	F	Steil mot sør		3	1	2	Lavhast. sone
465	623330	6701962	G	Steil mot nord		3	1	2	
480	623334	6701947	H	Steil mot nord		4	1	2	

Tabell 5: Klassifisering av svakhetssoner ved Korslund ut fra resistivetsdata. Se også tabell 1.

3.3 Morskogen

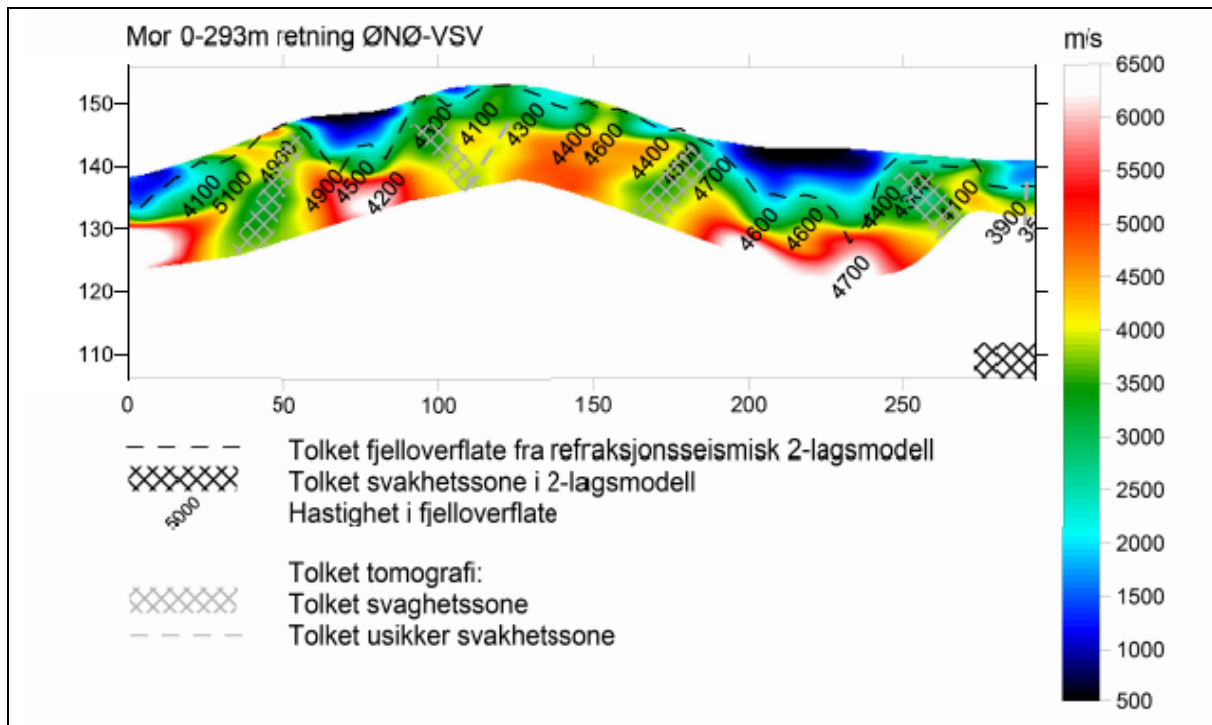
Ved Morskogen var det tidligere målt et 293 meter langt refraksjonsseismisk profil. NGU målte et 600 m langt resistivitetsprofil som går mer eller mindre langs seismikkprofilen (se figur 11). De to profilene er klemte inne mellom E6 og jernbanen, og sistnevnte vil bidra til at absolutte resistivitetsnivået blir noe lavere på større dyp. For å få lange nok utlegg, var det også nødvendig å legge en knekk på nesten 30° på resistivitetsprofilen. Dette vil øke resistivitetsnivået gradvis mot dypet. Selv om disse to forholdene påvirker resistivitetsdata vil det fremdeles være mulig å se kontraster langs profilet. Profilet ble valgt ut på grunnlag av store sprik i hastighetsangivelser i fjell, men også uoverensstemmelser ved påvisning av svakhetssoner i fjell.



Figur 11: Lokalisering av refraksjonsseismisk profil og resistivitetsprofil ved Morskogen. Profilet med refraksjonsseismikk er markert med rød, stiplet linje (293 m), mens resistivitetsprofilen er markert med svart linje (600 m).

3.3.1 Tidligere seismiske tolkninger

Opprinnelig tolking av det refraksjonsseismiske profilet ved Korslund er vist i figur 12.



Figur 12: Opprinnelige tolking av refraksjonsseismisk profil ved Morskogen (Wisén 2008). Overgangen fra løsmasser til fjell, hastighet i fjell og svakhetssoner fra GRM-metoden er fremstilt med svart stiplet linje, svarte tall og svart skravur. Hastigheter fra tomografisk inversjon er angitt med fargekode og svakhetssoner er angitt med grå skravur.

Påvisning av svakhetssoner.

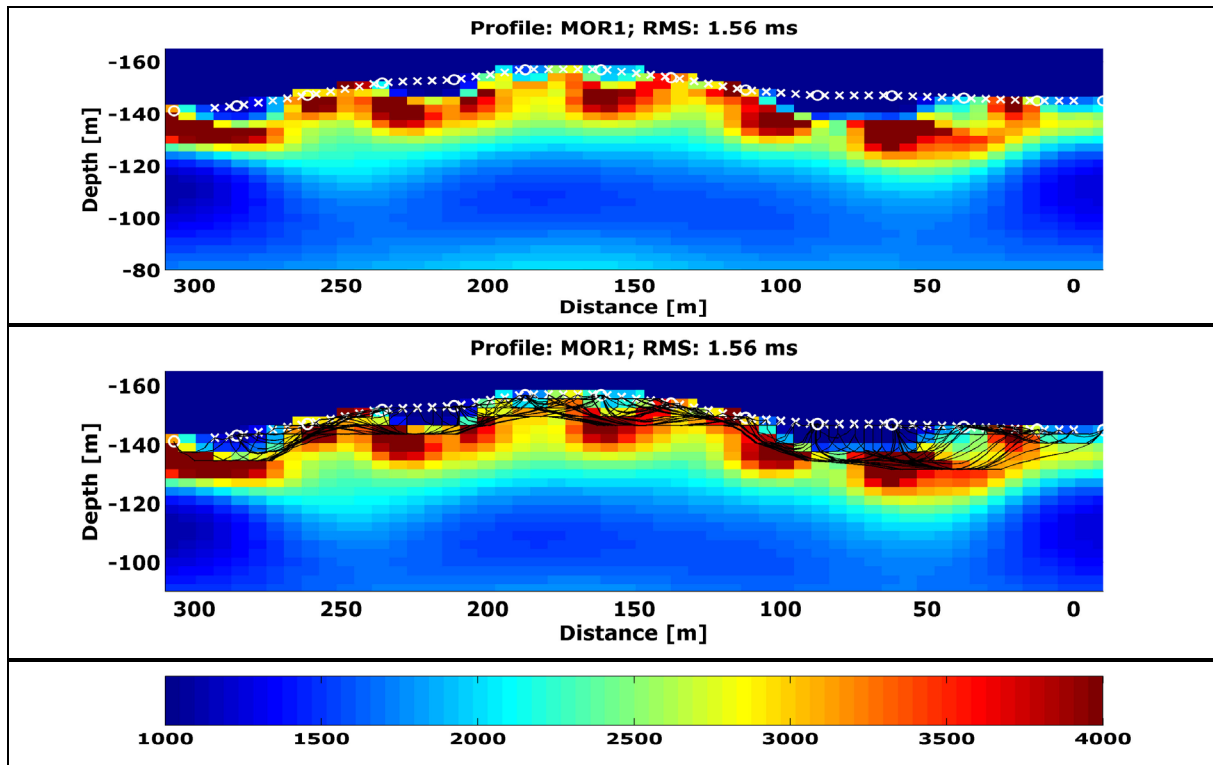
Ved den tomografiske inversjonen er det tolket 4 svakhetssoner, angitt med grå skravur ved ca. koordinatene 50, 100, 180 og 250 (figur 12). Alle disse indikeres med fall, og felles for alle er at de har utgående på fjellknauser i følge GRM-tolkingen. I tillegg er det tolket en usikker sone med fall mot venstre (mot nord) ved ca. koordinat 120, og en vertikal usikker sone ved ca. koordinat 290. Bare sistnevnte sone viser fjellhastighet lavere enn 4000 m/s ved GRM-tolkingen.

Hastighetsanalyse.

Ved dette profilet er det relativt godt samsvar mellom tolket dyp til fjell (stiplet sort linje, Figur 12) ved GRM-tolking og seismiske hastigheter fra ca. 2200 m/s og lavere ved den tomografiske inversjonen. I følge Wisén (2008) stemmer beregnede hastigheter i løsmassene godt med hastighetene den tomografiske inversjonen viser. Tilsvarende kan ikke sies om de tolkede seismiske hastigheter i fjell. GRM-metoden viser fjellhastigheter som varierer fra 3900 m/s til 5100 m/s. Tilsvarende verdier ved den tomografiske inversjonen varierer fra ca. 2000 m/s til stedvis opp mot 4500 m/s. Disse verdiene ligger generelt mye lavere, og variasjonene ser ut til å sprike. Ved ca. koordinat 30 viser tomografisk inversjon hastighet ned mot 2000 m/s (lys blå farge i figur 12) mens GRM-metoden antyder 4100 m/s. I andre områder som f. eks. ved koordinat 200, viser tomografien hastigheter rundt 3500 m/s (grønn farge i figur 12) mens GRM-metoden indikerer 4600 m/s. Forfatterne har ikke noen tilfredsstillende forklaring på dette spriket.

3.3.2 Retolking seismisk tomografi

Tomografisk inversjon av det refraksjonsseismiske profilet ved Morskogen med Heincke's program (Heincke 2006) er vist i figur 13. Det er benyttet en cellestørrelse på 3 m x 6 m (vertikalt x horisontalt) ved inversjonen av data.



Figur 13: Ny tomografisk inversjon av profilet ved Morskogen. Øverst vises hastighetsprofil og nederst hastighetsprofil med strålebaner. Skuddpunkt er angitt med hvite sirkler og geofoner med hvite kryss.

Ved denne tomografiske inversjonen er det benyttet en fargeskala fra 1000 til 4000 m/s. Dette betyr at en ikke kan nyansere hastighetene over 4000 m/s, men klare svakhetssoner kan påvises. Metoden angir hvordan strålebanene går, og under nederste strålebane er det ikke grunnlag for å si noe som helst om hastighetene. Hastigheten i celler med få strålebaner og hvor disse går i bare en retning er også usikker.

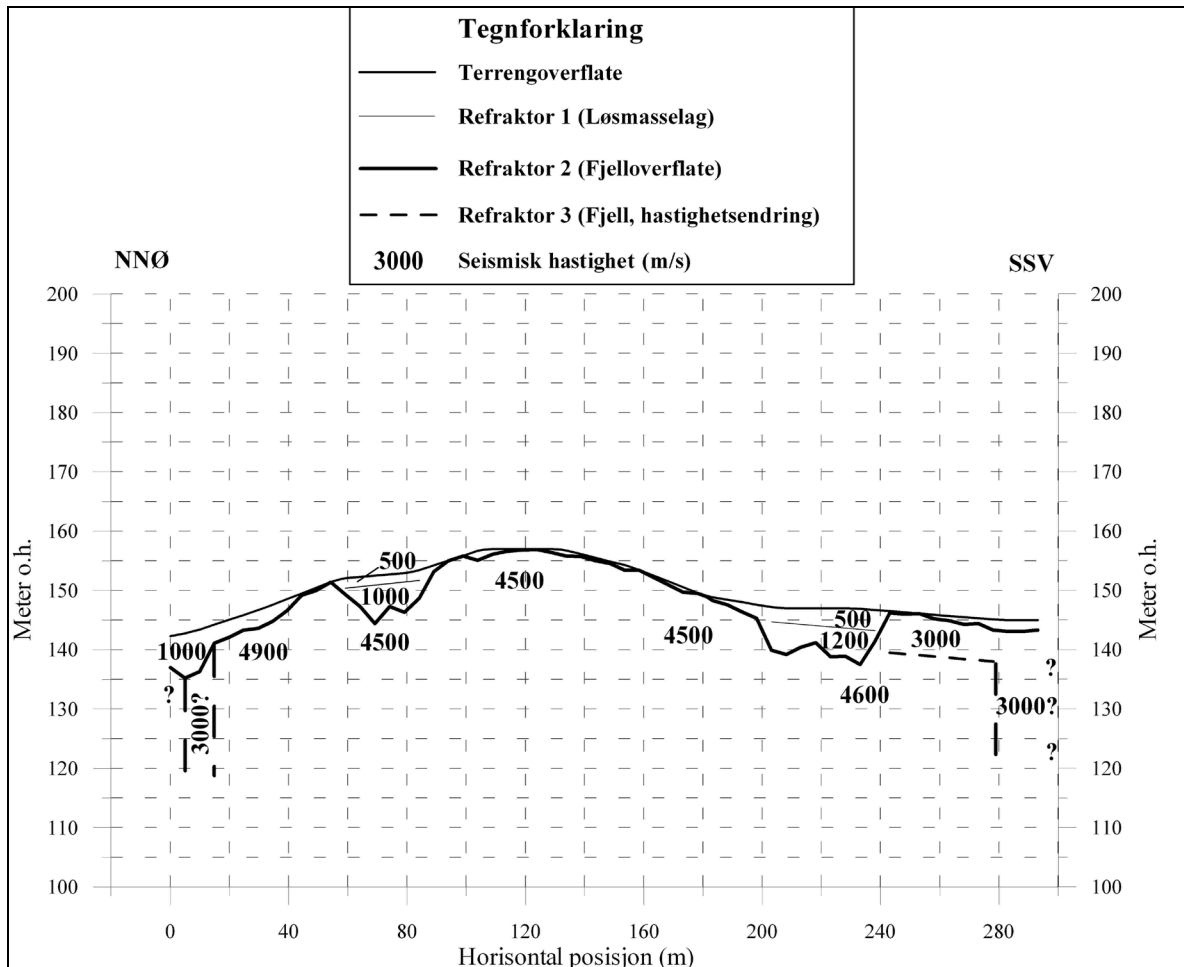
Dersom en benytter lavhastighet ved laveste strålebane som kriterium for å påvise svakhetssoner i fjell, kan en tolke svakhetssoner som vist i tabell 6. Det er i alt indikert 7 soner langs dette profilet med ny tomografisk inversjon (figur 13). De fleste sonene indikerer steilt fall, mens for to av sonene er det ikke mulig å angi fallet på sonen.

Ca. koordinat	Ca. hastighet (m/s)	Ca. bredde (m)	Mulig fall
270	Uklar, få strålebaner	12	Steil mot sør
245	3200	12	Steil
215	3400	12	Steil
180	2800	30	Steil
130	3500 - 2800	30	?
80	3300 - 2400	18	Steil
50 - 0	Uklart, få strålebaner	24	??

Tabell 6: Mulige svakhetssoner ved Morskogen tolket fra Heinckes tomografiske inversjon.

3.3.3 Tradisjonelle refraksjonsseismiske tolkinger

Tradisjonell tolking (Hagedoorns +/- metode) av det refraksjonsseismiske profilet ved Morskogen er vist i figur 14.



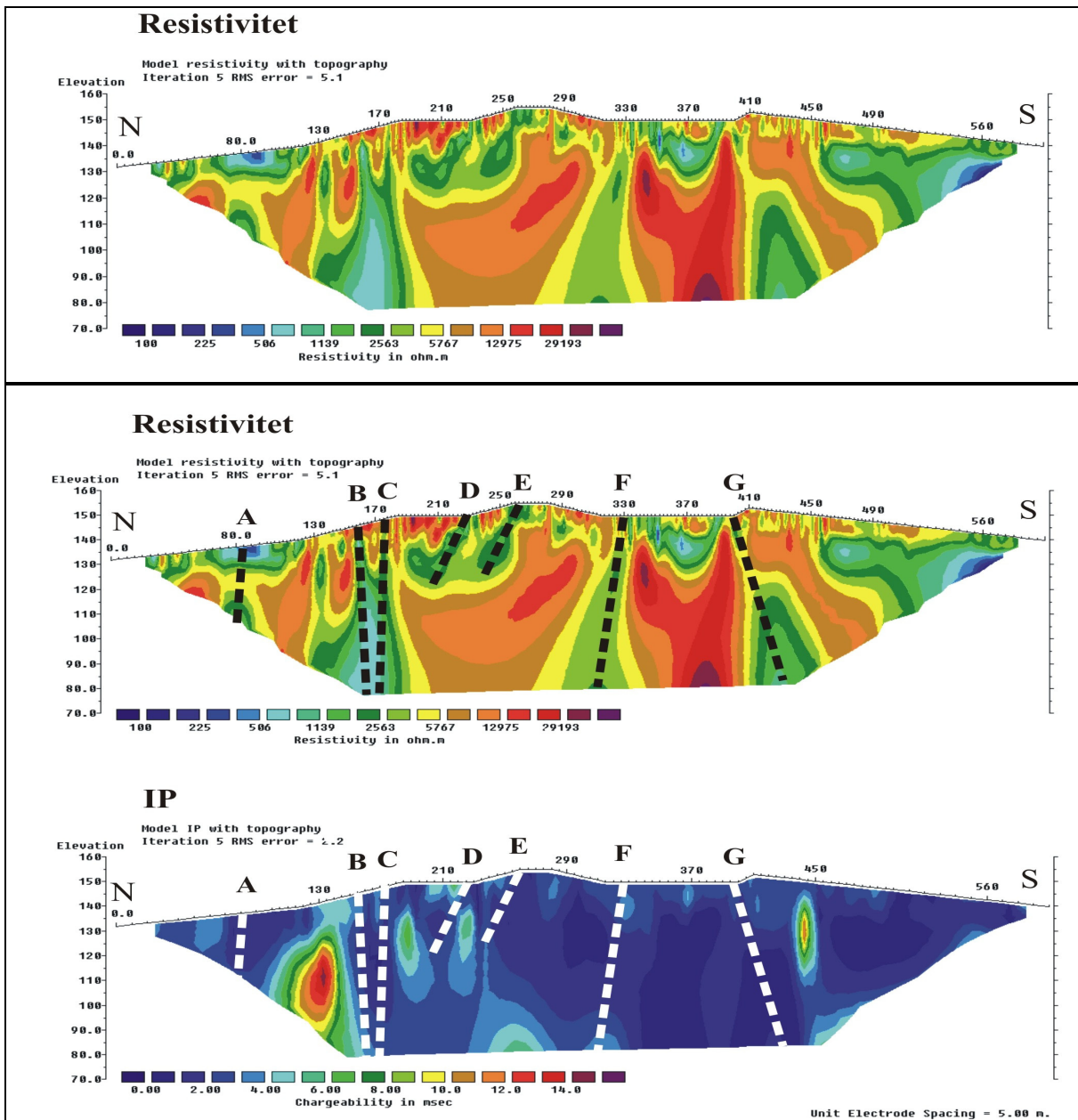
Figur 14: Tradisjonell tolking med Hagedoorns +/- metode av refraksjonsseismisk profil ved Morskogen.

Tradisjonell tolking av de refraksjonsseismiske data ved Morskogen viser to markerte svakhetssoner. På grunn av plasseringen, på hver ende av utlegget, er tolkingen av seismisk hastighet i og bredden av disse to sonene usikker. Hastigheten i fjellet mellom disse to sonene er fra 4500 m/s til 4900 m/s og dette skulle ikke tilsi noen større svakhetssoner, men samtidig synes disse hastighetene å være relativt lave. Mellom koordinatene 240 og 280 indikeres en fjellhastighet på 3000 m/s i de øverste 5-6 metrene. Dette kan representere forvitret fjell.

Stedvis indikeres et topplag i løsmassene med hastighet 500 m/s. Dette representerer trolig løse og tørre masser. Under dette indikeres et lag med hastighet 1000 til 1200 m/s. Dette representerer trolig tettere masser, men fremdeles relativt tørre. Løsmassestyktheten varierer fra 0 til ca. 8 meter.

3.3.4 Nye resistivitetmålinger

NGUs resultater fra resistivitetmålinger og måling av Indusert Polarisasjon (IP) ved Morskogen er vist i figur 15.



Figur 15: Resistivitet og indusert polarisasjon langs resistivitetsprofil ved Morskogen.

Ved Morskogen indikeres 7 svakhetssoner ved resistivitetmålingene. Resistiviteten i den mest pålitelige delen av sonene som er nær overflaten ligger høyere enn 1000 ohmm, og ut fra anvendte tolkingsmodell skulle dette tilsi oppsprukket vannfylt fjell men uten leire på sprekke (tabell 1, Rønning et al. 2009). Det er påvist IP-effekt langs profilet, men ikke knyttet til de indikerte sonene. En kan derfor se bort fra sulfider eller andre elektronisk ledende mineraler som årsak til den lave resistiviteten. Klassifisering av de 7 indikerte sonen fra resistivitetstolkningen fremgår av tabell 7.

Posisjon res.-profil	UTM-øst	UTM-nord	Sone	Fall (retning)	Leir-sone?	A dybde	B bredde	C RES	Kommentar
85	622977	6709710	A	Steil mot nord		4?	2	2	
160	622930	6709648	B	≈ Steil		4	1	3	
175	622920	6709636	C	≈ Steil		4	1	2	
230	622889	6709589	D	Mot nord		1	1	2	
275	622867	6709550	E	Mot nord		1	1	2	
330	622851	6709500	F	Steil mot nord		4	1	2	Lavhast. sone
395	622844	6709438	G	Steil mot sør		4	1	2	Lavhast. sone

Tabell 7: Klassifisering av svakhetssoner ved Morskogen ut fra resistivitetsdata. Se også tabell 1.

4. DISKUSJON

I dette kapitlet blir det først foretatt en sammenligning av de ulike tolkingsmetodene for de refraksjonsseismiske data og deretter en sammenstilling av de ingeniørgeologiske data fra refraksjonsseismikken og de elektriske målingene. Det gis også en metodevurdering.

4.1 Sammenstilling seismiske data

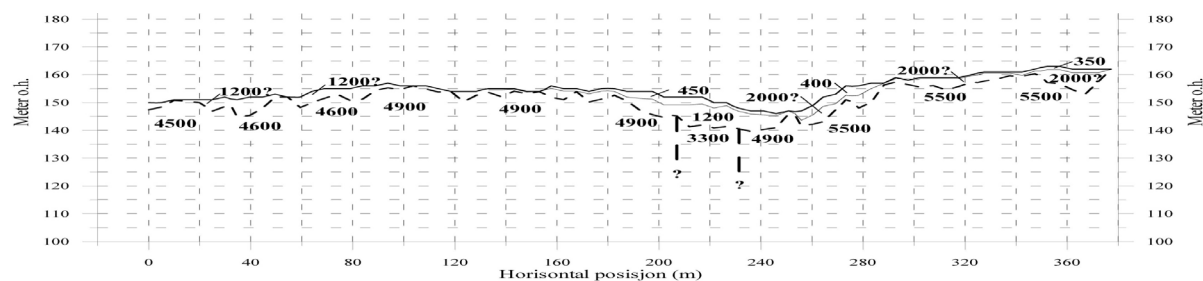
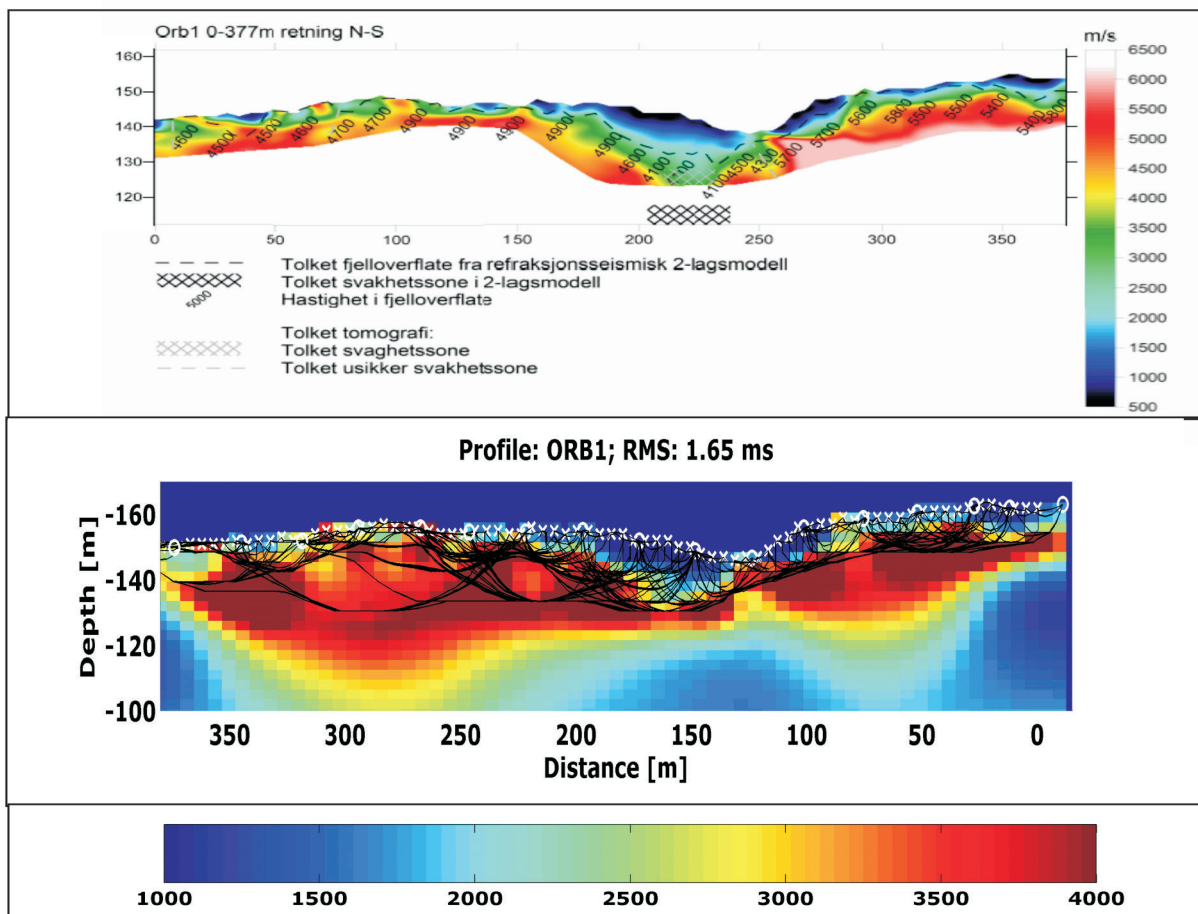
Seismiske data fra de tre områdene er tolket med følgende metoder: General Reciprocal Method (GRM, Wisen, Rambøll), tomografisk inversjon med programmet Rayfract (Wisen, Rambøll), tomografisk inversjon med Heinckes program (Heincke, tidligere NGU) og Hagedoorns +/-metode (Tønnesen, NGU).

En kvalitativ sammenligning av tolkede hastigheter og løsmassemektheter viser seg vanskelig. Dette skyldes delvis ulike tolkingsmodeller, og delvis metodiske svakheter. Ved GRM-tolkningen er det benyttet en to-lags-modell, mens NGU benyttet tre-lagsmodell ved tolkingen med Hagedoorns +/-metode. I tillegg er ikke hastigheten i løsmassene angitt ved GRM-tolkningen. Det er vanskelig å bestemme hastighet ut fra fargekodene ved de tomografiske inversjonsmetodene, men også fordi skarpe reelle kontraster ofte kommer frem som en gradvis overgang ved tomografisk inversjon (Sheehan et al. 2005). I tillegg til dette kommer forskjellig fargeskala ved de tomografiske inversjonene, og spesielt er dette problematisk ved Heincke's inversjon der fargeskalaen går fra 1000 m/s til 4000 m/s mens at de andre tolkingene antyder hastigheter fra 500 m/s til 5800 m/s. NGU har likevel valgt å gjøre et forsøk på å sammenligne hastigheter og mektigheter der dette er mulig.

4.1.1 Seismiske tolkinger ved Ørbekk

De forskjellige tolkingene av de refraksjonsseismiske data fra Ørbekk er sammenstilt i figur 16. Dette profilet ble valgt ut som et referanseprofil da de to opprinnelige tolkingene viste god overensstemmelse.

Alle de fire tolkingsmetodene viser en svakhetsone ved koordinat 220. Tykkelsen av denne varierer noe, fra ca. 35 meter ved GRM-metoden til ca. 20 meter ved +/-metoden. De to



Tegnforklaring	
—	Terrengoverflate
—	Refraktor 1 (Løsmasser/kraftig oppsprukket fjell)
- - -	Refraktor 2 (Massivt fjell, > 4500 m/s) (Svakhetszone, <4000 m/s)
5500	Seismisk hastighet (m/s)

Figur 16: Sammenligning av seismiske tolkinger ved Ørbekk. Øverst: opprinnelige tolkinger med GRM-metoden og tomografisk inversjon med programmet Rayfract, Midten: Tomografisk inversjon med Heincke's metode og nederst: NGUs tolking med Hagedoorns +/-metode.

tomografiske metodene indikerer en tykkelse ned mot 20 meter. Hastigheten i denne sonen varierer også noe. Hagedoorns +/- antyder en hastighet på 3300 m/s, GRM-metoden 4100 m/s mens begge de to tomografiske metodene antyder 3500 m/s. Dette viser at det er viktig å vite hvilken metode data er tolket med dersom seismisk hastighet senere skal benyttes i en klassifisering av svakhetssoner. Spesielt gjelder dette dersom seismisk p-bølgehastighet benyttes til å bedømme fjellkvalitet. Siden alle metodene indikerer denne sonen anses den som sikker.

En usikker svakhetsone ved koordinat 250, opprinnelig tolket på grunnlag av tomografi (Rayfract), antydes med hastighet 4300 m/s ved GRM-tolkningen, men den manuelle tolkingen med Hagedoorns +/-metode viser ingen klar anomali. Heincke's tomografiske inversjon antyder en ca. 12 meter bred sone med hastighet fra 3000 til 3500 m/s i samme område. Siden bare de to tomografiske metodene påviser denne sonen, anses den som usikker ut fra seismikken. To soner indikert med Rayfract-inversjonen gir ikke respons på de andre metodene og anses derfor som tvilsomme.

Koordinat	GRM-metode	TOMO Rayfract	TOMO Heincke	Hagedoorns +/-	Kommentar
10	4600 /-	3500 / ?	? / ?	4500 / -	Tvilsom
75	4000 / ?	4700 / -	? / ?	4600 / -	Tvilsom
220	4100 / 35	3500 / 20	3500 / 20	3300 / 20	Sikker
250	4300 / -	4000 / ?	3000-3500/12	4900 / -	Usikker

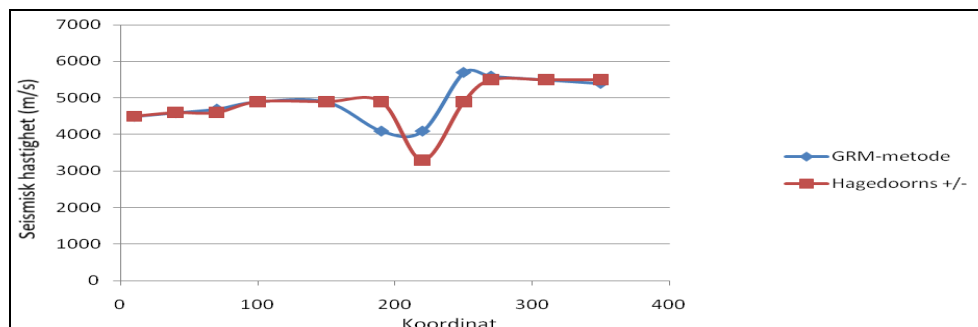
Tabell 8: Seismisk P-bølgéhastighet (m/s) over bredde (m) av soner indikert ved de forskjellige tolkingsmetoder langs profilet ved Ørbekk.

I tabell 9 er det gjort et forsøk på å sammenligne løsmassehastigheter og løsmassenes tykkelse. Løsmassehastigheter fra GRM-metoden er ikke oppgitt. Med forbehold at fargeskala ved Heincke's metode ikke går lavere enn 1000 m/s ser det ut til at tomografiberegningene gir sammenlignbare data når det gjelder hastighet i løsmassene. NGU's tolkning med Hegedorn's +/- -metode avviker med å angi to lag i løsmassene; et med lav hastighet (300-400 m/s) og et med middels hastighet (1200 m/s). Avviket skyldes først og fremst forskjellige tolkingsmodeller, men også at tomografiberegninger kan gi en gradvis overgang i hastigheter (Sheehan et al. 2005). Løsmassemekthet tolket med GRM-metoden og Hagedoorn's +/- -metode gir sammenlignbare resultater, men Heincke's tomografiberegninger stemmer ikke med disse.

Metode	Løsmasse hastighet (m/s)	Løsmassemekthet (m)
GRM-metoden	??	0 - 10
Tomografisk inversjon, Rayfract	500 – 2500	Ikke klart angitt
Tomografisk inversjon, Heincke	1000 – 2500	0 - 18
Hagedoorns +/-metode	300 – 400, 1200	0 - 10

Tabell 9: Sammenligning av tolket løsmassehastighet og -tykkelse ved de fire anvendte tolkingsmetoder for de seismiske data.

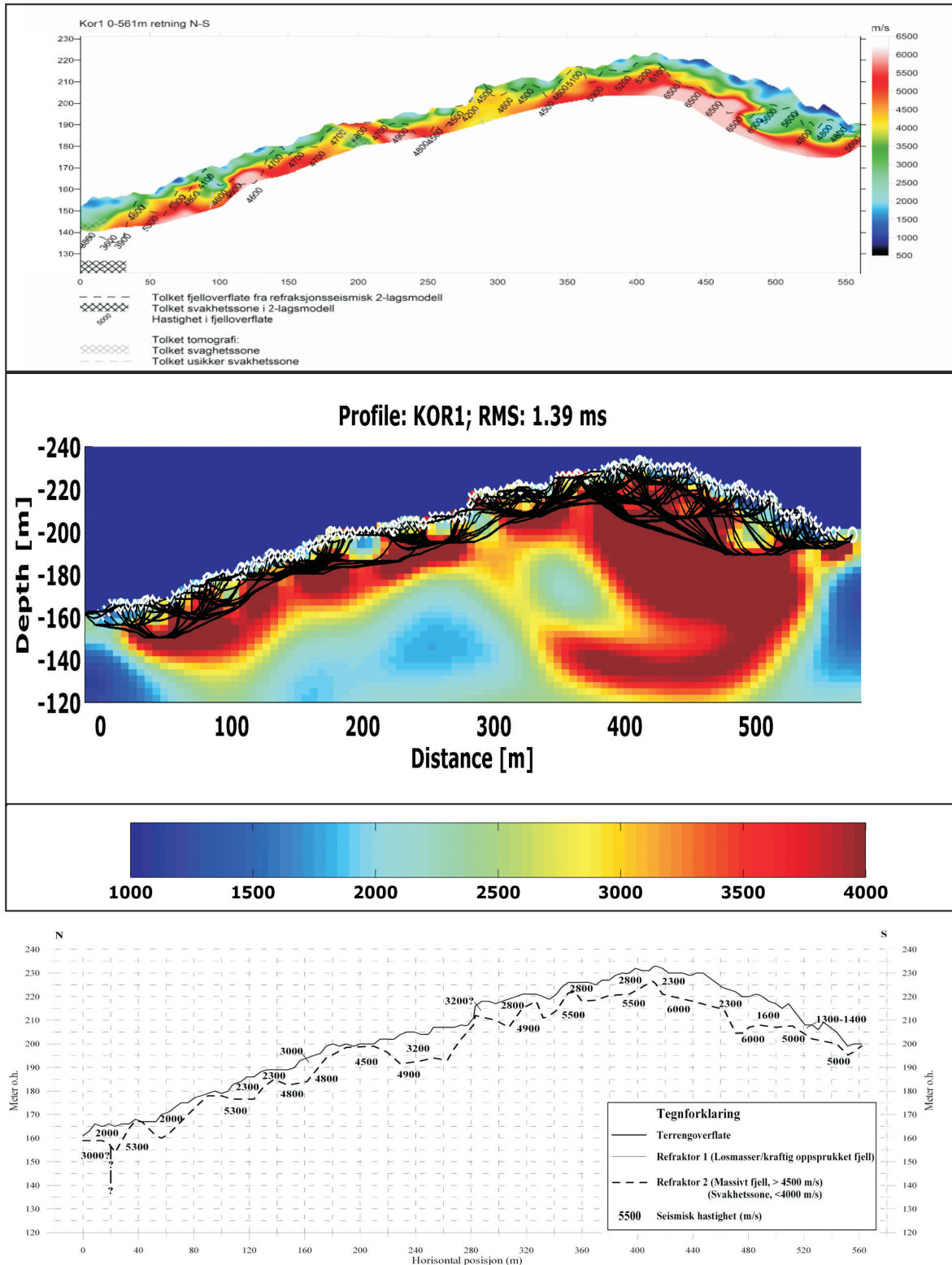
I figur 17 er alle angitte fjellhastigheter fra Hagedoorns +/-metode sammenlignet med tilsvarende data fra GRM-metoden ved samme koordinat. Det er meget godt samsvar langs hele profilet unntatt i området rundt svakhetssonen. GRM-metoden antyder en bredere sone med høyere hastighet.



Figur 17: Hastighet i fjell tolket med GRM-metoden og Hagedoorns +/-metode langs profilet ved Ørbekk.

4.1.2 Seismiske tolkinger ved Korslund

En sammenstilling av de seismiske tolkingene langs profilet ved Korslund er vist i figur 18.



Figur 18: Sammenligning av seismiske tolkinger ved Korslund. Øverst: opprinnelige tolkinger med GRM-metoden og tomografisk inversjon med programmet Rayfract, Midten: Tomografisk inversjon med Heinckes metode og nederst: NGUs tolking med Hagedoorns +/-metode.

En sammenstilling av seismisk hastighet og mektighet for indikerte soner fra de seismiske tolkningene ved Korslund er vist i tabell 10. Resultatene spriker noe når det gjelder posisjon, men spesielt store avvik finner vi på hastigheter og mektigheter.

Koordinat	GRM-metode	TOMO Rayfract	TOMO Heincke	Hagedoorns +/-	Kommentar
0-30	3600 / 30?	2500 / 15?	2200 / 30?	3000 / 20?	Sikker
90 - 100	4200 / ?	4000 / 25	3500 / 15	5300 / -	Usikker
140	4700 / -	5000 / -	3500 / 12	4800 / -	Tvilsom
190 - 200	4700 / -	3200? / 20	3500 / 18	4500 / ?	Usikker
290 - 300	4200 / -	3500 / ?	2800 / 30	4900 / -	Usikker
360	5100 / -	4500 / -	3600 / 18	5500 / -	Tvilsom
540	4800 / -	5000 / -	2800 / 24	5000 / -	Tvilsom

Tabell 10: Seismisk P-bølgehastighet (m/s) over bredde (m) av soner indikert ved de forskjellige tolkingsmetoder langs profilet ved Korslund.

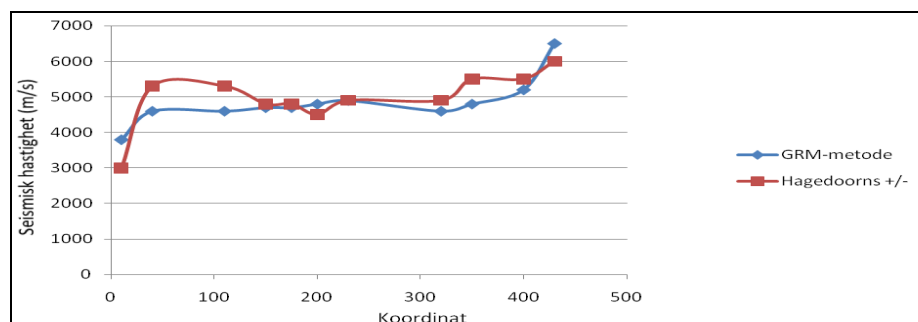
Sone ved koordinat 0 -30 varierer i hastighet fra 2200 til 3600 m/s. Bredden av sonen er vanskelig å tolke på grunn av at sonen ligger på enden av geofonutlegget. Sonen synes høyst reell, og den har trolig en betydelig mektighet (20 meter eller mer).

Mulig sone ved koordinat 90 – 100 meter viser lave hastigheter ved de tomografiske inversjonene (3500 og 4000 m/s), GRM-metoden antyder 4200 m/s mens Hagedoorns +/- metode indikerer massivt fjell med hastighet 5300 m/s. Sonen må anses som usikker siden den ikke gir resopons på Hagedoorn's +/-metode.

Mulige soner ved koordinat 190 - 200 og 290 - 300 viser lave hastigheter ved de tomografiske inversjonene (2800 til 3500 m/s) men mer moderate hastigheter ved de andre to metodene (4200 og 4900 m/s). Hastighetene til GRM- og Hagedoorns metode er ikke spesielt lave, og sonene må anses som usikre.

Mulige soner ved koordinatene 140, 360 og 540 kommer frem bare på Heincke's tomografiske inversjon. De andre metodene antyder hastigheter fra 4700 m/s til 5500 m/s og dette tolkes som massivt fjell med få sprekker. En anser derfor disse tre sonene som tvilsomme.

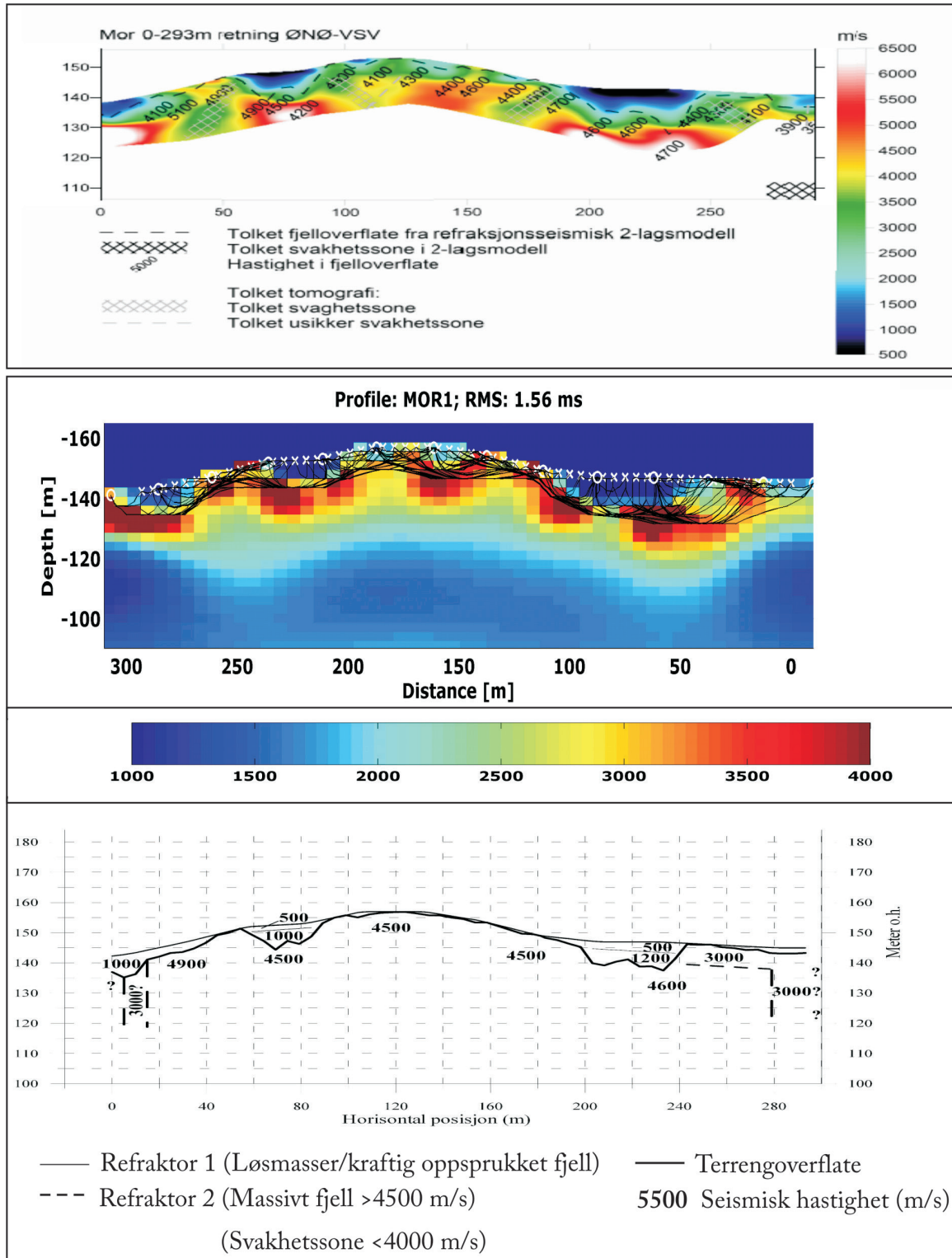
I figur 19 er alle angitte fjellhastigheter fra Hagedoorns +/-metode sammenlignet med tilsvarende data fra GRM-metoden ved samme koordinat. Det er ikke like godt samsvar i tolkede fjellhastigheter her som ved Ørbekk, men bortsett fra i starten av profilet hvor det er angitt en svakhetszone, indikerer alle verdier her massivt fjell med få sprekker. Avviket endrer derfor ikke på den ingeniørgeologiske tolkingen.



Figur 19: Hastighet i fjell tolket med GRM-metoden og Hagedoorns +/-metode langs profilet ved Korslund.

4.1.3 Seismiske tolkninger ved Morskogen

En sammenstilling av de seismiske tolkningene langs profilet ved Morskogen er vist i figur 20.



Figur 20: Sammenligning av seismiske tolkninger ved Morskogen. Øverst: opprinnelige tolkninger med GRM-metoden og tomografisk inversjon med programmet Rayfract, Midten: Tomografisk inversjon med Heinckes metode og nederst: NGUs tolking med Hagedoorns +/-metode.

En sammenstilling av seismisk hastighet og bredde for indikerte soner fra de seismiske tolkningene ved Morskogen er vist i tabell 11. Resultatene spriker noe når det gjelder posisjon, og i tillegg er det store avvik på hastigheter og bredde av svakhetssonene.

Koordinat	GRM-metode	TOMO Rayfract	TOMO Heincke	Hagedoorns +/-	Kommentar
0 - 20	? / ?	6000 / -	Uklar	3000 / 10	Sikker
55	4900 / -	3500 /12	3200 /12	4500 / -	Usikker
85	4200 / -	5000 / -	3400 /12	4500 / -	Tvilsom
90 - 120	4500 / -	3500-4000/10	2800 / 30	4500 / -	Usikker
170 - 180	4500 / -	3800 / 10	2800-3500 /30	4500 / -	Usikker
200 - 220	4600 / -	5000 / 10	2400-3300/18	4600 / -	Tvilsom
250 - 270	4400/-	3500 / 10 ?	Uklar	4600 / -	Usikker
280 - 300	3500-3900/20	4000/-	Uklar	3000 / 20	Sikker

Tabell 11: Seismisk P-bølgehastighet (m/s) over bredde (m) av soner indikert ved de forskjellige tolkingsmetodene langs profilet ved Morskogen.

Mulig sone ved koordinat 0 – 30 indikeres bare ved Hagedoorns +/-metode, og tolkingen her er usikker på grunn av få data på enden av profilet. Sonen vurderes derfor som usikker.

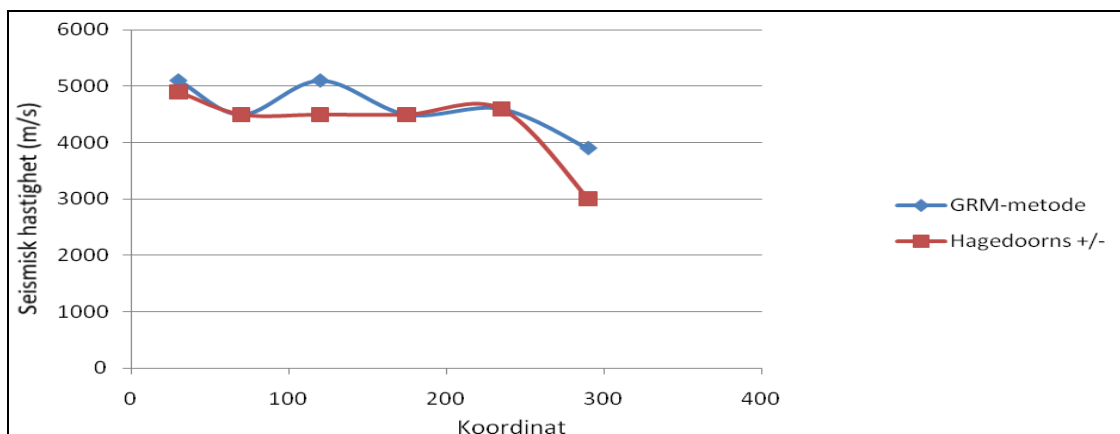
Alle de tre sonene vedkoordinatene 55, 90 - 120 og 180 indikeres ved de tomografiske inversjonene, men på de to andre metodene har disse sonene hastigheter på fra 4200 til 4900 m/s. Dette indikerer relativt massivt fjell med få sprekker. Siden kun to metoder påviser sonene vurderes de som usikre.

Mulige soner ved koordinatene 85 og 200 – 220 indikeres bare ved Heincke's tomografi og disse anses derfor som tvilsomme.

Mulig sone mellom koordinatene 250 og 270 indikeres ved Rayfract-inversjonen, er uklar på Heincke's inversjon og mens de to andre metodene indikerer lite oppsprukket fjell med hastighet 4400 til 4600 m/s. Siden det ikke er noen klar indikasjon på sonen annet enn ved GRM-metoden, anses den som usikker.

Mulig sone ved slutten av profilet (koordinat 280 -300) indikeres klart ved GRM-metoden og Hagedoorn's +/-metode. Hastigheten er lav ved Rayfract-inversjonen (4000 m/s), men usikker på grunn av få strålebaner ved Heinke's inversjon. Siden sonen indikeres med alle metodene anses den som sikker, selv om det er sprik i resultatene.

I figur 21 er alle angitte fjellhastigheter fra Hagedoorns +/-metode sammenlignet med tilsvarende data fra GRM-metoden ved samme koordinat. Svakhetszone ved starten av profilet var ikke tildelt noen hastighet ved GRM-metoden så denne faller derfor ut. Det er relativt få verdier å sammenligne, men de som er stemmer godt over ens unntatt for sone ved koordinat 300. Igjen antydes lavere hastighet i sonen med Hagedoorn's metode enn ved GRM-metoden.



Figur 21: Hastighet i fjell tolket med GRM-metoden og Hagedoorns +/-metode langs profilet ved Morskogen.

I tabell 12 er det gjort et forsøk på å sammenligne løsmassedata. Det er noe sprik i løsmassehastighetene og dette skyldes trolig valg av modell (to-lags og trelags) og begrenset fargeskala for Heincke's inversjon. Ved GRM-metoden er ikke hastighetene i løsmassene angitt. Løsmassemektigheten viser god overensstemmelse, oppløsingen ved de tomografiske inversjonene tatt i betraktning.

Metode	Løsmasse hastighet (m/s)	Løsmassemektighet (m)
GRM-metoden	??	0 - 15
Tomografisk inversjon, Rayfract	750 - 2000	0 - 12
Tomografisk inversjon, Heincke	1000 - 2000	0 - 12
Hagedoorns +/-metode	500, 1000-1200	0 - 15

Tabell 12: Sammenligning av tolket løsmassehastighet og -tykkelse ved de fire anvendte tolkingsmetoder for de seismiske data ved Morskogen.

4.2 Sammenstilling seismikk- og resistivitetsdata.

I dette avsnittet gjøres en sammenstilling av alle indikerte soner. Soner som ved seismikken ble ansett som tvilsomme tas ikke med.

4.2.1 Sammenstilling av svakhetssoner Ørbekk

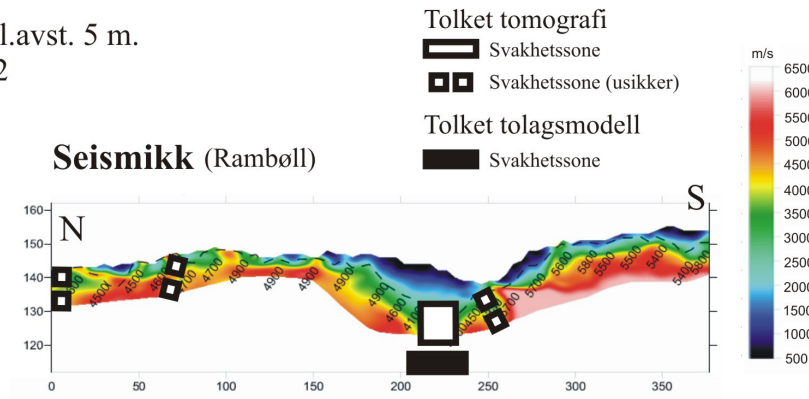
I figur 22 er alle data fra Ørbekk-profilen unntatt Heincke's tomografiske inversjon sammenstilt. All informasjon om de enkelte indikerte sonene unntatt de fra seismikken som ble ansett som tvilsomme, er sammenstilt i tabell 13.

I profilet ved Ørbekk er det indikert 8 mulige svakhetssoner (figur 22 og tabell 13). To av sonene som er indikert ved Ørbekk er kun kartlagt med resistivitetsmetoden (sone A og H), da disse ligger utenfor seismikkprofilen. Sone B og C gir også utslag i IP målingene, det vil si at berggrunnen kan inneholde ledende mineraler og de lave resistivitetsverdiene kan skyldes for eksempel forekomst av sulfider og ikke svakhetssoner (tabell 13). Sone D er påvist med alle metodene og en kan derfor med stor sikkerhet si at den er ca 20 m bred og muligens inneholder leire (<500 ohmm, figur 22 og tabell 13). Sone E, F og G er påvist med resistivitet, men ikke seismikk (figur 22 og tabell 13). To av disse sonene (F og G) har resistivitetsverdier 1000-3000 ohmm, som kan tilsvare oppsprukket fjell som kan vannførende (tabell 1 og 13).

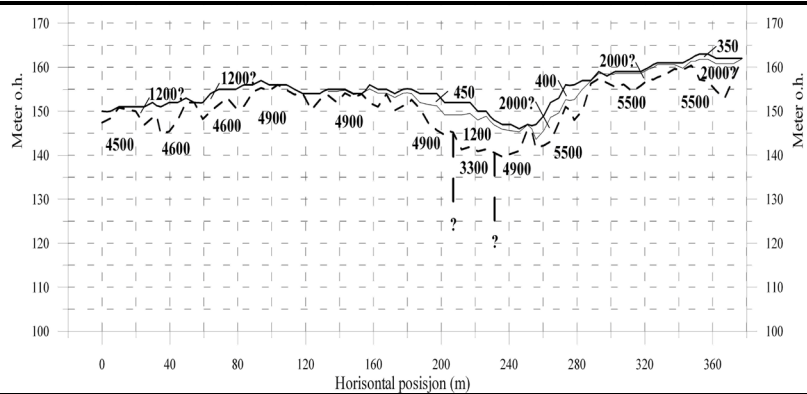
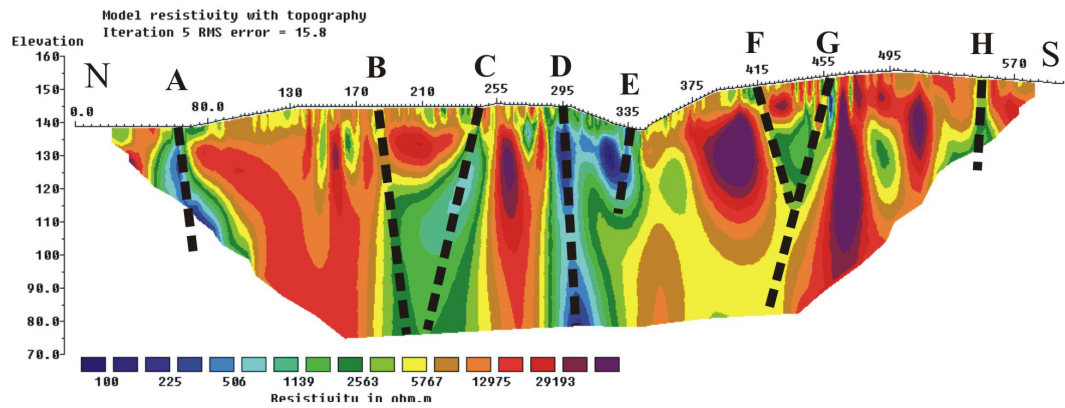
Ørbekk

Profil 1

Gradient, el.avst. 5 m.
V/H-filter 2



Resistivitet



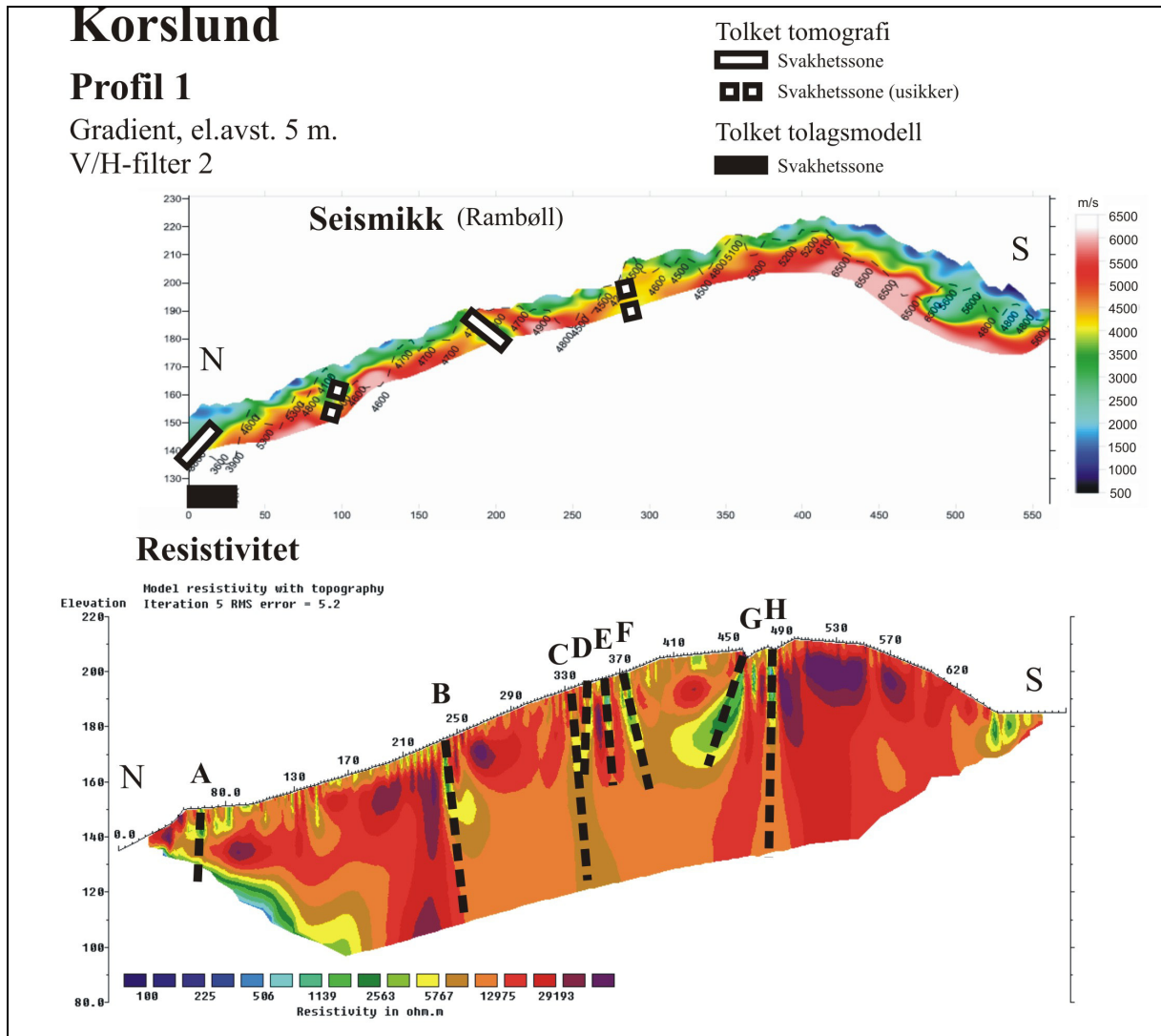
Figur 22: Sammenstilling av resistivitet og seismiske tolkninger ved Ørbekk.

Sone	Koord.	UTM koordinater		Tolkning resistivitet					Tolkning seismikk		Kommentar
	Res.-profil	Øst	Nord	Fall	A, Dybde	B, Bredde	C, Res.	Leir-sone	Hastighet (m/s)	Bredd (m)	
A	60	623402	6700776	Steil sør	4?	1	4	Mulig			Utenfor seismikkprofil.
B	185	623398	6700750	Steil sør	4	1	2				Usikker p.g.a IP-effekt.
C	245	623389	6700592	Steil nord	4	1	3				Usikker p.g.a IP-effekt.
D	295	623393	6700549	Steil sør	4	1	4	Mulig	3000 – 4100	20	Sikker ved resistivitet. Sikker ved seismikk.
E	335	623399	6700512	Steil nord	2	1	4	Mulig	4300	?	Sikker ved resistivitet. Ikke ved seismikk.
F	415	623411	6700437	Steil sør	3	1	2				Sikker ved resistivitet. Ikke ved seismikk.
G	460	623415	6700396	Steil nord	4	1	3				Sikker ved resistivitet. Ikke ved seismikk.
H	550	623423	6700308	Steil nord	4?	1	2				Utenfor seismikkprofil.

Tabell 13: Sammenstilling av sikre og usikre svakhetssoner langs Ørbekk-profilen. For klassifisering av resistivitetsrespons, se tabell 1.

4.2.2 Sammenstilling av svakhetssoner Korslund

I figur 23 er alle data fra Korslund-profilen unntatt Heincke's tomografiske inversjon sammenstilt. All informasjon om de enkelte indikerte sonene unntatt de fra seismikken som ble ansett som tvilsomme, er sammenstilt i tabell 14.



Figur 23: Sammenstilling av resistivitet og seismiske tolkninger ved Korslund.

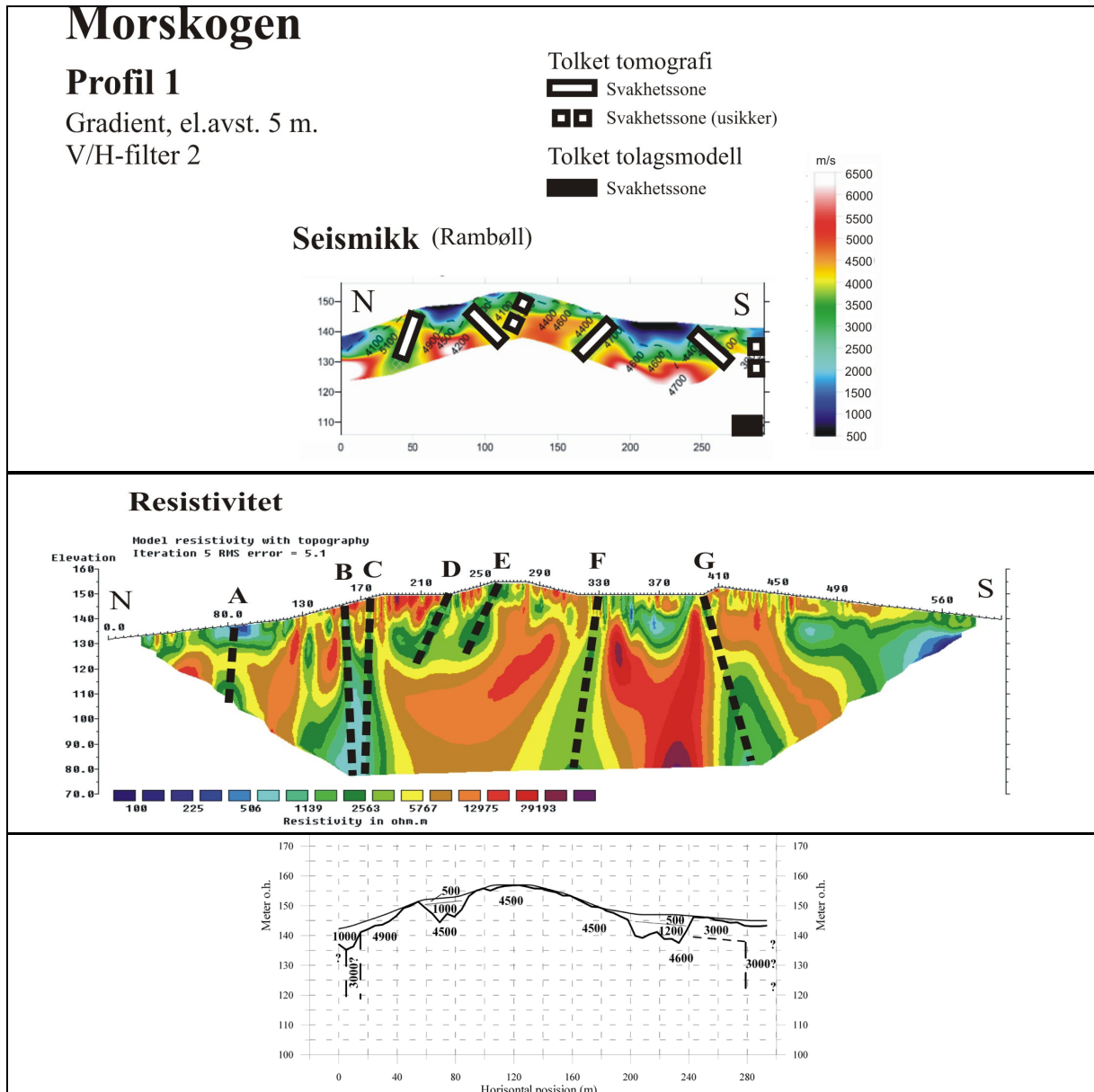
Det er i alt indikert 10 mulige svakhetssoner langs profilene ved Korslund. To av disse sonene er kun indikert som usikre fra seismikken (sone Seis 1 og 2 i tabell 14). Det er indikert 5 soner (B, C, E, G og H) med resistivitet som ikke er indikert med seismikk. Disse 5 sonene har resistivitetsverdier fra ca 1000-3000 ohmm og kan tilsvare oppsprukket fjell som kan være vannførende. Ingen av disse 5 sonen kan følges fra overflaten og til dypet av profilet (figur 23), noe som gjør at de vurderes som mindre problematiske ved en fremtidig tunneldriving. Sone A er påvist med alle metodene, men denne sonen ligger i enden av profilet som gjør at kvaliteten på dataene er varierende. Sone F er påvist med både seismikk og resistivitet, men indikasjonene er noe usikre (tabell 14).

Sone	Koord.	UTM koordinater		Tolkning resistivitet					Tolkning seismikk			Kommentar
	Res.-profil	Øst	Nord	Fall	A, Dybde	B, Brekke	C, Res.	Leir-sone	Hastighet (m/s)	Bredde (m)	Fall	
A	60	623293	6702331	≈ Steil	4?	1	2		2200-3600	20-30	Mot nord	Usikker ved resistivitet, ende av profil. Sikker ved seismikk
Seis1	170								3500-4000 ved tomo, høy ellers.	15 og 25	Mot nord	Ikke ved resistivitet. Usikker ved seismikk.
B	240	623298	6702179	≈ Steil	4	1	2					Klar men svak ved resistivitet. Ikke ved seismikk.
Seis2	260								3200-3500 ved tomo ellers høy.	18-20	Mot sør	Ikke ved resistivitet. Usikker ved seismikk. Forskjøvet 20 m fra B
C	335	623305	6702090	≈ Steil	4	1	1					Klar men svak ved resistivitet. Ikke ved seismikk
D	345	623306	6702080	Steil nord	2	1	1					Klar men svak ved resistivitet. Ikke ved seismikk
E	360	623307	6702066	≈ Steil	2	1	2					Klar men svak ved resistivitet. Ikke ved seismikk
F	375	623309	6702052	Steil sør	3	1	2		2800-3500 ved tomo ellers høy.	30?	Steil mot sør	Klar men svak ved resistivitet. Usikker ved seismikk.
G	465	623330	6701962	Steil nord	3	1	2					Klar men svak ved resistivitet. Ikke ved seismikk
H	480	623334	6701947	Steil nord	4	1	2					Klar men svak ved resistivitet. Ikke ved seismikk

Tabell 14: Sammenstilling av sikre og usikre svakhetssoner langs Korslund-profilen. For klassifisering av resistivetsrespons, se tabell 1.

4.2.3 Sammenstilling av svakhetssoner Morskogen

I figur 24 er alle data fra Morskog-profilen unntatt Heincke's tomografiske inversjon sammenstilt. All informasjon om de enkelte indikerte sonene unntatt de fra seismikken som ble ansett som tvilsomme, er sammenstilt i tabell 15.



Figur 24: Sammenstilling av resistivitet og seismiske tolkninger ved Morskogen.

Sone	Koord. Res- profil	UTM koordinater		Tolkning resistivitet					Tolkning seismikk			Kommentar
		Øst	Nord	Fall	A, Dybde	B, Bredde	C, Res.	Leir- sone	Hastighet (m/s)	Bredd (m)	Fall	
A	85	622977	6709710	Steil nord	4?	2	2					Utenfor seismikkprofil
B	160	622930	6709648	≈ Steil	4	1	3		3000 ved +/- Høy ved tomografi	10	Usikkert	Sikker ved resistivitet. Sikker ved seismikk, noe forskjøvet. Seismikk skiller ikke B og C.
C	175	622920	6709636	≈ Steil	4	1	2		3000 ved +/- Høy ved tomografi	10	Usikkert	Sikker ved resistivitet. Sikker ved seismikk, noe forskjøvet. Seismikk skiller ikke B og C.
Seis1	210								3200-3500 ved tomo, ellers høy.	12?	Mot nord	Ikke ved resistivitet. Usikker seismikk. Samme fall som D, men 20 m forskjøvet.
D	230	622889	6709589	Mot nord	1	1	2					Sikker ved resistivitet. Grunn. Ikke ved seismikk. Forskjøvet 10 m fra Seis 2 og motsatt fall.
Seis 2	240								2800-3500 ved tomo ellers 4500	10 og 30	Mot sør	Ikke ved resistivitet. Usikker ved seismikk. Forskjøvet 10 m fra D og motsatt fall.
E	275	622867	6709550	Mot nord	1	1	2		2800-3800 ved tomo ellers 4500	10 og 30	Mot nord	Sikker ved resistivitet. Usikker ved seismikk. Forskjøvet 10 m. Samme fall.
F	330	622851	6709500	Steil nord	4	1	2				Mot nord	Sikker ved resistivitet. Usikker ved seismikk. Samme fallretning. Noe forskjøvet
G	395	622844	6709438	Steil sør	4	1	2		2000- 3500 ved tomo ellers høy	10 og 24	Mot sør	Sikker ved resistivitet. Usikker ved seismikk. Samme fallretning og posisjon
Seis3	430 - 450								3000-3500	20	Usikker	Ikke ved resistivitet. Sikker ved seismikk.

Tabell 15: Sammenstilling av sikre og usikre svakhetssoner langs Morskog-profilen. For klassifisering av resistivitetsrespons, se tabell 1.

Langs Morskog-profilen er det totalt indikert 10 svakhetssoner. Sone A ligger utenfor seismikkprofilen og gir bare indikasjon på resistivitetsdata. Sonene B, C, E, F og G gir alle respons på både resistivitet og seismikk. Sonene F og G anses som usikker ved seismikk, men bekreftes altså ved resistivitetsmålingene. Sone D indikeres bare på resistivitetsdata, men dette kan godt være samme sone som Seis 2. Fallet på disse to går imidlertid i hver sin retning. Sonene Seis1 og Seis3 er tolket som henholdsvis usikker og sikker på seismikken men gir ingen respons ved resistiviteitsprofilen.

4.3 Vurdering av metodene

Modellering av responser fra forskjellige sprekkesonemodeller har vist at resistivitetsmetoden har mulighet til å vise hvor dypt sonene går, hvor brede de er og hvilket fall de har (Reiser et al. 2009). Tilsvarende modellering av refraksjonsseismikk har vist at denne metoden kan ha store begrensninger når det gjelder å følge sonen mot dypet (Westerdahl 2003). Her ble en 10 meter dyp grøft i fjelloverflaten tolket som en svakhetszone. Forfatterne kjenner ikke til at det er gjort noe forsøk på seismisk modellering der en ser på sprekkesoners fall.

Ved undersøkelsen som her rapporteres har vi tolket sonenes bredde både ved refraksjonsseismikken og resistivitetsdata. Ved resistivitetsmålingene kan det enkelte ganger være vanskelig å få et klart uttrykk for bredden, noe som kan skyldes gradvise overganger fra massivt fjell, via ulike grader av oppsprekning til en forkastningskjeve av nedknust leirholdig materiale (Braathen og Gabrielsen 2000). Seismikkdata har vist til dels store avvik i tolkingen av sonenes bredde (se tabellene 9, 10 og 11), dette til tross for at det er det samme datasettet som ligger til grunn for tolkningene. Det er avvik mellom de tomografiske metodene på en side, og de mer tradisjonelle metodene på den andre siden, GRM-metoden og Hagedoorn's +/-metode. Sistnevnte har i det ene tilfellet vi har kunnet sammenligne vist en smalere sone med lavere hastighet (se figur 17).

Ved refraksjonsseismiske målinger benyttes vanligvis kun bølgenes førsteankomst til geofonen ved tolkingen av data. Dersom en har en markert overgang fra løsmasser til massivt fjell, vil en da i praksis ikke få informasjon om sonenes forløp nedover i fjellet. Dette gjelder da både utstrekning og fall. Modellering har vist at dette er mulig ved resistivitetsmålinger, og spesielt tolking av fall er bekreftet ved flere undersøkelser i felt (Ganerød et al. 2006, Rønning 2003, Rønning m.fl. 2009). I undersøkelsen som her rapporteres har en klare indikasjoner på fall fra resistivitetsdata. En må imidlertid vente på tunneldrivingen, eventuelt boring, for å få en bekreftelse på dette. Det er gjort forsøk på å tolke fall ut fra de tomografiske inversjonene av refraksjonsseismikken, men opptegning av strålebaner viser at dette kan være høyest usikkert. En sammenligning av fall tolket fra resistivitet og seismikk viser noen ganger sammenfall og noen ganger fall i forskjellig retning.

Seismisk hastighet og resistivitetsverdier kan benyttes til å karakterisere svakhetssoner og derved få et begrep om fjellkvalitet. NGU har etablert en tolkingsmodell for resistivitetsdata (Rønning et al. 2009, se også side 9). Modellen er testet med positivt resultat på flere tunneler (Rønning m.fl. 2007, Rønning m. fl. 2009). I undersøkelsen som her rapporteres er modellen benyttet ved tolkingen, men en får selvsagt ikke svar på om modellen kan benyttes før tunnelene drives eller det fortas boring. De seismiske tolkingene har i dette prosjektet vist store sprik når det gjelder seismisk hastighet i sonene. Dette gjelder spesielt mellom de tomografiske inversjonene på den ene siden og tradisjonelle tolkingsteknikker på den andre. Det er imidlertid også et sprik i tolket hastighet i svakhetssonene mellom GRM-metoden og Hagedoorn's +/-metode. Dette viser at det er viktig å vite hvilken tolkingmetode som er benyttet dersom resultatene fra seismikktolkingen brukes i vurdering av fjellkvalitet.

Langs de delene av profilene vi har sammenfall mellom refraksjonsseismikk og resistivitet, har sistnevnte indikert totalt 21 mulige svakhetssoner. Tilsvarende har tolkingen av seismikken med en eller flere av de 4 anvendte teknikkene indikert 12 mulige soner langs de samme linjene. Dersom en kun ser på tradisjonell tolking med Hagedoorn's +/-metode indikeres kun 4 soner. Dette viser at resistivitetsmetoden er mer følsom og kan påvise flere

svakhetssoner. Undersøkelsen viser også at tomografisk inversjon er en mer følsom enn de tradisjonelle seismiske tolkningsmetodene. Ved resistivitetsmålingen har en spesielt langs Korslund-profilen påvist mange soner, men de aller fleste av disse kan karakteriseres som tynne, lite utholdene mot dypet og med liten resistivitetskontrast. Det antas at disse ikke gir nevneverdige problemer ved eventuell fremtidig tunneldriving.

5. KONKLUSJONER

Tolkning av refraksjonsseismiske data samlet inn som en del av forundersøkelsene for samarbeidsprosjekt mellom Statens Vegvesen og Jernbaneverket langs Mjøsa, viste til dels store sprik i resultatene. NGU har, som et ledd i prosjektet Forbedrede Forundersøkelser for Tunneler, retolket data fra tre profiler med to andre teknikker. Metodene som er sammenlignet i denne rapporten er Hagedoorns +/- metode (tradisjonell metode), GRM- metoden (automatisk tolkning) og Tomografisk Inversjon. I tillegg har NGU utført resistivitetsmålinger langs de samme profilene.

En sammenligning av seismiske tolkninger viser at det er relativt godt samsvar i tolkning av løsmassemekthet og seismiske hastigheter i løsmasser og massivt fjell utført manuelt med Hagedoorn's +/-metode og automatiske tolkninger med GRM-metoden. Det er imidlertid noe avvik ved bestemmelse av fjellhastighet knyttet til svakhetssoner i fjell.

Tomografisk inversjon av de samme data viser også godt samsvar innbyrdes, men det er stort sprik i tolkningene når en sammenligner med resultatene fra de andre to metodene (Hagedoorn's +/-metode og GRM-metoden). Avviket kan delvis forklares med forskjellig modellvalg. Ved tomografisk inversjon deles bakken opp i celler og hastigheten i disse beregnes fritt mens de to andre metodene bygger på lagdelte modeller. På grunn av dette kan tomografisk inversjon gi større detaljrikdom. En svakhet med den tomografiske inversjonen er at skarpe hastighetskontraster har en tendens til å komme ut som gradvise overganger, noe som gjør det vanskelig å påvise f.eks. overgangen fra løsmasser til fjell.

Tolkning av seismisk hastighet i svakhetssoner i fjell viser til dels store sprik mellom de forskjellige tolkningsmetodene inklusive Hagedoorn's +/- og GRM-metoden. Dette viser at det er meget viktig å vite hvilken metode som er benyttet dersom seismisk hastighet skal benyttes for tolkning av fjellkvalitet.

Resistivitetsmålinger viser også her at metoden er mer følsom når det gjelder påvisning av mulige svakhetssoner. Innenfor samme strekninger har resistivitetsmålingene indikert i alt 21 sikre og usikre svakhetssoner, mens tilsvarende for seismikken med alle tolkningsmetoder er 12. Dersom en begrenser den seismiske tolkningen til den tradisjonelle Hagedoorn's +/-metode, kommer det fram bare fire svakhetssoner, noe som viser at mer moderne tolknings-teknikker kan være mer følsomme. Det må imidlertid bemerkes at mange av de indikerte sonene ved resistivitetsmålingen fremstår som grunne, relativt tynne soner der resistiviteten ikke er spesielt lav. Disse behøver ikke nødvendigvis gi store problemer ved en fremtidig tunneldriving. Resistivitetsmetoden har større mulighet til å påvise soners dyptgående og fall.

Denne undersøkelsen viser at tomografisk inversjon kan være mer følsom enn tradisjonelle seismiske tolkningsmetoder. Arbeide med uttesting av disse tolkningsteknikkene bør derfor videreføres.

6. REFERANSER

ABEM 1999: ABEM Terrameter SAS 4000/SAS 1000. Instruction Manual. ABEM Printed Matter 93101. ABEM, Sverige.

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

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.

Ganerød, G. V., Rønning, J.S., Dalsegg, E., Elvebakk, H., Holmøy, K., Nilsen, B. and Braathen, A. 2006: Comparison of geophysical methods for sub-surface mapping of faults and fracture zones in a section of the Viggja road tunnel, Norway. Bull. Eng. Geol. Env. (2006) 65: 231 – 243). ISSN: 1435-9529 (Paper) 1435-9537 (Online)

Heincke, B, Maurer, H., Green, A.G., Willenberg, H., Spillmann, T. & Bulini, L. 2006: Characterizing an unstable mountain slope using shallow 2- and 3D seismic tomography. Geophysics 71. B241, B256.

Intelligent Resources Inc. 2009: Seismic Refraction and Crosshole Tomography- Surface Seismic Models for Geotechnical Engineering and Exploration. <http://rayfract.com>

Interpex 2009: IXRefraX. General Reciprocal Method (GRM), refraction seismic interpretation software. www.interpex.com

Loke. M.H. 2007: RES2INV ver. 3.56. Geoelectrical Imaging 2D & 3D. Instruction manual. www.geoelectrical.com.

Palmer, D. 1980a: The Generalized Reciprocal Method of Seismic Refraction Interpretation, SEG, 1980, ISBN 0-931830-14-1.

Palmer, D. 1980b: An introduction to the generalized reciprocal method of seismic refraction interpretation, Geophysics, Vol. 46., No. 11, November 1981, p 1508-1518.

Reynolds 1997: An Introduction to Engineering and Environmental Geophysics. Wiley & Sons, UK.

Rønning, J.S.2003: Miljø- og samfunnstjenlige tunneler. Sluttrapport delprosjekt A, Forundersøkelser. Statens vegvesen, Publikasjon nr. 102.

Rønning, J.S., Olesen, O., Dalsegg, E., Elvebakk, H. & Gellein, J. 2007: Dypforvitring i Oslo-regionen. Påvising og oppfølgende undersøkelser. NGU Rapport 2007.034.

Rønning, J.S., Dalsegg, E., Elvebakk, H., Ganerød, G.V. & Heincke, B.H. 2009: Characterization of fracture zones in bedrock using 2D resistivity. Proceedings from 5th Seminar on Strait Crossings, Trondheim, June 21 – 24 2009, p. 439 - 444 (SINTEF/NTNU).

Rønning, J.S., Dalsegg, E., Heincke, B., Olesen, O. og Tønnesen, J.F. 2009: Geofysiske målinger over tunneler ved Hanekleiv, Ravneheia og Vadfoss. NGU Rapport 2009.040

Sheehan, J.R., Doll, W.E & Mandell, W.A. 2005: An Evaluation of Methods and Available Software for Seismic Refraction Tomography Analysis. JEEG, March 2005, Volume 10, Issue 1, pp. 21–34.

Westerdahl, H. 2003: Seismisk modellering. Modellering av seismiske data over løsmassefylte depresjoner, svakhetssoner og ved kabelheng. Miljø- og samfunnstjenlige tunneler, Rapport 32. Statens vegvesen.

Wisén, R. 2008: Refraksjonsseismiske undersøkelser for fellesprosjektet E6 – Dovrebanen. Rapport datert Juli 2008 fra Rambøll Danmark AS.

TEKSTBILAG 1

UTM-koordinater for de målte resistivitetsprofil.

Tabell 16: Koordinater målt med håndholdt GPS.

WGS-84-32V, UTM-øst	WGS-84-32V, UTM-nord	Profil	Koordinat
623304	6702392	Korslund-P1	0
623285	6702290		100
623296	6702217		200
623301	6702123		300
623311	6702028		400
623340	6701927		500
623368	6701837		600
623380	6701757		700
623413	6700837	Ørbekk-P1	0
623395	6700735		100
623386	6700631		200
623393	6700545		300
623410	6700451		400
623418	6700359		500
623428	6700257		600
623027	6709781	Morskogen-P1	0
622968	6709697		100
622904	6709615		200
622854	6709528		300
622843	6709433		400
622837	6709338		500
622815	6709242		600



NGU OVERSIKTSKART ØRBEKK, KORSLUND OG MORSKOGEN EIDSVOLL OG STANGE, AKERSHUS OG HEDMARK	MÅLESTOKK	MÅLT E.D.	Aug. 2009
	1 : 50 000	TEGN E.D.	Nov. 2009
		TRAC	
		KFR	
NORGES GEOLOGISKE UNDERSØKELSE TRONDHEIM	KARTBILAG NR 2009.064-01	KARTBLAD NR 1915 I/1916 II	



Statens vegvesen

Statens vegvesen Vegdirektoratet
Postboks 8142 Dep
N - 0033 Oslo

Tlf. (+47 915) 02030
E-post: publvd@vegvesen.no

ISSN 1504-5005