



GEOLOGI FOR SAMFUNNET

SIDEN 1858



NORGES
GEOLOGISKE
UNDERSØKELSE
· NGU ·



| | | | |
|---|---|---|-----------------------|
| Rapport nr.: 2016.048 | ISSN: 0800-3416 (trykt) ISSN: 2387-3515 (online) | Gradering: Åpen | |
| Tittel: Retolkning av geofysiske data og sammenligning med resultater fra tunneldriving, Knappetunnelen ved Ringveg Vest i Bergen. | | | |
| Forfatter: Jan S. Rønning, Georgios Tassis, Terje Kirkeby og Morgan Wåle | | Oppdragsgiver: Statens vegvesen Vegdirektoratet / NGU | |
| Fylke: Hordaland | Kommune: Bergen | | |
| Kartblad (M=1:250.000) BERGEN | Kartbladnr. og -navn (M=1:50.000) 1115 I Bergen | | |
| Forekomstens navn og koordinater: Ringveg vest, Bergen 32V 293730 6696910 | | Sidetall: 48 Pris: 150,- Kartbilag: | |
| Feltarbeid utført: 2009 | Rapportdato: 21.07.2016 | Prosjektnr.: 329500 | Ansvarlig: |
| Sammendrag: <p>Refraksjonsseismiske data samlet inn som en del av forundersøkelsene for den 3,8 km lange Knappetunnelen ved Ringveg vest i Bergen, er tolket med tomografisk inversjon hvor en benyttet programmet Rayfract™. Samtidig er resistivetsdata samlet inn av NGU også som en del av forundersøkelsene, reprocessert med ny versjon av programmet Res2DInv. Disse nye data er deretter samtolket med resultater registrert under drivingen av tunnelene.</p> <p>Tomografisk inversjon av refraksjonsseismiske data påvirkes i en viss grad av hva for startmodell som benyttes. I dette arbeidet er en glatt automatisk generert 1D modell og en 2D modell generert semi-automatisk med Rayfract benyttet som startmodell. Analysen viser at 2D startmodell gir et mer nyansert hastighetsprofil, og er å foretrekke. Andre startmodeller bør også testes.</p> <p>Reprocesserte resistivetsdata viser de samme strukturene som ved den opprinnelige prosesseringen, men med avvik på detaljnivå. Kunstig effekt som utvidelse av svakhetszone mot dypet ser ut til å være forbedret, og flere soner viser større utstrekning mot dypet. På grunnlag av reprocesserte data er nye svakhetssoner tolket inn. Det er mulig at den mest markerte sonen skyldes sulfider og/eller grafitt.</p> <p>Sammenligning av forskjellige tolkningsmetoder av refraksjonsseismikk viser at tradisjonelle tolkninger og tomografisk inversjon med både 1D og 2D startmodell i hovedsak viser de samme strukturene. Ved tomografisk inversjon med Rayfract er 2D startmodell å foretrekke. En halvautomatisk tolkning av de samme data med Hagedoorn's plus-minus-metode ved bruk av programmet Rayfract gir ikke så godt resultat, noe som kan skyldes for få skuddpunkt og/eller mindre fokus på tolkningen da dette skulle benyttes som startmodell ved den tomografiske inversjonen.</p> <p>Resultatene fra tunneldrivingen viser store variasjoner i bergmassekvaliteten mellom de to tunnelene. Dette skyldes delvis at de aktuelle sonene krysser tunneltracéene i meget spiss vinkel, men også at bergmassekvaliteten skifter hurtig over korte avstander. Subjektiv årsak til denne variasjonen synes mindre aktuell.</p> <p>Slik data her ble tolket viser tradisjonelle seismiske tolkningene, den tomografiske inversjonen og resistivetsdata tilnærmet samme treffprosent på svakhetssoner. Semi-automatisk tolkning med Hagedoorn's plus-minus-metode gir et dårligere resultat ved påvising av svakhetssoner. Alle metodene feiler ved påvising av enkelte svakhetssoner, og i noen tilfeller indikeres god bergmassekvalitet i tunnelnivå som svakhetszone.</p> <p>Generelt kan en konkludere med at refraksjonsseismikk og resistivitet utfyller hverandre både når det gjelder påvising av svakhetssoner og karakterisering av disse og begge metodene bør være standard teknikker ved forundersøkelser. Tomografisk inversjon av refraksjonsseismikken fungerer bedre enn ved tidligere undersøkelser langs Mjøsa, men en kjenner lite til hvordan metoden svarer på ulike modeller. Det anbefales derfor å gjøre modellberegninger for å studere dette, og samtidig bør det gjøres forsøk med andre startmodeller ved den tomografiske inversjonen.</p> | | | |
| Emneord: Geofysikk | Refraksjonsseismikk | Resistivitet | |
| Svakhetssoner i fjell | Reprocessering | Tomografisk inversjon | |
| | | Fagrapport | |

Innhold

| | |
|--|----|
| 1. INNLEDNING | 7 |
| 2. TIDLIGERE UNDERSØKELSER RINGVEG VEST..... | 8 |
| 2.1 Geologiske forundersøkelser ved Knappetunnelen..... | 8 |
| 2.2 Geofysiske forundersøkelser..... | 8 |
| 2.3 Oppfølgende ingeniørgeologiske undersøkelser | 11 |
| 2.3.1 Masteroppgave Mari Lie Arntsen..... | 11 |
| 2.3.2 Ingeniørgeologisk oppfølging Knappetunnelen..... | 12 |
| 2.3.3 Motivasjon for repressering av de geofysiske målingene..... | 13 |
| 3. KORT BESKRIVELSE AV PROGRAMMET Rayfract..... | 14 |
| 4. SAMMENLIGNING AV REFRAKSJONSSEISMISKE METODER..... | 15 |
| 4.1 Datagrunnlag for refraksjonsseismikk..... | 15 |
| 4.2 Detaljert beskrivelse av tomografisk inversjon..... | 15 |
| 4.3 Tomografisk inversjon, 1D eller 2D startmodell | 16 |
| 4.4 Tradisjonell tolkning vs. tomografisk inversjon | 17 |
| 5. SAMMENLIGNING AV REFRAKSJONSSEISMIKK, RESISTIVITET OG RESULTATER FRA TUNNELDRIVING | 21 |
| 5.1 Datagrunnlag og repressering av resistivitetsdata..... | 21 |
| 5.2 Samtolkning av geofysiske data og resultater fra tunneldriving..... | 23 |
| 6. DISKUSJON..... | 28 |
| 6.1 Metodiske forhold ved tomografisk inversjon..... | 28 |
| 6.2 Repressering av resistivitetsdata | 29 |
| 6.3 Ingeniørgeologiske forhold | 30 |
| 7. KONKLUSJONER | 32 |
| 8. REFERANSER..... | 33 |
| Vedlegg 1: Korrelasjon av profilnummer, sonenummer og koordinater..... | 36 |
| Vedlegg 2: Plansjer som viser tolkningsresultater..... | 37 |

1. INNLEDNING

I de senere årene har forundersøkelser for tunneler endret seg. Resistivitet er introdusert som en ny metode, og tolkning av refraksjonsseismikk presenteres som tomografisk inversjon. En sammenstilling av ny og gammel tolkning av refraksjonsseismikken har vist sprikende resultater og det stemmer nødvendigvis ikke med resistivitetstolkninger (Rønning m.fl. 2009a). I et samarbeid med Statens vegvesen Vegdirektoratet, i regi av prosjektet Forbedrede forundersøkelser for utbygning tunneler (ForForUT), har NGU sett nærmere på resultater fra Knappetunnelen ved Ringveg Vest i Bergen. Arbeidet er todelt, først sammenlignes forskjellige tolkninger av refraksjonsseismiske data. Dernest blir seismikktolkninger sammenlignet med resistivitetsdata og data registrert under driving av tunnelen.

Tomografisk inversjon av seismiske data er ikke en spesielt ny metode. Selve ordet tomografi stammer fra de greske ordene *Τομος* som betyr skive og *Γραφος* som betyr å skrive, her ment mer å tegne. Lehmann (2007) viser en historisk utvikling av generelle tomografiske beregninger. Den første seismiske tomografistudien mellom borehull ble rapportert av Bios et al (1972). Metoden har vært benyttet for tolkning av seismiske målinger mellom borehull og sjøbunn og mellom to borehull i lang tid i Norge. Etter det forfatterne kjenner til ble tomografisk inversjon først benyttet til tolkning av refraksjonsseismikk på bakken av White (1989). I 1993 ble en lærebok publisert (Iyer & Hirahara 1993). Etter dette nevnes metoden mer og mer i litteraturen, og spesielt etter år 2000 er tomografisk inversjon av refraksjonsseismiske data målt på bakken blitt mye benyttet.

NGU har ved et tilfelle tidligere sammenlignet tradisjonelle tolkninger av refraksjonsseismikk med resultater fra tomografisk inversjon av data (Rønning m. fl. 2009a). Her ble det benyttet tradisjonell tolkning med Hagedoorn's +/- metode (Hagedoorn 1959), automatisk tolkning med GRM-metode (Palmer 1980), tomografisk inversjon med egenutviklet rutine (Heincke et al. 2006) og tomografisk inversjon med kommersiell programvare Rayfract (Rayfract 2016a). Ved denne undersøkelsen var ikke data fra tunneldriving tilgjengelig. Ved Knappetunnelen foreligger nå data fra tunneldrivingen slik at en i tillegg til metodiske studier kan korrelere geofysiske anomalier (seismiske hastigheter og resistivitet) med hva disse skaper av problemer ved tunneldrivingen.

Georgios Tassis ved NGU har utført tomografisk inversjon av refraksjonsseismiske data samlet inn av Geophysix og reprocessert resistivitetsdata samlet inn av NGU tilbake i 2009. Morgan Wåle ved Geophysix har tolket refraksjonsseismikken med tradisjonelle teknikker. Terje Kirkeby fra Statens vegvesen Vegdirektoratet har foretatt ingeniørgeologiske observasjoner under tunneldrivingen og sammenstilt disse. Jan S. Rønning ved NGU har sammenstilt resultatene fra alle tolkninger, og foretatt en evaluering av metodene.

2. TIDLIGERE UNDERSØKELSER RINGVEG VEST

Knappetunellen er en del av Ringveg Vest i Bergen. Den starter ved Sandeide i sør og går under Kanadaskogen til Liavatnet i nord og er på 3,8 km. Tunnelen er bygd med to løp med tverrsnitt T9,5 med to kjørefelt i hver retning. Avstand mellom senterlinjer varierer fra 20 til 23 meter. I tillegg ble det bygd av- og påkjøringsramper ved Sandeidet. Total tunnallengde ble med dette 8325 m.

2.1 Geologiske forundersøkelser ved Knappetunnelen

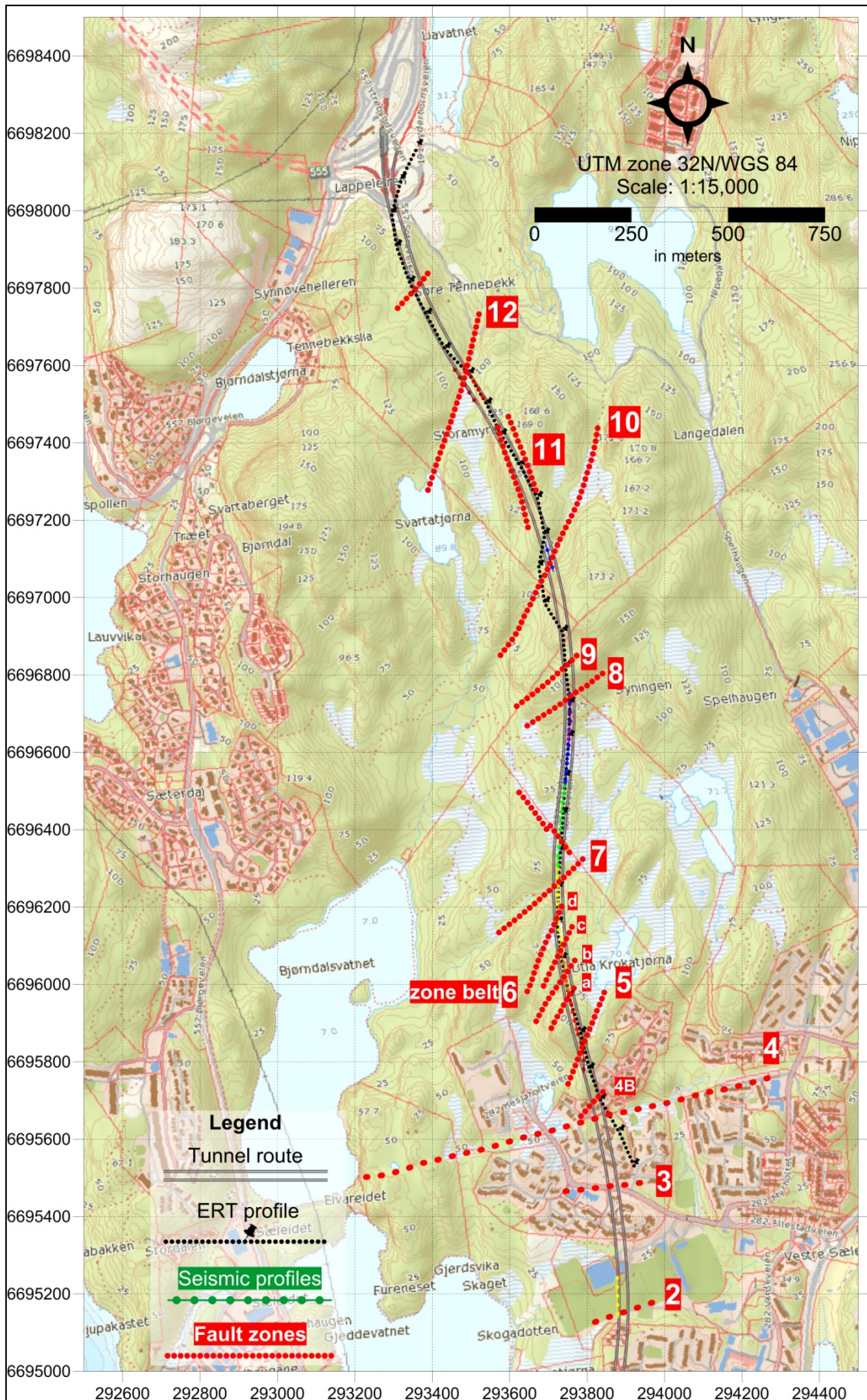
Bergrunnen ved Knappetunnelen er sammenstilt og beskrevet av Fossen (1989) og Fossen & Ragnhildstveit (1997). Hele tunnelen går gjennom prekambriske gneiser kalt Øygarden gneiskompleks som består av to komponenter: Granittisk gneis og heterogen gneis (granittisk til granodiorittisk). Bergrunnen ble ikke kartlagt i detalj under tunneldrivingen, men det ble rapportert om noe mer nyansert bergrunnsgeologi. I tillegg til forskjellige varianter av gneis (granittisk-, amfibolittisk-, bånd- og glimmergneis) ble det også rapportert amfibolitt i tunnelen (Arntsen 2012).

Som en del av forundersøkelsene utførte Rune Stumo (2002) numerisk modellering av bl.a. bruddnettverk og permeabilitet som sin hovedoppgave ved Universitetet i Bergen. Bruddsystem og spenningsfelt ved tunnelen er bl.a. beskrevet i hovedoppgaven til Guri Venvik nå Ganerød (2003). Jordforsk (senere Asplan Viak) har gjennomført en vurdering av hydrogeologiske forhold langs tunneltraseen og Cowi (2009) anbefalte et overvåkingsprogram for grunnvann i løsmassene. I tillegg har Vegvesenet selv utført ingeniørgeologisk kartlegging som en del av forundersøkelsene (Kirkeby 2010). Mulige svakhetssoner fra denne kartleggingen er vist i Figur 1.

2.2 Geofysiske forundersøkelser.

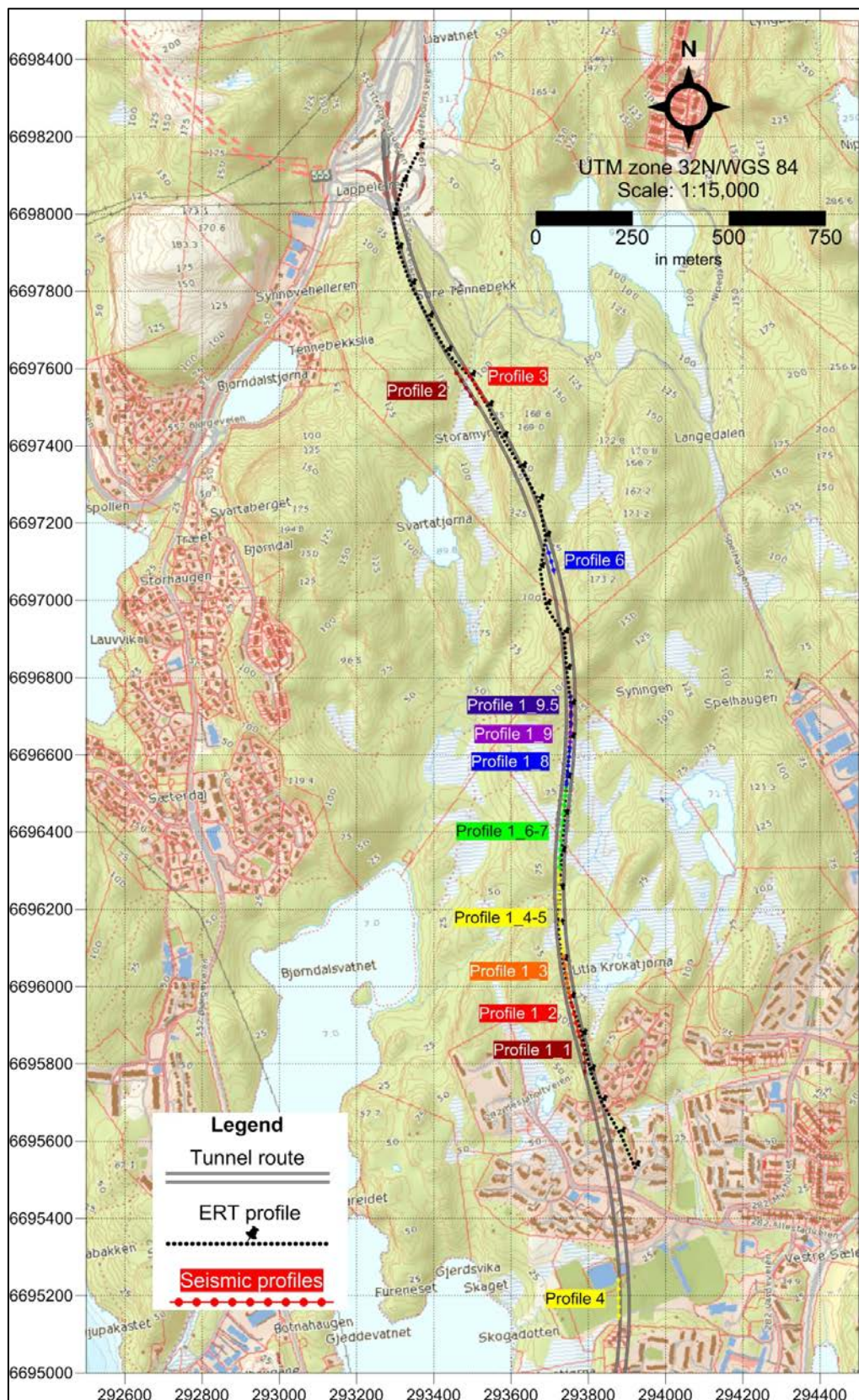
Planleggingen av Knappetunnelen ved Ringveg Vest i Bergen har gått over flere år, og rekke undersøkelser er foretatt. Størst betydning for arbeidet som her rapporteres er refraksjonsseismiske målinger foretatt av Geophysix i juni 2009 (Wåle 2009) og resistivetsmålinger utført av NGU også i juni 2009 (Ganerød m. fl. 2009). Resistivetsmålinger utgjør totalt 3 km mens refraksjonsseismikken til sammen (P1/09, P2/09, P3/09 og P6/09) utgjør 1440 meter. Det ble også utført refraksjonsseismikk i 2010 (Wåle 2010), data som ikke er benyttet i denne rapporten.

For å gjøre en rask undersøkelse langs størstedelen av tunnelen er det benyttet en elektrodeavstand på 10 meter ved resistivetsmålingne, noe som gir en begrenset oppløsning. All refraksjonsseismikk er skutt med geofonavstand 5 meter og skuddavstand 20 meter. For å kunne utføre tomografisk inversjon av de refraksjonsseismiske data må ikke skuddavstanden overstige 6 ganger geofonavstanden (30 meter), aller helst 3 ganger geofonsavstanden (15 meter, Rayfract 2016b). Ut fra dette burde data fra Knappetunnelen være gode nok for tomografisk inversjon. For mer utfyllende informasjon om målingenes utførelse, datakvalitet og tolkningsrutiner, se opprinnelige rapporter (Wåle 2009, Ganerød et al. 2009).

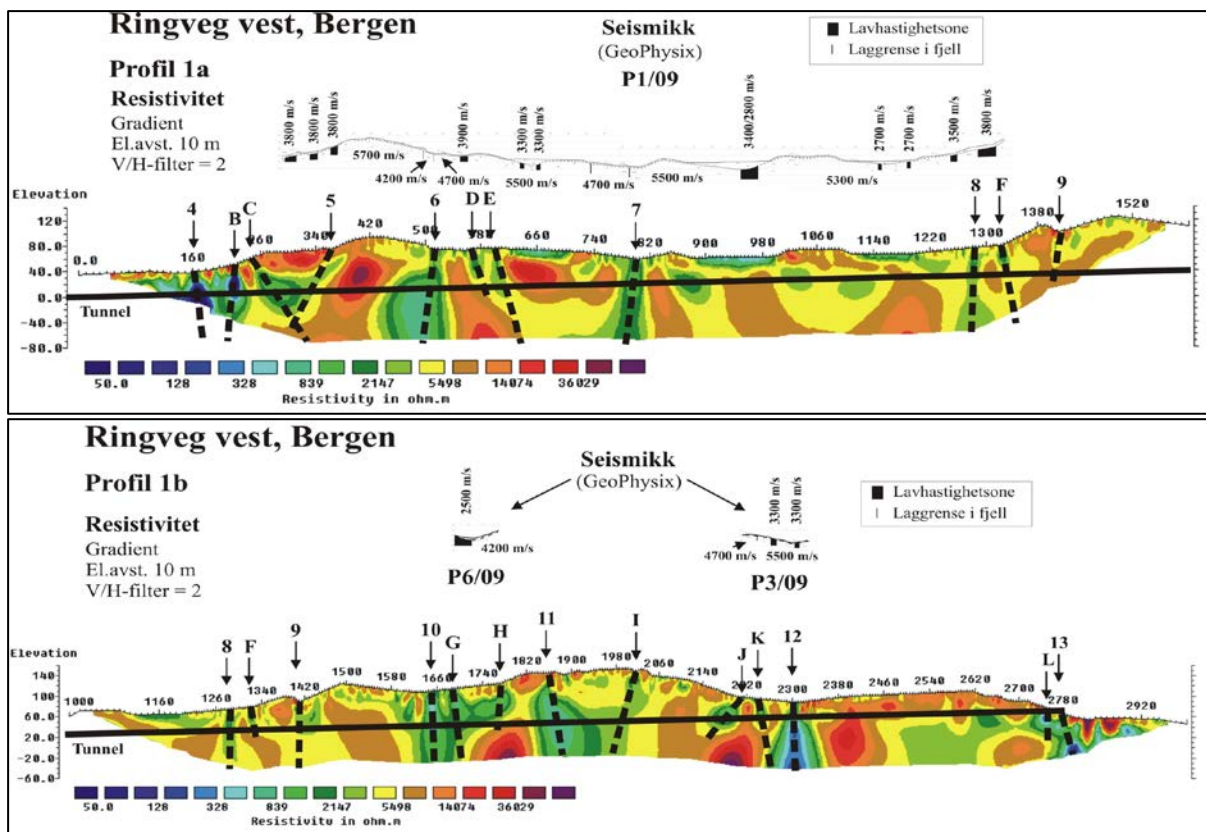


Figur 1: Geologiske kartlagte svakhetszoner ved forundersøkelser for Knappetummelen, Ringveg vest i Bergen (fra Kirkeby 2010).

Plasseringen av seismiske profiler og resistivitetsprofilen ved Knappetunellen i Bergen er vist i Figur 2. De opprinnelige resultatene fra disse undersøkelsene er sammenstilt i figur 3.



Figur 2: Seismiske profiler (flere farger) og resistivitetsprofil (sort farge) langs Knappetunellen ved Ringveg vest i Bergen.



Figur 3: Resultater fra refraksjonsseismikk og resistivitet langs store deler av Knappetunnelen i Bergen (Fra Ganerød m. fl. 2009). Mulige svakhetssoner fra resistivitet er markert med sort stipling. Soner angitt med tall er kartlagt geologisk forut for resistivitetsmålingene. Soner angitt med bokstaver fremkom som nye ut fra resistivitetsdata. Over dette er resultatene fra refraksjonsseismikk presentert tradisjonelt med hastigheter i berg og svakhetssoner som sorte soner.

2.3 Oppfølgende ingeniørgeologiske undersøkelser

Oppfølgende undersøkelser ved Knappetunnelen består i korthet av masteroppgave ved NTNU og en sammenstilling av resultater presentert av Terje Kirkeby på Sv Teknologidagene i 2013.

2.3.1 Masteroppgave Mari Lie Arntsen.

Mari Lie Arntsen (2012) sammenlignet i sin masteroppgave ved NTNU resultater fra forundersøkelsene med ingeniørgeologiske forhold i to tunneler, Eikremtunnelen i Møre og Romsdal og Knappetunnelen ved Ringveg vest i Bergen. Førstnevnte var ferdig drevet da oppgaven ble skrevet, men bare ca. 50 % av Knappetunnelen var drevet ferdig.

Ved de to tunnelene ble det indikert 18 svakhetssoner med resistivitetsmålinger ved de delene som ble undersøkt, men bare 10 ble funnet i tunnelene (Arntsen 2012). Av disse 10 ble 5 påvist bare ved resistivitetsmålinger. Arntsen (2012) kommenterer videre at resistivitetsmetoden har god evne til å karakterisere svakhetssoner med hensyn på vann- eller leirsoner. Denne karakteriseringen viser treff på 8 av 9 soner, og foreslåtte tolkningsmodell fra Lunnertunnelen (Rønning et al. 2009b og 2013a) kan overføres til gneisbergarter på Vestlandet. I følge Arntsen (2012) gir ikke

refraksjonsseismikk ekstra informasjon ut over det resistivitetsmålinger gir. Årsaken til dette er metodens manglende evne til å se nedover i massivt berg, og det settes her lit til hva tomografisk inversjon av refraksjonsseismikk kan gi av ekstra informasjon.

Arntsen konkluderer med at det vil være fornuftig med

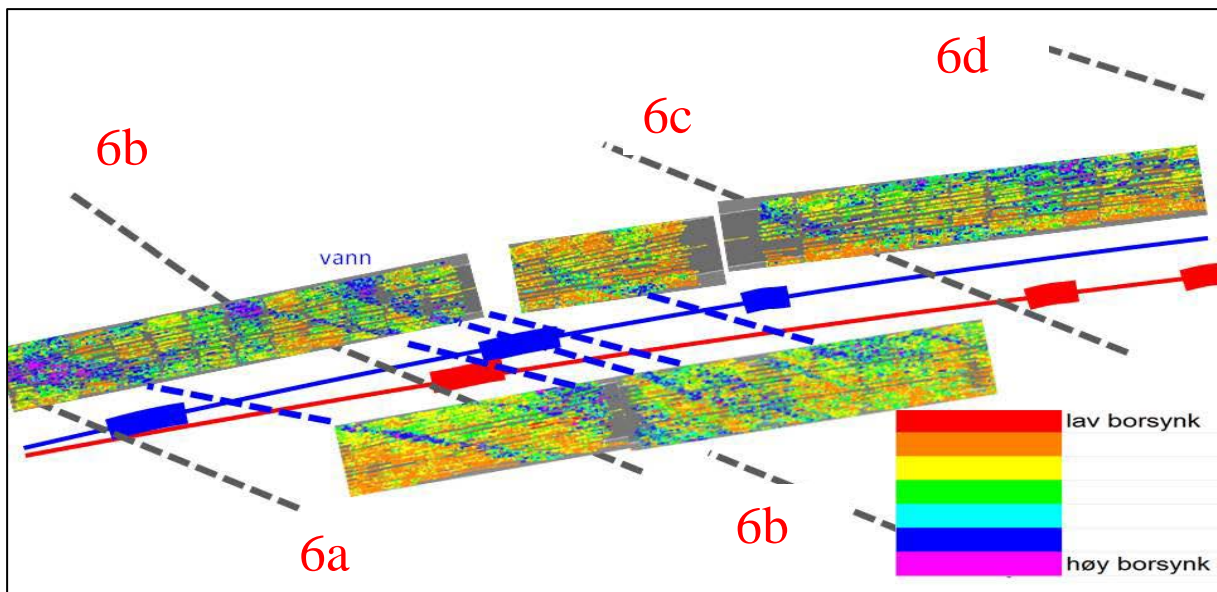
- Parallell bruk av de to undersøkelsesmetodene for å få bedre erfaring med resistivitetsmålinger
- Videre utforskning av mulighetene ved tomografisk inversjon av refraksjonsseismiske data.

2.3.2 Ingeniørgeologisk oppfølging Knappetunnelen

Terje Kirkeby ved Vegdirektoratet har deltatt i planleggingen og fulgt drivingen av Knappetunnelen, og er den som kjenner forundersøkelsene og problemene under tunneldrivingen best. Disse erfaringene ble presentert på Statens vegvesens Teknologidager i 2013 (Kirkeby 2013).

All salveboring ved Knappetunnelen er utført med borerigg som kan registrere boreparametre automatisk (Arntsen 2012). Disse er: Borsynk, matetrykk, rotasjonstrykk, hammertrykk, rotasjonshastighet, vannmengde, vanntrykk og tid. Disse data er tolket og sammenstilt av Bever Control AS og lagt inn i program-systemet NovaPoint. En rask vurdering viste at borsynk presenterte svakhetssoner og soner med tettere oppsprekning best, og denne ble benyttet som indikator ved oppfølgende undersøkelser (Kirkeby 2010).

Figur 4 viser resultater fra forundersøkelser (geologisk kartlegging og tolkede svakhetssoner fra refraksjonsseismikk og resistivitetsmålinger) sammen med borsynk ved sonene 6, a til d (se Figurene 1 og 3). I dette området indikerer både geologisk kartlegging, refraksjonsseismikk og resistivitetstolkningen svakhetssoner, men ikke nødvendigvis på samme sted. På grunn av at sonen krysser tunnellopene i en spiss vinkel blir resultatene svært forskjellige i de to løpene. Forskyvninger fra overflaten og ned til tunnel kan skyldes fall på sonene. Soner som ikke detekteres i tunnel kan være grunne. Soner som påvises ved resistivitet og ikke ved refraksjonsseismikk og visa versa kan skyldes sonenes karakter (enkel oppsprekning vs. oppknusning, soner med og uten leire). Kort sagt, årsak til respons ved de forskjellige metodene er et sammensatt problem.



Figur 4: Eksempel på sammenstilling av resultater fra forundersøkelser (sonene 6 a til e i Figur 1) og borsynk som fargekodet bilde. Grå stiplet linje viser geologisk kartlagt sone, blå linje med utbuling viser resistivetsprofil med svakhetssone, rød linje med utbuling viser refraksjonsseismikk med svakhetssone og blå stiplet linje indikerer sammenheng mellom høy borsynk i de to tunnellopene (modifisert fra Kirkeby 2013).

Kirkeby konkluderte sitt foredrag med:

- Kan sammenligne feltkartlegging, refraksjonsseismikk og resistivitet med driving av en flere km lang to-løps tunnel som krysser et ti-talls forventete svakhetssoner.
- De største sonene er påvist ved alle metoder, om enn ikke alltid helt på samme sted.
- Både resistivitet og seismikk indikerer flere mindre soner som ikke sees verken i tunnel eller på feltkartleggingen.
- Ikke alltid overensstemmelse mellom metodene, seismikk kan varsle en sone, resistiviteten ikke, og visa versa.
- Grundig feltkartlegging/terrenganalyse gir mest, men både resistivitet og seismikk gir viktig tilleggsinformasjon, særlig i tilfelle overdekning/bebyggelse.
- Problemer å finne mindre soner, men det kunne ikke feltarbeide heller.
- Stadig utviklingspotensiale.

2.3.3 Motivasjon for repressering av de geofysiske målingene

Både Arntsen (2012) og Kirkeby (2013) kunne konkludere med at de geofysiske målingene som ble foretatt under forundersøkelsene for Knappetunnelen var viktige og gav nyttig informasjon for planleggingen. Det er ikke alltid overensstemmelse mellom de geofysiske metodene, de stemmer ikke alltid med den geologiske kartleggingen, og da heller ikke med resultater kartlagt under tunneldrivingen. Etter at forundersøkelsene ble gjennomført er prosesseringsrutinene for resistivitet blitt oppdatert, refraksjonsseismisk tomografi er blitt en mer vanlig metode å presenter de refraksjonsseismiske data på. Det er derfor interessant å foreta en repressering av resistivetsdata og samtidig gjøre en tomografisk inversjon av refraksjonsseismikken og sammenholde dette med erfaringer høstet under tunneldrivingen.

3. KORT BESKRIVELSE AV PROGRAMMET Rayfract

Ved det foreliggende studie har NGU benyttet programsystemet Rayfract™ ved den tomografiske inversjonen av refraksjonsseismikken ved Knappetunnelen i Bergen. Et studie av Sheehan et al. (2005) sammenlignet flere kommersielt tilgjengelige inversjonsprogrammer for flere problemstillinger og Rayfract kom gunstig ut av denne testen.

Rayfract™ kan prosessere både P-bølge og S-bølge refraksjons-seismikk og i tillegg borehullsundersøkelser. Programmet er meget avansert og benytter flere tolkningsmetoder for å komme frem til mer eller mindre automatisk genererte 2D hastighetsprofiler. Første versjon (v. 1.3) ble sluppet i 1998, mens versjonen vi har benyttet (v. 3.33) ble gjort tilgjengelig i august 2015. I mellomtiden er programsystemet gradvis blitt bygget ut ved at flere funksjoner er lagt til.

Største fordel med programmet er at hastighetsprofiler kan genereres automatisk så snart førsteankomster legges inn i programmet. Programmet kan også takle bedre reelle geologiske variasjoner som vertikal hastighetsgradient innenfor lag, hastighetsinversjoner (Reynolds 2011), utkiling av lag, forkastninger og hastighetsanomalier (Rayfract 2016b). Om en vil ha mer kontroll med startmodell for inverteringen, kan en benytte tradisjonelle tolkningsteknikker til dette. Noe som kan oppfattes som en ulempe med dette programmet er at hastighetsprofiler presenteres i farger, og dersom en ønsker å tolke hastighet i en svakhetszone må en benytte fargeskalaen for å tolke denne. For å få gode hastighetsprofiler må ikke skuddavstanden være for stor. Ideelt bør det være ett skudd for hver tredje geofon. I noen tilfeller kan ett skudd pr. 6 geofoner aksepteres. Programmet varsler hvis en prøver å tolke kompliserte modeller med for få data.

Ved all inversjon av måledata må en ha en startmodell. Rayfract kan generere en slik startmodell automatisk eller styrt av operatør på flere måter. En kan begynne med en 1D eller en 2D hastighetsmodell som kan være generert ved:

- 1 D Standard glatt inversjon (Rayfract 2016a)
- 1 D Delta-t-v-metoden (Gebrande & Miller 1985)
- 2 D Plus-minus metode (Hagedoorn 1959)
- 2 D Bølgefront (Bruckl 1987, Ali Ak 1990)
- 2 D CMP Intersepttid (Gebrande & Miller 1985, Ruhl 1995)

Bølgefront-metoden kan betraktes som en optimalisert versjon av GRM-metoden (Generalized Reciprocal Method, Palmer 1980). Med utgangspunkt i en av disse startmodellene starter en inversjonsrutine som blir kalt "Wavepath Eikonal Traveltime tomography" (WET, Schuster & Quintus 1993, Watanabe 1999) som genererer 2D hastighetsmodeller. Forlengs modellering av førsteankomster benytter rutiner beskrevet av Lecomte et al. 2000). For presentasjon av hastighetsprofiler benyttes programmet Surfer scripts (Golden software).

4. SAMMENLIGNING AV REFRAKSJONSSEISMISKE METODER

I dette avsnittet beskrives den tomografiske inversjonen av refraksjonsseismiske data mer i detalj, og resultater fra forskjellige tolkningsmetoder sammenlignes. Alle tolkninger er vist i vedlegg 2. Vedlegg 1 viser hvordan disse profilene ligger i forhold til resistivitetsprofil og sonebenevning vist i Figurene 1 og 3.

4.1 Datagrunnlag for refraksjonsseismikk

De refraksjonsseismiske data som her er reprocessert ble samlet inn av Geophysix som en del av forundersøkelsene for tunnelen (Wåle 2009). På oppfordring fra NGU ble det skutt mye tettere enn det som er vanlig nettopp for å kunne gjøre tomografisk inversjon av disse data. Geofonavstand var 5 meter og skuddavstand 20 meter. I tillegg ble det skutt ett fjernskudd 20 – 50 meter på hver side av utlegget. Geofonutleggene var på 115 og 225 meter. Som registreringsinstrument ble ABEM Terraloc Mark-3 og Marc-6 benyttet. Profilene ble detaljert målt inn av vegvesenets egne folk.

4.2 Detaljert beskrivelse av tomografisk inversjon

Ved den tomografiske inversjonen av refraksjonsseismiske data ved Kappetunnelen ble programsystemet Rayfract versjon 3.33 benyttet (Rayfract 2016a). Som nevnt i avsnitt 3, kan flere startmodeller benyttes ved inversjonen. I vårt arbeid ble det benyttet to startmodeller, en automatisk generert 1D modell (vertikal hastighetsgradient) og en 2D modell generert ved Hagedoorn's plus-minus-metode (Hagedoorn 1959). Ved sistnevnte må det foretas en tolkning av knekkpunkt på gangtidskurvene for å kunne beregne en hastighetsmodell. Denne modellen blir senere benyttet ved sammenligning av forskjellige refraksjonsseismiske tolkningsteknikker.

I vårt tilfelle ble det bare bestemt ett knekkpunkt på gangtidskurvene noe som gir en tolagsmodell, i dette tilfellet løsmasser og berg. Det kan maksimalt plukkes to knekkpunkter (trelags-modell). I utgangspunktet gir dette en modell med horisontal laggrense, men ved å redusere på filterbredde tillates programmet å endre på tykkelse og hastighet i første laget, og en 2D modell genereres. Hastigheten i lag to (berghastigheten) bestemmes ved Hagedoorn's minus-metode (Reynolds 2011).

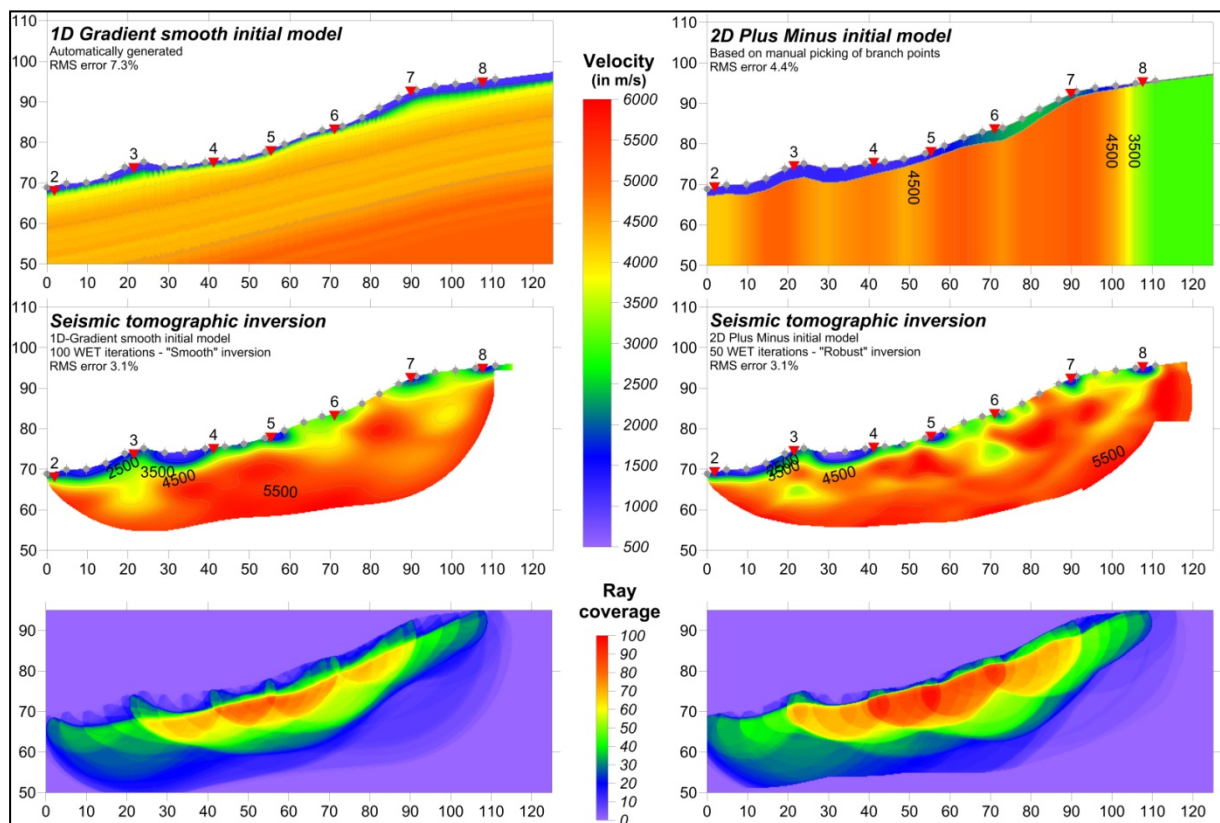
Ved den tomografiske inversjonen av startmodellen benyttes den interaktive WET-tomografien (Wavepath Eikonal Traveltime). Det vi her kaller "standard inversjon" benytter 1D startmodell med vertikal hastighetsgradient og programmets foreslåtte innstillinger (default-verdier). Det foretas 100 iterasjoner (gjentatte beregninger) og en oppnår med dette en glattet hastighetsmodell. Det vi kaller "robust inversjon" benytter 2D-modellen generert ved Hagedoorn's pluss-minus-metode som startmodell. I dette tilfellet endres parametrene i programmet slik at en får en større innflytelse på det endelige resultatet. Dette oppnås bl.a. ved å kjøre færre iterasjoner (mindre glatting). Det kan også legges begrensninger på endring av hastighet for hver iterasjon, og en kan redusere glattingen av data (for eksempel etter hver 5. iterasjon i stedet for etter hver iterasjon) eller en kan legge på andre glattingsfiltre (Gaussian i stedet for et uniformt filter). Disse parametrene ble variert individuelt ved inversjonen av de enkelte refraksjonsseismiske profiler. Generelt kan en si at det ble gjort færre iterasjoner (50), lavere bølgestrålefrekvens og begrenset glatting.

4.3 Tomografisk inversjon, 1D eller 2D startmodell

Eksempel på inverterte data med 1D glatt startmodell og 2D startmodell generert med pluss-minus-metoden er vist i figur 5. Dette er første del av P1/09 (Wåle 2009) også vist i Vedlegg 2 side 1.

1D startmodell genereres automatisk av programmet og viser en gradvis økning av hastigheten mot dypet med svært liten lateral variasjon i tykkelser. Det er vanskelig å se hvilke hastigheter som ligger i modellen på grunn av delvis liten oppløsning i fargeskalaen. Trolig varierer hastigheten fra ca. 500 m/s til opp mot 5500 m/s. Rent intuitivt kan denne modellen synes feil siden en her er på jakt etter laterale variasjoner i berghastigheten. Det inverterte bildet viser imidlertid tre forsenkninger med lavere hastighet som kan representere svakhetssoner i berget. Blå hastigheter på toppen (2000 m/s og lavere) indikerer noe løsmasser. Siden hastigheten øker gradvis mot dypet er det vanskelig å fastslå med sikkerhet hvor overgangen til berg ligger.

Stråledekningen viser flest stråler sentralt i profilet (opp mot 80-90 stråler pr. piksel) og dette burde garantere for sikker beregning av hastigheter. I ytterkantene er dekkningen dårligere (50 stråler pr. piksel og lavere).



Figur 5: Eksempel på inversjon med forskjellig startmodell, profil 1.1 Ringveg Vest. Startmodell (øverst), invertert hastighetsmodell (midten) og stråledekning (nederst) for 1D startmodell til venstre og 2D startmodell fra pluss-minus-metoden til høyre. Vertikal akse utgjør høyde over havet.

2D startmodell generert med Hagedoorn's plus-minus-metode viser laterale variasjoner i de to lagene (både hastighet og tykkelse) og det er en mye skarpere overgang fra det som tolkes som løsmasser (lag 1) og berg (lag 2). Dette er naturlig siden operatør i dette tilfellet manuelt har tolket knekkpunkt på gangtidskurvene, og

derved lagt begrensninger på den automatiske genereringen av startmodell. Den tomografisk inverterte modellen i midten til høyre får igjen en glidende overgang til høyere hastigheter, noe som gjør det vanskeligere å lese ut løsmassenes tykkelse. De tre mulige svakhetssonene i berg (ved posisjonene 25, 75 og 105) er mer utpreget enn ved 1D startmodell, og bl.a. er hastigheten i sonene lavere (ca. 3000 m/s). Ingen av sonene går særlig dypt (maksimum ca. 15 meter) og sonene lukkes med høye hastigheter i nedre del av profilet. Tunnelen ligger på ca. høydekote 0 m.o.h., ca. 65 meter dypere. En legger også merke til at det opptrer lag med lavere hastighet nede i profilet noe som ved tradisjonell tolkning ikke kan avdekkes (hastighetsinversjon, Reynolds 2011).

Sonenes dybderekkevidde sammenfaller i hovedsak med største stråledekning og maksimal dybderekkevidde ligger på ca. 25 meter. Det er uklart om en større skuddavstand til side for utlegget kunne øke dybderekkevidden.

I hovedtrekk er de to hastighetsprofilene fra 1D og 2D startmodell like, men det fremkommer klart flere detaljer på den tomografiske inversjonen med 2D startmodell.

4.4 Tradisjonell tolkning vs. tomografisk inversjon

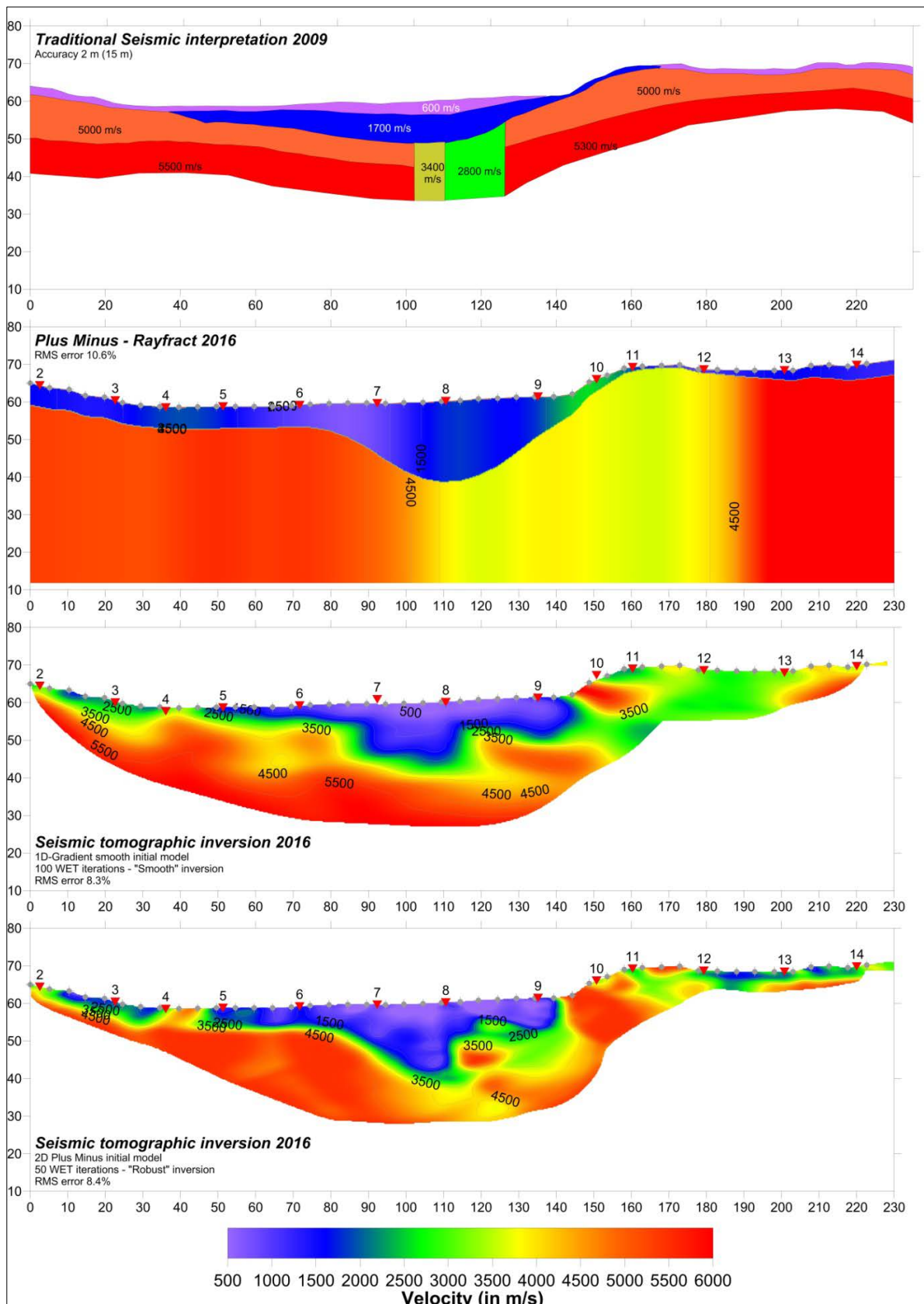
Figur 6 viser et eksempel på tolkning av refraksjonsseismisk profil der 4 forskjellige metoder er benyttet. Profilet er en del av P1/09 (utlegg 6 og 7, se Vedlegg 2 side 5) som er tolket manuelt med Hagedoorn's plus-minus-metode (også kalt Sjögrens ABC-metode) av Morgan Wåle ved Geophysix. De tre andre tolkningene er utført med programmet Rayfract. Automatisk tolkning med Hagedoorn's plus-minus-metode er den samme som 2D startmodell ved tomografisk inversjon. De to siste tolkningene er tomografisk inversjon med 1D (automatisk generert) og 2D (Hagedoorn plus-minus) startmodell.

Den tradisjonelle tolkningen av data vist øverst i figur 6 (Wåle 2009) er kun tillagt farger med samme fargeskala som for de automatiske tolkningene. Profilet viser to hastighetslag i løsmassene (tørre masser med hastighet 600 m/s og morene/vannmettede masser med hastighet 1700 m/s). Under dette finnes et lag med hastighet 5000 m/s over et fjerde lag med hastighet 5300 m/s. De to siste tolkes gjerne som noe oppsprukket berg (dagberg eller dagfjell) over massivt berg, begge med god bergmassekvalitet. Midt på profilet indikeres en todelt svakhetszone med hastigheter 3400 og 2800 m/s.

Ved automatisk plus-minus-tolkning fremstår løsmassene som tykkere med laterale variasjoner fra ca. 500 opp mot 2000 m/s. At en her bare har tolket ett løsmasselag gjør at tykkelsen av dette blir større. Generelt er hastigheten i berg større enn 5000 m/s, men med en langt bredere svakhetszone med hastigheter fra 4000 m/s (gul) ned mot 3500 (lys grønn). En merker seg at den ca. 25 meter brede sonen med hastigheter 2800 og 3400 m/s på den manuelle tolkningen er blitt 80 meter bred og med hastighet fra ca. 3500 til 4000 m/s ved automatisk tolkning med samme metode.

Som for profil 1.1 vist i Figur 5 (og Vedlegg 2 side 1) viser den tomografiske inversjonen av profil P1/09 i Figur 6 de samme strukturene uansett om det benyttes 1D eller 2D startmodell. Sistnevnte er imidlertid mer detaljert og representerer trolig et mer sant hastighets-profil, og her stikker en mulig svakhetszone dypere enn når

profilen inverteres med 1D startmodell. En sammenstilling av resultater fra de fire forskjellige tolkningene er vist i tabell 1. Resultatene sammenstilles med observasjoner fra tunneldrivingen i neste kapittel.



Figur 6: Forskjellig tolkning av refraksjonseismisk profil P1/09 utlegg 6 og 7 fra Geophysix (data fra Wåle 2009, se også Vedlegg 2 side 5).

Tolkning av svakhetssoner ved tomografisk inversjon er en subjektiv operasjon. Fargeplottene vist i Figur 6 gir ikke klare signaler om overgang fra løsmasser til berg. En ser heller ingen klare lavhastighetssoner som strekker seg mot dypet og som klart indikerer svakhetssoner. Områder langs profilene der lav hastighet viser klar nedbøyning tolkes som svakhetszone, som for eksempel mellom posisjon 90 og 115 i profilet vist i figur 6.

Tabell 1 viser at tradisjonell tolkning av refraksjonsseismikk ser i alt 20 mulige svakhetssoner langs de undersøkte profilene. Ved den automatiske tolkningen med Pluss-minus-metoden indikeres 12 soner mens det ved de to tomografiske inversjons-metodene er mulig å tolke 20 (1D startmodell) og 26 (2D startmodell). Det kan ut fra dette se ut som at de to sistnevnte er tilnærmet like god som tradisjonelle tolkninger, men at den automatiske pluss-minus-tolkningen er noe dårligere. Data spriker imidlertid noe mer enn dette. Det er mange soner som ses av tradisjonell tolkning men ikke ved de tre andre metodene og visa versa. Dette er forsøkt visualisert i tabell 2. Her er antall soner sett med en metode plottet vertikalt mens en horisontalt har antallet som sees med de andre metodene. Diagonalen viser totalt antall soner sett med metoden.

| Sees med: | Ses også med: | | | |
|------------------|------------------|----------------|--------------|--------------|
| Metode | Tradisjonell +/- | Automatisk +/- | Tomografi 1D | Tomografi 2D |
| Tradisjonell +/- | 20 | 11 | 11 | 13 |
| Automatisk +/- | 12 | 12 | 9 | 12 |
| Tomografi 1D | 10 | 8 | 20 | 18 |
| Tomografi 2D | 13 | 10 | 18 | 26 |

Tabell 2: Antall mulige svakhetssoner som ses med de forskjellige tolkningsmetodene og hvor mange av disse som ses med de andre metodene.

Ut fra tabell 2 ser vi at av de 20 sonen som indikeres med tradisjonelle tolkninger blir 11 sett med automatisk pluss-minus tolkninger, 11 med tomografisk inversjon med 1D startmodell og 13 med 2D startmodell. På den andre side, av de 26 sonene som indikeres med tomografisk inversjon og 2D startmodell, ses 13 med tradisjonell tolkning, 10 med automatisk +/- og 18 med tomografisk inversjon med 1D startmodell. Dette viser at tomografisk inversjon kan være noe mer detaljert enn tradisjonelle tolkninger, men også at de forskjellige tolkningsmetodene viser respons på forskjellige soner. Spørsmålet blir da hvordan så dette ut i tunnelnivå?

Siden tomografisk inversjon med 1D startmodell viser tilnærmet det samme som tomografisk inversjon med 2D startmodell, benyttes sistnevnte ved den videre analyse.

| Identifikasjon, ID nr. | Vedlegg nr. / side | Posisjon Meter langs profil | Res-sonese Figur 1, + RETOLK | Trad.tolk V (m/s) / Bredder (m) | Auto Plus-minus V (m/s) / Bredder (m) | Tomo 1D V (m/s) / Bredder (m) | Tomo 2D V (m/s) / Bredder (m) | Kommentar |
|------------------------|--------------------|-----------------------------|------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|
| 1 | 2 / 1 | 5 - 20 | C? | 3800 / 15 | - | < 3000 / 10 | < 3000 / 10 | Tomo noe forskjøvet mot nord |
| 2 | 2 / 1 | 40 - 50 | | 3800 / 10 | 4500 / ? | - | - | Ingen respons på Tomo |
| 3 | 2 / 1 | 70 - 80 | 5 | 3800 / 10 | - | < 4000 / ? | < 3500 / 10 | Grunn ved Tomo-1 og -2 |
| 4 | 2 / 1 | 105 - 125 | | - | < 3500 / 20 | < 4000 / 15 | < 4000 / ? | Tomo-2 fall mot sør? |
| 5 | 2 / 2 | 60 - 70 | | - | - | < 4000 / 5 | < 3500 / 10 | |
| 6 | 2 / 2 | 92 - 106 | | 4200 / 14 | 4000-4500 / 20 | < 4000 / 10? | ??? | Ende av profil usikker på Tomo |
| 7 | 2 / 2 | 106 - 115 | | 4700 / 9 | - | - | - | Auto plus-minus samme som 6 |
| 8 | 2 / 3 | 0 - 15 | 6? | - | - | < 2000 / ? | < 3500 / ? | Usikker, ende av profil |
| 9 | 2 / 3 | 20 - 30 | 6? | - | - | < 2000 / ? | < 3500 / ? | Klar men grunn på Tomo |
| 10 | 2 / 3 | 40 - 50 | | 3900 / 10 | ≈ 4500 | < 4000 / ? | < 3500 / ? | Forskjøvet mot sør ved Tomo |
| 11 | 2 / 3 | 50 - 60 | | - | - | < 4000 / ? | < 3500 / ? | Klar men grunn på Tomo |
| 12 | 2 / 3 | 75 - 85 | D | - | - | < 3500 / 10 | < 3500 / 10 | Klarest på Tomo-2 |
| 13 | 2 / 3 | 95 - 100 | E? | - | - | - | < 3500 / ? | Grunn. Usikker, ende av profil |
| 14 | 2 / 4 | 60 - 80 | 7 | - | - | < 4000 / ? | < 4000 / ? | Diffus og usikker |
| 15 | 2 / 4 | 90 - 110 | Ny? | - | - | - | ≈ 2000 / 15 | Kan være kunstig effekt. |
| 16 | 2 / 4 | 110 - 165 | Ny? | 4700 / 55 | < 4500 / 20 | ? | < 3500 / ? | Tomo-2 forskjøvet mot nord og grunn |
| 17 | 2 / 5 | 102 - 125 | Ny? | 3400-2800 / 23 | 3500-4000/80 | < 3000 / 30 | < 3000 / 25 | Tvilsom ved +/-, Grunn v/ Topo-1 |
| 18 | 2 / 6 | 77 - 82 | | 2700 / 5 | - | - | - | |
| 19 | 2 / 6 | 117 - 122 | | 2700 / 5 | - | - | < 4000 / ? | Tvilsom ved Tomo-2, ende av profil |
| 20 | 2 / 7 | 12 - 18 | | 2700 / 6 | < 4000 / 15 | < 3500 / 10 | < 3500 / 10 | Samme som ID 19 forskjøvet mot sør. |
| 21 | 2 / 7 | 30 - 40 | | - | - | - | < 3500 / 8 | |
| 22 | 2 / 7 | 60 - 70 | 8? | 3500 / 10 | - | < 3500 / 10 | < 3500 / 15 | Grunn på Tomo-1, klar på Tomo-2, |
| 23 | 2 / 8 | 0 - 15 | | 4500 / 15 | - | < 3000 / 15 | < 3000 / 15 | ID 20 forskjøvet ved Tomo? Usikker |
| 24 | 2 / 8 | 15 - 25 | 8? | 3500 / 10 | - | - | - | Samme som ID 22 |
| 25 | 2 / 8 | 53 - 78 | F? | 3800 / 25 | 3500 -4200/35 | < 3500 / 15 | < 3500 / 15 | Tvilsom ved +/-, Fall mot nord? |
| 26 | 2 / 9 | 0 - 30 | Ny? | 4200 / 30 | - | - | - | Svakhetszone ? |
| 27 | 2 / 9 | 50 - 62 | K? | 3000 / 12 | < 4500 / 15 | - | - | Tomo diffus |
| 28 | 2 / 9 | 105 - 115 | | - | - | < 3500 / 10 | < 3500 / 7 | Usikker, ende av profil |
| 29 | 2 / 10 | 0 - 25 | K | 4000 / 25 | - | - | < 4000 / ? | Tomo-2 diffus |
| 30 | 2 / 10 | 30 - 40 | | - | - | < 3500 / 10 | < 4000 / 10 | Diffus ved Tomo |
| 31 | 2 / 10 | 50 - 60 | | 3300 / 10 | - | - | - | |
| 32 | 2 / 10 | 90 - 98 | 12 | 3300 / 8 | > 4500 | < 4000 / ? | < 3500 / 10 | |
| 33 | 2 / 11 | 0 - 30 | G | 2500 / 30 | 3500 / 35 | ?? | < 4000 / 40 | |
| 34 | 2 / 11 | 30 - 90 | H | 4200 / 60 | 3000 / 30 | 3800 / 15 | < 4000 / 10 | |
| SUM | Alle | | | 20 | 12 | 20 | 26 | |

Tabell 1: Oversikt over indikerte svakhetssoner ved fire forskjellige inversjoner av samme refraksjonsseismiske data. "Vedlegg/side" refererer til vedlegg i denne rapporten. "Posisjon" refererer til posisjon i plottene slik de presenteres i vedlegg 2. Sonenavn refererer til opprinnelige sonenavn slik de ble presentert av NGU i 2009 (Figur 1, Ganerød m. fl. 2009). Trad. Tolk = Tradisjonell tolkning, Auto plus-minus = Automatisk Hagedoorn-tolking, Tomo 1D og 2D er henholdsvis tomografisk inversjon med 1D og 2D startmodell. Manglende respons er angitt med (-).

5. SAMMENLIGNING AV REFRAKSJONSSEISMIKK, RESISTIVITET OG RESULTATER FRA TUNNELDRIVING

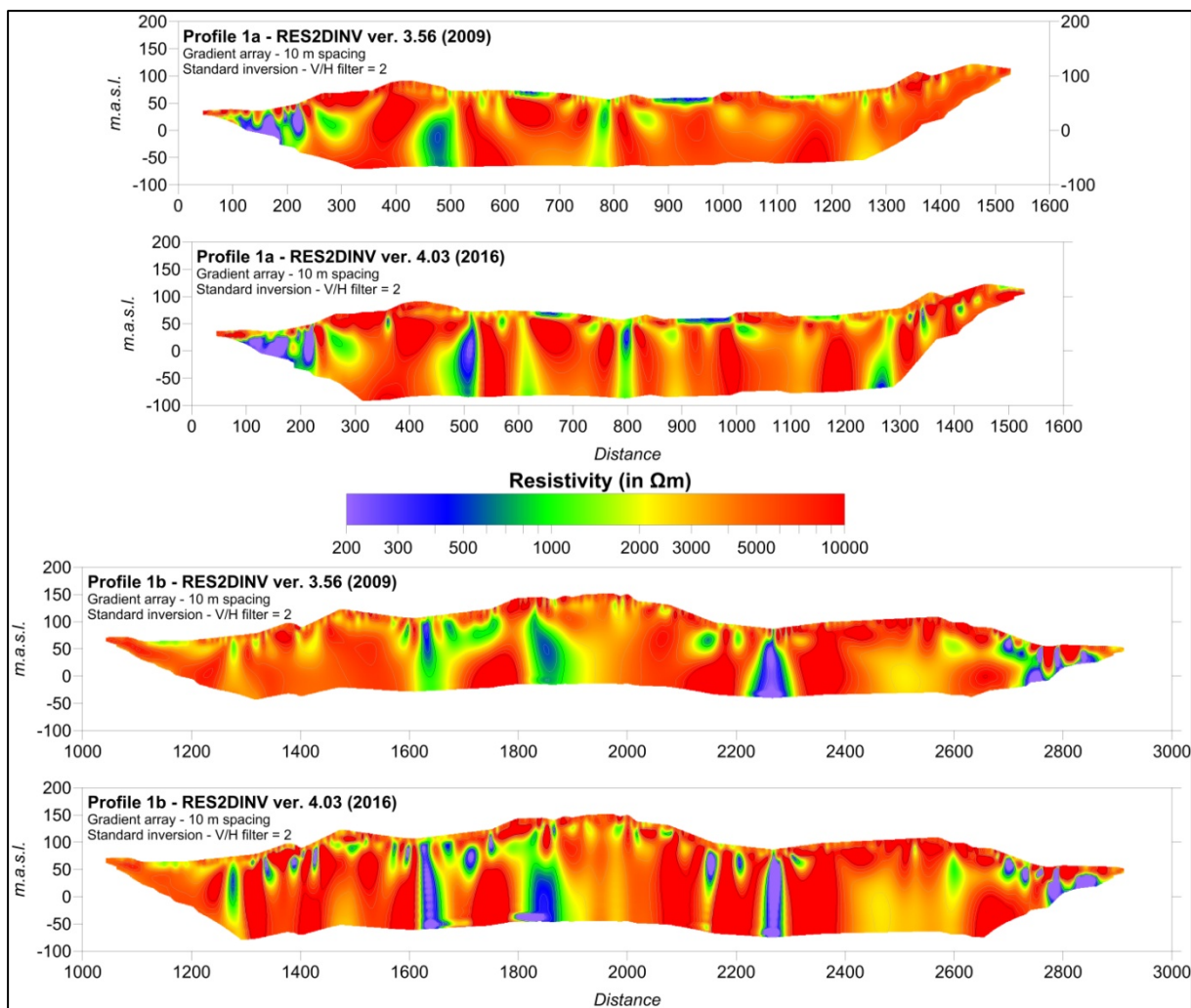
I dette kapitlet presenteres reprocesserte resistivitetsdata, og disse blir sammenholdt med resultater fra refraksjonsseismiske tolkninger og tunneldriving.

5.1 Datagrunnlag og reprocessing av resistivitetsdata.

Resistivitetsdata som benyttes i den videre analyse ble samlet inn av NGU i 2009 (Ganerød m.fl. 2009). Her ble Lund-systemet (Dahlin 1993) og ABEM Terrameter 4000 og elektrodevelger ABEM ES10-64 benyttet (ABEM 1999). Elektrodeavstanden var 10 meter og det ble benyttet Multi-Gradient elektrodekonfigurasjon. Data-kvaliteten var meget god.

Resistivitetsdata ble opprinnelig invertert ved bruk av programmet Res2DInv versjon 3.56 (Loke 2007). For å se om oppgradert versjon av dette programmet gir endringer i resistivitetsbildet, ble måledata i dette prosjektet reprocessert med Res2DInv versjon 4.03.32 (Loke 2014). Ved denne reprocessingen ble samme rutine og filtrering benyttet som ved først prosessering (Standard inversjon og vertikal-/horisontalfilter, V/H = 2). Nytt resistiviteitsprofil er vist sammen med det opprinnelige profilet i Figur 7, her med annen fargeskala enn opprinnelig brukt (se Figur 3). Profilet er delt i to av prosesseringstekniske grunner. Reprocessingen viser de samme strukturene som i opprinnelige prosessering, men med mindre avvik i detaljer.

Modellering har vist en kunstig effekt ved at vertikale strukturer blir bredere mot dypet (Reiser et al. 2009). Med den nye programversjonen kan det se ut som om denne kunstige effekten er redusert (se bl.a. ved koordinat 2280). Samtidig ser en at enkelte soner blir mer utholdende mot dypet (ved koordinat 1650).



Figur 7: Opprinnelig og repossert resistivetsprofil ved Knappetunellen (data fra Ganerød m.fl. 2009).

5.2 Samtolkning av geofysiske data og resultater fra tunneldriving

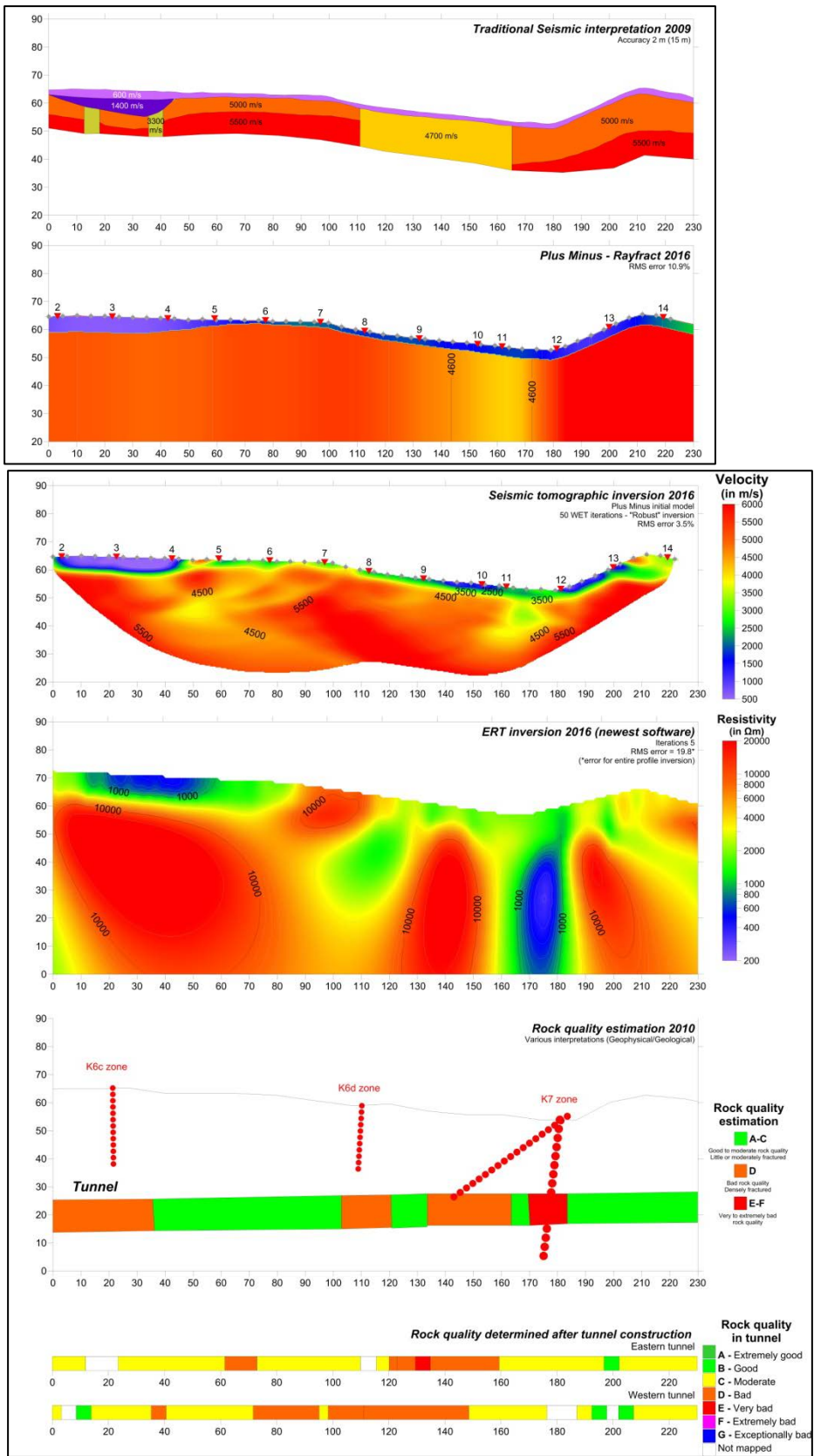
Som et eksempel på hva de forskjellige metodene viser i forhold til resultater fra tunneldrivingen har vi valgt det opprinnelige profilet P1/09 utlegg 4 og 5 (Wåle 2009).

Ved starten av denne delen av refraksjonsseismisk profil P1/09 utlegg 4 og 5 (Figur 8) viser den manuelle tolkningen to smale soner ca. 5 meter bredde, begge med hastighet 3300 m/s. Disse fanges ikke opp av den automatiske pluss-minus-tolkningen og heller ikke av resistivitetsmålingene. Tomografisk inversjon med 2D startmodell viser uregelmessigheter, men ingen klar svakhetssone som kan gå ned til tunnelnivå ca. 20 m.o.h.. Resultatene fra tunneldrivingen viser en ca. 5 meter bred sone med dårlig bergmasse i vestre tunnel. Denne faller sammen med den andre sonen med hastighet 3300 m/s. Den første sonen ligger i et område med god til moderat bergmassekvalitet og her indikerer tradisjonelle tolkninger feilaktig en svakhetssone.

En ca. 55 m bred sone med hastighet 4700 m/s vil i utgangspunktet kanskje ikke bli tolket som spesielt problematisk. Denne sonen gir en viss respons på automatisk pluss-minus tolkning, tomografisk inversjon og meget sterkt på resistivitet, dog noe forskjøvet. Tunneldrivingen viste dårlig og delvis meget dårlig bergmasse i begge tunnelene i dette området. Reprosessering av resistivitetsdata indikerer en mulig ny sone her (ved koordinat 125 med fall mot sør) og det kan se ut som markert sone ved koordinat 175 kommer ut med feil fall.

En kan ut fra det som er vist i Figur 8 konkludere med at de forskjellige metodene viser sprikende resultater, men at de samlet gir klare signaler på dårlig bergmasse.

Tilsvarende analyse er utført på de øvrige data, og dette er sammenstilt i tabell 3. Påvist sone med dårlig bergmassekvalitet som faller innenfor en avstand på +/- 15 meter fra påvist plassering fra geofysikken regnes som treff. Dette for å ta hensyn til usikkerheter i tolkningen av sonenes fall, og samtidig være innefor rekkevidde for sonderboringer på stoff.



Figur 8: Tolket refraksjonsseismikk (tradisjonell, automatisk pluss-minus, tomografisk inversjon med 2D startmodell) reprocessert resistivitet, foreslått bergartskvalitet på grunnlag av forundersøkelser og bergkvalitet basert på kartlegging i tunnel, profil P1/09 utlegg 4 og 5 (se også Vedlegg 2 side 4).

| Identifikasjon, ID nr. | Vedlegg nr. / side | Posisjon. Meter langs profil | Res-sonese Figur 1, + RETOLK | Trad.tolk. seis V (m/s) / Bredde (m) | Auto Plus-minus V (m/s) / Bredde (m) | Tomo 2D V (m/s) / Bredde (m) | Resistivitet Ohmm / Bredde (m) | Bergmassekvalitet / Kommentar |
|------------------------|--------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------|--------------------------------|---|
| 1 | 2 / 1 | 5 - 20 | C? | 3800 / 15 | - | < 3000 / 10 | ≈ 1000 / ? | Dårlig i begge tunneler |
| 2 | 2 / 1 | 40 – 50 | | 3800 / 10 | 4500 / ? | - | - | Dårlig i vestre tunnel ID 3 tolket til å falle mot denne |
| 3 | 2 / 1 | 70 – 80 | 5 | 3800 / 10 | - | < 3500 / 10 | < 1000 / 10 | Dårlig østre tunnel |
| 4 | 2 / 1 | 105 – 125 | | - | < 3500 / 20 | < 4000 / ? | - | God / moderat i begge tunneler |
| 5 | 2 / 2 | 60 – 70 | | - | - | < 3500 / 10 | - | God / moderat i begge tunneler |
| 6 | 2 / 2 | 92 – 106 | | 4200 / 14 | 4000–4500 / 20 | ??? | < 1000 / 14 | Dårlig i vestre tunnel Res-sonese 6 faller mot denne |
| 7 | 2 / 2 | 106 – 115 | | 4700 / 9 | - | - | < 1000 / 14 | Dårlig i vestre tunnel Res-sonese 6 faller mot denne |
| 8 | 2 / 3 | 0 – 15 | 6? | - | - | < 3500 / ? | < 600 / 15 | God/moderat begge tunneler |
| 9 | 2 / 3 | 20 – 30 | 6? | - | - | < 3500 / ? | < 2000 / 15 | Moderat begge tunneler |
| 10 | 2 / 3 | 40 - 50 | | 3900 / 10 | ≈ 4500 ? | < 3500 / ? | - | Dårlig vestre tunnel |
| 11 | 2 / 3 | 50 – 60 | D? | - | - | < 3500 / ? | < 2000 / ? | Dårlig i begge tunneler |
| 12 | 2 / 3 | 75 - 85 | D | - | - | < 3500 / 10 | ≈ 1500 / 20 | Dårlig i begge tunneler |
| 13 | 2 / 3 | 95 – 100 | E? | - | - | < 3500 / ? | < 3000 / ? | Dårlig i begge tunneler Feil fall på Res-sonese E? |
| 14 | 2 / 4 | 60 – 80 | Ny? | - | - | < 4000 / ? | < 3000 / ? | Dårlig i begge tunneler Ny sone faller mot sone i tunnel |
| 15 | 2 / 4 | 90 - 110 | Ny? | - | - | - | ≈ 2000 / 15 | Dårlig i vestre tunnel |
| 16 | 2 / 4 | 110 – 165 | 7 | 4700 / 55 | < 4500 / 20 | < 3500 / ? | < 800 / 30 | Dårlig i begge tunneler Feil fall på Res-sonese 7? |
| 17 | 2 / 5 | 102 – 125 | Ny? | 3400-2800 / 23 | 3500-4000/80 | < 3000 / 25 | ≈ 2000 / 20 | Dårlig < 5 m østre tunnel Feil fall på ny Res-sonese? |
| 18 | 2 / 6 | 77 – 82 | | 2700 / 5 | - | - | - | Moderat i begge tunneler |
| 19 | 2 / 6 | 117 – 122 | | 2700 / 5 | - | < 4000 / ? | - | Dårlig i vestre tunnel |
| 20 | 2 / 7 | 12 – 18 | | 2700 / 6 | < 4000 / 15 | < 3500 / 10 | - | Dårlig i vestre tunnel |
| | 2 / 7 | 30 - 40 | | | - | < 3500 / 8 | - | Moderat i begge tunneler |
| 21 | 2 / 7 | 75 – 85 | 8? | 3500 / 10 | - | < 3500 / 15 | < 2000 / 15 | Dårlig i vestre tunnel Feil fall på res-sonese 8? |
| 22 | 2 / 8 | 0 – 15 | 8 | 4500 / 15 | - | < 3000 / 15 | < 3000 / 20 | Dårlig i vestre tunnel Feil fall på ny Res-sonese 8? |
| 23 | 2 / 8 | 15 – 25 | 8? | 3500 / 10 | - | - | < 2000 / 10 | Dårlig i vestre tunnel |
| 24 | 2 / 8 | 53 – 78 | F? | 3800 / 25 | 3500 -4200/35 | < 3500 / 15 | < 2000 / 10 | Dårlig i vestre tunnel |
| 25 | 2 / 9 | 0 – 30 | K? | 4200 / 30 | - | - | < 500 / ? | Dårlig i vestre tunnel |

| | | | | | | | | |
|-----|--------|-----------|-----|-----------|-------------|-------------|------------|---|
| | | | | | | | | God/moderat i østre tunnel |
| 26 | 2 / 9 | 50 - 62 | 12? | 3000 / 12 | < 4500 / 15 | - | < 200 / 20 | God vestre tunnel Dårlig i Østre tunnel Feil fall på sone 12? |
| 27 | 2 / 9 | 105 – 115 | | - | - | < 3500 / 7 | | God bergmasse i begge tunnelene |
| 28 | 2 / 10 | 0 – 25 | K? | 4000 / 25 | - | < 4000 / 3 | < 500 / ? | Dårlig i vestre tunnel God/moderat i østre tunnel |
| 29 | 2 / 10 | 30 - 40 | | - | - | < 4000 / 10 | - | God/moderat i begge tunneler |
| 30 | 2 / 10 | 50 – 60 | 12? | 3300 / 10 | - | - | < 200 / 20 | God vestre tunnel Dårlig i Østre tunnel Feil fall på sone 12? |
| 31 | 2 / 10 | 90 - 98 | 12 | 3300 / 8 | - | < 3500 / 10 | < 200 / 20 | God/moderat i begge tunnelene |
| 32 | 2 / 11 | 0 - 30 | G | 2500 / 30 | 3500 / 35 | < 4000 / 35 | < 200 / 20 | Dårlig i østre tunnel |
| 33 | 2 / 11 | 30 - 90 | H | 4200 / 60 | 3000 / 30 | < 3500 / 10 | < 200 / 5 | God i begge tunneler |
| SUM | Alle | | | 20 | 11 | 22 | 22 | |

Tabell 3: Oversikt over indikerte svakhetssoner ved tre forskjellige inversjoner av samme refraksjonsseismiske data og resistivitet sammenholdt med resultater fra tunneldriving. "Vedlegg/side" refererer til vedlegg i denne rapporten. "Posisjon" refererer til posisjon i plottene slik de presenteres i vedlegg 2. Sonenavn refererer til opprinnelige sonenavn slik de ble presentert av NGU i 2009 (Figur 1, fra Ganerød m. fl. 2009). Trad. Tolk. Seis = Tradisjonell tolkning Hagedoorn, Auto plus-minus = Automatisk Hagedoorn-tolkning, Tomo 1D og 2D er henholdsvis tomografisk inversjon med 1D og 2D startmodell. Manglende respons er angitt med (-). Merk: ID 19 og 20 samt 26 og 30 er samme sone noe som er tatt hensyn til i oppsummeringen.

I tabell 4 gis en oppsummering av resultatene vist i tabell 3. Tabellen uttrykker antall soner med dårlig bergmasse som ses ved de forskjellige metodene, antall soner dårlig bergmasse som ikke ses med metodene og antall soner med god bergmasse men som vises feilaktig som svakhetssone.

Ved denne sammenstillingen er det ikke tatt noe hensyn til sonenes bredde og dårlig bergmasse i ett eller to tunnellop telles likt. Sone med indikert seismisk hastighet mindre enn 4500 m/s og resistivitet mindre enn 3000 Ωm blir registrert som svakhetssone.

Inversjonen av resistivitetsdata ble tvunget til å vise vertikale strukturer ($V/H = 2$). Dersom en har benyttet filter $V/H=1$, er det mulig at enkelte soner kunne vært indikert med fall. Dette gjelder sonene E, 7, 8 og 12. Data ble derfor reprocessert med $V/H=1$ og det samme fallet indikeres på disse fire sonene.

| Metode | Trad-tolk +/- | Auto +/- | Tomo-2D | Resistivitet |
|-------------------------------|---------------|----------|---------|--------------|
| Dårlig bergmasse sett av | 17 | 6 | 16 | 18 |
| Dårlig bergmasse ikke sett av | 5 | 16 | 7 | 4 |
| God bergmasse vist som sone | 2 | 2 | 7 | 2 |

Tabell 4: Oversikt over påvist bergmassekvalitet i tunnel og respons de forskjellige geofysiske metodene gir angitt som antall enheter (se teksten for detaljer).

Tabell 4 viser at de tre metodene tradisjonell seismisk tolkning, tomografisk inversjon med 2D startmodell og resistivitet viser respons på et tilsvarende antall soner med dårlig bergmasse, mens den automatiske tolkningen med Hagedoorn's pluss-minus-metode gir respons på færre soner. Dessverre er det slik at dårlig bergmasse også ikke blir sett av disse metodene. Resistivitet og tradisjonell seismisk tolkning kommer noe bedre ut enn tomografisk inversjon og også her kommer den automatiske pluss-minus-metoden dårligst ut. Alle metodene unntatt tomografisk inversjon viser få feiltolkninger i form av god bergmasse angitt som svakhetssone. Som en konklusjon kan en si at tradisjonelle tolkninger av refraksjonsseismikk og resistivitet kommer best ut av det på denne testen men tomografisk inversjon kommer like bak. Siden metodene gir respons på forskjellige soner kan en konkludere med at de utfyller hverandre.

6. DISKUSJON

I den påfølgende diskusjonen skilles det på rene metodiske (tomografisk inversjon og resistivitet) og ingeniørgeologiske forhold.

6.1 Metodiske forhold ved tomografisk inversjon

Tomografisk inversjon av refraksjonsseismiske data fra Knappetunellen i Bergen viser et større samsvar med tradisjonelle tolkninger enn det en tidligere har erfart i Norge (Rønning et al. 2009a). Denne undersøkelsen indikerer at valget av startmodell til en viss grad påvirker resultatet. Inversjon med en 2D startmodell, generert med Hagedoorn's pluss-minus-metode, ga bedre samsvar med manuelle tolkninger enn med 1 D automatisk generert startmodell med vertikal hastighetsgradient. Ved tomografisk inversjon av refraksjonsseismiske data for påvising av svakhetssoner bør derfor en 2D startmodell benyttes. Programmet har også tre andre metoder å generere startmodeller på, Delta-t-v (1D-modell) samt bølgefront- metoden og CMP intersept-tid (2D-modeller). Disse tre er ikke testet ved dette arbeidet, men det er av interesse å se hvilket inversjonsresultat disse metoden kan gi.

Startmodellen generert med Hagedoorn's pluss-minus-metode er i prinsippet en fullgod tolkningsmodell, men metoden ga et dårligere resultat sammenlignet med tradisjonelle tolkninger og tomografisk inversjon både med 1D og 2D startmodell. Årsaken til dette kan være for få skuddpunkt. Programmet varslet fra om at det ikke var mulig å legge inn mer enn to lag med de aktuelle data. Det kan også skyldes at den modellen som ble generert skulle benyttes som startmodell for den tomografiske modellen, og at det ikke ble lagt fullt fokus på best mulig tolkning.

Westerdahl (2003) viste ved modellberegninger at fordypninger i løsmassene kunne tolkes som svakhetssoner i fjell ved tradisjonelle refraksjonsseismiske tolkninger. Ved tomografisk inversjon av refraksjonsseismikk kan en i prinsippet ha kontroll på sonenes dyptgående. Den tomografiske inversjonen viser imidlertid generelt relativt liten penetrasjon (se vedlegg 2). Tabell 5 viser en oversikt over tolket dybderekkevidde ved et utvalg av mulige svakhetssoner og bergmassekvalitet i tunnelene ved samme posisjon.

| Profil / posisjon | Tolket sonedybde (m) | Tunnelnivå, meter under bakken | Bergmassekvalitet i tunnelnivå |
|-------------------|----------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 1.1 / 20 | 15 | 50 | Dårlig / Svært dårlig |
| 1.2 / 60 | 20 | - | God / Moderat |
| 1.3 / 80 | 15 | 50 | Dårlig |
| 1.4-5 / 160 | 25 | 40 | Dårlig / Svært dårlig |
| 1.6-7 / 100 | 25 | 30 | Moderat /Dårlig i tynn sone |
| 1.8 / 40 | 15 | - | God bergmasse |
| 1.9 / 70 | 10 – 15 | 30 - 40 | Dårlig |
| 1.9B / 60 | 20 | 50 | Dårlig |
| 2 / 10 | - | 50 | Dårlig / Svært dårlig |
| 3 / 35 | 15 | 40 | Dårlig |
| 6 / 10 | >20 | 100 | Dårlig |

Tabell 5: Tolket sonedybde ved tomografisk inversjon og bergmassekvalitet ved et utvalg av indikerte soner ved de enkelte profil.

Med unntak av profil 6, som viser lave hastigheter ned til bunn av plottet på 20 meters dyp, er alle de andre mulige svakhetssonene lukket med høye hastigheter i bunnen av plottene. Svakhetssonene strekker seg ned til fra 15 til 25 meter, mens det er påvist dårlig og til dels svært dårlig bergmassekvalitet i tunnelene på større dyp. Dette viser at en kan ha dårlig fjell på et større dyp selv om den tomografiske inversjonen viser lukking av svakhetssonene på et gitt dyp. Ved to tilfeller stemmer begrenset dybderekkevidde for svakhetssonene med god bergmassekvalitet i tunnelene dypere ned.

Tomografisk inversjon bygger på at hastigheten i massene øker nedover mot dypet, også i berg. I Norge hvor vi har hatt erosjon av isbreer kan en ofte gå direkte fra lavere seismiske hastigheter i løsmassene og direkte til høye hastigheter i berg (5000 – 6000 m/s). Ved slike tilfeller får en kritisk refraksjon av bølgestrålene og førsteankomst ved hver geofon har fulgt overflaten av berget (Reynolds 2011). Dette gir liten eller ingen informasjon i berget og mulighetene til å se svakhetssoners utstrekning mot dypet og fall blir begrenset. Tidligere modelleringer har vist at resistivitetsmetoden ikke har de samme begrensningene (Reiser et al. 2009).

Presentasjon av hastighetsprofiler med fargekodede seksjoner kan virke som en svakhet ved tomografisk inversjon. Overgang fra løsmasser til berg må tolkes inn i en hastighetsgradient uttrykt i farger. Dette er ikke alltid like lett. Det samme gjelder identifiseringen av hastighet i svakhetssonene. I Norge er det god tradisjon i å evaluere bergkvalitet ut fra P-bølgehastighet. Westerdahl (2003) viste at en kan komme i skade for å feiltolke forsenkinger i bergoverflaten med svakhetssoner i berg som er åpen mot dypet. På den andre siden er det vist at de hastigheter som presenteres ved tradisjonelle tolkninger sier noe om bergkvalitet. Ved en studie fra ROGSFAST-tunnelen ble det påvist en meget klar korrelasjon mellom seismiske hastigheter i soner målt på sjøbunnen og Q-verdi beregnet på kjerneprøver fra de samme sonene (Gjelsnes & Eidesen 2013). Barton (2007) presenterer en kvantitativ sammenheng mellom P-bølgehastighet, Q-verdi og bergmassekvalitet. For å kunne omsette seismisk hastighet til Q-verdi og bergmassekvalitet trengs eksakte hastigheter i svakhetssonene. Ved å tolke hastighet ut fra en fargeskala kan en kvalitative vurdering av bergmassekvalitet bli noe tilfeldig.

For å få en bedre forståelse av hvordan tomografisk inversjon av refraksjons-seismiske data fungerer, må det foretas modellberegninger som viser hvordan responsen fra forskjellige modeller fremstår ved tomografisk inversjon.

6.2 Reprosessering av resistivitetsdata

Ved innsamlingene av resistivitetsdata ble det fokusert på stor dybderekkevidde og elektrodeavstand på 10 meter ble valgt. For å kunne øke oppløsningen langs profilet burde det vært benyttet kortere elektrodeavstand (5 meter), men da hadde dybderekkevidden blitt tilsvarende redusert. For å løse dette dilemmaet burde en hatt kabler med samme lengde (200 meter) men med halvert elektrodeavstand, noe som selvsagt ville fordyre undersøkelsen.

Reprosessering av resistivitetsdata (standard inversjon med V/H-filter = 2) med nyere versjon av programmet Res2DInv (Loke 2014) viser de samme strukturene som opprinnelige prosessering, men med avvik på detaljnivå. Kunstig effekt som utvidelse av sone mot dypet synes å være redusert, og enkelte soner har fått større dybderekkevidde. Reprosesseringen har gjort det mulig å tolke inn flere svakhetssoner, og disse faller sammen med dårlig bergmasse i tunnelnivå.

Både ved den opprinnelige prosesseringen og reprosesseringen har en benyttet en filtrering som favoriserer vertikale strukturer (V/H=2). Under analysen ble det antydnet at dette kunne tvinge soner med et vist fall til å bli vertikale. En reprosessering med det samme filteret satt lik 1 viser ingen klare endringer, og de aktuelle sonene (E, 7, 8 og 12) blir fremdeles vertikale.

Modellering har vist at godt ledende løsmasseoverdekke (leire) kan hindre strømmen å gå dypt slik at en ikke får informasjon fra berggrunnen (Reiser et al. 2009). Resistiviteten i løsmassene over Knappetunnelen har ikke så lavt resistivitetsnivå at dette burde være noe problem.

Den mest markerte sonen langs det 3 kilometer lange profilet, sone 12, faller ikke sammen med dårlig bergmasse i tunnelnivå (se vedlegg 2 side 9 og 10). Den gir heller ikke respons på refraksjonsseismikken. Resistiviteten i denne sonen er meget lav, < 10 Ω m, og dette er uvanlig for svakhetssoner i berg. Det kan derfor være mulig at denne sonen skyldes sulfider og/eller grafitt. Måling av induert polarisasjon (IP) viser imidlertid ingen markert anomali (Ganerød et al. 2009) og det er heller ikke rapportert om denne type mineraler i tunnelen. Like sør for sonen, 30 meter i østre og 65 meter i vestre tunnel er det påvist dårlig og til dels svært dårlig bergmasse. Feil i indikert fall som skyldes inversjon ved å tvinge modellen til vertikale strukturer ble vurdert, men en reprosessering uten favorisering av vertikale strukturer viste samme fall. Sonen strekker seg klart dypere enn tunnelnivå (figur 3, figur 6 og vedlegg2 side 9 og 10), Årsaken til denne meget markerte vertikale sonen er derfor uklar, men en kan ikke se bort fra sulfider og/eller grafitt.

6.3 Ingeniørgeologiske forhold

Figur 1 viser at både refraksjonsseismikken og resistivitetsprofilet i hovedsak følger tunneltracéen. Det er et lite avvik ved refraksjonsseismisk profil 6 (se Figur 1) men ellers kan resultater fra refraksjonsseismikk korreleres med resistivitet og begge disse med hva en registrerte ved tunneldrivingen.

Til tross for at de to tunnelene ligger med senterlinje bare 20 til 23 meter fra hverandre, er det registrert en markert forskjell i bergmassekvalitet. I østre løp består ca. 165 meter tunnelens totale lengde på 3800 m av dårlig eller svært dårlig bergmasse, mens tilsvarende tall for vestre tunnel er 275 meter. Spørsmålet er om dette er reelt eller om det bygger på subjektive vurderinger. Kontrollingeniørene som har vurdert bergmassekvaliteten arbeidet på begge tunnelene mens de var på vakt. Den store forskjellen kan derfor ikke tilskrives en systematisk subjektiv effekt.

Samtolkning av indikerte soner og bergmassekvalitet viste at metodene tradisjonell tolkning av refraksjonsseismikk, tomografisk inversjon av refraksjonsseismikk og resistivitet påviste tilnærmet det samme antall soner med dårlig fjell. I denne

analysen ble det ikke gjort forsøk på å se bredden av svakhetssonene fra geofysikken og påvist dårlig bergmasse i tunnelene. Analysen viser videre at alle metodene kan overse dårlig bergmasse og i tillegg feilaktig indikere god bergmassekvalitet som svakhetssone. Heldigvis er det ikke så mange slike feiltolkninger.

Modellering har vist at en ut fra resistivitetsmålinger kan karakterisere svakhetssoner geometrisk (Reiser et al. 2009). Dette studiet har vist at resistivitet enten angir feil fall eller så påviser metoden svakhetssone feilaktig (sone 12). Sonenes bredde blir også feilaktig angitt. Strekningene med dårlig bergmasse i tunnelnivå er langt bredere enn indikert på målingene, både refraksjonsseismikk og resistivitet. Det kan se ut som sonenes dyptgående kan fungere ved resistivitet, i alle fall er dette korrekt for sone G som på resistivitetsdata går ned til 60 m.o.h. mens tunnelene her ligger på ca. 40 – 50 m.o.h (se vedlegg 2 side 9).

Tradisjonelle tolkninger av refraksjonsseismikk viser klare tall for p-bølgehastigheter i svakhetssoner og litteraturen sier at en ut fra dette kan tolke bergmassekvalitet (Barton 2007, Gjelsnes og Eidesen 2013). I sitt masterarbeid kunne Arntsen (2013) konkludere med at forslåtte tolkningsmodell for karakterisering av svakhetssoner i berg (Rønning et al. 2009b, Rønning et al. 2013a) fungerer også for grunnfjellsbergarter på Vestlandet. Arbeidet som her rapporteres viser at refraksjonsseismikk og resistivitet kan gi respons på forskjellige soner. Dette betyr at disse metodene utfyller hverandre både når det gjelder påvising av svakhetssoner og karakterisering av disse. Forundersøkelser for tunneler bør derfor benytte begge metoder der dette er mulig. Dessverre er det en stor utfordring å benytte resistivitet i marine miljø (Rønning et al. 2013b, Tassis et al. 2014).

I dette studiet har vi fokusert på svakhetssoner. Det som også er viktig er at både refraksjonsseismikk uansett tolkningsprosedyre og resistivitet indikerer god bergmassekvalitet i store deler av tunnelene.

7. KONKLUSJONER

Refraksjonsseismiske data samlet inn som en del av forundersøkelsene for den 3.8 km lange Knappetunnelen ved Ringveg vest i Bergen er tolket med tomografisk inversjon hvor en benyttet programmet Rayfract™. Samtidig er resistivitetsdata samlet inn av NGU også som en del av forundersøkelsene, reprocessert med ny versjon av programmet Res2DInv. Disse nye data er deretter samtolket med resultater registrert under drivingen av tunnelene.

Tomografisk inversjon av refraksjonsseismiske data påvirkes i en viss grad av hva for startmodell som benyttes. I dette arbeidet er en glatt automatisk generert 1D modell og en 2D modell generert semi-automatisk med Rayfract benyttet som startmodell. Analysen viser at 2D startmodell gir et mer nyansert hastighetsprofil, og er å foretrekke. Andre startmodeller bør også testes.

Reprocesserte resistivitetsdata viser de samme strukturene som ved den opprinnelige prosesseringen, men med avvik på detaljnivå. Kunstig effekt som utvidelse av svakhetszone mot dypet ser ut til å være forbedret, og flere soner viser større utstrekning mot dypet. På grunnlag av reprocesserte data er nye svakhetssoner tolket inn. Det er mulig at den mest markerte sonen skyldes sulfider og/eller grafitt.

Sammenligning av forskjellige tolkningsmetoder av refraksjonsseismikk viser at tradisjonelle tolkninger og tomografisk inversjon med både 1D og 2D startmodell i hovedsak viser de samme strukturene. Ved tomografisk inversjon med Rayfract er 2D startmodell å foretrekke. En halvautomatisk tolkning av de samme data med Hagedoorn's plus-minus-metode ved bruk av programmet Rayfract gir ikke så godt resultat, noe som kan skyldes for få skuddpunkt eller mindre fokus på tolkningen da dette skulle benyttes som startmodell ved den tomografiske inversjonen.

Resultatene fra tunneldrivingen viser store variasjoner i bergmassekvaliteten mellom de to tunnelene. Dette skyldes delvis at de aktuelle sonene krysser tunneltracéene i meget spiss vinkel, men også at bergmassekvaliteten skifter hurtig over korte avstander. Subjektiv årsak til denne variasjonen synes mindre aktuell.

Slik data her ble tolket viser tradisjonelle seismiske tolkningene, den tomografiske inversjonen og resistivitetsdata tilnærmet samme treffprosent på svakhetssoner. Semi-automatisk tolkning med Hagedoorn's pluss-minus-metode gir et dårligere resultat ved påvising av svakhetssoner. Alle metodene feiler ved påvising av svakhetssoner, og i noen tilfeller indikeres god bergmassekvalitet i tullenivå som svakhetszone.

Generelt kan en konkludere med at refraksjonsseismikk og resistivitet utfyller hverandre både når det gjelder påvising av svakhetssoner og karakterisering av disse og begge metodene bør være standard teknikker ved forundersøkelser. Tomografisk inversjon av refraksjonsseismikken fungerte bedre enn ved tidligere undersøkelse langs Mjøsa, men en kjenner lite til hvordan metoden svarer på ulike modeller. Det anbefales derfor å gjøre modellberegninger for å studere dette, og samtidig bør det gjøres forsøk med andre startmodeller ved den tomografiske inversjonen.

8. REFERANSER

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

Ali Ak, M. 1990: An analytical raypath approach to the refraction wavefront method. *Geophysical Prospecting*, vol. 38, pp. 971 – 982.

Arntsen, M.L. 2012: Vegtunnelene Eikremtunnelen og Knappetunnelen: Vurdering av refraksjonsseismikk, resistivitetsmålinger og laboratorieundersøkelser som en del av de ingeniørgeologiske undersøkelsene. Masteroppgave ved Teknisk geologi NTNU.

Barton, N. 2007: Rock quality, seismic velocity, attenuation and anisotropy. Taylor & Francis, London 2007, side 92.

Bois, P., LaPorte, M., LaVergne & Thomas, G. 1972: Well-to-well seismic measurements. *Geophysics*, 37, 471 – 480.

Brueckl, E. 1987: The Interpretation of Traveltime Fields in Refraction Seismology. *Geophysical Prospecting*, vol. 35, pp. 973 – 992.

Cowi 2009: Overvåkingsprogram for grunnvann i løsmasser Ringveg Vest. Rapport datert 09.04.2009.

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.

Fossen, H., 1989: Geology of the Minor Bergen Arc, West Norway. *Norges geologiske undersøkelse Bulletin* 416, s.47-62.

Fossen, H. & Ragnhildstveit, J., 1997: Berggrunnskart Bergen 1115 I M 1:50 000. *Norges geologiske undersøkelse*.

Ganerød, G.V., Dalsegg, E. & Rønning, J.S. 2009: Geologiske og geofysiske undersøkelser for tunnelstrekning Sandeide-Liavatnet, Ringveg Vest, Bergen. NGU Rapport 2009.077, 23 pp.

Gebrande, H. & Miller, H. 1985: Refraksjonsseismik (in German). In Bender, F. (Editor) *Angewandte Geowissenschaften II*. Ferdinand Enke, Stuttgart; pp. 226 – 260-ISBN 3-432-91021-5.

Gjelsnes, H.C. & Eidesen, J.M. 2013: Korrelasjon mellom Q-verdier fra kjerneprøver og seismiske hastigheter for E39 ROGFAST. Bergmekanikkdagen 2013, foredrag 26.

Hagedoorn, J.G. 1959: The plus-minus method of interpreting seismic refraction sections. *Geophysical Prospecting* 7 (2), pp.158 – 182.

Heincke, B., Maurer, H., Green, A.G., Willenberg, H., Spillmann, T. & Berlini, L. 2006: Characterization of unstable mountain slope using shallow 2D and 3D seismic tomography. *Geophysics* Vol 71 (6) B 241 – B256, doi: 10.1190/1.2338823

Iyer, H.M. & Hirahara, K. (eds.)1993: *Seismic Tomography. Theory and Practice*. Chapman & Hall, London 1st ed. 1993.

Kirkeby, T. 2010: Ringveg vest i Bergen, 2. byggetrinn. Ingeniørgeologisk rapport til konkurransegrunnlaget. Oppdragsrapport nr. 2010127742-001, 132 sider.

Kirkeby, T. 2013: Resistivitet og tunnelkartlegging, Ringveg Vest i Bergen. Eller; hvordan gikk det egentlig. Foredrag, Svv Teknologidagene i Trondheim 21. – 24. oktober 2013.

Lecomte, I., Gjøystdal, H., Dahle, A. & Pedersen, O.C. 2000: Improving modelling and inversion in refraction seismic with a first-order Eikonal solver. *Geophysical Prospecting*, vol. 48, pp. 437 – 454.

Lehmann, B. 2007: *Seismic travelttime tomography for engineers and exploration applications*. EAGE Publications, ISBN 978-90-73781-41-2.

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

Loke, M.H. 2014: RES2INV x64 ver. 4.03.32. *Geoelectrical Imaging 2D & 3D. Instruction manual*. www.geoelectrical.com.

Palmer, D. 1980: *The Generalized Reciprocal Method of Seismic Refraction Interpretation*. Society of Exploration Geophysicists, Tulsa. ISBN 0-931830-14-1.

Rayfract 2016a: *Rayfract Seismic Refraction & Borehole Tomography- Subsurface Seismic Velocity Models for Geotechnical Engineering and Exploration*. Downloaded from <http://rayfract.com>

Rayfract 2016b: *Rayfract help*. Download from <http://rayfract.com/help/rayfract.pdf>

Reiser, F., Dalsegg, E., Dahlin, T., Ganerød, G.V. and Rønning, J.S. 2009: *Resistivity Modelling of Fracture Zones and Horizontal Layers in Bedrock*. NGU Report 2009.070 (117 pp.).

Reynold, J. M. 2011: *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. Wiley & Sons, West Sussex, UK (2nd edition).

Ruehl, T. 1995: Determination of shallow refractor properties by 3D-CMP refraction seismic techniques. *First Break*, vol. 13, pp. 69 - 77.

Rønning, J.S., Dalsegg, E., Heincke, B., Tønnesen, J.F. & Wisen, R. 2009a: *Resistivitets-målinger og retolkning av seismikk langs E6 og Dovrebanen ved Mjøsa*. NGU Rapport 2009.064 (50 sider).

Rønning, J.S., Dalsegg, E., Elvebakk, H., Ganerød, G.V. & Heincke, B.H. 2009b: 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., Ganerød, G.V., Dalsegg, E. & Reiser, F. 2013a: Resistivity mapping as a tool for identification and characterization of weakness zones in bedrock - definition and testing of an interpretational model. Bull. Eng. Geol. Environment Volume 73, Issue 4 (2014), Page 1225-1244.

Rønning, J.S., Tassis, G., Tsourlos, P. & Dalsegg, E. 2013b: Resistivitet for kartlegging av svakhetssoner i fjell i marine miljø. Muligheter og begrensninger. Bergmekanikkdagen 2013. Oslo 22. november 2013.

Schuster, G.T. & Quintus -Bosz, A. 1993: Wavepath eikonal travelttime inversion: Theory. Geophysics vol. 58, pp. 1314 – 1323.

Sheehan et al. 2005: Refraction Tomography Analysis. Journal of Environmental & Engineering Geophysics Vol 10 Issue 1(March 2005).

Stumo, R. 2002: Numerisk modellering av bruddnettverk: konnektivitet og permeabilitet med anvendelse på tunneler, Ringveg Vest, Bergen
Hovedfagsoppgave ved Institutt for Geologi ved Universitetet i Bergen.

Tassis, G., Rønning, J.S., Tsourlos, P. & Dahlin, T. 2014: Detection and characterisation of fracture zones in marine environment- possibilities and limitations. NGU Report 2013.017, 74 pp.

Venvik, R.G.F. (Ganerød), 2003: Bruddsystem og spenningsfelt tilknyttet tunneltraséen Ringveg Vest i Bergen. Hovedfagsoppgave ved Geologisk Institutt, Universitetet i Bergen.

Wanatabe, T. et al. 1999: Seismic travelttime tomography using Fresnel volum approach. SEG Houston 1999 Meeting, Extended Abstract.

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

White, D.J. 1989: Two-Dimensional Seismic Refraction Tomography. Geophys. J. Int. 97.2 pp 223 – 245.

Wåle, M. 2009: Refraksjonsseismiske undersøkelser Ringveg vest, byggetrinn 2 Sandeide-Liavatnet. GeoPhysix, Rapport nr 09171.

Wåle, M. 2010: Refraksjonsseismiske undersøkelser Ringveg vest, byggetrinn 2 Sandeide-Liavatnet. Supplerende undersøkelser, Hesjakollen. GeoPhysix, Rapport nr 09431.

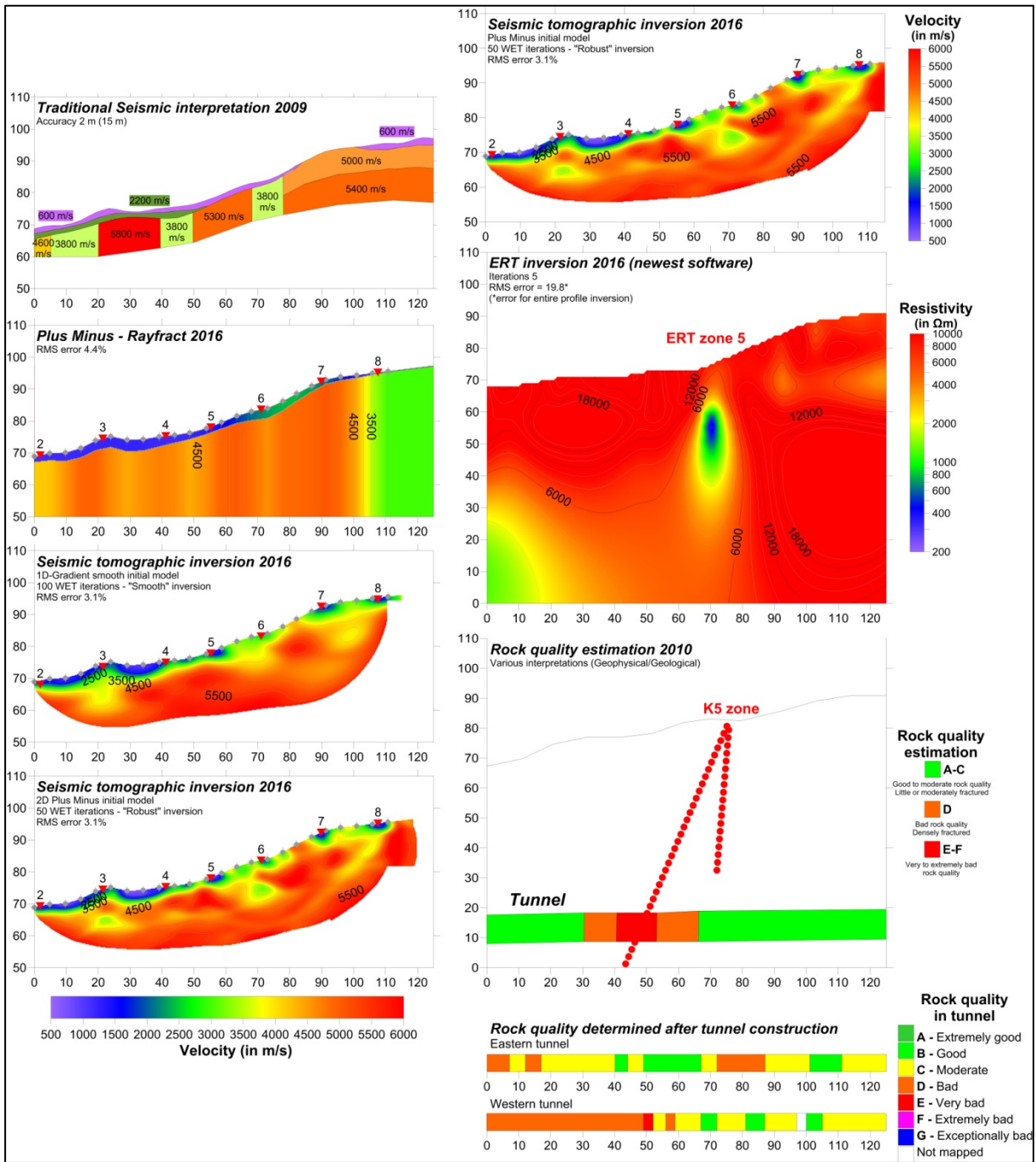
Vedlegg 1: Korrelasjon av profilnummer, sonenavn og koordinater.

| Profil nr. Geo-physix | Profil nr. NGU 2016 | Koordinater NGU 2009 se Fig.1 | Sone- navn NGU Fig. 1 | Sone- navn Arnt- sen & Kirke by | Start UTM 32N | | Slutt UTM 32N | |
|--------------------------|------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|--|---------------|---------|---------------|---------|
| | | | | | Øst | Nord | Øst | Nord |
| P1-09 | 1.1 | 300 - 425 | 5 | K5 | 293789 | 6695770 | 293775 | 6695878 |
| P1-09 | 1.2 | 405 - 520 | Til 6 | K6a | 293777 | 6695873 | 293751 | 6695980 |
| P1-09 | 1.3 | 510 - 625 | 6, D, E | K6b | 293750 | 6695976 | 293735 | 6696087 |
| P1-09 | 1.4-5 | 620 - 850 | 7 | K6c, K6d, K7 | 293735 | 6696082 | 293725 | 6696303 |
| P1-09 | 1.6-7 | 850 - 1080 | Ingen | KMn2 | 293725 | 6696298 | 293743 | 6696519 |
| P1-09 | 1.8 | 1080 - 1205 | Ingen | KMn4 .1, KMn4 .2 | 293743 | 6696514 | 293753 | 6696627 |
| P1-09 | 1.9 | 1190 - 1315 | Ingen (8) | KMn4 .2, KS1 | 293753 | 6696622 | 293755 | 6696733 |
| P1-09 | 1.9,5 | 1220 - 1335 | 8 og F | KS1 K8 | 293755 | 6696670 | 293755 | 6696758 |
| P2-09 | 2 | 2225 - 2330 | K og 12 | KK K12 | 293514 | 6697500 | 293453 | 6697597 |
| P3-09 | 3 | 2220 - 2335 | K og 12 | KK K12 | 293538 | 6697510 | 293477 | 6697605 |
| P4-09 | 4 | Utenfor | Utenfor | K2 | 293879 | 6695137 | 293877 | 6695246 |
| P6-09 | 6 | 1680 - 1770 | G og H | K10 | 293712 | 6697067 | 293692 | 6697141 |

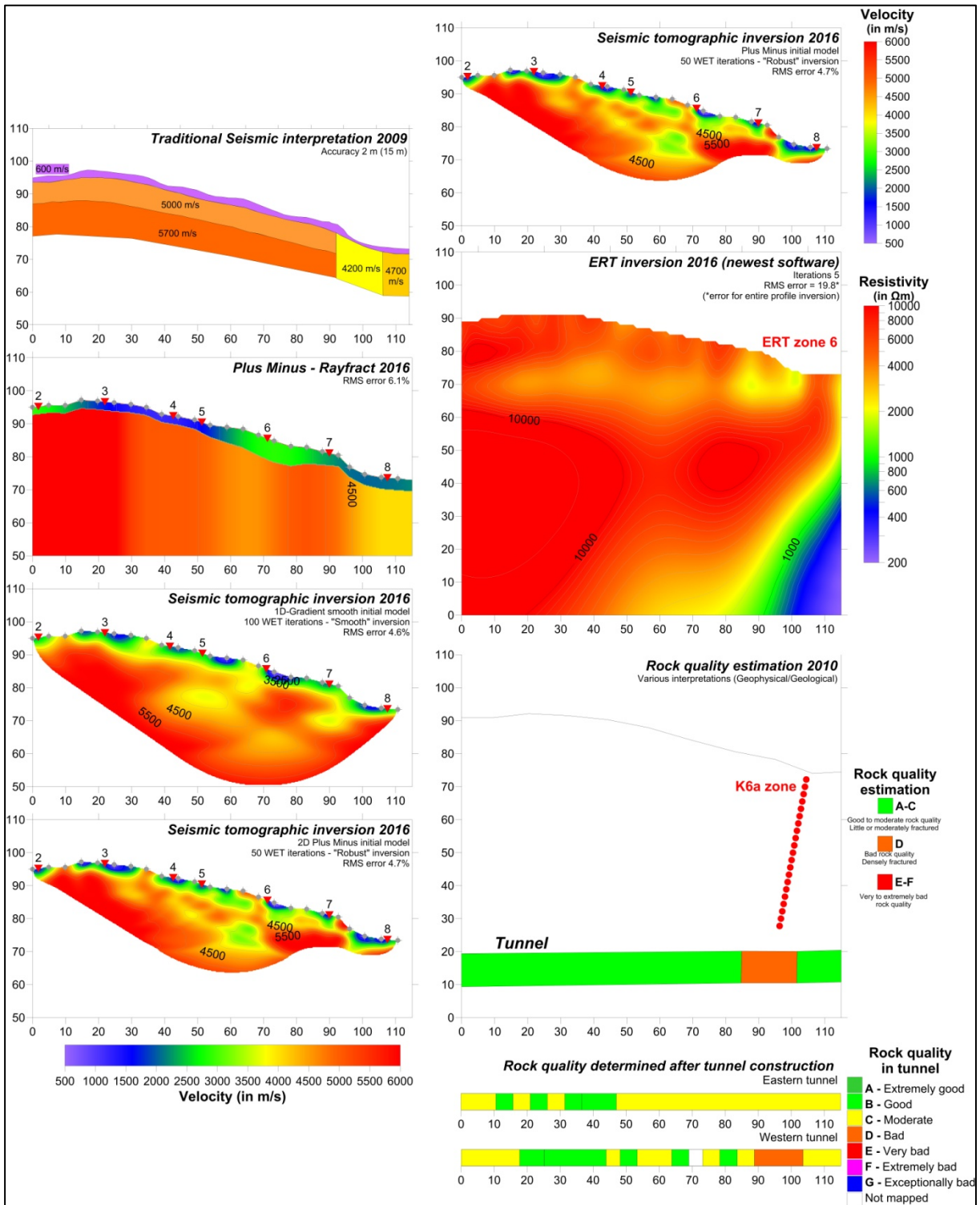
Vedlegg 2: Plansjer som viser tolkningsresultater.

| | |
|---|--|
| Tradisjonell tolket refraksjonsseismikk (Wåle 2009) | Tomografisk inversjon med 2D startmodell |
| Hagedoorn's Plus- minus-tolkning ved bruk av Rayfract | Retolket resistivitetsprofil |
| Tomografisk inversjon med 1D startmodell | Sprekketolkning ved forundersøkelser (Kirkeby 2010) |
| Tomografisk inversjon med 2D startmodell | Bergmassekvalitet kartlagt ved tunneldriving (fra Kirkeby) |

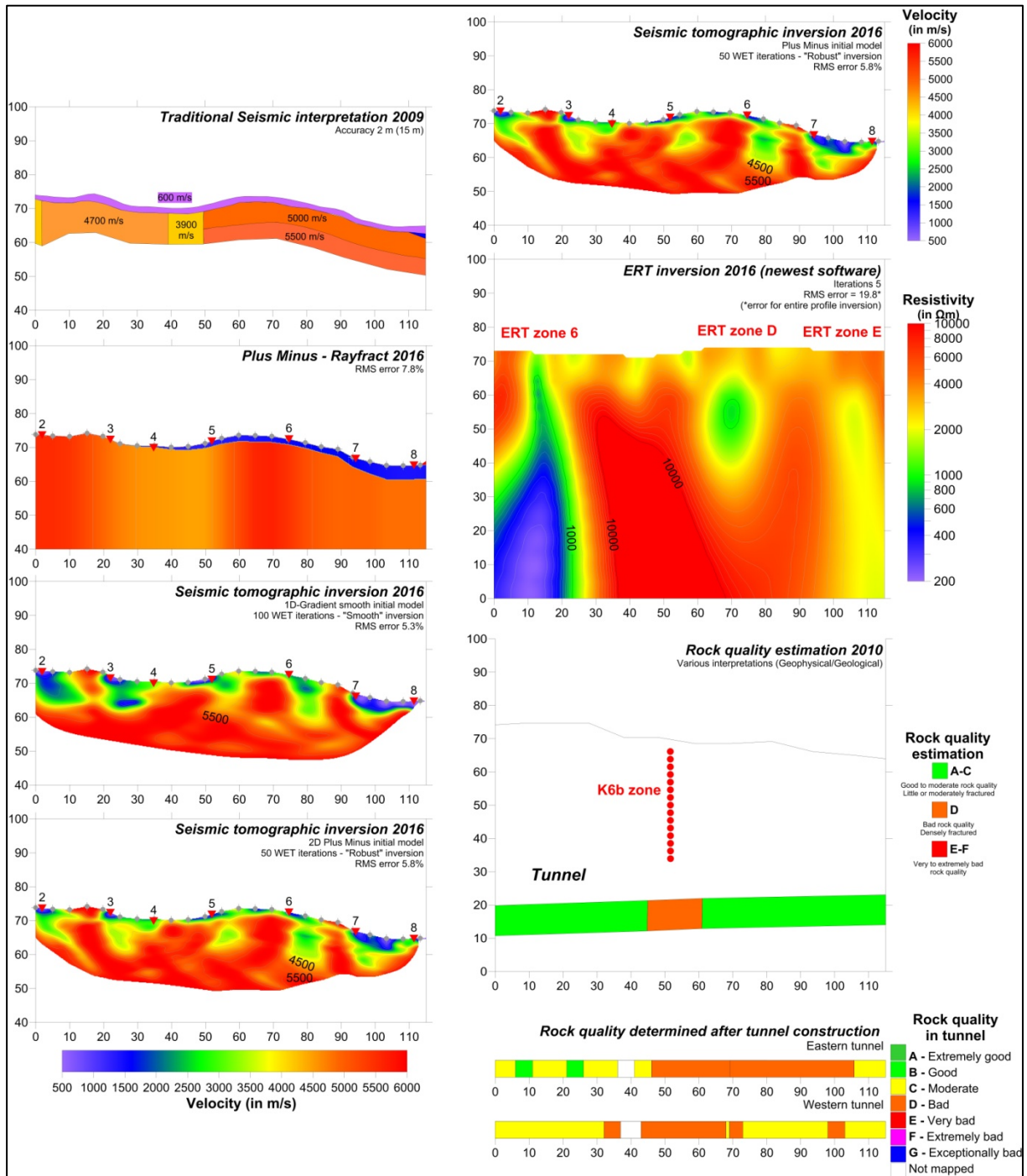
Vedlegg 2 side 1: Tolknings profil 1.1



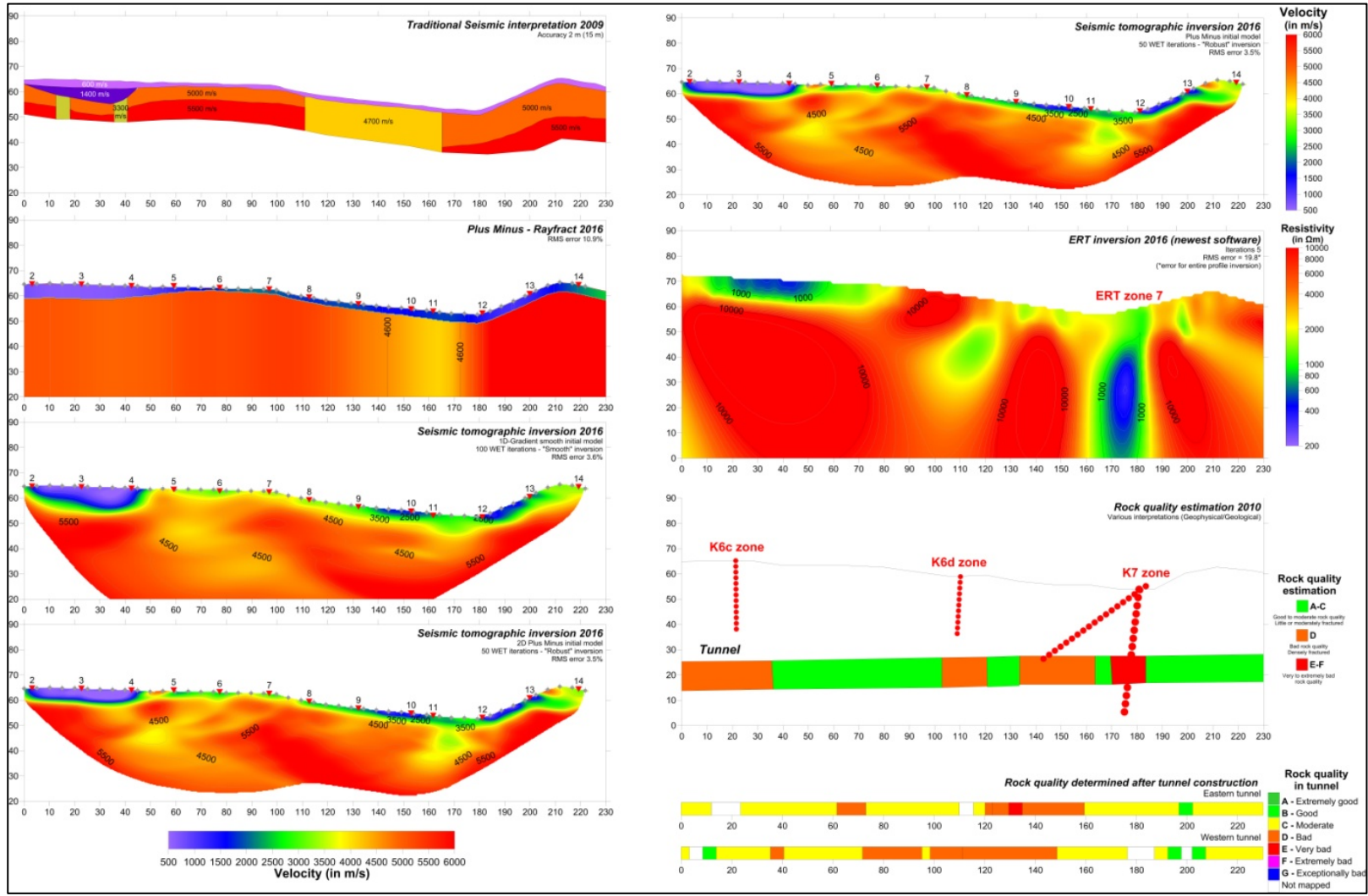
Vedlegg 2 side 2: Tolknings profil 1.2



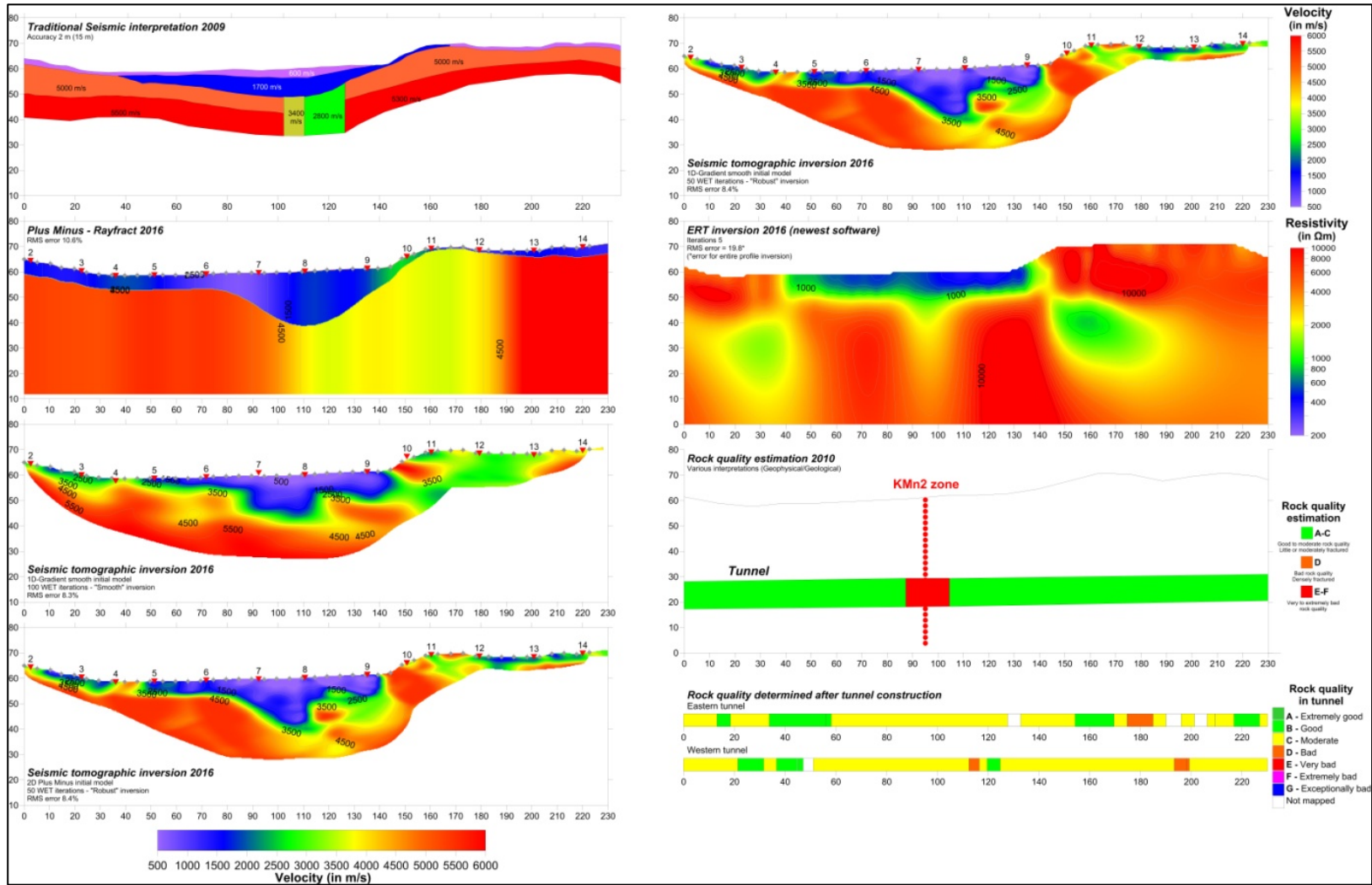
Vedlegg 2 side 3: Tolkningsprofil 1.3



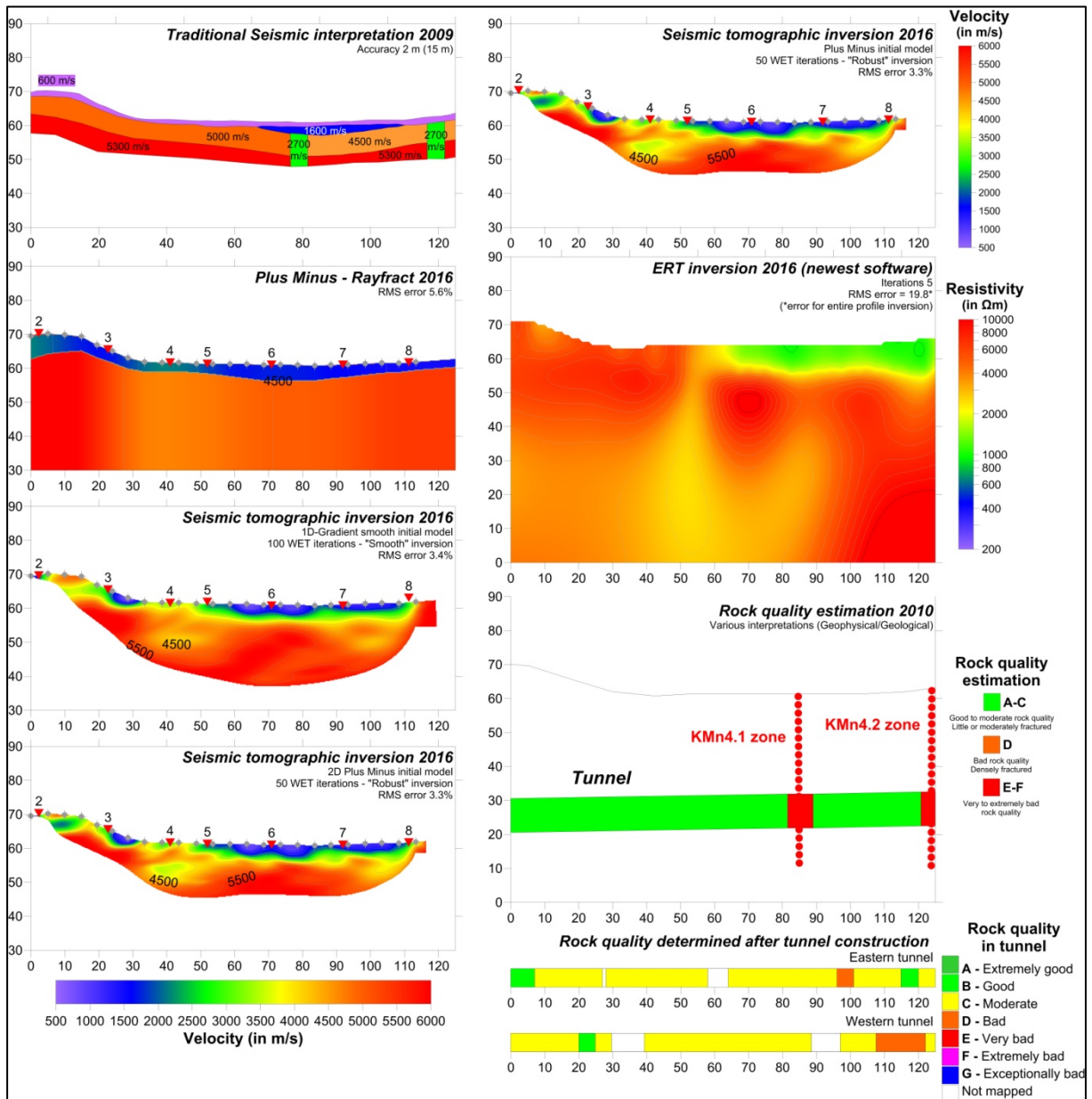
Vedlegg 2 side 4: Tolkningsprofil 1.4-5



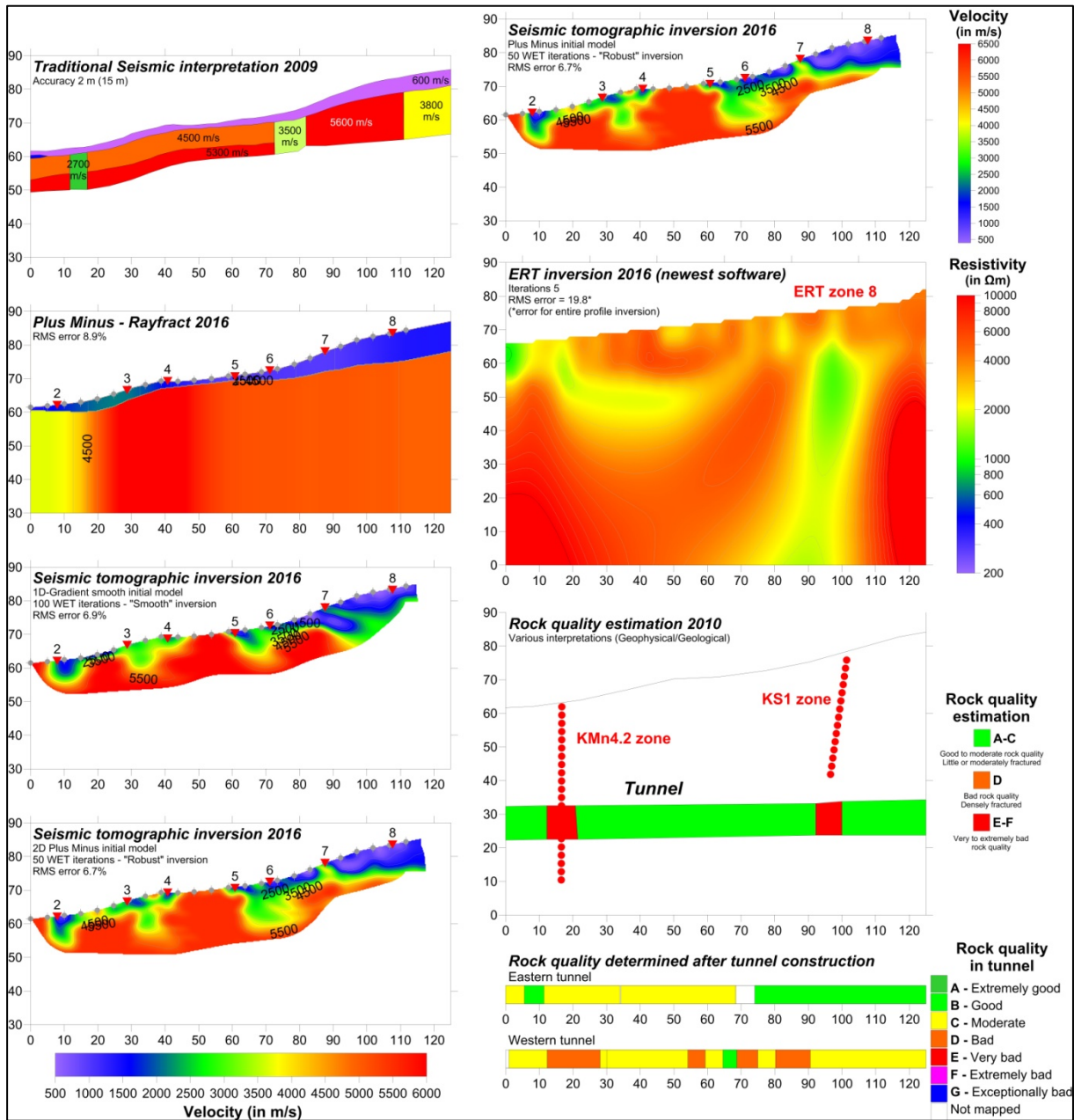
Vedlegg 2 side 5: Tolknings profil 1.6-7



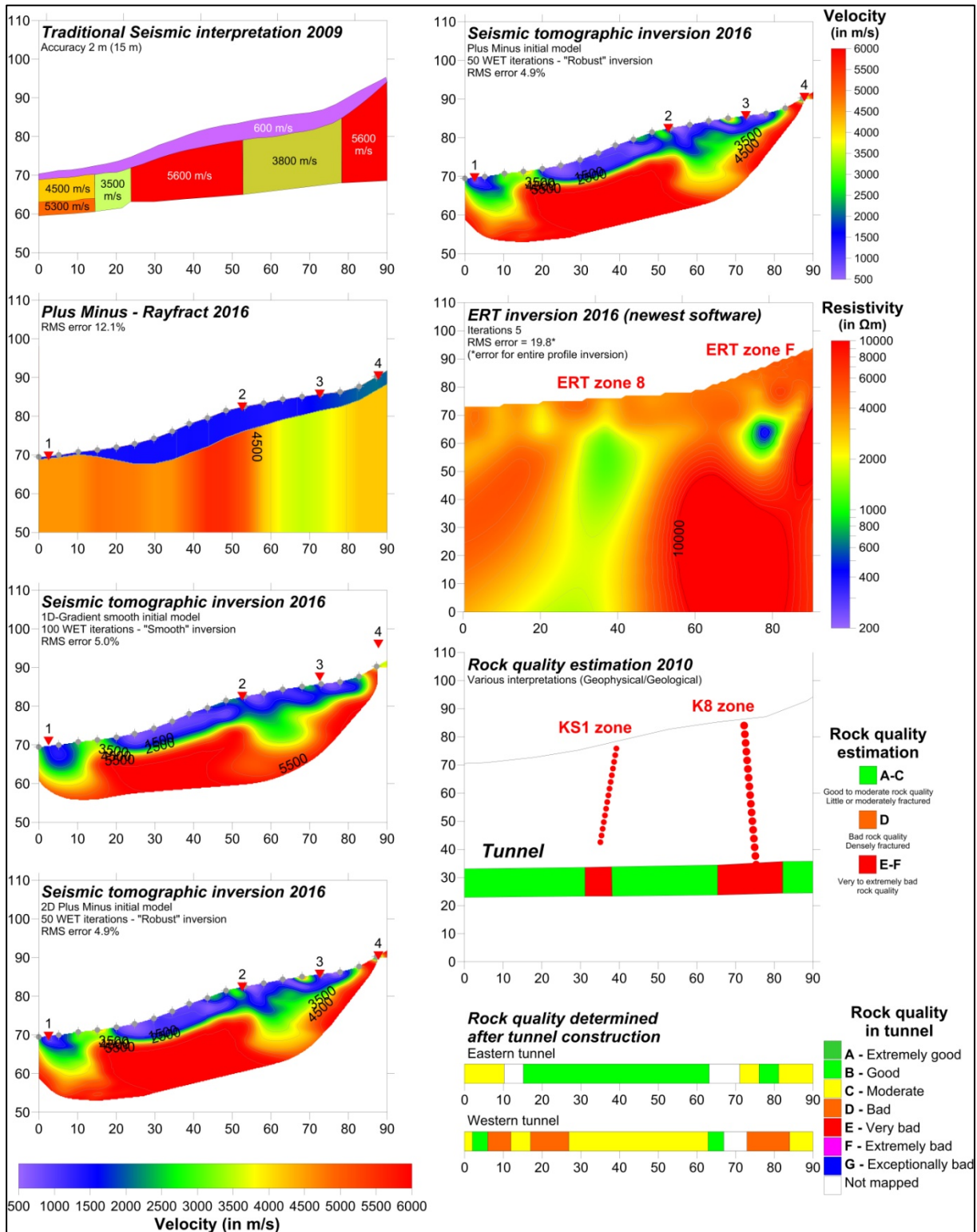
Vedlegg 2 side 6: Tolknings profil 1.8



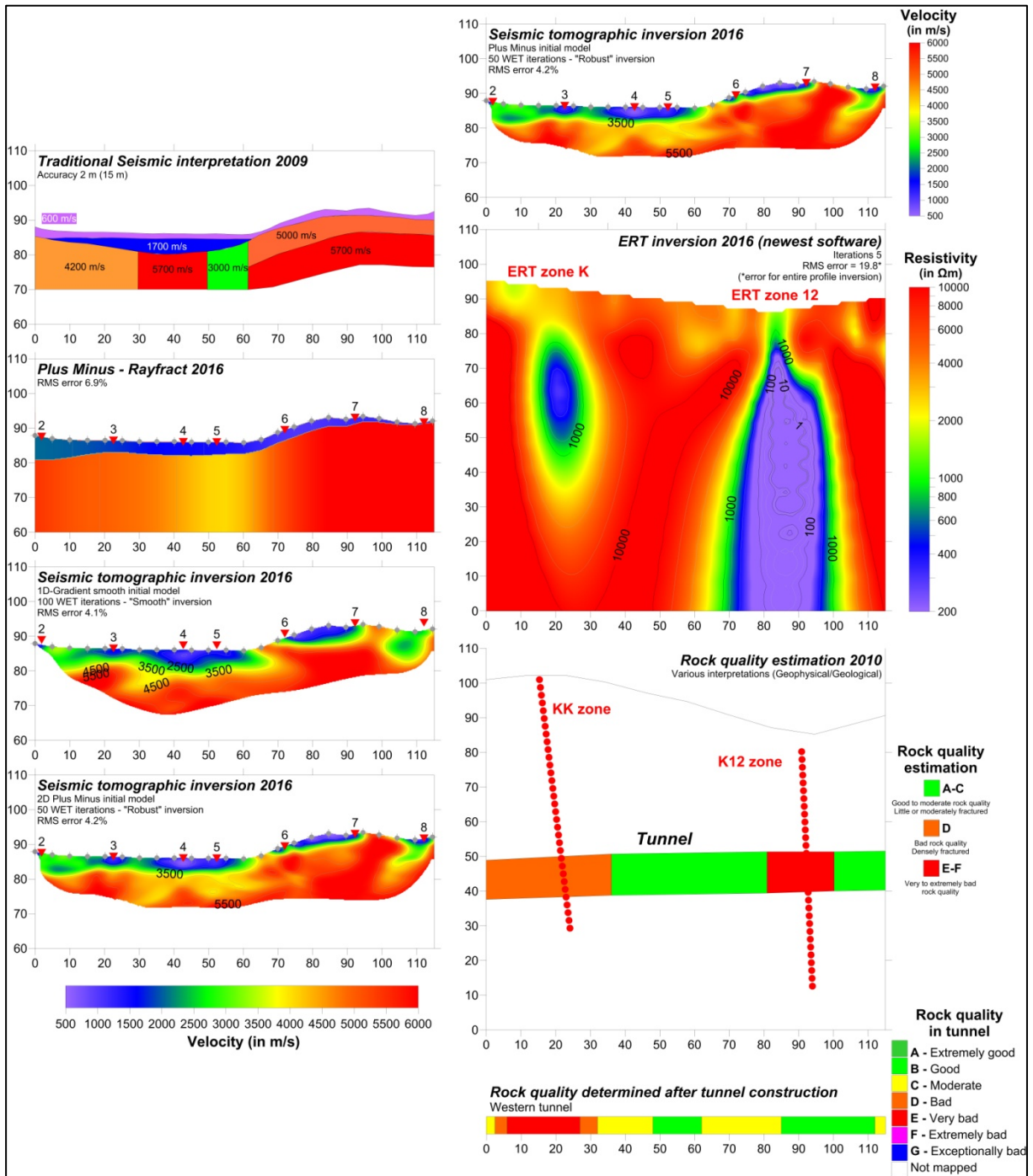
Vedlegg 2 side 7: Tolknings profil 1.9



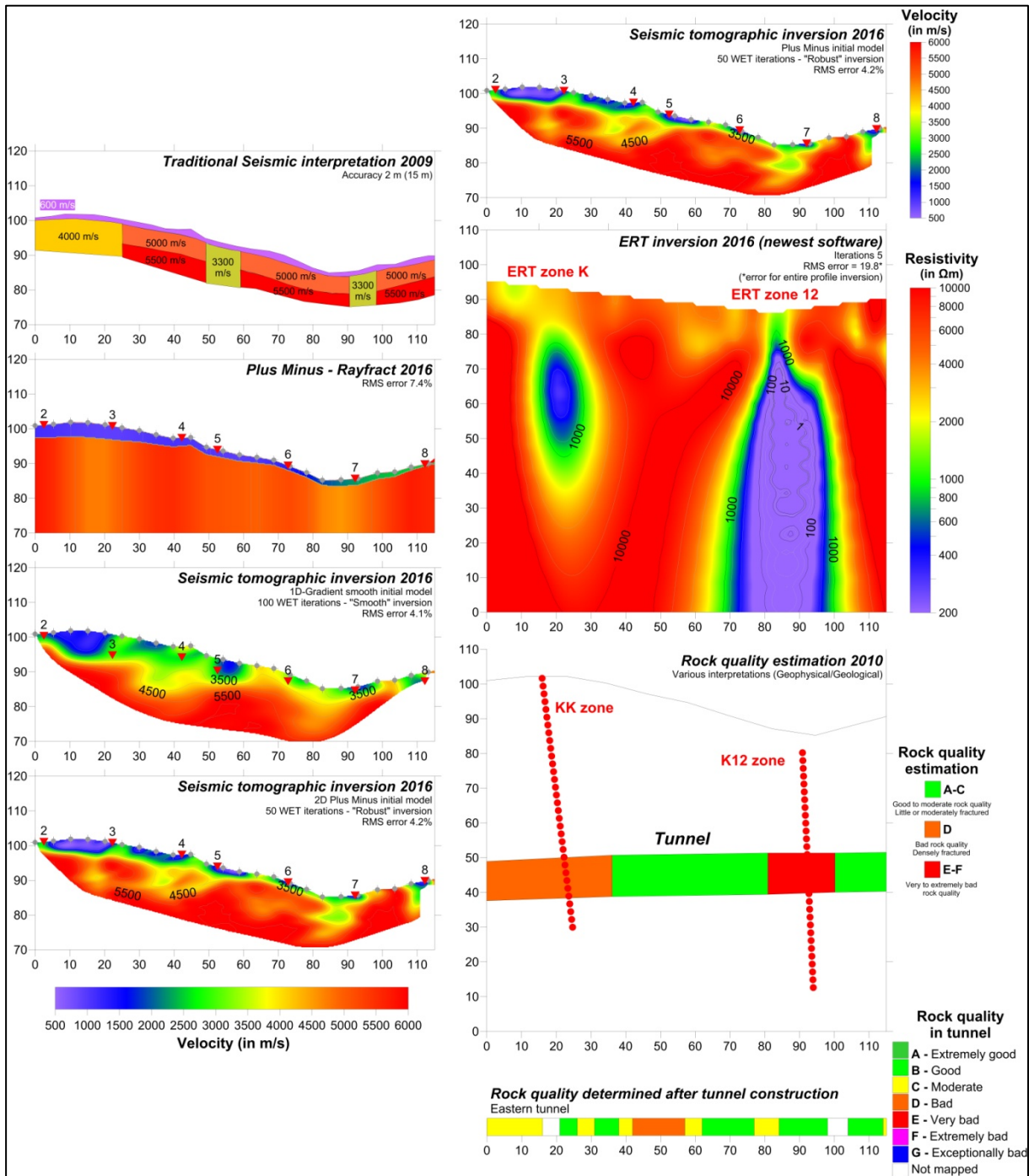
Vedlegg 2 side 8: Tolkningsprofil 1.9B



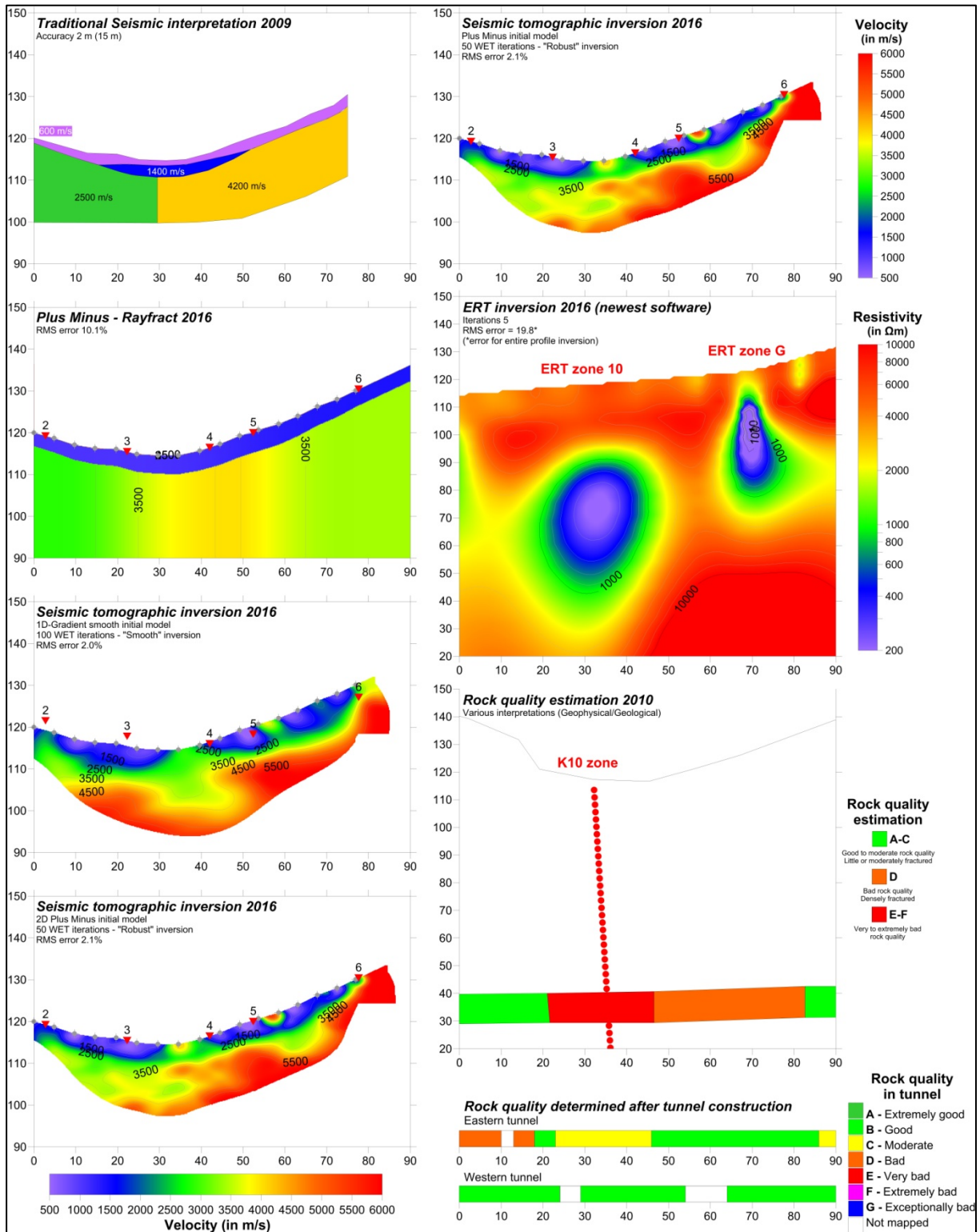
Vedlegg 2 side 9: Tolknings profil 2



Vedlegg 2 side 10: Tolkninger profil 3



Vedlegg 2 side 11: Tolkninger profil 6





NORGES
GEOLOGISKE
UNDERSØKELSE
- NGU -

Norges geologiske undersøkelse
Postboks 6315, Sluppen
7491 Trondheim, Norge

Besøksadresse
Leiv Eirikssons vei 39
7040 Trondheim

Telefon 73 90 40 00
E-post ngu@ngu.no
Nettside www.ngu.no