



# **GEOLOGI FOR SAMFUNNET**

SIDEN 1858



**NORGES  
GEOLOGISKE  
UNDERSØKELSE**  
· NGU ·





Report nr.: 2019.014	ISSN: 0800-3416 (trykt) ISSN: 2387-3515 (online)	Gradering: Åpen
<b>Tittel:</b> Reprosessering og ny samtolkning av geofysiske data med resultater fra tunneldriving, Knappetunnelen ved Ringveg Vest i Bergen.		
<b>Forfatter:</b> Jan S. Rønning, Georgios Tassis, Terje Kirkeby og Morgan Wåle	<b>Oppdragsgiver:</b> Statens vegvesen Vegdirektoratet / NGU	
<b>Fylke:</b> Hordaland	<b>Kommune:</b> Bergen	
<b>Kartblad (M=1:250.000)</b> BERGEN	<b>Kartbladnr. og -navn (M=1:50.000)</b> 1115 I Bergen	
<b>Forekomstens navn og koordinater:</b> Ringveg vest, Bergen 32V 293730 - 6696910	<b>Sidetall:</b> 57	<b>Pris:</b> 150,-
<b>Feltarbeid utført:</b> 2009	<b>Rapportdato:</b> 09.04.2019	<b>Prosjektnr.:</b> 329500
		<b>Ansvarlig:</b> <i>Marco Brömmel</i>

**Sammendrag:**

Refraksjonsseismiske data, samlet inn som en del av forundersøkelsene for den 3,8 km lange nordlige delen av Knappetunnelen ved Ringveg vest i Bergen, er tolket med tomografisk inversjon med programmet Rayfract™. Samtidig er resistivitetsdata samlet inn av NGU også som en del av forundersøkelsene, reprocessert med nyeste versjon av programmet Res2DInv. De samme data er tidligere reprocessert og samtolket med observasjoner fra tunneldrivingen i 2016. Nytt ved analysen som her rapporteres, er inversjon av refraksjonsseismikken med helt ny prosedyre, bredde på svakhetssoner er tatt med i vurderingen og resultater fra de geologiske forundersøkelsene er evaluert.

Tidligere arbeider utført av NGU har vist at antatt beste inversjonsprosedyre for refraksjons-seismiske data med den aktuelle programvaren er «Multi-run Conjugate Gradient» inversjon og med «Cosine-squared» vektning og hvor en benyttet en 2D startmodell generert med Hagedoorn's metode. Ved alle analyser i dette arbeidet er denne prosedyren benyttet. Det er også vist at inverterte hastighetsprofiler blir bedre jo kortere avstand som benyttes mellom geofoner og skuddposisjoner. Ideelt sett bør geofonavstanden være 2 m og skuddavstanden 6 m. Dette er selvsagt et økonomisk spørsmål som må vurderes opp mot faglig gevinst.

Reprocesserte resistivitetsdata viser de samme strukturene som ved den opprinnelige prosesseringen, men med avvik på detaljnivå. Kunstige effekter ser ut til å være forbedret, og flere soner viser større utstrekning mot dypet. Elektrodeavstanden som er benyttet (10 m) gir god dybderekkevidde, men er for stor til å fange opp mindre soner. En må velge mellom stor penetrasjon og høy oppløsning, og en midlere løsning kan være elektrodeavstand 5 m. Grense for hva som anses som anomale resistivitetsverdier i berggrunnen må kanskje justeres.

Hvor godt de forskjellige undersøkte metodene fungerer ved beskrivelse av bergmassekvalitet, avhenger av hva det legges vekt på. Ser en på antall påviste soner, er den automatiske tolkingen med Hagedoorn's metode best. Dersom total lengde indikert dårlig bergmassekvalitet er viktigst, er resistivitetsmetoden vinner. Dersom en tar utgangspunkt i hvor mange av de 26 påviste sonene med dårlig eller meget dårlig bergmassekvalitet i tunnelnivå og ser på hvilken metode som indikerer flest soner, er resistivitet igjen vinneren. Ved alle synsmåter kommer den geologiske forundersøkelsen relativt dårlig ut.

I et forsøk på å få et samlet inntrykk av hvilken metode som fungerer best, er det beregnet en treff-faktor. Denne tar utgangspunkt i antall kartlagte soner med dårlig bergmassekvalitet i tunnelnivå metodene treffer, og trekker fra summen av antall soner som ikke påvises og antall falske påvisninger. Ved denne analysen kommer resistivitet klart best ut. På andre plass kommer automatisk tolking med Hagedoorn's pluss-minus-metode. Deretter følger tomografisk inversjon med antatt beste prosedyre og tradisjonelle seismiske tolkinger med tilnærmet samme treff-faktor. Også her kommer de geologiske forundersøkelsene dårligst ut. Tolkning av svakhetssoners fall kan være en utfordring, men både tomografisk inversjon av refraksjonsseismikk og spesielt inversjon av resistivitetsdata kan indikere sonenes fall.

Metodene benyttet her utfyller hverandre, det er derfor viktig at alle metodene benyttes ved forundersøkelser. Det er også viktig at inversjon og tolking av data gjøres av kompetente fagfolk som benytter antatt beste prosedyrer.

<b>Emneord:</b>	Geofysikk	Refraksjonsseismikk
Resistivitet	Reposessering	Tomografisk inversjon
Svakhetssoner i fjell	Bergmassekvalitet	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. ....	12
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 FORSKJELLIGE GEOFYSISKE TOLKINGER.....	16
4.1 Datagrunnlag for refraksjonsseismikk og resistivitet.....	16
4.2 Eksempel på forskjellig tolking av refraksjonsseismiske data.....	16
4.3 Sammenligning refraksjonsseismikk og resistivitet.....	19
4.4 Treffrate ved de forskjellige geologiske og geofysiske tolkingene .....	24
5. SAMMENLIGNING AV TUNNELDATA MED GEOLOGISKE OG GEOFYSISKE FORUNDERSØKELSER.....	25
5.1 Påvist dårlig bergmassekvalitet i tunnelnivå .....	25
5.2 Sammenheng mellom påvist dårlig bergmasse og treffrater. ....	28
6. DISKUSJON.....	29
6.1 Metodiske forhold ved tomografisk inversjon av refraksjonsseismiske data	29
6.2 Repressering av resistivitetsdata .....	31
6.3 Ingeniørgeologiske forhold .....	36
6.4 Metodenes mulighet til å påvise svakhetssoners fall.....	32
7. KONKLUSJONER .....	40
8. REFERANSER.....	42
VEDLEGG:	
Vedlegg 1: Beskrivelse til plansjer som viser tolkningsresultater (vedlegg 2) .....	45
Vedlegg 2: Plansjer som viser tolkningsresultater .....	46
Vedlegg 3: Korrelasjon av profilnummer, sonenummer og koordinater .....	57



## 1. INNLEDNING

I de senere årene har forundersøkelser for tunnelarbeider endret seg. Resistivitet er introdusert som en ny metode, og tolkning av refraksjonsseismikk presenteres gjerne som tomografisk inverterte data. 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), studerte NGU i 2016 resultater fra nordlige del av Knappetunnelen ved Ringveg Vest i Bergen. Den aktuelle delen av Knappetunnelen starter ved Sandeide i sør og går under Kanadeskogen til Liavatnet i nord. Arbeidet var todelt, først ble forskjellige tolkninger av refraksjonsseismiske data sammenlignet. Deretter ble seismikkolkninger sammenlignet med resistivitetsdata og data registrert under driving av tunnelen (Rønning m. fl. 2016).

I rapporten fra dette arbeidet ble refraksjonsseismikken fra prosjektet (Wåle 2009) reprocessert med programmet Rayfract hvor det ble benyttet 1D startmodeller som var automatisk generert og en 2D startmodell generert med Hagedoorns +/- metode (Hagedoorn 1959). Det ble benyttet en relativt enkel rutine for tomografisk inversjon (Wavepath Eikonal Traveltime, WET). Resultatene fra den tomografiske inversjonen ble sammenlignet med den tradisjonelle tolkingen av de samme data (Wåle 2009). I dette arbeidet ble det konkludert med at tradisjonelle tolkninger og tomografisk inversjon med 1D og 2D startmodell viste de samme strukturene (Rønning m.fl. 2016). Hvilken startmodell som benyttes for selve inversjonen var viktig for kvaliteten av inversjonen og 2D startmodell fungerte best. Tradisjonell seismisk tolking, tomografisk inversjon og reprocesserte resistivitetsdata samlet inn av NGU (Ganerød m.fl. 2009) ga tilnærmet samme treffprosent på svakhetssoner kartlagt under tunneldrivingen.

Ved denne første sammenligningen av forskjellige tolkninger av refraksjonsseismikk med resistivitetsdata og tunnelresultater, var resultatene så interessante at NGU ønsket å studere dette nærmere. I et arbeid avsluttet sommeren 2017, ble mulighetene for å karakterisere svakhetssoner ved tomografisk inversjon av refraksjonsseismikk studert (Tassis et al. 2017). Ut fra et sett av modeller ble det beregnet syntetiske data som så ble invertert. Dette arbeidet konkluderte med at bredden av svakhetssoner, hastigheten i sonene og tykkelse av overdekning kunne bestemmes nøyaktig ved beste kombinasjon av inversjonsparametere. Sonene kunne følges til et visst dyp, men dypere soner gav samme respons som grunnere dersom de oversteg et visst dyp. Svakhetssoners fall og posisjon kunne være en utfordring spesielt ved små hastighetskontraster. Under dette arbeidet fikk NGU tilgang på nye inversjonsrutiner, og det ble konkludert med at beste prosedyre for kartlegging av svakhetssoner i fjell med programmet Rayfract var som følger (Tassis et al. 2017):

- Startmodell genereres med Hagedoorn's +/- metode
- Selve inversjonen utføres som «multi-run Conjugate Gradient»
- Vekting med «Cosine-Squared weighting»
- Minimal glatting av inverterte data.

Ved den første inversjonen av refraksjonsseismikken fra Knappetunnelen ble ikke «Multi-run Conjugate Gradient» benyttet. Modelleringen avsluttet i 2017 viste at utført på denne måten kunne tomografisk inversjon gi bedre resultater. Det var derfor viktig å se hvor godt tomografisk inversjon fungerer utført med antatt beste prosedyre.

Georgios Tassis ved NGU har utført en ny tomografisk inversjon av refraksjonsseismiske data samlet inn av GeoPhysix (Wåle 2009) ved bruk av programmet Rayfract. Også resistivitetsdata, samlet inn av NGU tilbake i 2009 (Ganerød m. fl. 2009), er reprocessert med nyeste programversjon av Res2DInv (Loke 2018). Morgan Wåle ved GeoPhysix har tolket refraksjonsseismikken med tradisjonelle teknikker (Wåle 2009). Terje Kirkeby fra Statens vegvesen Vegdirektoratet har foretatt ingeniørgeologiske observasjoner før og under tunneldrivingen og sammenstilt disse. Jan S. Rønning har foretatt en evaluering av metodene ved forrige runde (Rønning m.fl. 2016) og i arbeidet som rapporteres her.

## **2. TIDLIGERE UNDERSØKELSER RINGVEG VEST**

Knappetunellen er en del av Ringveg Vest i Bergen. Arbeidet som her rapporteres, er utført ved andre byggetrinn som 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 er 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**

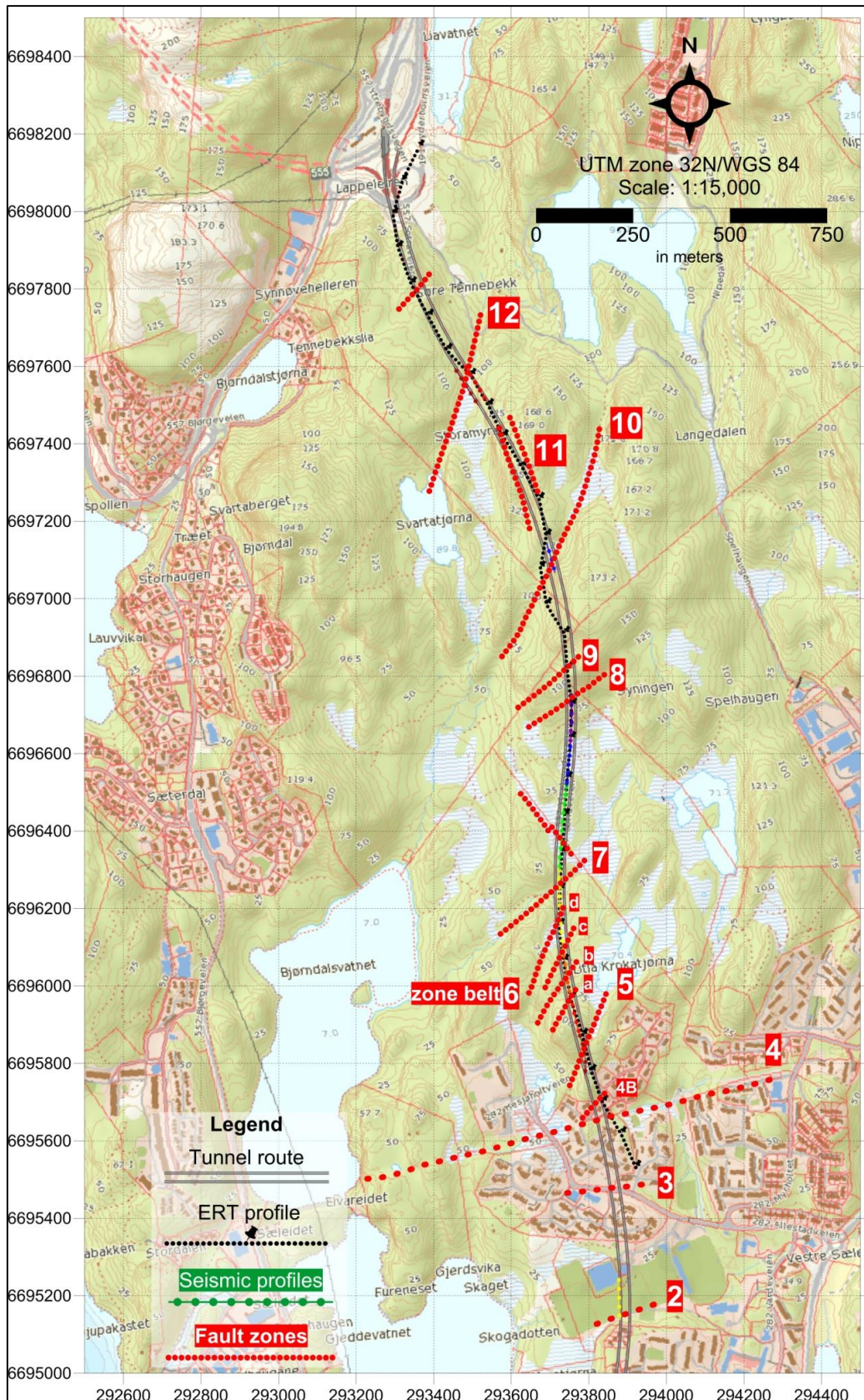
Berggrunnen ved Knappetunnelen er sammenstilt og beskrevet av Fossen (1989) og Fossen & Ragnhildstveit (1997). Nordre del av tunnelen (andre byggetrinn) går gjennom prekambriske gneiser kalt Øygarden gneiskompleks som består av to komponenter: Granittisk gneis og heterogen gneis (granittisk til granodiorittisk). Berggrunnen ble ikke kartlagt i detalj under tunneldrivingen, men det ble rapportert om noe mer nyansert berggrunns-geologi. 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 masteroppgave ved Universitetet i Bergen. Bruddsystem og spenningsfelt ved tunnelen er bl.a. beskrevet i masteroppgaven til Guri Venvik (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 sistnevnte er vist i Figur 1.

### **2.2 Geofysiske forundersøkelser.**

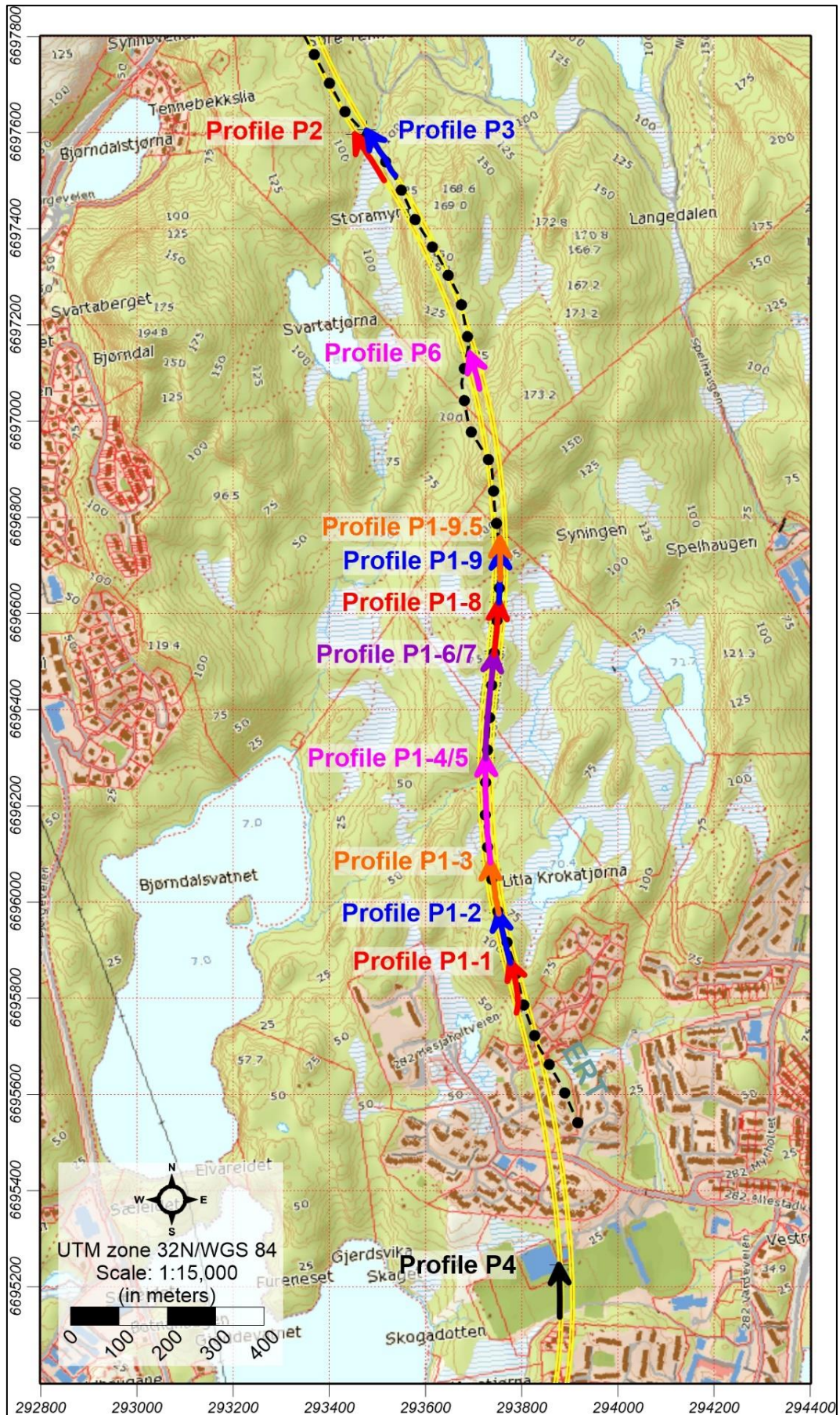
Planleggingen av Knappetunnelen ved Ringveg Vest i Bergen har gått over flere år, og rekke undersøkelser er foretatt. Størst betydning for arbeidet som her rapporteres er refraksjonsseismiske målinger foretatt av GeoPhysix i juni 2009 (Wåle 2009) og resistivitetmålinger utført av NGU også i juni 2009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





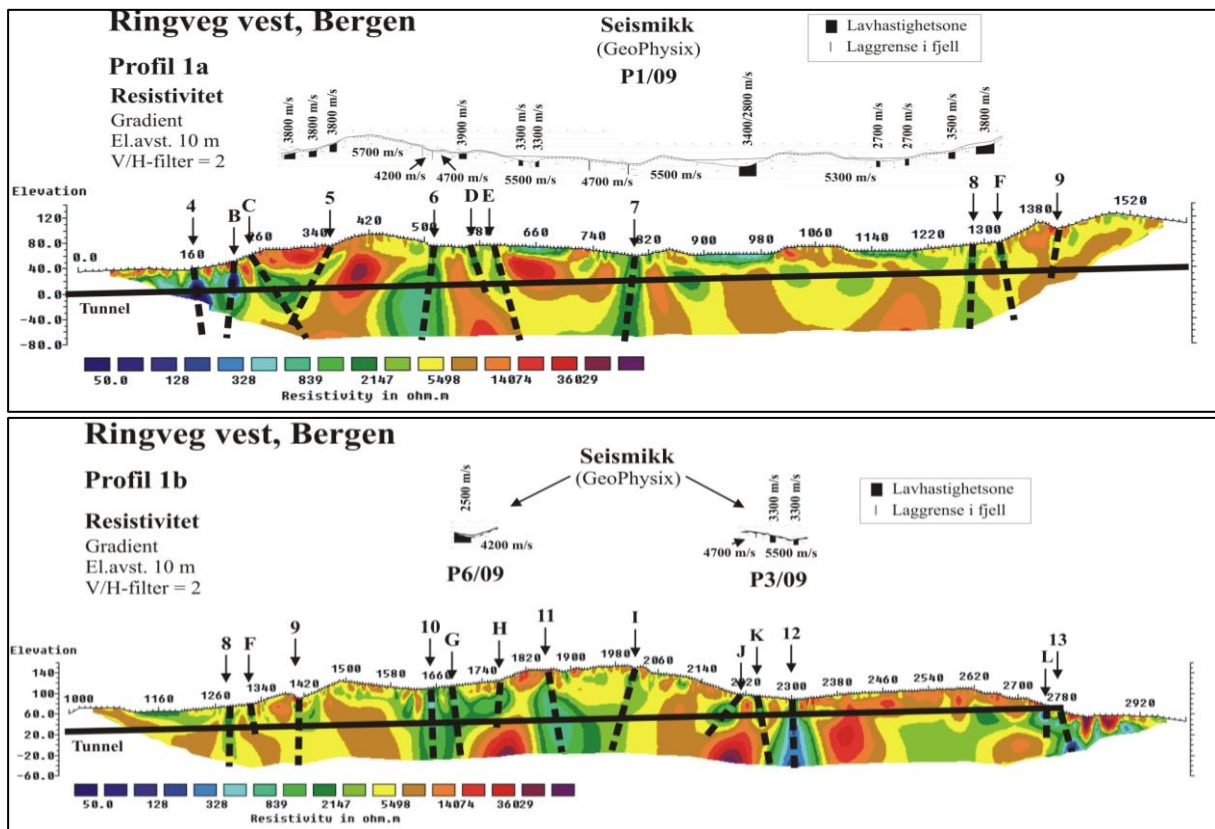
Figur 1: Geologiske kartlagte svakhetssoner (i rødt) ved forundersøkelser for Knappetunnelen, Ringveg vest i Bergen (fra Kirkeby 2010).

Plasseringen av seismiske profiler og resistivitetsprofilen ved Knappetunnelen i Bergen er vist i Figur 2. De opprinnelige resultatene fra disse undersøkelsene (Wåle 2009, Ganerød m.fl. 2009) er sammenstilt i Figur 3.



Figur 2: Seismiske profiler (flere farger) og resistivetsprofil (sort farge) langs Knappetunellen (gule streker) ved Ringveg vest i Bergen (fra Rønning m. fl. 2016).

For å gjøre en rask undersøkelse langs størstedelen av tunnelen er det benyttet en elektrodeavstand på 10 m ved resistivitetmålingene, noe som gir en begrenset oppløsning. All refraksjonsseismikk er skutt med geofonavstand 5 m og skuddavstand 20 m. For å kunne utføre tomografisk inversjon av de refraksjons-seismiske data, må ikke skuddavstanden overstige 6 ganger geofonavstanden (30 m), aller helst 3 ganger geofonavstanden (15 m, Rayfract 2018b). 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 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 resistivitetmålingene. Nye soner tolket ut fra resistivitetsdata er angitt med bokstaver. 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 nordlige del av Knappetunnelen består i korthet av en masteroppgave ved NTNU og en sammenstilling av resultater presentert av Terje Kirkeby på Statens vegvesen Teknologidagene i 2013, En geologisk sluttrapport fra prosjektet er under utarbeidelse (Kirkeby 2019).

### 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 tolkings-modell fra Lunnertunnelen (Rønning m. fl. 2009b og 2013a) kan overføres til gneisbergarter på Vestlandet. Ifølge 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

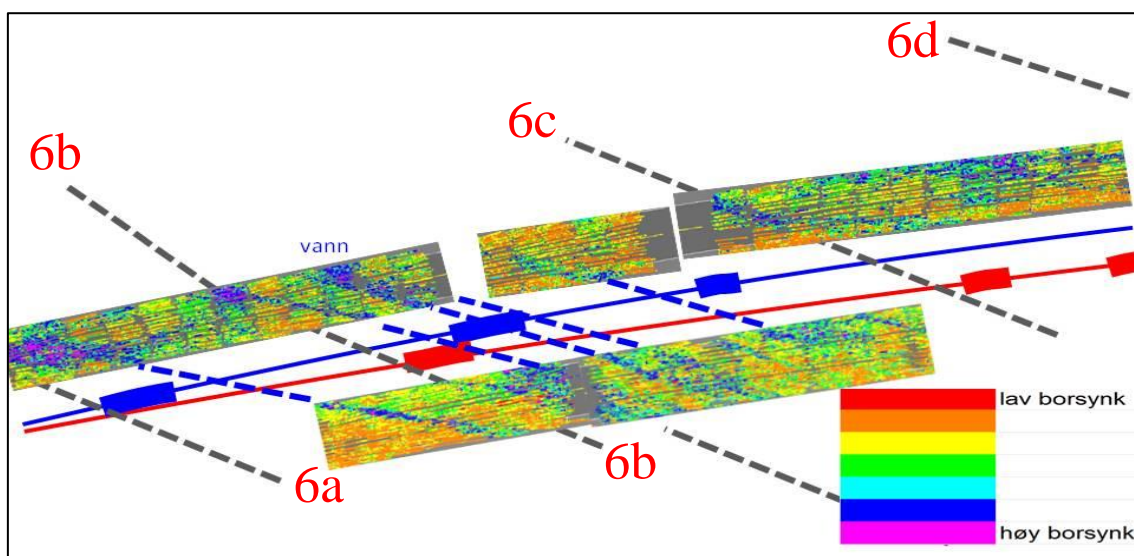
Terje Kirkeby ved Vegdirektoratet har deltatt i planleggingen og fulgt drivingen av Knappetunnelen. Han er den som kjenner forundersøkelsene og problemene under tunneldrivingen best. Disse erfaringene ble presentert på Statens vegvesens Teknologidager i 2013 (Kirkeby 2013).

All salveboring ved Knappetunnelen er utført med borerigg som kan registrere boreparametere automatisk (Arntsen 2012). Disse er: Borsynk, matetrykk, rotasjons trykk, 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 oppsprekking best, og denne ble benyttet som indikator ved oppfølgende undersøkelser (Kirkeby 2013).

Figur 4 viser et eksempel på resultater fra forundersøkelser (geologisk kartlegging og tolkede svakhetssoner fra refraksjonsseismikk og resistivitetsmålinger) sammen med borsynk ved sonene 6a til 6d (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 tunnelløpene 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 oppsprekking vs. knusing, soner med og uten leire).

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 feltarbeidet heller.
- Stadig utviklings-potensiale.



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

### 2.3.3 Motivasjon for reprosessering 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 presentere de refraksjonsseismiske data på. Det var derfor interessant å foreta en reprosessering av resistivitetsdata og samtidig gjøre en tomografisk inversjon av refraksjonsseismikken og sammenholde dette med erfaringer høstet under tunneldrivingen (Rønning m.fl. 2016). Nye rutiner som gir åpenbare forbedringer innenfor programsystemet Rayfract, (Tassis et al. 2017 & 2018) gjør det interessant å utføre enda en reprosessering av refraksjonsseismikken fra Knappetunnelen i Bergen.

### 3. KORT BESKRIVELSE AV PROGRAMMET Rayfract®

Ved den tomografiske inversjonen av refraksjonsseismikken ved Knappetunnelen i Bergen, har NGU benyttet programsystemet Rayfract®. En studie av Sheehan et al. (2005) sammenlignet flere kommersielt tilgjengelige inversjonsprogrammer for flere problemstillinger og Rayfract kom gunstig ut av denne testen og er det programmet de aller fleste aktører benytter i dag.

Rayfract® kan prosessere både P-bølge og S-bølge refraksjons-seismikk og i tillegg borehulls-undersøkelser. Programmet er meget avansert og benytter flere tolkningsmetoder. Første versjon (v. 1.3) ble sluppet i 1998. Ved den første inversjonen av data fra Knappetunnelen ble versjon 3.33 fra 2015 benyttet, mens det i arbeidet som her rapporteres ble benyttet versjon 3.35 publisert i 2018. Programsystemet utvikles kontinuerlig slik at nye rutiner og forbedringer av eksisterende gjøres tilgjengelig.

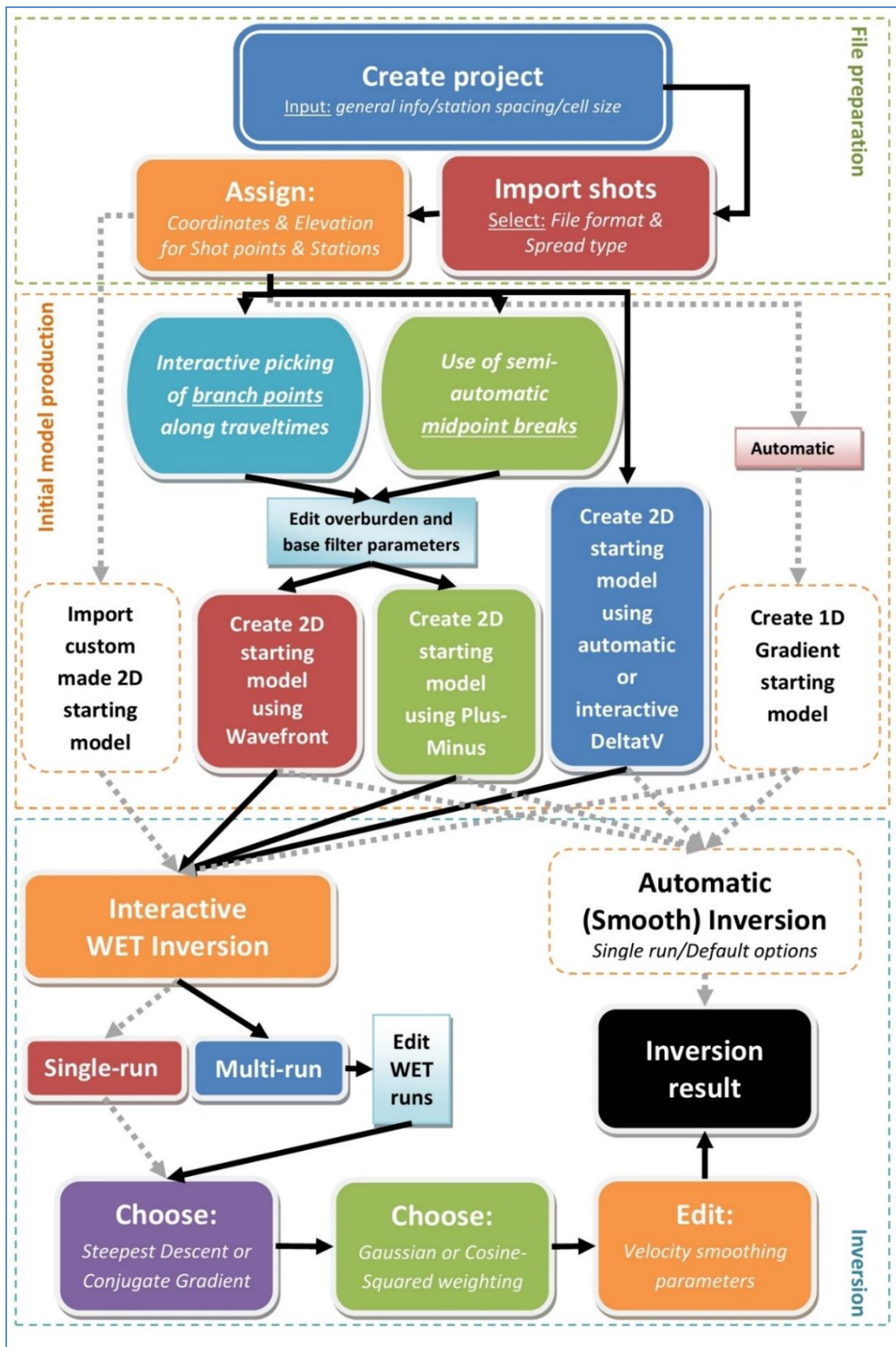
Med programmet Rayfract® kan hastighetsprofiler genereres automatisk. Programmet kan bedre takle reelle geologiske variasjoner som vertikal hastighetsgradient innenfor lag, hastighetsinversjoner (Reynolds 2011), utkiling av lag, forkastninger og hastighetsanomalier (Rayfract 2018b). Om en vil ha mer kontroll med startmodell for inverteringen, kan en benytte tradisjonelle tolkningsteknikker til dette. Noe som kan oppfattes som en ulempe med programmet er at hastighetsprofiler ofte presenteres i farger uten angivelse av hastighetsverdier. Dersom en ønsker å tolke hastighet i en svakhetssone, må en derfor benytte fargeskalaen for å tolke denne. For å få gode hastighetsprofiler må ikke skudd- og geofonavstanden være for stor. Ideelt bør det være ett skudd for hver tredje geofon og gjerne 2 m mellom geofonene. 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 (se Figur 5):

- 1 D Standard glatt inversjon (Rayfract 2018a)
- 2 D Delta-t-v-metoden (Gebrande & Miller 1985)
- 2 D Plus-minus metode (Hagedoorn 1959)
- 2 D Bølgefront (Bruckl 1987, Ali Ak 1990)

I tillegg kan en også benytte en egendefinert startmodell. Bølgefront-metoden kan betraktes som en optimalisert versjon av GRM-metoden (Generalized Reciprocal Method, Palmer 1980). Ved Pluss-minus-metoden og Bølgefrontmetoden kan en manuelt plukke knekkpunkter (branch points) i gangtidskurvene eller automatisk ved såkalte «Midpoint breaks» der en ser på gangtidskurver for CMP-data (Common MidPoint), data som viser gangtid for økende avstand mellom skudd og geofon.

Med utgangspunkt i en av disse startmodellene, er neste trinn en inversjonsrutine som blir kalt "Wavepath Eikonal Traveltime" WET, (Schuster & Quintus 1993, Watanabe et al. 1999). Denne inversjonen produserer 2D hastighetsmodeller. Som vist i Figur 5 kan en også her velge blant flere metoder, «Single-run» eller «Multi-run», «Steepest Descent» eller «Conjugate Gradient» inversjon, «Gaussian» eller «Cosine» vekting og flere glattingsmuligheter. Ved «Multi-run» kan inversjonsparametere endres for hver inversjonsrunde. For presentasjon av hastighetsprofiler benyttes programmet Surfer (Golden software). Forlengs modellering av førsteankomster benytter rutiner beskrevet av Lecomte et al. (2000).



Figur 5: Flytskjema for programmet Rayfract. Etter en organisering av datafiler genereres en startmodell. Dette kan skje på prinsipielt fem forskjellige metoder, både automatisk og ved bruk av manuelt plukket knekkpunkter i gangtidskurvener (branch points). Deretter følger selve inversjonen (Wavepath Eikonal Traveltime, WET). Her finnes også flere valg, «Single-run» eller «Multi-run», «Steepest Descent» eller «Conjugate Gradient» inversjon, «Gaussian» eller «Cosine Squared» vekting og flere glattingsmuligheter.

## 4. SAMMENLIGNING AV FORSKJELLIGE GEOFYSISKE TOLKINGER

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 med forklaring i vedlegg 1. Vedlegg 3 viser hvordan disse profilene ligger i forhold til resistivitetsprofil og sonebenevning vist i Figurene 1 og 3.

### 4.1 Datagrunnlag for refraksjonsseismikk og resistivitet

De refraksjonsseismiske data som her er reprocessert ble samlet inn av GeoPhysix som en del av forundersøkelsene for Knappe-tunellen (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 m og skuddavstand 20 m. I tillegg ble det skutt ett fjernskudd 20 – 50 m på hver side av utlegget. Geofon-utleggene var på 115 og 225 m (24 eller 48 kanaler). Som registreringsinstrument ble ABEM Terraloc Mark-3 og Marc-6 benyttet (ABEM1994). Profilene ble detaljert målt inn av vegvesenets egne folk. Generering av startmodell og selve inversjonen ble foretatt med programmet Rayfract versjon 3.35.

Resistivitetsdata ble samlet in av NGU i 2009 (Ganerød m. fl. 2009). Elektrodeavstanden var ved disse undersøkelsene 10 m og det ble benyttet Lund kabelsystem (Dahlin 1993) og Multi-gradient elektrodekonfigurasjon. Data-innsamlingen er mer utførlig beskrevet av Ganerød et al. (2009). Resistivitetsdata som her presenteres er invertert med programmet Res2DInv versjon 4.07.11 (Loke 2018) som er en oppgradert versjon i forhold til de versjonene som ble benyttet opprinnelig (3.56) og ved arbeidet i 2016 (4.03.32) (Rønning m.fl. 2016). Ved inversjonen som presenteres i denne rapporten er det i utgangspunktet benyttet standard (L2 norm) inversjon og filteret  $V/H=2$  som favoriserer vertikale strukturer.

### 4.2 Eksempel på forskjellig tolking av refraksjonsseismiske data.

Ved all ny automatisk tolking av refraksjonsseismiske data fra Knappetunnelen som rapporteres her, ble programsystemet Rayfract versjon 3.35 benyttet (Rayfract 2018a).

Som nevnt i avsnitt 3, kan flere startmodeller og rutiner benyttes ved inversjonen. I dette arbeidet er de refraksjonsseismiske data først invertert tradisjonelt av GeoPhysix as med Hagedoorn's (1959) pluss-minus-metode (også kalt Sjögrens ABC-metode) (Wåle 2009). Deretter er det foretatt automatisk inversjon med Hagedoorn's pluss-minus-metode, automatisk tomografisk inversjon (WET) med 1D startmodell, automatisk WET-inversjon med «single-run» og automatisk WET-inversjon med «multi-run» (se figur 5). Ved de to siste ble «Conjugate Gradient» inversjon og «Cosine Squared» vektning benyttet og Hagedoorn's automatiske inversjon ble benyttet som startmodell. Sistnevnte vurderes av NGU til å være antatt beste prosedyre (Tassis et al. 2017 og 2018).

**Figur 6** viser et eksempel på forskjellig tolking av refraksjonsseismisk profil 1.1 fra Knappetunnelen. Her er alle posisjoner angitt som midlere PEL-nummer (i meter) for de to tunnelene. Øverst presenteres den **tradisjonelle tolkingen** foretatt av Wåle (2009). Det indikeres relativt klart tre svakhetssoner hvor hastigheten er oppgitt til 3800 m/s (Wåle 2009). I starten av profilet indikeres en sone med hastighet 4600 m/s. P-



bølgehastigheten i berg mellom sonene er relativt høy (fra venstre 5800 m/s, 5300 m/s og 5700 m/s) noe som signaliserer massivt berg. Dagnært mot enden av profilet indikeres noe dårligere fjellkvalitet (dagfjell, 5000 m/s). Løsmassene er inndelt i to lag. Ett topplag med hastighet 600 m/s (tørr sand og grus eventuelt myr) og et lag under dette med hastighet 2200 m/s (morene).

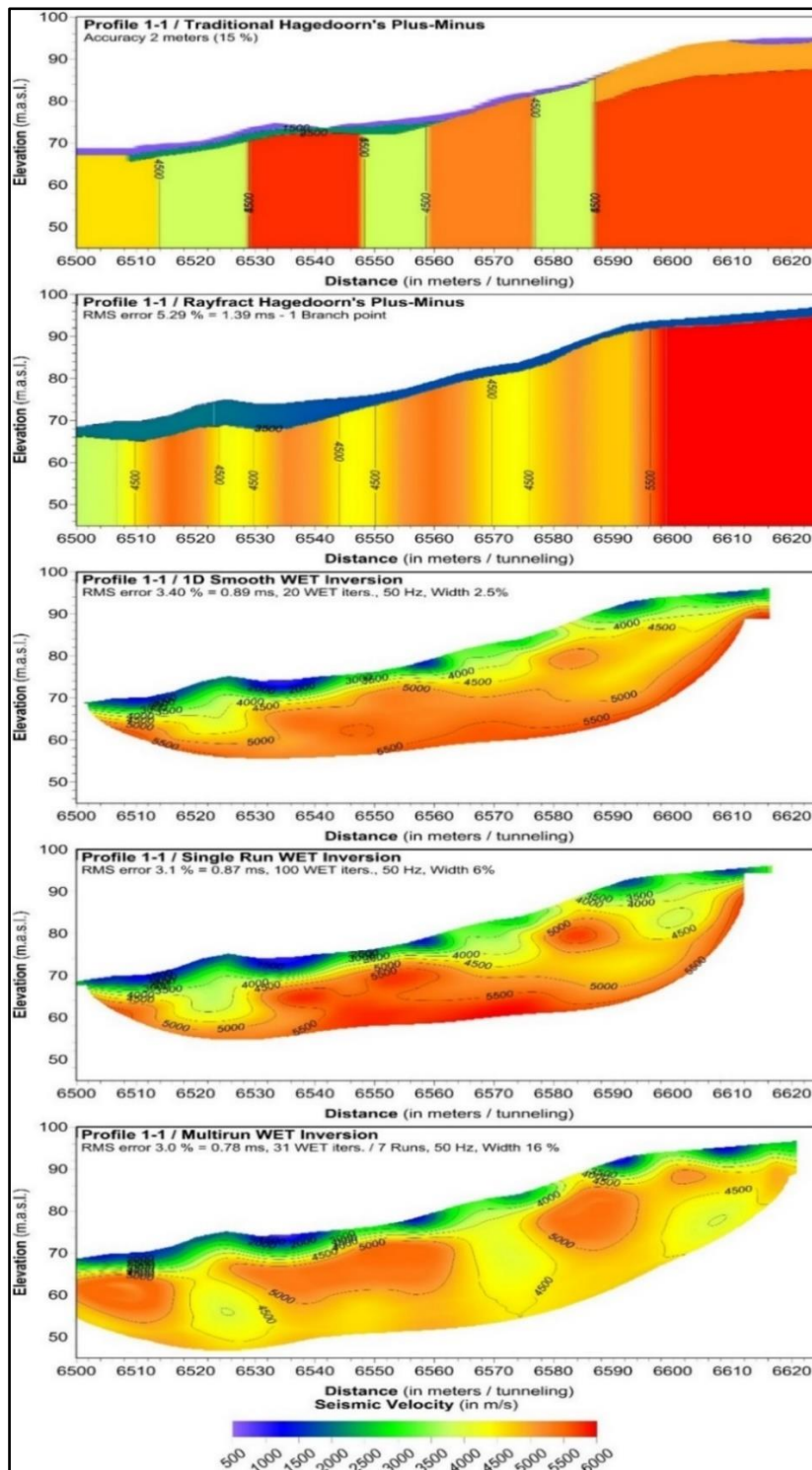
Den **automatisk genererte tolkingen med Hagedoorn's pluss-minus-metode** (bilde nr. 2) indikerer også tre mulige svakhetssoner i fjell, men hastigheten er noe høyere (ca. 4200 m/s). Disse er noe forskjøvet i forhold til ved den tradisjonelle tolkingen. Sonen i starten av profilet har fått en noe lavere hastighet, ca. 3800 m/s. Løsmassene fremstilles med skarp hastighetskontrast, men jevnt over med større tykkelse og med en høyere hastighet. Årsaken til dette er metodisk. Med den geofon- og skuddavstand som er benyttet her er det ikke mulig å tolke mer en to lag, ett løsmasselag over berg.

Bildet i midten av Figur 6 viser resultatet en fikk ved **automatisk tomografisk inversjon med 1D gradient startmodell**. Det indikeres ingen klare svakhetssoner i fjell, men ved to posisjoner (6525 og 6570) fremstår to forsenkninger i hastighetsforløpet som kan tolkes som mulige svakhetssoner. Hastigheten i disse ligger i intervallet 4000 – 4500 m/s. Generelt ligger hastigheten i fjell på over 5000 m/s unntatt mot slutten av profilet. Her indikeres en noe lavere hastighet (ca. 4300 m/s, gul farge) i et skråstilt lag under en noe høyere hastighet (hastighetsinversjon). Tradisjonelt er dette umulig å påvise. Øverst i plottet fremstår hastigheter lavere enn 2000 m/s (løsmasser) og disse går gradvis over i høyere hastigheter. En klar overgang til fjellhastigheter finnes ikke, og løsmassetykkelsen blir derfor vanskelig å tolke.

Nest nederste bilde i Figur 6 viser **tomografisk inversjon med antatt beste inversjonsmetode** («Conjugate Gradient» inversjon og «Cosine Squared» vekting), men som «**Single-run**» med 100 iterasjoner. Bildet er ikke så mye forskjellig fra midtre bildet (tomografisk inversjon med 1D gradient startmodell) men de to forsenkingene i hastighetsprofilen er mer markant og det antydes en noe lavere hastighet spesielt ved den første (posisjon 6530). Største endring kommer mot slutten av profilet der det fremstår et enda mer markert lavhastighetsområde som kan tolkes som svakhetszone med hastighet lavere enn 4000 m/s. Også her er overgangen fra løsmasser til fjell diffus og vanskelig å tolke.

Nederste bilde i Figur 6 viser **tomografisk inversjon med antatt beste inversjonsmetode** («Conjugate Gradient» inversjon og «Cosine Squared» vekting), og med «**multi-run**» (7 runder) der signalbredden endres for hvert «run», fra 30 % og i sprang på 2 % ned til 18 %. Dette er metoden som tidligere er vurdert som antatt beste metode (Tassis et al. 2017 og 2018). I dette bildet fremstår tre mulige svakhetssoner som alle strekker seg ned mot metodens penetrasjonsdyp på ca. 30 m. Hastigheten i sonematerialet ligger mellom 4000 m/s og 4500 m/s som er noe høyere enn ved den tradisjonelle tolkingen. Bredden på den første sonen kan tolkes til ca. 10 m (posisjon 6530) og ca. 15 m på den andre (posisjon 6575). Mot slutten av profilet fremstår en lavhastighetszone (< 4500 m/s) under materiale med høyere hastighet (4500 – 5000 m/s). Også denne kan tolkes som en svakhetszone som heller ikke er mulig å påvise tradisjonelt på grunn av hastighetsinversjon. Også her er overgangen fra løsmasser til fjell diffus og vanskelig å tolke.

De fem forskjellige tolkingemetodene av refraksjonseismikken viser forskjellig resultat. Antall svakhetssoner og plasseringen av disse varierer. Hastigheten i sonene der en har overlappende indikasjoner er forskjellig, og bredden av sonene varierer noe. I neste avsnitt blir det vist en oversikt over hvor mange soner de forskjellige metodene indikerer.



Figur 6: Eksempel på forskjellig tolkning av refraksjonseismisk Profil 1.1 over Knappetunnelen i Bergen. Øverst: Tradisjonell tolkning med Hagedoorn's plus-minus metode. Deretter: Automatisk tolkning med Hagedoorn's metode. I midten: Automatisk tomografisk inversjon med 1D startmodell. Nest nederst: «Single-run» WET inversjon. Nederst: «Multi-run» WET inversjon. De to siste metodene benytter Hagedoorn's automatiske 2D tolkning som startmodell, «Conjugate Gradient» inversjon og «Cosine Squared» vektning.

### 4.3 Sammenligning refraksjonsseismikk og resistivitet

I **Figur 7** er tre utvalgte refraksjonsseismiske tolkinger fra profil 1-1 sammenholdt med resistivitetsdata fra det tilsvarende området. De valgte refraksjonsseismiske tolkingene er tradisjonell tolking (Wåle 2009), automatisk tolking med Hagedoorns pluss-minus-metode, WET tomografisk inversjon med antatt beste prosedyre og til slutt resistivitetsdata. Fargekodet observert bergmassekvalitet langs profilet både i østre og vestre tunnelløp er plottet inn på alle figurer. Mellom disse data, i figuren som viser WET tomografisk inversjon (øverst til høyre), er tolket bergmassekvalitet på grunnlag av geologiske forundersøkelser plottet (fra Kirkeby 2010).

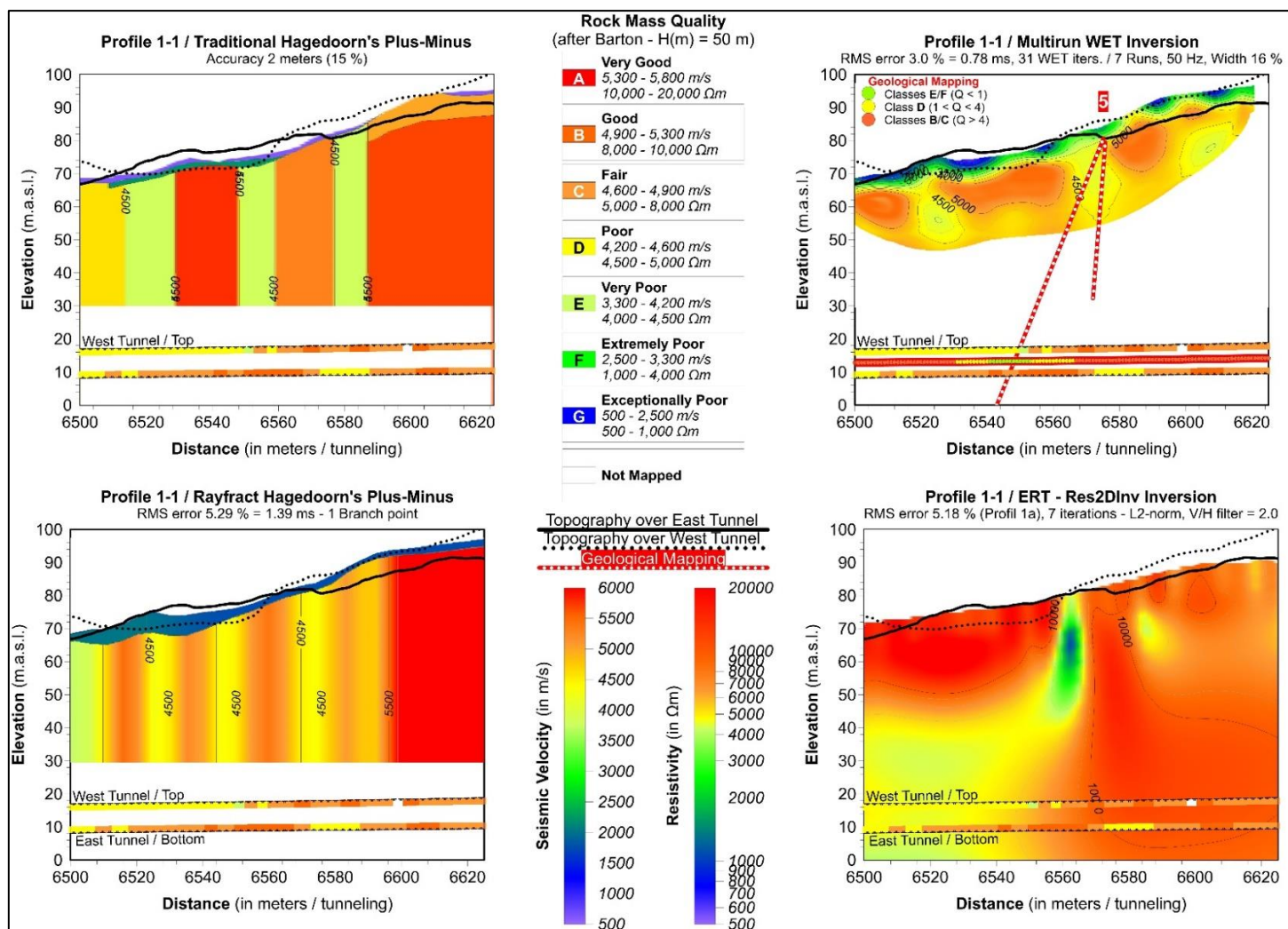
Resistivitetsdata viser her et mønster som avviker fra refraksjonsseismikken. Resistivitetsdata har større dybderekkevidde og kan i motsetning til refraksjonsseismikken si noe om bergmassekvalitet ned til tunnelnivå. Resistivitetsdata viser en markert sone med lav resistivitet (ned mot 1000  $\Omega\text{m}$ ) ved pel nummer 6564. Sonen indikerer et fall mot lavere pel-nummer (mot sør). Denne sonen sammenfaller delvis med en lavhastighetssone ved WET inverterte seismikkdata, og med en lavhastighetssone ved den automatiske tolkingen med Hagedoorns pluss-minus-metode. Resistivitetssonen faller midt mellom to lavhastighetssoner ved den tradisjonelle refraksjonsseismiske tolkingen.

Resistivitetsdata indikerer også en meget svak sone ved pel-nummer 6584. Denne faller sammen med lavhastighetssone på den tradisjonelle seismiske tolkingen og ved den automatiske Hagedoorns-tolkingen. Den tomografiske inversjonen viser ingen lavhastighets-sone ved denne posisjonen men snarere et område hvor p-bølgehastigheten er større enn 5000 m/s.

Et karakteristisk trekk ved resistivitetsdata er et klart anomalt nivå, lavere enn 4500  $\Omega\text{m}$ , under 40 m.o.h. fra pel-nummer 6500 til ca. pel-nummer 6540. Dette er ikke spesielt lavt for krystalline bergarter (Rønning et al. 2013a), men i denne sammenhengen fremstår det som klart lavere enn i bergarten generelt hvor resistiviteten er større enn 10.000  $\Omega\text{m}$ . Det er interessant å se at bergmassekvaliteten spesielt i østre tunnelløp er dårlig og som ender opp i en tynn sone med meget dårlig bergmassekvalitet.

De forskjellige metodene for kartlegging av svakhetssoner i berg (bergmassekvalitet) viser klart forskjellig resultat. Det er åpenbart et behov for å se nærmere på hvilke metoder som fungerer best, og i neste avsnitt blir treffprosent ved de forskjellige geofysiske metodene vurdert opp mot hverandre. Tabell 1 tar utgangspunkt i antall påviste soner ved de forskjellige geofysiske metodene og sammenholder dette med påvist bergmassekvalitet i tunnelnivå.

I påfølgende kapittel blir det tatt utgangspunkt i påviste soner med dårlig bergmassekvalitet i de to tunnellopene og sett på om disse påvises ved de forskjellige geofysiske tolkingemetodene. Disse resultatene oppsummeres i Tabell 2.



Figur 7: Eksempel på geofysiske og geologiske tolkinger langs profil P1.1. Tradisjonell tolking av refraksjonsseismikk (øverst til venstre), automatisk tolking med Hagedoorn's metode (nederst til venstre), antatt beste tomografiske inversjon (øverst til høyre) og resistivitet (nederst til høyre). Nederst på hvert bilde er observert bergmassekvalitet i de to tunneløpene vist. Bergmassekvalitet i østre tunnel er vist i tunnelens såle (bottom) mens bergmassekvalitet i vestre tunnel er vist i tunnelens heng. I figuren øverst til høyre er tolkede svakhetssoner ut fra geologisk kartlegging tegnet inn, også med tolket bredde i tunneløp. Topografien varierer også på tvers av profilet og dette illustreres ved at terrenget over de to tunneløpene avviker fra terrenget langs profilene.

1 Identi- fikasjon, ID nr.	2 Seismic line	3 Vedlegg 2 side ?	4 Posisjon PEL nr.	5 Geol. Kartl. Sone nr./ Bredde (m) (se Fig. 1)	6 Trad.tolk +/- V (m/s) / Bredde (m)	7 Auto +/- V (m/s) / Bredde (m)	8 Tomo multi V (m/s) / Bredde (m)	9 2D Res. Ohmm / Bredde (m)	10 Kommentarer:	Tabell 1 side 1
Geol 1	P1.1	1	6530 - 6566	5 / 36					MDBMK x 1, DBMK x 2	
Geof 1	P1.1	1	6500 - 6515		4500 / 15				DBMK x 2	
Geof 2	P1.1	1	6515 - 6530		3800 / 15				DBMK x 2	
Geof 3	P1.1	1	6548 - 6560		3800 / 12				DBMK x 1, delvis MDBMK	
Geof 4	P1.1	1	6576 - 6588		3800 / 12				DBMK x 1	
Geof 5	P1.1	1	6500 - 6510			4000 / 10			DBMK x 2	
Geof 6	P1.1	1	6522 - 6532			< 4500 / 10			DBMK x 1	
Geof 7	P1.1	1	6548 - 6560			< 4500 / 12			DBMK x 1, delvis MDBMK	
Geof 8	P1.1	1	6570 - 6576			< 4500 / 6			DBMK x 1	
Geof 9	P1.1	1	6520 - 6528				< 4500 / 8		DBMK x 2	
Geof 10	P1.1	1	6568 - 6576				<4500 / 8		DBMK x 1	
Geof 11	P1.1	1	6598 - 6612				< 4500 / 14		Falsk? Data i tunnel mangler	
Geof 12	RES	1	6500 - 6530					< 2000 / 30	DBMK x 1 (delvis x2), MDBMK	
Geof 13	RES	1	6584 - 6592					< 4000 / 8	DBMK x 1, opptret grunt	
Geol 2	P1.2	2	6696 - 6706	6a / 10					DBMK x 1	
Geof 14	P1.2	2	6706 - 6720		4200 / 14				DBMK x 1	
Geof 15	P1.2	2	6670 - 6678			< 4500 / 8			Falsk? Data i tunnel mangler	
Geof 16	P1.2	2	6706 - 6714			< 4000 / 8			DBMK x 1	
Geof 17	P1.2	2	6665 - 6678				<4500 / 13		Falsk? Data i tunnel mangler	
Geof 18	P1.2	2	6670 - 6726					<4500 / 56	DBMK x 1, 15 m < 1500 Ωm	
Geol 3	P1.3	3	6766 - 6780	6b / 14					DBMK x 2	
Geof 19	P1.3	3	6758 - 6770		3900 / 12				DBMK x 2	
Geof 20	P1.3	3	6740 - 6746			< 4500 / 6			DBMK x 2	
Geof 21	P1.3	3	6764 - 6772			< 4500 / 8			DBMK x 2	
Geof 22	P1.3	3	6806 - 6810			< 4500 / 4			DBMK x 1	
Geof 23	P1.3	3	6820 - 6824			< 4500 / 4			DBMK x 2	
Geof 24	P1.3	3	6744 - 6750				< 4500 / 6		DBMK x 2	
Geof 25	P1.3	3	6800 - 6810				< 4500 / 10		DBMK x 2	
Geof 26	P1.3	3	6768 - 6806					< 4500 / 38	DBMK x 2, 16 m < 1500 Ωm	
Geol 4	P1.4-5	10	6842 - 6856	6c / 14					Falsk? Data i tunnel mangler	
Geol 5	P1.4-5	10	6932 - 6948	6d / 16					DBMK x 2	
Geol 6	P1.4-5	10	6960 - 6988	7a / 28					DBMK x 2, MDBMK x 1	
Geol 6	P1.4-5	10	6996 - 7008	7b / 12					Falsk? Data i tunnel mangler	
Geof 27	P1.4-5	10	6841 - 6848		3200 / 7				DBMK x 2	
Geof 28	P1.4-5	10	6864 - 6810		3300 / 6				DBMK x 1	
Geof 29	P1.4-5	10	6860 - 6870			< 3500 / 10			DBMK x 1	

1 Identi- fikasjon, ID nr.	2 Seismic line	3 Vedlegg 2 side	4 Posisjon PEL nr. i tunnel	5 Geol. Kartl. Sone nr. (se Fig. 1)	6 Trad.tolk +/- V (m/s) / Bredde (m)	7 Auto +/- V (m/s) / Bredde (m)	8 Tomo multi V (m/s) / Bredde (m)	9 2D Res. Ohmm / Bredde (m)	10 Kommentar	Tabell 1 side 2
Geof 30	P1.4-5	10	6996 - 6998			< 4000 / 2			DBMK x 2	
Geof 31	P1.4-5	10	7000 - 7016			< 3500 / 16			Falsk? Data i tunnel mangler	
Geof 32	P1.4-5	10	6880 - 6912				< 4000 / 32		DBMK x 2	
Geof 33	P1.4-5	10	6992 - 7008				< 4500 / 16		Falsk? Data i tunnel mangler	
Geof 34	P1.4-5	10	6904 - 6934					<3500 / 30	DBMK x 2	
Geof 35	P1.4-5	10	6970 - 7008					<4500 / 38	DBMK x 2, 20 m < 1500 Ωm	
Geof 36	P1.6-7	11	7148 - 7158		3400 / 10				DBMK x 1	
Geof 37	P1.6-7	11	7158 - 7172		2800 / 14				DBMK x 2	
Geof 38	P1.6-7	11	7124 - 7132			< 4500 / 8			Falsk	
Geof 39	P1.6-7	11	7154 - 7160			< 4500 / 6			DBMK x 1	
Geof 40	P1.6-7	11	7166 - 7182			< 3500 / 16			Falsk? Data i tunnel mangler	
Geof 41	P1.6-7	11	7200 - 7228			< 3500 / 28			DBMK x 1	
Geof 42	P1.6-7	11	7164 - 7180				< 3500 / 26		Falsk? Data i tunnel mangler	
Geof 43	P1.6-7	11	7216 - 7260				< 3500 / 44		DBMK x 2	
Geof 44	P1.6-7	11	7040 - 7100					< 3000 / 60	Falsk	
Geof 45	P1.6-7	11	7142 - 7150					<4500 / 8	DBMK x 1	
Geof 46	P1.6-7	11	7190 - 7256					< 4000 / 66	DBMK x 2	
Geof 47	P1.8	4	7340 - 7346		2700 / 6				Falsk? Data i tunnel mangler	
Geof 48	P1.8	4	7292 - 7300				< 4500 / 8		Falsk? Data i tunnel mangler	
Geof 49	P1.8	4	7346 - 7352				< 4500 / 6		DBMK x 1	
Geol 7	P1.9	5	7452 - 7458	8 / 6					DBMK x 1	
Geof 50	P1.9	5	7380 - 7386		2700 / 6				DBMK x 1	
Geof 51	P1.9	5	7440 - 7450		3500 / 10				DBMK x 1	
Geof 52	P1.9	5	7384 - 7392			< 4500 / 8			DBMK x 1	
Geof 53	P1.9	5	7380 - 7396				< 4500 / 16		DBMK x 1	
Geof 54	P1.9	5	7388 - 7464					< 3800 / 76	DBMK x 1, 10 m < 1500 Ωm	
Geol 8	P1.9B	6	7486 - 7502	9 / 16					DBMK x 1	
Geof 55	P1.9B	6	7480 - 7506		3900 / 26				DBMK x 1	
Geof 56	P1.9B	6	7476 - 7496			< 4000 / 20			DBMK x 1	
Geof 57	P1.9B	6	7424 - 7430				< 4500 / 6		DBMK x 1	
Geof 58	P1.9B	6	7484 - 7496				< 4500 / 12		DBMK x 1	
Geof 59	P1.9B	6	7400 - 7460					< 4000 / 60	DBMK x 1, 3 små soner	
Geof 60	P1.9B	6	7504 - 7530					<4500 / 26	DBMK x 1	
Geol 9	P6	9	7836 - 7862	10 / 26					DBMK x 1	
Geof 61	P6	9	7816 - 7850		2500 / 34				DBMK x 2	

1 Identi- fikasjon, ID nr.	2 Seismic line	3 Vedlegg 2 side	4 Posisjon PEL nr. i tunnel	5 Geol. Kartl. Sone nr. (se Fig. 1)	6 Trad.tolk +/- V (m/s) / Bredde (m)	7 Auto +/- V (m/s) / Bredde (m)	8 Tomo multi V (m/s) / Bredde (m)	9 2D Res. Ohmm / Bredde (m)	10 Kommentar	Tabell 1 side 3
Geof 62	P6	9	7850 - 7900		4200 / 50				Falsk? Data i tunnel mangler	
Geof 63	P6	9	7800 - 7830			< 4000 / 30			DBMK x 2	
Geof 64	P6	9	7830 - 7852			< 3000 / 22			DBMK x 1	
Geof 65	P6	9	7852 - 7868			< 4000 / 16			Falsk	
Geof 66	P6	9	7882 - 7892			< 3500 / 10			Falsk? Data i tunnel mangler	
Geof 67	P6	9	7806 - 7850				< 3000 / 44		DBMK x 2	
Geof 68	P6	9	7850 - 7890				< 4500 / 50		Falsk	
Geof 69	P6	9	7800 - 7840					< 4000 / 40	DBMK x 1	
Geof 70	P6	9	7840 - 7906					< 4000 / 66	Falsk? Data i tunnel mangler	
Geol 10	P2	7	8350 - 8360	12 / 10?					Falsk	
Geof 71	P2	7	8290 - 8324		4200 / 34				MDBMK x 1	
Geof 72	P2	7	8344 - 8356		3000 / 12				Falsk	
Geof 73	P2	7	8290 - 8306			< 4300 / 16			MDBMK x 1	
Geof 74	P2	7	8338 - 8360			< 4000 / 22			Falsk	
Geof 75	P2	7	8290 - 8312				< 4500 / 22		MDBMK x 1	
Geof 76	P2	7	8338 - 8360				< 4500 / 22		Falsk	
Geol 11	P3	8	8376 - 8396	12 / 20					Falsk? Data i tunnel mangler, = Geol 10	
Geof 77	P3	8	8290 - 8324		4000 / 34				Falsk? Data i tunnel mangler, = Geof 71	
Geof 78	P3	8	8348 - 8358		3300 / 10				DBMK x 1,	
Geof 79	P3	8	8388 - 8396		3300 / 8				Falsk? Data i tunnel mangler	
Geof 80	P3	8	8312 - 8320			< 4000 / 8			Falsk? Data i tunnel mangler, = Geof 73	
Geof 81	P3	8	8384 - 8390			< 4500 / 6			Falsk? Data i tunnel mangler	
Geof 82	P3	8	8310 - 8318				< 4500 / 8		Falsk? Data i tunnel mangler, = Geof 75	
Geof 83	P3	8	8380 - 8388				< 4500 / 8		Falsk? Data i tunnel mangler	
Geof 84	P3	8	8320 - 8348					< 4000 / 28	MDBMK x 1	
Geof 85	P3	8	8380 - 8396					< 1000 / 16	Falsk? Data i tunnel mangler	
SUM		Alle		11	19	25	19	16	Antall soner	
SUM		Alle		3	4	8	7	3	Antall falske soner	
SUM		Alle		204	301	282	335	656	Total lengde svakhetszone (m)	

Tabell 1: Oversikt over indikerte svakhetssoner ved geologisk kartlegging, tre forskjellige inversjoner av samme refraksjonseismiske data og resistivitetsdata fra Knappetunnelen. Kolonne 1: ID-nr. Kolonne 2: Seismisk linje refererer til profilbenevning i rapport fra GeoPhysix (Wåle 2009). Kolonne 3: "Vedlegg 2 side" refererer til vedlegg i denne rapporten. Kolonne 4: "Posisjon" refererer til ca.PEL-nummer i tunnelene. Kolonne 5: Sone nr. og tolket bredde ved geologisk kartlegging. Kolonne 6: Trad. Tolk +/- = Tradisjonell tolkning med Hagedoorn's metode. Kolonne 7: Auto +/- = Automatisk Hagedoorn-tolkning ved bruk av Rayfract, Kolonne 8: Tomo multi = WET inversjon med «Multi-run». Kolonne 9: 2D Res. er resistivitetsdata fra området. I kommentarfeltet (Kolonne 10) betyr (M)DBMK= (Meget) Dårlig BergMasseKvalitet, x1, x2 = registrert i 1 eller 2 tunneløp. Merk: Antall soner og lengde av disse fra P2 er ikke regnet med i summeringen siden de telles for P3. Merk: Noen soner er kommentert som «Falsk» som betyr art sonen ikke er funnet i tunnelnivå. «Falsk?» betyr trolig falsk sone, men data mangler i tunnelnivå og det kan være en son likevel.

#### 4.4 Treffrate ved de forskjellige geologiske og geofysiske tolkingene

Tabell 1 viser en oversikt over indikerte svakhetssoner ved de fem metodene; geologiske forundersøkelser, tradisjonell tolking av refraksjonsseismikken ved bruk av Hagedoorn's pluss-minus-metode, automatisk tolking av refraksjonsseismikken ved bruk av samme metode, antatt beste tomografiske inversjon av seismikkdata og resistivitetsdata.

**Kriterier for å tolke en svakhetszone er p-bølgehastighet lavere enn 4500 m/s og resistivitetsverdi lavere enn 4500  $\Omega$ m. Dersom indikert sone faller på eller innenfor +/- 10 meter fra påvist dårlig (meget dårlig) bergmasse-kvalitet i et eller i begge tunneløpene registreres dette som treff. Det antas at sonene er mer eller mindre vertikale.**

De tre første kolonnene i **Tabell 1** viser et identifikasjonsnummer og hvor tolkingsdata er presentert i vedlegg 2. Fjerde kolonne angir pel-nummer for den aktuelle indikerte svakhetszone i de to tunnelene. Femte kolonne viser indikerte soner ved de geologiske forundersøkelsene. Sonene angis med et nummer som refererer til numrene vist i Figur 1 og i tillegg angis bredden av sonen hentet fra rapport fra forundersøkelsene (Kirkeby 2010). I kolonne seks angis tolkede soner ved den tradisjonelle seismiske tolkingen med angitt seismisk hastighet og sonens bredde. Kolonne sju og åtte angir tilsvarende data ved automatisk tolking med Hagedoorns metode og med antatt beste tomografiske inversjon. Kolonne ni viser indikerte soner ved resistivitetsdata. Her angis resistivitet i sonen og sonenes bredde.

I kommentarfeltet, kolonne ti i **Tabell 1**, angis om sonen kan knyttes opp mot påvist dårlig eller meget dårlig bergmassekvalitet ved tunneldrivingen i en (x1) eller i begge tunneløpene (x2). Indikerte soner som ikke kan kobles til dårlig eller meget dårlig bergmassekvalitet angis som falske soner. Dessverre er det mindre huller i datagrunnlaget angitt med hvite felt i karakteriseringen av bergmassene ved tunnelarbeidene (se Figur 1 og Vedlegg 2). Dette angis med «*Data i tunnel mangler*». Totalt for alle metodene er det angitt 23 mulige falske soner, men 19 av disse kan kobles til manglende data fra tunneldrivingen. I det videre arbeid behandles all angitt falske soner som om de er en feilpåvisning.

Metode	Geologisk kartlegging	Trad.tolk seismikk	Auto +/- Seismikk	Tomo-inversjon	Resistivitet
Antall påviste soner	11	19	25	19	16
Antall falske soner	3	4	8	7	3
Total sone-lengde (m)	204	347	320	379	656

Tabell 2: Antall påviste svakhetssoner ved geologisk kartlegging, tradisjonell seismisk tolking, automatisk tolking med Hagedoorn's pluss-minus-metode, tomografisk inversjon med antatt beste prosedyre og resistivitet.

**Tabell 2** viser en oversikt over hvor mange soner de forskjellige metodene indikerer. Profil 2 og Profil 3 dekker tilnærmet det samme området er påviste soner ved seismikken langs Profil 2 ikke tatt med i summeringen. Dette for å få så like sammenligninger som mulig da geologisk kartlegging og resistivitet har bare en enkel dekning langs hele tunnelen.



Det geologiske kartleggingen utført som en del av forundersøkelsene påviser færrest soner (11). Deretter følger resistivitet (16) og to av de seismiske tolkingsmetodene (19). Flest soner indikeres med automatisk tolking med Hagedoorns metode (25) men denne metoden sammen med den tomografiske inversjonen gir også flest falske soner, henholdsvis 8 og 7 soner. Treffrate kan også studeres ved total sone-lengde. Her kommer resistivitet bedre ut ved at sonene i sum er lengre langs de to tunnelene.

## 5. SAMMENLIGNING AV TUNNELDATA MED GEOLOGISKE OG GEOFYSISKE FORUNDERSØKELSER

I dette kapitlet tas det utgangspunkt i påviste soner med dårlig og meget dårlig bergmassekvalitet påvist i de to tunnellopene og ser om disse påvises ved de forskjellige geologiske og geofysiske tolkingene.

### 5.1 Påvist dårlig bergmassekvalitet i tunnelnivå

I dette avsnittet tas det utgangspunkt i hva som ble påvist ved tunneldrivingen. **Tabell 3** viser en oversikt over påviste soner med dårlig og meget dårlig bergmassekvalitet i de to tunnellopene ved Knappetunnelen i Bergen. Den første kolonnen viser en soneidentitet mens de to neste kolonnene viser hvor de opptrer i det geofysiske datagrunnlaget (profil og side i vedlegg 2). Kolonne 4 og 5 som viser hvor disse sonene opptrer i de to tunnelene (pel-nummer) mens kolonne 6 viser påvist bergmassekvalitet. De fem siste kolonnene viser om de kartlagte sonene påvises ved henholdsvis geologisk kartlegging som en del av forundersøkelsene, ved tradisjonell tolking av refraksjonsseismikken, ved automatisk tolking med Hagedoorn's pluss-minus-metode, ved tomografisk inversjon med antatt beste prosedyre eller ved resistivitetmålinger. Ved denne sammenligningen benyttes de samme treffkriteriene som i Avsnitt 4.4: **p-bølgehastighet < 4500 m/s, resistivitet < 4500  $\Omega$ m, sonene ligger innenfor en feilmargin på +/- 10 m og det antas at de er nær vertikale.**

Totalt er det påvist 26 soner med dårlig eller meget dårlig bergmassekvalitet i de delene av Knappetunnelen hvor vi har geofysiske data å sammenligne med (se Tabell 3). Sonene fordeler seg ujevnt i de to tunnellopene med 19 soner i vestlige tunnel, 7 i østlige løp mens to soner er i begge. Den totale lengden av disse sonene viser samme mønster, i alt 280 m med dårlig og meget dårlig bergmassekvalitet i vestlige løp og 186 m i østlige tunnellop (Tabell 3). Årsaken til dette er uklar. Det er de samme folkene som har bedømt bergmassekvaliteten i begge tunnellopene så en bør kunne se bort fra subjektive vurderinger.

To av sonene er sammenfallende i de to tunnellopene og hvis en trekker fra overlappet (20 m) er det påvist dårlig eller meget dårlig bergmassekvalitet i en total lengde av 446 m langs de to tunnelene. **Tabell 2** viser at den geologiske kartleggingen ved forundersøkelsene indikerte dårlig eller meget dårlig bergmassekvalitet i en total lengde på 204 m langs tunnelen. Dette tilsvarende 46 % av den totale lengden dårlig

eller meget dårlig bergmasse observert i tunnelene (446 m). Tilsvarende tall for tradisjonell seismisk tolking er 347 m (78 %), automatisk tolking med Hagedoorns pluss-minus-metode 320 m (72 %), tomografisk inversjon med antatt beste prosedyre 379 m (85 %) og resistivitet 656 m (147 %).

**Vurdering:**

Ut fra analysen over kan det se ut som om tomografisk inversjon fungerer best for påvisning av dårlig bergmassekvalitet av de vurderte tolkingemetodene. Resistivitet indikerer dårlig til meget dårlig bergmassekvalitet i et langt større område enn det som ble påvist i tunnelnivå, mens den geologiske kartleggingen indikerte mindre enn halvparten av den påviste lengden av dårlig eller meget dårlig bergmassekvalitet.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Identifikasjon	Seismikk linje	Vedl. 2 side	PEL Fra – Til (m) Vesttunnel Løp12 (antall)	PEL Fra – Til (m) Østtunnel Løp 11 (antall)	Bergmassekvalitet i tunnel	Sett ved Geol.kartl. sone nr., Prosent	Sett med Trad +/- Prosent	Sett med Auto +/- Prosent	Sett med TOMO Multi Prosent	Sett med 2D RES Prosent
Sone 1	P1.1	1	6500 – 6548 (1)	6500 – 6516 (2)	DBMK	Nei	Delvis	Delvis	Delvis	Ja
Sone 2	P1.1	1	6548 – 6552 (1)		MDBMK	Ja, 5	Ja	Ja	Nei	Ja
Sone 3	P1.1	1	6556 – 6560 (1)		DBMK	Ja, 5	Ja	Ja	Ja	Ja
Sone 4	P1.1	1		6572 – 6588 (1)	DBMK	Ja, 5	Ja	Ja	Ja	Ja?
Sone 5	P1.2	2	6700 – 6714 (1)		DBMK	Ja, 6a	Ja	Ja	Nei	Ja
Sone 6	P1.3	3	6752 – 6788 (1)		DBMK	Delvis 6b, 50	Delvis, 33	Delvis, 35	Nei	Delvis, 70
Sone 7	P1.3	3	6790 – 6798 (1)		DBMK	Nei	Nei	Ja	Ja	Ja
Sone 8	P1.3	3	6818 – 6824 (1)		DBMK	Nei	Nei	Ja	Ja?	Nei
Sone 9	P1.3	3		6766 – 6834 (1)	DBMK	Delvis, 6b, 25	Delvis, 20	Delvis, 20	Delvis, 15	Delvis, 65
Sone 10	P1.4-5	9	6868 – 6872 (1)		DBMK	Nei	Ja	Ja	Nei	Nei
Sone 11	P1.4-5	9		6896 – 6906 (1)	DBMK	Nei	Nei	Ja	Ja	Ja
Sone 12	P1.4-5	9	6904 – 6920 (1)		DBMK	Nei	Nei	Delvis, 25	Ja	Ja
Sone 13	P1.4-5	9	6928 – 6974 (1)		DBMK	Delvis, 6d, 44	Nei	Delvis	Nei	Delvis, 44
Sone 14	P1.4-5	9		6948 – 6984 (1)	(M)DBMK	Ja, 7	Nei	Delvis	Nei	Delvis, 44
Sone 15	P1.6-7	10	7156 – 7160 (1)		DBMK	Nei	Ja	Ja	Ja	Ja
Sone 16	P1.6-7	10		7216 – 7226 (1)	DBMK	Nei	Nei	Ja	Ja	Ja
Sone 17	P1.6-7	10	7234 – 7240 (1)		DBMK	Nei	Nei	Ja	Ja	Ja
Sone 18	P1-8	4		7356 – 7362 (1)	DBMK	Nei	Nei	Nei	Ja	Nei
Sone 19	P1-8	4	7372 – 7386 (1)		DBMK	Delvis, ??,50	Delvis, 25	Nei	Nei	Delvis, 40
Sone 20	P1.9	5	7412 – 7416 (1)		DBMK	Nei	Nei	Nei	Ja??	Ja
Sone 21	P1.9	5	7426 – 7432 (1)		DBMK	Nei	Nei	Nei	Nei	Ja
Sone 22	P1.9	5	7442 – 7450 (1)		DBMK	Ja, 8	Ja	Nei	Nei	Ja
Sone 23	P1.9B	6	7492 – 7504 (1)		DBMK	Ja, 9	Ja	Ja	Ja	Delvis, 50
Sone 24	P6	9	7800 – 7810 (2)	7806 – 7832 (1)	DBMK	Nei	Ja	Ja	Ja	Ja
Sone 25	P2	7	8298 – 8328		MDBMK	Nei	Ja	Delvis, 30	Delvis, 50	Delvis,40
Sone 26	P3	8		8338 – 8352 (1)	DBMK	Nei	Ja	Ja	Ja	Ja
		Sum	280 meter	186 meter	Antall Ja	7	11	14	14	16
					Antall delvis	4	4	7	3	7
					Antall totalt	11	15	21	17	23
					Antall nei	15	11	5	9	3
					Ant. falske	3	2	6	6	2

Tabell 3: Oversikt over påviste soner med dårlig eller meget dårlig bergmassekvalitet i tunnelene (kolonne 1 – 5, identifikasjon, hvilken seismikklinje de ligger, vedlegg i denne rapporten som viser aktuelle område og PEL-nummer i de to tunnelene), deres bergmassekvalitet ((M)DBMK = (Meget) Dårlig BergMasseKvalitet) indikert ved tunneldriving (kolonne 6). Kolonnene 7 til 11 angir om sonene ble påvist ved geologiske kartlegging, tradisjonell seismisk tolkning Hagedoorn's Plus-Minusmetode, automatisk tolkning Hagedoorn's Plus-Minusmetode, WET tomografisk inversjon med «Multi-run» og ved resistivitet.

## 5.2 Sammenheng mellom påvist dårlig bergmasse og treffrater.

Høyre del av Tabell 3 viser om de forskjellige geologiske og geofysiske tolkingene påviser de kartlagte sonene med dårlig og meget dårlig bergmassekvalitet i tunnelnivå. «Ja» betyr at metoden angir en sone innenfor de gitte kriteriene, «nei» det motsatte. «Delvis» betyr at de geologiske og geofysiske tolkingene bare delvis sammenfaller med kartlagt sone i tunnellopene. Det gis et anslag i prosent for hvor stor del av påvist sone i tunnelnivå som indikeres geologisk og geofysisk. Tabell 4 oppsummerer de individuelle resultatene i Tabell 3 og trekker inn antall falske soner fra Tabell 2.

1	2	3	4	5	6
Metode	Geologisk kartlegging	Trad. tolk seismikk	Auto +/- seismikk	Tomografisk inversjon	Resistivitet
Antall Ja	7	11	14	14	16
Antall delvis	4	4	7	3	7
Antall totalt	11	15	21	17	23
Antall nei	15	11	5	9	3
Antall falske	3	4	8	7	3
Treff-faktor	-7	0	8	1	17

Tabell 4: Antall treff (ja), delvis treff, totalt antall treff, ikke påviste (nei) og falske svakhetssoner i tunnelnivå for undersøkelsesmetodene geologisk kartlegging ved forundersøkelsene (kolonne 2), tradisjonell tolking av refraksjons-seismikk (kolonne 3), automatisk tolking av refraksjonsseismikk med Hagedoorn's pluss-minus-metode (kolonne 4), tomografisk inversjon med antatt beste prosedyre (kolonne 5) og resistivitet (kolonne 6). En treff-faktor er beregnet ut fra antall treff minus summen av antall soner som ikke ble påvist og antall falske soner (fra tabell 1).

**Tabell 4** viser at resistivitet indikerer flest av sonene med dårlig og meget dårlig bergmassekvalitet. Sammen med de sonene som det er delvis sammenfall på, har resistivitet indikert 23 av i alt 26 kartlagte soner i tunnelnivå. De tre sonene som ikke er indikert er relativt tynne soner i tunnelnivå (se **Tabell 3**): Sone 8 (6 m bred), sone 10 (4 m) og sone 18 (6 m). Metoden har indikert 3 soner som karakteriseres som falske. Ved to av disse (Geof 70 og Geof 85 i **Tabell 1**) mangler observasjoner i tunnelnivå, og disse kan derfor være reelle. Sone Geof 44 synes å være en falsk påvisning (se **Tabell 1**). Resistivitetsanomalien er ca. 60 m bred, resistiviteten er lavere enn 3000  $\Omega\text{m}$  og den fremstår som en meget klar sone i Vedlegg 2, side 11. Uoverensstemmelsen kan forklares ved at sonen skyldes elektrisk ledende mineraler (sulfider eller grafitt) men kan også være en kunstig effekt av relativt godt ledende materiale ved overflaten (ned mot 500  $\Omega\text{m}$ ).

Tomografisk inversjon med antatt beste prosedyre gir respons på 17 (14 + 3) av de 26 påviste svakhetssonene i tunnelnivå. Dette er noe bedre enn den tradisjonelle tolkingen (Wåle 2009) som indikerer 15 treff totalt, men dårligere enn den automatiske tolkingen med Hagedoorn's pluss-minus-metode med 21 treff totalt. Denne automatiske tolkingen er ment å være en måte å generere en startmodell for tomografisk inversjon, og ikke en selvstendig tolkingemetode. Metoden tolker imidlertid data på samme måte som ved de tradisjonelle tolkingene, men med større detaljeringsgrad som kan gi flere enkeltstående soner. Dette avspeiles i Tabell 1 der metoden indikerer i alt 25 soner mot 19 ved de andre seismiske tolkingene. Tabell 4 viser at automatisk tolking med Hagedoorn's pluss-minus-metode og tomografisk

inversjon angir noe flere falske soner, henholdsvis 8 og 7, men også for disse er det soner i tunnelnivå hvor bergmassekvaliteten ikke er angitt.

Den geologiske kartleggingen utført som en del av forundersøkelsene kommer dårligst ut under denne analysen. Bare 11 av de 26 påviste sonene med dårlig eller meget dårlig bergmassekvalitet i tunnelene indikeres. Det er også her angitt 3 falske soner, men alle disse ligger i områder der det mangler data fra tunneldrivingen.

Ved denne analysen er det vanskelig kvantitativt å kåre noen vinner da dette avhenger av hva det legges vekt på. En måte å gjøre dette på, er å beregne en treff-faktor der en tar utgangspunkt i antall totalt indikerte soner og trekker fra summen av antall ikke påviste soner og antall falske soner. Denne treff-faktoren i **Tabell 4** antyder at resistivitet kommer best ut, deretter automatisk tolking med Hagedoorn's pluss-minus-metode foran tomografisk inversjon og de tradisjonelle tolkingene av refraksjonsseismikken. Geologisk kartlegging ut fra terrengformer kommer dårligst ut.

## 6. DISKUSJON

I denne påfølgende diskusjonen skilles det på rene metodiske (inversjon av refraksjonsseismikk og resistivitet) og ingeniørgeologiske forhold.

### 6.1 Metodiske forhold ved tomografisk inversjon av refraksjonsseismiske data

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). Dette skyldes trolig måten data er blitt invertert på. Tidligere arbeid utført på syntetiske data i samarbeid med Vegdirektoratet, har vist at antatt beste inversjonsprosedyre for påvising av svakhetssoner i berg er å benytte en startmodell generert ved en automatisk tolking med Hagedoorn's pluss-minus-metode, «multi-run Conjugate Gradient» inversjon og med «Cosine-squared» vekting (Tassis et al. 2017 og 2018). Ved arbeidet som rapporteres her, vet en ikke fasiten slik en gjør ved syntetiske data. Figur 6 viser at de forskjellige tolkingene (inversjonene) gir forskjellig resultat, og de indikerte svakhetssonene kommer klarest frem ved denne antatt beste inversjonsmetoden. Dette viser at refraksjonsseismiske data fremstår forskjellig ved forskjellig inversjons-prosedyre og det er viktig å velge riktig prosedyre. Ut fra egen modellering (Tassis et al. 2017) velger NGU å stole mest på «multi-run Conjugate Gradient» inversjon og med «Cosine-squared» vekting.

Ved arbeidet rapportert i 2016 (Rønning m.fl. 2016) ble programmet Rayfract versjon 3.33 benyttet. Ved arbeidet som rapporteres her, er en oppgradert versjon 3.35 benyttet. Trolig er dette en forbedring, men den største endringen ligger i valg av prosedyre. Som vist i Figur 6, er det stor forskjell i hastighetsprofilen om WET-inversjonen er utført med 1D startmodell og enkel («smooth») inversjon (i midten) eller om det er utført med antatt beste prosedyre, men med en enkel inversjon («single-run», nest nederst) og «multi-run» nederst. Den største forskjellen i resultatene er når inversjonen utføres som «Multi-run» med justering av parametere (signal bredde) for hver runde og ellers antatt beste inversjon (nederste figur). Sistnevnte var ikke tilgjengelig i 2016 da forrige re-tolking av seismikkdata fra Knappetunellen ble foretatt.

Dette nye arbeidet viser at tomografisk inversjon av refraksjonsseismiske data fra Knappetunnelen har gitt bedre bilde av hastighetsvariasjonene i undergrunnen. Ved alle sammenligninger av tolkingsteknikker i dette arbeidet, er den tomografiske inversjonen utført med denne antatt beste prosedyre.

Ved forrige studie av refraksjonsseismikken fra Knappetunnelen ble det indikert at **tradisjonelle tolkinger** var et lite hakk bedre enn den **tomografiske inversjonen** når en ser på antall påviste soner (17 mot 16) men også antall falske soner (2 mot 7). Ved analysen foretatt i dette arbeidet (Tabell 2) indikerer de to metodene like mange soner (19, sonene langs Profil 2 ikke medregnet), men den tradisjonelle tolkingen har færre falske soner (4 mot 7). Ut fra dette har ikke reprosesseringen av refraksjonsseismikken med en antatt bedre prosedyre gitt vesentlig flere påviste svakhetssoner. Avviket mellom antall soner ved tradisjonelle tolkinger ved undersøkelsen i 2016 og ved undersøkelsen som rapporteres her, skyldes en noe annerledes måte for opptelling. To tynne soner ble utelatt i 2016 og to soner med to forskjellige hastigheter ble regnet som en.

Refraksjonsseismikken ved Knappetunnelen ble samlet inn med 5 m geofonavstand og skudd for hver 20 m. I forhold til tradisjonelle seismiske målinger er dette detaljert. Modellering av syntetiske data har vist at ved 5 m geofonavstand kan en få langt bedre resultat ved å øke skuddpunktavstanden fra 30 m, via 20 m til 15 m (Tassis et al. 2017, Figur 6.2.1). Tilsvarende arbeid året etter viste at en ved å redusere både geofon- og skuddpunktavstand kunne en gjenskape de syntetiske data stadig bedre (Tassis et al. 2018). Beste oppsett var 1 m geofonavstand og 3 m skuddpunktavstand. Dette var gjeldene både for den automatiske tolkingen med Hagedoorn's pluss-minus-metode og for den tomografiske inversjonen med antatt beste prosedyre (Tassis et al. 2018, Figurene 5.1.2 og 5.2.1). Ideelt sett burde derfor refraksjonsseismikken vært utført langt mer detaljert enn hva som har vært praksis hittil, men dette er selvsagt et økonomisk spørsmål som må veies opp mot ingeniørgeologisk gevinst.

Startmodellen generert med Hagedoorn's pluss-minus-metode er i prinsippet en tolkningsmetode på linje med tradisjonelle tolkinger. Sammenligninger mellom de forskjellige seismiske tolkingemetodene (tabell 2) viser at denne metoden indikerer flest mulige svakhetssoner (25), men også at denne metoden har flest falske soner (8) dvs. indikerte soner som ikke kunne kobles til påvist dårlig eller meget dårlig bergmassekvalitet ved tunneldrivingen. **Tradisjonelle tolkinger og tomografisk inversjon** med antatt beste prosedyre indikerte begge 19 mulige svakhetssoner (se tabell 2) og at deres totale bredde var tilnærmet likt, henholdsvis 347 m og 379 m. Ut fra dette kan en kanskje konkludere med at det ikke er så stor forskjell på disse to seismiske tolkingemetodene.

Westerdahl (2003) viste ved modellberegninger at fordypninger i løsmassene kunne tolkes som svakhetssoner i fjell ved tradisjonelle refraksjonsseismiske tolkinger. Ved tomografisk inversjon av refraksjonsseismikk kan en i prinsippet ha kontroll på sonenes dyptgående. Langs profil 1.1 indikerer automatisk tolking med Hagedoorn's pluss-minus-metode fire svakhetssoner. Etter en inversjon med antatt beste prosedyre er disse redusert til to, kanskje tre svakhetssoner (se Figur 7). Dette kan være et signal om at mulige falske soner indikert med Hagedoorn's metode kan prosesseres bort ved tomografisk inversjon.

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 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 nede i berget og mulighetene til å se svakhetssoners utstrekning mot dypet og sonenes fall blir begrenset ved refraksjonsseismikk. Tidligere modelleringer har vist at resistivitetsmetoden ikke behøver å ha de samme begrensningene (Reiser et al. 2009).

Presentasjon av hastighetsprofiler med fargekodete 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 ROGFAST-tunnelen ble det påvist en meget klar korrelasjon mellom Q-verdi beregnet ut fra seismiske hastigheter i soner målt ved sjøbunnsseismikk og Q-verdi beregnet på kjernemateriale 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 kvalitativ vurdering av bergmassekvalitet bli noe tilfeldig.

## 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 og målingene mer tidkrevende. Ved denne undersøkelsen ble tre tynne soner påvist i tunnelnivå oversett ved resistivitetsmålingene (Sonene 8, 10 og 18, se Tabell 3). Dette kan delvis skyldes stor elektrodeavstand. Ideelt bør elektrodeavstanden være en tredjedel av sonebredden noe som tilsier elektrodeavstand 2 m i dette tilfellet (Tassis et al. 2014). For å løse dette dilemmaet burde en hatt kabler med samme lengde (200 meter) men med halvert elektrodeavstand, noe som selvsagt ville stille store krav til utstyrsparken og utførelsen, og derved fordyre undersøkelsen.

Reprosessering av resistivitetsdata (standard inversjon med V/H-filter = 2) med nyere versjon av programmet Res2DInv (Loke 2018) 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 den forrige analysen (Rønning m. fl. 2016) ble det antydnet at dette kunne tvinge soner med et visst fall til å

bli vertikale. I avsnitt 6.3 diskuteres resultater fra en reprosessering med det V/H-filteret satt lik 2, 1 og 0,5. De to siste gir større vekt på horisontale strukturer og derved økt mulighet til å påvise svakhetssoner med slakt fall.

Modellering har vist at godt ledende løsmassedekke (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. Ved ett tilfelle (Profil 1.6-7, vedlegg 2 side 11) er det påvist et overflatelag med resistivitet ned mot 500  $\Omega\text{m}$ , og i endene av dette fremstår brede relativt godt ledende ( $< 3000 \Omega\text{m}$ ) soner. Dette kan delvis være en kunstig effekt, men sonenes totale bredde indikerer at det også må være reelle lavresistivitetssoner i området.

Den mest markerte sonen langs det tre kilometer lange resistivitetsprofilen er en ca. 20 m bred sone ved PEL-nummer 8380 til 8400 (Vedlegg 2, sidene 7 og 8) der resistiviteten i sonen er ned mot 500  $\Omega\text{m}$ . Denne sonen er kartlagt geologisk ved forundersøkelsene som sone 12 (se Figur 1). Sonen kan ikke umiddelbart knyttes til dårlig bergmasse-kvalitet i tunnelnivå verken i østre (Løp 11, Vedlegg 2 side 7) eller vestre tunnel (Løp 12, Vedlegg 2 side 8). I østre tunnel er det imidlertid en sone på ca. 8 m med manglende observasjoner i tunnelen. Ved flere anledninger har manglende observasjoner fra tunneldrivingen skapt usikkerheter ved vurderingen av mulige falske svakhetssoner. Detaljer ved sone 12 blir diskutert mer i neste avsnitt.

### **6.3 Metodenenes mulighet til å påvise svakhetssoners fall**

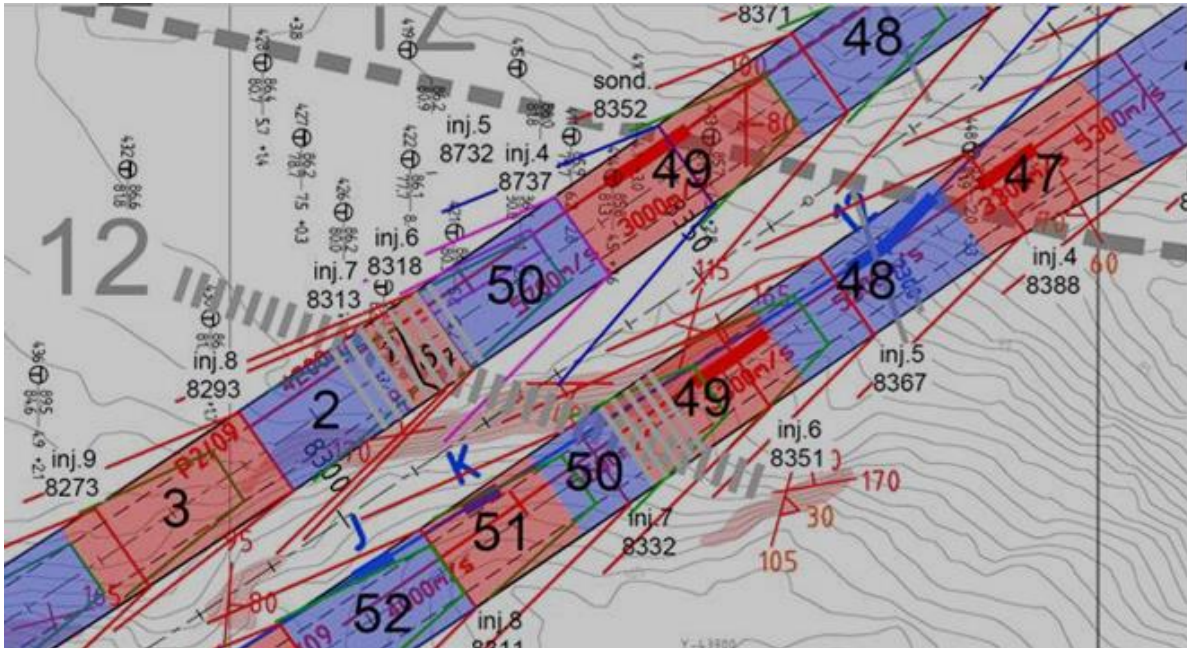
Tidligere studier har vist at ved resistivitetmålinger kan en få indikasjoner på fallet til svakhetssoner (Reiser et al. 2009) mens at det ved tomografisk inversjon av refraksjons-seismikk kan være noe mer utfordrende (Tassis et al. 2017). Ved tradisjonelle tolkinger med Hagedoorn's metode er det bare unntaksvis mulig å tolke svakhetssoners fall. Ved alle analyser så langt i dette arbeidet, er det forutsatt at sonene faller nær vertikalt. Ved drivingen Knappetunnelen ble det indikert at sone 12 har et fall på ca. 45° mot sør (se Figur 8). Skjæring med de to tunnelene ble tolket til å ligge ca. 40 m sør for sonens utgående. Dette har da medført at sonen ble registrert som falsk i Tabell 1 og delvis ikke påvist i Tabell 3. Dette gjelder selvsagt ved alle metoder.

Seismikken langs Profil 2 (Vedlegg 2, side 7), som ligger over vestre tunnel (se Figur 1), viser lavhastighetssoner ved alle tre tolkingemetoder i starten av profilet, og disse ligger over sonen med meget dårlig bergmassekvalitet i vestre tunneløp (sone 25, PEL 8298 – 8328, se Tabell 3). Dette er derfor registrert som treff på disse metodene. Langs Profil 3 (Vedlegg 2 side 8) er det påvist relativt klare lavhastighetssoner ved tradisjonelle tolkinger og ved automatisk tolking med Hagedoorn's metode midt i profilet. Disse er registrert som treff på sone 26 i Tabell 3 (PEL 8338 – 8352 i østre tunnel). Den tomografiske inversjonen av refraksjonsseismikken viser ingen markert anomali over denne sonen.

Resistivitetsprofilen, som ligger tilnærmet rett over østre tunnel, viser anomali som delvis ligger over sone 26 (PEL 8338 – 8352 i østre tunnel). Dette er da registrert som treff under forutsetning av at alle sonene i utgangspunktet ble antatt å være vertikale. Den mest markerte sone ved resistivitetmålingene, sone Geof 85 i tabell 1 (Pel 8380



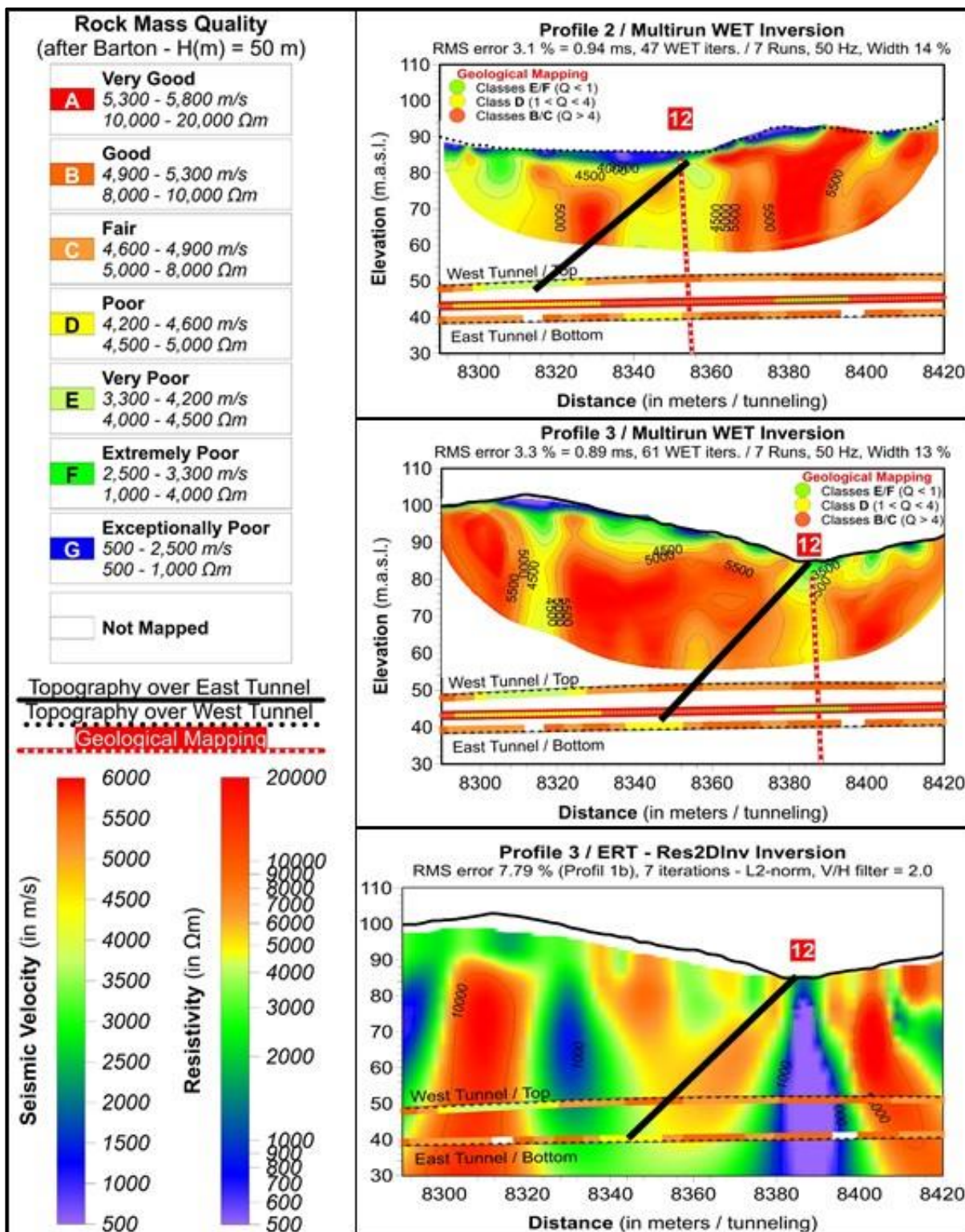
– 8396) er 16 m bred i tunnelnivå og resistiviteten i sonen er mindre enn 1000  $\Omega$ m. Denne sonen kan ikke kobles til dårlig bergmassekvalitet verken i østre eller vestre tunnel, og er registrert som falsk. Det er tidligere antydnet at sonen kan skyldes elektronledende mineraler (sulfider eller grafitt, Rønning m. fl. 2016) men sonen viser ingen markert anomali på IP-data (Indusert Polarisasjon, Ganerød et al. 2009). Dette er derfor lite sannsynlig. Tolkningen basert på observasjoner i tunnelene indikerer at denne aktuelle sonen (sone 12) faller slakt mot lavere PEL-nummer, mot sør, se figur 8.



Figur 8: Detalj-studie av sone 12. Sonen har utgående ved ca. PEL 8350 i vestre tunnel og på seismisk Profil 2. Over østre tunnel har sone 12 utgående ved seismisk Profil 3 og resistivetsprofilen har utgående ved ca. PEL 8385. Ved tunneldriving ble sonen påvist ved ca. PEL 8310 i vestre og ca. PEL 8340 i østre tunnel (grå skraver). Her var det nødvendig med tung sikring i form av  $\varnothing$ 20mm armerte sikringsbuer (grå bånd) over tunnelene (fra Kirkeby 2019).

I Figur 9 er tomografisk inversjon med antatt beste prosedyre langs profilene 2 og 3 sammenstilt med resistivitetsdata. Sort linje viser tolket tilsynelatende fall for sone 12 ut fra observasjoner i tunnelene, ca.  $45^\circ$  mot fallende PEL-nummer (tilnærmet mot sør). Denne tolkingen viser meget dårlig bergmassekvalitet fra PEL 8298 til PEL 8328 i vestre tunnel (Sone 25 i Tabell 3) og dårlig bergmassekvalitet fra PEL 8338 til PEL 8352 i østre tunnel (Sone 26 i Tabell 3), og kan kobles til geologisk kartlagt sone 12 med tilhørende geofysiske anomalier. Sonen ser ut til å falle mye slakere enn opprinnelig antatt og tolkingen gjør det nødvendig å se på analysen av treffprosent på nytt. Det er også nødvendig å se på geofysikkens muligheter til å tolke svakhetssoners fall.

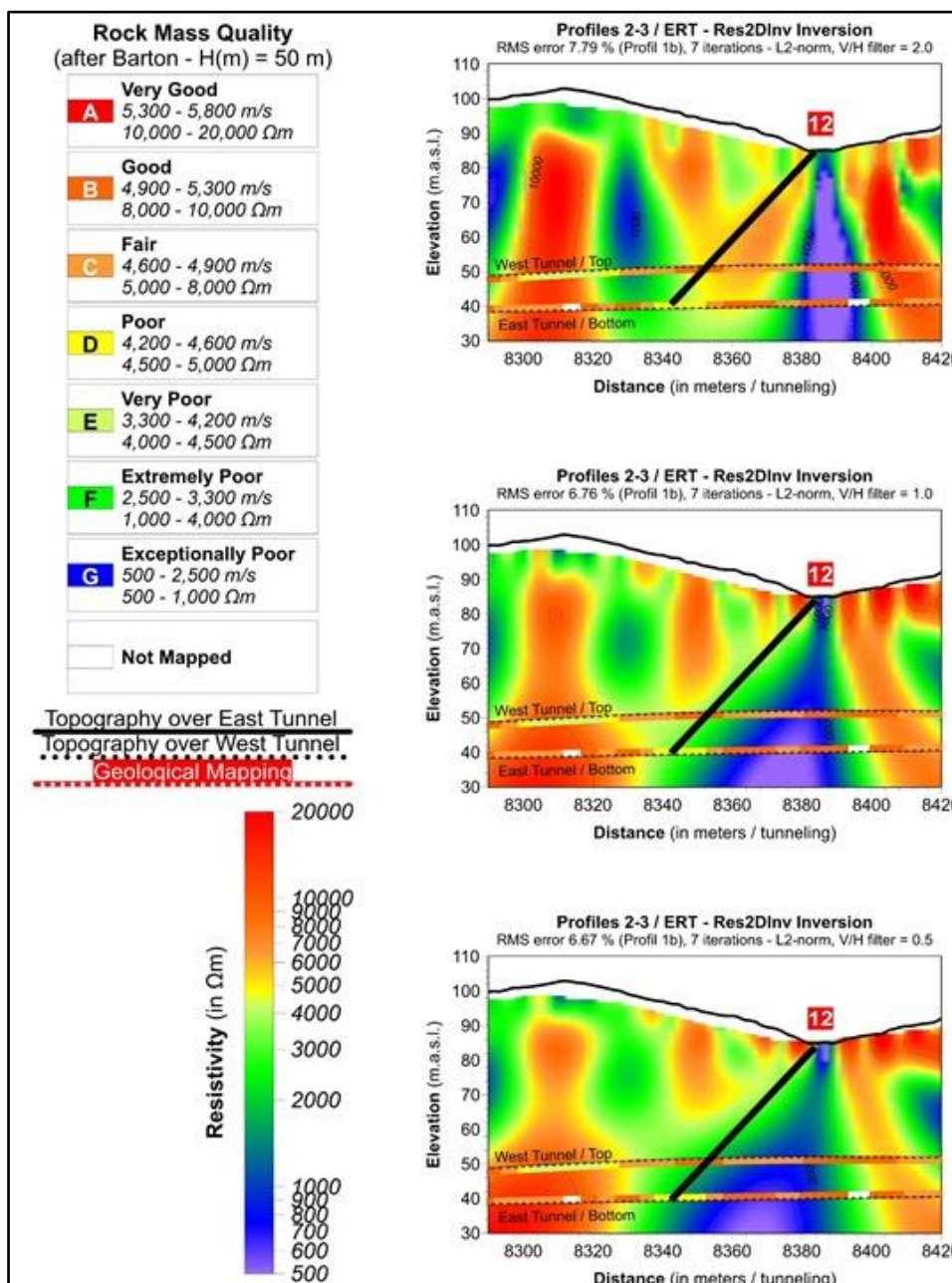
Ved den topografiske inversjonen av refraksjons-seismikken i Figur 9 fremstår svake signaler som kan indikere et fall mot sør. Alle lavhastighetssoner fremstår vertikale, men spesielt Profil 2 viser en utbuling i hastighetsprofilen mot lavere PEL-nummer (mot sør) og mot dypet. Dette ligner på hastighetsprofil fra soner med fall som tidligere modelleringer har vist (Tassis et al. 2017). Også ved Profil 3 indikeres uregelmessigheter i hastighetsforløpet fallende PEL-nummer (mot sør) og mot dypet under den tolkede svakhetssonen, men disse er så svake at det ikke legges noen vekt på. Uansett, ved fremtidige undersøkelser må en vurdere svakhetssoners fall også ut fra tomografisk inverterte data.



Figur 9: Detalj-studie av sone 12 som er tegnet inn på seismisk Profil 2 (øverst), seismisk Profil 3 (i midten) og ved resistivitet (nederst). Ved tunneldriving viste sone 12 et fall på ca. 45° mot sør (sort strek). Forskyvning i posisjon skyldes at sonen krysser de to tunnelene i en relativt spiss vinkel. Resistivitetsprofilen ligger nært opp til seismisk Profil 3. Merk at observert tunnelkvalitet er plottet i tunnelheng ved vestre tunnel og i tunnelsåle i østlige tunnel.

Ved prosesseringen av resistivitetsdata ble det antatt at svakhetssonene var vertikale og for å fremheve dette ble det benyttet et vertikal/horisontal-filter lik 2. Når det nå er kjent at sone 12 faller 45° mot sør, er det av interesse å se hvordan andre filtre som kan fremheve soner med slakere fall fungerer. I Figur 10 vises resistivitetsdata

prosessert med V/H-filter 2, 1 og 0,5. Det siste gir størst mulighet til å se soner med slakt fall. Prosessering med V/H-filter lik 2 indikerer klart en vertikal sone (Figur 10 øverst). Prosesseringen med V/H-filter lik 1 (nøytral) indikerer en draging av sonen mot lavere PEL-nummer (Figur 10 midt). Ved å endre dette filteret til 0,5, som favoriserer horisontale strukturer, ser en at sonen med lav resistivitet dras bort til området med dårlig bergmassekvalitet i østre tunnel. Med den prosedyre vi har benyttet i dette arbeidet, er dette å regne som treff. RMS-error, et mål for hvor god modelltilpasningen er til målte data, viser en svakt avtagende verdi når V/H-filteret reduseres; fra 7,79 % via 6,76 % til 6,67 %. Dette betyr at beste tilpasning til målte data er inversjonen med V/H-filter lik 0,5. Denne analysen viser at fall kan indikeres på resistivitetsdata, og at en ved prosessering av resistivitetsdata må benytte flere valg av V/H-filtre for å kunne dra maksimal informasjon ut fra måledata.



Figur 10: Reprosessering av resistivitet med varierende vertikal-horisontal-filtre ved sone 12. Øverst: V/H filter lik 2 (som i Figur 9). I midten: V/H filter lik 1. Nederst: V/H filter lik 0,5. Ved tunneldriving viste sone 12 et fall på ca. 45° mot sør (sort strek). Resistivitetsprofilen ligger nærmest østlige tunnel.

I Tabell 5 er det foretatt en ny analyse av treff-faktor basert på det slake fallet til sone 12 viste i Figur 9. De fleste metodene kommer noe bedre ut enn vist i tabell 4, og best for den geologiske kartleggingen siden både sone 25 og 26 i Tabell 3 nå er påvist geologisk. Best treff-faktor har en likevel ved resistivitetsmålinger og den automatiske tolkingen med Hagedoorn's pluss-minus-metode.

Metode	Geologisk kartlegging	Trad. tolk seismikk	Auto +/- seismikk	Tomografisk inversjon	Resistivitet
Antall Ja	9	11	15	15	17
Antall delvis	4	4	7	3	6
Antall totalt	13	15	22	18	23
Antall nei	13	11	5	9	3
Antall falske	3	4	8	7	3
Treff-faktor	-3	0	9	2	17

Tabell 5: Korrigerer av Tabell 4 ut fra påvist fall på sone 12. Antall treff (ja), delvis treff, totalt antall treff, ikke påviste (nei) og falske svakhetssoner i tunnelnivå for undersøkelsesmetodene geologisk kartlegging, tradisjonell tolking av refraksjons-seismikk, automatisk tolking av refraksjonsseismikk med Hagedoorn's pluss-minus-metode, tomografisk inversjon med antatt beste prosedyre og resistivitet. En treff-faktor er beregnet ut fra antall treff minus summen av antall soner som ikke ble påvist og antall falske soner (fra Tabell 1).

Modelleringer har vist at en ved resistivitet-målinger kan si noe om svakhetssoners fall (Reiser et al. 2009). Reprosessering med rette parametere ( $V/H=0,5$ ) viser at dette kan fungere også ved reelle data der en svakhetsone har et relativt slakt fall ( $45^\circ$ ). For å avdekke dette er det imidlertid nødvendig med spesiell prosessering. Konsekvensen av dette er at resistivitetsdata bør prosesseres både med filteret  $V/H=2$  for å fremheve vertikale svakhets-soner men også med filteret  $V/H=0,5$  for å påvise eventuelt fall på sonene. Tidligere arbeid har vist at sistnevnte kan være nyttig for å påvise løsmassemektheter (Rønning m.fl. 2015). Den tomografiske inversjonen av refraksjonsseismiske data gir svake signaler om at den aktuelle sonen faller mot sør.

#### 6.4 Ingeniørgeologiske forhold

Figur 2 viser at både refraksjonsseismikken og resistivetsprofilen 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. På grunn av at mange svakhetssoner krysser tunnelene i en spiss vinkel, må en forvente forskyvninger av sonene i tunnelnivå.

Ved de analyser som foretas i dette arbeidet, er i utgangspunktet ingen av data georefererte men foreligger i analoge optegninger. Dette betyr at det er lagt ned et betydelig arbeide i å få alle data over på et felles koordinatsystem. Dette er delvis utført ved at de geofysiske profilene manuelt er tilpasset til terrenget. I dette ligger selvsagt en viss usikkerhet. Denne er forsøkt tatt høyde for i de utførte analyser ved at dårlig

bergmassekvalitet som ligger innenfor +/- 10 m fra en anomali og omvendt, regnes som treff. Alle data er koblet opp mot PEL-nummer i de to tunnelene, og disse følger ikke hverandre helt i de to tunnellopene. Figur 9 viser at PEL-nummer kan være forskjøvet opp mot 12 m fra østre til vestre tunnellop. Informasjon om bergmassekvalitet i de to tunnelene er plottet på riktig PEL-nummer slik at bildene blir noe forskjøvet i forhold til hverandre. Også dette og at sonene ikke nødvendigvis er vertikale, gir en viss usikkerhet i posisjon. Det er derfor mulig at +/- 10 m for registrering av treff kan være en for liten usikkerhet.

Ved vurderingen av geofysiske data var kriteriene for påvisning av en svakhetszone p-bølgehastighet lavere enn 4500 m/s eller resistivitet lavere enn 4500  $\Omega\text{m}$ . Grensene for hva som er en svakhetszone kan diskuteres både for p-bølgehastighet og resistivitet. Ved Knapptunnelen viser måldata at p-bølgehastighet lavere enn 4500 m/s stikker seg ut og er klart anomale i forhold til den generelle hastigheten i gneisbergartene som normalt ligger delvis godt over 5000 m/s. Ved resistiviteten er grensen for en svakhetszone valgt til resistivitet lavere enn 4500  $\Omega\text{m}$ . Dette er noe høyt i forhold til tidligere studier (Rønning et al. 2013 a og b) hvor grensen for svakhetszone ble satt til mindre enn 3000  $\Omega\text{m}$ . En må imidlertid se på det generelle resistivitetsnivået i bergarten og ved Knappe-tunnelen ligger dette godt over 10.000  $\Omega\text{m}$  og da blir 4500  $\Omega\text{m}$  og lavere klart anomalt.

Ved vurderingen av påviste soner med de geofysiske metodene ble det antydnet mange falske soner (se Tabell 1). Ved de aller fleste tilfellene var det manglende registreringer på enkeltsalver i ett av tunnellopene. Disse tilfellene skaper noe usikkerhet ved samtolkingen av de geologiske og geofysiske data og tolket bergmassekvalitet ved tunneldrivingen. En vet aldri om forundersøkelsene har vist falske indikasjoner eller om manglende data fra tunnelarbeidene kan skjule en svakhetszone. Det er imidlertid lite sannsynlig at de manglende registreringene tilfeldigvis faller sammen med en svakhetszone i alle tilfeller, og de fleste angitte mulige falske soner er trolig reelle. Usikkerheten er imidlertid den samme for alle metoder, så ved de metodiske sammenligninger bør dette ikke være noe stort problem.

Til tross for at de to tunnelene ligger med senterlinje bare 23 meter fra hverandre, er det registrert en markert forskjell i bergmassekvalitet. I østre løp består ca. 172 meter tunnelens totale lengde på 3800 m av dårlig eller svært dårlig bergmasse, mens tilsvarende tall for vestre tunnel er 294 meter. Antall påviste soner med dårlig eller meget dårlig bergmassekvalitet varierte tilsvarende med 8 i østlige tunnel og 20 i vestlige hvor to soner var sammenfallende i de to tunnelene. 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 er derfor ikke et resultat av subjektive observasjoner, men er trolig en reell effekt.

Ved sammenligning av antall påviste soner ved de forskjellige geologiske og geofysiske metodene viste de tre seismiske tolkingsmetodene 19, 25 og 19 soner (soner langs profil 2 ikke tatt med) mens resistiviteten indikerte 16 soner (Tabell 1 og tabell 2). Total lengde påvist sone var 301 m, 282 m og 335 m for de tre seismiske metodene og 656 m ved resistivitetsdata (data fra profil 2 ikke tatt med). Total lengde påvist dårlig og meget dårlig bergmassekvalitet for begge tunnelene var 446 m, og målt opp mot dette var det tomografisk inversjon som kom nærmest fasit med 85 %. Geologisk kartlegging kom dårlig ut både når det gjelder antall påviste soner og den

totale lengde med svakhetssone hvor resultatet var henholdsvis 11 soner med total lengde 204 m. Dette viser at geofysiske målinger, både refraksjonsseismikk og resistivitet, er viktige når bergmassekvalitet skal evalueres.

En annen viktig parameter i denne sammenligningen er antall falske soner, dvs. indikerte soner ved de geologiske og geofysiske metodene, men som ikke ble kartlagt ved tunneldrivingen. Her kom geologisk kartlegging, tradisjonell seismisk tolking og resistivitet gunstig ut med tre soner hver. De to automatiske seismiske tolkingemetodene Hagedorn's pluss-minus-metode og tomografisk inversjon med antatt beste prosedyre kom ut med henholdsvis 8 og 7 falske soner. Som tidligere diskutert er dette bildet usikkert siden de aller fleste falske sonene kunne kobles til områder i en av tunnelene med manglende registreringer av bergmassekvaliteten på enkeltsalver.

Totalt ble det påvist 26 soner med dårlig og meget dårlig bergmassekvalitet i de to tunnelene. Av disse kunne resistivitet påvise 16 soner helt og 7 soner delvis, totalt 23 soner. Nest best i denne testen var automatisk tolking med Hagedorn's pluss-minus-metode hvor tallene var 14 soner helt og 7 soner delvis, dvs. 21 soner totalt. Deretter fulgte tomografisk inversjon med antatt beste prosedyre hvor tallene var 14 soner helt og 3 soner delvis, totalt 17 soner. Dette er hakket bedre enn tradisjonelle seismiske tolkinger som indikerte 11 soner helt og 4 soner delvis, totalt 15 soner. Geologisk kartlegging kom dårligst ut med 7 soner helt og 4 soner delvis, totalt 11 soner. Disse tallene betyr at geologisk kartlegging overså 15 soner med dårlig bergmassekvalitet. Tradisjonelle seismiske tolkinger overså 11 soner, automatisk tolking med Hagedorn's metode 5, tomografisk inversjon overså 9 soner mens resistivitets-tolkingene overså 3 relativt tynne soner. Disse tallene ble noe endret når det ble korrigert for fallet sone 12 viste ved tunneldrivingen, men trenden er den samme.

Ved vurdering av bergmassekvalitet under tunneldriving er Q-systemet benyttet (NGI 2015). Q-verdi mellom 1 og 4 angis som dårlig bergmassekvalitet (forkortet DBMK i dette arbeidet) mens Q-verdi mellom 1 og 0,1 vurderes som meget dårlig bergmassekvalitet (forkortet MDBMK). Gradering av bergmassekvalitet ut fra Q-verdi er absolutt, mens naturen kan ha mer gradvise overganger som vurderes subjektivt. Litt tettere oppsprekking, litt mer leire på sprekken, litt planere sprekker osv. kan fort endre middels bergmassekvalitet med Q-verdi like over 4 til dårlig bergmassekvalitet med Q-verdi noe lavere enn 4. Dette kan da endre antall soner innenfor de forskjellige bergmassekvalitetene, også mot bedre bergmassekvalitet. Denne usikkerheten vil imidlertid gjelde alle metodene som er vurdert i dette arbeidet, og vil trolig ikke endre mye på den innbyrdes vurderingen.

Hvilken metode som fungerer best for påvising av soner med dårlig bergmassekvalitet, avhenger av hva en legger vekt på. I et forsøk på å kvantifisere hvor vellykket de forskjellige metodene var ble det beregnet en treff-faktor i **Tabell 4** og **Tabell 5**. Denne ble beregnet ut fra antall positive påvisninger minus summen av antall soner som ikke ble påvist og antall falske soner. I denne evalueringen kommer resistivitetsmetoden klart best ut og deretter fulgte automatisk tolking med Hagedorn's pluss-minus-metode. Tradisjonell seismisk tolking og tomografisk inversjon kom relativt likt ut mens geologisk kartlegging også her kom dårligst ut.

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 forslutte tolknings-modell for karakterisering av svakhetssoner i berg (Rønning et al. 2009b, Rønning et al. 2013a) fungerer også for grunnfjells-bergarter 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 påvisning 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).

Tunnelarbeidene ved andre byggetrinn av Knappetunnelen (nordlige del) påviste aldri ekstremt eller eksepsjonelt dårlig bergmassekvalitet, bare dårlig og meget dårlig bergmassekvalitet. Dette betyr at berggrunnen ikke ga de største utfordringene ved tunneldrivingen, men også at de geologiske og geofysiske metodene ikke kunne testes på de dårligste bergmassekvalitetene. Laveste påviste p-bølgehastighet i datagrunnlaget fra Knappetunnelen var riktignok to tynne soner med p-bølgehastighet 2700 m/s, men ved de aller største sonene var hastigheten mellom 3800 m/s og 4700 m/s (se Figur 3). Også resistivitetsverdiene i de påviste sonene ved Knappetunnelen var moderate. De fleste påviste sonene hadde resistivitet fra 1000  $\Omega\text{m}$  og opp til 4500  $\Omega\text{m}$  (se Vedlegg 2). Bare en sone viste en resistivitet ned mot 500  $\Omega\text{m}$  (Sone 12, Vedlegg 2 side 7). I utgangspunktet var dette en falsk anomali, med som vist i avsnitt 6.3, var dette en sone med fall  $45^\circ$  og hvor bergmassekvalitet i vestre tunnel var meget dårlig (dårlig i østre tunnel). Moderate p-bølgehastigheter og resistivitetsverdier i de påviste sonene ved Knappetunnelen er i overensstemmelse med en ikke alt for dårlig bergmassekvalitet. For å få et enda bedre grunnlag for vurdering av hvilke metoder som fungerer best for påvisning og karakterisering av svakhetssoner i berg, bør det utføres tilsvarende analyser ved tunnelprosjekt der en har flere soner med meget dårlig bergmassekvalitet, og gjerne også soner med ekstremt og eksepsjonelt dårlig bergmassekvalitet.

Ved tunnelarbeidene ved andre byggetrinn av Knappetunnelen ble det påvist bare en større sone med meget dårlig bergmassekvalitet (MDBMK), sone 25 i vestre løp (se Tabell 3). Analyse av denne sonens fall, avsnitt 6.3 viser at dette er den geologisk kartlagte sone 12 som fremstår med lav p-bølgehastighet (3500 – 4000 m/s, Figur 9) og som på resistivitetsmålingene fremstår som den mest markerte sone med resistivitet ned mot 500  $\Omega\text{m}$  (Figur 10). I østre tunnel viste samme sone dårlig bergmassekvalitet (sone 26 i Tabell 3). Tidligere publisert tolkningsmodell (Rønning et al. 2009b og 2013a) tilsier at dette kan være en leir-infisert svakhetssone. Observasjoner på tunnelstuff (Figur 11) dokumenterer den dårlige bergmassekvaliteten og det er påvist leire ved PEL 8339 i østre tunnel. Dette er i samsvar med publiserte tolkningsmodell.



Figur 11: Meget dårlig bergmassekvalitet ved PEL 8305 i vestre tunnel (til venstre) og ved PEL 8339 i østre tunnel (høyre). For sistnevnte er hele stoffen oppsprukket berg med leire og med en grønn sleppeflate på skrå i venstre del.

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. Ved de valgte kriteriene for påvist sone ved resistivitetsmålinger ( $< 4500 \Omega\text{m}$ ) kommer metoden dårligst ut ved at den påviste totalt 656 m med mulig dårlig bergmassekvalitet mens det ved tunneldrivingen ble påvist 446 m. En lavere grense for hva som er anomali ville selvsagt redusert lengden av anomale soner og da trolig også antall soner.

Resistivitetsmålinger er mindre ressurskrevende enn refraksjonsseismikk. En kostnadseffektiv prosedyre vil derfor være å utføre resistivitetsmålinger mer eller mindre kontinuerlig langs tunneler på land og bruke resultatene til å velge ut områder hvor det gjøres mer tidkrevende refraksjonsseismikk.

## 7. KONKLUSJONER

Refraksjonsseismiske data samlet inn som en del av forundersøkelsene for den 3,8 km lange byggetrinn 2 av 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, repossert med nyeste versjon av programmet Res2DInv (Loke 2018). De samme data er tidligere repossert og samtolket med observasjoner fra tunneldrivingen i 2016. Nytt ved analysen som her rapporteres er inversjon av refraksjonsseismikken med en helt ny prosedyre, lengde på svakhets-soner er tatt med i vurderingen og resultater fra de geologiske forundersøkelsene er evaluert.

Tomografisk inversjon av refraksjonsseismiske data påvirkes til en viss grad av hvilken startmodell som benyttes, men aller mest av hvilken prosedyre som velges. Tidligere arbeider utført av NGU, har vist at antatt beste inversjonsprosedyre er «multi-run



Conjugate Gradient» inversjon og med «Cosine-squared» vektning og hvor en benyttet en 2D startmodell generert automatisk med Hagedoorn's pluss-minus-metode. Ved alle sammenligninger i dette arbeidet er denne prosedyren benyttet.

Tidligere modellering har vist at inverterte hastighetsprofiler blir bedre jo kortere avstand som benyttes mellom geofoner og skuddposisjoner. Ideelt sett bør geofonavstanden være 2 m og skuddavstanden 6 m. Dette er selvsagt et økonomisk spørsmål som må vurderes opp mot gevinst.

Reprosesserte resistivitetsdata med nyeste programversjon viser de samme strukturene som ved den opprinnelige prosesseringen, men med avvik på detaljnivå. Kunstige effekter som utvidelse av svakhetssone mot dypet ser ut til å være forbedret, og flere soner viser større utstrekning mot dypet. Elektrodeavstanden som er benyttet (10 m) gir god dybderekkevidde, men er for stor til å fange opp mindre soner. Dette blir derfor et valg mellom stor penetrasjon og høy oppløsning, og en midlere løsning kan være elektrodeavstand 5 m.

Hvor godt de forskjellige undersøkte metodene fungerer ved beskrivelse av bergmassekvalitet avhenger av hva det legges vekt på. Ser en på antall påviste soner, er den automatiske tolkingen med Hagedoorn's metode best. Dersom total lengde indikert dårlig bergmassekvalitet er viktigst er resistivitetsmetoden vinner. Dersom en tar utgangspunkt i hvor mange av de 26 påviste sonene med dårlig eller meget dårlig bergmassekvalitet i tunnelnivå og ser på hvilken metode som indikerer flest er resistivitet igjen vinneren. Ved alle synsmåter kommer den geologiske forundersøkelsen relativt dårlig ut.

I et forsøk på å få et samlet inntrykk av hvilken metode som fungerer best, er det beregnet en treff-faktor. Denne tar utgangspunkt i antall kartlagte soner i tunnelnivå metoden treffer, og trekker fra summen av antall soner som ikke påvises og antall falske påvisninger. Ved denne analysen kommer resistivitet klart best ut. På andre plass kommer automatisk tolking med Hagedoorn's pluss-minus-metode. Deretter følger tomografisk inversjon med antatt beste prosedyre og tradisjonelle seismiske tolkinger med tilnærmet samme treff-faktor. Også her kommer de geologiske forundersøkelsene dårligst ut.

Resistivitet indikerer dårlig bergmassekvalitet i større lengder enn hva som er påtruffet i tunnelene, og grense for hva som er anomalt burde kanskje justeres.

En sone (sone 12 fra geologisk kartlegging) indikerer et relativt slakt fall ( $45^\circ$  tilnærmet mot sør). Resistivitetsdata indikerer i utgangspunktet at sonen er vertikal, men reprosessering som favoriserer mer horisontale strukturer gir klare signaler om et fall mot sør. Også ved tomografisk inversjon av refraksjonsseismikken viser svake indikasjoner på dette fallet. Dette betyr at svakhetssoners fall kan indikeres, men prosesseringen og tolkingen må tilpasses hva en ser etter.

Metodene utfyller hverandre, det er derfor viktig at alle metodene benyttes ved forundersøkelser. Siden resistivitet er mindre ressurskrevende enn refraksjonsseismikk, vil en kostnadseffektiv prosedyre være å måle resistivitet mer eller mindre kontinuerlig langs tunneler og så gjøre refraksjonsseismiske målinger på utvalgte områder. Det er også viktig at inversjon og tolking av data gjøres av kompetente fagfolk som benytter antatt beste prosedyrer.

## 8. REFERANSER

- ABEM 1994: ABEM Terraloc Mark 6 Seismograph. Reference Manual. ABEM Printed Matter 9133 0011 90. 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.
- Bruckl, 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.  
[https://www.ngu.no/upload/Publikasjoner/Rapporter/2009/2009\\_077.pdf](https://www.ngu.no/upload/Publikasjoner/Rapporter/2009/2009_077.pdf)
- 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.
- 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.
- Kirkeby, T. 2019: Geologisk sluttrapport for Knappetunnelen. Rapport under utarbeidelse. Statens vegvesen Vegdirektoratet.
- Lecomte, I., Gjølstdal, 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.
- Loke. M.H. 2018: RES2INV x64 ver. 4.07.11. Geoelectrical Imaging 2D & 3D. Instruction manual. [www.geoelectrical.com](http://www.geoelectrical.com).
- NGI 2015: Håndbok. Bruk av Q-systemet. Bergmasseklassifisering og bergforsterkning. <https://www.ngi.no/nor/content/download/4012/431183/version/1/inLanguage/nor-NO/file/H%C3%A5ndbok%20Q-systemet%20norsk%20nov%202015%20nettutg.pdf>.

- Palmer, D. 1980: The Generalized Reciprocal Method of Seismic Refraction Interpretation. Society of Exploration Geophysicists, Tulsa. ISBN 0-931830-14-1.
- Rayfract 2018a: Rayfract version 3.35. Seismic Refraction & Borehole Tomography-Subsurface Seismic Velocity Models for Geotechnical Engineering and Exploration. Download from <http://rayfract.com>
- Rayfract 2018b: Rayfract help. Download from <http://rayfract.com/help/rayfract.pdf>
- Reiser, F., Dalsegg, E., Dahlin, T., Ganerød, G.V. & Rønning, J.S. 2009: Resistivity Modelling of Fracture Zones and Horizontal Layers in Bedrock. NGU Report 2009.070 (117 pp.).  
[http://www.ngu.no/upload/Publikasjoner/Rapporter/2009/2009\\_070.pdf](http://www.ngu.no/upload/Publikasjoner/Rapporter/2009/2009_070.pdf)
- Reynold, J. M. 2011: An Introduction to Applied and Environmental Geophysics. Wiley & Sons, West Sussex, UK (2nd edition).
- 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).  
[https://www.ngu.no/upload/Publikasjoner/Rapporter/2009/2009\\_064.pdf](https://www.ngu.no/upload/Publikasjoner/Rapporter/2009/2009_064.pdf)
- 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 5<sup>th</sup> 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 characterisation 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.
- Rønning, J.S., Dalsegg, E., Drageset, L.N., Ganerød, G.V. & Wiig, H.S. 2015: Resistivitetmålinger langs jernbanetunnel Holm – Nykirke. Hva kan vi lære? Fjellsprengningsteknikk / Bergmekanikk / Geoteknikk 2015, artikkel 31 (15 sider).
- Rønning, J.S., Tassis, G., Kirkeby, T. & Wåle, M. 2016: Retolkning av geofysiske data og sammenligning med resultater fra tunneldriving, Knappetunnelen ved Ringveg Vest i Bergen. NGU Rapport 2016.048 (48 s.).  
[https://www.ngu.no/upload/Publikasjoner/Rapporter/2016/2016\\_048.pdf](https://www.ngu.no/upload/Publikasjoner/Rapporter/2016/2016_048.pdf)
- Schuster, G.T. & Quintus -Bosz, A. 1993: Wavepath eikonal travelttime inversion: Theory. Geophysics vol. 58, pp. 1314 – 1323.
- Sheehan, J.R., Doll, W.E. & Mandell, W.A. 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.  
[https://www.ngu.no/upload/Publikasjoner/Rapporter/2013/2013\\_017.pdf](https://www.ngu.no/upload/Publikasjoner/Rapporter/2013/2013_017.pdf)
- Tassis, G., Rønning, J.S. & Rohdewald, S. 2017: Refraction seismic modelling and inversion for the detection of fracture zones in bedrock with the use of Rayfract<sup>®</sup> software. NGU Report 2017.025 (62pp.).  
[https://www.ngu.no/upload/Publikasjoner/Rapporter/2017/2017\\_025.pdf](https://www.ngu.no/upload/Publikasjoner/Rapporter/2017/2017_025.pdf)

- Tassis, G., Rodewald, S. & Rønning J.S. 2018: Tomographic Inversion of Synthetic Data Using Various Starting Models in Rayfract<sup>®</sup> software. NGU Report 2018.015 (45pp.). [https://www.ngu.no/upload/Publikasjoner/Rapporter/2018/2018\\_015.pdf](https://www.ngu.no/upload/Publikasjoner/Rapporter/2018/2018_015.pdf)
- Venvik, R.G.F. 2003: Bruddsystem og spenningsfelt tilknyttet tunneltraséen Ringveg Vest i Bergen. Hovedfagsoppgave ved Geologisk Institutt, Universitetet i Bergen.
- Watanabe, T., Matsuoka, T. & Ashida, Y. 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.
- 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: Beskrivelse til plansjer som viser tolkningsresultater (vedlegg 2).

I vedlegg 2 presenteres alle delprofiler med tre forskjellige tolkninger av refraksjonsseismikken og i tillegg resistivetsdata:

- Tradisjonell tolkning med Hagedoorn's metode (fra Wåle 2009).
- Automatisk tolkning med Hagedoorn's metode utført med programmet Rayfract versjon 3.35.
- Tomografisk inversjon med antatt beste inversjonsprosedyre «Multi-run WET Conjugate Gradient» inversjon og «Cosine Squared» vekting og Hagedoorn's automatiske inversjon som startmodell utført med programmet Rayfract versjon 3.35.
- 2D Resistivetsprofil invertert med Res2DInv versjon 4.07.11 (Loke 2018).

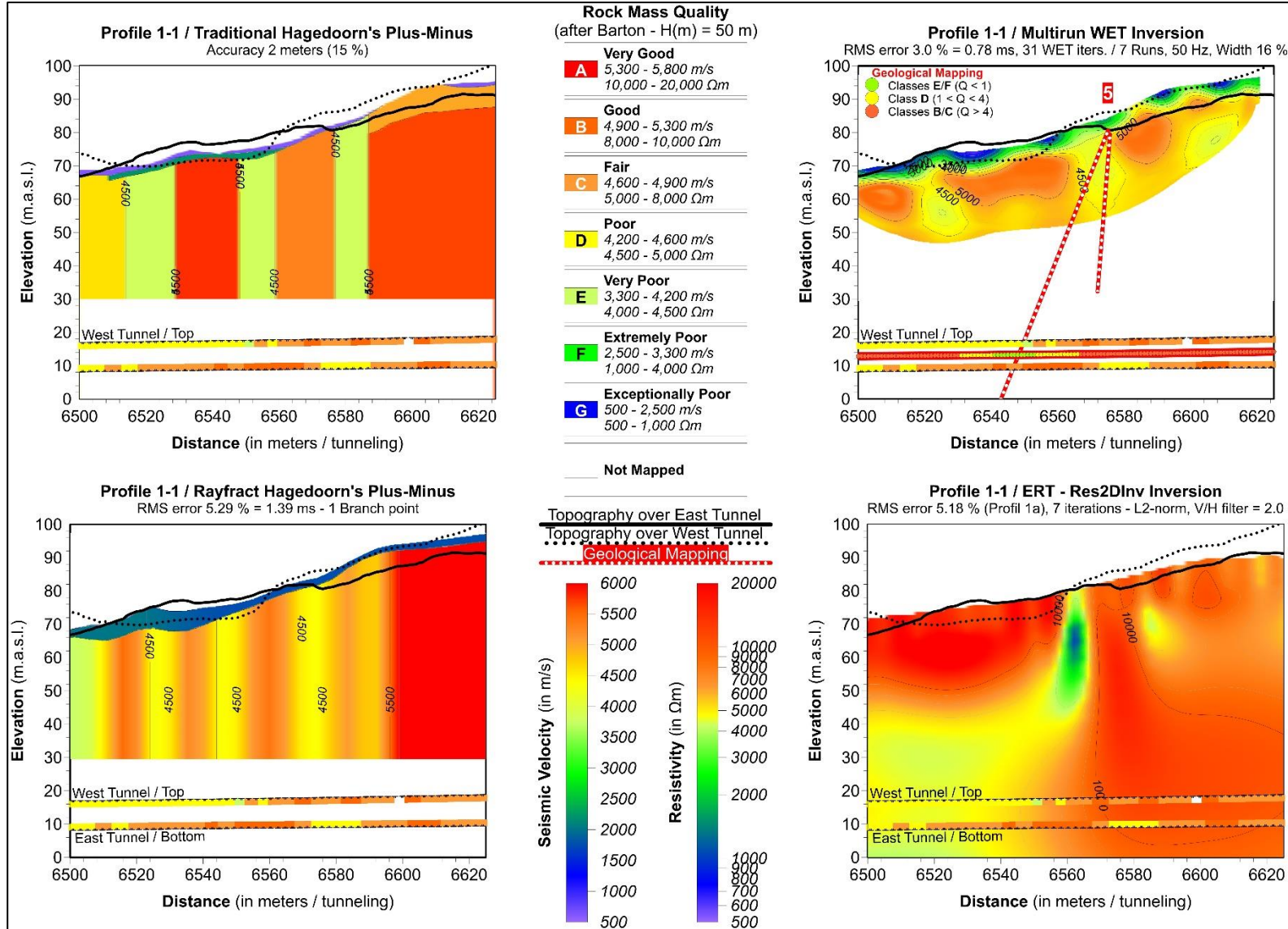
I tillegg presenteres observert bergmassekvalitet (Rock Mass Quality) i begge tunnellopene ut fra observasjoner under tunnelarbeidet. Bergmassekvalitet i vestre tunnel plottes i tunnelheng mens bergmasse-kvaliteten i østre tunnel plottes i tunnelsåle. Fargekode er tilpasset arbeider publisert av Barton (2007). Fargekode benyttet ved presentasjonen av refraksjonsseismikken og resistivetsdata er tilpasset samme fargeskala. Dette betyr at:

- Meget god (very good) bergmassekvalitet observert i tunnel presenteres med rød farge. I seismikken tilsvarer dette p-bølgehastighet på 5300 – 5800 m/s og resistivitet på 10.000 – 20.000  $\Omega\text{m}$ .
- Dårlig (poor) bergmassekvalitet observert i tunnel presenteres med gul farge. I seismikken tilsvarer dette p-bølgehastighet på 4200 – 4600 m/s og resistivitet på 4.500 – 5.000  $\Omega\text{m}$ .
- Meget dårlig (very poor) bergmassekvalitet observert i tunnel presenteres med lys grønn farge. I seismikken tilsvarer dette p-bølgehastighet på 3300 – 4200 m/s og resistivitet på 4.000 – 4.500  $\Omega\text{m}$ .

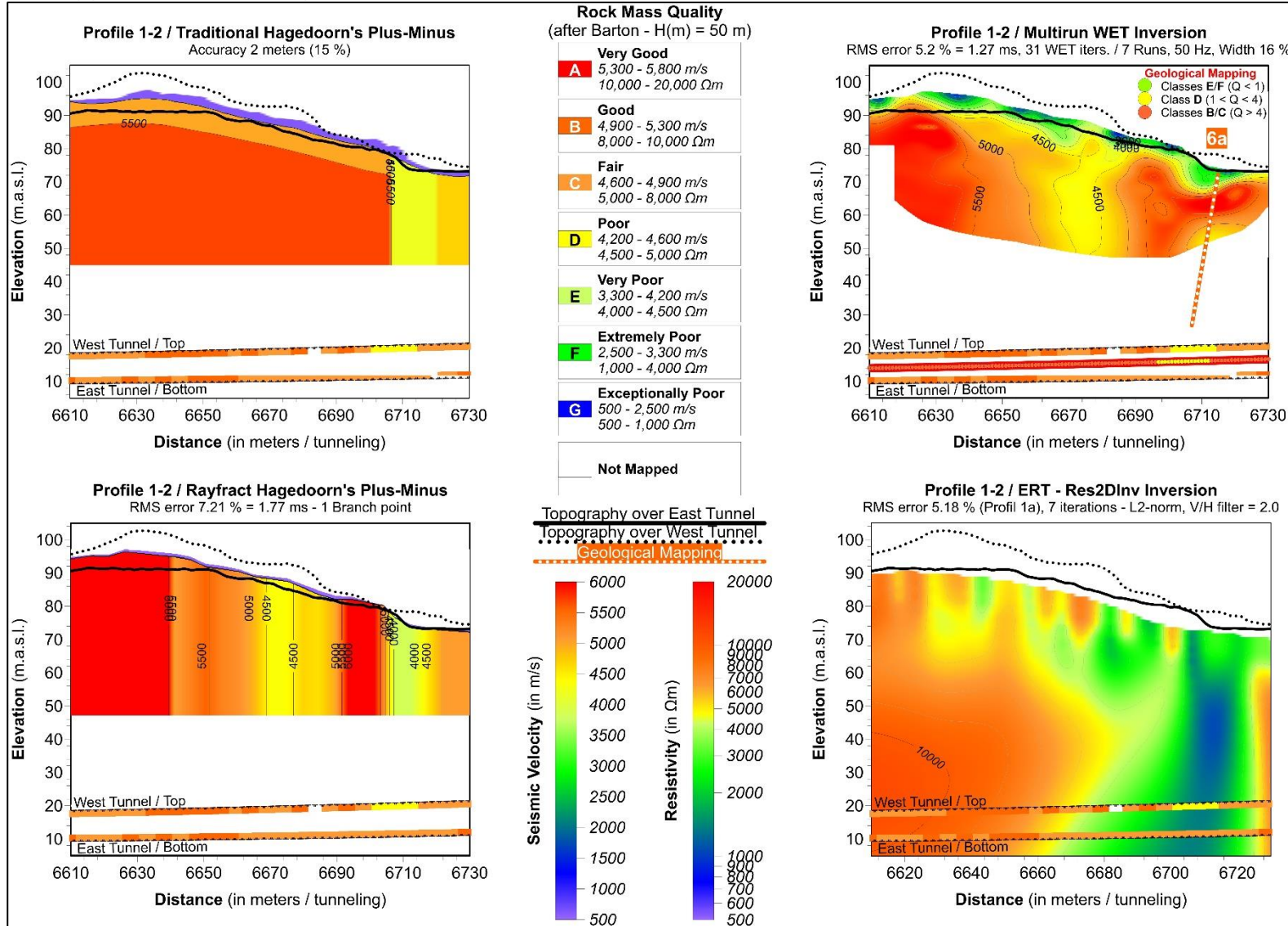
Det er verdt å merke seg at bergmassekvalitetene «Extremely Poor» og «Exceptionally Poor» ikke er påvist i de to tunnellopene ved Knappe-tunnelen.

Tolket bergmassekvalitet ut fra de geologiske forundersøkelsene er plottet mellom observert bergmassekvalitet i østre og vestre tunnellop i figuren som viser «Multirun WET inversion» (øverst til høyre / nummer tre fra toppen).

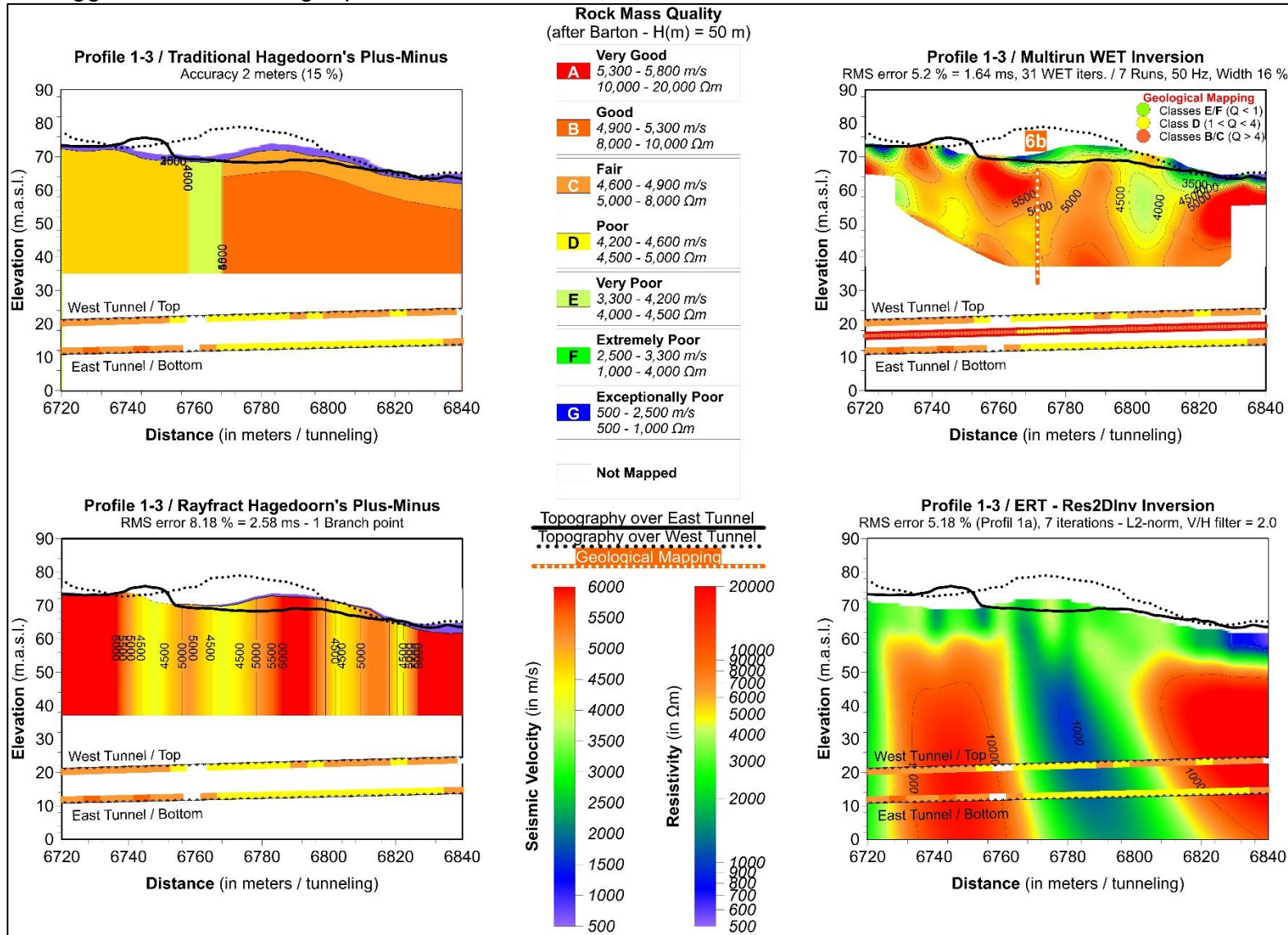
# Vedlegg 2 side 1: Tolkninger profil 1.1



## Vedlegg 2 side 2: Tolkninger profil 1.2

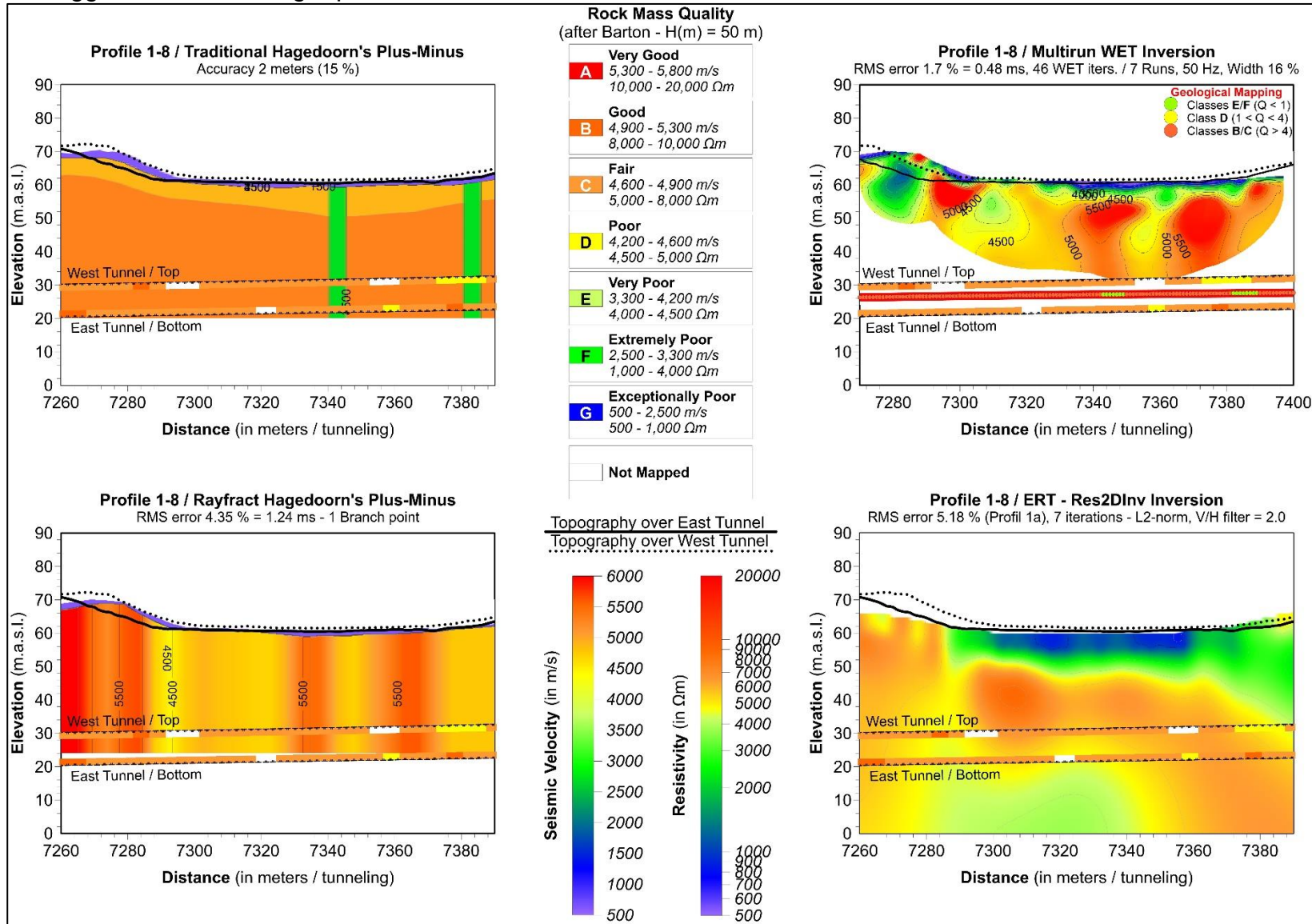


# Vedlegg 2 side 3: Tolkninger profil 1.3

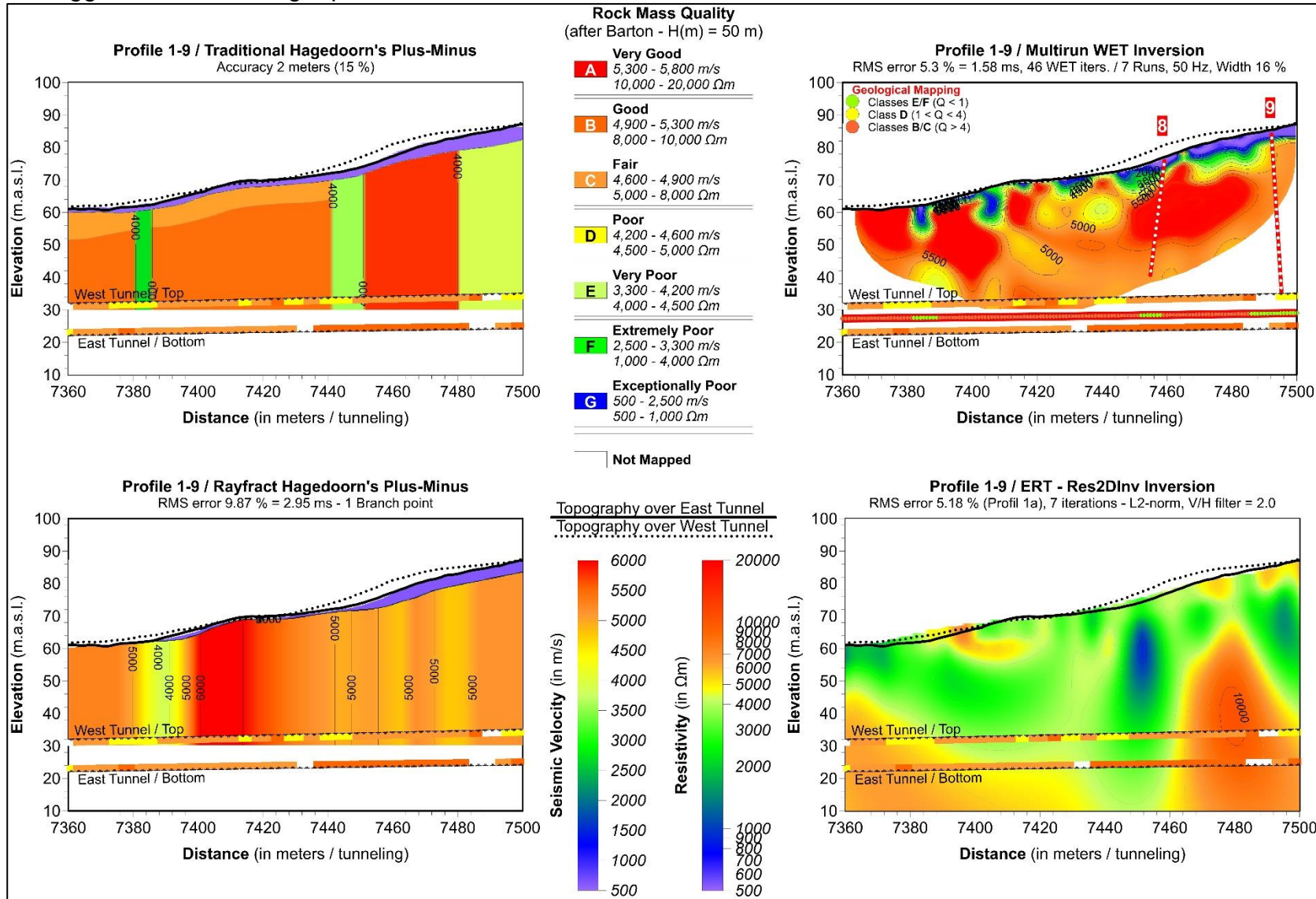




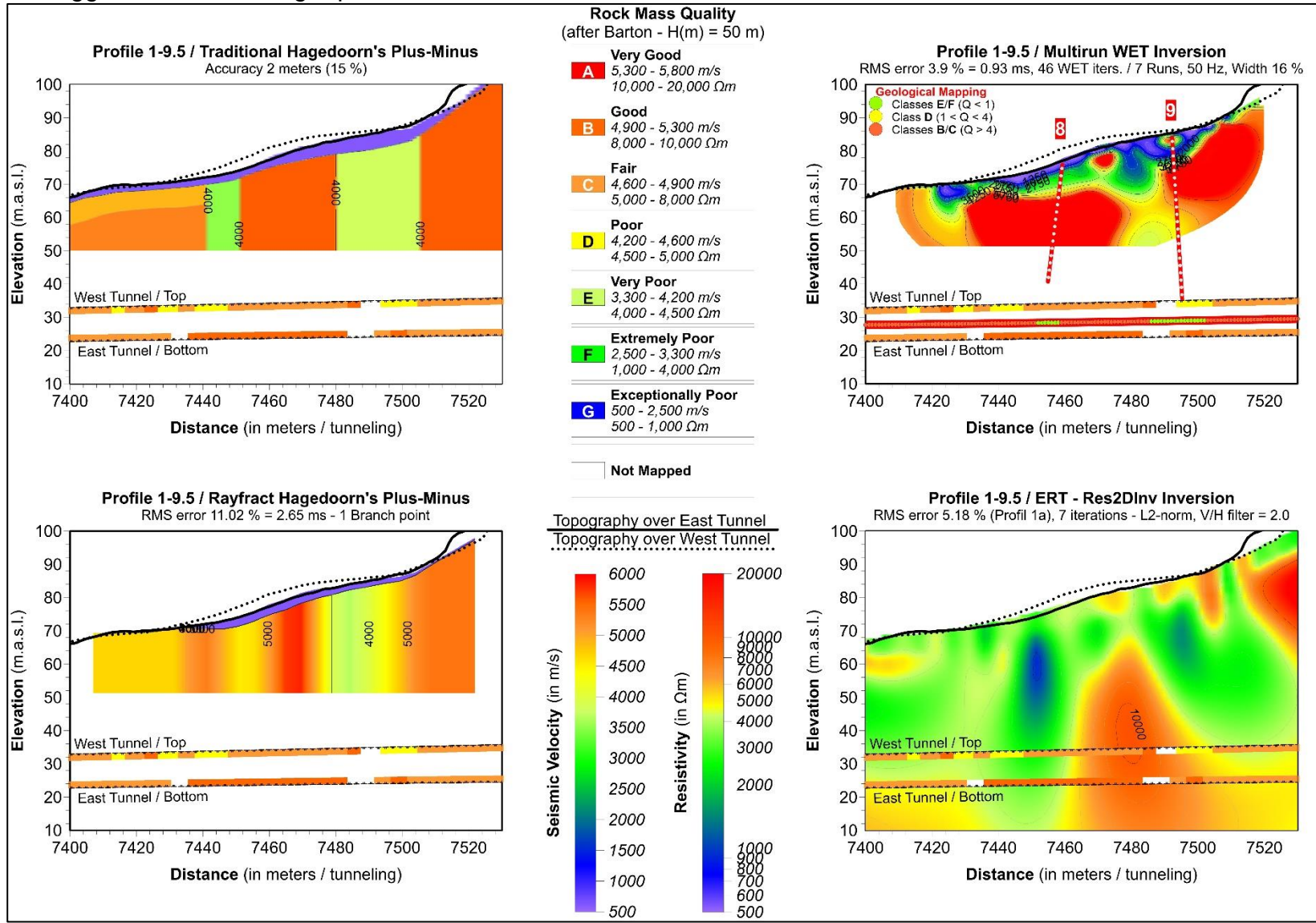
# Vedlegg 2 side 4: Tolkninger profil 1.8



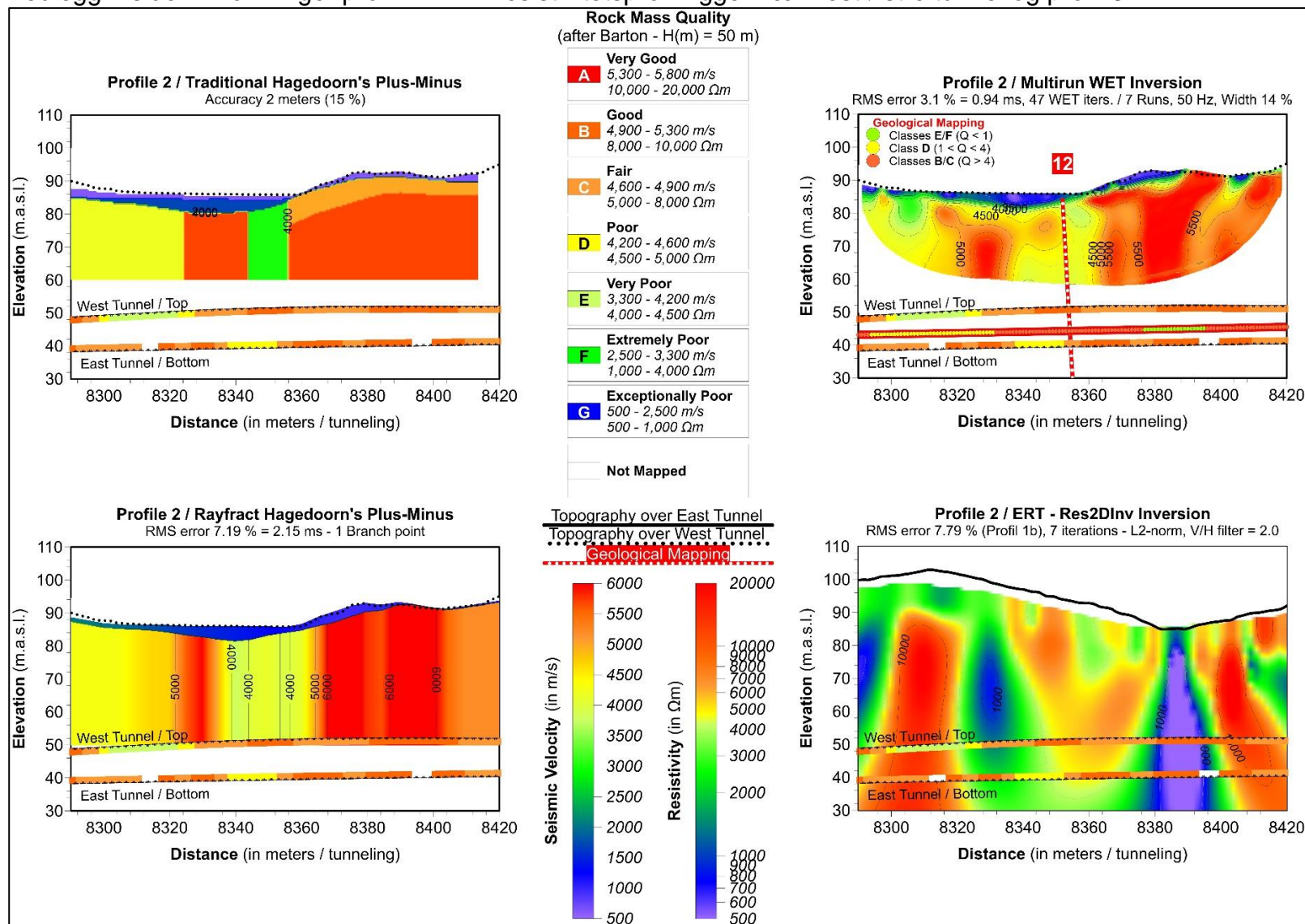
# Vedlegg 2 side 5: Tolkninger profil 1.9



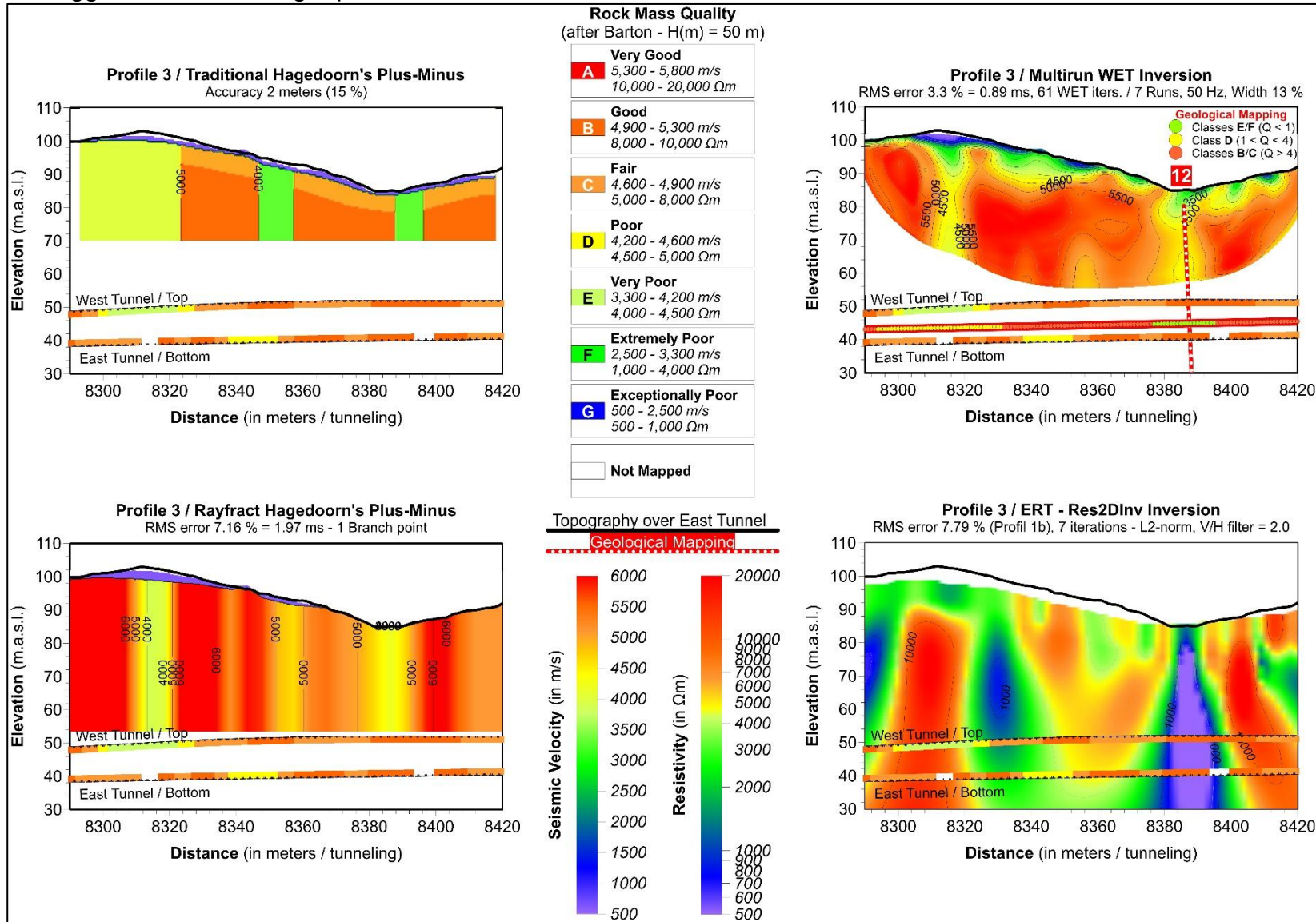
# Vedlegg 2 side 6: Tolkninger profil 1.9B



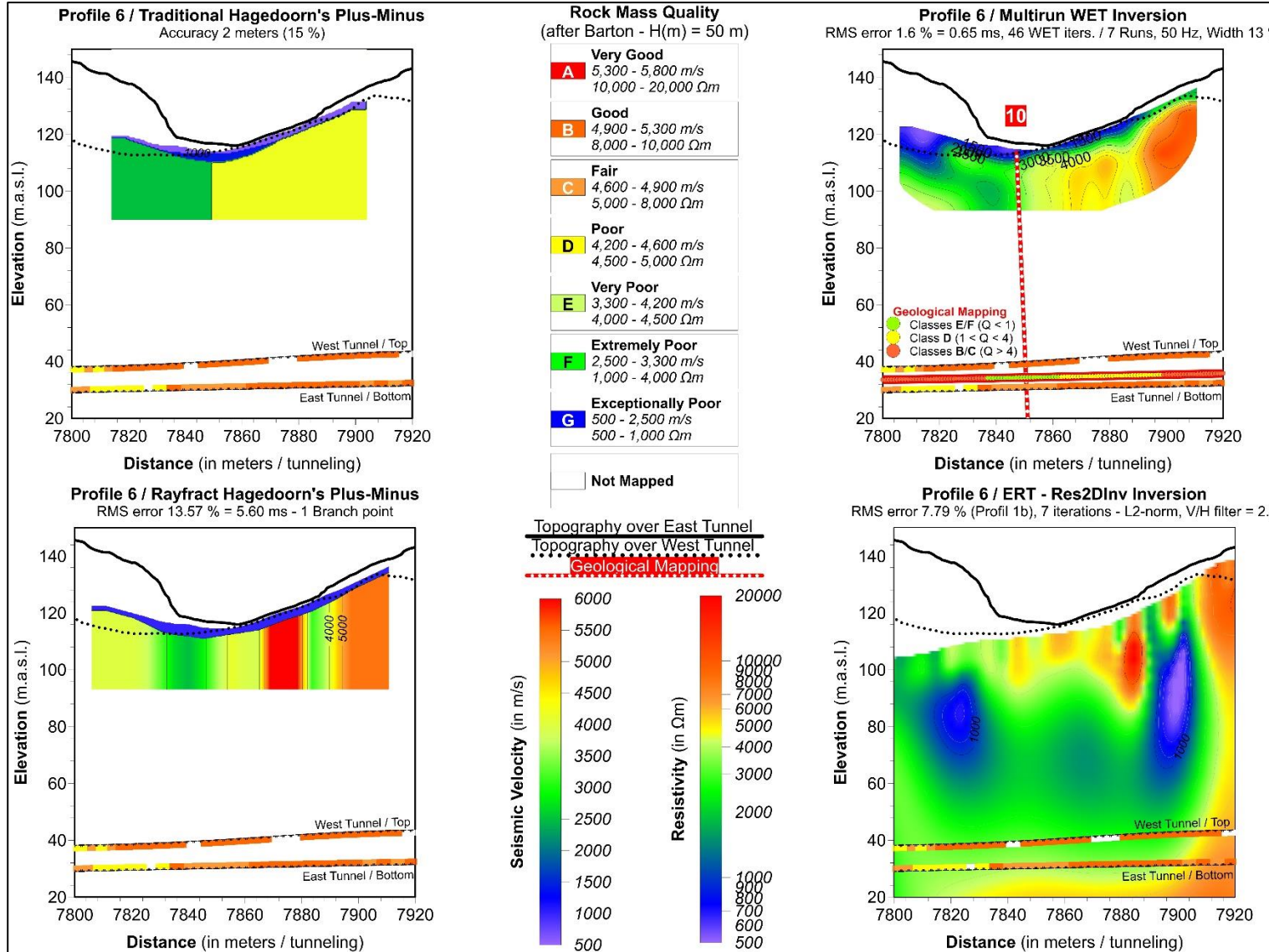
Vedlegg 2 side 7: Tolkninger profil 2. NB: Resistivitetsprofil ligger nærmest østre tunnel og profil 3.



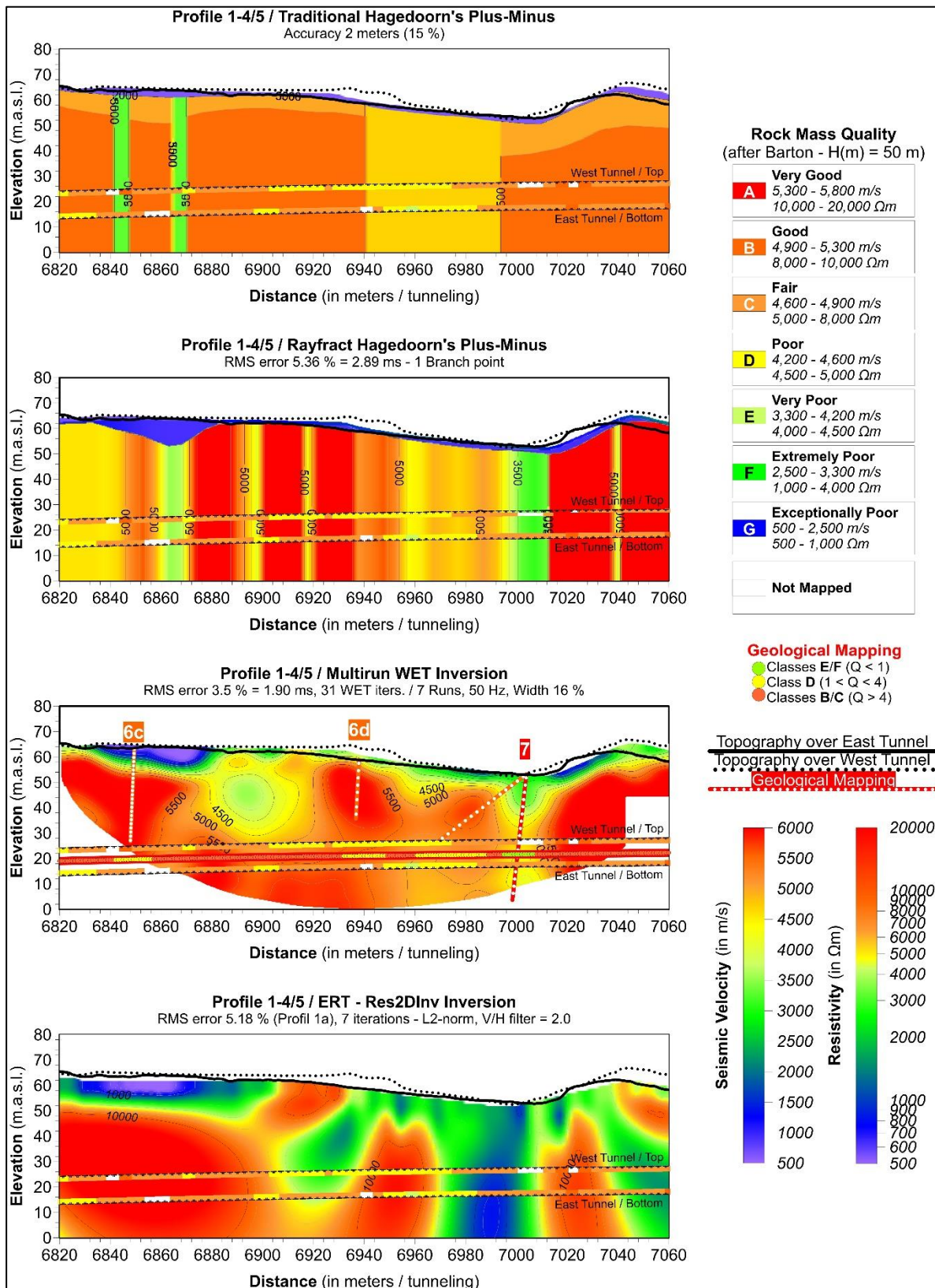
Vedlegg 2 side 8: Tolkninger profil 3



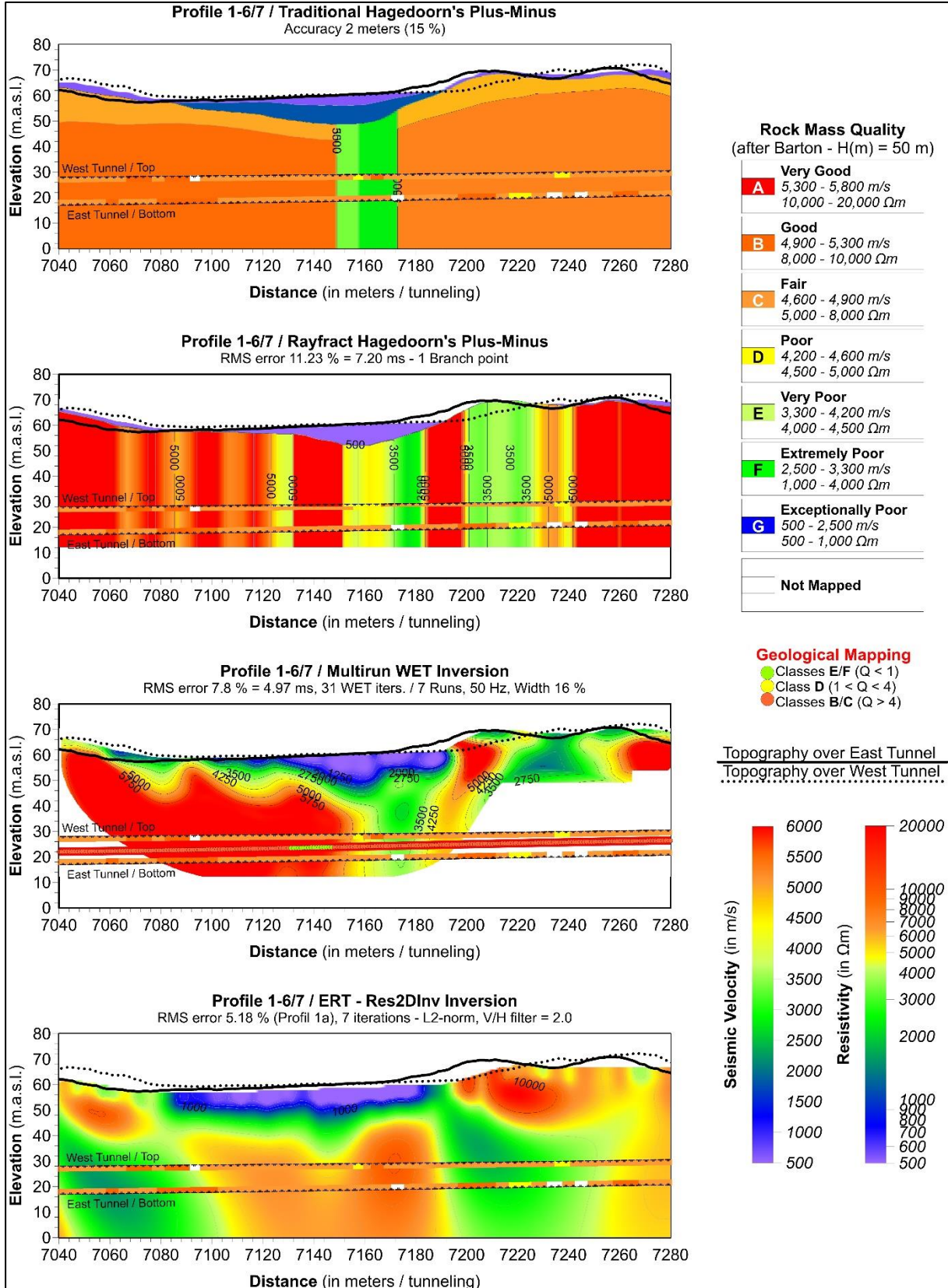
# Vedlegg 2 side 9: Tolkninger profil 6



Vedlegg 2 side 10: Tolkninger profil 1.4-5



# Vedlegg 2 side 11: Tolkninger profil 1.6-7





### Vedlegg 3: Korrelasjon av profilnummer, sonenavn og koordinater.

Profil nr. Geo- physics	Profil nr. NGU	PEL- nummer i tunnel	Sone-navn Figur 1	Sone-navn Arntsen & Kirkeby	Start UTM 32N		Slutt UTM 32N	
					Øst	Nord	Øst	Nord
P1-09	1.1	6500-6625	5	K5	293789	6695770	293775	6695878
P1-09	1.2	6610-6730	6a	K6a	293777	6695873	293751	6695980
P1-09	1.3	6720-6840	6b	K6b	293750	6695976	293735	6696087
P1-09	1.4-5	6820-7060	6c, 6d og 7	K6c, K6d, K7	293735	6696082	293725	6696303
P1-09	1.6-7	7040-7280	Ingen	KMn2	293725	6696298	293743	6696519
P1-09	1.8	7260-7390	Ingen	KMn4.1, KMn4.2	293743	6696514	293753	6696627
P1-09	1.9	7360-7500	8 og 9	KMn4.2, KS1	293753	6696622	293755	6696733
P1-09	1.9B	7400-7530	8 og 9	KS1 K8	293755	6696670	293755	6696758
P2-09	2	8290-8420	12	KK K12	293514	6697500	293453	6697597
P3-09	3	8290-8420	12	KK K12	293538	6697510	293477	6697605
P6-09	6	7800-7920	10	K10	293712	6697067	293692	6697141



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](mailto:ngu@ngu.no)  
Nettside [www.ngu.no](http://www.ngu.no)