



GEOLOGI FOR SAMFUNNET

SIDEN 1858



**NORGES
GEOLOGISKE
UNDERSØKELSE**
· NGU ·

**NGU RAPPORT
2020.040**

Kvalitet på tolket seismikk.
Eksempler fra E39 Krysning av
Romsdalsfjorden.

Rapport nr.: 2020.040	ISSN: 0800-3416 (trykt) ISSN: 2387-3515 (online)	Gradering: Åpen	
Tittel: Kvalitet på tolket seismikk. Eksempler fra E39 Kryssing av Romsdalsfjorden.			
Forfatter: Jan S. Rønning, Georgios Tassis, Arne Kavli, Torkild Åndal, Fredrik W.G. Olsen og Roger Wisén		Oppdragsgiver: NGU, Statens vegvesen, Vegdirektoratet, Statens vegvesen, utbyggingsområde midt	
Fylke: Møre og Romsdal		Kommune: Molde og Vestnes	
Kartblad (M=1:250.000) ÅLESUND		Kartbladnr. og -navn (M=1:50.000) 1220 II Vestnes, 1320 III Åndalsnes	
Forekomstens navn og koordinater: WGS84 UTM sone 32, se sammendrag		Sidetall: 118	Pris: kr 250,-
Feltarbeid: Geophysix 2014, Fugro 2018, GeoExpert AG, 2015 og IMPAKT Geofysik AB 2019		Rapportdato: 2. juli 2021	Prosjektnr.: 329500 / 364500
		Ansvarlig: <i>Marco Brønner</i>	
Sammendrag:			
<p>NGU har, som deltager i «Ekspertergruppe for ingeniørgeologi» ved prosjektet E39 Kryssing av Romsdalsfjorden, fått tilgang til mye resultater fra refraksjonsseismikk utførte av flere aktører samt boringer utført av Statens vegvesen. I foreliggende arbeid er kvaliteten på refraksjonsseismiske tolkinger for påvising og karakterisering av svakhetssoner i berg samt tolket dyp til berg og karakterisering av løsmasser vært viktige tema. De erfaringer som er opparbeidet ved å studere NGUs repressering av data med programmet Rayfract og andre firmas tolkinger er viktige å ta vare på for ettertiden, derfor denne rapporten. NGU har også vurdert kvaliteten av tomografi utført mellom sjøbunnen og borehull. Arbeidet er utført innenfor NGUs samarbeidsprosjekt med Svv, Vegdirektoratet. Arbeidet omhandler seismikk utført av GeoExpert AG, Impakt Geofysik AB og Geomap/GeoVista, Fugro og GeoPhysix AS.</p> <p>NGUs repressering med programmet Rayfract gav respons på de aller fleste av de 19 svakhetssonene som IMPAKTs tradisjonelle tolkinger indikerte langs utvalgte profiler. I tillegg er fire nye svakhetssoner indikert langs de ni undersøkte profilene. NGUs tolkinger, både Hagedoorntolkinger og tomografisk inversjon, viser i gjennomsnitt samme bredde av sonene, men det er individuelle forskjeller. Hastigheten i sonene ved NGUs tolkinger er jevnt over noe høyere enn ved de tradisjonelle tolkingene, og dette vil ha konsekvenser for klassifiseringen av bergmassen. Tomografisk inversjon med 1D startmodell utført både av IMPAKT og NGU gir dårligere bilder av bergmassen. Tomografisk inversjon kan prosessere bort falske svakhetssoner som skyldes mindre fordypninger i bergoverflaten.</p> <p>Tradisjonelle tolkinger av dyp til berg kan ha en betydelig større usikkerhet enn +/- 10 % som tradisjonelt har vært en vanlig angivelse av usikkerhet. Automatiske tolkinger med Rayfract og Hagedoorns metode har vist relativt gode tolkinger, men også resultater der dypet til berg ligger i gjennomsnitt opp mot 18 % høyere enn det åtte boringer viser. Ved å benytte resultater fra boringer har NGU kommet fram til prosedyrer for tolking av refraksjonsseismikk som gir meget god angivelse av dyp til berg (100 % +/- 7% ved 7 boringer). IMPAKTs kombinerte tolking gir relativt gode angivelser av dyp til berg sammenlignet med boreresultater (97 % +/- 13 %). Beste tolking av dyp til berg ble imidlertid oppnådd ved refraksjonsseismikk. Repressering av FUGROS refraksjonsseismikk i fjorden med gode hastighetsanalyser fra IMPAKTs målinger, viste en treffprosent på 104 og med et standardavvik mindre enn 4 %.</p> <p>Seismisk tomografi mellom sjøbunnen og borehull i berg har ikke gitt pålitelige resultater, verken ved prosjektet «E39 Kryssing av Romsdalsfjorden» eller ved «Nordøyprosjektet» lengre ute i Romsdalsfjorden.</p> <p>NGUs arbeidet har også avdekt svakheter ved den praktiske gjennomføringen av seismiske undersøkelser. Ved ett tilfelle er det benyttet en for svak energikilde, noe som førte til feil hastigheter i bergmassen. Ute i Romsdalsfjorden ble to refraksjonsseismiske utlegg plassert på en uheldig måte. Dette gav større usikkerhet ved tolkingen av svakhetssoner og dyp til berg ved NGUs tolkinger. Ved refraksjonsseismiske undersøkelser i fjorden ble det benyttet en for kort hydrofonkabel til at sikre hastighetsanalyser kunne gjennomføres, noe som resulterte i usikre dyp til berg. Karakterisering av løsmasser ut fra p-bølgehastighet er mulig, men fysiske feilkilder (blindsonelag) og uheldige hastighetsprofiler ved tomografi kan gi utfordringer.</p> <p>Undersøkelsene fordeler seg på tre områder: Julbøen vest for Molde (UTM 396500 - 6957750), i sjøen sør og nord for øya Tautra midt i fjorden (UTM 391150 - 6950600) og ved Vik på sørsida av Romsdalsfjorden (UTM 393600 - 6947000). Koordinater er i UTM sone 32, WGS84.</p>			
Emneord: Tunnel	Refraksjonsseismikk	Refleksjonsseismikk	
Tolkningsteknikker	Bergmassekvalitet	Dyp til berg	
Repressering	Retolking	Fagrapport	

INNHold

1. INNLEDNING	7
2. DATAINNSAMLING OG TOLKINGSMETODER	8
2.1 IMPAKTs innsamling av refraksjonsseismikk	8
2.2 IMPAKTs tolking av refraksjonsseismikk	9
2.3 NGUs tolking av refraksjonsseismikk	11
2.4 Boringer utført av Statens vegvesen ved Vik.....	13
2.5 Refraksjonsseismiske undersøkelser utført av GeoPhysix i 2014	13
2.6 Tomografi mellom sjøbunnen og borehull	13
3. KVALITET PÅ INVERSJONER MED RAYFRACT	14
3.1 Geologisk relevans	14
3.2 Teknisk kvalitet på inversjonen.....	16
4. PÅVISING OG KARAKTERISERING AV SVAKHETSSONER	17
4.1 Ingeniørgeologisk klassifisering av bergmasse	17
4.2 Individuell presentasjon av refraksjonsseismiske profiler	17
4.3 Rayfract DeltatV-inversjon for påvising av svakhetssoner	36
4.4 Sammenstilling av indikerte svakhetssoner fra refraksjonsseismikk.....	38
5. KVALITET PÅ TOLKING AV DYP TIL BERG	41
5.1 Kvalitet på IMPAKTs tradisjonelle lagdelte og kombinerte tolkinger	42
5.2 Kvalitet på NGUs tolkinger med Hagedoorns metode på land ved Vik.....	43
5.2.1 Tolking av dyp til berg ved profil Vik19-01.	45
5.2.2 Tolking av dyp til berg ved profil Vik19-02 og Vik19-04, versjon 1.....	46
5.2.3 Tolking av dyp til berg ved profil Vik19-02 og Vik19-04, versjon 2.....	48
5.3 Kvalitet på NGUs tolkinger med DeltatV-metoden på land ved Vik.	50
5.4 Kvalitet på GeoPhysix sine tradisjonelle tolkinger på land ved Vik.....	53
5.5 Kvalitet på refraksjonsseismiske dybdetolkinger i Romsdalsfjorden.....	54
5.6 Kvalitet på refleksjonsseismiske dybdetolkinger i Romsdalsfjorden	56
6. TOMOGRAFI MELLOM SJØBUNNEN OG BOREHULL	60
6.1 Resultater, tomografi ved Bh1 og Bh3.....	60
6.2 Resultater tomografi ved Bh2B.....	64
6.3 Vurdering av resultatene	67

7. BERGMASSEKVALITET VED JULBØEN	71
7.1 Slegge vs. dynamitt som energikilde	72
7.2 Sammenligning av refraksjonsseismiske tolkingsteknikker	76
7.3 Ingeniørgeologiske vurderinger	78
8. DISKUSJON	80
8.1 Påvising og karakterisering av svakhetssoner.....	80
8.1.1 Tidligere erfaringer.....	80
8.1.2 Erfaringer i dette prosjektet.....	81
8.2 Tolking av dyp til berg.....	84
8.2.1 IMPAKTs refraksjonsseismiske tolkinger	84
8.2.2 NGUs refraksjonsseismiske tolkinger	85
8.2.3 FUGROs refleksjonsseismiske tolkinger.....	86
8.3 Karakterisering av løsmasser	87
8.3.1 Karakterisering av løsmasser ved refraksjonsseismikk.....	87
8.3.2 Karakterisering av løsmasser ved refleksjonsseismikk.....	89
8.4 Tomografi mellom sjøbunnen og borehull	92
8.5 Andre erfaringer.....	93
9. KONKLUSJONER	94
10. REFERANSER.....	96

VEDLEGG:

Vedlegg 1: Boringer utført av Statens vegvesen ved Vik.....	99
Vedlegg 2: NGUs tolkinger med Hagedoorns metode og tomografi, alle profiler....	100
Vedlegg 3: NGUs tolkinger med DeltatV-metoden. Profilene Vik 19-01,-02 og -04.	113
Vedlegg 4: IMPAKTs refleksjonsseismiske hastighetsanalyser på 13 punkter nord for Tautra.....	117

1. INNLEDNING

Statens vegvesen, utbyggingsområde midt, planlegger kryssing av Romsdalsfjorden med tunnel under fjorden. Prosjektet er en del av fergefri E39 fra Kristiansand til Trondheim og den aktuelle parsellen er kalt Vik – Julbøen. Denne består av Bru over Julsundet fra Julbøen på fastlandet til Nautneset på Otrøya, og videre tunnel under fjorden til Vik i Vestnes kommune (se Figur 1). Tunnelen blir ca. 15 km lang og har en maksimal stigning på 5 %. Ved å akseptere en bergoverbygning mindre enn 50 m, kan tunnelen heves og kortes inn med 20 m for hver meter tunnelen heves. For å kunne gjøre dette må en ha meget god kontroll på bergoverflaten. Det er derfor utført mye geofysikk og borer, kanskje mer enn ved noe annet prosjekt i Norge. Prosjektet har gitt mange erfaringer. Førsteforfatter har vært geofysisk rådgiver for prosjektet og mener at erfaringene må komme ettertiden til gode. Derfor denne rapporten.



Figur 1: E39 kryssing av Romsdalsfjorden (Møreaksen) med tunnel under Romsdalsfjorden og hengebru over Julsundet (Illustrasjon: Statens vegvesen).

Det svenske firmaet IMPAKT Geofysik AB utførte høsten 2019 refraksjonsseismiske målinger på land ved Vik, på Julbøen og i sjøen på begge sider av øya Tautra midt i Romsdalsfjorden. Hensikten med målingene var å bestemme dyp til berg samt påvise og karakteriser svakhetssoner i berg langs en justert tunneltracé (IMPAKT 2020). Firmaet tolket måledata tradisjonelt med Hagedoorns pluss-minus-metode (Hagedoorn 1959) og som tomografisk inverterte hastighetsprofiler utført med program fra Geogiga (2019).

NGU har gjennom flere år vurdert hvordan en best kan påvise og karakterisere svakhetssoner i berg med programmet Rayfract (Tassis et al. 2017 og 2018, Rønning et al. 2016, 2017, 2019a og 2019b). På grunnlag av disse arbeidene har NGU definert det de mener er «antatt beste prosedyre» for påvising og karakterisering av svakhetssoner i berg. NGU har hittil ikke vurdert presisjonen ved tolking av dyp til berg, men har et nylig avsluttet modelleringsarbeide også på dette (Rønning et al. 2020)

Tolkingene utført av IMPAKT viste stedvis sprik i dyp til berg mellom deres tradisjonelle lagdelte tolking med Hagedoorns metode og den tomografiske inversjonen (IMPAKT 2020). Den tomografiske inversjonen viste relativt gode tolkinger av dyp til berg, men disse tolkingene viste ingen klare responser på svakhetssoner i berg. NGU har til nå liten erfaring med hvor godt Rayfract fungerer for tolking av dyp til berg. Det var derfor av stor interesse å re-tolke IMPAKTS data med denne programvaren for påvising og karakterisering av både svakhetssoner i berg og dyp til berg.

FUGRO har utført refleksjonsseismiske undersøkelser i Romsdalsfjorden. I mangel på noe bedre ble dybdekonverteringen foretatt med en konstant hastighet på 1600 m/s. Etter det en nå vet, måtte dette bli feil, og det er gjort forsøk på å forbedre dybdekonverteringen ved å benytte hastighetsprofiler beregnet av IMPAKT Geofysik.

I løpet av 2017 og 2018 utførte det norske firmaet Geomap tomografisk inversjon mellom sjøbunnen og borehull (Geomap 2017a og Geomap/Geovista 2018). NGU har også sett på kvaliteten også på denne undersøkelsen, og har sammenlignet resultatene med annen tilgjengelig informasjon.

Roger Wisén har vært ansvarlig for IMPAKTs tolkinger og Arne Kavli er ansvarlig for kvaliteten på utførte borer. Torkild Åndal har sammenstilt p-bølgehastigheter beregnet fra Q-verdi på kjernemateriale, fra tradisjonell refraksjonsseismikk og fra tomografien mellom sjøbunnen og borehull. Georgios Tassis har utført all repressering med programmet Rayfract. Fredrik W.G. Olsen og Roger Wisén har vært ansvarlige for IMPAKTs tolkinger. Jan S. Rønning har ledet arbeidet og utformet rapporten.

Håkan Mattsson ved GeoVista (Luleå) har bidratt med viktige avklaringer ved tomografien mellom sjøbunnen og borehull i berg, og takkes for dette.

2. DATAINNSAMLING OG TOLKINGSMETODER

Utvalgte profiler fra refraksjonsseismiske målinger utført av IMPAKT Geofysik AB for prosjektet E39 Kryssing av Romsdalsfjorden, er retolket med alternativ programvare (Rayfract) av NGU. I dette kapitlet beskrives datainnsamlingen og de forskjellige tolkingsteknikkene IMPAKT og NGU har benyttet. Tomografi mellom sjøbunn og borehull utført av Geomap/GeoVista (Geomap 2017a og 2018, Geomap/Geovista 2018) beskrives samlet i eget kapittel. Geophysix har utført noe refraksjonsseismikk på land ved Vik.

2.1 IMPAKTs innsamling av refraksjonsseismikk

Beskrivelsen av IMPAKTs innsamling av egen refraksjonsseismikk er hentet fra firmaets rapport til oppdragsgiver (IMPAKT 2020), men med noen spesifiseringer. Datainnsamlingen fant sted i perioden 17. oktober 2019 til 10. november 2019.

Målingene til lands ble utført med en 48-kanals seismograf av typen ABEM Terraloc Pro og 10Hz vertikalgeofoner med geofonavstand på 2 m eller 5 m. Til vanns ble anvendt en 48-kanals seismograf av typen ABEM Terraloc PRO komplettert med en

24-kanals ABEM Terraloc MK6 og 10Hz hydrofoner. Hydrofonavstanden var 5 m. Som pulskilde ble det anvendt eksplosiver både til lands og til vanns. I tillegg ble det anvendt akselerert hammer av typen Gisco ESS100 TURBO i områder hvor eksplosiver ikke var mulig å anvende.

Målingene ble utført med 1-3 fjernskudd utenfor hvert utlegg for sikring av full refraktordekning fra berg langs hele utlegget. For beregningen av hastigheter i løsmassene ble det utført skudd inne i hvert utlegg etter avtalt skuddgeometri og aktuelle forhold. Til hvert utlegg ble det utført en detaljert protokoll med notering av sammenheng mellom naboutlegg, notering av detaljer som har hatt betydning for tolkning, samt dato og linjeID. Alle seismiske data er innsamlet med parametere omtalt i Tabell 1.

Tabell 1: seismiske innsamlingsparametere

Parameter	Innstilling
Record length	819.2 ms
Sample interval	0.1 ms
Format	*.Sg2

På land ble det ved hvert utlegg notert knekkpunkter og/eller endepunkter og målt inn med et RTK GNSS system av typen SatLAB SL300 med korreksjon fra CPOS. Alle data ble lagret med geofonposisjon eller fjernskuddsnummer og med informasjon omkring kvalitet av målingen. Til vanns ble det avfyrt 5-8 skudd rundt kabelutlegget for posisjonering av hydrofonene med triangulering. Linjene ble løpende lagt in i CAD og posisjonen vurdert. Alle datainnsamlinger ble under feltarbeidet gjennomgått og kvalitet ble vurdert. Det ble alltid vurdert om det var full refraktordekning fra berg langs hele utlegget. Enkelte linjesegmenter ble tatt om igjen etter tett kommunikasjon med oppdragsgiver.

2.2 IMPAKTs tolking av refraksjonsseismikk

Beskrivelsen av IMPAKTs tolking av egen refraksjonsseismikk er hentet fra firmaets rapport til oppdragsgiver (IMPAKT 2020), men med noen spesifiseringer.

Lagbasert tolkning

Tolkning av refraksjonsseismiske profiler er utført med pluss-minus-metoden (Hagedoorn 1959), komplettert med GRM med 2 eller 3 lags modell (Generalised Reciprocal Method, Palmer 1980).

Fra skuddene inne i utlegget analyseres fordelingen av hastigheter i løsmassene, som videre benyttes til å beregne gjennomsnittshastigheter. Deretter beregnes dybde til berg under hver hydrofon/geofon.

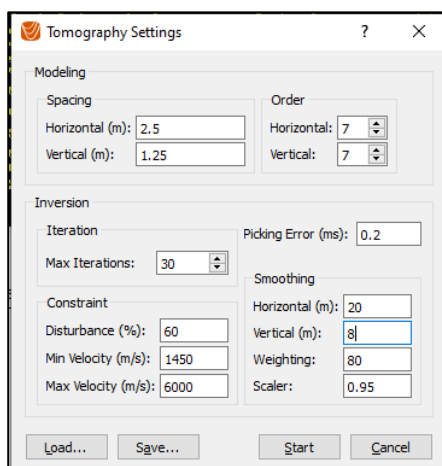
Tolkningene er utført enkeltvis for hvert kabelutlegg. Ved linjer lengre enn et utlegg er tolkningene for kabelutleggene satt sammen, men det er ikke foretatt noen korrigerende av tolkninger for å få bergoverflaten jevn. Derfor kan det forekomme områder, hvor bergoverflaten er forskjøvet i vertikalretning. IMPAKT mener det er viktig informasjon omkring usikkerheter og har derfor valgt ikke å interpolere mellom utleggene.

Tomografisk inversjon

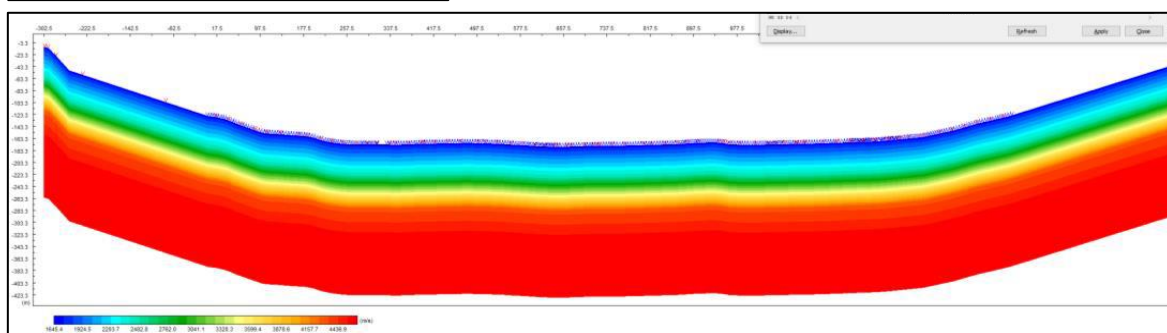
Tomografisk inversjon av data er utført med DWTOMO (Seismic Pro 9.15) fra Geogiga Technology Corp. (Geogiga 2019). Softwaren er anvendt både til plukking av første ankomster, samt tomografisk invers modellering (inversjon). Metoden gir en gradvis hastighetsvariasjon både horisontalt og vertikalt. Under inverteringen er alle innstillinger notert og dokumentert. Det er anvendt omtrent de samme innstillinger for alle linjer, se Figur 2.

For beskrivelse av programvaren henvises det til manual for Geogiga som kan fås fra Geogiga Inc. eller IMPAKT Geofysik AB. For linjene på land settes en minimumshastighet (Min Velocity) på 350 m/s. Ved målinger i sjøen ble denne satt til 1450 m/s. Maksimumshastighet ved begge tilfellene var 6000 m/s.

Startmodell er en 1D gradientmodell som følger de lave hastighetene i første ankomstkurvene, se eksempel i Figur 3. Antallet av iterasjoner er primært vurdert ut fra tilpasning av modellen til de målte førsteankomster. Når tilpasningen ikke lengre forbedres stoppes inversjonen, typisk er dette etter mellom 10-20 iterasjoner med en minste kvadratfeil under 1ms. Til en viss grad er det også tatt hensyn til et geologisk perspektiv ved valget av antall iterasjoner. I tilfelle av geologiske urimelige modeller med mange kunstige effekter er inversjonen stoppet manuelt. Den horisontale og vertikale glatting som blir anvendt er slik at risikoen for små kunstige effekter med ekstreme hastigheter er liten. Tomografien har både fungert som et sluttprodukt, men er underveis også anvendt som et effektivt verktøy for kvalitetskontroll av plukkede førsteankomster. Dette har vært til gagn for både den seismiske tomografi så vel som for den lagbaserte tolkning.



Figur 2: Innstillinger for tomografisk invers modellering for refraksjonsseismikk. Eksempel fra P04.



Figur 3: Eksempel fra startmodell for tomografi på linje P04.

For de profilene hvor det er levert resultater fra seismisk tomografi, er modelleringen utført på sammenstilte profiler. Dette er nødvendig for at fjernskudd med lang avstand til profilet skal kunne modelleres korrekt. I motsetning til Rayfract (som er en annen kommersiell programvare som bl.a. NGU benytter for seismisk tomografi) så kan Geogiga anvende fjernskudd som er plassert langt utenfor profilene, men det skaper en økt usikkerhet om resultatet i endene på profilene. Sammenlignet med den lagbaserte tolking så tar den tomografiske inversjonen høyde for forskjell mellom de enkelte utlegg og leverer ett resultat hvor modellene er tilpasset hverandre. Tomografi er kun utført på visse linjer eller deler av linjer med spesielt høy interesse.

Tomografien er et sterkt verktøy i kombinasjon med lagbasert tolkning. Ved avvik mellom tomografi og lagbasert tolkning synliggjøres en kompleks geologi. IMPAKT utfører vanligvis en kombinert tolking der resultater fra tradisjonelle lagdelte tolking og tomografisk inversjon samtolkes med annen informasjon (geologisk kartlegging, boring o.a.) og da gjerne i dialog med oppdragsgiver.

2.3 NGUs tolking av refraksjonsseismikk

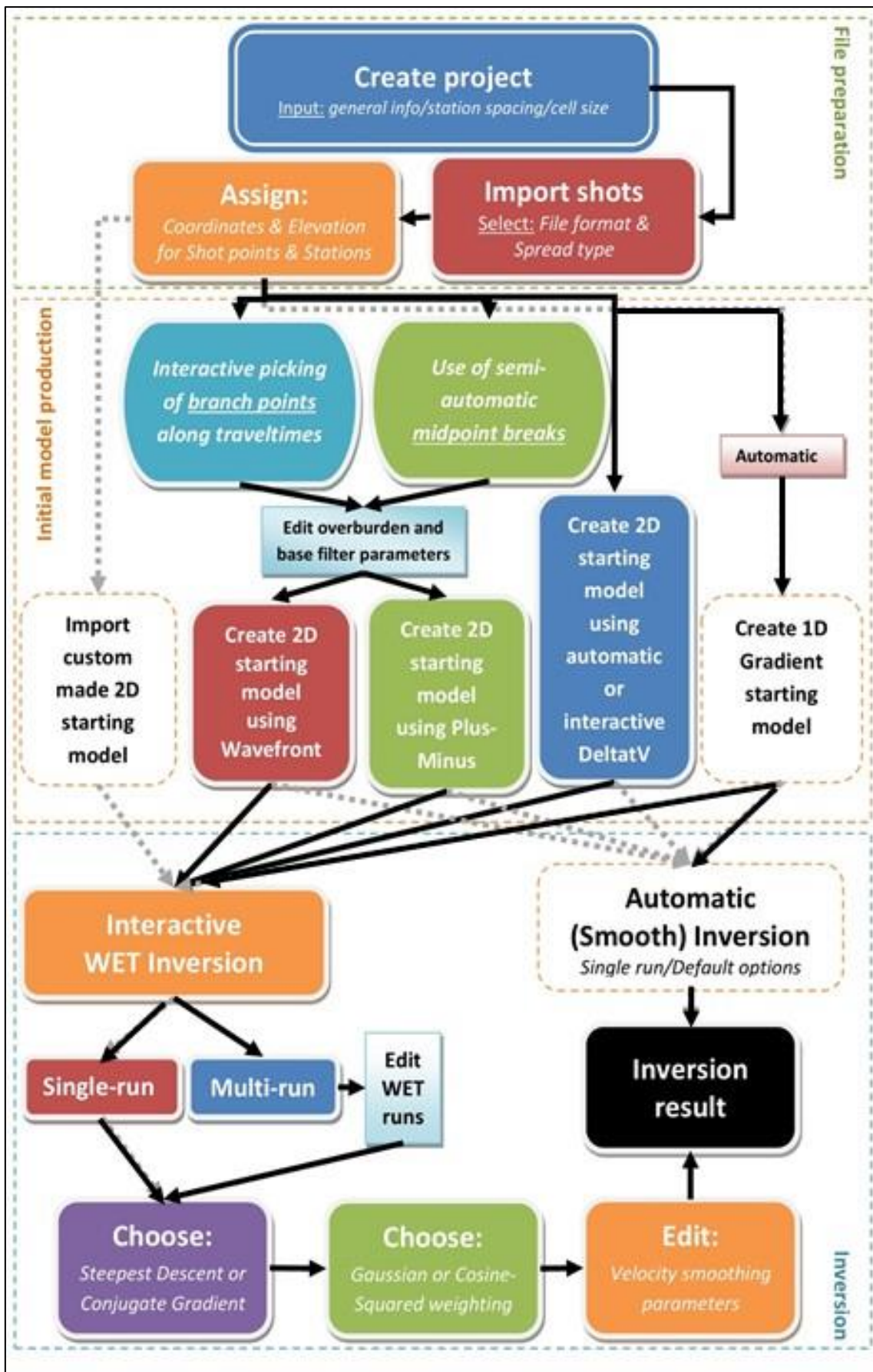
NGU benytter programmet Rayfract (Intelligent Resources 2019a og -b) ved sine tolkinger av refraksjonsseismikk. Programmet er meget avansert og har mange valgmuligheter underveis (se Figur 4). En startmodell for inversjonen kan skapes på i prinsippet fem forskjellige måter:

1. 2D egendefinert startmodell
2. 2D startmodell beregnet med «Wavefront»-metoden
3. 2D startmodell beregnet med Hagedoorns pluss-minus-metode
4. 2D startmodell beregnet med DeltatV-metoden (automatisk eller interaktivt)
5. 1D gradient startmodell tilsvarende den som IMPAKT benytter (Figur 3).

Arbeid gjennom flere år har vist at resultatet av inversjonen for påvising og karakterisering av svakhetssoner i berg er sterkt avhengig av hvilken startmodell som benyttes og hvilken prosedyre som velges under selve inversjonen (Tassis et al. 2017 og 2018, Rønning et al. 2020). NGU har kommet frem til at antatt beste prosedyre for lokalisering og karakterisering av svakhetssoner i berg ved bruk av programmet Rayfract er

- å benytte startmodell beregnet med Hagedoorns metode
- «Multi-run conjugate gradient» inversjon
- «Cosine squared» vekting og
- Minimal glatting.
-

Modellering har vist at tomografisk inversjon kan, i tillegg til påvising av svakhetssoner, angi sonenes bredde og indikere sonenes utstrekning mot dypet til et visst dyp. Ved dyp større enn ca. 20 m, får metoden problemer med å angi utstrekningen mot dypet, dette på grunn av at de seismiske bølgeene ikke går dypt nok ned i berget. Bestemmelse av svakhetssoners fall kan være en utfordring (Tassis et al. 2017, Rønning et al. 2019a og b). Dersom det benyttes liten geofon- og skuddavstand, kan den tomografiske inversjonen gi relativt gode tolkinger av hastigheten i sonene (Tassis et al. 2018).



Figur 4: Flytskjema for programmet Rayfract. NGU har uttestet alle valg angitt med sort pil for påvisning og karakterisering av svakhetssoner i berg.

Ved NGUs tomografiske inversjoner som presenteres i denne rapporten, er prosedyren som skissert ovenfor benyttet som hovedmetode. I tillegg til de tomografisk inverterte hastighetsprofilene, presenteres også startmodellen beregnet med Hagedoorns pluss-minus-metode. Denne er i prinsippet en selvstendig tolking lik IMPAKTs lagdelte tolking. Anvendte tider for førsteankomster er levert av IMPAKT Geofysik og er de samme som IMPAKT selv har benyttet.

NGU har ikke tidligere sett så mye på kvaliteten på tolking av dyp til berg med tomografisk inversjon. I foreliggende arbeid blir tolking av dyp til berg sammenlignet med resultater fra relativt sikre borer. I denne sammenheng blir bl.a. effekten av forskjellig glatting av de inverterte data testet. I dette arbeidet benyttes også generering av startmodell automatisk med DeltatV-metoden (se Figur 4).

2.4 Boringer utført av Statens vegvesen ved Vik

Statens vegvesen har selv utført borer ved Vik, i det samme området som GeoPhysix AS og IMPAKT Geofysik AB utførte refraksjonsseismiske undersøkelser i 2019. Boringen var av typen «Total sondering», og hensikten var hovedsakelig å kartlegge dyp til berg. Vanligvis benyttes begrepet «antatt berg» ved slike borer. Ved boringene på Vik, ble det boret fra 3,0 m til 5,4 m ned i antatt berg. Angivelse av dyp til berg ved disse boringene vurderes derfor som relativt sikre. Tekniske data og resultater fra boringene er vist i vedlegg 1. Resultatene fra disse boringene er benyttet til en kvalitetskontroll av tolket dyp til berg ved forskjellige tolking av refraksjonsseismikken. Bare borer med avstand til seismikklinje mindre enn 4 meter er tatt med i dette arbeidet.

2.5 Refraksjonsseismiske undersøkelser utført av GeoPhysix i 2014

På senhøsten i 2014 utførte firmaet GeoPhysix refraksjonsseismiske målinger langs fire profiler ved Vik. Utførelse og tolking (tradisjonelle manuelle tolking med Hagedoorns metode) er beskrevet i rapport fra arbeidet (GeoPhysix 2015).

2.6 Tomografi mellom sjøbunnen og borehull

På senhøsten i 2017 utførte Geomap tomografi med skudd i to borehull og registreringer på sjøbunnen (Geomap 2017a). Dette førte til kollaps i borehullene. Det ble derfor utviklet en hydrofonkabel som flyttet registreringene ned i et tredje borehull og med tilhørende skudd på sjøbunnen (Geomap/GeoVista 2018). Prosedyrer er noe mangelfullt beskrevet i nevnte rapporter.

3. KVALITET PÅ INVERSJONER MED RAYFRACT

NGU har reprocessert ni profiler samlet inn av IMPAKT Geofysik høsten 2019 ved Vik sør for Romsdalsfjorden og i selve fjorden. Hensikten med dette var først og fremst å vurdere mulighetene forskjellige tolkingsteknikker (inversjonsmetoder) har for påvising og karakterisering av svakhetssoner (bergmassekvalitet). Derneft var det av interesse å se hvor gode tolkinger av dyp til berg de forskjellige teknikkene kunne gi. Som et ledd i dette arbeidet har NGU også sett på den tekniske kvaliteten av egne inversjoner som er utført med programmet Rayfract (Intelligent Resources 2019a og -b).

3.1 Geologisk relevans

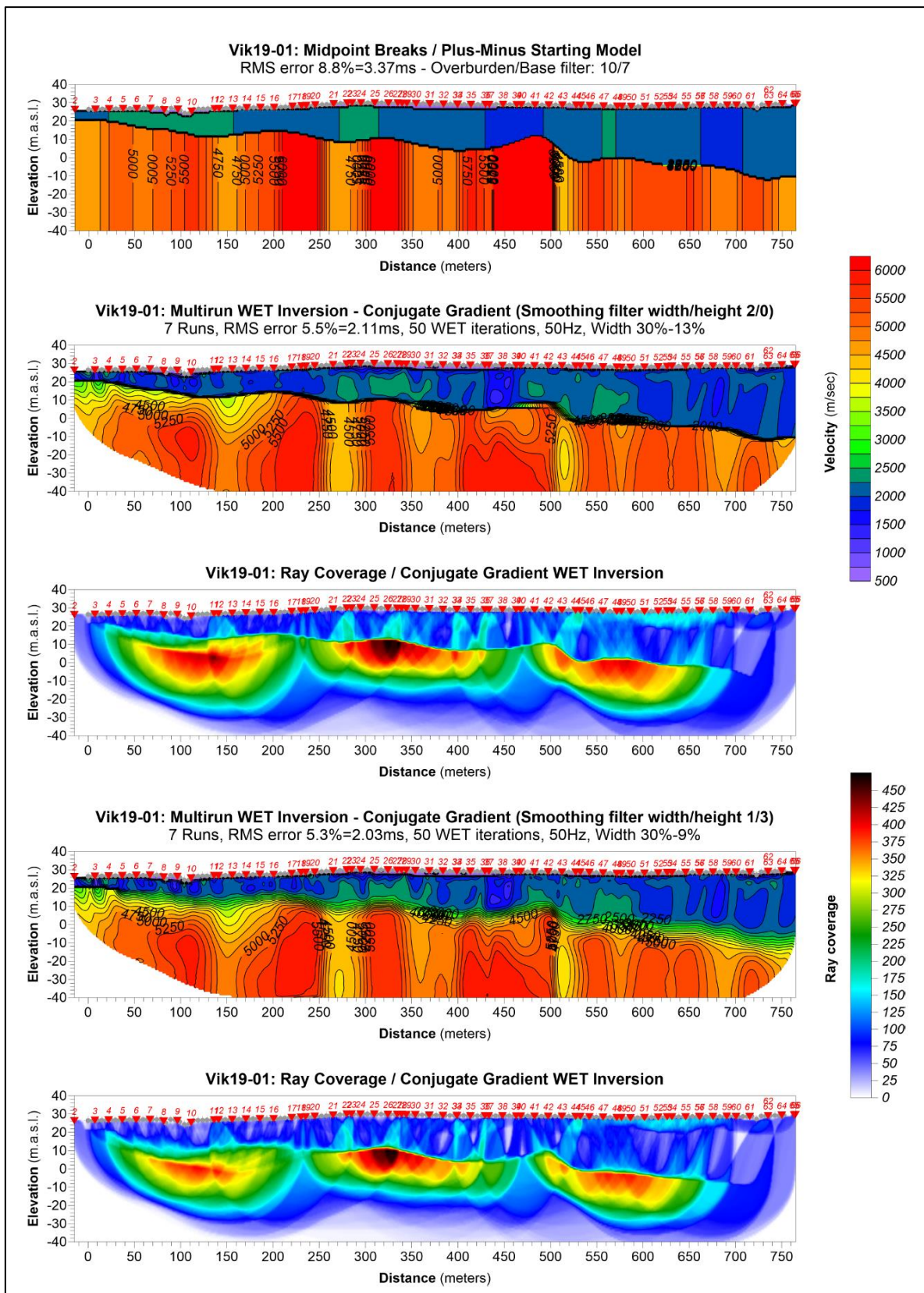
NGU har benyttet det som anses som «antatt beste prosedyre» for inversjon av refraksjonsseismiske data med henblikk på påvising og karakterisering av svakhetssoner i berg (se kapittel 2.2). Alle de inverterte profilene er vist i vedlegg 2. Et eksempel på slike tolkinger er vist i Figur 5 (Profil Vik19-01).

Tolkingen med Hagedoorns metode (Figur 5 øverst) gir en meget klar overgang fra løsmassehastigheter (< 2500 m/s) og berghastigheter (> 3500 m/s). Det indikeres også et meget detaljert bilde av p-bølgehastigheten i berg inkludert flere svakhetssoner med hastigheter < 4500 m/s. Hvor gode disse tolkingene av berghastigheten og løsmasse-tykkelsen er, diskuteres i kapitlene 4 og 5.

Ved «Multi-run» tomografisk inversjon nyanseres hastighetsprofilen noe, spesielt i løsmassene. De indikerte svakhetssonene fremstår også på begge de to alternative tomografiske inversjonene, dog med mindre justeringer i form og interne hastigheter. Dette er en indikasjon på at sonene er reelle, og ikke en effekt av fordypninger i bergoverflaten slik Westerdahl (2003) påviste var mulig.

Forskjellig glatting gir variasjoner i hvor skarp hastighetsgradienten fra løsmassehastigheter til berghastigheter blir (se Figur 5). Et glattingsfilter «Width/Height» lik 2/0 (ingen vertikal glatting) gir en meget skarp overgang, mens Width/Height lik 1/3 (større vertikal glatting) gir en mer gradvis overgang. Intuitivt er den første varianten å foretrekke, da denne gir en meget veldefinert bilde av overgangen mellom løsmasser og berg. Spørsmålet er imidlertid hvor god denne tolkingen er, noe kapittel 5 gir svar på.

Bildet av strålingstettheten (Ray coverage) er meget nyttig informasjon ved vurdering av inversjonens geologiske relevans. Dette gir et bilde av hvor mange stråler som går gjennom hver celle i det inverterte bildet. I dette tilfellet er forløpet faglig fornuftig med en oppblomstring av strålebaner ved overgangen til berg. Dette kan være en indikasjon på en skarp hastighetskontrast som gir kritisk refraksjon med mange strålebaner som følger øvre deler av bergoverflaten. Ved rapportering av denne type undersøkelser bør derfor stråletettheten presenteres, ikke minst for vurdering av kvaliteten av inversjonen i forskjellige deler av hastighetsprofilen. Jo flere stråler som går gjennom en celle i det inverterte bilde, jo større sannsynlighet er det for at hastigheten i cellen er korrekt.



Figur 5: NGUs tolkinger med programmet Rayfract av refraksjonsseismisk profil Vik19-01 samlet inn av IMPAKT Geofysik AB. Øverst vises beregnet startmodell med Hagedoorns pluss-minus-metode, som også kan fungere som selvstendig tolking tilsvarende IMPAKTs lagdelte tolking. Deretter følger resultatet av antatt beste inversjon og tilhørende stråledekning for to forskjellige glattingsrutiner, henholdsvis «Width/Height» lik 2/0 og 1/3.

3.2 Teknisk kvalitet på inversjonen.

Hvor god en inversjon er rent teknisk, kan studeres ved å se på hvordan beregnede data fra det inverterte hastighetsprofilen stemmer med de målte data punkt for punkt i hastighetsprofilen. Avviket uttrykkes i en «RMS-error» målt i prosent (%) eller i millisekund (ms). Hastighetsprofilene presentert i vedlegg 2, viser verdiene for de enkelte profilene.

Tabell 2 viser «RMS-error» for NGUs inversjon av ni profilene fra IMPAKT Geofysik som er reprocessert. Generelt kan en si at Hagedoorns pluss-minus-metode gir en dårlig tilpasning til de målte data. I gjennomsnitt er feilen nesten 10 % eller 4,0 ms. Dette er høyt, og illustrerer at inversjonen ikke er spesielt god. Etter å ha kjørt en (WET) tomografisk inversjon er avviket betydelig redusert og er mindre enn 2,5 % eller ned mot 1 ms. Dette regnes som meget gode modelltilpasninger til de målte data, men en skal merke seg at det ikke sier noe om kvaliteten på de målte data. En lav RMS-verdi er heller ikke en garanti for at hastighetsprofilen er korrekt, da flere modeller kan gi gode tilpasninger til de målte data.

Tabell 2: Profillengde og «RMS-error» for forskjellig tolking og glatting av reprocesserte refraksjonsseismiske profiler.

Profil	Lengde (m)	Hagedoorn RMS (%) / (ms)	TOMO Glatting W / H	TOMO RMS (%) / (ms)	Glatting Tomo W / H	TOMO RMS (%) / (ms)
Vik 19-01	750	8,8 / 3,4	2 / 0	5,5 / 2,11	1 / 3	5,3 / 2,03
Vik 19-02	525	5,5 / 2,1	2 / 0	1,8 / 0,75	1 / 4	1,9 / 0,75
Vik 19-03	162	7,0 / 1,9	3 / 1	3,3 / 0,9	1 / 2	4,2 / 1,12
Vik 19-04	715	13,1 / 5,5	3 / 1	4,0 / 1,68	1 / 2	3,8 / 1,6
P01 3	360	3,8 / 1,2	4 / 3	0,6 / 0,18	2 / 4	0,7 / 0,21
P01 4-5	710	6,4 / 3,4	3 / 1	1,0 / 0,53	2 / 4	1,0 / 0,51
P02 3-4-5	970	5,8 / 3,2	3 / 1	1,1 / 0,58	1 / 4	0,9 / 0,49
P05, 0-875	909	14,7 / 9,8	2 / 0	3,5 / 2,15	1 / 3	4,6 / 2,9
P05, 909 - 1474	563	17,7 / 5,9	2 / 0	1,2 / 0,39	1 / 4	1,1 / 0,4
Gjennomsnitt		9,2 / 4,0		2,3 / 0,9		2,4 / 1,0
SDEV		4,8 / 2,6		1,6 / 0,6		1,7 / 0,7

Det tomografisk inverterte hastighetsprofilen kan glattes både horisontalt og vertikalt. Større tall for horisontal glatting (Width) og vertikal glatting (Height) angir økende glatting. Verdier under 5 regnes som moderat glatting. Forskjellig glatting av det inverterte hastighetsprofilen gir ikke vesentlig endring av «RMS-error». Noen ganger øker feilen med større glatting, og noen ganger blir den noe mindre. Mest følsom er den vertikale glattingen (Height) og i gjennomsnitt oppnås en noe lavere «RMS-error» ved liten vertikal glatting. Ved denne glattingen oppnås de skarpeste overgangene mellom løsmasser og berg (se Vedlegg 2). Denne måten å presentere de tomografisk inverterte måledata på er gunstig da de viser en veldefinert hastighetsovergang mellom løsmasser og berg, gitt at denne er skarp i virkeligheten.

Størst «RMS-error» viser de to delene av profil P05 som er målt ute i Romsdalsfjorden på ca. 170 meters sjødyb og med løsmassetykkelse på ca. 100 m.

Refraksjons-seismikken viser her sprikende resultater og dette er mest sannsynlig en effekt av en komplisert geologi. Sjødypet har ingen innvirkning siden hydrofonutlegget ligger på sjøbunnen og her ble også alle skuddene avfyrt. Ved profil P02 er løsmassetykkelse opp mot 80 m og dette profilet viser normale hastighetsverdier og en moderat «RMS-error». Uoverensstemmelsen kan da enten skyldes feil i tolket førsteankomst eller komplisert geologi.

4. PÅVISING OG KARAKTERISERING AV SVAKHETSSONER

I dette kapitlet sammenlignes påviste svakhetssoner ved IMPAKTs lagdelte tolkinger og tomografiske inversjon med tilsvarende inversjoner utført av NGU med programmet Rayfract. Det gis først en oppsummering av ingeniørgeologisk klassifisering av bergmasse, deretter en individuell presentasjon av de forskjellige tolkingene og til slutt en samlet sammenstilling av resultater.

4.1 Ingeniørgeologisk klassifisering av bergmasse

Ved beskrivelsen av indikerte svakhetssoner er det valgt å følge Statens vegvesen og prosjektets (E39 Kryssing av Romsdalsfjorden) egen bergmasseklassifisering vist i tabell 3 (Stig Lillevik, personlig meddelelse). Dette innebærer at p-bølgehastigheter større enn 4600 m/s ikke registreres som svakhetssoner (middels, god eller svært god bergmassekvalitet). I Norge har en lang erfaring med tolking av bergmassekvalitet ut fra p-bølgehastighet bestemt ved tradisjonelle tolkinger med Hagedoorns pluss-minus-metode. Denne tolkingen benyttes derfor som utgangspunkt for sammenligningen av tolkingsmetodene. Det er av interesse å undersøke hvordan den ingeniørgeologiske tolkingen vist i tabell 3 stemmer med sonehastigheter bestemt med de andre tolkingsmetodene.

Tabell 3: Bergklasse, p-bølgehastighet og karakteristikk etter vegvesenets egen gradering.

Bergklasse	P-bølgehastighet (m/s)	Karakteristikk
A/B	> 5000	God til svært god bergmassekvalitet
C	4600 - 5000	Middels bergmassekvalitet
D	4000 - 4600	Dårlig bergmassekvalitet
E	3000 - 4000	Svært dårlig bergmassekvalitet
F	2000 – 3000	Ekstremt dårlig bergmassekvalitet
G	< 2000	Eksepsjonelt dårlig bergmassekvalitet

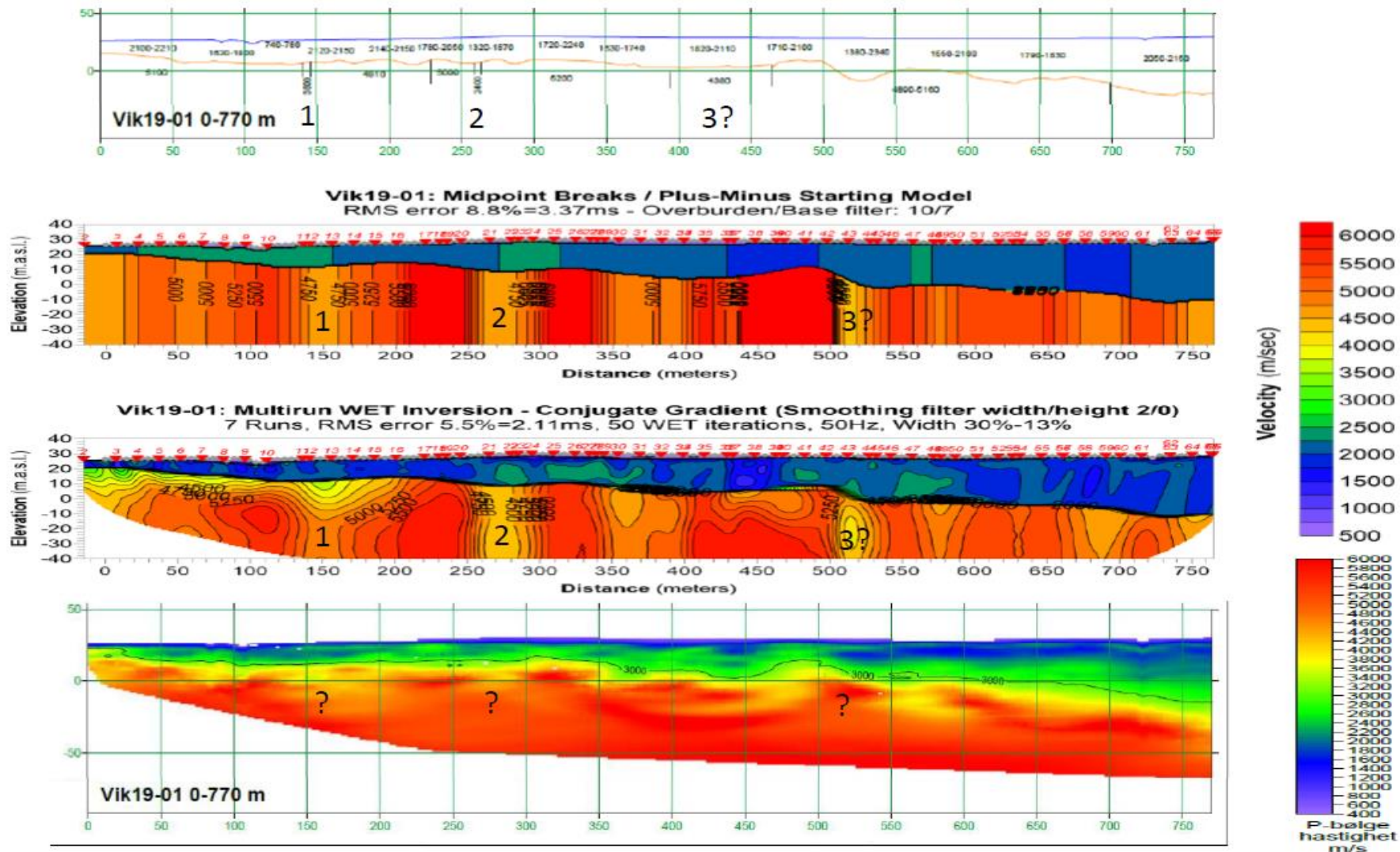
4.2 Individuell presentasjon av refraksjonsseismiske profiler

Fire alternative tolkinger av de fleste profilene presenteres i Figurene 6 til 14. Øverst vises IMPAKTs tradisjonelle lagdelte tolking. Deretter følger NGUs automatiske tolking med Hagedoorns pluss-minus-metode og NGUs tomografiske inversjon med antatt beste prosedyre. Nederst presenteres IMPAKTs tomografiske inversjon med programmet DWTOMO (Geogiga 2019). IMPAKT har ikke utført tomografisk inversjon langs profil P01 utlegg 3 (Figur 10) da oppdragsgiver ikke ønsket dette.

MERK: IMPAKTs tomografiske inversjon fokuserer utelukkende på beregning av løsmassetykkelse og denne inversjonen gir derfor ikke noe godt bilde av svakhetssoner. Tolkningene tas likevel med som en dokumentasjon av tolket dyp til berg (se Kapittel 5).

IMPAKTs lagdelte tolking av **Profil VIK19-01** indikerer tre svakhetssoner (Figur 6).

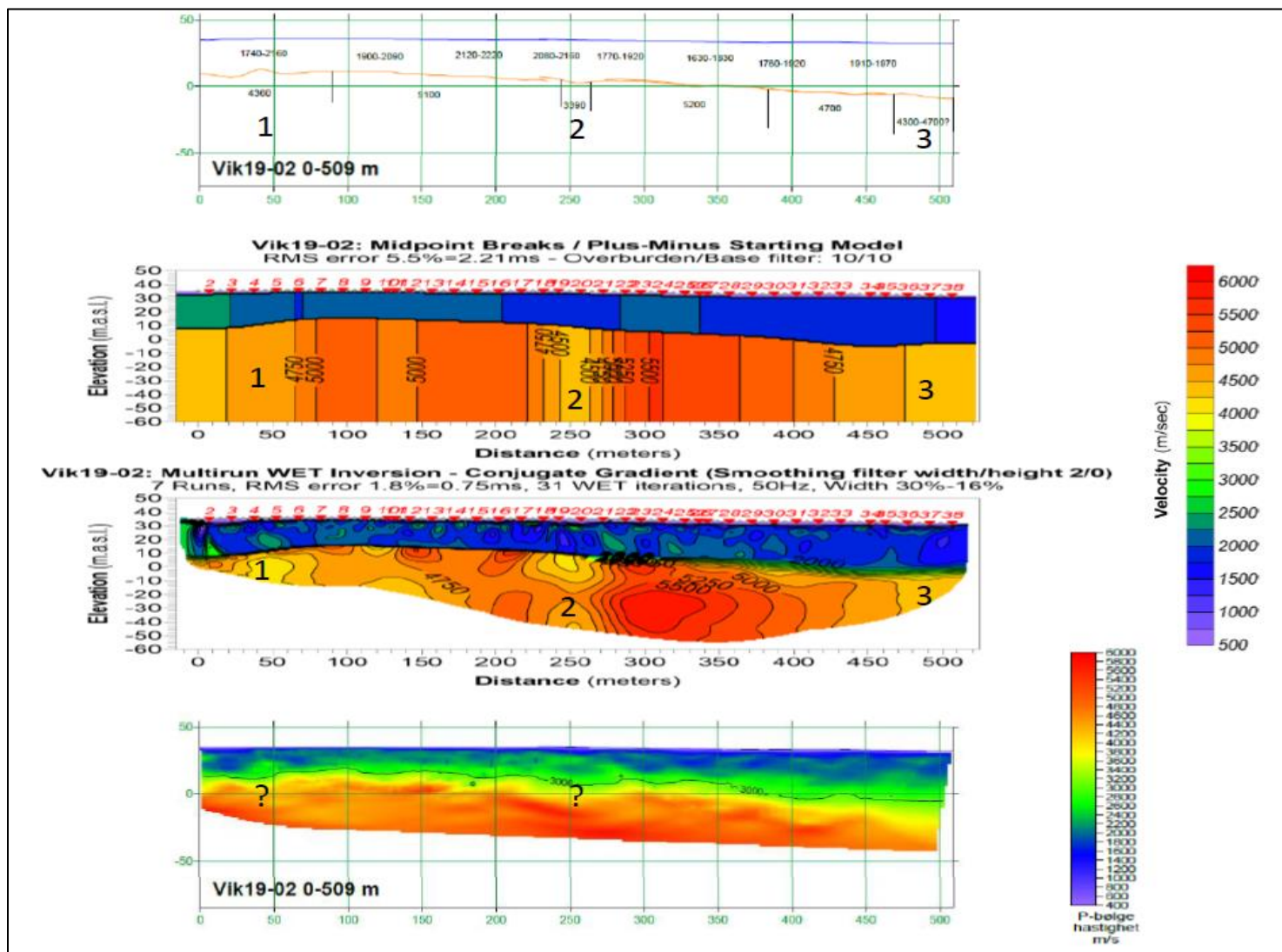
1. **Sone Vik1901-1** fremstår som en ca. 5 m bred sone med hastighet 3800 m/s på den lagdelte tolkingen fra IMPAKT (svært dårlig bergmassekvalitet). Ved NGUs tolking med Hagedoorns metode fremstår denne som en ca. 20 m bred sone der hastigheten ligger mellom 4500 og 4750 m/s. NGUs tomografiske inversjon indikerer at dette kan være et overflatefenomen og at hastigheten nærmer seg 5000 m/s mot dypet. Uansett er dette trolig en sone som ikke vil skape store problemer ved en eventuell driving av tunnel.
2. **Sone Vik1901-2** fremstår som en ca. 5 m bred sone med hastighet 2400 m/s på den lagdelte tolkingen fra IMPAKT. Dette kan da være en relativt smal sone, men med ekstremt dårlig bergmassekvalitet. Ved NGUs tolking med Hagedoorns metode fremstår også denne som en ca. 20 m bred sone der hastigheten ligger mellom 4500 og 4750 m/s. NGUs tomografiske inversjon indikerer også at sonen er ca. 20 m bred, og at hastigheten ligger mellom 4250 og 4500 m/s. Ut fra dette kan bergmassekvaliteten være noe bedre, men sonen betydelig bredere.
3. **Sone Vik1901-3** fremstår som en ca. 65 m bred sone med hastighet 4380 m/s på den lagdelte tolkingen fra IMPAKT (dårlig bergmassekvalitet). NGUs tolkinger viser p-bølgehastigheter godt over 5000 m/s i det samme området. Det indikeres imidlertid en ny sone som er forskjøvet ca. 75 m mot høyere koordinat (nord). Ved NGUs tolking med Hagedoorns metode fremstår denne som en ca. 10 m bred sone der hastigheten ligger mellom 4250 og 4500 m/s. Ved NGUs tomografiske inversjon fremstår sonen som 15 m bred og med hastighet mellom 4250 og 4500 m/s. Det er tvilsomt at den store forskyvningen kan være en tolkingseffekt og mest sannsynlig indikerer IMPAKTs lagdelte tolking en sone som NGUs tolkinger ikke ser og visa versa.



Figur 6: Forskjellig refraksjonsseismisk tolking av det samme datasettet langs profil Vik19-01. IMPAKT's lagdelte tolking øverst, deretter følger NGUs Rayfract-tolking med Hagedoorns metode (startmodell) og tomografiske inversjon med antatt beste prosedyre. Nederst vises IMPAKT's tomografiske inversjon med programmet fra Geogiga.

IMPAKTs lagdelte tolking av **Profil VIK19-02** indikerer tre svakhetssoner (Figur 7).

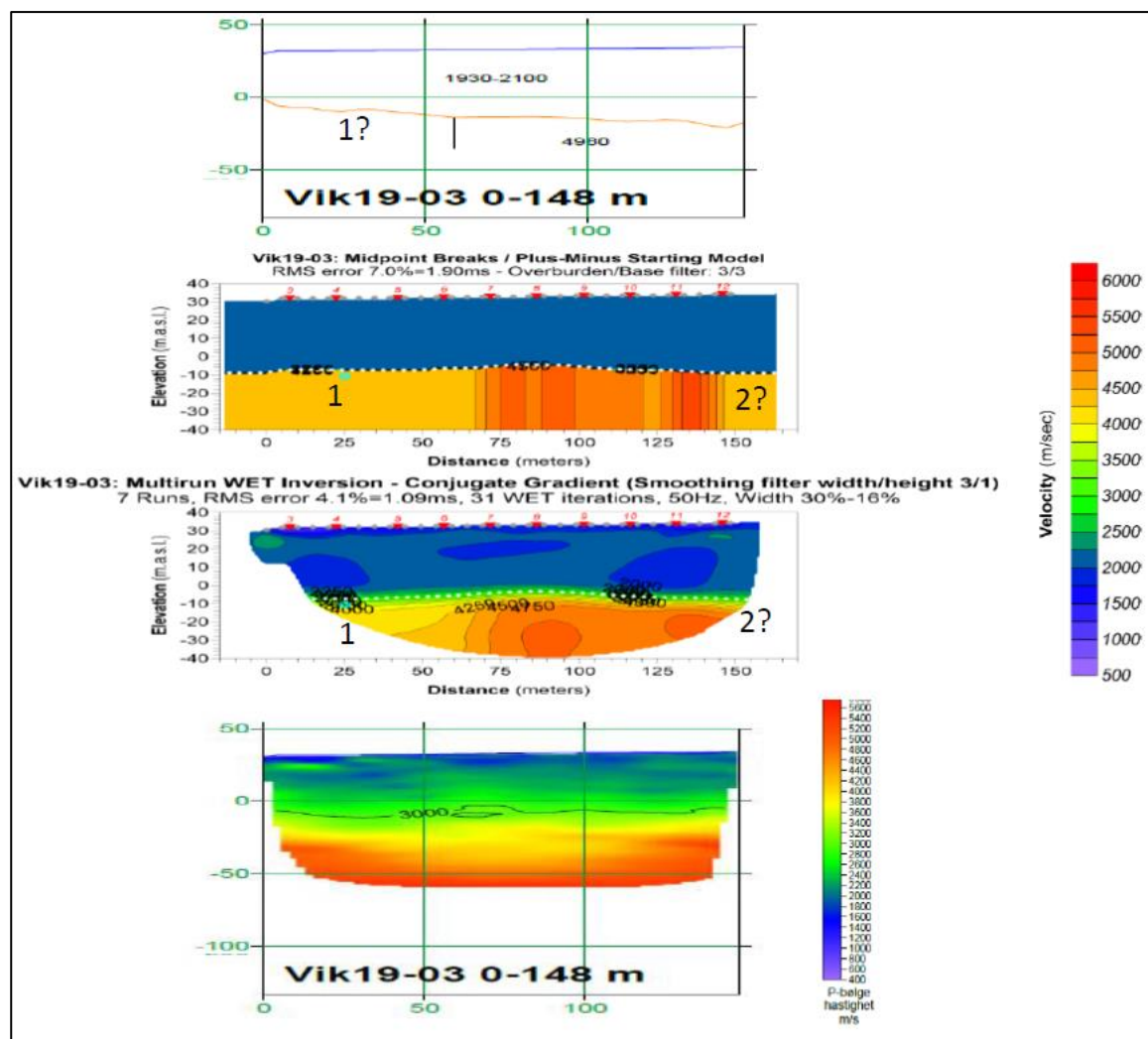
1. **Sone Vik1902-1** fremstår som en ca. 90 m bred sone med hastighet 4360 m/s på den lagdelte tolkingen fra IMPAKT (dårlig bergmassekvalitet). Ved NGUs tolking med Hagedoorns metode fremstår denne som en ca. 65 m bred sone der hastigheten ligger mellom 4500 og 4750 m/s. Ved NGUs tomografiske inversjon fremstår sonen som 80 m bred og med hastighet mellom 4000 og 4500 m/s, noe som må sies å stemme meget bra med IMPAKT's lagdelte tolking.
2. **Sone Vik1902-2** fremstår som en ca. 20 m bred sone med hastighet 3390 m/s på den lagdelte tolkingen fra IMPAKT (svært dårlig bergmassekvalitet). Ved NGUs tolking med Hagedoorns metode fremstår denne som en ca. 20 m bred sone der hastigheten ligger mellom 4250 og 4500 m/s. Ved NGUs tomografiske inversjon fremstår sonen som ca. 30 m bred og med hastighet mellom 3750 og 4250 m/s. Begge NGUs tolkinger påviser sonen, men viser noe høyere hastigheter og den tomografiske inversjonen viser også en større bredde.
3. **Sone Vik1902-3** fremstår som en ca. 40 m bred sone med hastighet 4300 - 4700? m/s ved den lagdelte tolkingen fra IMPAKT (dårlig bergmassekvalitet). Ved NGUs tolking med Hagedoorns metode og tomografiske inversjon fremstår denne som en ca. 40 m bred sone der hastigheten ligger mellom 4250 og 4500 m/s. Her stemmer både bredde og p-bølgehastighet meget bra for de tre tolking-metodene.



Figur 7: Forskjellig refraksjonsseismisk tolking av det samme datasettet langs profil Vik19-02. IMPAKT's lagdelte tolking øverst, deretter følger NGUs Rayfract-tolking med Hagedoorns metode (startmodell) og tomografiske inversjon med antatt beste prosedyre. Nederst vises IMPAKT's tomografiske inversjon med programmet fra Geogiga.

IMPAKTs lagdelte tolking av **Profil VIK19-03** indikerer ingen svakhetssone (Figur 8).

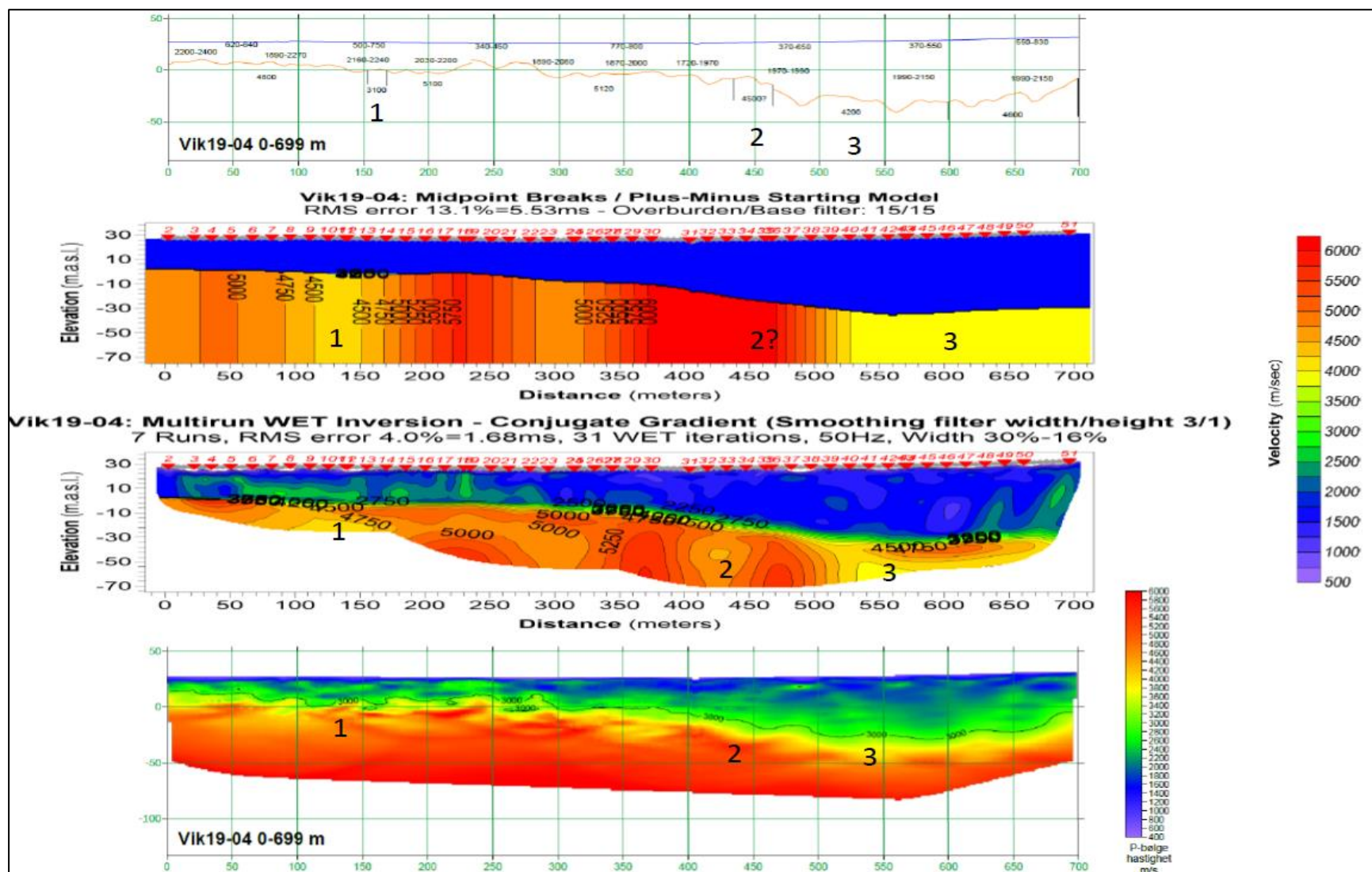
1. Det som likevel kan sies å være **sonen VIK1903-1** fremstår som en ca. 60 m bred sone der hastigheten ikke er bestemt ved den lagdelte tolkingen fra IMPAKT. Ved NGUs tolking med Hagedoorns metode fremstår denne som en ca. 65 m bred sone der hastigheten ligger mellom 4000 og 4250 m/s. Ved NGUs tomografiske inversjon fremstår sonen som en ca. 65 m bred sone med hastighet mellom 4000 og 4500 m/s. Denne delen av profilet **Vik19-03** kan derfor utgjøre en bred sone med dårlig bergmassekvalitet. Profilet viser imidlertid et uvanlig hastighetsforløp og RMS-error er relativt høy både for Hagedoorn-tolkingen og den tomografiske inversjonen, henholdsvis 7 % og 4,1 %. Tolkingen er derfor være noe usikker.
2. Den siste delen av dette profilet (90 m) viser ved den lagdelte tolkingen en p-bølgehastighet på 4980 m/s og er ikke å betrakte som en svakhetssone (middels god bergmassekvalitet). NGUs tolking med Hagedoorns metode indikerer imidlertid en ca. 20 m bredsone med hastighet 4250 til 4500 m/s. Denne mulige sonen (**Vik1903-2**) opptrer på enden av profilet, og delvis utenfor det tomografiske bildet. Hastigheten ligger på grensen til det som kan tolkes som dårlig bergmasse, og den indikerte sonen kan være en kunstig effekt ved enden av profilet.



Figur 8: Forskjellig refraksjonssismisk tolking av det samme datasettet langs profil Vik19-03. IMPAKT's lagdelte tolking øverst, deretter følger NGU's Rayfract-tolking med Hagedoorns metode (startmodell) og tomografiske inversjon med antatt beste prosedyre. Nederst vises IMPAKT's tomografiske inversjon med programmet fra Geogiga.

IMPAKTs lagdelte tolking av **Profil VIK19-04** indikerer tre mulige svakhetssoner (Figur 9). NGUs tolkinger viser her relativt stor RMS feil, og tolkingene kan derfor være noe usikre.

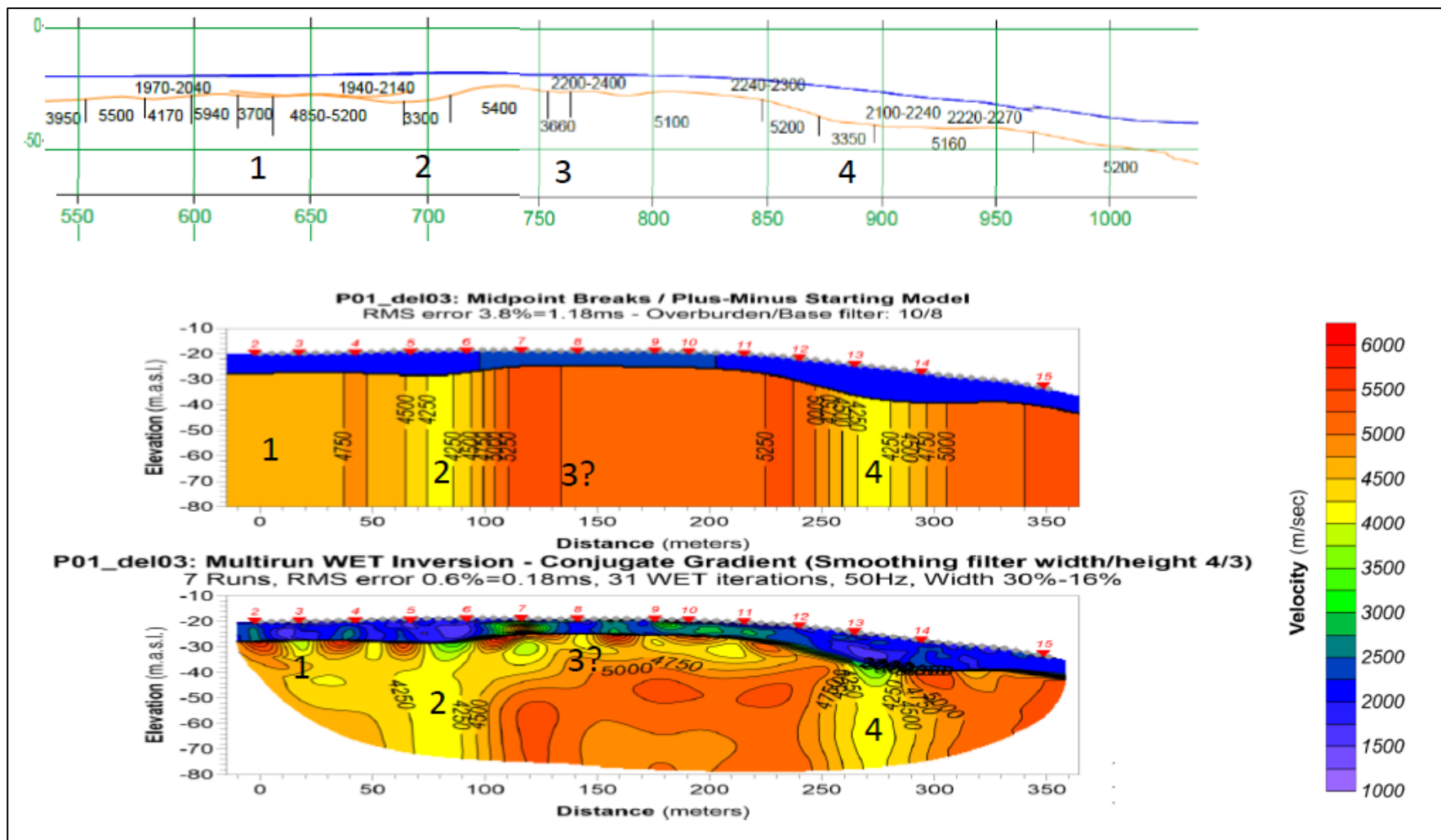
1. **Sone Vik1904-1** fremstår som en ca. 15 m bred sone med hastighet 3100 m/s på den lagdelte tolkingen fra IMPAKT (svært dårlig bergmassekvalitet). Ved NGUs tolking med Hagedoorns metode fremstår denne som en ca. 35 m bred sone der hastigheten ligger mellom 4250 og 4500 m/s. Ved NGUs tomografiske inversjon fremstår sonen som 60 m bred og med hastighet mellom 4000 og 4500 m/s. Sonen er betydelig bredere ved NGUs tolkinger, men til gjengjeld er hastigheten høyere.
2. **Sone Vik1904-2** fremstår som en ca. 30 m bred sone med hastighet 4500? m/s på den lagdelte tolkingen fra IMPAKT (i grenseland for dårlig bergmassekvalitet). NGUs tolking med Hagedoorns metode viser ingen tegn på noen sone her, derimot hastigheter opp mot 6000 m/s. Ved NGUs tomografiske inversjon derimot, fremstår sonen som 20 m bred og med hastighet mellom 4500 og 5000 m/s. Tolkede hastigheter ligger på grensen til det som regnes som svakhetszone både for IMPAKT's lagdelte tolking og NGUs tomografiske inversjon. Siden sonen i tillegg ikke viser respons på NGUs tolking med Hagedoorns metode, tas den ikke med i den videre analysen.
3. **Sone Vik1904-3** fremstår som en ca. 140 m bred sone med hastighet 4200 m/s på den lagdelte tolkingen fra IMPAKT (dårlig bergmassekvalitet), men fortsetter med hastighet 4600 m/s i ytterligere 100 m. Ved NGUs tolking med Hagedoorns metode fremstår denne som en ca. 200 m bred sone der hastigheten ligger mellom 4000 og 4500 m/s. Ved NGUs tomografiske inversjon fremstår sonen som ca. 200 m bred og med hastighet mellom 4000 og 4500 m/s. Denne sonen er også betydelig bredere ved NGUs tolkinger, men dette samsvarer med fortsettelsen mot høyre med hastighet 4600 m/s ved IMPAKT's lagdelte tolking. Sonen viser delvis lavere hastighet ved NGUs tolking med Hagedoorns metode, men ved den tomografiske inversjonen stemmer hastigheten bra med IMPAKT's lagdelte tolking, men noe mer nyansert.



Figur 9: Forskjellig refraksjonsseismisk tolking av det samme datasettet langs profil Vik19-04. IMPAKTs lagdelte tolking øverst, deretter følger NGUs Rayfract-tolking med Hagedoorns metode (startmodell) og tomografiske inversjon med antatt beste prosedyre. Nederst vises IMPAKTs tomografiske inversjon med programmet fra Geogiga.

IMPAKTs lagdelte tolking av **Profil P01 utlegg3** indikerer fire svakhetssoner (Figur 10). I tillegg indikeres en 20 m bred sone med hastighet 4170 m/s rett før utlegg 3, men denne ligger utenfor NGUs tolkinger.

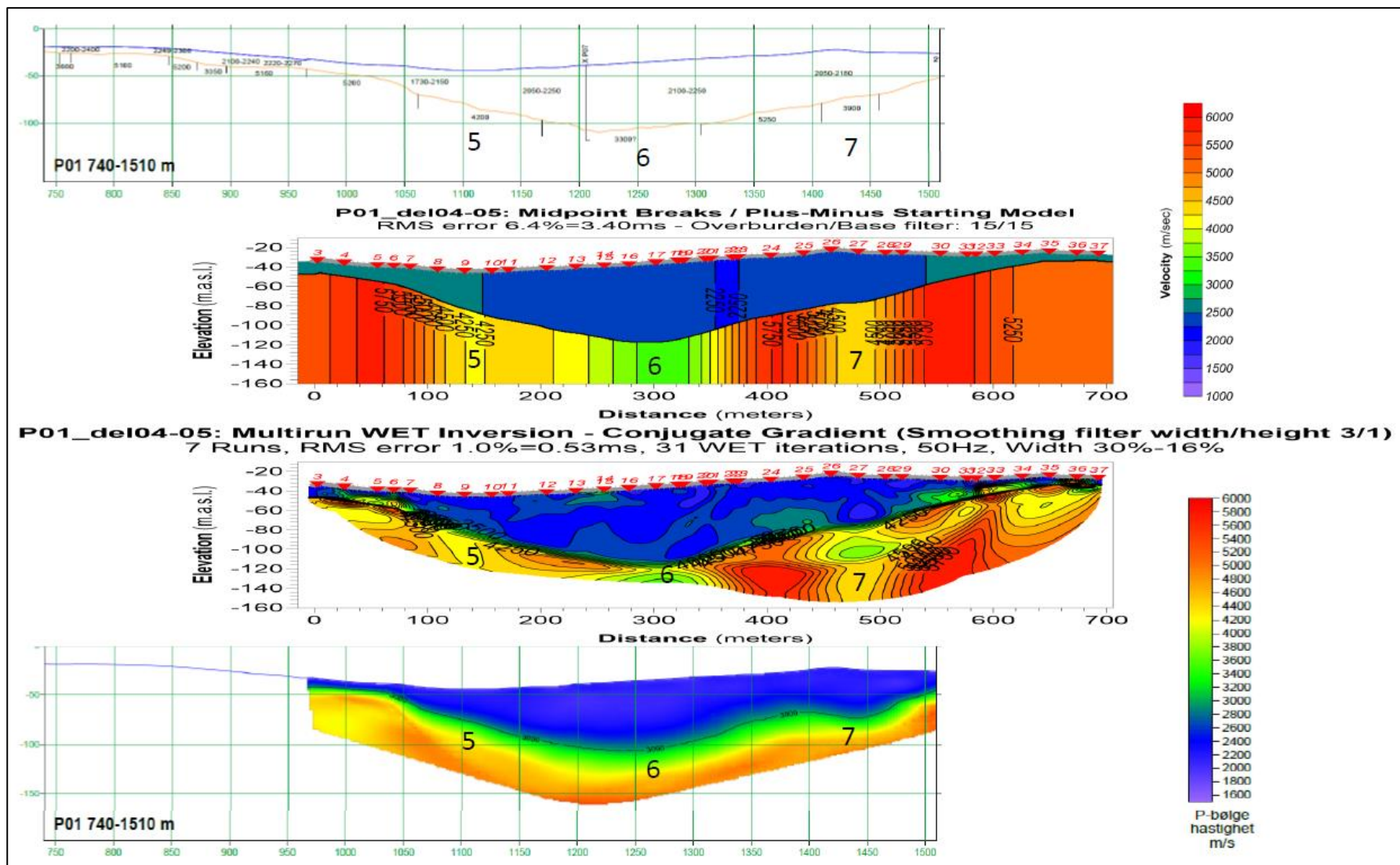
1. **Sone P01-1** fremstår som en ca. 10 m bred sone med hastighet 3700 m/s på den lagdelte tolkingen fra IMPAKT (svært dårlig bergmassekvalitet). Denne sonen indikeres ikke ved NGUs tolking med Hagedoorns metode, men hastigheten ligger mellom 4500 og 4750 m/s i en ca. 50 m bred sone. Ved NGUs tomografiske inversjon indikeres relativt lave hastigheter (< 4500 m/s) ca. 25 m ned i berget. Dette kan være en indikasjon på forvitret berg, noe som også stemmer med relativt lav hastighet til side for sonen i IMPAKT's lagdelte tolking.
2. **Sone P01-2** fremstår som en ca. 15 m bred sone med hastighet 3300 m/s på den lagdelte tolkingen fra IMPAKT (svært dårlig bergmassekvalitet). Ved NGUs tolking med Hagedoorns metode og tomografiske inversjon fremstår denne som en ca. 30 m bred sone der hastigheten ligger mellom 4000 og 4500 m/s. Også denne sonen er ved NGUs tolkinger bredere og med høyere hastighet. Sonen har betydelig utstrekning mot dypet på begge NGUs tolkinger, noe som indikerer en reell svakhetszone.
3. **Sone P01-3** fremstår som en ca. 10 m bred sone med hastighet 3660 m/s på den lagdelte tolkingen fra IMPAKT (svært dårlig bergmassekvalitet). Ved NGUs tolking med Hagedoorns metode ligger denne sonen i et område med hastigheter godt over 5000 m/s, noe som stemmer godt med IMPAKT's lagdelte tolking til side for sonen. NGUs tomografiske inversjon indikerer lave hastigheter ca. 15 m ned i berget. Det er mulig dette indikerer forvitret berg i soner, men med begrenset utstrekning mot dypet.
4. **Sone P01-4** fremstår som en ca. 25 m bred sone med hastighet 3350 m/s på den lagdelte tolkingen fra IMPAKT (svært dårlig bergmassekvalitet). Ved NGUs tolking med Hagedoorns metode fremstår denne som en ca. 30 m bred sone der hastigheten ligger mellom 4000 og 4500 m/s. Ved NGUs tomografiske inversjon fremstår sonen som 30 m bred og med hastighet mellom 3500 og 4500 m/s. Sonen er noe bredere ved NGUs tolkinger, men til gjengjeld er hastigheten høyere. Sonen har betydelig utstrekning mot dypet på begge NGUs tolkinger, noe som indikerer en reell svakhetszone.



Figur 10: Forskjellig refraksjonsseismisk tolking av det samme datasettet langs profil P01 utlegg 3. IMPAKTs lagdelte tolking øverst, deretter følger NGUs Rayfract-tolking med Hagedoorns metode (startmodell) og tomografiske inversjon med antatt beste prosedyre. IMPAKTs har ikke utført tomografiske inversjon med programmet fra Geogiga ved dette profilet.

IMPAKTs lagdelte tolking av **Profil P01 utlegg 4 og 5** indikerer tre svakhetssoner (Figur 11) i tillegg til de fire fra utlegg 3.

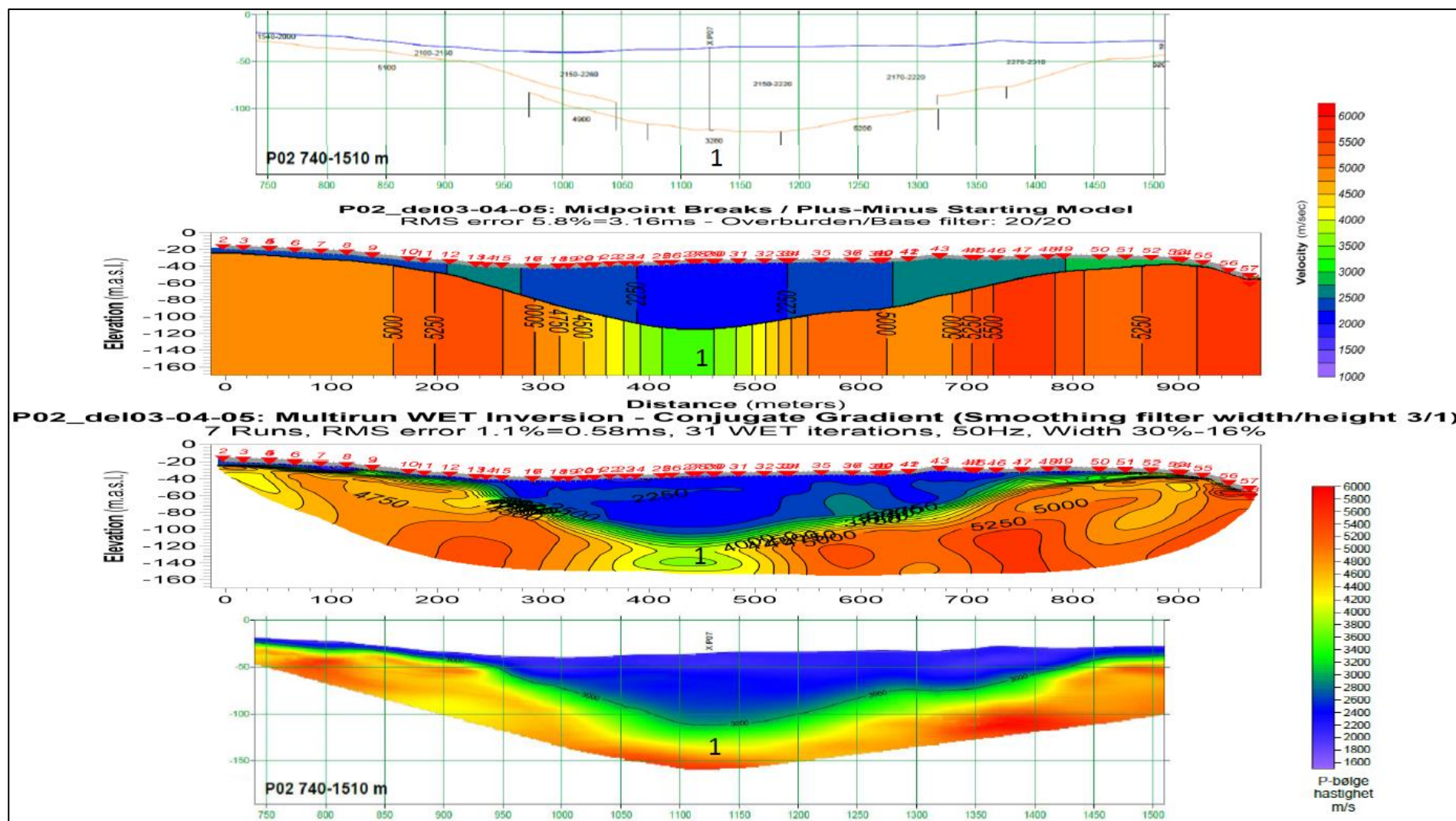
5. **Sone P01-5** fremstår som en ca. 105 m bred sone med hastighet 4200 m/s på den lagdelte tolkingen fra IMPAKT (dårlig bergmassekvalitet). Sone 5 ligger direkte inntil sone 6. Ved NGUs tolking med Hagedoorns metode fremstår denne som en ca. 100 m bred sone der hastigheten ligger mellom 4000 og 4500 m/s. Ved NGUs tomografiske inversjon fremstår sonen som en ca. 60 m bred sone der hastighet ligger mellom 4000 og 4500 m/s. NGUs tolkingene stemmer relativt bra med IMPAKT's lagdelte tolking og sonen synes reell.
6. **Sone P01-6** fremstår som en ca. 140 m bred sone med hastighet 3300? m/s på den lagdelte tolkingen fra IMPAKT (svært dårlig bergmassekvalitet). Sone 6 synes å være en videreutvikling av sone 5. Ved NGUs tolking med Hagedoorns metode fremstår denne som en ca. 110 m bred sone der hastigheten ligger mellom 3000 og 4000 m/s. Ved NGUs tomografiske inversjon fremstår sonen som en ca. 80 m bred sone der hastighet ligger mellom 3000 og 4000 m/s. NGUs tolkinger stemmer også her relativt bra med IMPAKT's lagdelte tolking. Penetrasjonen ned i berg er imidlertid sterkt begrenset (ca. 10 m), og dette gjør tolkingen mer usikker.
7. **Sone P01-7** fremstår som en ca. 50 m bred sone med hastighet 3900 m/s på den lagdelte tolkingen fra IMPAKT (svært dårlig bergmassekvalitet). Ved NGUs tolking med Hagedoorns metode fremstår denne som en ca. 35 m bred sone der hastigheten ligger mellom 4250 og 4500 m/s. Ved NGUs tomografiske inversjon fremstår sonen som en ca. 35 m bred sone der hastighet ligger mellom 3500 og 4500 m/s. Sonen gjør en uforklarlig utbuling ca. 20 m ned i berget. NGUs tolkinger stemmer også her relativt bra med IMPAKT's lagdelte tolking, og den tomografiske inversjonen indikerer en betydelig utstrekning mot dypet.



Figur 11: Forskjellig refraksjonseismisk tolking av det samme datasettet langs profil P01 utleggene 4 og 5. IMPAKTs lagdelte tolking øverst, deretter følger NGUs Rayfract-tolking med Hagedoorns metode (startmodell) og tomografiske inversjon med antatt beste prosedyre. Nederst vises IMPAKTs tomografiske inversjon med programmet fra Geogiga.

IMPAKTs lagdelte tolking av **Profil P02 utleggene 3, 4 og 5** indikerer en svakhets-
sone (Figur 12).

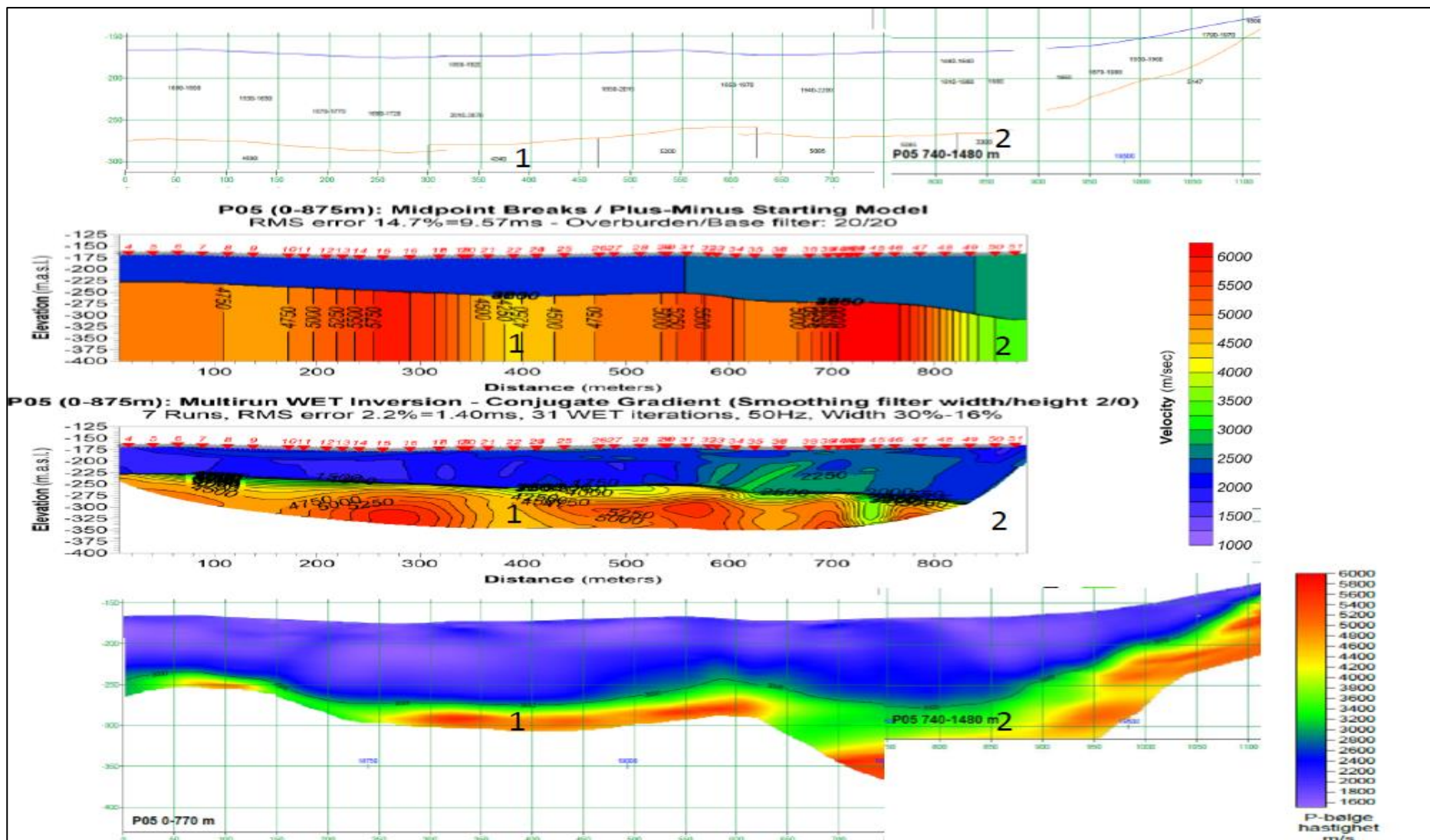
1. **Sone P02-1** fremstår som en ca. 110 m bred sone med hastighet 3280 m/s på den lagdelte tolkingen fra IMPAKT (svært dårlig bergmassekvalitet). Ved NGUs tolking med Hagedoorns metode fremstår denne som en ca. 180 m bred sone der hastigheten ligger mellom 3000 og 4500 m/s. Ved NGUs tomografiske inversjon fremstår sonen som en ca. 120 m bred sone der hastighet ligger mellom 3250 og 4500 m/s. NGUs tolkinger stemmer også her relativt bra med IMPAKT's lagdelte tolking, spesielt den tomografiske inversjonen, men hastigheten i sonen er stedvis høyere.



Figur 12: Forskjellig refraksjonseismisk tolking av det samme datasettet langs profil P02 utleggene 3, 4 og 5. IMPAKTs lagdelte tolking øverst, deretter følger NGUs Rayfract-tolking med Hagedoorns metode (startmodell) og tomografiske inversjon med antatt beste prosedyre. Nederst vises IMPAKTs tomografiske inversjon med programmet fra Geogiga.

IMPAKTs lagdelte tolking av **Profil P05 0-875 m** indikerer to svakhetszone (Figur 13).

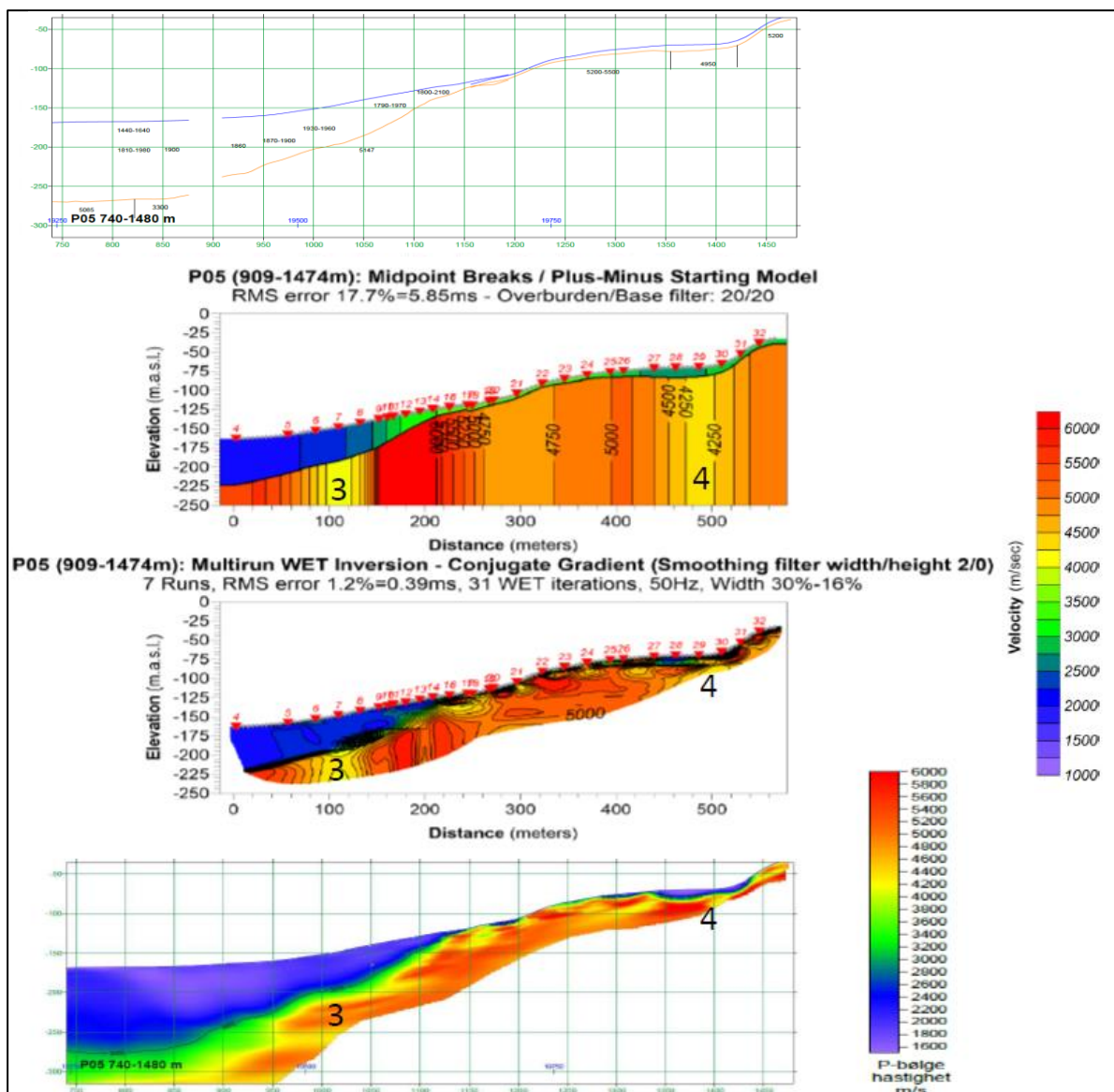
1. **Sone P05-1** fremstår som en ca. 165 m bred sone med hastighet 4340 m/s på den lagdelte tolkingen fra IMPAKT (dårlig bergmassekvalitet). Ved NGUs tolking med Hagedoorns metode fremstår denne som en ca. 70 m bred sone der hastigheten ligger mellom 4000 og 4500 m/s. Ved NGUs tomografiske inversjon fremstår sonen som en ca. 60 m bred sone der hastighet ligger mellom 4250 og 4500 m/s. NGUs tolkinger av hastighet stemmer bra med IMPAKT's lagdelte tolking, men sonen er betydelig smalere.
2. **Sone P05-2** fremstår som en mer enn 80 m bred sone med hastighet 3300 m/s ved den lagdelte tolkingen fra IMPAKT. Sonen ligger på slutten av profilet og fortsetter trolig ut over profilets lengde. Ved NGUs tolking med Hagedoorns metode er sonen trolig mer enn 100 m bred med hastighet i intervallet 3000 – 4500 m/s, og fortsetter ut av profilet. Dette stemmer bra med 3300 m/s fra den tradisjonelle lagdelte tolkingen. Ved NGUs tomografiske inversjon faller dessverre sonen utenfor hastighetsprofilet og hverken hastighet eller bredde kan tolkes. Ved IMPAKT's tomografiske inversjon med program fra Geogiga indikeres ingen klar svakhetszone, men fra tolket dyp til berg (3000 m/s-konturen) og videre ca. 50 m mot dypet er berghastigheten lavere enn 4200 m/s i ca. 300 meters bredde. Dette kan indikere en overflateforvitring, men dette stemmer ikke med de andre tolkingsteknikkene der hastigheten i hovedsak er større enn 5000 m/s bortsett fra i denne ene sonen.



Figur 13: Forskjellig refraksjonsseismisk tolking av det samme datasettet langs profil P05 utleggene 1, 2 og 3. IMPAKTs lagdelte tolking øverst, deretter følger NGUs Rayfract-tolking med Hagedoorns metode (startmodell) og tomografiske inversjon med antatt beste prosedyre. Nederst vises IMPAKTs tomografiske inversjon med programmet fra Geogiga.

IMPAKTs lagdelte tolking av **Profil P05 909-1474m** indikerer ingen svakhetssoner (Figur 14), men NGUs tolkinger indikerer to soner.

1. **Sone P05-3** viser en konstant hastighet på 5347 m/s (5350 m/s) ved IMPAKT's tradisjonelle tolking, og gir ikke noe signal om dårlig bergmassekvalitet. Ved NGUs tolking med Hagedoorns metode er sonen 40 m bred og hastigheten ligger i intervallet 3750 – 4500 m/s (dårlig til svært dårlig bergmassekvalitet). Ved NGUs tolking med tomografisk inversjon er sonen også 40 m bred, men med hastighet i intervallet 4000 – 4500 m/s (dårlig bergmassekvalitet). Denne sonen gir klare responser på NGUs tolkinger, ligger på en utflating i bergoverflaten og ser ut til å være reell.
2. **Sone P05-4** viser en konstant hastighet på 4950 m/s ved IMPAKT's tradisjonelle tolking, og gir ikke noe signal om dårlig bergmassekvalitet. Ved NGUs tolking med Hagedoorns metode er sonen 65 m bred og hastigheten ligger i intervallet 4000 – 4500 m/s (dårlig bergmassekvalitet). Ved NGUs tolking med tomografisk inversjon er sonens bredde mer usikker på grunn av liten dybderekkevidde. Hastighet ligger i intervallet 4000 – 4500 m/s (dårlig bergmassekvalitet). Også denne sonen gir klare responser på NGUs tolkinger, ligger på en utflating i bergoverflaten og ser ut til å være reell.



Figur 14: Forskjellig refraksjonsseismisk tolking av det samme datasettet langs profil P05 (909 – 1474m). IMPAKTs lagdelte tolking øverst, deretter følger NGUs Rayfract-tolking med Hagedoorns metode (startmodell) og tomografiske inversjon med antatt beste prosedyre. Nederst vises IMPAKTs tomografiske inversjon med programmet fra Geogiga.

4.3 Rayfract DeltatV-inversjon for påvising av svakhetssoner

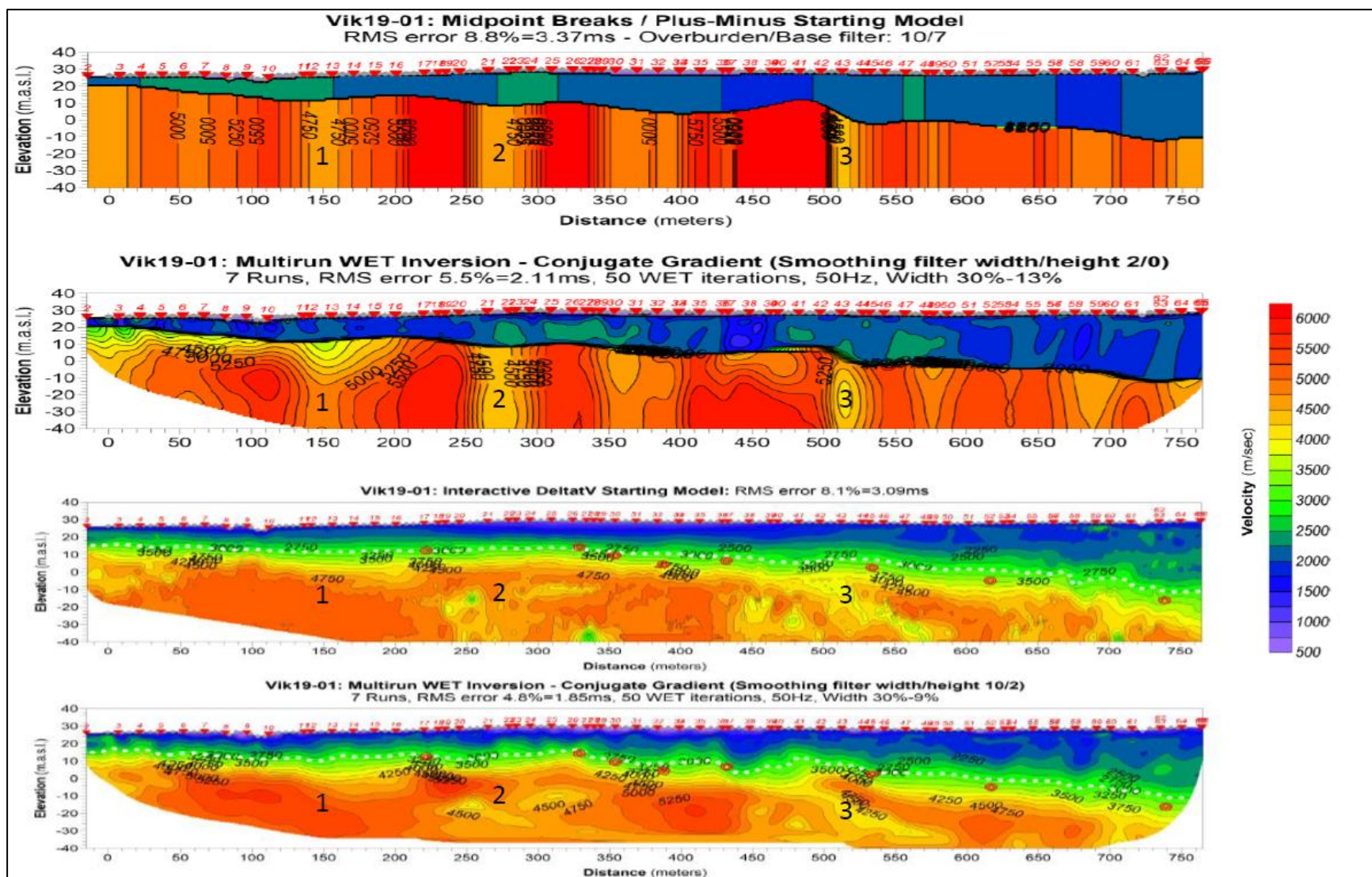
For å kunne vurdere alternative inversjonsprosedyrer for påvising og karakterisering av svakhetssoner, har NGU invertert profilene Vik19-01, Vik19-02 og Vik19-04 med Rayfract der startmodell er beregnet med DeltatV-metoden (se Figur 4). Startmodellen kan gi et bilde av hastighetsfordelingen mot dypet, men det er den påfølgende tomografiske inversjonen som utgjør selve tolkingen. Et eksempel på tolking langs profil Vik19-01 er vist i Figur 15. Også her er det benyttet antatt beste prosedyre for inversjonen, «Multirun Conjugate Gradient», men det er benyttet en mye større horisontal glatting og noe større vertikal glatting (Weight/Height filter 10/2). Alle NGUs DeltatV-tolkinger av de tre profilene ved Vik er vist i Vedlegg 3.

Som diskutert tidligere, indikerte Profil Vik19-01 tre svakhetssoner både på IMPAKTs lagdelte tolking og på NGUs Hagedoorn-tolking og tomografiske inversjon med denne som startmodell (se Kapittel 4.2). Startmodellen beregnet med DeltatV-metoden og den tomografiske inversjonen med denne som startmodell viser ingen klar indikasjon på sone **Vik1901-1**. Denne sonen ble indikert som en 5 m bred sone med hastighet 3800 m/s ved IMPAKTs lagdelte tolking. (se tabell 4). Ved startmodellen beregnet med Hagedoorns metode (Figur 15 øverst), ligger hastigheten i intervallet 4500 – 4750 m/s, og ligger i øvre sjikt for hva som karakteriseres som svakhetszone. Ved den tomografiske inversjonen med startmodell beregnet med Hagedoorns metode, kan denne sonen tolkes som en fordypning i bergoverflaten med hastigheter over 4750 m/s mot dypet. Dette er nok ikke en markert svakhetszone som burde gi et klart svar ved inversjon med DeltatV startmodell.

Sone **Vik1901-2**, som også var smal (5 m) ved IMPAKTs tradisjonelle tolkinger, er noe klarere både ved Hagedoorns metode og ved inversjonen med denne som startmodell. Sonens bredde er i begge tilfeller ca. 20 m og hastigheten i sonen ligger i intervallet 4250 – 4500 m/s. Denne sonen gir ingen klar indikasjon ved DeltatV startmodell, og heller ikke ved den tomografiske inversjonen med denne som startmodell. Det indikeres imidlertid subhorisontale soner med lavere hastighet (stedvis mindre enn 4000 m/s). Her indikeres en hastighetsinversjon, da hastigheten i overliggende berg er betydelig høyere, stedvis opp mot 5000 m/s.

Sone **Vik1901-3**, som ikke falt sammen med NGUs tolkinger, viste en hastighet på 4380 m/s i 65 m bredde ved IMPAKTs tradisjonelle lagdelte tolking. NGUs tolking med Hagedoorns metode og den påfølgende tomografiske inversjonen indikerte en vertikal sone med bredde 10 – 15 m og med sonehastighet på 4250 – 4500 m/s. Startmodellen beregnet med DeltatV-metoden og den tomografiske inversjonen indikerer en lavhastighetszone som faller relativt slakt mot stigende koordinat (mot nord). Hastigheten i sonen ligger mellom 4000 m/s og 4500 m/s ved den tomografiske inversjonen, og stedvis lavere enn 3750 m/s i startmodellen. Dersom det viser seg at tolkingen er korrekt, er dette er en meget viktig informasjon om sonens fall. Hagedoorns metode vil oftest indikere vertikale soner om den gjøres manuelt eller automatisk med Rayfract.

Ingen av de seks indikerte svakhetssonene langs profilene Vik 19-02 og -04 viser klare responser ved DeltatV-tolkningene (se Vedlegg 3). Tolking av dyp til berg med DeltatV-metoden diskuteres i Kapittel 5.4.



Figur 15: Alternative refraksjonsseismiske tolkinger av profil Vik19-01. Øverst: NGUs Rayfract-tolking med Hagedoorns metode (startmodell) og deretter tomografiske inversjon med antatt beste prosedyre. To nederste bilder viser henholdsvis DeltatV startmodell og tomografiske inversjon med denne som startmodell. Hvit stiplet linje viser hastighetskonturen $v=3000$ m/s, mens røde symboler viser dyp til berg fra boringer.

4.4 Sammenstilling av indikerte svakhetssoner fra refraksjonsseismikk

Ved IMPAKTs tradisjonelle lagdelte tolking varierer hastigheten i sonene fra 2400 m/s (ekstrem dårlig bergmassekvalitet) til 4980 m/s. Sistnevnte tolkes gjerne som middels bergmassekvalitet, men indikeres som svakhetszone ved NGUs tolkinger. Totalt er det indikert 23 svakhetssoner langs de ni inverterte profilene (se Figurene 6 til 14). Siden tolkinger med DeltatV-metoden gir mer usikre tolkinger, utelates resultatene fra denne metoden i det videre arbeidet med svakhetssoner.

Tabell 4 viser en samlet oversikt over indikerte svakhetssoner, deres hastighet og sonenes tykkelse ved de forskjellige tolkingemetodene. En sone ved IMPAKTs lagdelte tolking (Vik1903-1) mangler hastighet, men fremstår som en klar svakhetszone ved NGUs tolkinger. Tre markerte soner ved NGUs tolkinger viser p-bølgehastighet større enn 4600 m/s ved IMPAKTs lagdelte tolking (Vik1903-2, P05-3 og P05-4, se Tabell 4). Sone Vik1904-2 viste hastigheter i grensen for en svakhetszone ved IMPAKTs lagdelte tolking (4500?), hastighet større enn 5500 m/s ved NGUs Hagedoorntolking og fra 4750 til 5000 m/s ved NGUs tomografiske inversjon. Sonene P01-1 og P01-3 indikeres som overflatefenomener ved NGUs tomografiske inversjon, og kan være eksempler på at tomografien kan si noe om sonenes dybderekkefølge. Disse sonen tas ikke med i den videre analysen.

I Tabell 4 er det gjort ett forsøk på å beregne gjennomsnittlig hastighet i og bredde av svakhetssonene. Dette er ikke alltid like lett. Ved IMPAKTs tradisjonelle lagdelte tolking benyttes hovedsakelig bare fjernskuddene og det oppgis bare en hastighet. Ved NGUs tolking med Hagedoorns pluss-minus-metode og tomografiske inversjon fremstilles hastigheten i intervaller og er mye mer nyansert enn de tradisjonelle tolkingene (se Figurene 6 til 14). Dette er naturlig dersom en tenker på at strukturen i svakhetssoner er slik Braathen og Gabrielsen (2000) fremstilte de. Tradisjonelt er en imidlertid vant med at en svakhetszone har en tolket intern hastighet. Ved NGUs beregning av gjennomsnittlig hastighet i sonene, er det i utgangspunktet valgt å benytte den midlere hastigheten i det hastighetsintervallet som sonene viser i Tabell 4. Alternativt benyttes også minimumshastigheten i intervallet.

Gjennomsnittlig sonehastighet fra IMPAKTs lagdelte tolking er 3720 m/s. Tilsvarende tall for NGUs tolking med Hagedoorns pluss-minus-metode og tomografiske inversjon er henholdsvis 4240 m/s og 4200 m/s. Gjennomsnittlig hastighet i de 17 benyttede sonene blir derved 520 m/s høyere for Hagedoorn-tolkingen og 480 m/s for den tomografiske inversjonen. Dersom en heller velger å benytte minste verdi i angitte hastighetsintervall for de enkelte sonene, blir gjennomsnittshastigheten for Hagedoorns tolking 3970 m/s og for den tomografiske inversjonen 3910 m/s, noe som er betydelig nærmere den tradisjonelle tolkingen. Uansett ser det ut til at NGUs tolkinger viser en noe høyere hastighet i svakhetssonene enn hva den tradisjonelle tolkingen viser. Generelt høyere hastigheter ved NGUs tolkinger har konsekvenser for angivelse av bergmassekvalitet, spesielt for den første beregningsmåten, men også dersom en benytter minstehastigheten i intervallet.

Tabell 5 viser en oversikt over antall soner i de forskjellige bergklassene. Noen «soner» kan ved enkelte tolkingemetoder bli plassert i bergklasse C (middels bergmassekvalitet) siden de på de andre tolkingemetodene karakteriseres med dårligere bergmassekvalitet.

Tabell 4: Sammenligning av tolket P-bølgehastighet (V) i svakhetssoner og tykkelse (t) av de ved forskjellige tolkinger av de samme datasettene. Markerte soner utelates i det videre arbeidet.

Profil - Sone	IMPAKTs Koordinater	IMPAKT Lagdelt V (m/s) / t (m)	NGU Hagedoorn Rayfract V (m/s) / t (m)	NGU Tomo Rayfract V (m/s) / t (m)	Sediment-tykkelse (m)	Kommentar
Vik 1901 - 1	140 - 145	3800 / 5	4500 - 4750 / 20	4750 - 5000 / 20	15	
Vik 1901 - 2	258 - 263	2400 / 5	4500 - 4750 / 20	4250 - 4500 / 20	25	
Vik 1901 - 3	518 - 528	4380 / 65	4250 - 4500 / 10	4250 - 4500 / 15	10	Forskjøvet? Fall?
Vik 1902 - 1	0 - 90	4360 / 90	4250 - 4750 / 65	4000 - 4500 / 80	20 - 25	Starten av profil
Vik 1902 - 2	245 - 265	3390 / 20	4250 - 4500 / 20	3750 - 4250 / 30	30	
Vik 1902 - 3	470 - 510	4300-4700 / 40	4250 - 4500 / 40	4250 - 4500 / 40	40	Slutten av profil
Vik 1903 - 1	0 - 60	? / 60	4000 - 4250 / 65	4000 - 4500 / 65	35 -	Starten av profil
Vik 1903 - 2	60 - 150	4980 / 90	4000 - 4250 / 20	Utenfor bilde	30	Ikke ved lagdelt, utelates
Vik 1904 - 1	155 - 170	3100 / 15	4250 - 4500 / 35	4000 - 4500 / 60	30	
Vik1904 - 2	430 - 465	4500? / 35	>5500	4750 - 5000 / 20		Usikker, utelates
Vik 1904 - 3	460 - 600	4200 / 140	4000 - 4500 / 200	3750 - 4500 / 200	60	Hastighetsinversjon?
P01 - 1	620 - 630	3700 / 10	4500 - 4750 / ?	3500 - 4500 / ?	10	Grunn sone? Utelates
P01 - 2	690 - 715	3300 / 15	4000 - 4500 / 30	4000 - 4500 / 30	10	
P01 - 3	755 - 765	3660 / 10	? / ?	? / ?	10	Grunn sone? Utelates
P01 - 4	870 - 895	3350 / 25	4000 - 4500 / 30	3500 - 4500 / 30	12	
P01 - 5	1060 - 1165	4200 / 105	4000 - 4500 / 100	4000 - 4500 / 60	20 - 50	
P01 - 6	1165 - 1305	3300? / 140	3000 - 4000 / 110	3000 - 4000 / 80	60 - 70	
P01 - 7	1410 - 1560	3900 / 50	4250 - 4500 / 35	3500 - 4500 / 35	60	
P02 - 1	1070 - 1180	3280 / 110	3000 - 4500 / 180	3250 - 4500 / 180	80	
P05 - 1	300 - 465	4340 / 165	4000 - 4500 / 70	4250 - 4500 / 60	75	
P05 - 2	820 - ?	3300 / 80+	3000 - 4500 / 100+	Utenfor bilde	105	Utenfor tomografisk bilde
P05 - 3	1000 - 1050	5347	3750 - 4500 / 40	4000 - 4500 / 40	50	Ikke ved lagdelt, utelates
P05 - 4	1355 - 1420	4950 / 70	4000 - 4500 / 65	4000 - 4500 / 40?	12	Ikke ved lagdelt, utelates
Gjennomsnitt		3724 / 61	4241 / 66	4195 / 63		Markerte soner utelatt
SDEV		595 / 45	314 / 56	296 / 54		Markerte soner utelatt

Tabell 5: Oversikt over antall svakhetssoner i de forskjellige bergklasser ved de forskjellige refraksjonsseismiske tolkingemetoder.

Bergmasseklasse	Hastighet (m/s)	Karakteristikk	IMPAKT Tradisjonell lagdelt	NGU Hagedoorn Middel	NGU Hagedoorn Minimum	NGU Tomo Middel	NGU Tomo Minimum
C	5000 - 4600	Middels bergmassekvalitet	3	1	1	2	2
D	4600 - 4000	Dårlig bergmassekvalitet	7	18	18	12	11
E	4000 - 3000	Svært dårlig bergmassekvalitet	11	3	3	6	7
F	3000 - 2000	Ekstremt dårlig bergmassekvalitet	1	0	0	0	0
G	< 2000	Eksepsjonelt dårlig bergmassekvalitet	0	0	0	0	0
Utelatt			1	1	1	3	3
Sum			23	23	23	23	23

Tabell 6: Oversikt over svakhetssoners totale bredde og prosentandel i forskjellige bergklasser ved de forskjellige refraksjonsseismiske tolkingemetoder.

Bergklasse	Hastighet (m/s)	Karakteristikk	IMPAKT Tradisjonell lagdelt (m) / Andel (%)	NGU Hagedoorn Middel (m) / Andel (%)	NGU Hagedoorn Minimum (m) / Andel (%)	NGU Tomo Middel (m) / Andel (%)	NGU Tomo Minimum (m) / Andel (%)
C	5000 - 4600	Middels bergmassekvalitet	160 / 12,5	20 / 1,5	20 / 1,5	40 / 3,6	40 / 3,6
D	4600 - 4000	Dårlig bergmassekvalitet	640 / 50,0	865 / 68,0	825 / 65,0	710 / 64,3	510 / 46,2
E	4000 - 3000	Svært dårlig bergmassekvalitet	480 / 37,5	390 / 30,5	430 / 33,5	355 / 32,1	555 / 50,2
F	3000 - 2000	Ekstremt dårlig bergmassekvalitet	5 / 0,1	0 / 0	0 / 0	0 / 0	0 / 0
G	< 2000	Eksepsjonelt dårlig bergmassekvalitet	0 / 0	0 / 0	0 / 0	0 / 0	0 / 0
SUM			1280	1275	1275	1105	1105
SUM	D, E og F		1120	1255	1255	1065	1065

IMPAKTs tradisjonelle tolking viser at de aller fleste sonene (11) kan ha svært dårlig bergmassekvalitet mens NGUs tolkinger viser at majoriteten ligger på dårlig bergmassekvalitet. NGUs tomografiske inversjon der en benytter minimumsverdi fra hastighetsintervallet, er metoden som kommer nærmest de tradisjonelle tolkingene.

I tabell 6 er bredde av soner i de forskjellige bergklassene summert. Total lengde av soner med nedsatt bergmassekvalitet (bergklasse D, E og F) er relativt lik for de forskjellige tolkingemetodene, IMPAKT's tradisjonelle, NGUs Hagedoorntolking og NGUs tomografiske inversjon, henholdsvis 1120 m, 1255 og 1065 m. Dette kan virke noe mye, i overkant av 20 % av den totale profillengden på 5650 m som er undersøkt. En må her huske på at profilene er valgt ut nettopp for å studere svakhetssoner og profiler med mange og brede svakhetssoner er overrepresentert.

Innbyrdes fordeling varierer imidlertid noe. IMPAKT's tradisjonelle tolking viser at 160 m (12,5 %) av angitte soner har bergklasse C og betraktes derfor ikke som svakhetssone. Dette er soner som ved NGUs tolkinger kommer ut med dårligere bergmassekvalitet. Ved IMPAKT's tradisjonelle tolking plasseres halvparten (50 %) av sonelengden i bergklasse D, 37,5 % i bergklasse E og en liten sone med bredde 5 m i bergklasse F. Ved NGUs Hagedoorntolkinger kommer en større andel i bergklasse D (65 - 68 %) mens vel 30 % kommer i bergklasse E. En merker seg her at bare 20 m svakhetssone fra IMPAKT's tradisjonelle tolking plasseres i bergklasse C.

NGUs tomografiske inversjon, der midlere hastighet i sonene benyttes, gir et tilsvarende bilde som tolkingene med Hagedoorns metode. Tilnærmet 2/3 av sonelengden plasseres i bergklasse D og nær 1/3 i bergklasse E. Her er det to soner (40 m) som IMPAKT's tolkinger angir som svakhetssone, men som ved den tomografiske inversjonen får hastighet større enn 4600 m/s, bergklasse C.

Dersom en velger å benytte minimumshastigheten i sonens hastighetsintervall ved NGUs tomografiske inversjon, endres bildet markert. Ca. 46 % av sonelengden plasseres i bergklasse D mens ca. 50 % plasseres i bergklasse E. Denne metoden gir derved samlet en dårligere bergmassekvalitet enn både NGUs Hagedoorntolkinger og IMPAKT's tradisjonelle tolkinger.

5. KVALITET PÅ TOLKING AV DYP TIL BERG

På land ved Vik på sørsida av Romsdalsfjorden er sikkert dyp til berg fra Vegvesenets egne 17 boringer sammenlignet med forskjellige tolkinger av IMPAKT's fire refraksjonsseismiske profiler. Avstanden fra boring til nærmeste refraksjonsseismiske tolking av dyp til berg var mindre enn 4 m (se Tabell 7). IMPAKT Geofysik AB har utført to tradisjonelle lagdelte tolkinger med Hagedoorns metode og en kombinert tolking med et program fra Geogiga (2019). Den kombinerte tolkingen på land ved Vik bygger på lagdelt tolking, den tomografiske inversjonen og resultater fra boringer. NGU har utført tolkinger av de samme profilene med programmet Rayfract (Intelligent Resources 2019). I dette området har også GeoPhysics målt refraksjonsseismikk langs fire andre profiler, og tolkingen av disse sammenlignes også med resultater fra boring.

Langs profil P05 i Romsdalsfjorden nord for Tautra er IMPAKT's og NGUs automatiske tolkinger av dyp til berg sammenlignet med relativt sikre dybder fra

boringer fra skip utført av FUGRO (FUGRO 2019). I sjøen, nord og sør for Tautra, er det også utført refleksjonsseismiske undersøkelser (FUGRO 2018 a og b, IMPAKT 2020) og ved disse er tolket dyp til berg ved forskjellige hastighetsprofiler sammenstilt med tilsvarende dyp fra boringer.

I Tabellene 7 til 12 er resultatene fra de refraksjonsseismiske tolkingene sammenholdt med antatt sikkert dyp til berg fra boringene. Dyp til berg fra boring ved Vik varierer fra 10,5 m til 55,6 m og i sjøen nord for Tautra varierer dyp til berg fra ca. 90 m til i overkant av 100 m. Dette er en spredning som gir et godt grunnlag for å se hvor gode tolkingene de forskjellige tolkingemetodene gir. Avvikene er fargekodet slik at avvik fra sikker angivelse av dyp til berg fra boring mindre enn 2 % er skarpt grønn, mens avvik fra 2% til 10 % markeres med lysere grønnfarge. Dette er intervallet som tilsvarer tradisjonell angivelse av usikkerhet ved refraksjonsseismiske undersøkelser. Avvik fra 10 % til 20 % er markert med gult mens avvik større enn 20 % er farget rød.

5.1 Kvalitet på IMPAKTs tradisjonelle lagdelte og kombinerte tolkinger

Den første tradisjonelle tolkingen til IMPAKT på land ved Vik (IMPAKT Lagdelt 1, Tabell 7) viste delvis store avvik i dyp til berg, og det ble derfor utført en justering av denne hvor en mindre feil i tolkingen ble rettet opp (IMPAKT Lagdelt 2). Data er sammenstilt av Arne Kavli (Statens vegvesen).

Tabell 7: Dyp til berg fra relativt sikre boringer, fra IMPAKTs tradisjonelle lagdelte tolkinger og fra IMPAKTs kombinerte tolking.

Profil	Borehull	Avstand til boring (m)	Boring Dyp til berg (m)	IMPAKT Lagdelt 1 Dyp til berg (m)	IMPAKT Lagdelt 1 /Boring Avvik %	IMPAKT Lagdelt 2 Dyp til berg (m)	IMPAKT Lagdelt 2 /Boring Avvik %	IMPAKT Kombi Dyp til berg (m)	IMPAKT Kombi / Boring Avvik %
Vik19-01	415	1,69	15,9	22,6	142	21,9	138	14,36	90,3
Vik19-01	411	0,13	15,4	28,1	183	20,8	135	15,36	100,1
Vik19-01	410	1,47	20,0	31,3	157	22,7	114	16,76	84,0
Vik19-01	409	2,74	24,8	32,4	131	26,0	105	22,47	90,7
Vik19-01	363	2,53	22,3	25,3	113	24,9	112	25,96	116,3
Vik19-01	406	3,75	26,0	36,6	141	35,8	138	25,51	98,0
Vik19-01	405	2,41	33,2	43,1	130	36,0	108	28,00	84,3
Vik19-01	403	0,71	45,3	55,1	122	49,6	109	41,18	90,9
Vik19-01	402	0,28	48,8	56,1	115	47,5	97	45,34	93,0
Vik19-01	70	3,37	30,6	32,2	105	32,3	105	28,49	93,2
Vik19-02	414	0,41	19,8	25,8	130	25,6	129	21,44	108,3
Vik19-02	413	1,87	20,0	25,9	129	25,6	128	19,59	97,9
Vik19-02	412	0,85	25,9	30,7	119	30,7	119	27,81	107,4
Vik19-02	404	0,66	43,7	41,3	94	41,3	95	37,18	85,0
Vik19-04	408	1,06	20,4	23,7	116	23,7	116	26,72	131,3
Vik19-04	407	0,86	20,9	29,5	141	29,3	140	20,97	100,3
Vik19-04	401	2,47	55,6	62,1	112	51,5	93	44,78	80,6
MIDDEL		1,60			128		116		97,1
SDEV		0,6			21		32		13

Ved IMPAKT's kombinerte tolking (IMPAKT kombi) benyttes konturen $V = 3000$ m/s som indikator på dyp til berg i det tomografiske hastighetsprofilen justert noe ut fra den lagdelte tolkingen og resultater fra boringene.

IMPAKT's første lagdelte tolking viser jevnt over mye større dyp til berg enn det boringene sier (Tabell 7). Ti punkter viser avvik større enn 20 % og det største avviket er på +83 %. Fem punkter har avvik mellom 10 og 20 % mens bare to punkt ligger innenfor den tradisjonelle usikkerhetsnormen på ± 10 % av dyp til berg. I gjennomsnitt er tolket dyp til berg 28 % høyere enn tilsvarende fra sikre boringer. Det store avviket skyldtes at en detalj i datagrunnlaget som ble oversett. Da dette ble oppdaget ble den lagdelte tolkingen justert. Et systematisk for stort dyp til berg skyldes at alle boringer ble utført der de første seismiske tolkingene viste store dyp og hvor det var mest kritisk for tunnelbyggingen, og det var her utslaget av feiltolkingen ble størst. Disse data er derfor ikke representative for en vurdering av den generelle tolkingen av dyp til berg, men kan være en illustrasjon på hvor store feil en mindre feiltolking kan gi.

IMPAKT's andre lagdelte tolking viser et betydelig forbedret resultat, men også her er avviket i dyp til berg større enn den tradisjonelle normen med ± 10 %. Ved seks boringer er tolket dypet til berg mer enn 20 % høyere enn ved boring, markert med rødt i tabell 7. Ved fire borepunkt ligger tolket dyp til berg 10 til 20 % høyere enn ved boringen, markert med gult. Ved 7 av 17 borepunkt er avviket mindre enn ± 10 % markert med grønt. I gjennomsnitt ligger tolket dyp til berg 16 % høyere enn det de sikre boringene viste.

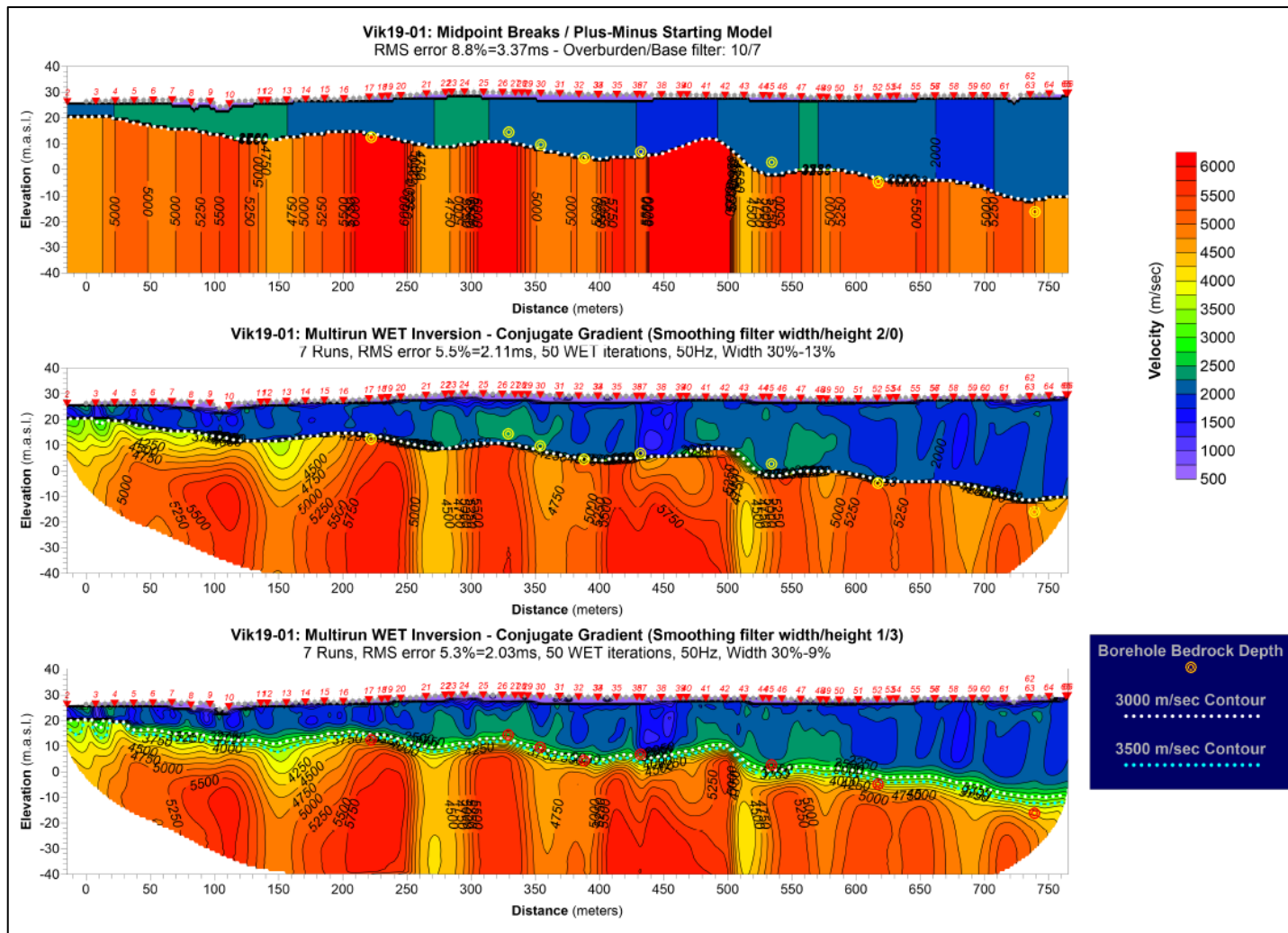
IMPAKT's kombinerte tolking, som i stor grad legger vekt på den tomografiske inversjonen og boringene, viser jevnt over et godt samsvar med de virkelige dyp til berg fra boringer. Fire punkter har et avvik som er mindre enn eller lik 2 %. I tillegg har sju punkter et avvik mindre enn 10 %. Ved fem punkter er avviket mellom 10 og 20 %. Ved ett punkt er avviket 31,3 %, noe som er uakseptabelt høyt, men som trolig skyldes spesielt vanskelige geologiske forhold. I gjennomsnitt er avviket mindre enn 3 %, men standardavviket er kanskje litt høyt (13 %).

IMPAKT's kombinerte tolking viser en god presisjon og resultatet fra tomografien er betydelig bedre enn det de tradisjonelle lagdelte tolkingene viser. Det må imidlertid påpekes at ved denne tolkingen var resultatene fra boringene kjent og benyttet.

5.2 Kvalitet på NGUs tolkinger med Hagedoorns metode på land ved Vik

Fire deler av de profilene IMPAKT målte ved Vik, er re-tolket av NGU med programmet Rayfract. Ved første tolking hadde NGU ikke kunnskap om dyp til berg fra boring. Ved profil Vik19-01 stemte dyp til berg relativt bra. Tolkingen her ble benyttet til å studere effekten av glatting av hastighetsprofilen. Den første tolkingen av profil Vik19-03 (versjon 1) viste tvilsomme hastigheter i berg. Av denne grunn, ble de tre profilene Vik19-02, -03 og -04 re-tolket (versjon 2) og da ble resultatet fra relativt sikker tolking av dyp til berg fra boring benyttet for å se hvor gode tolkinger det er mulig å oppnå.

Når ikke annet er sagt, tolkes dyp til berg som dyp til 3000 m/s-konturen både i Hagedoorns tolking og ved den tomografiske inversjonen. Dette er samme hastighets-kontur som IMPAKT benyttet ved sin tolking av dyp til berg.



Figur 16: NGUs tolkinger av dyp til berg langs profil Vik19-01 sammenholdt med resultater av dyp til berg fra borerer (gule/røde prikker). Øverst NGUs tolking med Hagedoorns pluss-minus-metode, deretter tomografisk inversjon med «antatt beste prosedyre» og med to varianter av glatting, «Width/height» 2/0 i midten og 1/3 nederst.

5.2.1 Tolking av dyp til berg ved profil Vik19-01.

Figur 16 viser tre tolkingsvarianter av profil Vik19-01 hvor dyp til berg fra boring er plottet inn. Det øverste bildet viser NGUs tolking med Hagedoorns metode som startmodell for den tomografiske inversjonen, men som også kan være en selvstendig tolking tilsvarende IMPAKTs lagdelte tolking. De to nederste bildene er tomografisk inversjon med antatt beste prosedyre («Multirun Conjugate Gradient») men med to forskjellige varianter av glatting (Width/Height-filter lik 2/0 og 1/3).

Rent visuelt er det et godt samsvar mellom dyp til berg fra boring og tolket dyp til berg fra NGUs tolking (Figur 16). Noen dyp til berg fra boringer ligger på tolket dyp fra refraksjonsseismikken, noen ligger like over mens andre ligger noe dypere. En av boringene med stort avvik er plassert ved ett punkt på seismikklinjen der bergoverflaten er uregelmessig (boring 363 ved posisjon 540). Avviket er kvantifisert i Tabell 8.

Tabell 8: Dyp til berg fra boring langs profil Vik19-01 sammenlignet med NGUs tolking av dyp til berg med Hagedoorns pluss-minus-metode og forskjellig tomografisk inversjon med antatt beste prosedyre (Multirun, Conjugate Gradient). 2/0 og 1/3 angir forskjellig glatting (se tekst). Dyp til berg er angitt som dyp til 3000 m/s unntatt i siste eksempel der V= 3500 m/s angir dypet.

Borehull	Boring, dyp til berg (m)	Hagedoorn +/- (m)	Avvik Hagedoorn +/- %	Tomo CG 2/0 (m)	Tomo CG 2/0 Avvik %	Tomo CG 1/3 (m)	Tomo CG 1/3 Avvik %	Tomo CG 1/3 3500 (m)	Tomo CG1/3 3500 Avvik %
415	15,9	14,4	91	14,5	91	13,7	86	14,7	92
411	15,4	18,9	123	19,1	124	16,7	109	18,1	118
410	20,0	21,8	109	21,8	109	20,4	102	22,0	110
409	24,8	24,4	98	24,4	98	23,1	93	24,4	98
363	22,3	24,2	109	24,3	109	24,2	109	25,5	114
406	26,0	30,8	118	30,7	118	28,0	108	29,8	115
405	33,2	31,5	95	31,6	95	29,7	90	31,6	95
403	45,3	40,3	89	40,6	90	38,8	86	41,3	91
Snitt			103,9		104,3		97,9		104,1
SDEV			12,4		12,7		10,2		11,2

Dyp til berg ved **Hagedoorns metode** (Tabell 8), viser tre punkter hvor dypet avviker mer enn +/- 10 %, det som har vært ansett som et standard usikkerhetsnivå. Disse er boringene 411, 406 og 403 der avviket er henholdsvis +23 %, +18 % og -11 %.

Dyp til berg tolket ved **tomografisk inversjon** (hastighetskontur 3000 m/s) med glatting 2/0 (Width/Height) viser to boringer hvor dypet avviker mer enn +/- 10 %. Disse er boringene 411 og 406 der avviket er henholdsvis +24 % og +18 %, noe som er tilnærmet det samme som ved Hagedoorns metode. Ved boring 403 er avviket i dyp til berg marginalt forbedret fra -11 % til -10 %.

Dyp til berg tolket ved **tomografisk inversjon** (hastighetskontur 3000 m/s) med glatting 1/3 (Width/Height) viser to punkter hvor tolket dyp avviker mer enn +/- 10 %. Disse er boringene 415 og 403 der avviket for begge er -14 %. Ved seks av åtte boringer er avviket mindre enn +/- 10 %.

Dyp til berg tolket som dyp til hastighetskonturen 3500 m/s ved **tomografisk inversjon** med glatting 1/3 (Width/Height), viser tre boringer hvor tolket dyp avviker

mer enn +/- 10 %. Disse er boringene 411, 363 og 406 der avviket er henholdsvis +18 %, +14% og +15%. Ved fem av åtte borer er avviket mindre enn +/- 10 %.

Gjennomsnittlig avvik for de fire tolkingsmetodene ligger innenfor +/- 4,3 %, noe som må sies å være veldig bra. Standardavviket er noe høyt. Analysen viser også at det er relativt godt samsvar mellom metodene, avvik som er lavere enn 100 % går igjen for alle metoder og tilsvarende hvor avviket er større enn 100 %. Dette kan nok skyldes at den tomografiske inversjonen ofte «arver» og holder på tolkingen i startmodellen, og at den tomografiske inversjonen bare gjør mindre endringer på startmodellen.

Tolket dyp til 3000 m/s ved tomografisk inversjon og glatting 1/3 viser beste tilpasning med gjennomsnittlig avvik lik -2,1 %, og her er standardavviket også minst (10,2 %). Ved samme tolking og glatting, men ved dyp for $V=3500$ m/s er gjennomsnittlig avvik på +4,1 %. Det er nærliggende å tro at en tolking av dyp til f.eks. 3200 m/s-konturen har gitt enda bedre tilpasning til dyp til berg fra boring.

5.2.2 Tolking av dyp til berg ved profil Vik19-02 og Vik19-04, versjon 1.

Ved NGUs tolkinger av data fra IMPAKT med programmet Rayfract, ble det først gjort en mindre feil ved generering av startmodell (feil parametre ved beregning av «midpoint breaks»). Dette resulterte i et for stort dyp til berg slik det går frem av Tabell 9A.

Ved tre borepunkter er tolket dyp til berg med Hagedoorns metode større enn 30 %, ved to punkter ligger avviket på +/- 17 – 18 %, og bare to punkter ligger innenfor den tradisjonelle usikkerhetsmarginen på +/- 10 %. Ett av punktene (boring 401) er det 100 % treff på dyp fra boring. Ved Hagedoorns metode ligger tolket dyp til berg jevnt over 18 % høyere enn dypene fra de sikre boringene, og standardavviket er høyt (23 %). Dette er noe bedre enn for IMPAKTS lagdelte tolkinger som benytter samme metode manuelt, men likevel uakseptabelt høyt.

Den første tomografiske inversjonen (Tomo 1a, Tabell 9A) er foretatt med startmodell beregnet med Hagedoorns metode, det er utført «multirun Conjugate Gradient» inversjon. Profil Vik19-02 er glattet med «Width/Height-filter» 2/0, mens profil Vik19-04 er glattet med filter 3/1. Den tomografiske inversjonen endrer ikke særlig mye på tolkingen med Hagedoorns metode (start-modellen). Fordelingen av fargekode for avvik er den samme, og gjennomsnittlig avvik er pluss 17 % og standard-avviket er noe høyere. Igjen er det slik at inversjonen arver data fra startmodellen, og at det bare gjøres mindre endringer.

Den andre tomografiske inversjonen (Tomo 1b, Tabell 9A) er foretatt med startmodell beregnet med Hagedoorns metode, det er utført «multirun Conjugate Gradient» inversjon. Profil Vik19-02 er glattet med «Width/Height-filter» 1/4, mens profil Vik19-04 er glattet med filter 1/2. Dette er en noe større vertikal glatting. Dyp til berg er tolket som dyp til kontur med hastighet 3000 m/s. Denne inversjonen viser et betydelig bedre resultat. Bare ett punkt har et avvik på + 26 %, ved to punkter er avviket +/- 16 – 17 %. Ved fire punkter ligger tolket dyp innenfor den tradisjonelle

Tabell 9: Dyp til berg fra boring og tolkinger langs profil Vik19-02 og Vik19-04. Ved tolking versjon 1 (A), ble det gjort en feil som ble rettet opp ved versjon 2 (B). Dyp til berg er tolket med Hagedoorns pluss-minus-metode og forskjellig tomografisk inversjon med antatt beste prosedyre (Multirun Conjugate Gradient). Ved versjon Tomo 1a og 2a er glatting Width/Height varierende men moderat, mens i versjon Tomo 1b og 2b er glattingen noe sterkere (se tekst). Dyp til berg er angitt som dyp til 3000 m/s i hastighetsprofilen.

A. Linje	Borehull	Avstand til boring (m)	Dyp til berg fra boring (m)	Dyp til berg Hagedoorn 1 (m)	Hagedoorn 1 / boring (%)	Dyp til berg Tomo 1a (m)	Tomo 1a/ Boring (%)	Dyp til berg Tomo 1b (m)	Tomo 1b / Boring (%)
Vik19-02	414	0,41	19,8	26,7	134	27,3	137	20,8	105
Vik19-02	413	1,87	20	23,4	117	23,4	117	20	100
Vik19-02	412	0,85	25,9	27,1	105	27,5	106	26,4	102
Vik19-02	404	0,66	43,7	35,8	82	35,8	82	36,2	83
Vik19-04	408	1,06	20,4	29,5	144	29,2	143	25,7	126
Vik19-04	407	0,86	20,9	29,5	141	29,5	141	24,2	116
Vik19-04	401	2,47	55,6	55,6	100	53,1	95	50,8	91
Snitt					118		117		104
SDEV					23,3		24,1		13

B. Linje	Borehull	Avstand til boring (m)	Dyp til berg fra boring (m)	Dyp til berg Hagedoorn 2 (m)	Hagedoorn 2 / boring (%)	Dyp til berg Tomo 2a (m)	Tomo 2a/ Boring (%)	Dyp til berg Tomo 2b (m)	Tomo 2b / Boring (%)
Vik19-02	414	0,41	19,8	19,7	99	19,4	98	18,5	93
Vik19-02	413	1,87	20	19	95	19	95	18,8	94
Vik19-02	412	0,85	25,9	24,1	93	24,1	93	24,9	96
Vik19-02	404	0,66	43,7	44,6	102	43,8	100	37,2	85
Vik19-04	408	1,06	20,4	21,1	103	21,3	104	22,4	110
Vik19-04	407	0,86	20,9	23,6	113	23,6	113	22,4	107
Vik19-04	401	2,47	55,6	52,4	94	51,6	93	49,1	88
Snitt		1,2			100		99		96
SDEV		0,7			7,0		7,2		9,3

feilmarginen på +/- 10 % hvorav to har et avvik på mindre enn eller lik 2%. Gjennomsnittlig avvik er på + 3,3 %, men standardavviket er for høyt (14,5 %). Dette eksemplet viser at om en kommer ut noe skjevt i startmodellen, kan den tomografiske inversjonen rette noe på dette, men da må en tillate noe større glatting av det tomografisk inverterte hastighetsprofil.

5.2.3 Tolking av dyp til berg ved profil Vik19-02 og Vik19-04, versjon 2.

Ved NGUs andre tolking av data fra IMPAKT med programmet Rayfract, ble feilen ved beregning av «midpoint breaks» rettet opp, og her ble resultatene fra boringen benyttet til å finne den rette inversjonsprosedyren. Dette resulterte i et betydelig bedre resultat i tolket dyp til berg slik det går frem av Tabell 9B.

Ved **Hagedoorns tolking** vist i Tabell 9B, er det bare ett punkt som ligger utenfor den tradisjonelle usikkerhetsmarginen på +/- 10 % (Boring 407, + 13 %). Alle de andre punktene ligger innenfor +/- 10 % og to av sju punkter har et avvik fra dyp ved boring mindre enn eller lik 2 %. Selv for boring 401, hvor dyp til berg er 55,6 m, er avviket relativt lavt (3,2 m eller - 6 %). I gjennomsnitt er tolket dyp til berg 100 % (99,9 %) av sant dyp ved boring, og standardavviket er på 7 %. Dette må da sies å være et meget godt resultat som viser at det er mulig med Hagedoorns metode å oppnå gode tolkinger av dyp til berg dersom rett prosedyre benyttes.

Den **første tomografiske inversjonen** (Tomo 2a, Tabell 9B) er foretatt med startmodell beregnet med Hagedoorns metode, og det er utført «Multirun Conjugate Gradient» inversjon. Her benyttes hastighetskonturen 3000 m/s som indikator på bergoverflaten. Profil Vik19-02 er glattet med «Width/Height-filter» 2/0 (ingen vertikal glatting), mens ved profil Vik19-04 er filteret 3/1 (meget moderat vertikal glatting). Det tomografiske bildet viser minimale endringer i forhold til startmodellen fra Hagedoorns metode. Individuelle endringer er mindre enn eller lik 2 %. Gjennomsnittsverdi er 99 % (99,4%) og standardavviket 7,2 %. Dette viser at dersom inversjonen gjøres på riktig måte, kan en komme fram til gode pålitelige tolkinger av dyp til berg, også ved tomografisk inversjon.

Den **andre tomografiske inversjonen** (Tomo 2b, Tabell 9B) er også foretatt med startmodell beregnet med Hagedoorns metode, og det er utført «Multirun Conjugate Gradient» inversjon. Også her benyttes hastighetskonturen 3000 m/s som indikator på bergoverflaten. Profil Vik19-02 er glattet med «Width/Height-filter» 1/4, en noe større vertikal glatting, mens ved profil Vik19-04 er filteret 1/2 (meget moderat vertikal glatting). Generelt kan en si at tolket dyp til berg blir inntil 5-6 % lavere enn ved inversjonen kalt Tomo 2a. Største endring er ved boring 404 som går fra tilnærmet full treff til - 15 %, en endring på 5,4 m. Ved boring 408 øker tolket dyp til berg fra 21,3 m til 22,4 m (fra +4 % til +10%). I gjennomsnitt er tolket dyp til berg 96 % av boret dyp, og standardavviket (9,3 %) er noe større enn ved både inversjon versjon 2a og Hagedoorns metode. I motsetning til den første inversjonen, hvor resultatet ble forbedret ved større glatting, gir økt glatting ved versjon 2 et noe dårligere resultat. Dette skyldes at ved begge tolkingene avtar dyp til berg med økende glatting, og ved versjon 2 er utgangspunktet meget bra (ca. 100 % i gjennomsnitt).

Tabell 10 viser de beste av NGUs tolkinger av dyp til berg langs alle profilene ved Vik. For profil Vik19-03 er avstand til nærmeste boring 16,5 m og denne boringen er derfor utelatt. All tomografisk inversjon er også foretatt med startmodell beregnet med Hagedoorns metode, og det er utført «Multirun Conjugate Gradient» inversjon. Profilene Vik19-01 og Vik19-02 er glattet med «Width/Height-filter» 2/0, mens ved profil Vik19-04 er filteret 3/1 (ingen og meget moderat vertikal glatting). Ved alle tolkinger er hastighetskonturen 3000 m/s benyttet som indikator for dyp til berg.

Tabell 10: Dyp til berg fra alle boringer, tolkinger med Hagedoorns metode og beste tomografiske inversjoner langs profilene Vik19-01, Vik19-02 og Vik19-04. Tomografisk inversjon langs profil Vik19-01 er glattet med «Width/Height filter» 1/3, Vik19-02 er glattet med filter 2/0, mens tilsvarende for profil Vik19-04 er 3/1. Dyp til berg er angitt som dyp til hastighetskontur 3000 m/s.

Linje	Borehull	Avstand til boring (m)	Dyp til berg, boring (m)	Dyp til berg Hagedoorn (m)	Hagedoorn / Boring (%)	Dyp til berg, beste Tomo (m)	Beste Tomo / Boring (%)
Vik19-01	415	1,69	15,9	14,4	91	13,7	86
Vik19-01	411	0,13	15,4	18,9	123	16,7	108
Vik19-01	410	1,47	20	21,8	109	20,4	102
Vik19-01	409	2,74	24,8	24,4	98	23,1	93
Vik19-01	363	2,53	22,3	24,2	109	24,2	109
Vik19-01	406	3,75	26	30,8	118	28	108
Vik19-01	405	2,41	33,2	31,5	95	29,7	89
Vik19-01	403	0,71	45,3	40,3	89	38,8	86
Vik19-02	414	0,41	19,8	19,7	99	19,4	98
Vik19-02	413	1,87	20,0	19,0	95	19,0	95
Vik19-02	412	0,85	25,9	24,1	93	24,1	93
Vik19-02	404	0,66	43,7	44,6	102	43,8	100
Vik19-04	408	1,06	20,4	21,1	103	21,3	104
Vik19-04	407	0,86	20,9	23,6	113	23,6	113
Vik19-04	401	2,47	55,6	52,4	94	51,6	93
SNITT		1,6			102		98
SDEV		1,0			10,3		8,6

Tolkinger av dyp til berg både ved Hagedoorns metode og den valgte tomografiske inversjon (minimal glatting), viser et gjennomsnittlig dyp som er 2 % høyere enn relativt sikkert dyp fra boring. Hagedoorns metode viser ett punkt hvor tolking av dyp til berg er over 20 % høyere enn dypet fra boring. Antall boringer med avvik som ligger mellom 10 % og 20 % høyere er henholdsvis tre og fire. Majoriteten av tolkingene ligger innenfor et avvik på +/- 10 %, og av disse har 3 tolkinger et avvik som er 2 % eller mindre både for Hagedoorns metode og den tomografiske inversjonen.

Dersom en heller hadde benyttet «Width/Height Filter» 1/3 ved tomografisk tolking av profil Vik 10-01, ville gjennomsnittsverdi for avviket blitt 99 % med et standardavvik på 8,7 %. Det betyr i praksis at 67 % av alle tolkinger ville falt innenfor +/- 10 % av sant dyp fra boringer.

Konklusjon:

Det kan her konkluderes med at Hagedoorns metode med programmet Rayfract, som egentlig er ment som en startmodell for den tomografiske inversjonen, kan gi meget gode tolkinger av dyp til berg. Dette avhenger imidlertid av om det velges riktig prosedyre under den semi-automatiske genereringen av startmodell. Tomografisk inversjon med startmodell tolket med Hagedoorns metode, riktig inversjonsprosedyre og med moderat glatting kan vise et tilsvarende godt bilde. Sterkere vertikal glatting gir et lavere tolket dyp til berg, og med et godt resultat ved Hagedoorns metode kan resultatet bli dårligere.

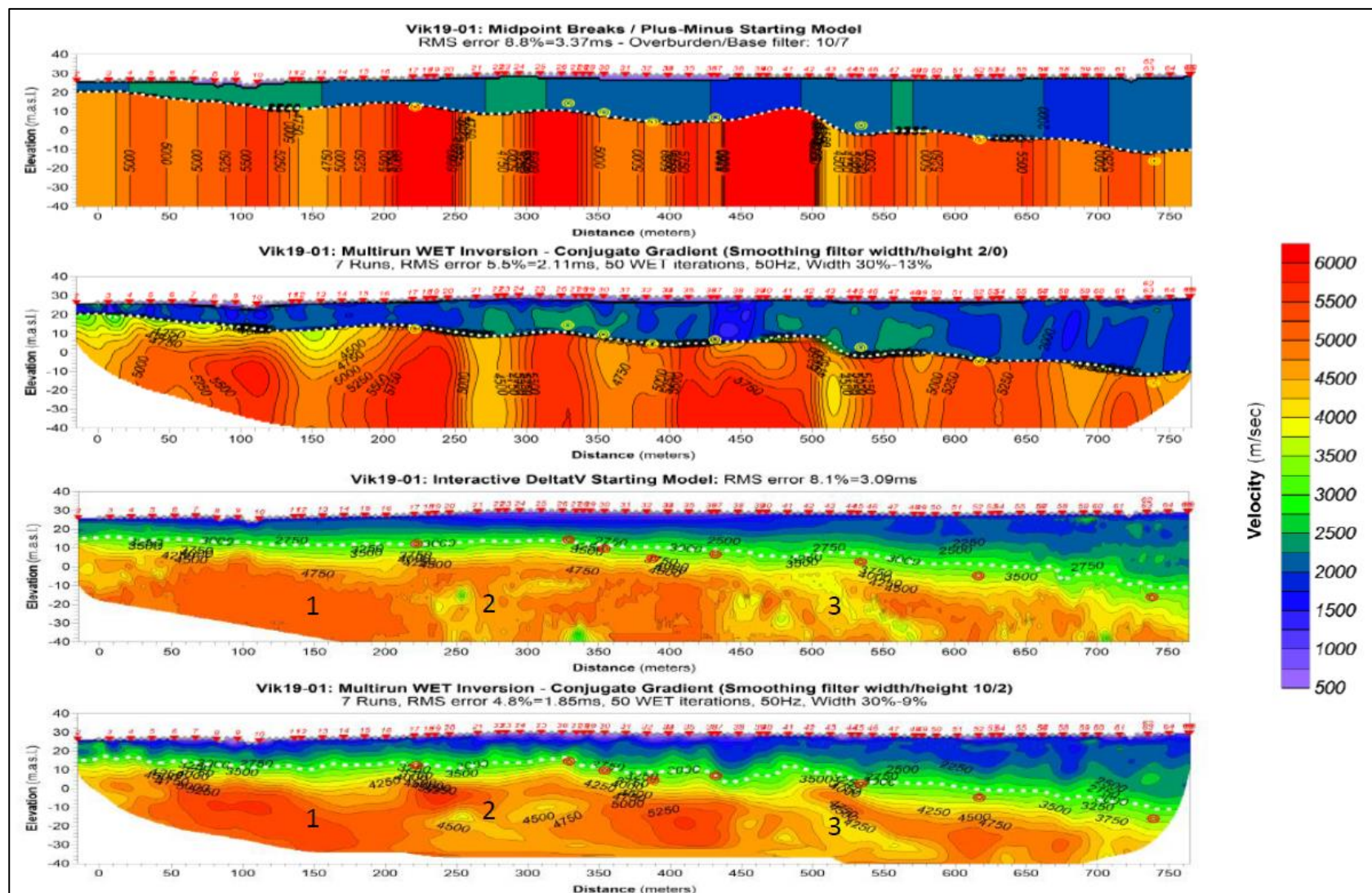
5.3 Kvalitet på NGUs tolkinger med DeltatV-metoden på land ved Vik.

NGU har også tolket Profilene Vik19-01, -02 og -04 med programmet Rayfract der startmodellen ble beregnet med DeltatV-metoden. Startmodell, tomografisk inversjon med antatt beste prosedyre (Multirun Conjugate Gradient) og stråletetthet langs alle de tre profilene er vist i Vedlegg 3. Denne metoden er helautomatisk, og det legges derfor ingen føringer på inversjonsprosessen. Metoden er spesielt gunstig for lange profiler (> 500 m), kort skudd- og geofonavstand og der det er gradvise overganger i hastigheten mot dypet.

I Figur 17 er NGUs tolkinger der en benytter startmodell beregnet med Hagedoorns metode og DeltatV-metoden langs profil Vik19-01 sammenstilt. Tolkingene med Hagedoorns metode ble diskutert i Kapittel 5.1.

Tolkingene med DeltatV startmodell og den tomografiske inversjonen der denne benyttes viser en gradvis overgang fra klare løsmassehastigheter (< 2500 m/s) til klare berghastigheter (>3500 m/s). Det oppstår da et spørsmål om hvor dyp til berg skal tolkes. NGU har valgt å benytte hastighetskonturen 3000 m/s som indikator på dyp til berg også ved denne metoden. Dette betyr at sikkert dyp til berg ved noen boringer blir liggende tilnærmet på tolket dyp til berg mens noen boringer angir et noe større dyp.

Tolket dyp til berg med DeltatV-metoden er sammenstilt med dyp til berg fra boringene i Tabell 11.



Figur 17: Startmodell og tomografisk inversjon av profil Vik19-01 med Hagedoorns metode (øverst) og startmodell og tomografisk inversjon med DeltatV-metoden (nederst). Stiplet hvit linje angir tolket dyp til berg ($V=3000$ m/s) mens ovale gule og røde punkter angir dyp til berg fra borerer.

Tabell 11: Dyp til berg fra alle borerer langs profilene Vik19-01, Vik19-02 og Vik19-04 og tolket dyp til berg med DeltatV-metode (startmodell) og tomografisk inversjon med denne som startmodell og antatt beste prosedyre (Multirun Conjugate Gradient). Tomografisk inversjon langs profil Vik19-01 er glattet med «Width/Height filter 10/2», mens tilsvarende for profil Vik19-02 og -04 er 5/1. Dyp til berg er angitt som dyp til hastighetskonturen 3000 m/s.

Linje	Borehull	Avstand til boring (m)	Boring Dyp til berg (m)	DeltatV Startmodell (m)	DeltatV Startmodell / Boring (%)	DeltatV Tomo (m)	DeltatV Tomo / Boring (%)
Vik19-01	415	1,69	15,9	15,6	98	15,3	96
Vik19-01	411	0,13	15,4	16,4	106	13,1	85
Vik19-01	410	1,47	20,0	17,6	88	18,3	92
Vik19-01	409	2,74	24,8	18,4	74	20,3	82
Vik19-01	363	2,53	22,3	19,9	89	22,8	102
Vik19-01	406	3,75	26,0	21,3	82	25,0	96
Vik19-01	405	2,41	33,2	26,7	80	29,0	87
Vik19-01	403	0,71	45,3	39,7	88	39,7	88
Vik19-02	414	0,41	19,8	15,9	80	20,9	105
Vik19-02	413	1,87	20,0	20,2	101	19,0	95
Vik19-02	412	0,85	25,9	26,1	107	28,2	108
Vik19-02	404	0,66	43,7	34,1	78	35,9	82
Vik19-04	408	1,06	20,4	19,5	96	22,3	109
Vik19-04	407	0,86	20,9	19,4	93	19,9	95
Vik19-04	401	2,47	55,6	38,8	70	42,3	76
Snitt		1,6			89		93
SDEV		1,0			11		10

Tolket dyp til berg ved **startmodell beregnet med DeltatV**-metoden viser tre punkter hvor dyp fra boring er betydelig større (avvik fra 22 til 30 %, boringene 409, 404 og 401). Ved seks borerer er tolket dyp til berg mellom 10 % og 20 % lavere enn ved boringene. Ved seks andre borerer er avviket mindre enn +/- 10 % hvorav to er mindre enn +/- 2%.

Ved de **tomografiske inversjonene** er det bare ett punkt med avvik større enn 20 % (boring 401) og ved fem borerer er tolket dyp fra 10 til 20 % lavere enn dypet fra boring. Ved ni borerer av i alt 15 er tolket dyp til berg innenfor +/-10 % som er ansett som et standard usikkerhetsnivå. I gjennomsnitt er tolket dyp til berg for DeltatV startmodell 89 % av dypet fra boring og standardavviket er på 11 %. Ved den tomografiske inversjonen med startmodell beregnet med DeltatV-metoden er tolket dyp til berg i gjennomsnitt 93 % av dypet fra boring og standardavviket er på 10 %. Dette er klart bedre enn begge IMPAKTs lagdelte tolkinger, men dårligere enn IMPAKTs kombinerte tolking (97 % +/- 13 % av dyp fra boring).

Sammenligning med NGUs Hagedoorn-tolkinger er noe mer komplisert siden kjent dyp til berg ble benyttet ved tolkinger av profilene Vik19-02 og -03. Dersom en bare ser på Profil Vik19-01, som NGU tolket uten kjennskap til dyp fra borerene, er tolket dyp til berg med DeltatV-metoden (8 borerer) i gjennomsnitt på 88 % av dypet fra borerer for startmodellen og 91 % for den tomografiske inversjonen. Standardavviket er på 10 % for begge tolkingene. Dette er også et dårligere resultat enn NGUs tolkinger med Hagedoorns metode (Tabell 8) hvor alle tolkinger i gjennomsnitt lå innenfor +/- 4 % av dyp fra borerene. Siden de aller fleste tolkede dyp til berg er mindre enn fra borerene, kunne en høyere hastighetskontur (3200

m/s?) vært benyttet som indikator for berg. Modelleringer (Rønning et al. 2020) indikerer at hastighetskonturen 3250 m/s kan være et godt valg.

5.4 Kvalitet på GeoPhysix sine tradisjonelle tolkinger på land ved Vik

Det norske firmaet GeoPhysix utførte refraksjonsseismiske målinger på land ved Vik i 2014 (GeoPhysix 2015). Målingene ble utført med 24 geofoner, 5 m geofonavstand og med dynamitt som energikilde. Totalt ble det målt fire profiler med en samlet lengde på 2315 m. Måledata ble manuelt tolket med Hagedoorns pluss-minus-metode.

I ettertid er det også her foretatt boringer. Tekniske data for disse er vist i vedlegg 1. Det er i alt utført 17 totalsonderinger hvor avstand til refraksjonsseismiske tolkinger er mindre enn ca. 3 m i det aktuelle området. I Tabell 12 er dyp til berg fra boring sammenstilt med tolket dyp fra nærmeste seismikktolking. GeoPhysix oppgir selv en usikkerhet i tolking på +/- 15 %, men at en kan ha avvik fra dette som skyldes komplisert geologi, siderefraksjoner, hastighetsinversjon og blindsonelag.

Tabell 12: Dyp til berg fra boringer og seismikk langs profilene Vik1014-01, Vik14-02, Vik 14-03 og Vik14-04. Data samlet inn og tolket manuelt med Hagedoorns metode av GeoPhysix (2015).

Borehull	Avstand til boring (m)	Dyp til berg fra boring (m)	Dyp til berg fra tolking (m)	Tolket dyp til berg / boring (%)
9	< 3	17,1	16,3	95,2
10	< 3	22,3	19,6	87,8
8	< 3	25,2	18,5	73,6
5	< 3	20,9	18,9	90,6
306	< 3	18,4	16,3	88,4
305	< 3	17,7	17,7	99,8
304	< 3	17,8	14,8	83,0
303	< 3	13,6	14,9	109,3
302	< 3	14,5	14,2	98,1
301	< 3	13,8	14,2	102,7
2	< 3	13,6	13,9	102,0
300	< 3	15,1	13,9	92,4
311	< 3	12,5	11,6	92,8
345	< 3	10,5	9,0	86,1
434A	< 3	14,2	15,6	109,9
415	< 3	17,7	16,4	92,9
414	< 3	22,9	18,7	81,7
SNITT				93,3
SDEV				9,7

Variasjonen i dyp til berg er noe mindre her (10,5 – 25,2 m) enn lengre nord der tolkingene til IMPAKT og NGU ligger. GeoPhysix sine tolkinger viser et enkelt punkt med avvik større enn 20 % (boring 8) og fem punkter hvor avviket i tolket dyp til berg er mellom 10 og 20 %. Alle disse punktene viser et tolket dyp til berg som er mindre enn dypet fra boringene. Ved 11 av 17 boringer er avviket mindre enn +/- 10 %

hvorav to punkter viser et avvik mindre enn 2 %. I gjennomsnitt ligger tolket dyp til berg på 93,3 % av dypet fra boring, og med et standardavvik på 9,7%. Bare tre av i alt 17 punkter har et avvik større enn +/- 15 % som GeoPhysix selv angir.

5.5 Kvalitet på refraksjonsseismiske dybdetolkninger i Romsdalsfjorden

NGU utførte tomografisk inversjon med programmet RAYFRACT og antatt beste prosedyre for påvising av svakhetssoner i berg langs fem profiler i Romsdalsfjorden. Dette er nødvendigvis ikke beste prosedyre for tolking av dyp til berg. IMPAKT har utført tomografisk inversjon med program fra Geogiga. Denne tomografien viste seg å gi relativt gode resultater ved Vik (Kapittel 5.1). Langs profil P05 er det utført fire boringer som kan benyttes til kvalitetsvurderinger. Boringene Bh0C og Bh0D ligger på profilet, mens Bh1A og Bh1B ligger ca. 20 m øst for profilet. Figur 18 viser to varianter av NGUs tomografiske inversjon og i tillegg IMPAKTs tomografiske inversjon hvor dyp til berg fra fire boringer er angitt. I Tabell 13 er dyp til berg ved de fire boringene sammenstilt med tolket dyp til berg fra den tomografiske inversjonen.

Tabell 13: Dyp til berg fra boring og tre forskjellige tomografiske inversjoner langs profil P05 i Romsdalsfjorden. Tomo1 er NGUs inversjon med liten glatting, Tomo2 er NGUs inversjon med noe mer vertikal glatting og Tomo3 er IMPAKTs tomografiske inversjon. Tolket dyp til berg er vist i meter og i % avvik fra dypet ved boring. Ved alle tolkinger er hastighetskontur 3000 m/s benyttet som indikator for berg. Dyp til berg fra boring er hentet fra FUGRO (2018 a og b).

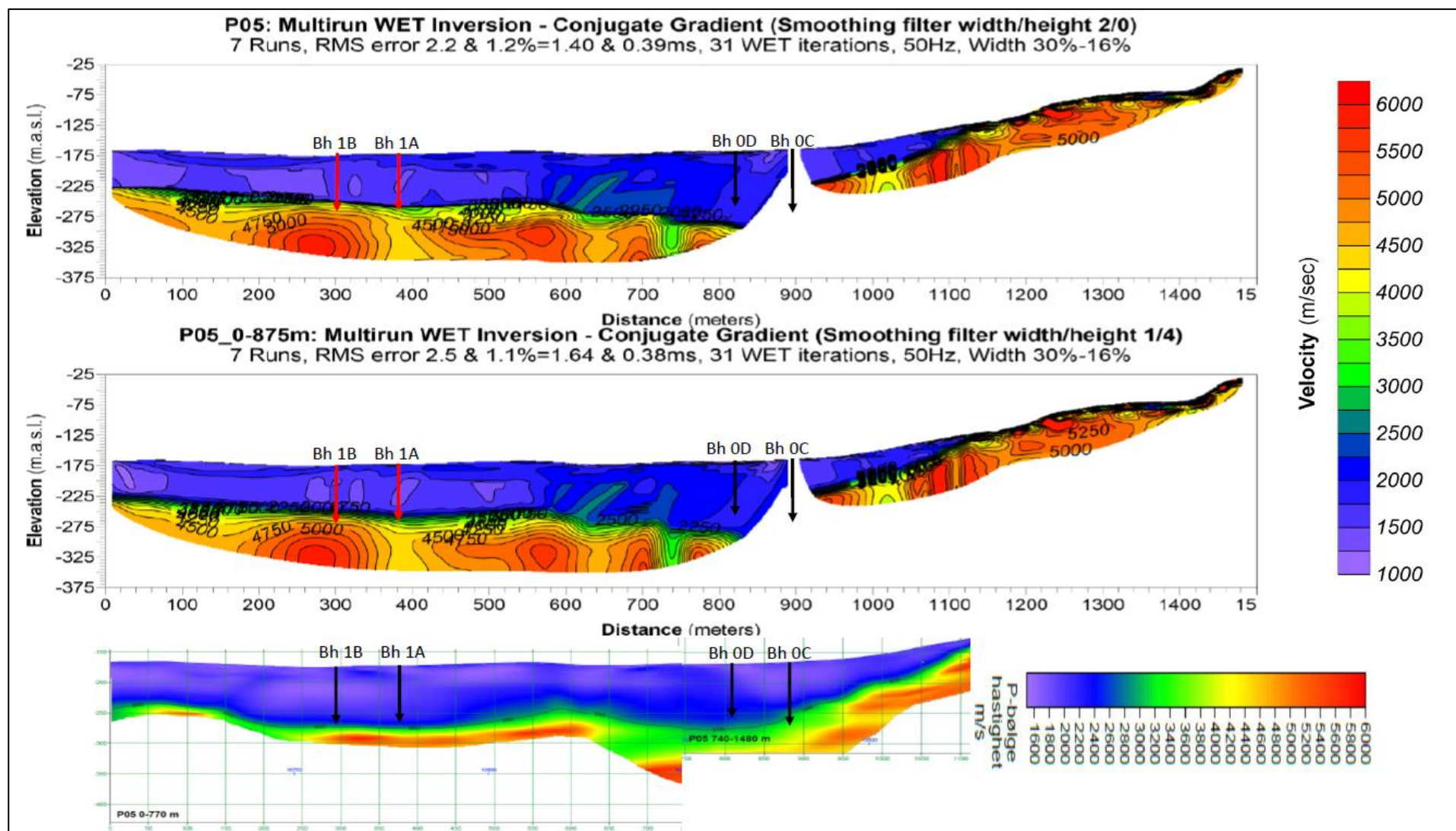
Borehull	Dyp til berg boring (m)	Dyp til berg (m), Tomo1 / Boring (%)	Dyp til berg (m), Tomo2 / Boring (%)	Dyp til berg (m), Tomo3 / Boring (%)
Bh0C	103,5	?	?	83 m, 80 %
Bh0D	90 - 91	125 m, 138 %	118 m, 130 %	107 m, 118 %
Bh1A	94,5 – 95,6	90 m, 95 %	86 m, 90 %	102 m, 108 %
Bh1B	96	80 m, 83 %	78 m, 81 %	98 m, 102 %

IMPAKTs tomografiske tolking (Tomo3) av dyp til berg ved boring Bh1B stemmer godt med resultatet fra boringen (102 %). Også ved Bh1A stemmer tolket dyp relativt bra (108 %). Ved boringene Bh0C og Bh0D stemmer tolket dyp noe dårligere (henholdsvis 80 % og 118 %).

NGUs tolking med minimal glatting (Tomo1) stemmer bra med tolket dyp til berg ved Bh 1A (95 %), men ikke så bra ved Bh 1B (83 %). Med NGUs tomografiske inversjon med noe mer glatting er resultatet noe dårligere (henholdsvis 90 % og 81 %).

Ved NGUs tolkinger med programmet Rayfract var det ikke mulig å slå sammen de to datasettene langs profil P05 slik IMPAKT har gjort med programmet fra Geogiga. Dette gir uheldige konsekvenser mot slutten av profilene. Stråledekningen (Ray coverage) og penetrasjonsdypet blir dårlig, og tolkingen desto mer usikker. Langs profil P05 er det i tillegg et gap i datadekningen noe som fører til at Bh 0C faller mellom de to hastighetsprofilene (se Figur 18), mens Bh 0D er plassert i et område med dårlig datadekning og usikre tolkinger. Kvaliteten av NGUs tolkinger i området rundt boringene Bh 0C og Bh 0D må karakteriseres som meget dårlig.

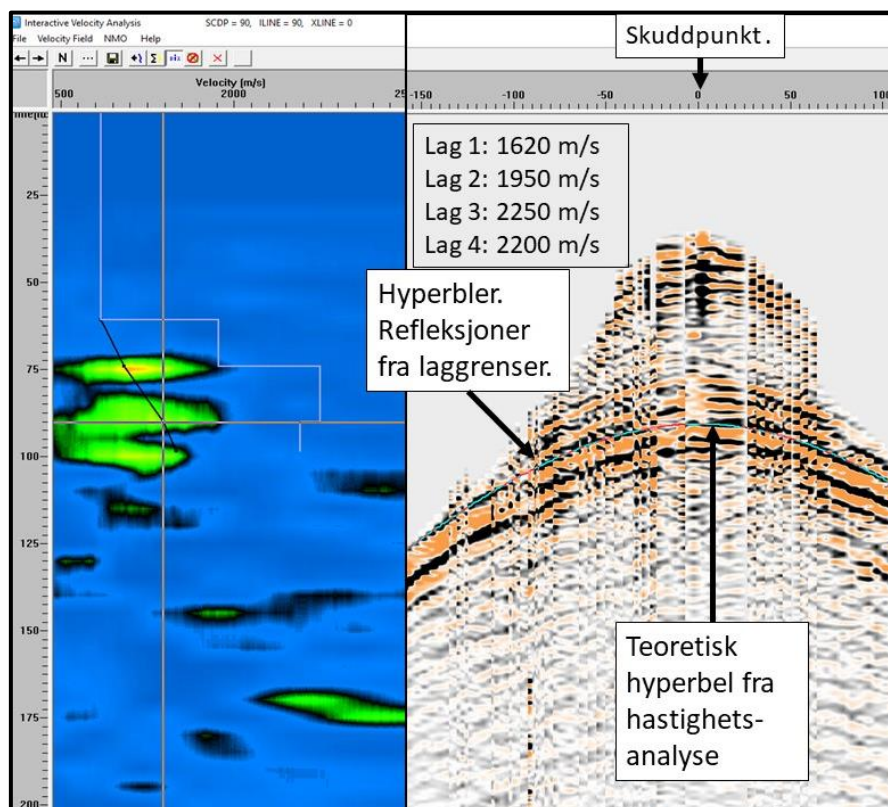
Det må her bemerkes at gapet i datadekningen ble av IMPAKT «reparert» ved å benytte data fra egenfinansierte Profil 6 som ligger like ved. NGU gjorde ikke forsøk på dette.



Figur 18: Sammenstilte tomografiske inversjoner og boringer langs profil P05 i Romsdalsfjorden. Øverst, NGUs inversjon med moderat glatting. I midten: NGUs inversjon med noe mer vertikal glatting. Nederst: IMPAKTs tomografiske inversjon med programvare fra Geogiga. Tolket dyp til berg (hastighetskontur $v=3000$ m/s) er markert med sort strek. Piler angir dyp til berg fra boringer, Bh0C og Bh0D ligger tilnærmet på profilet mens Bh1A og Bh1B ligger ca. 20 m øst for profilet.

5.6 Kvalitet på refleksjonsseismiske dybdetolkninger i Romsdalsfjorden

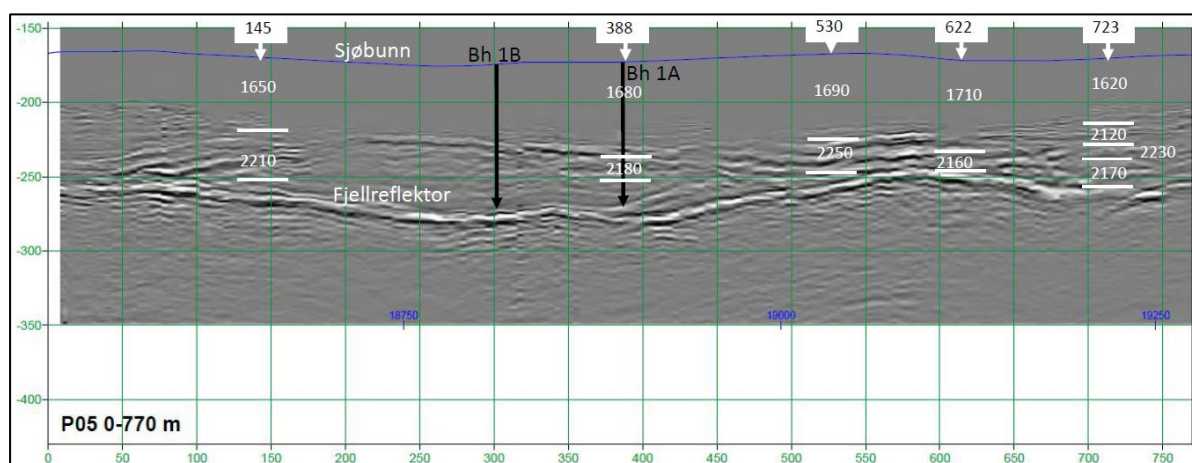
Ved IMPAKT's refraksjonsseismiske målinger i Romsdalsfjorden nord for Tautra høsten 2019, ble det påvist gode refleksjoner i de fleste skuddene (se eksempel i Figur 19). Det ble derfor besluttet å foreta refleksjonsseismisk prosessering av enkelte profiler målt i sjøen nord for Tautra, og disse inngår i leveransen fra firmaet (IMPAKT 2020). Dessverre var det ikke mulig å gjøre tilsvarende refleksjonsseismiske analyser på data sør for Tautra da datakvaliteten her var betydelig dårligere.



Figur 19: Eksempel fra IMPAKT's prosessering fra ett skudd langs profil P04 (CDP90). Tid øker nedover. Flere hyperbler representerer refleksjoner fra laggrenser i løsmassene og overgang til berg. Hastighet ned til lagene kan analyseres med hyperbeltilpasning (blå hyperbel) eller med en NMO-analyse (til venstre). Hvit linje med sprang viser interne hastigheter i de forskjellige lagene (modifisert fra IMPAKT 2020).

Figur 20 viser IMPAKT's prosesserte refleksjonsmønster ved profil P05 posisjon 0 til 770 m. Totalt er det her utført fem hastighetsanalyser langs denne delen av profil P05. Øverst finnes et lag med hastigheter som varierer fra 1620 m/s til 1710 m/s. Dette er forenelig med marine fjordavsetninger (silt og leire). Denne lagpakken er tilsynelatende uten interne reflektorer, men dette skyldes at data er slettet («Muted») for å fremheve mer interessante refleksjoner. Under dette opptrer lag med flere interne refleksjoner. Hastigheten i disse varierer fra 2120 m/s til 2250 m/s som er typiske morene-hastigheter. En ser også at stedvis mangler hastigheten rett over bergoverflaten. Det er rimelig å anta at denne ikke er noe lavere enn hastigheten i materialet som ligger rett over. Denne hastighetsanalysen bestemmer hastigheten ned til reflektorer. Den kan derfor ikke bestemme hastigheten i berg.

Totalt har IMPAKT utført 13 hastighetsanalyser på sitt datasett nord for Tautra. Det kan påvises tre forskjellige hastighetslag. Alle analyser er vist i Vedlegg 4. Gjennomsnittlig hastighet i første laget er 1660 m/s som tolkes som marine fjordavsetninger (silt og leire). Under dette indikeres to lag med gjennomsnittshastighet 2063 m/s og 2188 m/s. Det kan diskuteres om dette er to separate lag eller en lagpakke med til dels hardpakket morene. To boreringer sentralt i profilet, men ca. 20 m øst for dette, viser relativt godt samsvar med antatt bergreflektor (Figur 20).



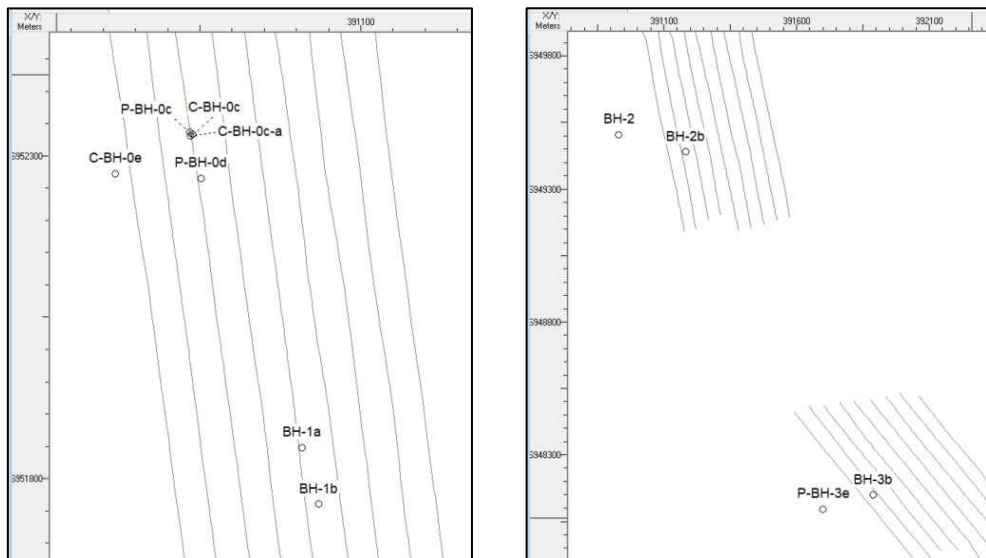
Figur 20: Refleksjonsseismisk profil P05 0 – 770 m. Hvide tall viser hastigheter (m/s) fra fem analyser langs denne delen av profilet og hvite streker viser dyp til laggrenser. Sjøbunnen er angitt som blå linje. Hastigheter i intervallet 1620 til 1710 tolkes som marine fjordavsetninger (silt og leire) mens hastigheter større enn 2000 m/s tolkes som morene og hastighet større enn 2100 m/s tolkes som hardt pakket morene. Sorte piler angir dyp til berg fra FUGROs boreringer (Modifisert fra IMPAKT 2020).

Firmaet FUGRO utførte refleksjonsseismiske undersøkelser både sør og nord for Tautra i 2018 (FUGRO 2018a). Linjeavstanden var 50 m og skuddpunktavstanden 3,125 m (Sparker). Posisjonering av hydrofonkabel er meget nøyaktig (< 2 m) siden både båt og endebøye er posisjonert med DGPS med cm-nøyaktighet. Ifølge deres egen tolkingsrapport, var det ikke mulig å utføre gode hastighetsanalyser med deres data (FUGRO 2018b). I stedet ble det benyttet en konstant hastighet på 1600 m/s for hele løsmassepakken. Ut fra det IMPAKTs analyser viser, måtte dette bli feil. På oppfordring ble derfor IMPAKTs hastighets-analyser benyttet til å reprocessere og retolke FUGROs refleksjonsseismikk (FUGRO 2020a og 2020b).

FUGRO har også utført boreringer ned til berg i det aktuelle området for tunnelen (FUGRO 2019). I sine rapporter fra boringene fra BH-1a og BH-1b oppgir FUGRO et standardavvik i posisjoneringen av boreskipet på ca. 10 cm (henholdsvis 8 cm øst-vest, 9 cm nord-syd og 12 cm øst-vest, 12 cm nord-syd). I e-post datert 15.09.2020 oppgir et mulig avvik på borestrengen gjennom løsmassene på 2° fra vertikal. Med en løsmassetykkelse på 100 m utgjør posisjonsavviket ved bergoverflaten maksimalt ca. 3,5 m.

Figur 21 viser plassering av FUGROs boreringer i forhold til deres refleksjonsseismiske profiler. Nord for Tautra finnes sju boreringer innenfor eller nært opp til de refleksjonsseismiske linjene. Sør for Tautra finnes fire boreringer, men to av disse ligger så langt til side for målte refleksjonsseismiske profiler (> 100 m) at disse ikke kan korreleres mot de seismiske tolkingene.

Ved sammenligningen av dyp til berg fra boring og refleksjonsseismikk benyttes et griddet bildet av dyp til berg fra refleksjonsseismikken. Det betyr at det benyttes interpolerte verdier mellom profilene (som har innbyrdes avstand 50 m) og ekstrapolerte verdier der boringene ligger utenfor de målte profilene.



Figur 21: Plassering av FUGROS boringer i forhold til FUGROS refleksjonsseismikk nord for Tautra til venstre og sør for Tautra til høyre. Linjeavstand ved refleksjonsseismikken er 50 m (fra FUGRO 2020b).

I Tabell 14 er tolket dyp til berg fra boringene sammenstilt med tolket dyp fra FUGROs refleksjonsseismikk. Her presenteres den første av FUGROs tolkinger der det er benyttet en konstant hastighet i løsmassene på 1600 m/s. Deretter vises tolket dyp der FUGROs egne hastighetsanalyser er benyttet. Siste datasett viser tolket dyp til berg der gjennomsnittlige hastigheter fra IMPAKT's hastighetsanalyser er benyttet for dybde-konvertering.

En dybdekonvertering med konstant hastighet 1600 m/s gir som forventet et for lite dyp til berg. I gjennomsnitt er dette ca. 12 % lavere enn det boringene viser. Dybdekonvertering med FUGROs egen hastighetsanalyse viser et for stort dyp til berg ved alle boringer og i gjennomsnitt 32 % høyere. Ved å benytte et mer nyansert hastighetsprofil fra IMPAKT's analyser, stemmer dybdekonverteringen meget godt. De fleste analysene ligger 1 til 5 % over dypet fra boringene. To punkter viser noe større avvik (6 og 8 %) mens ett punkt viser et dyp til berg en prosent lavere enn ved boring. En merker seg her at tolket dyp ved refleksjonsseismikk er større eller tilnærmet lik dypet fra boringene, og at bergoverflaten kan ligge jevnt over grunnere enn det refleksjonsseismikken viser. I denne analysen er BH-2b, der dyp til berg fra boring er mindre enn 10 m, holdt utenfor da tolkingen ved refleksjonsseismikken blir usikker.

Konklusjon:

FUGRO vurderer usikkerheten i dyp til berg fra sine boringer til å være ca. 1m. Refleksjonsseismiske analyser med hastighetsprofiler i løsmassene fra IMPAKT viser at dyp til berg ligger i gjennomsnitt 4 % dypere. Dette innebærer at re-tolket dyp til berg ved FUGROs refleksjonsseismikk tilsvarende i gjennomsnitt kan ligge ca. 4 % grunnere enn det refleksjonsseismikken viser (FUGRO 2020a).

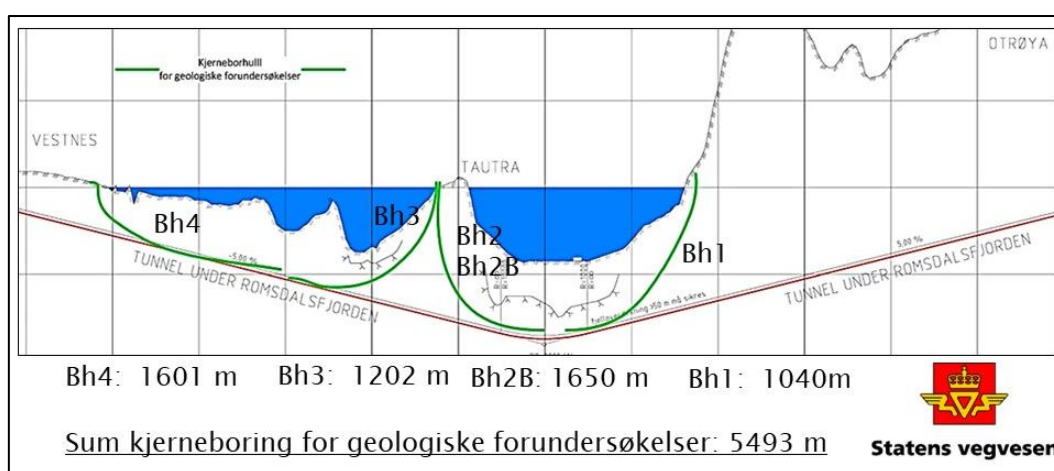
Tabell 14: Dyp til berg fra boring og tolking av FUGROs refleksjonsseismikk. Ved FUGROs data er først en konstant løsmassehastighet på 1600 m/s benyttet, deretter FUGROs egen hastighetsanalyse. Ved siste datasett er gjennomsnittlige hastigheter fra IMPAKT's analyser benyttet (data fra FUGRO 2020 a og b).

Borehull	Dyp til berg fra boring (m)	Dyp til berg FUGRO 1600 m/s (m)	Avvik i % FUGROs 1600 m/s	Dyp til berg FUGROs hastigheter (m)	Avvik i % FUGROs hastigheter	Dyp til berg IMPAKT's hastigheter (m)	Avvik i % IMPAKT's hastigheter
Tautra nord							
P-BH-0c	103,5	93,1	90	162,0	157	109,2	106
C-BH-0c	103,5	92,7	90	160,4	155	108,7	105
C-BH-0c-a	103,5	92,3	89	158,9	154	108,1	105
P-BH-0d	90 - 91	80,4	89	118,5	131	89,3	99
C-BH-0e	98 - 99	86,8	88	126,4	127	106,0	108
BH-1a	94,5-95,6	87,9	92	105,7	111	98,6	103
BH-1B	96	86,5	90	105,9	110	99,3	103
Tautra sør							
BH-2	37 – 39	-	-	-	-	-	-
BH-2b	9 – 9,5	4,6	50	4,6	50	6,0	65
BH-3b	77,2–77,7	59,3	77	86,6	112	78,5	101
P-BH-3e	56,5–57,5	-	-	-	-	-	-
Gjennomsnitt*			88,1		132		103,8
SDEV			4,6		20,4		2,9

* BH-2b blir ikke benyttet i analyser på grunn av liten løsmassetykkelse og usikre seismiske tolkinger.

6. TOMOGRAFI MELLOM SJØBUNNEN OG BOREHULL

For å øke kunnskapen om bergmassekvalitet ved tunnelarbeidene under Romsdalsfjorden, ble det boret fire lengre kjerneborehull (Figur 22). Borehull 1 (Bh1) ble boret fra Otrøya i nord og styrt ned mot tunnelnivå. Bh 2 ble boret fra øya Tautra midtfjords, men her brakk borestrengen ved det første hullet og det ble boret et nytt kjernehull (Bh2B). Bh 3 ble også boret fra Tautra, men i retning sør. Bh 4 ble boret fra Vik på sørsida av fjorden og nordover. Intensjonen her var å få kontinuerlige kjerner langs hele den undersjøiske delen av den ca. 15 km lange tunnelen. Av ulike årsaker ble ikke lengden av boringene som opprinnelig planlagt, men det ble tatt opp 5493 m med kjerner.



Figur 22: Kjerneborehull ved kryssing av Romsdalsfjorden, borehullenes posisjon og lengde.

Høsten 2017 utførte det norske firmaet Geomap i samarbeid med svenske Geovista seismisk tomografi mellom borehullene Bh1 og Bh3 og sjøbunnen (Geomap 2017a). Våren 2018 ble det utført tilsvarende tomografi mellom sjøbunnen og Bh2B (Geomap/GeoVista 2018). Hensikten med dette var å få en sikrere bestemmelse av bergoverflaten og bergmassekvaliteten i tunnelnivå. Ved disse undersøkelsene ble det også utført tradisjonelle tolkninger av refraksjonsseismikken på sjøbunnen (Geomap 2017a og 2018).

6.1 Resultater, tomografi ved Bh1 og Bh3

Ved den tomografiske undersøkelsen ved Bh1 og Bh3 ble skuddene (mindre dynamitt-ladninger) ført ned i borehullene med en stiv pleksiglasslange mens hydrofonkabel med 10 og 5 m hydrofonavstand ble lagt ut på sjøbunnen. Lengde av hvert utlegg var i utgangspunktet henholdsvis 470 m og 235 m. På grunn av overlapp mellom de tre utleggene ved Bh1 og ujevn avstand mellom hydrofonene, ble utleggenes totale lengde 570 m ved Bh1. I utgangspunktet skulle skuddpunktavstanden i borehullene være 5 m eller mindre (se Figur 4.14). På grunn av sprengningene ble borehullene blokkert, og planlagt skuddavstand var umulig å oppnå. Dette ga sterkt redusert kvalitet på tomografien ved borehullene Bh1 og spesielt i Bh3. Av denne grunn, presenteres ikke resultatene fra Bh3 i denne rapporten.

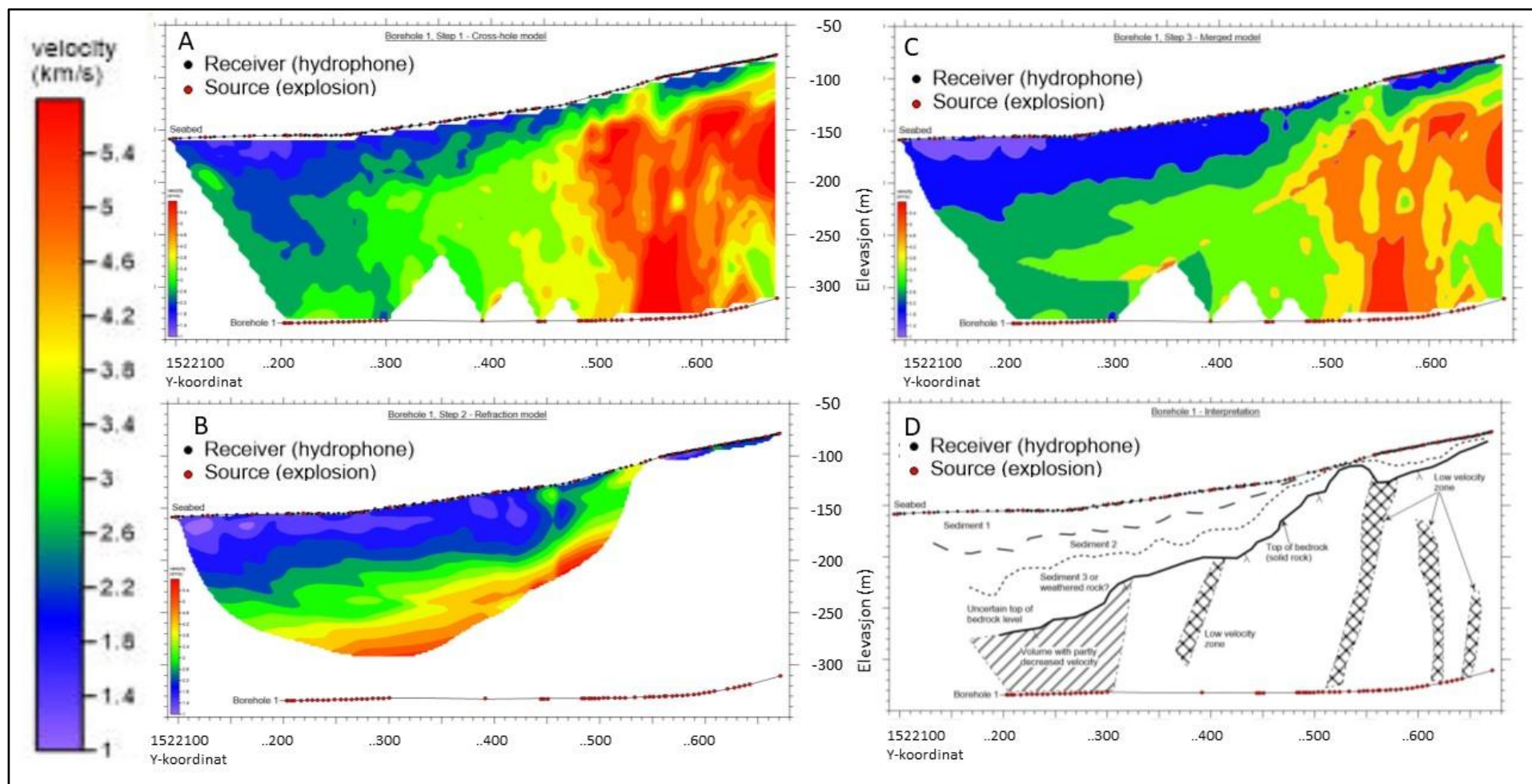
Datasettene fra både Bh1 (og Bh3) ble først tolket med en enkel rutine i 2D av Robert Vida i regi av Geomap. Ved analysene i foreliggende rapport, sees det nærmere på en mer kompleks og forhåpentligvis mer korrekt invertering i 3D utført med programmet GeoTomCG (GeoTom 2017) av Håkan Mattsson (GeoVista).

Tre forskjellige tolkinger av seismikken ved Bh1 er vist i Figur 23 sammen med den opprinnelige geologiske tolkingen av disse data (fra Geomap 2017a). Hastighetsprofil A er beregnet ut fra tomografien mellom borehullet og sjøbunnen og i tillegg registreringer med både skudd og hydrofoner på sjøbunnen. Her er det benyttet en hastighetsmodell som bygger på de tradisjonelle tolkingene, men med en gradvis økning av hastigheten mot dypet (1D gradientmodell). Hastighetsprofil B er utelukkende basert på tomografisk inversjon av refraksjonsseismikken på sjøbunnen hvor programmet Rayfract (versjon 3.35) og 1D gradient startmodell er benyttet (se Figur 4). Hastighetsprofil C er en sammenstilling av hastighetsprofilene A og B, der overlappet mellom disse er representert ved gjennomsnittsverdier. Figur 23D viser en geologisk tolking av hastighetsprofilene.

Alle de tre hastighetsprofilene viser gradvise overganger fra løsmassehastigheter (<2500 m/s, blå farger) til klare berg hastigheter både horisontalt og vertikalt (>4000 m/s, rødlige farger). Modellering av syntetiske data (Rønning et al. 2020) har vist at **dyp til berg** kan tolkes ut fra denne hastighetsgradienten, men en trenger tilleggsinformasjon fra f.eks. boring til berg for å kunne bestemme hvilken hastighetskontur som kan benyttes som indikator for bergoverflaten (Rønning et al. 2020).

Modelleringen viste også at det ved lagdelt hastighetsmodell i praksis er umulig å tolke **riktige hastigheter i lagene** ved gradvise økninger i hastighetsprofilen, og derved vanskelig å tolke hvilke materialtyper som finnes (Rønning et al. 2020). Refleksjons-seismiske analyser foretatt av IMPAKT Geofysik AB ca. 100 m mot vest (Kapittel 5.6), viste veldefinerte lag hvor hastigheten i øverste lag var 1660 m/s (finkornige marine avsetninger), under dette et lag med hastighet 2030 m/s og under dette igjen et lag med hastighet ca. 2200 m/s hvor begge disse er forenlig med morene som ligger på berg. Ut fra denne modellen synes den gradvise hastighetsmodellen tomografien viser ved Bh1 å være mindre sannsynlig, og alle forsøk på å bestemme hastigheten i løsmassene blir da en utfordring. Mest sannsynlig, ut fra NGUs modelleringer (Rønning et al. 2020), ville en tomografisk inversjon med en startmodell generert med Hagedoorns metode kunne gi en rimelig god hastighet i det øverste løsmasselaget, men hastigheten i de to neste løsmasselagene vil være en utfordring (Kapittel 4.3) på grunn av blindsoneproblematikk.

Hovedinntrykket fra hastighetsprofil A er høye hastigheter i berg (rød farge, > 4600 m/s, middels til god bergmassekvalitet) mot nord (mot høyre), men med betydelig lavere hastigheter mot sør (grønne farger, 2600 – 3600 m/s, svært dårlig til ekstremt dårlig bergmassekvalitet) fra en usikker bergoverflate og helt ned til borehullsnivå (≈ tunnelnivå). Sistnevnte dekker et område med samlet bredde på ca. 380 m.



Figur 23: Tomografiske inversjoner av data fra BH1. A) Tomografi mellom borehullet (skudd) og sjøbunnen (hydrofoner), B) Tomografisk inversjon av overflate-tomografi (skudd og hydrofonkabel på sjøbunnen), C) Sammenstilling av de to tomografibildene der det i overlappet er benyttet gjennomsnittsverdien av de to og D) Ingeniørgeologisk tolking av tomografien. Merk at fargeskala er noe forenklet i hastighetsprofil C. (Modifisert fra Geomap 2018).

P-bølgehastigheter i berg ved de forskjellige tolkingsmetodene er sammenstilt i Tabell 15. Tomografien mellom borehullet og sjøbunnen viser jevnt over lave hastigheter 2600 – 3600 m/s i berg i den sydligste delen (svært dårlig til ekstremt dårlig bergmasse (se Tabell 3). Fra ca. (nord)koordinat 1522450 begynner hastigheten å øke og mot slutten av profilet indikeres hastigheter godt over 5000 m/s. Ved den tomografiske inversjonen av refraksjonsseismikken på sjøbunnen (Figur 23B), indikeres hastigheter i berg over 4200 m/s der metoden når ned til berg.

Siden fjernskudd ikke kan benyttes ved den tomografiske inversjonen av refraksjonsseismikken på sjøbunnen, er det bare i begrensede deler av profilet en kan avlese hastigheten i berg. Som forventet ved bruk av 1D gradient startmodell, viser dette tomografibildet få variasjoner i berghastighet langs profilet. De tradisjonelle tolkingene (Geomap 2017a) indikerer to svakhetssoner i området, en med hastighet 3100 m/s i en bredde på ca. 100 m i starten av profilet og en tilsvarende bred sone med hastighet 3600 m/s mellom koordinatene 1522300 og 1522400, begge tolkes som soner med svært dårlig bergmassekvalitet. Fra koordinat 1522400 og videre nordover er hastigheten tolket til 5200 m/s til 5700 m/s (meget god bergmassekvalitet).

Tabell 15: Tolket p-bølgehastighet i berg langs Bh1 ved tomografi mellom borehullet og sjøbunnen, tomografi på sjøbunnen og tradisjonelle tolkinger av samme data (Fra Geomap 2017a).

Fra Nord-koordinat	Til Nord-koordinat	Ca. bredde (m)	Vp (m/s) Sjøbunn – Bh -tomografi	Vp (m/s) Sjø-bunns-tomografi	Vp (m/s) Tradisjonell tolking
1522100	1522200	100	2600 - 3600	?	3100
1522200	1522300	100	2600 - 3600	>4200	5200
1522300	1522400	100	2600 - 3600	>4200	3600
1522400	1522500	100	3400 - 4000	>4200	5200 - 5700
1522500	1522670	170	4200 - 5500	?	5200 - 5700

I tolkingsmodellen vist i Figur 23D indikeres tre løsmasselag. Hastigheten i de to første lagene er vanskelig å bestemme på grunn av gradienten i hastighetsforløpet, og er ikke angitt. Hastigheten i lag tre er angitt til 2500 m/s til 3000 m/s som er noe høyt til å være løsmasser og det antydes forvitret berg (Geomap 2017a). De tradisjonelle manuelle tolkingene indikerer hastigheter i løsmassene på 1600 m/s og 1700 - 1900 m/s lengst sør og noe høyere (1900 – 2100 m/s) lengst mot nord. Dette er i samsvar med det annen refraksjonsseismikk og refleksjonsseismikk har indikert (IMPAKT 2019). Hastigheter rundt 2000 m/s kan ligge i blindsoner der løsmassene er tykkere (mot sør), men kommer nærmere sjøbunnen mot nord og kommer derved ut av blindsonen.

Dyp til berg ved de tradisjonelle tolkingene ligger mer eller mindre midt i løsmasselag 3 i tolkingsmodellen (Figur 23D). Dette er mulig dersom dette laget opptrer i en blindsoner. Lengst mot nord (fra koordinat 1522500) er løsmassetykkelsen mindre enn 5 m ved de tradisjonelle tolkingene og i dette området er berghastigheten godt over 5000 m/s. Avviket mellom dyp til berg fra tomografien og de tradisjonelle tolkingene kan ikke forklares med forvitret berg i blindsoner i dette området, og en mulig forklaring kan være usikkerheter i hastighetsprofilet ved en eller begge metodene.

I tolkingsprofilen (Figur 23D) er det indikert fire lavhastighetssoner og et større volum med delvis nedsatt hastighet. Sistnevnte faller sammen med et område som ved de tradisjonelle tolkingene indikerer hastighet på 5200 m/s (meget god bergmassekvalitet). Tradisjonelle tolkinger indikerer i hovedsak hastigheten i berg ved bergets utgående. En lavere hastighet under dette vurderes som lite sannsynlig. Her er det uoverensstemmelse mellom de to tolkingene. Den sydligste av de fire lavhastighetssonene (ved ca. koordinat 1422400) faller delvis sammen med en ca. 60 m bred sone med hastighet 3800 m/s ved de tradisjonelle tolkingene og kan være reell. En legger imidlertid merke til at datadekningen ved volumet med nedsatt hastighet mellom borehullet og sjøbunnen her er svært dårlig, bare fire skudd på en strekning på 180 m.

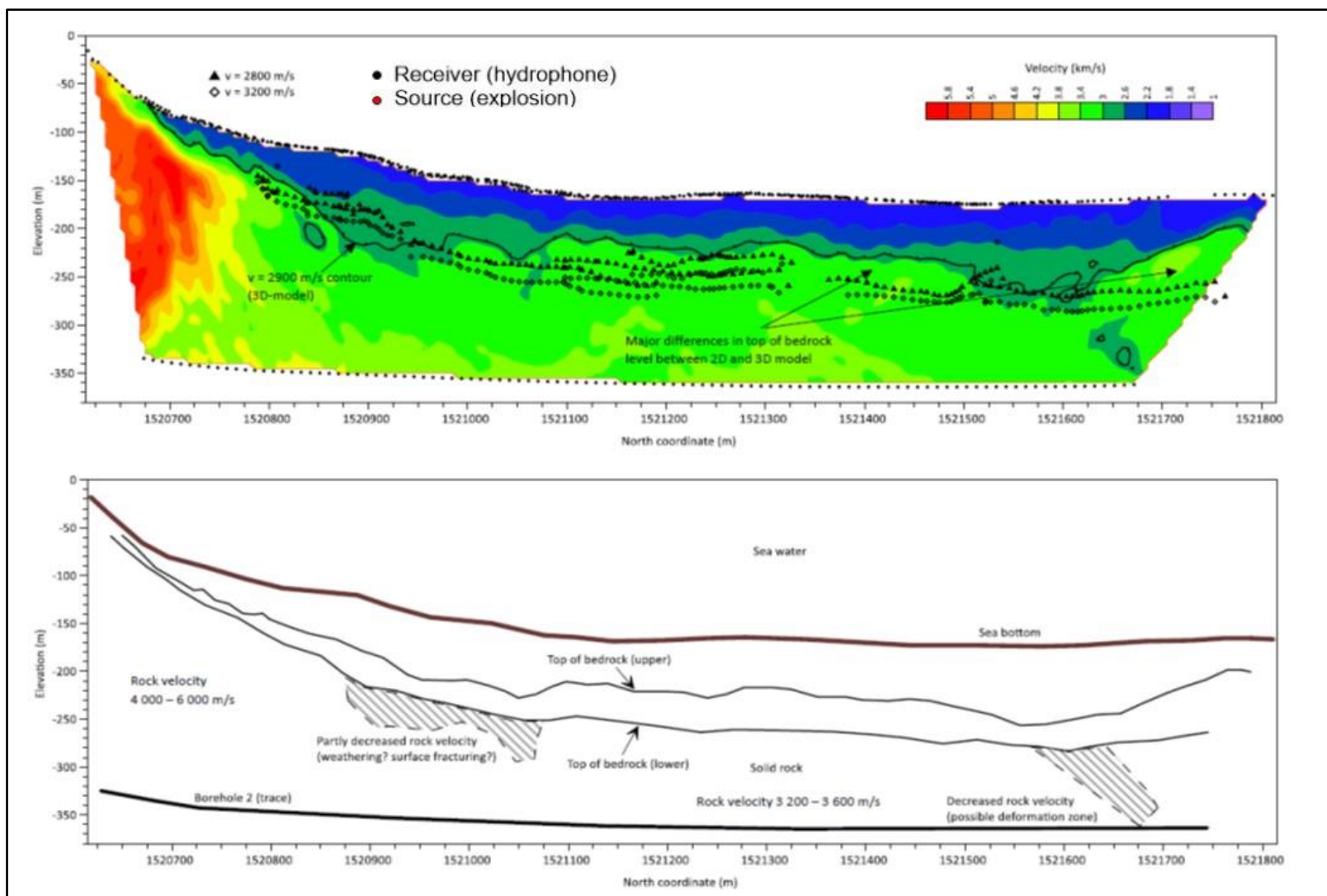
De tre andre nordligste lavhastighetssonene ligger alle i god datadekning ved tomografien, men i et område der berghastigheten fra de tradisjonelle tolkingene er ≥ 5200 m/s. To av tre soner går ikke til bergoverflaten, men starter et stykke ned i berget. Her har GeoVista i ettertid (e-post datert 25. april 2021 fra Håkan Mattsson) antydnet en annen mulig tolking der en svakhetszone skrår ned fra bergoverflaten ved koordinat 1522570 og mot lavhastighetszone ved profilets slutt. Dette er heller ikke sannsynlig siden en sone med indikert bredde på 25 m burde vist en signatur ved tradisjonelle tolkinger hvor løsmassetykkelsen er mindre enn 5 m (Geomap 2017a).

6.2 Resultater tomografi ved Bh2B

For å forbedre datakvaliteten ved tomografien mellom sjøbunn og borehull, ble det laget en ny hydrofonkabel for bruk i borehull. Denne kabelen har 24 hydrofoner med innbyrdes avstand 10 m, og ble flyttet stegvis i borehull Bh2B til en total dekning på 1000 m. Med skudd utenom dette intervallet ble profilets totale lengde over Bh2B i underkant av 1200 m. Her ble det skutt på sjøbunnen og det ble foretatt kun registreringer i borehullet. Dette løste problemet med kollaps i berget og strålebildet fra skudd til hydrofoner på sjøbunnen ble vesentlig forbedret.

Forut for dette (høsten 2017) ble det skutt i alt 10 refraksjonsseismiske profiler som alle ligger over Bh2B (Geomap 2018). Her ble det benyttet en kabel med 48 hydrofoner og 10 m mellom hver, totalt 470 m lang. Disse profilene er tolket manuelt og tomografisk ved bruk av programmet Rayfract (1D gradient start-modell). Tolket profillengde varierte fra 230 m til 400 m både ved den tradisjonelle og den tomografiske tolkingen. Disse profilene overlapper hverandre og stedvis ligger fire profiler parallelt i en korridor med bredde mindre enn 50 m. Datasettet inneholder i alt 5890 registreringer, 2152 fra skyting mellom sjøbunn og hydrofoner i borehullet (90 skudd fordelt på ca. 1200 m) og 3738 registreringer ved sjøbunnsmålingene (ca. 80 skudd).

Figur 24 viser en sammenstilling av tolkinger. Tomografien er tolket og fremstilt som et fargekodet hastighetsprofil hvor alle data er benyttet på samme måte som ved Bh1 (Figur 23C). Indikert **dyp til berg** fra sjøbunnstomografien er angitt ved å markere to hastighetskonturer fra den tomografiske inversjonen. Sorte trekanten følger konturen 2800 m/s mens åpne firkanten følger hastighetskonturen 3200 m/s. I tillegg er hastighetskonturen $V=2900$ m/s fra borehulls-tomografien angitt med heltrukken linje. En legger her merke til at to overlappende utlegg ved koordinat 1521180 viser sprik i indikert bergoverflate på ca. 25 m ved den dypeste hastighetsindikator ($V=3200$ m/s).



Figur 24: Tomografisk inversjon av data fra Bh2B. Øverst: Hastighetsprofil satt sammen av tomografien mellom borehull og sjøbunn og tomografisk inversjon av refraksjonseismikk på sjøbunnen. Hastighetskontur $V=2900$ m/s er uthevet som heltrukket sort linje. Som indikatorer for mulig bergoverflate fra sjøbunns-tomografien er hastighetskonturen $V=2800$ m/s angitt som sorte trekanter mens $V=3200$ m/s er angitt som åpne forkanter. Nederst: Tolket profil (Fra Geomap/GeoVista 2018).

NGUs modellering med Rayfract har vist at hvilken hastighetskontur som best indikerer bergoverflaten, avhenger av den geologiske modellen (Rønning et al. 2020). For løsmasser med hastighet 1600 m/s kan hastighetskonturen $V= 3030$ m/s være en god indikator for bergoverflaten. Dersom en introduserer blindsonelag med en høyere hastighet (2100 m/s) vil riktig hastighets-kontur øke og kan komme opp mot 3500 m/s. Ut fra dette er nok hastighetskonturen $V= 3200$ m/s i det tolkede bildet (Åpne firkanter, Figur 24 øverst) trolig den beste indikatoren for bergoverflaten av de to valgte. Dette stemmer veldig bra med Geomaps tradisjonelle tolkinger fra koordinat 1521200 og nordover, men mot sør indikeres bergoverflaten enda dypere ved de tradisjonelle tolkingene. Avstanden tatt i betraktning, stemmer disse tolkingene godt med IMPAKTs tolkinger ca. 100 m lengre mot vest, og med boringer i samme området (Kapitlene 5.4 og 5.5).

Ut fra en samlet vurdering av dyp til berg, varierer **hastighetene i løsmassene** fra ca. 1800 m/s nærmest sjøbunnen til mellom 3000 m/s og 3400 m/s ned mot berg. Dette er klart høyere enn indikerte løsmassehastigheter generelt (Tabell 17), og høyere enn ved Geomaps tradisjonelle tolkinger (1800 m/s – 1900 m/s, Geomap 2018). Refleksjonsseismikken (Kapittel 5.5) ca. 100 m lengre mot vest indikerte opp mot 60 m med hastighet 1660 m/s (marine finkornige avsetninger) over en lagpakke med hastigheter 2000 – 2200 m/s. Hastighetene i løsmassene ved denne tomografien synes å være for høy.

Bortsett fra i et mindre område lengst sør hvor hastigheten i berg er fra 4200 m/s til godt over 5000 m/s, ligger hastigheten i berg i området 3200 m/s til 3600 m/s ved det tomografiske bildet. Dette kan tolkes som **svært dårlig bergmassekvalitet** i en sammenhengende lengde på nesten **1000 m**.

I Tabell 16 er alle hastigheter i berg fra Geomap (2018) sine tradisjonelle tolkinger over Bh2B sammenstilt.

Tabell 16: Bergmassekvalitet over Bh2B ut fra tradisjonelle tolkinger. Se teksten for detaljer. (Data fra Geomap 2018).

Fra koordinat Nord (m)	Til koordinat Nord (m)	Bredde (m)	Antall profiler	Hastigheter (m/s)	Bergmassekvalitet (se Tabell 4.1)
1520620	1520830	210	3	5400 - 5600	God / Meget god
1520830	1520950	120	4	2900 - 3100	Ekstremt dårlig
1520950	1520990	40	4	4900 - 5100	Middels / God
1520990	1521060	70	2*	3800 - 4100	Svært dårlig
1520990	1521060	70	1*	4900	Middels
1521060	1521100	40	2*	4100	Dårlig
1521060	1521100	40	2*	5400 - 5700	God / Meget god
1521100	1521170	70	3	5400 - 5700	God / Meget god
1521170	1521230	60	3	3600 - 4100	Svært dårlig
521230	1521380	150	4	5000 - 5700	God / Meget god
521380	1521480	100	2-3	4400 - 5000	Middels
1521480	1521600	120	3	4300 - 4400	Dårlig
1521600	1521660	60	1	5100	God / Meget god
1521660	1521750	90	1	4100	Dårlig
1521750	1521810	60	1	5100	God / Meget god

Den totale lengden av dette området er ca. 1200 m og dekkes med fra ett til fire parallelle profiler refraksjonsseismikk. Første og siste del av dette området har begrenset dekning ved tomografien. Områder med god/meget god bergmassekvalitet er markert med skarp grønn farge, middels bergmassekvalitet i lysere grønt, dårlig bergmassekvalitet er markert med gult, svært dårlig bergmassekvalitet i oransje mens ekstremt dårlig bergmassekvalitet er markert med rødt. Ved denne graderingen er det foretatt en konservativ vurdering og soner som ifølge Tabell 3 kommer på grensen mellom bergmasseklassene, blir plassert i dårligste klasse. Legg merke til at ved to områder markert med *, er det avvik i tolket seismisk hastighet ved forskjellige profiler.

Tabell 16 viser en langt mer nyansert hastighetsfordeling i berg langs den ca. 1200 m lange strekningen refraksjonsseismikken dekker over Bh2B sammenlignet med resultatene ved tomografien. God til meget god bergmassekvalitet indikere i en total lengde ca. 590 m som er ca. halvparten av den totale lengden. Av dette kan ca. 40 m ha dårlig bergmassekvalitet da tolkingene viser sprikende resultater (Koordinater 1521060 – 1521100). De tradisjonelle tolkingene indikerer videre ca. 210 m med middels bergmassekvalitet, ca. 250 (210?) dårlig bergmassekvalitet, ca. 130 m svært dårlig bergmassekvalitet og ca. 120 m med på grensen til ekstremt dårlig bergmassekvalitet. Ved tomografien er det bare ca. 100 m som viser god til meget god bergmassekvalitet, mens resten indikerer svært dårlig bergmassekvalitet. Det er åpenbart store avvik i tolket p-bølgehastighet og følgelig tilsvarende sprik i tolket bergmassekvalitet. Generelt er hastigheten ved tomografien mellom sjøbunnen og borehullet lavere enn ved de tradisjonelle tolkingene.

6.3 Vurdering av resultatene

Tomografien mellom borehullene Bh1 og Bh3 fikk sterkt redusert datakvalitet på grunn av at skudd i borehullene førte til kollaps av borehullet. Med skudd på sjøbunnen og hydrofoner i borehullet, som i Bh2B, ble strålegjennomgangen og derved kvaliteten på undersøkelsen vesentlig forbedret. Ved fremtidige undersøkelser av denne type, bør registreringsutstyr (hydrofoner) plasseres i borehullene mens skuddene bør plasseres på sjøbunnen/bakken.

Ingen av de tomografiske inversjonene viste bilder av strålegjennomgangen, noe som er viktig ved vurdering av kvaliteten på inversjonene. Det er mulig både ved programmet GeoTomCG og ved Rayfract. Denne muligheten bør benyttes slik at kvaliteten på inversjonene kan vurderes.

I rapporteringen av undersøkelsene (Geomap 2017a, Geomap/GeoVista 2018) ble det referert til gode modelltilpasninger med lave RMS-verdier (avvik mellom målte gangtider og modellens gangtider). Modellering har imidlertid vist (Rønning et al. 2020) at en kan få meget lave RMS-verdier med feil hastighetsmodeller. Dette er et klassisk eksempel ved all inversjon av geofysiske data; mange forskjellige modeller kan gi gode tilpasninger til målte data, men modellen behøver ikke å være korrekt. Lave RMS-verdier ved seismikken er derfor ikke en garanti for korrekt hastighetsmodell.

Ved den tomografiske inversjonen av refraksjonsseismikken på sjøbunnen ble det benyttet en 1D gradient startmodell i de presenterte profilene. Andre startmodeller ble ifølge GeoVista testet (Håkan Mattsson, e-post datert 26.04.2021), men ikke vist i rapporteringen. 1D gradient startmodell kan være riktig dersom det er gradvise variasjoner i hastigheten mot dypet. Refleksjonsseismikken utført av IMPAKT Geofysik viste imidlertid klare lagdelinger med veldefinerte hastigheter (Kapittel 5.5) og ved en slik hastighetsmodell er Hagedoorns metode langt bedre til å gi et mest mulig sant bilde av det virkelige hastighetsprofil.

Hastighetsprofilen presentert i Figur 24 er en midling av tomografien der alle måledata er med (skudd og registreringer på sjøbunnen og skudd på sjøbunnen og registrering i borehullet) og den rene tomografiske inversjonen av refraksjonsseismikken på sjøbunnen. Et feilaktig hastighetsprofil med gradvis økning av hastigheten mot dypet fra sjøbunntomografien, vil dominere det endelige hastighetsprofil. Den tomografiske inversjonen av alle måledata viser også en gradvis overgang i hastigheter mot dypet (Bh 1, Figur 23A). Det kan virke som om inversjonen av refraksjonsseismikken, slik den er utført i dette prosjektet, ikke er tilpasset geologien i området.

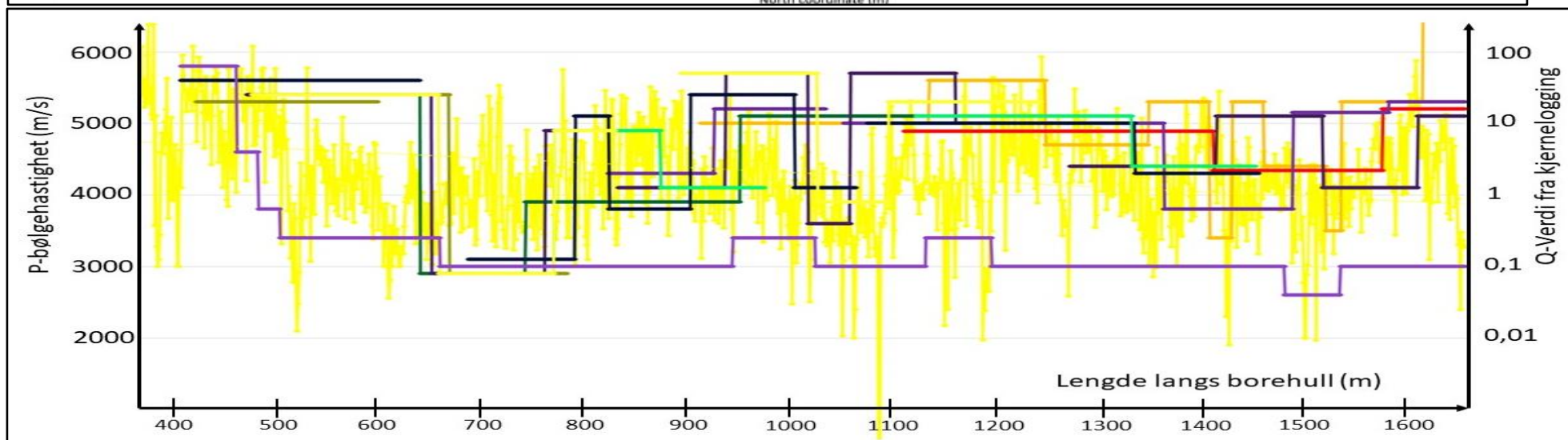
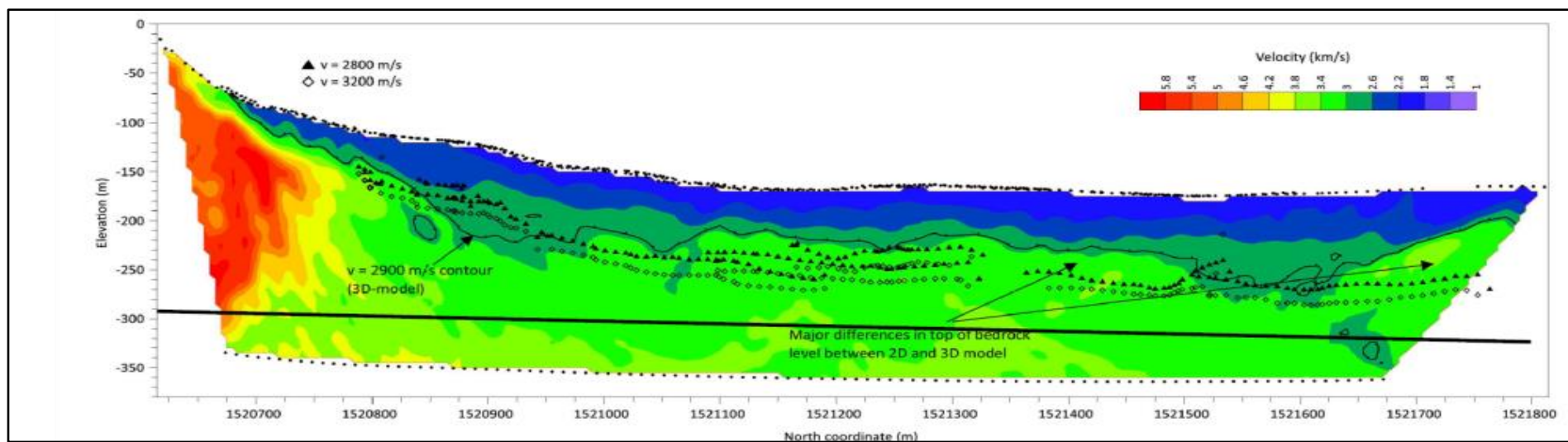
Tomografien mellom sjøbunnen og borehull Bh2B, viste generelt høyere hastigheter i løsmassene og lavere hastigheter i berg enn det andre undersøkelser har vist; tradisjonelle tolkinge både fra Geomap/Geovista (2018), refraksjonsseismikk og refleksjonsseismikk fra IMPAKT Geofysik (2019). Sistnevntes refleksjonsseismikk stemte meget bra med boringer til berg og vurderes som de beste tolkingene av seismikk i dette prosjektet (Kapitel 5.5). Svært dårlig bergmassekvalitet (p-bølge hastighet på 3200 – 3600 m/s) i en total lengde av 1000 m er svært lite sannsynlig selv ved krysning av Møre-Trøndelag forkastningskompleks (Lutro et al. 2015).

Med sammenhengende borekjerner langs hele Bh2B er det foretatt ingeniørgeologisk registrering langs hele hullet. Figur 25 viser beregnet Q-verdi langs hele profilen (NGI 2015). J_w (sprekkevannstall) og SRF (Stress Reduction Factor) er begge satt lik 1, noe som kanskje gir noe høye Q-verdier. Ut fra denne Q-verdien er det estimert hvilken p-bølgehastighet dette kan gi ved å benytte formelen (V_p i km/s):

$$V_p = I_g Q + 4$$

Denne formelen uttrykker en mellomting mellom formelen Barton publiserte (Barton 2007) og en lokal tilpasning ved flere tunneler i en studentoppgave ved NTNU (Duås, Eggen & Veien 2016).

P-bølgehastighet beregnet fra Q-verdi etter angitte formel er fremstilt ufiltrert som sterkt varierende gul kurve i Figur 25. En konservativ p-bølgehastighet i tunnelnivå lest fra det tomografiske bildet er fremstilt i fiolett nederst i profilen. P-bølgehastighet fra Geomaps tradisjonelle tolkinge er vist med ulike farger. Generelt kan en si at p-bølgehastigheten fra de tradisjonelle tolkingene er mye høyere enn fra tomografien. P-bølgehastighet fra Q-verdi ligger også klart over hastigheten fra tomografien, og mer eller mindre i nivå med den tradisjonelle tolkingen. P-bølgehastigheten fra tomografien, som indikerte svært dårlig bergmassekvalitet i en total lengde av 1000 m, indikerer en betydelig dårligere bergmassekvalitet enn hva kjernene fra borehullet viser. Dette gjelder også om en benytter en mer konservativ sammenheng mellom Q-verdi og hastighet (Barton 2007) og korrigerer for at Q-verdi stammer fra borehullet mens P-bølgehastigheten fra tomografien er avlest i tunnelnivå (se Figur 25, øverst).



Figur 25: Tomografisk inversjon av data fra Bh2B (øverst, samme som i Figur 24). Nederst en sammenstilling av p-bølge hastigheter. Gul uregelmessig kurve representerer V_p beregnet ut fra logget Q-verdi i kjernematerialet, nederste lilla strek er V_p i tunnelnivå ut fra det tomografiske hastighetsprofil (øverst) mens de andre fargekodede strekene er V_p fra Geomap sine tradisjonelle tolkinger av refraksjonsseismikken på sjøbunnen. Merk at koordinatene langs profilet er noe forskjellig, nordkoordinat på hastighetsprofil og lengde langs borehullet i hastighetsprofil.

Det kan ut fra dette konkluderes med at tomografien, slik den er utført ved Bh2B, indikerer for høye hastigheter i løsmassene og for lave hastigheter i berg, men likevel er modell-tilpasningen god (lave RMS-verdier). En inversjon der en låser løsmasse-tykkelsen og hastigheten i løsmassene, ville trolig gi et bedre bilde av hastighetene i berg, men dette er ikke mulig med det anvendte programmet GeoTomoCG (Håkan Matsson, E-post datert 26.04.2021). Programmet Rayfract kan gjøre dette, men det er ikke uttestet.

De tre tolkingsmetodene; tomografi mellom borehull og sjøbunn, tomografisk inversjon av refraksjonsseismikken på sjøbunnen og de tradisjonelle manuelle tolkingene, viser svært forskjellige hastigheter i berg. Noe av dette kan forklares med manglende datadekning både ved Bh1 og Bh3. Noe kan forklares ved måten tomografien på sjøbunnen er utført. NGU har erfart at tomografisk inversjon med 1D gradient startmodell sjelden gir gode bilder av svakhetssoner i berg og pålitelige hastigheter i løsmassene (Tassis et al. 2017 og 2018, Rønning et al. 2020). En kan heller ikke se bort fra anisotrope hastigheter (forskjellige hastigheter i forskjellige retninger) kan også være en mulig forklaring. Ved tradisjonell refraksjonsseismikk kartlegges hastigheten langs bergoverflaten mer eller mindre horisontalt mens en ved tomografi mellom borehull og sjøbunn kartlegger hastigheten hovedsakelig vertikalt.

Anisotrope hastigheter er lite studert i Norge. Intuitivt kan en kanskje si at løsmassene kan ha forskjellig hastighet i vertikal og horisontal retning. Sedimentasjon av finkornige marine avsetninger kan gi en lagdeling. Det samme kan kanskje sies om morener. Dette vil imidlertid gi lavere hastigheter på tvers av lagdelingen enn langs. Tomografien mellom sjøbunnen og borehullet indikerte høyere hastigheter i løsmassene. I massivt berg med svært god bergmassekvalitet (liten oppsprekking) kan en forvente tilnærmet lik hastighet i alle retninger. Ved dårligere bergmassekvalitet, kan det i prinsippet være forskjeller i hastigheter i forskjellige retninger ved forskjellig sprekke-mønster. Ved mulige tynnere svakhetssoner som indikert i Figur 23, vil bølgestrålene fra sjøbunnen mot borehullet i utgangspunktet ha en stor vertikalkomponent. Disse vil gå ut til de massive partiene i berget og refrakteres langs disse noe som ville gi høy hastighet og problemer med å påvise tynnere svakhetssoner. Anisotropi i p-bølge-hastighet kan ikke alene forklare avvik i tolket p-bølge-hastighet ved de anvendte metodene for hastighetsanalyser ved Romsdalsprosjektet.

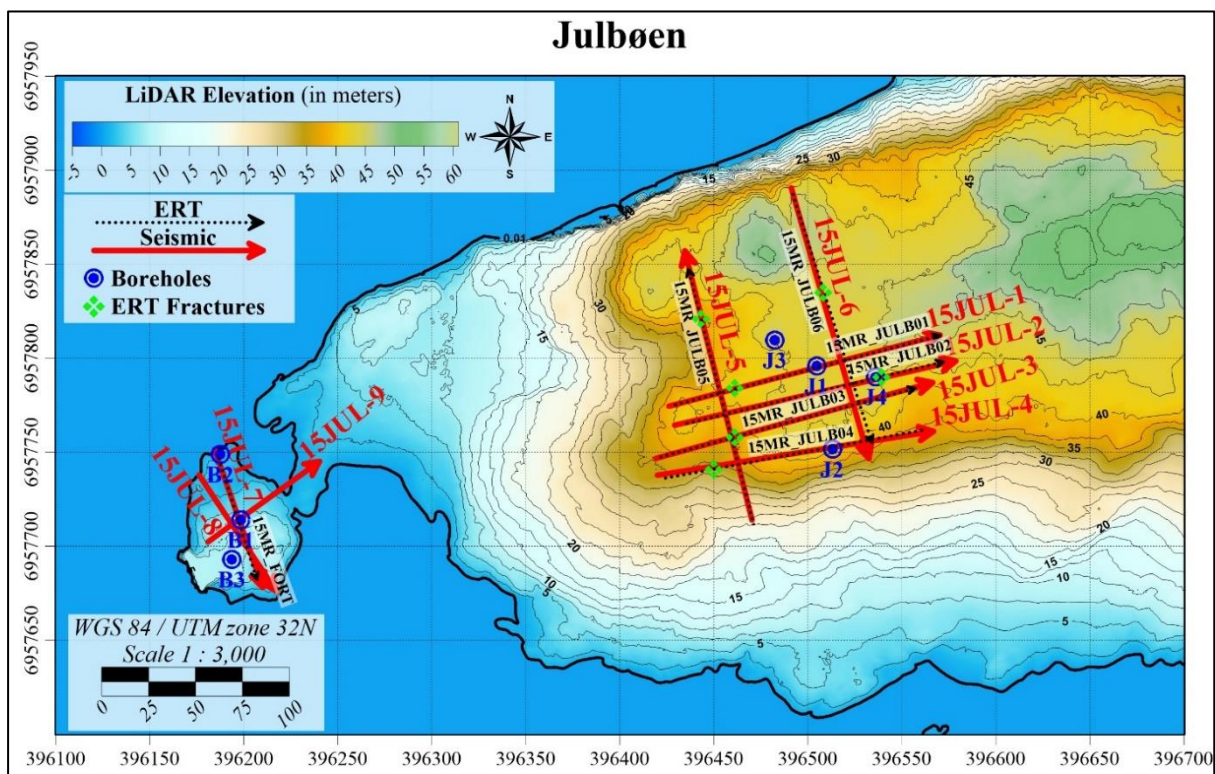
Konklusjon

Tomografien ved borehullene i Romsdalsfjorden, slik den er utført, bidrar ikke til sikker karakterisering av løsmassene, pålitelig tolket dyp til berg og heller ikke en troverdig karakterisering av bergmassen. Det er uklart om alternativ inversjon med låsing av løsmassetykkelse og hastigheter kan forbedre inversjonen av hastighetene i berg siden dette ikke er testet.

7. BERGMASSEKVALITET VED JULBØEN

Det Sveitsiske firmaet GeoExpert AG utførte refraksjonsseismiske undersøkelser i samarbeid med Ruden AS blant annet på Julbøen høsten 2015 (Ruden 2015a). Energikilden var her en slegge på 6 kg. Kvaliteten på denne undersøkelsen ble for enkelte profiler vurdert som meget tvilsom, og NGU ble bedt om å reprocessere data. I rapport fra den undersøkelsen ble det konkludert med at enkelte profiler måtte måles opp igjen med en bedre energikilde (Rønning et al. 2019a). Høsten 2019 utførte IMPAKT Geofysik nye refraksjonsseismiske målinger der det ble benyttet dynamitt i stedet for en mye svakere slegge som energikilde (IMPAKT 2020).

Figur 26 viser beliggenheten av alle målte profiler ved Julbøen. Profilene 15JUL-1 til -6 ligger i området for ankerfeste for hengebru, mens profilene 15JUL-7 til -9 er plassert ved østlige tårn for den planlagte hengebrua. Ved de fleste profilene ble det opprinnelig målt både refraksjonsseismikk og resistivitet (Ruden 2015a). Profilene 15JUL-1 og 15JUL-4 ble målt opp igjen med refraksjonsseismikk av IMPAKT høsten 2019 og da kalt JUL19-1 og JUL19-2 (IMPAKT 2020). Begge firma benyttet geofonavstand på 2 m. GeoExpert hadde fast avstand 2 m mellom slegge-slagene mens IMPAKT benyttet 6 m mellom dynamittskuddene.



Figur 26: Plassering av profiler og borer ved Julbøen, vest for Molde. Profilene 15JUL-1 og 15JUL-4 ble målt på nytt av IMPAKT høsten 2019 med dynamitt som energikilde (fra Rønning et al. 2019a).

7.1 Slegge vs. dynamitt som energikilde

I **Figur 27** er NGUs re-tolking av GeoExperts målinger langs profil **15JULB-1** sammenstilt med re-tolkingen av IMPAKTs målinger langs samme profil, nå kalt **19JUL-01**. Ved re-tolkingen av data fra GeoExpert (Rønning et al. 2019a) vurderte NGU kvaliteten på dette refraksjonsseismiske profilet å være god.

NGUs tolking av **GeoExperts data** med Hagedoorns metode (Figur 27 øverst til venstre), indikeres to markerte svakhetssoner med hastigheter i intervallet 3400 m/s til 3800 m/s. NGUs tomografiske inversjon av de samme data (i midten til venstre), viser imidlertid at de to sonene krympes og opptrer som grunnere soner med stedvis enda lavere hastighet (2600 m/s til 3400 m/s). Disse to sonene strekker seg likevel relativt langt mot dypet, henholdsvis ca. 20 m og ca. 30 m. Borehull J1 skjærer gjennom den ene lavhastighetssonen. Seismisk logging av borehull J1 viser hastigheter langs borehullet som jevnt over er større enn 3980 m/s og bare enkelte punkter med lavere hastighet (2900 m/s til 3980 m/s). Dette stemmer meget dårlig med begge NGUs tolkinger av GeoExperts data langs profilet.

Kvaliteten på disse tolkingene er tilsynelatende god. Hagedoorns metode viser en «RMS error» på 7,6 % eller tilsvarende 3,2 ms. Strålegjennomgangen (Ray coverage) gjennom cellene i modellen viser et fornuftig forløp og stedvis et betydelig antall (ca. 800 på det meste). Selv i områder med «liten» strålegjennomgang er det jevnt over ca. 100 stråler gjennom hver celle. Ut fra dette burde tolkingene gi et godt hastighetsprofil. Når profilet likevel viser tolkinger som ikke harmonerer med hastighetsloggen fra borehull J1, kan dette skyldes usikkerheter i plukkingen av førsteankomster, en prosess NGU ikke hadde innvirkning på. Svak energikilde kan være årsak til usikker angivelse av førsteankomster.

NGUs tolking av **IMPAKTs data** med Hagedoorns metode (Figur 27 øverst til høyre) viser et mer nyansert hastighetsprofil. Det som kan tolkes som løsmasser (hastighet < 2500 m/s) er tynnere, og hastigheten i berg skifter hyppig fra laveste verdi < 3400 m/s ved posisjon 100 til en høyeste verdi > 5400 m/s ved posisjon 10 og 90. Ved NGUs tomografiske inversjonen av disse data endres bildet. Mulige svakhetssoner fra tolkinger med Hagedoorns metode flyter sammen til en ca. 20 m dyp sone ved posisjon 30 der hastigheten er ned mot 2000 m/s. Denne opptrer omtrent i samme posisjon som tilsvarende sone ved tolkingen av GeoExperts data. En tilsvarende sammenflyting av soner skjer ved posisjon 80 og 100. Her indikeres et område med hastigheter < 3400 m/s under materiale med hastighet > 3800 m/s. Dette er et fenomen som er fysisk umulig å avdekke ved tradisjonelle tolkinger (hastighetsinversjon). Lave hastigheter mot slutten av profilet kan være kunstige effekter.

Den tekniske kvaliteten på tolkingene av IMPAKTs data er ikke så god som for GeoExperts data. Hagedoorns metode viser en «RMS error» på 15,4 % eller 1,91 ms. Tilsvarende tall for tomografisk inversjon er 10,3 % og 1,27 m/s. Stråledekningen viser et fornuftig forløp med opphopning av strålebaner ved overgang til berg, men på grunn av færre skudd er stråledekningen lavere enn for GeoExperts data. NGUs tomografiske inversjonen av IMPAKTs data er tilsynelatende mer pålitelig ved at høye hastigheter i borehull J1 stemmer bedre med hastighetsprofilen fra inversjonen.

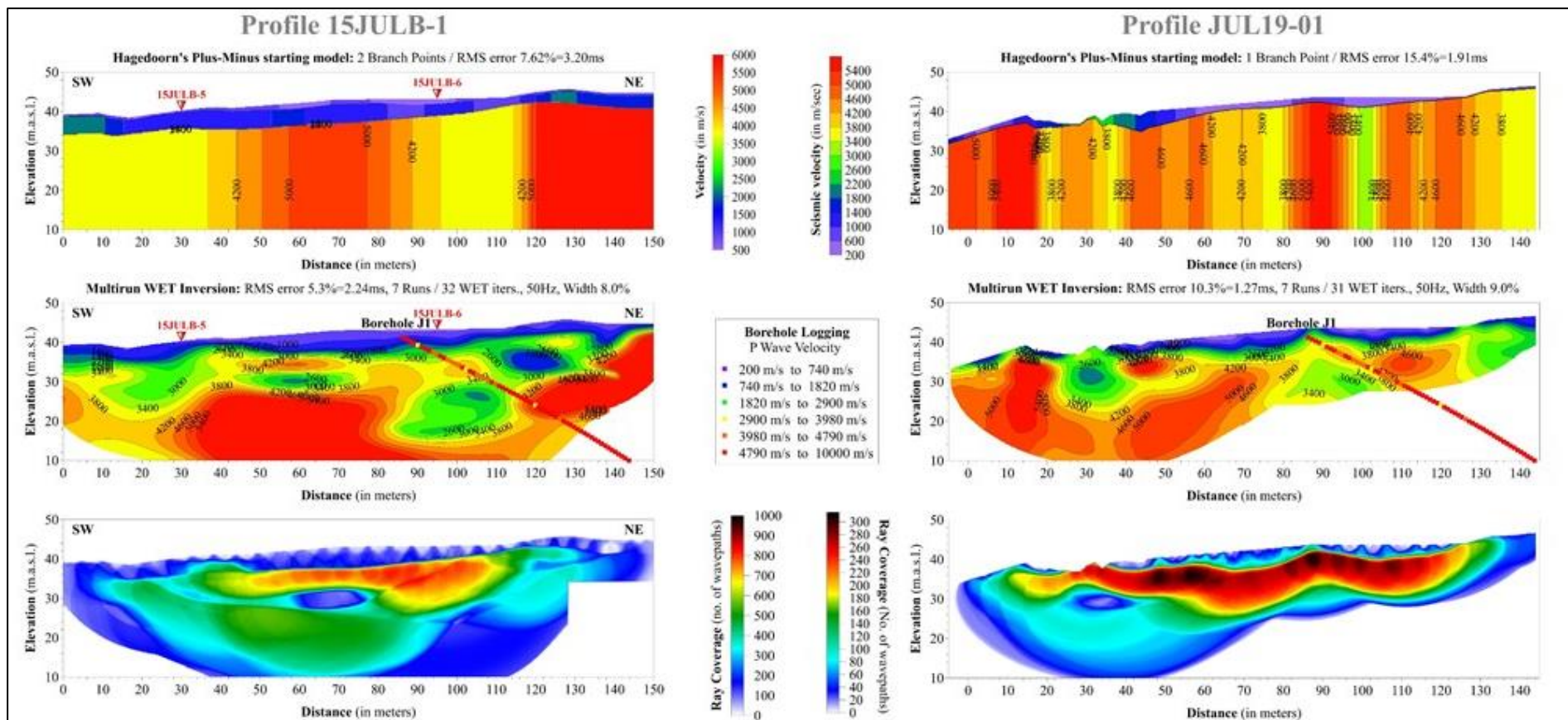
I **Figur 28** er NGUs re-tolking av GeoExperts målinger langs profil **15JULB-4** sammenstilt med re-tolkingen av IMPAKTs målinger langs samme profil, nå kalt **19JUL-04**. Ved re-tolkingen av data fra GeoExpert (Rønning et al. 2019a), vurderte NGU kvaliteten på dette refraksjonsseismiske profilet som ubrukelig.

NGUs tolking av **GeoExperts** data med Hagedoorns metode (Figur 28 øverst til venstre), indikerer et tynt løsmasselag (< 2 m) med hastighet < ca. 800 m/s. Under dette er hastigheten hovedsakelig < 2600 m/s men med to soner der hastigheten er noe høyere (2600 m/s – 3000 m/s). NGUs tomografiske inversjonen av de samme data viser et tilsvarende bilde der hastigheten i det som burde være berg ifølge borehull J2, ligger hastigheten hovedsakelig i intervallet lavere enn 800 m/s til 2000 m/s (blå farger). Kun sporadisk indikeres hastigheter opp mot 4000 m/s. Ut fra hastighetslogger fra borehullene (Ruden 2015b), tolking av naboprofiler og observasjoner i felt, må dette være feil. Årsaken er ikke kjent, men en kan ikke se bort fra at energikilden er for svak, og at hastighetsprofilet bygger på førsteankomster av overflatebølger (Rayleigh- og Love-bølger (Reynolds 2011)).

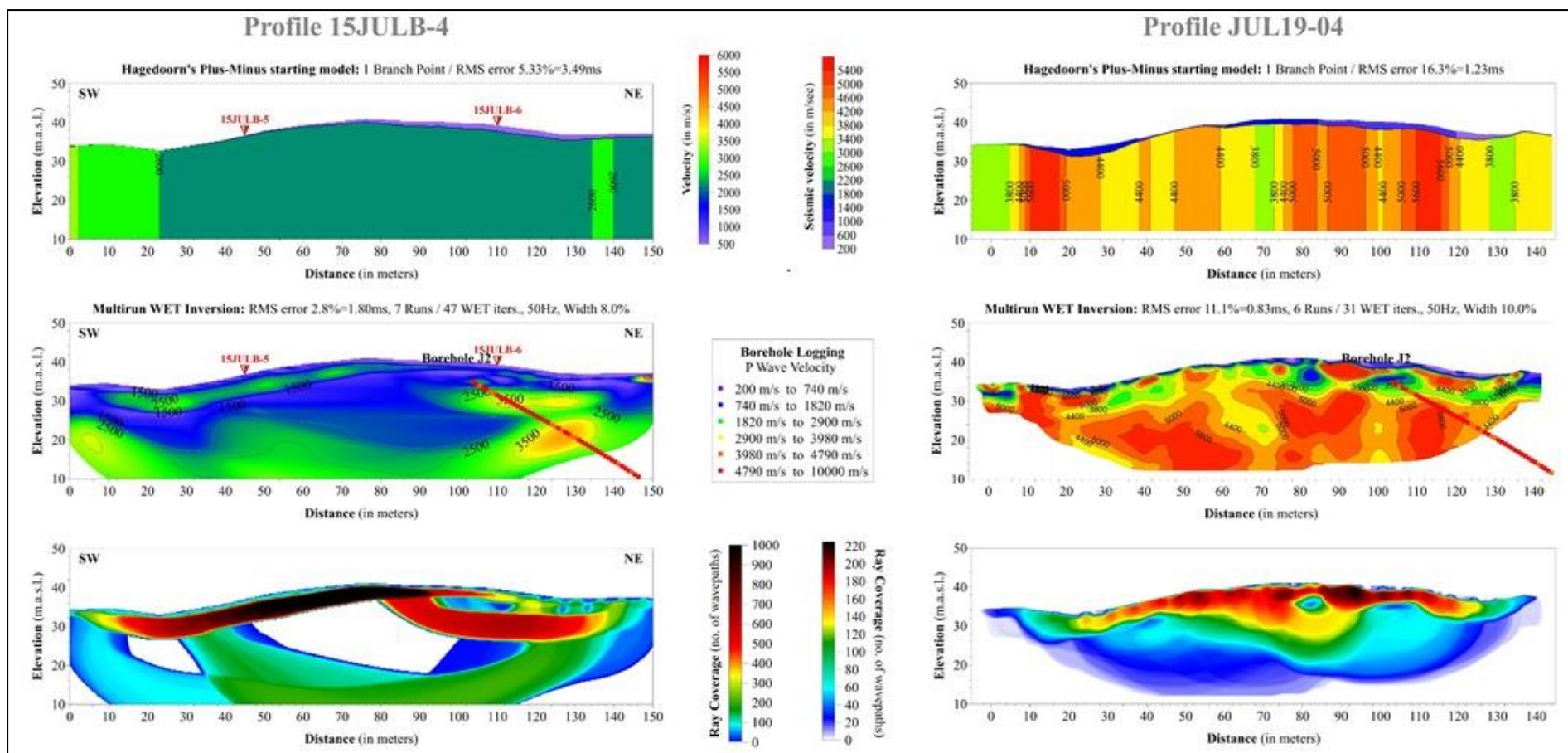
Den tekniske kvaliteten på dette profilet er tilsynelatende god. «RMS-error» ved Hagedoorns tolking er 5,33 % eller 3,49 ms mens den tomografiske inversjonen viser tilsvarende 2,8 % og 1,8 ms. Bilde av strålemønsteret (nederst til venstre) viser imidlertid et ulogisk forløp med store områder i dypet uten strålegjennomgang (hvite felt). Dette er et signal om at inversjonen ikke er av god kvalitet.

NGUs tolking av **IMPAKTS data** med Hagedoorns metode (Figur 28 øverst til høyre) viser et meget tynt lag med løsmasser (0 til 2 m) der hastigheten er lavere enn 2000 m/s. I underliggende berg skifter hastigheten hyppig, med variasjoner fra mindre enn 3800 m/s til godt over 5000 m/s. Alle hastighetssonene strekker seg mot dypet, noe som er typisk ved Hagedoorns metode, og som er en av svakhetene med metoden. Dette bildet endrer seg ved den tomografiske inversjonen. Områder med lave berghastigheter begrenses i hovedsak til de øvre 5 til 8 metrene. Under dette er hastigheten i berg jevnt over høyere enn 5000 m/s men med et par soner (posisjonene 60-70 og 100) der hastigheten går ned mot 4000 m/s. Denne tolkingen gir et mye bedre samsvar med logget p-bølgehastighet i borehull J2.

Den tekniske kvaliteten av tolkingene er ikke spesielt god, 16,3 % (1,23 ms) for Hagedoorn-tolkingen og 11,1 % (0,83 ms) for den tomografiske inversjonen. Dette er et signal om at de refraksjonsseismiske data representerer inhomogene masser. Strålemønsteret viser imidlertid et fornuftig forløp med en opphopning av strålebaner (100 – 200 pr. celle) i berg med lav hastighet og en gradvis reduksjon mot dypet.



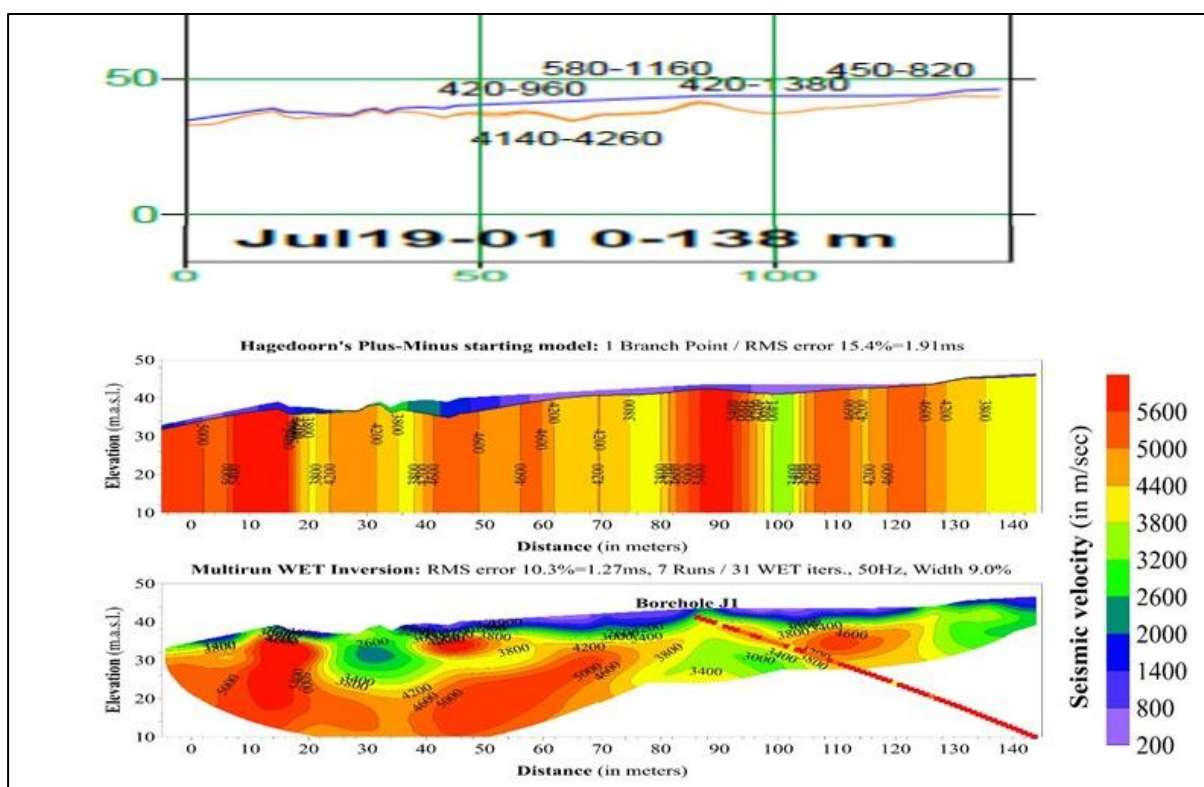
Figur 27: NGUs tolking av refraksjonsseismikk på Julbøen ved bruk av programmet Rayfract. Til venstre vises retolking av Profil 15JULB-1 samlet inn med slegge som energikilde av GeoExpert i 2015. Til høyre retolking av IMPAKTs profil JUL19-01 samlet inn med dynamitt som energikilde i 2019. Øverst vises tolking med Hagedoorns metode, i midten tomografisk inversjon med antatt beste prosedyre og nederst stråledekning (Ray coverage). Logget p-bølge hastighet i borehull J1 er hentet fra Ruden (2015b).



Figur 28: NGUs tolkinger av refraksjonsseismikk på Julbøen ved bruk av programmet Rayfract. Til venstre vises re-tolking av Profil 15JULB-4 samlet inn med slegge som energikilde av GeoExpert i 2015. Til høyre re-tolking av IMPAKT's profil JUL19-04 samlet inn med dynamitt som energikilde i 2019. Øverst vises tolking med Hagedoorns metode, i midten tomografisk inversjon med antatt beste prosedyre og nederst stråledekning (Ray coverage). Logget p-bølge hastighet i borehull J2 er hentet fra Ruden (2015b).

7.2 Sammenligning av refraksjonsseismiske tolkingsteknikker

Figurene 29 og 30 viser tre forskjellige tolkinger av IMPAKTs refraksjonsseismiske profiler JUL19-01 og JUL19-02. Øverste er IMPAKTs lagdelte tolking, deretter følger NGUs tolking med Hagedoorns metode og tomografiske inversjon med antatt beste prosedyre.



Figur 29: Forskjellig refraksjonsseismisk tolking av det samme datasettet langs Profil JUL19-01. IMPAKTs lagdelte tolking øverst, deretter følger NGUs Rayfract-tolking med Hagedoorns metode (startmodell) og tomografiske inversjon med antatt beste prosedyre.

IMPAKTs tradisjonelle lagdelte tolking med Hagedoorns metode langs profil **JUL19-01** (Figur 29 øverst) viser en tolags-modell med løsmassehastigheter som varierer fra ca. 400 m/s til ca. 1200 m/s (hovedsakelig tørre løsmasser). Tykkelsen varierer fra 0 til ca. 6 meter. Under dette er berghastigheten ca. 4200 m/s langs hele profilet (dårlig bergmassekvalitet).

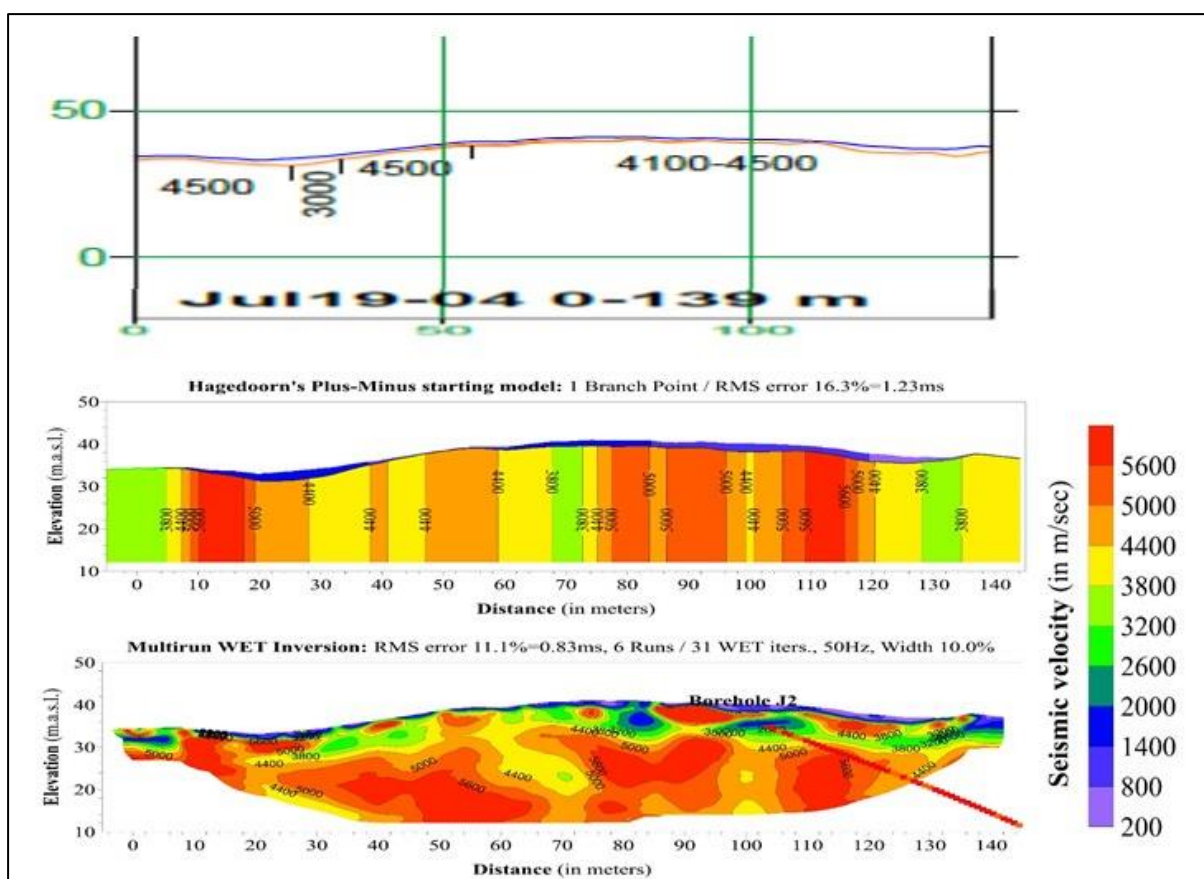
NGUs automatiske tolking med **Hagedoorns metode** viser noe tynnere løsmasser (0 – 2 m) og hastigheten viser noe større variasjoner. Som tidligere nevnt, viser NGUs tolking med Hagedoorns metode et nyansert bilde av hastigheten i berg med variasjoner fra lavere enn 3400 m/s til godt over 5000 m/s. I gjennomsnitt er dette kanskje ikke så langt fra IMPAKTs lagdelte tolking (4140 – 4260 m/s).

NGUs **tomografiske inversjon** fremstår løsmassetykkelsen mer i samsvar med det IMPAKTs tradisjonelle lagdelte tolking viste (0 til ca. 6 m). Tolkingen indikerer noe dårlig bergmassekvalitet stedvis i de øvre 20 - 30 metrene av profilet. Dette er klart mer nyansert enn ved IMPAKTs lagdelte tolking.

IMPAKTs tradisjonelle lagdelte tolking med Hagedoorns metode langs profil **JUL19-04** (Figur 30 øverst) viser en tolagsmodell der løsmassetykkelsen er for liten til å kunne gi noen god hastighetsbestemmelse. Hastigheten i berg ligger i området 4100 – 4500 m/s (dårlig bergmassekvalitet), men med en ca. 10 m bred sone med hastighet 3000 m/s (meget dårlig bergmassekvalitet).

NGUs automatiske tolking med **Hagedoorns metode** gir også ved dette profilet et noe mer nyansert bilde. Løsmassetykkelsen kan tolkes til fra 0 til 2 m og hastigheten i disse er jevnt over mindre enn 1500 m/s. Hastigheten i berg varierer fra mindre enn 3800 m/s til godt over 5000 m/s. Laveste hastighet opptrer i relativt tynne soner (< 10 m) ved posisjonene 0, 70 og 130. Sonene strekker seg mot dypet, noe som er typisk for denne tolkingsmetoden og som kan være en kunstig effekt.

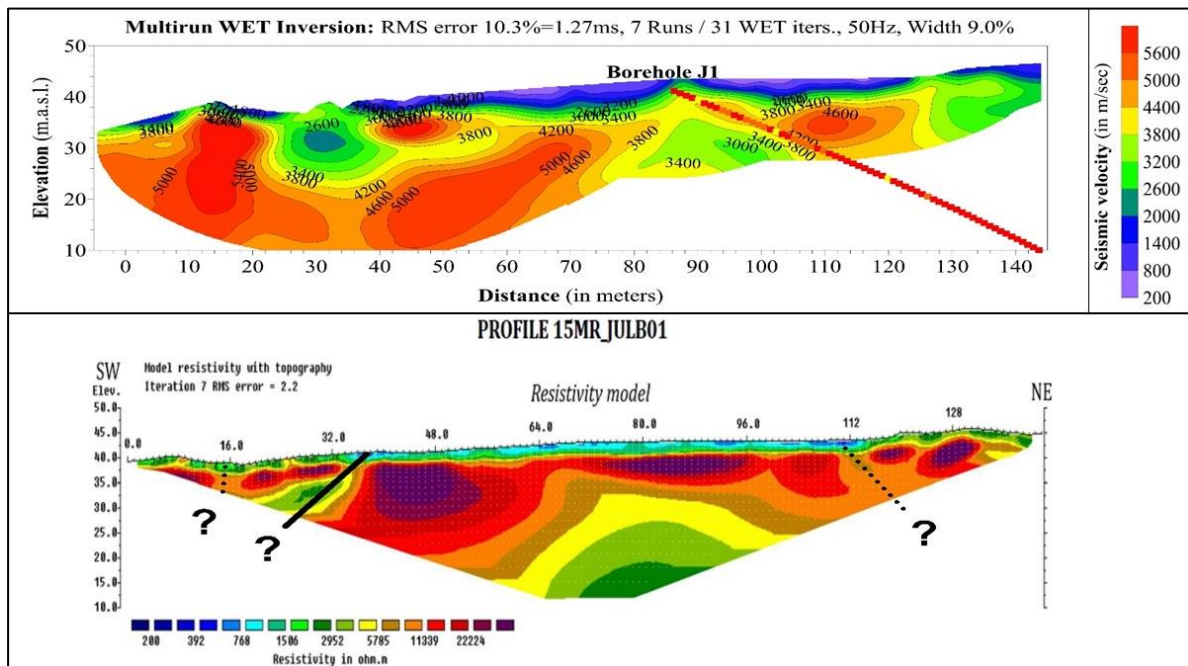
NGUs **tomografiske inversjon** viser et annet bilde. Løsmassene med hastigheter mindre enn 2000 m/s har en tykkelse som kan tolkes til mindre enn 2 m. Lave hastigheter i berg (< 3800 m/s) begrenses til de øverste 5 til 8 metrene av berget. Under dette er hastigheten jevnt over større enn 4400 m/s. Et mindre unntak finnes ved posisjon 70 der hastigheten ligger noe lavere enn 4400 m/s.



Figur 30: Forskjellig refraksjonsseismisk tolking av det samme datasettet langs Profil JUL19-04. IMPAKT's lagdelte tolking øverst, deretter følger NGUs Rayfract-tolking med Hagedoorns metode (startmodell) og tomografiske inversjon med antatt beste prosedyre.

7.3 Ingeniørgeologiske vurderinger

God bergmassekvalitet ved Julbøen er meget viktig da området vil bli utsatt for sterke krefter både ved ankerfeste for hengebru ved profilene 19JUL-01 og -04, men også ved østlige tårn for hengebrua på Julholmen noe lengre mot vest (se Figur 26). Siden to metoder kan gi et bedre bilde av bergmassekvaliteten enn bare en, er den mest detaljerte tolkingen av refraksjonsseismikken ved profilene JUL19-01 og JUL 19-04 sammenstilt med resistivitetsdata langs de samme profilene i Figurene 31 og 32.



Figur 31: NGUs tomografiske inversjon av refraksjonsseismisk profil JUL19-01 (øverst) og Resistivitetsprofil fra Ruden (2015a) tilnærmet langs samme profil. Sort linje og stiplinger indikerer mulig sprekkeseone.

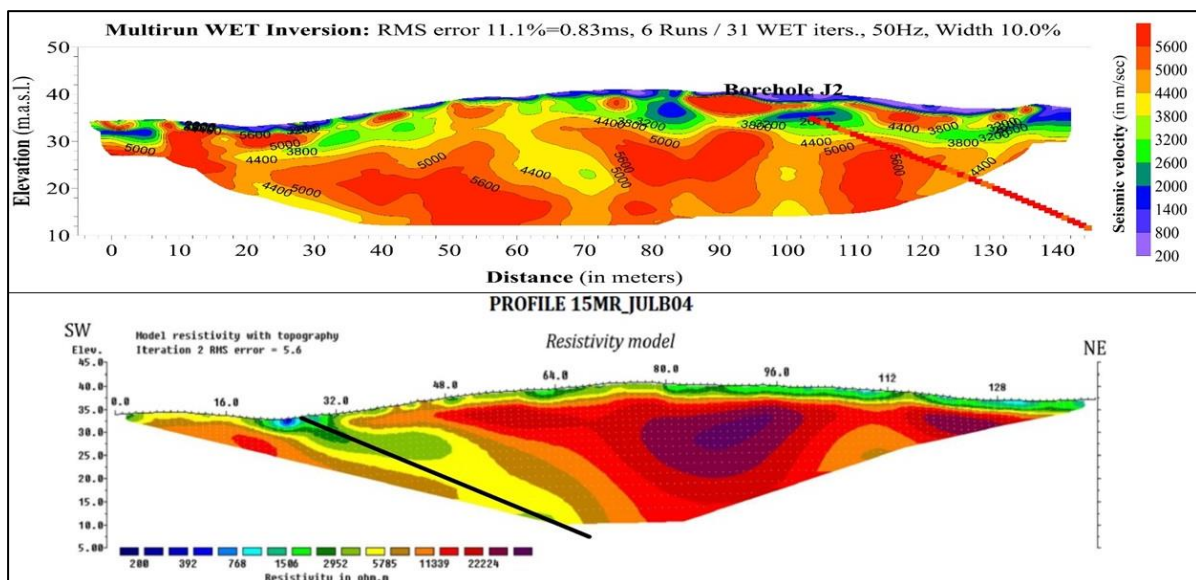
NGUs tomografiske inversjon langs profil **JUL19-01** (Figur 31) viser en lavhastighets-sone med hastighet lavere enn 3400 m/s som strekker seg ned til ca. 25 m.o.h. ved posisjon 30. Denne faller sammen med en tolket svakhetssone ved resistivitetsdata fra profilet 15MR_JulB01 som er målt tilnærmet langs samme linje (Ruden 2015a). Denne sonen viser et klart lavere resistivetsnivå (3000 til 5000 Ωm) enn i profilet ellers, og sonen indikerer et fall mot sørvest (se Figur 26). Ifølge tolkingsmodell fra NGU (Rønning et al. 2013) kan dette være en ren oppsprekking uten leiromvandling, men det må samtidig påpekes at sonen ligger mot enden av profilet der datadekningen er mindre og usikkerheten i tolkingen desto større.

Resistivitetsprofilet viser også lave resistivetsverdier på dypet sentralt i profilet. Dette ble det ikke fokusert på ved NGUs re-tolking av geofysikken fra Julbøen (Rønning et al. 2019a). En ser nå at dette lave resistivetsområdet faller delvis sammen med lave p-bølgehastigheter (< 3800 m/s). Hva dette betyr ingeniørgeologisk er uklart, det kan være en kunstig effekt da det her indikeres hastighetsinversjon.

Refraksjonsseismikken indikerer også en sone med lav hastighet mot slutten av profilet. Resistiviteten antyder også her lavere resistivitet, men på grunn av dårlig datadekning ved begge metoder er denne mer usikker.

NGUs **tomografiske inversjon** av refraksjonsseismikken langs profil **JUL19-04** og resistiviteten tilnærmet langs samme profil indikerer begge løsmassetykkelse fra 0 til ca. 2 m (Figur 32). Refraksjonsseismikken indikerer lave hastigheter i berg ned til fra 5 til 8 meter langs store deler av profilet. Lavhastighetsområdet mellom posisjonene 30 og 50 ser ut til å falle sammen med en svakhetszone indikert på resistivetsdata. Forløpet mot dypet avviker, og dette kan skyldes to forhold. Tomografisk inversjon av refraksjonsseismikk er ikke spesielt god på å detektere svakhetssoners fall (Tassis et al. 2017), og resistivetsprofilen ligger på flanken av profilet der datadekkingen er dårlig. Det er imidlertid sammenfallende anomalier i området som begge indikerer dårlig bergmassekvalitet.

Den generelle lave p-bølgehastigheten i resten av profilet har ikke en tilsvarende lav resistivitet. Dette kan skyldes at berget er drenert og at resistiviteten derved feilaktig kan indikere god bergmassekvalitet.



Figur 32: NGUs tomografiske inversjon av refraksjonsseismisk profil JUL19-04 (øverst) med borehull J2 og resistivetsprofil (Ruden 2015a) tilnærmet langs samme profil. Sort strek i resistivetsprofil representerer tolket svakhetszone.

Konklusjon

Bergmassekvaliteten ved Julbøen er allerede undersøkt med boringer og borehullslogging (Ruden 2015b) og bergkvaliteten ved disse boringene er ikke urovekkende. Geofysikken viser imidlertid at dette kan skifte hurtig, og dårligere bergmassekvalitet indikeres lokalt. Forfatterne av denne rapporten mener at årsaken til sammenfallende lav p-bølgehastighet og lav resistivitet må undersøkes nærmere for å se om dette kan ha en betydning for stabiliteten i området kablene til hengebrua skal forankres.

8. DISKUSJON

Dette arbeidet vurderer kvalitet på seismikkens mulighet til å påvise og karakterisere svakhetssoner i berg samt kvaliteten av beregnet dyp til berg og karakterisering av løsmassene.

8.1 Påvising og karakterisering av svakhetssoner

NGU har gjennom flere år arbeidet med påvising og karakterisering av svakhetssoner i berg med refraksjonsseismikk. Det er naturlig at erfaringer fra arbeid med «E39 Kryssing av Romsdalsfjorden» sees i lys av dette.

8.1.1 Tidligere erfaringer.

NGU har tidligere utført modellering med bruk av syntetiske data for å studere hvilken inversjonsprosedyre i programmet Rayfract som gir det beste resultat for påvising og karakterisering av svakhetssoner i berg (Tassis et al. 2017 og 2018). I dette arbeidet har NGU benyttet de fleste muligheter for generering av en startmodell for den tomografiske inversjonen (se Figur 4). Arbeidet konkluderer med at antatt beste prosedyre for påvising av og karakterisering av svakhetssoner i berg er å benytte en startmodell beregnet med Hagedoorns pluss-minus-metode, at selve inversjonen utføres som «Multi-run Gradient Conjugate» og med «Cosine Squared» vektning og det bør benyttes minimal glatting. Alle profilene NGU har invertert i foreliggende arbeid er tolket med denne prosedyren. Noen profiler er også invertert med andre prosedyrer. Disse arbeidene viser at startmodellen beregnet med Hagedoorns metode, kan være en god selvstendig tolking på linje med manuelle tradisjonelle tolkinger.

Startmodeller beregnet med 1D gradient-modell og metoden DeltatV gir ikke så gode inversjoner for påvising og karakterisering av svakhetssoner i berg (Tassis et al. 2017 og 2018, Rønning et al. 2020). Tre profiler fra Vik er likevel tolket med denne metoden, men først og fremst for å vurdere metoden ved tolking av dyp til berg og karakterisering av løsmassene.

NGUs erfaring tilsier at dersom en benytter startmodeller for inversjonen som ikke fanger opp hastighetsvariasjoner i berg, vil metoden ikke gi noe godt bilde av svakhetssoner. Selve inversjonen utfører bare justeringer på startmodellen. En kan si at den endelig tomografiske inversjonen ofte arver og videreforedler strukturene i startmodellen. Dette er nok grunnen til at startmodeller beregnet med 1D gradient startmodell og metoden **DeltatV** ikke gir så gode bilder av svakhetssoner i berg. Sistnevnte er dessuten best på lange profiler (> 500 m) og der det er gradvise overganger i hastigheter mot dypet slik at prinsippet med «diving waves» (Gebrande & Miller 1985) kan benyttes. En modell med en skarp overgang fra løsmassehastigheter mindre enn 2500 m/s til berghastigheter som oftest er større enn 4500 m/s er ikke en god modell for DeltatV-metoden.

Ved **Hagedoorns** metode kan en benytte manuelt plukket knekkpunkter («Branch points») slik en gjør ved tradisjonelle tolkinger av refraksjonsseismikk. Med mange skuddpunkt og tett geofonavstand, som kreves ved tomografisk inversjon, kan dette være en tidkrevende prosess. Dette arbeidet kan effektiviseres ved en halvautomatisk prosess der en velger «midpoint breaks» (Intelligent Resources 2019a). NGUs modellering har vist at halvautomatisk plukking av «midpoint breaks» kan gi relativt gode tolkinger (Tassis et al. 2018, Rønning et al. 2020). Dette arbeidet viste også at når en først har plukket knekkpunkter eller «midpoint breaks», er det raskt å beregne en startmodell med metoden «Wavefront». Dette gav også gode bilder av syntetiske svakhetssoner, men ikke så gode som ved startmodell fra Hagedoorns metode (Tassis et al. 2018).

Tradisjonelle lagdelte tolkinger med Hagedoorns metode, har lenge vært benyttet for påvising og karakterisering av svakhetssoner i berg i Norge. Sonenes interne p-bølgehastighet benyttes ofte for karakterisering av bergmassekvalitet (Tabell 3). Enkelte forskere har til og med formalisert bruken av p-bølgehastigheten for bestemmelse av Q-verdi (Barton 2007). To masteroppgaver ved NTNU fra 2013 viser at det kan være en relativt klar sammenheng mellom p-bølgehastighet i en svakhetszone og Q-verdi bestemt på logging av kjerner fra borerer gjennom sonene (Eidesen 2013, Gjelsnes 2013). Den tradisjonelle tolkingen benyttes derfor som en referanse for sammenligningen med andre tolkingemetoder.

8.1.2 Erfaringer i dette prosjektet

I dette kapitlet diskuteres evnen de forskjellige tolkingene for refraksjonsseismikk har for påvising og karakterisering av svakhetssoner i berg.

Påvising av svakhetssoner.

Ved de analyserte profilene fra «E39 Krysning av Romsdalsfjorden» (se Tabell 4) indikerer IMPAKTs **tradisjonelle lagdelte tolkinger** 19 svakhetssoner. P-bølgehastigheten i sonene ved de tradisjonelle tolkingene varierer fra 2400 m/s (ekstremt dårlig bergmassekvalitet) til 4380 m/s (dårlig bergmassekvalitet), og representerer en god spredning i bergmassekvalitet. NGUs tolkinger indikerer alle disse sonene unntatt sone Vik1904-2 og i tillegg indikeres fire soner som ikke påvises ved IMPAKTs tradisjonelle tolking. Sone Vik1904-2 er tolket tradisjonelt som en 35 m bred sone med en hastighet på 4500 m/s og indikeres derved som en usikker sone. Ved NGUs tolkinger er hastigheten i denne sonen klart over 4750 m/s som tolkes som god til middels bergmassekvalitet. Ved sone Vik 1903-1 er det ikke angitt noen berghastighet ved IMPAKTs tradisjonelle tolkinger. Sone Vik1903-2 har ved den tradisjonelle tolkingen p-bølgehastighet 4980 m/s og tolkes derfor ikke som svakhetszone, men sonen indikeres klart ved NGUs **Hagedoorntolking** (hastighet 4250 - 4500 m/s, tabell 4). Sonene P05-3 og P05-4 indikeres som relativt brede klare soner med hastigheter i intervallet 4000 til 4500 m/s både på Hagedoorntolkingen og på den tomografiske inversjonen. Dette indikerer at automatisk påvising av svakhetssoner ved bruk av programmet Rayfract, kan være vel så effektivt som de tradisjonelle lagdelte tolkingene, i alle fall ved de geologiske betingelser en har ved Vik.

NGUs **automatiske tolking med Hagedoorns metode**, som egentlig er ment som en startmodell for tomografisk inversjon, gir gode bilder av mulige svakhetssoner, og evnen til å påvise soner synes god. Disse tolkingene er i prinsippet det samme som IMPAKTs tradisjonelle lagdelte tolkinger og er derfor sammenlignbare.

NGUs **tomografiske inversjon** gir respons på alle sonene kartlagt med IMPAKTs tradisjonelle lagdelte tolking unntatt ved tre tilfeller. Sonen kalt VIK1903-2 ligger helt på enden av profilet, og ved den tomografiske inversjonen faller den utenfor hastighetsprofilet fra inversjonen. Sonene P01-1 og P01-3 fremstår ved tradisjonelle tolkinger begge som 10 m brede soner med mindre hastighet henholdsvis 3700 m/s og 3660 m/s (svært dårlig bergmassekvalitet). Ved NGUs Hagedoornstolking fremstår P01-1 som en bred sone der hastigheten ligger i intervallet 4500 m/s til 4750 m/s, mens sone P01-3 viser en hastighet større enn 5000 m/s og kan derved ikke karakteriseres som svakhetszone (se Figur 10). Begge disse sonene fremstår som grunne soner i det tomografiske hastighetsprofilet. Harald Westerdahl (2003) viste at en forsenkning på 10 m i bergoverflaten lett kunne tolkes som en svakhetszone med meget lav p-bølgehastighet. Nylig gjennomført modellering (Rønning & Tassis 2020) viser også at «svakhetssoner» som ved Hagedoorns metode fremstår som vertikale soner med stor utstrekning mot dypet, kan få et grunnere forløp ved den tomografiske inversjonen. Dette viser at den tomografiske inversjonen i praksis kan signalisere om at en indikert svakhetszone ved Hagedoorns metode bare kan være en fordypning i bergoverflaten og derved en kunstig effekt.

NGUs tolkinger med DeltatV metoden viste hastighetsprofiler hvor det var vanskelig å lokalisere svakhetssoner. Det ble imidlertid indikert en sone som viste et klart fall. Dette er en interessant observasjon som bør følges opp ved fremtidige undersøkelser, og ved tunneldrivingen. Tidligere arbeider med Hagedoorns metode (Tassis et al. 2017, Rønning et al. 2019b og c) har vist at tolking av svakhetssoners fall kan være en utfordring.

IMPAKTs tomografiske inversjon med program fra Geogiga viser ingen klare indikasjoner på svakhetssoner i berg. Årsaken til dette er at en ved disse inversjonene ble fokusert på løsmassenes tykkelse og ikke på påvisning av svakhetssoner og prosedyre for glatting ble valgt ut fra dette. En kan imidlertid ikke se bort fra at valg av 1D gradient startmodell (se Figur 3) også påvirker muligheten til å påvise svakhetssoner. NGUs modelleringer har vist at det er vanskelig å få klare bilder av svakhetssoner i berg med en 1D gradient startmodell, og spesielt med relativt stor avstand mellom geofonene (5 m) og relativt få skudd (Tassis et al. 2018).

Karakterisering av svakhetssoner

Ved NGUs automatiske tolking med Hagedoorns metode er det individuelle variasjoner i sonenes bredde og p-bølgehastighet. Sonene viser ofte en høyere hastighet enn ved de tradisjonelle tolkingene, og de er ofte bredere ved NGUs tolking. Det kan være gradvise overganger fra høye hastigheter (god bergmassekvalitet) til lavere hastigheter (dårligere bergmassekvalitet) i sonenes sentrum. Det siste er i samsvar med det bildet Braathen og Gabrielsens (2000) gav av forkastningssoner med en kjerne av nedknust materiale («fault gauge») og en gradvis overgang til stadig mindre oppsprukket berg til sidene. Tradisjonelle tolkinger

der sonene gis en fast p-bølgehastighet og bredde er kanskje en noe forenklet modell, men som gir klare tall å arbeide videre med ingeniørgeologisk. NGUs tolking av svakhetssoner i berg viser variasjoner i p-bølgehastighet som kan være mer i overensstemmelse med aksepterte geologiske modeller.

Med den gradvise overgangen i berghastighet både som den automatiske Hagedoorn-tolkingen og den tomografiske inversjonen viser, blir det vanskelig å angi en bestemt hastighet for svakhetssoner slik en er vant med fra tradisjonelle tolkinger. I analysen presentert i Tabell 4 angis sonenes hastighet med et intervall. Ved enkelte soner treffer dette intervallet relativt godt med hastigheten fra den tradisjonelle lagdelte tolkingen, og det samme kan sies om sonenes bredde (Sonene VIK19-02-1, VIK19-02-2, VIK19-02-3, VIK19-04-3, P01-5 og P1-06). Mange soner, spesielt tynne soner med lav hastighet fra den tradisjonelle tolkingen, viser en større bredde og høyere hastighet ved NGUs tolkinger med Rayfract (sonene VIK19-01-1, VIK19-01-2, VIK19-01-3, VIK19-04-1 og P01-2). Sone P01-4 viser nær konstant bredde, men betydelig høyere hastighet ved NGUs Hagedoorn-tolking. Ved den tomografiske inversjonen justeres imidlertid hastigheten mot hastigheten fra den tradisjonelle tolkingen. Selv om Hagedoorn-tolkingen kan gi gode bilder av svakhetssoer, er det likevel viktig å utføre den tomografiske inversjonen for å refusere eventuelle kunstige effekter.

Ved de **tradisjonelle lagdelte** tolkingene gis de enkelte sonene en fast hastighet (trolig en gjennomsnittshastighet) og bredde, og en ingeniørgeologisk karakterisering blir entydig. Ved Rayfract-tolkingene oppgis sonenes hastighet som et intervall, og sonens bredde blir et definisjonsspørsmål. NGU valgte å tolke sonenes bredde som all bergmasse med hastighet lavere enn 4500 m/s. I utgangspunktet ble den sentrale hastigheten i intervallet benyttet som sonens hastighet. Det viste seg at denne ble betydelig høyere enn hastigheten fra den tradisjonelle tolkingen (se Tabell 4). I gjennomsnittlig ble sonehastighet ved **NGUs automatiske Hagedoorn-tolking** ca. 520 m/s høyere enn ved den lagdelte tolkingen. Tilsvarende ble NGUs gjennomsnittlige hastighet i sonene ved den **tomografiske inversjonen** ca. 480 m/s høyere enn ved den tradisjonelle tolkingen. NGU benyttet også minimumshastigheten for intervallet, ved karakterisering av bergmassekvalitet. Hastigheten i sonene ble da justert noe mer mot verdien fra den tradisjonelle tolkingen, men fremdeles lå NGUs Hagedoorn-tolking ca. 400 m/s høyere mens den tomografiske inversjonen ca. 120 m/s høyere. Sonenes individuelle bredde varierte, men i gjennomsnitt ble sonenes totale bredde relativt lik ved de tre tolkingsmetodene (61 m, 66 m og 63 m, Tabell 4). Det er uklart om alternativ horisontal filtrering ved inversjoner med Rayfract vil kunne gi smalere soner og lavere hastigheter i sonene slik tradisjonelle tolkinger gir. Dette er ikke testet ved dette arbeidet, og heller ikke i NGUs siste modelleringsarbeid (Rønning et al. 2020).

Gjennomsnittlig høyere indre hastigheter i sonene påvirker selvsagt bergmasseklassifiseringen. Færre soner ble plassert i bergklasse E (Svært dårlig bergmassekvalitet) ved NGUs automatiske tolkinger sammenlignet enn ved IMPAKTs tradisjonelle lagdelte tolkinger. Ved å benytte hastighetsintervallenes minimumsverdi jevnet dette seg ut (se Tabell 5), og samlet lengde med bergklasse E (svært dårlig bergmassekvalitet) ble betydelig større. Ut fra denne analysen kan det se ut som minimumshastighet i sonenes hastighetsintervall er mest lik den tradisjonelle ingeniørgeologiske karakteriseringen.

NGUs arbeid med tolking av svakhetssoner med tomografisk inversjon viser at det er svært viktig å benytte riktig prosedyre. Karakteriseringen av svakhetssonene (bredde og indre p-bølgehastighet) kan variere fra metode til metode, og dersom en velger å benytte tomografisk inversjon, må den tradisjonelle klassifiseringen av bergmasser ut fra p-bølgehastighet justeres.

Dette arbeidet omfatter et fåtalls svakhetssoner i grunnfjellsbergarter på Nordvestlandet. For å få et bedre bilde av hvordan svakhetssoner fremtrer ved automatiske tolkinger i andre geologisk miljø, må flere tilsvarende analyser utføres. For å kunne avgjøre om de indikerte sonene er reelle, må observasjoner under fremtidig tunneldriving sammenstilles med resultatene fra de refraksjonsseismiske tolkingene slik NGU gjorde for Knappetunnelen i Bergen (Rønning et al. 2019b).

8.2 Tolking av dyp til berg

Tradisjonelt blir usikkerheten ved tolking av dyp til berg ved refraksjonsseismikk angitt som +/- 10 % for dyp større enn 10 m (Sjøgren 1984). Noen aktører angir dette til +/- 15 % (GeoPhysix 2015). Det er uklart hvor mye forskning som ligger bak disse tallene.

For prosjektet «E39 Kryssing av Romsdalsfjorden» var det meget viktig å ha klarhet i kvaliteten ved tolking av dyp til berg. Ved undersjøiske tunneler kreves det en bergoverbygning på 50 meter. Halvparten av dette er nødvendig for å ha mottrykk ved injeksjon, mens den andre halvparten skal ta hånd om usikkerheter i tolkingen av dyp til berg. Dersom usikkerheten i dybdetolkingen kan reduseres, kan tunnelen heves og ofte kan da total tunnellengde reduseres, noe som gir reduserte kostnader.

I det følgende blir kvaliteten av tolket dyp til berg ved IMPAKTs refraksjonsseismiske tolkinger, NGUs refraksjonsseismiske tolkinger og FUGROs refleksjonsseismiske tolkinger diskutert.

8.2.1 IMPAKTs refraksjonsseismiske tolkinger

IMPAKTs første tradisjonelle lagdelte tolkinger med Hagedoorns metode ved Vik, viste et for stort dyp til berg (128 % i gjennomsnitt) ved sammenligning med relativt sikker angivelse av bergoverflate fra boringer. Mindre soner med lav hastighet i løsmassene dagnært ble oversett. De store avvikene skyldes delvis at boringene ble foretatt der tolkingene viste størst dyp til berg. Da dette ble oppdaget og tatt hensyn til ved tolkingen, ble kvaliteten i tolket dyp til berg noe bedre, men fremdeles et for stort gjennomsnittlig dyp til berg (116 %) og spredningen relativt stor (standardavvik på 32 %). Det kan se ut som om usikkerheten i **tradisjonelle lagdelte tolkinger** kan være noe større enn det som ofte blir angitt. Denne usikkerheten i tolkingen av dyp til berg, ville gjort det vanskelig å få godkjent en heving av tunnelen under Romsdalsfjorden.

IMPAKTs **kombinerte tolking**, som ikke avviker så mye fra den tomografiske inversjonen, viste en betydelig bedre presisjon. I gjennomsnitt var tolket dyp til berg

97 % av den relativt sikre påvisingen ved 17 boringer ved Vik, men spredningen var relativt høy (standardavvik på 13 %). Ved denne tolkingen ble det benyttet en 1D gradient hastighetsprofil som startmodell. Her legges ingen føringer for inversjonen, metoden er automatisk, og en kan få et godt uhildet bilde av dyp til berg. Ulempen med denne metoden er at det endelige tomografiske inverterte hastighetsprofillet også har en gradvis overgang i hastigheter, og bildet må tolkes. IMPAKT Geofysik har god erfaring med denne type tolking, og det har vist seg at konturen for hastighet lik 3000 m/s er en god indikasjon på dyp til berg. Senere modellering (Rønning et al. 2020) har imidlertid vist at riktig hastighetskontur avhenger av geologisk modell. Et lag med høyere hastighet i «blind-sone» kan ikke påvises med refraksjonsseismikk, og beste hastighetskontur som indikator for dyp til berg øker med lagets tykkelse.

Ved NGUs tomografiske inversjon for påvising av svakhetssoner i berg, så en ofte at inversjonen ikke endret så mye på startmodellen. Dersom det gjøres feil ved genereringen av en startmodell, blir denne arvet i den tomografisk inverterte modellen. Ved å benytte en 1D gradient startmodell, blir inversjonen friere og en unngår en uheldig arv av feiltolkinger. Dette gjør at en fri tomografisk inversjon er uhildet, og kan fange opp svakheter i tradisjonelle tolkinger som hastighetsinversjon og blindsoner (Reynolds 2011). Som en del av tolkingen av refraksjonsseismiske data bør det foretas inversjon med forskjellig prosedyre for på denne måten avdekke usikkerheter i tolkingen.

8.2.2 NGUs refraksjonsseismiske tolkinger

NGUs tolkinger av dyp til berg ved profil Vik19-01 viste relativt gode resultater. Både **Hagedoorns metode** og tre varianter med **tomografisk inversjon** viste at dyp til berg ved åtte boringer lå i gjennomsnitt innenfor +/- 5 % av sikker dybdeangivelse noe som må karakteriseres som bra. Men, også her var spredningen stor, et standardavvik på 10-12 %.

NGUs første tolking av profilene Vik19-02, -03 og -04 viste imidlertid et dårligere resultat. Ved disse profilene ble tolket dyp til berg med Hagedoorns metode i gjennomsnitt 18 % høyere enn ved de 7 boringene som alle lå innenfor 4 m fra tolket dyp. Tomografisk inversjon med minimal glatting arvet denne usikkerheten og her ble tolket dyp i gjennomsnitt 17 % høyere. Ved begge tolkingene var spredningen stor (standardavvik 23 – 24 %). Disse tolkingene gir ikke en tilfredsstillende nøyaktighet, og er langt utenfor tradisjonell angitt usikkerhet (+/- 10%).

Ved generering av startmodell med **Hagedoorns metode**, ble det her benyttet semi-automatisk plukking av «mid-point breaks» og ikke tradisjonelle tolking av knekkpunkter i gangtidsdiagrammene. Ved denne metoden kan prosessen påvirkes ved valg av enkelte parametre. Med utgangspunkt i sikkert dyp fra boringene, ble parametrene justert til en fant en god tolking. Dette betyr at **resultatet fra boring ble benyttet til å finne den rette prosedyre for plukking av «mid-point breaks»**. Med denne fremgangsmåten var det mulig å komme frem til meget gode tolkinger av dyp til berg. Hagedoorns metode viste et treff på 100 %, og ved den tomografiske inversjonen med minimal glatting var treffprosenten 99 %. Fremdeles var det en viss spredning på resultatene (standardavvik på 7 %). Med en større glatting (versjon 2b i tabell 9B) ble gjennomsnittlig dyp til berg tolket til 96 % av dyp fra boring med et noe

større avvik (standardavvik 9,2 %). Denne øvelsen gav NGU verdifull erfaring med hvordan den automatiske plukkingen av «midpoint breaks» bør utføres, en erfaring som kan benyttes ved senere tolkinger.

En sammenstilling av NGUs beste tolkinger som alle ligger i en avstand mindre enn 4 m fra nærmeste boring, er vist i tabell 10. Ved 15 relativt sikre boringer er gjennomsnittlig tolket dyp til berg på 102 % av dypet fra boringen og med et standardavvik på 10%. Dette gjelder både for tolkingen med Hagedoorns metode og tomografisk inversjon med minimal glatting. Dette viser at det er mulig å komme frem til relativt presise tolkinger av dyp til berg med programmet Rayfract, men **en må vite eksakt hvordan dette skal gjøres.**

NGUs tolking med **Hagedoorns metode** viste en meget skarp overgang fra løsmassehastigheter mindre enn 2500 m/s til berghastigheter større enn 4500 m/s. Denne skarpe kontrasten ble arvet ved den tomografiske inversjonen der det ble benyttet minimal glatting. Dette letter selvsagt tolkingen av dyp til berg, men samtidig bevares også eventuelle feiltolkinger ved genereringen av startmodell. Sistnevnte kan kontrolleres ved å benytte en 1D startmodell slik IMPAKT gjorde, da dette gir en helt uhildet tolking. NGUs tolkinger av dyp til berg med DeltatV-metoden, som også benytter en automatisk beregnet 1D startmodell, viste imidlertid ikke noe bedre tolkinger av dyp til berg ved Vik enn det Hagedoorntolkingene viste. **Hagedoorns metode, som viste seg å være best ved påvising og karakterisering av svakhetssoner i berg, kan derfor like gjerne benyttes ved tolking av dyp til berg.** Store avvik mellom de forskjellige tolkingemetodene kan være et signal om en komplisert geologi, og det kan derfor være smart å utføre flere alternative tolkinger.

8.2.3 FUGROs refleksjonsseismiske tolkinger

Ved FUGROs **refleksjonsseismiske** undersøkelser i Romsdalsfjorden ble det opprinnelig benyttet en konstant hastighet i løsmassene på 1600 m/s ved dybdekonverteringen (FUGRO 2018a). IMPAKTs **refraksjonsseismiske** målinger viste klare reflektorer, og data ble derfor også benyttet til refleksjonsseismikk (IMPAKT 2020). Hastighetsanalyser viste at en konstant hastighet på 1600 m/s var for lavt. Dette gjorde at bergoverflaten ved FUGROs målinger ble tolket for grunt.

Forsøk på en hastighetsanalyse med FUGROs data må sies å være mislykket da en her kom fram til for store hastigheter og derved for store dyp til berg (Tabell 11). Ved å benytte gjennomsnittlig hastighetsprofiler fra IMPAKT sine målinger på FUGRO sine måldata, kom en fram til meget gode tolkinger av dyp til berg. I gjennomsnitt var tolket dyp til berg mindre enn 104 % av dypet ved åtte boringer, og standardavviket var på 2,9 %. Dette representerer derfor den sikreste tolkingen av dyp til berg ved undersøkelsene ved prosjektet «E39 Kryssing av Romsdalsfjorden».

Årsaken til at det ble benyttet feil hastigheter ved dybdekonverteringen er todelt. I bestillingen fra Statens vegvesen ble det sagt at en konstant hastighet på 1500 m/s skulle benyttes. Dette endret FUGRO til 1600 m/s ut fra opplysninger fra nærområdet (FUGRO 2020b). FUGROs egen hastighetsanalyse ble unøyaktig på grunn av at deres hydrofonkabel ikke var lang nok for gode hastighetsanalyser. For å kunne

gjøre gode hastighetsanalyser bør relasjonen nedenfor være oppfylt (Prof. ved NTNU, Martin Landø, personlig meddelelse):

$$X^2/h^2 > 0,8$$

X er her hydrofonkabelens lengde og h er dyp ned til reflektor. FUGROs hydrofonkabel var 150 m lang og ble slepet i sjøoverflaten. Med et sjødyp på 170 m og løsmasse-tykkelse på ca. 100 m blir relasjonen ovenfor lik 0,32. IMPAKT's hydrofonkabel var 350 m lang og denne ble lagt på sjøbunnen. Med denne geometrien blir relasjonen ovenfor lik 2,7 og gode hastighetsanalyser kunne utføres.

Det en kan lære ut fra dette er at den geofysiske konsulenten må benytte utstyr som gjør det mulig å utføre gode hastighetsanalyser under de rådende forhold. Dette MÅ være konsulentens ansvar. I tillegg må utbygger bestille refleksjonsseismikk der det skal benyttes korrekte hastighetsprofiler ved konvertering tovegs gangtid til dyp.

8.3 Karakterisering av løsmasser

I Norge er det lange tradisjoner for karakterisering av løsmasser ut fra p-bølge-hastighet. Korrekte løsmassehastigheter er også avgjørende for korrekt tolking av dyp til berg.

8.3.1 Karakterisering av løsmasser ved refraksjonsseismikk

Karakterisering av løsmasser er viktig i mange sammenhenger og spesielt ved kryssing av fjorder med undersjøiske tunneler. Ofte kan løsmasstype tolkes ut fra p-bølgehastigheten i løsmassene. Hva for materialer løsmassene består av, er avgjørende for vurdering av vanninntrengning i undersjøiske tunneler og ved et eventuelt ras i en svakhetszone kan løsmasstypen ha avgjørende betydning for rasets utvikling. Lærebøker og forskjellige aktører oppgir delvis forskjellige hastigheter i de forskjellige geologisk materialene. Tabell 15 viser p-bølgehastigheter i noen løsmasstyper og bergarter, erfaring som er opparbeidet gjennom mer enn 60 år med refraksjonsseismikk ved NGU, men som også stemmer med data fra andre aktører.

Tabell 17: P-bølgehastighet i noen løsmasstyper og ikke oppsprukne bergarter (NGUs nettsider).

Jordarter	P-bølgehastighet (m/s)	Bergarter, ikke oppsprukket	P-bølgehastighet (m/s)
Torv	150 – 500	Sandstein	3000 – 3500
Leire (tørr)	600 – 1200	Kalkstein	4000 – 6000
Sand (tørr)	400 – 900	Dolomitt	2500 – 6500
Grus (tørr)	400 – 1000	Kvartsitt	5500 – 6000
Morene (tørr)	400 – 1600	Granitt	4800 – 5500
Leire (vannmettet)	1200 – 1600	Gneis	4700 – 5800
Sand (vannmettet)	1400 – 1800	Diabas	5700 – 6500
Grus (vannmettet)	1400 – 1900	Gabbro	6200 – 6700
Morene (løs)	1500 – 1900	Ultramafisk	6500 – 7500
Morene (hard)	1900 – 2800		

Korrekt bestemmelse av lydhastigheten i løsmassene er selvsagt også meget viktig for bestemmelse av dyp til berg. Ved IMPAKTs første lagdelte tolking ved Vik ble små lommer med lave hastigheter oversett, noe som resulterte i for store dyp til berg. Dette ble oppdaget og rettet opp, noe som gav bedre tolkinger av dyp til berg.

Det finnes imidlertid situasjoner der det er fysisk umulig å oppdage uheldige hastighetsvariasjoner. Ved såkalt **hastighetsinversjon**, lav hastighet i et lag under et lag med høyere hastighet, vil en ikke ved tradisjonelle tolkinger kunne påvise dette, og tolking av dyp til berg blir for stor. I noen tilfeller kan hastigheten være økende mot dypet, men et lag kan likevel ikke påvises fordi det vil være raskere å gå ned til et underliggende lag med enda større hastighet. Laget kan ligge i en **blindson**e og blir ofte kalt blindsonelag. I slike tilfeller blir løsmasselag ikke avdekt og dypet til berg tolket for lite. Ved begge disse fenomenene blir det umulig å tolke løsmassetype. En annen konsekvens er at usikkerheten ved angivelse av dyp til berg kan bli større enn +/- 10 % som ofte benyttes (Sjøgren 1984).

Tolking av hastigheter i løsmassene viser store variasjoner både på land og ved målinger i sjøen ved undersøkelsene som her rapporteres. Dagnært på land ved Vik opptrer hastigheter i intervallet 300 – 700 m/s ved IMPAKTs tradisjonelle tolking. Dette tolkes gjerne som tørre løsmasser (Profil Vik19-04). Under dette indikeres stedvis hastigheter opp mot 2250 m/s ved IMPAKTs tradisjonelle lagdelte tolkinger, noe som tolkes som hardpakket morene. Ved NGUs tolkinger med Hagedoorns metode indikeres hastigheter fra ca. 2000 m/s til ca. 2500 m/s med vertikale intervallgrenser i samme området, og det er en skarp overgang fra rene løsmassehastigheter (< 2500 m/s) til rene berghastigheter (> 3500 m/s). NGUs tomografiske inversjon indikerer at de høyeste hastighetene kan ligge i lommer med hastighetsgradienter både horisontalt og vertikalt, men også her er overgangen fra løsmassehastigheter til berghastigheter skarp. Hastigheter godt over 2000 m/s tolkes gjerne som hard morene (bunnmorene), noe som også ved Vik er forenlig med påvising av mye blokker i løsmassene ved boring.

Ved **IMPAKTs tomografiske inversjon** er det en mer gradvis overgang fra rene løsmassehastigheter til klare berghastigheter. IMPAKT velger å benytte hastighetskonturen 3000 m/s som indikator for bergoverflaten. Dette betyr at løsmasser kommer ut med hastigheter oppunder 3000 m/s noe som tradisjonelt har vært svært uvanlig. Dette viser en dårligere evne til å karakterisere løsmassene ut fra seismisk hastighet ved denne tomografimetoden. Effekten er også demonstrert ved modellering av syntetiske data (Sheehan et al. 2005, Tassis et al. 2018, Rønning et al. 2020).

NGUs tolking med startmodell beregnet med **DeltatV-metoden** viser også en gradvis overgang fra rene løsmassehastigheter, både ved startmodellen og ved den tomografiske inversjonen (Figur 17 og Vedlegg 3). Også her får en hastigheter opp mot 3000 m/s rett over berg, og dette gir et falskt bilde av løsmassehastigheten. I praksis vil det ved denne tolkingemetoden og IMPAKTs tomografiske inversjon være vanskelig å få noen klar oppfatning av p-bølgehastigheten umiddelbart over berg og karakterisering av løsmassene blir vanskelig.

Sør for Tautra ute i Romsdalsfjorden (Profilene P01 og P02, Figurene 10, 11 og 12) viser jevnt over løsmassehastigheter godt **over 2000 m/s ved alle de fire tolkingsmetodene av refraksjonsseismikken**. Dette tolkes som morene, noe som er i overensstemmelse med FUGROs overflatetolkinger av batymetrien (FUGRO 2018a). Boring med lettere utstyr i dette området mislyktes på grunn av svært harde masser (Arne Kavli, ikke rapporterte data) og dette bekrefter morenemasser. I dette tilfellet kan alle de anvendte tolkingsmetodene av refraksjonsseismikken benyttes til karakterisering av løsmassene.

Nord for Tautra viser **IMPAKTs tradisjonelle tolking** av profil P05 (Figurene 13 og 14) løsmassehastigheter jevnt over i intervallet 1530 m/s til ca. 1800 m/s. Dette er klart lavere enn sør for Tautra og indikerer andre løsmassetyper, trolig marine finkornige fjordavsetninger (silt og leire). Stedvis finnes hastigheter rundt 2000 m/s og i enkelte tilfeller opp mot 2200 m/s spesielt mot nord (stigende posisjon). Dette indikerer at en også her kan finne hardere bunnmorene over berg, og at denne ligger i blindsoner der løsmassetykkelsen er størst.

NGUs Hagedoorn-tolkinger langs profil P05 (0 – 875 m Figur 13 og 909 – 1474 m Figur 14) viser hastigheter fra 1750 m/s til 2000 m/s i første delen av profilet, deretter 2000 – 2250 m/s og til slutt et lite parti hvor hastigheten er større enn 2250 m/s. Dette avspeiler en tilsvarende trend som ved IMPAKT's tradisjonelle tolking, men er lite nyansert. Ved NGUs tomografiske inversjon nyanseres bildet noe. I det første partiet (posisjon 0 – 580 m) indikeres en hastighetsinversjon med hastigheter større enn 1750 ved sjøbunnen og hastigheter mindre enn 1750 m/s under dette. Fra posisjon 580 indikeres hastigheter delvis større enn 2000 m/s øverst og stedvis hastigheter større enn 2250 m/s under dette. Modellering har vist at indikert hastighetsinversjon ved tomografisk inversjon kan være en falsk effekt (Rønning et al. 2020).

IMPAKTs tomografiske inversjon indikerer hastigheter lavere enn ca. 1800 m/s øverst og hastigheter betydelig høyere enn dette (> 2000 m/s) under dette (Figur 13). Tykkelsen av «lavhastighetslaget» synes å variere langs profilet. Som tidligere diskutert vil en ved denne tomografiske inversjonen få usannsynlig høye hastigheter i løsmassene rett over berg, dette på grunn av den gradvise økningen av hastigheten ned mot berg.

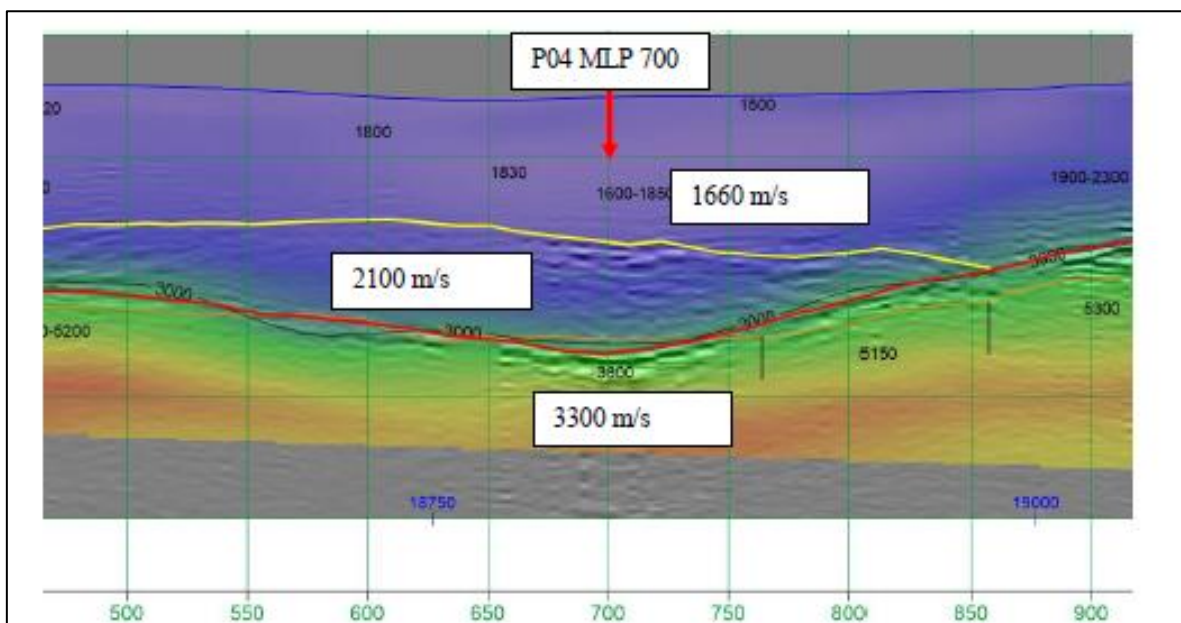
8.3.2 Karakterisering av løsmasser ved refleksjonsseismikk

IMPAKTs hastighetsanalyser basert på refleksjonsseismikk viste et konsistent datasett. Analyser på 13 punkter langs Profilene P04, P05 og P06 (Vedlegg 4, se også Figur 20) viste en gjennomsnittlig hastighet på 1660 m/s deretter 2063 m/s under dette og et siste lag med hastighet 2188 m/s over berg. Det første av disse tre kan tolkes som finkornige marine fjordavsetninger mens de to siste gjerne tolkes som morene. Påliteligheten til disse tolkingene forsterkes ved en meget god kvalitet på refleksjonsseismikken langs profil P04 (Figur 29) og P05 (Figur 20) men også de andre profilene nord for Tautra, P04 og P06 (IMPAKT 2020).

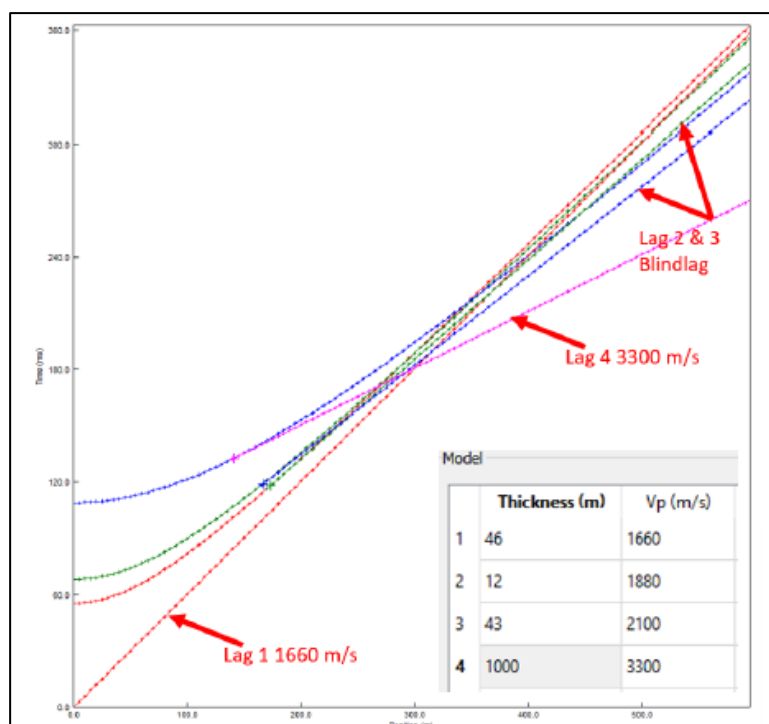
Ingen av de refraksjonsseismiske tolkingene var i stand til å fange opp de klare hastighetsvariasjonene som refleksjonsseismikken viste nord for Tautra. Årsaken til

dette er at morenelaget ligger som en blindsoner. Ved refleksjonsseismikk er det mulig å avdekke problemene med hastighetsinversjon og blindsoner, og metoden kan derfor bidra til bedre materialkarakterisering enn det refraksjonsseismikken kan.

Hastighetsfordelingen ved punkt MLP700 i Figur 33 er modellert i Figur 34 (fra IMPAKT 2020). Her er det kartlagt 46 m med hastighet 1660 m/s (lag 1) over 12 m med hastighet 1880 m/s (lag 2), over 43 m med hastighet 2100 m/s (lag 3) som igjen ligger over berg med hastighet 3300 m/s (lag 4, hastighet fra refraksjonsseismikk). Første ankomster i starten vil være en direktebølge i lag 1, og etter dette vil refraksjoner fra lag 4 (berggrunn) komme først til registreringsenhetene. Lagene 2 og 3 ligger begge i blindsoner. Den totale løsmassetykkelsen her er 101 m, mens tykkelsen av blindsonelagene (lag 2 og lag 3) er 55 m. Dersom hastigheten i berggrunnen er større enn dette vil lag med enda større tykkelse falle i blindsoner.



Figur 33: IMPAKT's kombinerte tolking av seismikken langs deler av Profil P04. Tradisjonelle tolkinger langs profilet er angitt med gulbrun strek og sorte tall, tomografiske inversjon i farger og refleksjonsseismikk i gråtoner og med laghastigheter i hvite bokser. Rød strek angir en kombinert tolking av dyp til berg. Gul strek angir tolket topp av morene. Hastighetsprofilet ved MLP700 modelleres i Figur 30.



Figur 34: Modellering, utført av IMPAKT, av førsteankomster ved blindsonelag. Lagene 2 og 3 ligger begge i blindsoner og kan ikke identifiseres ved refraksjonsseismikk som utelukkende benytter første ankomne impulser.

Denne blindsoneproblematikken forklarer delvis det uryddige hastighetsforløpet som refraksjonsseismikken viser nord for Tautra. For det meste ligger morenelaget som en blindsoner, men enkelte steder kan tykkelsen av overliggende fjordavsetninger med lavere hastighet (ca. 1660 m/s) være mindre slik at morenelaget over berg kan påvises bl.a. nordlige del av P05. Sør for Tautra er dette ikke noe problem da morenelaget med hastighet større enn 2000 m/s går helt opp til sjøbunnen.

Denne modelleringen (Figur 34) viser også at for å kunne få refraksjoner fra bergoverflaten ved alle registreringsenhetene, må fjernskuddene plasseres minst 300 m fra nærmeste registreringsenhet med denne løsmassefordelingen. Dette er i samsvar med tradisjonelle tommelfingerregel om at fjernskudd må ligge minst tre ganger løsmassetykkelsen fra nærmeste registreringsenhet, noe også nyere modellering har vist (Rønning et al. 2020).

Konklusjon

Refraksjonsseismikk kan i mange sammenhenger benyttes til å karakterisere løsmassene, men ikke alltid. Morenemateriale i blindsoner kan aldri bli avdekket ved tradisjonelle tolking. Ved tomografisk inversjon kan overgang mellom klare løsmassehastigheter (< 2500 m/s) og klare berghastigheter (>3500 m/s) komme i en hastighetsgradient som gjør korrekt avlesning av hastighet i materialet vanskelig. Refleksjonsseismikk gav i dette tilfellet den klart beste mulighet til å finne korrekte hastigheter i ulike løsmassetyper.

8.4 Tomografi mellom sjøbunnen og borehull

Ved prosjektet «E39 Kryssing av Romsdalsfjorden» er det foretatt tomografi mellom sjøbunnen og tre borehull. Ved to tilfeller ble det skutt i borehullene, noe som førte til kollaps i berget og manglende datadekning. Ved det tredje borehullet ble skuddene plassert på sjøbunnen og hydrofonene i borehullet. Dette bedret datadekningen betraktelig, men likevel viste inversjonen for høye hastigheter i løsmassene og for lave hastigheter i berg. Sistnevnte indikerte svært dårlig bergmassekvalitet i en total lengde på ca. 1000 m noe som er svært lite sannsynlig, ikke i samsvar med tradisjonelle refraksjonsseismiske tolkninger og heller ikke i samsvar med logget bergmassekvalitet på kjernematerialet. For å kunne bedre kvaliteten på disse undersøkelsene må trolig løsmassenes tykkelser og hastigheter låses ved inverteringen. Dette var ikke mulig med anvendte programvare GeoTomCG (GeoTom 2017).

Det er også utført tomografi mellom sjøbunn og borehull også ved Nordøyveg-prosjektet lengre ute i Romsdalsfjorden (Geomap 2017b). Også her ble det påvist uoverensstemmelser mellom den tradisjonelle refraksjonsseismikken over borehullene og tomografien mellom sjøbunnen og tre borehull. De første tolkingene stemte på ingen måte med kjerneloggingen. Det ble da konkludert med at avvik i borehullsforløpet kunne være årsak til uoverensstemmelsen. Borehullet var med andre ord ikke avviksmålt. Etter gjentagende justeringer og inversjoner ble det invertert hastighetsprofiler som inne ved land viste normalt høye hastigheter (≈ 5000 m/s), men utover sjøen avtok hastigheten generelt ned til ca. 3500 – 4500 m/s. Flere områder der den tradisjonelle refraksjonsseismikken viste hastigheter over 5000 m/s (god bergmassekvalitet) indikerte tomografien hastigheter ned mot 4000 m/s og enda lavere (dårlig til svært dårlig bergmassekvalitet). Ved de aktuelle undersøkelsene ved Nordøyvegen var løsmassetykkelsen tolket til mindre enn ca. 8 m, og har derved mindre innvirkning på det den tomografiske inversjonen. Løsmassene kom heller ikke klart frem ved tomografien ved Nordøyvegen. Ved utarbeidelse av konkurransegrunnlaget ble det lagt liten vekt på tomografien mellom sjøbunnen og borehullene (Kåre Ingolf Karlson, E-post datert 10.05.2021).

Konklusjon

Tomografien ved borehullene i Romsdalsfjorden, slik den er utført, bidrar ikke til sikker karakterisering av løsmassene, pålitelig tolket dyp til berg og heller ikke en troverdig karakterisering av bergmassen. Det er uklart om alternativ inversjon med låsing av løsmassetykkelser og hastigheter kan forbedre inversjonen av hastighetene i berg da dette ikke er utprøvd.

Heller ikke tilsvarende tomografi ved Nordøyvegen viste pålitelige resultater dette til tross for relativt lite løsmasser. Manglende avviksmåling av borehullene kan være en medvirkende årsak til sprikende hastigheter i berg.

Dersom det skal være mulig å få pålitelige data om løsmasser og bergmassekvalitet ved denne type undersøkelse, må skuddene plasseres på sjøbunnen og det må foretas avviksmåling av borehullene.

8.5 Andre erfaringer

Tolking av dyp til berg langs profil P05 ute i Romsdalsfjorden ble en utfordring for refraksjonsseismikken. Geologien var her komplisert med hurtig skiftende dyp til berg og dette falt sammen med markerte svakhetssoner i berg og i tillegg var batymetrien varierende. Den kompliserte geologien og knekk i batymetrien falt sammen med slutten av ett utlegg og starten på et nytt. I tillegg ble det på grunn av sterke strømmer i sjøen et mindre gap uten registreringer mellom disse to utleggene. IMPAKTs **tradisjonelle tolkinger** gav her sprikende resultater i dyp til berg. Ved IMPAKTs **tomografiske inversjon** var det mulig å bygge sammen de to utleggene til et kontinuerlig profil ved hjelp av nærliggende Profil P06, men mangel på kontinuerlige registreringer gjør tolkingen noe mer usikker. Ved **NGUs tolkinger** med programmet Rayfract var det ikke mulig å bygge sammen datasettene fra de aktuelle utleggene til et profil, og det oppsto et meget uheldig brudd i tolkingen. En meget viktig boring for kalibrering av dyp til berg falt midt i dette bruddet, og samtidig fikk tolkingene et meget uheldig forløp mot slutten av utleggene. Ved fremtidige undersøkelser av samme type, må en søke å få kontinuerlige utlegg i kritiske partier som det viste seg å være ved denne lokaliteten.

I 2015 ble det utført refraksjonsseismikk med bruk av en 6 kilos slegge ved prosjektet «E39 Kryssing av Romsdalsfjorden» (Ruden 2015a). Resultatene var så tvilsomme at NGU ble bedt om å reprocessere data for denne undersøkelsen. I rapport fra denne undersøkelsen konkluderte NGU med at ved 7 av 15 profiler var data meget dårlige og til dels ubrukelige (Rønning et al. 2019a). Det ble antatt at energikilden var for svak, og IMPAKT Geofysik fikk jobben med å måle to profiler på Julbøen på nytt og da med dynamitt som energikilde (IMPAKT 2020). Disse målingene indikerte pålitelige resultater som stemmer bedre med borehullslogging fra området og resistivitetsdata.

Ett av de opprinnelige profilene (15JULB-01) viste ett tilsvarende bilde som det remålte profilet kalt JUL19-01. Det andre opprinnelige profilet (15JULB-04), viste imidlertid hastigheter som bare unntaksvis var over 2600 m/s i berg, noe som tilsvarer svært dårlig bergmassekvalitet. Terrengformer, målte resistivitetsverdier langs profilet, logging av p-bølgehastighet i et borehull nært opp til profilet og ikke minst logging av sprekkefrekvens med optisk televiewer i dette borehullet, viste at det måtte være feil i dette hastighetsprofilet. Remålingen av dette profilet med bruk av dynamitt (IMPAKT 2020) viste her normale hastigheter. Energikilden ved de første målingen var åpenbart for svak og mest sannsynlig representerer de lave hastighetene i det opprinnelige profilet overflatebølger. Utøvende geofysikkfirma må tillegges ansvar for til enhver tid å benytte sterk nok energikilde.

NGUs automatiske Hagedoorntolking av IMPAKTs data (Profilene JUL19-01 og -04, Figurene 21 og 22) viste mange vertikale strukturer med svært varierende hastighet i berg. Den tomografiske inversjonen med dette som startmodell, gjorde store endringer i hastighetsprofilet, og de aller fleste vertikale lavhastighetssoner ble til overflate-fenomener som strakk seg ca. 10 m ned i berget, stedvis noe mer. Dette viser at dersom en kommer uheldig ut med Hagedoorntolking, kan dette rettes opp igjen med tomografisk inversjon.

Ved NGUs inversjon av det opprinnelige Profil 15JULB-04, viste de inverterte data lav «RMS-error», 5,3 % (2,4 ms) ved Hagedoorns metode og 2,8 % (1,8 ms) ved den tomografiske inversjonen, noe som lett kan tolkes som meget bra hastighetsmodell. Ved NGUs inversjon av data fra IMPAKT, profil JUL19-04, var tilsvarende data 16,3 % (1,23 ms) for Hagedoorntolking og 11,1 % (0,83 ms) ved den tomografiske inversjonen. Dette kan da tolkes som en dårligere modelltilpasning, men som diskusjonen ovenfor viser, er dette et mye bedre hastighetsprofil. Dette viser at en ikke kan stole på beregnet «RMS-error» når en vurderer kvaliteten på en inversjon. Modelltilpasningen kan være meget god, men når måledata er feil blir også hastighetsprofilen feil. Det ser ut til at bildet av strålegjennomgangen (Ray coverage) i dette tilfellet kan bidra til å avdekke tvilsomme data. Denne effekten ble også påvist ved NGUs siste modellering av syntetiske data (Rønning et al. 2020).

De nye refraksjonsseismiske tolkingene fra de to profilene ved Julbøen stemmer relativt bra med resistivitetstolkingene langs de samme to profilene (Figurene 27 og 28). De to metodene forsterker påliteligheten gjensidig, og det er grunn til å se på bergmassekvaliteten i detalj på nytt før etablering av ankerpunkter for hengebru-kablene.

9. KONKLUSJONER

Ved vegprosjektet «E39 Kryssing av Romsdalsfjorden», som består av en hengebru over Julsundet med påfølgende tunnel under Romsdalsfjorden vest for Molde, er det utført mye seismikk og boringer. NGU har som medlem av «ekspertgruppe for ingeniørgeologi», bidratt til valg av profiler som skulle måles og hvordan data senere ble behandlet på alternative måter. Dette innebærer repressering av noe refraksjonsseismikk som ble utført av IMPAKT Geofysik AB i 2019 og GeoExpert AG i 2015. Temaene har først og fremst vært påvisning og karakterisering av svakhetssoner i berg, men også dyp til berg og karakterisering av løsmasser har vært viktige tema. Det er i tillegg høstet erfaringer fra praktisk utførelse av refraksjonsseismikk. Det er gjort mange erfaringer som bør komme tilsvarende prosjekter i fremtiden til gode, og derfor er denne rapporten utarbeidet. Arbeidet er utført som en del av NGUs samarbeidsprosjekt med Statens vegvesen, Vegdirektoratet.

I Norge har en lange tradisjoner ved å benytte refraksjonsseismikk for karakterisering av bergmassekvalitet. Ut fra tradisjonelle lagdelte tolkinger med Hagedoorns metode er svakhetssoners bredde og intern p-bølgehastighet bestemt, og sistnevnte benyttes til å tolke bergmassekvalitet. NGU har utført tilsvarende tolkinger med programmet Rayfract. Disse tolkingene viste respons på de aller fleste sonene fra den tradisjonelle tolkingen og i tillegg ble fire nye klare soner indikert. Ved NGUs automatiske tolkinger ble hastigheten i sonene noe høyere enn ved den tradisjonelle tolkingen og mange soner ble tolket bredere. Gjennomsnittlig bredde av alle indikerte svakhetssoner ble imidlertid relativt lik for de tre tolkingemetodene IMPAKTs tradisjonelle lagdelte tolkinger, NGUs automatiske tolkinger med Hagedoorns metode og tomografisk inversjon. Høyere sonehastighet har betydning for den ingeniør-

geologiske klassifiseringen ved at færre soner ble klassifisert med svært dårlig bergmassekvalitet.

IMPAKTs tomografiske inversjon med programvare fra Geogiga og NGUs tolking med startmodell beregnet med DeltatV-metoden, som begge benytter 1D startmodell ved den tomografiske inversjonen, ga ikke noen klare bilder av mulige svakhetssoner.

NGUs tolkinger med programmet Rayfract synes å være like bra som de tradisjonelle tolkingene for påvising og karakterisering av svakhetssoner i berg, dersom løsmassetykkelsen er liten (< 20 m). Hastighetsintervaller for forskjellig bergklasse må imidlertid justeres. Det endelige svaret på hvor gode disse tolkingene er, får en imidlertid ikke før tunnelen drives.

Selv om automatiske tolkinger med Hagedoorns metode kan være en selvstendig tolking, har arbeidet vist at mulige falske svakhetssoner som skyldes fordypninger i bergoverflaten kan prosesseres bort ved tomografisk inversjon.

IMPAKTs tradisjonelle tolking av dyp til berg ved Vik viste resultater som i gjennomsnitt lå klart over dyp til berg fra boringer, og klart utenfor en standard angivelse av dyp til berg på +/- 10 % av det virkelige dypet. IMPAKT's kombinerte tolking, som i stor grad påvirkes av den tomografiske inversjonen og resultater fra boringer, viste et gjennomsnitt på 97 % av sikkert dyp til berg, men standardavviket var noe høyt (13 %). Også ute i Romsdalsfjorden ved «rolige geologiske forhold» viste IMPAKT's kombinerte tolking relativt gode dybdeestimer.

NGUs tolking av dyp til berg langs et profil ved Vik (8 boringer) viste relativt gode resultater (104 +/- 11 %). Langs to andre profiler ved Vik (7 boringer) lå imidlertid gjennomsnittlig dyp til berg 17 – 18 % over dypene fra boringene, og standardavviket var meget høyt (ca. 24 %). Dette resultatet ble forbedret noe ved mer glatting. En kontrollert tolking av dypene langs disse to profilene, der en benyttet dyp til berg fra boring til å styre tolkingen, viste at det er mulig å tolke frem gode resultater av dyp til berg både ved Hagedoorns metode direkte (100 +/- 7 %) og ved tomografisk inversjon med denne tolkingen som startmodell (99 +/- 7 %). Dette gav erfaring som vil komme senere tolkinger til nytte.

GeoPhysix sine tolkinger uten informasjon fra boringer viste at dyp til berg lå i gjennomsnitt på 93 % av relativt sikkert dyp fra boring og med et standardavvik på 9,7 %.

Ut fra oppnådde resultater kan en konkludere med at det er utfordrende å oppnå en nøyaktighet på +/- 10 % ved refraksjonsseismiske tolkinger av dyp til berg. Feilkilder som hastighetsinversjon og blindsoner reduserer presisjonen og +/- 15 % kan synes å være en bedre angivelse av usikkerhet. Arbeidet har imidlertid vist at dersom en kjenner dypet til berg fra en eller flere boringer, kan all tolking av dyp til berg finjusteres og en langt bedre presisjon oppnås.

Sikreste tolking av dyp til berg ble oppnådd med refleksjonsseismikk i sjøen både nord og sør for Tautra. I alt åtte boringer med dyp til berg fra 77 m til 103,5 m ligger innenfor områdene som FUGRO målte refleksjonsseismikk. Reprosessering av

denne refleksjonsseismikken med presise hastighetsprofiler fra IMPAKT, viste et dyp til berg som i gjennomsnitt var på 104 % av dypet ved de åtte borer og standardavviket var på 3 %.

Det er mulig med refraksjonsseismikk å karakterisere løsmassene ut fra p-bølge-hastighet, men dette kan også være en utfordring. Blindsonelag og hastighetsinversjon ved tradisjonelle tolkinger og hastighetsgradienter i løsmassene ved noen tomografiske inversjonsmetoder, kan gjøre det vanskelig å bestemme rett hastighet i løsmassene. Også her kan refleksjonsseismiske analyser gi et bedre resultat.

Seismisk tomografi mellom sjøbunnen og borehull i berg har ikke gitt pålitelige resultater, verken ved prosjektet «E39 Kryssing av Romsdalsfjorden» eller ved «Nordøyvegprosjektet» lengre ute i Romsdalsfjorden. Her må inversjonsprosedyrene forbedres.

Denne undersøkelsen har også avdekt svakheter ved den praktiske gjennomføringen av seismikken. Ved de første undersøkelsene på Julbøen ble en for svak energikilde benyttet og tolkingene ble feil. Refraksjonsseismikken i Romsdalsfjorden fikk ved ett tilfelle uheldig plassering. Et utlegg ble avsluttet i et kritisk område, og neste utlegg ble forskjøvet slik at det oppsto et uheldig gap i datadekningen. Den flatedekkende refleksjonsseismikken i fjorden ble utført med en for kort «streamer» slik at det ikke var mulig å utføre nøyaktige hastighetsanalyser. Dette er forhold som utførende konsulent bør ta ansvar for slik at de problemene dette skapte unngås i fremtiden. IMPAKT målte et nytt profil for egen regning slik at en fikk kontinuerlige data.

10. REFERANSER

- Barton, N. 2007: Rock quality, seismic velocity, attenuation and anisotropy. Taylor & Francis, London 2007, side 92.
- Braathen, A. og Gabrielsen, R.H. 2000: Bruddsoner i fjell – oppbygging og definisjoner. NGU Gråsteinen 7.
- Duås, M.W., Eggen, S.K. & Veien, H. 2016. Sammenligning av Q-verdier fra planleggingsfase og driftsfase i vegtunneler. Bachelor-oppgave ved NTNU, Institutt for bygg og miljø 2016 (82s.).
- Eidesen, J.M. 2013: Metodikk for driving og sikring gjennom svakhetssoner ved Rogfast. Masteroppgave ved NTNU, Institutt for geologi og bergteknikk, 2013.
- FUGRO 2018a: Geophysical Operations Report, Norwegian Public Roads Administration Fjord Crossings E39 – Marine Ground Investigations, Romsdalsfjorden, Area 07. Fugro Report No. 132128V00_D1-DO1.5_Vol-3.
- FUGRO 2018b: Interpretation Report, Norwegian Public Roads Administration Fjord Crossings E39 – Marine Ground Investigations, Romsdalsfjorden, Area 07. Fugro Report No. 132128V00_D1-O1.1_Vol-7.
- FUGRO 2019: E39 Coastal Highway Route, Romsdalsfjorden Fjord Crossing, Norway, Investigation Results, Geotechnics. Fugro Report No. P903306/01.
- FUGRO 2020a: Fjord Crossings E39. Marine Ground investigations – Romsdalsfjorden. Interpretation of Depth to Basement. Fugro Report No. 133887/00

- FUGRO 2020b: E39 Romsdalsfjorden. Review of Time-Depth-conversion for depth to bedrock Maps. Presentasjon på prosjektmøte 5. mai 2020.
- Gebrande, H. & Miller, H. 1985: Refraksjonsseismik (in German). In: F. Bender (Editor) *Angewandte Geowissenschaften II*. Ferdinand Enke, Stuttgart; pp. 226 – 260. ISBN 3-432-91021-5.
- Geogiga 2019: Geogiga DW Tomo 9.1 — Refraction Tomography Software <https://www.geogiga.com/en/dwtomo.php>
- Geomap 2017a: E39 Romsdalskryssingen. Seismic tomography and refraction seismic survey. Geomap-rapport (23 s.) datert 21. desember 2017.
- Geomap 2017b: Tomography survey in Nordøyvegen area. Survey Report. Geomap Report 161021, dated 07.03.2017, (19 pp.).
- Geomap 2018: Tradisjonelle tolkinger av refraksjonsseismiske profiler målt over kjerneborehull Bh2B, tolkede profiler uten annen dokumentasjon.
- Geomap/Geovista 2018: E39 Romsdalskryssingen. Seismic tomography and refraction seismic survey. Preliminary report – borehole 2B (13 s.).
- GeoPhysix 2015: E39. Refraksjonsseismiske undersøkelser på land for undersjøisk tunnel under Romsdalsfjorden. GeoPhysix Prosjektrapport 14462.
- GeoTom 2017: GeotomCG, GeoTomCG GPR and seismic tomography software (versjon 15.5.1). <http://dev.geotom.net/>
- Gjelsnes, H.C. 2013: Gjennomførbarhet for bruk av TBM ved Rogfast. Masteroppgave ved NTNU, Institutt for geologi og bergteknikk, 2013.
- Hagedoorn, J.G. 1959: The Plus-Minus method of interpreting seismic refraction sections. *Geophysical Prospecting* 7 (2), pp.158 – 182.
- IMPAKT 2020: E39 Romsdalsfjorden, Vik – Julbøen. Refraksjonsseismiske undersøkelser i sjø og på land. Rapport fra IMPAKT Geofysik AB datert 2020-02-05.
- Intelligent Resources 2019a: Rayfract Seismic Refraction & Borehole Tomography-Subsurface Seismic Velocity Models for Geotechnical Engineering and Exploration. Downloaded from <http://rayfract.com>
- Intelligent Resources 2019b: Rayfract help. Download from <http://rayfract.com/help/rayfract.pdf>
- Lutro, O., Redfield, T., Oppikofer, T., Dehls, J. & Rønning, J.S. 2015: E39 Kryssing av Romsdalsfjorden. Berggrunnsgeologi, strukturgeologi og undersøkelse av ustabile fjellparti. NGU Rapport 2015.039. (36 s.). https://www.ngu.no/upload/Publikasjoner/Rapporter/2015/2015_039.pdf
- Palmer, D. 1980: The Generalized Reciprocal Method of Seismic Refraction Interpretation. Society of Exploration Geophysicists, Tulsa. ISBN 0-931830-14-1.
- Reynolds, J. M. 2011: An Introduction to Applied and Environmental Geophysics. Wiley & Sons, West Sussex, UK (2nd edition).
- Rønning, J.S., Ganerød, G.V., Dalsegg, E. & Reiser, F. 2013: Resistivity mapping as a tool for identification and characterization of weakness zones in bedrock - definition and testing of an interpretational model. *Bull. Eng. Geol. Environment* 10.1007/s10064-013-0555-7.
- 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 (48s.). http://www.ngu.no/upload/Publikasjoner/Rapporter/2016/2016_048.pdf
- Rønning, J.S., Tassis, G., Kirkeby, T. & Rohdewald, S. 2017: Geofysiske metoder og svakhetssoner i fjell. Hva fungerer best? Bergmekanikkdagen 2017. Artikkelen 27 (22 s.).

- Rønning, J.S., Tassis, G. & Larsen, B.E. 2019a: E39 Kryssing av Romsdalsfjorden. Reprosessering og tolking av tidligere utført refraksjonsseismikk. NGU Rapport 2019.007 (52 s.).
https://www.ngu.no/upload/Publikasjoner/Rapporter/2019/2019_007.pdf
- Rønning, J.S., Tassis, G., Kirkeby, T. & Wåle, M. 2019b: Reprosessering og ny samtolkning av geofysiske data med resultater fra tunneldriving, Knappetunnelen bed Ringveg Vest i Bergen. NGU Rapport 2019.014 (57s.).
https://www.ngu.no/upload/Publikasjoner/Rapporter/2019/2019_014.pdf
- Rønning, J.S., Tassis, G., Kirkeby, T., Wåle, M. & Rohdewald, S. 2019c: Hvordan bør refraksjonsseismikken utføres, tolkes og presenteres? Tradisjonell tolking eller tomografisk inversjon. Fjellspregningsdagen-Bergmekanikkdagen-Geoteknikkdagen, Oslo, 20. – 21. nov. 2019. Artikkel 21.
- Rønning, J.S. & Tassis, G. 2020: Tomographic inversion of synthetic refraction seismic data using Rayfract® software. Effects of various distant shots, fracture zones depth and fracture zone velocity. NGU Report to be published.
- Ruden, F. 2015a: Geofysiske undersøkelser for Statens vegvesen – Romsdalsfjorden. Rapport til oppdragsgiver datert 21.12.2015.
- Ruden, F. 2015b: Borehullslogging for Statens vegvesen. Romsdalsfjorden. Rapport datert 17.12.2015.
- Sheehan, J.R., Doll, W.E. & Mandell, W.A. 2005: Refraction Tomography Analysis. Journal of Environmental & Engineering Geophysics. Vol. 10 Issue 1 (March 2005).
- Sjøgren, B. 1984: Shallow Refraction Seismics. Chapman and Hall Ltd. London, ISBN 0 412 24210 9.
- Tassis, G., Rønning, J.S. & Rohdewald, S. 2017: Refraction seismic modeling and inversion for the detection of fracture zones in bedrock with the use of Rayfract® software. NGU Report 2017.025 (62pp.).
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® software. NGU Report 2018.015 (45pp.).
https://www.ngu.no/upload/Publikasjoner/Rapporter/2018/2018_015.pdf
- Westerdahl, H. 2003: Seismisk modellering. Modellering av seismiske data over løsmassefylte depresjoner, svakhetssoner og ved kabelheng. Miljø- og samfunnstjenlige tunneler, Rapport 32. Statens vegvesen.

Vedlegg 1: Relevante boringer (Totalsondering) utført av Statens vegvesen ved Vik pr. 20.03.2020.

Tabellen viser borehullsnummer, koordinater i NTM sone 6 (X og Y) og høyde i meter (Z) over havet (Terrengmodell NN2000), tolket løsmassetykkelse fra boring, antatt boring i berg, nærmeste refraksjonsseismiske profil og dato for boring. Første del av tabellen viser data for boringene der IMPAKT og NGU tolking er utført, andre del hvor tolkingene til GeoPhysics er utført.

Borehull	X	Y	Z	Løsmasse- tykkelse (m)	Boring i antatt berg (m)	Nærmeste Profil	Dato for boring
415	1516087,4	122413,6	29,0	15,9	5,0	Vik19-01	16.04.2020
411	1516152,8	122329,1	30,4	15,4	5,0	Vik19-01	19.03.2020
410	1516166,8	122309,6	30,2	20,0	5,0	Vik19-01	19.03.2020
409	1516187,9	122282,6	29,6	24,8	5,1	Vik19-01	19.03.2020
363	1516215,5	122247,4	30,3	22,3	3,0	Vik19-01	21.10.2019
406	1516279,8	122168,5	30,0	26,0	5,0	Vik19-01	12.03.2020
405	1516327,2	122101,2	30,5	33,2	5,2	Vik19-01	11.03.2020
403	1516399,7	122001,9	30,8	45,3	5,0	Vik19-01	09.03.2020
402	1516425,8	121967,1	31,4	48,8	5,0	Vik19-01	10.03.2020
70	1516602,5	121722,5	34,5	30,6	3,0	Vik19-01	23.04.2016
414	1516174,4	122463,1	34,5	19,8	5,1	Vik19-02	15.04.2020
413	1516207,0	122426,9	35,8	20,0	5,0	Vik19-02	20.03.2020
412	1516333,8	122261,9	35,1	25,9	5,0	Vik19-02	27.02.2020
404	1516431,9	122043,3	33,1	43,7	5,2	Vik19-02	27.02.2020
408	1516177,1	122232,5	28,5	20,4	5,4	Vik19-04	25.02.2020
407	1516226,1	122164,5	28,3	20,9	5,0	Vik19-04	12.03.2020
401	1516383,6	121927,0	28,3	55,6	5,0	Vik19-04	10.03.2020

9	1515653,2	123071,4	30,0	17,1	2,7	P?/14	08.01.2015
10	1515681,3	123084,3	32,4	22,3	3,1	P?/14	08.01.2015
8	1515720,2	123050,3	33,0	25,2	5,0	P?/14	12.01.2015
5	1515748,4	123010,2	32,3	20,9	3,2	P?/14	14.01.2015
306	1515700,4	122868,7	25,5	18,4	3,0	P?/14	03.01.2019
305	1515740,2	122890,9	27,8	17,7	3,2	P?/14	03.01.2019
304	1515769,2	122908,0	29,3	17,8	3,0	P?/14	03.01.2019
303	1515793,7	122922,7	30,3	13,6	3,0	P?/14	04.01.2019
302	1515819,6	122937,3	33,0	14,5	3,0	P?/14	04.01.2019
301	1515838,4	122947,6	34,7	13,8	3,0	P?/14	04.01.2019
2	1515807,4	122922,5	32,2	13,6	3,4	P?/14	14.01.2015
300	1515864,8	122961,2	36,6	15,1	3,0	P?/14	04.01.2019
311	1515822,2	122903,9	31,7	12,5	3,0	P?/14	21.01.2019
345	1515970,6	122673,8	31,7	10,5	3,0	P5/14	12.02.2019
434A	1516048,1	122559,5	31,2	14,2	9,5	P?/14	23.04.2020
415	1516087,3	122414,4	29,0	17,7	5,0	P2/14	16.04.2020
414	1516172,3	122465,8	34,6	22,9	5,1	P2/14	15.04.2020

Vedlegg 2: NGUs tolkinger med Hagedoorns metode og tomografi, alle profiler.

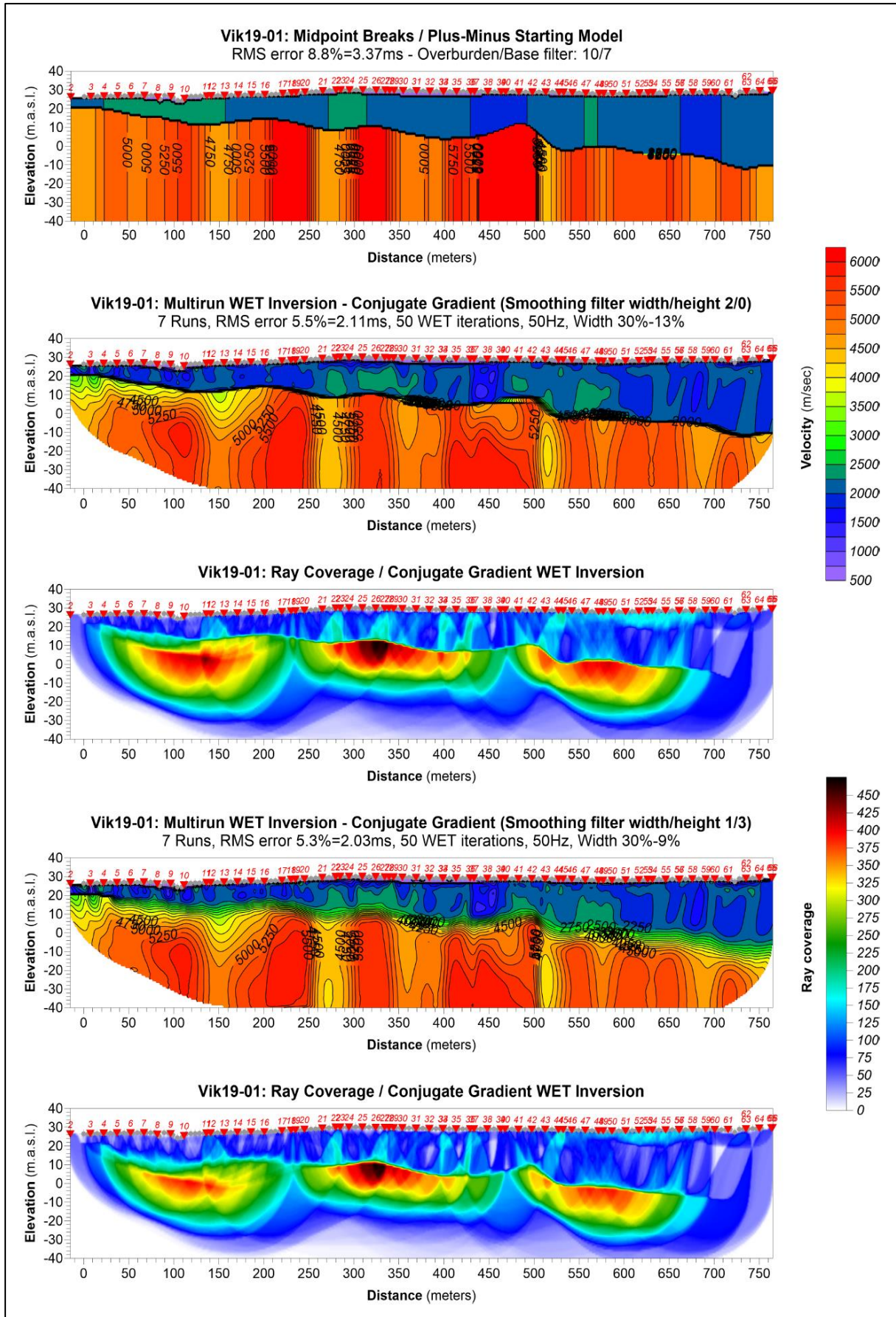
Øverst vises tolking med Hagedoorns pluss-minus-metode (Hagedoorn 1959), som senere benyttes som startmodell for tomografisk inversjon.

Neste figur viser NGUs tomografiske inversjon med programmet Rayfract og antatt beste prosedyre og tilhørende stråledekning «Ray coverage». Den automatiske tolkingen med Hagedoorns metode er benyttet som startmodell. Selve inversjonen er utført som «Multirun Conjugate Gradient method» der signalbredden justeres ned for hver inversjonsrunde (sju trinn). Det er foretatt «Cosine squared» vekting.

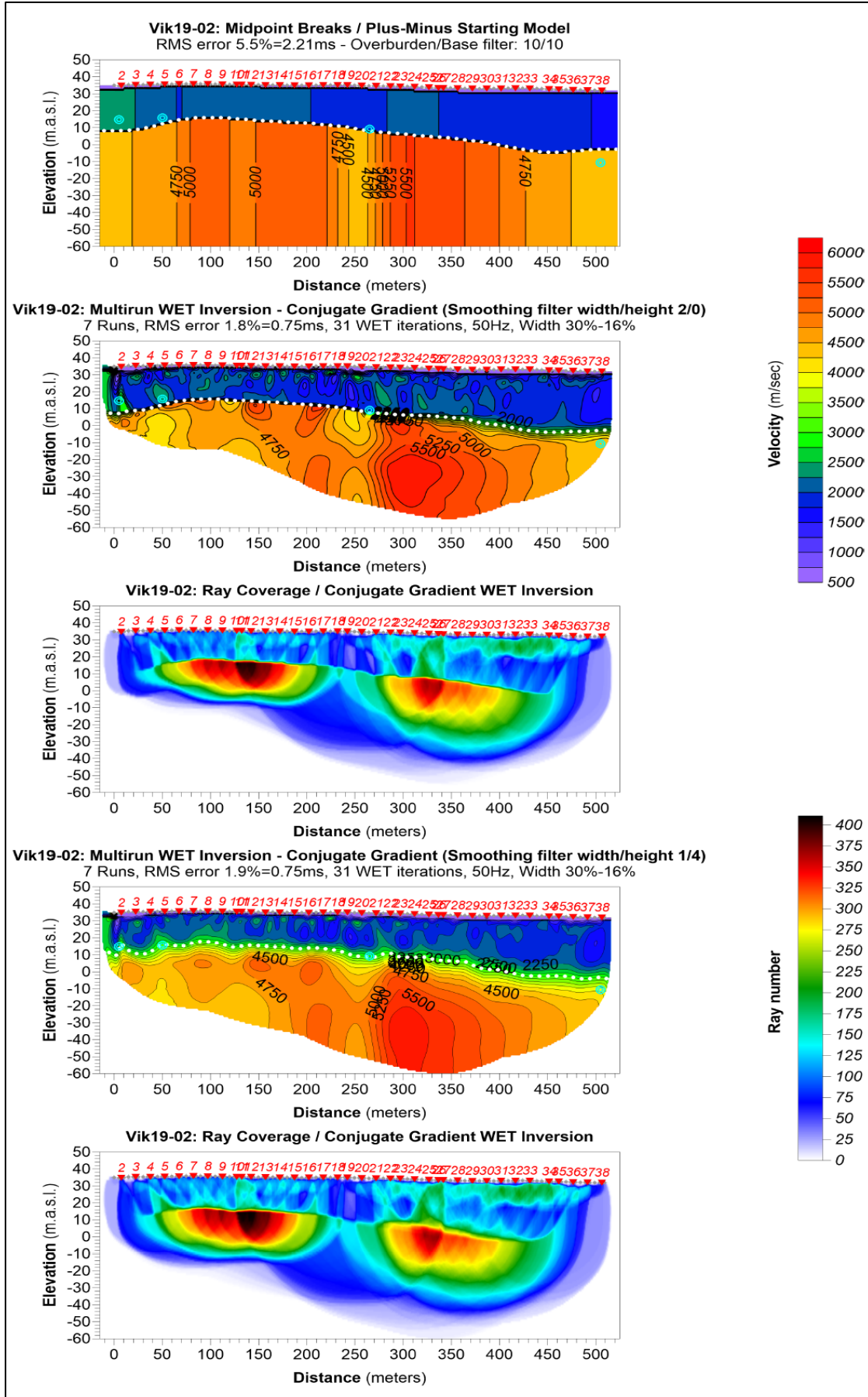
Første tomografisk inverterte datasett (bildene 2 og 3) viser inversjon og stråledekning med liten vertikal glatting. I det andre datasettet (to nederste bildene) er tolkingen glattet noe mer, spesielt vertikalt.

Ved profilene Vik19-02, Vik19-03 og Vik19-04 er dyp til berg fra boringer plottet inn som punkter mens tolket dyp til berg er markert med hvit eller lilla stiplet linje.

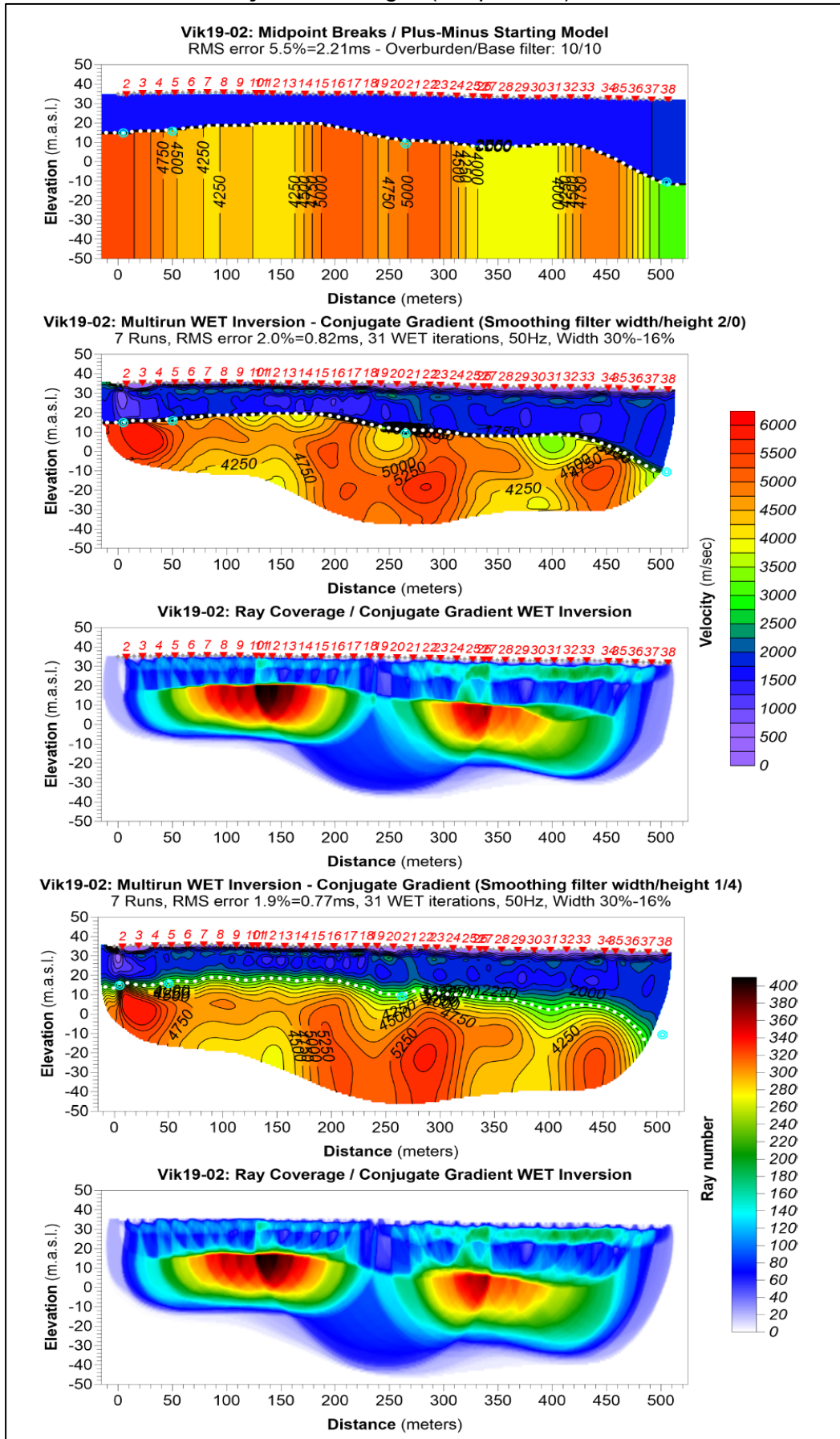
Profil Vik19-01.



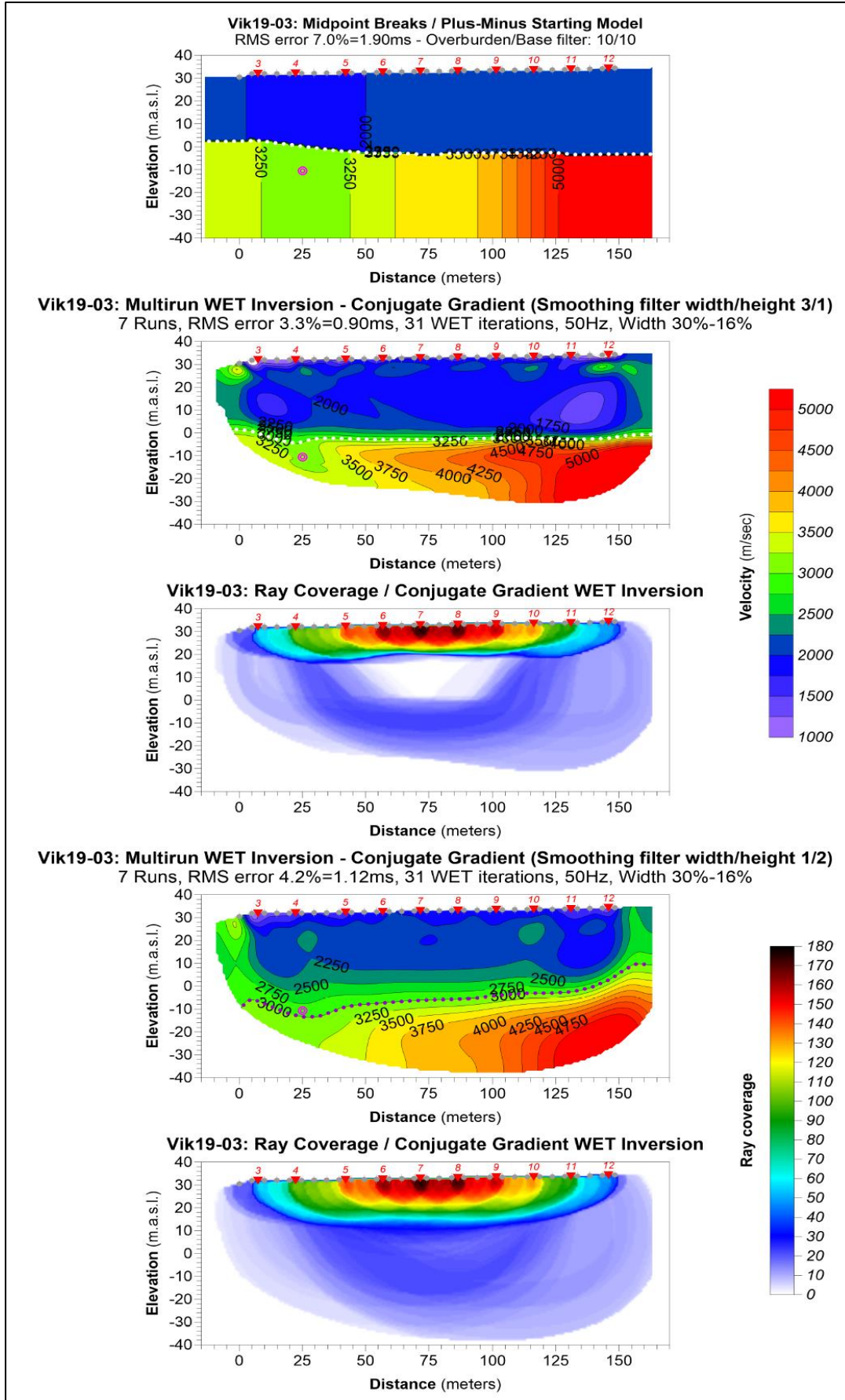
Profil Vik19-02. Versjon 1. Boringer (blå punkter) fra venstre: 414, 413, 412 og 404.



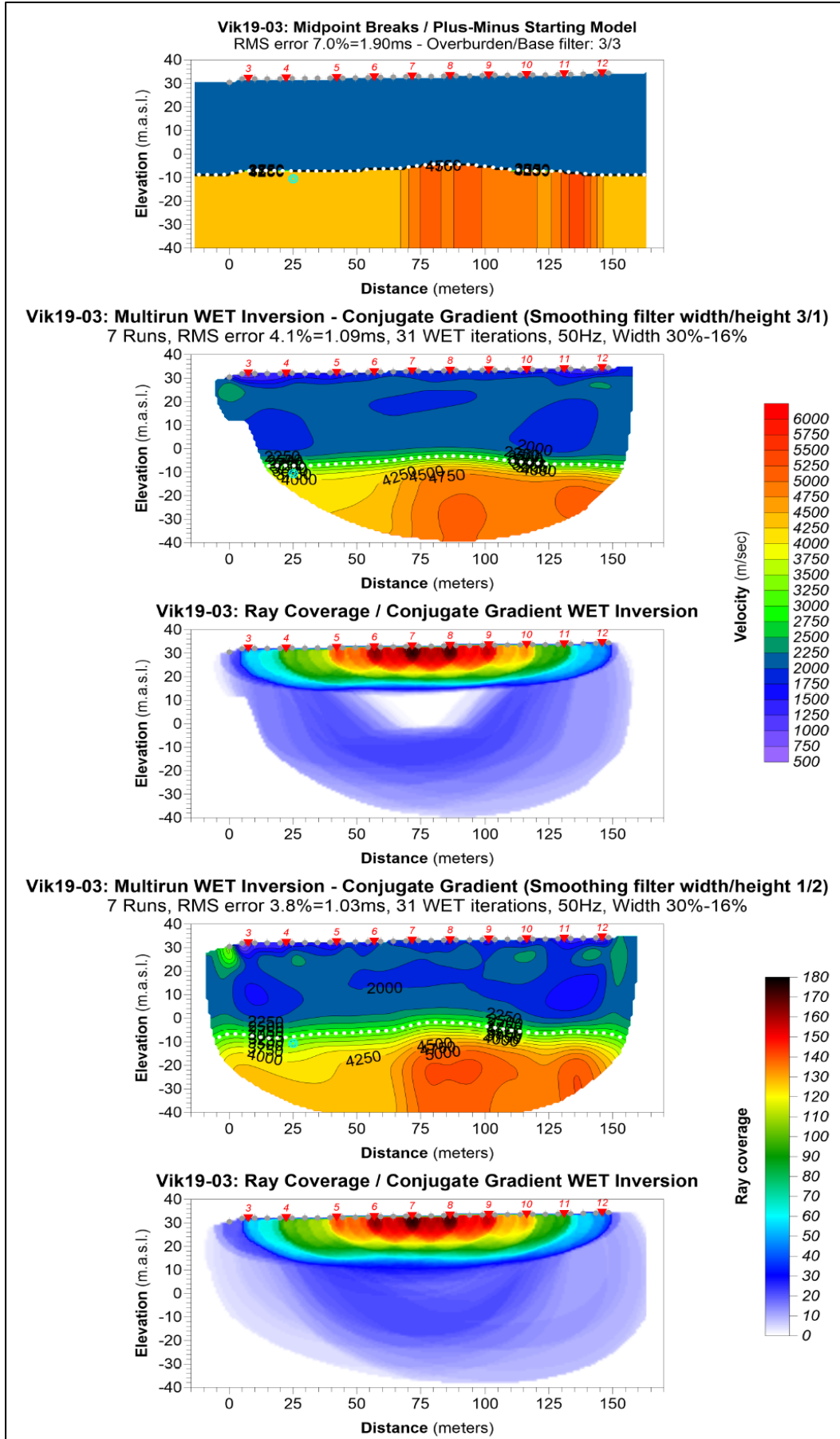
Profil Vik19-02. Versjon 2. Boringer (blå punkter) fra venstre: 414, 413, 412 og 404.



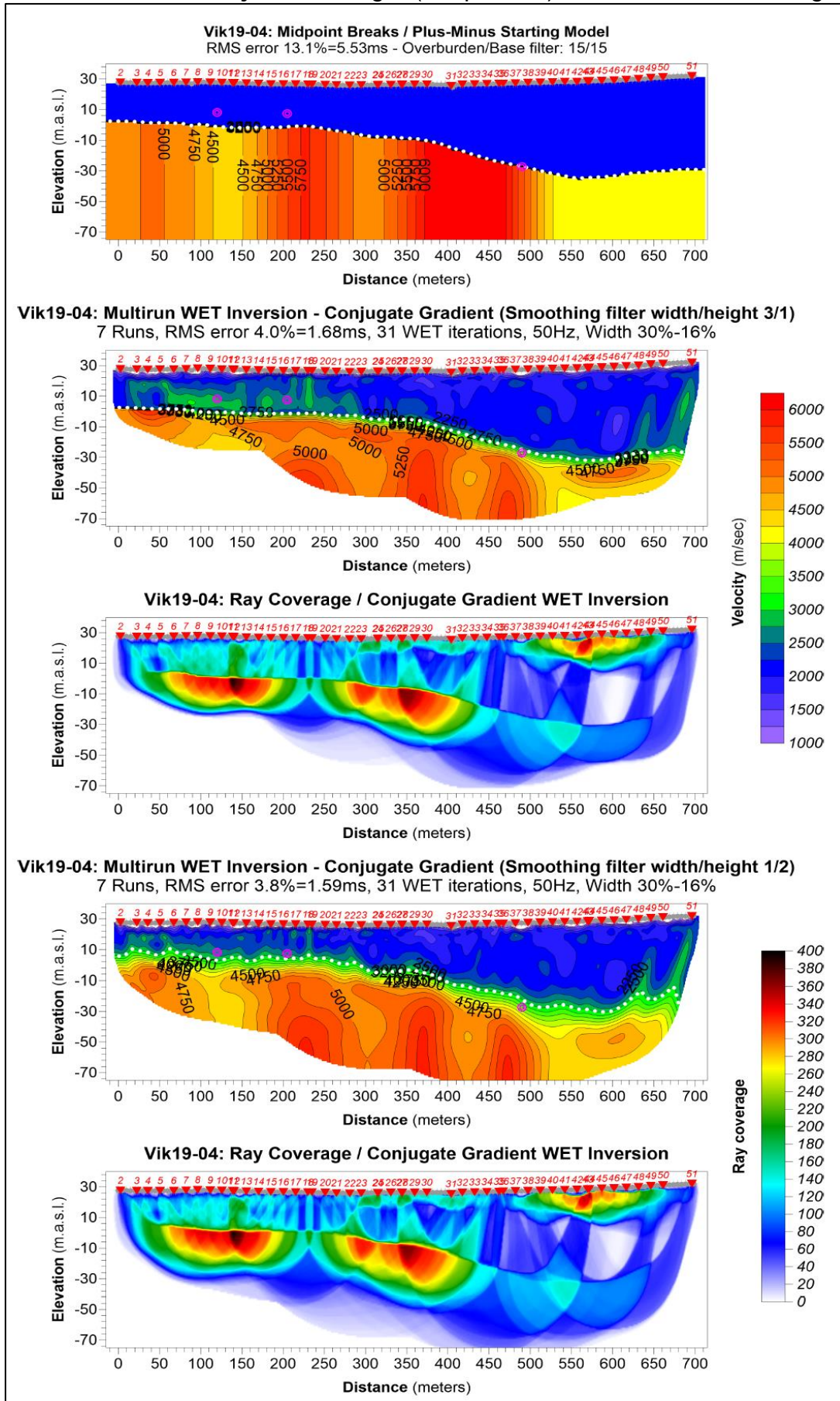
Profil Vik19-03. Versjon 1. NB! Boring 404 (lilla punkt) ligger 16 m fra profilet.



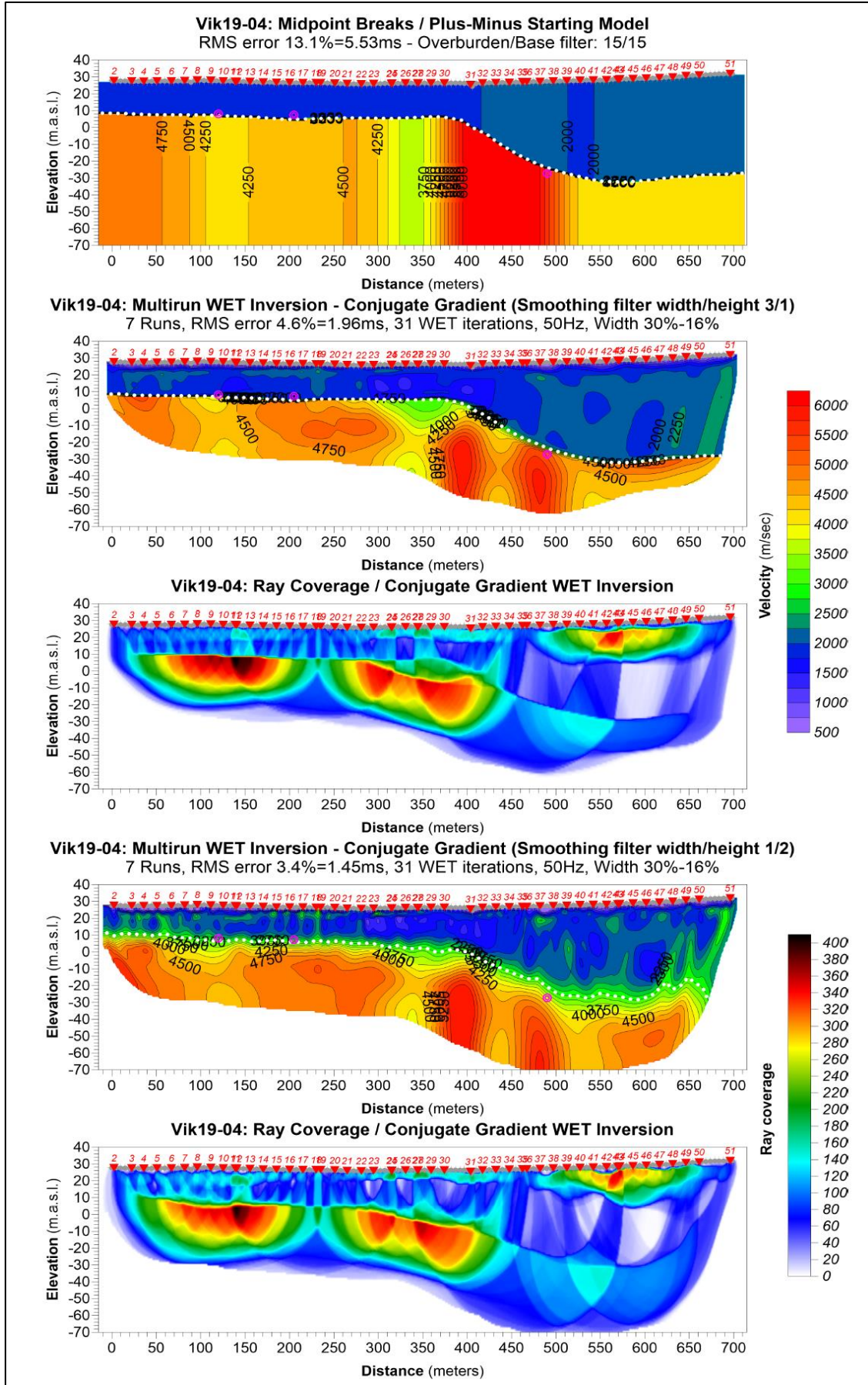
Profil Vik19-03. Versjon 2. NB! Boring 404 (blått punkt) ligger 16 m fra profilet.



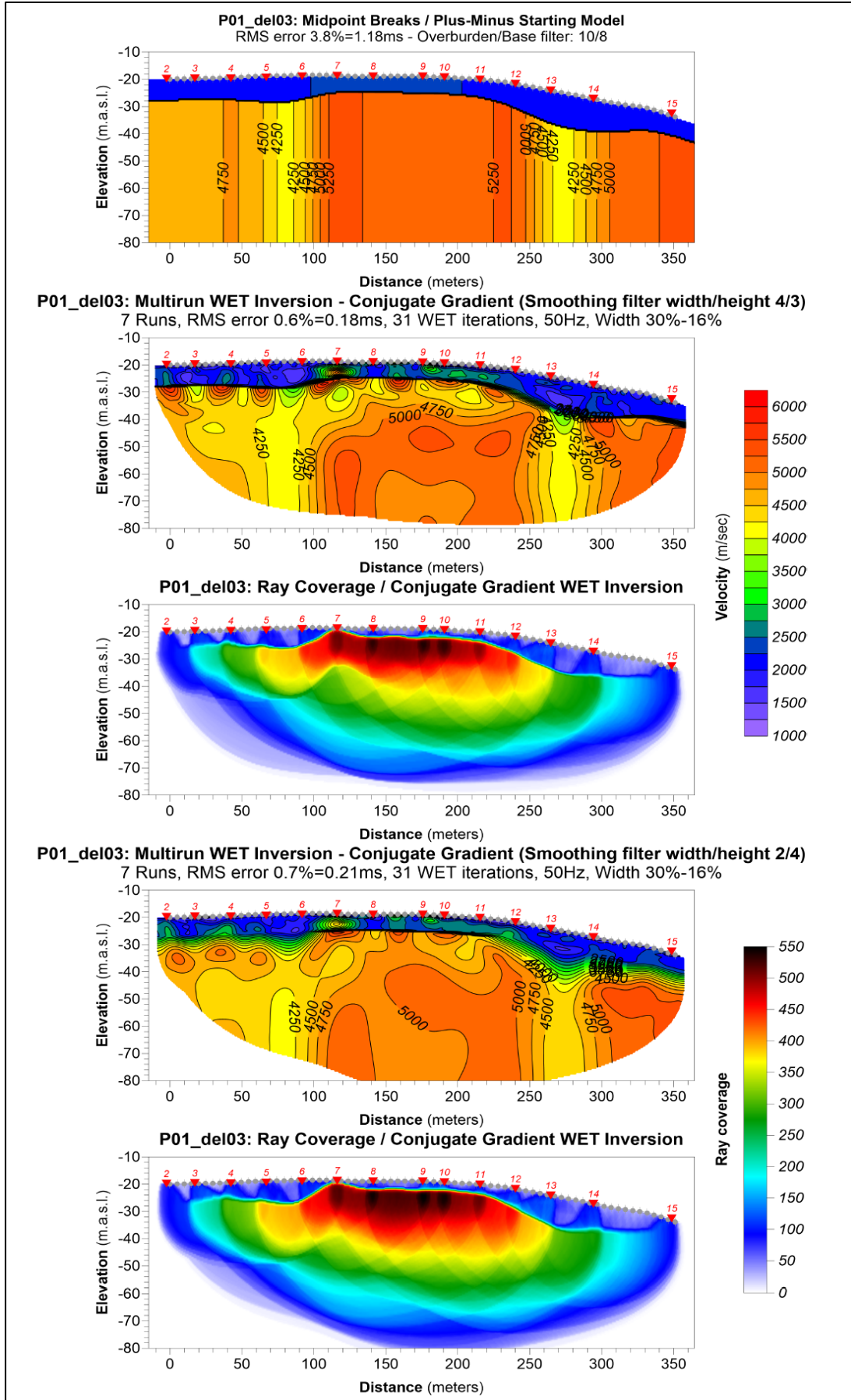
Profil Vik19-04. Versjon 1. Boringer (lilla punkter) fra venstre: 408, 407 og 401.



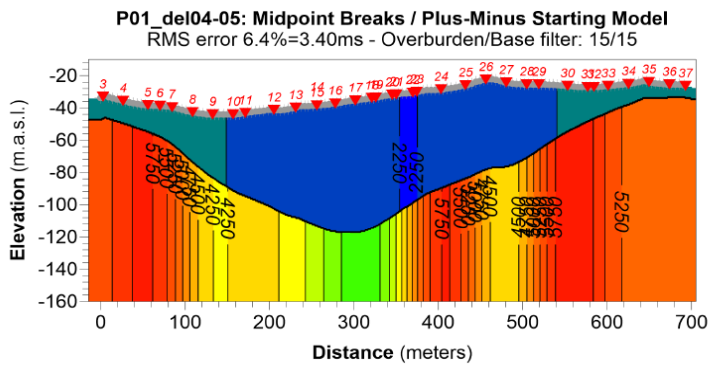
Profil Vik19-04. Versjon 2. Boringer (lilla punkter) fra venstre: 408, 407 og 401



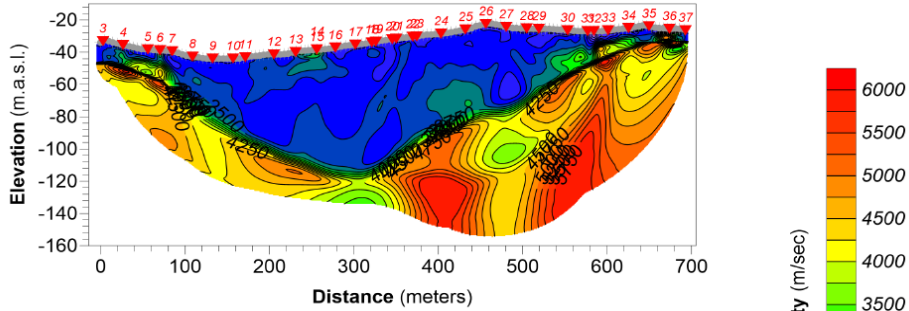
Profil P01. Utlegg 3.



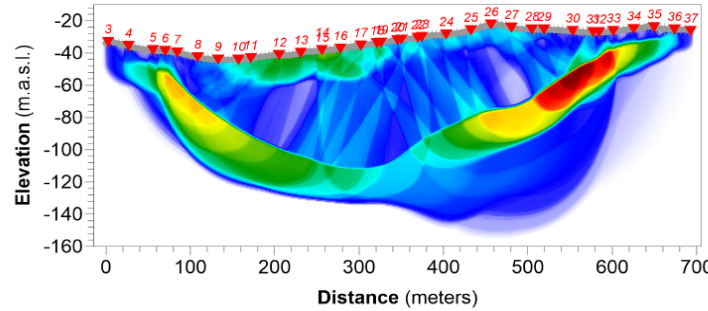
Profil P01. Utlegg 4 og 5.



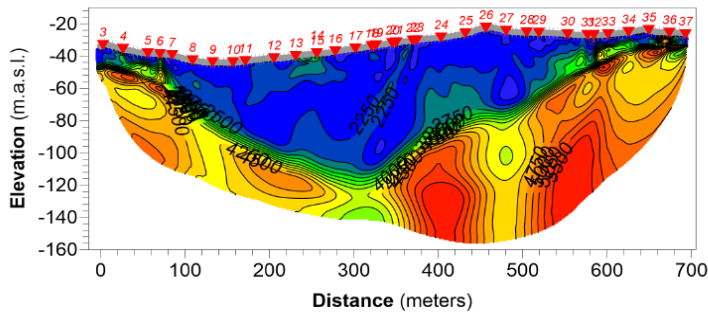
P01_del04-05: Multirun WET Inversion - Conjugate Gradient (Smoothing filter width/height 3/1)
 7 Runs, RMS error 1.0%=0.53ms, 31 WET iterations, 50Hz, Width 30%-16%



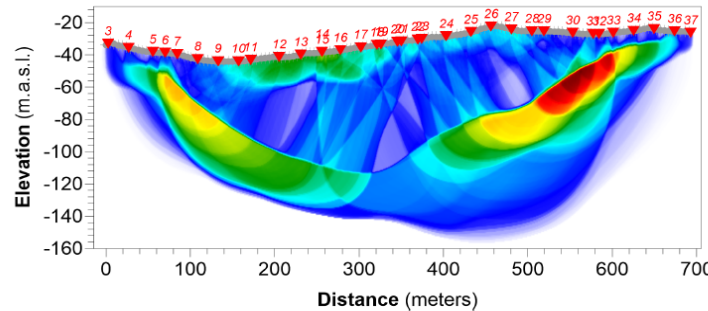
P01_del04-05: Ray Coverage / Conjugate Gradient WET Inversion



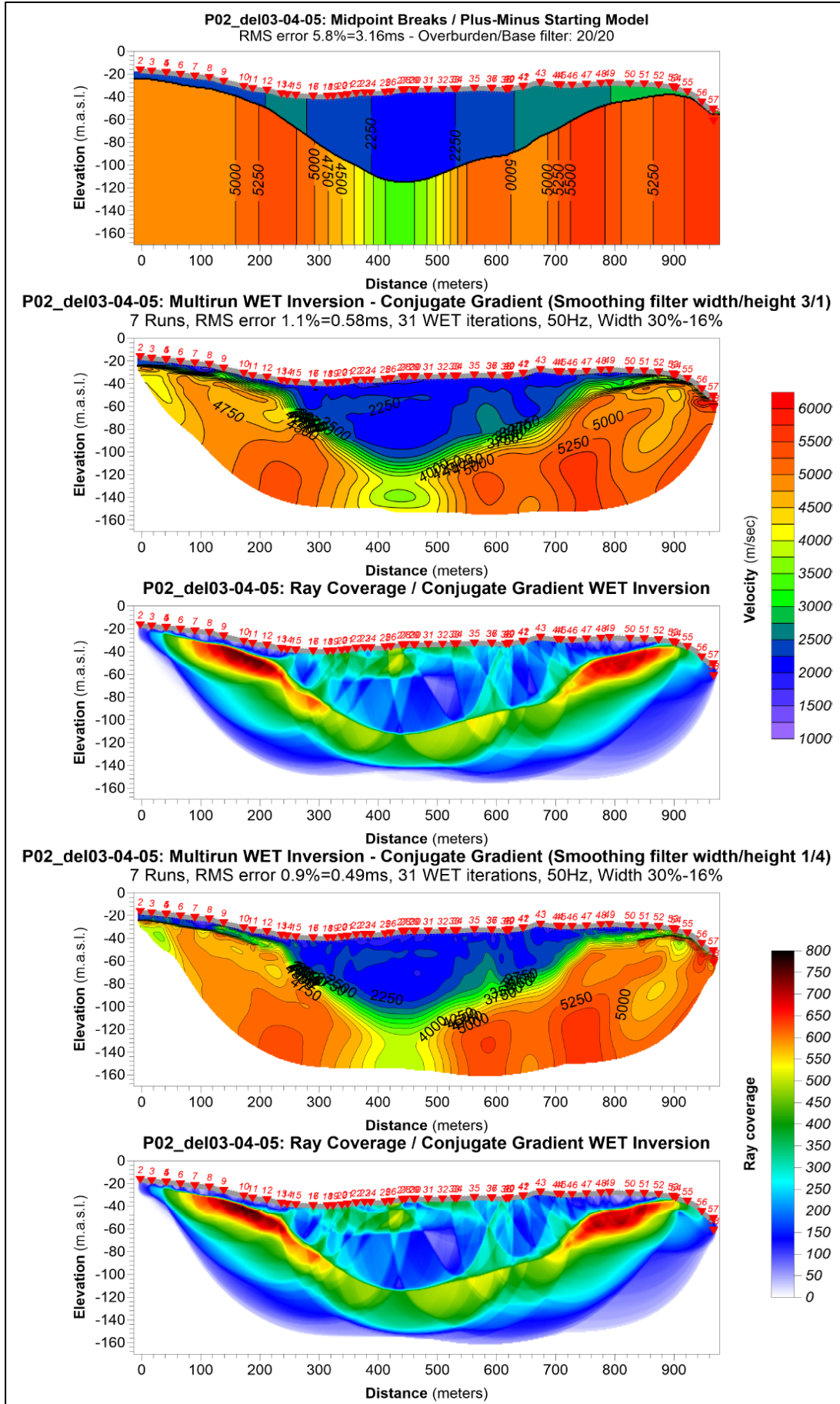
P01_del04-05: Multirun WET Inversion - Conjugate Gradient (Smoothing filter width/height 2/4)
 7 Runs, RMS error 1.0%=0.51ms, 31 WET iterations, 50Hz, Width 30%-16%



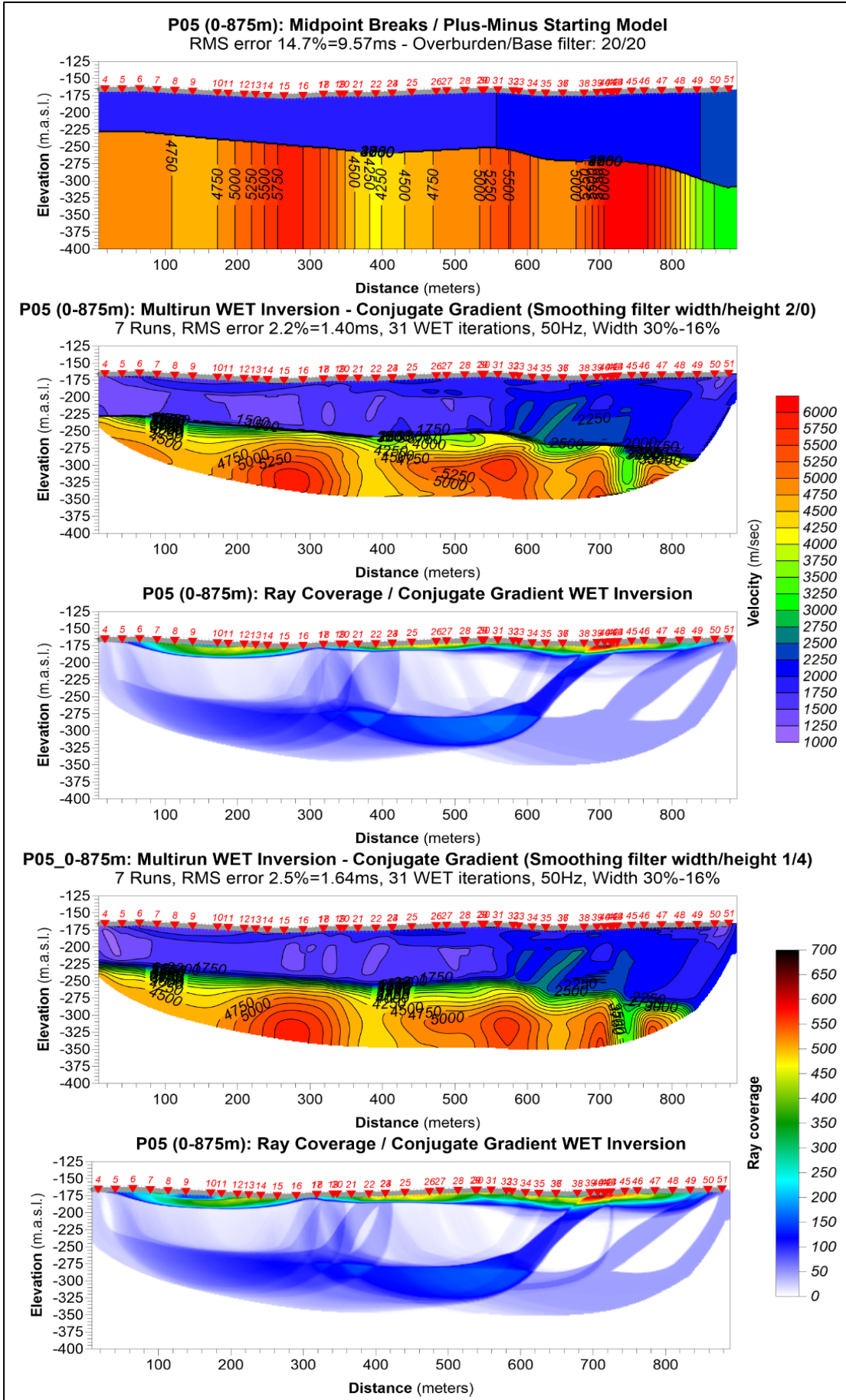
P01_del04-05: Ray Coverage / Conjugate Gradient WET Inversion



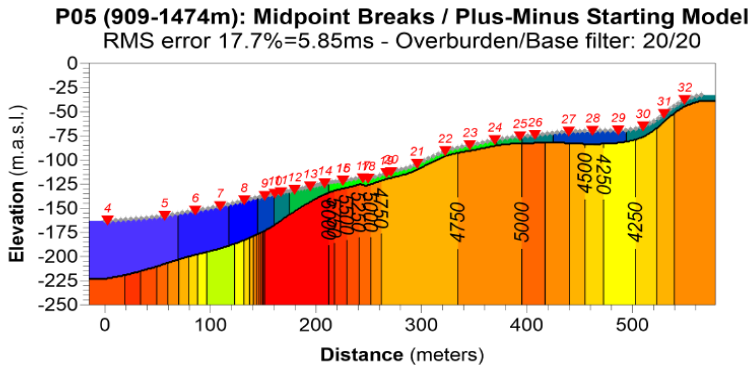
Profil P02. Utlegg 3, 4 og 5.



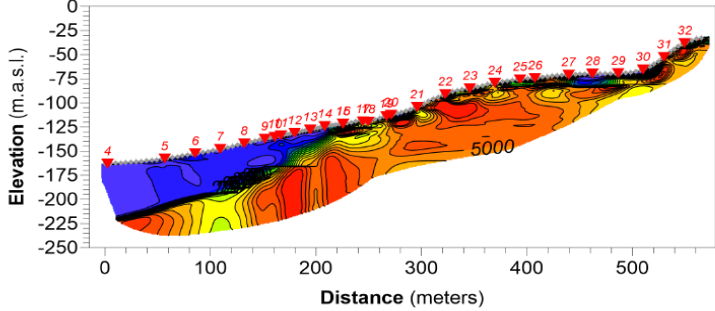
Profil P05, 0 – 875 m.



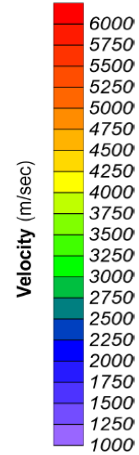
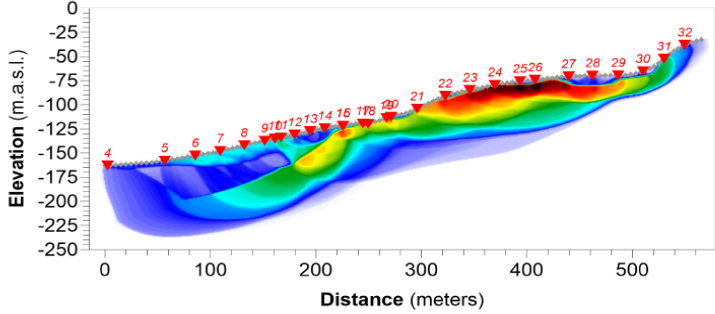
Profil P05, 909 – 1474 m.



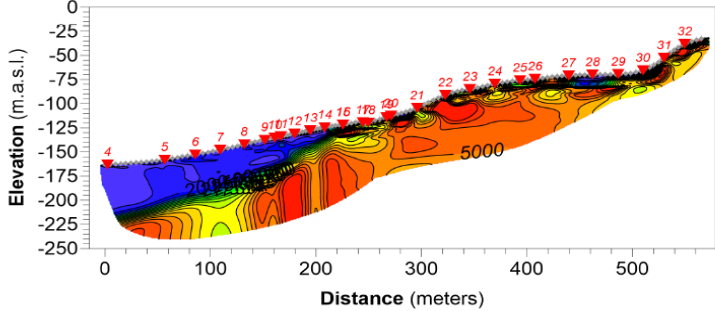
P05 (909-1474m): Multirun WET Inversion - Conjugate Gradient (Smoothing filter width/height 2/0)
 7 Runs, RMS error 1.2%=0.39ms, 31 WET iterations, 50Hz, Width 30%-16%



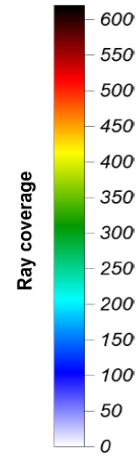
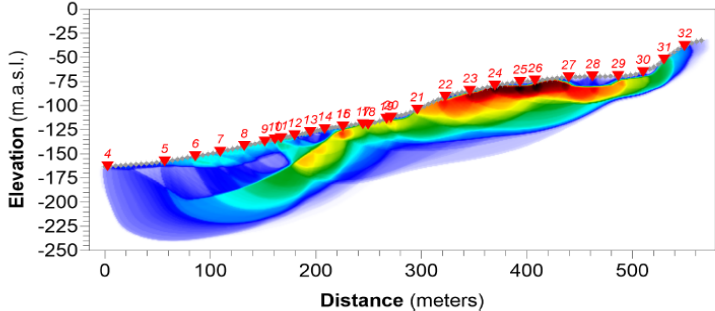
P05 (909-1474m): Ray Coverage / Conjugate Gradient WET Inversion



P05 (909-1474m): Multirun WET Inversion - Conjugate Gradient (Smoothing filter width/height 1/4)
 7 Runs, RMS error 1.1%=0.38ms, 31 WET iterations, 50Hz, Width 30%-16%



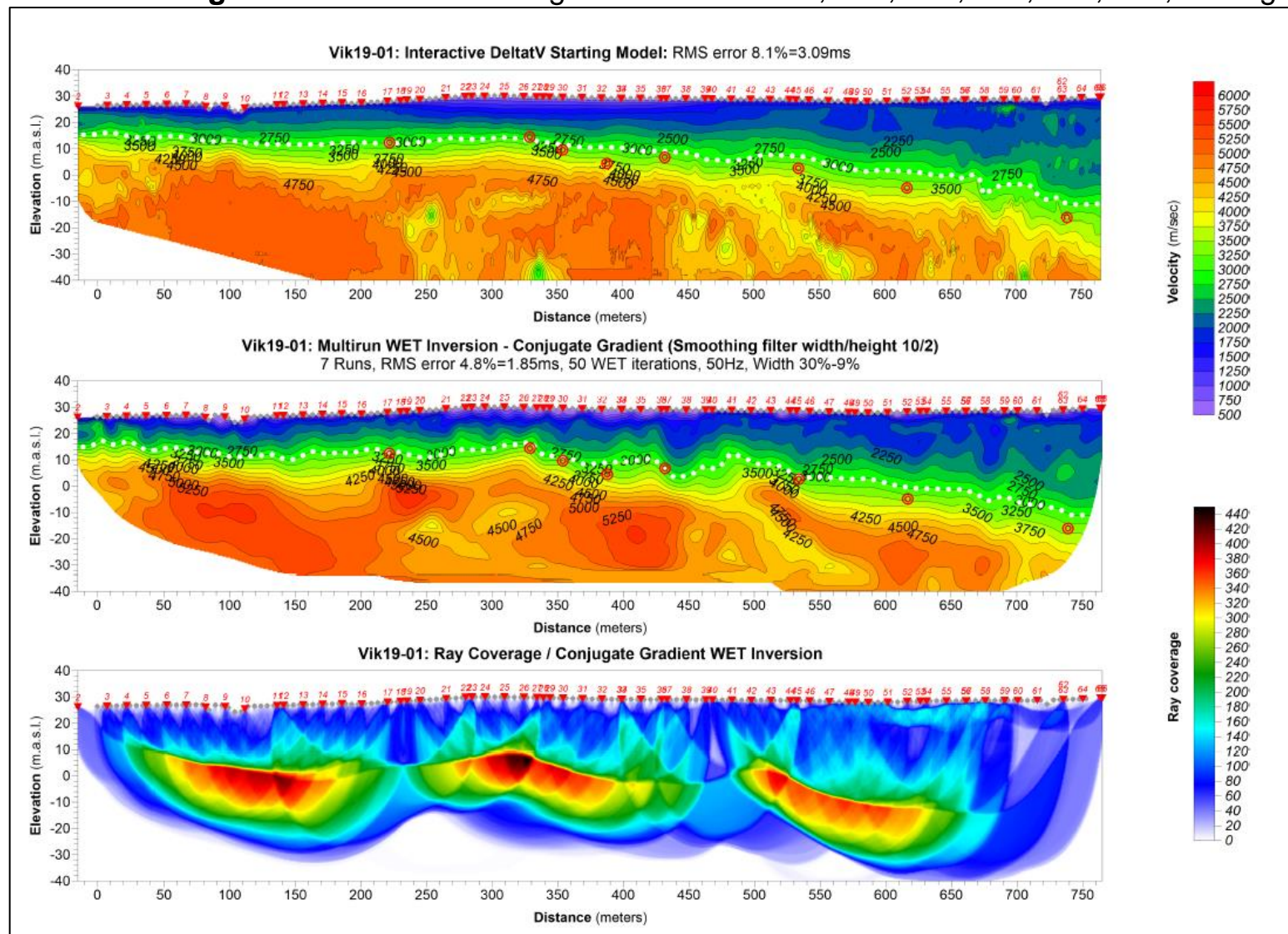
P05 (909-1474m): Ray Coverage / Conjugate Gradient WET Inversion



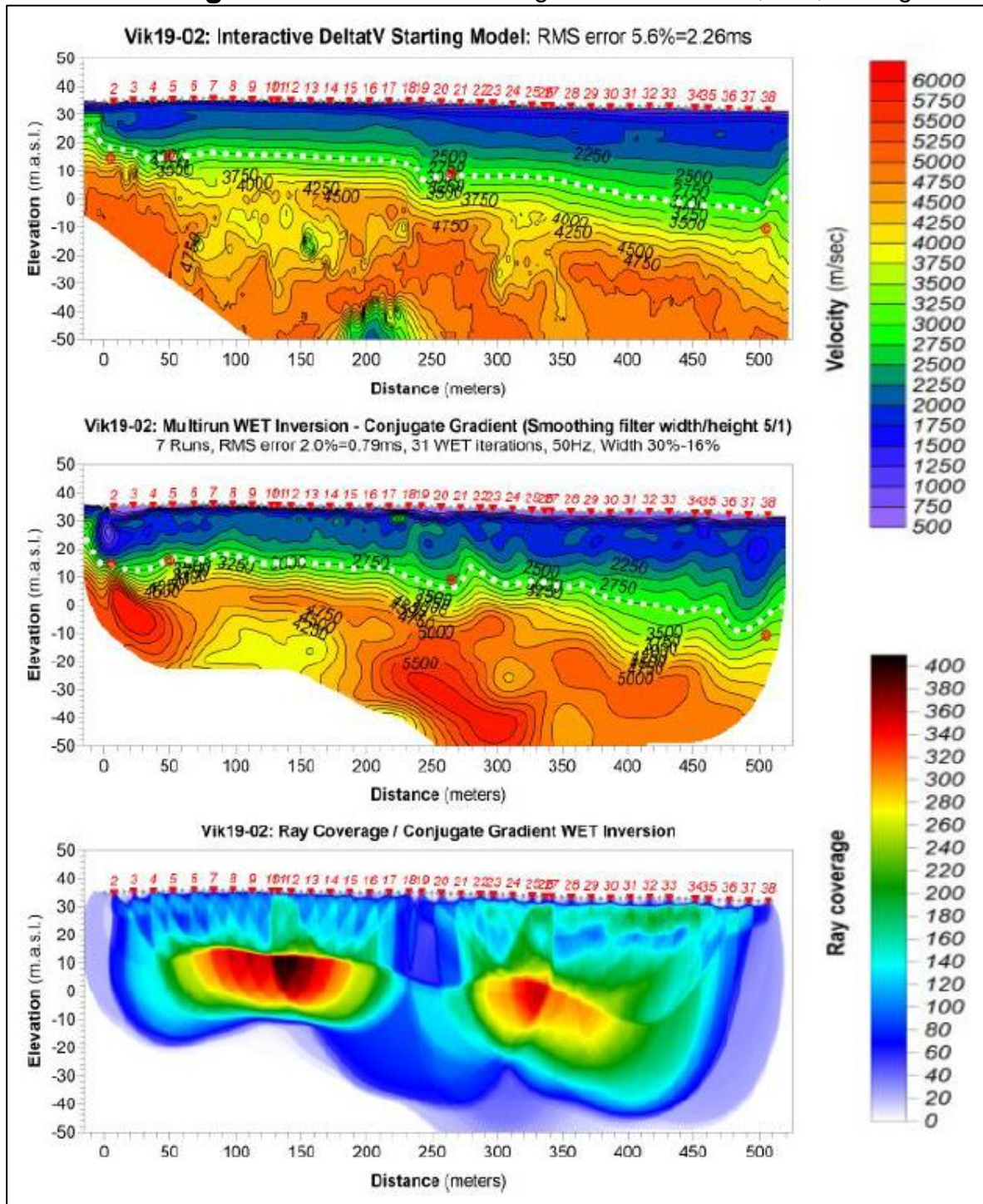
**Vedlegg 3: NGUs tolkinger med DeltatV-metoden.
Profilene Vik 19-01, -02 og -04.**

Øverst vises startmodell beregnet med DeltatV-metoden. Deretter følger tomografisk inversjon med denne som startmodell. Nederst vises strålegjennomgang («Ray coverage»). Hastighetskonturen $V=3000$ m/s, som kan brukes som indikator for bergoverflaten, er forsterket med hvite prikker. Dyp til berg ved boringer mindre enn 4 m fra profilene, er vist som røde sirkler.

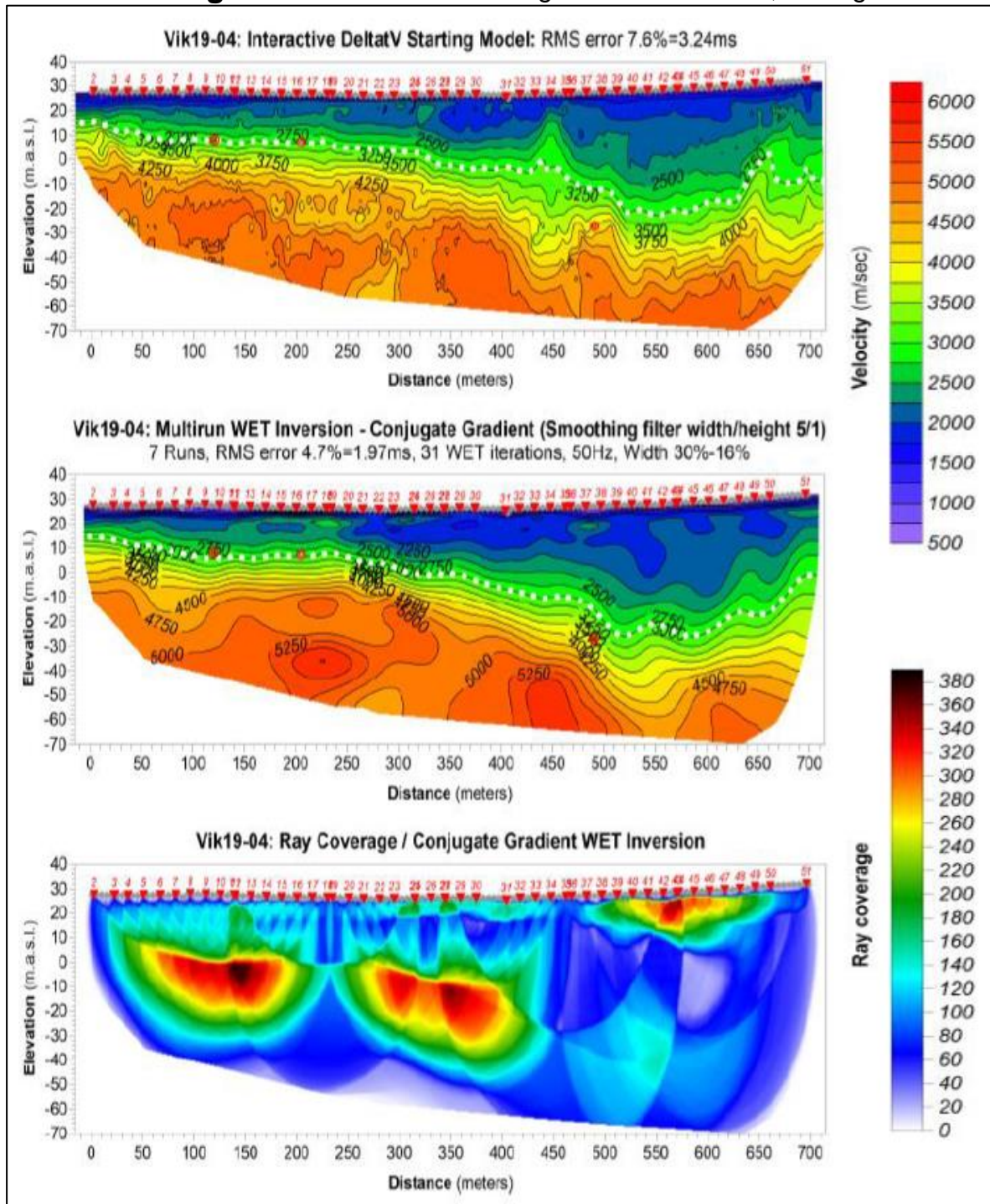
DeltatV-tolking Profil Vik 19-01. Boringer fra venstre: 415, 411, 410, 409, 363, 406, 405 og 403.



DeltatV-tolking Profil Vik 19-02. Boringer fra venstre:414, 413, 412 og 404.



DeltatV-tolking Profil Vik 19-04. Boringer fra venstre: 408, 407 og 401.



Vedlegg 4: IMPAKTs refleksjonsseismiske hastighetsanalyser på 13 punkter i sjøen nord for Tautra.

MLP angir IMPAKTs posisjon langs profilet. Deretter følger dyp fra og til den aktuelle hastigheten opptrer, intervallhastighet angir beregnet hastighet i intervallet. Koordinater (øst og nord) er i NTN sone 6 (X og Y). Sjødyp i meter under havet er angitt med Terrengmodell NN2000. Det er utført hastighetsanalyser langs profilene P04, P05 og P06.

P04 MLP	Dyp fra (m)	Dyp til (m)	Intervall hastighet (m/s)	X	Y	Sjødyp (m)
50	0	35	1650			
50	35	56	2210			
50	56	67	2300			
50	67	?	4300*			
365	0	49	1615			
365	49	62	1950			
365	62	80	2250			
365	80	?	5000*			
700	0	46	1660			
700	46	58	1880			
700	58	101	2100			
700	101	?	3300*			

*Fra refraksjonsseismikk

P05 MLP	Dyp fra (m)	Dyp til (m)	Intervall hastighet (m/s)	X	Y	Sjødyp (m)
145.29	0	52	1650	119045.40	1521370.21	-169.86
145.29	52	86	2210	119045.40	1521370.21	-169.86
388.22	0	67	1680	118983.80	1521605.44	-172.86
388.22	67	82	2180	118983.80	1521605.44	-172.86
530.34	0	60	1690	118941.76	1521741.15	-167.29
530.34	60	82	2250	118941.76	1521741.15	-167.29
621.95	0	65	1710	118904.99	1521824.87	-172.00
621.95	65	77	2160	118904.99	1521824.87	-172.00
723.93	0	46	1620	118870.41	1521920.56	-169.67
723.93	46	59	2120	118870.41	1521920.56	-169.67
723.93	59	70	2230	118870.41	1521920.56	-169.67
723.93	70	87	2170	118870.41	1521920.56	-169.67
841.52	0	62	1630	118827.74	1522030.05	-167.10
841.52	62	89	2130	118827.74	1522030.05	-167.10
841.52	89	108	2220	118827.74	1522030.05	-167.10

P06 MLP	Dyp fra (m)	Dyp til (m)	Intervall- hastighet (m/s)	X	Y	Sjødyp (m)
0	0	55	1600	118888.06	1521957.13	-167.62
0	55	74	2100	118888.06	1521957.13	-167.62
0	74	89	2100	118888.06	1521957.13	-167.62
57.94	0	60	1680	118868.30	1522011.58	-166.86
57.94	60	79	1950	118868.30	1522011.58	-166.86
57.94	79	86	2290	118868.30	1522011.58	-166.86
118.77	0	57	1700	118846.68	1522068.38	-165.37
118.77	57	74	1790	118846.68	1522068.38	-165.37
118.77	74	106	2010	118846.68	1522068.38	-165.37
193.61	0	53	1730	118822.41	1522139.15	-160.62
193.61	53	84	2230	118822.41	1522139.15	-160.62



NORGES
GEOLOGISKE
UNDERSØKELSE
- NGU -

Norges geologiske undersøkelse
Postboks 6315, Sluppen
7491 Trondheim, Norge

Besøksadresse
Leiv Eirikssons vei 39
7040 Trondheim

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