



GEOLOGI FOR SAMFUNNET

SIDEN 1858



**NORGES
GEOLOGISKE
UNDERSØKELSE**
· NGU ·

Rapport nr.: 2019.007	ISSN: 0800-3416 (trykt) ISSN: 2387-3515 (online)	Gradering: Åpen
Tittel: E39 Krysning av Romsdalsfjorden. Reprosessering og tolking av tidligere utført geofysikk.		
Forfatter: Jan S. Rønning, Georgios Tassis og Bjørn E. Larsen	Oppdragsgiver: Statens vegvesen, Region Midt	
Fylke: Møre og Romsdal	<ul style="list-style-type: none"> • Kommune: • Molde, Vestnes, Midsund 	
Kartblad (M=1:250.000) ÅLESUND	<ul style="list-style-type: none"> • Kartbladnr. og -navn (M=1:50.000) • 1220 II Vestnes, 1320 III Åndalsnes 	
Forekomstens navn og koordinater: WGS84 UTM sone 32, se sammendrag	Sidetall: 53	Pris: kr 250,-
Feltarbeid utført: 2015	Rapportdato: 25. februar 2019	Prosjektnr.: 364500
		Ansvarlig: <i>Marco Brömmel</i>

Sammendrag:

Statens vegvesen, Region Midt, planlegger krysning av Romsdalsfjorden med tunnel. Prosjektet er en del av E39 og den aktuelle parsellen er kalt Vik – Julbøen. Denne består av hengebru over Julsundet fra Julbøen på fastlandet til Nautneset på Otrøya og videre med tunnel under fjorden fra Otrøya til Vik i Tomrefjorden.

Refraksjonsseismiske data, samlet inn av det Sveitsiske firmaet GeoExpert AG, er reprosessert med en kombinasjon av Hagedoorns metode og antatt beste prosedyre av WET tomografisk inversjon ved bruk av programmet Rayfract.

Dette arbeidet avdekket tvilsomme data og det stilles spørsmålstegn ved måten data er samlet inn. Av i alt 15 profiler viser syv profiler tvilsomme seismiske hastigheter. NGU har ingen klar oppfatning av hvorfor kvaliteten er så dårlig, men en kan ikke se bort fra et anvendte energikilde (slegge på 6 kg) gir for svake signaler i enkelte områder. NGU savner også fjernskudd ved denne undersøkelsen. Enkelte av profilene burde vært målt på nytt ned en bedre energikilde.

Resistivitetsdata samlet inn av Ruden AS viser jevnt over god kvalitet. Unntaket er enkelte profiler som går så nært sjøen at beregnet resistivitet påvirkes av sjøvannet.

I dette arbeidet blir reprosesserte seismiske data samtolket med de eksisterende resistivitetsdata. I de fleste tilfeller er det samsvar mellom de to metodene, men det er også tilfeller der resultatene spriker. Det antas at dette skyldes at metodene responderer forskjellig ved forskjellige geologiske modeller.

Profilene fordeler seg på fem områder: Julbøen vest for Molde (UTM 396500 - 6957750), Nautneset på Otrøya (UTM 394500 – 6957400), sørsida av Otrøya (UTM 390300 - 6953000), på øya Tautra midtfjords (UTM 391150 - 6950600) og ved Vik på sørsida av Romsdalsfjorden (UTM 393600 - 6947000). NGU har utarbeidet tolkingskart der dette er naturlig.

Emneord: Tunnel	Refraksjonsseismikk	Resistivitetmålinger
Bergmassekvalitet	Svakhetssoner i fjell	Løsmasser
Reprosessering	Retolking	Fagrapport

INNHOOLD

1. INNLEDNING	6
2. MÅLEMETODE OG UTFØRELSE	6
2.1 Refraksjonsseismikk.....	6
2.2 Resistivitetsmålinger.....	7
2.3 Reprosessering av refraksjonsseismikken	7
3. RESULTATER	8
3.1 Julbøen	8
3.2 Nautneset.....	27
3.3 Otrøya	34
3.4 Tautra.....	37
3.5 Vik.....	40
4. DISKUSJON.....	44
4.1 Datainnsamling.....	44
4.2 Dataprosessering og tolking.....	45
4.3 Rapportering	45
4.4 Tolningskart.....	45
5. KONKLUSJONER.....	47
6. REFERANSER	48
Vedlegg 1: Profilenes koordinater (fra Ruden 2015a).....	49
Vedlegg 2: Figur 20 forstørret (A3).....	50
Vedlegg 3: Resistivitetsdata fra Julbøen plottet i 3D perspektiv (fra Ruden 2015a)..	51

1. INNLEDNING

Statens vegvesen, Region Midt, planlegger krysning av Romsdalsfjorden med tunnel. Prosjektet er en del av E39 og den aktuelle parsellen er kalt Vik – Julbøen. Denne består av Bru over Julsundet fra Julbøen på fastlandet til Nautneset på Otrøya, og videre med tunnel under fjorden fra Otrøya til Vik i Tomrefjorden (se Vegvesenets nettsider, <http://www.vegvesen.no/Europaveg/e39romsdalsfjorden>).

Ruden AS ble engasjert av Statens vegvesen Region midt (SvvRm) til å utføre resistivitet og refraksjonsseismikk på en del av landdelene av prosjektet. Til å utføre de refraksjonsseismiske undersøkelsene engasjerte Ruden AS det sveitsiske firmaet GeoExpert AG. Presentasjonene av resultatene fra refraksjonsseismikken gjorde at SvvrM stilte seg tvilende til noe av det som ble presentert, dette på bakgrunn av andre undersøkelser og geologisk feltkartlegging. NGU ble derfor bedt om å gjøre en retolking av innsamlede refraksjonsseismiske data og sammenstille disse med resistivitetsdata samlet inn av Ruden AS. Alle opprinnelige resultater er tidligere presentert i rapport fra Ruden AS (Ruden 2015a).

2. MÅLEMETODE OG UTFØRELSE

Ved de aktuelle områdene på land rundt selve fjordkrysningen er det utført noe refraksjonsseismikk og noe 2D resistivitetmålinger (ERT). Stort sett er disse målingene sammenfallende.

2.1 Refraksjonsseismikk

Refraksjonsseismikken er utført av GeoExpert AG med geofonavstand 2 m og skuddavstand 6 m. Energikilden var en 6 kg slegge. Det ble i de fleste tilfellene benyttet 80 geofoner og effektiv tolket profillengde ble ca. 160 m. I noen tilfeller (Julneset) ble det benyttet bare 40 geofoner mens på Tautra og ved Vik langt flere geofonstasjoner. Alle skuddpunkt (slagpunkt) var innenfor geofonrekken (Split-spread) noe som betyr ingen fjernskudd. I ett tilfelle gir GeoExpert en advarsel om at datakvaliteten ikke er god og at data må benyttes med forsiktighet (Ruden 2015a).

Refraksjonsseismikken ble invertert av GeoExpert AG med programsystemet Rayfract (2015). Første prosesseringstrinn var CMP-sortering av førsteankomster, deretter generering av startmodell med Delta-t-V-metoden. Tilslutt ble det foretatt enkel «Single-run» WET (Wave Eikonal Traveltime) inversjon, totalt 100 iterasjoner. En detaljert oversikt over programmets mange valgmuligheter er vist i Tassis et al. (2017 og 2018).

Ved NGUs arbeid på seismisk inversjon med programvaren Rayfract er det gjort tester på syntetiske data. Disse er generert fra en på forhånd definert geofysisk modell, noe som gjør at en vet hva som er fasit ved slike inversjoner (Tassis et al. 2017, Tassis et al. 2018). I disse arbeidene konkluderes det med at beste inversjons-resultat for kartlegging av svakhetssoner i fjell, oppnås ved å benytte «Multi-run Conjugate Gradient inversion» med «Cosine-Squared weighting» og med en startmodell generert med «Hagedoorn 2D Pluss-Minus-metode». Sistnevnte er i praksis samme metode

som benyttes ved tradisjonelle tolkinger av refraksjonsseismikk, og kan betraktes som en selvstendig tolking på linje med tradisjonelle tolkinger.

GeoExpert AG har også foretatt en refleksjonsseismisk prosessering av seismikkdata. NGU ser ikke at dette gir noen troverdig informasjon og velger ikke å gjøre noe mer med de refleksjonsseismiske data.

2.2 Resistivitetsmålinger

Resistivitetsmålingene (ERT, Electric Resistivity Tomography) er utført av Ruden AS (Ruden 2015a). Målingene er utført med et standard kabelsystem med 72 elektroder og elektrodeavstand 2 m. Ved profilet på Julneset (15JULB-7) ble det benyttet 1 m elektrodeavstand. Benyttet elektrode-konfigurasjon var «Wenner–Schlumberger» hvor resultatene ikke avviker nevneverdig fra konfigurasjonen «Multi Gradient» som andre aktører velger å benytte. Ved datainnsamlingen ble et fransk instrument (Syscal) benyttet.

Inversjonen av data er foretatt med «Standard» programvare, Res2DInv (Loke 2015). Inversjonsmetode oppgis ikke. Resistivitetsmålingene er utført på så god måte at NGU ikke ser noen grunn til å reprocessere disse data.

NGU vurderer kvaliteten på resistivitetsdata ut fra angitt «RMS Error», mindre enn 5 % vurderes som meget god, 5 til 10 % god og 10 til 20 % akseptabel. Andre forhold som avstand til ledende materialer (sjøvann) tas med i vurderingen.

Det er også utført IP-målinger sammen med resistivitetsmålingene. NGU ser ikke at disse data viser klare relevante resultater for vurdering av bergmassekvalitet og velger å ikke vurdere disse data.

2.3 Reprosessering av refraksjonsseismikken

NGU fikk tilsendt filer med skuddplassering, geofonplassering og plukket første-ankomst fra GeoExpert AG. Ved NGUs prosessering er samme programsystem benyttet (Rayfract 2018), men med en nyere utgave. Startmodell for inversjonen ble generert automatisk med Hagedoorns Pluss-Minus-metode (Hagedoorn 1959). Knekkpunkter i gangtidskurvene ble bestemt manuelt, dvs. det er utført en viss manuell tolking. Ved selve inversjonen ble rutineene «Multi-run Conjugate Gradient inversion» og «Cosine-Squared weighting» benyttet, en prosedyre som NGU har vurdert som den antatt beste (Tassis et al. 2017, Tassis et al. 2018).

Generert startmodell utgjør en tolking av data tilsvarende det som gjøres manuelt av norske aktører. Denne modellen presenteres derfor i påfølgende plott. Deretter presenteres resultatene fra selve inversjonen, og et bilde som viser strålegjennomgangen i bakken (Ray coverage). Dette er viktige data for vurdering av kvaliteten. Der det finnes resistivitetsdata langs eller like ved seismikkprofilene plottes disse nederst. I tillegg har NGU lagt inn bilder av P-bølge hastighet logget i nærliggende borehull der det finnes. Cellestørrelsen ved denne inversjonen var 2 m x 2 m.

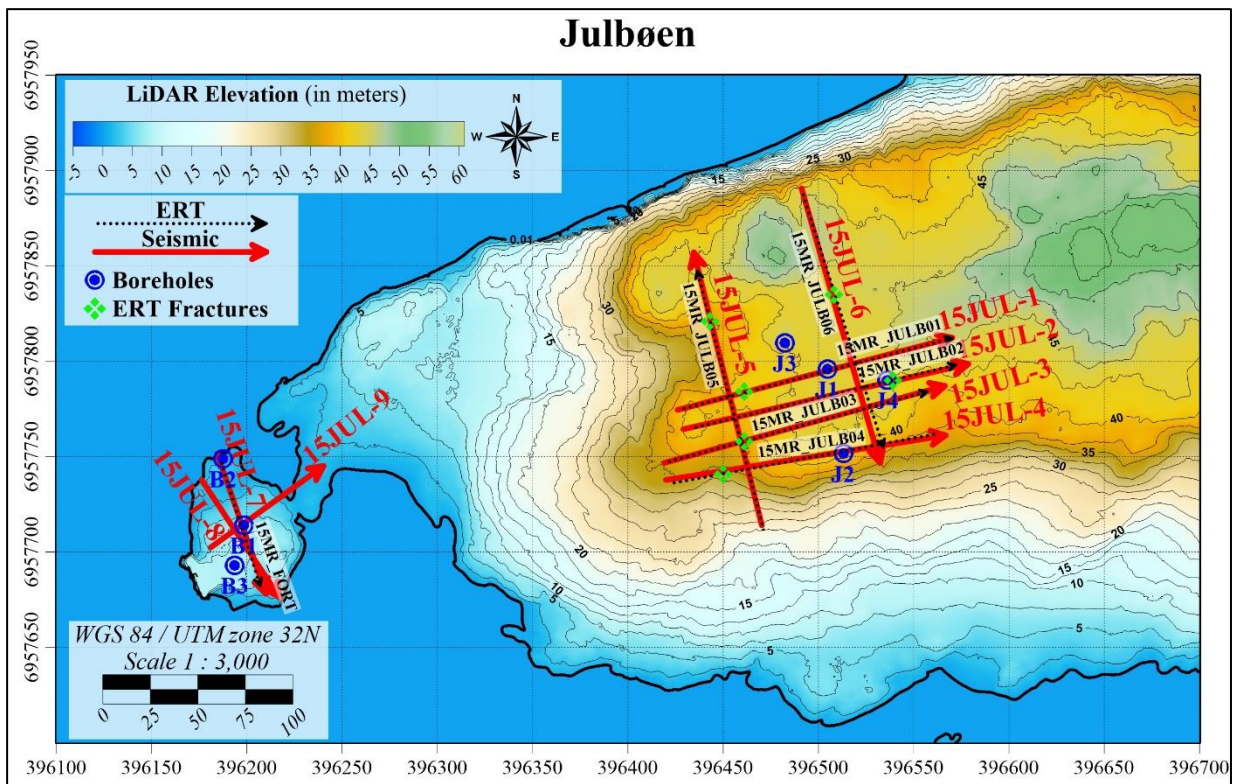
3. RESULTATER

NGU har reprocessert refraksjonsseismiske data fra følgende områder: Julbøen, Nautneset (på Otrøya), Otrøya, Tautra og ved Vik på sørsida av Romsdalsfjorden. Profilenes start og sluttspunkt er vist i vedlegg 1.

Profilene er plottet på et konturkart generert fra høyoppløselige LIDAR-data med celledørrelse 1m x 1m. Denne terrengmodellen er et meget godt grunnlag for tolking av mulige svakhetssoner ut fra terrengformer ved at all skog er prosessert bort slik at en får et detaljert bilde av overflaten.

3.1 Julbøen

Figur 1 viser beliggenheten av målte profiler ved Julbøen. Profilene 15Jul-1 til -6 ligger i området for ankerfeste for hengebru, mens profilene Jul-7 til -9 er plassert ved østlige tårn for hengebrua. Ved de fleste profilene er det målt både refraksjonsseismikk og resistivitet.



Figur1: Plassering av profiler og boringer ved Julbøen, vest for Molde.

Resultater fra profil 1 på Julbøen (15JULB-1) er vist i **figur 2**. NGU vurderer datakvaliteten til å være god, både ved refraksjonsseismikken og ved resistiviteten.

Den automatiske tolkingen av refraksjonsseismikken med Hagedoorns metode viser en trelagsmodell, øverst ett tynt lag med hastighet ca. 500 m/s og under dette ett nytt lag med hastighet ca. 1500 m/s og tykkelse fra 2 til 5 m. Begge disse lagene tolkes som løsmasser. Det tredje laget representerer berg, og det indikeres to soner med lavere P-bølgehastighet:

 Posisjon 0 – 40, $V_p < 4000$ m/s, delvis < 3500 m/s

 Posisjon 85 – 120, $V_p < 4000$ m/s, delvis ned mot 3500 m/s.

Utenfor disse sonene er hastigheten større enn 5000 m/s og representerer god bergmassekvalitet.

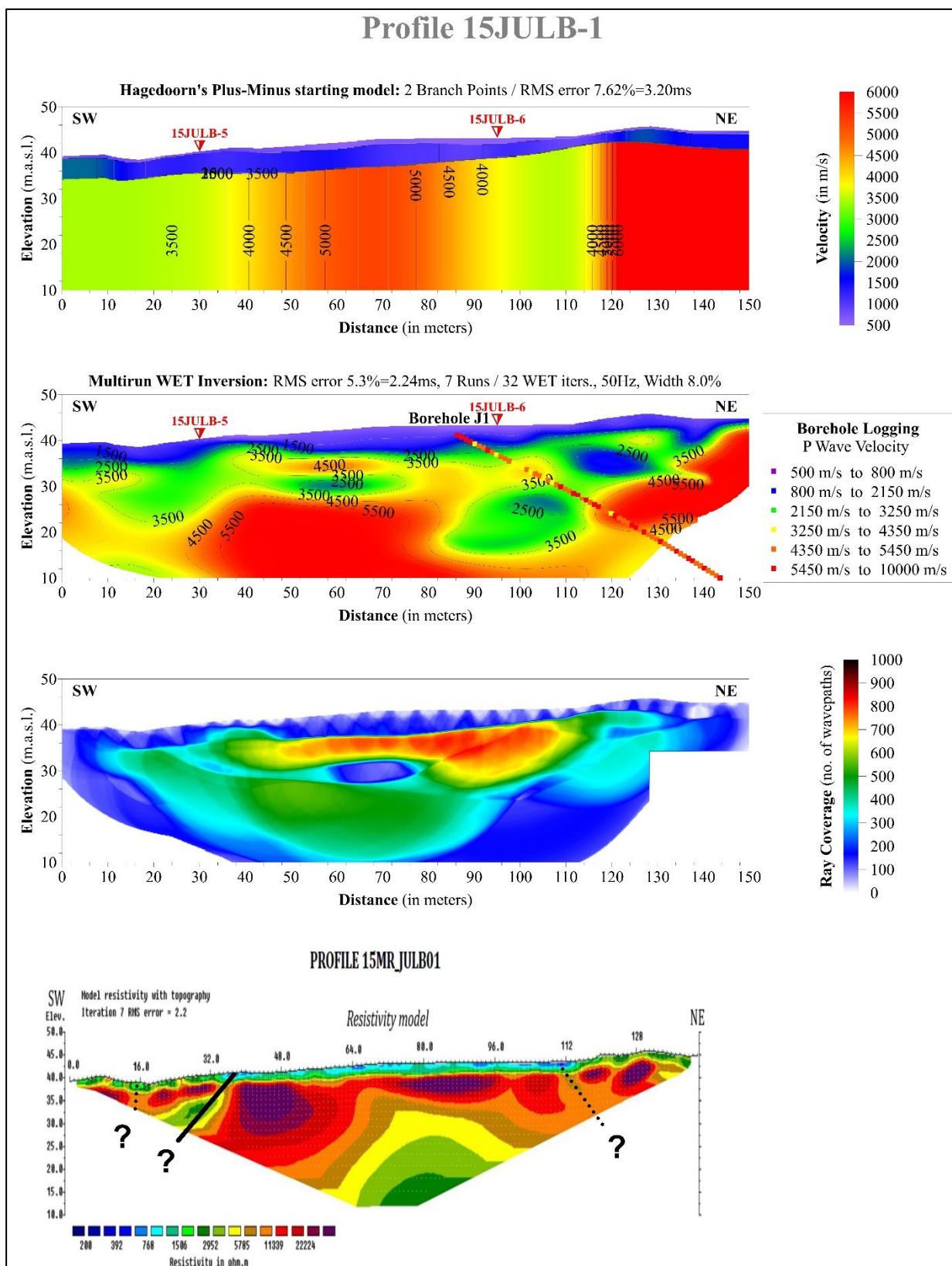
Den tomografiske inversjonen viser et noe mer nyansert bilde. De to indikerte lavhastighetssonene synes å være grunnere og hastigheten mer varierende. Dette kan representere forvitret berg delvis ned til ca. 15 m.o.h.. Borehull J1 skjærer gjennom den ene lavhastighetssonen og her er P-bølgehastigheten jevnt over > 4350 m/s. Sporadisk er det påviste p-bølge-hastighet mellom 3250 m/s og 4350 m/s, men bare i tynne soner som kan representere enkeltstående tynne sleppe-soner. Dette kan indikere at lavhastighetssonen som går på skrå ned fra posisjon 120 til posisjon 90 kan være en falsk hastighetsanomali. Bergmassekvaliteten må vurderes ut fra detaljerte målinger med televiver i borehull J1.

Bølgetettheten (Ray-coverage) er jevnt over mer enn 300 bølger pr. celle og delvis høyere enn 500. I disse områdene må en forvente at hastigheten er relativt godt bestemt.

Resistiviteten viser jevnt over relativt høye verdier, noe som indikerer god bergmassekvalitet. En markert mulig svakhetssone med fall mot SV fremstår ved posisjon 38. I tillegg indikeres meget svakt to mulige soner ved posisjonene 16 og 112. Disse er delvis tolket inn på grunnlag av terrengformer (Se Figur 1). Resistiviteten avtar mot dypet. Årsaken til dette er uvisst, men det kan være en metodisk svakhet.

Vurdering av profilets data.

Refraksjonsseismikken, både Hagedoorn-tolkingen og den tomografiske inversjonen, indikerer dårlig berg ($V_p < 3500$ m/s, delvis < 2500 m/s) i to soner ned til 15 m.o.h.. Resistiviteten viser imidlertid høye resistivitetsverdier ($> 10.000 \Omega m$) i store deler av profilet unntatt i to mindre soner. Lav seismisk hastighet stemmer ikke med resultatene fra borehullslogging i Bh J1. De mulige sonene ved resistivitetsdata bekreftes delvis av terrengformer.



Figur 2: Reprosessert seismikk og resistivitet, profil 15Julb-1. Fra toppen: Startmodell generert med Hagedoorns metode, WET tomografisk inversjon med p-bølge hastighet fra borehullslogg, stråle-dekning (Ray Coverage) og 2D resistivitet. Sort strek viser tolket svakhetszone, sort stipling viser mulig svakhetszone.

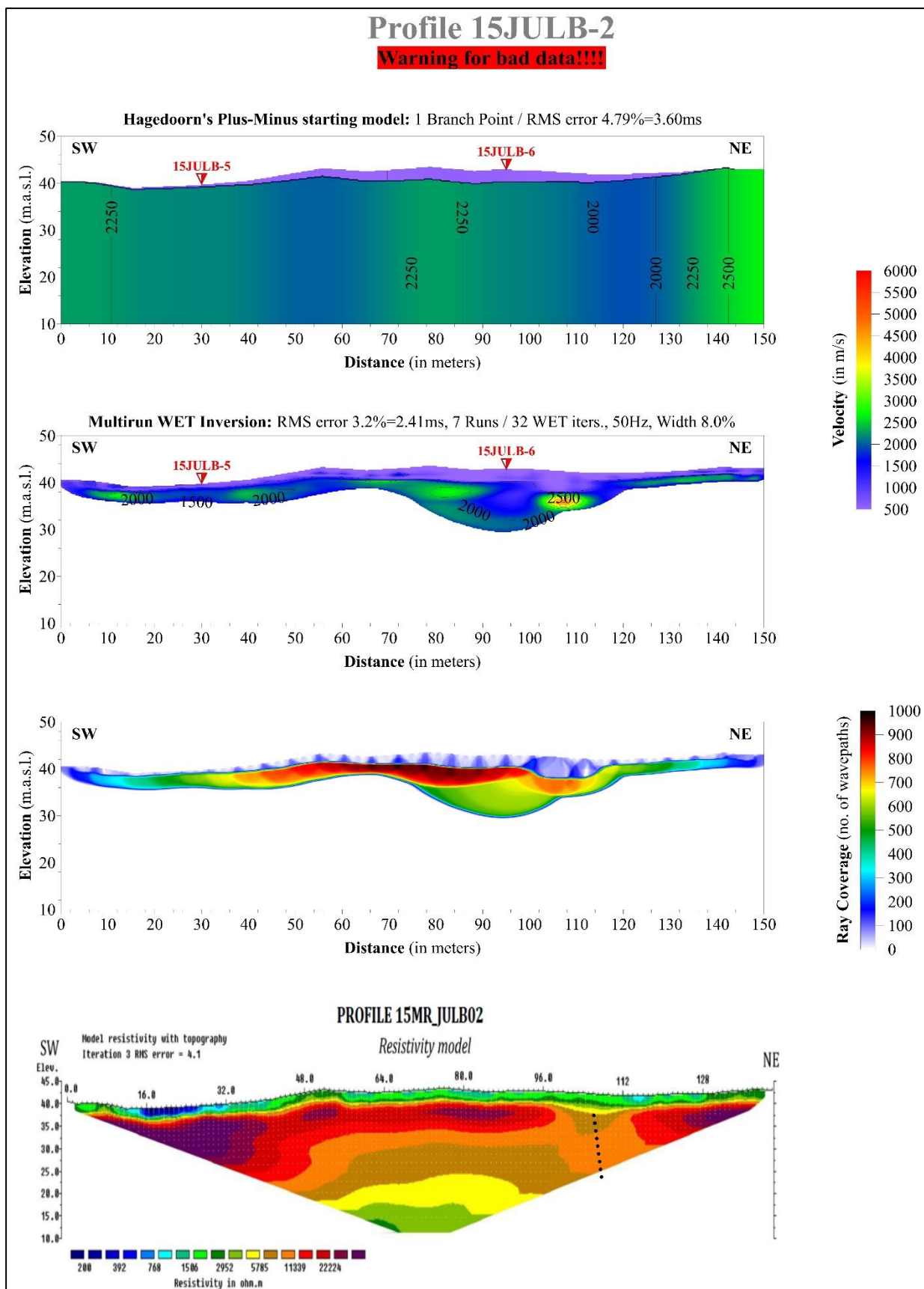
Resultater fra profil 2 på Julbøen (15JULB-2) er vist i **figur 3**. I rapporten fra undersøkelsen (Ruden 2015a) opplyses det at «rådata har redusert kvalitet på profilet». Årsaken til dette oppgis ikke. Kvaliteten på resistivitetsdata vurderes som meget gode.

Reprosesseringen med Hagedoorns metode viser hastigheter jevnt over lavere enn 2500 m/s (løsmassehastigheter). Dette synes usannsynlig og seismikken viser ikke troverdige data ved dette profilet.

Resistiviteten viser øverst et tynt topplag, ca. 2,5 m med resistivitet lavere enn 3000 Ωm . Dette kan representere delvis tørre løsmasser, men også forvitret berg. Under dette er resistiviteten høyere enn 5700 Ωm og representerer trolig god bergmassekvalitet. Unntaket er en ca. 20 m bred sone fra posisjon 98 til 112 hvor resistiviteten er noe lavere. Selv her er resistiviteten høyere enn 5800 Ωm og en kan se bort fra større svakhetssoner/forvitringssoner. Det er uklart hvorfor resistiviteten avtar mot dypet.

Vurdering av profilets data.

Kvaliteten på seismikkdata er så dårlig at en ikke kan stole på tolkingene. Resistivitetsdata oppfattes som gode og de indikerer god bergmassekvalitet. En mulig svakt oppsprukket sone indikeres ved posisjon 98 til 112.



Figur 3: Reprosessert seismikk og resistivitet, profil 15JULB-2. Fra toppen: Startmodell generert med Hagedoorns metode, WET tomografisk inversjon, stråle-dekning (Ray Coverage) og 2D resistivitet. Sort stipling viser en mulig svakhetszone.

Resultater fra profil 3 på Julbøen (15 JULB-3) er vist i **figur 4**. Konsulentene nevner ikke datakvaliteten i sin rapport (Ruden 2015a). NGU vurderer kvaliteten på resistivitetsdata som meget god.

Den automatiske tolkingen av refraksjonsseismikken med Hagedoorns metode viser en tolagsmodell, øverst ett tynt lag med hastighet ca. 1000 m/s som tolkes som løsmasser. Laget tykkest i øst og tynnes ut mot vest. På det meste er laget ca. 10 m tykt. Hastigheten i berg er gjennomgående meget lav, fra større enn 4500 m/s sentralt til ned mot 3000 m/s mot begge profilendene. Dersom dette er reelt kan det indikere dårlig bergmassekvalitet.

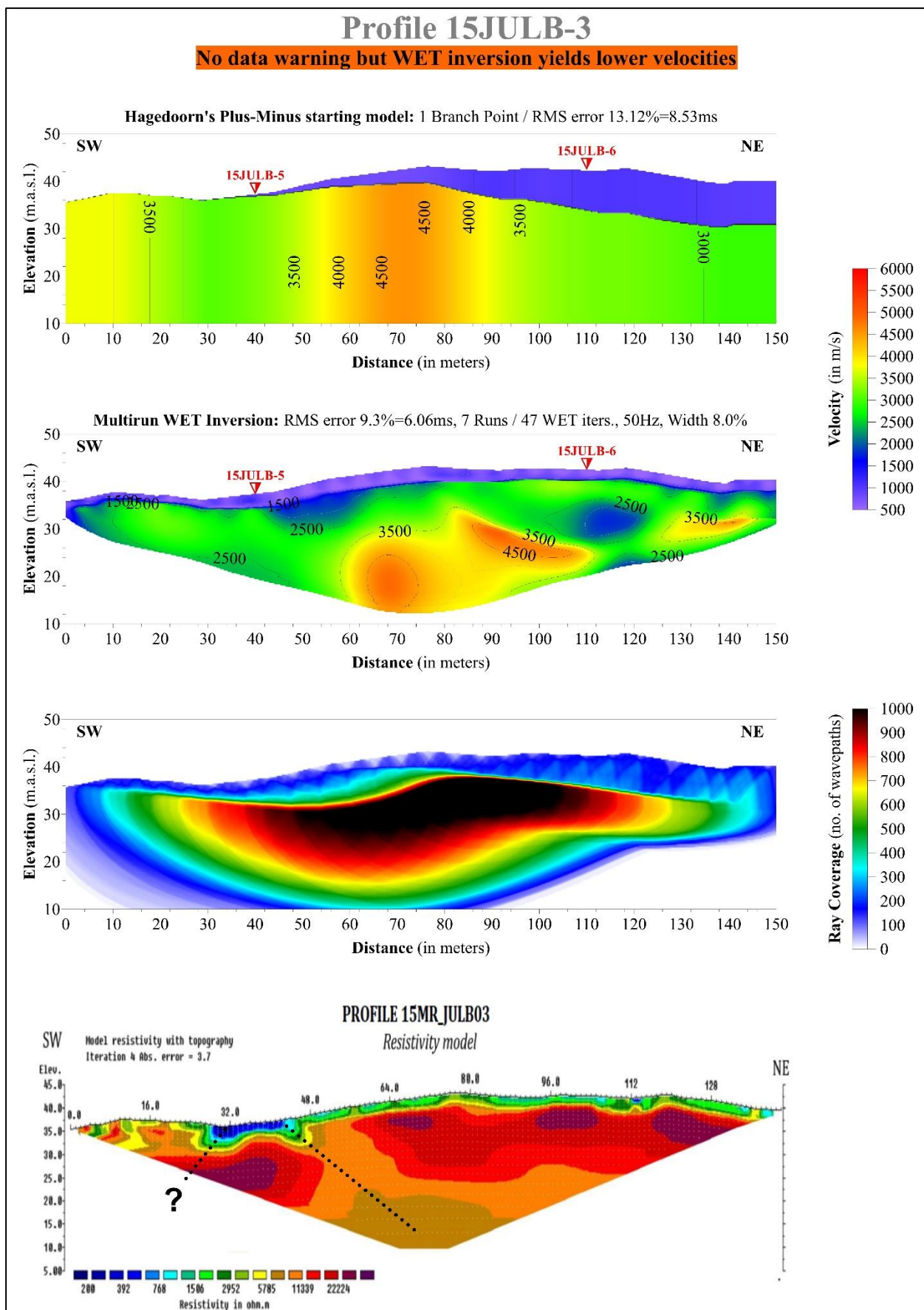
Den tomografiske inversjonen viser også her et noe mer nyansert bilde. Løsmasse-laget har hastighet fra ca. 500 til ca. 1000 m/s og er mer gjennomgående med en mer konstant mektighet på ca. 2 – 4 m. Hastigheten i berg er her enda lavere enn ved Hagedoorns metode, ned mot 2500 m/s. Dette representerer i så fall meget dårlig bergmassekvalitet.

Bølgetettheten (Ray-coverage) er jevnt over mer enn 300 bølger pr. celle og delvis over 1000. I disse områdene må en forvente at hastigheten er relativt godt bestemt.

Resistivitetsdata viser et tynt topplag (< 2m) som er mer eller mindre gjennomgående. Resistiviteten er generelt lavere enn 3000 Ωm . Siden P-bølgehastigheten jevnt over er lavere enn 1000 m/s representerer dette trolig relativt tørre løsmasser da resistiviteten er noe høy. Resistiviteten under dette første laget er høy, større enn 6000 Ωm og delvis over 20.000 Ωm . Dette kan tolkes som relativt godt og lite oppsprukket berg. Noe lavere resistivitet observeres som skrå sone ved posisjon 48. Det kan også tolkes ei mulig svakt oppsprukket sone ved posisjon 30. Resistiviteten er ikke spesiell lav, men dette kan representere en mindre sprekkeson.

Vurdering av profilets data.

Seismikkdata indikerer delvis svært lave hastigheter i berg, mens resistiviteten viser høye verdier som trolig representerer god bergmassekvalitet. Dette er motstridende. Kvaliteten av seismikkdata langs flere andre profiler er dårlige og ved borehullslogging er det påvist jevnt over høye p-bølgehastigheter i området. NGU velger her å stole på resistivitetsdata. Forsenkning i terrenget ved posisjon 30 til 45 kan være en indikasjon på to svakt oppsprukket soner.



Figur 4: Reprosessert seismikk og resistivitet, profil 15Julb-3. Fra toppen: Startmodell generert med Hagedoorns metode, WET tomografisk inversjon, stråle-dekning (Ray Coverage) og 2D resistivitet. Sort stipling viser mulige svakhetssoner.

Resultater fra profil 4 på Julbøen (15JULB-4) er vist i **figur 5**. NGU vurderer datakvaliteten ved seismikken som tvilsom mens kvaliteten på resistiviteten vurderes som god.

Den automatiske tolkingen av refraksjonsseismikken med Hagedoorns metode viser en tolagsmodell, med ett meget tynt topplag med hastighet ca. 500 m/s. Dette synes rimelig og kan representere løst lagret (tørre?) løsmasser. Under dette er p-bølgehastigheten ned mot 2500 m/s noe som vurderes høyest usannsynlig på en fjellrygg som en finner her.

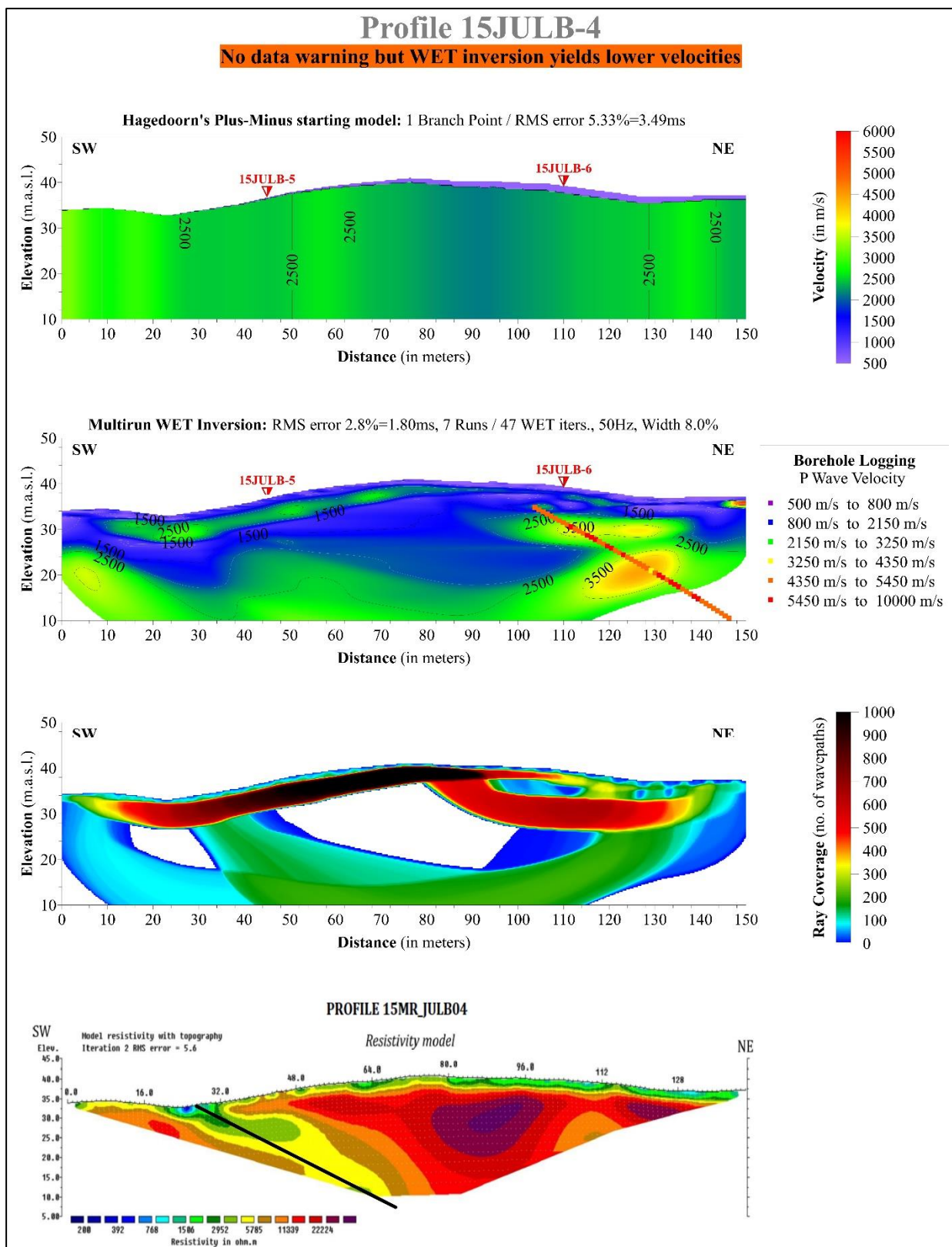
Den tomografiske inversjonen viser et tilsvarende bilde med lave hastigheter, stedvis lavere enn 1500 m/s som om ikke annet var kjent, ville bli tolket til å representere løsmasser. I et borehull i nærområdet (Bh J2) er P-bølgehastigheten logget, og denne viser for det meste hastigheter på over 4350 m/s og delvis over 5450 m/s (Ruden 2015b). Dette avspeiler god bergmassekvalitet.

Bølgetettheten (Ray-coverage) viser et komplisert mønster med flere områder uten strålegjennomgang. Dette styrker ikke tilliten til datasettet.

Resistivitetsdata viser igjen et tynt topplag (ca. 2 m) på toppen med resistivetsverdier lavere enn 3000 Ωm . Trolig representerer dette løsmasser, men forvitret berg kan ikke utelukkes. Under dette er resistiviteten jevnt over høyere enn 6000 Ωm som trolig representerer god bergmassekvalitet. Unntaket her er en sone med utgående i en forsenkning i terrenget mellom posisjonene 16 og 32 som faller slakt mot øst. Resistiviteten ved bergoverflaten er ca. 1500 Ωm og dette representerer trolig en ren sprekkesone (Rønning et al. 2014).

Vurdering av profilets data.

Refraksjonsseismikken langs profil 15JULB-4 vurderes som ubrukelig. Inverterte P-bølge-hastigheter er delvis bare halvparten av hastigheten målt i nærliggende borehull. Resistivitetsdata vurderes som gode. Generelt vurderes bergmasse-kvaliteten til å være god, men en mulig sprekkesone indikeres ved posisjon 27.



Figur 5: Reprosessert seismikk og resistivitet, profil 15JULB-4. Fra toppen: Startmodell generert med Hagedoorns metode, WET tomografisk inversjon med p-bølge hastighet fra borehullsløgg, stråle-dekning (Ray Coverage) og 2D resistivitet. Sort strek viser tolket svakhetssone.

Resultater fra profil 5 på Julbøen (15JULB-5) er vist i **figur 6**. NGU vurderer datakvaliteten ved seismikken som tvilsom mens kvaliteten på resistiviteten vurderes som god.

Den automatiske tolkingen av refraksjonsseismikken med Hagedoorns metode viser en tolagsmodell, med ett 2 – 6 m tykt topplag med hastighet ca. 1500 m/s. Dette synes rimelig og kan representere løsmasser. Under dette ligger P-bølgehastigheten jevnt over lavere enn 4000 m/s og stedvis under 3500 m/s, noe som vurderes høyst usannsynlig på en fjellrygg som en finner her. Profilet synes imidlertid å gå langs en mulig svakhetssone (se Figur 21). Dersom denne er tykk kan resultatene være reelle, men dersom sonen er relativt smal (5 – 10 m) vil en ved refraksjonsseismikken kartlegge høy hastighet utenfor sonen.

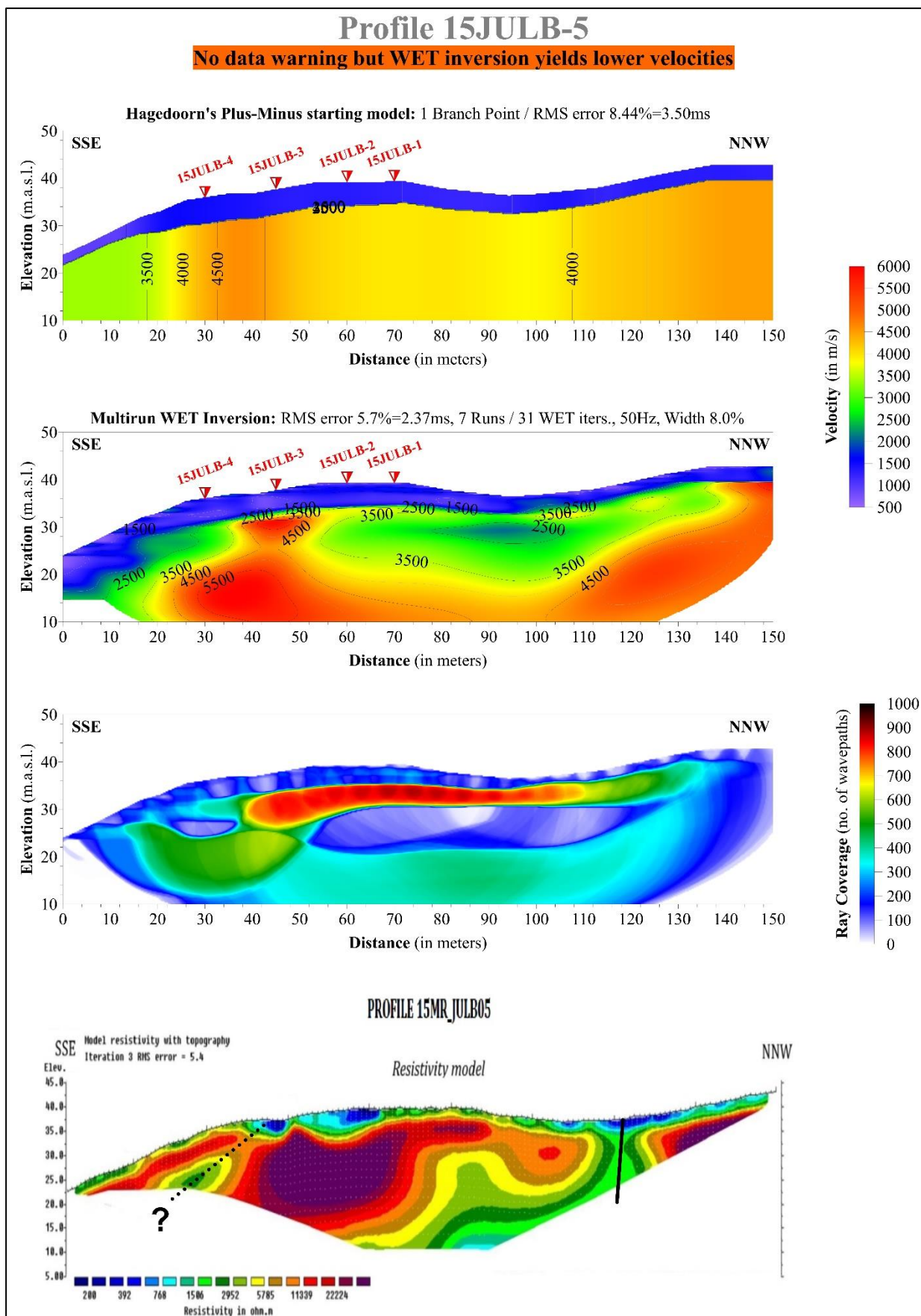
Den tomografiske inversjonen viser et mer nyansert bilde. Topplaget med tykkelse 3 – 6 m opptrer med hastigheter 500 til 1500 m/s og representerer trolig løsmasser. Under dette indikeres P-bølgehastigheter på fra 2500 til 4500 m/s. Hastigheten øker mot dypet, og fra ca. 30 meters dyp opptrer normale P-bølgehastigheter for lite oppsprukket gneisbergarter (4500 til > 5500 m/s). Dette kan være forenlig med at profilet går langs en sprekkesone, men at en når massivt berg enten sidelengs eller på ett større dyp under en sprekkesone med fall.

Bølgetettheten (Ray-coverage) viser et komplisert mønster med bl.a. et område med lav strålegjennomgang sentralt. At stråletettheten øker igjen mot dypet kan skyldes modellen diskutert ovenfor.

Resistivitetsdata viser et tynt topplag med varierende tykkelse 1 til 4 m. Resistiviteten i laget variere også fra ca. 3000 Ω m og ned mot 300 Ω m. Dette kan representere løsmasser, men forvitret berg kan ikke utelukkes. Under dette er resistiviteten jevnt over høyere enn 6000 Ω m som trolig representerer god bergmassekvalitet. Unntaket her er en sone med utgående mot slutten av profilet og som synes å gå under laget med høy resistivitet. Lavere resistivitet i starten av profilet kan også indikere en mulig svakt oppsprukket sone med fall mot SSØ. Denne tolkingen tilsvarer den som ble gitt for refraksjonsseismikken.

Vurdering av profilets data.

Selv om refraksjonsseismikken innledningsvis ble karakterisert som tvilsom, kan det hende at uvanlig lave hastigheter spesielt ved tolkingen med Hagedoorns metode, er en effekt av at profilet delvis følger en sprekkesone i terrenget. Resistivitetsdata indikerer det samme.



Figur 6: Reprosessert seismikk og resistivitet, profil 15JULB-5. Fra toppen: Startmodell generert med Hagedoorns metode, WET tomografisk inversjon, stråle-dekning (Ray Coverage) og 2D resistivitet. Sort strek viser tolket svakhetszone, sort stipling viser mulig svakhetszone.

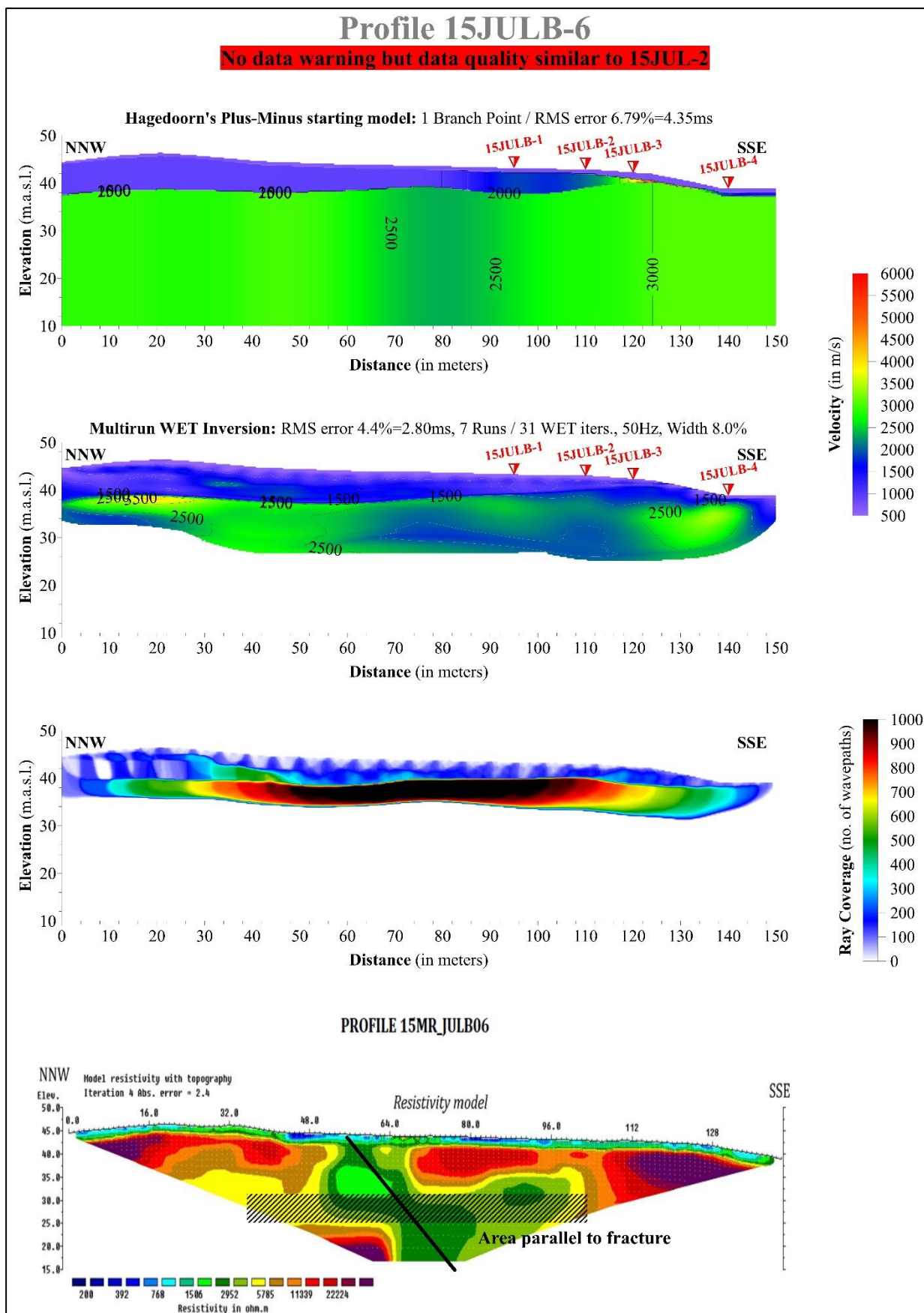
Resultater fra profil 6 på Julbøen (15JULB-6) er vist i **figur 7**. NGU vurderer datakvaliteten ved seismikken som meget tvilsom mens kvaliteten på resistiviteten vurderes som god.

Den automatiske tolkingen av refraksjonsseismikken med Hagedoorns metode viser en trelagsmodell, hvorav de to første lagene kan representere løsmasser. Under dette indikeres for det meste hastigheter lavere enn 3000 m/s og delvis lavere enn 2500 m/s. Dette skulle tilsi svært dårlig bergmassekvalitet, med dette virker lite sannsynlig. Logging av borehull har vist hastigheter opp mot 5500 m/s i området (se figur 5, profil 15JULB-4, data hentet fra Ruden 2015b). Enkelte andre profiler i området viser høyere hastigheter og profilet ligger på en fjellrygg. Den tomografiske inversjonen viser beregnede hastigheter ned til under 30 m.o.h. mens strålemønsteret viser ingen strålegjennomgang dypere enn ca. 35 m.o.h.. NGU velger å avstå fra videre vurdering av refraksjonsseismikken.

Resistivitetsdata viser et tynt lag med jevn tykkelse på ca. 1 til 2 m. Resistiviteten i laget variere fra ca. 3000 Ω m og ned mot 300 Ω m. Dette kan representere løsmasser, men forvitret berg kan ikke utelukkes. Under dette er resistiviteten jevnt over høyere enn 6000 Ω m som trolig representerer god bergmassekvalitet. Unntaket her er en mulig svakhetszone med utgående under løsmassene mellom posisjonene 50 og 65, en sone som indikerer et fall mot SSØ. Lavere resistivitet mot dypet kan også her skyldes at profilet går mer eller mindre langs en sprekkesone.

Vurdering av profilets data.

Refraksjonsseismikken langs profil JULB-6 er så tvilsom at NGU avstår fra å tolke disse data. Resistivitetsdata langs profilet indikerer en ca. 15 m bred svakhetszone med fall mot SSØ og i tillegg kan resistivitetsforløpet mot dypet antyde at profilet går mer eller mindre langs en sprekkesone.



Figur 7: Reprosessert seismikk og resistivitet, profil 15JULB-6. Fra toppen: Startmodell generert med Hagedoorns metode, WET tomografisk inversjon, stråle-dekning (Ray Coverage) og 2D resistivitet. Sort strek viser tolket svakhetszone, sort stipling mulig påvirkning fra svakhetszone parallelt resistivitetsprofil.

Resultater fra profil 7 på Julbøen (15JULB-7) er vist i **figur 8**. NGU vurderer datakvaliteten både ved seismikken og resistivitetsmålingene som akseptabel. Refraksjonsseismikken er her utført med 40 geofoner med avstand 2 m, og skuddpunkt for hver 6 m. Resistiviteten er utført med 1 m elektrodeavstand. Topografien ved seismikken og resistivitetsdata avviker en del. NGU har benyttet en digital terrengmodell med cellestørrelse 1m x 1m. Det er uklart hvilken topografisk modell Ruden AS har benyttet ved resistivitetsmålingene.

Den automatiske tolkingen av refraksjonsseismikken med Hagedoorns metode viser en trelagsmodell, hvorav de to første lagene kan representere løsmasser (P-bølge hastighet 1000 til 2000 m/s). Tykkelsen synes å være fra 2 til 5 m. Under dette vises hastigheter fra 4500 m/s opp mot 6000 m/s i store deler av profilet. Dette tolkes som god bergmassekvalitet. På endene av profilet antydes lavhastighetssoner, mindre enn 4500 m/s i starten og ned mot 3500 m/s fra posisjon 60 og ut profilet. Her antydes dårligere bergmassekvalitet.

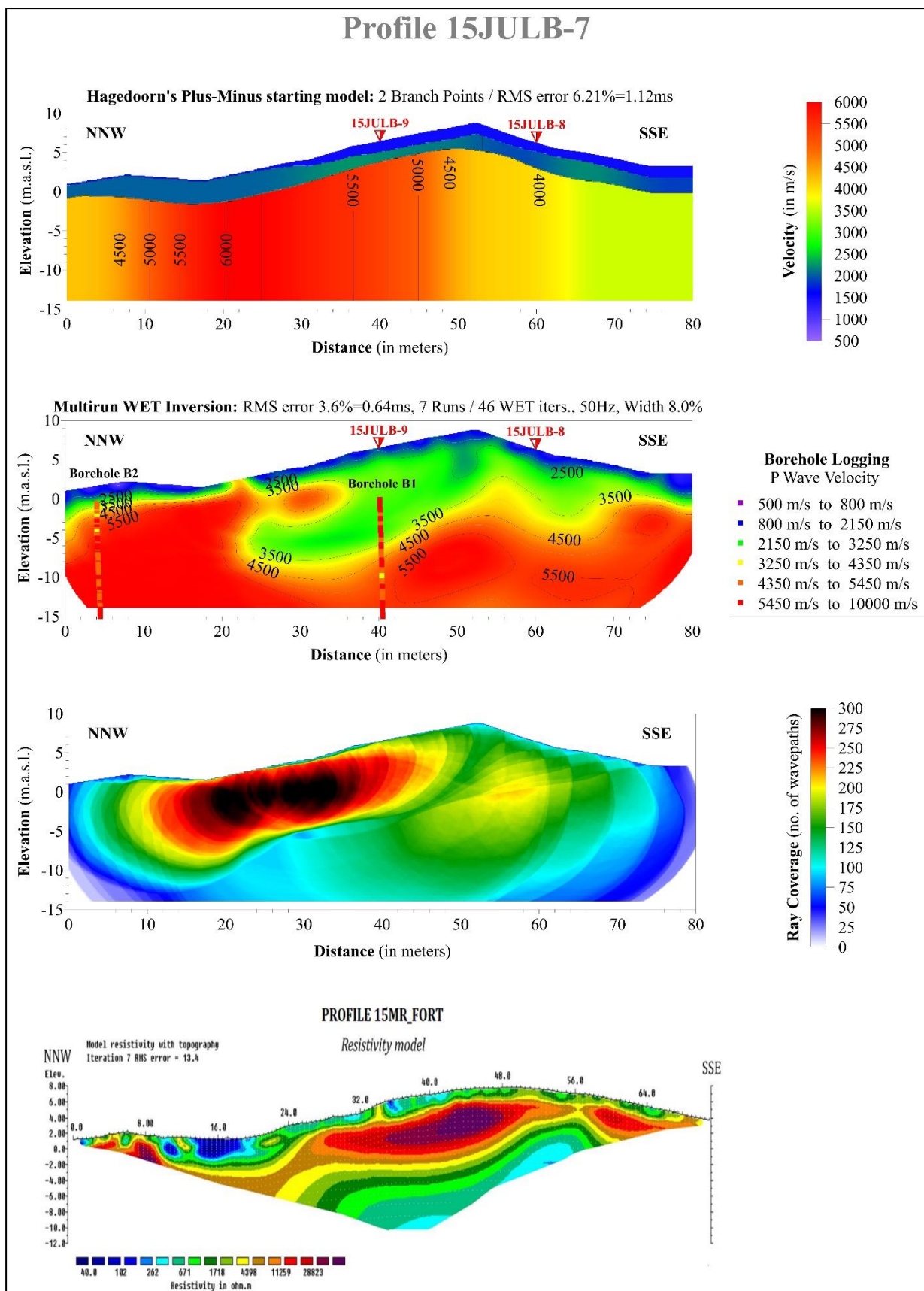
Den tomografiske inversjonen av de samme data viser et noe annet bilde. Laget med løsmassehastigheter ($V_P < 2000$ m/s) er tynnere og stedvis fraværende. I den delen av profilet som tolkes som berg, opptrer et større parti der hastigheten i området 2500 m/s til 3500 m/s. Dette kan tolkes som forvitret berg. Et nærliggende borehull viser imidlertid P-bølge-hastigheter fra 4350 m/s til over 5450 m/s. Ellers kan det bemerkes at forvitret berg som står opp i en knaus synes lite sannsynlig. I starten av profilet viser både det tomografiske bildet og loggingen i borehull B2 god bergmassekvalitet. Mot slutten av profilet indikeres god bergmassekvalitet med hastigheter fra 4500 m/s til over 5500 m/s relativ dagnært (dyp 3- 4 m). Tolkingen med Hagedoorns pluss-minus-metode viser dårlig bergmassekvalitet i dette området.

Bølgetettheten (Ray-coverage) viser et tett mønster i venstre del av profilet (mer enn 200 strålebaner/celle) men noe lavere i høyre del. Dette er trolig styrt av lavhastighetssonen som fremkommer ved WET-inversjonen.

Resistivitetsdata (merk dybdeskala) viser et tynt lag med jevn tykkelse på ca. 1 til 2 m. Resistiviteten i laget variere fra ca. 3000 Ω m og ned mot 200 Ω m. Dette kan representere løsmasser, men forvitret berg kan ikke utelukkes. Under dette er resistiviteten jevnt over høyere enn 6000 Ω m som trolig representerer god bergmassekvalitet. Sentralt i profilet mot dypet avtar resistiviteten. Dette kunne vært en effekt av sjøen som «stjeler strøm», men avstanden til sjø er egentlig for stor til det.

Vurdering av profilets data.

Kvaliteten av refraksjonsseismikken og resistivitetsdata langs profil 15JULB-7 vurderes som akseptabel. To tolkinger av refraksjonsseismikken viser forskjellig bergmassekvalitet på to områder. P-bølge hastigheter fra borehullslogging indikere at den tomografiske inversjonen viser feil. På den annen side vil tomografisk inversjon kunne gi bedre resultater der tradisjonell tolking med Hagedoorns pluss-minus-metode har svakheter. Resistivitetsdata indikerer god bergmassekvalitet under løsmasser/forvitert berg, men har en viss usikkerhet omkring bergmassekvaliteten mot dypet. Siden området skal bære tårnene for hengebrua må en her stole på data fra boringer, kjerneboring eller brønnboring men med inspeksjon ved bruk av optisk eller akustisk televiwer som kan identifisere enkeltsprekker og gi sprekkeretning.



Figur 8: Reprosessert seismikk og resistivitet, profil 15Julb-7. Fra toppen: Startmodell generert med Hagedoorns metode, WET tomografisk inversjon med p-bølge hastighet fra borehullslogg, stråle-dekning (Ray Coverage) og 2D resistivitet.

Resultater fra profil 8 på Julbøen (15JULB-8) er vist i **figur 9**. NGU vurderer datakvaliteten ved seismikken som god. Refraksjonsseismikken er her utført med 40 geofoner med avstand 2 m, og skuddpunkt for hver 6 m. Det er ikke utført resistivitetsmålinger langs dette profilet.

Den automatiske tolkingen av refraksjonsseismikken med Hagedoorns metode viser en trelagsmodell, hvorav de to første lagene kan representere løsmasser (P-bølge hastighet 500 til 2000 m/s). Tykkelsen synes å være fra 2 til 6 m. Under dette vises hastigheter fra 4500 m/s opp mot 6000 m/s i store deler av profilet. Dette tolkes som god bergmassekvalitet uten noen svakhetssoner av betydning.

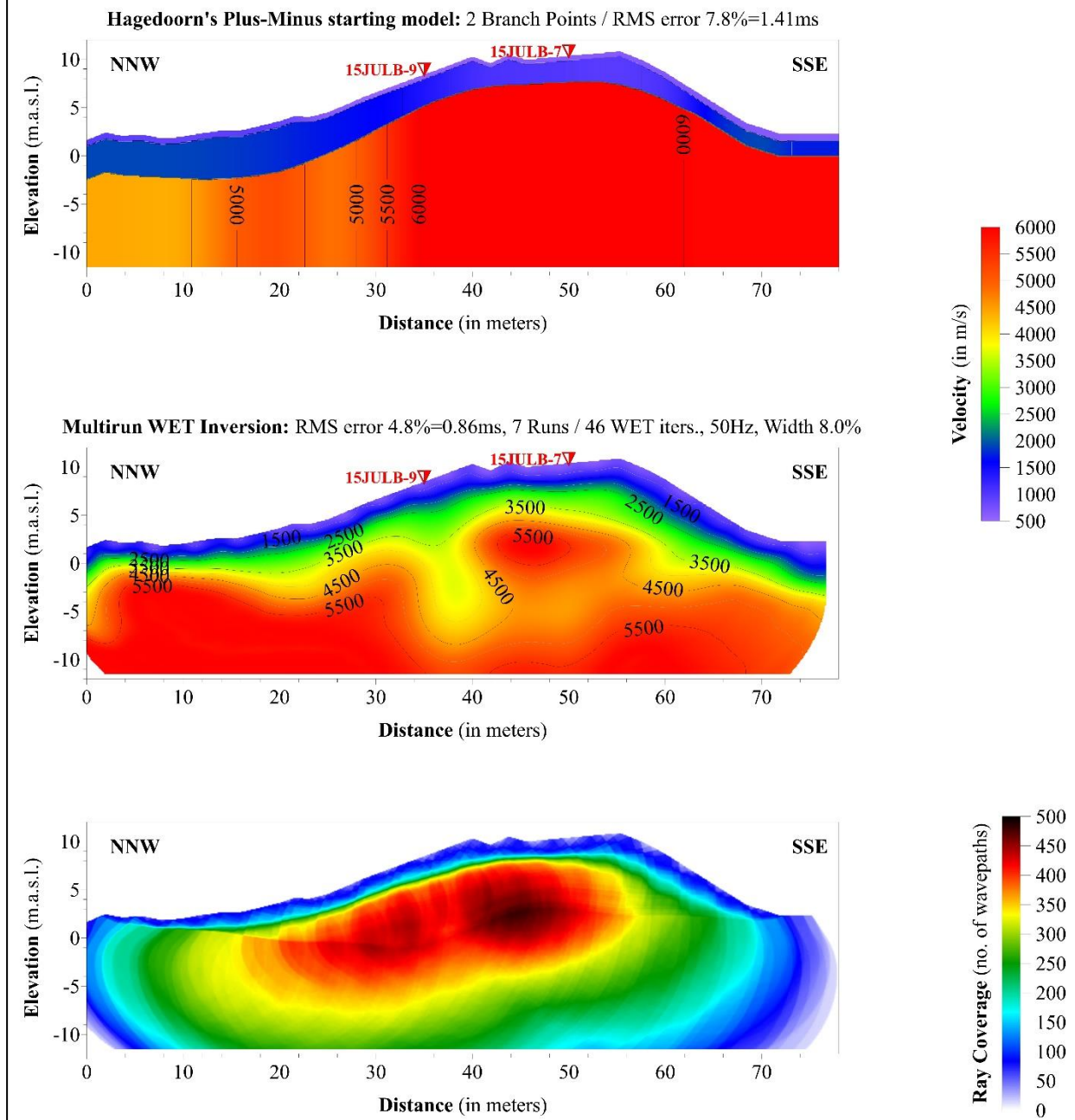
Den tomografiske inversjonen av de samme data viser et noe annet bilde. Laget med løsmasse hastigheter ($V_P < 2000$ m/s) er tynnere men til gjengjeld fremstår en overgangssone med p-bølge hastighet rundt 3000 m/s med en gradvis overgang til høyere hastigheter. Dette kan være forvitret berg med tykkelse fra 2 m til 4-5 m (også kalt dagfjell). Ved posisjon 40 indikeres en fordypning i hastighetsprofilet som kan representere en mindre sleppe.

Bølgetettheten (Ray-coverage) viser et tett mønster sentralt med mer enn 300 strålebaner/celle). Dette er en indikasjon på pålitelige data.

Vurdering av profilets data.

Kvaliteten på refraksjonsseismikken vurderes som god. Begge de to viste tolkingene indikere i hovedsak god bergmassekvalitet. Den tomografiske inversjonen antyder en mindre sprekkesone sentralt i profilet, og det kan være noe forvitret berg (2 – 4 m) dagnært.

Profile 15JULB-8



Figur 9: Reprosessert seismikk profil 15Julb-8. Fra toppen: Startmodell generert med Hagedoorns metode, WET tomografisk inversjon og stråle-dekning (Ray Coverage).

Resultater fra profil 9 på Julbøen (15JULB-9) er vist i **figur 10**. NGU vurderer datakvaliteten ved seismikken som i utgangspunktet som god, men Ruden (2015a) har plottet en knekk på profilet like over midten. Denne kan skjule en lavhastighetszone om det ikke er korrigeret for kortere avstand mellom geofonene. Refraksjonsseismikken er her utført med 40 geofoner med avstand 2 m, og skuddpunkt for hver 6 m. Det er ikke utført resistivitetsmålinger langs dette profilet.

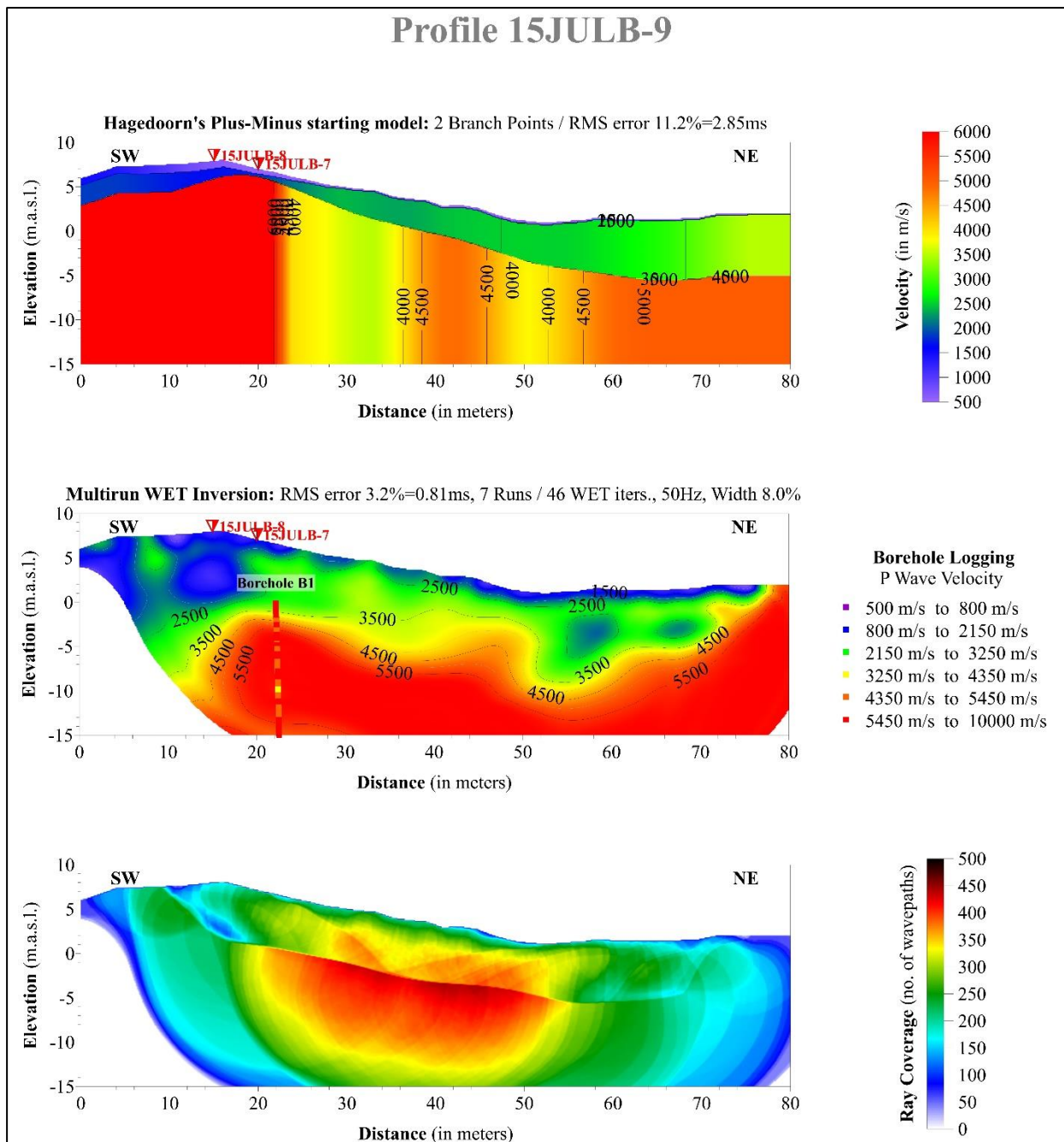
Den automatiske tolkingen av refraksjonsseismikken med Hagedoorns metode viser en trelagsmodell. I den første delen av profilet (0 til 25 m) kan de to første lagene representere løsmasser (P-bølgehastighet 500 til 2000 m/s). Tykkelsen synes å være fra 2 til 3 m. I resten av profilet er hastigheten i topplaget fra 2500 m/s til nesten 4000 m/s. Dette tolkes som forvitret berg (dagfjell) med tykkelse opp mot 7 til 8 m. Under dette vises hastigheter fra 4500 m/s opp mot 6000 m/s i store deler av profilet, men med mulige svakhetszoner fra posisjon 25 til 35 og fra 48 til 52. Hastigheten i disse er henholdsvis ca. 3500 m/s og 3800 m/s. Dette tolkes som mindre god bergmassekvalitet, men sonen ved posisjon 50 m kan være påvirket av den omtalte knekken på profilet. NGU kjenner ikke til om tilsendte data er korrigeret for dette.

Den tomografiske inversjonen av de samme data viser et noe annet bilde. I starten av profilet er hastigheten relativt lav (< 2000 m/s) ned til ca. 8 - 10 m. Mot øst (stigende posisjon) øker hastigheten noe, men ligger lavere enn 3500 m/s. Dette er en indikasjon på forvitret/oppsprukket berggrunn og denne er spesielt dyp i forsenkningen i terrenget (eidet over til Julneset). Borehull B2 bekrefter god bergmassekvalitet på et visst dyp i starten av profilet.

Bølgetettheten (Ray-coverage) viser et tett mønster sentralt med mer enn 300 strålebaner/celle. Et gjennomgående avvik i mønsteret kan være en effekt av overgang til mer stabilt berg.

Vurdering av profilets data.

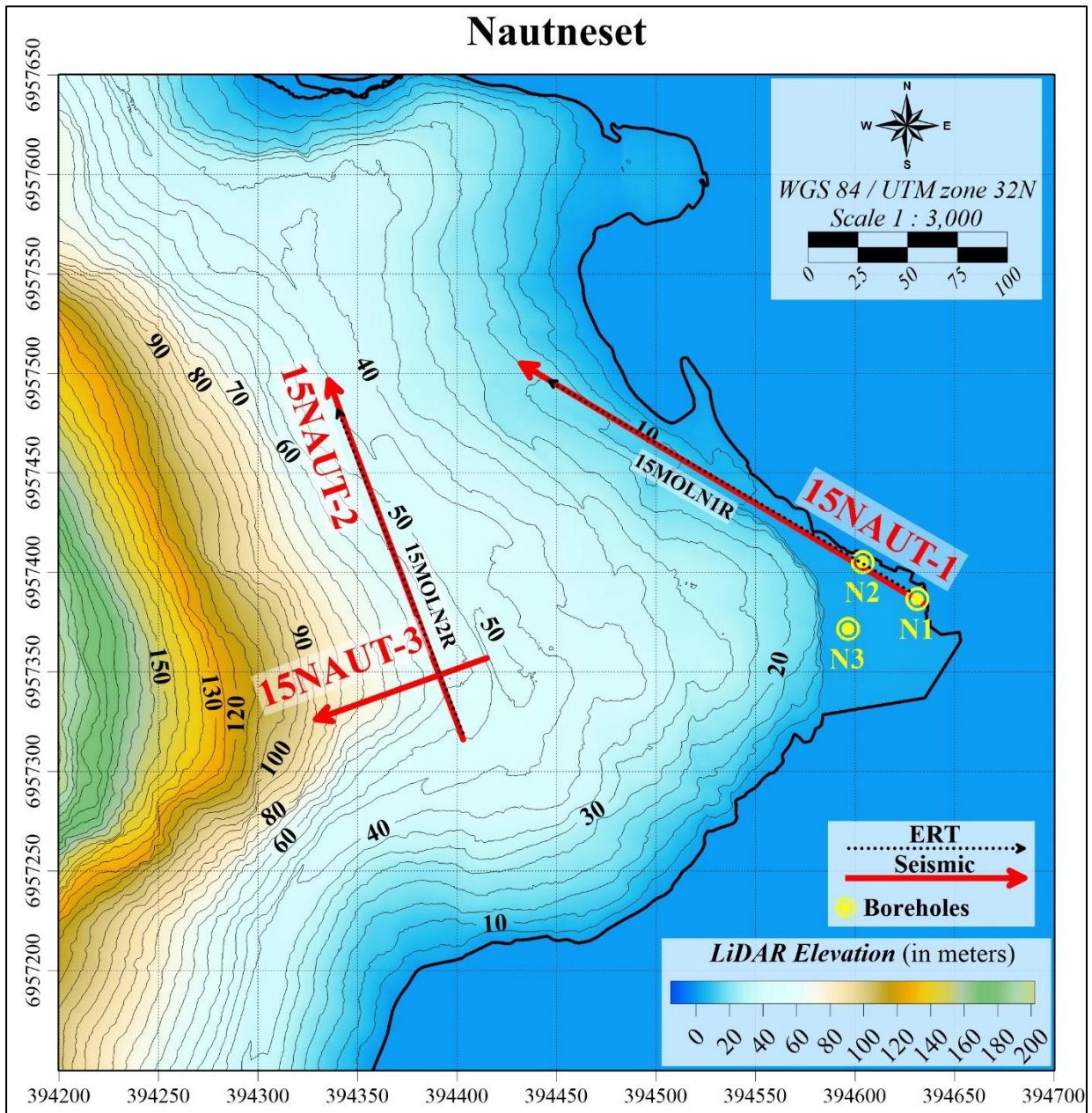
Kvaliteten på refraksjonsseismikken vurderes som god. Det er noen nyanseforskjeller i de to presenterte tolkingene. Disse kan forklares med metodiske svakheter. Det kan synes som en her har noe forvitring i overflaten, men at bergmassekvaliteten på dypet (fra ca. 5 m under havet og ned) er god.



Figur 10: Reprosessert seismikk profil 15Julb-9. Fra toppen: Startmodell generert med Hagedoorns metode, WET tomografisk inversjon med p-bølge hastighet fra borehullslogg og stråle-dekning (Ray Coverage).

3.2 Nautneset

Figur 11 viser beliggenheten av målte profiler ved Nautneset. Profilet 15Naut-1 plassert ved vestlige tårn for hengebrua mens profilene 15Naut-2 og 15Naut-3 ligger i området for ankerfeste for hengebrua. Det er målt refraksjonsseismikk langs alle tre profilene og resistivitet langs profilene 15Naut-1 og -2.



Figur 11: Plassering av profiler og boringer ved Nautneset på Otrøya.

Resultater fra profil 1 på Nautneset (15Naut-1) er vist i **figur 12**. NGU vurderer datakvaliteten ved seismikken som god. Refraksjonsseismikken er her utført med 120 geofoner med avstand 2 m, og skuddpunkt for hver 6 m. Resistivitet er målt med fire kabler hvor elektrodeavstanden var 2 m, total lengde ca. 200 m. Resistivitetsprofilen ligger stedvis så nært sjøen at dette påvirker datakvaliteten.

Den automatiske tolkingen av refraksjonsseismikken med Hagedoorns metode viser en trelagsmodell. Hastigheten i de to første lagene, som har en tykkelse på 4 – 8 m, er lavere enn 2000 m/s og representerer trolig løsmasser. Det tredje laget tolkes som berg, og her varierer hastigheten mye, fra mindre enn 3000 m/s til over 5000 m/s. Mulige svakhetssoner finnes ved posisjon 38 til 52 (ca. 3500 m/s) og ved posisjon 75 til 93 (ca. 3500 m/s). Også mot slutten av profilet (posisjon 198 og ut profilet) fremstår en lavhastighetszone hvor hastigheten gjennomgående er lavere enn 3000 m/s.

Den tomografiske inversjonen av data viser et tilsvarende bilde som Hagedoorns-tolkingen. De to mulige svakhetssonene i starten av profilet smelter sammen mot dypet og hastigheten ligger i samme området (ca. 3500 m/s). Sonen mot enden av profilet indikerer en hastighet lavere enn 3000 m/s. En må her bemerke at all inversjon av data mot slutten av profilet kan være beheftet med en viss usikkerhet. Logging i de to borehullene N1 og N2, tegnet inn på den tomografiske tolkingen, viser seismiske hastigheter stort sett i intervallet 4350 m/s til 5450 m/s. Dette samsvarer ikke med tolket løsmassetykkelse og heller ikke med en tolket svakhetszone ved posisjon 40 m.

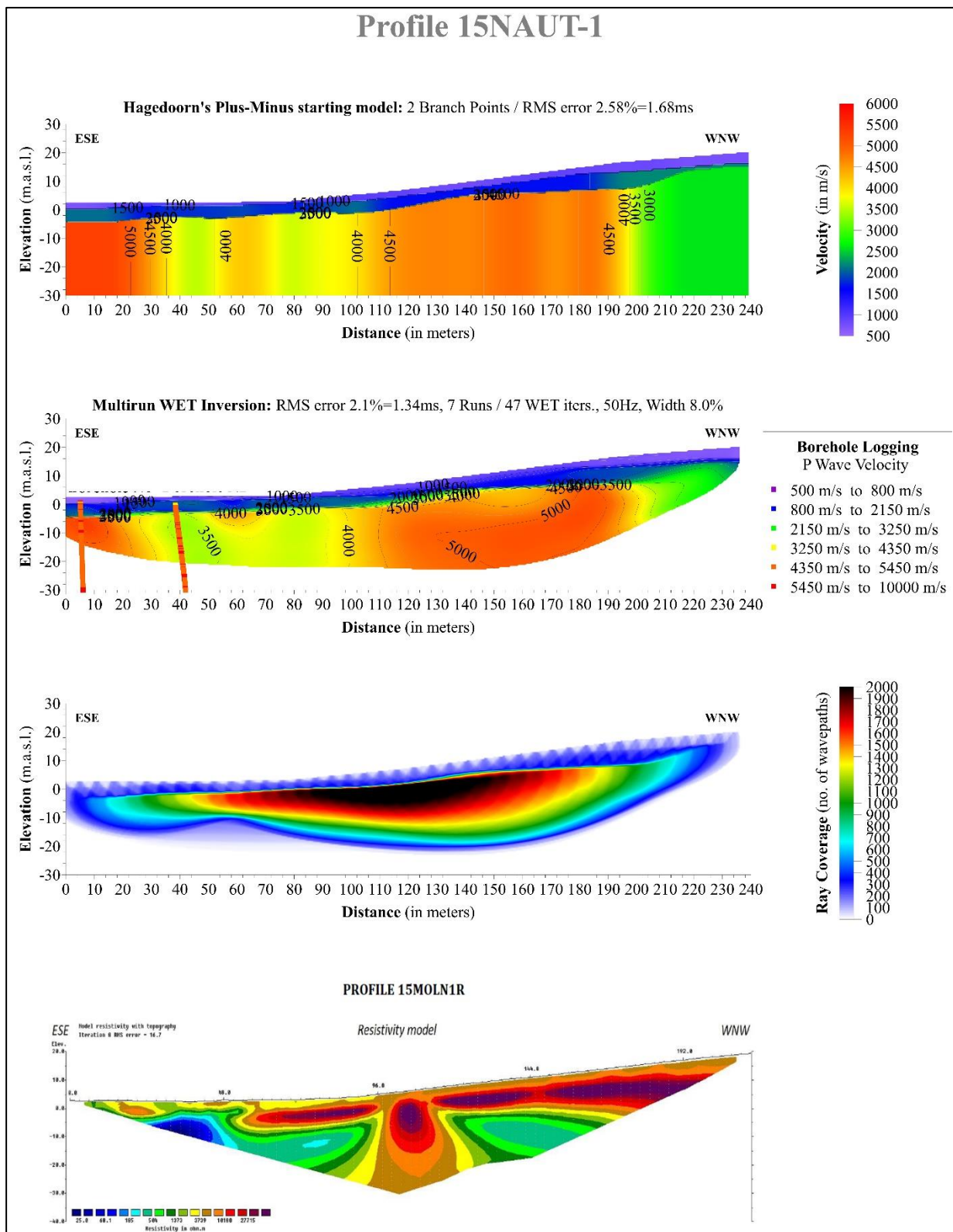
Bølgetettheten (Ray-coverage) viser et tett mønster sentralt med opp mot 2000 strålebaner/celle. Mønsteret viser et normalt forløp, noe som indikerer god datakvalitet. En merker seg at bølgestrålene går relativt grunt, noe som tilsier stor hastighetskontrast mellom overliggende løsmasser og berg.

Resistivitetsdata avspeiler avstanden fra elektrisk meget godt ledende sjøvann. Lav resistivitet dagnært ved starten av profilet fremstår der profilet går nærmest sjøen og data her er ikke troverdig. Et parti midt på profilet er avstanden til sjøen noe større enn målingenes dybderekkevidde og partiet fremstår med høy resistivitet. Gjennomgående høy resistivitet i de øvre 10 til 20 m vurderes som pålitelig og representerer her god bergmassekvalitet. Dette strider med en mulig svakhetszone tolket ved seismikken mot slutten av profilet.

Vurdering av profilets data.

Kvaliteten på refraksjonsseismikken vurderes som god. De to viste tolkingene viser tilsvarende bilder med to indikerte svakhetssoner lengst mot SSØ, og en svakhetszone mot slutten av profilet. Logging av borehull N2 viser høy seismisk hastighet, noe som ikke er i samsvar med den ene tolkede svakhetssonen.

Resistivitetsdata påvirkes sterkt av nærheten til sjøen, og de dypere deler av profilet er ubrukelig til vurdering av bergmassekvalitet. Dagnært, grunnere enn 10 – 20 m, indikeres god bergmassekvalitet fra posisjon 75 og videre mot VNV. Dette er i strid med dårlig bergmassekvalitet ved slutten av seismikkprofilet.



Figur 12: Repressert seismikk og resistivitet, profil 15Naut-1. Fra toppen: Startmodell generert med Hagedoorns metode, WET tomografisk inversjon med p-bølge hastighet fra borehullslogg, stråle-dekning (Ray Coverage) og 2D resistivitet.

Resultater fra profil 2 på Nautneset (15Naut-2) er vist i **figur 13**. Refraksjonsseismikken er her utført med 100 geofoner med avstand 2 m (profillengde 200 m), og skuddpunkt for hver 6 m. NGU vurderer datakvaliteten ved seismikken som ubrukelig. Resistivitet er målt med fire kabler (180 m) hvor elektrodeavstanden var 2 m og kvaliteten vurderes som god.

Den automatiske tolkingen av refraksjonsseismikken med Hagedoorns metode viser et meget tynt topplag og ellers mer eller mindre homogen p-bølgehastighet lavere enn 3000 m/s. Dette anses som usannsynlig siden profilet i sin helhet ligger på et utspring i fjellet.

Den tomografiske inversjonen av data viser et tilsvarende bilde som Hagedoorns-tolkingen. Her er hastigheten mer lagdelt og enda lavere, ned mot 1500 m/s under stedvis høyere hastighet.

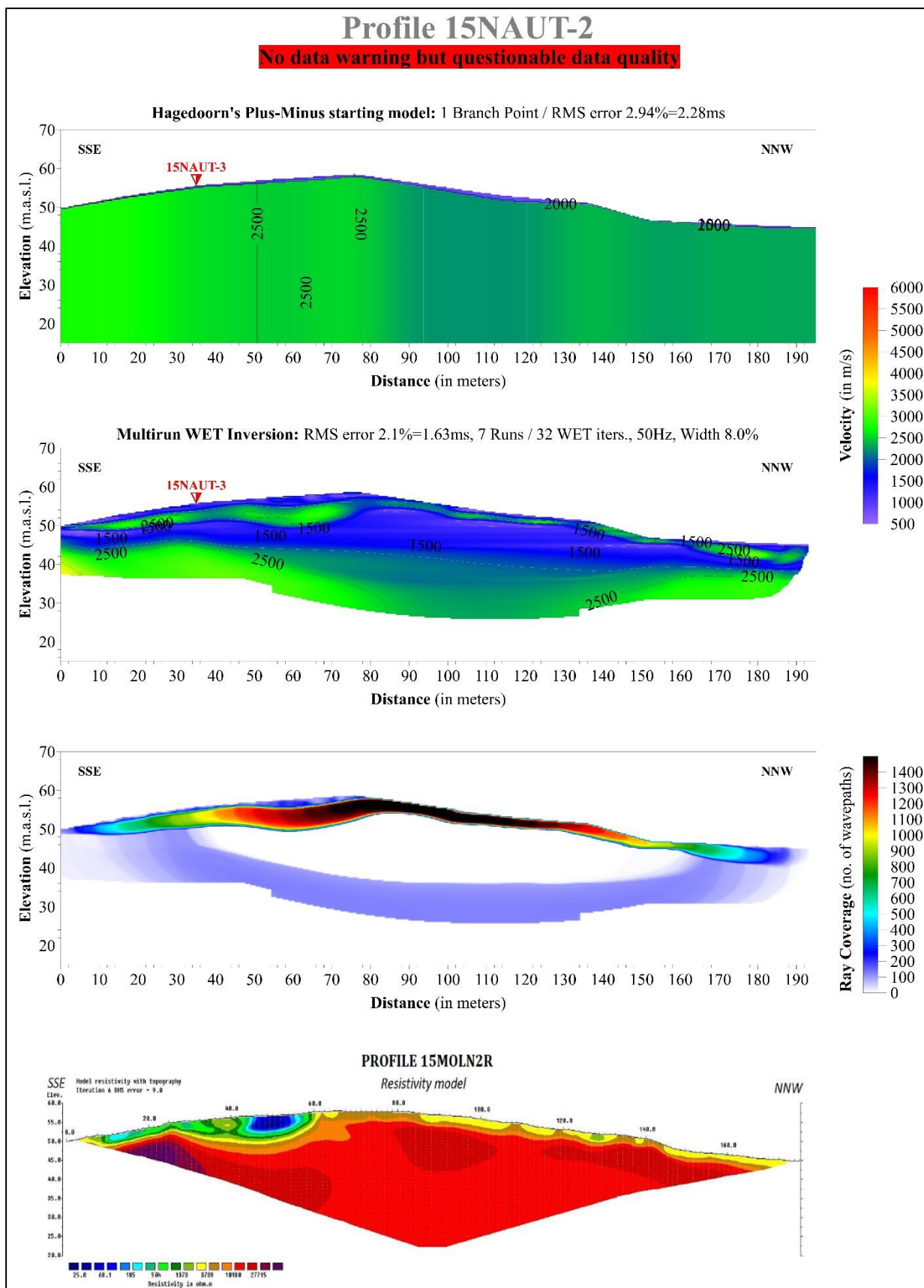
Bølgetettheten (Ray-coverage) viser et tett mønster dagnært, men så et parti uten strålegjennomgang sentralt. Under dette kommer et parti med ca. 200 stråler pr. celle. Mønsteret viser et meget tvilsomt forløp, noe som svekker tilliten til disse data.

Resistivitetsdata viser et parti dagnært med resistiviteter fra ca. 100 Ωm og opp mot 3000 Ωm i starten av profilet. Dette kan representere skredmasser. Fra posisjon 50 og videre mot NNV fremstår et tynt lag med resistivitet 3000 Ωm til over 5000 Ωm . Dette kan representere oppsprukket/forvitret berg, men også skredmasser. Tykkelsen av overflatelagene er begrenset til fra ca. 2 m til 5-6 m. Under disse lagene er resistiviteten jevnt over høyere enn 10.000 Ωm . Dette tolkes til å representere god bergmassekvalitet.

Vurdering av profilets data.

NGU vurderer datakvaliteten ved seismikken som ubrukelig.

Resistivitetsmålingene indikerer god bergmassekvalitet under tynne lag av forvitret berg eventuelt skredmasser.



Figur 13: Reprosessert seismikk og resistivitet, profil 15Naut-2. Fra toppen: Startmodell generert med Hagedoorns metode, WET tomografisk inversjon, stråle-dekning (Ray Coverage) og 2D resistivitet.

Resultater fra profil 3 på Nautneset (15Naut-3) er vist i **figur 14**. Refraksjonsseismikken er her utført med 45 geofoner med avstand 2 m, og skuddpunkt for hver 6 m. NGU vurderer datakvaliteten ved seismikken som ubrukelig. Det er ikke målt resistivitet langs dette profilet.

Den automatiske tolkingen av refraksjonsseismikken med Hagedoorns metode viser et relativt tynt topplag med hastigheter på rundt 2000 m/s. Under dette varierer hastigheten rundt 3000 m/s. Dette anses som usannsynlig siden profilet i sin helhet ligger på et utspring i fjellet.

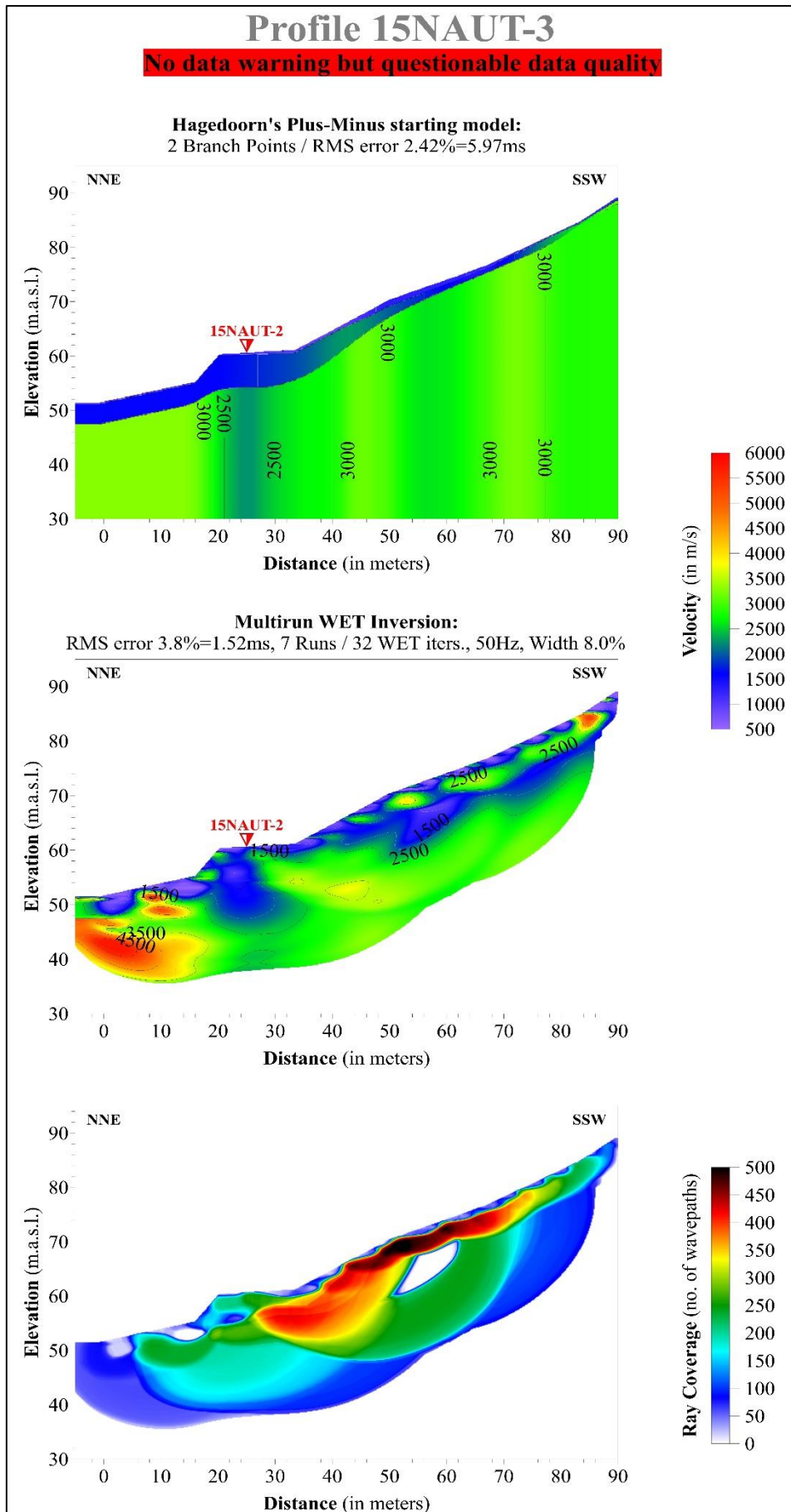
Den tomografiske inversjonen av data viser et tilsvarende bilde som Hagedoorns-tolkingen. Her er hastigheten mer lagdelt og stedvis enda lavere, ned mot 1000 m/s under stedvis høyere hastighet. Dette anses som høyest usannsynlig.

Bølgetettheten (Ray-coverage) viser et tett mønster dagnært, men også et parti uten strålegjennomgang sentralt. Under dette kommer et parti med ca. 250 stråler pr. celle. Mønsteret viser et meget tvilsomt forløp, noe som svekker tilliten til disse data.

Vurdering av profilets data.

NGU vurderer datakvaliteten ved seismikken som ubrukelig.

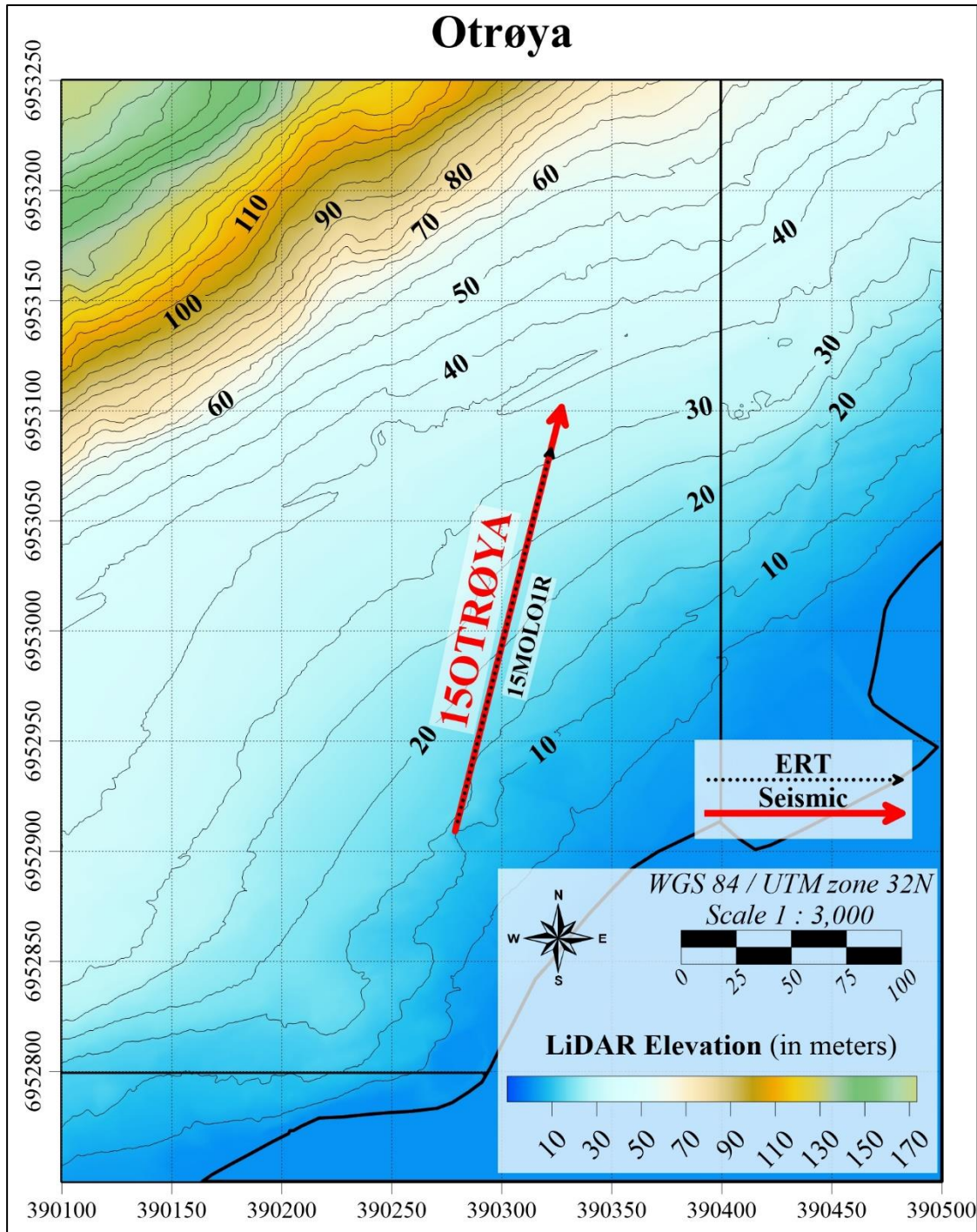
Det er ikke målt resistivitet langs profilet.



Figur 14: Repressert seismikk profil 15Naut-3. Fra toppen: Startmodell generert med Hagedoorns metode, WET tomografisk inversjon og stråle-dekning (Ray Coverage).

3.3 Otrøya

Figur 15 viser beliggenheten av ett målt profil på sørsida av Otrøya ved Heggdal. Det er målt både refraksjonsseismikk og resistivitet. Profilet er målt for å vurdere bergmassekvalitet ved ett påhugg for en transporttunnel.



Figur 15: Plassering av profil på sørsida av Otrøya.

Resultater fra profilet målt på sørsida av Otrøya (15OTRØYA) er vist i **figur 16**. Refraksjons-seismikken er her utført med 95 geofoner med avstand 2 m, og skuddpunkt for hver 6 m. Resistiviteten er målt med 96 elektroder med avstand 2 m. Kvaliteten på refraksjonsseismikken vurderes i utgangspunktet som tvilsom mens kvaliteten på resistivitetsmålingene vurderes som god.

Den automatiske tolkingen av refraksjonsseismikken med Hagedoorns metode viser et meget tynt topplag med hastigheter lavere enn 1000 m/s. Dette tolkes som løsmasser. Under dette varierer hastigheten fra 3000 til 3500 m/s, men med en sone sentralt hvor hastigheten er opp mot 4500 m/s. Dette synes lavt ut fra observert berg i dagen.

Den tomografiske inversjonen av data viser et mer nyansert bilde. Her er hastigheten i de dypeste deler over 4500 m/s i store deler av profilet, mens det over dette indikeres oppknuste/forvitrede masser, stedvis med tykkelse på ca. 30 m. Som vist nedenfor kan dette være reelt, og kvaliteten på seismikken kan være bedre enn først antatt.

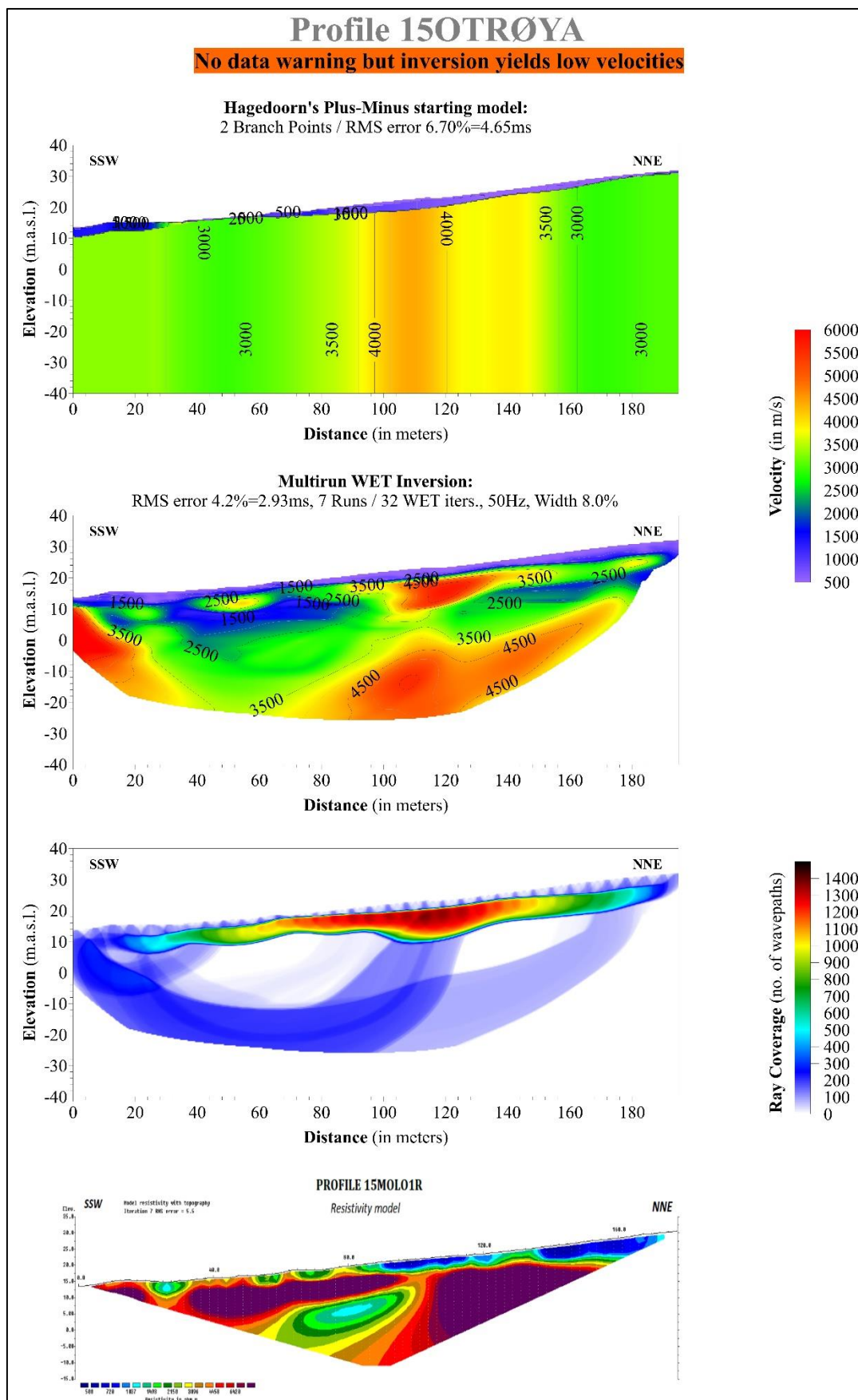
Bølgetettheten (Ray-coverage) viser et tett mønster dagnært, men også to parti uten strålegjennomgang. Under dette kommer et parti med fra ca. 200 til 400 stråler pr. celle. Mønsteret viser et meget tvilsomt forløp, men kan være forenlig med en skråstilt svakhetssone med utgående under løsmasser mellom posisjon 80 og 100 og med fall mot SSV.

Resistivitetsdata viser et topplag med resistivitet fra ca. 500 til ca. 3000 Ωm og med varierende tykkelse fra 0 til opp mot 5 m. Dette kan være skredmasser. Under dette er resistiviteten jevnt over høyere enn 5000 Ωm og stedvis godt over 10.000 Ωm noe som trolig representerer god/meget god bergmassekvalitet. Unntaket her er en fallende struktur med utgående under et topplag ved ca. posisjon 100 og med fall mot SSV. Dette kan være en sprekke-/forvitringssone, og denne tolkingen er til dels forenlig med den tomografiske tolkingen av refraksjons-seismikken.

Vurdering av profilets data.

Kvaliteten på seismikkdata vurderes som akseptabel mens kvaliteten på resistivitetsdata vurderes som god. Uoverensstemmelser mellom tolking av refraksjonsseismikken med Hagedoorns metode og tomografisk inversjon kan skyldes metodiske svakheter. Ved Hagedoorns metode vil lave hastigheter i bergets overflate fremstilles som vertikale strukturer mens den topografiske inversjonen vil gi et bedre bilde på hvor dypt disse strukturene stikker.

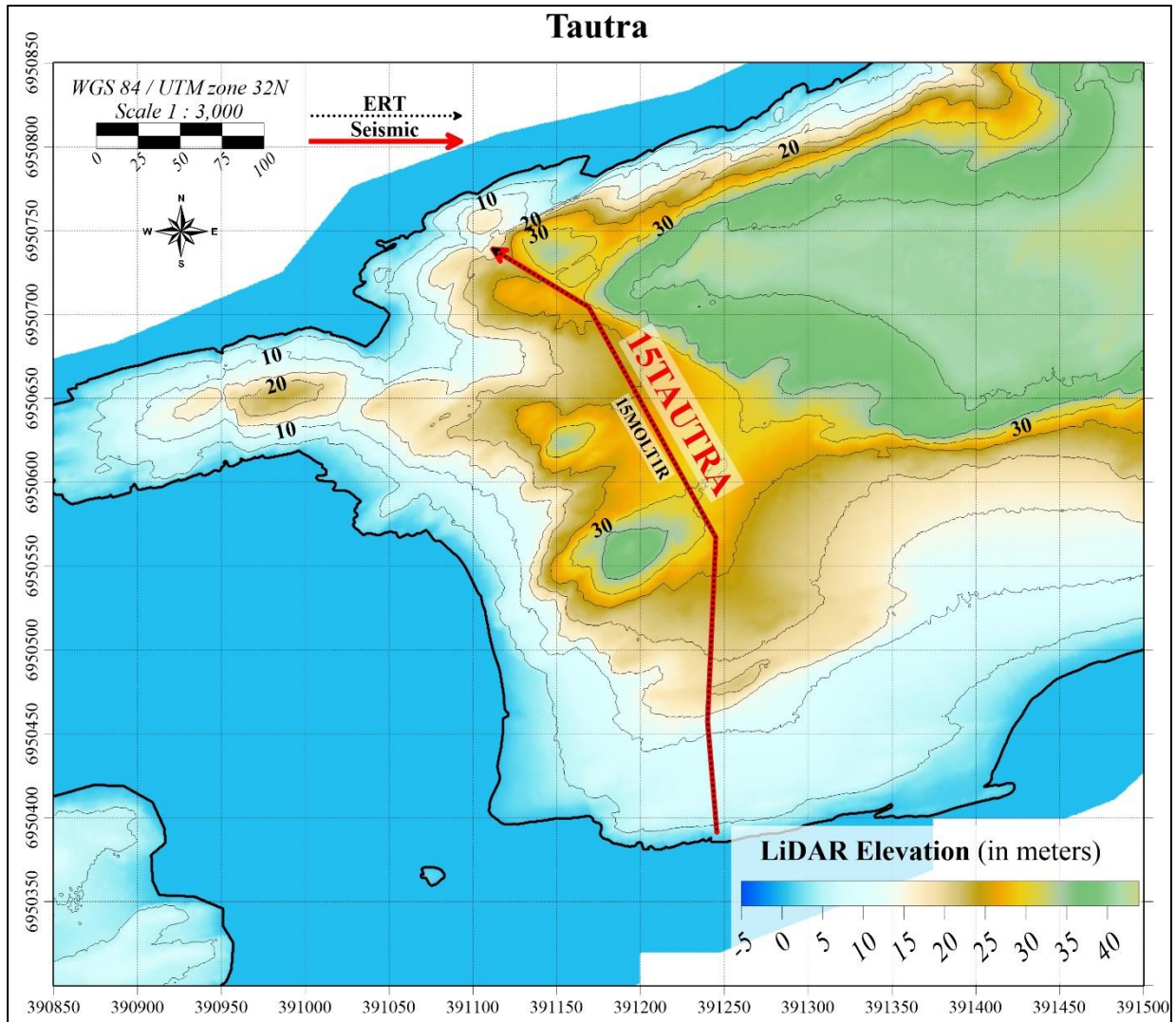
Resistiviteten langs profilet indikerer en svakhetssone med fall mot SSV sentralt i profilet. Dette er i overensstemmelse med den tomografiske tolkingen av seismikken.



Figur 16: Reprosessert seismikk og resistivitet, profil 15Otrøya. Fra toppen: Startmodell generert med Hagedoorns metode, WET tomografisk inversjon, stråle-dekning (Ray Coverage) og 2D resistivitet.

3.4 Tautra

Figur 17 viser beliggenheten av ett målt profil på vestenden av øya Tautra. Det er målt både refraksjonsseismikk og resistivitet langs dette profilet. Profilet er målt for å kunne gi informasjon om bergmassekvaliteten over tunnelen under Tautra.



Figur 17: Plassering av profil på øya Tautra midtfjords.

Resultater fra profilet målt på Tautra (15TAUTRA) er vist i **figur 18**. Refraksjonsseismikken er her utført med 210 geofoner med avstand 2 m, og skuddpunkt for hver 6 m. I rapport fra undersøkelsen oppgis ikke innsamlingsparameter for resistivitetsmålinger, men ut fra profilets maksimale dybderekkevidde (ca. 60 m) antas det at elektrodeavstanden er 5 m. Resistiviteten er derfor trolig målt med 80 elektroder med avstand 5 m (total lengde 400 m). Kvaliteten på refraksjonsseismikken vurderes som god. Kvaliteten på resistivitetsmålingene er for det meste god, men ved sydenden av profilet er trolig resistivitetsverdiene påvirket av nærliggende salt sjøvann.

Den automatiske tolkingen av refraksjonsseismikken med Hagedoorns metode viser et tynt topplag (opp mot 5 m) med hastigheter lavere enn 1500 m/s. Dette tolkes som løsmasser. Under dette er hastigheten jevnt over høyere enn 5000 m/s, noe som tilsier god bergmassekvalitet. Det fremstår imidlertid flere tynne soner med lavere hastighet, noen ned mot 3500 m/s, mens andre viser en hastighet på rundt 4000 m/s.

Den tomografiske inversjonen av data viser et mer nyansert bilde. Med unntak av en sone ved posisjon 40 er hastigheten i berget jevnt over høyere enn 5000 m/s, noe som signaliserer overveiende god bergmassekvalitet. Uoverensstemmelsen mellom de to tolkingsmetodene kan forklares med metodiske svakheter knyttet til Hagedoorns metode. Mindre forsenkninger i fjelloverflaten kan bli tolket som vertikale svakhetssoner.

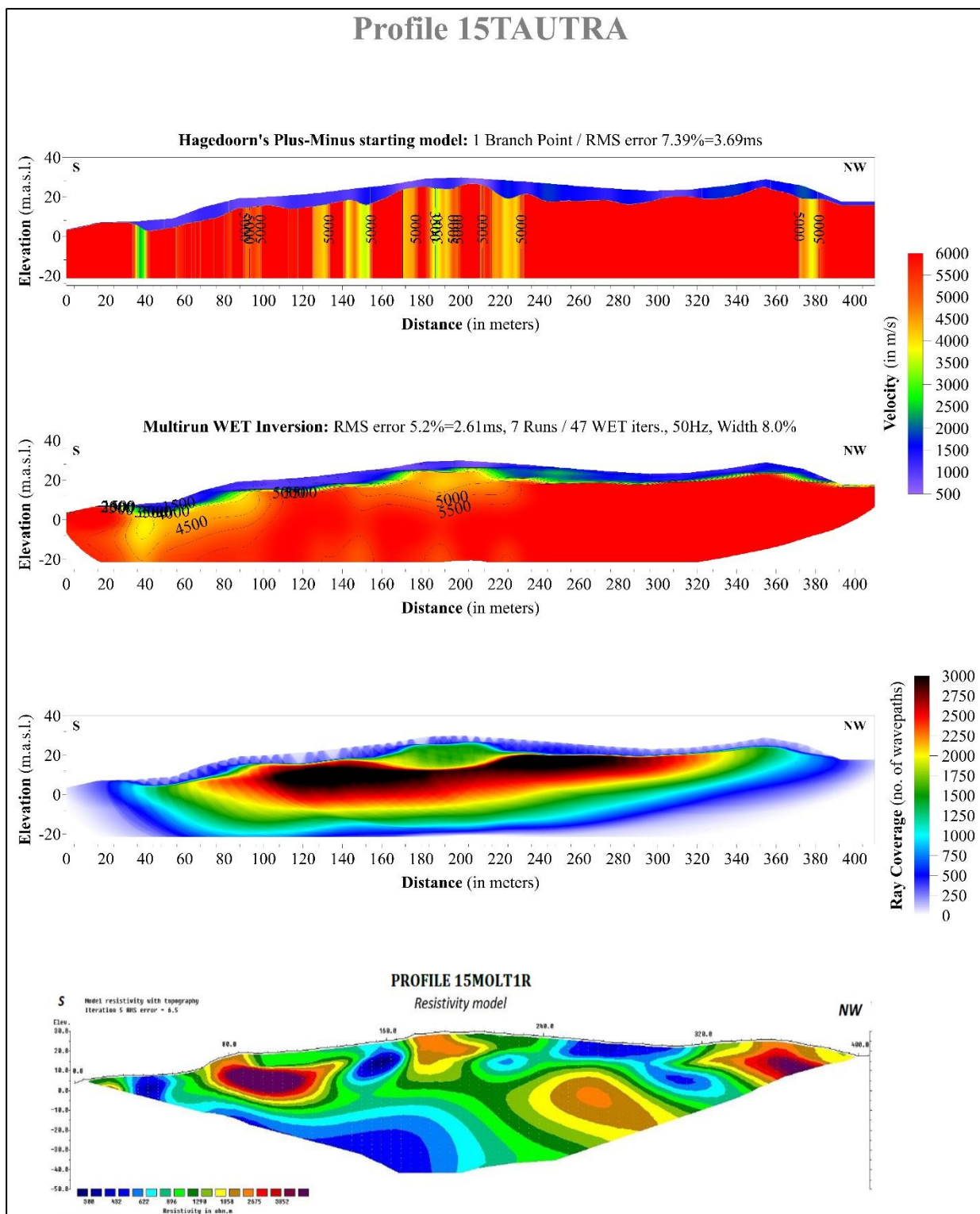
Bølgetettheten (Ray-coverage) viser et meget tett mønster dagnært (< 2000 bølgebaner/celle) og ellers et normalt forløp. Dette styrker troen på at datakvaliteten er god.

Resistivitetsdata viser her et mer uryddig mønster. Starten av profilet i sør ligger så nært sjøen at en ikke kan stole på resistivitetsverdiene. Sentralt i profilet vises også lave resistivitetsverdier mot dypet, og en kan heller ikke her se bort fra påvirkning fra sjøen, eventuelt saltvannsholdige sedimenter langs strandkanten. En kan heller ikke se bort fra at sjøsprøyt ute i den åpne Romsdalsfjorden kan ha påvirket resistivitetsnivået langs hele profilet. Profilets grunnere deler (øvre 20 til 30 m) vurderes imidlertid til å ha tolkbar kvalitet. Som for seismikken kan det stedvis tolkes inn løsmasser med resistivitet lavere enn 900 Ωm og med tykkelser fra nær 0 til ca. 5 m. Mulige svakhetssoner kan tolkes mellom posisjonene 150 og 165, ved posisjon 240 og ved posisjon 300. Sistnevnte kan ha ett fall mot N (NV).

Vurdering av profilets data.

Kvaliteten på seismikkdata vurderes som god mens kvaliteten på resistivitetsdata vurderes tvilsom da en ikke kan se bort fra at data er påvirket av saltvann i sjøen, i strandsedimenter eller som finfordelt saltvann fra sjøsprøyt langs hele eller deler av profilet.

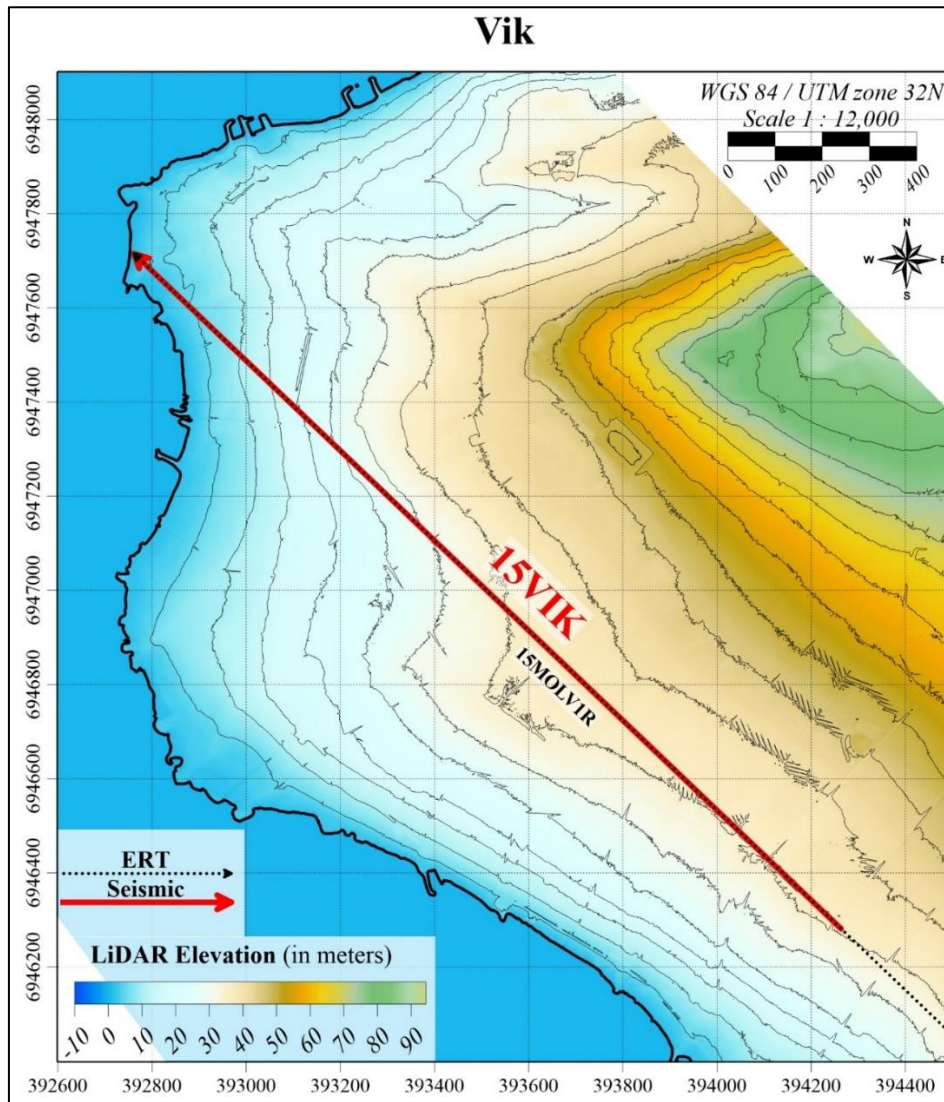
Tradisjonell seismikktolking med Hagedoorns metode antyder flere vertikale tynne svakhetssoner med hastigheter ned mot 4000 m/s og stedvis ned mot 3500 m/s. Ved den tomografiske inversjonen forsvinner alle disse unntatt en ved posisjon 40. Resistiviteten indikerer tre svakhetssoner langs profilet.



Figur 18: Reprosessert seismikk og resistivitet, profil 15Tautra. Fra toppen: Startmodell generert med Hagedoorns metode, WET tomografisk inversjon, stråle-dekning (Ray Coverage) og 2D resistivitet.

3.5 Vik

Figur 19 viser beliggenheten av ett målt profil ved Vik på sørsida av Romsdalsfjorden. Profilet dekker området for tunnelens påhugg. Det er målt både refraksjonsseismikk og resistivitet, men profilenes lengde varierer (resistivitet 2800 m, refraksjonsseismikk 2100 m, se figur 19). Geophysix AS har også målt refraksjonsseismikk i den sørlige delen av refraksjonsprofilet (Wåle 2015).



Figur 19: Plassering av profil ved tunnelpåhugg ved Vik på sørsida av Romsdalsfjorden.

Resultater fra profilet målt ved Vik på sørsida av Romsdalsfjorden (15VIK) er vist i **figur 20**. I vedlegg 2 er det vist en noe større versjon av disse data. Refraksjonsseismikken er her utført med over 1000 geofonplasseringer med avstand 2 m, og med varierende skuddpunktavstand. For det meste var denne ett skudd for hver 6 m, men i sentrale deler, fra posisjon 870 til posisjon 1340 rapporteres det om vanskelige forhold med myr og tett vegetasjon. Her var skuddavstanden stedvis 12 m. Resistiviteten er trolig målt med elektrodeavstand 5 m (total lengde 2100 m). I rapport fra undersøkelsen oppgis ikke dette, men ut fra profilets maksimale dybderekkevidde (ca. 60 m) antas det at elektrodeavstanden er 5 m. Kvaliteten på refraksjonsseismikken vurderes som god mens kvaliteten på resistivitetmålingene for det meste er god, men ved

nordenden av profilet er trolig resistivitetsverdiene påvirket av nærliggende salt sjøvann.

Den automatiske tolkingen av refraksjonsseismikken med Hagedoorns metode viser et topplag som varierer i tykkelse fra ca. 5 m til opp mot ca. 25 m. Størst mektighet finnes mot sør. Hastigheten varierer fra ca. 500 m/s og opp mot 2500 m/s. Sistnevnte kan være høyt for løsmasser og det kan derfor også være stedvis forvitret berg. Hastigheten i underliggende lag, som tolkes som fjell, varierer også mye, fra ca. 3500 m/s til over 5000 m/s. Flere vertikale mulige svakhetssoner indikeres, spesielt i profilets sydlige halvdel. Dette kan imidlertid være en kunstig effekt.

Tomografisk inversjon av de samme data viser et noe annet bilde. Denne tolkingen viser et tilsvarende bilde av løsmassene, ca. 5 m til ca. 25 m tykkelse og med hastigheter stort sett lavere enn 2200 m/s. Ved den tomografiske inversjonen fremstår ingen svakhetssoner som strekker seg ned mot dypet. Langs hele profilet opptrer hastigheter fra 4500 m/s og til over 5500 m/s i profilets dypere deler. Dette kan være en indikasjon på at sydlige halvdel av profilet er generelt forvitret, og at denne forvitringen går relativt dypt, stedvis ned til ca. 50 m under havet.

Bølgetettheten (Ray-coverage) viser et meget tett mønster i starten av profilet (opp mot 3000 stråler pr. celle), men tilsynelatende mer glissent videre mot nord. Noe av effekten skyldes varierende skuddavstand.

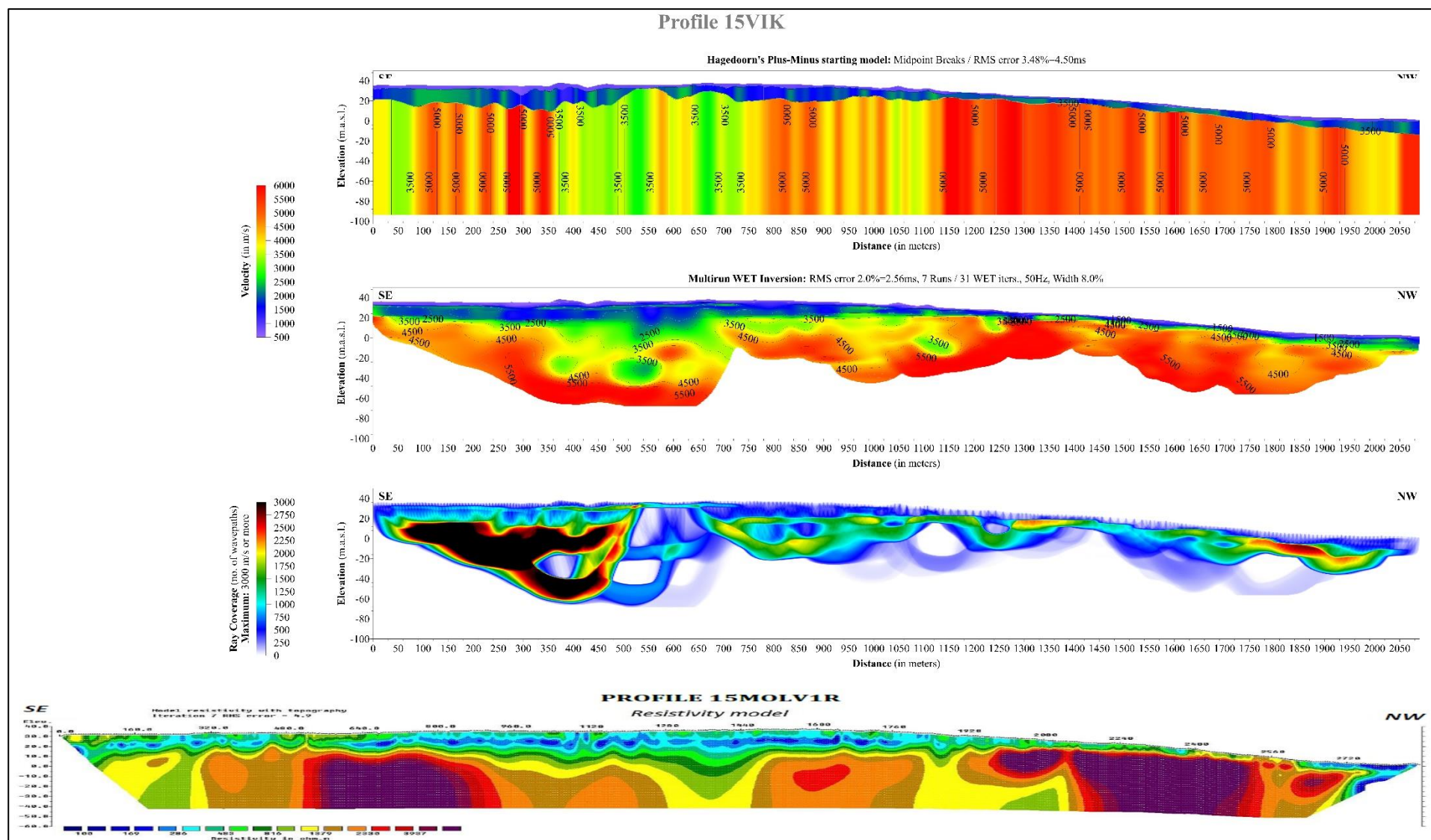
Resistivitetsdata viser her et relativt klart mønster. Øverst fremstår ett lag med resistivitet lavere enn 800 Ωm . Dette tolkes som løsmasser (morenemateriale). Tykkelsen er minst lengst mot NW, ca. 5 m, og øker til opp mot 25 til 30 m sentralt i profilet. Resistiviteten i berg varierer fra ca. 1000 Ωm til over 10.000 Ωm . Soner med resistivitet ned mot 1000 Ωm representerer trolig rene knusningssoner (Rønning et al. 2014). Områder med resistivitet høyere enn 4000-5000 Ωm tolkes som god bergmassekvalitet. På nordenden av profilet vises lav resistivitet og det kan skyldes nærheten til sjøvann.

Vurdering av profilets data.

Kvaliteten på både seismikkdata og resistivitetsdata vurderes i hovedsak som god. Noe redusert skuddavstand (12 m) ser ikke til å påvirke tolkingene nevneverdig. Resistivetsprofilet er trolig påvirket av sjøvann ved nordenden.

Tolking av seismikken med Hagedoorns metode indikerer mange mulige svakhetssoner i profilets sørlige halvdel. Ved tomografisk inversjon opptrer dette partiet mer som dypforvitret med en betydelig dybderekkevidde. Resistiviteten viser et tilsvarende mønster. Mellom to soner med meget høy resistivitet opptrer et parti med noe redusert resistivitet. Dette kan representere et forvitret parti der bergmassekvaliteten er noe lavere og varierende. Begge metodene gir samme bilde av løsmassene.

Sydlige del av det refraksjonsseismiske profilet overlapper delvis med refraksjonsseismikk utført av GeoPhysics i 2014 (Wåle 2015). Generelt kan en si at løsmassetolkingene stemmer meget godt med mektigheter på fra ca. 15 til opp mot 25 m i sydlige del. Målingene GeoPhysics utført indikerer flere svakhetssoner, slik også den automatiske Hagedoorn-tolkingen gjør, men som viskes bort ved den tomografiske inversjonen.



Figur 20: Reprosessert seismikk og resistivitet, profil 15Vik. Fra toppen: Startmodell generert med Hagedoorns metode, WET tomografisk inversjon med p-bølge hastighet fra borehullslogg, stråle-dekning (Ray Coverage) og 2D resistivitet.

4. DISKUSJON

Reprosessering og retolking av geofysiske data samlet inn for vurdering av fjellkvalitet på land ved prosjektet «E39 Krysning av Romsdalsfjorden» har avdekt svakheter både ved datainnsamlingen, prosesseringen og selve rapporteringen.

4.1 Datainnsamling

Refraksjonsseismikken samlet inn av firmaet GeoExpert AG, har vist delvis tvilsomme data. Av i alt 15 målte profiler er det påvist tvilsom datakvalitet ved i syv profiler. Ved ett tilfelle, profil 15JULB-2, advarer konsulenten om dårlig datakvalitet og at data må benyttes med varsomhet. Gjennom dette arbeidet er det i enkelte områder antydning av p-bølge hastigheter ned mot 2500 m/s der fjellet danner åser og utspring i terrenget og hvor en bør kunne forvente høyere hastighet. Ved flere tilfeller har logging av seismisk hastighet, resistivitet og inspeksjon med akustisk televiwer i borehull nært ved seismikkprofilene med tvilsomme data, påvist god bergmassekvalitet. Det kan derfor med god grunn stilles ett spørsmål ved måten seismikkdata er samlet inn på.

Ved alle seismikkprofilene er det benyttet en 6 kg slegge som energikilde. NGU har ikke sett originalopptakene, og kan derfor ikke si noe sikkert om dette gir en god nok datakvalitet. Profilene med tvilsom datakvalitet viser P-bølge hastigheter fra 2500 m/s og opp mot 3000 m/s. Logging av flere borehull viser en S-bølge hastighet ligger i dette nivået (data fra Ruden 2015b). En kan da spørre seg om energikilden er for svak til å gi klar P-bølgeankomst og at det er S-bølgeankomst som er registrert som førsterankomst. Dersom dette er tilfelle, kan data benyttes til å vurdere bergmassekvalitet, men en må da bruke en helt annen tolkingstabell. En vurdering av om energikilden er tilstrekkelig, krever tilgang på originalopptakene for å se om de kan tolkes annerledes. Den beste testen på dette er imidlertid å måle opp igjen noen av profilene, da med dynamitt som energikilde.

Mange av de profilene som ga tvilsomme data ligger et stykke opp i fjellskråning ved Julbøen og ved Naustneset på Otrøya. NGU kjenner ikke de lokale forholdene i detalj, men kan se for seg at dersom det er mye lyng med røtter og kanskje noe myr, kan det være vanskelig å sette opp tilstrekkelig sterke lydbølger med en slegge. I så fall ville skudd med dynamitt vært en bedre energikilde.

Ved datainnsamlingen her er det konsekvent ikke benyttet noe fjernskudd slik en har god erfaring med i Norge. I de fleste profilene ligger (trolig) berget så nært utgående at dette ikke er noe stort problem. Det vet man nødvendigvis ikke ved datainnsamlingen og en standard prosedyre med ett eller flere fjernskudd i begge retningene bør tilstrebes.

Resistivitetsdata er i hovedsak vurdert som gode. Det er imidlertid foretatt målinger i områder der salt sjøvann etter all sannsynlighet har påvirket resultatene. I noen tilfeller kan dette være nødvendig for å få gode data i andre deler av profilene, men dette må nevnes når data leveres til oppdragsgiver. Dette ble ikke nevnt i rapport fra konsulenten ved dette prosjektet. Spørsmålet om det salte sjøvann påvirker måleresultatene kunne delvis vært avklart ved å måle vannets elektriske ledningsevne i borehullene, men ved

borehullsloggingen ble denne ikke målt. Effekten av avvikende strømforløp p.g.a. ledende vann til side for profilet er vanskelig å vurdere effekten av.

4.2 Dataprosessering og tolking

Forfatterne av denne rapporten har gjennom et samarbeid med Vegdirektoratet foretatt modellering av tomografiske inversjoner av syntetiske refraksjonsseismiske data (Tassis et al. 2017, Tassis et al. 2018). Ved denne type arbeid genereres syntetiske data fra en kjent modell som så inverteres som om det er målte data. På denne måten kjenner en fasit og kan vurdere hvilken inversjonsprosedyre som fungerer best. I disse arbeidene konkluderer NGU i samarbeid med utvikler av programvaren Rayfract, Sigfried Rohdewald, at beste prosedyre for påvising av svakhetssoner i berg er å benytte en 2D startmodell generert med Hagedoorns metode innenfor programmet Rayfract, foreta tomografisk inversjon med rutinen «Multi-run Conjugate Gradient inversion» med «Cosine-Squared weighting».

NGU har forsøkt å få aktuelle konsulent til å benytte det som anses som antatt beste prosedyre for prosessering av refraksjonsseismiske data for kartlegging av svakhetssoner i fjell, men har ikke lyktes i sine bestrebelser. Resultatet er at også data fra andre områder levert til andre aktører av samme konsulent er retolket for om mulig få et bedre resultat (bl.a. Tassis & Rønning 2019).

4.3 Rapportering

Rapporteringen av de undersøkelsene som her er repossert og retolket, er mangelfull. For seismikken er datafangst og prosessering dokumentert klart, men presentasjonen av resultatene er mangelfull og til dels villedende. Data fra den tomografiske inversjonen er delvis presentert på små figurer og med tykke tolkingslinjer som dekker over hastighetsprofilen. Det blir da nesten umulig å hente ut informasjon om løsmassenes og bergets kvalitet.

Seismikken er presentert som såkalt «hybridseismikk». Dette betyr at data som er samlet inn presenteres både som tomografisk inverterte hastighetsprofil og som refleksjons-seismiske data. Presentasjonen av refleksjonsseismikken og tolkingen vekker ikke tillit og kommenteres ikke videre.

Prosesseringen og presentasjonen av resistivitetsdata er god, og spesielt kan presentasjon av resistivitet lagt inn i terrengmodell være opplysende og kan lette tolkingen (se vedlegg 3). Rapporteringen av hvordan data er samlet inn er imidlertid mangelfull. Det burde ikke være nødvendig å gjette seg til hvordan data er samlet inn og hvordan de er invertert. Denne type data er viktig for vurdering av kvalitet.

4.4 Tolkingskart

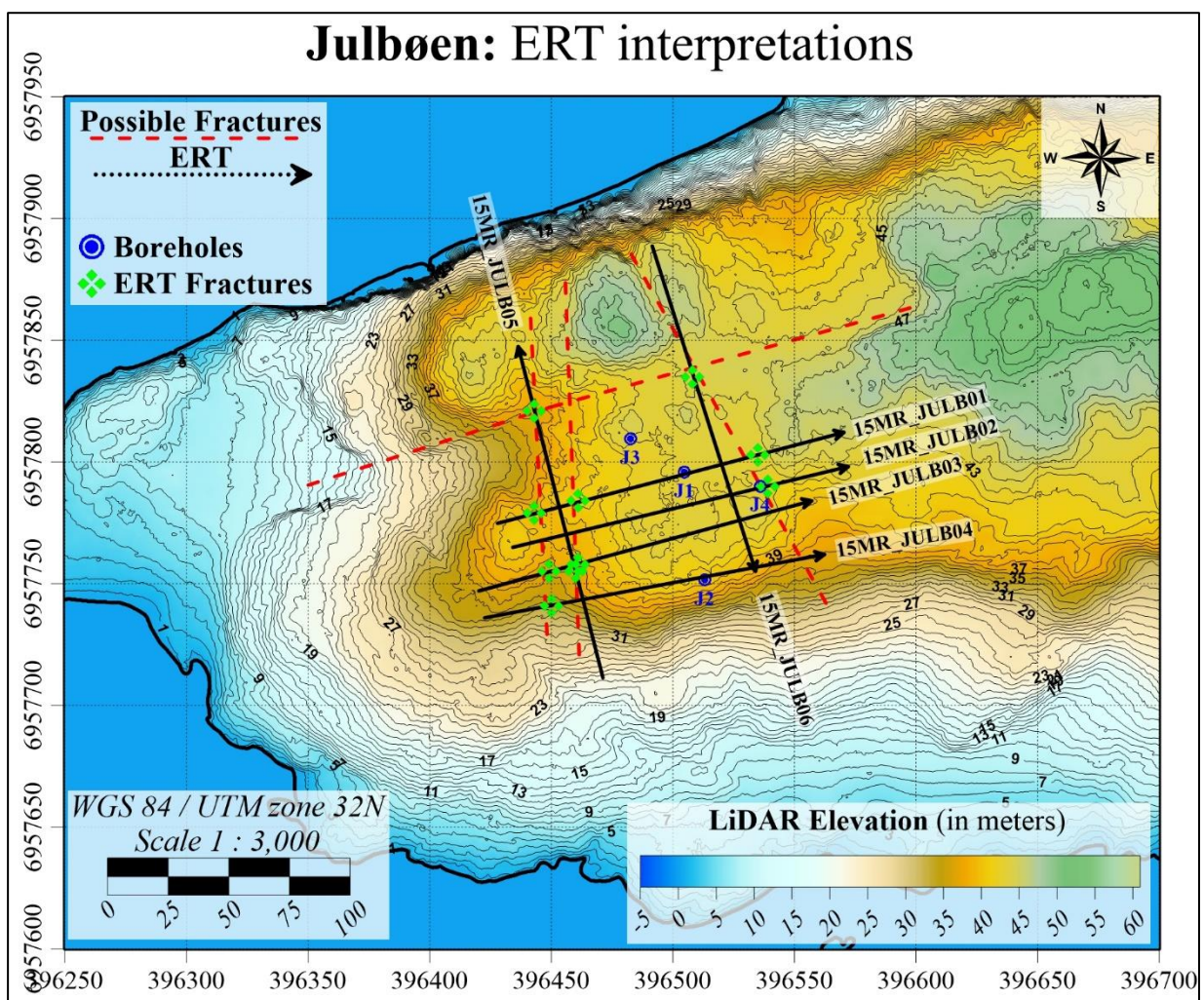
Ved Julbøen er det målt så mange resistivetsprofiler at det er mulig å utarbeide et tolkingskart over mulige svakhetssoner i berget. Til dette arbeidet er også den detaljerte topografien fra LIDAR-data med celledimensjon 1 m x 1 m benyttet. NGU vil påpeke at dette er konservative tolkingen der en ser etter alle mulige tegn på svakheter i berget. Tolkingskartet er vist i Figur 21.

Tolkingskartet viser tre mulige svakhetssoner som går mer eller mindre i N-S-retning. To av disse går delvis langs profil 15JULB-5 mens den siste går langs profil 15JULB-6. Disse sonene opptrer ikke på alle profiler og anomaliene er ikke spesielt store. Forløpet stemmer imidlertid med små fordypninger i terrenget.

Profilene 15JULB-5 og 15JULB-6 indikerer i tillegg en svakhetszone som går i retning VSV-ØNØ. Denne sonen er knyttet til en mer markert svakhet i terrenget, men ser ut til å ligge i ytterkant på nordsiden av det topografiske lineamentet. Både langs profil 15JULB-5 og 15JULB-6 indikeres et fall mot SSØ, og dette kan være forenlig med plasseringen. Dessverre har ikke refraksjonsseismikken god nok kvalitet langs disse to profilene til å bekrefte sonenes oppreden.

Ingen av disse svakhetssonene gir spesielt sterke utslag på resistiviteten og er heller ikke særlig markerte i terrenget. Dette betyr trolig at det kan være mindre soner (slepper) men som kan være avgjørende dersom området utsetter for sterke strekkbelastninger i form av forankring av bærekabler til hengebrua.

På grunn av at NGU ikke har reprocessert resistivetsdata er posisjonen til angitte svakhetssoner noe usikker.



Figur 21: Tolkingskart Julbøen.

5. KONKLUSJONER

Refraksjonsseismiske data, samlet inn av det Sveitsiske firmaet GeoExpert AG, er reprocessert med det som NGU vurderer som antatt beste prosedyre. Dette arbeidet avdekket tvilsomme data og det stilles spørsmålstegn ved måten data er samlet inn. Av i alt 15 profiler viser 7 profiler tvilsomme seismiske hastigheter. NGU har ingen klar oppfatning av hvorfor kvaliteten er så dårlig, men en kan ikke se bort fra et anvendte energikilde (slegge på 6 kg) gir for svake signaler i enkelte områder. NGU savner også fjernskudd ved denne undersøkelsen. For å kunne avklare om for svak energikilde er årsak til tvilsomme resultater må en ha tilgang til originalopptak, men aller helst nye målinger med dynamitt som energikilde.

Resistivitetsdata samlet inn av Ruden AS viser jevnt over god kvalitet. Unntaket er enkelte profiler som går så nært sjøen at beregnet resistivitet påvirkes av sjøvannet. Ved Julbøen var det mulig å lage et tolkingskart over mulige svakhetssoner.

I dette arbeidet blir reprocesserte seismiske data samtolket med de eksisterende resistivitetsdata. I de fleste tilfeller er det samsvar mellom de to metodene, men det er også tilfeller der resultatene spriker. Det antas at dette skyldes at metodene responderer forskjellig ved forskjellige geologiske modeller.

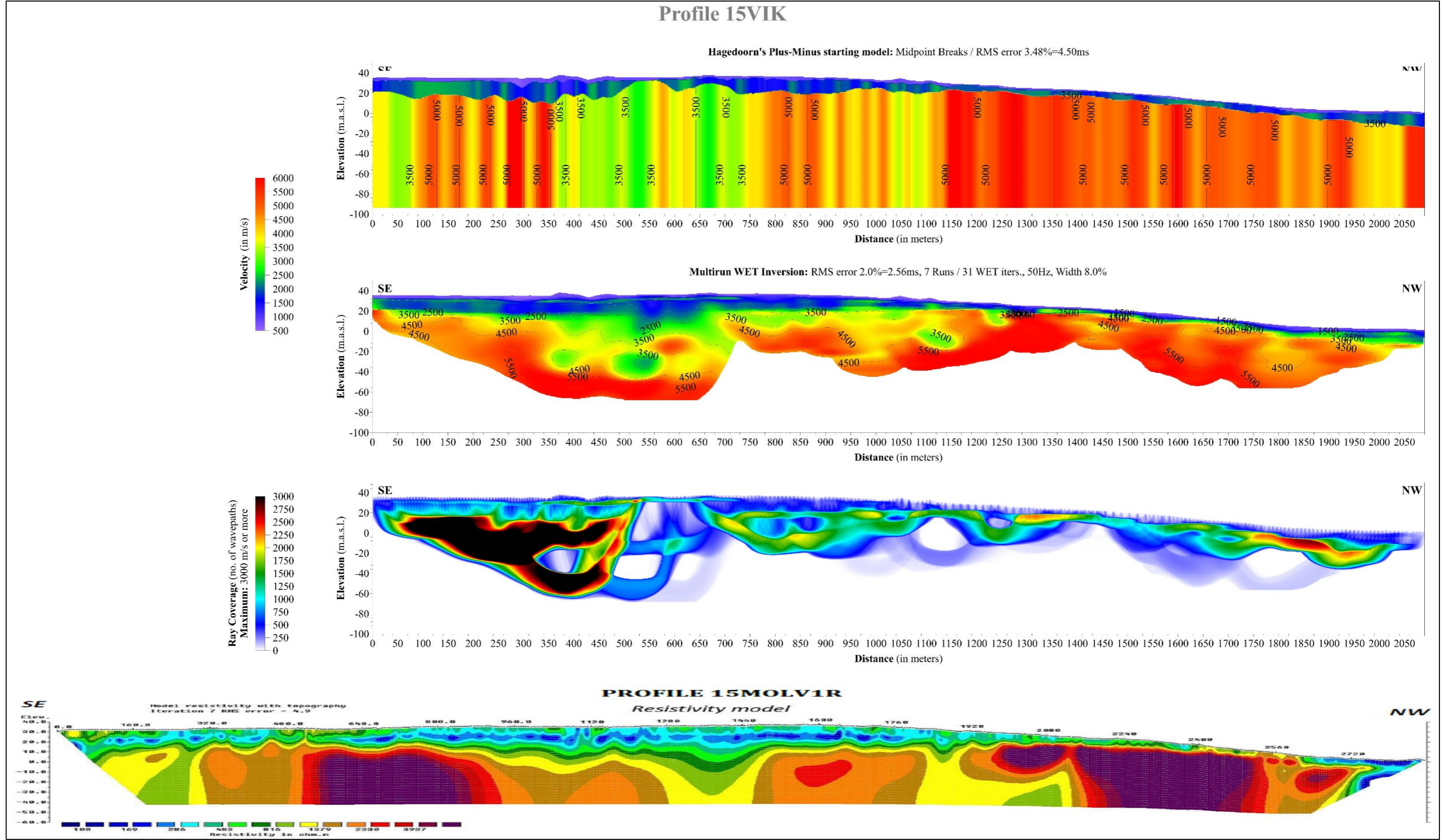
Profilene fordeler seg på fem områder: Julbøen vest for Molde, Nautneset på Otrøya, sørsida av Otrøya, på øya Tautra midtfjords og ved Vik på sørsida av Romsdalsfjorden. NGU har utarbeidet tolkingskart der dette er naturlig (Julbøen).

6. REFERANSER

- Hagedoorn, J.G. 1959: The Plus-Minus method of interpreting seismic refraction sections. *Geophysical Prospecting* 7 (2), pp.158 – 182.
- Loke, M.H. 2015: RES2DINV versjon 4.7.11. Geoelectrical Imaging 2D & 3D. Instruction manual. www.geoelectrical.com.
- Rayfract 2018: Rayfract Seismic Refraction & Borehole Tomography- Subsurface Seismic Velocity Models for Geotechnical Engineering and Exploration. Downloaded from <http://rayfract.com>
- 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.
- Rønning, J.S., Ganerød, G.V., Dalsegg, E. & Reiser, F. 2014: Resistivity mapping as a tool for identification and characterization of weakness zones in bedrock - definition and testing of an interpretational model. *Bull. Eng. Geol. Environment* Volume 73, Issue 4 (2014), Page 1225-1244
- 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
- Tassis, G. & Rønning, J.S. 2019: Reprocessing of Refraction Seismic data from Åknes, Stranda Municipality, Møre & Romsdal County. NGU Report 2019.004. To be published.
- Wåle 2015: E39. Refraksjonsseismiske undersøkelser på land for undersjøisk tunnel under Romsdalsfjorden. GeoPhysix Rapport Prosjekt nr. 14462 (24 sider.)

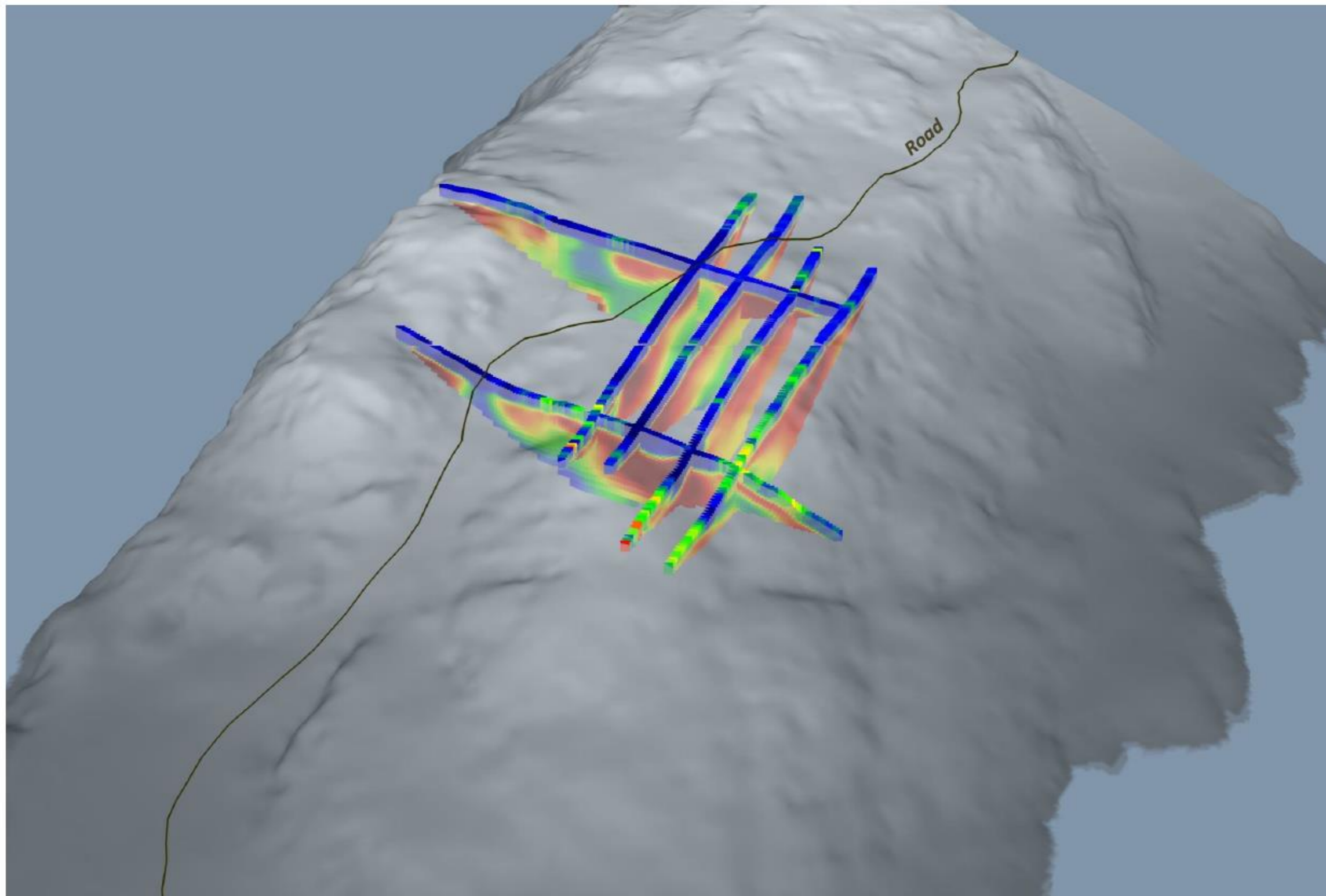
Vedlegg 1: Koordinater for start- og sluttpunkter for de represserte og retolkede profilene. Alle koordinater i EUREF89 NTM (Norsk Transversal Mercator, fra Ruden 2015a).

Profil ID	Metode	Start øst	Start nord	Slutt øst	Slutt nord
JULBØEN					
JULB-1	SEIS	124199,60	1527736,17	124340,44	1527779,02
MR_JULB-1	ERT	124199,46	1527736,93	124331,00	1527775,35
JULB-2	SEIS	124203,01	1527726,15	124349,42	1527765,62
MR_JULB-2	ERT	124206,19	1527726,56	124342,79	1527765,04
JULB-3	SEIS	124193,71	1527708,17	124337,49	1527753,67
MR_JULB-3	ERT	124192,92	1527708,11	124328,30	1527750,41
JULB-4	SEIS	124194,97	1527699,08	124338,96	1527727,72
MR_JULB-4	ERT	124195,77	1527697,14	124334,40	1527728,60
JULB-5	SEIS	124203,06	1527818,56	124243,79	1527678,63
MR_JULB-5	ERT	124205,21	1527809,03	124245,32	1527674,42
JULB-6	SEIS	124258,86	1527852,42	124305,15	1527711,98
MR_JULB-6	ERT	124258,71	1527852,48	124306,36	1527720,60
JULB-7	SEIS	123958,10	1527701,75	123985,57	1527630,93
MR_FORT	ERT	123958,94	1527700,10	123982,34	1527635,08
JULB-8	SEIS	123950,94	1527688,14	123991,76	1527629,08
JULB-9	SEIS	123958,54	1527655,97	124013,85	1527699,09
NAUTNESET					
NAUT-1	SEIS	122420,40	1527277,11	122215,19	1527389,05
MOLN1R	ERT	122416,09	1527281,70	122229,43	1527381,12
NAUT-2	SEIS	122193,03	1527200,72	122118,97	1527376,83
MOLN2R	ERT	122193,80	1527200,89	122124,05	1527362,36
NAUT-3	SEIS	122202,19	1527239,71	122120,16	1527207,23
OTRØYA					
OTRØYA	SEIS	118242,29	1522636,15	118282,61	1522826,54
MOLO1R	ERT	118242,69	1522637,14	118279,00	1522809,67
TAUTRA					
TAUTRA	SEIS	119305,24	1520158,29	119160,00	1520496,34
MOLT1R	ERT	119305,24	1520158,29	119160,00	1520496,34
VIK					
VIK-1	SEIS	123098,83	1515667,54	120926,57	1517505,70
MOLV1R	ERT	122480,64	1516164,86	120924,69	1517539,33

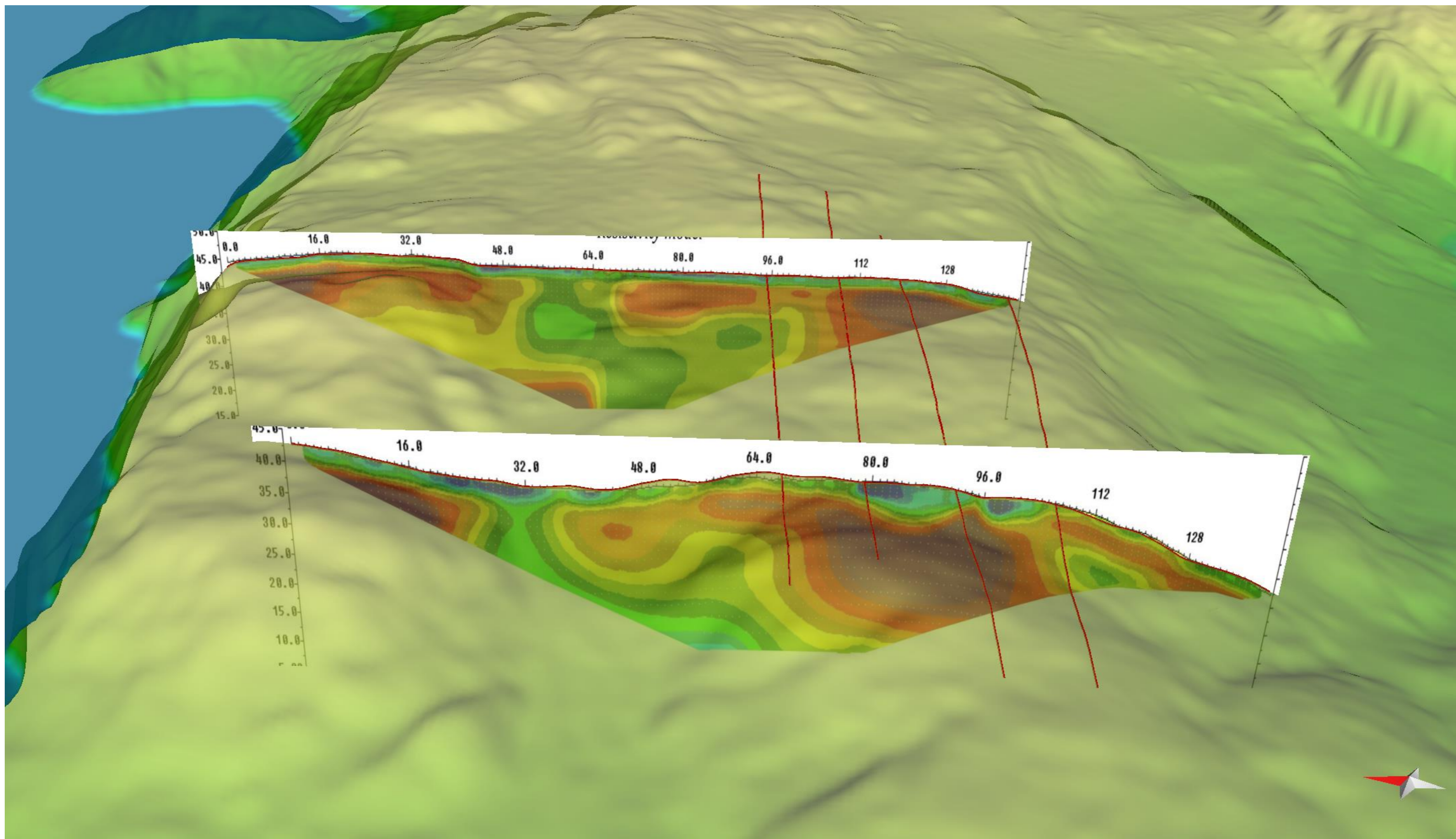


Vedlegg 2: Figur 20 forstørret: Reprosessert seismikk og resistivitet, profil 15Vik. Fra toppen: Startmodell generert med Hagedoorns metode, WET tomografisk inversjon med p-bølgehastighet fra borehullslogg, stråledekning (Ray Coverage) og 2D resistivitet.

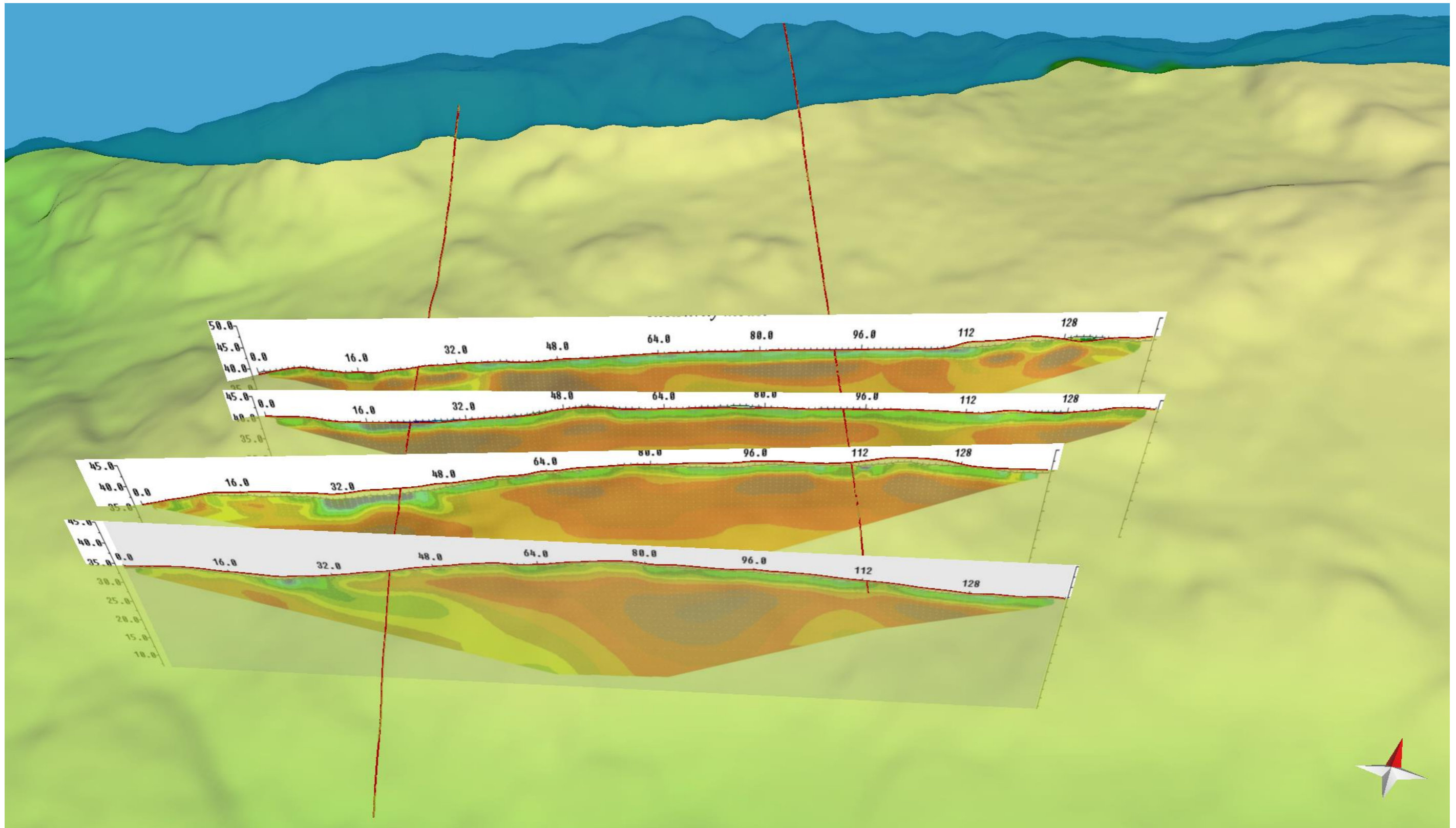
JULBØEN 3D RESISTIVITY MODEL



Vedlegg 3.1: Resistivetsdata fra Julbøen plottet i 3D perspektiv sett mott øst- nordøst (fra Ruden 2015a).



Vedlegg 3.2: Resistivitetsdata fra Julbøen plottet i 3D perspektiv sett tilnærmet mot øst (data fra Ruden 2015a).



Vedlegg 3.3: Resistivitetsdata fra Julbøen plottet i 3D perspektiv sett tilnærmet mot nord (data fra Ruden 2015a).



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