



GEOLOGI FOR SAMFUNNET

SIDEN 1858



**NORGES
GEOLOGISKE
UNDERSØKELSE**
· NGU ·



Rapport nr.: 2020.014	ISSN: 0800-3416 (trykt) ISSN: 2387-3515 (online)	Gradering: Åpen	
Tittel: Geofysiske bakkemålinger og boringer på Fensfeltet, Nome kommune, Vestfold og Telemark fylke. Løsmassemektighet og bergkvalitet.			
Forfatter: Bjørn Eskil Larsen, Jan S. Rønning, Frode Ofstad, Jan Fr. Tønnesen, Sven Dahlgren og Geir Viken		Oppdragsgiver: NGU, Vestfold og Telemark fylkeskommune, v/Regiongeologen	
Fylke: Vestfold og Telemark		Kommune: Nome	
Kartblad (M=1:250.000) Skien		Kartbladnr. og -navn (M=1:50.000) 1713-4 Nordagutu	
Forekomstens navn og koordinater: WGS 84 – UTM32 Fen: 516500 - 6570500		Sidetall: 44	Pris: Kr. 150,-
Feltarbeid utført: 2015 - 2018		Rapportdato: 08.06.2020	Prosjektnr.: 372800
		Ansvarlig: <i>Marco Brønner</i>	
Sammendrag: <p>For å vurdere grunnforholdene forut for boring av to 1000 m dype kjerneborehull på Fen, har NGU i perioden 2015 – 2018 utført seismikk- og resistivitetmålinger innenfor Fensfeltet. Som et ledd i den detaljerte berggrunnsgeologiske karleggingen er det i tillegg utført 96 grunne boringer med NGUs LITO-rigg. Alle undersøkelsene er utført i nært samarbeid med Regiongeologen i Vestfold og Telemark fylke (tidligere Buskerud, Telemark og Vestfold).</p> <p>Ut fra geofysikken og de grunne boringene er det utarbeidet et kart over dyp til fjell. I store deler av det undersøkte området er løsmassetykkelsen rundt ti meter, men den varierer fra blottet fjell til opp mot 40 m med løsmasser i Vibetodalen. Resistiviteten i løsmassene er høyere enn 100 Ωm i store deler av området spesielt mot øst og dette tolkes som siltige masser med innslag av morene. Rundt Vibetodalen er resistiviteten i løsmassene fra 10 til 100 Ωm og dette kan indikere kvikkleire. Det er ikke påvist nevneverdig mengder av salt intakt leire. Det ble også laget en høydemodell av fjelloverflaten som vil være tilgjengelig som digitalt vedlegg i .tif format.</p> <p>Forløpet av to forkastninger gjennom Fensfeltet er kartlagt ut fra de geofysiske data og terreng. Stedvis er det indikert svært dårlig og delvis ekstremt dårlig bergmassekvalitet. Mekktigheten av de to sonene er stedvis ca. 90 og ca. 250 m. Dessverre ga en av disse sonene ikke respons på resistivitetsdata. Dette førte til en uheldig plassering av det ene dype borehullet (LHKB-2). Det oppsto store problemer under boringen, og denne måtte avsluttes allerede etter 716 m.</p>			
Emneord: Geofysikk	Refraksjonsseismikk	Resistivitet	
Kjerneboring	Dyp til fjell	Svakhetssoner i fjell	
		Fagrapport	

Innholdsfortegnelse

1.	INNLEDNING	7
2.	GEOLOGI OG TIDLIGERE UNDERSØKELSER	8
2.1	Berggrunns-, struktur- og mineralgeologi	8
2.2	Løsmassegeologi	9
2.3	Tidligere geofysiske undersøkelser	11
3.	METODEBESKRIVELSER.....	11
3.1	Resistivitet.....	11
3.2	Refraksjonsseismikk.....	12
3.3	Boringer.....	13
4.	RESULTATER.....	14
4.1	Resistivitet.....	14
4.2	Refraksjonsseismikk og samtolkning med resistivitet.....	25
4.3	Dyp til fjell fra boring.....	29
5.	TOLKINGER	31
5.1	Karakterisering av løsmasser	31
5.2	Karakterisering av svakhetssoner i fjell	33
6.	REFERANSER.....	38
A.	Vedlegg	40
A.1	Vedlegg 1: Informasjon om borehull.....	40
A.2	Vedlegg 2: Informasjon om Seismikk-profiler	43
A.3	Vedlegg 3: Informasjon om Resistivitets-profiler	44

1. INNLEDNING

I samarbeid med Regiongeologen, Vestfold og Telemark fylkeskommune, har NGU utført geofysiske målinger, 9 resistivitetsprofiler og 2 linjer med refraksjonsseismikk innenfor Fensfeltet i 2016 og 2017. Hensikten med disse undersøkelsene var å kartlegge mektigheten av løsmassene og mulige svakhetssoner i berg som kunne skape problemer for boring av to 1000 m dype kjerneborehull. De geofysiske undersøkelsene skulle også bidra til å finne borelokasjoner for grunne borer i Vibetodalen der det var antatt til generelt å være stor dybde til fjell.

Parallelt med dypboringsprosjektet har Regiongeologen drevet et prosjekt på detaljert berggrunnsgeologisk kartlegging av Fensfeltet. I denne sammenheng er det foretatt i alt 96 korte borer med NGUs LITO-rigg som i tillegg til å kartlegge berggrunnsgeologien også gir informasjon om tykkelsen av løsmassene. Dette lithoboreprogrammet 2015-2018 ble ledet av Regiongeologen, og detaljer fra disse boringene er rapportert tidligere (Dahlgren 2019). Selve boringene ble utført av G. Viken, NGU, i samarbeid med S. Dahlgren og medarbeidere fra Regiongeologen (B. Strømberg og H. Grønnevik m.fl.).

De to dype boringene ble gjennomført på senhøsten 2017 og vinteren/våren 2018. J.S. Rønning, NGU, og S. Dahlgren, Regiongeologen, planla borelokasjonene, og Regiongeologen med 2 medarbeidere fulgte opp boringene på stedet på daglig basis i hele boreperioden. Kjernene er logget geologisk, analysert kjemisk og det er foretatt hyperspektral fotografering av kjernene (Coint & Dahlgren 2019). I tillegg er det foretatt geofysisk logging av borehullene (Elvebakk & Rønning 2019).

Resultatene fra de geofysiske bakkemålingene fra 2016 er benyttet i en Masteroppgave ved NTNU (Frydenlund 2017). I denne oppgaven ble det foretatt tomografisk inversjon av refraksjonsseismikken. Dette arbeidet ga ikke vesentlig informasjon som supplement til tolkingene som her rapporteres.

Ramberg (1973) utførte tolkinger av tyngdemålinger over Fensfeltet. NGU har, også i samarbeid med Regiongeologen, utført nye detaljerte tyngdemålinger over og rundt Fensfeltet i perioden 2016 til 2019. Disse data blir tolket og rapportert separat. En siste del av dette prosjektet har vært geotermisk modellering på grunnlag av borehullsloggingen. Også dette arbeidet rapporteres separat.

I oktober 2015 gjennomførte NGU (Georgios Tassis) med bistand fra Regiongeologen (S. Dahlgren, B. Strømberg, Tone Marit Haugland Strand, Ingrid Sætersdal), målinger av flere profiler i alle deler av feltet med georadar. Ved prosessering av dataene viste det seg at de leirerike løsmassene på Fensfeltet gjorde at metoden ikke var brukbar for å finne dybden til fjell, og andre metoder måtte tas i bruk.

Resultatene fra bakkegeofysikken har mer generell interesse, og i foreliggende rapport presenteres datainnsamlingen, prosesseringen og resultatene av bakkegeofysikken på tradisjonell måte. Resultatene blir benyttet til karakterisering av løsmassene og utarbeidelse av et kart over dyp til fjell. I tillegg er det foretatt en karakterisering av svakhetssoner i området.

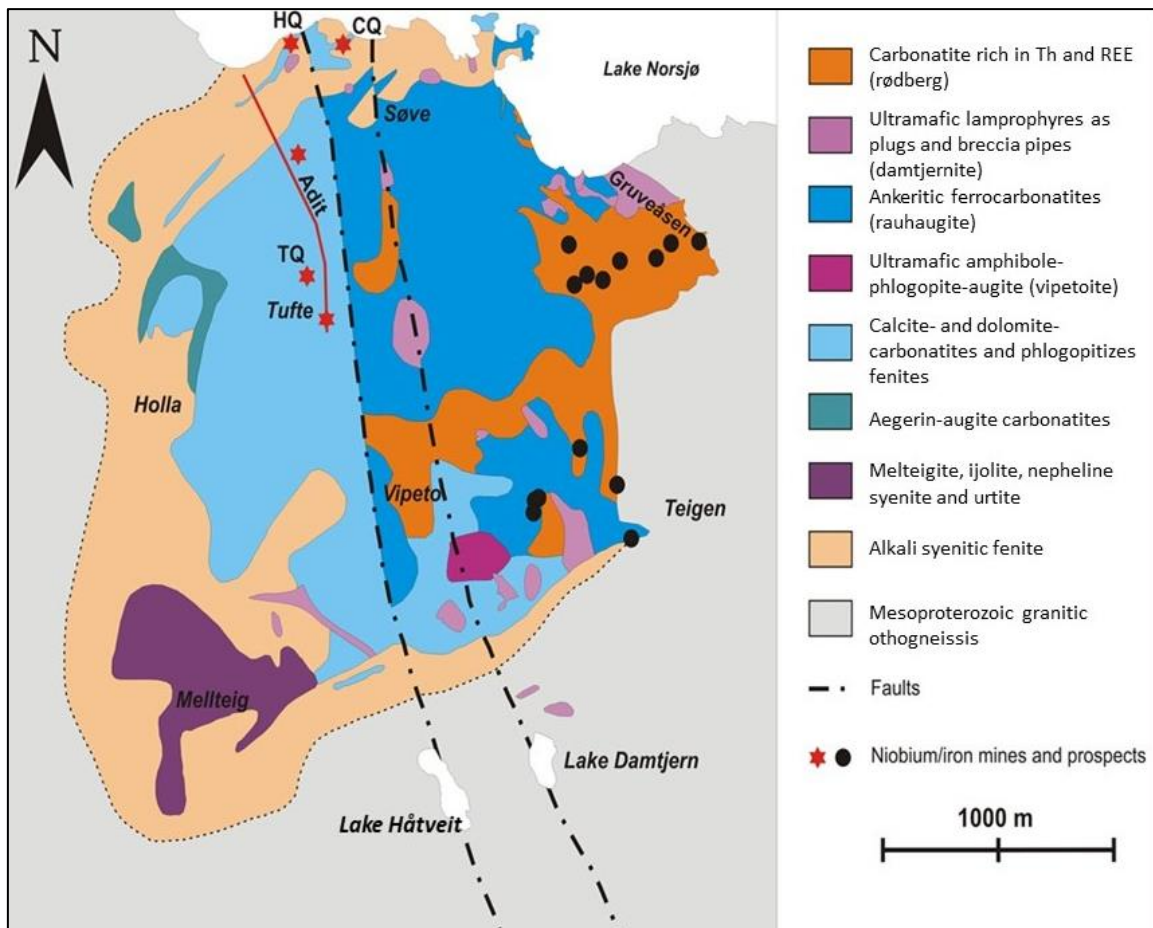
Regiongeolog S. Dahlgren planla profilene for seismikk og resistivitet i samarbeid med J.S. Rønning, NGU. S.Dahlgren gjorde avtaler med grunneiere, og innhentet opplysninger om infrastruktur i bakken (vann, kloakk, el-nett, telekom etc.) fra kommune og gravemeldingstjenesten som en del av forberedelsene. S. Dahlgren samlet data fra boringene (koordinater og dyp til fjell). Frode Ofstad, Bjørn Eskil Larsen og Jan Fr. Tønnesen, alle NGU, har samlet inn de geofysiske dataene i felt, med bistand fra B. Strømberg, Regiongeologen. Larsen og Tønnesen har tolket henholdsvis resistivetsdata og refraksjonsseismikken. Jan S. Rønning har vært prosjektleder og har i tillegg sammen med Larsen utformet denne rapporten. Prosjektet ble finansiert av NGU og Regiongeologen.

2. GEOLOGI OG TIDLIGERE UNDERSØKELSER

I dette kapitlet gis en kort beskrivelse av geologien og hva som NGU tidligere har gjort geofysikk i og ved Fensfeltet.

2.1 Berggrunns-, struktur- og mineralgeologi

Fen-komplekset er et sirkulært karbonatitt-kompleks med areal ca. 4 – 5 km², som ligger øst for Ulefoss, sør for Norsjø i gamle Telemark fylke. Komplekset er tverrsnittet på tilførselssystemet til en erodert vulkan som intruderte omkringliggende grunnfjell for ca. 580 mill. år siden (Dahlgren 2006). Gravimetrisk modellering (som nå gjøres på nytt) indikerte en sylindrisk fortsettelse mot dypet ned til minst 14 km (Ramberg 1973). Et forenklet geologisk kart over Fensfeltet er vist i [Figur 1](#). Som tidligere nevnt pågår det ny detaljert kartlegging i regi av Regiongeologen.



Figur 1: Forenklet berggrunnsgeologisk kart over Fen.

Som vist i Figur 1, indikeres to forkastninger som skjærer gjennom feltet. Disse vil bli nærmere beskrevet ut fra geofysikken som her rapporteres.

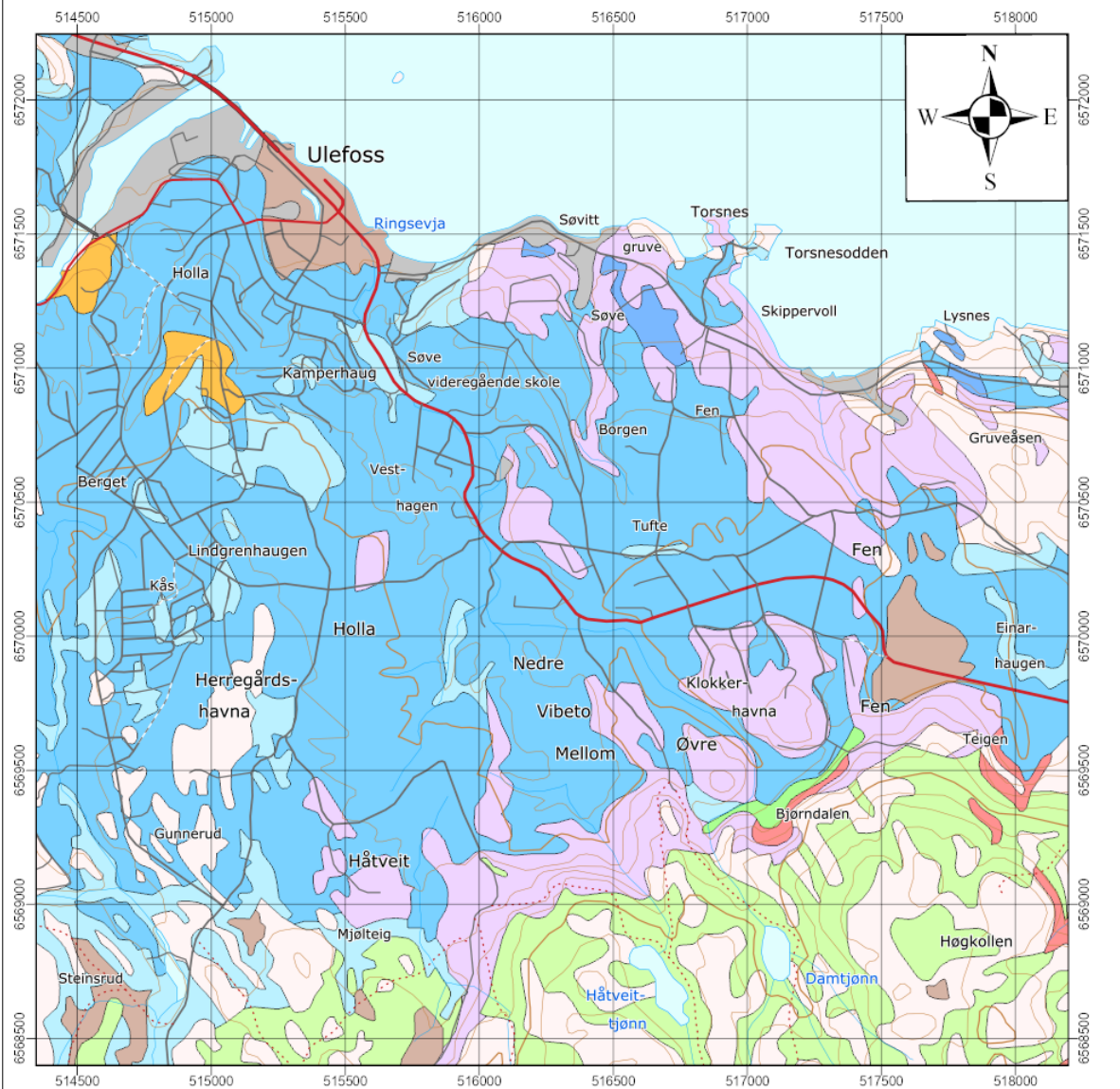
Fensfeltets geologi er meget spesiell. Det er verdens typelokalitet for magmatiske, subvulkanske karbonatbergarter, «karbonatitter» (Brøgger 1921). Feltet inneholder også mineralforekomster som det har vært drift på, og som det kanskje kan bli fremtidig drift på. Ulefos Jernverk, og andre jernverk, drev på jernmalm i Gruveåsen fra 1657 mer eller mindre sammenhengende frem til 1927, og ved Søve gruver ble det drevet på niob fra 1953 til 1965 (Dahlgren 2006). Noen av bergartene i Fensfeltet er kjent for høyt innhold av Th og sjeldne jordarter (REE) (Dahlgren 2012, 2015, 2019; Coint og Dahlgren 2019), og spesielt forekomsten av REE er årsak til fornyet interesse for Fensfeltet.

2.2 Løsmassegeologi

Løsmassegeologien over Fensfeltet er i hovedsak tolket som sammenhengende marine strandavsetninger (Figur 2). Stedvis finnes mindre breelvavsetninger (i vest) og noe torv og myr (i øst). I randsonen av Fensfeltet finnes blottet forvitret fjell, delvis dekt av usammenhengende morene.

Løsmasse flater og grenser

- Morenemateriale, usammenhengende
- Morenemateriale, sammenhengende
- Breelavsetning (Glasifluvial avsetning)
- Hav- og fjordavsetning og strandavsetning, usammenhengende
- Hav- og fjordavsetning, sammenhengende
- Marin strandavsetning, sammenhengende
- Forvittringsmateriale
- Bart fjell
- Torv og myr
- Fyllmasse (antropogent materiale)
- Skredmateriale, sammenhengende



Figur 2: Løsmassegeologien på Fensfeltet (Fra ngu.no, kvartærgeologi M 1: 50.000).

2.3 Tidligere geofysiske undersøkelser

Det er tidligere utført tyngdemålinger med tilhørende tolkinger av Ramberg (1973). Bedre måleutstyr, bedre terrengmodeller og bedre modelleringsverktøy førte til at NGU, på oppfordring fra Regiongeologen, besluttet å måle området på nytt. Etter hvert som resultater kom frem ble det besluttet å utvide disse målingene, spesielt mot sør, men også ute i Norsjø. Data er nå under prosessering og blir rapportert separat.

I 1981 utførte Elkem magnetiske målinger på bakken (Carstens 1981). Disse undersøkelsene ser ikke ut til å gi relevant informasjon for de problemstillinger denne rapporten omhandler.

I 2006 utførte NGU spesielt detaljerte radiometriske målinger fra helikopter (Heincke et al. 2007). I 2013 ble området igjen delvis dekt av nye magnetiske og radiometriske målinger fra helikopter som en del av NGUs regionale undersøkelser (Stampolidis et al. 2013). De radiometriske data fra Fensfeltet er senere reprocessert med oppdatert kalibrering (Stampolidis et al. 2014). Magnetiske data fra disse to undersøkelsene er senere benyttet til utarbeidelse av «Aktsomhetskart for tunnelplanlegging» (Baranwal et al. 2017).

3. METODEBESKRIVELSER

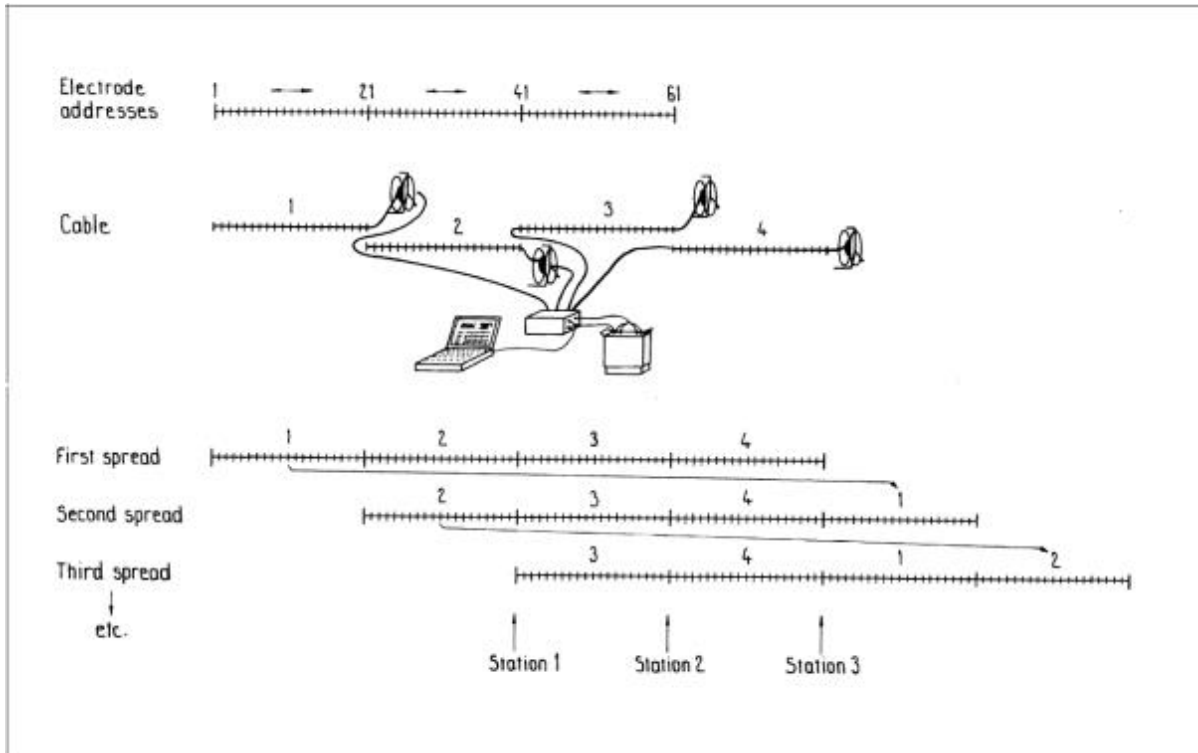
Ved de rapporterte undersøkelsene er det utført resistivetsmålinger, refraksjons-seismikk og korte kjerneboringer.

3.1 Resistivitet

2D resistivitet, også kalt Electrical Resistivity Tomography (ERT), utføres ved å sende strøm ned i bakken gjennom to elektroder samtidig som det måles spenning mellom to andre elektroder. Basert på utsendt strømstyrke, målt potensialforskjell og geometrisk plassering av elektrodene, kan en *tilsynelatende resistivitet* beregnes. Ved å foreta en inversjon av målt tilsynelatende resistivitet kan et tilnærmet sant bilde av resistiviteten i bakken beregnes. En mer utfyllende metodebeskrivelse finnes her:

<https://www.ngu.no/sites/default/files/2D%20RES-Metodebeskrivelse.pdf>

Målingene ble utført med Lund-systemet (Dahlin 1993) hvor fire multielektrode-kabler kobles opp til et ABEM Terrameter LS (ABEM 2012), se Figur 3. Elektrodekonfigurasjonen brukt i denne undersøkelsen er *Multiple Gradient* (Dahlin and Zhou 2006) med 5 meter elektrodeavstand. Da hver kabel har 20 elektroder vil en total lengde av 400 m måles ved hvert utlegg, og dette gir en dybdepenetrasjon på ca. 50 m. For å måle lengre profiler enn 400 m benyttes "roll-along"-metoden (Figur 3) hvor bakerste kabel flyttes fremst og nye målinger gjennomføres.



Figur 3: Diagram som viser LUND Systemet og hvordan roll-along metoden gjennomføres. Fra (ABEM 2012).

Siden hver måling gir en tilsynelatende resistivitet som er en gjennomsnittsverdi for alle kropper innenfor målevolumet, er det nødvendig å beregne den sanne resistiviteten. Dette gjøres gjennom en inversjonsprosess i programmet *Res2DInv* (Loke 2017). Det ble utført en «Standard inversjon» med horisontalt/vertikalt filter lik 1.

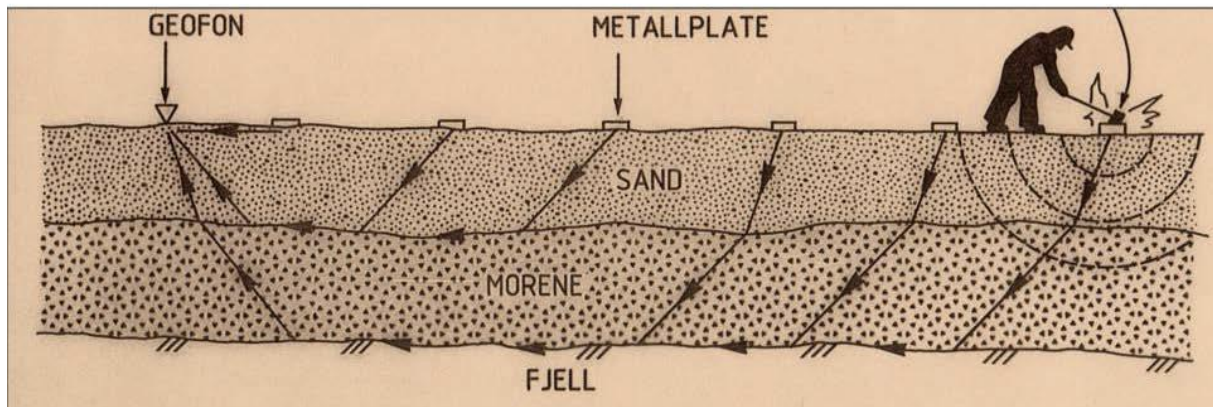
3.2 Refraksjonsseismikk

Metoden grunner seg på at lydets forplantningshastighet forandrer seg med mediets elastiske egenskaper. Energikilde i denne undersøkelsen var dynamitt. Oppsatte lydbølger fanges opp av geofoner og disse sendes inn på en digital 24-kanalers seismograf Terraloc MK6 (ABEM 1994). Avstanden mellom geofonene kan varieres etter formål, ved denne undersøkelsen ble 5 m geofonavstand benyttet. Skuddpunktavstanden var i utgangspunktet 30 m (6 x geofonavstand), men enkelte skudd kunne ikke skytes på grunn av lokale forhold i bakken. En mer utfyllende beskrivelse av refraksjonsseismikk finnes på:

https://www.ngu.no/sites/default/files/Refraksjon_beskrivelse_ny.pdf

En forutsetning for refraksjonsseismikken er at hastigheten i jordlagene øker mot dypet. Ved tolkninger benyttes den første ankomne bølgefront som når geofonene, P-bølgen. Dersom en "skyter" nært en geofon, vil den første ankomne bølge gå langs overflaten direkte fra skudd til geofonen. Når avstanden til geofonen øker, vil det etter hvert bli raskere for energien å gå ned i lag nummer 2 der hastigheten er større (Morene i **Feil! Fant ikke referanse kilden.**), og etter hvert også ned i lag 3 (Fjell). Ut

fra mange målte gangtider fra skudd til geofon kan et gangtidsdiagram konstrueres, og ut fra dette kan hastigheten i p-bølgene og lagenes tykkelse beregnes. NGU har benyttet Hagedoorns pluss-minus-metode ved tolkingen. Det aktuelle hastighetsområde i den såkalte ingeniørseismikk er fra ca. 200 m/s i visse typer porøse løsmasser til over 6000 m/s i enkelte bergarter (se [Tabell 1](#)).



Figur 4: Konseptfigur for refraksjonsseismikk. Ved moderne systemer benyttes færre skudd og flere geofoner.

Tabell 1: P-bølgehastigheter i utvalgte sedimenter og bergarter.

Jordarter	P-bølgehastighet (m/s)
Torv	150 – 500
Leire (tørr)	600 – 1200
Sand (tørr)	400 – 900
Grus (tørr)	400 – 1000
Morene (tørr)	400 – 1600
Leire (vannmettet)	1200 – 1600
Sand (vannmettet)	1400 – 1800
Grus (vannmettet)	1400 – 1900
Morene (løs)	1500 – 1900
Morene (hardpakket)	1900 - 2200
Granitt	4800 – 5500
Kalkstein	4000 – 6000

3.3 Boringer

NGUs kjerneborerigg (kalt LITO-rigg, Figur 5) er i stand til å ta opp kjerner fra ca. 50 m dype hull i fjell. Opprinnelig (i 2015) måtte boringene foretas på bart fjell, men etter noe utviklingsarbeide vinteren 2015/2016 ble det mulig å bore gjennom ca. 20 meter løsmasser. Ved noen av boringene på Fen var det ikke mulig å nå ned til fjell siden løsmasseemektigheten er større enn 20 meter.



Figur 5: NGUs kjerneborerigg (LITO-rigg) i aksjon på Fen (Foto: S. Dahlgren).

4. RESULTATER

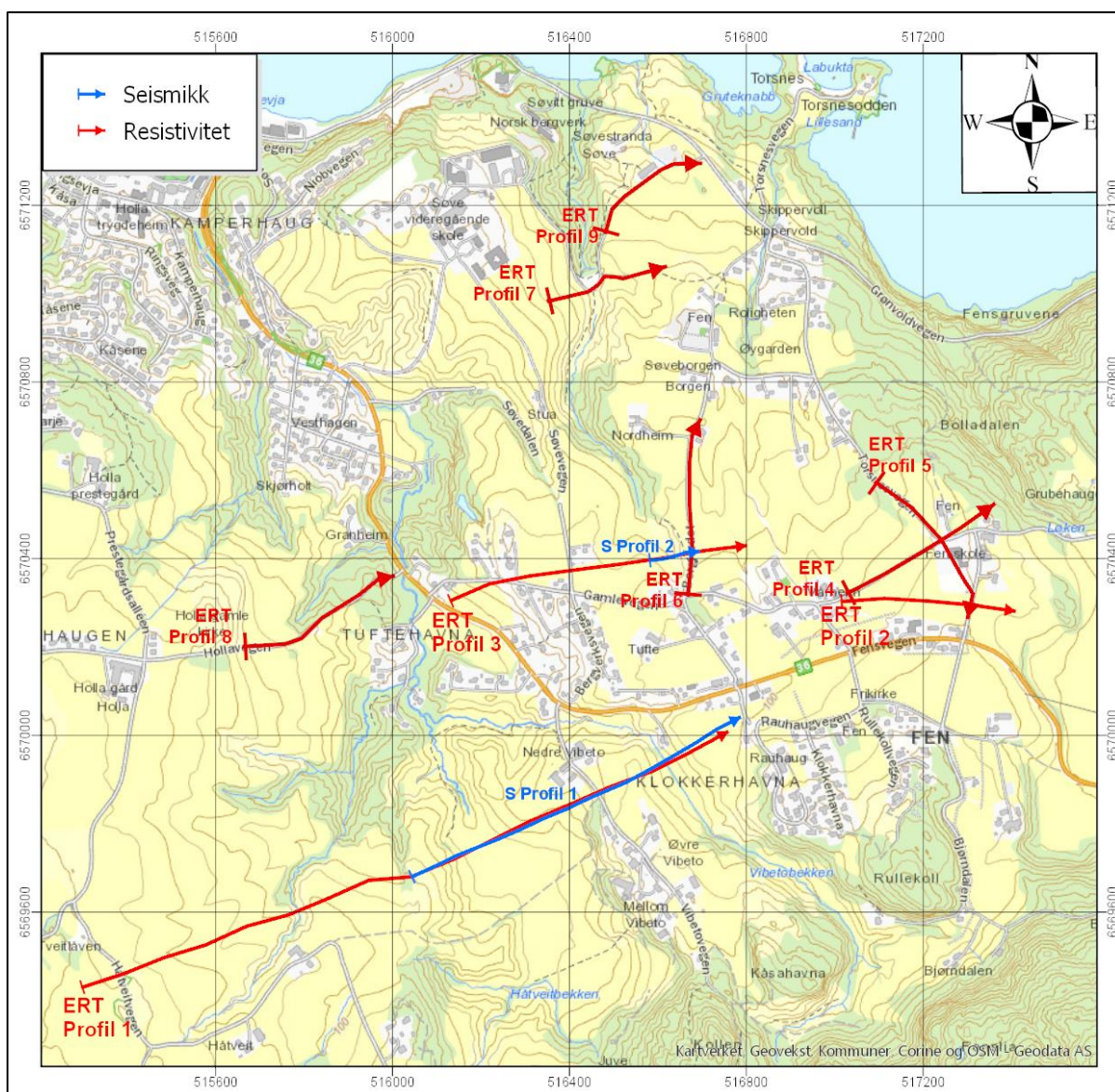
I det følgende blir resistivetsdata, seismikkdata og grunne boreriger presentert og kommentert.

4.1 Resistivitet

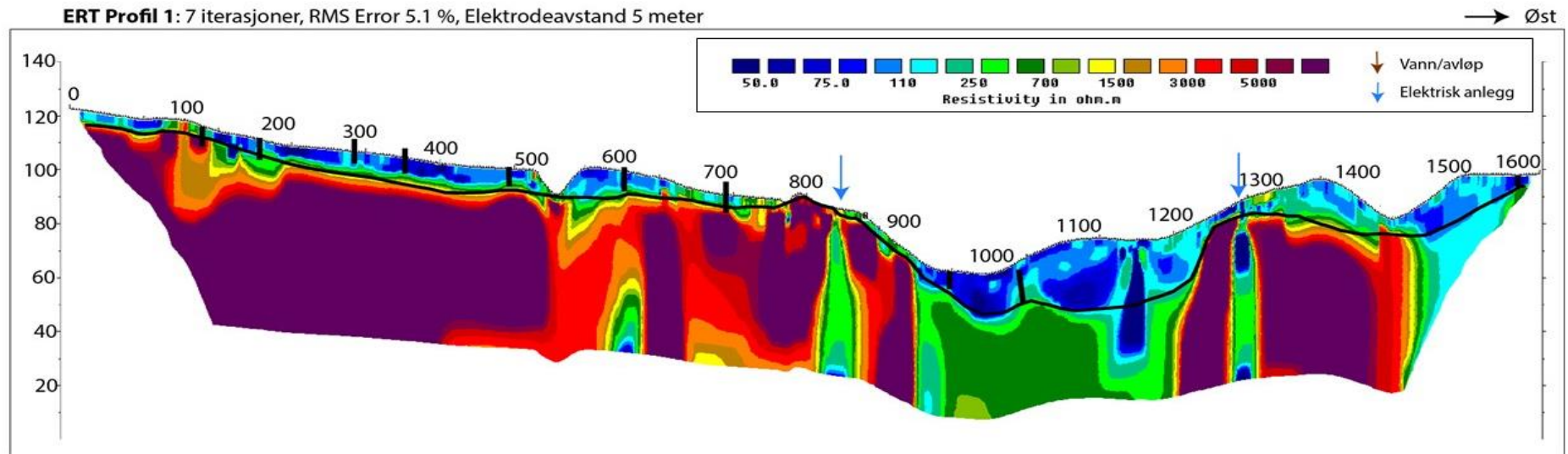
Målte resistivets- og seismikkprofiler ved Fen er vist på kart i [Figur 6](#). De enkelte inverterte resistivetsprofilene er vist i Figurene 7 til 15. Hvert profil blir kommentert under hvert bilde.

Ved alle de målte resistivetsprofilene var det lett å få kontakt med bakken, og en fikk ut relativt mye strøm. Dette resulterte i god kvalitet på de inverterte profilene. RMS-error som angir avvik mellom målte data og respons fra inverterte resistivetsmodell, er for profilene 1, 2, 3, 5, 6 og 7 lavere eller tilnærmet lik 5 %. Dette tilsier meget god teknisk kvalitet på de inverterte profilene. For de andre profilene (4, 8 og 9) er RMS Error mellom 5 og 10 % noe som tilsier god kvalitet på de inverterte profilene. Siden de fleste profilene befinner seg i områder med bebyggelse vil nedgravd infrastruktur påvirke resistivetsverdiene som vises. Det vil si at resistiviteten som fremkommer i de fleste figurene kan være noe lavere enn det som er riktig. Dette gjør at tolkning og karakterisering av løsmasser blir noe mer utfordrende. Det er likevel mulig å tolke dyp til fjell langs størstedelen av de berørte profiler. Dette gjelder hovedsakelig når kabler eller rør går parallelt med profilene.

Ved kommenteringen av de enkelte profilene er oversikter over infrastruktur som vann- og avløpsrør samt elektriske kabler i bakken benyttet. Denne informasjonen er hentet fra Nome kommune og den lokale strømleverandøren. I tillegg er boringer i umiddelbar nærhet til profilene projisert inn på profilene.

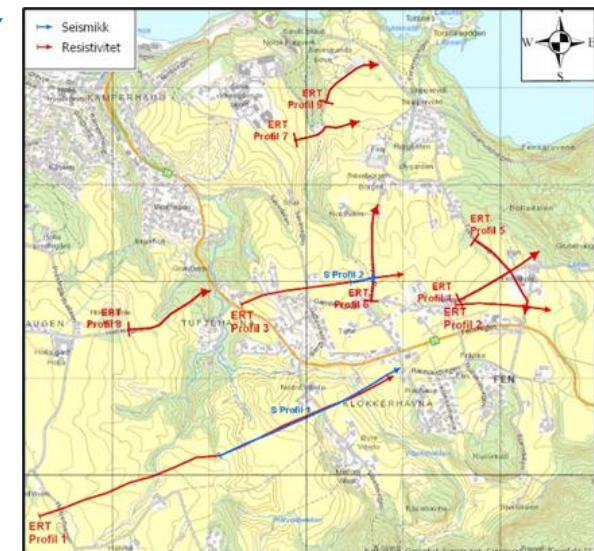


Figur 6: Oversikt over resistivitet (ERT) og seismikk (S) utført på Fen. Koordinater i WGS84 UTM

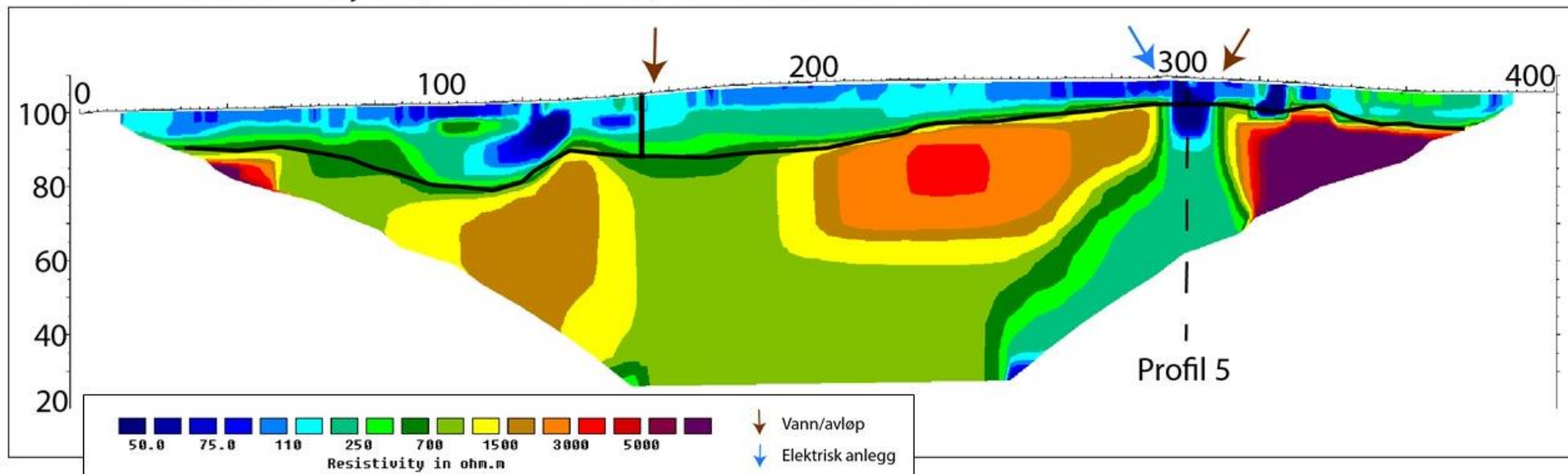


Figur 7: Resistivetsprofil 1 med tolket dyp til fjell (sort strek), boringer (sort vertikale strek) og plassering av nedgravd infrastruktur.

Profil 1 (Figur 7) viser ti boringer (sorte vertikale linjer) som er projisert fra sin nærliggende posisjon. Dyp til fjell i borehullene stemmer meget godt med den kontrasten i resistivitet som er tolket som overgang fra løsmasser til fjell. Vertikale soner med lav resistivitet ved ca. posisjonene 840, 1160 meter og 1280 meter er assosiert med nedgravd infrastruktur noen meter under overflaten som vann, avløp og elektriske kabler. Disse kan føre strøm bedre enn omgivelsene, dermed oppstår de karakteristiske vertikale lav-resistive sonene. En bred sone med lav resistivitet er kartlagt mellom posisjonene 900 og 1200. Denne sonen ligger akkurat hvor det forventes å finne oppsprukket fjell på bakgrunn av NGUs aktsomhetskart for tunnelplanlegging (Baranwal et al. 2017) som senere presenteres i Figurene 21 og 22. En markert sone med lav resistivitet fra ca. posisjon 1450 og ut profilet synes reell og representerer trolig også en svakhetsone i fjellet (se også seismikktolking, kapittel 4.2). Resistiviteten i løsmassene er i hovedsak $< 100 \Omega\text{m}$, og dette kan representere kvikkleire.



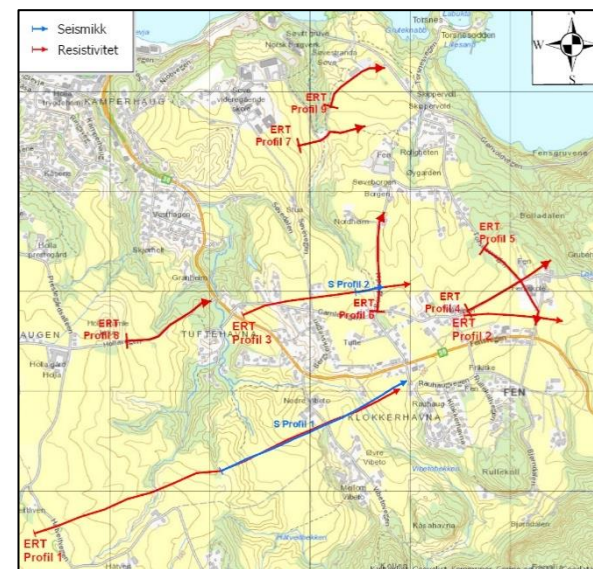
ERT Profil 2: 7 iterasjoner, RMS Error 3.0 %, Elektrodeavstand 5 meter

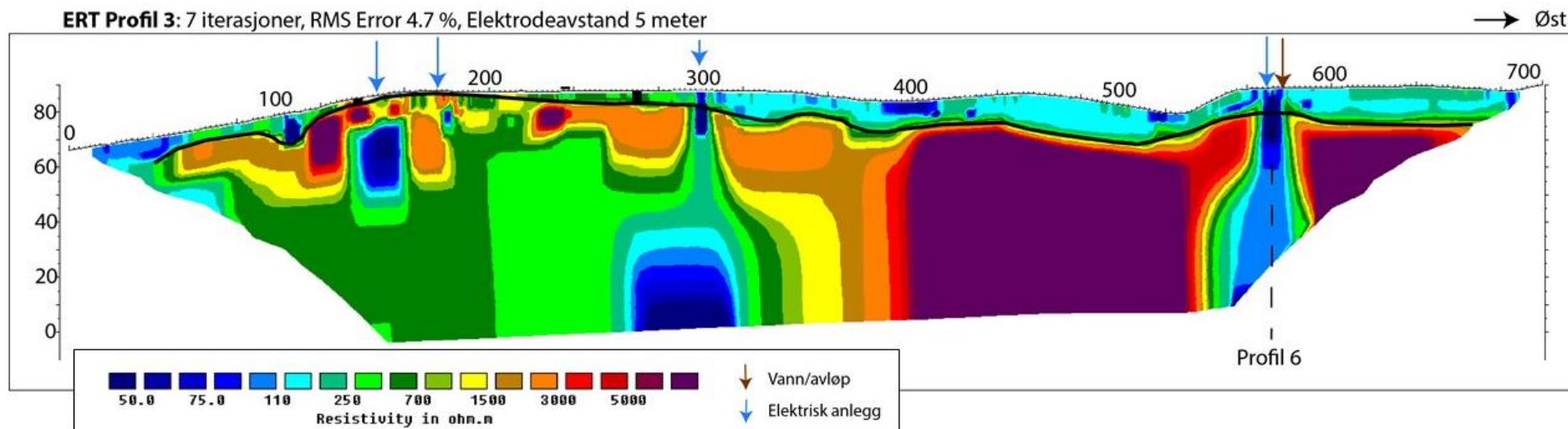


Figur 8: Resistivitetsprofil 2 med tolket dyp til fjell (sort strek), boringer (sort vertikal strek) og plassering av nedgravd infrastruktur. Kryssende profiler er også indikert.

Profil 2 (Figur 8) viser to boringer, og resultatene fra disse stemmer også veldig bra med tolket dyp til fjell. Kontrasten mellom løsmasser og fjelloverflaten er ikke like stor som andre profiler, noe som kan skyldes at strømmen går langs vann og avløps anlegg som krysser profilet ved 160 meter og 300 meter. Indikert sone med lav resistivitet ved posisjon 300 faller sammen med infrastruktur i bakken, og kan på grunn av dette være en falsk anomali.

Resistiviteten i løsmassene er jevnt over relativt høye ($\approx 100 \Omega m$), og representerer trolig silt-holdige strandavsetninger, eventuelt morene.

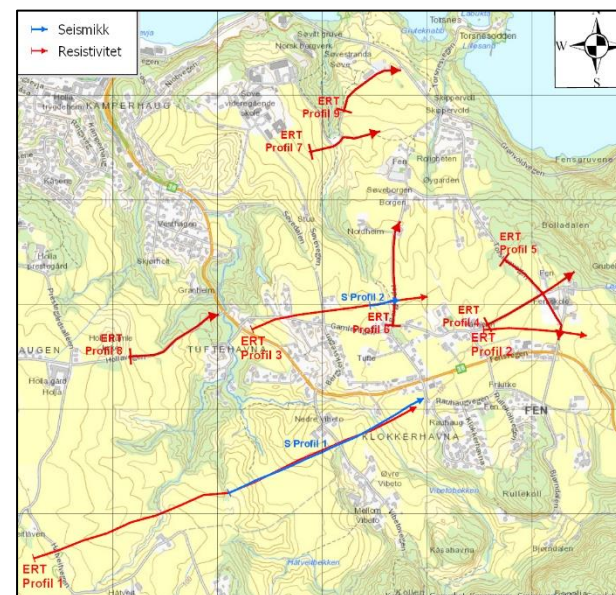




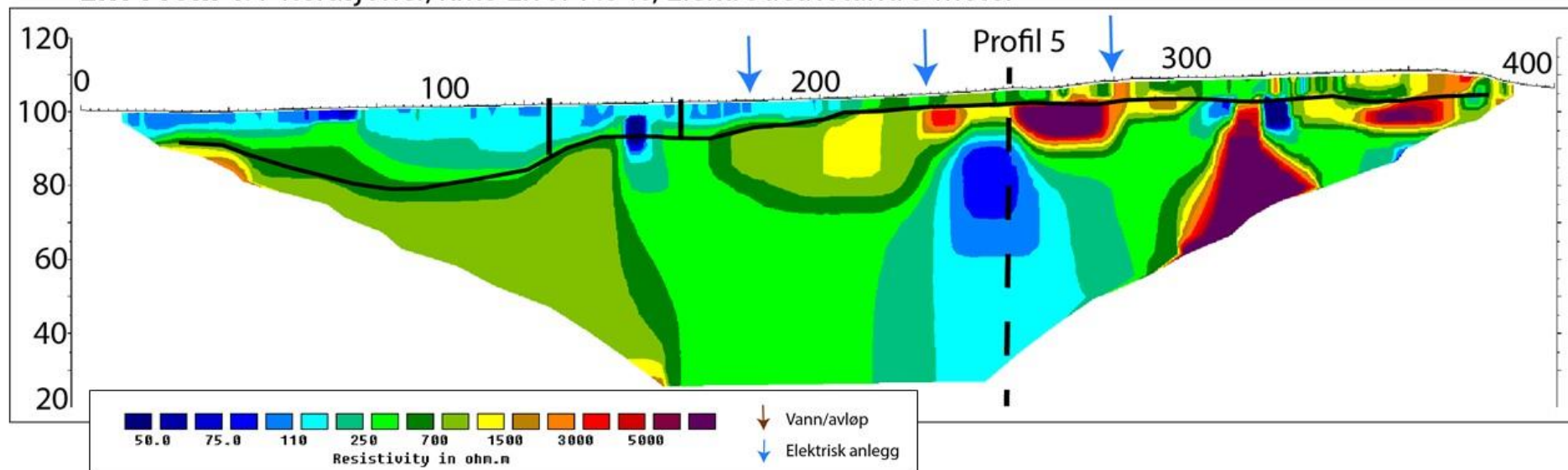
Figur 9: Resistivetsprofil 3 med tolket dyp til fjell (sort strek), boringer (sort vertikal strek) og plassering av nedgravd infrastruktur. Kryssende profil 6 er også indikert.

Profil 3 (Figur 9) viser to boringer. Det er i tillegg flere boringer langs profilet, men de ligger mellom 130 meter og 160 meter og går rett i fjell. Fjell er blottet ved ca. posisjon 160. Dyp til fjell følger samme resistivetsgradient som de andre profilene i området. Også her er det infrastruktur som forstyrrer målingene ved ca. posisjonene 140, 170, 300 og 570 langs profilet. Anomaliene går helt opp i tolkede løsmasser, og representerer trolig ikke svakhetssoner i fjell, men er kunstige effekter.

Resistiviteten i løsmassene er jevnt over høyere enn 100 Ω m, og representerer trolig silt- holdige strandavsetninger, eventuelt morene.



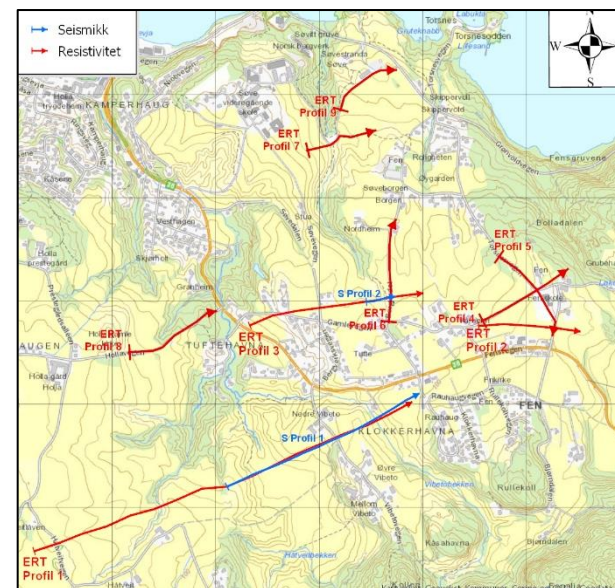
ERT Profil 4: 7 iterasjoner, RMS Error 7.6 %, Elektrodeavstand 5 meter



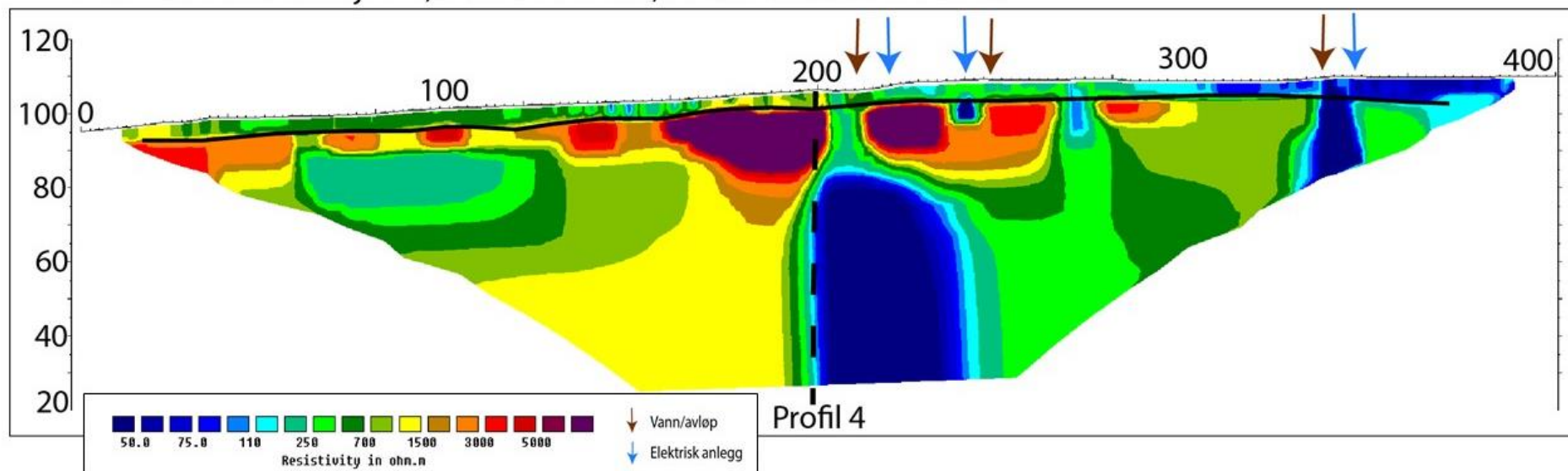
Figur 10: Resistivetsprofil 4 med tolket dyp til fjell (sort strek), borerer (sort vertikal strek) og plassering av nedgravd infrastruktur. Kryssende profil 5 er også indikert.

Profil 4 (Feil! Fant ikke referanseikilden.) er lagt vinkelrett på Profil 5. Profil 4 preges av støy fra infrastruktur, men det er likevel mulig å tolke et dyp til fjell. Denne tolkningen stemmer også godt med de to nærliggende borehull. Elektriske anlegg krysser profilet ved ca. 150 meter og ligger langs profilet videre øst langs hele profilets lengde. Profilet krysser også Profil 5 som vist på figuren.

Resistiviteten i løsmassene er jevnt over høyere enn 100 Ωm , og representerer trolig silt- holdige strandavsetninger, eventuelt morene.

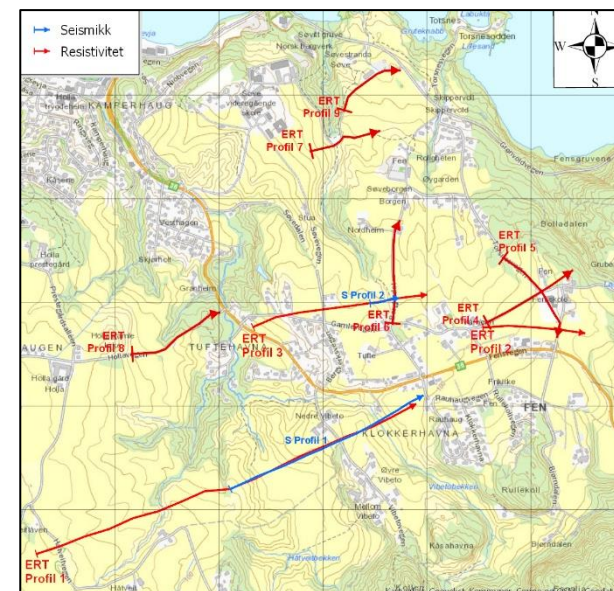


ERT Profil 5: 7 iterasjoner, RMS Error 3.9 %, Elektrodeavstand 5 meter

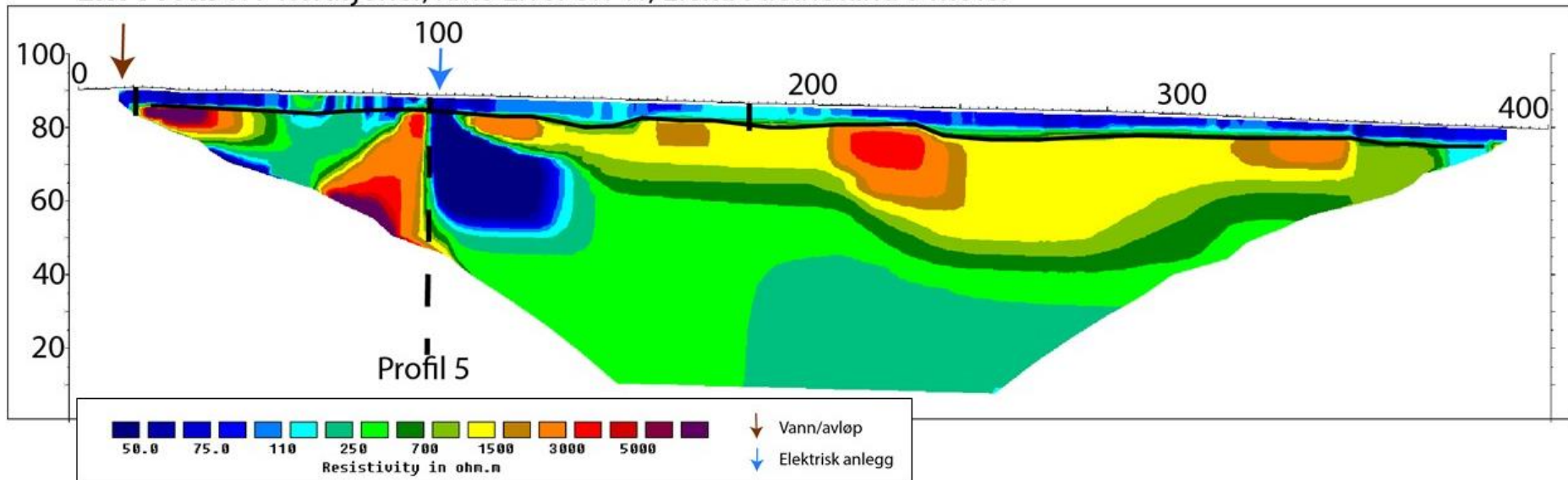


Figur 11: Resistivetsprofil 5 med tolket dyp til fjell (sort strek), boringer (sort vertikal strek) og plassering av nedgravd infrastruktur. Kryssende profil 4 er også indikert.

Profil 5 (Figur 11) er lagt vinkelrett på **Profil 4** og preges dermed av den samme infrastrukturen denne linja. Det er tett med vann og avløps ledninger samt noe elektrisk infrastruktur sørøst for 200 meter. Det er likevel god kontrast mellom løsmasser og fast fjell som er mulig å følge langs hele profilet. I starten av profilet og frem til ca. posisjon 300 er resistiviteten i angitte løsmasser jevnt over høyere enn 300 Ω m, og representerer trolig forvitret fjell, eventuelt morene. Mot slutten av profilet avtar resistiviteten (< 100 Ω m), og representerer trolig mer leir-holdige strandavsetninger.



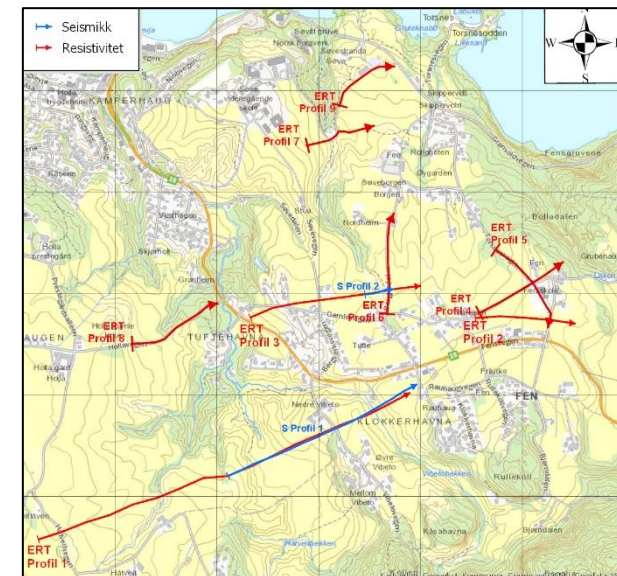
ERT Profil 6: 7 iterasjoner, RMS Error 5.1 %, Elektrodeavstand 5 meter



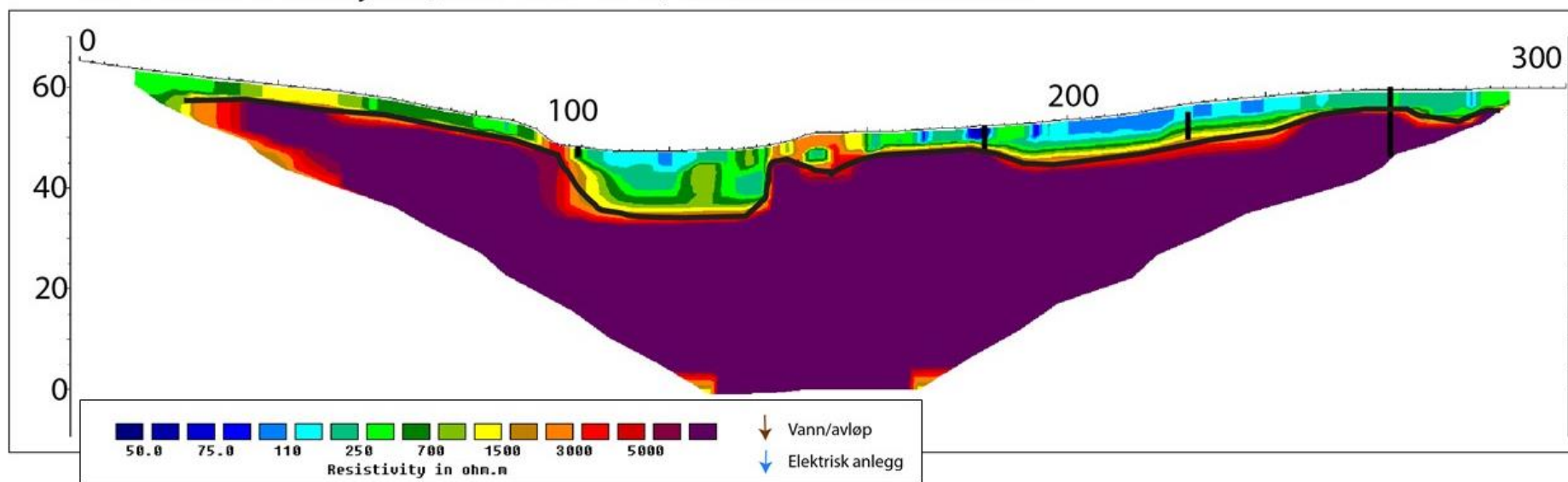
Figur 12: Resistivetsprofil 6 med tolket dyp til fjell (sort strek), borer (sort vertikal strek) og plassering av nedgravd infrastruktur. Kryssende profil 5 er også indikert.

Profil 6 (Figur 12) går langs vei i nord-sør retning ved Tuft. Det krysser en elektrisk ledning ved ca. 100 meter samtidig som det går et vann og avløpsrør langs hele profilet. Dette kan forklare det er lavere resistivitet i dypet. Ellers er overgangen fra løsmasser til fjell klar og stemmer veldig godt når den sammenliknes med nærliggende borer.

Resistiviteten i løsmassene er jevnt over høyere enn 65 Ω m og kan stedvis representere mulig kvikkleire. Resistivitet > 100 Ω m representerer trolig siltige strandavsetninger.



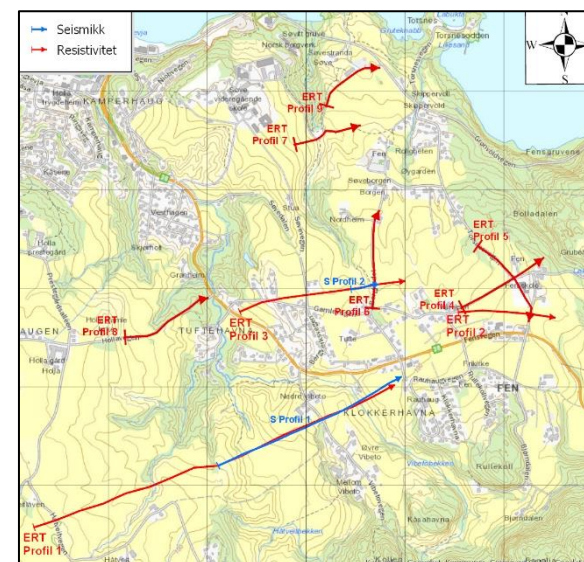
ERT Profil 7: 7 iterasjoner, RMS Error 4.4 %, Elektrodeavstand 5 meter



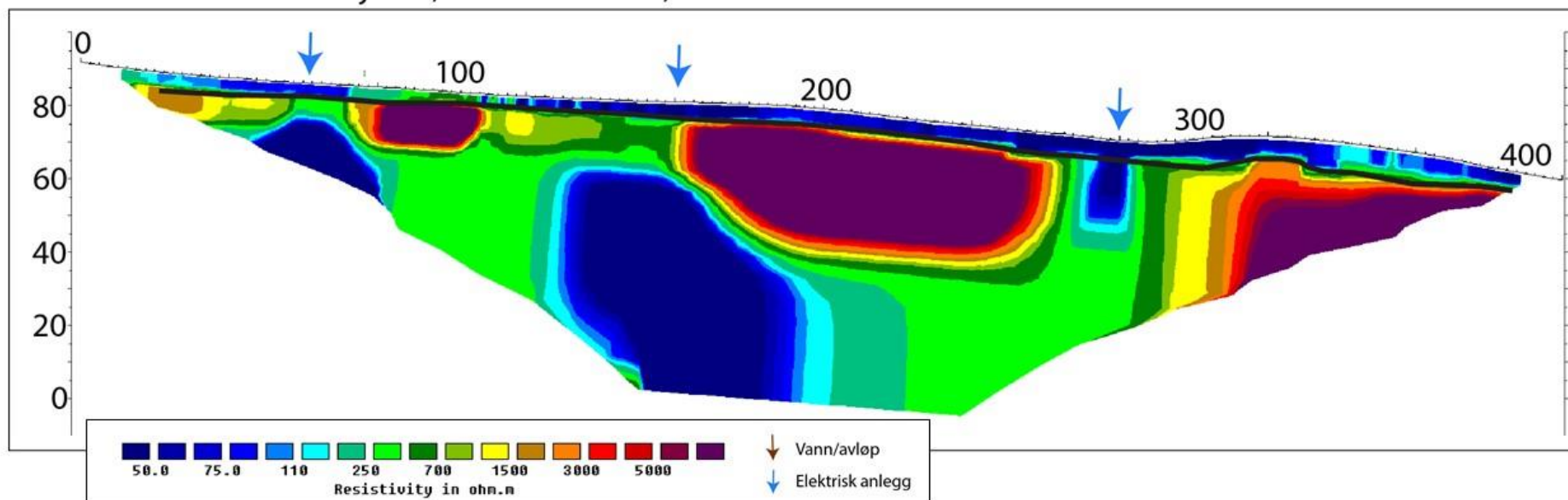
Figur 13: Resistivetsprofil 7 med tolket dyp til fjell (sort strek) og boringer (sort vertikal strek). Langs dette profilet er det ikke lokalisert nedgravd infrastruktur.

Profil 7 (Figur 13) er helt uten påvirkning av infrastruktur. Overgangen fra løsmasser til fjell er dermed veldig klar og kan følges langs hele profilet. Det er fire nærliggende borehull som alle stemmer godt med tolket dyp til fjell bortsett fra det lengst øst. Dette kan skyldes en veldig lokal, dyp lomme med sedimenter til side for profilet. Mellom 100 meter og 140 meter er mektighet ca. 10 m større enn resten av profilet. Dette søkket sammenfaller med en bekke dal som krysser profilet i nord-sør retning, og kan representere en svakhets sone i fjell. Profilet, som går like forbi det ene dypborehullet (LHKB-2), viser gjennomgående høye resistivetsverdier i fjell, og ingen tegn til noen svakhets sone.

Resistiviteten i de tolkede løsmassene er relativt høy, spesielt i vest og kan representere siltige masser eller morene.



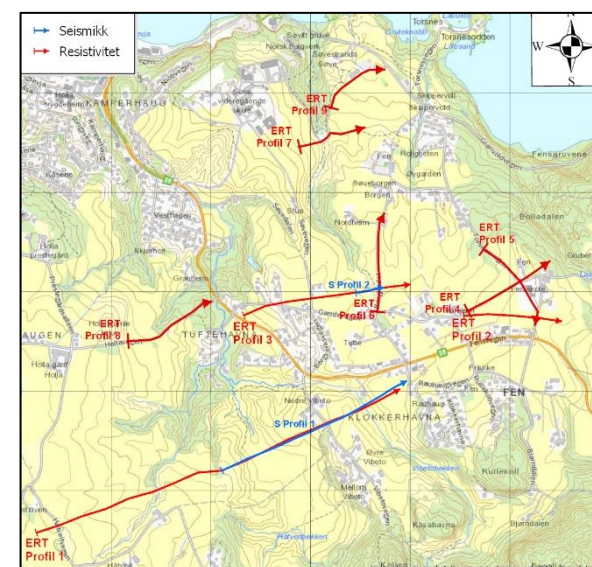
ERT Profil 8: 7 iterasjoner, RMS Error 9.6 %, Elektrodeavstand 5 meter



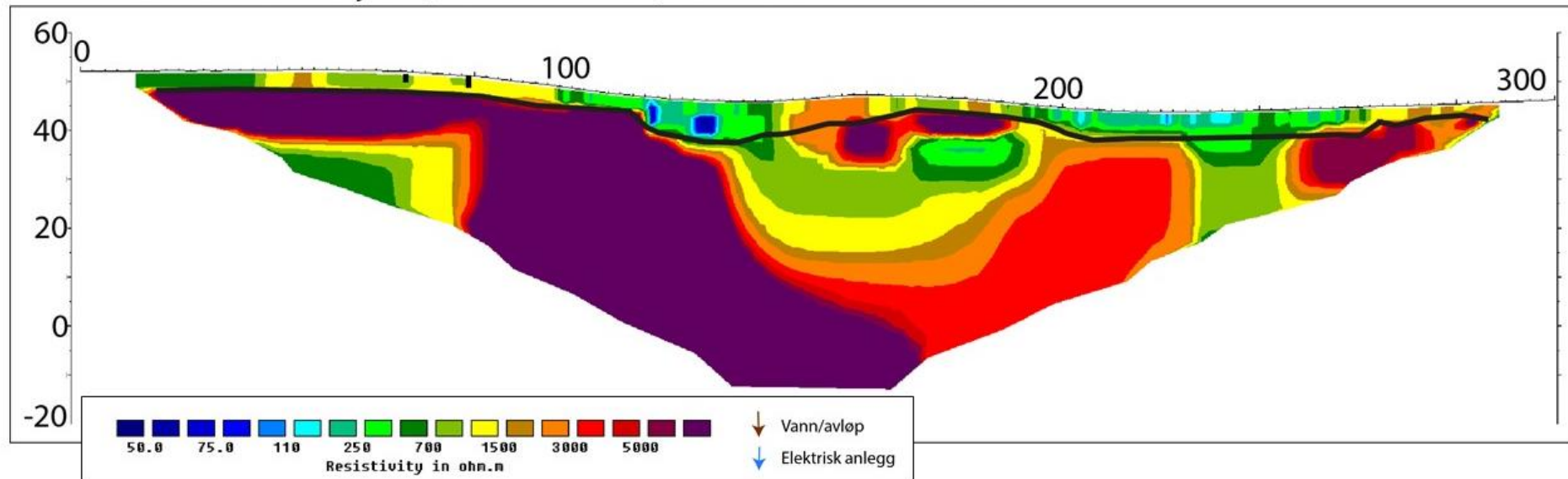
Figur 14: Resistivetsprofil 8 med tolket dyp til fjell (sort strek) og plassering av nedgravd infrastruktur.

Profil 8 (Figur 14) går langs vei fra Holla gård ned til Rv 36. Profilet preges av elektrisk infrastruktur som stjeler strømmen mellom 50 meter og 280 meter. Dermed gis det inntrykk av at det er lav resistivitet i dypet, men dette skyldes trolig at strømmen velger å gå langs ledningsnettet i stedet for i fjellet. Dyp til fjell lar seg likevel tolke og er ganske stabilt på ca. 5 m langs hele linja. Det fins kun ett nærliggende borehull, men det står i en bergknaus ca. 40 meter sør for 100-metersmerket.

Resistiviteten i løsmassene er i hovedsak lavere enn 100 Ω m og kan representere kvikkleire. På grunn av påvirkningen fra tekniske anlegg, kan en ikke tolke svakhetssoner i fjellet ut fra dette resistivetsprofilet.



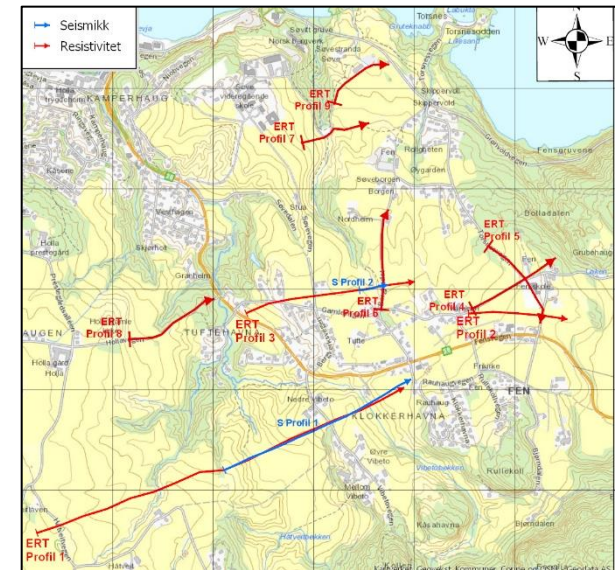
ERT Profil 9: 7 iterasjoner, RMS Error 9.1 %, Elektrodeavstand 5 meter



Figur 15: Resistivetsprofil 9 med tolket dyp til fjell (sort strek) og boringer (sort vertikal strek).

Profil 9 (Figur 15) starter ca. 100 m nord for **Profil 7**. Det passerer forbi to borehull (ved posisjonene 65 og 75) som viser mindre løsmasse-mektighet enn resistiviteten, men disse borehullene er ca. 10 m fra profilet så variasjoner i fjelltopografien kan forklare dette. Ellers er kontrastene mellom løsmasser og fjell veldig sterk, bortsett fra mellom 120 meter og 200 meter hvor det antydes at det er lavere resistivitet i dypet. Dette er typisk for nedgravd infrastruktur. Dette kan høre til bygningen som ligger langs veien mellom 160 meter og 200 meter.

Relativt høy resistivitet i de tolkede løsmassene kan representere morene, men forvitret fjell kan ikke utelukkes. Lav resistivitet i fjell ved posisjon 230 – 240 kan representere en svakhetszone i fjell.



4.2 Refraksjonsseismikk og samtolkning med resistivitet

Det ble målt to linjer med refraksjonsseismikk. Begge linjene går langs deler av tidligere presenterte resistivitetsprofiler 1 og 3 (se [Figur 6](#)). Dette ble gjort for å verifisere resistivitetmålingene siden refraksjonsseismikk sammen med resistivitet gir en sikrere indikasjon på dyp til fjell i alle typer løsmasser og samtidig en alternativ og mer nyansert metode for påvising og karakterisering av svakhetssoner i fjell.

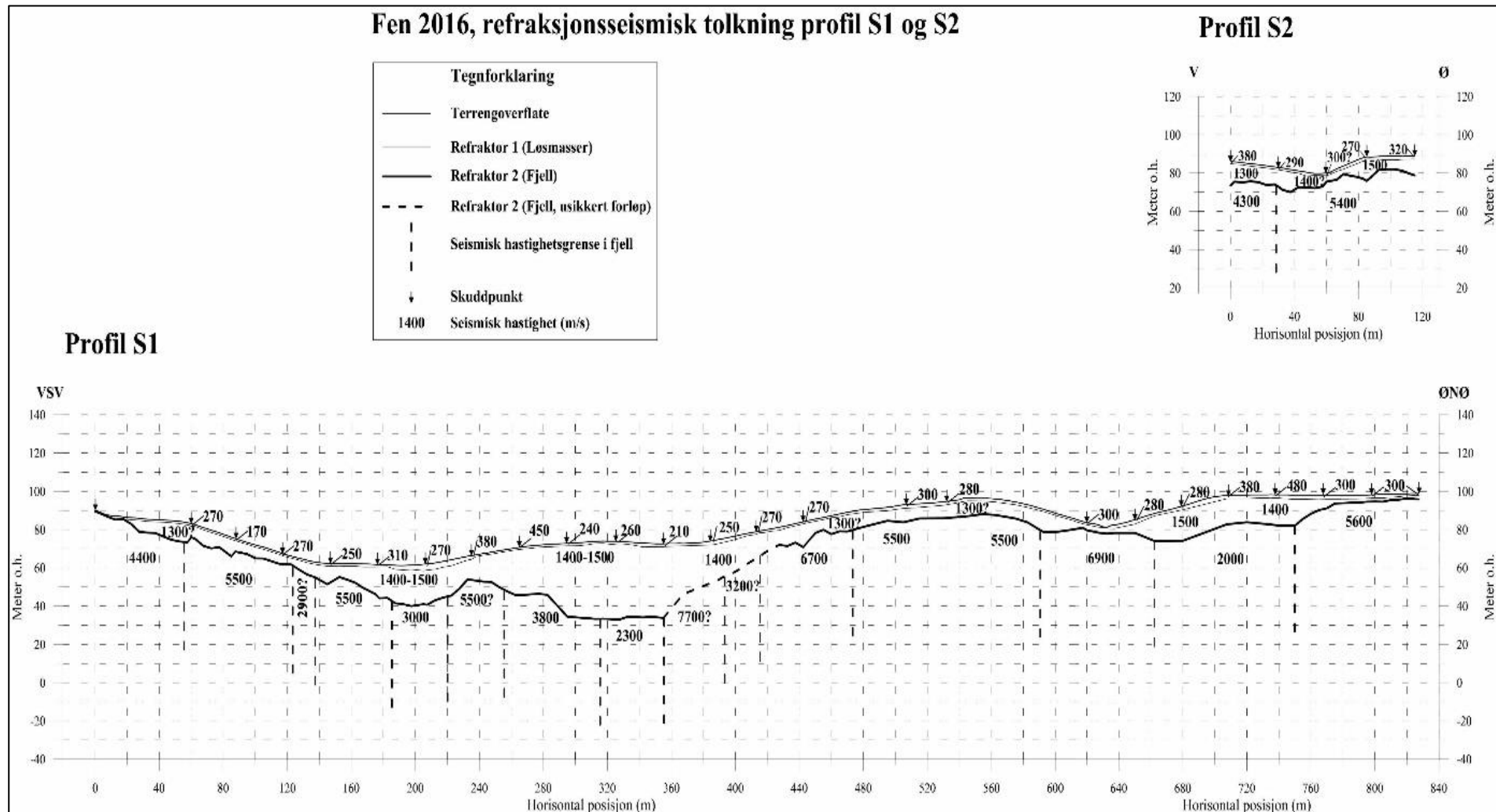
Seismikkprofilene er tolket tradisjonelt ved bruk av Hagedoorns pluss-minus metode (Hagedoorn 1959, Reynolds 2011). Rene tolkninger av de refraksjonsseismiske linjene er vist i [Figur 16](#). I [Figur 17](#) og [Figur 18](#) er seismikken sammenstilt med resistivitetsprofilene.

Som vist på [Figur 17](#) starter **S1** ved ca. posisjon 810 langs resistivitetsprofil 1 og følger resten av lengden pluss 50 meter. Tolket dyp til fjell er så å si identiske langs mesteparten av de sammenfallende profilene. Det største avviket fremstår i Vibetodalen, mellom posisjonene 950 og 1200 på resistivitetsprofilet. Her er resistiviteten lav delvis på grunn av økt løsmassetykkelse, men også på grunn av oppsprukket mulig forvitret fjell. Tolkning av fjelloverflate blir derfor usikker. Også rundt bakketoppen på 1360 meter langs resistivitetsprofilet, avviker dypet til fjell. Dette kan skyldes få skuddpunkt pga. dyrket mark i området.

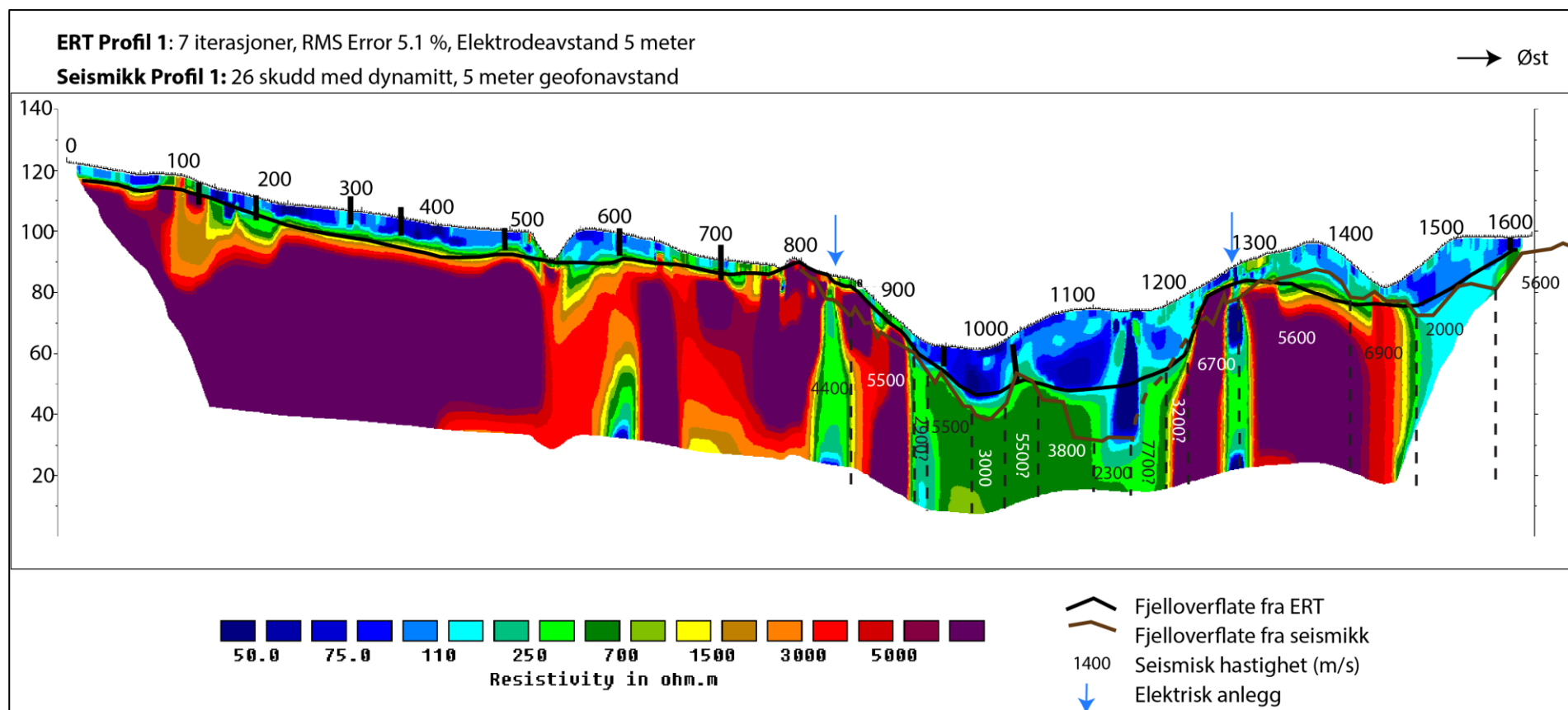
Seismikken viser nedsatt hastighet i fjell i flere soner gjennom Vibetodalen og bekrefter dermed det resistivitetsdata i dypet. Det ca. 250 m brede partiet fra posisjon 950 til 1200 på resistivitetsprofilet viser et mer nyansert bilde ved seismikkdata. Her varierer p-bølgehastigheten fra 2300 m/s via ca. 3000 m/s til 3800 m/s noe som ifølge ingeniørgeologene karakteriseres som henholdsvis ekstremt dårlig (< 3000 m/s) og svært dårlig bergmassekvalitet ($3000 < V_p < 4000$ m/s).

S2 ([Figur 18](#)) er målt langs resistivitetsprofil 3 som går på tvers av en elvedal ved Tufte. Dette var for å få bedre kontroll på hastigheten i fjellet siden elvedalen muligens sammenfaller med en svakhetsone som krysser området i nord-sør retning. Dyp til fjell er stort sett det samme som ved resistiviteten, men seismikken er noe mer detaljert. I dette korte profilet (110 m) er p-bølgehastigheten beregnet til 5400 m/s og 4300 m/s noe som karakteriseres som henholdsvis god og dårlig bergmassekvalitet. Resistivitetsprofilet og seismikken viser her motstridende resultat, og årsaken til dette er uviss.

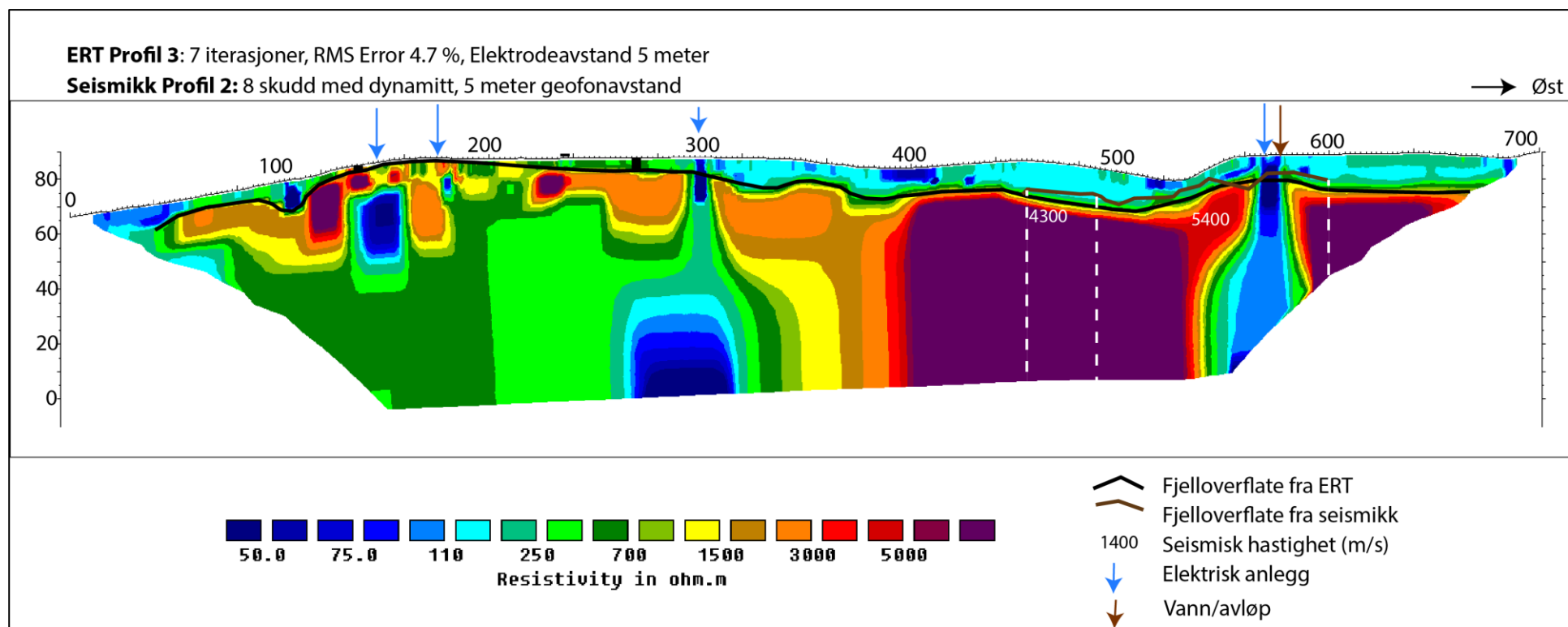
Fen 2016, refraksjonsseismisk tolkning profil S1 og S2



Figur 16: Tradisjonell tolkning av refraksjonsseismikk med Hagedoorns +/-metode langs profil S1 og S2.



Figur 17: Sammenstilling av resultater fra Resistivetsprofil 1 og Seismikkprofil 1 (i hvitt).

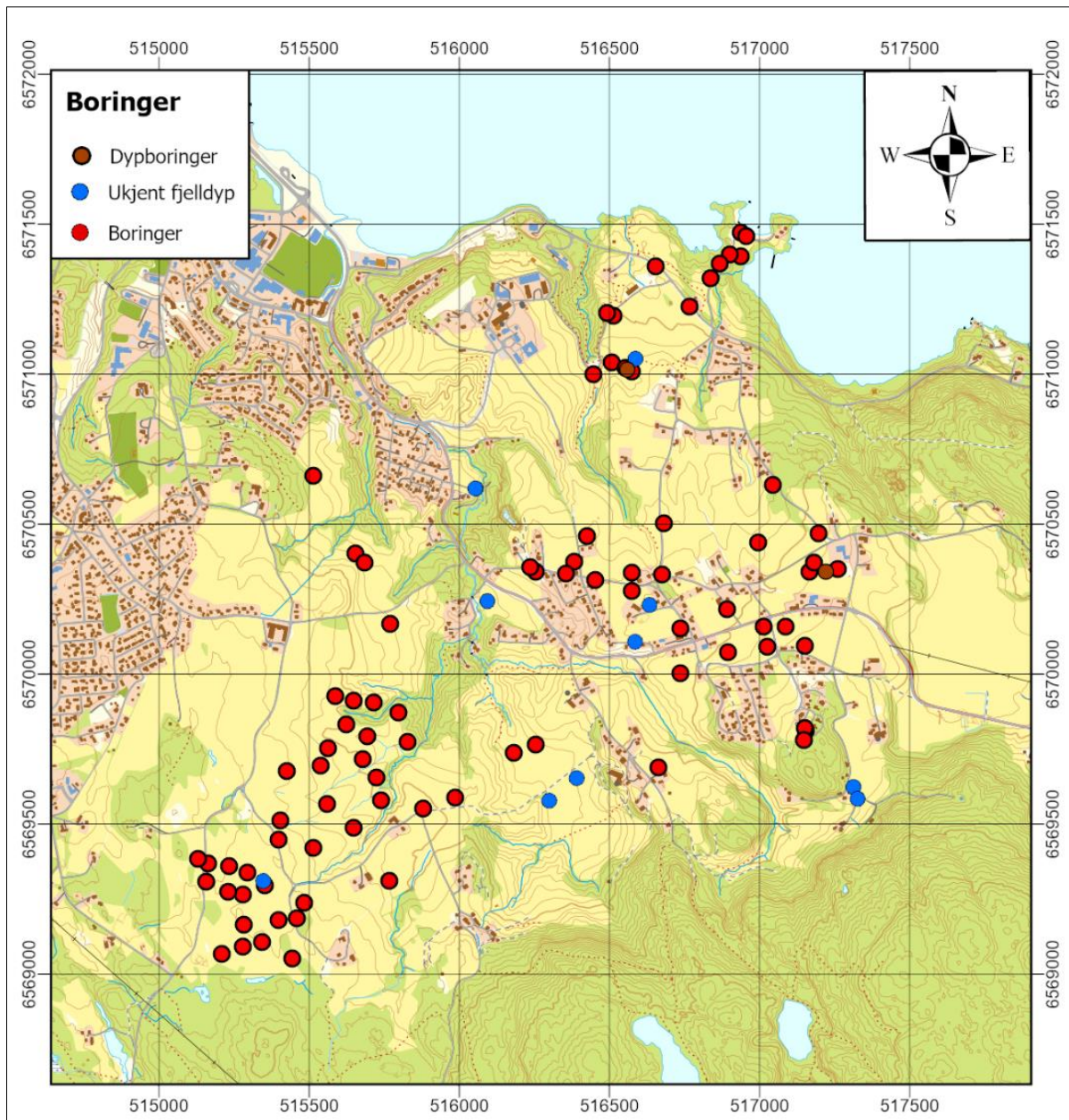


Figur 18: Sammenstilling av Resistivitetsprofil 3 og Seismikkprofil 2 (i hvitt).

4.3 Dyp til fjell fra boring

I tillegg til geofysiske målinger er det i alt utført 96 boringer med NGUs LITO-rigg innenfor Fensfeltet. Koordinater, borehullenes retning (asimut), borehullenes fall, dyp til fjell og total borelengde er presentert i Tabell A.1 (Vedlegg 1). I alt ni av hullene ble boret fra bart fjell, elleve av LITO-hullene nådde ikke fjell på grunn av store løsmassetykkelser. To av boringene (begge Fen 2017, henholdsvis TOR-1a og HTV-N2) var mislykket straks etter oppstart og ingen data ble samlet inn. Borehullenes posisjon presenteres i [Figur 19](#).

I kapittel 5.1 blir dyp til fjell fra boringene samtolket med dyp til fjell fra geofysikken og en oversikt over løsmassetykkelsen utarbeidet. Basert på geofysisk tolkning og boringer ble det produsert en raster 5m x 5m cellestørrelse som viser fjelltopografi i høyde over havet. Deretter ble LiDAR-topografi (fra Kartverket) resamlet fra 1m x 1m til 5m x 5m cellestørrelse og ved å subtrahere fjelltopografien fra overflatetopografien kunne et raster med cellestørrelse 5m x 5m av løsmasse-mektigheten beregnes. Ved dette arbeidet ble programsystemet Geosoft Oasis Montaj og algoritmen Minimum Curvature benyttet. Det ble også lagt inn en faktor som begrenser interpoleringen til maksimalt 100 m fra kjent datapunkt.



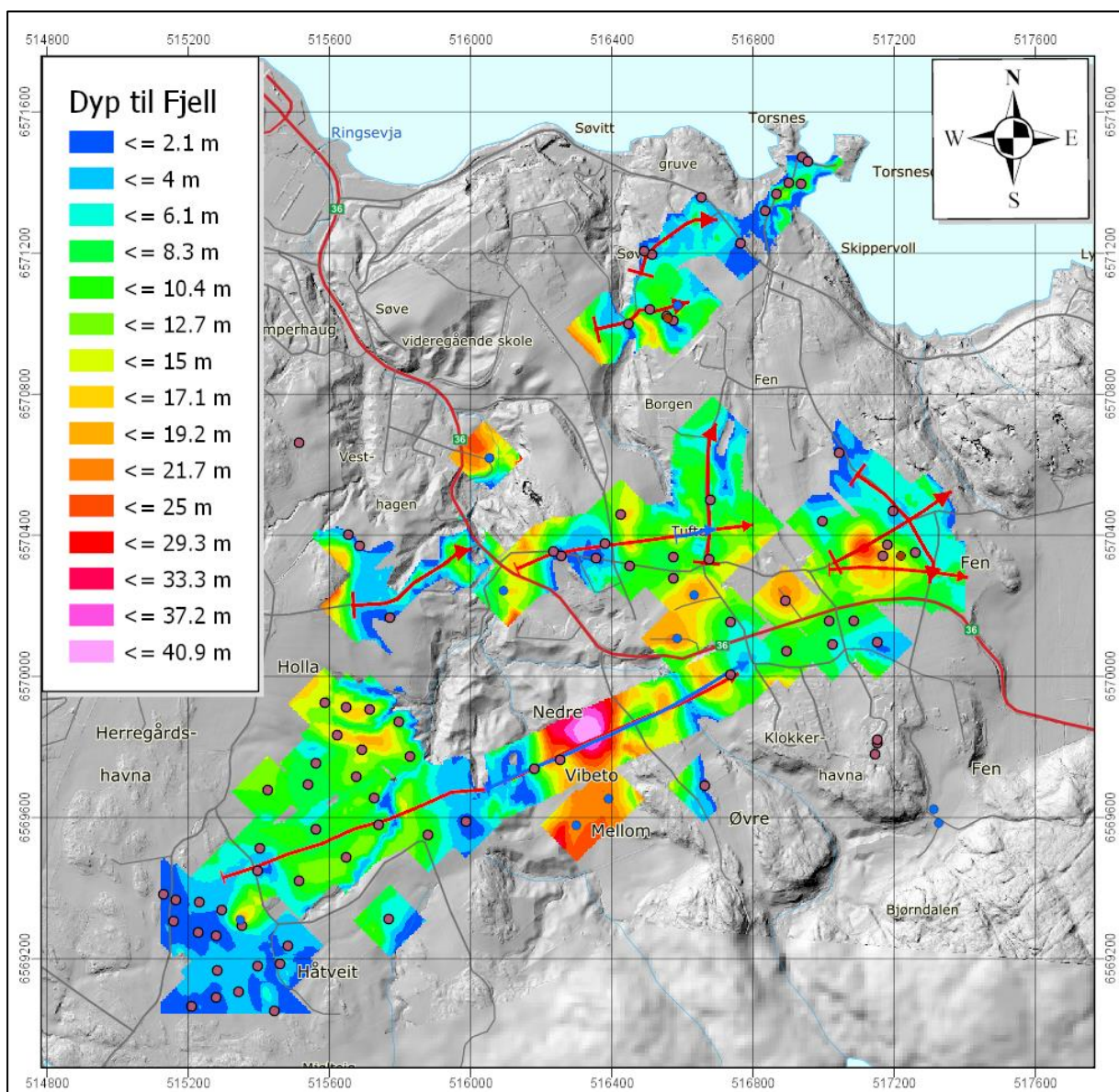
Figur 19: Oversikt over boringer i Fensfeltet. Røde punkter angir LITO-boringer ned til fjell, mens blå punkter angir LITO-boringer som ikke har nådd ned til fjell. Brunrøde punkter angir de to dypborehullene LHKB-1 ved Fen gamle skole og LHKB-2 ved Søve videregående skole.

5. TOLKINGER

5.1 Karakterisering av løsmasser

I dette avsnittet presenteres et kart over dyp til fjell, og en karakterisering av løsmasseytyper blir også oppsummert.

Ut fra boringene og tolking av geofysikken, er det utarbeidet et kart som viser dyp til fjell (Figur 20). NGU vil presisere at dette er et relativt grovt og glattet bilde av løsmasseytykkelsen, og mellom faste observasjoner (boringer og geofysikktolking) kan tykkelsen variere. Størstepartene av området har et dyp til fjell på rundt 10 m (grønne farger), men noen områder skiller seg ut. Disse er bl.a. Vibetodalen hvor løsmasseytykkelsen er tolket opp mot 40 meter og et område vest for gamle Fen skole hvor dyp til fjell er tolket til i overkant av 20 m. I andre områder er dyp til fjell mindre enn 5 m.



Figur 20: Dyp til fjell, med bakkegeofysikk og boringer. Bakke-teppet er en LIDAR høydemodell fra Kartverket. Punkter med blå farge representerer boringer som ikke er nådd ned til fjell. Koordinater er i ETRS89 - UTM32 (WGS-84).

Det er i tillegg laget en høydemodell av fjelloverflaten under løsmassene. Denne er tilgjengelig som et digitalt kartgrunnlag og kan sendes til brukere på forespørsel.

Ifølge kvartærgeologisk kart, vist i [Figur 2](#), er hele undersøkelsesområdet dominert av hav- og fjordavsetninger. NGU har utviklet en veiledning for karakterisering av leirtyper (Solberg, et al. 2011), gjengitt i **Feil! Fant ikke referanseilden..**

Tabell 2: Løsmasseklassifisering fra resistivitetsverdier (fra Solberg et al. 2011).

Resistivitet (Ωm)	Karakterisering
1 – 10	Ikke-utvaskete marine leiravsetninger
10 – 100	Utvaskede leiravsetninger (mulig kvikkleire)
Over 100	Tørrskorpeleire eller grovere masser

Resistivitetsprofilene (Figurene **Feil! Fant ikke referanseilden.** til [Figur 15](#)) viser resistivitetsnivåene i de enkelte profilene. Observerte data og tolkinger av løsmassetyper er vist i **Feil! Fant ikke referanseilden..** Generelt kan en si at det ikke er særlig mye intakte salte marine leiravsetninger i det undersøkte området. I Vibetodalen og vestover (Profilene 1 og 8, Figurene **Feil! Fant ikke referanseilden.** og 14) ligger resistiviteten i løsmassene i intervallet 10 til 100 Ωm , noe som kan indikere utvasket leire med mulig potensiale for kvikkleire. Øst for Vibetodalen, langs deler av Profil 1 og Profilene 2 til 7 og 9, er resistiviteten i løsmassene jevnt over > 100 Ωm og tolkes som siltige masser, mulig morene og eventuelt forvitret fjell. NGU presiserer at dette er tolkinger som må verifiseres med boring for å kunne vurdere risiko for kvikkleireskred. Det er også kjent at i områder med nedgravd infrastruktur vil deler av strømmen følge disse anleggene fremfor å følge løsmasser og fjell, dette gjør at datasettene påvirkes i form av lavere resistivitetsverdier enn naturlig.

Tabell 3: Observasjoner ut fra resistivitetsprofilene og tolket masstype.

Profil nr.	Del av profil	Løsmasse-tykkelse (m)	Resistivitets-nivå (Ωm)	Tolket masstype
1	Vest, 0 - 800	5 - 10	25 - 65	Utvasket leire
1	Mitre, 800 - 1200	20 - 40	40 - 100	Utvasket leire
1	Øst, 1200 - 1600	10 - 20	65 - 160	Utvasket leire/Silt
2	Hele	10 - 20	65 - 160	Mest Silt?
3	Vest, 0 - 120	5 - 10	65 - 160	Utvasket leire/Silt
3	Midt, 120 - 300	0 - 5	> 200	Silt/Morene
3	Øst, 300 - 700	5 - 15	100 - 160	Silt/Morene
4	Vest, 0 - 220	10 - 25	> 100	Silt/Morene
4	Øst, 220 - 400	5 - 10	> 200	Morene/Forvitret fjell
5	NV, 0 - 300	5 - 10	> 200	Morene/Forvitret fjell
5	SØ, 300 - 400	10 - 20	30 - 100	Utvasket leire/Myr?
6	Hele	10 - 15	65 - 400	Utvasket leire/Morene
7	Vest, 0 - 140	5 - 20	200 - 800	Morene
7	Øst, 160 - 300	5 - 10	100 - 200	Morene
8	Vest, 0 - 120	5 - 10	65 - 1000	Silt/Morene
8	Øst, 120 - 400	≈ 10	25 - 100	Utvasket leire
9	Hele, 0 - 300	5 - 10	200 - 800	Morene/Forvitret fjell

5.2 Karakterisering av svakhetssoner i fjell

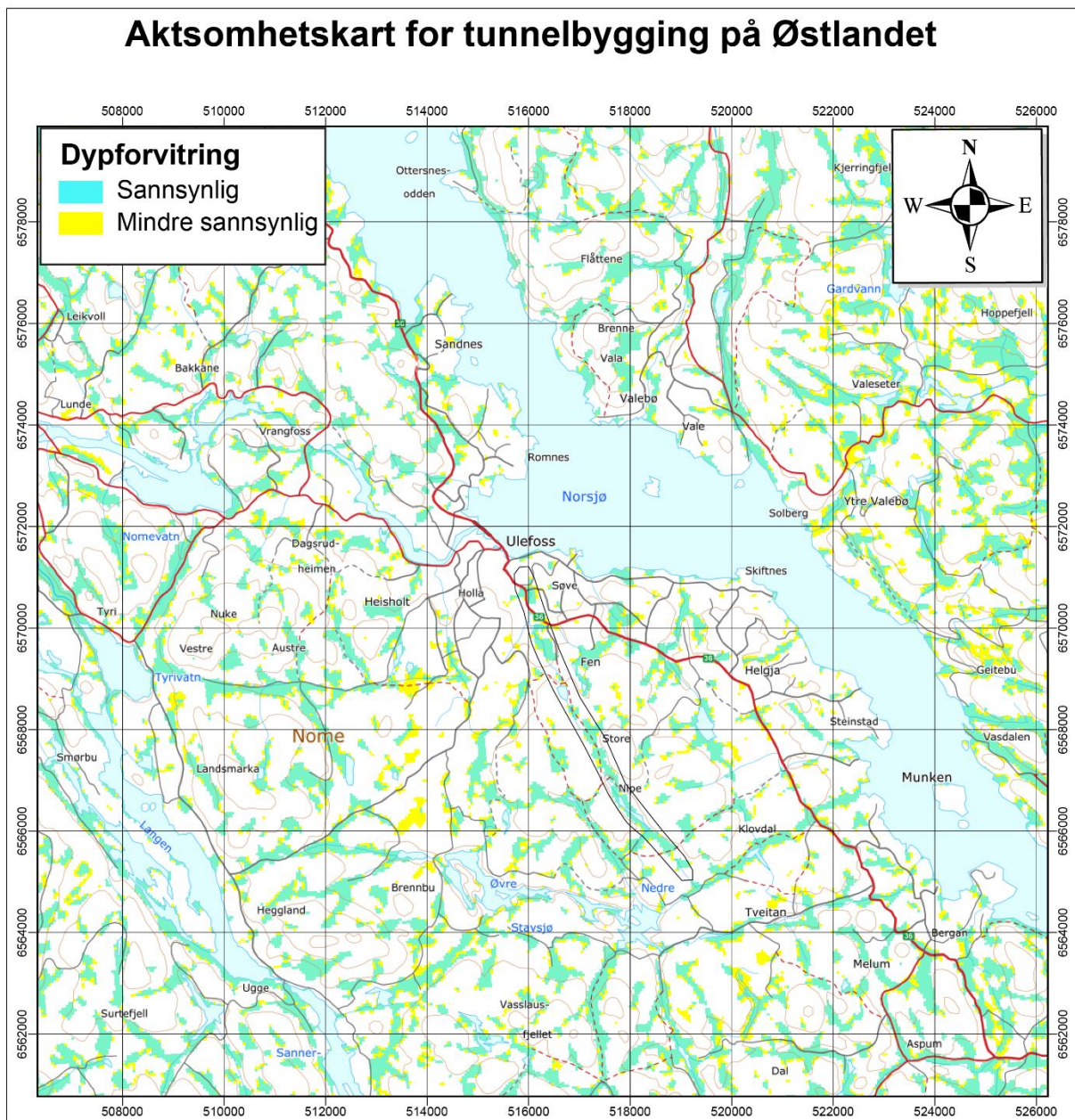
I det forenklete berggrunnsgeologiske kartet i [Figur 1](#) indikeres to forkastninger som går gjennom Fens-feltet. Ved boringene av de to lange hullene LHKB-1 og LHKB-2 ble det påtruffet knusningssoner som skapte store problemer i boreprosessen (Elvebakk & Rønning 2019). Det er derfor av interesse å se om det eventuelt er en sammenheng mellom disse forkastningene og problemene ved boring av LHKB-2. Dette vil være spesielt interessant om det eventuelt en gang i fremtiden kan være aktuelt å bygge anlegg i fjell i tilknytning til disse forkastningene.

NGU har produsert et aktsomhetskart for tunnelplanlegging (Baranwal, et al. 2017). Samspillet mellom lavt magnetfelt målt fra helikopter og topografiske forsenkninger kan indikere dypforvitrede svakhetssoner i berggrunnen (Olesen et al. 2007). Et utsnitt av disse dataene kan sees i [Figur 21](#). Her sees et lineament med nord/sør-utstrekning som passerer rett gjennom Vibetodalen og fortsetter mot nord langs dalføret hvor Riksveg 36 går før sonen forsvinner under Norsjø ved Ulefoss. Dette kan være forkastning kalt HQ i [Figur 1](#), men som ifølge geofysikken har et helt annet forløp mot nord.

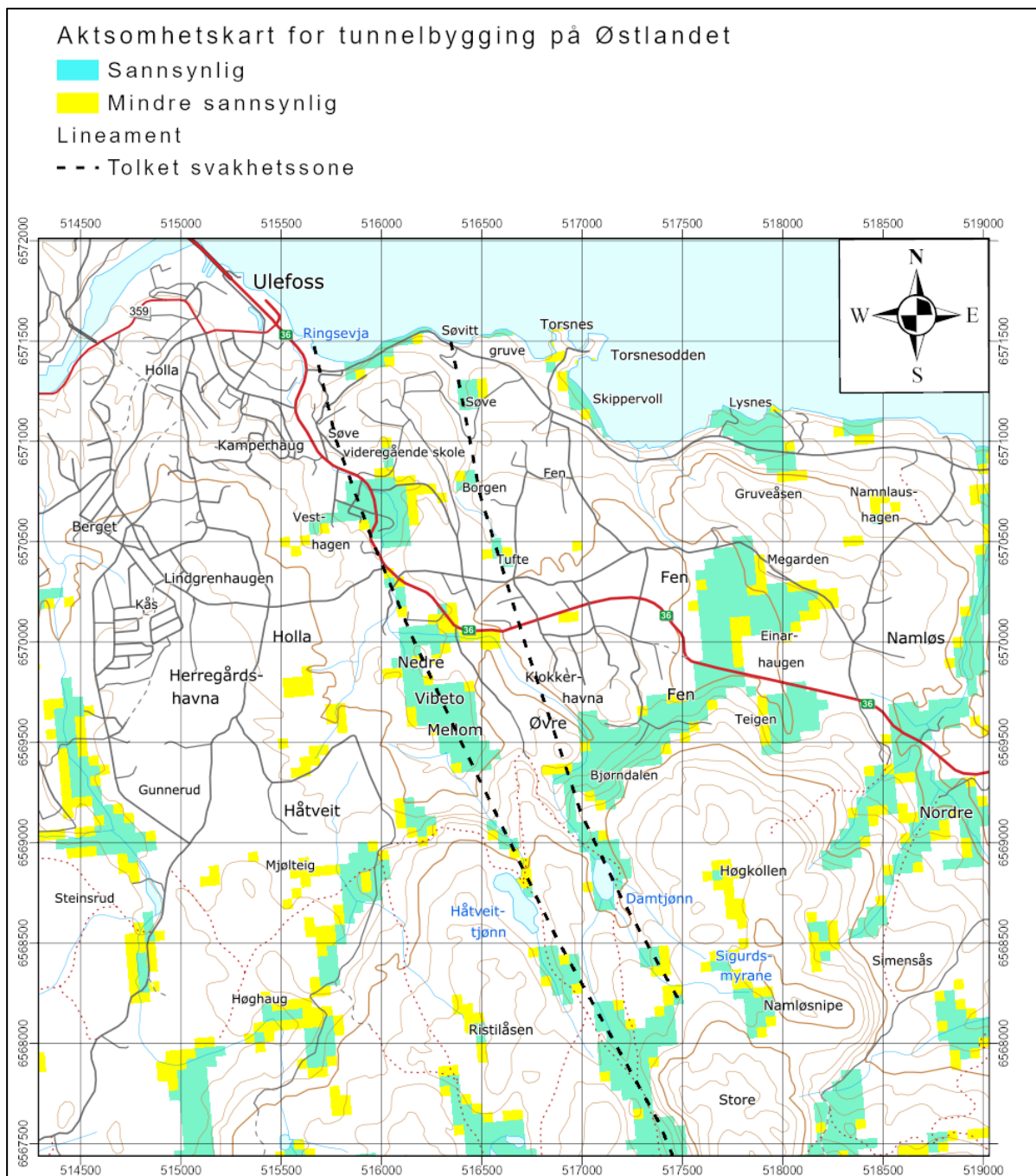
På resistivitetsprofilen i Vibetodalen (Profil 1, [Figur 7](#)) fremtrer en svakhetszone som er ca. 250 m bred sone fra posisjon 950 til 1200 med resistivitet i intervallet 300 til 800 Ωm . I henhold til publisert tolkingsmodell (Rønning et al. 2013) skulle dette tilsi en leir-omvandlet forvittringssone. Den meget spesielle geologien i Fensfeltet gjør denne tolkingen usikker. Sonen gir en markert respons på aktsomhetskartet for tunnelplanlegging og dette kan være en indikasjon på leireomvandling i grunnfjellet utenom Fensfeltet (Olesen et al. 2007). Leireomvandling er observert flere steder i bruddsoner på overflaten i og nær Fensfeltet, og spesielt mange leiresoner er observert i gruvene under jord innenfor Fensfeltet, og disse vil bli rapportert separat. (Dahlgren under arbeid).

På seismikkprofil 1 (også [Figur 16](#)) fremstår sonen mer nyansert. Den totale bredden av sonen er tilnærmet den samme, men den er splittet opp i 4-5 mindre svakhetssoner der p-bølgehastigheten varierer fra 2300 m/s via ca. 3000 m/s til 3800 m/s noe som ifølge ingeniørgeologene karakteriseres som ekstremt dårlig (< 3000 m/s) og svært dårlig bergmassekvalitet (3000 – 4000 m/s). På grunn av at resistivitetsprofilene 3 og 8 ikke kunne krysse Riksveg 36, er de ikke målt langt nok til å gi supplerende informasjon om sonen på dette stedet. Sonen ser ut til å falle mellom disse to profilene (se [Figur 23](#)).

De geofysiske tolkningene av de to stor bruddsonene gjennom Fensfeltets vestre del samsvarer fullstendig med tidligere studier av bruddsoner i området som var basert på feltsundersøkelser av fjell, kombinert med studier av flyfoto og topografiske kart (Dahlgren 1987).



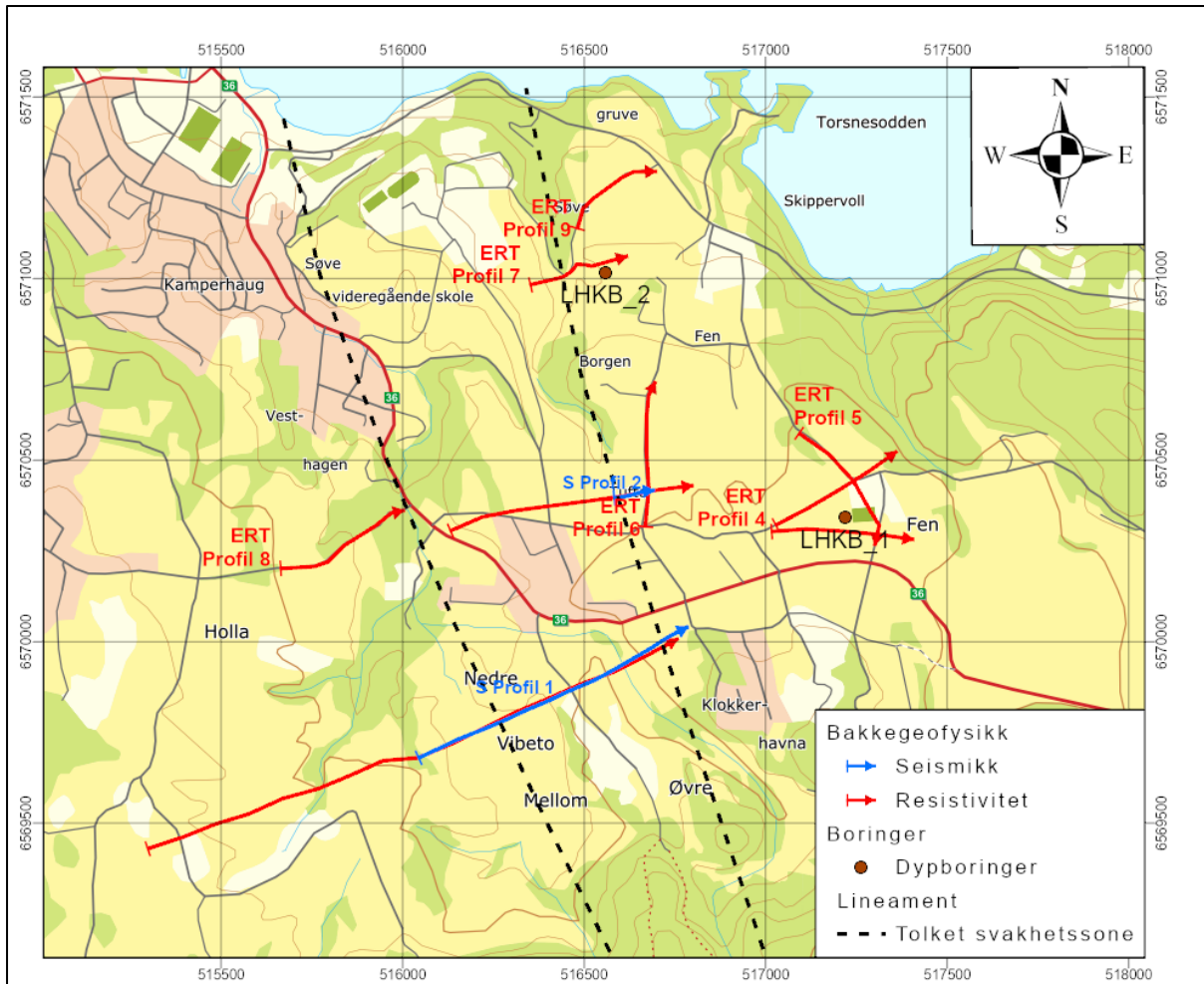
Figur 21: Utsnitt fra aksomhetskart for tunnelplanlegging (Baranwal, et al. 2017) som viser hvor det forventes å finne svakhetssoner. Koordinater i WGS 84 – UTM Sone 32.



Figur 22: Forstørret utsnitt fra aktsomhetskart for tunnelplanlegging (Baranwal et al. 2017) med indikerte svakhetssoner (forkastninger). Koordinater i WGS 84 – UTM Sone 32.

En forstørret versjon av aktsomhetskartet for tunnelplanlegging er vist i Figur 22. I tillegg til den markerte sonen gjennom Vibetodalen ned mot Ulefoss fremstår sporadisk indikasjoner på en svakhetszone som går gjennom Damtjern i sør, over Tufte og passerer like vest for LHKB-2 øst for Søve VGS. Dette kan være forkastningen kalt CQ i Figur 1. På resistivitetsprofil 1 fremstår denne som en ca. 90 m bred sone fra posisjon 1460 til posisjon 1540 med resistivitet 100 – 170 Ω m (Figur 7). Dette er meget lavt for svakhetssoner i fjell, noe som kan skyldes leiomvandling (Rønning et al. 2013). På seismikkprofilen (Figurene 16 og 17) er sonen også tolket til å være ca. 90 m bred med p-bølgehastighet ca. 2000 m/s. Dette er ekstremt lavt, og ingeniørgeologene karakteriserer dette som ekstremt dårlig bergmassekvalitet.

På seismikkprofil 2 fremstår sonen imidlertid med p-bølge-hastighet 4300 m/s. Dette er ikke spesielt lavt, men ingeniørgeologer karakteriserer dette som dårlig bergmassekvalitet. Av ukjent grunn gir denne sonen ingen anomali i fjell på resistiviteitsprofil 3 og 7 (se Figur 9 og Figur 13), men på begge disse profilene indikeres svake forsenkninger i fjelltopografien, spesielt på Profil 7.



Figur 23: Forløp av svakhetssoner (mulige forkastninger) i Fensfeltet. Tolkningen bygger på respons fra AMAGER-metoden (Baranwal et al. 2017), bakkegeofysikk (resistivitet og seismikk) og topografi. Koordinater i WGS 84 – UTM Sone 32.

Begge de to tolkede forkastningssonene viser en svak krumning som er forenlig med et steilt fall mot øst. Østligste svakhetszone (forkastning CQ?) passerer ca. 110 m vest for LHKB-2 og er trolig årsak til de store problemene ved boringen av dette hullet ved 700 m dyp. Bilder av kjernene er vist i Figur 24. Den geofysiske loggingen av LHKB-2 ble avsluttet på dyp 695 m (Elvebakk & Rønning 2019) for ikke å risikere tap av loggesonder. Det eksisterer derfor ingen geofysiske data på denne sonen fra borehullet. Ved LITO-boring Fen 2016 SØVE-E7, som var lokalisert 109 m VSV for LHKB-2, ble det også påtruffet så dårlig fjell at boringen ble stanset. Ut fra dette kan svakhetssonen ha et fall på ca. 75° - 80° mot øst.



Figur 24: Bilder av kjerner fra LHKB-2. Øverst: Dyp 700 – 705 m. Nederst: Dyp 710 – 715 m.

I LHKB-1 ble det også påvist en knusningszone som skapte problemer ved logging etter boring. Ved logging var hullet tett ved dyp 513 m (Elvebakk og Rønning 2029). Analyser med akustisk televiwer indikerer at denne skapte et hulrom over 1,5 m fra dyp 512,0 m til dyp 513,5. Det indikeres et fall på ca. 70° mot V-SV, noe som betyr en sann tykkelse på 0,5 m. Denne sonen er derfor trolig for tynn til å gi markerte signaturer på resistivitetsprofilene rundt borehullet.

6. REFERANSER

- ABEM. 2012: *ABEM Terrameter LS. Instruction Manual, release 1.11*. Sundbyberg: ABEM Instrument AB, Sweden.
- ABEM. 1994. *Terraloc MK6 System*. Sundbyberg: ABEM Instrument AB.
- Baranwal, V.C., Brønner, M., Olesen, O. & Nasuti, A. 2017: Rock construction awareness map from South Norway. NGU Rapport 2017.048, Trondheim: Norges Geologiske Undersøkelse.
- Brøgger, W. C. 1921: Die eruptivgesteine des Kristianiagebietes, IV. Das Fengebiet in Telemark, Norwegen. Det Norske Videnskaps Akademi i Oslo, Matematisknaturvitenskapelig klasse 1920 9.
- Carstens, C.W. 1981: Results from magnetic investigations of the Fen area in 1981. Bergvesenets rapport nr. 5696 (16pp.).
- Coint, N. & Dahlgren, S. 2019: Rare earth elements (REE) in two long drill-cores from the Fen Carbonatite Complex, Telemark, Norway. NGU Report 2019.008 (37pp.).
- Dahlgren, S. 1987: The satellitic intrusions in the Fen carbonatite alkaline rock province, Telemark, Upublisert Cand Sci oppgave, Univ. i Oslo.
- Dahlgren, S. 2004: Nordagutu, 1713 IV. 1:50 000 Bedrock map: Geological Survey of Norway.
- Dahlgren, S. 2006: Fenvulkanen. In: Ramberg, I. B., Bryhni, I. & Nøttvedt, A. (eds.) *Landet blir til: Norges geologi*, p.146.
- Dahlgren, S. 2012: Thorium i Fensfeltet-ressursanslag. Buskerud, Telemark og Vestfold fylkeskommuner, 24.
- Dahlgren, S. 2015: REE and thorium potential of the Fen Complex. Norway – A supplement to *Mining Journal*, 12.
- Dahlgren, S. 2019: REE mineralization in the Fen Carbonatite Complex, Telemark, Norway. A world-class exploration target for the Hi-Tech and “Green-shift” Industry? Report from the Geological Advisor 1-2019, 86pp. ISBN 978-82-994073-4-2
https://www.vtfk.no/globalassets/vtfk/dokumenter/regiongeologen/2019_11_17_fen_ree_resources_geoladvisor_sdahlgren_final_small.pdf
- Dahlin, T. 1993: On the automation of 2D resistivity surveying for engineering and environmental applications. *PhD Thesis* (Department of Engineering Geology, Lund Institute of Technology, Lund University. 187pp, ISBN 91-628-1032-4) 187.
- Dahlin, T., & Zhou, B. 2006: Multiple-gradient array measurements for multichannel 2D. *Near Surface Geophysics*, Vol 4, No 2 113-123.
- Elvebakk, H & Rønning, J.S. 2019: Geophysical logging of two deep boreholes at Fen, Nome municipality, Vestfold and Telemark county. NGU Report 2019.022 (105pp.).
- Frydenlund, P. 2017: Acquisition, Processing and Interpretation of Geophysics from the Fen Complex in Telemark, Norway. MSc. Thesis, NTNU
- Hagedoorn, J.G. 1959: The plus-minus method of interpreting seismic refraction sections. *Geophysical Prospecting* 7 (2), pp.158 – 182.
- Heincke, B., Mogaard, J.O., Rønning, J.S. & Smethurst, M.A. 2007: Kartlegging av thorium, uran og kalium fra helikopter ved Ulefoss, Nome kommune. NGU Rapport 2007.021 (16 s.).
- Loke, M H. 2017. «*Geoelectrical Imaging 2D & 3D. Instruction Manual. Res2DInv 4.07.* <http://www.geotomosoft.com/>.
- Olesen, O., Dehls, J.F., Ebbing, J., Henriksen, H., Kihle, O. & Lundin, E. 2007: Aeromagnetic mapping of deep-weathered fracture zones in the Oslo Region – a new tool for improved planning of tunnels. *Norwegian Journal of Geology*, vol. 87, pp. 253-267. Trondheim 2007. ISSN 029-196X

- Ramberg, I.B. 1973: Gravity Studies at the Fen Complex, Norway and Their Petrological Significance. *Contr. Mineral and Petrol.* 38, p 115 - 134. Springer.
- 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 characterisation of weakness zones in bedrock - definition and testing of an interpretational model. *Bull. Eng. Geol. Environment* Volume 73, Issue 4 (2014), Page 1225-1244.
- Solberg, I-L., Hansen, L., Rønning, J.S. & Dalsegg, E. 2011: Veileder for bruk av resistivitetsmålinger i potensielle kvikkleireområder. NGU Rapport 2010.048.
- Stampolidis, A., Ofstad, F. & Baranwal, V.C. 2013: Helicopterborne magnetic and radiometric geophysical survey in the Kviteseid – Notodden – Ulefoss area, Telemark county. NGU Report 2013.049 (28 pp.).
- Stampolidis, A., Rønning, J.R., Ofstad, F., Baranwal, V.C. & Heincke, B. 2014: Airborne Gamma-ray Spectrometry Compilation and Investigation of Leveling discrepancies. Abstract. 20th European meeting of environmental and engineering geophysics. September 17th 2014, Athens, Greece.

A. Vedlegg

A.1 Vedlegg 1: Informasjon om borehull.

Tabell A.1: Koordinater til borehull (WGS84 – UTM32), boreretning og fall, dyp til fjell og total borelengde. Boringene utført med NGUs LITO-rigg under ledelse av Regiongeologen, Vestfold og Telemark fylkeskommune.

Navn på borehull	X	Y	Asimut (°)	Fall (°)	Dyp til fjell (m)	Total dybde (m)
Fen 2015 RKL-1	517153.3	6569810.8	130	45	0.0	50.0
Fen 2015 RKL-2	517151.9	6569821.3	345	45	0.0	50.0
Fen 2015 RKL-3	517146.4	6569780.5	134	45	0.0	50.3
Fen 2015 VIB-1	516661.9	6569690.6	65	45	0.0	50.0
Fen 2015 GRV-1	516766.4	6571226.8	220	45	0.0	50.0
Fen 2015 GRV-2	516653.1	6571358.5	220	45	0.0	50.0
Fen 2015 HLA-1	515770.6	6570167.2	270	45	0.0	50.0
Fen 2015 TEIG-1	517195.5	6570469.5	246	45	0.0	63.7
Fen 2015 TVH-1	515398.2	6569449.0	57	45	0.0	1.5
Fen 2016 SØVE E2	516514.0	6571195.1	125	45	2.0	69.7
Fen 2016 SØVE E4	516508.5	6571041.0	88	45	3.9	5.5
Fen 2016 SØVE E6	516575.1	6571008.4	180	45	1.0	73.9
Fen 2016 SØVE E6b	516586.8	6571051.4	180	45	>13.4	13.4
Fen 2016 SØVE E7	516447.6	6570999.0	270	45	1.6	22.0
Fen 2016 TEIG-2	516995.8	6570439.7		90	6.3	74.8
Fen 2016 TEIG-3	517043.0	6570632.2	270	45	1.0	73.8
Fen 2016 SKOLE-1	517260.2	6570350.5	270	88	7.0	60.0
Fen 2016 FEN-1	517167.1	6570340.5		90	16.2	29.4
Fen 2016 TUFTE-1	516381.2	6570376.3	90	45	5.1	25.4
Fen 2016 TUFTE-2	516255.9	6570342.5	233	45	1.4	48.0
Fen 2016 TUFTE-3	516585.2	6570107.9		90	>15	15
Fen 2016 TUFTE-4	516451.4	6570312.8		90	8.2	10.9
Fen 2016 TUFTE-5	516676.7	6570331.5		90	8.4	12.2
Fen 2016 TUFTE-6	516680.9	6570501.6		90	7.9	12.8
Fen 2016 TUFTE-7	516633.5	6570230.7		90	>15	15
Fen 2016 TUFTE-8	516093.3	6570243.4	90	45	>15	15
Fen 2016 TUFTE-9	516355.8	6570334.0		90	1.0	5.0
Fen 2016 TUFTE-10	516235.2	6570355.4	23	45	0.0	71.5
Fen 2016 TBK-1a	516054.5	6570618.8	264	60	>15	15.0
Fen 2016 TBK-1b	516053.3	6570619.0	286	45	>15	15.0
Fen 2016 HLA-2	515654.2	6570402.4	230	45	4.1	15.5
Fen 2016 HLA-3	515685.1	6570371.2	250	45	2.9	12.4
Fen 2016 HLA-4	515512.7	6569420.9		90	10.8	14.3
Fen 2016 HLA-6	515693.0	6569793.6		90	15.1	21.9
Fen 2016 HLA-7	515713.8	6569905.8		90	14.8	23.3
Fen 2016 MTG-N1	515459.7	6569184.8		90	1.7	7.9
Fen 2016 MTG-N2	515398.1	6569180.4		90	3.3	10.8

Navn på borehull	X	Y	Asimut (°)	Fall (°)	Dyp til fjell (m)	Total dybde (m)
Fen 2016 MTG-N4	515482.2	6569238.2		90	3.5	10.1
Fen 2016 MTG-N5a	515347.4	6569310.7		90	>15	15
Fen 2016 MTG-N5b	515351.5	6569295.2		90	5.8	12.0
Fen 2016 BJD-1	517312.4	6569624.0		90	>15	15
Fen 2016 BJD-2	517326.4	6569584.8		90	>15	15
Fen 2017 FEN-2	517025.0	6570092.4		90	5.0	12.0
Fen 2017 FEN-3	517150.9	6570095.8		90	1.8	10.1
Fen 2017 FEN-4	517086.6	6570158.3		90	7.4	18.0
Fen 2017 FEN-5	516895.1	6570072.3		90	8.4	13.4
Fen 2017 FEN-6	517015.0	6570158.1		90	7.8	11.9
Fen 2017 FEN-8	516891.1	6570215.5		90	20.0	20.2
Fen 2017 RHG-1	516737.5	6570004.2		90	6.0	11.9
Fen 2017 TUFTE-12	516425.7	6570460.0		90	15.3	20.2
Fen 2017 TUFTE-13	516574.9	6570278.3		90	11.6	18.9
Fen 2017 TUFTE-14	516736.6	6570153.5		90	4.6	9.7
Fen 2017 SØVE E3	516492.8	6571204.8	340	45	1.1	54.4
Fen 2017 TOR-1a	516938.4	6571471.3				
Fen 2017 TOR-1b	516955.7	6571458.7		90	3.4	12.8
Fen 2017 TOR-2	516936.9	6571394.3		90	8.3	22.4
Fen 2017 TOR-3	516900.4	6571398.9		90	6.1	9.7
Fen 2017 TOR-4	516836.4	6571319.4	240	45	3.0	11.2
Fen 2017 TOR-5	516866.4	6571368.2		90	10.0	16.8
Fen 2017 HTV-N1	515879.0	6569552.4		90	10.4	14.3
Fen 2017 HTV-N2	515987.0	6569588.4				
Fen 2018 TUFTE-11c	516574.6	6570339.3		90	5.8	8.3
Fen 2018 VIBD-1	516253.9	6569764.8	12	72	15.6	22.2
Fen 2018 VIBD-2	516181.8	6569739.2		90	8.9	14.9
Fen 2018 VIBD-3	516390.9	6569653.6		90	>21	21.0
Fen 2018 VIBD-5	516299.3	6569578.5		90	>21	21.0
Fen 2018 MTG-E2	515767.6	6569311.4		90	5.7	10.7
Fen 2018 MTG-N3	515444.2	6569051.3		90	2.5	5.2
Fen 2018 MTG-N6	515343.3	6569107.4		90	3.2	5.1
Fen 2018 MTG-N7	515282.1	6569165.5		90	3.0	5.3
Fen 2018 MTG-N8	515278.6	6569264.4		90	1.7	3.8
Fen 2018 MTG-N9	515295.8	6569339.9		90	3.3	5.7
Fen 2018 MTG-N10	515279.3	6569091.7		90	1.0	3.6
Fen 2018 MTG-N11	515229.8	6569273.4		90	1.3	3.3
Fen 2018 MTG-N12	515232.9	6569361.2		90	3.0	5.5
Fen 2018 MTG-N13	515207.7	6569066.8		90	1.8	4.5
Fen 2018 MTG-N14	515163.7	6569368.0		90	1.2	3.6
Fen 2018 MTG-N16	515129.7	6569383.5		90	0.7	3.5
Fen 2018 MTG-N17	515157.6	6569307.7		90	2.0	5.5
Fen 2018 HLA-8	515403.6	6569514.0		90	6.7	9.8
Fen 2018 HLA-9	515646.8	6569488.3		90	10.3	15.2

Navn på borehull	X	Y	Asimut (°)	Fall (°)	Dyp til fjell (m)	Total dybde (m)
Fen 2018 HLA-10	515738.1	6569580.5		90	6.3	10.5
Fen 2018 HLA-11	515725.4	6569656.6		90	10.5	13.9
Fen 2018 HLA-12	515560.9	6569568.1		90	6.5	11.4
Fen 2018 HLA-13	515424.6	6569677.5		90	10.8	16.0
Fen 2018 HLA-14	515538.5	6569694.1		90	6.2	10.8
Fen 2018 HLA-15	515677.1	6569717.1		90	10.8	14.6
Fen 2018 HLA-16	515827.7	6569773.5		90	11.7	16.4
Fen 2018 HLA-17	515796.7	6569872.7		90	9.7	13.9
Fen 2018 HLA-18	515622.5	6569832.6		90	17.0	21.0
Fen 2018 HLA-19	515648.6	6569912.2		90	15.0	19.4
Fen 2018 HLA-20	515586.3	6569926.6		90	12.5	15.4
Fen 2018 HLA-23	515562.5	6569754.8		90	6.7	9.4
Fen 2018 HPRG-2	515515.3	6570661.7		90	1.0	10.6
Fen 2017 LHKB-1 Fen Skole	517182.6	6570373.3		90	13.2	1001.3
Fen 2018 LHKB-2 Søve	516554.2	6571021.8		90	4.9	716.4

A.2 Vedlegg 2: Informasjon om Seismikk-profiler

Table A.2: Koordinater til skuddpunkt for seismikkprofilene i WGS84 – UTM32.

Linje	X	Y	Skudd	Linje	X	Y	Skudd
S1	516042	6569679	S04-1	S2	516580	6570396	S01-1
	516096	6569704	S04-3		516609	6570399	S01-2
	516123	6569717	S04-4		516636	6570405	S01-3
	516150	6569730	S04-5		516664	6570414	S01-4
	516231	6569762	S05-4		516695	6570417	S01-5
	516342	6569812	S06-4		516724	6570418	S01-E1
	516178	6569736	S06-V3		516548	6570389	S01-V1
	516368	6569822	S07-1		516519	6570384	S01-V2
	516395	6569834	S07-2				
	516422	6569846	S07-3				
	516447	6569859	S07-4				
	516508	6569885	S07-E1				
	516312	6569796	S07-V2				
	516287	6569786	S07-V3				
	516260	6569772	S07-V4				
	516584	6569924	S09-1				
	516529	6569894	S09-V2				
	516684	6569982	S10-1				
	516710	6569997	S10-2				
	516735	6570015	S10-3				
	516760	6570029	S10-4				
	516788	6570042	S10-5				
	516813	6570052	S10-E1				
	516660	6569965	S10-V1				
	516636	6569954	S10-V2				
	516608	6569933	S10-V3				

A.3 Vedlegg 3: Informasjon om Resistivitets-profiler

Table A.3: Koordinater til målestasjoner og endepunkt til resistivitetslinjene i WGS84 – UTM32. Profilene er målt inn med håndholdt GPS.

Linje	X	Y	Stasjon	Linje	X	Y	Stasjon
1	515296	6569429	0	4	517026	6570320	0
	515396	6569462	100		517114	6570366	100
	515483	6569497	200		517201	6570417	200
	515578	6569526	300		517284	6570469	300
	515670	6569568	400		517363	6570525	400
	515765	6569594	500	5	517090	6570575	0
	515852	6569630	600		517174	6570516	100
	515946	6569672	700		517242	6570442	200
	516042	6569680	800		517289	6570358	300
	516134	6569718	900	517300	6570263	400	
	516222	6569761	1000	6	516668	6570314	0
	516312	6569806	1100		516678	6570420	100
	516402	6569844	1200		516672	6570519	200
	516493	6569884	1300		516672	6570621	300
	516585	6569918	1400		516697	6570718	400
	516673	6569962	1500	7	516349	6570982	0
516760	6570009	1600	516442		6571004	100	
2	517014	6570303	0		516521	6571034	200
	517113	6570310	100	516621	6571062	300	
	517213	6570304	200	8	515661	6570201	0
	517312	6570295	300		515757	6570207	100
	517410	6570281	400		515838	6570264	200
3	516129	6570304	0		515924	6570318	300
	516219	6570343	100		516006	6570362	400
	516311	6570361	200	9	516481	6571135	0
	516409	6570374	300		516526	6571221	100
	516510	6570387	400		516607	6571280	200
	516608	6570401	500		516701	6571295	300
	516704	6570418	600				
	516802	6570430	700				



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