



Seismiske målemetoder

Veiledning

STATENS VEGVESENS RAPPORTER

Nr. 733

Tittel

Seismiske målemetoder

Undertittel

Veiledning

Forfatter

Jan Steinar Rønning, NGU

Avdeling

Konstruksjoner

Seksjon

Konstruksjonsteknikk

Prosjektnummer

600550

Rapportnummer

Nr. 733

Prosjektleder

Mona Lindstrøm

Godkjent av

Alf Kveen

Emneord

Tunnel, forundersøkelser, seismikk

Sammendrag

Dette dokumentet, utarbeidet av Norges geologiske undersøkelse, gir veiledende informasjon om utførelse av seismiske målinger for kartlegging og karakterisering av svakhetssoner i berg samt kartlegging og karakterisering av løsmasser. Rapporten gir en oversikt over i hvilke geologiske miljø (på land) metoden kan benyttes, beskriver hvordan god datakvalitet sikres, hvordan målingene utføres i felt, hvordan data prosesseres og presenteres, og hvordan data tolkes og rapporteres.

Title

Seismic methods

Subtitle**Author**

Jan Steinar Rønning, NGU

Department

Structures

Section

Structural Engineering

Project number

600550

Report number

No. 733

Project manager

Mona Lindstrøm

Approved by

Alf Kveen

Key words

Tunnel, geo-investigation, seismic methods

Summary

This document, prepared by the Geological Survey of Norway, provides guidelines on how to perform seismic measurements for mapping and characterization of weakness zones in hard rocks, and the overlying Quaternary deposits, for tunnel pre-investigations in Norway. The report provides an overview of in which geological environment (on land) the methods can be used, description on how to ensure good data quality, how the measurements are performed in the field, and how data is processed, interpreted, presented and reported.



Seismiske målemetoder

Veiledning



Foto: J.S. Rønning. Avfyring av en mindre dynamittladning på grunt vann i Glåma, Åsnes kommune

FORORD

Dette dokumentet gir veiledende informasjon om utførelse av seismiske målinger for kartlegging og karakterisering av svakhetssoner i berg samt kartlegging og karakterisering av løsmasser. Metoder som MASW (Multi-channel Analysis of Surface Waves), TSP (Tunnel Seismic Prediction) og tomografi mellom borehull omhandles ikke i denne veiledningen.

Veiledningen:

- gir en oversikt over i hvilke geologiske miljø (på land) metoden kan benyttes,
- beskriver hvordan god datakvalitet sikres, hvordan målingene bør utføres i felt, hvordan data bør prosesseres og presenteres, og hvordan data bør tolkes og rapporteres.

Veiledningen bygger i stor grad på forskning og utviklingsarbeid utført ved Norges geologiske undersøkelse (NGU) i samarbeid med Statens vegvesen Vegdirektoratet og flere geofysiske firma og en programutvikler. NGU har dessverre erfart at både målinger i felt, prosessering og inversjon av data tidvis er feil utført, og ikke minst at rapporteringen har vært mangelfull (Rønning m.fl. 2020a). Veiledningen er en videreføring av tilsvarende veiledning for resistivitetsmålinger (Statens vegvesen 2018). Veiledningen er utviklet i samarbeid med Statens vegvesen Vegdirektoratet, og har vært på høring hos:

- Statens vegvesen (Terje Kirkeby, Arne Kavli, Stig Lillevik, Mona Lindstrøm, Torkild Åndal, Alf Kveen, Per Hagelia)
- Møre og Romsdal Fylkeskommune (Kåre Ingolf Karlsson)
- Universitetet i Lund, Avdeling for Ingeniørgeologi (Prof. Torleif Dahlin, Uadj. Peter Jonsson)
- NTNU (Prof. emeritus Bjørn Nilsen)
- Impakt Geofysik AB (Roger Wisén og Fredrik W. G. Olsen)
- Geomap as (Morten Urhaug)

Forundersøkelser utføres i henhold til Statens vegvesens vegnormal N500 Vegtunneler (Statens vegvesen 2020a) og håndbok V520 Tunnelveiledning (Statens vegvesen 2020b). Håndbok R211 Feltundersøkelser gir en kortfattet beskrivelse av geofysiske metoder inklusive seismikk (Statens vegvesen 2021). Foreliggende dokumentet er en veiledning for hvordan seismiske målinger bør utføres.

Veiledningen er uavhengig av måleutstyr, men det legges hovedvekt på bruken av Rayfract for tomografisk inversjon av refraksjonsseismikk. Annen programvare kan også benyttes under forutsetning av at det programmet fungerer like bra, spesielt for påvisning og karakterisering av svakhetssoner i berg.

Trondheim 30. august 2021



Senior geofysiker NGU / NTNU

INNHold

1	INNLEDNING	4
1.1	BAKGRUNN – REFRAKSJONSSEISMIKK I NORGE.....	4
1.2	TOMOGRAFISK INVERSJON AV REFRAKSJONSSEISMIKK.....	5
1.3	REFLEKSJONSSEISMIKK.....	6
1.4	TOMOGRAFI MELLOM BAKKE/SJØBUNN OG BOREHULL.....	6
1.5	ANDRE UNDERSØKELSESMETODER.....	6
2	FORARBEID OG GEOLOGISKE FORHOLD	7
2.1	FORARBEID OG PLANLEGGING.....	7
2.2	GEOLOGISKE FORHOLD OG BEGRENSNINGER MED METODENE	8
3	MÅLEUTSTYR OG TESTER	8
3.1	TEST AV MÅLEINSTRUMENT	8
3.2	TEST AV MÅLEKABLER.....	9
3.3	TEST AV GEOFONER/HYDROFONER.....	9
4	UTFØRELSE AV MÅLINGER I FELT	9
4.1	OBSERVASJONER I FELT VED UTFØRELSE AV FELTARBEID	9
4.2	GENERELLE TILTAK FOR Å OPPNÅ BEST MULIG DATAKVALITET	9
4.2.1	<i>Måleutstyr og metodikk</i>	10
4.2.2	<i>Kabelutlegg, geofonavstand og skuddavstand</i>	10
4.2.3	<i>Signal-støyforhold, skudd- og geofonkontakt</i>	10
4.2.4	<i>Posisjonering</i>	11
4.3	SPESIELLE TILTAK FOR Å OPPNÅ BEST MULIG KVALITET VED DE FORSKJELLIGE METODENE	11
4.3.1	<i>Tradisjonell refraksjonsseismikk</i>	11
4.3.2	<i>Refraksjonsseismikk som tolkes med tomografi</i>	12
4.3.3	<i>Refleksjonsseismikk</i>	13
4.3.4	<i>Tomografi mellom bakke/sjøbunn og borehull</i>	14
5	PROSESSERING OG PRESENTASJON AV MÅLEDATA	14
5.1	TRADISJONELLE TOLKINGER AV REFRAKSJONSSEISMIKK	14
5.2	TOMOGRAFISK INVERSJON AV REFRAKSJONSSEISMIKK.....	15
5.3	REFLEKSJONSSEISMIKK.....	17
5.4	TOMOGRAFI MELLOM SJØBUNN/BAKKE OG BOREHULL.....	18
5.5	GENERELLE FORHOLD VED PROSESSERINGEN OG PRESENTASJONEN AV DATA.....	19
6	GEOLOGISK TOLKNING AV MÅLERESULTATER	19
7	RAPPORTERING (PROSJEKTRAPPORT)	21
7.1	OPPLYSNINGER I PROSJEKTRAPPORT	21
7.2	TILTAK FOR Å FORENKLE OG SIKRE GOD RAPPORTERING.....	22
8	ETTERARBEID	23
9	REFERANSER	24
	VEDLEGG 1 – 4:	26 - 29

1 INNLEDNING

Hensikten med denne veiledningen for seismiske målinger ved kartlegging og karakterisering av svakhetssoner og løsmasser er å gi en beskrivelse av:

- Hvor metodene fungerer
- Hvordan målingene bør utføres
- Hvordan måledata bør prosesseres og visualiseres
- Hvordan data bør tolkes
- Hvordan arbeidet bør rapporteres.

Målgruppen er ingeniørgeologer som bestiller seismiske målinger, gjerne i kombinasjon med 2D resistivitetsmålinger. Tanken er at dokumentet legges ved en utlysning av seismiske målinger slik at undersøkelsene optimaliseres og standardiseres, og at kvaliteten av undersøkelsene derved kan sikres. NGU har dessverre erfart at både målinger i felt, prosessering og inversjon av data tidvis er feil utført, og ikke minst at rapporteringen har vært mangelfull (Rønning m.fl. 2020a).

NGU har mest erfaring med tomografisk inversjon av refraksjonsseismikk med programmet Rayfract. Denne beskrivelsen er tilpasset denne programvaren, men generelle prinsipper vil gjelde også for andre inversjonsprogrammer.

Veiledningen omhandler ikke TSP (Tunnel Seismic Prediction) da dette er en ny metode med liten erfaring i Norge. Seismisk tomografi mellom borehull er heller ikke tatt med da det ikke er utført denne type seismikk i Norge siden 1980-tallet. Metoden MASW (Multi-channel Analysis of Surface Waves) er utelatt da dette er en metode som utelukkende benyttes for beskrivelse av skjærfasthet i leire.

1.1 Bakgrunn – refraksjonsseismikk i Norge

Refraksjonsseismikk bygger tradisjonelt på teorier om bryting av seismiske bølger i lagdelte modeller med forskjellige p-bølgehastigheter. Forutsetninger for tradisjonelle tolkinger er at (Reynolds 2011):

1. Lagene er homogene med veldefinerte hastigheter
2. Hastigheten i lagene øker mot dypet
3. Hastighetskontrastene er markerte
4. Lagenes tykkelse øker mot dypet
5. Bølgeforplantningen er i vertikalplanet
6. Laggrensens fall er mindre enn 10° i forhold til terreng.

Dette er forutsetninger som kan være lett å glemme, og som gir usikkerheter i tolkingene, spesielt ved tolking av dyp til berg.

Refraksjonsseismikk har vært benyttet i Norge siden tidlig på 1950-tallet, og det finnes mye erfaring på tolking av bergmassekvalitet og løsmassetyper. Metoden benyttes både på land og i sjøen der det benyttes henholdsvis geofoner og hydrofoner som registreringsenhet. Det finnes flere feilkilder knyttet til forutsetningene som gjør tolkingen av data usikker og i verste fall umulig. Disse er (Reynolds 2011):

1. Hastighetsinversjon, underliggende lag har lavere hastighet enn overliggende lag
2. Blindsonelag, økende hastighet mot dypet, men laget er for tynt til å kunne avdekkes
3. Manglende hastighetskontrast, to geologiske lag kan ha samme hastighet
4. For stor geofonavstand, tynne lag og svakhetssoner kan overses
5. Siderefraksjon, bølgene går ikke i vertikalplanet, men brytes fra f.eks. bergkollene til side for profilet (3D-effekt).

Fordypninger i bergoverflaten kan tolkes som svakhetssone dersom det er for liten avstand til fjernskudd, og kabelheng (i sjø) kan feiltolkes som svakhetssone (Westerdahl 2003).

I tillegg kan en gradvis hastighetsøkning føre til tolkningsproblemer ved at det ikke indikeres klare hastighetsgrenser i gangtidene, bølgene brytes gradvis og en får det som blir kalt «diving waves». Noen av de angitte svakhetene ved refraksjonsseismikken kan løses med tomografisk inversjon, men det sikreste er å benytte resultater fra borer for kalibrering av seismiske tolkninger.

1.2 Tomografisk inversjon av refraksjonsseismikk

Tomografisk inversjon av refraksjonsseismikk ble introdusert på det norske markedet like før 2010, men teknologien har vært tilgjengelig i alle fall siden 1996 (Intelligent Resources 2021). Inversjonsprosessen går ut på å dele opp undergrunnen i celler som tildeles en starthastighet (startmodell). Responsen fra denne startmodellen sammenlignes med de målte data og for å bedre tilpasningen endres hastighetene i cellene (første iterasjon). Etter en ny sammenligning justeres hastighetene i modellen på nytt, og responsen sammenlignes med de målte data (andre iterasjon). Prosedyren gjentas inntil det ikke oppnås noen forbedring i tilpasningen eller ved at et antall angitte iterasjoner er gjennomført. Avviket mellom målte data og responsen fra den endelige modellen angis som en «RMS-error» i prosent eller millisekund. Ved noen program (f.eks. Rayfract) kan inversjonsparametere justeres underveis og inversjonen kan med dette gjennomføres i flere runder («multi-run»).

I starten for tomografisk inversjon av refraksjonsseismikk i Norge ble det presentert noen tvilsomme tolkninger. Dette gjorde at NGU begynte å se på muligheter og begrensninger med metoden innenfor et samarbeidsprosjekt med Statens vegvesen Vegdirektoratet. Mye av dette arbeidet var modellering av syntetiske data. Ut fra definerte geologiske modeller er det beregnet syntetiske data. Disse er så invertert med forskjellige prosedyrer og ut fra dette har NGU anbefalt en antatt beste prosedyre for påvising og karakterisering av svakhetssoner i berg (Tassis m.fl. 2017a).

NGU har også undersøkt kvaliteten av tolkninger av dyp til berg og mulighetene for å karakterisere løsmassetyper. Arbeidet er oppsummert i en rekke NGU-rapporter, artikler ved bergmekanikkdager og ved presentasjoner i internasjonale fora (Tassis m.fl. 2017a, 2017b, 2017c og 2018, Rønning m.fl. 2016, 2017, 2019a, 2019b, 2020a, 2020b og 2021). Ved senere anbefalinger blir det ikke alltid spesifikt referert til disse, men lar det være opp til leserne å søke detaljinformasjon. Arbeidet bærer preg av at programvaren NGU har benyttet (Rayfract) har vært under stadig oppgradering, og bedre rutiner har blitt tilgjengelig underveis (Intelligent Resources 2021).

1.3 Refleksjonsseismikk

Refleksjonsseismikk for tolking av dyp til berg har lenge vært standard metode ved undersøkelser i sjø. Dette er en relativt rask metode for å få et bilde av bergoverflaten (og sjøbunnen). NGU har erfart at ved enkelte undersøkelser er det benyttet for svak energikilde, og at hydrofonkabelen som ble benyttet var for kort til å kunne gjøre nødvendige hastighetsanalyser. På den andre siden, er det også erfart at tradisjonelle refraksjonsseismiske undersøkelser kan vise gode refleksjoner som har vist seg å være den sikreste geofysiske metode for korrekt bestemmelse av dyp til berg (Rønning m.fl. 2020a).

Metoden har også vært benyttet på land, men her stilles det store krav til materialene det skytes i, og spesielt tykkelsen av den umettede sonen. Enkle undersøkelser med 12 aktive geofoner og en haglpatron som energikilde, viste utmerkede data i vannmettet finkornig sand på Tanadelta og Altadelta i Finnmark (Mauring & Rønning 1993 og 1995), men tilsvarende undersøkelser i grovt morenemateriale på Jæren var slett ingen suksess (Mauring & Rønning 1990). Refleksjonsseismikk er lite egnet til lokalisering og karakterisering av svakhetssoner og dette bidrar også til at metoden er lite benyttet på land.

1.4 Tomografi mellom bakke/sjøbunn og borehull

Tomografi mellom bakke/sjøbunn og et underliggende borehull er ikke så mye benyttet. I prosjektet «E39 Kryssing av Romsdalsfjorden» ble denne type måling utført mellom sjøbunnen og tre lengre borehull. Erfaringen fra disse relativt omfattende målingene er blandet. Ved de to første undersøkelsene ble det skutt i borehullene, noe som førte til at disse kollapset og datadekningen ble kritisk lav. I det tredje borehullet ble det skutt på sjøbunnen og registrert med hydrofonkabel i borehullet. Dette ga god datadekning, men inversjonen av data bidro ikke til sikker tolking av dyp til berg og bergmassekvalitet (Rønning m.fl. 2020a).

En annen undersøkelse ved Nordøyvegen i Møre og Romsdal er det også utført tomografi mellom borehull (skudd) og sjøbunnen (hydrofonkabel). Også her ble det påvist avvik mellom tomografien og tradisjonell refraksjonsseismikk med de samme hydrofonutleggene som ved tomografien (Rønning m.fl. 2020a). Det oppsto diskusjoner om borehullenes forløp, og sikker avviksmåling av borehullene er absolutt nødvendig. Det er mulig at en utvikling av inversjonsrutinene kan forbedre resultatene.

1.5 Andre undersøkelsesmetoder

NGU har tidligere arbeidet med påvisning og karakterisering av svakhetssoner i berg med resistivitet (se bl.a. Rønning m.fl. 2013, Rønning m.fl. 2021). I krystalline bergarter er dette en meget anvendelig metode, og er et klart supplement til refraksjonsseismikk. Ved sammenligninger utført ved Knappetunnelen i Bergen, var 2D Resistivitet den metoden som fanget opp de fleste svakhetssonene som ble påvist ved tunneldrivingen (Rønning m.fl. 2019a og 2019b). Refraksjonsseismikk og resistivitetmålinger gir respons på forskjellig måte og utfyller derved hverandre. Resistivitetmålinger er mindre ressurskrevende enn refraksjonsseismikk, og bør derfor utføres først. Tolkede resistivitetsprofiler er et meget godt grunnlag for utlegging av seismikkprofiler. Metoden har utfordringer i sedimentære bergarter der resistiviteten generelt er lavere enn i krystalline bergarter og i tett bebygde områder der

tekniske anlegg kan forstyrre strømbanene (Rønning 2021). I områder der det kan være vanskelig å utføre refraksjonsseismikk (gassholdige løsmasser, mye støy fra industri, utfordrende terreng, infrastruktur som ikke tåler sprengninger o.a.), er resistivitetsmetoden et meget godt alternativ.

Borehullslogging med optisk eller akustisk televiewer i brønner kan være et godt alternativ til mer ressurskrevende kjerneboring. I noen tilfeller kreves kjerner for testing av bergmassekvalitet og mineralogi, og da må det foretas kjerneboring. Logging av seismiske hastigheter og resistivitet gir også god og detaljert informasjon om bergmassekvaliteten.

Sikreste metode for å få kunnskap om bergmassekvalitet er selvsagt kjerneboring. Ingeniørgeologisk logging av kjerner gir et godt bilde av de tre leddene i Q-metoden oppsprekingsgrad, bergmassens skjærfasthet og opptredende spenning (NGI 2015).

2 FORARBEID OG GEOLOGISKE FORHOLD

Før seismiske målinger for kartlegging av svakhetssoner og karakterisering av svakhetssoner i berg iverksettes, er det viktig at arbeidet planlegges godt, og at det gjøres vurderinger av muligheten for å oppnå vellykkede resultater.

2.1 Forarbeid og planlegging

Flere forhold avklares før avtale om seismiske undersøkelser inngås:

- Gjelder undersøkelsene kun lokalisering og karakterisering av svakhetssoner i berg, eller skal undersøkelsene inkludere andre forhold som løsmassetykkelse og karakterisering av løsmassene? Ut fra dette kan inversjonsmetode optimaliseres.
- Hvilke geologiske materialer er det i området? Dette kan være avgjørende og refraksjonsseismikk kan velges for å bestemme dyp til berg.
- Topografi: Varierende terreng kan forstyrre forplantningen av lydbølgene. Dette kan vanskeliggjøre gjennomføringen i felt, men fremfor alt gi utfordringer i form av statistiske korreksjoner ved tolkingene.
- Infrastruktur og bygninger som kan vanskeliggjøre målingene i felt og gi kunstige effekter i måledata.
- Tilstedeværelse av støykilder. De fysiske forholdene på et målested kan innvirke på muligheten for å oppnå høykvalitets måledata. Forhold som påvirker datakvaliteten kan være støy fra vegtrafikk, jernbane, pukkverk, tungindustri m.m.
- Forventede svakhetssoner og sannsynlig orientering på disse ut fra en regionalgeologisk forståelse, tolking med AMAGER-metoden (Olesen m.fl. 2007), resistivitetsmålinger eller geologisk feltkartlegging.
- Metoden 2D Resistivitet (ERT) er en raskere metode som i mange sammenhenger gir bedre informasjon om løsmassetyper (saltleire, utvasket leire, sand/grus, morene og vannmetning, (Solberg m.fl. 2010)) men også geometrisk og mineralogisk karakterisering av svakhetssoner (Rønning m.fl. 2013). Dette er en raskere metode og bør utføres forut for mer tidkrevende seismikk.

Som hovedregel legges seismikklinjer langs en tunneltrasé. Dette vil fange opp svakhetssoner som krysser tunnelen mer eller mindre vinkelrett. To eller flere parallelle linjer

kan gi informasjon om sprekkesoners retning. Dersom det er mistanke om svakhetssoner som går tilnærmet langs tunnelen, måles kryssende profil(er). Ved kryssende profiler må en være klar over at seismikken ikke kan gi klar informasjon om soner som går parallelt de geofysiske profilene. Det er mulig at en i fremtiden også kan utføre 3D refraksjonsseismikk, som vil løse utfordringer med 3D geologi, til en fornuftig pris.

I noen tilfeller kan bebyggelse og infrastruktur være til hinder, og det er nødvendig å gå på akkord med det ideelle, og profiler legges da ut der det er praktisk mulig. Det er viktig at avstand til infrastruktur som kan påvirke de seismiske data registreres under feltarbeidet. Mulig påvirkning diskuteres med geofysisk firma.

2.2 Geologiske forhold og begrensninger med metodene

Refraksjonsseismikk fungerer godt ved de aller fleste geologiske forhold. Gass i unge sedimenter har imidlertid i noen tilfeller dempet bølgene kritisk. Akustisk støy fra eksterne kilder kan være en utfordring, og infrastruktur i bakken kan være et hinder for gjennomføringen av seismikk. Utfordringen kan til en viss grad overkommes med å velge andre og/eller sterkere energikilder eventuelt ved å summere data fra flere skudd (stacke) dersom det er mulig.

Siden det ofte er aktuelt med sprengladninger som utløses nede i bakken, kartlegges infrastruktur som strømkabler, datalinjer, vannforsyning og avløpsledninger på forhånd.

Refleksjonsseismikk på land er utfordrende i tørre og grove steinrike masser. I utgangspunktet bør en ha vannmettede finkornige masser. Refleksjonsseismikk i sjø fungerer vanligvis meget bra.

3 MÅLEUTSTYR OG TESTER

Det finnes i dag flere leverandører av velfungerende utstyr for seismiske målinger. Mange aktører i Skandinavia benytter utstyr fra Guide-line (ABEM, Terraloc MK6 eller Terraloc Pro2). For refraksjonsseismikk er det ikke kritisk hvilken utrustning som benyttes, men for refleksjonsseismikk er det viktig at instrumentet mestrer sterke signaler med god nok oppløsning (høyt dynamikkområde). For å sikre god datakvalitet er det viktig at utstyret testes før feltarbeid, mens testing etter feltarbeid sikrer at innsamlede data har god kvalitet.

3.1 Test av måleinstrument

Test av måleinstrumentets funksjoner utføres regelmessig for å kvalitetssikre måledata. Testing og kalibrering av måleutstyr følger dokumenterte rutiner i instrumentets brukermanual. Instrumenter med funksjonsfeil skal ikke benyttes.

Funksjonstest utføres før og etter et måleoppdrag, og resultatene dokumenteres i prosjektrapport.

3.2 Test av målekabler

Kablene kan tøyes ved gjentatt bruk. For å sikre korrekt avstand mellom mottagere, måles lengden av kablene årlig. En økning bør være på maks. 1 % i forhold til original kabellengde. Dersom feilen er større, må hver enkelt geofon/hydrofon i et utlegg måles inn.

I multilederkabler kan det lett oppstå brudd i kontakter og enkeltledere som gjør det vanskelig eller umulig å få frem signaler. At enkelte kanaler faller ut kan aksepteres, men ikke over 4 % av kanalene (en kanal pr. 24 kanaler). Alternative løsninger for å oppnå ønsket datadekning kan aksepteres.

Kabelfeil omtales i prosjektrapport.

3.3 Test av geofoner/hydrofoner

De fleste måleinstrumenter har innebygd en testfunksjon for geofonene/hydrofonene. For å sikre god datakvalitet, gjennomføres en slik test før undersøkelser utføres og gjerne etter. Denne testen kan også avdekke brudd i enkeltkabler.

Geofon/hydrofon-svakheter omtales i prosjektrapport.

4 UTFØRELSE AV MÅLINGER I FELT

Måten seismiske målinger utføres på, påvirker datakvaliteten. Noen forhold er gjennomgående og gjelder for alle metoder. Andre forhold er mer spesifikke for de forskjellige typer seismikk og krever særskilt beskrivelse. Lokale (geologiske) forhold ved de enkelte profiler kan både forringe datakvalitet og påvirke tolkingen.

4.1 Observasjoner i felt ved utførelse av feltarbeid

Forhold som kan påvirke datakvalitet og ha en betydning for tolkingen av måledata, kartlegges under feltarbeid og kommenteres i prosjektrapport. Disse kan også være kartlagt på forhånd, og kan være (se også 2.1):

- Blottet massivt/oppsprukket/forvitret berg
- Alle typer løsmasser og spesielt de med lav hastighet (tørre masser, myr)
- Uregelmessigheter i terrenget
- Støykilder som veg, jernbane, tungindustri og annet som kan ha betydning for datakvaliteten registreres
- Infrastruktur som kan påvirke datakvaliteten

Denne type data dokumenteres i prosjektrapport.

4.2 Generelle tiltak for å oppnå best mulig datakvalitet

For å sikre en god datakvalitet er det viktig med gode valg ved datainnsamlingen.

4.2.1 Måleutstyr og metodikk

Forskjellig måleutstyr kan benyttes. Moderne seismografer har i dag de spesifikasjonene som er viktige for god datakvalitet. Eldre seismografer kan ha for lite dynamikkområde for høyoppløselig refleksjonsseismikk.

4.2.2 Kabelutlegg, geofonavstand og skuddavstand

Uansett seismisk metode er det en stor fordel med mange mottagere (geofoner/hydrofoner) og kort avstand mellom disse. Dette er imidlertid en avveining mellom kvalitet og kostnad. Generelt anbefales minst 48 mottagere både ved refraksjonsseismikk og refleksjonsseismikk. Færre mottagere (24) kan aksepteres ved veldefinerte problemstillinger på land. Ved undersjøiske undersøkelser kan det være økonomisk fordelaktig med enda flere hydrofoner (f.eks. 72 eller 96). Geofysisk firma er ansvarlig for at riktig type geofoner/hydrofoner benyttes slik at best mulig datakvalitet oppnås.

For å kunne bestemme hastigheten i materialet dagnært, er det viktig med kort avstand mellom registreringsenhetene. Dette kan oppnås ved å redusere avstanden mellom registreringsenhetene ved skuddpunktene, eventuelt benytte ekstra registreringsenheter. Dette er spesielt viktig ved tørre masser med lav hastighet.

For kartlegging og karakterisering av svakhetssoner i berg, bør ikke mottageravstanden være mer enn 5 m. Ideelt sett burde den være mindre for å oppnå den oppløsning som er ønskelig, men dette er en avveining mot kostnad. I noen tilfeller kan en geofonavstand på 2 m eller mindre være nødvendig ved detaljerte grunne undersøkelser på land. Ved løsmassetykkelser opp mot 100 m, kan en mottageravstand på 10 m være tilstrekkelig. Ved lengre profiler med flere mottagerutlegg, bør det være overlapp på minst en mottager på utleggene slik at kontinuerlig datadekning sikres for videre prosessering. Ved tomografisk inversjon av måledata er overlapp svært viktig for kvaliteten på inversjoner.

Det tilstrebes å ha så mange skudd som praktisk mulig langs og utenom mottager-rekken (fjernskudd).

Type og antall geofoner/hydrofoner og deres avstand skal fremgå klart i prosjektrapport. Det samme gjelder antall skudd og deres plassering.

4.2.3 Signal-støyforhold, skudd- og geofonkontakt

Ved eventuelle problemer med å få ønsket signalstyrke, gjøres tiltak for å øke signal-støyforholdet, spesielt ved undersøkelser på land. Tiltakene kan være:

- Rense kontakter for skitt (ikke ledende materiale)
- Fjerne lyng og løsmasser som forhindrer god kobling til geofoner
- Trykke geofonene dypt ned i løsmassene, bore hull i berg
- Etablere gode skuddplasseringer, dype hull i både løsmasser og i berg
- Benytt tilstrekkelig energimengde
- Unngå målinger ved kraftig vind og regn.

Ansvar for gode signal/støy-forhold ligger hos utførende geofysiske firma.

4.2.4 Posisjonering

For å oppnå god datakvalitet er det viktig at avstanden mellom registreringsenhetene er kjent, og at hele utlegget er mest mulig rettlinjert. Konstant avstand oppnås ved å strekke kablene helt ut, slik at mottageravstand blir lik avstanden mellom uttakene på kablene. Dersom konstant avstand ikke kan oppnås, skal hver enkelt mottager måles inn.

Ved kabelutlegg i sjø må alltid hydrofonene måles inn med flere (6 – 8) skudd i kjent posisjon. Dette for å vite eksakt hvor kabelen ligger, om det er ulik avstand mellom hydrofonene og om kabelen kan henge opp fra sjøbunnen. Sistnevnte kan bidra til å tolke falske svakhetssoner (Westerdahl 2003). Alternative måter for å finne hydrofonenes posisjon kan aksepteres dersom god nøyaktighet kan dokumenteres.

Enkelte ganger er det nødvendig å gjøre en knekk på profilet på grunn av hindringer, noe som fører til endret mottageravstand og bølgeretning. Dette vil gi feil i beregnet hastighet og derav feil i inverterte seksjoner. Et enkelt profilknekk kan ikke overstige 20°. Summen av flere knekkpunkter kan heller ikke overstige 20°. Dersom det er nødvendig med store knekk og mange knekkpunkter, bør et profil avsluttes og et nytt profil legges ut i ny retning.

For å vite eksakt hvor et målt profil ligger i terrenget, må viktige punkter på et profil måles inn. Et minstekrav er at start, slutt og eventuelle knekkpunkt på profilene måles inn. Punkter for hver 100 meter, eventuelt 200 meter, bør også måles inn. Dersom terrengformene er sterkt varierende og det er mistanke om lengdefeil på kablene, må hver enkelt mottager (geofon/hydrofon) måles inn. Nøyaktighet i koordinater og høyde må være ned mot 0,1 m.

For nøyaktig høyde på registreringsenhetene kan eksisterende tilstrekkelig nøyaktig digital terrengmodell benyttes (LIDAR-data). Denne sjekkes mot observasjoner i felt for å avdekke eventuelle terrengendringer etter at LIDAR-data ble samlet inn.

4.3 Spesielle tiltak for å oppnå best mulig kvalitet ved de forskjellige metodene

For å kunne oppnå best mulig datakvalitet er det viktig at datainnsamlingen tilpasses metode og tolkingsmetodikk.

4.3.1 Tradisjonell refraksjonsseismikk

I utgangspunktet anbefales så liten mottageravstand som praktisk og økonomisk mulig. Erfaring tilsier at en mottageravstand på 5 m kan være en god avveining mellom kostnader og datakvalitet. Ved mer detaljerte undersøkelser ved lite løsmasser der f.eks. grunne tynne sprekkesoner kan være kritisk, anbefales mottageravstand på 1 eller 2 m. For kartlegging av svakhetssoner under tykke løsmasser (> 50 m) kan en mottageravstand på 10 m aksepteres. For å kunne bestemme hastighet i øvre tynne, kanskje tørre løsmasser, anbefales kortere geofonavstand ved skuddpunktene. For profilering med flere separate utlegg bør det være overlapp på minst en mottager.

I et utlegg med 24 mottagere bør det skytes minimum 5 skudd ved mottagerrekken og minst ett fjernskudd på hver side. For å sikre refraksjoner fra berg på alle mottagere må avstand til

ytterste fjernskudd være minst 3 ganger dypet til berg. Flere fjernskudd utenfor dette kan bidra til å avdekke svakhetssoners fall.

Mottager- og skuddpunktavstand dokumenteres i prosjektrapport. Det er opp til det geofysiske firmaet å sørge for stor nok avstand til fjernskudd slik at dyp til berg blir kartlagt langs hele den aktuelle målelinjen.

4.3.2 Refraksjonsseismikk som tolkes med tomografi

Plassering av mottagere ved tomografisk inversjon av refraksjonsseismikk er som for tradisjonell refraksjonsseismikk (4.3.1), men også her anbefales mindre mottageravstand. Dersom det ikke skytes fjernskudd, må det være overlapp på inntil 6 mottagere (Intelligent Resources 2021). Det bør alltid være overlapp på en mottager for å kunne prosessere flere utlegg samlet.

Tomografisk inversjon av refraksjonsseismikk krever tettere avstand mellom skuddpunkt. Ideelt bør det være ett skudd for hver tredje eller fjerde mottager. Ett skudd pr. sjette mottager kan unntaksvis aksepteres.

Bare ved enkelte programsystemer kan fjernskudd benyttes ved tomografisk inversjon. Det bør likevel skytes fjernskudd som anbefalt for tradisjonell refraksjonsseismikk, dette for å kunne benytte data ved tradisjonelle tolkinger med Hagedoorns metode og tolkinger med denne metoden som startmodell ved tomografisk inversjon.

I prinsippet kan refraksjonsseismiske målinger grupperes i tre forskjellige vanskelighetsgrader (tabell 1). For enkle undersøkelser, tynne homogene løsmasselag og et enkelt forløp av bergoverflaten, er det tilstrekkelig med en moderat skuddpunktavstand og enkle tradisjonelle lagdelte tolkinger. For mer utfordrende betingelser, heterogene løsmasser men med et antatt enkelt forløp av bergoverflaten, anbefales tettere skuddavstand og tomografisk inversjon i tillegg til en tradisjonell lagbasert tolking. Ved høyeste vanskelighetsgrad, heterogene løsmasser og utfordrende berggrunnstopografi, anbefales tett skuddavstand innenfor utlegget (hver 3. eller hver 4. geofon), og flere fjernskudd utenfor utlegget. Data tolkes tradisjonelt med lagdelt modell og som tomografisk inversjon. På grunn av økt usikkerhet i tolkingene anbefales at det foretas en samtolling med andre eksisterende data, i praksis boringer.

Tabell 1: Gruppering av refraksjonsseismiske undersøkelser etter vanskelighetsgrad med forslag til utførelse og tolkingsprosedyre.

Vanskelighetsgrad	Beskrivelse	Skuddavstand	Tolkingsmetode
1	Tynne homogene løsmasser Enkelt bergforløp	Moderat, skudd hver 6. geofon, ett fjernskudd	Trad. lagdelt tolking
2	Tykke heterogene løsmasser Enkelt bergforløp	Tett, skudd hver 3. – 4. geofon, flere fjernskudd	Trad. lagdelt tolking og tomografisk inversjon
3	Tykke heterogene løsmasser Komplisert bergforløp	Tett, skudd hver 3. – 4. geofon, flere fjernskudd	Trad. lagdelt tolking, tomografisk inversjon og samtolling med annen info

4.3.3 Refleksjonsseismikk

Refleksjonsseismikk på land stiller store krav til massene det skal skytes i. Ønsket oppløsning avhenger av et høyt frekvensinnhold i signalet, og ved tørre avsetninger dempes energien og spesielt de høye frekvensene. Bruk av refleksjonsseismikk på land diskuteres med eksperter som kjenner metodens muligheter og begrensninger.

Refleksjonsseismikk i sjø, ofte feilaktig kalt akustikk, gir vanligvis god informasjon om sjødyp og løsmassefordeling. På grunn av noe lavere nøyaktighet ved refleksjonsseismikk, bør kartlegging av sjødyp (batymetri) utføres med høyoppløselig multistråle ekkolodd.

Refleksjonsseismikk i sjø kan være enkel enkanals (en hydrofongruppe) eller flerkanals med en lengre hydrofonkabel. Førstnevnte betraktes som en orienterende måling for et enkelt bilde av løsmassenes tykkelse, og ved denne varianten kan ikke hastighetsanalyser utføres. Derfor forventes relativt stor usikkerhet i dybdeangivelser dersom ikke hastigheter i løsmassene skaffes fra andre kilder. Dersom det stilles større krav til nøyaktighet og detaljer i opptakene, må et flerkanalssystem benyttes. Kostnader knyttet til disse to variantene er vanligvis svært forskjellige.

Det er viktig å benytte sterk nok energikilde for å oppnå gode reflekser fra bergoverflaten, men dette veies opp mot frekvensinnhold og behovet for detaljert vertikal oppløsning i løsmasselagene. Bare unntaksvis, der det er viktig med god oppløsning i øvre deler av sjøbunnen, er det aktuelt å benytte en høyfrekvent PINGER som energikilde da denne kan få problemer med å trenge gjennom tykke løsmasselag på grunn av høyt frekvensnivå og lav energi. Ofte vil en BOOMER være riktig å bruke da denne har et relativt høyt frekvensinnhold (god vertikal oppløsning) og relativt høyt energinivå. Ved større løsmassetykkelser (> 50 m) på sjøbunnen kan det være nødvendig å benytte en SPARKER som har et høyere energinivå, men lavere frekvensinnhold (dårligere vertikal oppløsning).

For å kunne unngå forstyrrelser i det reflekterte signalet (aliasing) er det nødvendig å benytte en samplingsfrekvens som er minst to ganger høyere enn frekvensinnholdet i signalet.

Sikker tolking av dyp til berg er avhengig av at en kjenner hastighetene i løsmassene så detaljert som mulig. For å kunne gjøre sikre hastighetsanalyser, benyttes et flerkanalssystem og følgende forhold mellom hydrofonkabelens lengde (X) og dyp til dypeste reflektor (h), (Prof. ved NTNU Martin Landrø, personlig meddelelse):

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

For kort hydrofonkabel som gir usikre hastighetsanalyser, har gitt store feil i tolket dyp til berg (Rønning m.fl. 2020a).

Det diskuteres med den geofysiske konsulenten om innsamlede refraksjonsseismiske data inneholder refleksjoner som kan prosesseres og gi et sikkert bilde av løsmassefordeling (tykkelser og hastigheter) og dyp til berg.

Det må være den geofysiske firmaets ansvar å sørge for å benytte riktig energikilde, riktig samplingsfrekvens og hydrofonkabel med tilstrekkelig lengde.

4.3.4 Tomografi mellom bakke/sjøbunn og borehull

Enkelte forsøk med tomografi mellom sjøbunn og borehull i Norge har ikke gitt overbevisende resultater (Rønning m.fl. 2020a). Ved eventuelle fremtidige målinger av denne type, må det vurderes hvilken informasjon som ønskes, og om det er mulig å innhente denne informasjonen med tomografiske målinger mellom bakke/sjøbunn og et borehull.

Undersøkelser ved «E39 kryssing av Romsdalsfjorden» viste at skudd bør foretas på sjøbunnen (bakken) og ikke i borehull. Dette for å unngå kollaps av borehullet.

Det er en selvfølge at borehullene er avviksmålt, og at borehullenes forløp i forhold til sjøbunnen er meget godt kjent.

Ved inversjon av gangtiden mellom skudd og registreringsenheter, må det være en mulighet til å låse enkelte størrelser (løsmassetykkelser, hastigheter i løsmassene) for å kunne få pålitelige hastigheter i berg. Dette er spesielt viktig ved store løsmassetykkelser.

Ved utførelsen av målingene er det en meget stor fordel å ha borerigg tilgjengelig for etablering av hydrofonkabel (eventuelt skudd) i borehull.

5 PROSESSERING OG PRESENTASJON AV MÅLEDATA

Introduksjonen av tomografisk inversjon av refraksjonsseismikk har gitt nye muligheter for både tolking og presentasjon av resultater. NGU har erfart at forskjellige aktører utfører tolkingen forskjellig, og med dette blir også kvaliteten forskjellig. Hvordan tolkingen presenteres er heller ikke uvesentlig. For å kunne standardisere tolking og presentasjon, bør visse retningslinjer følges ved de forskjellige seismiske metodene. Dette gjelder også innhenting av terrengdata og bruken av disse.

5.1 Tradisjonelle tolkinger av refraksjonsseismikk

Tradisjonell tolking av refraksjonsseismikk er den sikreste metoden for påvising og karakterisering av svakhetssoner i berg, spesielt ved store løsmassemektheter (> 50 m). Metoden gir nøkterne tolkinger av svakhetssoners bredde og interne p-bølgehastighet, og den kan gi relativt sikre anslag av dyp til berg, men presisjonen kan variere (Rønning m.fl. 2020a og 2020b). Usikkerheten i dybdetolking er tradisjonelt angitt til +/- 1m ved dyp mindre enn 10 m og +/- 10 % av dypet ved større dyp til berg (Sjögren 1984). Undersøkelser har vist (Rønning m.fl. 2020a) at usikkerheten ved større dyp til berg kan være +/- 15 % og lokalt også større enn dette. Tradisjonelle tolkinger av refraksjonsseismikk kan gi relativt gode anslag for p-bølgehastigheter i løsmassene, men hastighetsinversjon og løsmasselag i blindsoner er en utfordring.

De aktører som er på markedet i Norge synes å benytte tilnærmet samme metodikk for tradisjonell tolking av refraksjonsseismikk, Hagedoorns pluss-minus-metode eller varianter av denne. Dette gir ensartede tolkinger og presentasjoner av resultatene både når det gjelder løsmasselag og svakhetssoner i berg. Som kjent er det flere svakheter med refraksjonsseismikken som gir usikkerheter i tolkingene, spesielt hastighetsinversjon og

blindsonelag. For om mulig å avdekke disse, er det en stor fordel om måledata tolkes på alternative måter som f.eks. tomografisk inversjon.

En gjennomgående erfart svakhet ved presentasjonen av resultater er bruk av fontstørrelse. Uansett om data granskes på papirplott eller i digitale bilder, er det viktig at all informasjon med letthet kan leses. Dersom det benyttes lengder langs profil som avstandsindikator må koordinater i et gitt geodetisk system avtalt med oppdragsgiver oppgis ved start og slutt av profiler.

Tolkingsresultater presenteres som 2D profiler med klar angivelse av tolket bergoverflate, hastigheter i berg, løsmasselagdeling og -hastigheter. Tunnelveiledningen, håndbok V520 (Statens vegvesen 2020b) viser eksempler på hvordan dette kan utføres. Siden det er en viss usikkerhet i tolkingen av refraksjonsseismikken, stiples alle inntegnede forløp av svakhetssoner og andre planstrukturer på profiler. Tolkingsresultater leveres i tillegg digitalt i et format som oppdragsgiver ønsker for videre bruk i egne GIS-verktøy. Dette inkluderer som regel xyz-data langs alle profiler av tolket lagdeling og bergoverflate.

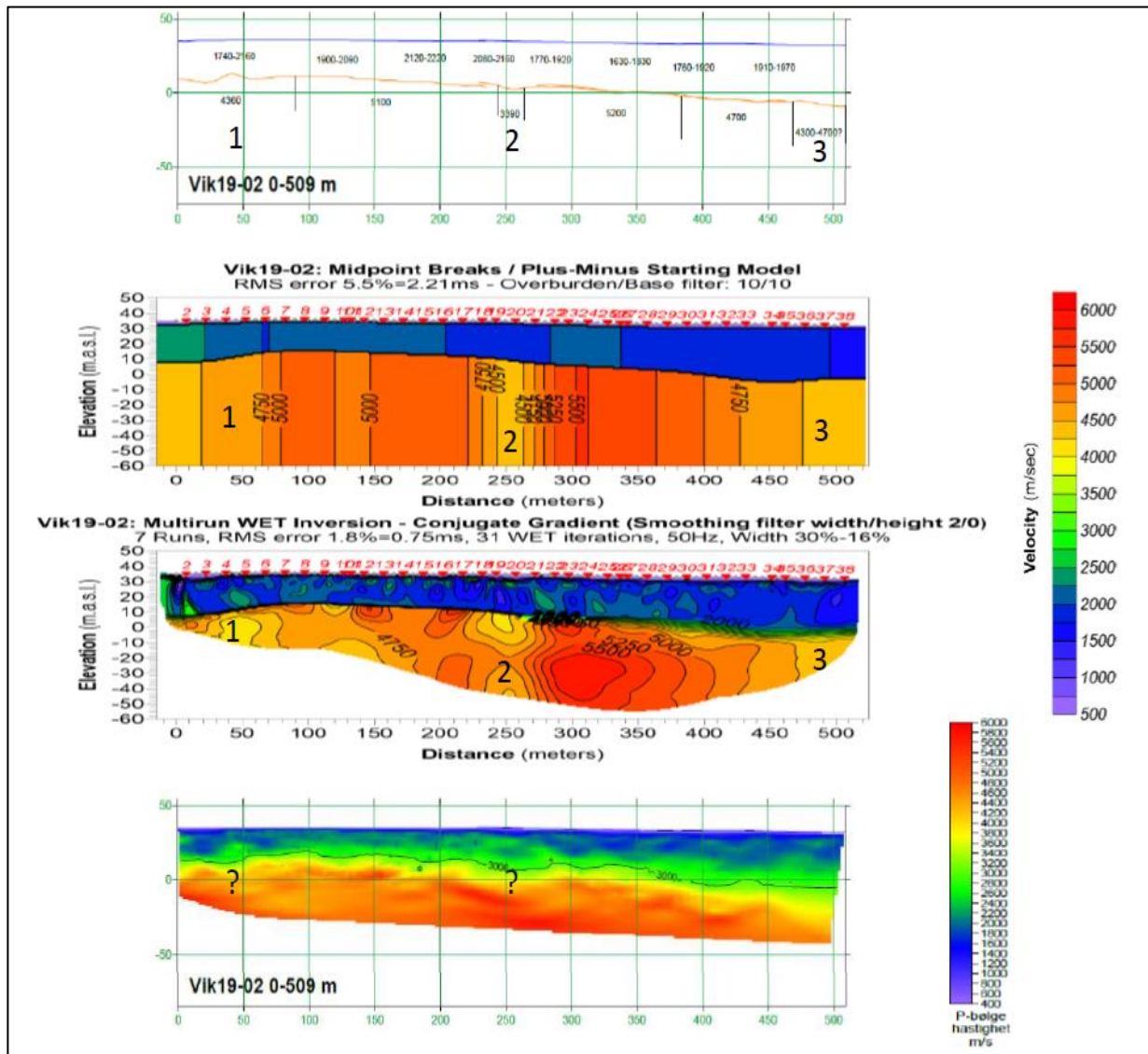
Tolkingsmetode beskrives i prosjektrapport.

5.2 Tomografisk inversjon av refraksjonsseismikk

NGUs modelleringsarbeider (Tassis m.fl. 2017 og 2018, Rønning m.fl. 2020b) viser at valg av inversjonsteknikk er svært viktig for å kunne oppnå pålitelige tomografiske hastighetsprofiler, spesielt ved påvising og karakterisering av svakhetssoner i berg. Hvilken prosedyre som benyttes avhenger av hva som skal undersøkes.

NGU har erfart at et godt bilde av svakhetssoner i berg ved tomografisk inversjon, kan oppnås ved bruk av programmet Rayfract og med en startmodell beregnet med Hagedoorns metode (se figur 1). Den tomografiske inversjonen bør utføres med «Multi-run Conjugate Gradient» inversjon og «Cosine squared» vekting, og det bør benyttes minimal glatting (Tassis m.fl. 2017). Startmodellen beregnet med Hagedoorns metode kan være en selvstendig tolking, men denne har svakheter som at alle svakhetssoner blir vertikale med «uendelig» forløp mot dypet. Inversjon av reelle data (Rønning m.fl. 2020a) og modellering (Rønning m.fl. 2020b) har vist at påfølgende tomografisk inversjon kan modifisere tolkingen og redusere slike kunstige effekter. Dersom det er store løsmassemektheter (> 30 m, vanskelighetsgrad 2 eller 3, tabell 1), anbefales både tradisjonelle tolkinger med Hagedoorns metode og tomografi som beskrevet ovenfor.

Tomografisk inversjon kan selvsagt også utføres med andre programmer, i de tilfeller dokumenteres det at prosedyren fungerer like bra som metoden beskrevet ovenfor ved tolking av svakhetssoner med programmet Rayfract.



Figur 1: Eksempel på forskjellig tolking av det samme datasettet langs refraksjonsseismisk profil Vik19-02 fra «E39 Kryssing av Romsdalsfjorden». IMPAKTs lagdelte tolking øverst, deretter følger NGUs Rayfract-tolking med Hagedoorns metode (startmodell) og tomografisk inversjon med antatt beste prosedyre. Nederst vises IMPAKTs tomografiske inversjon med programmet fra Geogiga (fra Rønning m.fl. 2020a).

De fleste prosedyrer for tomografisk inversjon kan fungere godt for bestemmelse av dyp til berg (Rønning m.fl. 2020a). En startmodell beregnet med Hagedoorns metode og påfølgende tomografisk inversjon med programmet Rayfract kan gi gode bilder av undergrunnen der det finnes klare lagdelinger (figur 1, Rønning m.fl. 2020 a og b). En ulempe knyttet til tomografisk inversjon er at ved 1D gradient startmodell vil også det tomografisk inverterte hastighetsprofilen få en gradvis økning av hastigheten mot dypet (figur 1 nederst). Dette løses vanligvis ved å la en bestemt hastighetskontur representere dyp til berg, spørsmålet blir da hvilken. NGUs modellering har vist at ved forskjellige geologiske modeller vil beste hastighetskontur som indikator for dyp til berg variere fra 3000 m/s til opp mot 3500 m/s der det er tykke lag i blindsonen (Rønning m.fl. 2020b). Andre har erfart at bergoverflaten kan ligge ved hastighetskontur 2500 m/s (Fredrik Olsen, IMPAKT AB,

personlig meddelelse). Sikre tolkinger av dyp til berg avhenger av informasjon fra andre kilder (f.eks. boring).

Den gradvise overgangen i hastigheter mot dypet, som ofte ses ved tomografisk inversjon (figur 1 nederst), gir også utfordringer ved tolking av løsmassetyper. Modellering har vist at det kan være vanskelig å angi en fast hastighet i løsmasselagene. Også her har Rayfract-tolking med Hagedoorns metode gitt gode svar på hastighet i løsmasser, men hastighetsinversjon og lag i blindsoner er en utfordring (Rønning m.fl. 2020b).

Dagens tomografiske inversjon med programmet Rayfract, kan ikke benytte fjernskudd (skudd i stor avstand utenfor mottagerrekken). Dette betyr at dersom det ikke benyttes Hagedoorns metode for beregning av startmodell, vil dybderekkevidden være begrenset av geofon-/hydrofonutleggets lengde. Andre inversjonsprogrammer f.eks. DW TOMO fra Geogiga (2021) kan involvere fjernskudd i den tomografiske inversjonen.

Prosjektrapport skal inneholde informasjon om:

- *Inversjonsprogram*
- *Hvilken startmodell som er benyttet*
- *Hvilken inversjonsprosedyre som er benyttet*
- *Hvilken glatting som er benyttet*
- *Cellestørrelse*
- *Spesielle detaljer ved inversjonen*

Tolkede hastighetsprofiler presenteres i farger med tilhørende fargeskala. Enkelte hastighetskonturer markeres med sort linje. Hastighetsprofilene presenteres i en lett lesbar form der det er lett å gjøre en geologisk tolking. «RMS-error» og avvik mellom måledata og modelldata i ms (millisekund) skal oppgis. I tillegg bør stråletettheten angis i egne plott enten som fargekodet tetthetsplott eller som strålebaner. Sistnevnte for å kunne vurdere kvaliteten i forskjellige deler av hastighetsprofilen. Tolkede lagflater (løsmasselag og bergoverflate) presenteres også som xyz-data langs alle profiler.

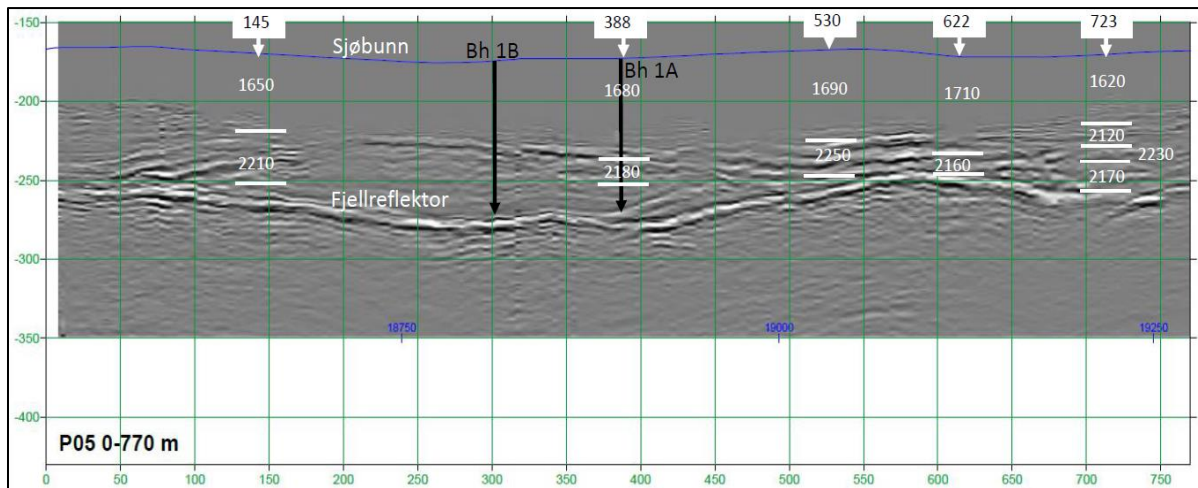
5.3 Refleksjonsseismikk

Refleksjonsseismikk kan gi gode bilder av løsmasser og bergoverflate, men har begrenset verdi ved påvising og karakterisering av svakhetssoner i berg. Flere programmer er tilgjengelig for prosessering av måledata. Konvertering av gangtider til et sant dybdeprofil avhenger av gode hastighetsanalyser. Som beskrevet i avsnitt 4.3.3, må utleggene (hydrofonkabel) ha en viss lengde i forhold til det totale dyp til berg for å kunne gi gode hastighetsanalyser. Om mulig skal de refleksjonsseismiske profilene migreres, en prosessering som fjerner kunstige effekter som hyperbler fra skarpe kanter (diffraksjoner) og objekter i bakken (punktrefektorer) samt «bow-ties» fra fordypninger i overflater. I tillegg bør det foretas «dekonvolving» som gir skarpere reflekser. Disse prosessene gir et så sant og skarpt bilde av undergrunnen som mulig og gjør den geologiske tolkingen lettere.

Prosjektrapport dokumenterer prosesseringsprogram og prosedyre.

Dersom gode hastighetsanalyser kan utføres, kan det også produseres gode hastighetsprofiler (Rønning m.fl. 2020a) og dette gir det beste grunnlaget for tolking av løsmassetyper.

Alle målelinjer presenteres i 2D profiler i farger eller gråtoneskala med gangtider både i ms og dybdekonvertert etter angitt hastighetsmodell. Ved flatedekkende målinger fremstilles bergoverflate som konturkart i farger og tilhørende fargeskala. Som regel ønsker oppdragsgiver også xyz-data med full oppløsning fra flate-dekkende målinger levert. Støypunkter filtreres bort. Alle prosesserte data leveres i digital form i et format og med koordinater tilpasset oppdragsgivers GIS-verktøy.



Figur 2: Eksempel på refleksjonsseismisk profil P05 0 – 770 m i Romsdalsfjorden, utført av Impakt Geofysik AB (2020). Data var opprinnelig samlet inn for refraksjonsseismikk, men gode refleksjoner gjorde det mulig å prosessere dette som refleksjonsseismikk. Hvite tall viser hastigheter (m/s) fra fem hastighetsanalyser langs denne delen av profilet og hvite streker viser dyp til laggrenser. Sjøbunnen er angitt som blå linje. Hastigheter i intervallet 1620 til 1710 tolkes som marine fjordavsetninger (silt og leire) mens hastigheter større enn 2000 m/s tolkes som hard morene. Sorte piler angir dyp til berg fra borer (fra Rønning m.fl. 2020a).

5.4 Tomografi mellom sjøbunn/bakke og borehull

Det kan være en utfordring å oppnå pålitelige hastighetsprofiler ved tomografi mellom sjøbunn eller bakke og underliggende borehull (Rønning m.fl. 2020a). I kapittel 4.3.4 er det listet noen praktiske hensyn som må være tilfredsstillt for å kunne oppnå gode resultater. Selv om datakvaliteten er god, er det likevel utfordringer knyttet til prosesseringen av måledata. Ved tomografien mellom sjøbunnen og et borehull ved prosjektet «E39 Kryssing av Romsdalsfjorden» viste inversjonen for høye hastigheter i løsmassene og for lave hastigheter i berg (Rønning m.fl. 2020a), noe som var direkte misvisende. For å kunne oppnå pålitelige hastigheter i berg, er det mest sannsynlig nødvendig å kunne låse løsmassetykkelser og -hastigheter med kjente verdier fra andre undersøkelser (tradisjonell refraksjonsseismikk, refleksjonsseismikk, boring o.a.). Denne muligheten er ikke uttestet i skrivende stund. Ikke all programvare for denne type tomografi har muligheten til å låse de aktuelle størrelsene ved inversjonen.

Ved tomografiske undersøkelser mellom sjøbunnen og underliggende borehull, eventuelt også mellom to borehull, må prosedyrene både for utførelse i felt og ikke minst inversjon av måledata diskuteres nøye på forhånd. Dette for å vurdere om det er mulig å oppnå pålitelige

anvendbare inverterte resultater. Dette kan gjerne involvere en tredjepart med kompetanse på metodikken.

Resultater fra en eventuell tomografi mellom sjøbunn og borehull sammenlignes med resultater fra annen seismikk og boring før endelig rapport skrives, og om mulig benyttes disse data ved inversjonen.

5.5 Generelle forhold ved prosessering og presentasjon av data.

Topografien langs et profil påvirker måleresultatene og det korrigeres for denne. Informasjon om dette legges inn før inversjon av måledata. Høyden over havet langs profilet kan fremskaffes ved å:

- lese ut fra konturene på egnet kartverk
- lese ut fra egnet digital terrengmodell (LIDAR-data) med et GIS-verktøy (angi cellestørrelse)
- nivellere alle mottagere langs profilet i felt
- måle batymetri med multistråle ekkolodd ved marine undersøkelser.

I prosjektrapport dokumenteres hvordan høydeinformasjon er hentet inn og oppløsningen i denne.

Som en standard plottes profiler fra vest mot øst eller fra sør mot nord. Retning vises på kart og i profil. Planlagt tunneltrasé tegnes inn i profilet.

Dette punktet kan unntas dersom oppdragsgiver har andre preferanser.

I tilfeller der det er målt flere profiler i et måleområde, bør data visualiseres i pseudo 3D-seksjoner eller som «fence-diagram». Det benyttes da samme fargeskala på samtlige profiler.

6 GEOLOGISK TOLKNING AV MÅLERESULTATER

Ut fra inverterte seismiske data er det vanlig å benytte seismiske hastigheter for karakterisering av løsmasser og bergmassekvalitet. Ut fra den fysiske modellen som viser laggrenser (overganger) og beregnet hastighet kan en geologisk modell tolkes. Tabell 2 viser p-bølgehastigheter i noen geologiske materialer. Tabellen bygger på mer enn 70 års erfaring med refraksjonsseismikk i Norge. Det er overlapp i p-bølgehastigheter mellom forskjellige materialtyper, noe som gjør tolkingen tvetydig. Mer entydige tolkinger kan oppnås ved å kombinere tolkingen med målt resistivitet.

Karakterisering av materialtyper ut fra p-bølgehastighet forutsetter gode hastighetsanalyser. Modellering har vist at hastighet i f.eks. morenelag i blindsoner ikke er mulig å påvise (Rønning m.fl. 2020b). Tomografisk inversjon som viser gradvise overganger i hastighet mot dypet, er mindre egnet for geologisk tolking (Rønning m.fl. 2020a og 2020b). I denne sammenheng er det viktig å sannsynliggjøre hvilken modell det arbeides på: Er det en lagdelt modell med klare hastighetskontraster (f.eks. finkornige marine avsetninger over morene og berg), eller er det en modell med gradvise endringer i p-bølgehastighet f.eks. forvitret berg

(sapro litt) med gradvise overganger til fast berg. Gangtidsskjema vil kunne indikere hvilken modell som er mest sannsynlig, og derved avgjøre den best egnede tolkingsmetode. Klare refleksjoner i måledata er et hint om lagdelt modell. Sikreste tolking av materialtype (og dyp til berg) er ved boring og prøvetaking.

Tabell 2: P-bølge hastighet i noen løsmasse typer og i enkelte bergarter (Fra www.ngu.no).

Løsmasse	P-bølge hastighet (m/s)	Bergart	P-bølge hastighet (m/s)
Myr	150 – 500	Sandstein	3000 – 3500
Leire (tørr)	600 – 1200	Kalkstein	4000 – 6000
Sand (tørr)	400 – 900	Dolomitt	2500 – 6500
Grus (tørr)	400 – 1000	Kvartsitt	5500 – 6000
Morene (tørr)	400 – 1600	Granitt	4800 – 5500
Leire (våt)	1200 – 1600	Gneis	4700 – 5800
Sand (våt)	1400 – 1800	Diabas	5700 – 6500
Grus (våt)	1400 – 1900	Gabbro	6200 – 6700
Morene (løs)	1500 – 1900	Ultramafisk	6500 – 7500
Morene (hard)	1900 – 2800		

Refleksjonsseismikk kan gi gode hastighetsanalyser dersom målingene er gjort på en riktig måte. Et forhold som kan komplisere hastighetsanalyser og som gjør tolking av dyp til berg usikker er anisotropi; forskjellig hastighet i forskjellige retninger. Laminerte løsmasselag, f.eks. marine avsetninger, kan ha forskjellig hastighet vertikalt og horisontalt. Dette er krevende å avdekke.

Ingeniørgeologer har lange tradisjoner i å tolke bergklasse ut fra p-bølge hastighet (Barton 2007). Tabell 3 viser bergmasseklasse, seismisk hastighet i svakhetszone og en karakterisering av bergmassen. Denne graderingen er benyttet ved karakterisering av bergmassekvalitet i prosjektet «E39 Kryssing av Romsdalsfjorden», og kan anvendes ved krystalline bergarter (grunnfjellsbergarter) i Norge. En generell inndeling som gjelder alle typer bergarter, er imidlertid mer utfordrende. NGUs sammenstilling av seismiske hastigheter i forskjellige bergartstyper (Elvebakk 2021) viser f.eks. generelt lavere hastigheter i ikke oppsprukne sedimentære bergarter i Oslofeltet (kambro-silur) enn i metamorfe grunnfjellsbergarter.

Tabell 3: Eksempel på tolket bergmasseklasse ut fra p-bølge hastighet med tilhørende kvalitetsbeskrivelse.

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

Det er viktig her å bemerke at spenningsnivå i berget og retningen på dette (anisotropi) kan ha stor innvirkning på hvilken hastighet som måles, og derved innvirkning på tolket bergmassekvalitet. En grunnleggende kunnskap om spenningsnivå er avgjørende for å unngå feiltolkninger.

Siden det er usikkerheter i tolkingen av refraksjonsseismikken, er det viktig at tolket dyp til berg kalibreres mot resultater fra eventuelle borer. Dette kan bidra til å avdekke utfordringer ved tolkingen av data, men fremfor alt gi sikrere anslag av dyp til berg.

Det avklares med oppdragsgiver om geologisk tolking skal utføres av geofysisk firma. Ved en eventuell tolking av løsmasstype og bergmassekvalitet oppgis alltid hvilken inndeling som benyttes.

7 RAPPORTERING (Prosjektrapport)

For å oppnå god dokumentasjon av oppnådde resultater som lett kan vurderes, er det viktig at rapporteringen er standardisert. En prosjektrapport inneholder dokumentasjon av: kvalitetsrutiner, målinger i felt, prosessering av måledata, resultater og eventuelle geologiske tolkinger.

7.1 Opplysninger i prosjektrapport

Sikring av datakvalitet

- Testing av kabellengder, når og med hvilket resultat
- Testing av kabelbrudd, når og resultat
- Testing av geofoner/hydrofoner, når og resultat
- Funksjonstest av måleinstrument, når og resultat

Målinger i felt

- Benyttet måleutstyr og kabler
- Antall mottakere, type mottakere og mottakeravstand
- Total lengde på utleggene
- Totalt antall måleverdier i profilene (ved tomografisk inversjon)
- Energikilde og mengde
- Innmåling av profilene, metode og nøyaktighet
- Observerte geologiske forhold langs profilene
- Andre relevante observasjoner.

Prosessering av måledata

- Type inversjon som er utført (tradisjonell, tomografi)
- Prosedyre ved tomografisk inversjon
- Utfordringer ved inversjonen

Tolkning av prosesserte data

- Posisjon av påviste svakhetssoner dokumenteres i plott og/eller i tabell

- Dyptgående, bredde og p-bølgehastighet i svakhetssoner klassifiseres
- Klassifikasjonssystem for bergmassekvalitet (jf. kap. 6, tabell 3)
- Tolket løsmassetykkelse og -typer
- Observerte forhold i terrenget som har betydning for tolkingen av måledata
- Anvendte tolkingsmodeller dokumenteres med referanse til originalpublikasjon eller nettsider som beskriver prosedyrene.

Dataleveranse

- Alle tolkninger sammenstilles digitalt og overleveres oppdragsgiver i egnet format for videre bruk i GIS-systemer.
- Hvert seismikkprofil viser aktuelle pelnummer, retningsbeskrivelse og riktig topografi for enkel sammenligning med geologiske kartleggingsdata m.m.
- Tolkede svakhetssoner og planlagt tunneltrasé tegnes / stiples inn i profilene.
- Georefererte 3D-data med alle tolkede resultater, med angivelse av koordinatsystem og datum.

Alle måledata oppbevares hos geofysisk firma iht. kontrakt og minst i 10 år. Alle måledata (opptaksfiler, tolkede førsteankomster) leveres oppdragsgiver vederlagsfritt på forespørsel.

7.2 Tiltak for å forenkle og sikre god rapportering

For å standardisere rapporteringen og sikre at minimumsinformasjon om utførte undersøkelser rapporteres, er det utviklet egne skjema for viktige parametere for vurdering av kvaliteten på undersøkelsene. Skjemaene omhandler kvalitetssikring, utførelse i felt og tolkingsprosedyrer. Siden det kan være snakk om utenlandske aktører, er skjemaene utarbeidet på engelsk. Tanken er at aktuelle geofysiske firma benytter disse skjemaene for derved å sikre en minste dokumentasjon av utført arbeid og at denne er samlet. De geofysiske firma kan dokumentere kvalitetssystemer, kvalitetstester og annet ut over denne minsterapporteringen.

Følgende skjema er utarbeidet og vedlagt:

- Vedlegg 1: Reporting tablet refraction seismic. Technical data.
- Vedlegg 2: Reporting tablet reflection seismic. Technical data.
- Vedlegg 3: Reporting tablet tomography. Technical data.
- Vedlegg 4: Bestillingsskjema.

8 ETTERARBEID

Erfaring har vist at det er viktig at resultater fra en undersøkelse diskuteres underveis og mot slutten av arbeidet før endelig rapport slutføres. Dette kan avklare utfordringer i tolkingene og bidra til at alternative tolkingsmetoder velges. Det er også viktig å være klar over at dersom det utføres tomografisk inversjon av refraksjonsseismikken, må dette være klart på forhånd, da dette krever tettere skyting enn ved tradisjonelle tolkinger. Anbefalingen er derfor at det bør skytes for tomografisk inversjon, men beslutningen om å gjøre dette kan vente til at foreløpige tolkinger foreligger.

Geofysisk firma og utbygger (m/samarbeidspartnere) bør gjennomgå følgende tema:

- Svarer rapporten på de oppgaver som er nedfelt i kontrakt?
- Eventuelle usikkerheter i måledata og mulige årsaker.
- Er det påvist spesielle forhold utbygger må være oppmerksom på?
- Er det forhold som kan gi problemer ved byggingen som ikke lar seg påvise?
- Er det behov for tilleggsundersøkelser?
- Har utbygger utfyllende data som kan redusere usikkerheten i de seismiske tolkingene (samtolking av seismikk og f.eks. boring)?

På forespørsel utleveres alle data fra undersøkelser (rådata, tolket førsteankomster m.m.) til oppdragsgiver for eventuell repossessering av tredjepart.

9 REFERANSER

- Barton, N. 2007: Rock quality, seismic velocity, attenuation and anisotropy. Taylor & Francis, London 2007, side 92.
- Elvebakk, H. 2021: Sammenstilling av resistivitet, seismiske hastigheter og naturlig gammastråling i norske bergarter. Oppdatering av NGU Rapport 2011.042. NGU Rapport 2021.015 (103 s). https://www.ngu.no/upload/Publikasjoner/Rapporter/2021/2021_015.pdf
- Geogiga 2021: Geogiga DW Tomo 9.1 — Refraction Tomography Software <https://www.geogiga.com/en/dwtomo.php>
- IMPAKT 2020: E39 Romsdalsfjorden, Vik – Julbøen. Refraksjonsseismiske undersøkelser i sjø og på land. Rapport fra IMPAKT Geofysik AB datert 2020-02-05.
- Intelligent Resources 2021: Rayfract Seismic Refraction & Borehole Tomography- Subsurface Seismic Velocity Models for Geotechnical Engineering and Exploration. Downloaded from <http://rayfract.com>
- Mauring, E. & Rønning, J.S. 1990: Refleksjonsseismiske målinger ved Opstad på Jæren, Hå kommune, Rogaland. NGU Rapport 90.148 (16s.). https://www.ngu.no/upload/Publikasjoner/Rapporter/1990/90_148.pdf
- Mauring, E. & Rønning, J.S. 1993: Geofysiske målinger i Tanadalen, Tana kommune, Finnmark. NGU Rapport 1993.122 (33 s.). https://www.ngu.no/upload/Publikasjoner/Rapporter/1993/93_122.pdf
- Mauring, E. & Rønning, J.S. 1995: Refleksjonsseismiske målinger og georadarmålinger ved utløpet av Altaelva, Finnmark. NGU Rapport 1995.129 (24 s.) https://www.ngu.no/upload/Publikasjoner/Rapporter/1995/95_129.pdf
- NGI 2015: Håndbok. Bruk av Q-systemet. Bergmasseklassifisering og bergforsterkning (56 s.).
- Olesen, O., Dehls, J.F., Ebbing, 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 87, pp. 253 - 287. ISSN 029-196X
- Reynolds, J.M. 2011: An introduction to applied and environmental geophysics. 2nd Edition, John Wiley and Sons, Inc., England
- 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, DOI: 10.1007/s10064-013-0555-7.
- Rønning, J.S., Tassis, G., Kirkeby, T. & Wåle, M. 2016: Retolkning av geofysiske data og sammenligning med resultater fra tunneldriving, Knappetunnelen ved Ringveg Vest i Bergen. NGU rapport 2016.048 (48s.). https://www.ngu.no/upload/Publikasjoner/Rapporter/2016/2016_048.pdf
- Rønning, J.S., Tassis, G., Kirkeby, T., Wåle, M. & Rohdewald, S. 2017: Geofysiske metoder og svakhetssoner i fjell. Hva fungerer best? Bergmekanikkdagen, Oslo, 24. nov. 2017. Artikkel 27.1 (22s.).
- Rønning, J.S., Tassis, G., Kirkeby, T. & Wåle, M. 2019a: Reprosessering og ny samtolkning av geofysiske data med resultater fra tunneldriving, Knappetunnelen ved Ringveg Vest i Bergen. NGU Rapport 2019.014 (57s.). https://www.ngu.no/upload/Publikasjoner/Rapporter/2019/2019_014.pdf
- Rønning, J.S., Tassis, G., Kirkeby, T., Wåle, M. & Rohdewald, S. 2019b: Hvordan bør refraksjonsseismikken utføres, tolkes og presenteres? Tradisjonell tolking eller tomografisk inversjon. Bergmekanikkdagen, Oslo, 22. nov. 2019. Artikkel 21.

- Rønning, J.S., Tassis, G., Kavli, A., Åndal, T. & Wisen, R. 2020a: Kvalitet på tolking av seismikk. Eksempler fra E39 Kryssing av Romsdalsfjorden. NGU Rapport 2020.040 (103s.).
- Rønning, J.S., Tassis, G., Wisen, R. & Turesson, B. 2020b: Tomographic inversion of synthetic refraction seismic data. Quality of inversion using various off-end shots, fracture zones depth, fracture zone velocity, soil thickness and hidden layer thickness. NGU Report 2020.044 (53s.).
- Rønning, J.S. 2021: Geofysikk og svakhetssoner i fjell. Forbedrede Forundersøkelser for Utbygning Tunneler (ForForUT). Sluttrapport. NGU Rapport 2021.0XX (under utarbeidelse).
- Statens vegvesen 2020a: Statens vegvesen, Vegtunneler. Vegnormal N500. <https://www.vegvesen.no/siteassets/content/vedlegg/handboker/hb-n500-vegtunneler.pdf>
- Statens vegvesen 2020b: Statens vegvesen, Tunnelveiledning. Håndbok V520. <https://www.vegvesen.no/siteassets/content/vedlegg/handboker/hb-v520-tunnelveiledning.pdf>
- Statens vegvesen 2018: Kartlegging av svakhetssoner i berg med 2D resistivitet. Veiledning. Statens vegvesen Rapport Nr. 305. (16 s.). <https://vegvesen.brage.unit.no/vegvesen-xmlui/bitstream/handle/11250/2659042/Rapport%20305%20Kartlegging%20av%20svakhetssoner%20i%20berg%20med%202D%20resistivitetsm%c3%a5linger%20%20Veiledning.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Statens vegvesen 2021: Feltundersøkelser. Håndbok R211. <https://www.vegvesen.no/siteassets/content/vedlegg/handboker/r211-feltundersokelser-2021.pdf>
- Solberg, I.L., Hansen, L., Rønning, J.S. og Dalsegg, E. 2010: Veileder for bruk av resistivitetmålinger i potensielle kvikkleireområder. Versjon 1.0. NGU Rapport 2010.048, 90 sider. https://www.ngu.no/upload/Publikasjoner/Rapporter/2010/2010_048.pdf
- Sjögren, B. 1984: Shallow Refraction Seismics. Chapman and Hall. ISBN 0-412-24210-9.
- Tassis, G., Rønning, J.S. & Rohdewald, S. 2017a: Refraction seismic modelling and inversion for the detection of fracture zones in bedrock with the use of Rayfract[®] software. NGU Report 2017.025 (62pp.). http://www.ngu.no/upload/Publikasjoner/Rapporter/2017/2017_025.pdf
- Tassis, G., Rønning, J.S., Kirkeby, T. & Wåle, M. 2017b: Reprocessing of geophysical data and comparison with results from tunneling construction of the Ring-road west of Bergen, Norway. Oral presentation, EEGS Annual Meeting (SAGEEP) Denver, Colorado USA March 19-23, 2017.
- Tassis, G., Rønning, J.S., Rohdewald, S., Kirkeby, T. & Wåle, M. – 2017c: Reprocessing of Geophysical Data, Comparison with Tunneling Results from the Bergen Ring-road and Subsequent Refraction Seismic modeling. Oral presentation Near Surface Geoscience 2017. Malmø, Sweden, September 4 - 6, 2017.
- Tassis, G., Rohdewald, S. & Rønning J.S. 2018: Tomographic Inversion of Synthetic Data Using Various Starting Models in Rayfract[®] software. NGU Report 2018.015 (45pp.). https://www.ngu.no/upload/Publikasjoner/Rapporter/2018/2018_015.pdf
- Westerdahl, H. 2003: Seismisk modellering. Modellering av seismiske data over løsmassefylte depresjoner, svakhetssoner og ved kabelheng. Miljø- og samfunnstjenlige tunneler, Rapport 32. Statens vegvesen. <https://vegvesen.brage.unit.no/vegvesen-xmlui/handle/11250/190422>

Vedlegg 1: Reporting tablet refraction seismic. Technical data.

Theme	Data (Proposed)	Comment
Seismograph	ABEM Terraloc Pro2	
Seismograph test	01.06.2021	Result: OK?
Record length	1100 ms	
Sampling interval (Frequency)	0.125 ms (8000 Hz)	
Record format	*.Sg2	
Receiver spread (active length)	2 x 110 m	Fixed spread or towed cable
Date of testing	01.06.2021	Result: Correct distances, All channels working
Receivers	10 Hz geophone	Producer?
Number of receivers	24	
Receiver spacing	5,0 m	Shorter distance at ends?
Energy source	Dynamite (50 – 100 g)	
Shot distance in spread	30 m	
Number of offend shots	3 at each side	Specifications for each profile
Max. distance to offend shots	120 m	Specifications for each profile
Traditional interpretation	Hagedoorns method	Additional information
Tomographic inversion	Rayfract software	Intelligent Resources Inc.
Starting model	2 D Hagedoorn	Stand-alone interpretation?
Inversion procedure	Multirun Conj.Gradient?	
Weighting	Cosine squared?	
Smoothing	Moderate?	Horizontal/vertical: 2/1
Cell size	2.5m x 2.5 m	
Other tomographic inversion	Software name	Producer?
Starting model		
Inversion procedure		
Weighting		
Smoothing		
Cell size		
Other parameters		

Vedlegg 2: Reporting tablet reflection seismic. Technical data.

Theme	Data (Proposed)	Comment
Seismograph	ABEM Terraloc Pro2	
Date of testing	01.06.2021	Result: OK?
Record length	1100 ms	
Sampling interval (Frequency)	0.125 ms (8000 Hz)	
Record format	*.Sg2	
Receiver spread (active length)	150 m	Fixed spread or towed cable
Date of testing	01.06.2021	Result: Correct distances, All channels working
Streamer depth	0,5 m / At seabottom?	
Receivers	50 Hz hydrophone	Producer?
Number of receivers (# Fold)	48 (24 fold)	
Receiver spacing	5.0 m	
Line spacing	50 m	
Energy source	Sparker	Type: GSO 540 tip
Shot point interval	5 m	
Shot point depth	0.5 m / At seabottom?	
Processing software	Pegasus (FUGRO)	
Swell noise attenuation	Yes / No	Details
Source and receiver deghosting	Yes / No	Details
Linear noise attenuation	Yes / No	Details
Seabottom Multiple Elimination	Yes / No	Details
NMO Velocity analyses	Yes / No	Details
Muting	Yes / No	Details
Deconvolution	Yes / No	Details
Bandpass filter	Yes / No	Details
Final stack	All / selected profiles	Which profiles

Vedlegg 3:

Reporting tablet tomography between ground/seabottom and borehole. Technical data.

Theme	Data (Proposed)	Comment
Seismograph	ABEM Terraloc Pro2	
Date of testing	01.06.2021	Result: OK?
Record length	1100 ms	
Sampling interval (Frequency)	0.125 ms (8000 Hz)	
Record format	*.Sg2	
Receiver spread (active length)	220 m	
Date of testing	01.06.2021	Result: Correct distances, All channels working
Streamer position		In borehole or At seabottom?
Accuracy, receiver position	+/- 1 m	
Receivers	50 Hz hydrophone	Producer?
Number of receivers	48	
Receiver spacing	5.0 m	
Energy source	Dynamite (50 – 100 g)	
Shot position		At seabottom? In borehole
Shot point interval	5 m	
Number of shots		
Accuracy, shot position	+/- 1 m	
Borehole deviation measure	Tool?	
Accuracy, borehole deviation	< 2 m?	
Seabottom bathymetry	MBES?	Multi Beam Echo Sounder?
Accuracy, bathymetry	+/- 1 m	
Processing software	GeoTomCG	http://dev.geotom.net/?page_id=111
2D or 3D inversion		
Distance shot-section	< 10m	Maximum distance from shots to inverted section
Cell size	2.5 m x 2.5 m (x 2.5m)	Voxel size in 2D (3D)
No. of active ray-paths	1111	Total number – deleted raypaths
Info from other sources?		Refraction data, boreholes
RMS error (% and ms)		For each profile

Vedlegg 4: Bestillingskjema

Type seismikk	# linjer	Total lengde (m)
Refraksjonsseismikk på land		
Antatt vanskelighetsgrad 1, 2, 3 (stryk)		
Høy detaljeringsgrad, geofonavstand 2 m		
Middels detaljeringsgrad, geofonavstand 5 m		
Lav detaljeringsgrad, geofonavstand 10 m		
Refraksjonsseismikk i sjø		
Antatt vanskelighetsgrad 1, 2, 3 (stryk)		
Høy detaljeringsgrad, hydrofonavstand 2m		
Middels detaljeringsgrad, hydrofonavstand 5 m		
Lav detaljeringsgrad, hydrofonavstand 10 m		
Tolkingsmetode, tradisjonell tolking (Hagedoorn)		
Tolkingsmetode, tomografisk inversjon		
Rayfract, antatt beste prosedyre		
Annen programvare, 1D gradient startmodell		
Geologisk tolking, ønskes / ønskes ikke		
Refleksjonsseismikk på land ¹⁾		
Refleksjonsseismikk i sjø, enkel enkanal		
Refleksjonsseismikk i sjø, avansert flerkanal ²⁾		
Energikilde PINGER, mottageravstand \approx 5m		
Energikilde BOOMER, mottageravstand \approx 5m		
Energikilde SPARKER, mottageravstand \approx 5m		
Refleksjonsseismikk i sjø, prosessering		
Hastighetsanalyse		
Multikanalers "stack"		
Fjerning av multipler		
Migrering		
Dekonvolving og båndpassfiltrering		
Dybdekonvertering ³⁾		
Tomografi mellom sjøbunn og borehull ⁴⁾		

1): Oppdragsgiver og geofysisk firma diskuterer mulige opplegg og hvilken informasjon som kan oppnås.

2): Geofysisk firma oppgir antall mottagere (og fold).

3): Data fra hastighetsanalyse benyttes for dybdekonvertering hvis ikke annet er ønsket.

4): Oppdragsgiver og geofysisk firma diskuterer mulige opplegg og hvilken informasjon som kan oppnås.



Statens vegvesen
Pb. 1010 Nordre Ål
2605 Lillehammer

Tlf:
firmapost@vegvesen.no

ISSN: 1893-1162

vegvesen.no

Tryggere, enklere og grønnere reisehverdag