

Kjell-Erik Nordbø

# Vurdering av nytteverdi av seismikk på stoff (TSP) for prediksjon av ingeniørgeologiske utfordringer på Rogfast

Masteroppgave i Tekniske Geofag

Veileder: Bjørn Nilsen

Juni 2020



Tverrslagstunnel Arsvågen. Foto: Stavanger Aftenblad



Kjell-Erik Nordbø

# **Vurdering av nytteverdi av seismikk på stuff (TSP) for prediksjon av ingeniørgeologiske utfordringer på Rogfast**

Masteroppgave i Tekniske Geofag  
Veileder: Bjørn Nilsen  
Juni 2020

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Fakultet for ingeniørvitenskap  
Institutt for geovitenskap og petroleum



Kunnskap for en bedre verden





## MASTEROPPGAVE

### Prosjektbeskrivelse

**Kandidatens navn:** Kjell-Erik Nordbø

**Oppgavens tittel:** Vurdering av nytteverdi av seismikk på stoff (TSP) for prediksjon av ingeniørgeologiske utfordringer på Rogfast

**English title:** Evaluation of potential of tunnel seismic prediction (TSP) for predicting engineering geological challenges for Rogfast subsea road tunnel

**Utfyllende tekst:**

1. Omfattende forundersøkelser, inkludert seismikk på stoff (TSP) i adkomsttunneler/tverrslag er utført for Rogfasttunnelen, og oppstart av tunneldriving for hovedløpene er nært forestående. Intensjonen med denne masteroppgaven er å vurdere potensiale og mulig nytteverdi av seismikk på stoff ved driving av hovedløpene.

Masteroppgaven er en videreføring av fordypningsprosjekt gjennomført høsten 2019, hvor det på grunnlag av litteraturstudier ble gjennomført analyse av og diskusjon av resultater og nytteverdi fra tidligere anvendelse av seismikk på stoff på et relevant utvalg av nyere tunnelprosjekter, inkludert det nærliggende Ryfast-prosjektet. Spesiell vekt skal legges på vurdering og diskusjon av:

- Metodens potensiale for påvisning av markerte svakhetssoner.
- Metodens potensiale for påvisning av store innlekkasjer/vanninnbrudd.
- Grad av usikkerhet i tolkningene.
- Muligheter for kombinasjon av TSP med sonderboring, MWD og andre undersøkelser.

Befaring til prosjektet skal foretas, og eventuelt prøvetaking for supplerende laboratorietester i den grad det vurderes hensiktsmessig.

2. Oppgaven gjennomføres i samarbeid med Norconsult med ingeniørgeolog Øyvind Dammyr som ekstern medveileder, og Statens vegvesen med byggeleder Sveinung Brude som kontaktperson.

**Studieretning:** Ingeniør- og miljøgeologi  
**Hovedprofil:** Ingeniørgeologi og bergmekanikk  
**Tidsrom:** 15.1.2020-10.6.2020

*Bjørn Nilsen, Professor/hovedveileder*



# Sammendrag

Den systematiske bruken av seismikk på stoff på E39 Rogfast vil bli et pilotprosjekt i norsk tunnelsammenheng. Det er antatt at tunnelen vil måtte krysse en rekke krevende og mektige svakhetssoner og partier med til dels uoversiktlig grunnforhold. I denne masteroppgaven er det vurdert potensialet for bruk av seismikk på stoff for prediksjon av ingeniørgeologiske utfordringer på Rogfast.

Det er til nå utført 11 seismiske undersøkelser på stoff i en tverrslagstunnel på Arsvågen. Fra disse undersøkelsene er det erfart at seismikk på stoff er godt egnet til å påvise fysiske kontraster og endringer i bergmassen. Metoden har imidlertid vist seg å predikere betydelig flere lavhastighetssoner enn det kartlagt bergmassekvalitet viser. Analysen i kapittel 6 viser at det kreves god kjennskap til metoden for å skille mellom hvilke strukturer i seismikken som har betydning for stabiliteten til tunnelen.

I masteroppgaven er det vist hvilken rolle den systematiske bruken av seismikk på stoff vil kunne ha under drivingen av hovedløpene på Rogfast. Det er vurdert at metoden kan brukes til å gi en innledende vurdering av de forutliggende grunnforholdene foran stoff, verifisere den ingeniørgeologiske modellen og framskaffe ytterligere opplysninger om svakhetssoner. Metoden vil være av spesiell viktig betydning i partiet hvor tunnelen går under Boknafjorden, hvor den ingeniørgeologiske usikkerheten er høy.

Det er også foretatt analyser av hvordan seismikk på stoff kan brukes til å påvise fem spesielt krevende partier på Rogfast. Her vil metoden kunne brukes til å gi supplerende informasjon om svakhetssoners orientering og mektighet på tunnelnivå, verifisere overdekning og til å gi en vurdering av sannsynligheten for vanninnbrudd i tunnel. Dette kan igjen brukes til å begrense ekstensiv bruk av kjerneboring på stoff.

Seismikk på stoff vil ikke kunne avsløre alle detaljer om bergmassens egenskaper. Fra analysen i kapittel 6 er det for eksempel erfart at metodens evne til å forutse vannforhold i bergmassen er usikker. I tillegg er metodens evne til å avbilde ingeniørgeologiske utfordringer begrenset av en rekke strukturelle forhold, som for eksempel subhorisontale sprekker og svakhetssoner. For å unngå uforutsette hendelser under drivingen av hovedløpene på Rogfast, og for å avgjøre relevansen til strukturer påvist med seismikk, er det derfor svært viktig at undersøkelsene suppleres med andre ingeniørgeologiske data som sonderboringer og MWD (*Measurement While Drilling*). Det er også vurdert at de seismiske prognosene av bergmasseforhold bør være enkle og begrenset til de viktigste oppdagelsene.





# Abstract

The systematic use of Tunnel Seismic Prediction (TSP) at E39 Rogfast will provide new knowledge in Norwegian tunnelling. Excavation of the tunnel will include passing of large and complex weakness zones and areas in which knowledge of the site ground conditions are limited. This master's thesis evaluates the potential of using TSP for predicting engineering geological challenges at E39 Rogfast.

To date, a total of 11 seismic campaigns are performed in an access tunnel at Arsvågen. Analyses of these campaigns showed that that tunnel seismic prediction is a valuable tool to obtain additional information about the rock mass. However, the method predicts a larger number of low velocity zones compared to what has actually been mapped in the tunnel. The analysis in Chapter 6 shows that good knowledge of the method is required to distinguish which structures that are of importance to the stability of the tunnel.

In the present study, the possible function of the systematic use of tunnel seismic prediction at E39 Rogfast is presented. The method will be an important tool while constructing the main tunnels, by providing a first assesment of the ground conditions to be expected ahead. Therefore, the method can be used to verify the engineering geological model and obtain further information about weakness zones. This will be of particular importance while crossing the Bokna fjord, where the engineering geological uncertainty is high.

Furthermore, how the method can be used to predict the ground conditions while crossing five of the most challenging sections at Rogfast is assessed. It is expected that the method will provide information about the extent and orientation of weakness zones, the overburden and the possibility of water ingress. This information may be used to limit extensive use core drilling.

Seismic exploration can not reveal all geological details. In Chapter 6, the uncertainty of predicting water ingress is discussed. The method is also limited by certain structural geological conditions, such as subhorizontal joints and weakness zones. To avoid any unexpected events while excavating the main tunnels at Rogfast, and to determine the relevance of geological features detected by the seismic surveys, the method must be supplemented by systematic geological investigation during construction, such as probe drilling and MWD (*Measurement While Drilling*). The geological forecasts provided by TSP should also be simple and limited to the most important features.



# Forord

Denne masteroppgaven er utarbeidet ved Institutt for geovitenskap og petroleum ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU) i Trondheim våren 2020. Masteroppgaven har et omfang på 30 studiepoeng på studieprogrammet Tekniske Geofag. Oppgaven er skrevet i samarbeid med Statens vegvesen region vest, og den er en videreføring av prosjektoppgaven: *”Nytteverdi av seismikk på stuff for prediksjon av ingeniørgeologiske utfordringer”* skrevet av undertegnede høsten 2019.

Først og fremst ønsker jeg å takke professor Bjørn Nilsen for god faglige oppfølging. Din kunnskap og engasjement for fagfeltet har vært en stor inspirasjon. Jeg vil også takke medveileder og framtidige kollega Øyvind Dammyr hos Norconsult AS, som har bidratt med gode faglige innspill og gjennomlesning. En stor takk rettes til Sveinung Brude, Hans Ivar Ravn-Larsen og Gudmund Lunden ved Statens vegvesen region vest for muligheten til å skrive denne oppgaven. Jeg vil også takke for gjestfriheten dere viste da vi besøkte prosjektkontoret deres på Mekjarvik, og for muligheten til å gjennomføre befarings- og uthenting av prøver på kjernelageret deres på Sola. Takk også til kontrollingeniør Erik Jensen hos Statens vegvesen som har tilgjengeliggjort data fra seismikk på stuff.

Videre ønsker jeg å takke Jon Runar Drotninghaug for god veiledning i forbindelse med prøveprepareringen og laboratorieundersøkelsene. Takk også til Laurentius Tijhuis for hjelp med XRD-analysen. Jeg ønsker også å takke medstudent Marie Hernæs Larsen for et godt samarbeid under laboratoriearbeidet og befarings- og for nyttige diskusjoner.

Takk til Karoline som har vært min viktigste støttespiller under studietiden. Takk til familie for motivasjon og oppmuntring. Til slutt vil jeg takke mine klassekamerater for en artig studietid!

Kjell-Erik Nordbø

Trondheim, juni 2020



# Innhold

<b>Sammendrag</b>	<b>v</b>
<b>Abstract</b>	<b>vii</b>
<b>Forord</b>	<b>ix</b>
<b>Innholdsfortegnelse</b>	<b>xi</b>
<b>1 Introduksjon</b>	<b>1</b>
1.1 Bakgrunn . . . . .	1
1.2 Målsettinger . . . . .	2
1.3 Begrensninger . . . . .	3
1.4 Oppgavens oppbygning og grunnlagsmateriale . . . . .	3
<b>2 Seismikk på stoff</b>	<b>7</b>
2.1 Målsettinger i prosjektoppgaven . . . . .	7
2.2 Teoretisk bakgrunn . . . . .	8
2.3 Tunnel Seismic Prediction (TSP) . . . . .	14
2.4 Oversikt eksempelstudier . . . . .	18
2.5 Erfaringer fra Hundvågtunnelen . . . . .	23
<b>3 Empiriske korrelasjoner mellom bergmassens egenskaper og seismiske hastigheter</b>	<b>27</b>
3.1 Bergmassens oppsprekking . . . . .	27
3.2 Sprekkeforhold . . . . .	28
3.3 Vannforhold . . . . .	29
3.4 Bergmassens spenningsforhold og P-bølgehastighet . . . . .	29
3.5 Q-systemet og P-bølgehastigheter . . . . .	30

<b>4</b>	<b>Rogfastprosjektet</b>	<b>33</b>
4.1	Prosjektoversikt . . . . .	33
4.2	Regional geologi . . . . .	35
4.3	Tverrslagstunnel Arsvågen . . . . .	37
4.4	Tverrslagstunnel Mekjarvik . . . . .	42
4.5	Erfaringer så langt . . . . .	43
<b>5</b>	<b>Undersøkelser i felt og i laboratorium</b>	<b>45</b>
5.1	Befaring til Rogfastprosjektet . . . . .	45
5.2	Laboratorieanalyser . . . . .	50
5.3	Resultater . . . . .	57
5.4	Diskusjon og gyldighet av resultater . . . . .	61
<b>6</b>	<b>Prediksjon av ingeniørgeologiske forhold i tverrslagstunnel på Arsvågen</b>	<b>65</b>
6.1	TSP-brukergrensesnitt og utgangspunkt for tolkning . . . . .	65
6.2	Tekniske aspekter ved forberedelse og utførelse av undersøkelsene . . . . .	67
6.3	Utvalg av undersøkelser . . . . .	68
6.4	Tunneldokumentasjon og MWD-data . . . . .	71
6.5	Prediksjon av bergmassekvalitet . . . . .	72
6.6	Prediksjon av svakhetssoner . . . . .	76
6.7	Prediksjon av vannforhold . . . . .	81
6.8	Prediksjon av bergartsgrenser . . . . .	84
6.9	Korrelasjoner mellom P-bølgehastighet og Q-parametre i tunnel . . . . .	88
6.10	Oppsummerende vurderinger . . . . .	92
<b>7</b>	<b>Bruk av seismikk på stoff under driving av hovedløpene på Rogfast</b>	<b>95</b>
7.1	Ingeniørgeologiske forundersøkelser under driving . . . . .	95
7.2	Systematisk bruk av seismikk på stoff . . . . .	96
7.3	Antatte spesielt krevende partier . . . . .	100
<b>8</b>	<b>Diskusjon</b>	<b>115</b>
8.1	Usikkerhet . . . . .	115
8.2	Potensiell nytteverdi . . . . .	117
<b>9</b>	<b>Konklusjon</b>	<b>121</b>
<b>10</b>	<b>Videre arbeid</b>	<b>123</b>
	<b>Referanser</b>	<b>125</b>

<b>Vedlegg</b>	<b>I</b>
<b>A Oversikt over kartleggingslokaliteter</b>	<b>I</b>
A.1 Ingeniørgeologisk profil for tverrslagstunnel på Mekjarvik . . . . .	II
<b>B Bilder og resultater fra laboratorieundersøkelser</b>	<b>III</b>
B.1 Bilder etter våtsikting av sprekkematerialet . . . . .	IV
B.2 Aksiell spennings-tøyningskurve for kjerneprøvene . . . . .	V
B.3 Bilder av kjerneprøver etter brudd . . . . .	VI
B.4 Svelletrykksmålinger fra ødometertest . . . . .	VII
B.5 Diffraktogram og tolkninger fra XRD-test. . . . .	VIII
<b>C Utdata seismikk på stuff og Q-kartlegging i tunnel</b>	<b>XI</b>
C.1 Seismikk- og Q-parametre i tunnel . . . . .	XI





# Kapittel 1

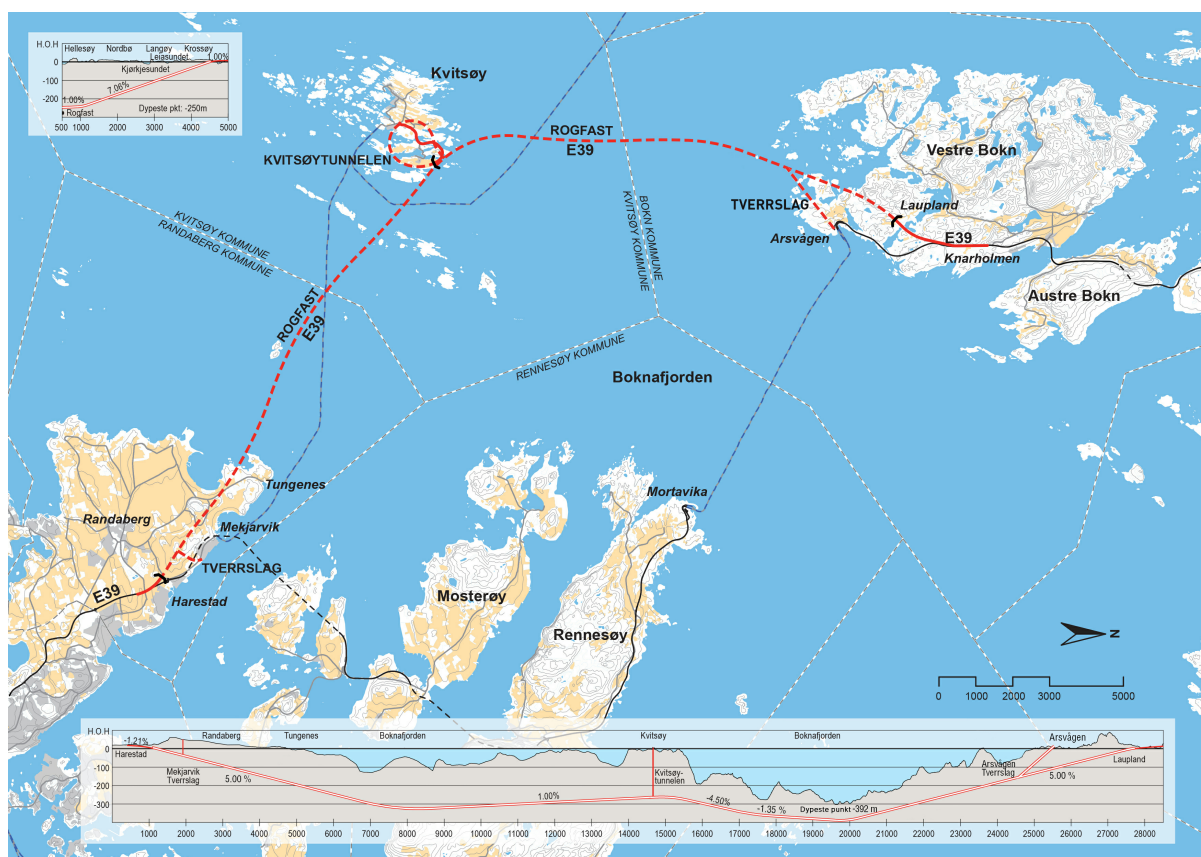
## Introduksjon

### 1.1 Bakgrunn

Prosjektet E39 Rogfast er en del av den nasjonale satsingen for å etablere fergefri E39 mellom Kristiansand og Trondheim. Prosjektet innebærer kryssing av Boknafjorden med en 26,7 km lang undersjøisk toløpstunnel. Tunnelen er planlagt ned til 392 meter under haveoverflaten, og den vil med dette bli både verdens lengste og dypeste undersjøiske vegtunnel. I tillegg vil det bygges en ca. 3,1 km lang undersjøisk ettløpstunnel til Kvitsøy. Tunnelene vil sørge for ferjefri forbindelse mellom Nord- og Sør-Rogaland, forkorte dagens overfartstid og legge til rette for et utvidet bo- og arbeidsmarked i regionen (Statens vegvesen, 2020a). En oversikt over prosjektet er illustrert i figur 1.1.

Byggingen av Rogfast vil medføre kryssing av en rekke markerte og antatt krevende svakhetssoner. Enkelte av disse sonene er påvist løsmasseaktige og har trolig høy permeabilitet. I kombinasjon med høyt vanntrykk kan det oppstå meget utfordrende forhold for tunneldriving. I tillegg finnes det flere partier hvor kunnskap om de ingeniørgeologiske forholdene er lav. Hovedparten av tunnelen er undersjøisk. I tillegg har ikke refraksjonseismiske undersøkelser og kjerneboringer gitt tilfredsstillende data i alle områder. På bakgrunn av dette vil det være en risiko forbundet med tunnelbyggingen. Uforutsette vanninnbrudd, mektige svakhetssoner og dårlige bergmasseforhold kan føre til forsinkelser og kostnadsoverskridelser i prosjektet.

Det å ha kontroll på den geologiske risikoen er avgjørende for et vellykket tunnelprosjekt. God kjennskap til forutliggende grunnforhold er sentralt for riktig valg av drivetekniske og sikringsmessige tiltak, og for et optimalt teknisk-økonomisk resultat. E39 Rogfast vil være det



Figur 1.1: En oversikt over E39 Rogfast med tilhørende lengdeprofil (Statens vegvesen, 2018).

første norske prosjektet hvor seismikk på stoff skal brukes systematisk under drivingen av hovedløpene. Metoden har vist seg å gi lovende resultater fra en rekke internasjonale prosjekter, hvor den har vært brukt til å påvise ingeniørgeologiske utfordringer i god tid før de møtes. Ved en tidlig bestemmelse av svakhetssoners plassering, orientering og mektighet, kan metoden bli et hjelpemiddel til å ta riktige beslutninger, slik at tunnelen kan bygges så sikkert som mulig og ferdigstilles innen planlagt tid.

## 1.2 Målsettinger

Masteroppgaven skal vurdere potensialet og nyttverdien av å bruke seismikk på stoff ved driving av hovedløpene på Rogfast. Dette inkluderer en analyse av hvordan metoden har fungert i den ferdigdrevene tverrslagstunnelen på Arsvågen. Målsettingene med arbeidet er å:

- Vurdere metodens potensiale for å påvise markerte svakhetssoner. I dette punktet skal det sees nærmere på et utvalg krevende partier på Rogfast og undersøkes hvordan metoden kan være et hjelpemiddel til å påvise disse.

- Vurdere metodens potensiale for å påvise store vanninnbrudd i bergmassen. En av de fremste utfordringene i prosjektet antas å være håndtering av store innlekkasjer under høyt trykk. Det er derfor av interesse å undersøke hvorvidt seismikken er i stand til å påvise soner med potensiale for store vanninnbrudd i tunnel.
- Diskutere usikkerhet tilnyttet prediksjon av de ingeniørgeologiske utfordringene og grad av usikkerhet i tolkningene. I dette punktet skal begrensninger med metoden belyses. Det skal også drøftes hvilken betydning usikkerheten kan ha for påvisning og tolkning av ingeniørgeologiske utfordringer.
- Undersøke muligheter for å kombinere metoden med sonderboring, MWD (*Measurement While Drilling*) og andre undersøkelser. Seismiske metoder vil ikke kunne avsløre alle detaljer om bergmassen. Det er derfor viktig å undersøke hvordan seismikk på stuff lar seg kombinere med andre ingeniørgeologiske data for optimal kontroll under driving.

### 1.3 Begrensninger

Kvalitet og usikkerhet hva angår tolkning og analyse av utdata fra seismikk på stuff er avhengig av brukerens erfaring med metoden. Undertegnede har ikke opptrening i bruk av *Tunnel Seismic Prediction* og tolkning av utdata fra metoden. Undertegnede har heller ingen erfaring i å bearbeide eller å tolke seismiske data. Det er forsøkt å basere analysen og tolkning av predikerte ingeniørgeologiske forhold på ferdigprosesserte data i rapporter. Det presiseres at disse resultatene allerede er påvirket av brukerens fagmessige skjønn gjennom valg under prosessering og presentasjon av dataene. Merk at brukere av metoden alltid vil tolke og presentere resultatene forskjellig.

Det var planlagt befarings til tverrslagstunneler på Mekjarvik og Arsvågen i henholdsvis februar og april 2020. Det er utført seismiske undersøkelser på stuff i begge tverrslagstunneler. På grunn av situasjonen rundt Covid-19 ble det ikke utført befarings og prøveinnhenting i tverrslagstunnelen på Arsvågen i april. Undertegnede har derfor ikke hatt mulighet til å gjøre egne vurderinger av grunnforholdene i denne tunnelen. Undertegnede har heller ikke hatt tilgang til data fra den seismiske undersøkelsen som er utført på stuff i tverrslagstunnelen på Mekjarvik.

### 1.4 Oppgavens oppbygning og grunnlagsmateriale

Masteroppgaven vil innledningsvis i kapittel 2 presentere de mest sentrale resultater fra prosjektoppgaven skrevet høsten 2019. Dette inkluderer en beskrivelse av det teoretiske grunnlaget bak seismikk på stuff og hvordan metoden utføres i tunnel. I kapittel 3 vil det kort presenteres

hvordan bergmassens egenskaper påvirker den seismiske hastigheten. Videre vil det i kapittel 4 og 5 gis en oversikt over Rogfastprosjektet og felt- og laboratorieundersøkelser utført av undertegnede. I kapittel 6 vil det bli presentert analyser og vurderinger av hvordan de seismiske undersøkelsene på stoff har fungert i den ferdigdrevene tverrslagstunnelen på Arsvågen. Avslutningsvis i kapittel 7 vil det bli sett på hvordan metoden kan brukes til å påvise ingeniørgeologiske utfordringer langs hovedløpene. Dette inkluderer en analyse av den systematiske bruken og hvordan metoden kan være et hjelpemiddel i påvisning av de antatt mest krevende partiene.

En oversikt over grunnlagsmaterialet som er benyttet under arbeidet med masteroppgaven finnes i tabell 1.1. Grunnlagsmaterialet inkluderer geologiske rapporter, ingeniørgeologiske konkurransegrunnlag og tidligere masteroppgaver om Rogfast. Det henvises til Norconsult sine ingeniørgeologiske rapporter for originalreferanser hva angår refraksjonseismikk, kjerneboringer, spenningsmålinger og andre utførte grunnundersøkelser.

**Tabell 1.1: Oversikt over benyttet grunnlagsmateriale under arbeidet med masteroppgaven.**

<b>Publisert</b>	<b>Tittel</b>	<b>Forfattere</b>
15.11.2006	Geological and geophysical investigations for the Rogfast project. NGU Report 2006.076.	NGU v/ Rønning et al.
20.12.2011	Geological investigations by drill core logging for the Rogfast tunnel project. NGU Report 2011.034.	NGU v/ Saintot & Solli
11.04.2011	Geofysisk logging av borehull på Alstein, Randa-berg kommune, Rogaland. NGU rapport 2011.032	NGU v/ Elvebakk & Saintot
07.05.2012	Geologisk rapport for E39 Rogfast. Vedlegg til Tema-rapport Geologi.	SINTEF v/ Holmøy et al.
Juni 2012	Rogfasttunnelen. Analyse av drivetekniske forhold, stabilitet og sikringsbehov for avgreining til Kvitsøy. Masteroppgave ved NTNU.	L.E. Friestad
Juni 2013	Metodikk for driving og sikring gjennom svakhetssoner ved Rogfast. Masteroppgave ved NTNU.	J.M. Eidesen
2014 (u.d.)	Geological investigations for the ROGFAST project in the area between Kvitsøy and Bokn. NGU Report 2014.054.	NGU v/ A. Solli & Ø. Nordgulen
19.02.2015	NO-61-GEO Entreprise E11. Ingeniørgeologisk rapport for sidetunnel Mekjarvik. Konkurransesgrunnlag.	Norconsult v/ Vik et al.
01.06.2017	NO-78-GEO Entreprise E13. Ingeniørgeologisk rapport for sidetunnel Arsvågen. Konkurransesgrunnlag.	Norconsult v/ Vik et al.
31.01.2019	NO-88-GEO Entreprise E03. Ingeniørgeologisk rapport for Boknafjordtunnelen sør. Konkurransesgrunnlag.	Norconsult v/ Dammyr et al.
22.03.2019	NO-89-GEO Entreprise E04. Ingeniørgeologisk rapport for Boknafjordtunnelen nord. Konkurransesgrunnlag.	Norconsult v/ Dammyr et al.
2019 (u.d.)	Ingeniørgeologisk sluttrapport E11 sidetunnel Mekjarvik E39 Rogfast.	Statens Vegvesen v/ L. Eldevik
Juni 2019	Analyse av stabilitet og bergspenningsforhold for Kvitsøykrysset, E39 Rogfast. Masteroppgave ved NTNU	S.F. Mathiassen
30.01.2020	Geologisk sluttrapport E13 Rogfast – Sidetunnel. Statens vegvesens rapporter nr. 624.	Statens Vegvesen v/ L. Eldevik & E.Jensen
07.02.2020	NO-60-GEO Entreprise E15 og E02. Ingeniørgeologisk rapport for Kvitsøytunnelen og Boknafjordtunnelen midt. Konkurransesgrunnlag.	Norconsult v/ Dammyr et al.
27.03.2020	Evalueringsrapport for seismikken Rogfast E13 – Arsvågen. Statens vegvesens rapporter nr. 563.	Statens Vegvesen v/ A. Samarray & E. Jensen



## Kapittel 2

# Seismikk på stoff

Masteroppgaven er en videreføring av prosjektoppgaven: *"Nytteverdi av seismikk på stoff for prediksjon av ingeniørgeologiske utfordringer"* skrevet av undertegnede høsten 2019. I dette kapitlet vil det teoretiske grunnlaget bak seismikk på stoff bli kort gjengitt. Deretter vil det gis en oversikt over hvordan metoden utføres i tunnel. Det er også valgt å ta med en oversikt over undersøkte eksempelstudier fra prosjektoppgaven. Det er sammenstilt en rekke erfaringer fra eksempelstudiene som også vil være relevant i arbeidet med denne oppgaven. Avslutningsvis er det valgt å ta med et eget delkapittel om erfaringene ved bruk av metoden i Hundvågtunnelen i Ryfastprosjektet. Denne tunnelen ligger i et lignende geologisk område som deler av traseen til Rogfast. Det er derfor vurdert at erfaringene fra dette prosjektet vil være spesielt relevant for arbeidet med undersøkelsene utført på Rogfast.

### 2.1 Målsettinger i prosjektoppgaven

Prosjektoppgaven omhandler en beskrivelse av seismikk på stoff som metode og vurderinger av seismikk på stoff sin nytteverdi som forundersøkelse i tunnel. I prosjektoppgaven var målsettingene å:

- Gi en beskrivelse av seismikk på stoff sin virkemåte og teori. Dette innebar en beskrivelse av aktuelt utstyr og egenskaper ved seismiske bølger nær tunnel.
- Presentere praktisk gjennomføring av seismisk undersøkelse på stoff. Dette inkluderte en beskrivelse av oppstilling, utførelse og deloperasjoner som inngår i en seismisk undersøkelse på stoff.

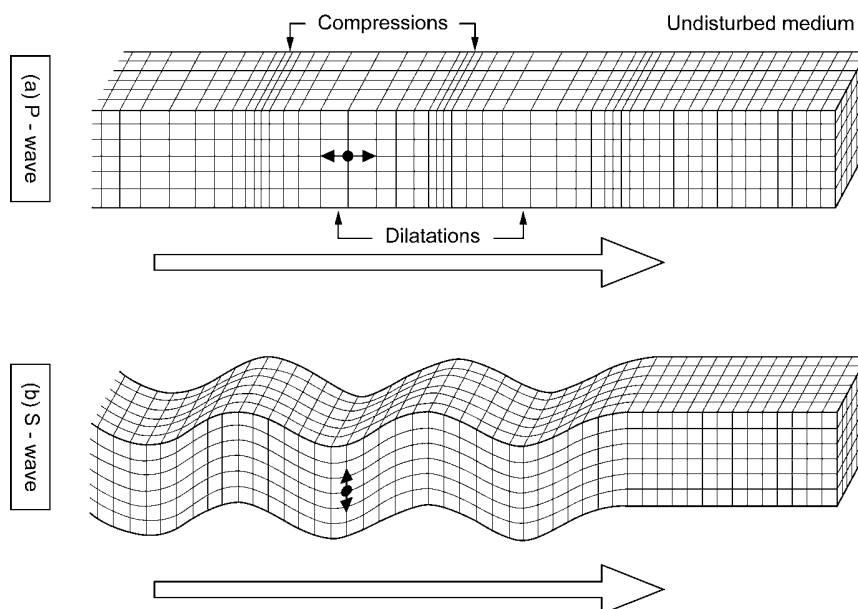
- Gjøre rede for tolkning og forventet grad av usikkerhet med tanke på prediksjon av ingeniørgeolgoiske utfordringer.

## 2.2 Teoretisk bakgrunn

I følgende delkapittel vil det teoretiske grunnlaget bak seismikk på stoff bli kort presentert. Dette inkluderer en presentasjon av seismisk bølgeforplantning, refleksjonsseismikk og bergmassen som bølgeforplantningsmedium.

### 2.2.1 Seismisk bølgeforplantning

Seismiske bølger er elastiske bølger som forplanter seg gjennom berggrunnen. De deles inn i tre forskjellige typer: P-bølger, S-bølger, og overflatebølger. P-bølger, også kalt kompresjonsbølger, forplanter seg gjennom berggrunnen ved at bergartsmaterialet avvekslende trykkes sammen og utvider seg i utbredelsesretningen. S-bølger, eller skjærbølger, forplanter seg ved at bergartsmaterialet settes i svingninger normalt på utbredelsesretningen. En illustrasjon over hvordan P-bølger og S-bølger forplanter seg gjennom berggrunnen vises i figur 2.1. P-bølger er raskere enn skjærbølgen i berggrunnen. S-bølger har den egenskap at de ikke kan forplante seg i medier som ikke tar opp skjærspenninger, som for eksempel vann. Overflatebølger kan deles inn i Rayleigh-bølger og Love-bølger. Disse bølgene kan igjen dekomponeres til kombinasjoner av P-bølger og S-bølger (Fossen, 2018).

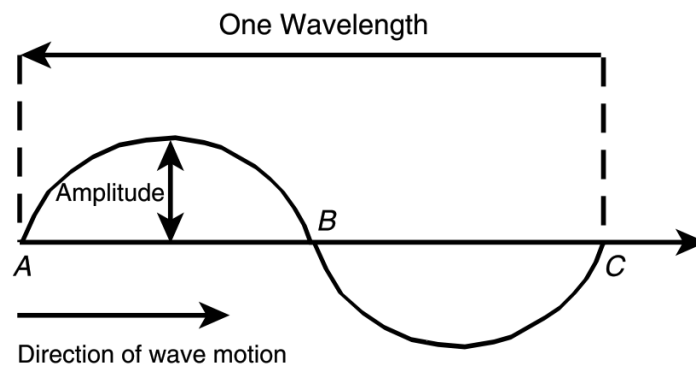


Figur 2.1: Bølgeretning og forplantningsegenskaper ved (a) P-bølger og (b) S-bølger (Barton, 2007).



I seismiske undersøkelser er det først og fremst amplituden og hastigheten til bølgene som er av interesse. Disse er de to fundamentale egenskapene til seismiske bølger som endrer seg basert på hvilke materialer bølgene beveger seg gjennom (Nanda, 2016). En skisse av den seismiske bølgebevegelsen vises i figur 2.2. Fanchi (2010) gir en oversikt over definisjoner ved bølgebevegelsen:

- Amplituden til bølgen er definert som det maksimale partikkelutslaget på bølgebevegelsen. Amplituden måles som avstanden fra en bølges største utslag til likevektstilstanden (figur 2.2).
- Bølgehastigheten er hastigheten de elastiske bølgene har når de forplanter seg gjennom ulike medier.
- Avstanden fra punkt A til punkt C i figur 2.2 er bølgelengden.
- Bølgefrequensen er antall bølger som passerer et bestemt punkt (for eksempel punkt B i figur 2.2) i løpet av et gitt tidsrom.



Figur 2.2: Skisse av bølgebevegelsen (Fanchi, 2010).

### 2.2.2 Elastiske rombølger

Det er bergartenes elastiske oppførsel som danner grunnlaget for at seismiske bølger kan forplante seg gjennom berggrunnen. Bølgeforplantningen kan sees på som forflytning av tøyingsenergi gjennom et medium. I seismiske undersøkelser forutsettes det at bergmassen responderer elastisk til påkjenninger, og at den kan beskrives av Hookes lov. I Schön (2015) defineres følgende elastisitetsmoduler for å beskrive et elastisk og isotropisk materiale:

- Young's modulus  $E$ , er definert som forholdet mellom spenning ( $\sigma$ ) og tøyning ( $\epsilon$ ) under et enaksielt spenningsforhold, uttrykt ved  $\frac{\sigma}{\epsilon}$ . E-modulen beskriver materialets motstandsevne mot elastisk deformasjon. En høyere E-modul indikerer et stivere materiale.

- Bulkkompresjonsmodulen  $k$ , er definert som forholdet mellom hydrostatisk spenning ( $\Delta P$ ) og volumetrisk tøyning ( $\Delta v/v$ ), uttrykt ved  $\frac{\Delta P}{\Delta v/v}$ . Bulkmodulen beskriver materialets motstand mot isotropisk volumetrisk tøyning under en uniform spenningstilstand.
- Skjærmodulus  $\mu$ , er definert som forholdet mellom skjærspenning ( $\tau$ ) og skjærtøyning ( $\tan \theta$ ), uttrykt ved  $\frac{\tau}{\tan \theta}$ . Skjærmodulen beskriver responsen til et materiale under skjærspenning.
- Poissons tallet  $\nu$ , er definert som det negative forholdet mellom lateral- og aksialtøyning under et enaksielt spenningsforhold, uttrykt ved  $-\frac{\epsilon_{lat}}{\epsilon_{aks}}$ . Når materialet komprimeres er Poissons tall positivt.

De presenterte elastisitetsmodulene kan blant annet brukes til å uttrykke P- og S-bølgehastigheten i bergmassen. P-bølgehastigheten (likning 2.1) er en funksjon av bergmassens bulkmodul, skjærmodul og tetthet. S-bølgehastigheten (likning 2.2) kan beskrives som en funksjon av bergmassens skjærmodul og tetthet.

- P-bølgehastigheten:

$$V_p = \sqrt{\left(\frac{k + 4\mu/3}{\rho}\right)} \quad (2.1)$$

- S-bølgehastigheten:

$$V_s = \sqrt{\left(\frac{\mu}{\rho}\right)} \quad (2.2)$$

I seismikk brukes ofte de seismiske hastighetene til å estimere bergmassens dynamiske elastisitetsmoduler. De dynamiske elastisitetsmodulene definerer forholdet mellom spenning og tilhørende tøyning i et materiale under dynamisk pålasting, og de er egenskaper hos viskoelastiske materialer (Mashinsky, 2003). De dynamiske elastisitetsmodulene er en funksjon av pålastingsfrekvens og energien materialet blir påført. I seismiske undersøkelser på stoff inngår de dynamiske elastisitetsmodulene som viktige tolkningsparametre, hvor de brukes til å vurdere kvaliteten på bergmassen.

I bergarter er de dynamiske elastisitetsmodulene vanligvis forskjellige fra de korresponderende statiske elastisitetsmodulene. Dette skyldes både bergartenes naturlige varierende og anisotrope egenskaper og forskjeller mellom hvordan modulene måles (Fjær, 2019). Dynamiske elastisitetsmoduler måles under høyere pålastingsfrekvens og lavere tøyningssamplituder sammenlignet med de statiske elastisitetsmodulene. Modulene er derfor ikke direkte sammenlignbare da de bestemmes på et forskjellig deformasjon grunnlag. Forskjellen mellom de statiske og dynamiske elastisitetsmodulene kan være en faktor på mellom 1-20 (Wang, 2000). I litteraturen er det

etablert flere empiriske korrelasjoner mellom modulene, både på lineær form (Wang, 2000) og ikke-lineær form (Heerden, 1987), som har vist seg å gi gode sammenhenger. Schön (2015) oppsummerer tre generelle forskjeller mellom den dynamiske og statiske E-modulen:

- Den statiske E-modulen er generelt lavere enn den dynamiske E-modulen.
- Forskjellen mellom de øker med økende grad av oppsprekking og porøsitet. De største forskjellene er blitt observert for ukonsoliderte bergarter.
- Ved økende omslutningstrykk reduseres forskjellene mellom den dynamiske og statiske E-modulen.

Den dynamiske E-modulen ( $E_{dyn.}$ ) er en funksjon av bergartenes tyngdetetthet og P- og S-bølgehastighet (likning 2.3). Dynamisk Poissons tall ( $\nu_{dyn.}$ ) er en funksjon av bergartenes P- og S-bølgehastighet (likning 2.4).

$$E_{dyn.} = \rho V_s^2 \left( \frac{3V_p^2 - 4V_s^2}{V_p^2 - V_s^2} \right) \quad (2.3)$$

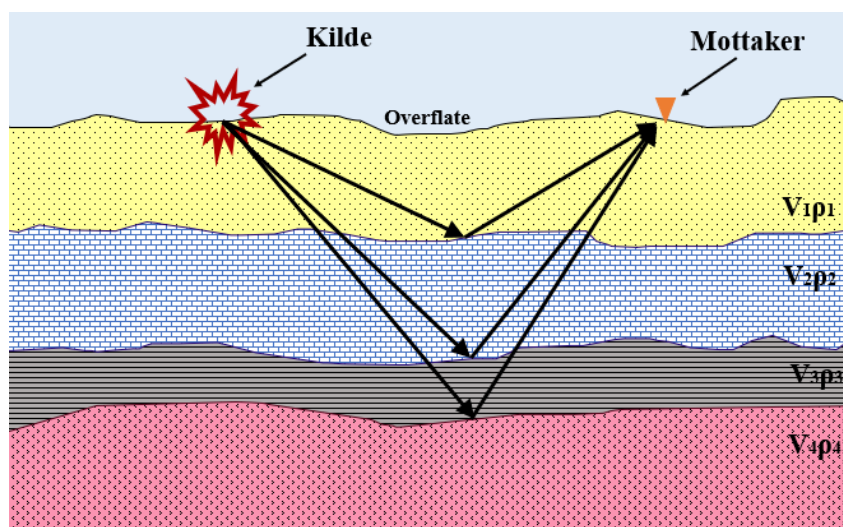
$$\nu_{dyn.} = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)} \quad (2.4)$$

### 2.2.3 Refleksjonsseismikk

Seismikk på stoff baserer seg på prinsippene innenfor refleksjonsseismikk. Refleksjonsseismikk er en geofysisk metode, hvor reflekterte seismiske bølger fra bergrunnen analyseres og måles for å gi en fortolkning av geologiske forhold mot dypet (Nanda, 2016). En prinsippsskisse av metoden vises i figur 2.3. Seismiske bølger genereres fra kontrollerte kilder og forplanter seg nedover i bergrunnen, hvor de møter på ulike geologiske grenseflater som sprekker, bergartsgrenser og forkastninger. Slike grenseflater representerer kontraster i bergmassens fysiske egenskaper som kan uttrykkes i form av akustisk impedans. Akustisk impedans ( $Z$ ) er produktet av den seismiske hastigheten ( $V$ ) og tyngdetettheten ( $\rho$ ) i en geologisk struktur (likning 2.5).

$$Z = \rho V \quad (2.5)$$

Når seismiske bølger støter på grenseflater som representerer en kontrast i akustisk impedans, vil en del av den seismiske energien bli reflektert tilbake til overflaten. Kontrasten i akustisk impedans uttrykkes i refleksjonskoeffisienten (likning 2.6), som gir et mål på hvor mye av den seismiske energien som blir reflektert i grenseflaten. En lav refleksjonskoeffisient indikerer at



Figur 2.3: Prinsippskisse av refleksjonsseismikk.

det meste av energien transmitterer gjennom grenseflaten, mens en høy verdi representerer en mer fullstendig refleksjon. Negative verdier av refleksjonskoeffisienten indikerer faseskifte av den seismiske bølgen. Summen av reflektert og transmittert energi er lik energien til den innkommende bølgen (Nanda, 2016).

$$R = \frac{(Z_2 - Z_1)}{(Z_2 + Z_1)} \quad \{-1 < R < 1\} \quad (2.6)$$

I overflaten blir de seismiske bølgene registrert av mottakere (geofoner). Tiden det tar fra bølgen blir generert, reflektert i en grenseflate i berggrunnen, og til den blir registrert av en geofon, kalles toveis gangtid. Prinsippet bak refleksjonsseismikk er å bruke informasjon om toveis gangtid og seismiske hastigheter i ulike geologiske strukturer, til å lage modeller av berggrunnen og finne avstanden til grenseflater mot dypet.

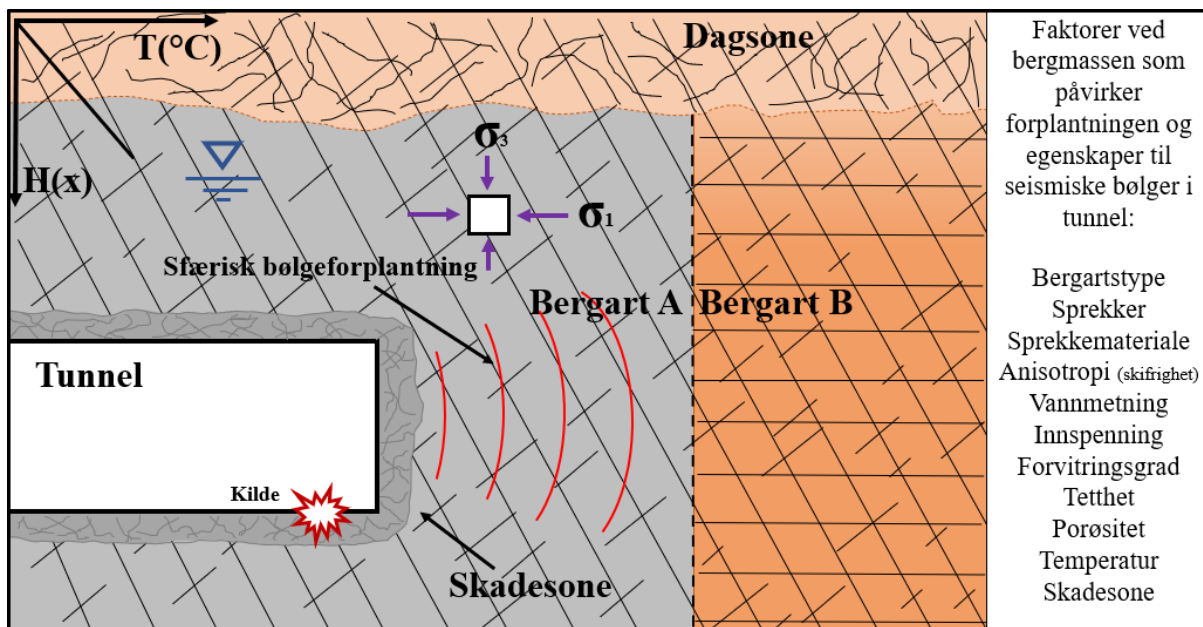
## 2.2.4 Bergmassen som bølgeforplantningsmedium

Kunnskap om hvordan bergmassens egenskaper påvirker forplantningen til seismiske bølger er sentralt for å forstå muligheter og begrensninger til seismiske undersøkelser av berggrunnen. I prosjektoppgaven ble det tatt utgangspunkt i litteratur fra Nanda (2016) og Barton (2007), som gir en god oversikt over bergmassen som bølgeforplantningsmedium. Disse forfatterne skiller mellom bergmassens energitapende og miljømessige faktorer.

Seismiske bølger taper energi gjennom fire prosesser: absorpsjon, spredning, transmisjonstap over grenseflater og geometrisk spredning. Energitap i form av absorpsjon skyldes friksjon mel-

lom mineralkorn, sprekker og væsker når partikler i bergmassen settes i sving. Spredningstap oppstår som følge av bergmassens inhomogene egenskaper, hvor seismiske bølger vil bli spredt og tape energi når de treffer geologiske strukturer som sprekkesoner og forkastninger. For hver grenseflate en seismisk bølge transmitterer igjennom, vil den tape litt energi. Dette energitapet kalles transmisjonstap, og det avhenger både av type og antall grenseflater bølgen støter på når den forplanter seg gjennom berggrunnen. Energitalpet i form av geometrisk spredning skyldes at bølgene sprer seg radielt utover i bergmassen. De seismiske bølgene taper dermed energi som en funksjon av avstand fra energikilden og bølgehastigheten (Nanda, 2016).

I arbeidet med prosjektoppgaven ble det sett nærmere på egenskaper ved bergmassen som påvirker forplantningen og hastigheten til de seismiske bølgene nær tunnel. En prinsippsskisse som viser disse finnes i figur 2.4. Barton (2007) diskuterer at den seismiske hastigheten i bergmassen påvirkes av faktorer som tyngdetetthet, porøsitet, vannmetning, forvitningsgrad, innspenning og temperatur. Generelt øker den seismiske hastigheten ved økende tyngdetetthet, vannmetning og innspenning. I motsetning vil den seismiske hastigheten reduseres ved økende porøsitet, forvitningsgrad og temperatur. Normalt så øker den seismiske hastigheten mot dypet, hvor bergmassen går fra forvitret og oppsprukket dagfjell til å bli mer homogen og massiv. Høyere innspenning vil også føre til lukning av sprekker og porerom. Dette gjør at bergmassen vanligvis blir mer elastisk mot dypet, som igjen resulterer i en økning i seismisk hastighet. I kapittel 3 vil det bli sett nærmere på enkelte etablerte empiriske korrelasjoner mellom bergmassens egenskaper og seismiske hastigheter.



Figur 2.4: Prinsippsskisse av egenskaper ved bergmassen som påvirker forplantningen til seismiske bølger i tunnel.

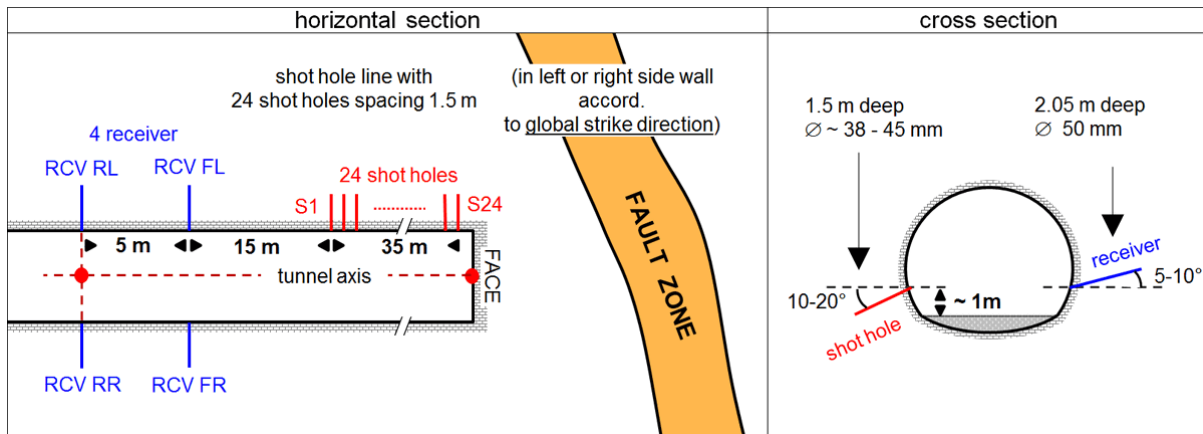
Schön (2015) fant at den seismiske hastigheten vanligvis øker fra felsiske til mafiske bergarter. De høyeste hastighetene observeres i bergarter som diabaser og gabbroer. I metamorfe bergarter som gneis og fyllitt vil ofte skifrihet og foliasjon gi utslag i anisotropieffekter. Den seismiske hastigheten er raskere langs skifriheten enn normalt på den. Dette skyldes at en seismisk bølge vil møte mindre motstand langs en grenseflate sammenlignet med når den forplanter seg normalt på den. Sedimentære bergarter har høy variasjon i seismisk hastighet. De høyeste hastighetene finnes i bergarter med høy tyngdetetthet og lav porøsitet. Den seismiske hastigheten er også kontrollert av bergmassens oppsprekingsgrad, og den vil bli kraftig redusert i tett oppsprukket berg (Palmstrøm, 1995). Det er imidlertid usikkert i hvilken grad sprekkefyllinger og sprekkeforhold påvirker den seismiske hastigheten i berggrunnen. Dette vil bli diskutert mer detaljert i kapittel 3.

### 2.3 Tunnel Seismic Prediction (TSP)

Seismikk på stoff er seismiske undersøkelser utført i tunnel for å forutsi grunnforholdene foran stoff. I prosjektoppgaven ble det tatt utgangspunkt i Amberg technologies sin metode *Tunnel seismic prediction* (TSP). I følgende delkapittel vil opprigging av en undersøkelse, aktuelt utstyr, utførelse og virkemåte bli presentert. Informasjon for å beskrive denne metoden er hentet fra Ambergs brukermanual (Amberg Technologies AG (2017b)).

#### 2.3.1 Oppstilling av undersøkelse

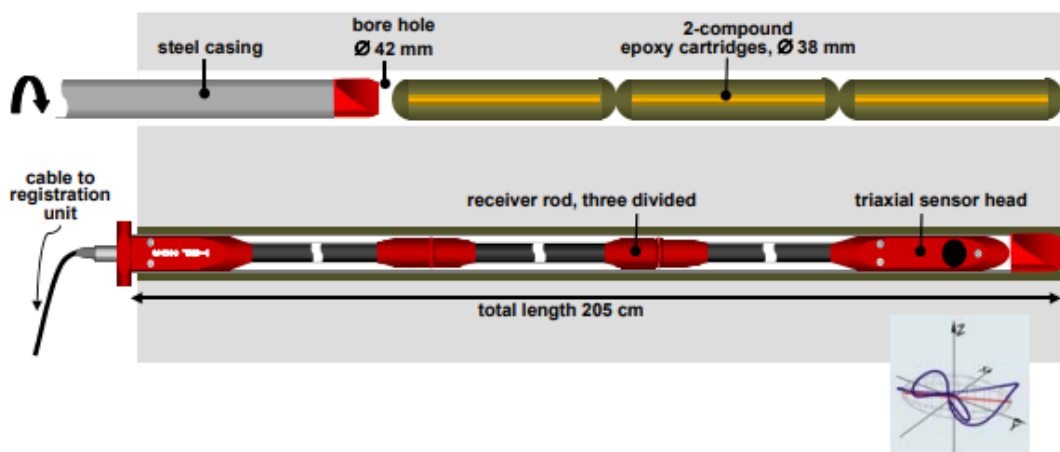
Oppstilling, geometri og dimensjoner ved tilrigging av en standard TSP-undersøkelse fremgår av figur 2.5. I denne metoden bores 24 skuddhull i én linje i tunnelkonturen bak stoff. Skuddlinjen etableres på høyre eller venstre side av tunnelen, avhengig av forventet orientering til den geologiske strukturen som skal undersøkes. Det første skuddhullet bores ca. 1-5 m bak stoff. Dette gjøres for å unngå risikofylt arbeid på eller i umiddelbar nærhet til stoff. Hullene bores 1,5 m dype med diameter  $\phi = 38-45$  mm og vinklet nedover  $10-20^\circ$ . Avstanden mellom skuddhullene er 1,5 m. Skuddhullene lades med eksplosive ladninger på 20-200 g, hvor ladningsmengden dimensjoneres etter den seismiske responsen (dempningen av den seismiske energien) i bergmassen. Det er vanlig å benytte større ladningsmengder i skuddhullene nærmest stoff, hvor avstanden mellom kilde og mottaker er større. Skuddhullene fylles deretter med vann eller sand, som fungerer som en pakning mellom ladningen og borchullet (Amberg Technologies AG, 2017b).



Figur 2.5: Oversikt over standard oppstilling for en TSP-undersøkelse (Amberg Technologies AG, 2017b).

### 2.3.2 Beskrivelse av utstyr

Geofonene installeres 15 m bak det siste skuddhullet. I TSP benyttes fire geofoner, to på hver side av tunnelen. Geofonene installeres i 2 m dype borhull med diameter  $\phi = 50$  mm. Disse hullene vinkles oppover med en vinkel på ca.  $5-10^\circ$ , slik at borstøv og løst materiale kan renne ut. Avstanden mellom geofonene er 5 m. Grunnen til at kilder og geofoner installeres i borehull i bergmassen er for å unngå at den seismiske energien skal forplante seg i skadesonen rundt tunnelen. Skadesonen er mer oppknust sammenlignet med den uforstyrrede bergmassen, og fører til raskere demping av de genererte seismiske bølgene (Dickmann, 2014). I hvert geofonhull limes et fôringsrør i stål med to-komponents polyester som huser geofonen. Geofonene består av sensitive triaksiale seismiske akselerometere som måler innkommende signaler i tre ortogonale retninger. En illustrasjon over installasjon og oppbygging av geofonen vises i figur 2.6.

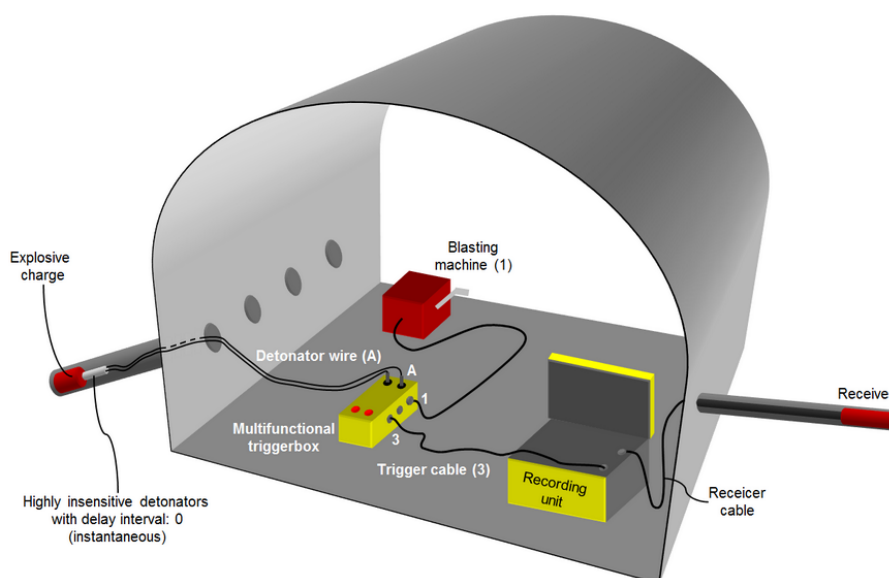


Figur 2.6: Oppbygging og installasjon av geofonene i borhull i bergmassen (Dickmann, 2005).

Boring av skudd- og geofonhull gjøres fortrinnsvis med en borrhigg. Boring av disse hullene kan kombineres med installasjon av bergsikring, eller under driftspauser på ca. én time. Etter at alle hullene er boret må de innmåles slik at nøyaktig posisjon, lengde, og vinkel på borehullene er kjent. Denne informasjonen brukes til å plassere skuddhull, geofoner og predikerte strukturer i samme koordinatsystem (Amberg Technologies AG, 2017b).

Det er også mulig å modifisere oppstillingen. Under komplekse geologiske forhold kan det være naturlig å installere én ekstra skuddlinje på motsatt tunnelside for å sikre tilstrekkelig oppløsning av de seismiske dataene. Avhengig av plassmangel, eller fysiske hindringer, kan det også være aktuelt å nedjustere antall skuddhull (Amberg Technologies AG, 2017b).

Figur 2.7 viser en oversikt over aktuelt utstyr som brukes i en TSP-undersøkelse, og hvordan det sammenkoples. Geofonene er koblet sammen med en registreringsenhet, som konverterer de seismiske signalene fra analoge til digitale data. Triggerboksen er koblet til sprengningsterminalen og til tennerne i skuddhullene, og sørger for bedre kontroll av forsinkelsestiden mellom skuddene. Registreringsenheten er koblet sammen med en feltdatamaskin, hvor dataprosessering- og behandling utføres. Det henvises til Amberg Technologies AG (2017b), brukermanualen til TSP 303, for ytterligere beskrivelser av tilrigging og oppstilling for en TSP-undersøkelse.



**Figur 2.7: Oversikt over utstyr som brukes i en TSP-undersøkelse, og hvordan det sammenkoples (Amberg Technologies AG, 2017b).**

### 2.3.3 Utførelse

Under utførelsen av en undersøkelse skytes de 24 skuddhullene enten enkeltvis, eller i grupper på seks skudd. I forbindelse med den første undersøkelsen i et prosjekt, eller hvor den seismiske

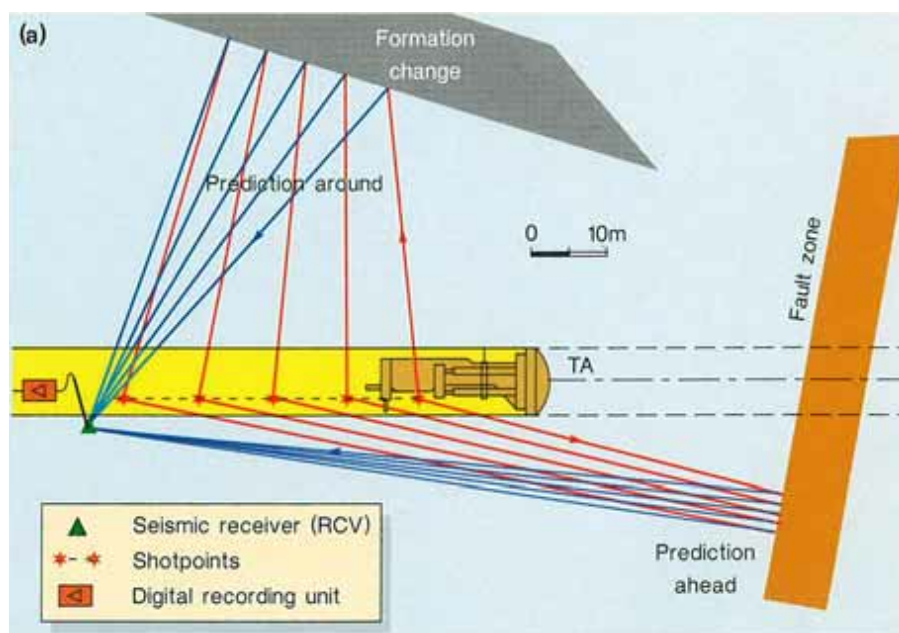


responsen til bergmassen er ukjent, er det vanlig å skyte skuddene enkeltvis. Dette gjør det mulig å endre de individuelle sprengladningene mellom hvert skudd. Fordelen med å skyte skuddene gruppevis er besparelse av tid. Hvorvidt dette kan gjøres avhenger også av forsinkelsestiden på tennerne som benyttes, brukers erfaring med utstyret og hvor krevende de antatte forutliggende grunnforholdene er. Under utførelse av undersøkelsen er det svært viktig at arbeider eller operasjoner som kan utgjøre en kilde til seismisk støy stoppes. I brukermanualene anbefales det å utføre undersøkelsene når det er lite aktivitet i tunnelen, som for eksempel under servicepauser eller i et skiftbytte. Ved driving av tunneler med to løp utføres vanligvis undersøkelsen i det tunnellopet som er kommet lengst for å unngå at naboløpet påvirker undersøkelsen (Amberg Technologies AG, 2017b).

### 2.3.4 Virkemåte og tolkning

Seismikk på stoff baserer seg på prinsipper innen refleksjonsseismikk. En prinsippsskisse av virkemåten til seismikk på stoff vises i figur 2.8. De eksplosive ladningene generer seismiske bølger som forplanter seg i bergmassen foran stoff og radielt utover fra tunnelkonturen (røde piler i figur 2.8). Når disse bølgene treffer geologisk strukturer og grenseflater som representerer kontraster i akustisk impedans (produktet av tyngdetetthet og seismisk hastighet), vil en del av energien reflekteres tilbake mot tunnel (blå piler i figur 2.8). Slike grenseflater kan for eksempel være bergartsgrenser eller svakhetssoner (figur 2.8). I metoden analyseres egenskaper ved de reflekterte seismiske bølgene som gangtid, amplitude, fase, polaritet og hastighet. Disse dataene behandles og prosesseres via programvare utviklet av Amberg Technologies. Resultatene fremstilles i et brukergrensesnitt som viser en oversikt over estimerte rombølgehastigheter og bergmekaniske parametre som funksjon av profilmeter foran stoff. Denne informasjonen brukes til å tolke og vurdere ingeniørgeologiske forhold opptil 150 m foran stoff. Programvaren gjør det også mulig å lage 3D-modeller av den forutliggende geologien, slik at for eksempel mektighet og orientering av svakhetssoner kan bestemmes (Amberg Technologies AG, 2017b).

Tolkning av dataene sammenlignes alltid med referanseverdier på bergmekaniske parametre. Disse referanseverdiene beregnes ved å bruke informasjon fra direktebølgen, som går i bergmassen mellom skuddhullene og geofonene foran stoff. Brukeren sammenligner da predikerte forhold opp mot grunnforholdene og referanseverdiene som foreligger. Basert på dette kan brukeren få et innblikk i om de forutliggende grunnforholdene ventes å bli bedre eller dårligere enn grunnforholdene som foreligger ved stoff. Brukergrensesnittet til TSP og utgangspunkt for tolkning vil presenteres mer detaljert i kapittel 6, i forbindelse med analysen av de seismiske undersøkelsene på stoff i tverrslagstunnelen på Arsvågen.



Figur 2.8: Prinsippkisse av virkemåten til seismikk på stoff (Sattel et al., 1996).

## 2.4 Oversikt eksempelstudier

I arbeidet med prosjektoppgaven ble det utført en litteraturstudie på et relevant utvalg av nyere internasjonale tunnelprosjekter, hvor TSP er benyttet. Hensikten med disse var å innhente informasjon om hvordan prediksjoner av ingeniørgeologiske utfordringer gjøres og tolkes. Studiene ga også svar på hvordan utstyret tilriggeres, hvordan en seismisk undersøkelse fungerer i tunnel og hvilke usikkerheter metoden behefter. Følgende delkapitler vil presentere de mest sentrale funnene fra litteraturstudien utført i prosjektoppgaven. For flere detaljer henvises det til Nordbø (2019).

### 2.4.1 Prediksjon av ingeniørgeologiske utfordringer

Tabell 2.1 oppsummerer sentrale eksempelstudier fra prosjektoppgaven som tar for seg prediksjon av ulike ingeniørgeologiske utfordringer. I tabellen er prediksjon av de ingeniørgeologiske utfordringene inndelt etter tema som bergmassekvalitet og svakhetssoner. Deretter er det systematisert hvilke prosjekter som har omhandlet de forskjellige typene prediksjoner. Tabellen inneholder også en sammenstilling av viktige erfaringer fra studiene. Disse erfaringene vil danne et utgangspunkt under analysen av utdata fra seismikk på stoff i senere kapitler. De viktigste erfaringene fra eksempelstudiene var:

- Bergmassekvaliteten vurderes fra endringer i predikerte rombølgehastigheter ( $V_p$  og  $V_s$ ), dynamiske elastisitetsmoduler ( $E_{dyn}$  og  $\nu_{dyn}$ ) og tyngdetetthet. Kontraster i disse para-

metrene indikerer ofte kontraster i bergmassekvalitet. Eksempelvis vil lavere verdier på rombølgehastighetene indikere en reduksjon i bergmassekvalitet.

- Svakhetssoner påvises som markante lavhastighetssoner i den seismiske prognosen. De kjennetegnes ved lav  $E_{dyn}$ ,  $V_p$  og  $V_s$ . TSP muliggjør å konstruere 3D-modeller av sonene. Slike modeller kan brukes til å bestemme svakhetssoners orientering, mektighet og hvor de krysser langs den planlagte tunneltraseen.
- Parametrene  $V_p$  og tyngdetetthet er sensitive overfor endringer i bergmassens oppsprekking og porøsitet. Reduksjoner i disse parametrene indikerer mer sprekker og en generelt svakere bergmasse. En tett oppsprukket bergmasse vil ofte også ha mange sterke og tettliggende reflektorer.
- Vannforhold i bergmassen vurderes fra analyse av  $V_s$ ,  $\frac{V_p}{V_s}$  og  $\nu_{dyn}$ . Sterke S-bølgerefleksjoner og reduksjoner i  $V_s$  er ofte gode indikasjoner på mer vann i bergmassen.
- Høy dempning av den seismiske energien (frekvens og amplitude) er en god indikasjon på en svak og forvitret bergmasse.

**Tabell 2.1: En oversikt over eksempelstudier fra prosjektoppgaven som har tatt for seg tema innen prediksjon av ingeniørgeologiske utfordringer ved bruk av TSP. Tabellen er modifisert etter Nordbø (2019).**

Prediksjon av ingeniørgeologiske utfordringer			
Hovedtema	Prosjekt	Forfattere	Viktige erfaringer
Bergmassekvalitet	Tilløpstunnel, Chavimochic, Peru	Hecht-Méndez et al. (2016)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• TSP er god til å påvise endringer i bergmasseforhold og kontraster i bergmassen. Et høyt antall reflektorer i et område kan indikere høy sprekketetthet.</li> </ul>
		Amberg Technologies AG (2017a)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bergmassekvaliteten vurderes fra rombølgehastigheter (<math>V_p</math> og <math>V_s</math>) og dynamiske elastisitetsmoduler. Generelt vil lavere verdier på rombølgehastighetene og de dynamiske modulene indikere en reduksjon i bergmassens kvalitet. I likhet vil en økning i samme parametre indikere en økning i bergmassens kvalitet.</li> </ul>
	Tilløpstunnel, Pahang-Selangor, Malaysia	Ismail et al. (2013)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>V_p</math> reduseres raskt i forbindelse med høy oppsprekking eller høy porøsitet. En reduksjon i bergmassens tyngdetetthet kan indikere mer sprekker og generelt svakere bergmasse.</li> </ul>
	Ikke-navngitt tunnel, Himalaya, India	Choudhary & Dickmann (2017)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• En svak og forvitret bergmasse demper den genererte seismiske energien (frekvens og amplitude) raskere sammenlignet med en elastisk og massiv bergmasse. En lav seismisk respons kan være en indikasjon på en svak og forvitret bergmasse.</li> </ul>
Svakhetssoner	Cachí vannkraftsprosjekt, Costa Rica	Dickmann (2014)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Svakhetssoner sees som lavhastighetssoner i den seismiske prognosen. De kjennetegnes ved lave verdier av dynamisk E-modul, <math>V_p</math>, <math>V_s</math>, og tyngdetetthet.</li> <li>• Det er vanskelig å karakterisere svakhetssonene ved å utelukke betrakte seismisk informasjon alene.</li> <li>• En svakhetszone med mange sterke og tettliggende reflektorer tolkes ofte til å være en sprekkzone.</li> </ul>
	Ikke navngitt tunnel, Himalaya, India	Choudhary & Dickmann (2017)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Programvaren muliggjør å lage 3D-modeller av svakhetssoner slik at sonens orientering og krysning med tunnel kan bestemmes.</li> <li>• TSP brukes først og fremst for å verifisere lokasjon og orientering av svakhetssoner. Det bør alltid suppleres med sonderboring for optimal kontroll på forutliggende svakhetssoner.</li> </ul>
Vannforhold i bergmassen	Tilløpstunnel Uma Oya, flerbruksprosjekt, Sri Lanka	Dickmann et al. (2016)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Det er mulig å gjøre kvalitative vurderinger av vannforhold ved analyse av S-bølger og dynamisk Poissons tall. Disse må imidlertid suppleres med andre ingeniørgeologiske forundersøkelser, som for eksempel sonderboringer.</li> </ul>
		Li et al. (2010)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vann i bergmassen kan påvises når det observeres en rask reduksjon i dynamisk E-modul i kombinasjon med en sterk S-bølgerefleksjon og få etterfølgende refleksjoner.</li> </ul>
	Ikke-navngitt tunnel, Himalaya, India	Hecht-Méndez et al. (2016)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ved å utføre flere undersøkelser i samme prosjekt er det mulig å etablere en erfaringsdatabase. Denne kan brukes til å lage en oversikt over hvilke Poissons tall i bergmassen som svarer til lav, moderat og høye innlekkasjer.</li> </ul>
Karsthuler	Qiyueshan tunnelen, Kina	Lin & Li (2014)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• TSP viste seg å være et nyttig verktøy til å påvise karsthuler i bergmassen, men på grunn av strukturenes horisontale orientering var det vanskelig å bestemme nøyaktig posisjon på disse.</li> </ul>
Svake bergartslag	Ikke-navngitt tunnel, Himalaya, India	Hecht-Méndez et al. (2016)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• I prosjektet oppstod det stabilitetsproblemer knyttet til svake siltlag innad i en sandstein. Det var ikke tilstrekkelig akustisk impedans mellom disse bergartslagene til at de kunne påvises med TSP.</li> </ul>

### 2.4.2 Tolkning, usikkerhet og begrensninger ved bruk av TSP

Tabell 2.2 inneholder en oversikt over eksempelstudiene som omhandlet tolkning, usikkerhet og begrensninger ved bruk av TSP. Disse er igjen inndelt i hovedtemaer som strukturelle begrensninger og begrensninger knyttet til tunnel. Tabellen knytter også sammen prosjekter og tilhørende forfattere i de studiene som er undersøkt. I høyre kolonne er det sammenstilt viktige erfaringer. Dette er punkter som vil være sentrale i diskusjonen av seismikk på stuff sitt potensiale under drivingen av hovedløpene til Rogfast. De viktigste erfaringene fra disse eksempelstudiene var:

- Rekkevidden til seismikk på stuff er ca. 150 m, men dette avhenger av bergmassens elastiske egenskaper. Rekkevidden blir betydelig redusert i forvitret og svak bergmasse.
- Metodens evne til å avbilde ingeniørgeologiske forhold er begrenset til strukturer som utgjør en kontrast i akustisk impedans  $>20\%$  og som danner en strøk- og fallvinkel  $>25^\circ$  med tunnelens lengderetning. Metoden vil for eksempel ikke kunne påvise subhorisontale sprekker. Produsenten oppgir at metoden vil kunne påvise 80-90% av alle geologiske endringer i bergmassen.
- Metoden har en oppløsning på  $\pm 5\%$  av antall predikerte m foran stuff. Dette medfører at det foreligger høyere usikkerhet i stedfestelsen av geologiske strukturer som ligger lenger ut i undersøkelsesområdet.
- Sterke reflektorer som for eksempel en basaltintrusjon, eller en sone med mange tettliggende reflektorer kan gjøre at den transmitterte energien blir for lav til å gi en god avbildning av bakenforliggende geologi. På den måten kan enkelte strukturer bli tilsynelatende skjult i den seismiske prognosen.
- Tolkningen av utdata fra TSP sine modeller er ikke éntydig. Metoden er svært erfaringsbasert, og metodens treffsikkerhet øker etter hvert som brukeren får mer trening.

**Tabell 2.2: En oversikt over eksempelstudier fra prosjektoppgaven som har tatt for seg tema innen tolkning, usikkerhet og begrensninger ved bruk av TSP. Tabellen er modifisert etter Nordbø (2019).**

Tolkning, usikkerhet og begrensninger ved bruk av TSP			
Hovedtema	Prosjekt	Forfattere	Viktige erfaringer
Strukturelle begrensninger	Qiyueshan tunnelen, Kina	Li et al. (2010); Lin & Li (2014) Dickmann et al. (2019) Landrø (2010)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Metoden kan ikke påvise strukturer med horisontal eller sub-horisontal orientering.</li> <li>• Det kan være vanskelig å påvise svakhetssoner som går parallelt med tunnelen</li> <li>• Sterke reflektorer (høy akustisk impedans) som for eksempel en basaltintrusjon kan gjøre det vanskelig å avbilde bakenforliggende geologi.</li> </ul>
	Hundvågtunnelen Rv. 13 Ryfast, Norge	Hecht-Méndez & Dickmann (2017)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lav overdekning førte til reverbasjoner av de genererte seismiske bølgene mellom sedimenter og underliggende bergmasse. Dette ga multipler (forsinkede refleksjoner) i dataene.</li> </ul>
Begrensninger knyttet til tunnel	Hundvågtunnelen Rv. 13 Ryfast, Norge	Hecht-Méndez & Dickmann (2016, 2017)  Li et al. (2017); Wang et al. (2019)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Utfordringer knyttet til å finne riktig ladningsmengde til de forskjellige skuddhullene. En stor skadesone og et stort tverrsnitt (ca. 13 m · 8 m) førte til høy variasjon i styrken på de mottatte seismiske signalene.</li> <li>• Ved driving av toløpstunneler bør seismikken skytes i det tunneløpet som er kommet lengst for å unngå at naboløpet påvirker.</li> <li>• Konfigurasjon mellom geofoner og kilder er romlig begrenset av tunnelgeometrien. Dette gir opphav til små refleksjon- og spredningssvinkler som igjen vil resultere i lavere oppløsning av den seismiske dataen.</li> </ul>
Tolkning	Tilløpstunnel, Pahang-Selangor, Malaysia	Dickmann & Krueger (2014)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tolkninger fra TSP sine modeller er ikke éntydige. Brukeren bør ikke overtolke dataen, men forsøke å holde den geologiske prognosen så enkel som mulig og fokusert på de mest relevante oppdagelsene. Modell-drevet tolkning reduserer den konseptuelle usikkerheten.</li> </ul>
	Gotthard Base Tunnel, Sveits	Dickmann et al. (2011); Lüth et al. (2009)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Etter hvert som det utføres seismiske undersøkelser bør det etableres en erfaringsdatabase for å gjøre det enklere å koble seismiske prediksjoner opp mot aktuell geologi.</li> </ul>
Rekkevidde og oppløsning	Tilløpstunnel, Chavimochic, Peru	Hecht-Méndez & Dickmann (2016); Amberg Technologies AG (2017b)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Den seismiske oppløsningen er <math>\pm 5\%</math> av antall predikerte m foran stoff. TSP kan påvise ca. 80-90% av alle geologiske endringer i bergmassen. Rekkevidden er 150 m, men dette avhenger av bergmassen elastiske egenskaper. Rekkevidden blir betydelig redusert i oppsprukket og forvitret bergmassen.</li> </ul>
Kombinasjon med andre ingeniør-geologiske data	Tilløpstunnel Pahang-Selangor, Malaysia	Ismail et al. (2013); Dickman (2012)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mulig å korrelere de seismiske prediksjonene med driveparametre fra TBM.</li> </ul>
	Tilløpstunnel, Chavimochic, Peru	Hecht-Méndez et al. (2016)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• TSP-resultater sammenlignes med MWD-data.</li> </ul>
	Hurongxi motorveg, Jinping II vannkraftverk, og Kiaochow Bay undersjøiske tunnel i Kina.	Li et al. (2010)  Barton (2007)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• TSP i kombinasjon med andre geofysiske metoder (elektriske metoder).</li> <li>• Korrelasjon mellom Vp fra refraksjonseismikk og bergmassekvalitet (Q-verdi).</li> </ul>
	Tunnel Semnan, Iran	Dickmann et al. (2019) Asadollahi & Foroozan (2006)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Det ligger et stort potensial knyttet til å sammenstille de seismiske prediksjonene med annen ingeniørgeologiske data i BIM.</li> <li>• Bruker verdier av dynamisk E-modul fra TSP for å estimere bergmassens deformasjonsmodulus og RMR-verdier.</li> </ul>

### 2.4.3 Oppsummerende vurderinger fra litteraturstudien

I prosjektoppgaven ble det vurdert at seismikk på stoff kan ha stor nytteverdi som forundersøkelse i tunnel. TSP kan først og fremst gi viktig tilleggsinformasjon om grunnforholdene foran stoff i prosjekter hvor den geologiske usikkerheten er høy. Seismikk på stoff har lang rekkevidde (150 m) og god oppløsning. Dette gjør det mulig å starte den ingeniørgeologiske risikovurderingen mye tidligere enn før.

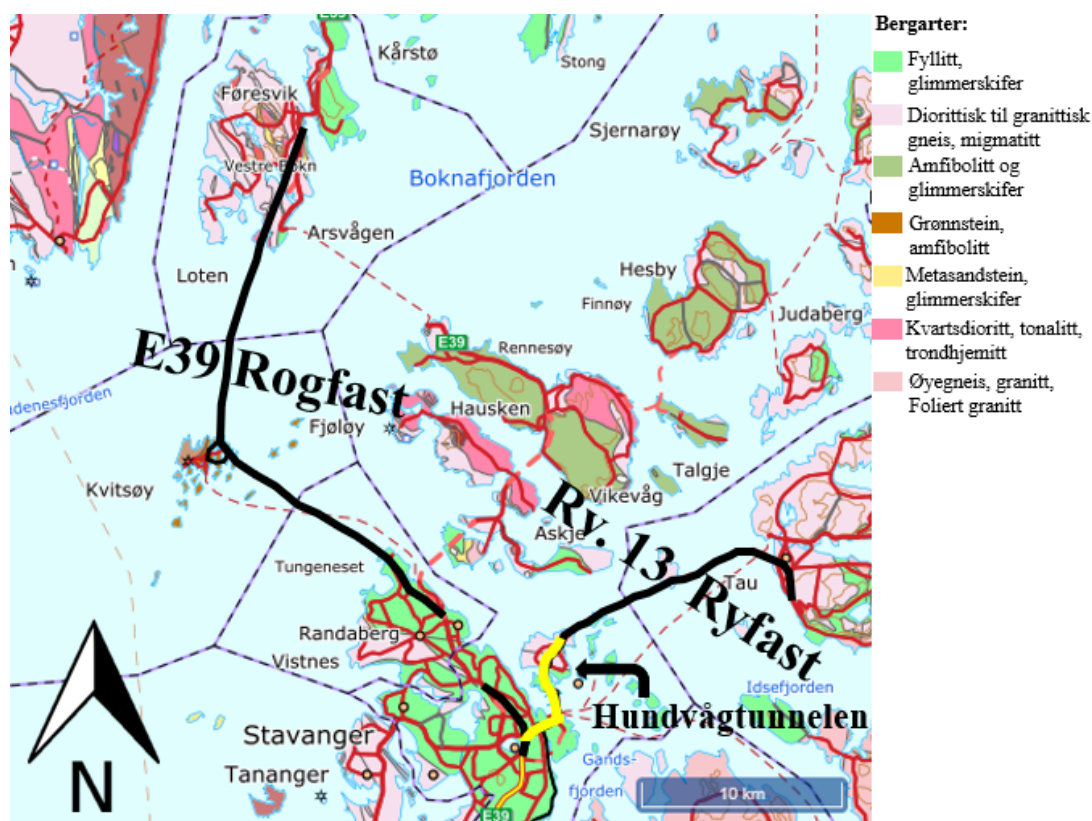
Fra arbeidet med prosjektoppgaven ble det erfart at seismikk på stoff er spesielt godt egnet til å fange opp tydelige kontraster i bergmassen, som for eksempel svakhetssoner, bergartsoverganger og gjennomsettende diskontinuiteter. Bruken av TSP behefter imidlertid en del usikkerheter, som nevnt i forrige delkapittel. For optimal kontroll og karakteristikk av bergmassen og svakhetssoner bør det alltid suppleres med sonderboring. Ved påvisning av mektige og potensielt krevende svakhetssoner vil det også være aktuelt å utføre kjerneboring på stoff.

## 2.5 Erfaringer fra Hundvågtunnelen

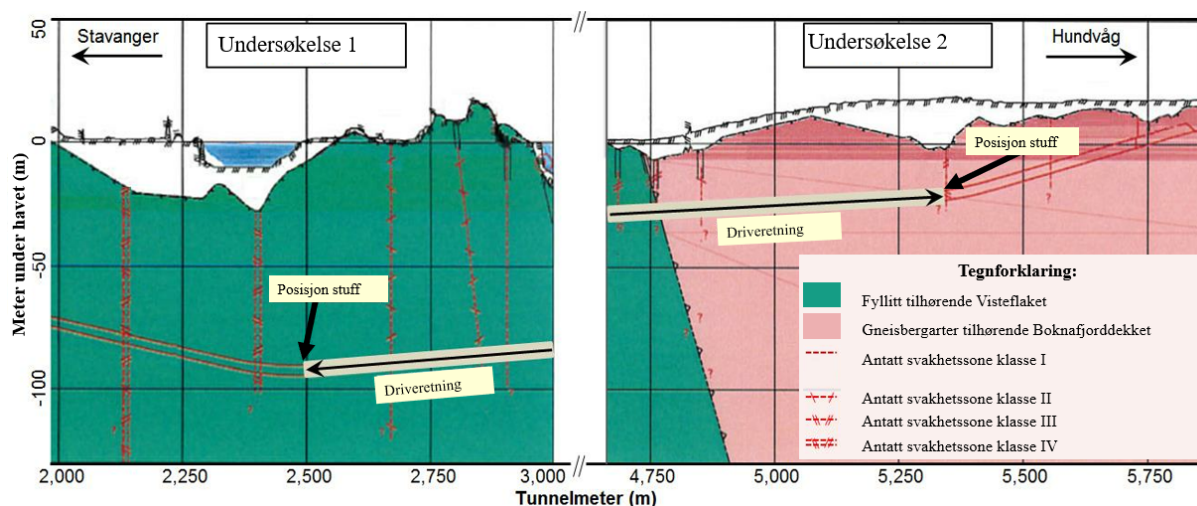
I juni 2016 ble Amberg engasjert av Statens vegvesen for å belyse potensialet og brukervennligheten til TSP 303 (Tunnel Seismic Prediction). Det ble utført to seismiske undersøkelser på stoff i Hundvågtunnelen i Ryfastprosjektet (figur 2.9). Den første undersøkelsen ble utført på stoff mot Stavanger mens den andre undersøkelsen ble utført på stoff mot Hundvåg. Den første undersøkelsen hadde som mål å påvise en potensiell svakhetszone ca. 100 m foran stoff. I den andre undersøkelsen var det antatt at det ville ligge en svakhetszone like foran stoff. I tillegg var det forventet en bergartsgrense mellom fyllitt og gneis. En oversikt over hvor de to undersøkelsene ble utført finnes i figur 2.10. Informasjon for å beskrive disse undersøkelsene er hentet fra Hecht-Méndez & Dickmann (2016, 2017).

Den første undersøkelsen ble utført ved profilnummer 2495 mot synkende profilnummer (figur 2.10). Det ble predikert tilsvarende bergmasseforhold som fantes ved stoff. Bergmassen bestod av en kompetent fyllitt av god kvalitet med enkelte leirfylte sprekker og lokalt tettere oppsprekking. De predikerte forholdene stemte godt med faktiske geologiske forhold. Svakhetssonen 100 m foran stoff, som var påvist med refraksjonseismikk på havbunnen, ble ikke igjenfunnet verken med TSP eller under driving. Undersøkelsen hadde en rekkevidde på 142 m foran stoff.

Undersøkelse nr. 2 ble utført ved profilnummer 5356 mot økende profilnummer (figur 2.10). Prognosen fra TSP indikerte markante reduksjoner i P-bølgehastighet og dynamisk E-modul fra ca. 1 m foran stoff. Dette ble tolket som begynnelsen på overgangssonen fra fyllitt til grunnfjellsgneis. Fra ca. 8 m til 27 m foran stoff ble det predikert en stor forkastning med potensial



Figur 2.9: Oversikt over traseen til Hundvågtunnelen (gul) i Ryfastprosjektet, hvor det ble utført to seismiske undersøkelser på stoff i 2016. Omtrentlig trasé E39 Rogfast og Rv. 13 Ryfast er skissert i svart. Modifisert utklipp fra NGU sitt berggrunnsgeologiske kart (N250) (NGU, 2020).



Figur 2.10: En oversikt over hvor de to seismiske undersøkelsene ble utført i Hundvågtunnelen 2016. Figuren er modifisert etter Hecht-Méndez & Dickmann (2017).



for vanninnbrudd i midtre deler av sonen. Fra 27 m til 132 m foran stuff viste seismikken en gradvis økning i rombølgehastighetene,  $E_{dyn.}$  og  $\nu_{dyn.}$ . På bakgrunn av disse dataene ble det antatt at tunnelen ville komme inn i grunnfjellsgneisen etter forkastningen.

Prediksjonene stemte godt med faktiske bergmasseforhold i tunnel. Basert på den predikerte forkastningen startet entreprenør med forinjeksjon fra stuff. Under driving ble det oppdaget en 19 m bred sprekesone med svært dårlig bergmassekvalitet. Deretter fulgte en 12 m overgangssone fra fyllitt til grunnfjellsgneis. Prediksjonsrekkevidden var 132 m. Basert på en gjennomgang av erfaringene og beskrivelsene av undersøkelser i Hundvågtunnelen (Hecht-Méndez & Dickmann, 2016, 2017), er følgende sluttbemerkninger sammenstilt:

- Seismikk på stuff ga nyttige tilleggsbeskrivelser av bergmasseforholdene foran stuff. Prediksjonene samsvarte bra med faktiske geologiske forhold i tunnel.
- I undersøkelse nr. 2 ble det oppdaget multipler i dataene. Multipler er forsinkede refleksjoner som interferer med hovedrefleksjonene fra tilsiktede reflektorer. De er uønskede i dataprosesseringen da de kan gjøre det vanskeligere å tolke resultatene. Det ble erfart at den relativt lave overdekningen (ca. 15 m) ga opphav til reverbasjoner av den utsendte seismiske energien mellom sedimenter og underliggende bergmasse. Slike fenomener kan oppstå mellom to lag med høy kontrast i akustisk impedans.
- Under utførelsen av de seismiske undersøkelsene oppstod det utfordringer knyttet til å finne riktig ladningsmengde i skuddhullene. Det var høy variasjon i signalstyrke på de motatte signalene. Det ble registrert verdier både under og over den dimensjonerte rekkevidden på geofonene. Personell fra Amberg (leverandør) mente at det store tunnelvernsnittet (ca. 13 m · 8 m) og en dyp skadesone rundt tunnel førte til stor variasjon i demping av den utsendte seismiske energien. Dette problemet ble løst ved å finne tilpassede ladningsmengder i hvert enkelt skuddhull.
- Ved driving av en toløpstunnel bør seismikk på stuff helst utføres i det tunnellopet som er kommet lengst. Ved kort stabbrebredde mellom to tunnellop kan naboløpet påvirke utbredelsen av de genererte seismiske bølgene.
- Hver undersøkelse tok samlet ca. 4-5 timer å utføre. Dette inkluderte ca. 2-2,5 timer til boring av skudd- og geofonhull. Under datainnsamlingen ble all aktivitet i det tunnellopet undersøkelsen fant sted stoppet.
- Det ble erfart at det var viktig å opprette en god dialog med entreprenør for å kommunisere oppdagelsene i de seismiske prognosene.



## Kapittel 3

# Empiriske korrelasjoner mellom bergmassens egenskaper og seismiske hastigheter

I kapittel 2 ble det gjengitt hvilke egenskaper ved bergmassen som påvirker forplantningen til seismiske bølger. I følgende kapittel vil det presenteres et utvalg av relevante og etablerte empiriske korrelasjoner mellom bergmassens egenskaper og seismiske hastigheter fra litteraturen. Flere av disse korrelasjonene er i stor grad basert på lab- og refraksjonseismiske undersøkelser. I kapittel 6 vil enkelte av disse korrelasjonene etterprøves for å undersøke hvorvidt de også kan anvendes for seismiske undersøkelser på stuff.

### 3.1 Bergmassens oppsprekking

Bergmassens seismiske hastighet er i stor grad bestemt av bergmassens oppsprekking (Sjøgren et al., 1979). Både sprekkefrekvens, orientering på sprekkesettene, og i hvilken grad sprekken er gjennomsettende påvirker den seismiske hastighet i bergrunnen. Åpne og luftfylte sprekker virker som akustiske barrierer i bergmassen og medfører at den seismiske hastigheten dempes raskere. Den seismiske hastigheten er alltid raskere langs sprekker enn normalt på (Palmstrøm, 1995) (se også kapittel 2). Dette resulterer i at den seismiske hastigheten i bergrunnen varierer avhengig av hvilken retning den måles i.

Rock Quality Designation (*RQD*) er en parameter som gir en beskrivelse av bergmassens opp-

sprekking. Parameteren ble introdusert av Deere i 1963 og er definert ut fra borkjerner som: ”summen av lengdene av alle kjernebiter med lengde over 10 cm i prosent av hele kjernelengden”(NGI, 2015). RQD oppgis i et prosenttall mellom 0 og 100. Parameteren kan også estimeres ved kjennskap til P-bølgehastigheten i bergmassen og til den korresponderende intakte kjerneprøven ved bruk av likning 3.1 (Deere et al., 1967). I likningen er  $V_{pF}$  P-bølgehastigheten i in-situ bergmasse mens  $V_{pL}$  er den korresponderende P-bølgehastigheten i den intakte kjerneprøven målt med ultralyd. Denne relasjonen er approksimativ og tar ikke høyde for variasjoner i for eksempel vannmetning og innspenning. I tillegg vil faktorer som prøvens dimensjoner og geometri, hvordan prøven prepareres og type testmetode påvirke resultatet (Rummel & van Heerden, 1978).

$$RQD = \left( \frac{V_{pF}}{V_{pL}} \right)^2 \cdot 100\% \quad (3.1)$$

Sjøgren et al. (1979) og Palmstrøm (1995) introduserte en hyperbolsk sammenheng mellom RQD og P-bølgehastigheten, gitt i likning 3.2. I likningen er  $V_{pF}$  P-bølgehastigheten i in-situ bergmasse,  $V_{pq}$  er den gjennomsnittlige P-bølgehastigheten i en sprekkefri bergmasse mens  $k_q$  er en konstant som tar høyde for in-situ bergmasseforhold. Parametrene  $V_{pq}$  og  $k_q$  bestemmes ved regresjonsanalyse basert på data fra områder hvor P-bølgehastigheten og korresponderende RQD-verdier er kjent.

$$RQD = \frac{V_{pq} - V_{pF}}{V_{pq} V_{pF} k_q} \cdot 100\% \quad (3.2)$$

## 3.2 Sprekkeforhold

Sprekkeforhold som sprekkegeometri, sprekkeåpning, sprekkeruhet og type sprekke materiale påvirker stivheten på sprekker. Slike faktorer vil dermed også påvirke den akustiske lukningen av sprekker mot dypet, som da har betydning for den seismiske hastigheten i berggrunnen (Bandis et al., 1983; Stacey, 1976). Det er imidlertid usikkert hvor stor påvirkning disse egenskapene har på den seismiske hastigheten i berggrunnen, og hvilken effekt for eksempel sprekkeåpning eller type sprekkefylling utgjør isolert sett (Palmstrøm, 1995). Fratta & Santamarina (2002) viste at S-bølger er sensitive overfor tykkelsen av leirfylling i sprekker. Forfatterne fant ut at jo tykkere leirfylling var, desto raskere ble S-bølgene dempet. Det er likevel usikkert hvorvidt denne egenskapen lar seg påvise ved bruk av seismikk på stoff.

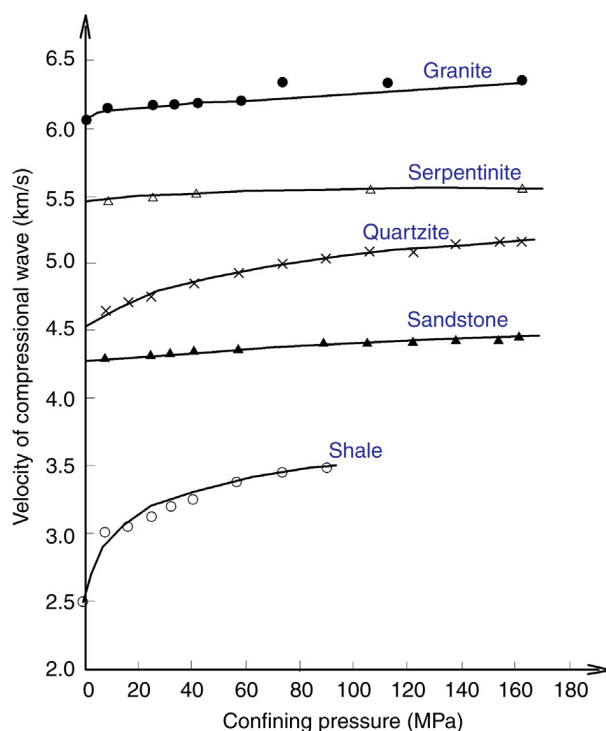
### 3.3 Vannforhold

P-bølgehastigheten i vann er ca. fem ganger høyere enn i luft. En vannmettet bergmasse har derfor høyere P-bølgehastighet sammenlignet med den korresponderende tørre bergmassen som har luftfylte porer og sprekker (Palmstrøm, 1995). I litteraturen er det vist at for en bergart med en kjent porøsitet kan vannmetningen estimeres på lineær form som funksjon av P-bølgehastigheten (Azimian & Ajalloeian, 2014). Det er også sett at bergarter med høy effektiv porøsitet har 2-3 ganger høyere P-bølgehastighet ved full vannmetning sammenlignet med tørr tilstand (Barton, 2007).

I Dickmann et al. (2016) ble det gjort vurderinger av in-situ vannforhold i bergmassen ved analyse av S-bølger og dynamisk Poissons tall. Ved økende vannmetning vil bergmassens evne til å forplante skjærbølger reduseres. Dette resulterer i en reduksjon i S-bølgehastighet og dermed også en økning i dynamisk Poissons tall. Vann, som er et inkompressibelt materiale, vil ha dynamisk Poissons tall på 0,5 mens en moderat til god bergmasse vanligvis har verdier mellom 0,2-0,3 (Dickmann et al., 2016). I studien ble det sett at prediksjon av høye verdier av dynamisk Poissons tall ( $> 0,3-0,35$ ), som ikke representerte egenskapene til den tørre bergmassen, ga gode indikasjoner på potensielle vanninnbrudd i tunnel. I Dickmann (2020) poengteres det at korrelasjonen mellom bergmassens vanninnhold og dynamisk Poissons tall ikke er éntydig. Den avhenger blant annet av den seismiske responsen til bergmassen og tolkerens kunnskap om geologiske forhold i det aktuelle prosjektet.

### 3.4 Bergmassens spenningsforhold og P-bølgehastighet

P-bølgehastigheten er også bestemt av bergmassens spenningsforhold (Nur & Simmons, 1969; Chen & Xu, 2017). Figur 3.1 viser en oversikt over P-bølgehastigheten i forskjellige bergarter som funksjon av omslutningstrykk. Figuren viser at bergartene får en rask økning i P-bølgehastighet i det lavere spenningsintervallet mellom 0 til 10-20 MPa. Nur & Simmons (1969) diskuterer at denne økningen er relatert til den akustiske lukningen av mikrosprekker og porerom i bergmassen, hvor den mekaniske kontakten mellom mineralkornene øker. Zhang (2016) poengterer at økningen er mest markant i anisotrope bergarter, slik som leirskifer (shale) (figur 3.1). Kurvene viser også et knekkpunkt ved økende omslutningstrykk, hvor  $V_p$  får en lineær trend som funksjon av innspenning. Ved dette knekkpunktet vil de aller fleste porene og sprekke-ene være lukket og den seismiske hastigheten vil i større grad styres av bergartsstrukturen og de elastiske egenskapene til kornskjelettet.



Figur 3.1: P-bølgéhastighet som funksjon av omslutningstrykk for et utvalg bergarter (Zhang, 2016).

### 3.5 Q-systemet og P-bølgéhastigheter

Q-systemet ble introdusert av NGI i 1974 og gir et mål på bergmassekvaliteten ved å vurdere seks ulike bergmasseparametre (Barton et al., 1974; NGI, 2015). Disse parametrene er oppsprekkingstallet  $RQD$ , tall for sprekkeseff  $J_n$ , sprekkeruhestall  $J_r$ , tall for sprekkedyfylling  $J_a$ , sprekkedyvannstallet  $J_w$  og spenningsfaktoren  $SRF$  (*Stress Reduction Factor*). Forholdet mellom  $RQD$  og  $J_n$  utgjør oppsprekkingsgraden, eller blokkstørrelsen i bergmassen. Forholdet mellom  $J_r$  og  $J_a$  beskriver bergmassens minste skjærfasthet, mens opptredende spenninger i bergmassen beskrives av forholdet mellom  $J_w$  og  $SRF$ . Relasjonen mellom parametrene vises i likning 3.3 og gir utregnet en Q-verdi. Parametrene i likningen kan bestemmes i felt, ved tunnelkartlegging eller ved kartlegging av borhullkjerner. Det henvises til håndboken utgitt av NGI (2015) for en ytterligere beskrivelse av Q-systemet.

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \cdot \frac{J_w}{SRF} \quad (3.3)$$

Barton (2007) har også etablert en sammenheng mellom Q-systemet og P-bølgéhastigheter i bergmassen, gitt i likning 3.4. Denne likningen er utviklet basert på empiriske korrelasjoner mellom Q-verdier og P-bølgéhastigheter fra grunne refraksjonseismiske undersøkelser (20-30

m dyp). I likningen er  $V_p$  P-bølgehastigheten i bergmassen mens  $Q_c$  er en normalisert Q-verdi. Denne verdien fås ved å multiplisere Q-verdien med bergartens enaksiale trykkfasthet ( $\sigma_c$ ), dividert på 100 (se likning 3.5). Ved kjennskap til bergmassens P-bølgehastigheter er det mulig å gi et estimat av korresponderende Q-verdier. Merk imidlertid at en slik korrelasjon bør brukes med forsiktighet i anisotrope bergarter, hvor P-bølgehastigheten kan variere avhengig av måleretning.

$$V_p[km/s] = \log_{10}(Q_c) + 3,5 \quad (3.4)$$

$$Q_c = Q \cdot \left(\frac{\sigma_c}{100}\right) \quad (3.5)$$

Det er også utarbeidet empiriske korrelasjoner mellom P-bølgehastigheter og Q-verdier i tidligere masteroppgaver på E39 Rogfast og Rv. 13 Ryfast. Ved å analysere borkjerner og refraksjonseismikk fra enkelte partier på Rogfast, fant Gjelsnes (2013) og Eidesen (2013) en eksponentiell sammenheng mellom P-bølgehastighet og Q-verdi, gitt i likning 3.6. Lausund (2015) undersøkte sammenhengen mellom refraksjonseismikk og Q-kartlegging under driving i forskjellige dekkeenheter i Ryfastprosjektet og nærliggende undersjøiske tunneler. Også disse undersøkelsene resulterte i en eksponentiell sammenheng mellom Q-verdier og P-bølgehastigheter, gitt i likning 3.7.

$$Q = 10^{-37} \cdot V_p^{10,323} \quad (3.6)$$

$$Q = 0,1626 \cdot e^{0,0006V_p} \quad (3.7)$$





# Kapittel 4

## Rogfastprosjektet

I dette kapitlet vil det gis en beskrivelse av Rogfastprosjektet. Dette inkluderer en oversikt over entreprisene og den regionale geologien i området. Det vil også presenteres erfaringer fra de ferdigdrevne tverrslagstunnelene på Mekjarvik og Arsvågen, med spesielt fokus på sistnevnte hvor det er utført 11 seismiske undersøkelser på stoff.

### 4.1 Prosjektoversikt

E39 Rogfast er inndelt i sju entrepriser. En oversikt over entrepriser og tilhørende entreprisegrenser finnes i figur 4.1. Her vises også profilnummer langs tunneltraseen. Beskrivelser av disse entreprisene er basert på informasjon fra de ingeniørgeologiske konkurransegrunnlagene for Rogfast utarbeidet av Norconsult (Vik & Martinelli, 2016; Vik et al., 2017; Dammyr et al., 2019a,b, 2020). Fra Harestad på Randaberg i sør mot Laupland på Bokn i nord er rekkefølgen på disse entreprisene som følger:

- Entreprise E06 omfatter forskjæring og påhugget til Boknafjordtunnelen i sør på Harestad, Randaberg.
- Entreprise E03 utgjør søndre del av Boknafjordtunnelen. Entreprisen inkluderer byggingen av ca. 8960 m tunnel (fra profil ca. 1089 til profil ca. 10050), vertikalsjakter på Randaberg og tilhørende påkoblingstunneler for ventilasjonssystemet.
- Entreprise E02 omfatter ca. 8400 m av midtre del av Boknafjordtunnelen (fra profil ca. 10050 til profil ca. 18450). Denne entreprisen inkluderer også byggingen av Kvitsøykrysset og to vertikale ventilasjonssjakter.



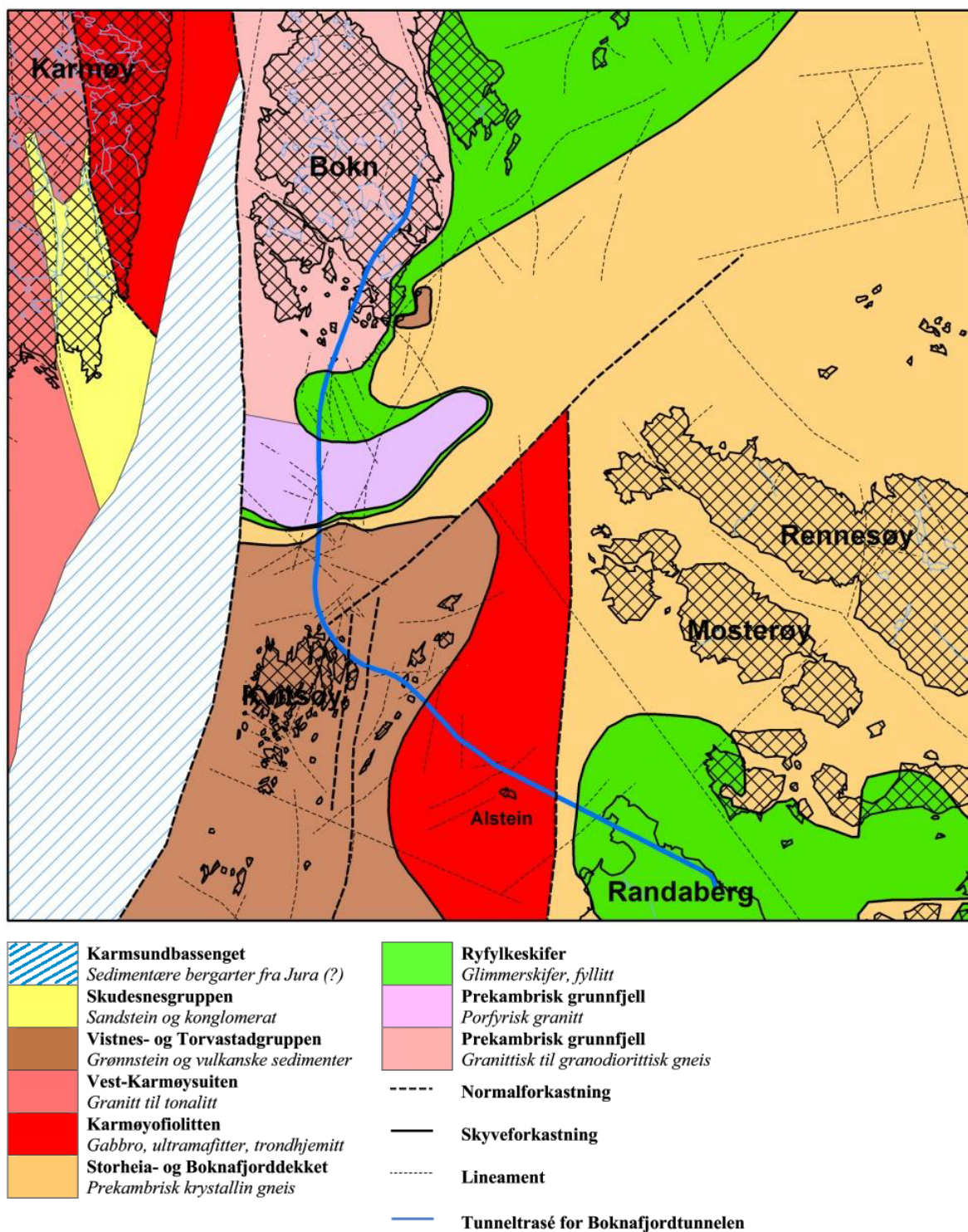
E02, E03 og E04 vil diskuteres mer detaljert i kapittel 7 i forbindelse ved bruk av seismikk på stuff under drivingen av hovedløpene på Rogfast.

## 4.2 Regional geologi

Den planlagte Boknafjordtunnelen vil bygges i et komplisert og sammensatt geologisk bilde, preget av flere markerte forkastninger, kaledonske skyvedekker og forskjellige bergartstyper. Hovedparten av den planlagte tunnelen er undersjøisk. Dette har medført at det over lengre partier ikke har vært mulig å vurdere de geologiske forholdene direkte. Den geologiske modellen er oppdatert av NGU flere ganger basert på sammenstilling av informasjon fra feltundersøkelser på øyer og holmer i området, kjerneboring fra land og skip, prøveinnhenting på havbunn, geofysiske metoder og strukturgeologiske antakelser. Følgende beskrivelser av den regionale geologien på Rogfast er basert på informasjon hentet fra Rønning et al. (2006); Saintot & Solli (2011); Solli & Nordgulen (2014).

En oversikt over den regionale geologien og tunneltraseen til Boknafjordtunnelen vises i figur 4.2. I området er det definert fire alloktone, kaledonske skyvedekker overliggende det prekambriske grunnfjellet. Grensene og mektighetene på de kaledonske skyvedekkerne er usikre, men det er antatt at flere av skyvesonene er nokså flattliggende. Det prekambriske grunnfjellet består hovedsakelig av gneiser av granittisk til granodiorittisk sammensetning (rosa farge figur 4.2). De alloktone kaledonske dekkeenhetene, fra underste til øverste dekke, er:

- **Visteflaket:** Denne dekkeenheten består hovedsakelig av bergarter fra Ryfylkeskiferformasjonen av kambrisk til ordovicisk alder (grønn farge figur 4.2). Ryfylkeskiferen består vekselvis av glimmerskifer og fyllitt med små foldede kvartslinser. Det forekommer også soner av kvartsitt og stedvise innslag av grafitt, granat og pyritt. Mektigheten på dette skyvedekket er varierende, og det er antatt at det stedvis kan være flere hundre meter tykt.
- **Storheidekket:** Dette dekket består av prekambriske gneiser av vekselvis diorittisk og granittisk sammensetning (mørkegul farge figur 4.2). I denne dekkeenheten forekommer det også linser og lag av marmor og glimmerskifer.
- **Boknafjorddekket:** Dette dekket inneholder nokså like bergarter som Storheidekket i form av prekambriske krystalline gneiser (mørkegul farge figur 4.2). Stedvis finnes også ganger og lag av amfibolitt. Merk at Storheia- og Boknafjorddekket er slått sammen i figur 4.2.
- **Hardangerdekket:** Dette er det øverste skyvedekket i området. Den dominerende tektoniske enheten i dette dekket er Karmøyofiolitten (rød farge figur 4.2). Her finnes ultramafiske, gabbroide og vulkanske bergarter som putelava og tuff. Øverst i Hardangerdekket



Figur 4.2: En oversikt over den regionale geologien for Rogfastprosjektet. Figuren er hentet fra Solli & Nordgulen (2014) og tegnforklaringen er oversatt til norsk av Mathiassen (2019)

finnes Torvastadgruppen (brun farge figur 4.2). Denne gruppen inneholder grønnstein og omdannede vulkanske sedimenter.

Fra Harestad på Randaberg i sør er det ventet at tunnelen vil drives i fyllitt og glimmerksifer, inn til den treffer en antatt forkastning øst for Alstein. Her vil tunnelen komme inn i Karmøyofiolitten, hvor hovedbergart trolig er gabbro. Avhengig av spranghøyden på forkastningen er det også mulig at tunnelen kan komme inn i granittiske og diorittiske gneiser i Storheiadekket. Øst for Kvitsøy vil tunnelen møte flere normalforkastninger med strøk N-S til NØ-SV. På Kvitsøy, og et stykke nord for Kvitsøy, er det ventet at tunnelen vil gå gjennom Torvastad- og Visnesgruppen, hvor bergarter som grønnstein, tuff, grønnskifer, lavabreksje og svartskifer finnes.

Bergartsfordelingen mellom Kvitsøy og Bokn er noe usikker. Det er antatt at det finnes flere kaledonske skyvedekker i området. Forventede bergarter er blant annet fyllitt i Ryfylkeskiferen og granittisk gneis i Boknafjorddekket. Det er også ventet at de tektoniske grensene mellom skyvedekkene sammenfaller med flere markante svakhetssoner. Mot Bokn er det antatt at tunnelen kommer inn i autotekton grunnfjellsgneis, som vil være dominerende bergartstype frem til Laupland på fastlandet.

## 4.3 Tverrslagstunnel Arsvågen

Adkomsttunnelen på Arsvågen er en del av entreprise E13 på Rogfast. Tunnelen er drevet med to løp med lengder på henholdsvis ca. 1940 m (linje 34000) og ca. 1980 m (linje 34100) (figur 4.1). Tunnelløpet i linje 34000 har tverrsnitt på  $76 \text{ m}^2$  og skal i anleggsfasen benyttes som tverrslag for driving av Boknafjordtunnelen mellom Bokn og i retning Kvitsøy. Tunnelløpet i linje 34100 har tverrsnitt  $45 \text{ m}^2$ . I driftsfasen skal tunnelen fungere som ventilasjonstunnel. Her skal det største tverrsnittet benyttes for avtrekk av forurenset luft og det minste løpet skal brukes for å trekke frisk luft inn til hovedløpene (Vik et al., 2017).

### 4.3.1 Ingeniørgeologiske forhold i tunnel

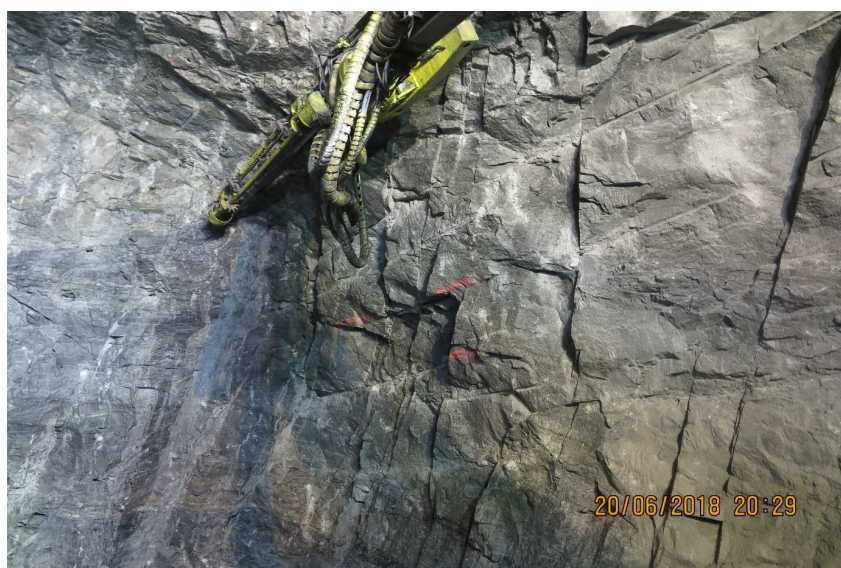
I det følgende vil en oversikt over de kartlagte ingeniørgeologiske grunnforholdene i tunnelen bli presentert. Denne informasjonen er hentet fra den geologiske sluttrapporten på E13 (Jensen & Eldevik, 2019). De ingeniørgeologiske grunnforholdene vil bli diskutert mer detaljert i sammenheng med analysen av de seismiske undersøkelsene på stoff i kapittel 6. Ingeniørgeologisk profil for tverrslagstunnelen finnes i figur 6.3 i kapittel 6.

Bergartsgrensen mellom fyllitt i Ryfylkeskiferen og den prekambriske grunnfjellsgneisen ble observert ved ca. profil 435 for linje 34000 og ved ca. profil 240 for linje 34100. Bergartsgrensen var vekslende, og større og mindre innslag av fyllitt forekom også opptil 100 m senere i begge

tunnelløp. Totalt ble 12% av tunnelen drevet i fyllitt og 88% ble drevet i grunnfjellsgneis. Bilder av fyllitten og grunnfjellsgneisen vises i henholdsvis figur 4.3 og 4.4.

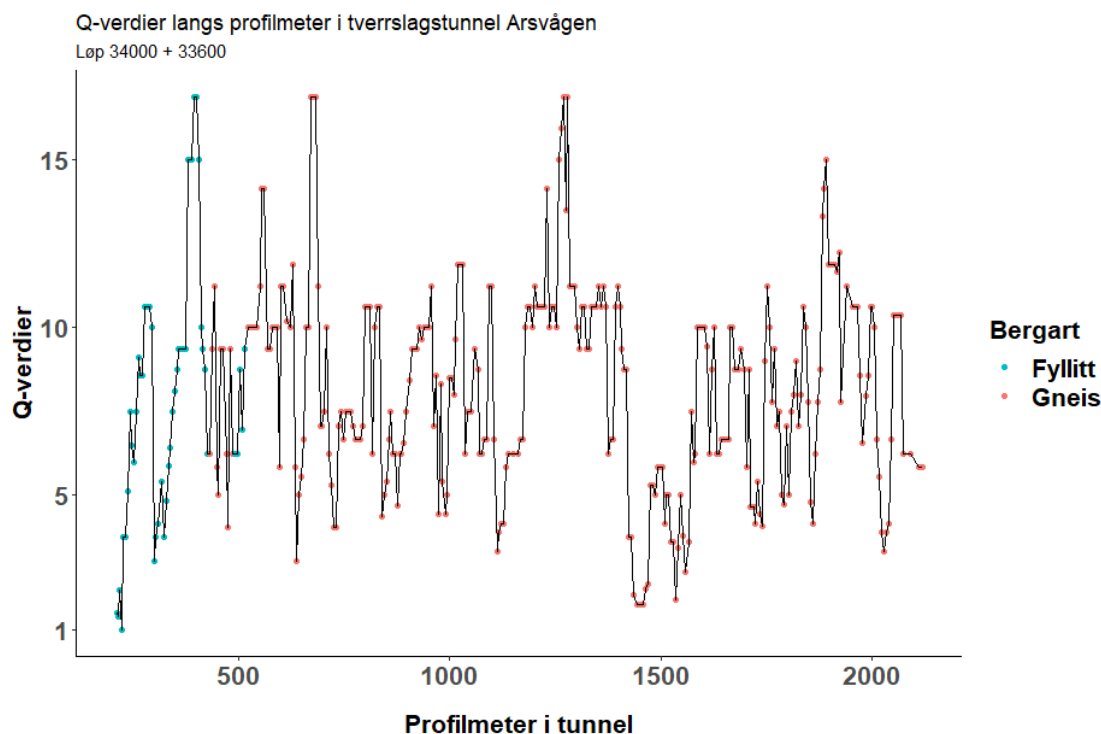


**Figur 4.3:** Fyllitt på E13 ved pel 217 linje 34000 (Jensen & Eldevik, 2019).



**Figur 4.4:** Granittisk gneis på E13 ved pel 534 linje 34000 (Jensen & Eldevik, 2019).

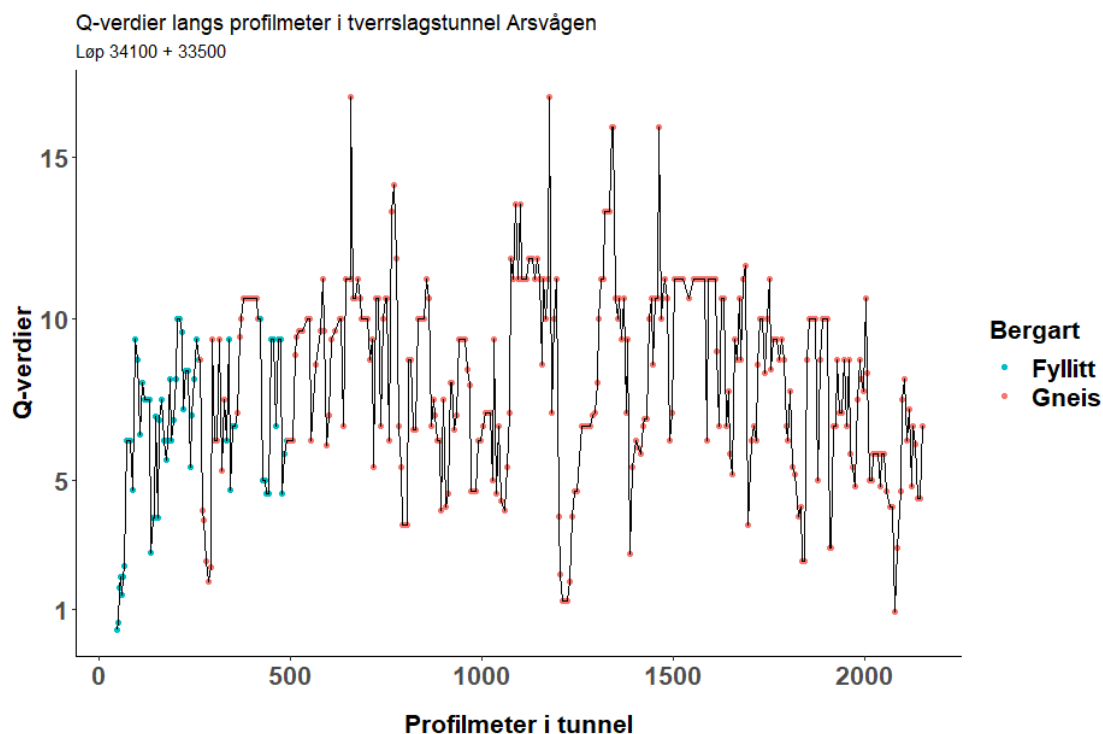
Fyllitten i tunnelen var av god kvalitet. Stedvis ble det også kartlagt innslag av glimmerskifer og skifer. Fyllitten bryter nokså lett opp langs skifriheten og den er svakere enn den påtrufne grunnfjellsgneisen (Jensen & Eldevik, 2019). Tunnelkartleggingen i fyllitten viser Q-verdier stort sett mellom 4-10, som tilsvarer bergmasseklasse C (Statens vegvesen, 2020c). En oversikt over registrerte Q-verdier mot profilmeter i tunnel finnes i figur 4.5 og 4.6. Fyllitten har stort sett to til tre sprekkesett med innslag av tilfeldige sprekker. Tall for sprekkesett ble normalt



**Figur 4.5:** Q-verdier mot profilmeter i tunnel for løp 34000 + 33600 i tverrslagstunnel på Arsvågen. Løp 33600 starter ved profilmeter 2120 og omfatter utsprenningen av en fjellhall. Figuren er laget i RStudio basert på informasjon hentet fra Jensen & Eldevik (2019).

satt mellom 6-9. Fyllitten var småfoldet som gjorde at det var vanskelig å registrere orienteringer på sprekkeseffene. De to mest fremtredende sprekkeseffene hadde strøk N10-20°Ø med fall 60-80°SØ og strøk N280-290°V med fall 40-90° vekslende mot SV og NØ. I den ytre delen av tunnelen med lav bergoverdekning ble det registrert gjennomsettende skrå sprekker opptil terrengnivå. Disse sprekkene ga en del innlekkasjer i tunnel og det ble utført flere injeksjonsskjermer.

Grunnfjellsgneisen hadde varierende kvalitet og sammensetning. De mest fremtredende bergartstypene var granittisk gneis og gneis, men det forekom også stedvise innslag av båndgneis, dioritt og kvarsitt (Jensen & Eldevik, 2019). Generelt varierte Q-verdiene mellom 4-10 i bergmasseklasse C, men det er også registrert enkelte partier med Q-verdier over 10 (figur 4.5 og 4.6). I tilknytning til driving gjennom en leirsone og enkelte små svakhetssoner i denne bergarten, er det kartlagt Q-verdier mellom 0,4 og 3. Sprekkeseffenes orientering har variert innover i tunnelen. Dette har medført enkelte større og mindre blokkutfall. De to mest fremtredende orienteringene hadde strøk NS med fall på 75-90° vekselvis mot øst og vest, og strøk N300-330°V



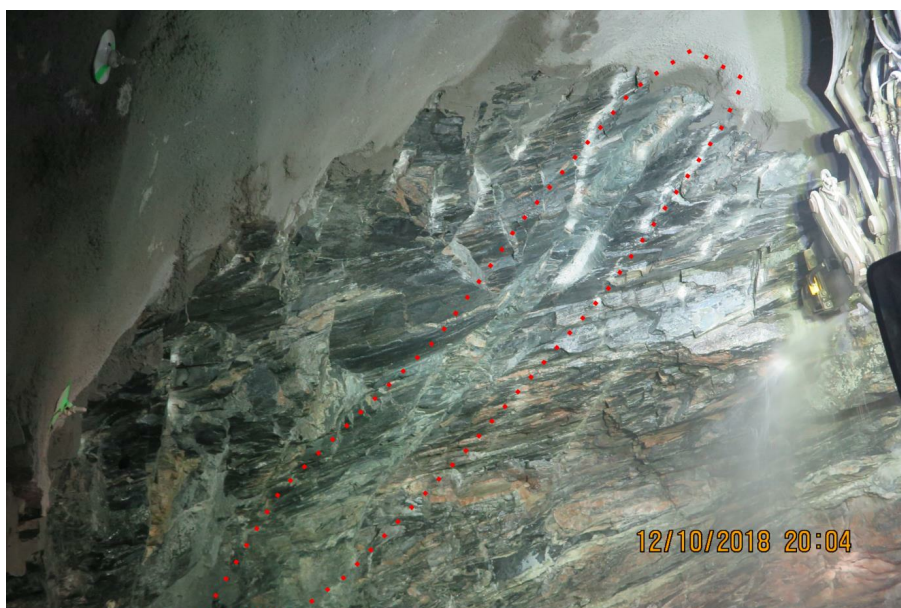
**Figur 4.6:** Q-verdier mot profilmeter i tunnel for løp 34100 + 33500 i tverrslagstunnel på Arsvågen. Løp 33500 starter ved profilmeter 2004 og omfatter utsprenningen av en fjellhall. Figuren er laget i RStudio basert på informasjon hentet fra Jensen & Eldevik (2019).

med subhorisontalt fall mot SV. Tabell 4.1 inneholder en oversikt over antatt fordeling av bergmasseklasse fra konkurransegrunnlag og faktisk fordeling fra tunnelkartleggingen. Fra tabellen kan det sees at bergmassen i tunnelen har hatt bedre kvalitet enn forventet.

**Tabell 4.1:** Oversikt over antatt og faktisk fordeling av bergmasseklasse for tverrslagstunnelen på Arsvågen (Jensen & Eldevik, 2019).

Bergmasseklasse (Håndbok N500)	Antatt fordeling fra konkurransegrunnlag	Faktisk fordeling fra kartlegging i tunnel
A/B	33%	33,9%
C	45%	56,8%
D	15%	8,9%
E	5%	0,3%
F	2%	0%
G	0%	0%
Sum	100%	100%





**Figur 4.7:** Leirsone (markert med rød stiplet linje) ved profilmeter 1214 til 1219 i løp 34100 (Jensen & Eldevik, 2019).

Norconsult definerte 14 svakhetssoner som det var antatt ville krysse tunneltraseen. Disse svakhetssoner er klassifisert i tre klasser (I, II, og III) basert på sonenes bredde, seismisk hastighet og antatt behov for vanntetting og stabilitetssikring (tabell 4.2). To av sonene ble plassert i klasse II mens de 12 andre ble plassert i klasse I. De fleste av de 14 antatte svakhetssonene ble ikke påtruffet, eller var lite markant på tunnelnivå. Under utspregningen av to fjellhaller (løp 33500 mellom profilmeter 2180 og 2200 og løp 33600 mellom profilmeter 2064 og 2089) ble det påtruffet en 20-30 m bred svakhetszone. I denne sonen ble det kartlagt Q-verdier mellom 0,4-1, som tilsvarer bergmasseklasse E. Ved profilmeter 1214 til 1219 i linje 34100 ble det observert en leirsone (figur 4.7). En prøve av dette materialet viste høy frissvelling på 300% og høyt svelletrykk på 0,54 MPa (Jensen & Eldevik, 2019).

**Tabell 4.2:** Klassifisering av svakhetssoner ut ifra sonebredde og seismisk hastighet (Vik et al., 2017).

Sonebredde (m)	Seismisk hastighet (m/s)		
	3500-4000	3000-3500	≤ 3000
< 5	I	I	II
5-15	I	II	II
> 15	II	II	III

## 4.4 Tverrslagstunnel Mekjarvik

Tverrslagstunnelen på Mekjarvik er en del av entreprise E11 på Rogfast. Tunnelen er 630 m lang, og den er drevet med ett løp (løp 30000) med modifisert T9,5 tverrsnitt på 88 m<sup>2</sup>. Tunnelen går fra Mekjarvik-industriområdet og inn til det prosjekterte hovedløpet til Boknafjordtunnelen (figur 4.1). I anleggsfasen vil tunnelen fungere som tverrslag for driving av Boknafjordtunnelen mellom Randaberg og Kvitsøy (entreprise E03). I driftsfasen skal tunnelen benyttes som rømningstunnel (Vik & Martinelli, 2016). Ingeniørgeologisk profil for tverrslagstunnelen finnes i vedlegg A.

### 4.4.1 Ingeniørgeologiske forhold i tunnel

Beskrivelse av de ingeniørgeologiske forholdene i denne tverrslagstunnelen er basert på informasjon fra den geologiske sluttrapporten på E11 (Eldevik, 2019). Forfatteren har også foretatt befaringsundersøkelser til denne tunnelen. Det henvises til kapittel 5 for ytterligere beskrivelser tilknyttet undersøkelser i felt og laboratorium.

Hovedbergart i tunnelen er en grå til svart fyllitt. I enkelte områder er det også kartlagt glimmerskifer. Bergartene er stedvis rik på små foldete linser av kvarts og har enkelte tynne, svarte lag av grafitt (Jensen & Eldevik, 2019). Tabell 4.3 viser en oversikt over fordeling av bergmasseklasse fra konkurransegrunnlag og faktisk fordeling fra tunnelkartleggingen. Bergmassen er stort sett av god kvalitet, og tabellen viser at 86% av tunnelen har Q-verdi over 10 i bergmasseklasse A/B. Bergmassen har 1-2 sprekkesett, med stedvis sporadisk oppsprekking. Det dominerende sprekkesettet samsvarer med det som ble kartlagt fra feltkartleggingen, og hadde strøk SV-NØ med fall 25-45° mot NV. Sprekkeflatene var glatte og bølgete. Sprekkeavstanden varierte fra noen få centimeter til en halv meter.

**Tabell 4.3: Oversikt over antatt og faktisk fordeling av bergmasseklasse for tverrslagstunnelen på Mekjarvik (Eldevik, 2019).**

<b>Bergmasseklasse (Håndbok N500)</b>	<b>Antatt fordeling fra konkurransegrunnlag</b>	<b>Faktisk fordeling fra kartlegging i tunnel</b>
A/B	26%	86%
C	50%	8%
D	27%	5%
E	7%	1%
F	0%	0%
G	0%	0%
Sum	100%	100%

Fra refraksjonseismiske undersøkelser og flyfoto definerte Norconsult tre svakhetssoner som

det var antatt ville krysse tunneltraseen. To av svakhetssonene ble plassert i klasse II og én svakhetszone ble plassert i klasse I (tabell 4.2). De tre antatte svakhetssonene ble ikke påtruffet i tunnel. Ingeniørgeologisk kartlegging viser Q-verdier over 10 i de aktuelle områdene.

Tunnelen passerer også under en innløpstunnel (kloakktunnel) til IVAR og Byfjordtunnelen. Minste vertikale avstand er henholdsvis ca. 17 m og ca. 16 m. Det er utført to injeksjonskjermer der tunnelen krysser under IVAR sin innløpstunnel for å forhindre eventuell innlekkasje av avløpsvann. Overdekningen til innløpstunnelen ble også kontrollert ved bruk av seismikk på stoff (Jensen & Eldevik, 2019). Det har ellers ikke blitt foretatt injeksjon i tunnelen og fyllitten har generelt vært lite vanngivende.

## 4.5 Erfaringer så langt

Fra en gjennomgang av konkurransegrunnlagene (Vik et al., 2017; Vik & Martinelli, 2016) og erfaringer fra de ferdigbygde tverrslagstunnelene på Rogfast (Jensen & Eldevik, 2019; Eldevik, 2019) er det funnet at:

- Bergmassekvaliteten og driveforholdene har vært bedre enn forventet. Både fyllitten og grunnfjellsgneisen har vært av god kvalitet.
- Bergsikringen har stort sett bestått av systematisk bolting og sprøytebetong. Det har også blitt utført mindre injeksjoner enn det som først var antatt.
- Svakhetssoner har vist seg å være mindre omfattende enn først ventet. De fleste av de antatte svakhetssonene er ikke gjenfunnet i tunnel. Det er imidlertid påvist at det kan forekomme leirsoner med aktivt svellemateriale i den prekambriske grunnfjellsgneisen.



## **Kapittel 5**

# **Undersøkelser i felt og i laboratorium**

Under arbeidet med masteroppgaven er det utført undersøkelser i både tunnel og i laboratorium. Hensikten med disse undersøkelsene har vært å innhente informasjon om bergmasseforhold og bergmekaniske parametre fra bergarter og sprekke materiale for å kunne vurdere og sammenligne med utdata fra seismikk på stoff. Laboratorieundersøkelsene har også gjort det mulig å gjøre vurderinger av de empiriske korrelasjonene i kapittel 3. Innledningsvis presenteres befaring til Rogfastprosjektet og en beskrivelse av prøvene som er tatt. Deretter vil det bli gitt en beskrivelse av utførte laboratorieundersøkelser og tilhørende resultater. Avslutningsvis vil gyldigheten av resultatene diskuteres.

### **5.1 Befaring til Rogfastprosjektet**

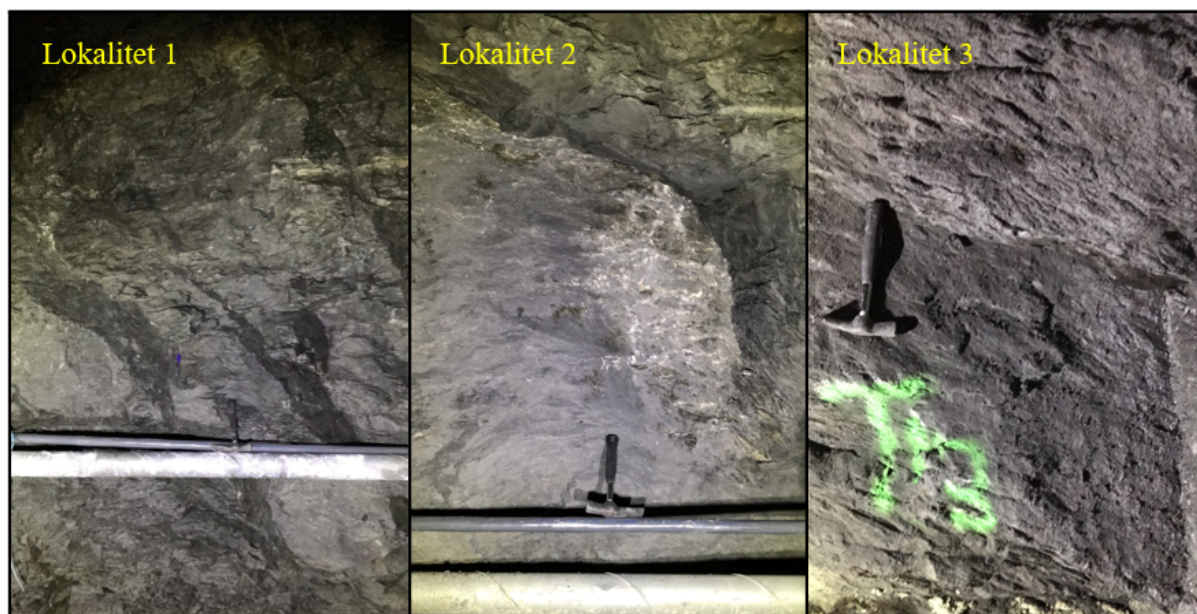
Den 6. februar 2020 besøkte undertegnede, professor Bjørn Nilsen og masterstudent Marie Hernæs Larsen Rogfastprosjektets rigg på Mekjarvik i Randaberg. I starten av dagen ble det arrangert et møte med byggeleder Sveinung Brude, assisterende byggeleder Gudmund Lunden og prosjekteringsleder Hans Ivar Ravn-Larsen, som ga en presentasjon om Rogfast og aktuelle ingeniørgeologiske utfordringer på prosjektet. Det ble også gitt en oppdatering om status på prosjektet, som er i påvente av å starte opp. Deretter ble det foretatt befaring av den ferdig-drevne tverrslagstunnelen på Mekjarvik (E11). Formålet med befaringen var å høre om erfaringer vedrørende aktuelle drive-, sikrings- og bergmasseforhold i tunnelen. Det ble også utført målinger av sprekker, bestemmelse av Q-verdier og prøvetaking. På slutten av dagen ble det

også hentet prøver fra prosjektets kjernelager på Sola.

Det var også planlagt befarings til tverrslagstunnelen på Arsvågen i april 2020. Det ble besluttet å ikke gjennomføre denne, i tråd med NTNU sine retningslinjer vedrørende ekskursjoner og situasjonen rundt Covid-19.

### 5.1.1 Ingeniørgeologisk kartlegging i tunnel

Under befaringen av tverrslagstunnelen på Mekjarvik ble det utført Q-kartlegging og prøveinnhenting av sprekke materiale ved tre lokaliteter i tunnelen. Det ble først gjort en rekognoserende kartlegging til enden av tunnelen før utvalgte lokaliteter ble undersøkt på veg tilbake mot påhugget. Bilder av lokalitetene vises i figur 5.1. Ingeniørgeologisk profil for tverrslagstunnel på Mekjarvik, og en oversikt over lokalitetene hvor det er utført tunnelkartlegging og prøvetaking, finnes i vedlegg A.



**Figur 5.1:** Figuren viser de tre undersøkte lokalitetene i tunnelen. Bilder av lokalitet 1, 2 og 3 er tatt ved henholdsvis pel 623, 513 og 299 i tunnel. Bildene er tatt av bergflater i tunnelkonturen retning øst. Geologihammer til skala.

Lokalitet 1 ble tatt ved profilmeter 623 i tunnel. Lokaliteten viste godt oppsprukket fyllittisk berg med mørkegrå leirmateriale i sprekke. Bergmassen har markant skifrihet og mye stikk, men med nokså lav utholdenhet. Bergflaten har to sprekkesett. Det første sprekkesettet har strøk N170°Ø og fall 60°V. Sprekkeavstanden til dette sprekkesettet varierer fra 0,5-1 m. Det ble også kartlagt et sprekkesett langs skifriheten. Dette sprekkesettet varierer på grunn av lokal småfolding, og viser strøk N80-100°Ø og fall 12-15° vekselvis både mot sør og nord. Bergflaten

er dekket av sort støv som det er antatt kan være grafitt. Bergflaten er våt og drypper stedvis. Overdekningen i området er ca. 50-60 m og det er derfor antatt gunstige spenningsforhold.

Lokalitet 2 var ved profilmeter 513. Fyllitten her har tilsvarende egenskaper som lokalitet 1, men bergflaten har lysere farge og er helt tørr. Bergarten har oppsprekking langs skifriheten, men på grunn av småfolding var det vanskelig å bestemme en generell strøkretning. Oppsprekking er subhorisontal og enkelte sprekkeflater opptrer med glatt, grafittisk materiale. Det er også kartlagt et sprekkesett med strøk/fall N150°Ø/68°SV. Disse sprekkeene opptrer med ca. 1-2 cm tykk grågrønn sprekkefylling. Prøver av dette sprekkematerialet beskrives mer detaljert i delkapittel 5.1.2. Det er antatt gunstige spenningsforhold ved lokaliteten.

Lokalitet 3 var ved profilmeter 299. Bergmassen her er mørkere enn ved de to andre lokalitetene, og fyllitten er trolig mer graffitrik. Bergarten er svakt forvitret og lettoppknuselig. Bergflaten har markant småfoldet skifrihet med subhorisontal oppsprekking. Det er også kartlagt et sprekkesett som stryker N140°Ø med fall 58°SV, tilsvarende som sprekkesett ved de to andre lokalitetene. Sprekkeflatene har et tynt lag av svart og leirig materiale. Bergflaten er fuktig og det er antatt gunstige spenningsforhold. En oversikt over de kartlagte Q-parametrene for de forskjellige lokalitetene vises i tabell 5.1. I tabellen er det gitt et intervall av Q-verdier basert på bergmassens varierende egenskaper ved lokalitetene. Bergmassen ved de tre lokalitetene har generelt vært av dårlig til middels kvalitet.

**Tabell 5.1: En oversikt over kartlagte Q-parametre for de tre lokalitetene. Fyllitten viser høy lokal variasjon og det er derfor oppgitt et spenn av Q-verdier fra ugunstig til gunstig.**

Verdi	Lokalitet 1		Lokalitet 2		Lokalitet 3	
	Ugunstig	Gunstig	Ugunstig	Gunstig	Ugunstig	Gunstig
<i>RQD</i>	40	70	20	60	30	60
<i>J<sub>n</sub></i>	6	6	6	6	6	6
<i>J<sub>r</sub></i>	1	1,5	1	1,5	1	1,5
<i>J<sub>a</sub></i>	4	2	4	2	4	2
<i>J<sub>w</sub></i>	1	1	1	1	1	1
<i>SRF</i>	1	1	1	1	1	1
<b>Q</b>	1,7	8,8	0,8	7,5	1,3	7,5

Tunnelen er gjennomgående sikret med 8 cm stålfiberarmert sprøytebetong (E700) i hvelv og vederlag. Det er også utført systematisk bolting med kombinasjonsbolter med lengder på 3 og 4 meter. Bolt sikringen er montert i et mønster med c/c 2,5 m, fra midt på vegg til midt på vegg. De første 15 profilmeterne har lav bergoverdekning, og er sikret med sprøytebetongbuer.

### 5.1.2 Prøveinnhenting

Fra tverrslagstunnelen på Mekjarvik ble det tatt med en blokk av fyllitt på ca. 20 kg for uttak av kjerneprøver (se bilde 5.2). Blokken ble tatt fra fyllingsområdet like nord for påhuggsflaten, hvor tunnelmassene er deponert. Blokken var intakt og tilsvarende den observerte bergmassen i tunnelen. Fyllitten er en del av Ryfylkeskiferen, som har stor mektighet i området.

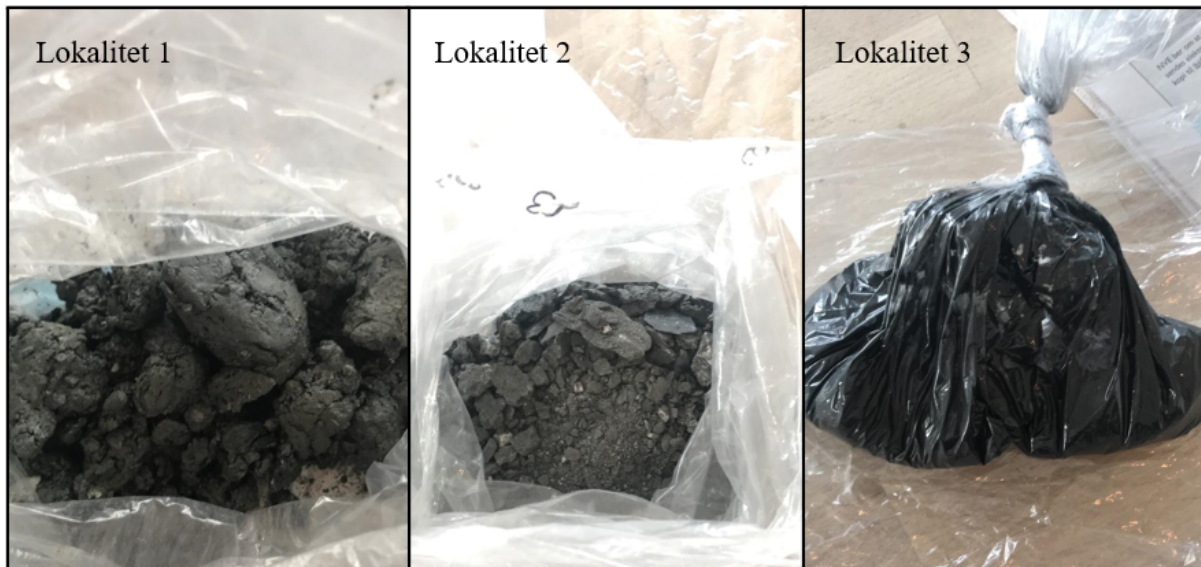


**Figur 5.2:** Fyllitt fra tverrslagstunnelen på Mekjarvik. Dimensjonene på blokken er ca. 40 cm x 15 cm x 12 cm.

Det ble tatt tre prøver av sprekke materialet i fyllitten fra samme lokaliteter hvor det er utført Q-kartlegging. Bilder av prøvene vises i figur 5.3. Prøve 1S er tatt ved profilnummer 623 i tunnel. Prøven har mørkegrå farge og er ganske leiraktig. Den inneholder også noen større bergartsfragmenter og korn av kvarts. Prøve 2S er tatt ved profilnummer 513. Prøven har grå til grønnaktig farge. Prøven har en del finstoff og oppknust materiale, mens bergartsfragmentene er flakige og knuses lett i hånden. Prøve 3S er tatt ved profilnummer 299. Prøven har kraftig sort farge og materialet er bløtt og leiraktig. Prøvene av sprekke materiale ble tatt fra sprekkesett med strøk N140-170°Ø og fall 60-70°SV.

Fra kjernelageret til Rogfastprosjektet i Sandnesveien på Sola ble det hentet ut fire kjernebiter på ca. 25 cm fra borhull BH-06-2016-Arsvågen. Beliggenhet av dette borhullet er nærmere anvist i ingeniørgeologisk profil av tverrslagstunnelen på Arsvågen i figur 6.3 i kapittel 6. Prøvene er lagret i et garasjeanlegg i et stabilt og tørt miljø, kontrollert av lufttemperaturen. Det er tatt tre prøver fra kasse 55 og en prøve fra kasse 28 (se figur 5.4 og 5.5). Alle prøvene er av en hvit til lys rosa granittisk til diorittisk gneis. De tre prøvene fra kasse 55 er tatt mellom 270-275 m fra





Figur 5.3: Foto av prøver av sprekkematerialer fra de tre undersøkte lokalitetene.

borhullets start, og nederste prøve ligger omtrent 20 meter over den ferdigbygde tunnelen. De regnes derfor som representative for bergartstypen i tunnelen. Det er også tatt med en prøve fra kasse 28 på ca. 140 m dybde for å undersøke om styrkeegenskapene til den granittiske gneisen viser lokale variasjoner.



Figur 5.4: Foto av kjernebasse K-55, BH-06-2016, 270-275 m. Fra kassen er det tatt ut tre kjerner til enaksial trykktest og test av ultralydhastigheter.



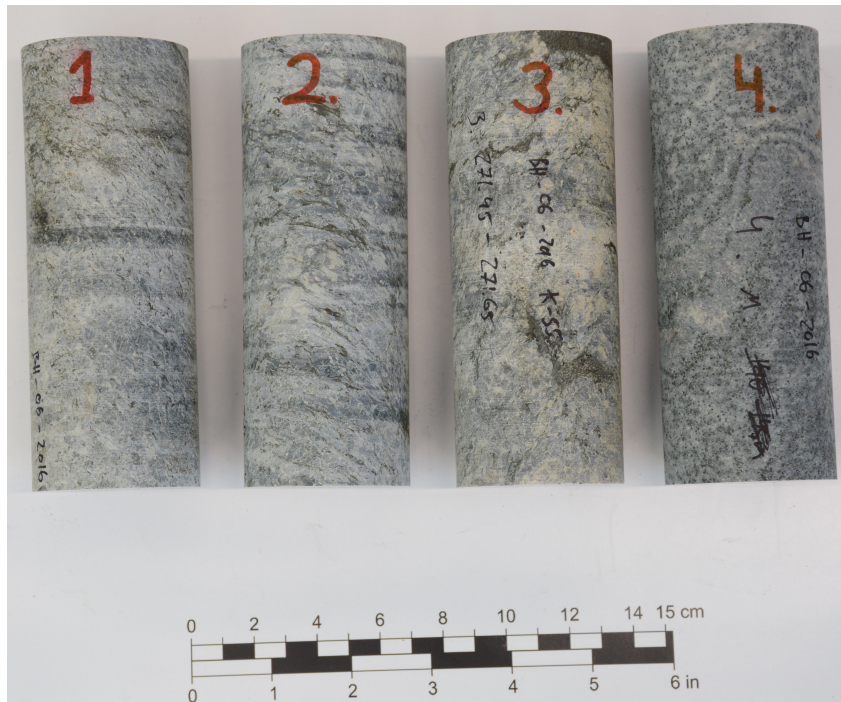
**Figur 5.5:** Foto av kjernebasse K-28, BH-06-2016, 270-275 m. Fra kassen er det tatt ut en kjerneprøve til enaksiell trykktest og test av ultralydhastigheter.

## 5.2 Laboratorieanalyser

I dette delkapittelet vil de ulike laboratorieundersøkelsene bli kort presentert. Prøvepreparering og laboratorieanalyser er utført ved bergmekanisk laboratorium ved NTNU, Trondheim, i perioden 24.02.2020-30.04.2020.

### 5.2.1 Beskrivelse av prøver

De ferdigpreparerte kjerneprøvene vises i figur 5.6 og 5.7. Det ble preparert fire kjernebiter av den granittiske gneisen med diameter på 50 mm. Flere av kjernebitene som ble tatt ut av fyllittblokken sprakk opp langs foliasjonen både ved kjerneboring og tilsaging. Det ble derfor besluttet å gå ned til et kortere og stivere kjernebor med diameter 40 mm. Fra dette boret ble det tatt ut tre kjerneprøver av fyllitt. Dimensjoner og tyngdetetthet til prøvene fremgår av tabell 5.2. Prøvene er nummerert fra 1 til 7 med tilhørende bergartstype.



Figur 5.6: Ferdigpreparerte kjerneprøver av granittisk gneis. Dimensjonene til prøvene fremgår av tabell 5.2. Foto: Jon Runar Drotninghaug.



Figur 5.7: Ferdigpreparerte kjerneprøver av fyllitt. Dimensjonene til prøvene fremgår av tabell 5.2. Foto: Jon Runar Drotninghaug.

Prøvene av den granittiske gneisen har lys til mørk grå farge (se figur 5.6). Prøvene er biotittrike og de inneholder en del kvarts og lys hvit (prøve 2 og 4) til rosa (prøve 1 og 3) feltspat. Prøve 1 og 2 har enkelte foliasjonsplan som skjærer lengdeaksen med en vinkel på ca. 40°. Foliasjonsplanene i prøve 3 og 4 er småfoldet og viser en båndet og undulerende struktur. Prøve 4 har også en mer homogen og kornete fordeling av biotittminerale sammenlignet med de andre prøvene. Prøve 3 har enkelte mørke partier som kan være amfibolitt. Kjerneprøvene er av god kvalitet og de har ingen synlige svakheter.

Bilder av fyllittprøvene vises i figur 5.7. Kjerneboringen ble gjort på tvers av foliasjonsretningen. Bergarten er grågrønn og har undulerende og småfoldete grå og svarte lag. Det sees også sporadiske linser og lag av hvit kvarts med varierende tykkelse. Bergarten er svært finkornet. Prøvene har varierende lengde som følge av at de sprakk opp ved tilsaging. Kjernebitene er av god kvalitet og de har ingen tydelige svakheter.

**Tabell 5.2: Oversikt over dimensjoner og tyngdetetthet til preparerte kjerneprøver.**

Prøveid.	Bergart	Lengde (L) (mm)	Diameter (D) (mm)	Tyngdetetthet ( $\rho$ ) (g/cm <sup>3</sup> )
1	Granittisk gneis	133,67	50,29	2,70
2	Granittisk gneis	133,65	50,30	2,71
3	Granittisk gneis	133,70	50,47	2,71
4	Granittisk gneis	133,73	50,51	2,72
5	Fyllitt	117,91	43,98	2,84
6	Fyllitt	105,41	43,96	2,84
7	Fyllitt	94,43	43,98	2,85

Prøvene av sprekkematerialet er nummerert fra 1S til 3S. Tabell 5.3 gir en oversikt over vekten av hver prøve og hvor mye finstoff (< 20  $\mu\text{m}$ ) prøvene inneholder. Det er også oppgitt vekttap som følge av våtsiktingen. Bilder av sprekkematerialet etter våtsiktingen finnes i vedlegg B.

**Tabell 5.3: Oversikt over prøver av sprekkemateriale.**

Prøveid.	Profilnummer tunnel	Tørrvekt prøvemateriale (g)	Tørrvekt materiale >20 $\mu\text{m}$ (g)	Tørrvekt materiale <20 $\mu\text{m}$ (g)	Vekt siktetap (g)
1S	623	256,9	218,0	34,7	4,2
2S	513	194,3	165,6	26,0	2,7
3S	299	240,2	209,5	24,1	6,6

### 5.2.2 Bestemmelse av ultralydhastigheter

P-bølgehastighet og S-bølgehastighet i kjerneprøvene ble bestemt ved test av ultralydhastighet. I denne testen genereres pulser av elastiske bølger med frekvens i kHz-MHz-spekteret. Prinsipi-

pet bak testen er å måle bølgenes gangtid gjennom kjerneprøvene ( $\Delta t$ ). Ultralydhastighetene i kjerneprøvene kan da beregnes ved å ta lengden av kjerneprøvene ( $L$ ) og dele på de registrerte gangtidene til rombølgene (se likning 5.1).

$$V = \frac{L}{\Delta t} \quad (5.1)$$

Testen ble utført ved bruk av utstyret *Pundit Lab* fra leverandøren Proceq. Et bilde av oppsettet for test av ultralydhastighet vises i figur 5.8. De ferdigpreparerte prøvene ble plassert mellom to transdusere, som fungerer som kilde og mottaker. Før teststart ble apparatet kalibrert med en prøve med kjent lydhastighet for å redusere støy i innmålingene. Prøvenes endeflater ble påført en viskøs epoxygel, tilpasset for testing av S-bølgehastighet. Gelen gir en bedre kopling og energioverføring mellom transduserne og prøven. Under testen ble det brukt frekvens på 250 kHz, som samsvarer både med anbefaling fra leverandør og den oppdaterte ISRM-standarden beskrevet i Aydin (2013). Resultatet fra testen vises i et oscillogram med gangtid i mikrosekunder på x-aksen og amplitude på y-aksen. Programvaren muliggjør avlesning av gangtider både for P- og S-bølger.

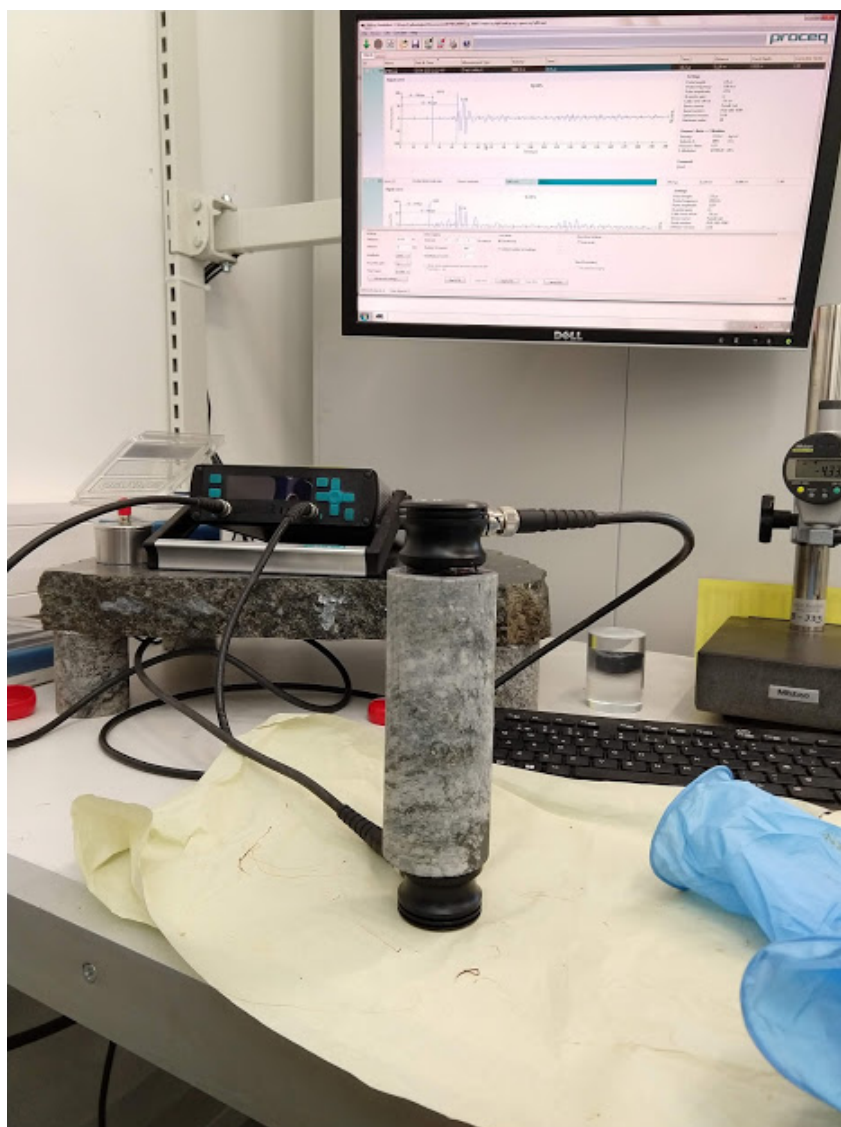
### 5.2.3 Bestemmele av dynamiske elastisitetsmoduler

De dynamiske elastisitetsmodulene  $E_{dyn.}$  og  $\nu_{dyn.}$  er bestemt ved bruk av likning 5.2 og 5.3. Det henvises til kapittel 2 for ytterligere beskrivelse av disse parametrene.

$$E_{dyn.} = \rho V_s^2 \left( \frac{3V_p^2 - 4V_s^2}{V_p^2 - V_s^2} \right) \quad (5.2)$$

$$\nu_{dyn.} = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)} \quad (5.3)$$

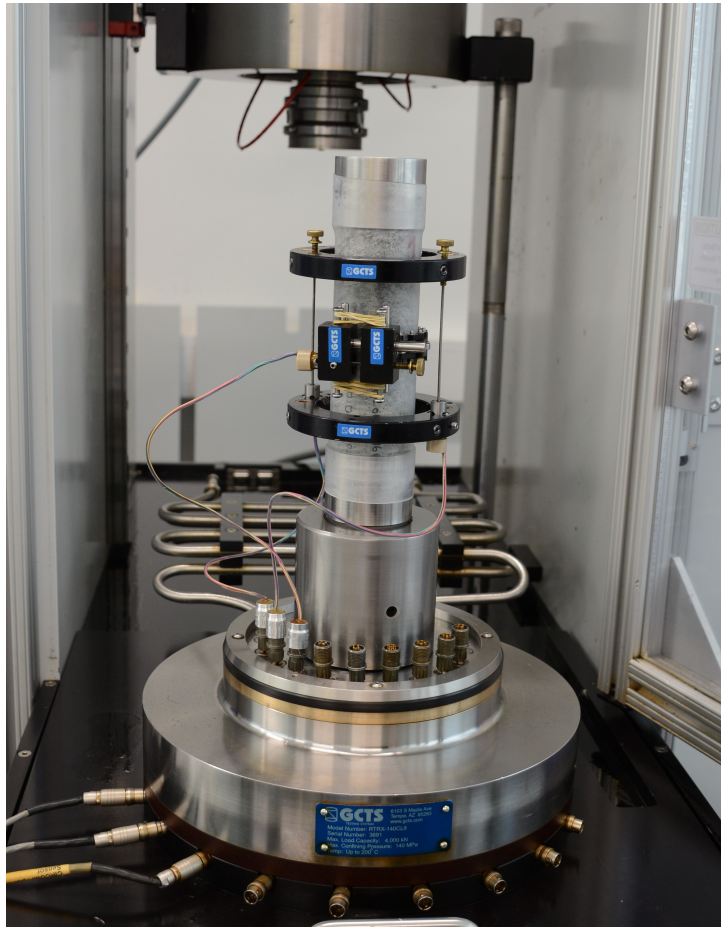
Bestemmelse av disse modulene gjøres ved å måle kjerneprøvenes tyngdetetthet, P-bølgehastighet og S-bølgehastighet. Kjerneprøvenes rombølgehastigheter ble funnet ved test av ultralydhastighet, som beskrevet ovenfor. Prøvenes tyngdetetthet ble funnet ved måling av prøvenes vekt og volum. Volumet av prøvene ble bestemt ut ifra gjennomsnittlig diameter og minste lengde langs prøvenes akse.



**Figur 5.8:** Foto av oppsett for test av ultralydhastighet.

#### **5.2.4 UCS og statiske elastisitetsmoduler**

For å bestemme kjerneprøvenes enaksiale trykkfasthet ( $\sigma_c$ ), statisk E-modul og statisk Poissons tall er det utført enaksial trykktest. I denne testen belastes prøvene gradvis i aksialretning til brudd inntreffer. Testene er utført etter standard ISRM-prosedyre beskrevet i Bieniawski et al. (1979).



Figur 5.9: Foto av testoppsett for enaksiell trykktest. Foto: Jon Runar Drotninghaug.

Utstyret som ble benyttet var en GCTS RTR-4000 bergpresse. Kjerneprøvene ble kledd i en plaststrømpe for beskyttelse av testutstyr. Testoppstillingen vises i figur 5.9. Tøyninger ble registrert via tre ekstensometere, to aksielle og ett radielt. Disse tøyningene ble brukt til å bestemme verdier av statisk E-modul og Poissons tall. Verdiene for disse modulene er bestemt ved tangentmodul fra det lineært elastiske område til prøvene.

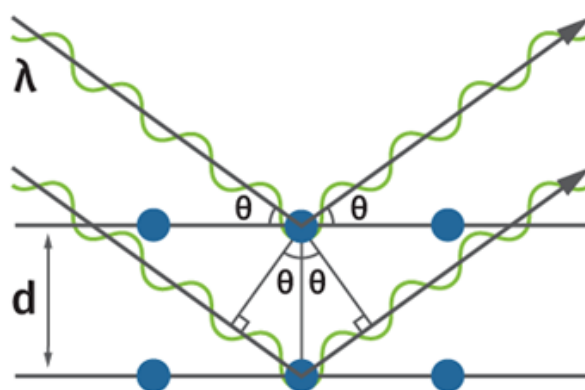
### 5.2.5 Røntgendiffraksjonsanalyse (XRD-test)

Det er utført XRD-test for mineralogisk analyse av sprekkematerialet. I denne testen knuses materialet ned til 5-10 mikrometer. Deretter sendes røntgenstråler i ulike vinkler inn mot prøven. Metoden baserer seg på Braggs lov (se likning 5.4 og figur 5.10), hvis relasjon brukes til å finne den spesifikke gitteravstanden,  $d$ , til mineralene i prøven. I likningen er  $n$  et heltall,  $\lambda$  er bølgelengden i materialet og  $\theta$  er vinkelen den innfallende strålen danner med krystallplanene til mineralene i prøven. Gitteravstanden er karakteristisk for hvert enkelt mineral, og kan regnes når  $n$  og  $\lambda$  er gitt, og  $\theta$  er målt. Analysen gir et diffraktogram som sammenlignes med

referansekurver til mineraler i en database. På den måten kan det både gis en fortolkning av hvilke mineraler som finnes i prøven, og hvor stor prosentvis andel de utgjør (Nilsen, 2016).

Utstyret som ble benyttet i denne testen var *Bruker D8 Advance*. Mineralene ble identifisert og kvantifisert ved bruk av programvarene *DiffraC.eva* og *Topas*, hvor sistnevnte benytter Rietvelts metode (e-post korrespondanse med Laurentius Tjihuis 09.03.20).

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (5.4)$$



Figur 5.10: Illustrasjon av Braggs lov (Stresstech, 2020).

### 5.2.6 Frisvellingstest

Det er utført frisvellingstest av sprekkematerialet fra tverrslagstunnelen på Mekjarvik. Metoden gir et mål på hvor mye vann et leirmateriale kan binde i suspensjon og dermed en indikasjon på svelleegenskapene til prøven (Statens vegvesen, 2014).

I denne testen ble 10 ml tørket prøvemateriale  $< 20 \mu m$  løst pakket i en målesylinder ( $V_t$ ). Prøvematerialet ble så drysset forsiktig ned i en målesylinder med 45 ml destillert vann. Prøven stod deretter i tre døgn før volumet av sedimentene i bunnen ble avlest ( $V_1$ ). Det volumet materialet inntar etter sedimentasjonsprosessen er ferdig uttrykkes som fri svelling i prosent ( $FS\%$ ). Materialet ble deretter klassifisert etter tabell 5.4, som indikerer hvor aktiv svellematerialet er. For ytterligere beskrivelser av denne metoden henvises det til håndbok R210 utgitt av Statens vegvesen (2014).

$$FS(\%) = \frac{V_1}{V_t} \cdot 100\% \quad (5.5)$$



**Tabell 5.4: Klassifisering av svellepotensial etter håndbok R210 Statens vegvesen (2014).**

Svellepotensial	Ikke aktivt	Lite aktivt	Middels aktivt	Meget aktivt
Fri svelling (%)	< 100%	100-140%	140-200%	> 200%

### 5.2.7 Måling av svelletrykk

Det er utført målinger av svelletrykk ved tradisjonell ødometertest. I denne testen holdes prøvematerialet ved fast volum og utvikling av svelletrykk observeres. For hver prøve ble 20 g tørr leirfraksjon pakket i en ødometerskål. Prøvene ble videre kompaktert med en belastning på 400 N i 24 timer. Prøvene ble deretter avlastet i to timer før svelletrykket ble mobilisert i ytterligere 24 timer. Største observerte svelletrykk ble notert og klassifisert i henhold til tabell 5.5. For ytterligere detaljer vedrørende denne testen henvises det til Mao et al. (2011).

**Tabell 5.5: Klassifisering av svelletrykk (NBG, 2000).**

Klassifisering	Lav	Middels	Høy	Meget høy
Svelletrykk (MPa)	< 0,1	0,1-0,3	0,3-0,75	> 0,75

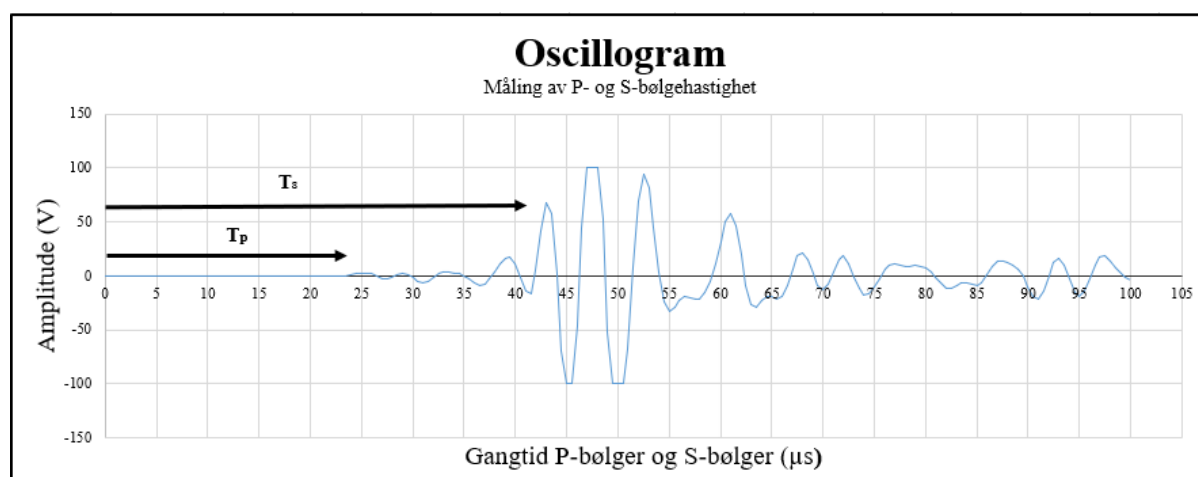
## 5.3 Resultater

I følgende delkapittel vil resultatene fra laboratorieundersøkelsene bli presentert. Det henvises til vedlegg B for flere bilder og diagrammer fra undersøkelsene.

### 5.3.1 Ultralydhastigheter og dynamiske elastisitetsmoduler

Bestemmelse av gangtider for P- og S-bølger ble funnet ved å analysere amplitudene i oscillogram (se figur 5.11). Gangtiden til P-bølgen ( $t_p$ ) ble bestemt fra området hvor oscillogrammet viser et første utslag. S-bølgen har høyere amplitude enn P-bølgen, og gangtiden til denne bølgen ( $t_s$ ) ble bestemt fra området hvor oscillogrammet viser et markant utslag. På grunn av vanskeligheter med å lese av gangtider for S-bølger på tvers av kjerneprøvene, har det ikke lyktes å måle S-bølgehastigheter i denne retningen.

Resultatene fra test av ultralydhastigheter vises i tabell 5.6. Tabellen gir en oversikt over P- og S-bølgehastigheter,  $\frac{V_p}{V_s}$ -forhold, dynamisk E-modul, dynamisk Poissons tall og anisotropi (forholdet mellom P-bølgehastigheten på tvers og langs kjerneprøvene).



Figur 5.11: Oscillogram som viser amplitude (V) som funksjon av gangtid ( $\mu s$ ). Oscillogrammet brukes til å lese av gangtider for P- og S-bølger. Figuren er laget i Microsoft Office Excel og viser data for prøve 3.

Tabell 5.6: Oversikt over resultater fra test av ultralydhastighet.

Prøveid.	$\Delta t_p$ [ $\mu s$ ]	$\Delta t_s$ [ $\mu s$ ]	$V_p$ [m/s]	$V_s$ [m/s]	$\frac{V_p}{V_s}$	$E_{dyn.}$ [GPa]	$\nu_{dyn.}$	$\Delta t_{p(\perp)}$ [ $\mu s$ ]	$V_{p(\perp)}$ [m/s]	Anisotropi ( $\frac{V_{p(\perp)}}{V_p}$ )
1	23,90	44,50	5593	3004	1,86	63,24	0,30	9,20	5466	0,98
2	24,00	44,90	5569	2977	1,87	62,41	0,30	9,40	5351	0,96
3	23,40	42,50	5714	3146	1,82	68,77	0,28	8,90	5671	0,99
4	25,40	42,30	5265	3161	1,67	66,21	0,22	9,40	5374	1,02
5	28,90	44,10	4080	2674	1,53	45,65	0,12	6,90	6374	1,56
6	26,70	40,60	3948	2596	1,52	42,88	0,12	6,80	6465	1,64
7	23,40	34,80	4035	2714	1,49	45,56	0,09	6,70	6563	1,63

Tabellforklaring:  $\Delta t_p$ : Gangtid P-bølger,  $\Delta t_s$ : Gangtid S-bølger,  $V_p$ : P-bølgehastighet langs kjerne,

$V_s$ : S-bølgehastighet langs kjerne,  $\Delta t_{p(\perp)}$ : Gangtid P-bølge på tvers av kjerne,  $V_{p(\perp)}$ : P-bølgehastighet på tvers av kjerne.

### 5.3.2 Enaksiell trykktest

Resultatene fra enaksiell trykktest vises i tabell 5.7. Tabellen gir en oversikt over prøvenes UCS-verdi, E-modul, Poissons tall, ved hvilke tangentspenninger disse parametrene er bestemt og bruddtype. Tangentspenning for bestemmelse av E-modul og Poissons tall er tatt ved 50% av UCS-verdi. Spenning-tøyningsdiagram og bilder av kjerneprøvene etter brudd finnes i vedlegg B.

**Tabell 5.7: Resultater fra enaksiell trykktest.**

Prøveid.	UCS (MPa)	$E_{stat.}$ (GPa)	$\nu_{stat.}$ (GPa)	Tangentspenning (MPa)	Bruddtype
1	113,7	64,36	0,28	57,6	Trappetrinn langs foliasjon
2	131,4	67,44	0,22	65,8	Trappetrinn langs foliasjon
3	114,9	70,42	0,23	57,5	Vertikalbrudd
4	281,6	67,12	0,27	141,8	Kaotisk
5	113,0	47,21	0,33	56,6	Skjærbrudd
6	100,8	48,73	0,27	50,5	Skjærbrudd
7	125,5	50,31	0,28	63,1	Skjærbrudd

### 5.3.3 XRD-test

Resultatene fra XRD-test vises i tabell 5.8. Tabellen gir en oversikt over de tolkede mineralene i prøvene og hvor stor prosentvis andel de utgjør. Tabellen viser at kvarts, muskovitt og kloritt er de mest fremtredende mineralene i prøvene. Diffraktogram fra XRD-analysen finnes i vedlegg B.

**Tabell 5.8: Resultater fra XRD-test.**

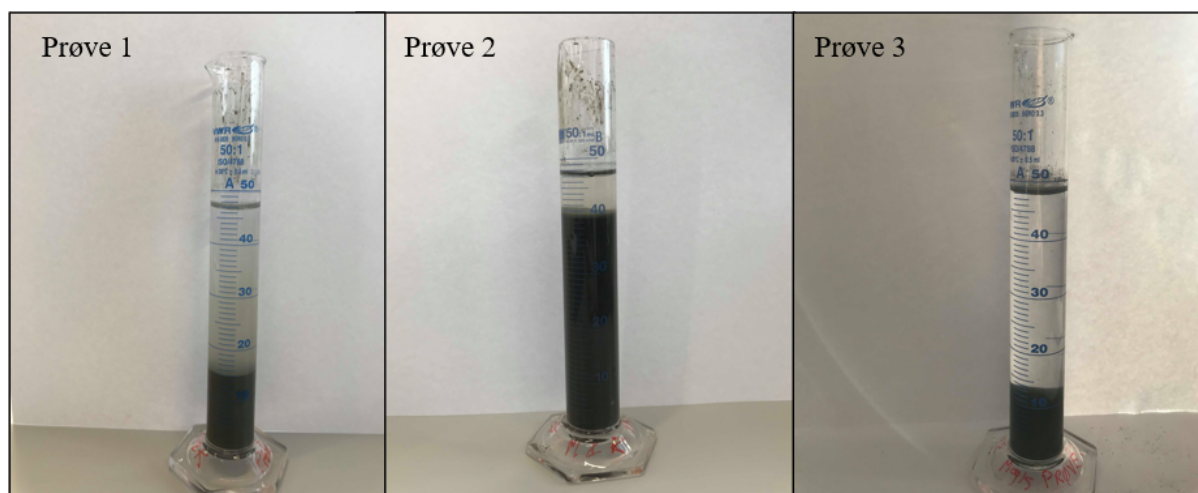
Mineraler (%):	Prøve 1S	Prøve 2S	Prøve 3S
Kvarts	31,82	6,00	32,61
Muskovitt	30,70	14,26	31,49
Kalsitt	4,28	51,82	2,61
Kloritt	16,06	10,03	13,47
Mikroklin	4,86	9,74	4,58
Pyritt	0,00	2,95	0,00
Spessartin	3,01	0,00	1,06
Augitt	3,17	0,00	4,36
Albitt	6,10	5,19	9,81
<b>Tot (%):</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>

### 5.3.4 Test av frisvelling

Resultatene fra frisvellingstest vises i tabell 5.9. Prøven ble oppbevart i tre døgn før volum av sedimentert materiale ble avlest. Bilder av prøvene ved avlesning vises i figur 5.12. Prøve 1S hadde en frisvelling på 150% og ble klassifisert som middels aktivt. Prøve 2S hadde en frisvelling på 410%, som er klassifisert som meget aktivt. Prøve 3S hadde frisvelling på 100% og er klassifisert som lite aktivt.

**Tabell 5.9: Resultater fra test av frisvelling.**

Prøveid.	Volum sedimentert materiale (ml)	Fri svelling (%)	Svellepotensial
1S	15	150	Middels aktivt
2S	41	410	Meget aktivt
3S	10	100	Lite aktivt



**Figur 5.12: Bilder av prøvene i frisvellingstest ved avlesning av sedimentert volum.**

### 5.3.5 Test av svelletrykk

Resultater fra test av svelletrykk vises i tabell 5.10. I tabellen vises høyeste observerte svelletrykk for hver prøve og korresponderende klassifisering av svelletrykket. Prøve 1S og 3S hadde henholdsvis middels og lavt svelletrykk på 0,17 og 0,02 MPa. Prøve 2S hadde størst svelletrykk på 0,69 MPa, som er klassifisert som høy. Oversikt over mobilisert svelletrykk til prøvene som funksjon av tid finnes i vedlegg B.

**Tabell 5.10: Resultater fra ødometertest.**

Prøveidentifikasjon	Største svelletrykk (MPa)	Klassifisering
1	0,17	Middels
2	0,69	Høy
3	0,02	Lav

## 5.4 Diskusjon og gyldighet av resultater

I dette delkapittelet vil gyldigheten og usikkerheten av resultatene fra laboratorieundersøkelsene diskuteres.

### 5.4.1 Antakelser vedrørende prøver av fyllitt

På grunn av situasjonen rundt Covid-19 ble det ikke anledning til å innhente fyllittprøver fra tverrslagstunnel på Arsvågen. Fyllitten på Mekjarvik og Arsvågen tilhører imidlertid samme dekkeenhet (Ryfylkeskiferen) og erfaringer fra drivingen av tunnelene har vist at disse har tilsvarende egenskaper. Det er derfor antatt at testene som er utført på fyllitten fra Mekjarvik også vil være representativ for fyllitten som er påtruffet i tverrslagstunnelen på Arsvågen. Dette medfører likevel en viss usikkert da fyllitten kan utvise lokale variasjoner.

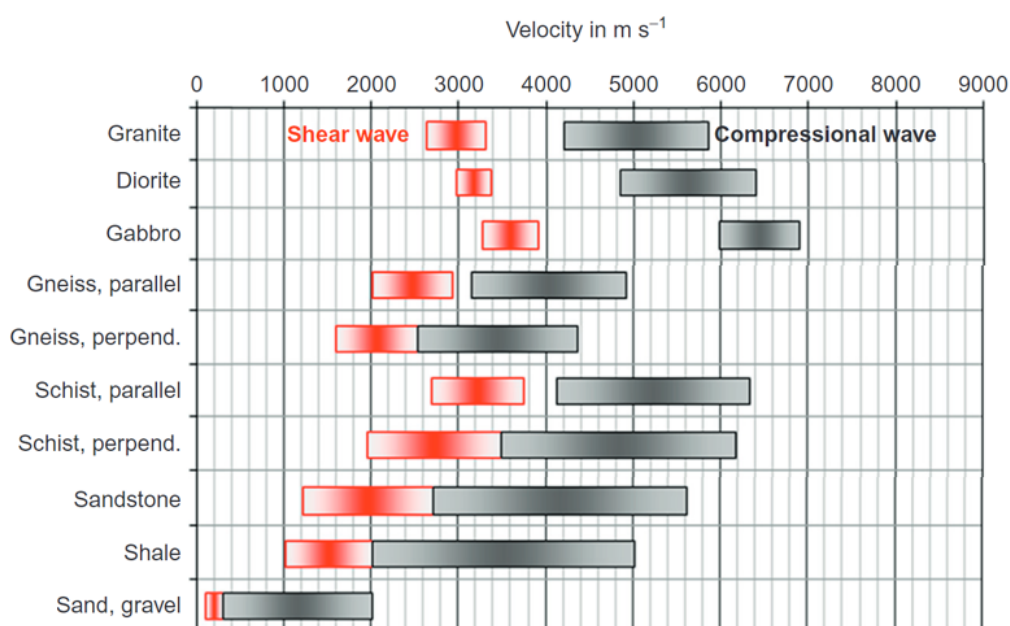
### 5.4.2 Test av ultralydhastighet

Test av ultralydhastighet viser at den granittisk gneisen og fyllitten har forskjellige egenskaper. I prøvene av granittisk gneis var P-bølgehastigheten målt på langs ca. 5600 m/s, mens den var ca. 4000 m/s i prøvene av fyllitt. Det er antatt at fyllittens skifrihet medfører at denne bergarten har lavere P-bølgehastighet sammenlignet med den granittiske gneisen. Forskjellen i P-bølgehastighet er trolig også påvirket av forskjeller i bergartenes tekstur og mineralsammensetning.

Testen viser også at fyllitten har høy anisotropi. P-bølgehastigheten var ca. 60% høyere (ca. 6300 m/s) målt på tvers av kjerneprøvene sammenlignet med målingene på langs. Dette skyldes trolig fyllittprøvenes skifrihet og foliasjon, hvor bølgene går raskere langs en laggrense. Den granittiske gneisen har nokså like bølgehastigheter på tvers som målt på langs. En mulig forklaring kan være prøvenes beskaffenhet. I prøvene fra den granittiske gneisen er foliasjonsplanene på skrå og småfoldet. Det har derfor vært vanskelig å få til målinger normalt på og langs foliasjonen. Merk også at siden kjernene er avrundete har målingene på tvers vært påvirket av at transduserne ikke har like god kontakt med prøveflatene i denne retningen. Disse resultatene er derfor mer usikre sammenlignet med målingene langs kjernen.

Det foreligger også usikkerhet tilknyttet bestemmelsen av S-bølgehastigheter i fyllittprøvene. Under test av ultralydhastighet var det krevende å fremskaffe stabiliserte amplituder i oscillogrammet. Dette medførte at det var vanskelig å lese av ankomsttider for disse bølgene. Følgelig foreligger det også usikkerheter vedrørende bestemmelse av  $E_{dyn}$  og  $\nu_{dyn}$ , som er funksjoner av S-bølgehastigheten.

En oversikt over P- og S-bølge hastighet for et utvalg bergarter vises i figur 5.13. Figuren er modifisert etter tabeller i Schön (2015). Fra figuren kan det sees at målte P- og S-bølge hastigheter i den granittiske gneisen ( $V_p$  på ca. 5600 m/s og  $V_s$  på ca. 3000 m/s) samsvarer best med verdier rapportert for granitt og dioritt. De målte hastighetene på langs og på tvers er litt høyere enn det som er rapportert for gneis. Figuren har ingen verdier for fyllitt, men det kan sees at de målte hastighetene i fyllittprøvene ( $V_p$  på ca. 4000 m/s og  $V_s$  på ca. 2700 m/s) samsvarer godt med rapporterte verdier for glimmerskifer, som er en liknende bergartstype.



Figur 5.13: Oversikt over P-bølge hastighet (svart) og S-bølge hastighet (rød) for et utvalg bergarter. Figuren er modifisert etter Schön (2015).

### 5.4.3 Enaksiell trykktest og dynamiske elastisitetsmoduler

Kjerneprøve 6 og 7 har  $\frac{L}{D}$ -forhold på henholdsvis 2,4 og 2,1 som følge av at disse prøvene sprakk opp langs skifriheten under tilsaging. Prøvene avviker derfor fra ISRM-standarden, som anbefaler  $\frac{L}{D}$ -forhold større enn 2,5 (Bieniawski et al., 1979). Prøvene ligger imidlertid innenfor anbefalingene i ASTM-standarden, som foreslår et minste  $\frac{L}{D}$ -forhold på 2,0. (ASTM International, 2014). Litteraturen viser at  $\frac{L}{D}$ -forholdet kan ha påvirkning på styrken når forholdet nærmer seg 2 (Tuncay & Hasancebi, 2009). Testen avviker også fra ISRM-standarden i antall kjerneprøver, hvor det anbefales å ta utgangspunkt i minst fem prøver. Testen har likevel avslørt jevne verdier av UCS,  $E_{stat}$  og  $\nu_{stat}$  innad for hver bergartstype med unntak av prøve 4, som hadde markant høyere UCS-verdi. Det er derfor antatt at testene, til tross for avvik fra ISRM-standarden, likevel kan ha gitt gode estimater på styrkeegenskapene til disse bergartstypene.

Gjennomsnittlig UCS-verdi for den granittiske gneisen og fyllitten er henholdsvis 160,4 og 113,1 MPa. Ifølge ISRM-standarden klassifiseres dette som veldig høy styrke (Bamford et al., 1978). Resultater fra enaksiell trykktest viser at styrken er i stor grad påvirket av prøvenes anisotropi. I prøve 1-3 har prøvene gått i brudd i trappetrinn langs foliasjonen. Dette er trolig grunnen til at disse prøvene har mye lavere UCS-verdi (113-131 MPa) sammenlignet med prøve 4, som hadde UCS-verdi på 281,6 MPa. Bruddet i prøve 4 er kaotisk og det har trolig ikke gått langs foliasjonen til prøven. Da prøve 4 er fra et høyere parti i borhullet kan også variasjoner i mineralsammensetningen ha påvirket.

I denne testen var det godt samsvar mellom  $E_{stat}$ - og  $E_{dyn}$ -verdier for begge bergartene.  $E_{stat}$ -verdier for den granittiske gneisen varierer mellom ca. 64-70 GPa, mens  $E_{dyn}$ -verdier varierer mellom ca. 62-69 GPa. For fyllittprøvene er det funnet  $E_{stat}$ -verdier mellom ca. 47-50 GPa og  $E_{dyn}$ -verdier mellom ca. 43-46 GPa. Resultatene viser at parameteren  $E_{dyn}$  kan være et godt mål på  $E_{stat}$  for disse bergartstypene. Resultatene viser også at den granittiske gneisen er en del stivere enn fyllitten.

Testen viser at det også er godt samsvar mellom  $\nu_{stat}$ -verdier (0,22-0,28) og  $\nu_{dyn}$ -verdier (0,22-0,3) for den granittiske gneisen. Resultatene samsvarer imidlertid dårlig for fyllittprøvene, hvor  $\nu_{stat}$ -verdiene er betydelig høyere (0,27-0,33) sammenlignet med  $\nu_{dyn}$ -verdiene (0,09-0,12). Dette viser at det foreligger usikkerhet knyttet til å bruke  $\nu_{dyn}$  som et mål på  $\nu_{stat}$  for fyllitten. Testen viser at resultatene må sees i sammenheng med prøvenes anisotropi (foliasjon). Prøvenes rombølg hastigheter avhenger av hvilken retningen de måles i. Følgelig er også bergartenes  $E_{dyn}$ - og  $\nu_{dyn}$ -verdier retningsavhengige.

#### 5.4.4 XRD-test

XRD-analysen viser at sprekkematerialene hovedsakelig består av mineralene kvarts, muskovitt, kloritt og ulike feltspater (mikroklin og albitt). I prøve 2S er det også påvist ca. 52% kalsitt og 3% pyritt. Testen kunne imidlertid ikke avsløre om prøvene inneholder grafitt, som det var antatt kunne forklare den sorte fargen på sprekkematerialet. Grafitt ligger i samme hovedtopp som kvarts (d-verdi på 3,33) og mineralet er derfor vanskelig å påvise i en slik analyse. Siden det ble utført en bulk XRD-test er det også vanskelig å skille svellende mineraler fra mer vanlige mineraler. Prøve 2S hadde imidlertid en bue av d-verdier som kan indikere innhold av svellende mineraler, men det var ikke mulig å kvantifisere denne mengden. Det er også mulig å utføre XRD-test spesifikt for svellende mineraler, men på grunn av tidsbegrensning ble ikke dette utført.

### 5.4.5 Test av frisvelling og svelletrykk

De ulike prøvene av sprekkemateriale viser svært forskjellige egenskaper. Prøve 1S og 3S viser sprekkemateriale med moderat og lavt svelletrykk. Prøve 2S er mest interessant, og viser at det finnes aktivt sprekkemateriale med høyt svelletrykk i tunnelen. Den store spredningen i resultatene tyder på at svelleegenskapene til sprekkematerialet i tunnelen utviser høy lokal variasjon.

I prøve 1S, 2S og 3S er prosentvisandel av materiale  $< 20\mu m$  henholdsvis 13,5%, 13,4% og 10%. Prøveandelen med svelleegenskaper utgjør derfor en forholdsvis lav prosentandel av sprekkemateriale. Det er derfor antatt at det mobiliserte svelletrykket i tunnel vil være betydelig lavere enn det som er målt i laboratoriet.



## Kapittel 6

# Prediksjon av ingeniørgeologiske forhold i tverrslagstunnel på Arsvågen

I dette kapitlet presenteres resultater fra de seismiske undersøkelsene på stoff i tverrslagstunnelen på Arsvågen. Kapitlet gir innledningsvis en introduksjon og forklaring av TSP sitt brukergrensesnitt, som brukes til å tolke ingeniørgeologiske forhold foran stoff. Deretter er det gjort et utvalg og en inndeling av undersøkelser etter hvordan metoden har blitt brukt til å påvise ulike ingeniørgeologiske problemstillinger. Avslutningsvis vil det bli vurdert hvordan metoden har fungert i tverrslagstunnelen.

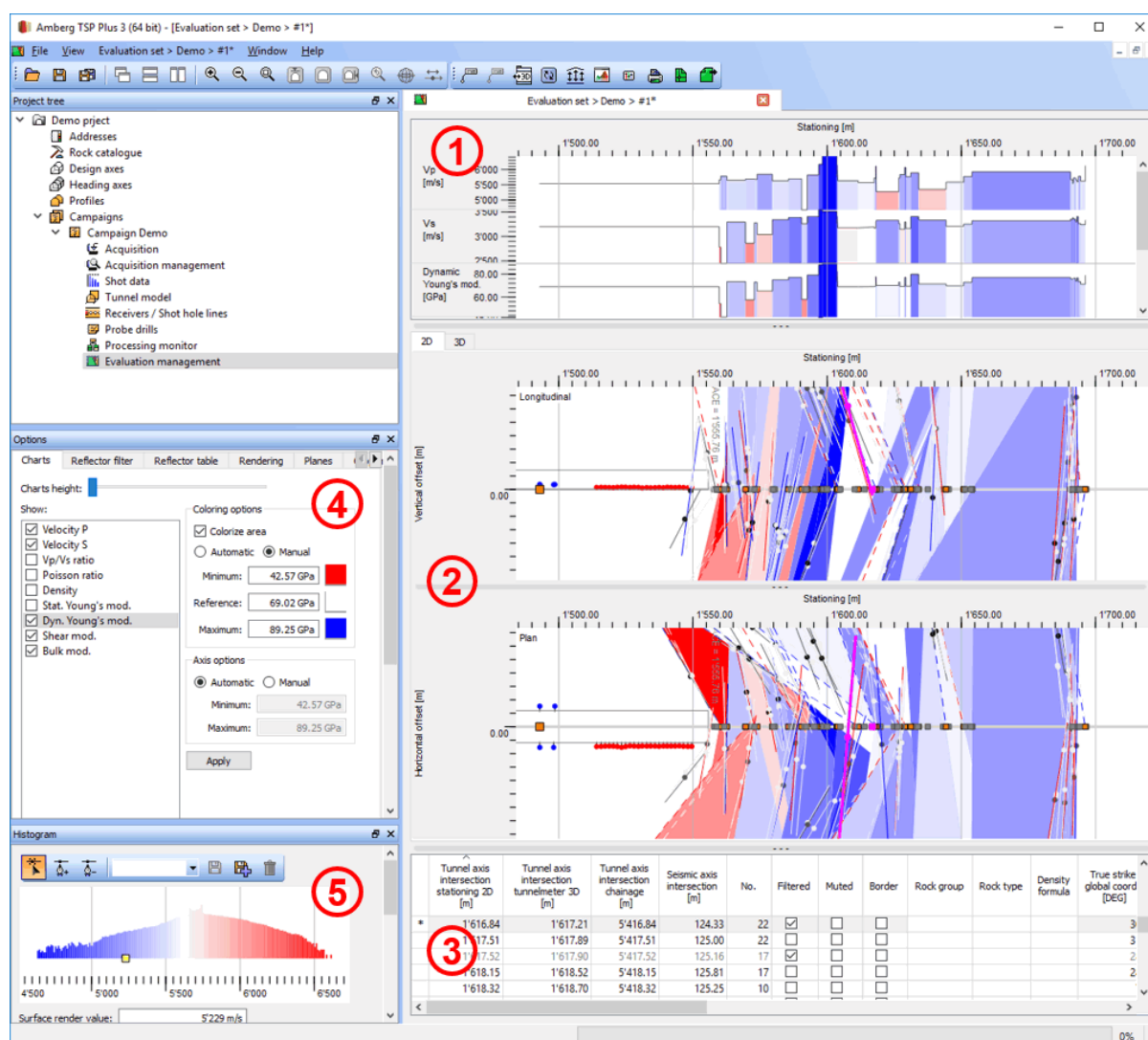
### 6.1 TSP-brukergrensesnitt og utgangspunkt for tolkning

Figur 6.1 viser et standard brukergrensesnitt i TSP hentet fra evalueringsmanualen til *Amberg Technologies* (Amberg Technologies AG, 2017a). Resultater fra de seismiske undersøkelsene visualiseres som fysiske og bergmekaniske parametre (vertikal akse) langs profilmeter foran stoff (horisontal akse) (vindu 1 i figur 6.1). I hver undersøkelse må det bestemmes referanseverdier på parametrene. Dette gjøres ved å bruke informasjon fra direktebølgen, som går i bergmassen mellom skuddhullene og geofonene. Ved bruk av presenterte likninger i kapittel 2 beregnes representative bergmekaniske parametre for den rådende geologien i tunnelen. Brukeren kan da sammenligne predikerte forhold opp mot grunnforholdene og referansenivåene som foreligger.

## Kapittel 6. Prediksjon av ingeniørgeologiske forhold i tverrslagstunnel på Arsvågen

Det er også mulig å legge inn manuelle referanseverdier (vindu 4 i figur 6.1).

Verdiene på de ulike parametrene er farge- og skyggekodet. Referanseverdiene representerer en midtre node i fargeskalaen i transparent hvit farge (vindu 1, 2 og 5 i figur 6.1). Verdier på estimerte rombølgehastigheter og bergmekaniske moduler som er lavere enn referansenivåene er fargekodet i rødt. Estimerte verdier som er høyere enn referansenivåene er fargekodet i blå. Mørkere farger indikerer mer ekstreme verdier. Brukeren kan selv velge hvilke parametre som skal vises i brukergrensesnittet (vindu 5). Aktuelle parametre er P-bølgehastighet, S-bølgehastighet,  $\frac{V_p}{V_s}$ -forhold, dynamisk Poissons tall, tyngdetetthet, statisk- og dynamisk E-modul, skjærmodul og bulkmodul. Programvaren bruker empiriske korrelasjoner for å beregne bergmassens tyngdetetthet og statisk E-modul (Amberg Technologies AG, 2017a).



Figur 6.1: Brukergrensesnitt til en standard TSP-undersøkelse (Amberg Technologies AG, 2017a).

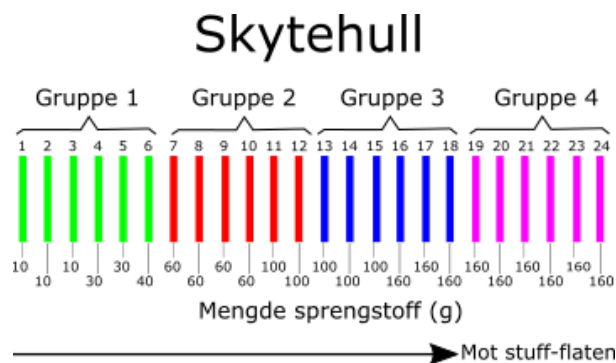
Vindu 2 i figur 6.1 viser en oversikt over predikerte seismiske reflektorer i henholdsvis profil- og horisontalplan. Reflektorene som krysser den planlagte tunneltraseen, samt segmentene mellom reflektorene, er fargekodet tilsvarende som de bergmekaniske parametrene. Reflektorer som ikke krysser tunnelen i profil- eller horisontalplan er illustrert i mørkegrå farge. Retningen til reflektorene representerer strøk og fallretning på de påviste geologiske strukturene. Dette kan være bergartsgrenser, svakhetssoner, sprekker eller andre fysiske kontraster i bergmassen. I vindu 2 i figur 6.1 vises også oppstillingen av skuddhull (røde punkter) og geofoner (blå punkter) i tunnel. I vindu 3 i figur 6.1 vises evalueringstabellen. Denne tabellen inneholder en liste av informasjon om de seismiske reflektorene, som for eksempel strøk og fall og ved hvilke profilnummer strukturene krysser i tunnel (Amberg Technologies AG, 2017a).

Programvaren muliggjør også å konstruere 3D-modeller av de forutliggende grunnforholdene. Det er for eksempel mulig å framstille modeller av romlig fordeling av P-bølge hastighet (Amberg Technologies AG, 2017a). Slike modeller kan brukes til å tolke orientering og utstrekning på geologiske strukturer. De kan dermed også brukes til å angi hvor strukturene kommer til å krysse langs den planlagte tunneltraseen.

## 6.2 Tekniske aspekter ved forberedelse og utførelse av undersøkelsene

I evalueringsrapporten til Al-Samarray & Jensen (2020) beskrives det hvordan de seismiske undersøkelsene på stoff har blitt utført på E13. Forberedelsen starter ved at byggherren sender ut en bestilling til entreprenør om tilrigging av en seismisk undersøkelse. Denne bestillingen inkluderer tidspunkt for når undersøkelsen skal gjennomføres, og antall borehull med plassering og geometri som skal bores innen den tid. En standard bestilling inkluderer 28 borehull, hvorav 24 er skuddhull og fire er mottakerhull. De tre siste undersøkelsene på E13 har blitt utført med 36 hull, hvor det ble installert 16 skuddhull og to geofonhull på hver side av tunnelen. Deretter foretar teknisk personell fra byggherre kontroll og innmåling av hullene og den stedværende geologien. Fra de 11 undersøkelsene som er blitt utført på E13 har entreprenør brukt i gjennomsnitt 2,76 timer på å bore alle hull. Tilrigging av de siste undersøkelsene har gått betydelig raskere sammenlignet med de første.

Når hullene er ferdig boret starter sertifisert sprengningspersonell (skytebas) fra entreprenør å lade skuddhullene. Skuddhullene lades etter en bestemt resept, levert av byggherre. Denne resepten er dimensjonert basert på erfaringer fra tidligere undersøkelser og den stedværende geologien. Figur 6.2 viser den mest brukte resepten på E13. Ladningen har bestått av Orica 80 g/m detonasjonslunte. For en lading på for eksempel 160 g kreves det derfor 2 m lunte.



**Figur 6.2:** Standard resept for ladning av skuddhull i tverrslagstunnelen på E13 (Al-Samarray & Jensen, 2020).

På E13 har entreprenør brukt i gjennomsnitt 0,94 timer på å lade 24 skuddhull. Samtidig som entreprenør lader skuddhullene, starter teknisk personell hos byggherre å montere geofoner og utstyr i forbindelse med undersøkelsen. Dette har tatt omtrent like lang tid som ladningen av skuddhullene (Al-Samarray & Jensen, 2020).

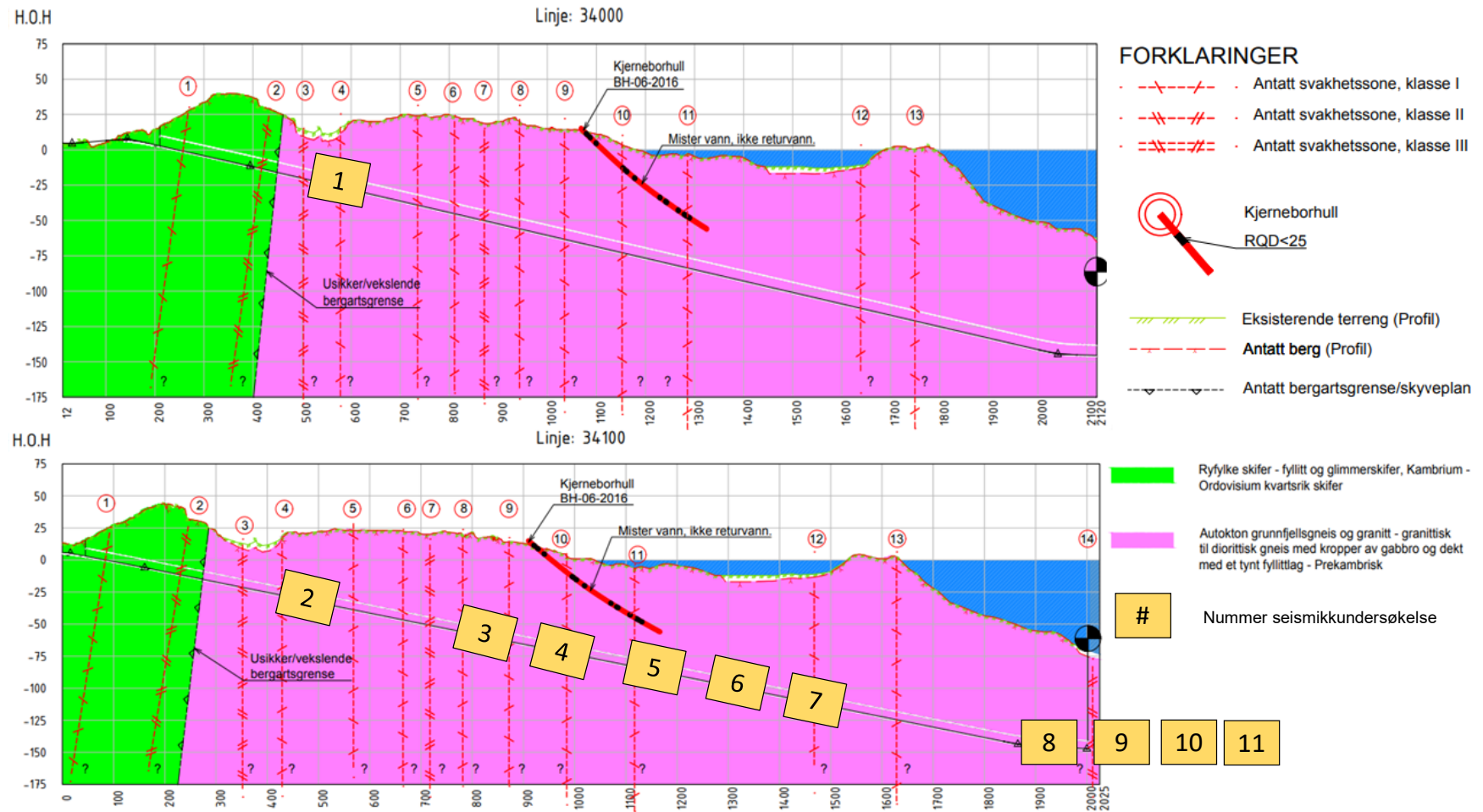
Undersøkelsene har blitt utført som gruppeskyting. Dette innebærer at skuddhullene deles inn i fire grupper med seks skudd med tilsvarende ladningsmengde (figur 6.2). Under utførelse skytes gruppene hver for seg med ett sekunds mellomrom. Selve skytingen og datainnsamlingen har tatt ca. 15 minutter. Totalt har tilriggingen, utførelsen og innmålingen av undersøkelsen tatt ca. 3-4 timer. Deretter følger dataprosessering, etterfulgt av tolkning og evaluering av resultatene. Erfaringene så langt viser at disse er de mest krevende trinnene, spesielt dataprosesseringen hvor det foretas skjønnsmessig kalibrering, filtrering og skille mellom god data og støy (Al-Samarray & Jensen, 2020).

### 6.3 Utvalg av undersøkelser

En detaljert presentasjon av samtlige 11 undersøkelser på E13 ville vært omfattende og utenfor omfanget til denne oppgaven. I tillegg har de siste undersøkelsene blitt utført i overgangen til entreprise E04, hvor det enda ikke foreligger kartleggingsdata i tunnel. Det er istedenfor valgt å fokusere på hvordan seismikken har klart å påvise ulike ingeniørgeologiske problemstillinger i tunnel som bergmassekvalitet, svakhetssoner, vannforhold og bergartsgrenser. På bakgrunn av dette er det valgt ut fire undersøkelser som eksemplifiserer disse problemstillingene. Disse undersøkelsene er igjen inndelt i seksjoner for å gjøre sammenligningen mellom den seismiske prognosen, tunneldokumentasjon og MWD-data mer oversiktlig. I delkapittel 6.10 er det presentert en oversikt over vurderinger av hvordan seismikken og MWD-dataen har samsvart med hverandre og den ingeniørgeologiske kartleggingen i tunnel. En oversikt over ingeniørgeologisk

profil og hvor i tunnelen det er utført seismiske undersøkelser på stoff finnes i figur 6.3. Resultater, modeller og data fra seismikk på stoff er hentet fra Al-Samarray & Jensen (2020). MWD-data og informasjon fra kartlegging i tunnel er hentet fra Jensen & Eldevik (2019).













Merk at selv om TSP har en rekkevidde på 150 m i godt berg, vil usikkerheten øke med antall meter ut i undersøkelsesområdet. I brukermanualen til TSP 303 oppgis det at den seismiske oppløsningen er ca.  $\pm 5\%$  av distansen fra stoff (Amberg Technologies AG, 2017b). Dette betyr at posisjonen til en geologisk struktur som ligger 20 m foran stoff vil kunne bestemmes med en nøyaktighet på ca.  $\pm 1$  m. Ved prediksjoner 100 m foran stoff vil nøyaktigheten være ca.  $\pm 5$  m. Det er derfor forventet at seismikken samsvarer dårligere med faktiske geologiske forhold i tunnel lenger ut i undersøkelsesområdet.



**Figur 6.3: Ingeniørgeologisk profil og oversikt over utførte seismiske undersøkelser på stoff for linje 34000 og linje 34100 for entreprise E13 Arsvågen (modifisert etter Vik et al. (2017)).**











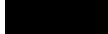
## 6.4 Tunneldokumentasjon og MWD-data

Data fra tunnelkartleggingen og borparametertolkning (BPT) foreligger i Novapointrapporter i den geologiske sluttrapporten på E13. Tunnelkartleggingen er utført etter hver salve og omfatter Q-verdier og beskrivelser av de geologiske forholdene i tunnel. Figur 6.4 viser tegnforklaring for bergartstyper og symboler for geologiske registreringer i tunnelen.

<u>Geologiske registreringer</u>	<u>Bergarter</u>
 Sprekkesett	 Båndgneis
 Foliasjon	 Dioritt
 Sprekk	 Fyllitt
 Sleppe	 Glimmergneis
 Svakhetszone smalere enn 1 m	 Glimmerskifer
 Svakhetszone bredere enn 1 m	 Gneis
S Avskaling etter over 1 time	 Granitt
SS Avskaling etter få minutter	 Granittisk gneis
B Intenst bergslag	 Skifer

**Figur 6.4: Tegnforklaring til geologiske registreringer og bergartstyper i novapointrapporter (Jensen & Eldevik, 2019).**

Borparametertolkningen er basert på en kontinuerlig innhenting av MWD-data (*Measurement while drilling*) fra boreriggen. Fra boringen samles data som blant annet borsynk, matetrykk, rotasjonskraft, vannmengde og spyletrykk. Dette brukes igjen til å beskrive styrken til berget, grad av oppsprekking og vannforhold (Nilsen & Palmstrøm, 2013). I den geologiske sluttrapporten fra E13 foreligger det registreringer av parameteren *tolket hardhet*. Denne parameteren er illustrert med farger og gir en beskrivelse av styrken til bergmassen. Tabell 6.1 gir en oversikt over sammenhengen mellom fargekodene og verdier av tolket hardhet. Kolonnene for *Beskrivelse* og *Verdi* er definerte skalaer fra Bever control, og gir en oversikt over variasjonen i den tolkede parameteren. Generelt indikerer blå farge hardt berg mens rødlig til fiolett farge indikerer lett borbart og svakt berg. Merk også at registrering av borsynkdata kan påvirkes av andre faktorer enn bergkvaliteten, som for eksempel slitt borekrone og dårlig kalibrering av utstyr.

Tolket hardhet		
Beskrivelse	Verdi	Farge
Opptil 2,0 m/min	-30,000	
-10	-15,000	
0	0,000	
10	5,000	
20	9,000	
30	12,000	
40	20,000	
50	30,000	
70	45,000	
130	110,000	
max	300,000	

**Tabell 6.1: Oversikt over sammenheng mellom fargekoder og definerte verdier for tolket hardhet av Bever Control.**

## 6.5 Prediksjon av bergmassekvalitet

For å belyse hvordan seismikken kan brukes til å påvise bergmassekvalitet i tunnel er det tatt utgangspunkt i undersøkelse nr. 5 som går fra pel ca. 1102-1250 i løp 34100 (figur 6.3). I dette partiet er det kartlagt varierende bergmassekvalitet. Denne tunnelseksjonen gir derfor grunnlag for å gjøre vurderinger om seismikken har klart å skille mellom soner med god og dårlig bergmasse. Det er valgt å dele undersøkelsesområdet i tre seksjoner, for å tydeliggjøre forskjellen i bergmassekvalitet. Fra kapittel 2 ble det sett at bergmassekvaliteten vanligvis vurderes ved å analysere variasjonene i parametrene  $V_p$ ,  $V_s$  og  $E_{dyn}$  (Choudhary & Dickmann, 2017; Hecht-Méndez et al., 2016; Dickmann, 2014).

### 6.5.1 Undersøkelse nr. 5

Resultater fra undersøkelse nr. 5 vises i figur 6.5 og 6.6. Referanseverdier på  $V_p$ ,  $V_s$  og  $E_{dyn}$  ble satt til henholdsvis 5902 m/s, 3411 m/s og 85 GPa. Dette tilsvarer en kompetent granittisk gneis med Q-verdier mellom 4-14 og RQD-verdier mellom 65-95.

I seksjon 1 (pel ca. 1102-1154) indikerer seismikken (Vindu D og E i figur 6.5) en liten forbedring i bergmassekvaliteten med  $V_p$  på ca. 6000 m/s og  $E_{dyn}$  på ca. 90 GPa. Det foreligger også en del lokale variasjoner, hvor  $V_p$  og  $E_{dyn}$  reduseres til henholdsvis 5456 m/s og 78 GPa (røde soner). Fra tunnelkartleggingen er det registrert god bergmassekvalitet med Q-verdier mellom 11-14 (vindu A i figur 6.5). Ved pel ca. 1135-1140 er det registrert to smale slepper som krysser fra hengen til tunnelveggene på tvers (vindu B i figur 6.5). I samme område viser seismikken en

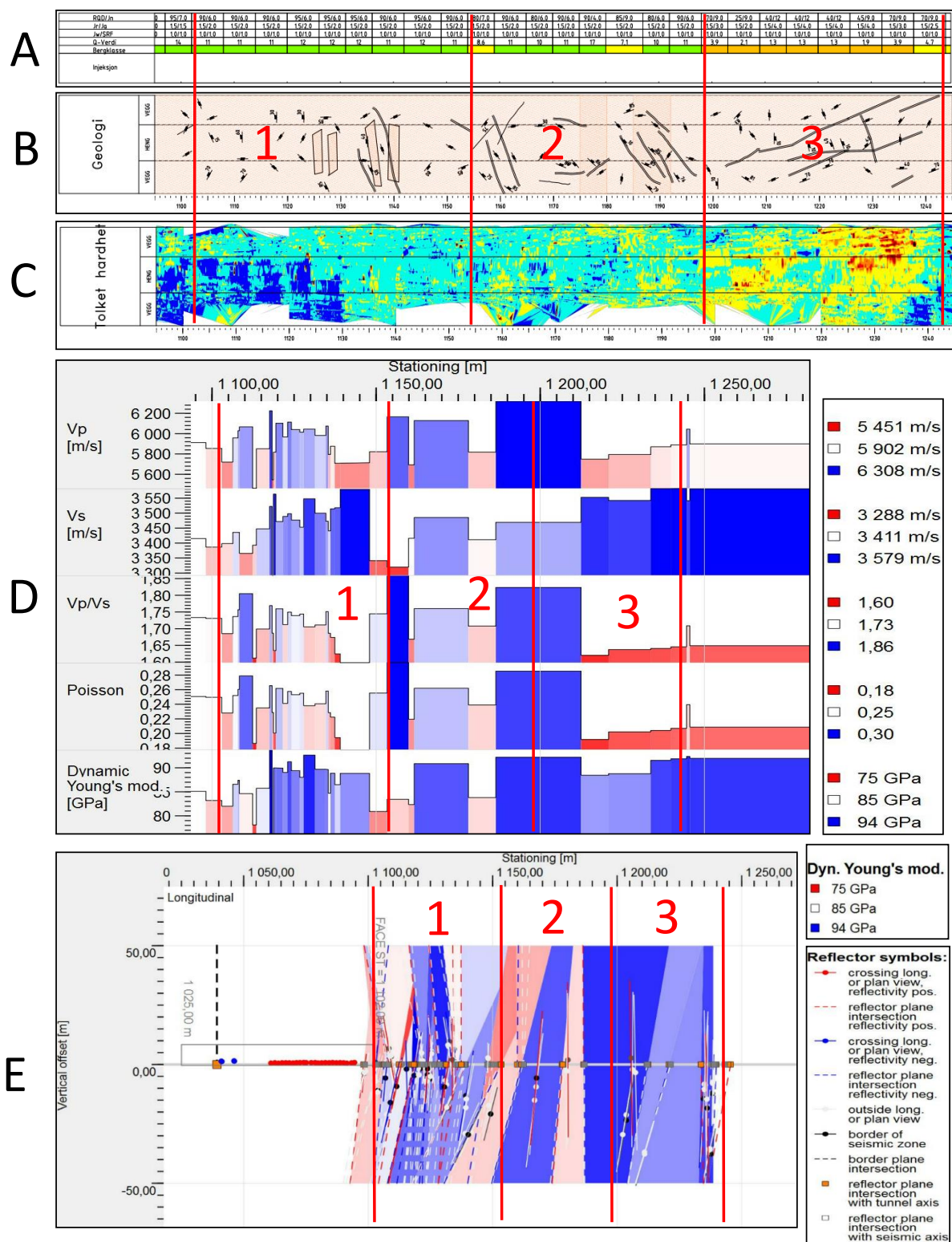


reduksjon i P-bølgehastighet til litt under referansenivå på 5707 m/s, men  $E_{dyn}$  gir ingen utslag. I vindu E i figur 6.5 viser seismikken at de fleste påviste reflektorene har orientering NS med fall på 70-90°Ø. Dette samsvarer godt med et av de kartlagte sprekkesettene i tunnel (vindu B i figur 6.5). Tolket hardhet (vindu C i figur 6.5) viser stort sett blå og gulgrønn farge som indikerer hardt berg. Fra disse dataene sees ingen tydelige strukturer som sammenfaller med seismikken eller den kartlagte geologien i tunnel.

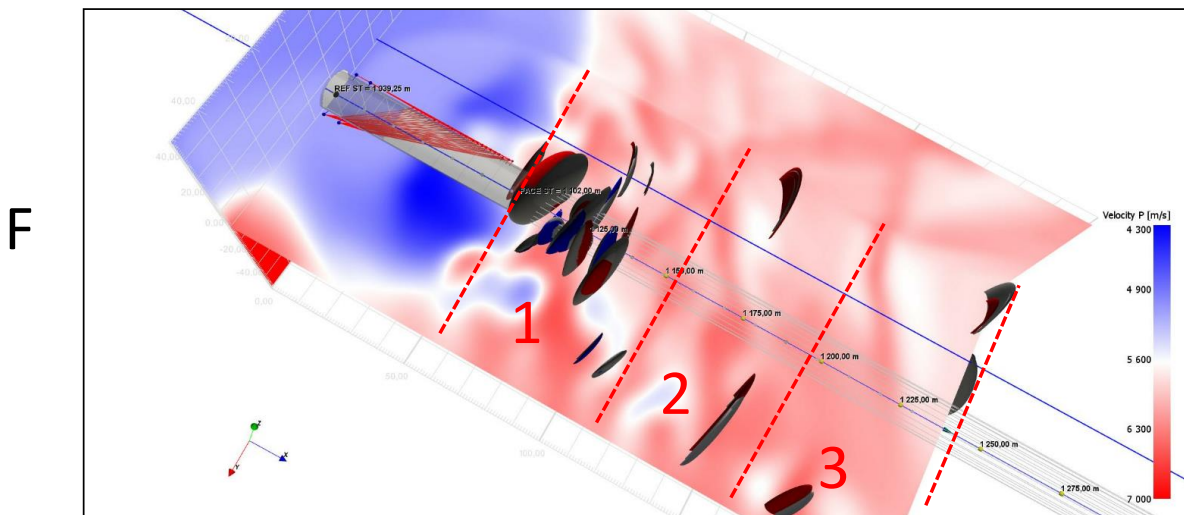
I seksjon 2 (pel ca. 1154-1198) er det kartlagt to salver med litt lavere Q-verdier på 8,6 og 7,1 (vindu B figur i 6.5). Også i denne seksjonen er det kartlagt flere smale slepper som krysser heng og vederlag, tilsvarende som i seksjon 1. Tolket hardhet viser mer nyansert gul farge i områdene hvor det er kartlagt slepper, men resten av seksjonen har blå farge, som indikerer forholdsvis hardt berg. Seismikken viser to smale soner med reduksjoner i samtlige parametre til under referansenivå ved henholdsvis pel 1160 og pel 1180-1185. Disse områdene indikerer derfor en reduksjon i bergmassekvalitet. Fra tunnelkartleggingen kan det sees at disse reduksjonene overlapper med salvene hvor det er kartlagt lavere bergmassekvalitet.

I seksjon 3 (pel ca. 1198-1243) viser tunnelkartleggingen flere langsgående slepper. Bergmassen her er mer oppsprukket, og det er kartlagt RQD-verdier på 25. Det er også registrert lave Q-verdier mellom 1,3-4,7, som indikerer dårlig til middels bergmassekvalitet. Fra tolket hardhet kan det observeres to markante strukturer i rød og gul, som har tilsvarende orientering som de kartlagte sleppene. Disse sonene er også påvist med seismikken, som viser tydelige reduksjoner i  $V_p$ ,  $\frac{V_p}{V_s}$ -forhold og  $\nu_{dyn}$  fra pel 1212 til 1243.

En 3D-modell av romlig fordeling av  $V_p$  i undersøkelsesområdet vises i figur 6.6 (vindu F). Skivene som krysser tunneltraseen er påviste reflektorer i bergmassen. I figuren kan det sees enkelte små partier i lys blå farge som representerer lokale reduksjoner i P-bølgehastighet. Modellen viser imidlertid ingen fremtredende lavhastighetssoner eller markante strukturer.



Figur 6.5: Oversikt over kartlegging i tunnel (vindu A og B), MWD-data (vindu C) og seismikkdata (vindu D og E) i forbindelse med seismikkundersøkelse nr. 5.



Figur 6.6: Romlig fordeling av  $V_p$  i seismikkundersøkelse nr. 5.

## 6.5.2 Diskusjon

I denne undersøkelsen stemte seismikken delvis overens med kartlagte bergmasseforhold i tunnel. Fra undersøkelsen ble det predikert stort sett gode bergmasseforhold og ingen kritiske partier ble avdekket, verken i seismikken eller under driving. Det må likevel bemerkes at seismikken predikererte betydelig flere lavhastighetssoner enn det kartlagt bergmassekvalitet skulle tilsi. Spesielt seksjon 1 peker seg ut, hvor seismikken viste hyppige og diffuse endringer i parameterverdier. Flere av de lokale lavhastighetssonene i denne seksjonen samsvarte dårlig med tunnelkartleggingen og MWD-dataene.

Metodene samsvarte best i seksjon 3. De registrerte langsgående sleppene sammenfalt med en reduksjon i seismikkparametrene  $V_p$ ,  $\frac{V_p}{V_s}$  og  $\nu_{dyn}$ . Sleppene ble også påvist i tolket hardhet som anomalier i rød og gul. Denne undersøkelsen illustrerer nytteverdien av å inkludere MWD-data i sammenlikningen. Mens seismikken indikerte langt flere dårlige soner enn hva som ble kartlagt i tunnel, sees det at tolket hardhet kan være en god parameter for å påvise hvilke av disse sonene som er relevante for tunneldrivingen.

## 6.6 Prediksjon av svakhetssoner

Det er kun påvist én svakhetssone under drivingen av tverrslagstunnelen. Denne ble påtruffet under utsprenghningen av to fjellhaller i enden av tunnelen ved profil ca. 2060-2085 (figur 6.3). I Novapointrapportene er dette registrert som et nytt løp 33500, hvor profilnummer 1 tilsvarer profilnummer 2004 i originalt løp 34100 (figur 6.7). Dette partiet er dekket av seismikkundersøkelse nr. 9, som går fra profilnummer ca. 2009,3 (stuff) til 2150.

Svakhetssoner er vanligvis mer oppknuste og deformerte sammenlignet med den øvrige bergmassen. Fra kapittel 2 ble det sett at svakhetssoner påvises som markante reduksjoner i rombølgehastigheter og dynamiske elastisitetsmoduler (Dickmann, 2014)).

### 6.6.1 Undersøkelse nr. 9

Resultater fra undersøkelse nr. 9 vises i figur 6.7 og 6.8. Bergoverdekningen i dette partiet er ca. 60 meter. Referansenivåene på  $V_p$ ,  $V_s$  og  $E_{dyn}$  er satt til henholdsvis 5700 m/s, 3295 m/s og 78 GPa. Dette tilsvarer en granittisk gneis med Q-verdier mellom 4-11 og RQD-verdier mellom 60-70. Referansegeologien har også en del små slepper og sprekker som går parallelt med tunnel.

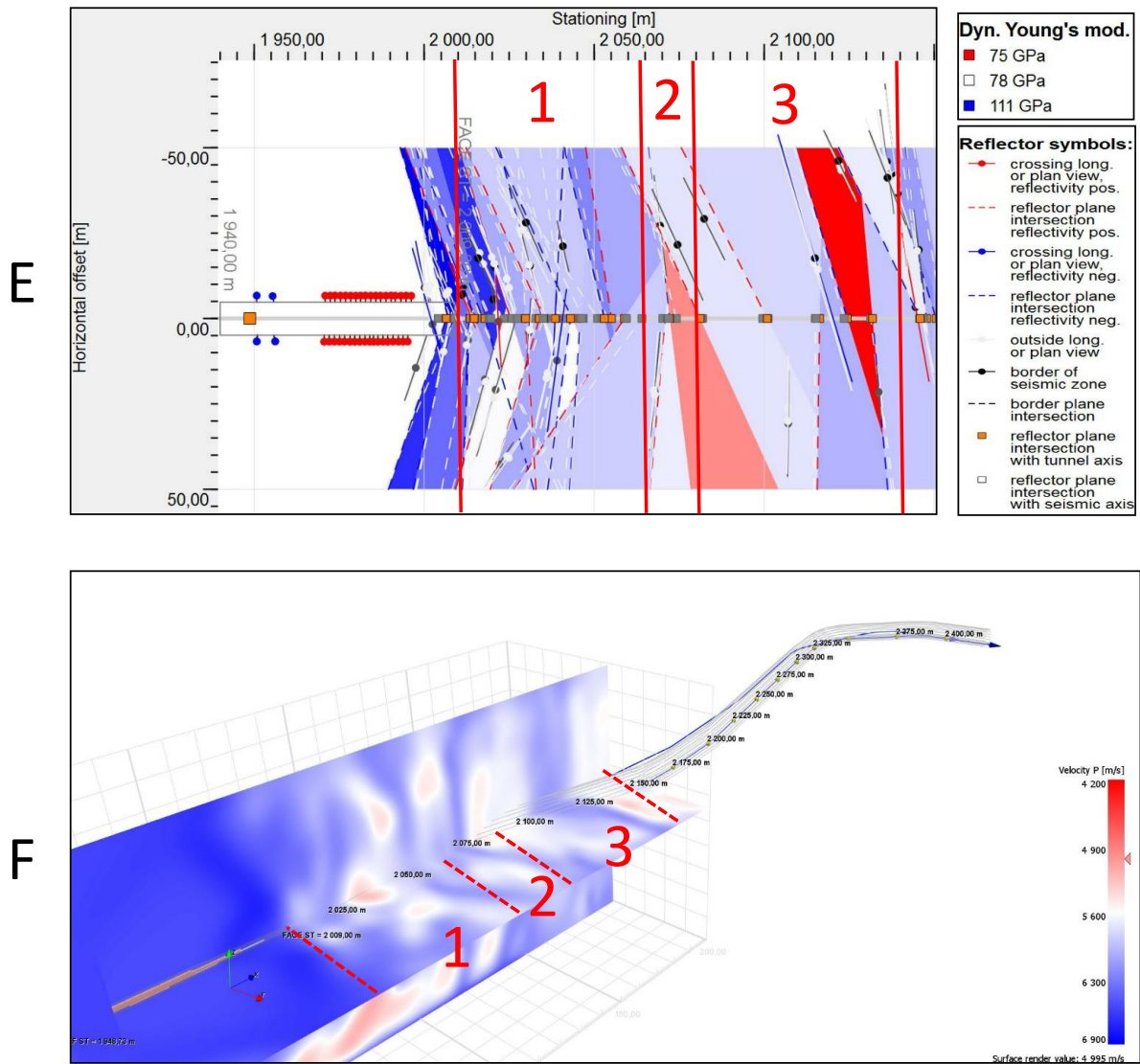
Seismikken i seksjon 1 (pel ca. 2009,3-2060) viser generelt høye rombølgehastigheter (Vindu D i figur 6.7). P-bølgehastigheten ligger jevnt godt over 6000 m/s, som indikerer god bergmassekvalitet. Det er også påvist P-bølgehastigheter opptil 6700 m/s. Ved profil ca. 2043 er det påvist

en lokal reduksjon i  $V_p$ ,  $\frac{V_p}{V_s}$  og  $\nu_{dyn}$ . Dette indikerer et lite område med lavere bergmassekvalitet. I horisontalprojeksjon av undersøkelsesområdet (Vindu E i figur 6.8) kan det sees at  $E_{dyn}$  varierer mellom 80-100 GPa, som indikerer en stiv bergmasse. 3D-modellen av romlig fordeling av  $V_p$  (Vindu F i figur 6.8) antyder en smal, vertikal lavhastighetszone ved pel ca. 2030. Tunnelkartleggingen (Vindu A og B i figur 6.7) viser oppsprukket berg med RQD-verdier mellom 60-70. Sprekkene er glatte og bølgete, og  $J_a$ -parameteren indikerer at sprekkene også har leirfylling. Ved pel 8 (pel 2012 løp 34100) er det registrert en sleppe som krysser fra heng til sydlig tunnelvegg på tvers. Q-verdiene ligger mellom 4,2-8,3. Tolket hardhet viser for det meste gul og rød farge, som indikerer en forholdsvis myk bergmasse (Vindu C i figur 6.7). Dette skyldes antakelig en godt oppsprukket bergmasse.

I seksjon 2 (pel 2060-2085) viser seismikken en markant reduksjon i  $V_p$ ,  $\frac{V_p}{V_s}$  og  $\nu_{dyn}$  med verdier på henholdsvis 5578 m/s, 1,63 og 0,20. Dette antyder et fall i bergmassekvalitet. Vindu E i figur 6.8 viser horisontalplan av undersøkelsesområdet. I denne modellen kan det observeres en ca. 10 m bred sone ved pel 2072 med  $E_{dyn}$  på 76 GPa. Det kan også sees at sonen skjærer tunnelen fra nordlige tunnelvegg. 3D-modellen (figur 6.8 i vindu F) viser en anomali i lys, rød farge som krysser tunnelen ved ca. pel 2075. De kartlagte geologiske forholdene i tunnel viser en ca. 20 m bred svakhetszone med sterkt oppsprukket berg. Ved pel 2075-2085 er det kartlagt Q-verdi på 0,94. Kartleggingen viser også fire slepper med orientering langs tunnelen. Tolket hardhet viser to strukturer i svart som krysser tunnelen på skrå. Disse strukturene utgjør en sterk kontrast sammenlignet med de to andre seksjonene.

I seksjon 3 (pel 2085-2145) viser seismikken en gradvis økning i  $V_p$ - og  $V_s$ -verdier på henholdsvis ca. 6000 m/s og ca. 3400 m/s. Dette indikerer en liten forbedring i bergmassekvalitet sammenlignet med seksjon 2. Ved pel 2123 observeres det en lokal reduksjon i  $V_p$ ,  $V_s$  og  $E_{dyn}$ . Denne sonen kan også sees i horisontalplan, hvor en rød sone med  $E_{dyn}$  på 77 GPa krysser tunnelen fra sydlige tunnelvegg (vindu E i figur 6.8). 3D-modellen (vindu F i figur 6.8) viser en smal, lys, rød sone i enden av undersøkelsesområdet med  $V_p$  på ca. 5300 m/s. I tunnelkartleggingen er det registrert flere små slepper i et spredt mønster. Q-verdiene varierer mellom 4,4-8,1 og det er kartlagt RQD-verdier mellom 55-80. Tolket hardhet viser en smal sone i fiolett som går langs tunnelen ved pel 2040. Seksjonen har ellers gul til rød farge, som indikerer forholdsvis myk og oppsprukket bergmasse.





Figur 6.8: Vindu E: Horizontal projeksjon av tunnelen med fargekodede verdier av  $E_{dyn}$ . Vindu F: Romlig fordeling av  $V_p$  i seismikkundersøkelse nr. 9.

## 6.6.2 Diskusjon

I denne undersøkelsen var det godt samsvar mellom lavhastighetssoner i seismikken og lokale reduksjoner i bergmassekvalitet. Dette kom spesielt godt fram i seksjon 2, hvor det er kartlagt Q-verdi på 0,94 og økt borsynk i tolket hardhet. Merk imidlertid at bergmassen i hele undersøkelsesområdet bærer preg av å være mer oppsprukket sammenlignet med den tidlige observerte bergmassen i tunnel. Fra fargeskalaen på  $V_p$  kan det eksempelvis sees at det er en forholdsvis liten forskjell i P-bølgehastighet på hva som karakteriseres som god (6700 m/s) og dårlig bergmasse (5600 m/s). Dette illustrer en utfordring med metoden. I slike partier, hvor bergmassekvaliteten er forholdsvis dårlig og homogen over en lengre strekning, kan det være vanskelig å identifisere svakhetssoner da kontrasten med den øvrige bergmassen er lav. Merk også at svakhetssonene i dette partiet hadde forholdsvis høy  $V_p$  på 5600 m/s. I andre undersøkelser ville dette trolig blitt karakterisert som god bergmassekvalitet. Det er antatt at endringer i faktorer som overdekning (innspenning), vannforhold og variasjoner i sprekkorientering gjør at hva som karakteriseres som en svakhetsone vil variere fra undersøkelse til undersøkelse. Dette viser viktigheten av å etablere riktige referansenivåer for den stedværende geologien og ta hensyn til de gradvis skiftende geologiske forholdene.

Fra denne undersøkelsen kan det også bemerkes at det er vanskelig å karakterisere svakhetssonene ut ifra seismisk informasjonen alene. Metoden kan for eksempel ikke brukes til å avgjøre om lavhastighetssoner skyldes et parti med lokalt høyere oppsprekking eller om sonen er forvitret eller deformert, før en har drevet igjennom partiet. Metoden sier heller ikke noe om stabiliteten til sonen og hvordan den bør sikres. Dette belyser igjen nytteverdien av å inkludere MWD-data i sammenlikningen, for å framskaffe ytterligere informasjon om bergmassen i form av borsynk. Merk også at svakhetssonen ikke var spesielt krevende, og stabiliteten ble ivaretatt med 10 cm E1000 sprøytebetong og bolter med lengde 4 m i mønster c/c 1,5 m.

Denne svakhetssonen samsvarer trolig med svakhetsone nr. 14 i ingeniørgeologisk profil i figur 6.3. Refraksjonseismikk på havbunnen viste her P-bølgehastigheter mellom 3400-4000 m/s, og sonen ble plassert i kategori II (Vik et al., 2017). Seismikk på stoff målte P-bølgehastighet på 5600 m/s i denne svakhetssonen. Forskjellen i målt P-bølgehastighet skyldes trolig flere faktorer. Refraksjonseismikken er ikke utført i samme retning som den seismiske undersøkelsen på stoff, og da vil for eksempel sprekkorientering påvirke P-bølgehastigheten forskjellig. Det er også mulig at svakhetssonen kan ha smalnet mot dypet eller vært mindre markant på tunnelnivå.

Til slutt må det poengteres at undersøkelser i områder med svakhetssoner kan være mer usikre sammenlignet med undersøkelser i god bergmasse. Tett oppsprukket og forvitret berg medfører at de seismiske bølgene må passere flere reflektorer og akustiske barrierer, som vil sørge for en rask demping av den seismiske energien (Dickmann et al., 2011). Dette resulterer i at den



transmitterte energien langt ut i undersøkelsesområdet vil være lav. De påviste strukturene i seksjon 3 er derfor forbundet med høyere usikkerhet sammenlignet med de i seksjon 1.

## 6.7 Prediksjon av vannforhold

Det er utført systematisk sonderboring i tunnelen for å påvise bergkvalitet og vannlekkasjeforhold foran stoff. Under driving ble det boret fire sonderhull for hver 30 m. Hvis den målte innlekkasjen overgikk 6 l/min for et enkelthull, eller 12 l/min for alle hullene samlet, ble det bestilt injeksjonsarbeider. Seismikkundersøkelse nr. 7 sammenfaller med et parti i tunnelen hvor innlekkasjekravet er overgått tre ganger (pel 1412-1540, løp 34100 i figur 6.3). Denne undersøkelsen er derfor et godt utgangspunkt for å vurdere hvor godt seismikken har klart å påvise innlekkasjer i tunnel. Som presentert i kapittel 2 og 3 vil markante reduksjoner S-bølgehastigheten, som da vil gi høye  $\frac{V_p}{V_s}$ - og  $\nu_{dyn}$ -verdier, være indikasjoner på potensielle soner som kan gi vanninnbrudd i tunnel.

### 6.7.1 Undersøkelse nr. 7

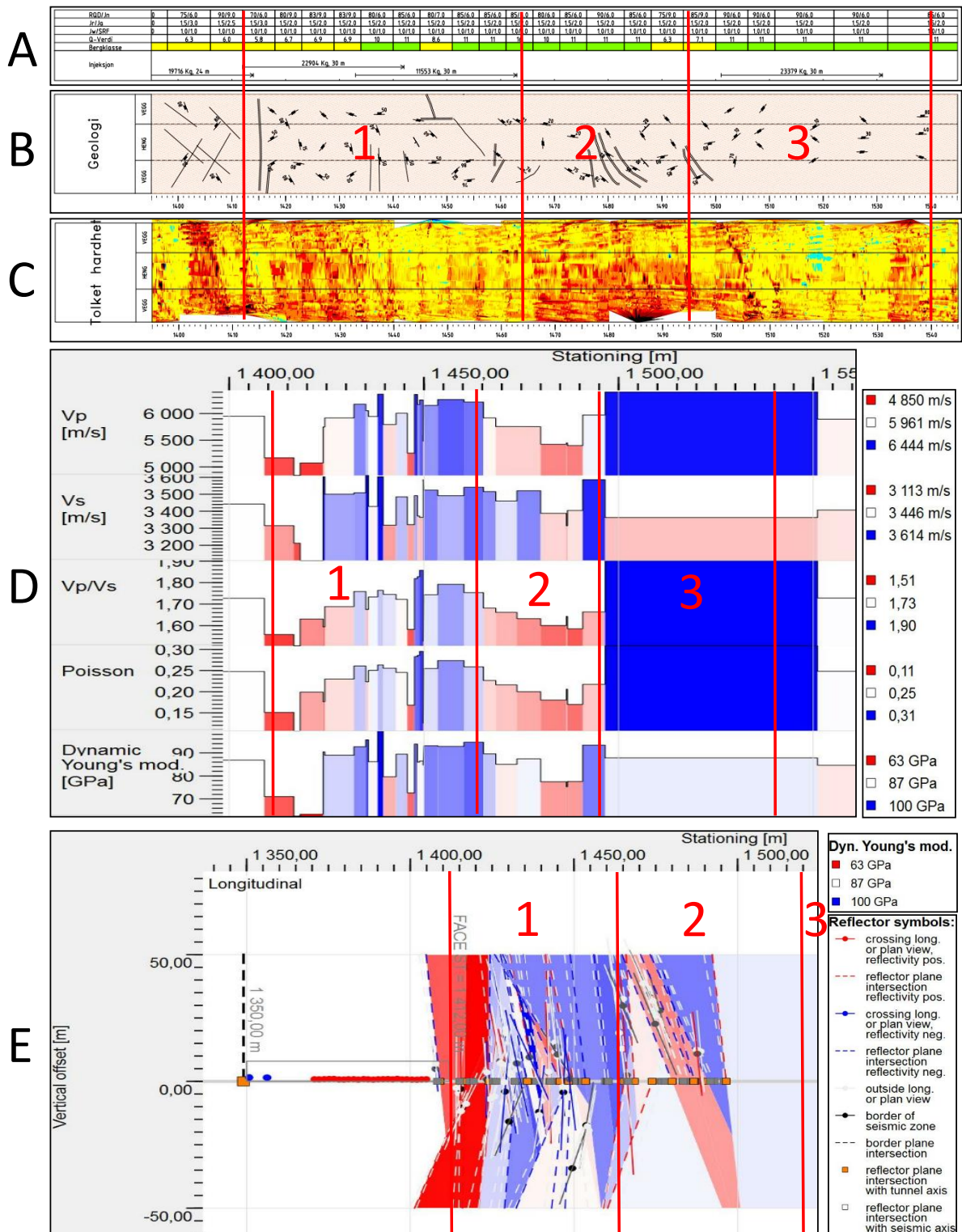
Resultater fra undersøkelse nr. 7 vises i figur 6.9 og 6.10. Det er parametrene  $V_s$ ,  $\frac{V_p}{V_s}$  og  $\nu_{dyn}$  som er av interesse ved analyse av vannforhold. Referansenivåer på disse parametrene er satt til henholdsvis 3446 m/s, 1,73 og 0,25. Bergmassen ved stoff var tørr og hadde Q-verdier mellom 2,7-11. Undersøkelsen er delt inn i tre seksjoner, hvor første og siste seksjon sammenfaller med utførte injeksjonsskjermer. I den midterste seksjonen ble det ikke målt verdier over innlekkasjekravet.

I seksjon 1 (pel 1412-1464) viser seismikken varierende parameterverdier over en kort distanse (Vindu D og E i figur 6.9). Ved pel 1412-1419 observeres det en reduksjon i  $V_s$  ned til ca. 3100 m/s. Samtidig kan det også sees en reduksjon i  $\frac{V_p}{V_s}$  og  $\nu_{dyn}$ , og dette gir derfor ingen klare holdepunkter for at det kan forekomme større innlekkasjer i tunnel. Fra pel 1419 til 1425 øker  $V_s$  opptil 3500 m/s mens  $\frac{V_p}{V_s}$  og  $\nu_{dyn}$  fortsatt har verdier under referansenivå. Med unntak av en liten reduksjon i  $V_s$ , og en tilsvarende økning i  $\frac{V_p}{V_s}$  og  $\nu_{dyn}$  ved pel ca. 1445-1450, observeres det ingen spesielle soner som skulle tilsi store innlekkasjer i tunnel. Fra tunnelkartleggingen (Vindu A og B i figur 6.9) sees det at denne seksjonen sammenfaller med to 30 m lange injeksjonsskjermer. Det er benyttet henholdsvis 22904 kg og 11553 kg industrisement og et sluttrykk på 70 bar. Q-verdiene varierer mellom 5,8 til 11, som indikerer god bergmassekvalitet. Det er også kartlagt en del smale slepper på tvers og langs tunnelen. Tolket hardhet (Vindu C i figur 6.9) viser antydning til en liten forbedring av bergmassekvalitet ved pel ca. 1440. I disse dataene kan det ikke sees noen strukturer som kan ha sammenheng med de påviste innlekkasjene.

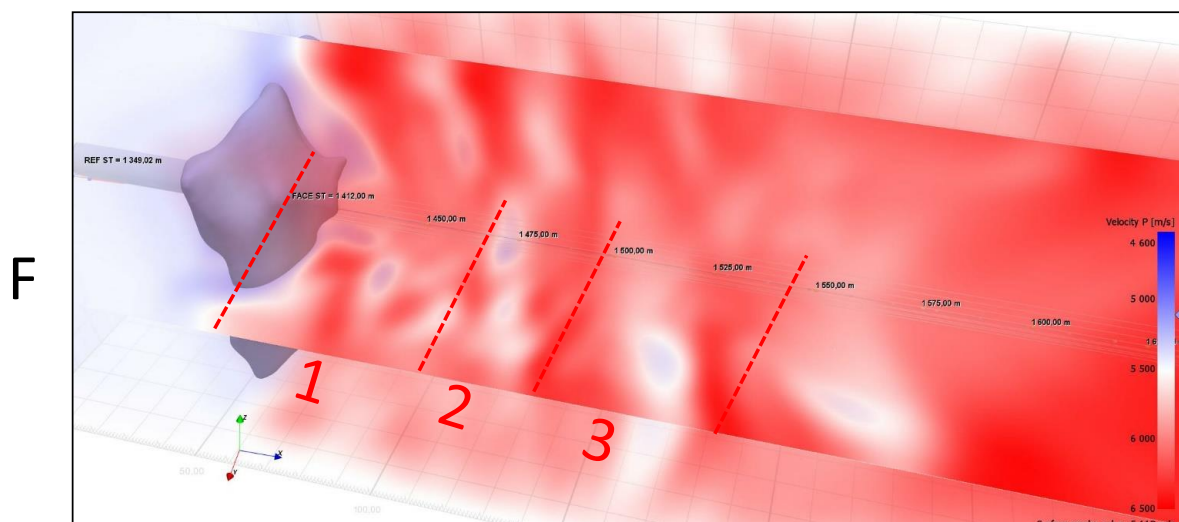
I seksjon 2 (pel 1464-1495) observeres det en gradvis reduksjon i samtlige seismikkparametre til under referansenivå. Seismikken indikerer derfor en reduksjon i bergmassekvalitet. Det kan også observeres et fall i parametrene  $\frac{V_p}{V_s}$  og  $\nu_{dyn}$ , som får verdier på henholdsvis 1,59 og 0,17. S-bølgehastigheten er nokså uforandret sammenlignet med seksjon 1. Dette indikerer derfor lite sannsynlighet for store vanninnbrudd i tunnel. Kartlegging i tunnel viser stort sett tilsvarende forhold som i seksjon 1. Bergflaten er lite oppsprukket med RQD-verdier på 75-90. Q-verdiene ligger mellom 6,3 til 11. Tolket hardhet viser mer rød farge sammenlignet med slutten av seksjon 1, men det er ingen tydelige anomalier i dataene.

I seksjon 3 (pel 1495-1540) observeres det en markant økning i  $V_p$ ,  $\frac{V_p}{V_s}$  og  $\nu_{dyn}$  til verdier på henholdsvis 6400 m/s, 1,90 og 0,31. I tillegg sees det en reduksjon i  $V_s$  til 3380 m/s. Dette indikerer at denne seksjonen har høyere sannsynlighet for større innlekkasjer i tunnel. Det er utført én injeksjonsskjerm ved pel 1501. Skjermen er 30 m lang, og det ble brukt 23379 kg industrisement med et sluttrykk på 70 bar. Den geologiske kartleggingen viser ingen spesielle strukturer og det er registrert Q-verdier på 11. Tolket hardhet viser antydning til en struktur i svart som krysser tunnelen på skrå mellom pel 1500-1510.

I vindu F figur 6.10 vises romlig fordeling av  $V_p$  i undersøkelsesområdet. Merk at lave hastigheter i denne figuren er fargekodet blå mens høye hastigheter er fargekodet rød. Fra figuren kan det sees en struktur i blå farge like foran stoff ved pel 1412-1419. Som tidligere nevnt er ikke denne sonen påvist i tunnelkartleggingen, men den sammenfaller med et område med målt høy innlekkasje. Det er derfor usikkert hva denne strukturen kan representere. Siden seismikken viser mange tettliggende reflektorer (se vindu E i figur 6.9) kan det være snakk om en sprekkeseone, som da også muligens kan ha sammenheng med de påviste innlekkasjene.



Figur 6.9: Oversikt over kartlegging i tunnel (vindu A og B), MWD-data (vindu C) og seismikkdata (vindu D og E) i forbindelse med seismikkundersøkelse nr. 7.



Figur 6.10: Romlig fordeling av  $V_p$  i seismikkundersøkelse nr. 7.

## 6.7.2 Diskusjon

Prediksjonene stemte godt overens i seksjons 2 og 3, hvor det ble predikert henholdsvis lave og høye innlekkasjer i tunnel. Seksjon 3 viste en forhøyning av  $\nu_{dyn}$  på 0,31 over en lengre strekning, og den ga derfor et godt holdepunkt for at sonen kunne gi vanninnbrudd i tunnel. Seksjon 1 viste svært varierende dynamisk Poissons tall over korte distanser. I denne seksjonen ga seismikken ingen éntydig informasjon om vannforholdene i tunnel.

Undersøkelsen viser at det foreligger flere usikkerhetsmomenter tilknyttet prediksjon av vannforhold i tunnel med seismikk. Seismikken vil kunne gi indikasjoner på vanninnbrudd i tunnel, men prediksjonene vil ikke kunne avsløre faktorer som geometri på vannlommer i bergmassen eller innlekkasje- og trykkforhold. Metoden kan derfor ikke brukes til å vurdere mengde innlekkasje i tunnel. Dette belyser viktigheten av å utføre sonderboring under driving til å verifisere partiene hvor seismikken indikerer mulighet for vanninnbrudd. Dickmann et al. (2016); Al-Samarray & Jensen (2020) diskuterer at prediksjon av in-situ vannforhold med TSP er svært erfaringsbasert, og det vil være lettere å tolke vannforhold etterhvert som det utføres flere undersøkelser og erfaringsgrunnlaget blir større.

## 6.8 Prediksjon av bergartsgrenser

Byggingen av Rogfast vil medføre driving i en rekke bergartstyper. Bergartsgrenser sammenfaller ofte med skyvesoner eller forkastninger som kan opptre som svakhetssoner i tunnel. Bergartsoverganger medfører også vanligvis endringer i bergmassens egenskaper. Under driving av

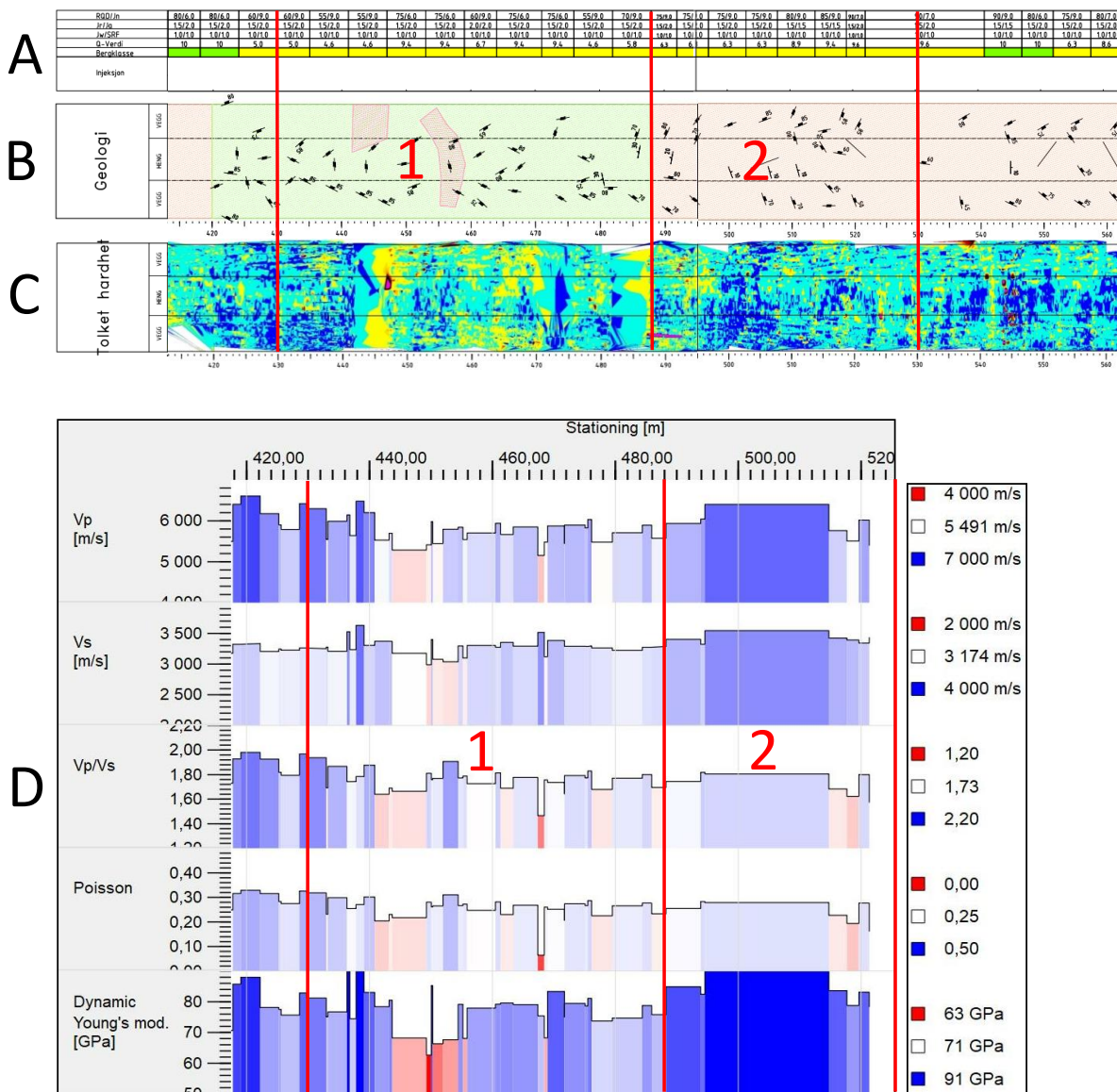
tverrslagstunnelen på Arsvågen ble det observert en bergartsgrense fra fyllitt til granittisk gneis ved pel ca. 435 i løp 34000 og pel ca. 240 for løp 34100, men det forekom også innslag av fyllitt lenger inn i tunnelen. Seismikkundersøkelse nr. 2 dekker området fra pel ca. 430 til 530 i løp 34100, og omfatter et parti med både fyllitt og granittisk gneis (figur 6.3). Fra kapittel 5 ble det sett at fyllitten og den granittiske gneisen har forskjellige ultralydhastigheter og bergmekaniske egenskaper. Det var derfor av interesse å undersøke i hvilken grad disse egenskapene kunne observeres i den seismiske undersøkelsen i tunnel.

### 6.8.1 Undersøkelse nr. 2

Resultatene fra undersøkelse nr. 2 vises i figur 6.11 og 6.12. Undersøkelsesområdet er delt i inn i to seksjoner, hvor første seksjon (pel 430-488) omfatter en linse av fyllitt. Seksjon 2 (pel 488-530) representerer overgangen til granittisk gneis. Referansegeologien ved stuff var en granittisk gneis med Q-verdi på 11 og RQD-verdi på 85. Referanseverdier på  $V_p$ ,  $V_s$  og  $E_{dyn}$  ble satt til henholdsvis 5491 m/s, 3174 m/s og 71 GPa.

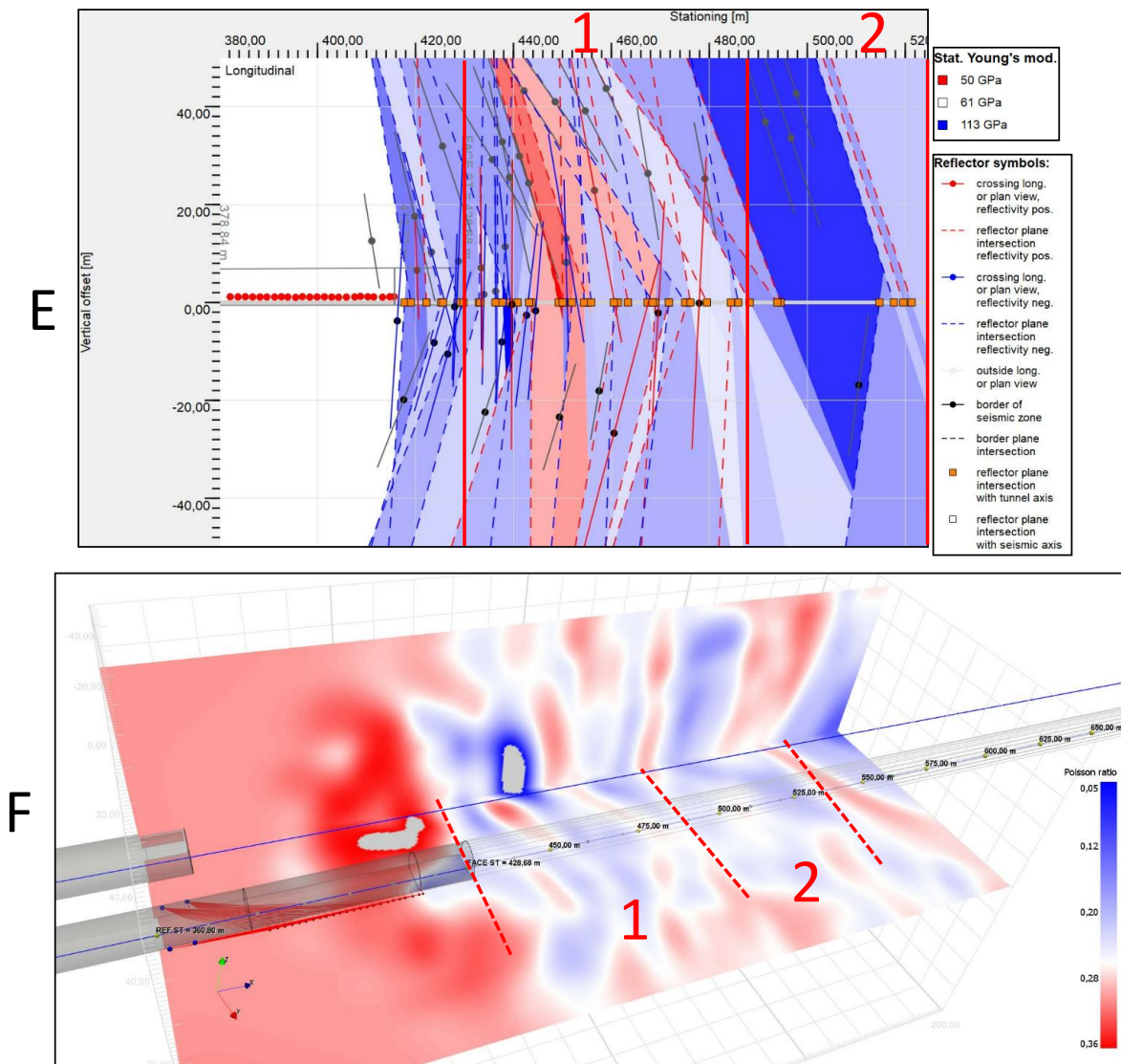
I seksjon 1 fra pel 430-444 indikerer seismikken gode bergmasseforhold (vindu D i figur 6.11 og vindu E i figur 6.12). Det observeres  $V_p$  og  $E_{dyn}$  på henholdsvis ca. 6000 m/s og ca. 90 GPa (Vindu D i figur 6.11). Ved pel ca. 444-450 og 467 observeres det lokale reduksjoner i  $V_p$  på henholdsvis 5284 m/s og 5153 m/s, som indikerer to partier med lavere bergmassekvalitet. I samme områder viser seismikken  $E_{dyn}$  på 65 og 68 GPa (røde soner i vindu D i figur 6.11). Fra tunnelkartleggingen (Vindu A og B i figur 6.11) er det kartlagt en moderat oppsprukket fyllitt med RQD-verdier mellom 55-75. Mellom pel 440-460 er det kartlagt innslag av granitt i vegg og i heng. Ved pel 447 er det kartlagt en liten forbedring i Q-verdi fra 4,6 til 9,4. Denne sammenfaller imidlertid med en lokal reduksjon i seismikkparametrene. MWD-dataene viser en overgang fra blå til gul og tildels fiolett farge, som indikerer en reduksjon i bergmassens hardhet (Vindu C i figur 6.11). Fra pel 450-488 viser tolket hardhet vekslende farger fra blå til gul, som indikerer variasjoner i bergmassens hardhet.

I seksjon 2 fra pel 488-530 ligger P-bølgehastigheten tett opp mot 6000 m/s. Det observeres også forholdsvis høye verdier av  $E_{dyn}$  på ca. 85 GPa. Seismikken indikerer derfor god bergmassekvalitet. Bergartsovergangen fra fyllitt til granittisk gneis ved pel 488 er lite synlig i seismikken. Det observeres en liten reduksjon i  $\frac{V_p}{V_s}$ -forholdet, men det sees ingen spesielle kontraster som skulle tilsi endringer i bergmasseforholdene. Q-kartleggingen viser verdier mellom 6,3 og 10. Det er også kartlagt to små sprekker i heng. Fra pel 487-495 viser tolket hardhet en overgang fra gul og tildels fiolett farge til blå farge.



Figur 6.11: Oversikt over kartlegging i tunnel (vindu A og B), MWD-data (vindu C) og seismikkdata (vindu D) i forbindelse med seismikkundersøkelse nr. 2.

Figur 6.12 viser romlig fordeling av  $\nu_{dyn}$ . Bergmassens  $\nu_{dyn}$ -verdier varierer mellom 0,16-0,33. I de mørkerøde sonene, med  $\nu_{dyn} > 0,3$ , ble det antatt at det kunne forekomme innlekkasjer i tunnel. Disse ble ikke påvist under driving.



Figur 6.12: Vindu E: Profilplan med fargekodede verdier av statisk E-modul. Vindu F: Romlig fordeling av  $\nu_{dyn}$  i seismikkundersøkelse nr. 2.

## 6.8.2 Diskusjon

Fra test av ultralydhastighet i kapittel 5 ble det sett at P-bølge hastigheten i den granittisk gneisen og fylltitten er henholdsvis ca. 5600 m/s og 4000 m/s (målt på tvers av foliasjon). Det var derfor forventet at det også skulle være forskjeller i bergartenes seismiske hastigheter på tunnelnivå. I denne seismikkundersøkelsen har foliasjonen i bergmassen strøkt omtrent vinkelrett på

tunnelens lengderetning. Fra undersøkelsen kan det sees at linsen av fyllitt sammenfaller med enkelte partier i seismikken som viser en liten reduksjon i P-bølgehastighet og dynamisk E-modul. Fyllittlinsen har imidlertid stor variasjon i P-bølgehastighet mellom ca. 5200-6500 m/s og dynamisk E-modul mellom ca. 66-102 GPa. Partiet med granittisk gneis har P-bølgehastighet på ca. 5500-6400 m/s og dynamisk E-modul på ca. 78-97 GPa. Ut ifra seismikken er det altså ingen tydelige forskjeller i bergmekaniske egenskaper mellom disse bergartene. Dette kan mulig forklares med teori presentert av Palmstrøm (1995), som poengterer at bergmassens anisotrope egenskaper blir mindre markant som funksjon av økende innspenning.

Merk også at seismikkens predikerte  $E_{dyn}$ -verdier er nokså forskjellig fra det som er målt i laboratoriet. I laboratoriet ble  $E_{dyn}$  i fyllitten og den granittiske gneisen funnet til å være henholdsvis ca. 45 GPa og ca. 65 GPa. Enaksiell trykktest ga tilsvarende verdier på henholdsvis ca. 47 GPa og ca. 67 GPa. Disse verdiene er mye lavere sammenlignet med det som ble påvist med seismikken. Dette skyldes trolig flere faktorer, slik som forskjeller i innspenning, anisotropi, vannmetning og målemetode.

## 6.9 Korrelasjoner mellom P-bølgehastighet og Q-parametre i tunnel

I følgende delkapittel vil det sees nærmere på empiriske korrelasjoner mellom P-bølgehastighet og RQD- og Q-verdier. En god korrelasjon mellom seismikk- og Q-parametre vil potensielt være nyttig, hvor en kan bruke utdata fra seismikk på stuff til å karakterisere bergmassens kvalitet og egenskaper.

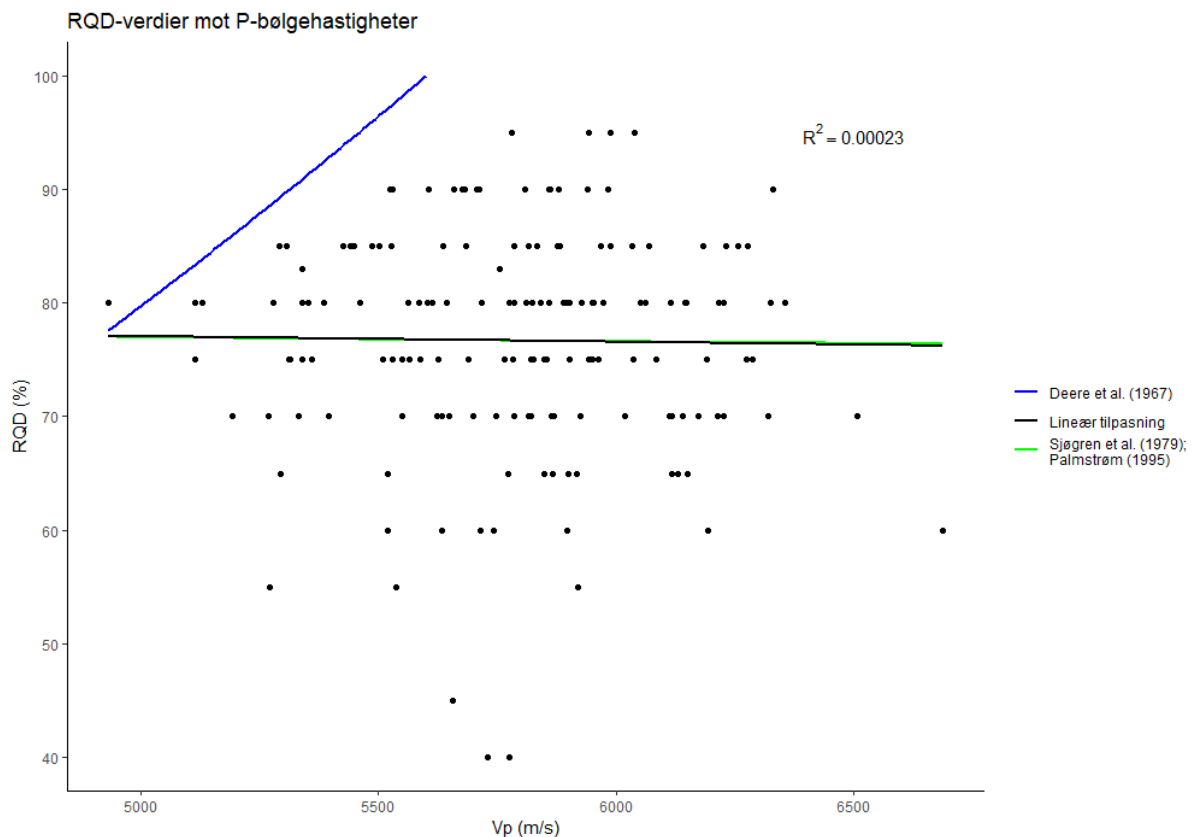
### 6.9.1 Utvalg av data

For å undersøke korrelasjoner presentert i kapittel 3 mellom seismiske hastigheter og kartlagte Q-parametre i tunnel, er det gjort et utvalg av data. Dataene mellom seismikken og kartlegging i tunnel har ikke vært direkte sammenlignbare da de foreligger over forskjellige intervaller. Det er for eksempel kartlagt et sett med Q-parametre etter hver tunnelsalve (hver 5-6 m) mens seismikken ofte inkluderer 5-7 registreringer av P-bølgehastigheten i samme område. Det er derfor tatt et gjennomsnitt av P-bølgehastighetene i intervallene som overlapper med de kartlagte Q-parametrene. Det er også valgt å begrense sammenligningen av P-bølgehastigheter til prediksjoner opptil 100 m foran stuff, for å ta hensyn til den økende romlige usikkerheten. Det foreligger heller ikke kartleggingsdata fra undersøkelse 10 og 11. Utvelgelsen av data har derfor resultert i totalt 159 datapunkter. En oversikt over seismikk- og Q-parametre fra tverrslagstunnelen på Arsvågen finnes i vedlegg C.



### 6.9.2 RQD-verdier og P-bølgehastighet

Figur 6.13 viser et spredningsplott av RQD-verdier mot P-bølgehastigheter. I tillegg er sammenhenger presentert av Deere et al. (1967) og Sjøgren et al. (1979); Palmstrøm (1995) gitt. Det er ingen tydelig trend i plottet, og fordelingen av RQD-verdier mot P-bølgehastighet ser ut til å være tilfeldig. Fra figuren kan det sees at det er stor spredning i RQD-verdier over de forskjellige P-bølgehastighetene. Det er for eksempel kartlagt både høye og lave RQD-verdier for forholdsvis lave P-bølgehastigheter og vice versa. En lineær tilpasning (svart linje i figur 6.13) viser at det er ingen korrelasjon mellom RQD-verdier og P-bølgehastigheter.



**Figur 6.13:** Kartlagte RQD-verdier mot målte P-bølgehastigheter. R-kvadrert ( $R^2$ ) gjelder for den lineære tilpasningen.

Fra figur 6.13 kan det sees at korrelasjonen gitt av Deere et al. (1967) (blå kurve) overestimerer RQD-verdier. Kurven legger seg høyt til venstre i plottet og skjærer få datapunkter. I denne formelen benyttes P-bølgehastigheten til den intakte bergartsprøven, som her er satt til 5600 m/s basert på resultatene i kapittel 5. En forutsetning for at denne formelen skal gi et godt mål på oppsprekking er at P-bølgehastigheten i den intakte prøven er høyere enn i in-situ bergmasse. Fra seismikken er det observert flere partier med P-bølgehastighet over 5600 m/s. Ved å innsette dette i formelen vil en derfor få feilaktige høye RQD-verdier over 100. Denne korrelasjonen

egner seg derfor dårlig i dette datasettet.

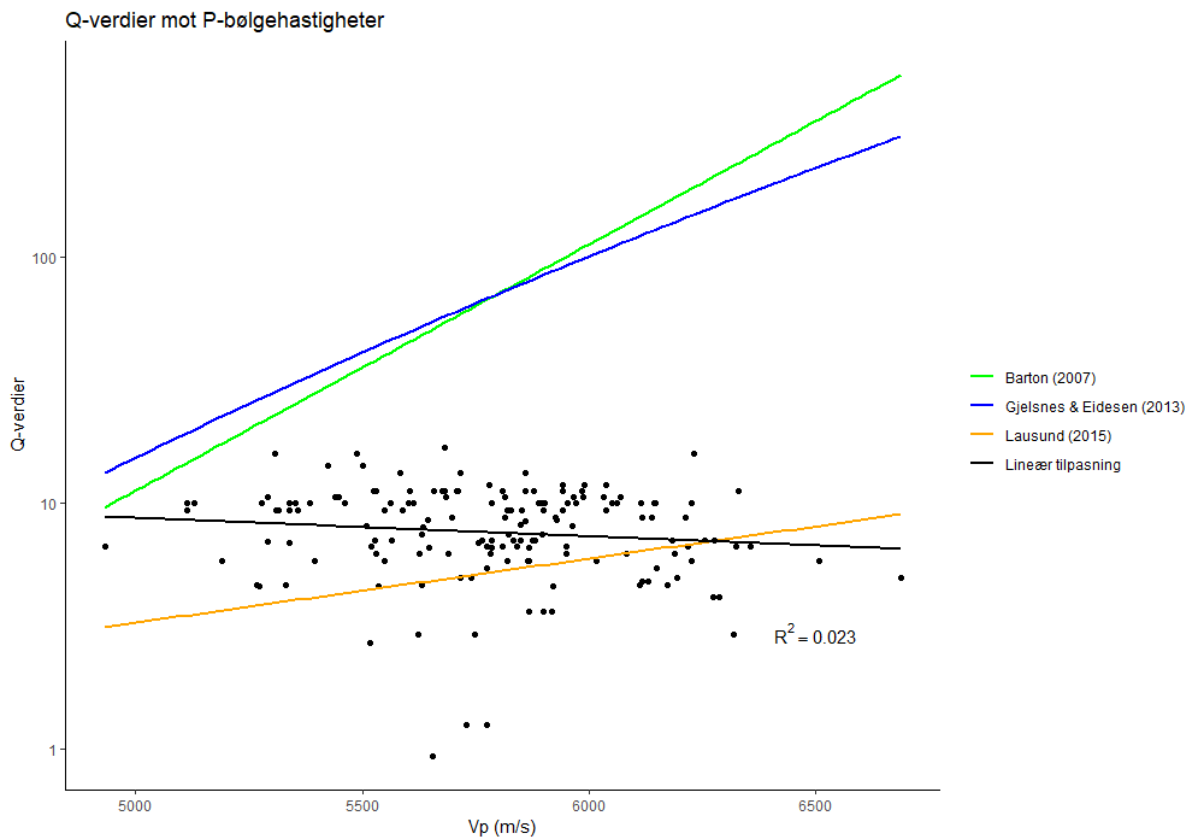
Sammenhengen presentert av Sjøgren et al. (1979); Palmstrøm (1995) gir også en svak tilpasning (grønn kurve i figur 6.13) i dette datasettet. Denne formelen baserer seg på en regresjonsanalyse for å finne estimater til parametrene  $V_{pq}$  og  $k_q$ , som med dette datasettet ble funnet til å være henholdsvis -153.8 og 0,000087. Fra figur 6.13 kan det sees at denne korrelasjonen gir tilnærmet samme estimater av RQD-verdier som den lineære tilpasningen. Denne korrelasjonen viser liten variasjon overfor endringer i P-bølgehastighet, og sammenhengen er derfor uklar i dette datasettet.

### 6.9.3 Q-verdier og P-bølgehastighet

Figur 6.14 viser et spredningsplott av kartlagte Q-verdier mot P-bølgehastigheter. I figuren er også sammenhenger presentert av Barton (2007), Gjelsnes (2013); Eidesen (2013) og Lausund (2015) gitt. Figuren viser ingen tydelig trend av Q-verdier mot P-bølgehastigheter. En lineær tilpasning (svart linje i figur 6.14) viser en svak negativ trend av lavere Q-verdier mot økende P-bølgehastigheter. Fordeling av Q-verdier ligger stort sett mellom 1-15 og det er få observasjoner mot de ytterligere endene av skalaen.

Korrelasjonen presentert av Barton (2007) (grønn kurve i figur 6.14) gir for høye Q-estimer i dette datasettet. Ved plotting av denne kurven er det benyttet normaliserte Q-verdier ved å benytte  $\sigma_c = 282$  MPa, som var den høyeste registrerte UCS-verdien fra enaksiell trykktest av den granittiske gneisen. Fra figur 6.14 kan det sees at kurven krysser over punktskyen og skjærer ingen datapunkter. Ved bruk av lavere  $\sigma_c$  ville kurven forflyttet seg oppover, som da ville gitt en enda dårligere tilpasning. Korrelasjonen presentert av Gjelsnes (2013); Eidesen (2013) (blå kurve i figur 6.14) gir også et tilsvarende og usannsynlig høyt mål på Q-verdier i dette datasettet.

I dette datasettet ser det ut til at korrelasjonen presentert av Lausund (2015) (oransje kurve i figur 6.14) gir en bedre tilpasning. Kurven skjærer likevel litt lavt i punktskyen og den gir forholdsvis moderate estimater av Q-verdier for et stort spenn av P-bølgehastigheter. Denne korrelasjonen er heller ikke tilpasset til øvre og nedre deler av Q-skalaen. Denne korrelasjonen antar for eksempel at en Q-verdi på 100 tilsvarer en usannsynlig høy P-bølgehastighet på 10703 m/s.



**Figur 6.14:** Kartlagte Q-verdier mot målte P-bølgehastigheter. R-kvadrert ( $R^2$ ) gjelder for den lineære tilpasningen.

### 6.9.4 Diskusjon

Som det er sett i figurene som viser estimert P-bølgehastighet mot Q- og RQD-verdier, er det ingen tydelig sammenheng mellom disse parametrene. Dette skyldes trolig en rekke faktorer. I kapittel 2 og 3 ble det sett nærmere på flere egenskaper ved bergmassen som har betydning for den seismiske hastigheten, men som ikke nødvendigvis vurderes i et bergmasseklasifiserings-system. Et eksempel er sprekeretning. Mens den seismiske hastigheten vil variere avhengig om bølgene forplanter seg langs eller normalt på sprekker, er ikke denne variasjonen hensyntatt i Q-systemet. I tillegg vil innspenningen variere som funksjon av overdekning. Mens seismikken trolig er sensitiv overfor den gradvis økende innspenningen i tunnel, som da vil bidra til lukning av porer og sprekker i bergmassen, skiller ikke *SRF* like nyansert mellom ulike spenningsforhold i bergmassen. I tillegg må det nevnes at parametrene i Q-systemet alltid vil bære preg av en viss fagmessig skjønn. Dette kommer spesielt til uttrykk i bestemmelse av RQD-verdier. Denne parameteren kan være vanskelig å bestemme når oppsprekking viser stor variasjon i ulike retninger. Det er også usikkert hvordan oppsprekking utarter seg lenger inn i bergmassen, hvor de seismiske bølgene forplanter seg.

Ut ifra datsettet ser det ut til at empiriske korrelasjoner utviklet på bakgrunn av refraksjonseismikk gir en dårlig tilpasning mellom P-bølgehastighet, målt med seismikk på stoff, og kartlagte Q-verdier i tunnel. I tillegg til faktorene nevnt i forrige avsnitt, skyldes nok dette også at metodenes forutsetninger for å måle P-bølgehastigheter i bergmassen er forskjellig. Refraksjonseismikk gjøres fra bergoverflaten og nedover, hvor de seismiske bølgene gjerne passerer oppsprukket dagberg. Seismikk på stoff måler P-bølgehastigheter på tunnelnivå, hvor bergmassen kan ha forskjellige egenskaper sammenlignet med bergmassen nær overflaten. Slik som det ble presentert i kapittel 2 og 3 vil for eksempel bergmassens spenningsforhold, anisotropi og sprekkenes karakteristikk endre seg mot dypet. Fra datasettet kan det se ut til at P-bølgehastighetene svarer til lavere Q-verdier sammenlignet med hva korrelasjonen til for eksempel Barton (2007) viser.

Merk at datasettet inneholder en lav variasjon i kartlagte Q-verdier. De fleste datapunkter har Q-verdi omtrent på 10 og de ytterligere endene av Q-skalaen er ikke brukt. I tillegg er det kun registrert P-bølgehastigheter i spennet ca. 5000 m/s til 6700 m/s. Datagrunnlaget er derfor forholdsvis smalt til å kunne gi en generell trend mellom Q- eller RQD-verdier og P-bølgehastigheter, målt med seismikk på stoff. Det foreligger for eksempel usikkerhet for hvilke P-bølgehastigheter seismikk på stoff vil vise i partier med svært dårlig bergmasse.

### 6.10 Oppsummerende vurderinger

Tabell 6.2 viser en oppsummering av sammenlikningen av dataen fra tverrslagstunnelen på Arsvågen. I tabellen vises en oversikt over hvordan seismikken, MWD-dataen og kartleggingen i tunnel (geologiske registreringer og bergmassekvalitet) har samsvart. Sammenlikningen er gjort basert på forfatterens egne vurderinger. I denne vurderingen er det vektlagt om endringer i rombølgehastigheter og dynamiske elastisitetsmoduler samsvarer med endringer i bergmassekvalitet fra tunnelkartleggingen, og hvorvidt dette kan synes i tolket hardhet. Det er eksempelvis undersøkt om lavhastighetssoner i den seismiske prognosen vises igjen i tunnelkartleggingen og på MWD-dataen. I hvilken grad seismikken samsvarer med vannforhold i tunnel, er basert på vurderinger av hvorvidt høye verdier av dynamisk Poissons tall sammenfaller med partier hvor det er utført injeksjonsarbeider.

Seismikken som er utført i tverrslagstunnelen på Arsvågen har vekslet mellom å samsvare godt med kartlegging i tunnel til å være tilfeldig. Slik det ble presentert i undersøkelse nr. 5, viser seismikken ofte langt flere røde lavhastighetssoner og soner med reduksjoner i  $E_{dyn}$  enn det kartleggingen i tunnel viser. Denne overestimeringen av potensielle svakhetssoner viser at det kan være vanskelig å skille mellom hvilke soner som er relevante for tunneldrivingen. Som det ble presentert i kapittel 2 og 3 kan lokale reduksjoner i  $V_p$  og  $V_s$  også skyldes en rekke faktorer

Tabell 6.2: Samsvar mellom seismikkdata, MWD-data og kartlegging i tunnel.

Undersøkelse nr.	Seismikk og kartlegging i tunnel	Seismikk og tolket hardhet	Tolket hardhet og kartlegging i tunnel	Seismikk og vannforhold i tunnel
1	Yellow	Green	Yellow	Green
2	Yellow	Green	Yellow	Green
3	Yellow	Yellow	Yellow	Green
4	Yellow	Yellow	Green	Red
5	Yellow	Green	Green	Red
6	Red	Red	Red	Red
7	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow
8	Yellow	Yellow	Green	Red
9	Green	Green	Green	Yellow

**Tabellforklaring:** ■ Dataene samsvarer godt. ■ Dataene samsvarer delvis, eller i enkelte områder. ■ Dataene samsvarer ikke, eller virker tilfeldig.

som ikke nødvendigvis påvirker stabiliteten til tunnelen. En bør derfor være forsiktig med å overtolke den seismiske prognosen da lavhastighetssoner ikke alltid representerer svakhetssoner.

Sensitiviteten til seismikken viser at metoden kan være et godt utgangspunkt for å påvise soner med lavere bergmassekvalitet. Det er ikke nødvendigvis viktig at alle prediksjoner stemmer overens med kartlagt geologi i tunnel, så lenge metoden kan påvise partier med krevende grunnforhold. Metoden bør imidlertid suppleres med sonderboringer og MWD-data for å bekrefte grunnforholdene. Slike data er også i mindre grad påvirket av tolkerens vurderinger og gir en mer objektiv prognose av bergmassekvalitet i form av borsynk.

Seismikken og tolket hardhet, og tolket hardhet og kartlegging i tunnel samsvarer bedre sammenlignet med seismikken og kartlegging i tunnel. De fleste av de påviste mykere strukturene i tolket hardhet overlapper med reduksjoner i de seismiske parametrene. Geologiske registreringer som gjennomsettende sprekker, små slepper og små svakhetssoner vises også i stor grad igjen på fargekonturen i tolket hardet.

Seismikkens prediksjoner av vannforhold i tunnel virker usikker. I flere undersøkelser er det blitt predikert høye verdier av dynamisk Poissons tall uten at det har blitt dokumentert relevante innlekkasjer i tunnel. Prediksjonene stemte imidlertid godt i undersøkelser 1, 2 og 3. Undertegnede har ikke hatt tilgang til målte innlekkasjeverdier. Merk at i områder hvor innlekkasjene ikke har overgått kravet om bestilling av injeksjonarbeider er det likevel mest sannsynlig vesentlige forskjeller i mengder vanninnbrudd. Dette medfører en usikkerhet da det er mulig at seismikken kan ha påvist små økninger i innlekkasjer uten at det finnes data til å verifisere dette. I tillegg var de fleste store innlekkasjene i prosjektet knyttet til driving i områder med fyllitt, som ikke er dekket av seismikken. Det poengteres derfor at datagrunnlaget fra disse undersøkelsene er noe lavt til å kunne dra konklusjoner om TSP sin evne til å påvise vannforhold i bergmassen. I Dickmann et al. (2016) diskuteres det at påvisning av vanninnbrudd i bergmassen er svært

erfaringsbasert. Det kreves god kjennskap til prosjektets geologi og bergmassens seismiske respons. Først da er det mulig å korrelere dynamisk poissons tall opp mot kvalitative vurderinger av innlekkasjer. Det er derfor forventet at det vil være enklere å påvise vannforhold i tunnel med metoden etter hvert som erfaringgrunnlaget øker.

TSP er svært erfaringsbasert i alle steg. Dette inkluderer opprigging av undersøkelsen, valg av design og ladningsmengde, dataprosessering, valg av referanseverdier og tolkning av den seismiske prognosen. I evalueringsrapporten til Al-Samarray & Jensen (2020) er det fremhevet at prediksjonevnen har blitt bedre og usikkerheten lavere etter hvert som det er utført flere undersøkelser og erfaringsgrunnlaget er blitt større. Til slutt må det poengteres at det ikke har vært noen spesielle utfordringer knyttet til grunnforholdene under drivingen av denne tverrslagstunnelen. Dette representerer en usikkerhet da det fortsatt er uvisst hvordan metoden vil kunne påvise krevende grunnforhold i prosjektet.

## Kapittel 7

# Bruk av seismikk på stoff under driving av hovedløpene på Rogfast

Markante og komplekse svakhetssoner og store vanninnbrudd under høyt trykk representerer de største utfordringene ved driving av undersjøiske tunneler i Norge (Nilsen & Palmstrom, 2001). I mange tilfeller vil svakhetssoner kunne påvises som lavhastighetssoner fra refraksjons-eismiske undersøkelser. Erfaringer fra undersjøiske tunneler som Atlanterhavs-, Bømlafjord- og Oslofjordtunnelen har imidlertid vist at dette i mange tilfeller ikke er tilstrekkelig, og at det er nødvendig med supplerende ingeniørgeologiske undersøkelser under driving (Nilsen, 2014).

Dette kapittelet er en analyse av hvordan seismikk på stoff kan være et nyttig hjelpemiddel under drivingen av hovedløpene på Rogfast. Kapittelet er inndelt i to deler, hvor den første delen vil dreie seg om diskusjon av den systematiske bruken. Deretter vil et utvalgt av antatte krevende partier på Rogfast bli presentert. Det vil bli drøftet hvordan seismikk på stoff kan brukes til å verifisere og gi bedre kontroll på disse partiene. Det vil også diskuteres potensielle begrensninger med metoden knyttet til de presenterte grunnforholdene.

### 7.1 Ingeniørgeologiske forundersøkelser under driving

Under drivingen av Rogfast skal seismikk på stoff utføres systematisk hver 100 m. Undersøkelsene utføres av byggherre. Entreprenør vil bistå med sertifisert personell for håndtering, lading og detonering av sprengstoff under utførelse av undersøkelsene. I kontraktene på Rogfast er det tatt hensyn til opprigging, skyting og heftid for tunneldrivingen (Dammyr et al., 2020).

Fra håndbok om vegtunneler N500 heter det at det skal utføres systematisk sonderboring i undersjøiske tunneler under kote 0 (sålenivå). Det skal også bores sonderhull der forundersøkelsene indikerer svakhetssoner og dårlig bergmassekvalitet generelt, og i områder hvor det er liten eller usikker bergoverdekning. Sonderboringer skal utføres med MWD-data og borparametertolkning (BPT) (Statens vegvesen, 2020c). Norconsult har i sine konkurransegrunnlag anbefalt 3-7 sonderhull (24 m lengde) hver 3. salve. Dette resulterer i ca. 8 m overlapp mellom sonderhullene. I mer krevende partier anbefaler Norconsult å sonderbore 5-7 sonderhull med 20 m overlapp for å ha minimum 20 m bergmasse frem mot eventuelle vanninnbrudd (Dammyr et al., 2020).

Det kan også bli aktuelt å utføre kjerneboring på stoff ved driving gjennom krevende partier og svakhetssoner. Dette behovet må vurderes fortløpende basert på informasjon fra seismikk på stoff, sonderboringer, MWD-data og tilegnede erfaringer underveis i tunneldrivingen.

## 7.2 Systematisk bruk av seismikk på stoff

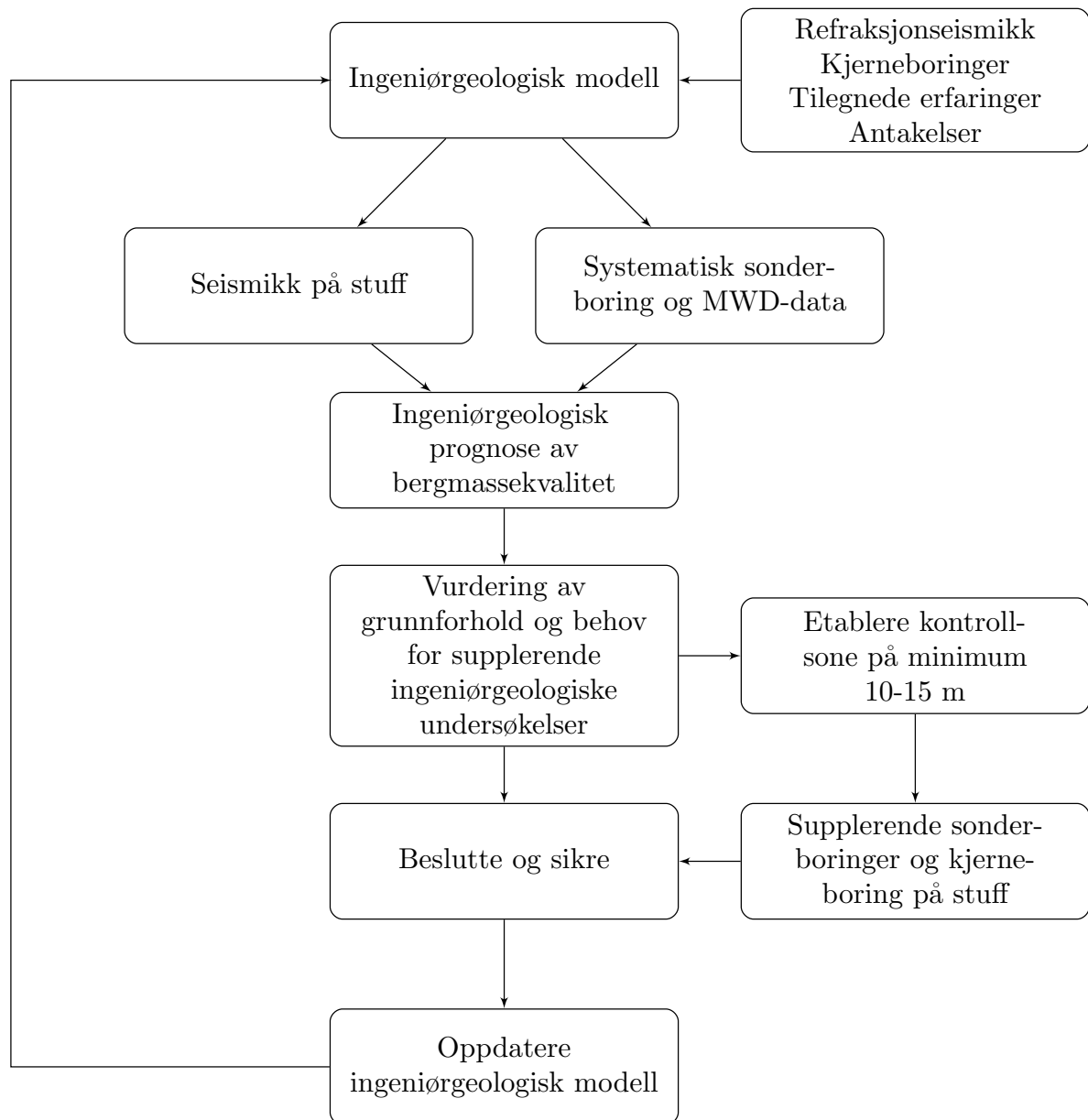
Den systematiske bruken av seismikk på stoff vil hovedsakelig omhandle å verifisere den ingeniørgeologiske modellen, gjøre innledende vurderinger av bergmasse- og innlekkasjeforhold og framskaffe ytterligere opplysninger om svakhetssoner. Dette vil være spesielt viktig hvis grunnforholdene viser seg å være annerledes enn antatt, og i tilfeller hvor seismikken kan bli et av de få holdepunktene for informasjon hva angår grunnforholdene.

I flytskjema i figur 7.1 og i figur 7.2 er det illustrert hvilken rolle seismikk på stoff kan tenkes å ha under driving. Før hver undersøkelse er det viktig å være godt kjent med den ingeniørgeologiske modellen og utførte ingeniørgeologiske forundersøkelser i det aktuelle området. Dette inkluderer kjennskap til aktuelle bergarter, påviste lavhastighetssoner, forkastninger eller lineamenter som det antas vil krysse tunnelen. Det å kjenne til slik informasjon kan gjøre det lettere å tolke den seismiske prognosen, hvor en kan korrelere oppdagelser i seismikken opp mot spesifikke geologiske strukturer.

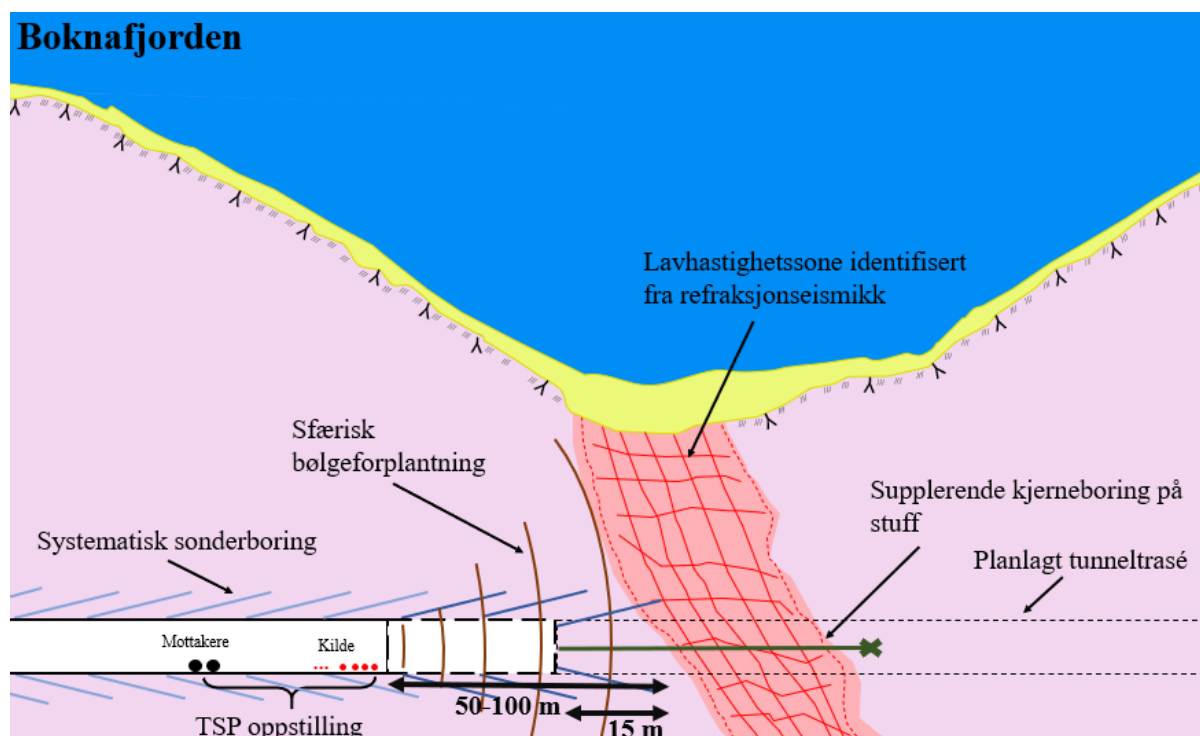
Som det er sett i litteraturen og fra analyser i kapittel 6, er metoden godt egnet til å påvise kontaster i bergmassen. Metoden kan derfor brukes til å få et førsteinntrykk av grunnforholdene. Spesielt nyttig vil det være å koble den seismiske prognosen av bergmasseforhold til resultatene fra utført refraksjonseismikk på havbunnen (figur 7.2). Mens refraksjonseismikk ofte gir begrenset informasjon om svakhetssoners forløp og beskaffenhet mot dypet, vil seismikk på stoff kunne brukes som et supplement til å finne mektigheten og orientering av lavhastighetssonene på tunnelnivå. På den måten kan det gis et mål på sonenes krysningslengde med tunnel. Dette kan gjøres ved å konstruere 3D-modeller av sonene med en romlig fordeling av for eksempel P-bølgehastighet. Erfaringene fra drivingen av E11 og E13 viser at de fleste mindre lavhastighetssoner smalner mot dypet eller er mindre markant på tunnelnivå. Seismikk på stoff vil være



## Systematisk bruk av seismikk på stoff



Figur 7.1: Rollen til systematisk bruk av seismikk på stoff i den ingeniørgeologisk risikovurderingen.



**Figur 7.2:** Skisse av hvordan det er tenkt den systematiske bruken av seismikk på stoff kan kombineres med andre ingeniørgeologiske data. Vertikalavstand er ikke i riktig skala.

et nyttig hjelpemiddel til å verifisere denne trenden.

Seismikk på stoff kan også brukes til å gi en innledende vurdering av potensielle vanninnbrudd i tunnel. Ved påvisning av uventet høye verdier av  $\frac{V_p}{V_s}$  og  $\nu_{dyn}$  og lave verdier av  $V_s$ , kan dette representere partier med høyere sannsynlighet for vanninnbrudd i tunnel. Disse vurderingene bør også knyttes til eventuelle geologiske strukturer i dataene. En sone med mange sterke og tettliggende reflektorer, lav P-bølgehastighet og høyt dynamisk Poissons tall kan for eksempel representere en sprekkesone med potensial for store vanninnbrudd.

Som det ble sett fra undersøkelsene i tverrslagstunnelen på Arsvågen vil ikke seismikk kunne gi en fullstendig karakterisering av grunnforholdene foran stoff. Seismikk som metode gir heller ingen éntydige svar om bergmasseforhold. Et eksempel som kan trekkes frem er erfaringene fra Nordkapp-tunnelen. I et parti i denne tunnelen viste refraksjonseismikk forholdsvis høye seismiske hastigheter over 5000 m/s. Det ble derfor antatt gode bergmasseforhold på tunnelnivå. Under drivingen av tunnelen viste det seg at bergmassen bestod av flattliggende, svake og ukonsoliderte sedimentære bergarter, som ga store stabilitetsproblemer og forsinkelser i inn-driftstiden (Palmstrøm et al., 2000). Et annet eksempel er Atlanterhavstunnelen, hvor det basert på refraksjonseismiske undersøkelser ikke var mulig å skille mellom tidligere uproblematisk svakhetssoner og en svært krevende sone 225 m under havoverflaten (Karlson, 2008; Nilsen,

2014). Dette belyser viktigheten av å inkludere sonderboringer og MWD-data til den seismiske prognosen av bergmasseforhold. I partier hvor det er forventet krevende grunnforhold kan det i tillegg også være aktuelt å bore enkelte lange sonderhull (50-100 m) for å ha tilstrekkelig med bergmasse frem mot eventuelle svakhetssoner og vanninnbrudd (Øyvind Dammyr, personlig kommunikasjon 07.06.2020). Etter hvert som data fra MWD og sonderboringer foreligger, i kombinasjon med den tilegnede erfaringen undervegs i drivingen, bør det foretas fortløpende vurderinger av de forutliggende grunnforholdene. Det må også gjøres en verifisering av den seismiske prognosen, for å avgjøre relevansen av påviste strukturer i seismikken til tunneldrivingen og stabiliteten til tunnelen.

Deretter må det vurderes om det er behov for supplerende ingeniørgeologiske undersøkelser som intensivert sonderboring eller kjerneboring på stoff. Dette vil være aktuelt i svært krevende partier og når dataene er usikre. I partier hvor sonderboringer eller seismikk på stoff indikerer svakhetssoner eller store vanninnbrudd bør det etableres en kontrollsoner på minimum 10-15 m foran stoff (stiplet tunnelkontur i figur 7.2). Fra kontrollsonene utføres intensivert sonderboring og eventuelle kjerneboringer fra stoff eller sidenisjer. Hovedløpene på Rogfast vil ha tunnelprofil T10,5. Ved etablering av kontrollsoner for et tverrsnitt av en slik størrelse anbefales det å bore minimum seks supplerende sonderhull (Pedersen et al., 2010). Slike sonderboringer bør være målrettet. Hvis seismikk på stoff indikerer en steil svakhetsone, som da for eksempel skjærer tunnelen med en spiss vinkel fra vegg eller vederlag, bør sonderboringer prioriteres ut og opp til siden for tunnelen (Statens vegvesen, 2020b). Hvis seismikken har vist at sonen har et slakt fall med eller mot driveretning, vil sondeborehull nedover gi bedre kontroll på forløp av sonen (Pedersen et al., 2010). Kjerneboringer ansettes vanligvis i nivå med tunnelhengen for å komme gjennom bergmassen i og like over hengen. Borkjernene brukes til å vurdere bergmassekvaliteten langs tunnelheng og til uttak av prøver av eventuelt leirmateriale.

Ekstensiv bruk av kjerneboring på stoff er imidlertid dyrt og vil hefte tunneldrivingen. Etter hvert som erfaringsgrunnlaget med seismikk på stoff øker, vil brukerne i større grad kunne bruke seismikken til å gjenkjenne ulike typer grunnforhold. Basert på dette kan det utarbeides retningslinjer for i hvilke situasjoner det bør utføres kjerneboring på stoff. Slike retningslinjer bør være fokusert på om seismikken, i kombinasjon med sonderboringer, MWD-data og tilegnede erfaringer undervegs i drivingen, gir et tilstrekkelig informasjonsgrunnlag til å kunne bestemme drivetekniske og sikringsmessige tiltak. På den måten kan seismikk på stoff brukes til å begrense ekstensiv bruk av kjerneboring på stoff. Dette bør imidlertid være begrenset til svakhetssoner av mindre omfang. Kjerneboring på stoff vil fortsatt måtte gjennomføres i de mest krevende partiene, hvor en bør ha spesielt god kontroll på grunnforholdene. Under drivingen av den nærliggende T-forbindelsen ble kjerneboring et viktig verktøy for å kunne planlegge drivingen optimalt (Øyvind Dammyr, personlig kommunikasjon 07.06.2020).

På bakgrunn av de ingeniørgeologiske dataene som foreligger, må det gjøres vurderinger av de forutliggende grunnforholdene. Hver enkelt svakhetszone bør vurderes uavhengig av andre påtrufne soner. En svakhetszone bør også klassifiseres i henhold til om sonen for eksempel er en knusningszone eller en strekkbruddzone (Pedersen et al., 2010). En leirinfisert knusningszone med omdannet sideberg er ofte de sonene som er vanskeligst å sikre. En strekkbruddzone med lav innspenning eller lav bergoverdekning kan potensielt føre med seg store vanninnbrudd i tunnel. En best mulig klassifisering av sonene er derfor av betydning under valg av drivetekniske tiltak, bergsikring, og for et optimalt teknisk-økonomisk resultat.

Til slutt må det tas beslutninger av hvilke drivetekniske og sikringsmessige tiltak som skal iverksettes. Dette er det mest kritiske og avgjørende trinnet, hvor konsekvensene kan bli store. Tidligere erfaringer fra driving av undersjøisk tunneler viser at en må være forsiktig med å ta for lett på grunnforholdene. Et eksempel er en svakhetszone fra Atlanterhavstunnelen, hvor sonderboringer antydte små innlekkasjer, men hvor forholdene etter hvert ble kritiske og innlekkasjene større som følge av en progressiv utvasking av sone- og sleppemateriale på stoff (Nilsen, 2014). På bakgrunn av dette vil tidligere erfaringer fra liknende soner og den ingeniørgeologiske risikoen også spille en sentral rolle når beslutninger skal tas.

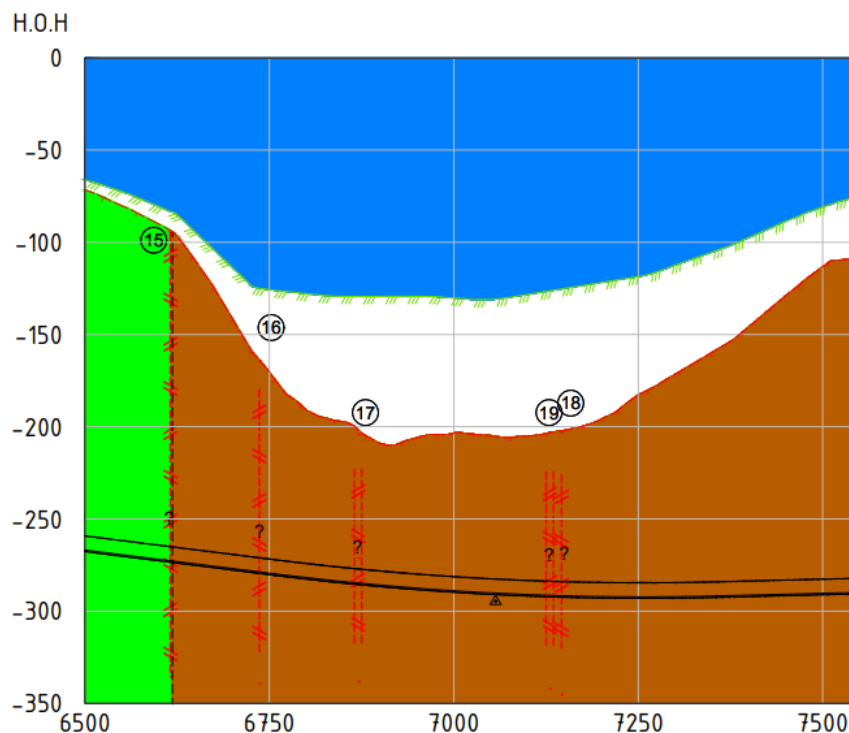
Etter hver undersøkelse er det viktig at grunnforholdene kartlegges og den ingeniørgeologiske modellen oppdateres. Dickmann & Krueger (2014) anbefaler en modell-drevet tolkning av seismikk på stoff. Denne tolkningsmetoden baserer seg på at den ingeniørgeologiske modellen hele tiden oppdateres basert på innhenting av ny geologisk data, og en justering mellom predikert og observert geologi. Ved å korrelere predikerte forhold opp mot kartlagt geologi vil det være mulig å koble begivenheter i seismikken til spesifikke geologiske strukturer eller bergmasseforhold. Dette vil redusere metodens usikkerhet og gjøre det lettere å gjenkjenne ulike grunnforhold i senere undersøkelser.

### **7.3 Antatte spesielt krevende partier**

I dette delkapittel vil det gis en beskrivelse av de antatte fem mest krevende partiene på Rogfast. Beskrivelsen av partiene vil ta utgangspunkt i grunnlagsmaterialet som foreligger. Deretter vil det gjøres vurderinger av de mest aktuelle utfordringene ved hvert parti og diskuteres hvilken nytteverdi seismikk på stoff vil kunne ha ved kryssing av disse partiene. Det vil også diskuteres mulige begrensninger ved bruk av metoden. Tabell 7.1, i slutten av kapittelet, inneholder en oversikt over de krevende partiene, og potensiell nytteverdi og begrensninger ved bruk av seismikk på stoff i disse partiene.

### 7.3.1 Tungenesforkastningen (profil 6500-7500)

Grunnlagsmaterialet for å beskrive dette partiet er hentet fra Dammyr et al. (2019a). Tungenesforkastningen er en antatt regional normalforkastning som markerer et skifte i bergartstyper fra Ryfylkeskifer til Karmøyofiolitt (figur 7.3). Tunnelen vil krysse forkastningen ved profil 6500-7500, øst for Alstein. Fra refraksjonseismiske undersøkelser er det identifisert en brattfallende og markert kløft på havbunnen med løsmasseykkelse mellom 70-100 m. Det er også påvist en rekke lavhastighetssoner (sone 15-19 i figur 7.3) med bredde opptil 70 m og hastigheter mellom 3000-3400 m/s. Orienteringen til sonene er uvisst, men det er antatt at de har vertikalt fall. Det dypeste punktet i dette partiet vil være ca. 300 m under havnivå. Det er utført kjerneboringer øst for forkastningen ved Tungenes og vest for forkastningen ved Alstein. Tolkninger av disse antyder et bergartsskifte fra glimmerskifer og fyllitt til plagioklasrik gabbro. Spenningsmålinger ved Tungenes har påvist høye horisontale spenninger,  $\sigma_H = \sigma_1 = 22,1 \pm 1,0$  MPa med retning N133°Ø og  $\sigma_h = \sigma_2 = 11,6 \pm 0,4$  MPa ved dybde 172-175 m, og en vertikal spenning tilsvarende  $\sigma_v = \sigma_3 = 7,3 \pm 0,7$  MPa ved dybde 156-159 m. De fremste utfordringene i dette partiet knyttes til usikkerhet vedrørende reell bergoverdekning, beskaffenhet av svakhetssoner på tunnelnivå og potensiale for store vanninnbrudd under høyt trykk.



Figur 7.3: Kryssing av svakhetssoner ved passering av Tungenesforkastningen (Dammyr et al., 2019a).

Erfaringer fra drivingen av avløpssambandet IVAR vest for Mekjarvik industriområde viser at bergmassen er mer oppsprukket inn mot forkastningen (Holmøy et al., 2012). Seismikk på stuff er godt egnet til å identifisere soner med tett oppsprukket berg. I Dickmann (2014) ble det sett at slike soner kan påvises ved reduksjoner i  $V_p$ , dynamisk E-modul og bergmassens tyngdetetthet. Dette var også tilfelle for undersøkelsen som omfattet svakhetssonen på E13, hvor seismikken påviste lokale reduksjoner i bergmassekvalitet. Det er derfor ventet at seismikk på stuff vil være et nyttig hjelpemiddel til å bestemme hvor forkastningen krysser på tunnelnivå.

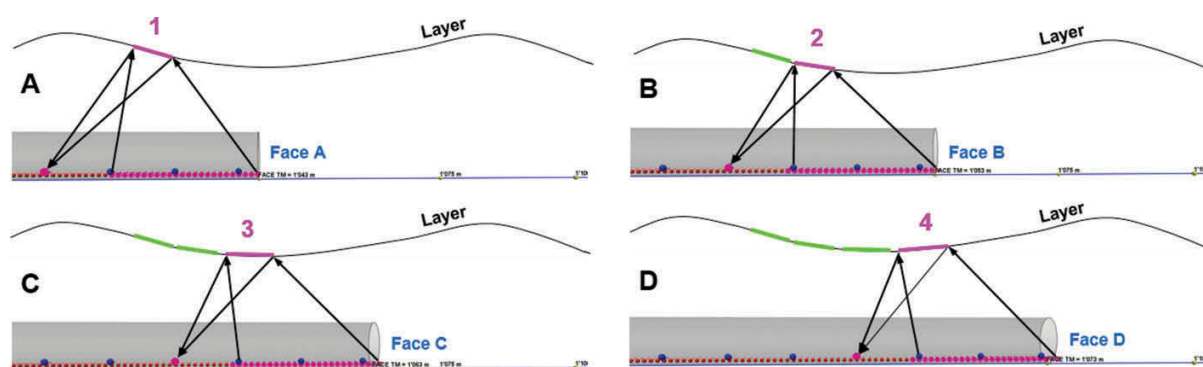
Det bør imidlertid vies ekstra oppmerksomhet til kvaliteten på dataen i dette partiet. Sterkt oppknust berg vil føre til en rask demping av den genererte seismiske energien. En må derfor forvente at den seismiske oppløsningen og rekkevidden vil være betydelig lavere i et slikt parti. Avhengig av kvaliteten på dataen kan det være aktuelt å utføre undersøkelsene hyppigere eller å installere en ekstra skuddlinje i motsatt tunnelkontur. Sistnevnte vil sørge for en bedre stacking av datene, og på den måten bidra til å fremheve relevante reflektorer (Amberg Technologies AG, 2017b).

Resultatene fra kapittel 5 viser at fyllitten i dette partiet kan opptre med svært aktiv svelleleire. Ødometertesten viste et mobilisert svelletrykk på 0,69 MPa. I tunnel regner man med at ca. 30% av svelletrykket fra ødomertest (ca. 0,21 MPa) belaster bergsikringen (Pedersen et al., 2010). I tillegg vil svelleleiren utøve et betydelig trykk på sprekker i usikret bergmasse, som i verste fall kan medføre utrasning i tunnel. Det er også mulig å påtreffe soner av grafitt. Grafitt vil redusere friksjonen på sprekkeplan og dermed øke risikoen for blokkutfall. Seismikken vil ikke kunne gi informasjon om sprekke materialets karakteristikk, som for eksempel innhold av svelleleire. Metoden kan heller ikke brukes til å bedømme hvor forvitret og deformerte sonene er. Det er likevel antatt at større markerte slepper og leirsoner i tunnel vil kunne påvises som fysiske kontraster i bergmassen. Hvis en kommer inn i et parti med mange leirsoner, hvor det er påvist svellende materiale, vil det være fornuftig å bruke seismikken til å bestemme leirsonenes bredde og orientering i forkant. Dette kan brukes til å planlegge og vurdere behovet for type og mengde sikring.

Seismikken vil også kunne brukes til å gi indikasjoner på når en er ute av forkastningspartiet. Undersøkelser med optisk viewer fra Alstein viser at gabbro nord for forkastningen har høye P-bølgehastigheter på ca. 6000 m/s (Elvebakk & Saintot, 2011). Det er derfor antatt at denne bergartstypen vil danne en god kontrast til fyllitten sør for forkastningen. Dette vil også være viktig å huske på ved etablering av referansenivåer på de seismiske parametrene i dette partiet. Det er en mulighet for at linser av fyllitt kan opptre som lavhastighetssoner i seismikkdataene uten at disse nødvendigvis representerer svakhetssoner.

Det vil også være aktuelt å bruke seismikk på stuff til å verifisere løsmassetykkelsen og bergover-

dekningen i området. Prinsippet illustreres i figur 7.4. Denne teknikken baserer seg på å gjenkjenne kontrasten mellom sedimenter på havbunnen og underliggende bergmasse. Etter hvert som tunnelen drives fremover vil det være mulig å gi en kontinuerlig avbildning av havbunnen, og på den måten ha kontroll på bergoverdekningen (Dickmann et al., 2019). Merk imidlertid at denne teknikken krever en del erfaring og en bør derfor også stedvis kontrollere bergoverdekningen med skrå sonderhull eller kjernehull.

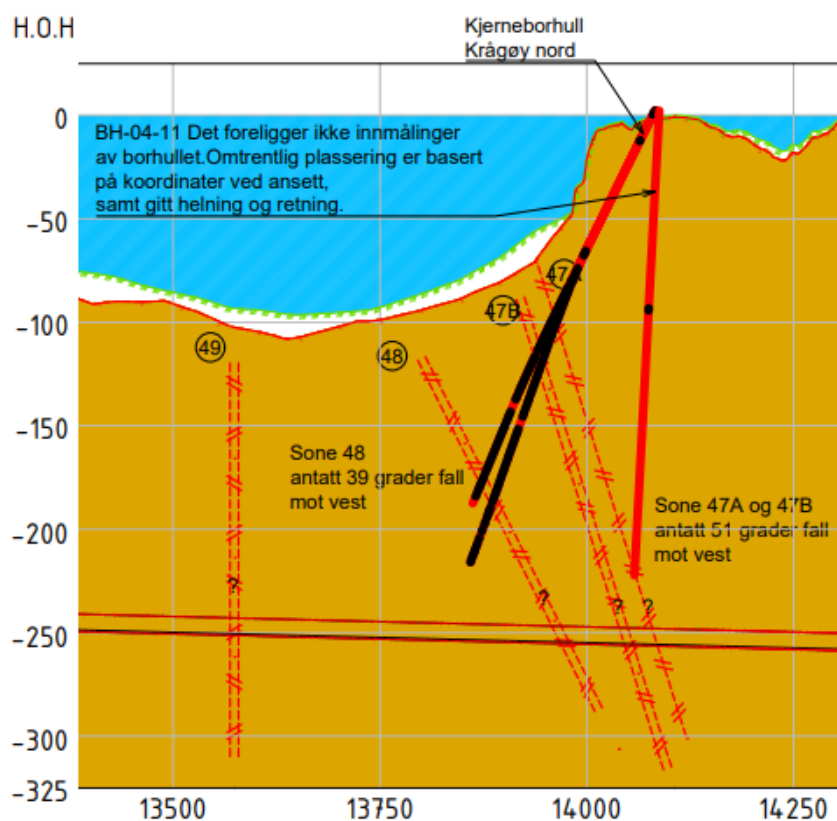


**Figur 7.4:** Påvisning av havbunnen og kontroll på bergoverdekningen ved systematisk bruk av seismikk på stoff (Dickmann et al., 2019).

Erfaringer fra Byfjordtunnelen, tunneler tilhørende sentralrenseanlegget på Nord-Jæren og tverrslagstunnelen på Mekjarvik viser at fyllitten i området generelt er lite vanngivende (Dammyr et al., 2019a; Eldevik, 2019). De påviste høye horisontalspenningene er også gunstig for lukkingen av potensielt vannførende sprekker. En tykk og eventuell impermeabel løsmasseoverdekning kan også ha en forseglende effekt og bidra til å redusere innstrømmingen til tunnelen (Bjørn Nilsen, personlig kommunikasjon 08.05.2020). Erfaringene fra drivingen av avløpssambandet IVAR viser at innlekkasjene og behovet for injeksjon blir større når tunnelen nærmer seg forkastningen (Holmøy et al., 2012). I prosjektet oppstod det også utfordringer knyttet til å få satt pakkere på grunn av det høye vanntrykket. I tillegg viser erfaringene fra drivingen av tverrslagstunnelen på Arsvågen at bergarten stedvis kan ha svært gjennomsettende sprekker, som potensielt kan føre med seg store innlekkasjer i tunnel. Seismikken bør brukes til en innledende vurdering av vannforholdene foran stoff. Det forventes å se markante reduksjoner i parametrene  $V_s$ ,  $\frac{V_p}{V_s}$  og økning i  $\nu_{dyn}$  ved passering inn mot forkastningen. Erfaringer fra kapittel 6 viser at slike tolkninger må suppleres med sondeboringer og MWD-data for optimal kontroll. Det bør også utforskes om en 3D-modell av  $\nu_{dyn}$  kan brukes til å avgjøre hvilke partier som bør prioriteres å sondebore. Det vil for eksempel være fornuftig å gjennomføre målrettet sondeboringer mot strukturer og anomalier med høye  $\nu_{dyn}$ -verdier, for å undersøke om disse kan gi større innlekkasjer enn den øvrige bergmassen.

### 7.3.2 Kvitsøy øst (profil 13950-14080)

Beskrivelser av partiet øst for Kvitsøy er basert på presentert grunnlagsmaterialet i Dammyr et al. (2020). Dette partiet er dominert av flere markante regionale nord-sørgående normalforkastninger. Kjerneboringer på Krågøy og Hestholmen har vist to til tre svakhetssoner som faller fra 39-51° mot vest (sone 47A/B og 48 i figur 7.5). Hovedbergart er grønnstein i Karmøyofiolitten, men det er også identifisert partier med graffitrike og kvartsrik svartskifer og grønnskifer. Kjerneboringen viser en knusningssone (sone 48 i figur 7.5) med varierende mektighet og bergmassekvalitet over en lengde på 60 m. Sonen har en kjerne på ca. 30 m med svært oppknust berg. Den oppknuste kjernen består av svart leirig, sandig steinmel med fragmenter av kvarts (figur 7.6). Det er også påvist at knusningssonen inneholder svelleleire (Holmøy et al., 2012).



Figur 7.5: Markante svakhetssoner øst for Kvitsøy (Dammyr et al., 2020). De svarte partiene i borehullene indikerer RQD-verdier < 25.

Svakhetssonene i området er påvist med refraksjonseismikk, som viser hastigheter mellom 2700-3500 m/s. Disse undersøkelsene viser i tillegg løsmassetykkkelser mellom 10-15 m. Spenningsmålinger på Krågøy har vist et svært komplekst og varierende spenningsbilde. Ved 198 m dybde nord på Krågøy er  $\sigma_1 = 12,1$  MPa (subvertikal 74°),  $\sigma_2$  N73°Ø = 11,1 MPa og  $\sigma_3$  N164°Ø = 4,3 MPa. Spenningsmålingene er usikre, og ved 75 m dybde ble det funnet et betydelig lavere spen-





**Figur 7.6: Kjerneboring Krågøy hull C ved dybde ca. 286-294 m. Bildet er hentet fra Holmøy et al. (2012).**

ningsbilde, hvor minste hovedspenning viste strekkspenning på  $-0,7$  MPa med retning  $N301^\circ\text{Ø}$  (Dammyr et al., 2020).

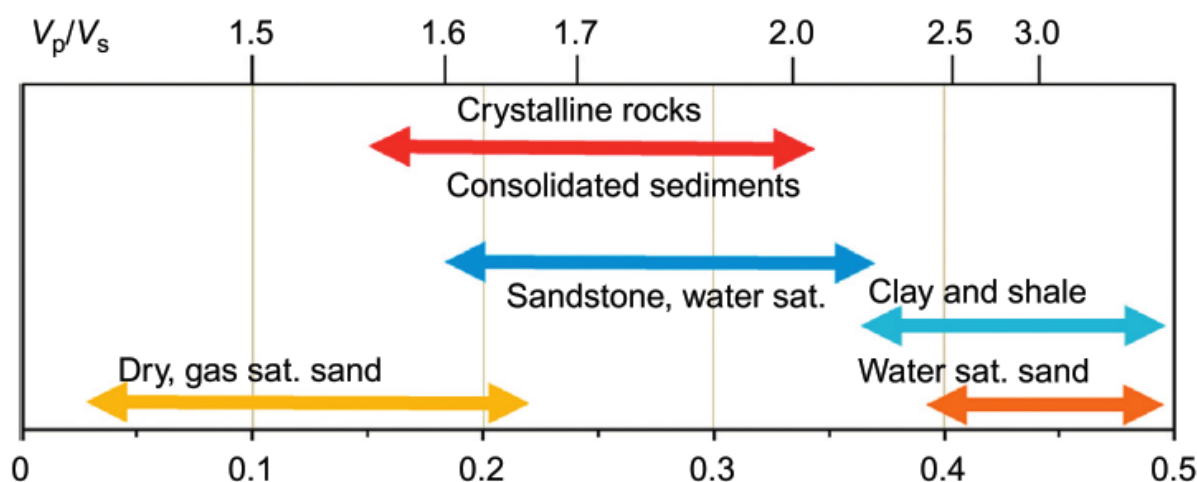
Undersøkelser utført av Friestad (2012) viser at intakte prøver av grønnstein og svartskifer i dette partiet har forholdsvis høye P-bølgehastigheter på henholdsvis ca. 6300-6400 m/s og ca. 5000-6300 m/s (målt på langs). Seismikk på stuff er svært sensitiv overfor økende oppsprekingsgrad, og knusningssonen vil derfor trolig danne en god kontrast til den øvrige bergmassen. Knusningssonen vil også kunne avsløres med reduksjoner i de andre seismiske parametrene som  $E_{dyn}$  og tyngdetetthet. Det vil også være nyttig å konstruere 3D-modeller av de geologiske forholdene på tunnelnivå. Dette kan brukes til å avgjøre om svakhetssonene opptrer enkeltvis eller om de utgjør et parti over en lengre strekning.

I Torvastad- og Visnesgruppen er det også påvist diabasganger. Disse kan potensielt medføre en utfordring i den seismiske avbildningen. Den seismiske hastigheten i slike ganger er ofte svært høy som gjør at de kan danne store refleksjonskoeffisienter med den øvrige bergmassen. Problemstillingen er godt kjent fra bruk av refleksjonsseismikk i petroleumindustrien, hvor sterke reflektorer som diabasganger og basaltintrusjoner kan gjøre at den transmitterte energien blir for lav til å avbilde bakenforliggende geologi (Landrø, 2010).

Tidligere erfaringer fra undersjøiske tunneler viser at de største innlekkasjene oppstår ved passering av distaldelene til svakhetssoner og i enkeltsprekker. Mens kjernen i svakhetssoner ofte består av leirig og impermeabelt materiale, har sprekke i ytre deler av svakhetssoner ofte større hydraulisk konduktivitet (Nilsen, 2014). Risikoen for store vanninnbrudd i dette partiet er derfor trolig størst i de ytterligere delene av knusningssonen, der hvor sideberget er mindre

omvandlet og sprekkene ikke har leirfylling. Det mest ugunstige tilfellet i dette partiet ansees å være hvis knusingssonen har hydraulisk forbindelse til havbunnen, i kombinasjon med horisontale strekkspenninger. Dette vil kunne føre til store innlekkasjer i tunnel. Seismikk på stuff vil ikke kunne påvise orienteringer eller størrelser på spenninger. Avløste sprekkesoner og strekkbruddsoner vil imidlertid utgjøre sterke fysiske kontraster i bergmassen, og kunne avbildes som lavhastighetssoner.

Det er også usikkert om seismikk på stuff kan påvise eventuelle vanninnbrudd i dette partiet. Fra figur 7.7 kan det sees at skiferbergarter har høye  $\frac{V_p}{V_s}$ - og  $\nu_{dyn}$ -verdier. Ved påtreffing av svartskifer i tunnel vil det derfor være vanskelig å avgjøre hvorvidt høye verdier av  $\frac{V_p}{V_s}$  og  $\nu_{dyn}$  representerer partier med potensiale for vanninnbrudd, eller om dette skyldes bergartstypen. Undersøkelsene må suppleres med sonderboringer, hvor enkelte av sonderhullene bør være lange for å sikre at en ikke kommer for tett på krevende grunnforhold. Det kan også være aktuelt å gjennomføre kjerneboring på stuff for optimal kontroll på sonene.

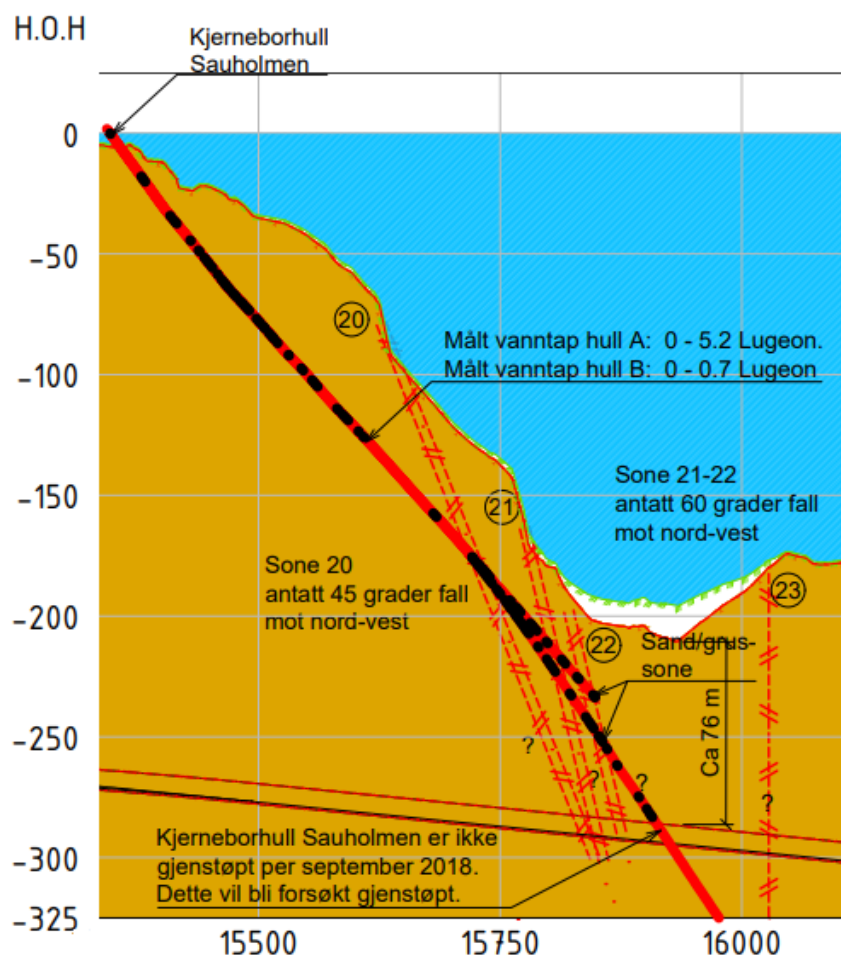


Figur 7.7: Oversikt over hvordan  $\frac{V_p}{V_s}$ -forhold (øvre horisontalakse) og dynamisk Poissons tall (nedre horisontalakse) varierer mellom bergarter og innhold av fluider (Schön, 2015).

### 7.3.3 Kvitsøy nord (profil 15700-15900)

Grunnlagsmaterialet for å beskrive partiet nord for Kvitsøy er hentet fra Dammyr et al. (2020). Topografien nord for Kvitsøy viser et markant lavbrekk på havbunnen (figur 7.8). Det er antatt at partiet sammenfaller med en rekke markerte og krevende svakhetssoner. Det er utført to kjerneboringer fra Sauholmen. Fra kjerneboringene er det registrert vekselvis grønnstein og grafittrik svartskifer i Karmøyofiolitten. Boring gjennom sone nr. 22 (figur 7.8) viser en forkastningsbreksje i grafittrik svartskifer. Materialet i sonen er løsmasseaktig og har for det meste bergartsfragmenter i grus- og sandfraksjonen (figur 7.9). Det er derfor ventet at denne sonen

er svært permeabel. Refraksjonseismiske målinger viser lavhastighetssoner mellom 2500 m/s og 3900 m/s (sone 20-23 figur 7.8). I siste revidering av entreprise E02 er det besluttet å heve Kvitsøykrysset med 20 m (Dammyr et al., 2020). Dette medfører at hovedløpene vil krysse svakhetssonene ca. 16-18 m høyere enn hva som er anvist i figur 7.8. Den minste skråavstanden til sjøbunnen i dette partiet vil være 59 m.



**Figur 7.8: Antatt spesielt krevende svakhetssoner nord for Kvitsøy (Dammyr et al., 2020). De svarte partiene i borhullene indikerer RQD-verdier  $< 25$ .**

Kjerneboringene fra Sauholmen er utført på skrå og ca. 300 m nordvest for tunneltraseen. Opplysninger om svakhetssonene på tunnelnivå er derfor basert på en ekstrapolering av informasjon fra borhullene. Det er derfor knyttet usikkerhet til de geologiske forholdene (Dammyr et al., 2020). Seismikk på stoff vil i dette område være et nyttig hjelpemiddel til å framskaffe ytterligere opplysninger om svakhetssonene på tunnelnivå. Det er ventet hyppige endringer i bergmassekvalitet i området, og seismikk er godt egnet til å påvise dette.

Den største utfordringen i partiet er knyttet til svakhetssone nr. 22. Hvis sonen er permeabel på tunnelnivå, og har direkte vannførsel fra sjøbunn, vil det kunne bli krevende forhold med store



**Figur 7.9:** Kjerneboring Sauholmen hull BH01.10B viser oppknust og løsmasseaktig materiale ved dybde ca. 665.8-668 m. Bildet er hentet fra Saintot & Solli (2011).

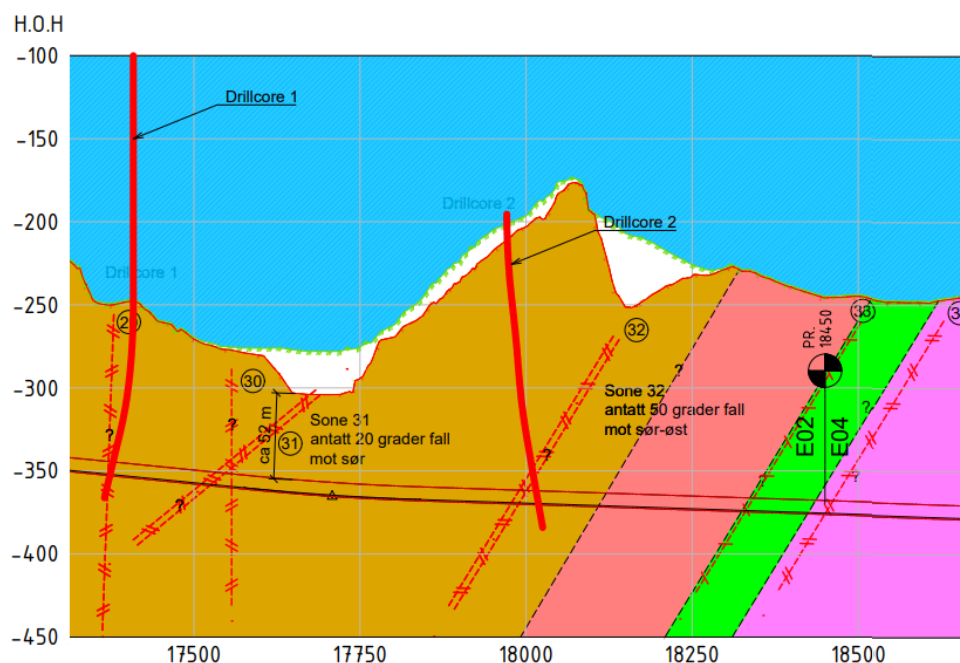
vanninnbrudd under høyt trykk (250 m vannsøyle). Dette var tilfelle for Bjorøytunnelen, hvor det ble påtruffet en 3-4 m bred forkastningssone bestående av Jurasedimenter, kullbiter og bergartsfragmenter. Denne sonen hadde høy permeabilitet og ga store innlekkasjer med vanntrykk på 0,7 MPa. Det var derfor et behov for å bruke utblåsningssikring på sonder- og injeksjonshull (Nilsen, 2014). Dette vil trolig også være aktuelt i forbindelse med kryssing av sandsonen nord for Kvitsøy.

Seismikken er godt egnet til å påvise løsmasseaktige soner, som vil være en sterk kontrast til den øvrige bergmassen. Typisk P-bølge hastighet i sand og grus er mellom ca. 500-2000 m/s (Schön, 2015) mens P-bølge hastigheten i svartskiferen er mellom ca. 5000-6300 m/s (Friestad, 2012). Denne kontrasten vil trolig være lett påviselig også på tunnelnivå. På grunn av en lav fallvinkelen på 25° fikk sandsonene i Bjorøytunnelen en krysningslengde i tunnel på 20-25 m, og sonen ble mer omfattende enn først ventet. I dette partiet vil det være fornuftig å bruke seismikken til å framskaffe opplysninger om sandsonens orientering og krysningslengde med tunnel. Dette vil gjøre det lettere å planlegge hvilke drive- og sikringsmessige tiltak som bør iverksettes.

### **7.3.4 Midtre Boknafjord (profil 17500-18450)**

I partiet i Boknafjorden fra profil 17500-18450 foreligger det stor usikkerhet knyttet til grunnforholdene. Refraksjonseismikk har påvist flere lavhastighetssoner (sone 29-34 i figur 7.10) med hastigheter mellom 2700-3900 m/s, men plassering og orientering av disse er usikker. Det er antatt at flere av disse lavhastighetssonene sammenfaller med flattliggende kaledonske skyvedekker. Mellom profil 17660-17750 viser undersøkelsene et lavbrekk, hvor bergoverdekningen vil være nær 50 m. Det er utført kjerneboring fra skip i området. Boringene viser ulike typer

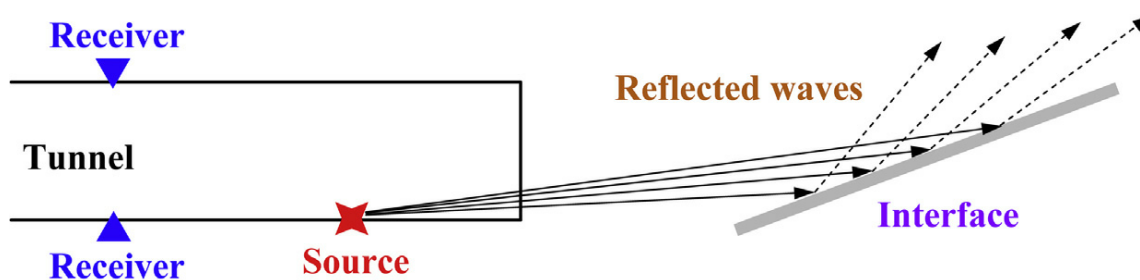
skifre, samt sandstein og fyllitt. De fremste utfordringene knyttes til den ingeniørgeologiske usikkerheten og orientering og mektighet av svakhetssoner på tunnelnivå. For flere detaljer hva angår grunnforholdene henvises det til Dammyr et al. (2020).



**Figur 7.10:** Ved profil 17500-18450 knyttes det stor usikkerhet til grunnforholdene. Det er antatt at området er preget av flere flattliggende skyvesoner (Dammyr et al., 2020). De tykke røde linjene viser hvor det er utført kjerneboring fra skip.

Den viktigste funksjonen til seismikk på stoff i dette partiet vil være å framskaffe ytterligere opplysninger om grunnforholdene foran stoff og på den måten redusere den ingeniørgeologiske risikoen. I dette partiet foreligger det få ingeniørgeologiske data og seismikken vil derfor være av spesiell viktig betydning. Det bør derfor prioriteres å framskaffe gode data fra seismikken. Dette kan gjøres ved å øke frekvensen på undersøkelsene til hver 50 m eller ved å skyte med to skuddlinjer.

Det er antatt at partiet vil ha høy variasjon i bergartstyper og bergmassekvalitet. Erfaringene fra det nærliggende Ryfastprosjektet viser at bergartsgrensene ofte sammenfaller med svakhetssoner (Larsen, 2019). Markerte bergartsgrenser opptrer også ofte med store vanninnbrudd på grunn av økt oppsprekking (Holmøy, 2008). Seismikk på stoff vil kunne brukes til å avsløre potensielle svakhetssoner knyttet til skyvesoner og bergartsgrenser. Som det ble sett i kapittel 6 foreligger det imidlertid usikkerhet ved å bruke seismisk informasjon til å skille mellom ulike bergartstyper. På grunn av den høye ingeniørgeologiske usikkerheten i dette partiet vil det være et stort behov for å gjøre intensiverte sonderboringer for å påvise bergmassekvalitet og potensielle vanninnbrudd i tunnel.



**Figur 7.11:** Seismikk på stuff vil ha utfordringer med å påvise grenseflater med lav fallvinkel ( $< 25^\circ$ ) da den seismiske energien vil reflekteres bort fra tunnel. Figuren er hentet fra (Li et al., 2017).

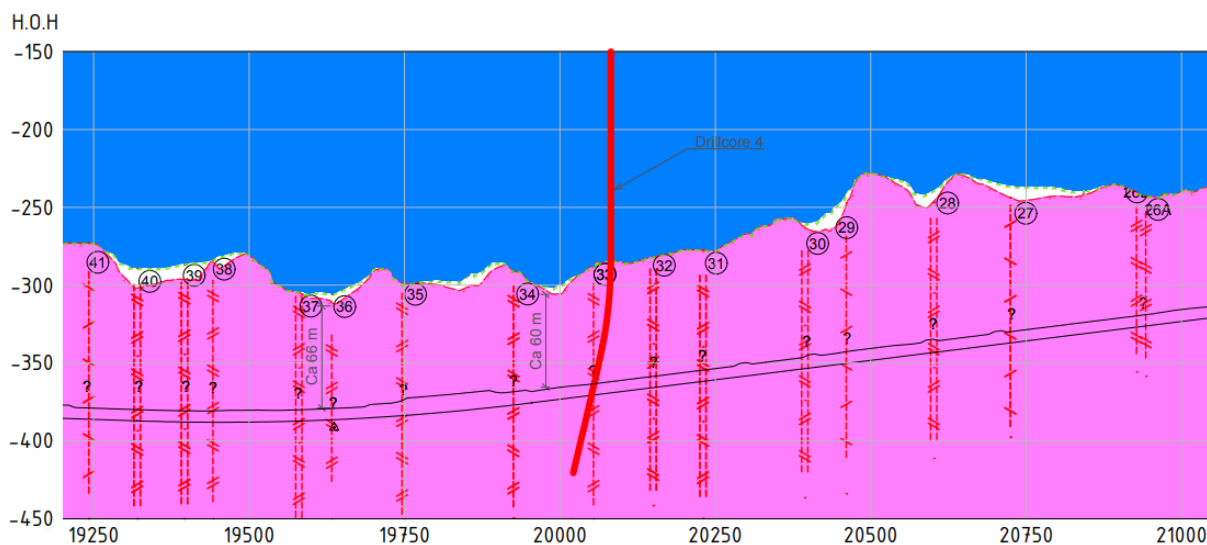
En mulig utfordring i dette partiet vil være å gi en god avbildning av de flattliggende skyvesonene. Hvis sonene skjærer tunnelens lengderetning med en fall- eller strøkvinkel  $< 25^\circ$  (som for eksempel sone 31 i figur 7.10) vil det meste av den utsendte energien bli refraktert og reflektert i laggrensen bort fra tunnel (Hecht-Méndez & Dickmann, 2016). Problemstillingen illustreres i figur 7.11, og skyldes Snells lov som beskriver forholdet mellom brytningsvinkel og seismiske hastigheter i en laggrense. Dette resulterer i at det kan oppstå situasjoner hvor det ikke vil være nok reflektert energi til å gi en tilstrekkelig god avbildning av de aktuelle sonene.

Ved passering inn mot lavbrekket (ca. pel 17600-17750) vil det være naturlig å bruke seismikk på stuff til å gi en kontinuerlig avbildning av havbunnen for å kontrollere bergoverdekningen. Ved usikre data bør det bores sonder- eller kjerne hull på skrå for ytterligere verifisering. En må imidlertid være klar over at lange sonderhull i skifrige bergarter kan medføre et betydelig boravvik. En oppnår derfor best kontroll ved å benytte begge metodene samtidig.

### 7.3.5 Midtre Boknafjord (profil 19250-21000)

Beskrivelser av dette partiet er basert på informasjon hentet fra Dammyr et al. (2019b). Ved profil 19250-21000 viser topografien flere markerte søkk (figur 7.12). Refraksjonseismiske undersøkelser har vist at disse sammenfaller med lavhastighetssoner på flere titalls meter. Det er også registrert hastigheter under 3000 m/s. Tunnelen er på sitt dypeste punkt på denne strekningen (392 muh.). Påtreffing av krevende svakhetssoner i kombinasjon med høyt vanntrykk vil være spesielt krevende. Det er utført kjerneboring fra skip som har vist foldet og grovkornet granittisk gneis. Det er antatt at dette kan være samme bergartstype som den som er påtruffet i tverrslagstunnel på Arsvågen.

Erfaringene fra tverrslagstunnelen på Arsvågen viser at påviste svakhetssoner fra refraksjonseismikk er mindre markante på tunnelnivå. Det er derfor antatt at flere av svakhetssonene i dette partiet kan vise samme trend, og være mindre problematiske enn først antatt. I likhet med dri-



**Figur 7.12: Antatte svakhetssoner ved profil 19250-21000 med potensiale for store vanninnbrudd under høyt trykk (Dammyr et al., 2019b).**

vingen på E13, vil seismikken her kunne være et nyttig hjelpemiddel til å avkrefte eller bekrefte utholdenhet på antatte svakhetssoner. Dette kan brukes til å redusere bruken av kjerneboring på stoff, ved å avvente til de mest krevende partiene. Det kan imidlertid være vanskelig å vurdere hvilke partier som er krevende utelukkende basert på seismisk informasjon. Det vil være fornuftig å supplere seismikk på stoff med enkelte lange sonderhull (50-100 m) for å bekrefte bergmasseforholdene, samt avdekke eventuelle krevende grunnforhold fra god avstand.

Lavhastighetssoner i grunnfjellsbergarter inneholder ofte svelleleire (Pedersen et al., 2010). Erfaringer fra E13 tilsier at dette også er tilfelle for den prekambriske grunnfjellsgneisen på Rogfast. Tidligere erfaringer fra drivingen av den nærliggende T-forbindelsen viser at gneisen kan ha svelletrykk opptil 1,1 MPa (Dammyr et al., 2020). Som det ble sett i kapittel 3 antas det at større leirsoner vil kunne avsløres ved reduksjoner i  $V_s$ . Denne tolkningen er ikke entydig, og det er også mulig at en slik reduksjon kan skyldes opptreden av vann. Seismikken vil heller ikke kunne brukes til å bedømme leirmaterialets karakteristik.

En potensiell utfordring i dette partiet vil være å gi en god avbildning av tettliggende svakhetssoner. Fra figur 7.12 kan det sees at det er forventet partier hvor det vil være opptil tre svakhetssoner i en seismikkundersøkelse. I slike tilfeller kan det oppstå scenarier hvor en svakhetssone kan skjule den neste, ved at den transmitterte energien gjennom første svakhetssone er for lav til å avbilde bakenforliggende svakhetssoner (Dickmann et al., 2011). Dette kan i verste fall gi et feilaktig og for optimistisk inntrykk av grunnforholdene. Det anbefales derfor å være forsiktig med å overtolke dataene i dette partiet. Bruk av sonderboringer og MWD-data vil være viktig for å avdekke uforutsette hendelser.

Det vil også være svært viktig å ha kontroll på vannforholdene i dette partiet. Ved påvisning av svakhetssoner kan seismikken brukes til å gjøre innledende analyser om disse potensielt kan være vannførende. Erfaringene fra driving av kraftverkstunneler i Sauda og Otra viser at det kan oppstå svært store vanninnbrudd i enkeltsprekker med lav horisontalspenning og høyt vanntrykk (Dammyr et al., 2020). Forholdene kan bli spesielt utfordrende hvis tunnelen treffer åpne og gjennomsettende sprekker som har direkte kontakt med fjorden. Ved påtreffing av sprekker med høy hydraulisk konduktivitet og høyt vanntrykk, i kombinasjon med dårlig bergmasse, kan det i verste fall skje en gradvis og ukontrollert utspyling av stuff. Slike situasjoner kan også oppstå selv om sprekke i utgangspunktet ikke gir store innlekkasjer (Bjørn Nilsen, personlig kommunikasjon, 20.04.2020). Det er usikkert hvorvidt seismikken er ømfintlig nok til å skille mellom hvilke sprekker som er vanngivende og trykksatt, og dermed om metoden kan påvise slike ovennevnte grunnforhold. Det vil være spesielt vanskelig hvis sprekke er subhorisontale og på den måten virke skjult i den seismiske prognosen. Det anbefales derfor å ha god overlap mellom sonderboringer, slik at man har tilstrekkelig med bergmasse frem mot eventuelle vanninnbrudd. En må også være klar over at sonderboringer ikke nødvendigvis vil påtreffe alle vannførende sprekker. På bakgrunn av dette bør en være ekstra forsiktig under drivingen av dette partiet.



Tabell 7.1: Oversikt over antatte utfordringer og bruk og begrensninger med seismikk på stoff på utvalgte krevende partier på Rogfast.

Partier:	Tungenes-forkastningen	Kvitvøy øst	Kvitvøy nord	Midtre Boknafjord	Midtre Boknafjord
<b>Profil:</b>	6500-7500	13950-14080	15700-15900	17500-18450	19250-21000
<b>Bergarter:</b>	Fyllitt, gabbro	Grønnstein, svart-skifer	Grønnstein, svart-skifer	Grønnstein, fyllitt, gneis, sandstein	granitt, granittisk gneis
<b>Antatt beskaffenhet:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Forkastning (knusningszone)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Regionale nord-sørgående forkastninger</li> <li>Knusningszone med svært oppsprukket kjerne</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Permeable svakhetssoner</li> <li>Høy variasjon i bergmassekvalitet</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Flere flatliggende kaledonske skyvedekker</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Tettliggende svakhetssoner i granittisk gneis</li> </ul>
<b>Antatt spesielle utfordringer:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Usikker overdekning</li> <li>Usikkert omfang av svakhetssoner på tunnelnivå</li> <li>Svelleleire</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Komplekst spenningsbilde</li> <li>Store vanninnbrudd</li> <li>Svelleleire</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Komplekst spenningsbilde</li> <li>En svært krevende sandsoner</li> <li>Store vanninnbrudd (høyt vanntrykk)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Usikkerhet tilknyttet bergartstyper</li> <li>Store vanninnbrudd (høyt vanntrykk)</li> <li>Omfang av svakhetssoner på tunnelnivå</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Store vanninnbrudd (høyt vanntrykk)</li> <li>Svelleleire</li> <li>Høy geologisk usikkerhet</li> </ul>
<b>Bruk av seismikk på stoff:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Verifisere overdekning</li> <li>Påvise sonens orientering og bredde</li> <li>Påvise sonens orientering og bredde</li> <li>Påvise vannforhold</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Påvise sonens orientering og bredde</li> <li>Påvise vannforhold</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Påvise løsmasseaktige svakhetssoner</li> <li>Påvise lokale endringer i bergmassekvalitet</li> <li>Lage 3D-modell for å finne krysningslengde på svakhetssoner i tunnel</li> <li>Påvise vannforhold</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Framskaffe ytterligere opplysninger om bergmasseforhold på tunnelnivå</li> <li>Redusere den geologiske risikoen</li> <li>Verifisere overdekning</li> <li>Påvise vannforhold</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Redusere behov for kjerneboring på stoff</li> <li>Redusere den geologiske risikoen</li> <li>Påvise vannforhold</li> </ul>
<b>Begrensninger ved bruk av seismikk på stoff:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Kan ikke påvise svelleleire</li> <li>Krever endel erfaring for å påvise overdekning</li> <li>Kort rekkevidde i</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Gir ikke informasjon om spenningsbilde</li> <li>Kort rekkevidde i</li> <li>Oppsprukket bergmasse</li> <li>Vanskelig å bruke seismikkparametre for å avgjøre vannforhold</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Gir ikke informasjon om spenningsbilde</li> <li>Kort rekkevidde i</li> <li>Oppsprukket bergmasse</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Vanskelig å påvise flatliggende gresseflater</li> <li>Krever endel erfaring for å påvise overdekning</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Kort rekkevidde</li> <li>Tilsynelatende skjulte svakhetssoner</li> <li>Kan ikke påvise svelleleire</li> <li>Vanskelig å påvise vannforhold enkeltsprekker</li> </ul>



# Kapittel 8

## Diskusjon

Tilstrekkelige forundersøkelser under bygging og god kjennskap til de forutliggende geologiske forholdene er avgjørende for et vellykket tunnelprosjekt (Palmstrøm et al., 2003). Den systematiske bruken av seismikk på stoff på Rogfast vil bli et pilotprosjekt i norsk tunnelsammenheng. Dette vil medføre en del nye erfaringer og potensielle utfordringer underveis. Dette kapitlet er en sammenfatning av erfaringer, diskusjoner og vurderinger gjort så langt. Spesielt fokus vil bli lagt på en diskusjon av metodens usikkerhet og potensiell nytteverdi i forbindelse ved bruken på Rogfast.

### 8.1 Usikkerhet

Det er viktig å være klar over at seismikk som en geofysisk metode alltid vil innebære usikkerhet. De seismiske undersøkelsene på stoff som er utført til nå på Rogfast viser at metoden predikerer langt flere kontraster og variasjoner i bergmassen sammenlignet med hva kartlegging i tunnel viser. Det er erfart at de fleste påviste reflektorene i seismikken er irrelevant for tunnel-drivingen, og uvesentlig for stabiliteten til tunnel. Dette kom spesielt godt fram i undersøkelse nr. 5 i kapittel 6, hvor seismikken viste hyppige variasjoner i de seismiske tolkningsparametrene, men hvor variasjonen ikke gjenspeilet de faktiske geologiske forholdene i tunnel.

Seismikk på stoff vil heller ikke kunne avsløre alle detaljer om bergmassen. Som det ble sett i kapittel 2 er det forutsatt at grenseflatene i bergmassen utgjør en kontrast på 20% i akustisk impedans. I tillegg forutsettes det at sprekker, forkastninger og slepper skjærer tunnelens lengderetning med en vinkel  $> 25^\circ$  (Amberg Technologies AG, 2017b). På bakgrunn av dette må en forvente situasjoner hvor ingeniørgeologiske utfordringer kan gå uforutsett. Under drivingen av

Rogfast er det for eksempel antatt at metoden vil ha utfordringer knyttet til å påvise svake bergartslag med lav kontrast i akustisk impedans, flattliggende svakhetssoner definert av kaledonske skyvedekker og potensielt vannførende, subhorisontale sprekker.

Tolkning av seismikken innebærer også usikkerhet. Det er enkelt å sammenligne seismikken med data etter driving, hvor en kan se etter sammenhenger. Utfordringen vil imidlertid være å bruke metoden til å lage objektive prognoser av bergmasseforholdene foran stoff. Tolkninger av den seismiske prognosen vil alltid være farget av brukeren sine forhåndskunnskaper og skjønnsmessige vurderinger. Dette gjør at brukeren, basert på sin overbevisning, kan bli fristet til å dra forhastede slutninger om hva strukturer i seismikken kan skyldes. Det er viktig å huske på at seismikken ikke er éntydig og at resultatene alltid vil kunne ha flere mulige forklaringer. En bør derfor unngå å overtolke den seismiske prognose og holde den så enkel som mulig og begrenset til de viktigste oppdagelsene.

Seismikk på stoff har også vist seg som en svært erfaringsbasert metode. Det er lett å generere feil i alle ledd av undersøkelsen. Dette vil igjen påvirke kvaliteten til den seismiske prognosen. Under tilriggingen må brukeren kunne dimensjonere riktig ladningsmengde etter de stedværende grunnforholdene. Dette krever kjennskap til bergmassens seismiske respons, som vil endre seg basert på faktorer som oppsprekking, bergartstype og størrelse på skadesone rundt tunnel. Under dataprosesseringen kreves det erfaring for å gjøre riktige utvelgelser av hva som er god data og hvilke data som er støy. Ifølge Al-Samarray & Jensen (2020) er dette det mest avgjørende trinnet for kvaliteten på den seismiske undersøkelsen. Under tolkning av den seismiske prognosen er det erfart at det er lett å sette feil referanseverdier. Hvis en setter referansenivået for høyt vil det genereres mange røde og falske svakhetssoner. Setter en derimot referansenivået for lavt kan konsekvensene bli et for optimistisk inntrykk av grunnforholdene. Etter hvert som en oppnår mer erfaring med metoden vil påliteligheten til de seismiske undersøkelsene øke. Dette avhenger imidlertid av at en benytter seg av de erfaringene en tilegner seg underveis, både for å tilpasse metoden etter de stedværende grunnforholdene, og for å korrelere strukturer i seismikken opp mot observert geologi (Dickmann & Krueger, 2014).

Det er ikke påvist spesielt krevende grunnforhold i tverrslagstunnelen på Arsvågen. Rogfastprosjektet har derfor enda ikke erfaringer med hvordan seismikk på stoff kan påvise markante svakhetssoner og store vanninnbrudd i tunnel. Det er også usikkert hvordan metoden vil fungere i slike grunnforhold. I litteraturen er det sett at oppløsningen og rekkevidden til metoden er svært ømfintlig overfor oppsprekking- og forvitningsgrad, som påvirker dempingen av de seismiske bølgene. Ved bruk av metoden i krevende partier, hvor bergmassen kan være svært knust og oppsprukket, må det forventes at dataene er mer usikre (Dickmann, 2020). I slike tilfeller bør metoden modifieres. Den mest aktuelle løsningen er å oppjustere antall skuddhull, ved å for

eksempel etablere én ekstra skuddlinje i motsatt tunnelkontur. Det er også mulig å utføre undersøkelser hyppigere for å få bedre og en mer kontinuerlig overlapp mellom undersøkelsene.

I arbeidet med oppgaven er det erfart at det er relativt dårlig samsvar mellom parameterestimer i prognosen fra seismikk på stoff og målte fysiske verdier i laboratoriet. Det er for eksempel vist at  $E_{dyn}$ -verdier for granittisk gneis, målt med seismikk på stoff, er mye høyere sammenlignet med målte  $E_{dyn}$ - og  $E_{stat}$ -verdier i laboratoriet. Det er også vist at P- og S-bølgehastigheter i in-situ bergmasse er høyere enn hva som måles i intakte kjerneprøver. På bakgrunn av dette bør en være forsiktig med å korrelere seismisk informasjon opp mot bergmassens fysiske egenskaper. Disse parametrene er også retningsavhengige, slik at en også bør ha god kjennskap til bergmassens anisotropi for å kunne gjøre pålitelige tolkninger.

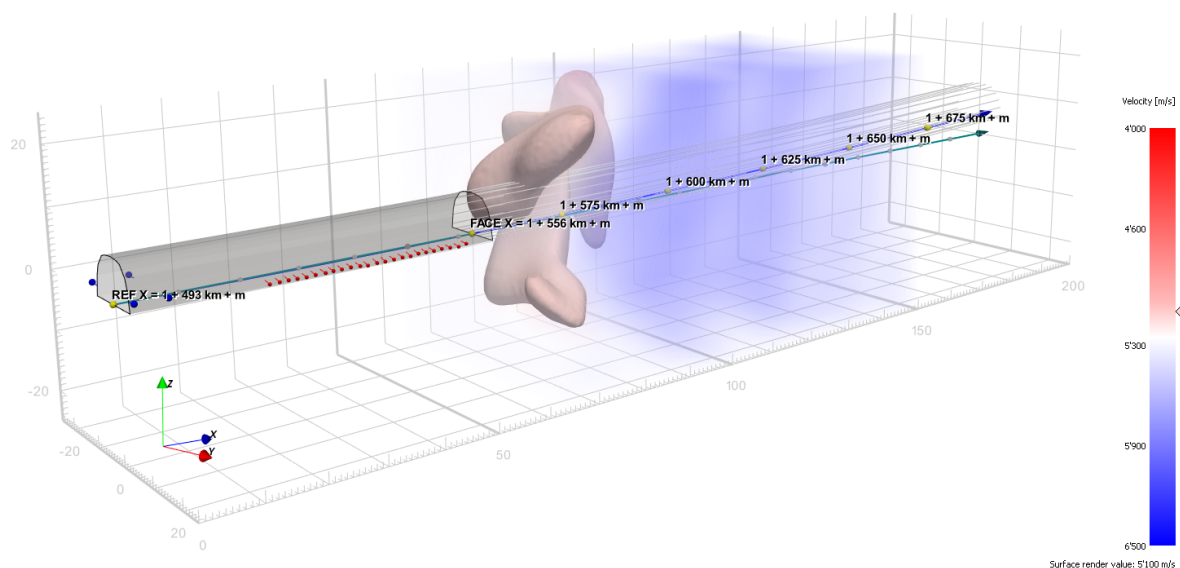
## 8.2 Potensiell nytteverdi

Resultatene fra tverrslagstunnelen på Arsvågen indikerer at seismikk på stoff vil kunne ha stor nytteverdi under drivingen av hovedløpene på Rogfast. Sensitiviteten til metoden gjør at den vil være et godt hjelpemiddel til å gi en første vurdering og beskrivelse av de forutliggende grunnforholdene. Metoden dekker et mye større område enn tradisjonelle forundersøkelser i tunnel, som for eksempel sonder- og kjerneboringer. Dette gjør at ingeniørgeologiske utfordringer som svakhetssoner og partier med dårlig bergmasse kan avdekkes tidlig. På Rogfast bør metoden først og fremst brukes som et verktøy for å planlegge hvor og når supplerende forundersøkelser må utføres og hvor eventuelle kontrollsoner skal etableres.

For å oppnå best mulig kontroll på potensielle ingeniørgeologiske utfordringer på Rogfast vil det være viktig å supplere TSP med andre ingeniørgeologisk data som foreligger. Dette inkluderer både data fra forundersøkelser i dagen og under bygging. Ved å sammenstille de seismiske undersøkelsene i tunnel med utførte refraksjonseismiske undersøkelser på havbunnen og kjerneboringer fra land, i partier hvor dette foreligger, vil en få bedre kontroll på for eksempel svakhetssoners omfang, karakteristikk og beliggenhet. Under bygging må seismikken suppleres kontinuerlig med sonderboringer og MWD-data. Dette vil være viktig for å vurdere relevansen av hvilke lavhastighetssoner og strukturer i seismikken som har betydning for tunneldrivingen og stabiliteten til tunnelen. På Rogfast skal seismikk på stoff brukes hver 100 m. Tidligere erfaringer fra systematisk bruk av seismikk på stoff viser at en undersøkelsesfrekvens på 100 m mellom hver undersøkelse vil gi tilstrekkelig overlapp og dermed være et godt utgangspunkt for å redusere den ingeniørgeologiske risikoen (Dickmann, 2020).

Seismikk på stoff vil potensielt være svært nyttig i krevende partier og inn mot markerte svakhetssoner. Her vil metoden kunne brukes til å verifisere overdekning, samt svakhetssoners ori-

entering, fall og mektighet og dermed kryssningslengde med tunnel. I krevende partier bør en i tillegg ha god overlapp mellom sonderboringene slik at en ikke kommer for tett på eventuelle svakhetssoner og vanninnbrudd. I figur 8.1 vises en 3D-modell av en svakhetszone fra en undersøkelse utført i Hundvågtunnelen i det nærliggende Ryfastprosjektet. I slike modeller er det lett å se utstrekningen på svakhetssonen. Under drifvingen av hovedløpene på Rogfast bør det utforskes om slike 3D-modeller av P-bølgehastighet eller  $E_{dyn}$  kan være et hjelpemiddel til å avgjøre hvor lange sonderhull eller kjernehull bør prioriteres å bore.



**Figur 8.1: Svakhetszone i Hundvågtunnelen modellert med romlig fordeling av P-bølgehastighet (Hecht-Méndez & Dickmann, 2016).**

En forutsetning for at metoden skal være et hjelpemiddel i tunneldrifvingen er at prognosene av bergmassekvalitet blir levert før entreprenør kommer inn i de aktuelle sonene. Entreprenørene kommer i stor grad til å drives samtidig, og dette vil medføre et behov for å kartlegge mange stuffer parallelt. Forventet inndrift vil være ca. 40-60 m per uke for hver stoff (Bjørn Nilsen, personlig kommunikasjon, 08.05.2020). Anslagsvis vil dette da kreve én seismisk undersøkelse for hver stoff annenhver uke. Erfaringene fra tverrslagstunnelen på Arsvågen viser at hver undersøkelse tar ca. 3-4 timer, mens tolkning og presentasjon av dataene tar enda lenger tid. I tillegg vil reisetid mellom entreprisene og sammenlikning med MWD-data og sonderboring gjøre at bruk av metoden kan bli tidkrevende. En mulig utfordring med metoden vil derfor være å gi en kontinuerlig oppdatert seismisk prognose for hver stoff og sørge for en god informasjonsflyt av aktuelle oppdagelser. På bakgrunn av dette kan det bli nødvendig å gjøre en prioritering av undersøkelsene til områder hvor det er ventet at grunnforholdene er mest krevende. I tillegg er det viktig at den som kartlegger stoff også er den som er med på å utføre og tolke de seismiske undersøkelsene, samt kommuniserer resultatene til prosjekts personell inkludert entreprenør.

Det er erfart at prediksjon av vannforhold er mest usikre. Korrelasjonen mellom dynamisk Poissons tall og innlekkasjer virker tidvis tilfeldig. Erfaringene fra E13 viser også at det er vanskelig å kvantifisere innlekkasjene. En bør derfor være kritisk til dette, og heller bruke seismikken som en indikasjon på hvor det kan forventes vanninnbrudd i tunnel. Den viktigste forundersøkelsen under bygging for å påvise vanninnbrudd i tunnel vil fortsatt være kontinuerlig bruk av sonderboringer (Nilsen, 2014). Under driving av hovedløpene ville det også vært interessant å sammenligne prediksjonene av dynamisk Poissons tall opp mot boreparametertolkning av vannforhold. Dette kan gjøre det lettere å påvise potensielle vanninnbrudd i tunnel.





# Kapittel 9

## Konklusjon

I denne masteroppgaven er det gjort en vurdering og diskusjon av potensialet til seismikk på stoff under drivingen av hovedløpene på Rogfast. Oppgaven inneholder også vurderinger av hvordan metoden har fungert i den ferdigdrevne tverrslagstunnelen på Arsvågen. Det er i tillegg utført felt- og laboratorieundersøkelser for å kunne teste hvorvidt utdata fra metoden kan brukes til å karakterisere bergmassens fysiske egenskaper. De viktigste resultatene fra arbeidet med denne oppgaven er:

- Seismikken på stoff er godt egnet til å påvise kontraster i bergmassen og lokale endringer i bergmasseforhold. På bakgrunn av dette er det vurdert at metoden vil være et nyttig hjelpemiddel til å påvise markerte svakhetssoner, partier med dårlig bergmasse og forkastninger langs hovedløpene på Rogfast. Ved driving i spesielt krevende partier vil det være aktuelt å bruke metoden til å påvise svakhetssoners krysningslengde med tunnel, verifisere overdekning, og for å hjelpe til å avgjøre når man bør utføre supplerende kjerneboring og intensivt sonderboring på stoff.
- Metoden vil ikke kunne gi en fullstendig karakterisering av bergmassens egenskaper. Det er vurdert at metodens evne til å påvise vanninnbrudd i tunnel er usikker. Ved drivingen av hovedløpene på Rogfast kan TSP brukes til å gi en innledende vurdering av sannsynlige innlekkasjer i tunnel. Metoden vil likevel ikke kunne avsløre faktorer som trykkforhold eller mengde innlekkasje i tunnel. TSP vil heller ikke kunne brukes til å identifisere svelleleire eller detaljer om sprekke- og sleppemateriale.
- Tolkning av utdata fra seismikk på stoff vil alltid bære preg av en viss usikkerhet. For å redusere metodens usikkerhet bør tolkningene være modell-drevet, hvor den ingeniør-

geologiske modellen hele tiden oppdateres basert på innhenting av ny geologisk data, og en justering mellom predikert og observert geologi. Ved å korrelere begivenheter i seismikken til spesifikke geologiske strukturer eller bergmasseforhold, kan dette gjøre det lettere å gjenkjenne ulike grunnforhold i senere undersøkelser.

- Under drivingen av Rogfast bør seismikk på stoff kontinuerlig suppleres med andre ingeniørgeologiske data. Analysen i kapittel 6 viser at seismikk i kombinasjon med MWD-data og sonderboringer gir god kontroll på forutliggende grunnforhold. En må imidlertid være forsiktig med å ta for lett på grunnforholdene da konsekvensene kan være store. Erfaringer fra tidligere krevende grunnforhold og den ingeniørgeologiske risikoen må også inngå i beslutninger av hvilke drivetekniske og sikringsmessige tiltak som skal iverksettes.
- Under arbeidet med oppgaven er det erfart at TSP sitt potensial er sterkt knyttet til brukernes erfaring med metoden. Kvaliteten på undersøkelsene avhenger av riktige valg under alle deloperasjoner som inngår i undersøkelsen, fra utførelse, prosessering av data og tolkning. Etter hvert som prosjektet oppnår bedre erfaring med metoden er det antatt at prediksjonsevnen øker og usikkerheten reduseres.

# Kapittel 10

## Videre arbeid

Datagrunnlaget for å gjøre vurderinger av TSP sin nytteverdi har vært begrenset. Det foreligger også lite erfaringer fra bruk av seismikk på stuff i undersjøiske tunneler. Videre arbeid bør i stor grad dreie seg om å gjennomgå flere undersøkelser fra Rogfast etter hvert som dette foreligger. Følgende arbeid foreslås å utforskes nærmere av for eksempel fremtidige master- eller doktorgradsstudenter:

- Undersøke potensialet for å legge de seismiske undersøkelsene inn i BIM (*Bygningsinformatjonsmodellering*). Et slikt arbeid bør være fokusert på hvordan BIM kan være et hjelpemiddel for å gjøre sammenlikningen av seismikken med grunnundersøkelser og data under driving enklere. Ved å bruke BIM kan en potensielt se større sammenhenger ved å analysere hvordan dataene samsvarer med hverandre. Dette kan være nyttig for å avgjøre hvilke strukturer i seismikken som har betydning i forhold til tunneldrivingen.
- Sammenstille informasjon og utarbeide erfaringsgrunnlag basert på en systematisk gjennomgang av seismiske undersøkelser på stuff og andre ingeniørgeologiske data under driving av Boknafjordtunnelen.
- Undersøke sammenhenger mellom utdata og seismikkparametre fra seismikk på stuff og bergmassens egenskaper.
- Undersøke hvordan bruken av seismikk på stuff kan optimaliseres under driving. Eksempler på spørsmål som gjenstår å besvares er: Er en undersøkelsesfrekvens på 100 m tilstrekkelig? Hvilke modifikasjoner av metoden må gjøres i krevende partier? Hvordan kan og hvordan fungerer metoden som et beslutningsverktøy under driving?



# Referanser

Al-Samarray, A. & Jensen, E. (2020), 'Evalueringsrapport for seismikken (TSP)', *Statens vegvesens rapporter nr. 563* . E39 Rogfast Statens Vegvesen utbyggingsområde vest.

Amberg Technologies AG (2017a), *TSP 303 Plus- Evaluation manual*. Hentet fra: [https://ambergtechnologies.com/fileadmin/user\\_upload/amberg-technologies/downloads-restric/Geophysics\\_restric/TSP303Plus\\_Evaluation\\_Manual\\_3.1.1.0\\_en.pdf](https://ambergtechnologies.com/fileadmin/user_upload/amberg-technologies/downloads-restric/Geophysics_restric/TSP303Plus_Evaluation_Manual_3.1.1.0_en.pdf)  
Nedlastet 25.01.2020.

Amberg Technologies AG (2017b), *TSP 303 Plus- Operation manual*. Hentet fra: [https://ambergtechnologies.com/fileadmin/user\\_upload/amberg-technologies/downloads-restric/Geophysics\\_restric/TSP303Plus\\_Operation\\_Manual\\_2.2.1\\_en.pdf](https://ambergtechnologies.com/fileadmin/user_upload/amberg-technologies/downloads-restric/Geophysics_restric/TSP303Plus_Operation_Manual_2.2.1_en.pdf)  
Nedlastet 25.01.2020.

Asadollahi, P. & Foroozan, R. (2006), 'Comparison of the evaluated rock mass properties from the tsp system and the rmr classification (semnan tunnel, iran)', *Tunnelling and Underground Space Technology* **21**(3-4), 236–236.

ASTM International (2014), 'Standard test methods for compressive strength and elastic moduli of intact rock core specimens under varying states of stress and temperatures', *ASTM International Designation: D7012* .

Aydin, A. (2013), 'Upgraded ISRM suggested method for determining sound velocity by ultrasonic pulse transmission technique', *The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007-2014* pp. 95–99.

Azimian, A. & Ajalloeian, R. (2014), 'Empirical correlation of physical and mechanical properties of marly rocks with p wave velocity', *Arabian Journal of Geosciences* **8**, 2069–2079.  
<https://doi.org/10.1007/s12517-013-1235-4>.

- 
- Bamford, W., Barton, C., MacMahon, B., Kanji, M., Babcock, K., Boyd, J., Cruden, D., Franklin, J., Herget, G., Macleod, G. et al. (1978), 'International society for rock mechanics commission on standardization of laboratory and field tests: suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses', *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* **15**(6), 319–368.
- Bandis, S., Lumsden, A. & Barton, N. (1983), 'Fundamentals of rock joint deformation', *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* **20**(6), 249–268. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(83\)90595-8](https://doi.org/10.1016/0148-9062(83)90595-8).
- Barton, N. (2007), *Rock Quality, Seismic Velocity, Attenuation and Anisotropy*, Taylor and Francis Group, London, UK. ISBN: 0-415-39441-4.
- Barton, N., Lien, R. & Lunde, J. (1974), 'Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support', *Rock mechanics* **6**(4), 189–236.
- Bieniawski, Z., Franklin, J., Bernede, M., Doffaut, P., Runmel, F., Horibe, T., Broch, E., Rodrigues, E., Van Heerden, W., Vogler, U. et al. (1979), 'Suggested methods for determining the ucs and deformability of rock materials. isrm commission on standardisation of laboratory and field tests', *Publ. Int. J. of Rock Mech. and Mining Sc. and Geomech. Abs* **16**(2), 135–140.
- Chen, X. & Xu, Z. (2017), 'The ultrasonic p-wave velocity-stress relationship of rocks and its application', *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* **76**(2), 661–669.
- Choudhary, K. & Dickmann, T. (2017), 'Perceiving geological risk using tunnel seismic prediction during tunnelling in weak sedimentary rocks', *INDOROCK 2017: Seventh Indian Rock Conference* .
- Dammyr, Ø., Farsund, T. Ø., Martinelli, E., Været, L., Holter, M. & Krogstad, M. (2020), 'Entreprise E15 og E02 - Ingeniørgeologisk rapport for Kvitsøytunnelen og Boknafjordtunnelen midt. Konkurransesgrunnlag.', *Sandvika: Norconsult AS for Statens vegvesen Region vest* .
- Dammyr, Ø., Martinelli, E., Farsund, T. Ø., Skrede, S., Holter, M. & Tuttle, K. J. (2019b), 'Entreprise E04 - Ingeniørgeologisk rapport for Boknafjordtunnelen nord. Konkurransesgrunnlag.', *Sandvika: Norconsult AS for Statens vegvesen Region vest* .
- Dammyr, Ø., Martinelli, E., Farsund, T. Ø., Skrede, S., Holter, M. & Været, L. (2019a), 'Entreprise E03 - Ingeniørgeologisk rapport for Boknafjordtunnelen sør. Konkurransesgrunnlag.', *Sandvika: Norconsult AS for Statens vegvesen Region vest* .
- Deere, D., Hendron, A., Patton, F., Cording, E. et al. (1967), 'Design of surface and near-surface

---

construction in rock', *Failure and Breakage of Rock. Proceedings of 8th US symposium on rock mechanics (USRMS), New York, pp. 237–302* .

Dickman, T. (2012), 'Predicting rock conditions ahead of the face', *TunnelTECH (September 2012)* . Hentet fra:

<https://www.tunneltalk.com/TunnelTECH-Sept12-Seismic-prediction-of-rock-conditions-ahead-of-the-face.php>

Nedlastet 23.04.2020.

Dickmann, T. (2005), 'Seismic prediction while tunneling in hard rock. sonderband i/2005, dgg kolloquium', *Geophysik zur Vorerkundung von Tunneln (Geophysics for the prediction ahead of the tunnel)* **1**, 59–70.

Dickmann, T. (2014), '3D tunnel seismic prediction; a next generation tool to characterize rock mass conditions ahead of the tunnel face', *Journal of Rock Mechanics & Tunnelling Technology (JRMTT)* **20**(1), 35–47.

Dickmann, T. (2020), 'Using seismic exploration to predict geological risk along tunnels and underground spaces', *Civil Engineering* **173**, 11–16. <https://doi.org/10.1680/jcien.19.00030>.

Dickmann, T., Hecht Mendez, J., Kripal, C. & Ataollah, R. (2016), 'Advanced seismic investigations during construction of hydro tunnels', *Recent Advances in Rock Engineering (RARE 2016)* pp. 149–157. <https://doi.org/10.2991/rare-16.2016.24>.

Dickmann, T. & Krueger, D. (2014), 'How to turn geological uncertainty into manageable risk', *Proceedings of the World Tunnel Congress- Tunnels for a better Life. Foz do Iguaçu, Brazil* .

Dickmann, T., Krueger, D. & Hecht-Méndez, J. (2019), 'Contribution of continuous geophysical measurements to the success of tunnelling', *Proceedings of the WTC 2019 ITA-AITES World Tunnel Congress (WTC 2019); Tunnels and Underground Cities. Engineering and Innovation Meet Archaeology, Architecture and Art* pp. 765–774.

Dickmann, T., Pittard, F. et al. (2011), 'An engineering view of the seismic prediction during tunneling', *12th International Congress on Rock Mechanics, Beijing, China* .

Eidesen, J. M. (2013), *Metodikk for driving og sikring gjennom svakhetssoner ved Rogfast*, Masteroppgave, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet. Institutt for geologi og bergteknikk. Trondheim.

Eldevik, L. (2019), 'E11 sidetunnel Mekjarvik E39 Rogfast - Ingeniørgeologisk sluttrapport'. Statens vegvesen Region vest.

- 
- Elvebakk, H. & Saintot, A. (2011), 'Geofysisk logging av borehull på Alstein, Randaberg kommune, Rogaland', *NGU Rapport 2011.032* .
- Fanchi, J. R. (2010), 5 - geophysics, in J. R. Fanchi, ed., 'Integrated Reservoir Asset Management', Gulf Professional Publishing, Boston, pp. 71 – 88. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-382088-4.00005-0>.
- Fjær, E. (2019), 'Relations between static and dynamic moduli of sedimentary rocks', *Geophysical Prospecting* **67**(1), 128–139.
- Fossen, H. (2018), 'Seismisk bølge', *Store norske leksikon* . Hentet fra: [https://snl.no/seismisk\\_b%C3%B8lge](https://snl.no/seismisk_b%C3%B8lge)  
Nedlastet 20.01.2020.
- Fratta, D. & Santamarina, J. (2002), 'Shear wave propagation in jointed rock: State of stress', *Géotechnique* **52**(7), 495–505.
- Friestad, L. E. (2012), *Rogfasttunnelen: Analyse av drivetekniske forhold, stabilitet og sikringsbehov for avgreining til Kvitsøy*, Masteroppgave, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet. Institutt for geologi og bergteknikk. Trondheim.
- Gjelsnes, H. C. (2013), *Gjennomførbarhet for bruk av TBM ved Rogfast*, Masteroppgave, Norges teknisknaturvitenskapelige universitet. Institutt for geologi og bergteknikk. Trondheim.
- Hecht-Méndez, J., Dickmann, T. et al. (2016), 3d-tsp-advanced geological prediction during tunnelling projects in the andes, in 'ISRM 2nd International Specialized Conference on Soft Rocks', International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering.
- Hecht-Méndez, J. & Dickmann, T. (2016), *Ryfast Project, Hundvåg Tunnel - TSP Demo. Result Report Tunnel Seismic Prediction - TSP 303 Plus.*, Amberg Technologies for Statens Vegvesen Region Vest. (Intern rapport).
- Hecht-Méndez, J. & Dickmann, T. (2017), Tunnel seismic investigations at low overburden in subsea tunnels, Proceedings of the World Tunnel Congress 2017-Surface challenges-Underground solutions, Bergen, Norway.
- Heerden, W. (1987), 'General relations between static and dynamic moduli of rocks', *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* **24**(6), 381–385.
- Holmøy, K., Grøv, E., Lienhard, E. & Trinh, N. (2012), 'Geologisk rapport for E39 Rogfast', *Vedlegg til Temarapport Geologi. SINTEF Byggforsk Infrastruktur* .



- 
- Holmøy, K. H. (2008), *Significance of geological parameters for predicting waterleakage in hard rock tunnels*, Doctoral thesis, Norwegian University of Science and Technology. Faculty of Engineering Science and Technology. Department of Geology and Mineral Resources Engineering. Trondheim.
- Ismail, M., Azit, R., Ng, S., Zabidi, H., Bakhudin, N., Nordin, Z. et al. (2013), 'Evaluation of geological conditions ahead of a tunnel face using the tunnel seismic prediction method (tsp)–lesson learned from the pahang-selangor raw water transfer tunnel, malaysia', *ISRM International Symposium-EUROCK 2013* .
- Jensen, E. & Eldevik, L. (2019), 'Geologisk sluttrapport e13 rogfast - sidetunnel', *Statens vegvesens rapporter nr. 624* . Statens Vegvesen avdeling: Utbyggingsområde vest.
- Karlson, K. I. (2008), 'Rv. 64 atlantehavstunnelen – lekkasjesone 230 m under havoverflaten', *Fjellsprenningsdagen 2008, Norsk Forening for Fjellsprenningsteknikk* .
- Landrø, M. (2010), *Anvendt geofysikk - Et innføringskurs i de vanligste geofysiske metodene som blir brukt for å kartlegge jordas bergarter*, Kompendium TPG4100.
- Larsen, M. H. (2019), *Karakter, stabilitetsforhold og sikringsbehov for vanskelige svakhetssoner i undersøiske tunneler*, Trondheim, NTNU: TGB4500 Ingeniørgeologi og bergmekanikk, fordypningsprosjekt (Ikke publisert).
- Lausund, I. (2015), *Prognoser for stabilitet og sikring av svakhetssoner i Ryfylketunnelen*, Masteroppgave, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet. Institutt for geologi og bergteknikk. Trondheim.
- Li, S., Li, S., Zhang, Q., Xue, Y., Liu, B., Su, M., Wang, Z. & Wang, S. (2010), 'Predicting geological hazards during tunnel construction', *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* **2**(3), 232 – 242. <https://doi.org/10.3724/SP.J.1235.2010.00232>.
- Li, S., Liu, B., Xu, X., Nie, L., Liu, Z., Song, J., Sun, H., Chen, L. & Fan, K. (2017), 'An overview of ahead geological prospecting in tunneling', *Tunnelling and Underground Space Technology* **63**, 69 – 94. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2016.12.011>.
- Lin, C. J. & Li, S. C. (2014), 'Tunnel seismic prediction (tsp) and its application in tunnel engineering', *Applied Mechanics and Materials* **501**, 1779–1782.
- Lüth, S., Rechlin, A. J., Giese, R., Tzavaras, J., Gross, K., Buske, S., Jetschny, S., De Nil, D. & Bohlen, T. (2009), 'Seismic prediction ahead of a tunnel face-modeling, field surveys, geotechnical interpretation', *International Journal of the JCRM* **4**(2), 47–51.

- 
- Mao, D., Nilsen, B. & Dahl, F. (2011), 'Laboratory testing of swelling gouge from weakness zone - principle and recent update', *45th US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium* .
- Mashinsky, E. (2003), 'Differences between static and dynamic elastic moduli of rocks: Physical causes', *Russ. Geol. Geophys* **44**(9), 953–959.
- Mathiassen, S. F. (2019), *Analyse av stabilitet og bergspenningsforhold for Kvitsøykrysset, E39 Rogfast*, Masteroppgave, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet. Institutt for geologi og bergteknikk. Trondheim.
- Nanda, N. (2016), *Seismic Data Interpretation and Evaluation for Hydrocarbon Exploration and Production*, Springer International Publishing Switzerland 2016. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-26491-2> ISBN: 978-3-319-26491-2.
- NBG (2000), *Handbook No 2, Engineering Geology and Rock Engineering*, Norsk bergmekanikkgruppe (NBG), Trondheim.
- NGI (2015), *Bruk av Q-systemet. Bergmasseklassifisering og bergforsterkning*, Norges Geotekniske Institutt (NGI), Oslo.
- NGU (2020), 'Nasjonal berggrunnsdatabase, kartblad N250.'. Hentet fra: <http://geo.ngu.no/kart/berggrunn/>  
Nedlastet 05.02.2020.
- Nilsen, B. (2014), 'Characteristics of water ingress in norwegian subsea tunnels', *Rock mechanics and rock engineering* **47**(3), 933–945.
- Nilsen, B. (2016), 'Ingeniørgeologi-Berg grunnkurskompendium', *NTNU: Norges teknisk-naturvitenskapelig universitet. Institutt for geovitenskap og petroleum* .
- Nilsen, B. & Palmstrom, A. (2001), 'Stability and water leakage of hard rock subsea tunnels', *Conference on Modern Tunneling Science and Technology. Kyoto, Japan* .
- Nilsen, B. & Palmstrøm, A. (2013), 'Methodology for predicting and handling challenging rock mass conditions in hard rock subsea tunnels', *Strait Crossings 2013 Proceedings (231)* pp. 288–298.
- Nordbø, K. (2019), *Nytteverdi av seismikk på stuff for prediksjon av ingeniørgeologiske utfordringer*, Trondheim, NTNU: TGB4500 Ingeniørgeologi og bergmekanikk, fordypningsprosjekt (Ikke publisert).
- Nur, A. & Simmons, G. (1969), 'Stress-induced velocity anisotropy in rock: An experimental study', *Journal of Geophysical Research* **74**(27), 6667–6674.

- 
- Palmstrøm, A., Nilsen, B., Pedersen, K. B. & Grundt, L. (2003), *Riktig omfang av undersøkelser for berganlegg*, Statens vegvesen, Publikasjon nr. 101.
- Palmstrøm, A., Stille, H. & Nilsen, B. (2000), 'The frøya tunnel—a sub-sea road tunnel in complex ground conditions', *Proceedings of Swedish rock mechanics conference* pp. 19–29.
- Palmstrøm, A. (1995), *Using refraction seismic velocities to characterize jointing*, RMI-a rock mass characterization system for rock engineering purposes, Appendix 5.
- Pedersen, K. B., Komoen, R. & Kveen, A. (2010), *Arbeider foran stoff og stabilitetssikring i vegtunneler*, Vegdirektoratet: Teknologirapport nr. 2538. Hentet fra: [https://www.vegvesen.no/\\_attachment/155750/binary/269125](https://www.vegvesen.no/_attachment/155750/binary/269125) Nedlastet 30.04.2020.
- Rønning, J., Dalsegg, E., Dehls, J., Haase, C., Nordgulen, Ø., Olesen, O., Saintot, A., Solli, A., Bokn, F., Haugesund, K. et al. (2006), 'Geological and geophysical investigations for the rogfast project', *Norges geologiske undersøkelse Report 2006.076* .
- Rummel, F. & van Heerden, W. (1978), 'Suggested methods for determining sound velocity', *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* **15**(2), 53 – 58. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(78\)91678-9](https://doi.org/10.1016/0148-9062(78)91678-9).
- Saintot, A. & Solli, A. (2011), 'Geological investigations by drill core logging for the rogfast tunnel project', *NGU Report 2011.034* .
- Sattel, G., Sander, B., Amberg, F. & Kashiwa, T. (1996), 'Predicting ahead of the face', *Tunnels & Tunnelling International* .
- Schön, J. H. (2015), Chapter 6 - elastic properties, in J. H. Schön, ed., 'Physical Properties of Rocks', Vol. 65 of *Developments in Petroleum Science*, Elsevier, pp. 167 – 268. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100404-3.00006-8>.
- Sjøgren, B., Øfsthus, A. & Sandberg, J. (1979), 'Seismic classification of rock mass qualities', *Geophysical prospecting* **27**(2), 409–442.
- Solli, A. & Nordgulen, Ø. (2014), 'Geological investigations for the Rogfast project in the area between Kvitsøy and Bokn', *NGU Report 2014.054* .
- Stacey, T. R. (1976), 'Seismic assessment of rock masses.', *Symposium on Exploration for Rock Engineering* **2**, 113–117.
- Statens vegvesen (2014), *Laboratorieundersøkelser, Håndbok R210*, Vegdirektoratet. Hentet fra: [https://www.vegvesen.no/\\_attachment/185231/binary/1090658](https://www.vegvesen.no/_attachment/185231/binary/1090658) Nedlastet 12.03.2020.
-

---

Statens vegvesen (2018), 'Illustrasjoner fra Rogfast'. Hentet fra:

<https://www.vegvesen.no/Europaveg/e39rogfast/Illustrasjoner>  
Nedlastet 10.05.2020.

Statens vegvesen (2020a), 'E39 Rogfast'. Hentet fra:

<https://www.vegvesen.no/Europaveg/e39rogfast>  
Nedlastet 26.05.2020.

Statens vegvesen (2020b), *Tunnelveiledning, Håndbok V520*, Vegdirektoratet. Hentet fra:

[https://www.vegvesen.no/\\_attachment/1597247/binary/1361411?fast\\_title=H%C3%A5ndbok+V520+Tunnelveiledning.pdf](https://www.vegvesen.no/_attachment/1597247/binary/1361411?fast_title=H%C3%A5ndbok+V520+Tunnelveiledning.pdf)  
Nedlastet 05.05.2020.

Statens vegvesen (2020c), *Vegtunneler, Håndbok N500*, Vegdirektoratet. Hentet fra:

[https://www.vegvesen.no/\\_attachment/61913](https://www.vegvesen.no/_attachment/61913)  
Nedlastet 20.05.2020.

Stresstech (2020), 'Measurement methods of residual stresses'. Hentet fra:

<https://www.stresstech.com/en/knowledge/articles/stresstech-bulletin-12-measurement-methods-residual-stresses/>  
Nedlastet 04.05.2020.

Tuncay, E. & Hasancebi, N. (2009), 'The effect of length to diameter ratio of test specimens on the uniaxial compressive strength of rock', *Bulletin of engineering geology and the environment* **68**(4), 491.

Vik, A. K. & Martinelli, E. (2016), 'Entreprise E11 - Ingeniørgeologisk rapport for sidetunnel fra Mekjarvik. Konkurransgrunnlag.', *Sandvika: Norconsult AS for Statens vegvesen Region vest*.

Vik, A. K., Martinelli, E., Dammyr, Ø., Farsund, T. Ø. & Været, L. (2017), 'Entreprise E13 - Ingeniørgeologisk rapport for sidetunnel Arsvågen. Konkurransgrunnlag.', *Sandvika: Norconsult AS for Statens vegvesen Region vest*.

Wang, Y., Fu, N., Lu, X. & Fu, Z. (2019), 'Application of a new geophone and geometry in tunnel seismic detection', *Sensors* **19**(5), 1246.

Wang, Z. (2000), 'Dynamic versus static elastic properties of reservoir rocks', *Seismic and acoustic velocities in reservoir rocks* **3**, 531–539.

Zhang, Z.-X. (2016), Chapter 6 - environmental effects on rock fracture, in Z.-X. Zhang, ed.,

---

'Rock Fracture and Blasting', Butterworth-Heinemann, pp. 135 – 153. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802688-5.00006-3>.



## **Vedlegg A**

# **Oversikt over kartleggingslokaliteter**

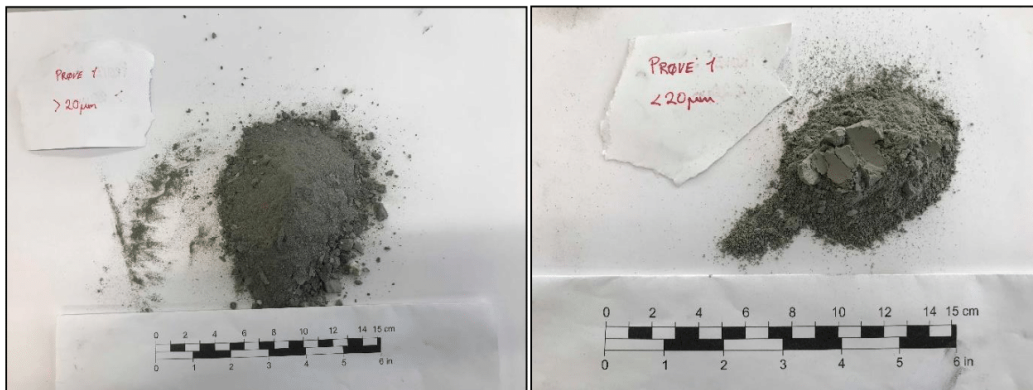




## **Vedlegg B**

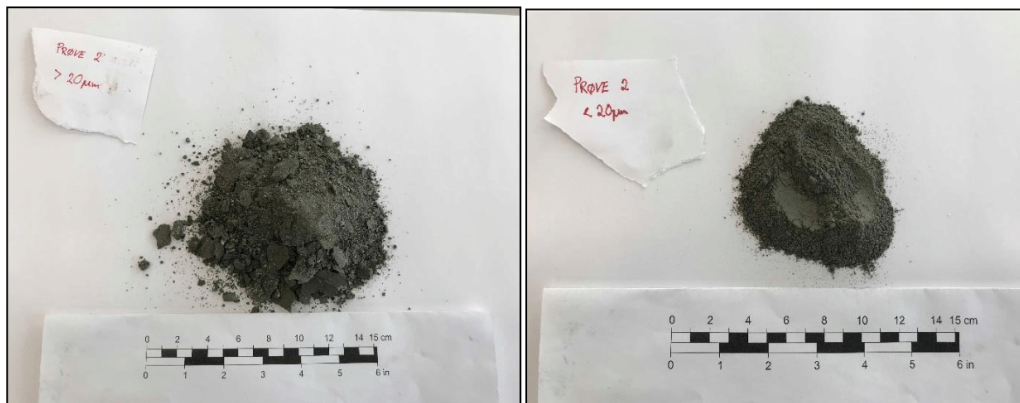
# **Bilder og resultater fra laboratorieundersøkelser**

## B.1 Bilder etter våtsikting av sprekkematerialet



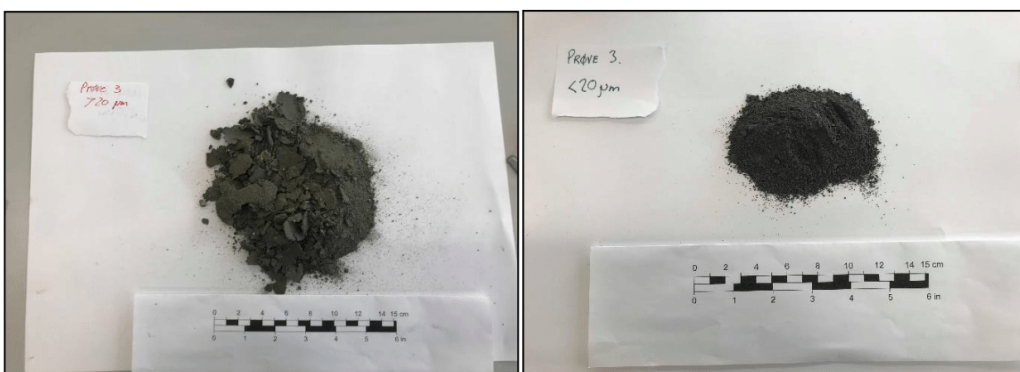
Prøve 1S prøvemateriale >20 µm

Prøve 1S prøvemateriale <20 µm



Prøve 2S prøvemateriale >20 µm

Prøve 2S prøvemateriale <20 µm

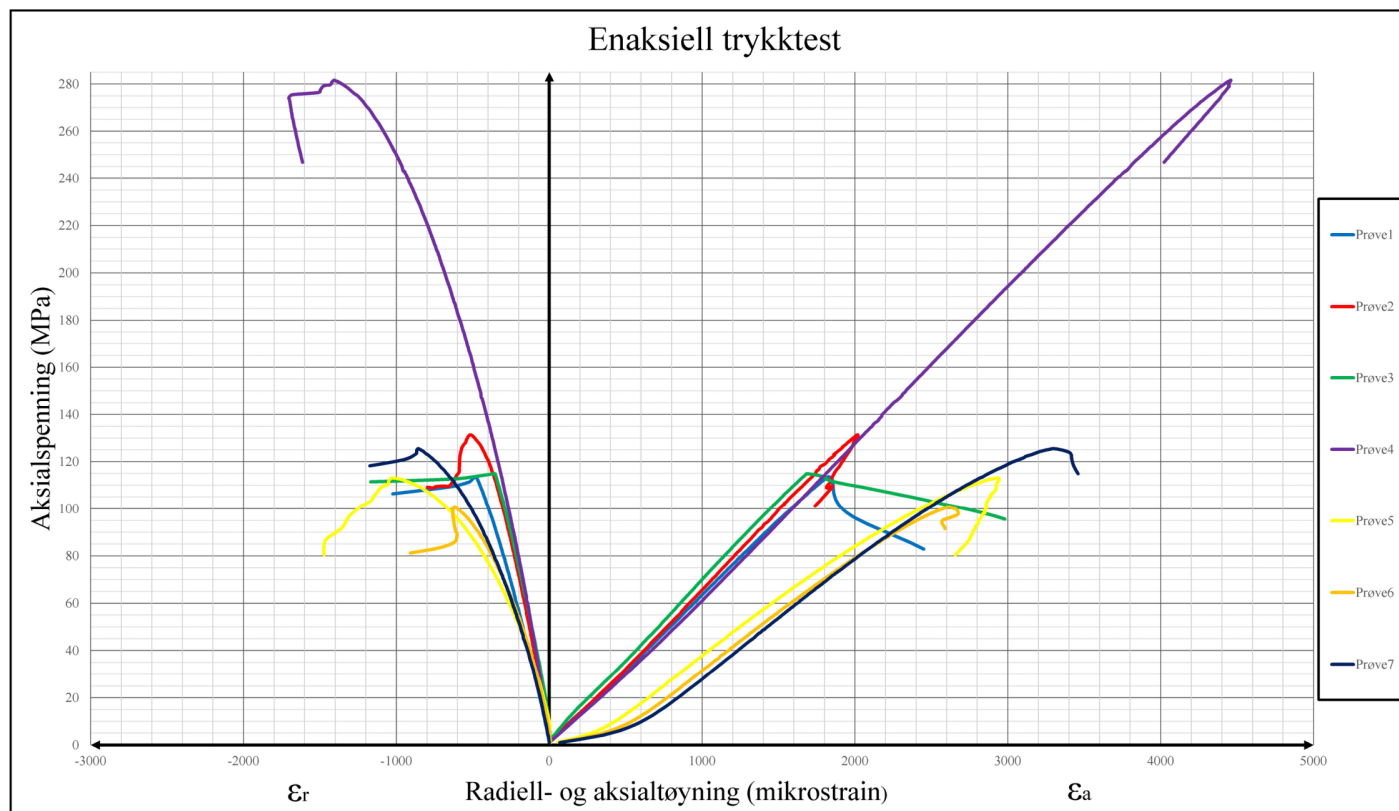


Prøve 3S prøvemateriale >20 µm

Prøve 3S prøvemateriale <20 µm

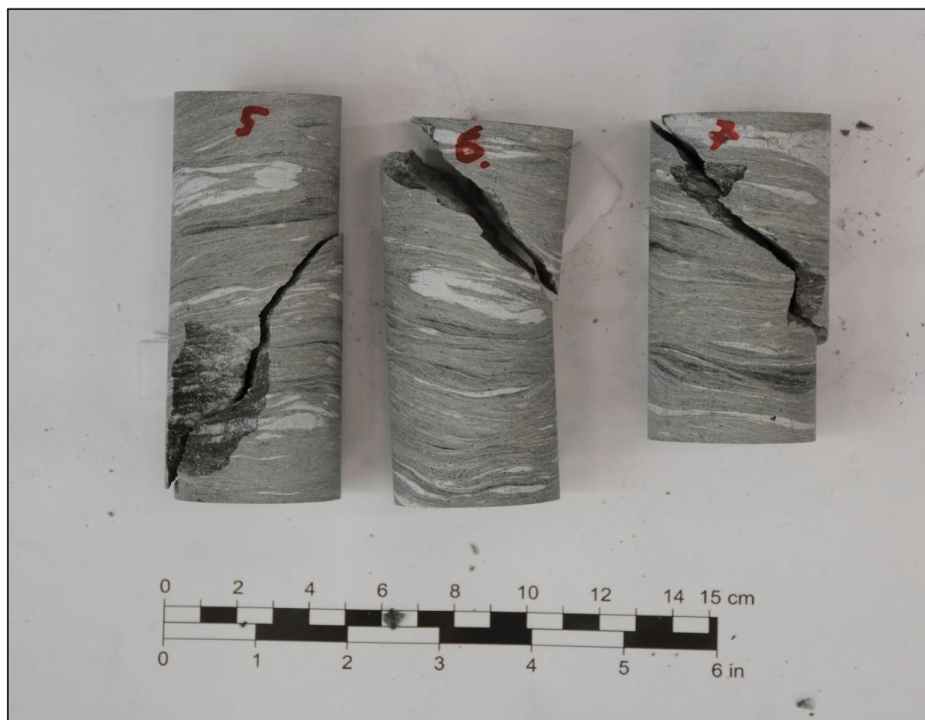
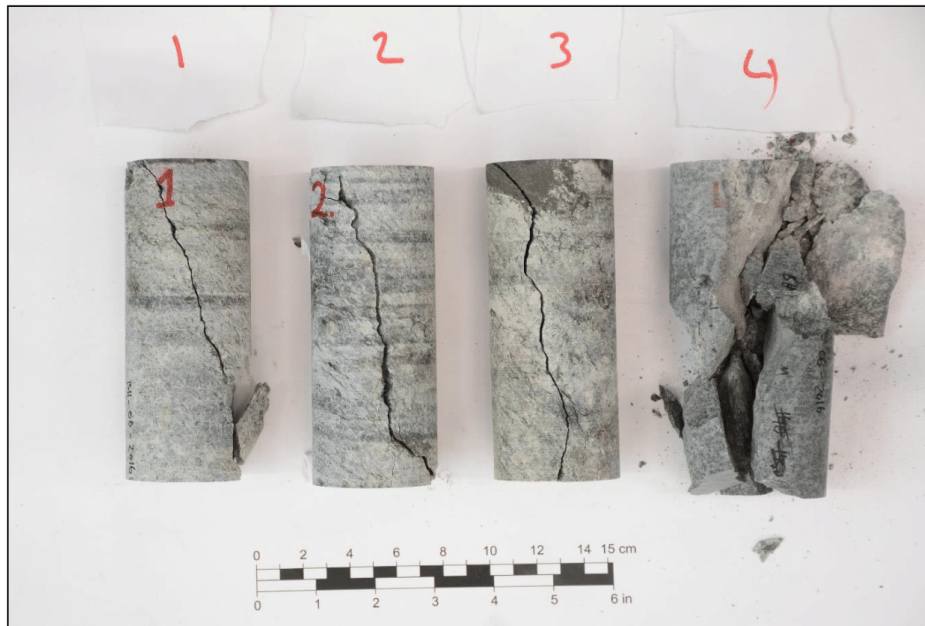
Figur B.1: Oversikt over mengde prøvemateriale større og mindre enn 20 µm for prøve 1S, 2S og 3S.

## B.2 Aksiell spennings-tøyningskurve for kjerneprøvene



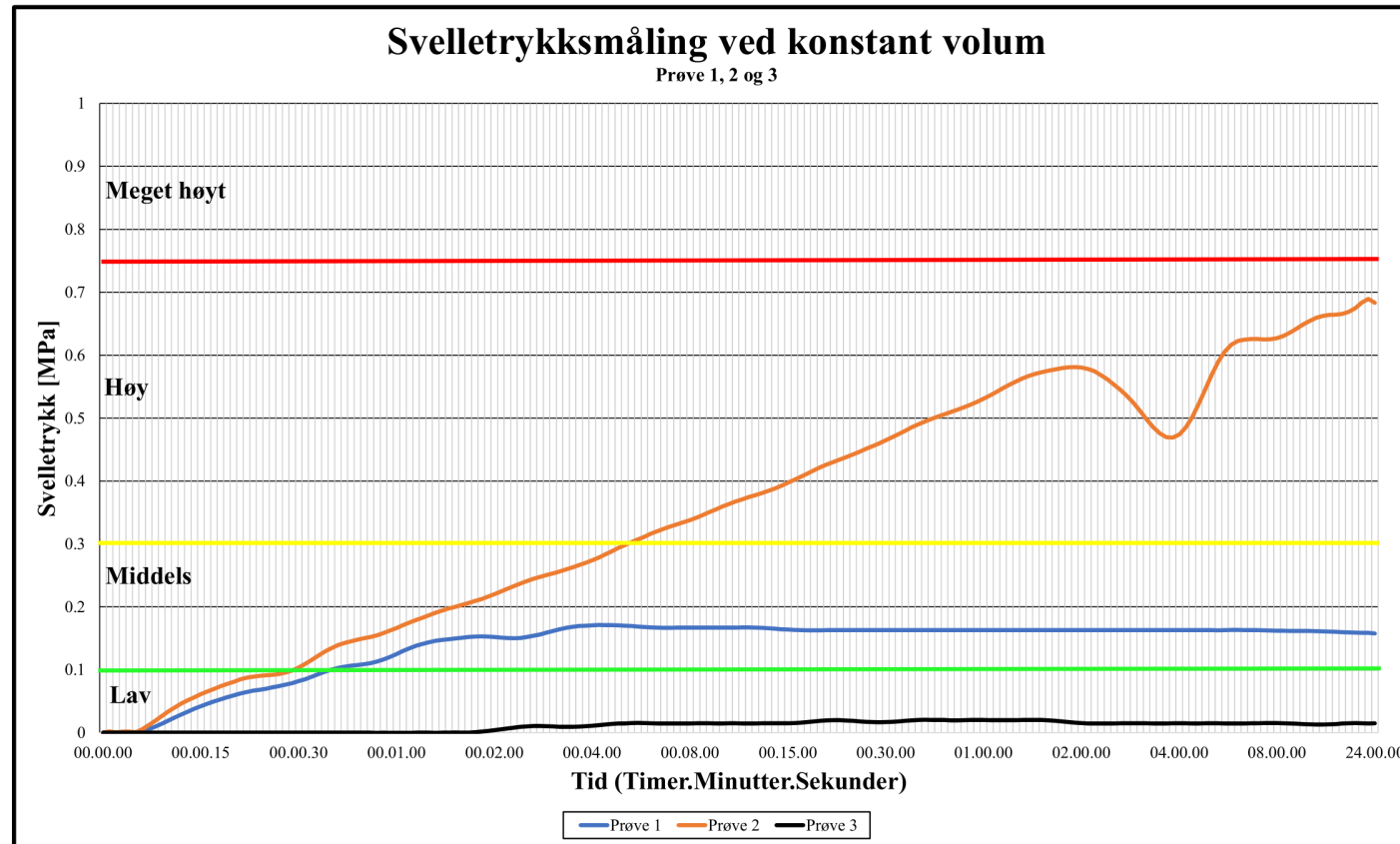
Figur B.2: Aksiell spennings-tøyningskurve for prøve 1 til 7 fra enaksiell trykktest.

### B.3 Bilder av kjerneprøver etter brudd



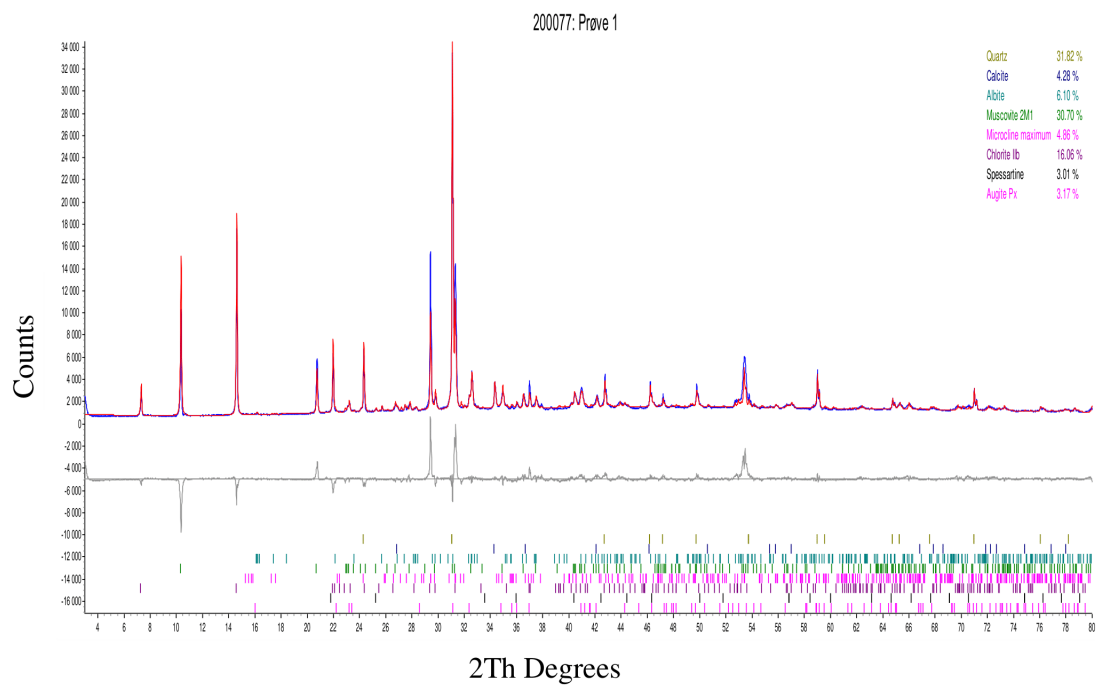
Figur B.3: Foto av brudd i kjerneprøve 1-7. Det øverste bildet viser prøve 1-4 av granittisk gneis. Det underste bildet viser prøve 5-7 av fyllitt.

## B.4 Svellertrykksmålinger fra ødometerettest

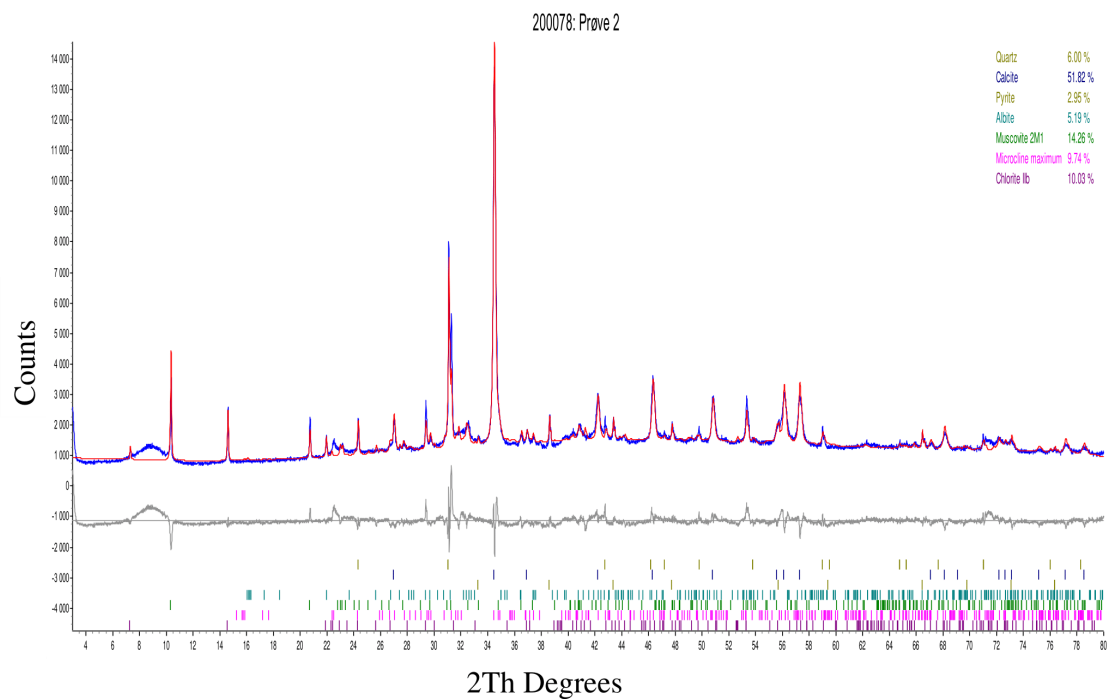


Figur B.4: Oversikt over mobilisert svellertrykk som funksjon av tid for prøve 1S, 2S og 3S.

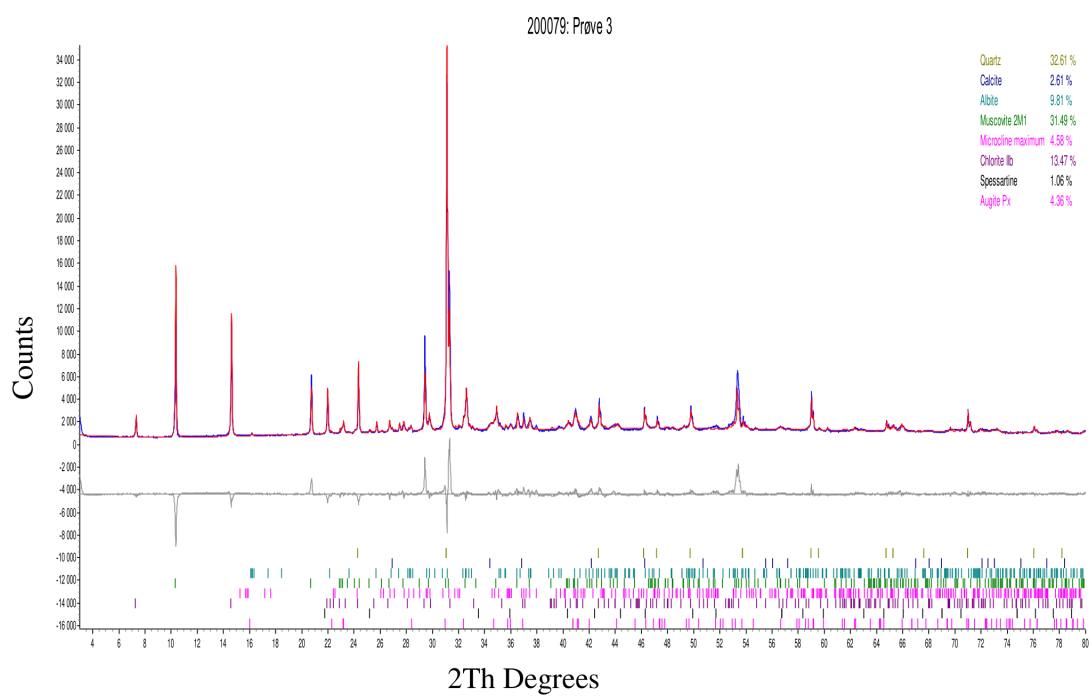
## B.5 Diffraktogram og tolkninger fra XRD-test.



Figur B.5: Diffraktogram for prøve 1S.



Figur B.6: Diffraktogram for prøve 2S.



**Figur B.7: Diffraktogram for prøve 3S.**





## **Vedlegg C**

# **Utdata seismikk på stuff og Q-kartlegging i tunnel**

### **C.1 Seismikk- og Q-parametre i tunnel**

Følgende tabell er en sammenstilling av seismikk- og Q-parametre fra tverrslagstunnelen på Arsvågen. Tabellen er basert på informasjon hentet fra Al-Samarray & Jensen (2020) og Jensen & Eldevik (2019).

Gj.snitt Vp	Gj.snitt Vs	Gj.snitt Vpvs	Gj.snitt dyn. Poissons tall	Gj.snitt dyn. E-modul	RQD	Jn	Jr	Ja	Jw	SRF	Q
5292.33	2955.67	1.79	0.27	61.00	65.00	7.00	1.50	2.00	1.00	1.00	6.96
5112.25	2879.75	1.78	0.26	56.25	75.00	6.00	1.50	2.00	1.00	1.00	9.38
5114.25	2916.50	1.76	0.25	57.50	80.00	6.00	1.50	2.00	1.00	1.00	10.00
5279.00	3118.50	1.70	0.22	65.50	80.00	6.00	1.50	2.00	1.00	1.00	10.00
5128.00	2986.67	1.72	0.23	60.00	80.00	6.00	1.50	2.00	1.00	1.00	10.00
5460.83	3039.67	1.80	0.28	65.83	80.00	6.00	1.50	2.00	1.00	1.00	10.00
5889.67	3089.00	1.91	0.31	71.33	80.00	6.00	1.50	2.00	1.00	1.00	10.00
5711.75	3145.00	1.82	0.28	72.00	90.00	6.00	1.50	2.00	1.00	1.00	11.25
5500.33	3112.67	1.77	0.26	69.00	85.00	9.00	1.50	1.00	1.00	1.00	14.17
5425.00	3189.67	1.70	0.23	71.00	85.00	9.00	1.50	1.00	1.00	1.00	14.17
5314.00	3277.00	1.62	0.19	73.00	75.00	6.00	1.50	2.00	1.00	1.00	9.38
5550.00	3252.50	1.71	0.23	74.50	75.00	6.00	1.50	2.00	1.00	1.00	9.38
5786.00	3228.00	1.79	0.27	76.00	80.00	6.00	1.50	2.00	1.00	1.00	10.00
5613.67	3247.33	1.73	0.24	75.00	80.00	6.00	1.50	2.00	1.00	1.00	10.00
5384.50	3297.00	1.64	0.20	74.50	80.00	6.00	1.50	2.00	1.00	1.00	10.00
5548.50	3319.50	1.67	0.22	78.00	70.00	9.00	1.50	2.00	1.00	1.00	5.83
5707.00	3370.00	1.69	0.23	82.00	90.00	6.00	1.50	2.00	1.00	1.00	11.25
5707.00	3370.00	1.69	0.23	82.00	90.00	6.00	1.50	2.00	1.00	1.00	11.25
5602.79	3169.82	1.81	0.28	73.00	80.00	6.00	1.50	2.00	1.00	1.00	10.00
5715.36	3168.14	1.84	0.29	72.00	60.00	9.00	1.50	2.00	1.00	1.00	5.00
5741.03	3151.50	1.77	0.26	70.50	60.00	9.00	1.50	2.00	1.00	1.00	5.00
5536.94	3207.37	1.68	0.23	72.00	55.00	9.00	1.50	2.00	1.00	1.00	4.58
5271.62	3241.81	1.63	0.20	68.00	55.00	9.00	1.50	2.00	1.00	1.00	4.58
5310.86	3119.41	1.74	0.25	65.67	75.00	6.00	1.50	2.00	1.00	1.00	9.38
5339.48	3094.54	1.63	0.20	67.00	75.00	6.00	1.50	2.00	1.00	1.00	9.38
5518.72	3255.44	1.70	0.23	80.67	60.00	9.00	2.00	2.00	1.00	1.00	6.67
5852.98	3308.93	1.75	0.25	78.40	75.00	6.00	1.50	2.00	1.00	1.00	9.38
5587.92	3221.60	1.74	0.25	74.00	75.00	6.00	1.50	2.00	1.00	1.00	9.38
5920.84	3347.95	1.77	0.26	83.00	55.00	9.00	1.50	2.00	1.00	1.00	4.58
5394.14	3169.84	1.70	0.24	70.00	70.00	9.00	1.50	2.00	1.00	1.00	5.83
5783.19	3282.73	1.76	0.26	78.75	75.00	9.00	1.50	2.00	1.00	1.00	6.25
5688.41	3346.16	1.70	0.24	80.50	75.00	9.00	1.50	2.00	1.00	1.00	6.25
5949.40	3056.40	1.96	0.31	69.20	80.00	9.00	1.50	2.00	1.00	1.00	6.67
5773.50	3366.75	1.72	0.24	81.50	65.00	9.00	1.50	2.00	1.00	1.00	5.42
5867.38	3410.63	1.72	0.25	84.50	65.00	9.00	1.50	3.00	1.00	1.00	3.61
5899.60	3299.10	1.79	0.27	80.10	65.00	9.00	1.50	3.00	1.00	1.00	3.61
5917.90	3407.90	1.74	0.25	84.70	65.00	9.00	1.50	3.00	1.00	1.00	3.61
5698.00	3457.00	1.65	0.21	84.00	70.00	6.00	1.50	2.00	1.00	1.00	8.75
5815.67	3405.58	1.71	0.24	83.58	70.00	6.00	1.50	2.00	1.00	1.00	8.75
5868.57	3422.86	1.72	0.24	85.00	70.00	8.00	1.50	2.00	1.00	1.00	6.56
5785.00	3344.13	1.73	0.25	80.50	70.00	8.00	1.50	2.00	1.00	1.00	6.56
5952.50	3351.50	1.78	0.27	83.00	80.00	6.00	1.50	2.00	1.00	1.00	10.00
6051.13	3384.88	1.79	0.27	85.38	80.00	6.00	1.50	2.00	1.00	1.00	10.00
5894.80	3421.40	1.72	0.24	84.60	80.00	6.00	1.50	2.00	1.00	1.00	10.00
5561.17	3292.17	1.69	0.23	75.83	80.00	6.00	1.50	2.00	1.00	1.00	10.00
5529.00	3325.50	1.66	0.21	76.50	90.00	6.00	1.50	2.00	1.00	1.00	11.25
5814.50	3399.50	1.71	0.24	83.50	85.00	6.00	1.50	2.00	1.00	1.00	10.63
5810.00	3390.00	1.71	0.25	83.00	80.00	9.00	1.50	2.00	1.00	1.00	6.67
5823.50	3413.67	1.71	0.24	84.00	80.00	8.00	1.50	2.00	1.00	1.00	7.50
5849.00	3375.00	1.73	0.25	83.00	75.00	8.00	1.50	2.00	1.00	1.00	7.03
5626.33	3449.00	1.63	0.20	83.00	75.00	9.00	1.50	2.00	1.00	1.00	6.25
5962.20	3376.21	1.77	0.26	85.00	75.00	7.00	1.50	2.00	1.00	1.00	8.04
5647.77	3256.74	1.74	0.25	77.08	70.00	8.00	1.50	2.00	1.00	1.00	6.56
5764.38	3276.85	1.76	0.26	78.92	75.00	8.00	1.50	2.00	1.00	1.00	7.03
5826.89	3500.78	1.67	0.22	88.67	75.00	6.00	1.50	2.00	1.00	1.00	9.38
6036.50	3537.67	1.71	0.24	93.00	75.00	6.00	1.50	2.00	1.00	1.00	9.38
5900.94	3475.59	1.70	0.23	88.65	75.00	6.00	1.50	2.00	1.00	1.00	9.38
5942.60	3542.74	1.68	0.22	91.80	75.00	6.00	1.50	2.00	1.00	1.00	9.38
5859.63	3469.68	1.69	0.23	87.50	90.00	8.00	1.50	2.00	1.00	1.00	8.44
5634.80	3362.34	1.68	0.22	80.50	85.00	8.00	1.50	2.00	1.00	1.00	7.97
6112.75	3454.35	1.77	0.26	90.38	70.00	9.00	1.50	2.50	1.00	1.00	4.67
5330.67	3291.97	1.62	0.19	73.33	70.00	9.00	1.50	2.50	1.00	1.00	4.67
5268.00	3313.21	1.59	0.17	73.00	70.00	9.00	1.50	2.50	1.00	1.00	4.67
6190.40	3607.69	1.72	0.24	97.80	75.00	9.00	1.50	2.00	1.00	1.00	6.25
6083.43	3580.98	1.70	0.23	95.71	75.00	9.00	1.50	2.00	1.00	1.00	6.25
6217.14	3607.35	1.72	0.24	98.43	80.00	9.00	1.50	2.00	1.00	1.00	6.67
6184.13	3535.22	1.75	0.26	94.38	85.00	9.00	1.50	2.00	1.00	1.00	7.08
6255.50	3494.67	1.79	0.27	94.00	85.00	9.00	1.50	2.00	1.00	1.00	7.08
5809.20	3387.20	1.72	0.24	82.60	90.00	6.00	1.50	2.00	1.00	1.00	11.25
5984.00	3406.70	1.76	0.26	85.60	90.00	6.00	1.50	2.00	1.00	1.00	11.25
5658.22	3380.78	1.68	0.22	80.56	90.00	6.00	1.50	2.00	1.00	1.00	11.25
5942.86	3477.07	1.71	0.24	88.43	95.00	6.00	1.50	2.00	1.00	1.00	11.88
6039.00	3478.20	1.74	0.25	89.40	95.00	6.00	1.50	2.00	1.00	1.00	11.88
5989.14	3509.29	1.71	0.24	90.14	95.00	6.00	1.50	2.00	1.00	1.00	11.88
5860.25	3495.58	1.68	0.22	87.75	90.00	6.00	1.50	2.00	1.00	1.00	11.25
5779.80	3541.80	1.63	0.20	88.60	95.00	6.00	1.50	2.00	1.00	1.00	11.88
5677.25	3403.25	1.67	0.22	81.75	90.00	6.00	1.50	2.00	1.00	1.00	11.25
5927.75	3349.75	1.77	0.26	82.00	80.00	7.00	1.50	2.00	1.00	1.00	8.57
5941.00	3388.67	1.76	0.26	84.00	90.00	6.00	1.50	2.00	1.00	1.00	11.25
5902.80	3439.20	1.72	0.24	86.20	80.00	6.00	1.50	2.00	1.00	1.00	10.00
5681.00	3407.00	1.67	0.22	82.00	90.00	6.00	1.50	2.00	1.00	1.00	11.25
5681.00	3407.00	1.67	0.22	82.00	90.00	4.00	1.50	2.00	1.00	1.00	16.88
5784.50	3428.25	1.69	0.23	84.25	85.00	9.00	1.50	2.00	1.00	1.00	7.08
6147.33	3468.33	1.77	0.26	90.00	80.00	6.00	1.50	2.00	1.00	1.00	10.00
5729.33	3550.00	1.62	0.19	88.00	40.00	12.00	1.50	4.00	1.00	1.00	1.25
5776.00	3541.33	1.63	0.20	88.67	40.00	12.00	1.50	4.00	1.00	1.00	1.25
5841.00	3120.67	1.87	0.30	71.33	80.00	9.00	1.50	2.00	1.00	1.00	6.67
5564.75	3215.25	1.73	0.25	72.75	75.00	8.00	1.50	2.00	1.00	1.00	7.03
5881.00	3176.08	1.86	0.29	73.83	85.00	9.00	1.50	2.00	1.00	1.00	7.08
5508.00	3153.33	1.75	0.25	69.67	75.00	7.00	1.50	2.00	1.00	1.00	8.04
5338.00	3093.00	1.73	0.25	65.86	80.00	6.00	1.50	2.00	1.00	1.00	10.00
5524.50	3025.75	1.83	0.29	64.75	90.00	6.00	1.50	2.00	1.00	1.00	11.25
5879.33	3203.67	1.84	0.29	75.33	90.00	6.00	1.50	2.00	1.00	1.00	11.25
5859.25	3289.50	1.78	0.27	78.75	80.00	6.00	1.50	1.50	1.00	1.00	13.33
5717.29	3307.12	1.73	0.24	78.06	80.00	6.00	1.50	1.50	1.00	1.00	13.33
5584.29	3267.29	1.71	0.24	74.86	80.00	6.00	1.50	1.50	1.00	1.00	13.33
5486.71	3168.14	1.73	0.25	69.86	85.00	4.00	1.50	2.00	1.00	1.00	15.94
5307.33	3271.00	1.62	0.19	71.67	85.00	4.00	1.50	2.00	1.00	1.00	15.94
5292.00	3297.00	1.60	0.18	72.00	85.00	6.00	1.50	2.00	1.00	1.00	10.63
5353.00	3298.00	1.62	0.19	73.00	80.00	6.00	1.50	2.00	1.00	1.00	10.00
5440.50	3332.50	1.63	0.20	75.50	85.00	6.00					

5966.67	3223.67	1.86	0.29	76.67	85.00	6.00	1.50	2.00	1.00	1.00	10.63
5527.25	3153.50	1.75	0.26	70.00	85.00	6.00	1.50	3.00	1.00	1.00	7.08
5358.67	3150.00	1.70	0.24	68.00	75.00	6.00	1.50	2.00	1.00	1.00	9.38
5518.00	3249.00	1.70	0.23	74.00	65.00	9.00	1.50	4.00	1.00	1.00	2.71
5191.33	3323.00	1.56	0.15	71.33	70.00	6.00	1.50	3.00	1.00	1.00	5.83
4932.00	3180.17	1.55	0.14	63.17	80.00	9.00	1.50	2.00	1.00	1.00	6.67
5338.00	3304.00	1.62	0.19	74.00	83.00	9.00	1.50	2.00	1.00	1.00	6.92
5755.17	3538.50	1.63	0.19	88.00	83.00	9.00	1.50	2.00	1.00	1.00	6.92
6062.14	3520.71	1.72	0.24	91.71	80.00	6.00	1.50	2.00	1.00	1.00	10.00
6033.30	3463.00	1.75	0.25	88.80	85.00	6.00	1.50	2.00	1.00	1.00	10.63
5643.71	3392.71	1.66	0.21	80.71	80.00	7.00	1.50	2.00	1.00	1.00	8.57
6069.75	3463.88	1.75	0.25	88.56	85.00	6.00	1.50	2.00	1.00	1.00	10.63
5988.00	3490.00	1.72	0.23	88.33	85.00	6.00	1.50	2.00	1.00	1.00	10.63
6231.50	3539.25	1.76	0.26	94.75	85.00	4.00	1.50	2.00	1.00	1.00	15.94
5972.33	3511.67	1.70	0.24	90.00	80.00	6.00	1.50	2.00	1.00	1.00	10.00
5684.00	3512.25	1.62	0.19	85.75	85.00	6.00	1.50	2.00	1.00	1.00	10.63
5604.83	3470.67	1.61	0.19	83.33	90.00	6.00	1.50	2.00	1.00	1.00	11.25
5448.50	3398.00	1.60	0.18	78.50	85.00	6.00	1.50	2.00	1.00	1.00	10.63
5529.33	3373.33	1.64	0.20	78.67	75.00	9.00	1.50	2.00	1.00	1.00	6.25
5833.75	3536.75	1.65	0.21	89.50	85.00	9.00	1.50	2.00	1.00	1.00	7.08
6330.50	3430.25	1.85	0.29	90.25	90.00	6.00	1.50	2.00	1.00	1.00	11.25
6116.50	3448.50	1.77	0.27	89.00	70.00	6.00	1.50	2.00	1.00	1.00	8.75
6145.00	3424.00	1.79	0.27	88.00	80.00	6.00	1.50	2.00	1.00	1.00	10.00
6115.20	3363.00	1.82	0.28	85.00	80.00	6.00	1.50	2.00	1.00	1.00	10.00
6227.22	3396.22	1.83	0.29	87.89	80.00	6.00	1.50	2.00	1.00	1.00	10.00
6318.86	3608.57	1.75	0.25	98.86	70.00	9.00	1.50	4.00	1.00	1.00	2.92
5747.00	3663.00	1.57	0.16	93.00	70.00	9.00	1.50	4.00	1.00	1.00	2.92
6325.00	3532.71	1.79	0.27	95.00	80.00	9.00	1.50	2.00	1.00	1.00	6.67
6355.50	3516.50	1.81	0.28	94.50	80.00	9.00	1.50	2.00	1.00	1.00	6.67
6213.88	3537.63	1.76	0.26	94.00	70.00	6.00	1.50	2.00	1.00	1.00	8.75
5875.38	3517.88	1.67	0.21	88.50	85.00	9.00	1.50	2.00	1.00	1.00	7.08
6277.46	3547.00	1.77	0.27	95.54	85.00	9.00	1.50	2.00	1.00	1.00	7.08
6139.10	3527.80	1.74	0.25	92.70	70.00	6.00	1.50	2.00	1.00	1.00	8.75
5775.00	3693.00	1.57	0.16	94.00	80.00	9.00	1.50	2.00	1.00	1.00	6.67
5925.86	3514.00	1.69	0.22	88.57	70.00	6.00	1.50	2.00	1.00	1.00	8.75
5820.50	3574.50	1.63	0.20	90.50	70.00	9.00	1.50	2.00	1.00	1.00	5.83
6150.50	3621.75	1.70	0.24	97.50	65.00	6.00	1.50	3.00	1.00	1.00	5.42
6117.75	3532.25	1.73	0.25	92.75	65.00	9.00	2.00	3.00	1.00	1.00	4.81
5896.78	3567.22	1.66	0.21	91.33	60.00	6.00	1.50	2.00	1.00	1.00	7.50
6688.18	3647.64	1.83	0.29	105.64	60.00	6.00	1.50	3.00	1.00	1.00	5.00
6193.50	3455.25	1.79	0.28	90.25	60.00	6.00	1.50	3.00	1.00	1.00	5.00
6507.00	3609.88	1.80	0.28	101.75	70.00	9.00	1.50	2.00	1.00	1.00	5.83
6017.60	3398.80	1.77	0.27	86.20	70.00	9.00	1.50	2.00	1.00	1.00	5.83
6226.20	3398.60	1.83	0.29	87.80	70.00	9.00	1.50	2.00	1.00	1.00	5.83
6131.00	3329.11	1.84	0.29	83.33	65.00	9.00	2.00	3.00	1.00	1.00	4.81
5868.30	3401.90	1.73	0.24	83.90	70.00	9.00	1.50	2.00	1.00	1.00	5.83
5864.50	3350.00	1.75	0.26	82.00	70.00	9.00	1.50	2.00	1.00	1.00	5.83
6172.00	3420.40	1.80	0.28	88.40	70.00	9.00	1.50	2.50	1.00	1.00	4.67
6287.33	3338.33	1.88	0.30	85.33	75.00	9.00	1.50	3.00	1.00	1.00	4.17
6274.50	3296.50	1.91	0.31	83.00	75.00	9.00	1.50	3.00	1.00	1.00	4.17
5655.20	3335.00	1.70	0.23	78.80	45.00	12.00	1.50	6.00	1.00	1.00	0.94
5623.50	3372.50	1.67	0.22	79.75	70.00	12.00	1.50	3.00	1.00	1.00	2.92
5632.00	3393.00	1.66	0.22	81.00	70.00	9.00	1.50	2.50	1.00	1.00	4.67
5632.00	3393.00	1.66	0.22	81.00	60.00	6.00	1.50	2.00	1.00	1.00	7.50
5849.33	3360.00	1.74	0.25	82.00	65.00	6.00	1.50	2.00	1.00	1.00	8.13
5950.00	3345.00	1.78	0.27	83.00	75.00	9.00	1.50	2.00	1.00	1.00	6.25





