

Kristine Birkeli

# Nytteverdi av ingeniørgeologiske undersøkelser ved driving av tunnelene på Nordøyvegen

Masteroppgave i Tekniske geofag

Veileder: Bjørn Nilsen

Juni 2020



Kristine Birkeli

# **Nytteverdi av ingeniørgeologiske undersøkelser ved driving av tunnelene på Nordøyvegen**

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:** Kristine Birkeli

**Oppgavens tittel:** NYTTEVERDI AV INGENIØRGEOLOGISKE UNDERSØKELSER VED DRIVING AV TUNNELENE PÅ NORDØYVEGEN

**English title:** Utility value of engineering geological investigations during excavation of tunnels for the Nordøy road connection

**Utfyllende tekst:**

1. I forbindelse med bygging av Nordøyvegen pågår det for tiden driving av 3 undersjøiske tunneler; Haramsfjordtunnelen (3500 m), Nogvafjordtunnelen (5730 m) og Fjørtoftfjordtunnelen (3680 m). På grunn av krevende grunnforhold er det lagt opp til omfattende ingeniørgeologiske undersøkelser under driving. Formålet med denne oppgaven er å vurdere nytteverdien av disse undersøkelsene.

Masteroppgaven er en videreføring av fordypningsprosjekt høsten 2019, hvor det ble gjennomført studier av opplegg for undersøkelser under driving som er benyttet i et relevant utvalg av tidligere bygde tunneler. Innledningsvis i masteroppgaven skal det gjøres rede for typer og omfang av undersøkelser som benyttes under driving av tunnelene langs Nordøyvegen, og omfanget av undersøkelser under driving skal vurderes i relasjon til omfanget av forundersøkelser. Nytteverdien av anvendte undersøkelser på stoff skal så vurderes og analyseres med spesiell vekt på:

- «Konvensjonell» sonderboring, inkl. anvendelse av MWD.
- Kjerneboring på stoff, inkl. korrelasjon mellom Q-verdi fra kjerneboring og Q-verdi registrert ved tunnelkartlegging.
- Kartlegging på stoff («byggherrens halvtime»), inkl. prøvetaking.
- Eventuelle deformasjonsmålinger.

2. Befaring til prosjektet skal foretas som del av arbeidet. Oppgaven gjennomføres i samarbeid med Møre og Romsdal fylkeskommune med ingeniørgeolog Kåre Ingolf Karlson som kontaktperson.

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

*Bjørn Nilsen, Professor/hovedveileder*

SKJEMAET TAS INN SOM SIDE 1 I MASTEROPPGAVEN  
NTNU, 16.1.2020



---

## Sammendrag

I perioden 2019-2022 bygges Fv. 659 Nordøyvegen for å gi fastlandsforbindelse til Nordøyane i Ålesund kommune. Som en del av prosjektet bygges tre undersjøiske tunneler; Haramsfjordtunnelen, Nogatfjordtunnelen og Fjørtoftfjordtunnelen. I denne masteroppgaven har formålet vært å vurdere nytteverdien av de ingeniørgeologiske undersøkelsene som benyttes under tunneldrivingen.

Undersøkelsene som utføres under driving er systematisk sonderboring m/MWD, kjerneboring foran stuff ved bergoverdekning mindre enn 40 m og/eller seismisk hastighet mindre enn eller lik 3000 m/s, og systematisk kartlegging på stuff med eventuell prøvetaking. Deformasjonsmålinger har til nå ikke blitt benyttet. For å begrense oppgaven, er det valgt å fokusere på sju utvalgte partier i tunnelene. I disse partiene er det gjennomgått hvilke ingeniørgeologiske undersøkelser som er utført både før og under driving, med tilhørende resultater og tolkninger. Kjerneboring er utført foran stuff i fem av de sju partiene, og har hatt stor verdi for drivingen. Vanskelighetsgraden til bergmassen kan bestemmes før den ankommer stuff, driving gjennom eventuelle svakhetssoner kan planlegges, og metoden kan forutse når det kan forventes bedre bergmasse etter en dårlig sone. Resultater fra kjerneboring, systematisk sonderboring og tunnelkartlegging har verifisert og utfyllt hverandre. Måling av innlekkasje i sonder- og kjernehull har gitt riktige forventinger av vannforholdene foran stuff. Tolket hardhet fra MWD-data har gitt indikasjoner på både dårlig bergmasse og ny bergart foran stuff, men disse borparametertolkningene er relativt lite benyttet av kontrollingeniørene ved Nordøyvegen under driving. I sleppemateriale fra Fjørtoftfjordtunnelen har det ved laboratorietester blitt påvist montmorillonitt, *meget stor* fri svelling og *høyt* svelletrykk, så mulighet for svelleproblematikk kan ikke utelukkes. Bergart i Haramsfjordtunnelen som ikke var forventet fra forundersøkelsene har ved petrografisk analyse blitt vurdert til å være en delvis eklogittisert olivingabbro med koronatekstur. Olivingabbroen har relativt høyt innhold av mikrogranater. Dette forklarer den ekstreme slitasjen som den medførte under boring, samt ekstreme borbarhetsindekser.

Diagrammer med fordeling av Q-verdier fra ulike undersøkelser i de utvalgte partiene har blitt presentert. Kjerneboringens Q-verdier svinger rundt de kartlagte Q-verdiene, og anses å gjenspeile variasjonen i bergmassekvalitet innad i tunnelprofilen. Om lave Q-verdier fra kjerneboring vil påvirke tunnelens totalstabilitet avhenger av hvordan de minst gunstige forholdene i kjernene forekommer i hele tunnelprofilen. Mulige forklaringer på dårlig korrelasjon mellom seismisk hastighet  $V_p$  og kartlagt Q-verdi har blitt diskutert. Det kan være feil antatt fallvinkel på svakhetssoner, usikker geologi som medfører feiltolkning av seismikken, eller at korrelasjonsformelen fra  $V_p$  til Q-verdi ikke er gjeldende for bergmassen. Usikkerheten knyttet til seismikken langs Nordøyvegen vitner om at ingeniørgeologiske undersøkelser i drivefasen har høy nytteverdi. De har bidratt til bedre forutsigbarhet, spesielt i partier der forundersøkelser ikke har stemt med de virkelige forholdene.





---

## Abstract

Between 2019-2022, the Fv. 659 Nordøy road connection is being built to give Nordøyane in Ålesund municipality a connection to the mainland. As part of this project, three subsea tunnels are being built; the Haramsfjord, the Nogvafjord and the Fjørtoftfjord tunnel. The objective of this master thesis has been to assess the utility value of the engineering geological investigations during tunnel excavation.

The investigations performed during excavation are systematic percussive probe drilling with MWD, core drilling ahead of tunnel face when rock cover is less than 40 m and/or seismic velocity is less than or equal to 3000 m/s, and systematic tunnel mapping including collecting samples for laboratory testing if necessary. Deformation monitoring has not yet been carried out. To limit the scope of the thesis, seven sections of the tunnels are selected and analysed. Both pre-investigations and engineering geological investigations during excavation are evaluated, with associated results and interpretations. Core drilling in front of the tunnel face is performed in five of the seven sections and have had great value during excavation. The difficulty of the rock mass can be determined in advance of reaching the tunnel face, excavation through weakness zones may be planned, and the investigation can predict when rock mass of better quality will occur after a zone of poor conditions. The results from core drilling, percussive probe drilling and tunnel mapping have verified and completed each other. Measurements of water leakage from the core and probe drill holes have given correct information of the water conditions ahead of face. Interpreted hardness from MWD have indicated both poor rock mass and new rock type ahead of face. However, these drill parameter interpretations are seldom used by the control engineers along the Nordøy road connection during excavation. Analysis of filling material from joints in the Fjørtoftfjord tunnel have shown that montmorillonite occurs, with *very high* free swelling and *high* swelling pressure. Instability because of swelling cannot be excluded. Unexpected rock type in the Haramsfjord tunnel is by petrographic analysis assessed to be a partly eclogitized olivine gabbro with corona texture. The olivine gabbro has a relatively high content of micro garnets, which explains the extremely high wear experienced during drilling as well as extreme drillability indexes.

Diagrams with Q-values from different investigations have been presented. Q-values from core drilling fluctuate around the mapped Q-values and are regarded to reflect the variation of rock mass quality within the tunnel profile. Whether low Q-values from core drilling will affect the total stability of the tunnel depends on how the less favourable conditions of the cores appear in the entire profile. Possible explanations of bad correlation between seismic velocity  $V_p$  and Q-value have been discussed. It can be due to wrongly assumed dip of weakness zones, unknown geology which leads to wrong interpretation of the seismic data, or the correlation formula between  $V_p$  and Q-value may be wrong. Uncertainty related to the seismic interpretations along the Nordøy road connection shows that engineering geological investigations during excavation have high utility value. These investigations have contributed to better predictability, especially when the pre-investigations were wrong.



---

## Forord

Denne masteroppgaven er skrevet våren 2020 ved Institutt for geovitenskap og petroleum ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU). Omfanget på oppgaven er 30 studiepoeng, og den er en videreføring av prosjektoppgaven som ble skrevet høsten 2019. Masteroppgaven markerer avslutningen på det femårige studiet «Tekniske geofag».

Først og fremst vil jeg takke min hovedveileder, Bjørn Nilsen, for gode faglige diskusjoner og innspill som i stor grad har bidratt til oppgaven. Takk for at du alltid tar deg tid til mine spørsmål og oppmuntrer meg videre i arbeidet.

En stor takk rettes også til Kåre Ingolf Karlson fra Møre og Romsdal fylkeskommune, min kontaktperson ved Nordøyvegen. Takk for all nyttig informasjon og grunnlagsmateriale fra prosjektet som du har delt, takk for at du tok meg så godt imot under befarings og takk for at du gladelig deler av all din erfaring som ingeniørgeolog. Takk også til resten av gjengen som arbeider for Møre og Romsdal fylkeskommune med Nordøyvegens tunneler, spesielt kvalitetsrådgiver Carina Farstad for tilsendte Novapoint-tegninger og kontrollingeniørene i tunnelene som har delt av hvordan de benytter seg av undersøkelser under driving.

Entreprenør Skanska fortjener også en takk for at jeg fikk ha sommerjobb på Fjørtofta i 2019, som ga meg et unikt innblikk i prosjektet allerede før masteroppgaven startet.

Jeg vil takke laboratorieansatte ved NTNU, Jon Runar Drotninghaug og Laurentius Tjihuis, for gjennomføring av henholdsvis svelleanalyse og XRD-analyse. Takk for særlig god forklaring av resultatene via epost, siden jeg verken kunne utføre testene selv eller delta på grunn av Covid-19 (koronavirus). Håkon Fjærli og Kjetil Eriksen fortjener en takk for preparering av tynnslip, og en ekstra takk rettes til professor Mai Britt Mørk for veiledning og verdifull kunnskap under mikroskoperingen.

Takk til familie for støtte gjennom de fem studieårene, samt bidrag til korrekturlesning. Medstudent Ingrid Mælan takkes for hjelp i kartprogrammet ArcMap. Til slutt vil jeg rette en spesiell takk til mine studievenninner Hedvig Åstebøl, Maria Thonhaugen Raastad, Johanne de Presno og Ingvild Sangesland, for godt samhold gjennom studietiden og ikke minst gode vennskap. Dere er gull verdt!

Trondheim, juni 2020

Kristine Birkeli



# Innhold

<b>1</b>	<b>Innledning</b>	<b>1</b>
1.1	Bakgrunn . . . . .	1
1.2	Formål og omfang . . . . .	1
1.3	Begrensninger . . . . .	2
1.4	Grunnlagsmateriale . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Erfaringer fra prosjektoppgaven</b>	<b>5</b>
2.1	Fremgangsmåte og formål med prosjektoppgaven . . . . .	5
2.2	Opplegg for undersøkelser under driving . . . . .	5
2.2.1	Kartlegging i tunnelen («byggherrens halvtime») . . . . .	5
2.2.2	Sonderboring med slaghammer, inkl. MWD og borparametertolkning . . . . .	6
2.2.3	Kjerneboring foran stuff . . . . .	7
2.2.4	Deformasjonsmålinger . . . . .	7
2.2.5	Geofysikk for registrering foran stuff . . . . .	7
2.3	Undersøkelser under driving i utvalgte tunnelprosjekter . . . . .	8
2.4	Nytteverdien til undersøkelser under driving . . . . .	9
2.4.1	Kartlegging i tunnelen . . . . .	9
2.4.2	Sonderboring med slaghammer . . . . .	9
2.4.3	Kjerneboring foran stuff . . . . .	10
2.4.4	Generelt . . . . .	10
<b>3</b>	<b>Nordøyvegen</b>	<b>13</b>
3.1	Prosjektbeskrivelse Fv. 659 Nordøyvegen . . . . .	13
3.1.1	Generelt . . . . .	13
3.1.2	Undersjøiske tunneler . . . . .	14
3.2	Regionalgeologi . . . . .	15
<b>4</b>	<b>Forundersøkelser ved Nordøyvegen</b>	<b>19</b>
4.1	Generelt . . . . .	19
4.2	Utførte forundersøkelser ved Nordøyvegen . . . . .	19
4.2.1	Akustikk . . . . .	20
4.2.2	Refraksjonsseismikk . . . . .	21
4.2.3	Styrt kjerneboring . . . . .	22
4.2.4	Seismisk tomografi . . . . .	23
4.2.5	Ingeniørgeologisk feltkartlegging . . . . .	24
4.2.6	Andre forundersøkelser . . . . .	25
4.3	Undersøkelsesomfang og geoteknisk kategori . . . . .	26
<b>5</b>	<b>Ingeniørgeologiske undersøkelser under driving av Nordøyvegen</b>	<b>29</b>
5.1	Sonderboring med slaghammer . . . . .	29
5.2	Kjerneboring foran stuff . . . . .	30
5.3	MWD og borparametertolkning . . . . .	31
5.3.1	Generelle erfaringer fra kontrollingeniører ved Nordøyvegen . . . . .	31
5.4	Kartlegging på stuff og prøvetaking . . . . .	32
5.4.1	Prøvetaking . . . . .	32
5.5	Deformasjonsmålinger . . . . .	33
5.6	Sluttkommentar . . . . .	33
<b>6</b>	<b>Laboratorieundersøkelser</b>	<b>35</b>
6.1	Analyse av sleppemateriale og kjernemateriale . . . . .	35

6.1.1	Beskrivelse av undersøkelsesmetoder for sleppe- og kjernemateriale . . . . .	36
6.1.2	Observasjoner og analyseresultater av sleppe- og kjernemateriale . . . . .	39
6.1.3	Diskusjon og oppsummering av sprekke- og kjernemateriale . . . . .	44
6.2	Petrografisk analyse for bergartsbestemmelse . . . . .	46
6.2.1	Beskrivelse av undersøkelsesmetoder . . . . .	47
6.2.2	Observasjoner og analyseresultater fra petrografisk analyse . . . . .	47
6.2.3	Diskusjon og oppsummering av petrografisk analyse . . . . .	48
6.3	Borbarhetstester fra SINTEF . . . . .	49
<b>7</b>	<b>Utvalgte partier for nærmere analyse</b>	<b>51</b>
7.1	Betraktede momenter ved utvelgelse av partier . . . . .	51
7.2	Parti 1: Pel nr. 6326-6268 . . . . .	52
7.2.1	Beskrivelse . . . . .	52
7.2.2	Begrunnelse . . . . .	53
7.3	Parti 2: Pel nr. 5620-5569 . . . . .	53
7.3.1	Beskrivelse . . . . .	54
7.3.2	Begrunnelse . . . . .	54
7.4	Parti 3: Pel nr. 23600-23700 . . . . .	54
7.4.1	Beskrivelse . . . . .	54
7.4.2	Begrunnelse . . . . .	55
7.5	Parti 4: Pel nr. 27900-27858 . . . . .	56
7.5.1	Beskrivelse . . . . .	56
7.5.2	Begrunnelse . . . . .	57
7.6	Parti 5: Pel nr. 27685-27672 . . . . .	57
7.6.1	Beskrivelse . . . . .	57
7.6.2	Begrunnelse . . . . .	58
7.7	Parti 6: Pel nr. 31783-31865 . . . . .	58
7.7.1	Beskrivelse . . . . .	58
7.7.2	Begrunnelse . . . . .	59
7.8	Parti 7: Pel nr. 32150-32202 . . . . .	60
7.8.1	Beskrivelse . . . . .	60
7.8.2	Begrunnelse . . . . .	60
7.9	Tabell med oversikt over utvalgte partier . . . . .	61
<b>8</b>	<b>Gjennomgang av utvalgte partier</b>	<b>63</b>
8.1	Parti 1: Pel nr. 6326-6268 . . . . .	63
8.1.1	Forundersøkelser . . . . .	63
8.1.2	Undersøkelser under driving . . . . .	64
8.1.3	Oppsummering og videre driving . . . . .	66
8.2	Parti 2: Pel nr. 5620-5569 . . . . .	66
8.2.1	Forundersøkelser . . . . .	66
8.2.2	Undersøkelser under driving . . . . .	67
8.2.3	Oppsummering og videre driving . . . . .	69
8.3	Parti 3: Pel nr. 23600-23700 . . . . .	70
8.3.1	Forundersøkelser . . . . .	70
8.3.2	Undersøkelser under driving . . . . .	70
8.3.3	Oppsummering og videre driving . . . . .	75
8.4	Parti 4: Pel nr. 27900-27858 . . . . .	76
8.4.1	Forundersøkelser . . . . .	76
8.4.2	Undersøkelser under driving . . . . .	78
8.4.3	Oppsummering . . . . .	79

8.5	Parti 5: 27685-27672 . . . . .	80
8.5.1	Forundersøkelser . . . . .	80
8.5.2	Undersøkelser under driving . . . . .	80
8.5.3	Oppsummering og videre driving . . . . .	82
8.6	Parti 6: Pel nr. 31783-31865 . . . . .	82
8.6.1	Forundersøkelser . . . . .	82
8.6.2	Undersøkelser under driving . . . . .	82
8.6.3	Oppsummering . . . . .	85
8.7	Parti 7: Pel nr. 32150-32202 . . . . .	85
8.7.1	Forundersøkelser . . . . .	85
8.7.2	Undersøkelser under driving . . . . .	85
8.7.3	Oppsummering og videre driving . . . . .	89
8.8	Samlet vurdering av nytteverdien til utførte undersøkelser under driving av Nordøyvegen	89
8.8.1	Kjerneboring foran stuff . . . . .	89
8.8.2	Sonderboring med slaghammer . . . . .	90
8.8.3	MWD og borparametertolkning . . . . .	90
8.8.4	Kartlegging på stuff med prøvetaking . . . . .	90
<b>9</b>	<b>Diskusjon</b>	<b>93</b>
9.1	Korrelasjon mellom $V_p$ og Q . . . . .	93
9.1.1	Korrelasjonsformler . . . . .	93
9.1.2	Innspenningseffekt og påvirkning av porøsitet . . . . .	94
9.1.3	Påvirkning av lagdeling i bergmassen, eksempel fra Nordkapptunnelen . . . . .	95
9.1.4	Effekt av forinjeksjon på Q-verdi . . . . .	96
9.2	Diagrammer med sammenstilte Q-verdier i utvalgte partier . . . . .	96
9.2.1	Parti 1 . . . . .	97
9.2.2	Parti 2 . . . . .	98
9.2.3	Parti 3 . . . . .	99
9.2.4	Parti 4 . . . . .	101
9.2.5	Parti 5 . . . . .	103
9.2.6	Parti 6 . . . . .	104
9.2.7	Parti 7 . . . . .	105
9.3	Vannforhold under driving . . . . .	105
9.4	Vurdering av alternative undersøkelser under driving . . . . .	108
9.5	Kommentar til undersøkelsesomfang . . . . .	109
9.6	Observerte generelle trender . . . . .	109
9.6.1	Kjerneboring foran stuff vs. tunnelkartlegging . . . . .	109
9.6.2	Ulik grad av variasjon i bergmassekvalitet . . . . .	110
9.6.3	Samlet vurdering av benyttet korrelasjonsformel mellom $V_p$ og Q . . . . .	110
<b>10</b>	<b>Konklusjon</b>	<b>113</b>
	<b>Referanseliste</b>	<b>115</b>
	<b>Vedlegg</b>	<b>119</b>
<b>A</b>	<b>Detaljert berggrunnskart etter Lutro (2011)</b>	<b>119</b>
<b>B</b>	<b>Undersjøiske tunnelprofiler</b>	<b>121</b>
B.1	Haramsfjordtunnelen . . . . .	122
B.2	Nogvafjordtunnelen . . . . .	122
B.3	Fjørtoftfjordtunnelen . . . . .	123

---

<b>C</b>	<b>Novapoint Tunnel - Geologi og bergsikring</b>	<b>124</b>
<b>D</b>	<b>Diffraktogrammer fra XRD-analyse</b>	<b>125</b>
<b>E</b>	<b>Frisvelling</b>	<b>128</b>
<b>F</b>	<b>Mikroskopibilder</b>	<b>129</b>
<b>G</b>	<b>Borbarhetsdiagrammer</b>	<b>130</b>
<b>H</b>	<b>Sammenheng mellom bergmasseklasse, Q-verdi og sikringsklasse</b>	<b>131</b>
<b>I</b>	<b>Parameterverdier for Q-systemet</b>	<b>132</b>
<b>J</b>	<b>Kjerneboring foran stoff i parti 1, pel nr. 6317-6283</b>	<b>134</b>
<b>K</b>	<b>Borparametertolkninger</b>	<b>136</b>
K.1	Parti 1: Pel nr. 6326-6268 . . . . .	136
K.2	Parti 2: Pel nr. 5620-5569 . . . . .	137
K.3	Parti 3: Pel nr. 23600-23700 . . . . .	138
K.4	Parti 4: Pel nr. 27900-27858 . . . . .	139
K.5	Parti 5: Pel nr. 27685-27672 . . . . .	140
K.6	Parti 6: Pel nr. 31783-31865 . . . . .	141
K.7	Parti 7: Pel nr. 32150-32202 . . . . .	142



# 1 | Innledning

## 1.1 Bakgrunn

Som en del av vegprosjektet Fv. 659 Nordøyvegen, pågår driving av de tre undersjøiske tunnelene Haramsfjordtunnelen (3500 m), Nogvafjordtunnelen (5730 m) og Fjørtoftfjordtunnelen (3680 m). I tillegg til bruer, sjøfyllinger og ny veg i dagen, skal dette gi fastlandforbindelse til Nordøyane i Ålesund kommune (tidligere Haram og Sandøy kommune). Tunnelene har profil T8,5 og tilhører tunnelklasse B. Tunneldrivingen langs Nordøyvegen startet i mars 2019, med planlagt åpning i mai 2022. Ved masterstart i januar 2020 var 31 % av tunnelene ferdig drevet, og det var fortsatt to av de totalt seks stoffene som ikke var påbegynt. Ved masterslutt er 50 % av tunneldrivingen ferdig, og Fjørtoftfjordtunnelen har nådd dypeste punkt.

Sommeren 2019 var jeg sommerstudent for entreprenør Skanska ved Nordøyvegen. Dette var en enestående mulighet til å få innblikk i prosjektet, og jeg fikk være mye ute i tunnelene og observere hvordan tunneldriving foregår i praksis. Sommerjobben ga meg inspirasjon og et godt grunnlag for masteroppgaven. De undersjøiske tunnelene langs Nordøyvegen drives i krevende grunnforhold, noe som medfører at det gjennomføres omfattende ingeniørgeologiske undersøkelser under driving for å sikre trygg og effektiv gjennomføring av prosjektet. I tillegg er det utført et stort omfang med forundersøkelser. Dette har gitt en unik mulighet til å analysere og vurdere undersøkelsene opp mot hverandre i masteroppgaven. En slik vurdering vil være interessant for byggherren med tanke på optimalisering av undersøkelser under driving i senere tunnelprosjekter.

## 1.2 Formål og omfang

Masteroppgaven er en videreføring av prosjektoppgaven *Vurdering av alternative opplegg for undersøkelser under driving* som jeg skrev høsten 2019. Da ble det gjennomført litteraturstudie av benyttede opplegg for undersøkelser under driving i et relevant utvalg av nyere undersjøiske tunneler. De mest relevante momentene fra denne oppgaven presenteres i kapittel 2 *Erfaringer fra prosjektoppgaven*.

Formålet med masteroppgaven er å vurdere nytteverdien til de ingeniørgeologiske undersøkelsene som utføres under driving av tunnelene langs Nordøyvegen. For å opparbeide grunnlag for en slik vurdering, blir det innledningsvis gjort en generell gjennomgang av utførte forundersøkelser og hvilke undersøkelser som utføres under driving. I samråd med veileder har det blitt valgt ut sju partier i tunnelene der utførte undersøkelser både før og under driving blir beskrevet i detalj. Dette har avgrenset oppgaven og gitt mulighet til å foreta en systematisk presentasjon og sammenligning av resultater og tolkninger fra de ulike undersøkelsene. Basert på dette er det valgt å fokusere på sammenligning av registrert bergmassekvalitet (Q-verdier) i de utvalgte partiene, og eventuelle avvik diskuteres. Avslutningsvis diskuteres også hvordan vannforhold foran stoff har blitt predikert, samt generelle trender som har blitt

---

observert gjennom hele analysen.

Siden prøvetaking er en viktig del av ingeniørgeologiske undersøkelser under driving, har jeg utført laborietester på prøver fra noen av de utvalgte partiene. Prøvene ble samlet inn under befaring til Nordøyvegen i uke 8, og presenteres i kapittel 6 *Laboratieundersøkelser*. Det er utført analyse av sleppe- og kjernemateriale gjennom XRD-analyse, frisvellingstest og svelletrykksmåling. I tillegg er petrografisk analyse med tynnslipmikroskopering utført på en bergartsprøve.

### **1.3 Begrensninger**

I denne masteroppgaven er det fokusert på hvilken nytteverdi de ingeniørgeologiske undersøkelsene som benyttes under driving har for å forutsi forholdene videre foran stuff underveis i drivefasen. Undersøkelsene vil selvsagt også kunne ha en nytteverdi senere, ved at de supplerer med nyttig geologisk informasjon for fremtidige tunneler/bergrom i nærheten eller for ingeniørgeologisk forskning. Dette er ikke vurdert noe grundigere i oppgaven. For å begrense oppgavens omfang, er vurderingene og diskusjonene rundt nytteverdien basert på de sju utvalgte partiene. Totalt utgjør dette 398 m av tunnelene, som tilsvarer bare 6 % av den totale lengden som er drevet ved masterslutt.

Det har til tider vært vanskelig å «tolke» kontrollingeniørenes dagbøker. Noen kontrollingeniører noterer gode beskrivelser av hvordan fjellforholdene er og hva som oppleves under driving, mens andre tar bare med korte stikkord og det aller mest nødvendige. Det samme gjelder for entreprenørens sonderboringrapporter. Jeg har dermed valgt å ta utgangspunkt i at forholdene er fine dersom det ikke er notert noen spesifikke problemer under sonderboringene.

Digital registrering av kartlegging i *Novapoint Tunnel - Geologi og bergsikring* har ikke blitt ferdigstilt på Longva-stuffen innen masterslutt på grunn av problemer med krasj i programvare. Dette har resultert i at jeg ikke har fått tilsendt Novapoint-tegninger fra parti 3, noe som har begrenset muligheten til å analysere disse resultatene i like stor grad som mottatte registrerte kartlegginger fra andre partier.

På grunn av Covid-19 (koronavirus) ble NTNU stengt fra 13.03.2020 og fram til masterslutt. Dette resulterte i en alternativ arbeidshverdag med hjemmekontor og ikke mulighet til å treffe veileder fysisk. Den største begrensningen situasjonen medførte var i forhold til pågående laboriearbeid. Jeg hadde nettopp preparert laborieprøvene mine, men utførelse av testene ble utsatt på ubestemt tid. Fra 27.04.2020 ble det mulig å fullføre testene, men av hensyn til smittevern ble de utført av laborieansatte ved NTNU. Tynnslipmikroskopering fikk jeg utføre selv, under strenge restriksjoner.

### **1.4 Grunnlagsmateriale**

For de tre undersjøiske tunnelene langs Nordøyvegen er det utarbeidet tre ingeniørgeologiske rapporter for konkurransegrunnlag. Disse er det viktigste grunnlagsmaterialet for delene av masteroppgaven som omhandler utførte forundersøkelser. I tillegg har noen utvalgte rapporter fra forundersøkelsene blitt

---

benyttet for å gi supplerende informasjon. Følgende grunnlagsmateriale som var utarbeidet før drivestart er benyttet:

- Geomap (2002) – *Nordøyvegen, Fjørtoftfjorden. Akustiske og refraksjonsseismiske målinger.*
- Geomap (2011) – *Nordøyvegen. Refraksjonsseismiske målinger.*
- Geomap (2011) – *Tomography survey in Nordøyvegen area.*
- NGU v/Guri V. Ganerød og Ole Lutro (2011) – *Berggrunnsgeologisk og strukturgeologisk kartlegging i forbindelse med prosjektet Fv. 659 Nordøyvegen, Møre og Romsdal.*
- NGU v/Ole Lutro (2011) – *Berggrunnskart over Nordøyane.*
- NGU v/John F. Dehls, Odleiv Olesen og Jan S. Rønning (2012) – *Magnetisk og batymetrisk kartlegging ved vegprosjektet Fv. 659 Nordøyvegen, Møre og Romsdal.*
- Norconsult (2012) – *Kjernelogg fra styrt kjerneboring, BH3.*
- Ingvild Hide Kvarstein (2017) – *Masteroppgave: Analyse av forventede forhold og mulige vannsikringsløsninger for planlagte undersjøiske tunneler langs Nordøyvegen.*
- Statens vegvesen v/Kåre Ingolf Karlson og Christine Grob (2018) – *Fv. 659 Nordøyvegen, Fjørtoftfjordtunnelen, ingeniørgeologisk rapport for konkurransegrunnlag.*
- Statens vegvesen v/Kåre Ingolf Karlson og Christine Grob (2018) – *Fv. 659 Nordøyvegen, Haramsfjordtunnelen, ingeniørgeologisk rapport for konkurransegrunnlag.*
- Statens vegvesen v/Kåre Ingolf Karlson og Christine Grob (2018) – *Fv. 659 Nordøyvegen, Nogvafjordtunnelen, ingeniørgeologisk rapport for konkurransegrunnlag.*
- Kartverket (2020) – *Topografisk Norgeskart. WMS-tjeneste.*
- NGU (2020) – *Berggrunn N250. FGDB-fil.*

Innsamling og gjennomgang av informasjon fra pågående driving har vært en betydelig del av masteroppgaven. For dette er følgende grunnlagsmateriale benyttet:

- SINTEF v/Joakim Eggen (2019) – *Prøvningsrapporter. Svelleegenskaper.*
- Skanska (2019/2020) – *Sonderboringsrapporter.*
- Bever Team Online (2020) – *MWD-data og borparametertolkninger fra nettstedet <https://beverteamonline.azurewebsites.net/>*
- SINTEF v/Kevin A. Dahlen (2020) – *Prøvingsrapport. Bestemmelse av borbarhetsegenskaper.*
- Møre og Romsdal fylkeskommune v/Kåre Ingolf Karlson (2020) – *Dagbøker til kontrollingeniørene ved Nordøyvegen.*
- Møre og Romsdal fylkeskommune v/Kåre Ingolf Karlson (2020) – *Excel-filer med kjernelogger fra kjerneboring foran stuff.*
- Møre og Romsdal fylkeskommune v/Carina Farstad (2020) – *Tegninger fra Novapoint Tunnel - Geologi og bergsikring.*

---

## 2 | Erfaringer fra prosjektoppgaven

I dette kapittelet gis en oppsummering av de viktigste funnene fra prosjektoppgaven som ble skrevet høsten 2019, med tittelen *Vurdering av alternative opplegg for undersøkelser under driving* (Birkeli, 2019). Prosjektoppgaven var et forstudie til masteroppgaven. Innledningsvis presenteres formålet med prosjektoppgaven og en punktvis oversikt over hva som ble gjort. Deretter gis det en kort beskrivelse av hvilke opplegg for undersøkelser som kan benyttes under driving av undersjøiske tunneler, etterfulgt av en oversikt over hvilke tunnelprosjekter som ble studert og hvilke metoder som ble benyttet under driving av disse. Avslutningsvis gjengis de mest relevante funnene fra prosjektoppgaven angående vurderingen av nytteverdien til de studerte undersøkelsesmetodene.

### 2.1 Fremgangsmåte og formål med prosjektoppgaven

Prosjektoppgaven ble gjennomført som et litteraturstudie av relevante rapporter, artikler og håndbøker. Følgende punkter ble gjennomgått:

- Generell presentasjon av ingeniørgeologiske undersøkelser for undersjøiske tunneler.
- Grundigere beskrivelse av opplegg for undersøkelser under driving av undersjøiske tunneler.
- Beskrivelse av et utvalg nyere undersjøiske tunneler, med gjennomgang av hvilke undersøkelser som er benyttet i drivefasen. Det ble lagt vekt på begrunnelse for valg av undersøkelsesmetoder på bakgrunn av geologiske forhold og utførte forundersøkelser.
- Basert på dette ble fordeler og begrensninger til metodene kartlagt, og nytteverdien til undersøkelsesmetodene ble vurdert.

Hensikten var altså å diskutere metodenes nytteverdi basert på erfaringer fra tidligere tunnelprosjekter. På denne måten ble det opparbeidet et grunnlag for analyse av det pågående tunnelprosjektet ved Fv. 659 Nordøyvegen, som denne masteroppgaven skal fokusere på.

### 2.2 Opplegg for undersøkelser under driving

I det følgende vektlegges de ingeniørgeologiske undersøkelsene som anses som mest relevante videre i masteroppgaven.

#### 2.2.1 Kartlegging i tunnelen («byggherrens halvtime»)

Under «byggherrens halvtime» skal kontrollingeniør kartlegge bergmasseforholdene på stuff som grunnlag for å vurdere videre drive- og sikringsmetode. Kartleggingen utføres etter at salven er utlastet og driftsrensk er utført, og før sprøytebetong eller annen sikring påføres (Statens vegvesen, 2018). Kartleggingen er todelt:

1. **Kartlegging på utbrettsprofil:** Generell kartlegging av bergmassen, med bestemmelse av bergartstyper og lokalisering av bergartsgrenser og strukturer som sprekker, foliasjoner, slepper og svakhetssoner. Det sentrale er å kartlegge strukturer som kan påvirke tunnelens stabilitet, med tilhørende

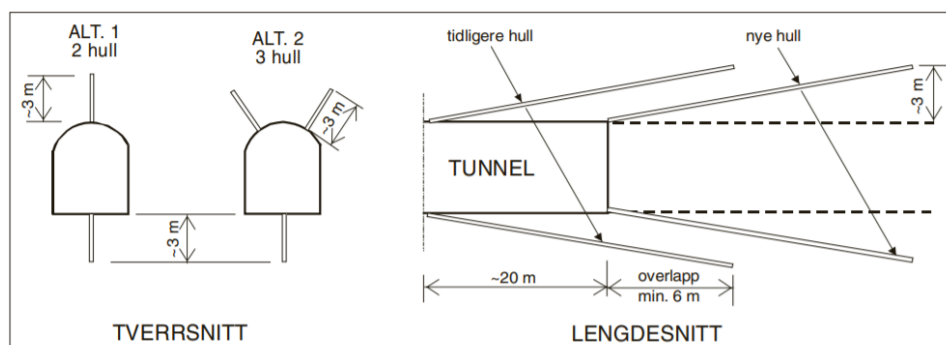
orientering, innhold og bredde. Registreringene tegnes på et utbrettsprofil av tunnelkonturen sett ovenfra.

2. **Bergmasseklassifisering etter Q-metoden:** Q-metoden beskrives i NGI (2015) sin håndbok *Bruk av Q-systemet*. Gjennom kartlegging av bergmassen på stoff bestemmes seks parametre som omfatter bergmassens oppsprekking (RQD og  $J_n$ ), friksjonen på sprekke (  $J_r$  og  $J_a$  ) og spenningsforholdene i bergmassen ( $J_w$  og SRF). Ut fra disse parametrene bestemmes Q-verdien. Den er logaritmisk og varierer mellom 0,001 og 1000, fra henholdsvis dårlig til god bergmassekvalitet. Basert på empiriske verdier kan Q-verdien knyttes opp mot sikringsklasse og anbefalt sikringsmengde. Q-verdien tar ikke hånd om stabiliteten til enkeltblokker, noe som kan resultere i at det forekommer ustabile enkeltblokker i tunnelen/bergrommet selv om høy Q-verdi tilsier at bergmassekvaliteten og totalstabiliteten er god.

Ved mistanke om svelleleire, skal det tas prøve av sprekkefylling som sendes til laboratorieundersøkelser (Statens vegvesen, 2018).

### 2.2.2 Sonderboring med slaghammer, inkl. MWD og borparametertolkning

Sonderboring utføres før salveboringen, og gir informasjon om bergmasse- og vannforholdene foran stoff. Det bores 2-6 vinklede hull med en lengde på 20-30 m innover i stoffen, se prinsippskisse i figur 2.1. For undersjøiske tunneler skal sonderboring utføres systematisk under kote 0, med minimum 6 m overlapp (Palmstrøm *et al.*, 2003). Ved liten bergoverdekning kan det være aktuelt at ett av hullene vinkles omtrent 45° oppover i forhold til tunnelaksen for å forsikre at bergoverdekningen er tilstrekkelig.



Figur 2.1: Prinsipp for sonderboring. Antall hull og lengde avgjøres ut fra størrelsen på tunnelvernsnittet og bergmasseforholdene på stoff (Palmstrøm *et al.*, 2003).

Underveis i sonderboringen registreres forhold som kan ha betydning for bergmassekvaliteten foran stoff (Statens vegvesen, 2018):

- Inndrift
- Borevansker
- Tap av spylevann
- Spylevannsfargen
- Vanninnbrudd
- Måling av utlekkasje per hull

---

Dersom det er ønskelig med et mer nøyaktig bilde av bergmassen i sonderhullene, kan det utføres logging med optisk viewer (OPTV) (NFF, 2019).

#### *MWD og borparametertolkning (DPI)*

Under boring av alle typer hull skal det utføres MWD (Measurement While Drilling). Det vil si at borrhullet inneholder utstyr som automatisk logger følgende parametre fra boringen: Bordybde, borsenk, matertrykk, rotasjonstrykk, slagtrykk, vannmengde, vanntrykk, rotasjon og tid (Statens vegvesen, 2018). Disse parametrene gir et konkret uttrykk for responsen fra boreprosessen, og gjennom borparametertolkning (Drill Parameter Interpretation, DPI) kan det tolkes hvordan forholdene forventes å være. Tolkningene gir bilder av bergmassens hardhet, oppsprekingsgrad og vannforhold foran stoff.

I tunneler der det er innført WiFi inn til stoffen, er det mulig å få borparametertolkningene innen 5-10 min (NFF, 2019). Dermed kan MWD være et supplement til tradisjonell sonderboring for å tolke forholdene foran stoff og bestemme videre drive- og sikringsfilosofi.

### **2.2.3 Kjerneboring foran stoff**

Kjerneboring foran stoff utføres i tillegg til normal sonderboring når det forventes ekstra utfordrende forhold, som ved driving gjennom større svakhetssoner (Statens vegvesen, 2020b). Metoden er tidkrevende og kostbar sammenlignet med sonderboring, men den gir visuelle borkjerner som kan studeres og klassifiseres etter Q-metoden. De visuelle observasjonene av bergmassen sammenstilles med de registrerte forholdene fra selve boringen, som inndrift, spylevannsfarge, borevansker, osv. (Statens vegvesen, 2018). Det er også mulig å teste eventuelt sleppemateriale for innhold av svelleleire slik at dette er avklart før stoffen ankommer sonen.

### **2.2.4 Deformasjonsmålinger**

Deformasjonsmålinger utføres for å vurdere stabiliteten til bergmassen rundt tunnelen, hovedsaklig i soner med dårligere bergmassekvalitet. Formålet er å undersøke om den permanente sikringen som er påført er tilstrekkelig, ved å måle deformasjon i bergmassen over tid (NFF, 2008). Dersom målingene viser at deformasjonen ikke stabiliseres over tid, kan det ettersikres før utviklingen fortsetter.

### **2.2.5 Geofysikk for registrering foran stoff**

Geofysiske metoder for registrering foran stoff er forholdsvis nye metoder å benytte under tunneldriving. I motsetning til sonder- og kjerneboring er metodene ikke-destruktive, og de benytter endringer i bergmassens egenskaper til å tolke hvordan forholdene er foran stoff. Tre geofysiske metoder som kan benyttes under tunneldriving er TSP (Tunnel Seismic Prediction), GPR (Ground Penetrating Radar) og IRT (InfraRed Thermal testing).

## 2.3 Undersøkelser under driving i utvalgte tunnelprosjekter

Seks tunnelprosjekter ble studert i prosjektoppgaven, derav fire norske og to internasjonale. Fem av dem var undersjøiske tunneler. Tabell 2.1 viser hvilke undersøkelser som ble utført i drivefasen. For utdypende begrunnelse for valg av tunneler og beskrivelse av prosjektene, henvises det til prosjektoppgaven (Birkeli, 2019).

**Tabell 2.1: Oversikt over hvilke opplegg for undersøkelser under driving som ble utført i de studerte tunnelprosjektene (Birkeli, 2019). Undersøkelsestunnelen til Brenner Base Tunnel er ikke undersjøisk.**

	Karmøy-tunnelen (Rogaland)	Atlantehavstunnelen (Møre og Romsdal)	Ryfast (Rogaland)	Bjørøy-tunnelen (Hordaland)	Undersøkelsestunnel til Brenner Base Tunnel (Østerrike)	Xiang'an-tunnelen (Kina)
<b>Byggeår</b>	2009-2013	2006-2009	2013-2020	1993-1996	2015-2019	2005-2010
<b>Kartlegging på stoff</b>	x	x	x	x	x	
<b>Sonderboring</b>	x	x	x	x	x	x
<b>OPTV</b>					x	
<b>Kjerneboring</b>	x	x		x		x
<b>Deformasjonsmåling</b>	x	x		x		
<b>TSP</b>			x		x	x
<b>GPR</b>						x
<b>IRT</b>						x

De norske prosjektene følger samme drivestrategi: 1) Systematisk sonderboring foran stoff, 2) kjerneboring foran stoff som supplement ved ekstra krevende forhold, 3) systematisk kartlegging av bergmasseforholdene på stoff og 4) deformasjonsmålinger i dårlige soner. TSP er den eneste geofysiske metoden som er testet i Norge, ved Ryfast.

Ved undersøkelsestunnelen til Brenner Base Tunnel i Østerrike er det utført systematisk TSP i tillegg til systematisk sonderboring, OPTV i sonderhull og kartlegging på stoff. I Xiang'an-tunnelen i Kina er det også utført systematisk TSP, og basert på disse tolkningene har det blitt avgjort om videre undersøkelser med sonder- og kjerneboring, GPR og IRT skulle utføres. Geofysiske metoder ser altså ut til å ha større utbredelse i utlandet.



---

## 2.4 Nytteverdien til undersøkelser under driving

På bakgrunn av erfaringene fra utførte undersøkelser under driving av de studerte tunnelprosjektene, viser tabell 2.2 en oversikt over fordeler og begrensninger med de ulike oppleggene. Følgende kommer en vurdering av nytteverdien til undersøkelsene som er mest relevante videre i masteroppgaven. Det betyr at deformasjonsmålinger og geofysiske metoder ikke vurderes ytterligere enn det som er oppgitt i tabell 2.2.

### 2.4.1 Kartlegging i tunnelen

Kartlegging på stoff kan anses som en av de mest grunnleggende undersøkelsesmetodene under driving. Metoden er rask og billig. De visuelle observasjonene gir et godt grunnlag for å bestemme videre drive- og sikringsfilosofi og hjelp til å tolke resultater fra andre undersøkelser. Under kartleggingen utføres subjektive vurderinger, noe som kan være en begrensning avhengig av kontrollingeniørens erfaring. God kommunikasjon innad i de ulike tunnelskiftene og mellom byggherre og entreprenør vil redusere usikkerheten rundt kartleggingen, ved at flere viktige observasjoner registreres.

Ved bergmasseklassifisering etter Q-metoden, er det viktig å være klar over at Q-verdien beskriver bergmassens totale stabilitet. I en avstand på to meter rundt tunnelens periferi kan det være sprengningsinduserte sprekker og riss (NGI, 2015). Disse vil ikke påvirke totalstabiliteten, og må dermed ikke tas med ved beregning av Q-verdien. Det må utføres en egen vurdering av enkeltblokkers stabilitet.

Den empiriske sammenhengen mellom Q-verdi og sikringsklasse fungerer best for anlegg i hard og oppsprukket bergmasse.

### 2.4.2 Sonderboring med slaghammer

I alle de studerte tunnelprosjektene ble sonderboring med slaghammer utført foran stoff. Metoden er enkel å utføre og kan gi gode indikasjoner på innlekkasje og injeksjonsbehov i bergmassen. Sonderboringen gir informasjon om forholdene i en liten andel av bergmassen foran stoff, og forholdene i resten av bergmassen anslås ut fra dette. Det er dermed en begrensning at sonderhullene kan unngå å treffe svakhets- eller vannbærende soner, slik at det forventes bedre forhold enn i virkeligheten.

En annen begrensning er at vannforholdene kan endre seg med tiden. Sonderboringen viser bare hvordan forholdene er på det tidspunktet boringen utføres, og kan ikke forutse hvordan forholdene eventuelt vil forverres med tiden. Dette var tilfellet ved en svakhetsone i Atlanterhavstunnelen, der innlekkasjen økte og resulterte i ras på stoff til tross for utført injeksjon. I Bjørøytunnelen viste sonderboringen derimot sin nytteverdi ved at en 30 m bred sandsone ble oppdaget før den nådde tunnelstøtten. Sonen var ikke forventet, mest sannsynlig grunnet lavt omfang med forundersøkelser. Sonderboringen avslørte dermed dårlige forhold slik at ytterligere undersøkelser og tiltak kunne iverksettes for å komme gjennom sonen.

---

### *MWD og borparametertolkning (DPI)*

Det er hovedsaklig to avgjørende faktorer som avgjør om MWD og borparametertolkning kan ha høy nytteverdi under driving: 1) MWD-programmet må kalibreres opp mot entreprenørens utstyr og bergforholdene på stedet, og 2) byggherren må få resultatene innen kort tid slik at de kan tas med i vurderingen når avgjørelser skal tas. Dette er mulig når det er WiFi på stuff og nettverket er stabilt. I tillegg er god kommunikasjon mellom entreprenør og byggherre viktig for at borparametertolkningen skal utføres på riktig grunnlag.

MWD utføres i alle typer borhull. Borparametertolkningene, som omfatter bergartens hardhet, bergmassens oppsprekingsgrad og vannforholdene, vil dermed gi et stort bidrag til den geologiske modellen. Dette har høy nytteverdi for senere vedlikehold og eventuelt fremtidig nabotunnel eller -bergrom.

### **2.4.3 Kjerneboring foran stuff**

Kjerneboring foran stuff er en kostbar og tidkrevende undersøkelsesmetode. På samme måte som ved sonderboring med slaghammer, vil også kjerneboring innebære en viss usikkerhet siden resultatet bare gjelder en liten andel av bergmassen foran stuff. Det er viktig å være klar over at kjernehullet kan unngå å treffe viktige geologiske strukturer som finnes andre steder i tunnelprofilen.

Kjerneboringen resulterer i tydelige borkjerner. Ved studering av disse kan det utarbeides kjernelogger med oppsprekings- og bergartsbeskrivelse, RQD og antall sprekker. Dette er subjektive vurderinger som krever erfaring, i likhet med kartlegging på stuff. Orienteringen til geologiske strukturer kan ikke bestemmes siden kjernene roteres idet de tas ut.

Kjerneboring foran stuff kan ha høy nytteverdi gjennom en dårlig sone ved at metoden kartlegger sonens nøyaktige bredde og dens innhold. Dette ble utført gjennom problemsoner i både Atlanterhavstunnelen og Bjorøytunnelen. Ved Karmøytunnelen ble det utført systematisk kjerneboring i hele den undersjøiske traséen. Dette viste seg å gi nyttige erfaringer og god forutsigbarhet under driving av en tunnel der det var knyttet stor usikkerhet til en av bergartene som det skulle drives gjennom.

### **2.4.4 Generelt**

Alle undersøkelser som utføres under driving er med på å skaffe ny informasjon om de geologiske forholdene foran stuff. Dette medfører kontinuerlig oppdatering av geologisk modell utarbeidet fra forundersøkelsene, og usikkerheten knyttet til bergforholdene langs tunneltraséen reduseres. Når flere opplegg for undersøkelser benyttes, kan de verifisere og supplere hverandre.

Tilstedeværelse i tunnelen i form av kartlegging på stuff gir grunnleggende geologisk forståelse. Sammen med erfaring er dette avgjørende for at nytteverdien av de andre undersøkelsene skal bli høyest mulig. Omfanget av undersøkelser i drivefasen bestemmes ut fra de generelle sikkerhetskravene som er gitt undersjøiske tunneler, i tillegg til kontinuerlige vurderinger underveis basert på de kartlagte forholdene. Undersøkelser under driving kan være både tidkrevende og kostbart, men kan ha høy nytteverdi

---

ved at prosjektet blir spart for uønskede hendelser som i verste fall medfører at prosjektet ikke kan gjennomføres. Samtidig er det unødvendig å utføre mye ekstra undersøkelser som ikke supplerer med nyttig informasjon. Omfanget av undersøkelser må vurderes i hvert enkelt tilfelle, der målet er å oppnå en tilfredsstillende geologisk modell og et akseptabelt sikkerhetsnivå før videre driving. Da vil undersøkelser under driving ha høy nytteverdi.

**Tabell 2.2: Oversikt over fordeler og begrensninger med de ulike oppleggene for undersøkelser under driving av undersjøiske tunneler (Birkeli, 2019).**

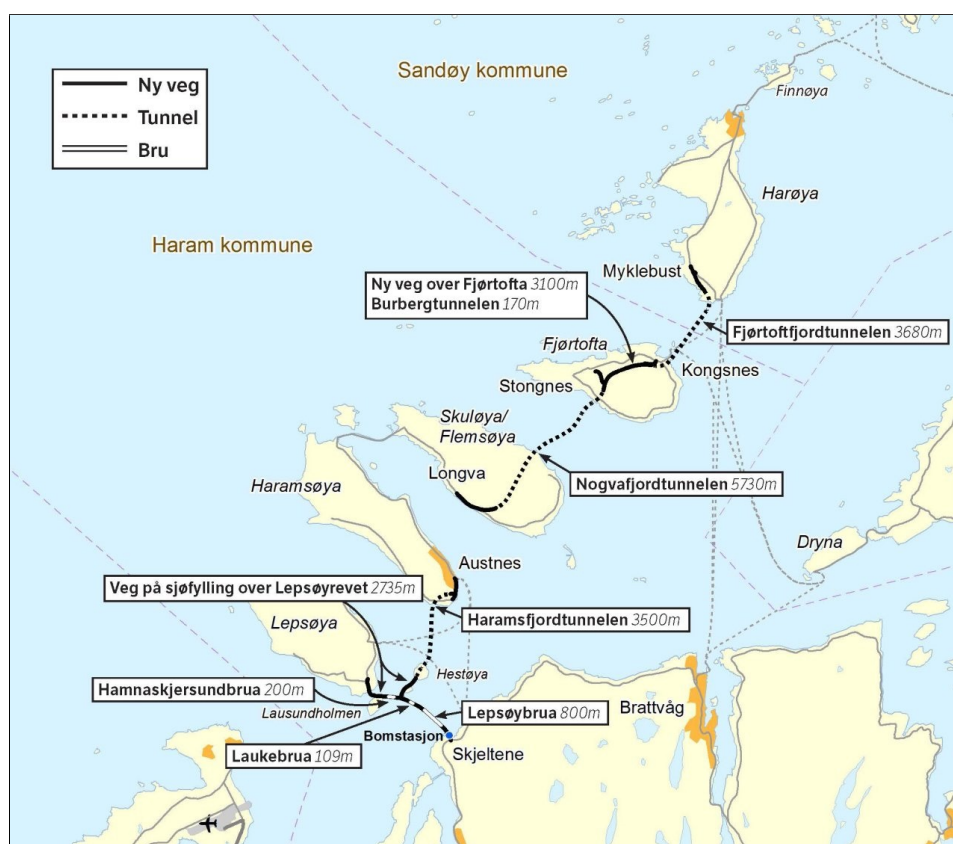
UNDERSØKELSESMETODER	FORDELER	BEGRENSNINGER
<b>Kartlegging i tunnelen</b> («Byggherrens halvtime»)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Lettere å gjøre gode avgjørelser for videre driving når man er tilstede i tunnelen og observerer de virkelige forholdene</li> <li>- Raskt og billig</li> <li>- Digital registrering: Slipper dobbeltregistrering. Mulighet til å se tidligere registreringer fra andre skift</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Er subjektive vurderinger</li> <li>- Vær obs på at noen sprekker kan være sprengningsinduserte</li> <li>- Kan bare rapportere én Q-verdi i Novapoint Tunnel</li> <li>- Dobbeltregistrering ved kartlegging med penn og papir</li> <li>- Sammenheng mellom Q-verdi og sikring er empirisk utledet fra tilfeller med hardt, oppsprukket berg</li> </ul>
<b>Sonderboring med slaghammer, inkl. MWD og DPI</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dårlige forhold kan oppdages tidnok ved systematisk sonderboring, jf. Bjørøytunnelen</li> <li>- Kan pr. 2019 oppnå tolkede MWD-resultater innen 5-10 min dersom det er WiFi på stoff</li> <li>- MWD/DPI gir dokumentasjon av berggrunnen, forbedrer geologisk modell. Bra mtp. vedlikehold og evt. nabotunnel</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kan unngå å treffe svakhets- og vannbærende soner</li> <li>- Vær obs på at vannforhold i bergmassen kan endre seg over tid</li> <li>- MWD/DPI kan ikke utnyttes under driving dersom resultatene ankommer sent</li> <li>- Dårlig kalibrering gir usikre MWD-resultater</li> <li>- MWD krever WiFi</li> </ul>
<b>Kjerneboring</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gir et tydelig visuelt resultat (kjerner)</li> <li>- Fungerer bra for beskrivelse av innholdet i og orienteringen til vanskelige soner som oppdages underveis</li> <li>- Kan benyttes til kartlegging av bredden til problemsoner</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kostbart og tidkrevende</li> <li>- Vurderinger av kjernene er subjektive og krever erfaring</li> <li>- Noen få kjerner skal representere hele bergmassen – kan unngå å treffe viktige geologiske strukturer</li> <li>- Orientering til strukturer i kjernene kan ikke bestemmes</li> </ul>
<b>Deformasjonsmålinger</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Oppnår et konkret resultat der opplegget er installert</li> <li>- Resultater kan gi mulighet til å utføre ekstra sikring før ustabiliteter utvikler seg videre</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Oppdager bare ustabiliteter der opplegget er installert</li> <li>- Resultatene kan bli forstyrret av injeksjonsarbeid lenger framme</li> <li>- Målepunkter kan bli ødelagte</li> </ul>
<b>Geofysikk foran stoff:</b> TSP GPR IRT	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Oppnår resultater fra et stort område foran stoff (TSP)</li> <li>- Trenger ikke direkte tilgang til stoff (TSP)</li> <li>- Måler in-situ forhold, bergmassen er ikke påvirket av sprengning</li> <li>- Raske og relativt billige metoder</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Støyende arbeid i tunnelen må stoppe idet TSP-målinger utføres</li> <li>- Penetrasjonsdybde til TSP varierer med bergmassens oppsprekking</li> <li>- TSP gir bergartsparmetre i forhold til referanseverdi ved stoff</li> <li>- GPR oppdager hovedsaklig bare hulrom og grunnvann</li> <li>- IRT oppdager hovedsaklig bare grunnvann</li> <li>- Krever høye ferdigheter innen tolkning</li> <li>- Kan ikke erstatte andre metoder, er et supplement</li> </ul>

## 3 | Nordøyvegen

### 3.1 Prosjektbeskrivelse Fv. 659 Nordøyvegen

#### 3.1.1 Generelt

Fv. 659 Nordøyvegen gir fastlandsforbindelse til rundt 2700 innbyggere på Nordøyane i Ålesund kommune (tidligere Haram og Sandøy kommune) (Møre og Romsdal fylkeskommune, 2020d). Nordøyane består av de fem øyene Lepsøya, Haramsøya, Skuløya/Flemsøya, Fjørtofta og Harøya, og de har i dag to fergeforbindelser og én hurtigbåtforbindelse. Fastlandsforbindelsen vil sørge for et mer forutsigbart og fleksibelt transportsystem, både for private og næringslivet. Nordøyane vil bli knyttet nærmere sammen innad i øysamfunnet og med resten av Ålesund kommune.



Figur 3.1: Kart over Fv. 659 Nordøyvegen (Møre og Romsdal fylkeskommune, 2020d).

Nordøyvegen har ifølge Møre og Romsdal fylkeskommune (2020d) en total kostnad på 4,9 milliarder kroner og er det største vegprosjektet i Møre og Romsdal noensinne. Prosjektet omfatter følgende, som vist i figur 3.1:

- Lepsøybrua (800 m) fra Skjeltene på fastlandet til sjøfylling på Lauka ved Hestøya.
- Laukebrua (109 m) og Hamnaskjersundbrua (200 m) som forbinde sjøfylling på Lauka med Lepsøya.
- Veg på sjøfylling over Lepsøyrevet (totalt 2735 m).
- Haramsfjordtunnelen (3500 m) fra Hestøya til Austnes på Haramsøya.

- Nogvafjordtunnelen (5730 m) fra Longva på Skuløya/Flemsøya til Fjørtofta sør.
- Ny veg over Fjørtofta (3100 m).
- Burbergtunnelen (170 m) på Fjørtofta, en miljøtunnel for å verne om hubro i området.
- Fjørtoftfjordtunnelen (3680 m) fra Fjørtofta nord til Myklebust på Harøya.

Fastlandforbindelse for Nordøyane har vært planlagt over lang tid. De første idéene om bru fra Skjeltene til Lepsøya kom allerede i 1963 (NRK, 2018). Dette utviklet seg videre til idéen om fastlandsforbindelse til de resterende øyene med undersjøiske tunneler. I 1988 utførte samarbeidsgruppen Blindheim - Lorgen - Norconsult en vegutredning for fergefri forbindelse til Nordøyane på oppdrag fra Statens vegvesen (Blindheim, Sam Lorgen A/S og Norconsult, 1988). Det ble da sett på hvilken samfunnsnytte fastlandsforbindelsen ville gi, finansieringsmulighetene og aktuelle traséer. Det skulle likevel ta lang tid før byggingen av Nordøyvegen ble realisert. Etter mange runder med kostnadssprekk og utsettelse, startet prosjektet opp i september 2017, med oppstart av tunneldrivingen i mars 2019 (Møre og Romsdal fylkeskommune, 2020d). Statens vegvesen var byggherre fram til Møre og Romsdal fylkeskommune overtok 1. januar 2020. Skanska Norge AS er hovedentreprenør. Planlagt åpning av Nordøyvegen er i mai 2022.

### 3.1.2 Undersjøiske tunneler

Videre i denne masteroppgaven fokuseres det på de tre undersjøiske tunnelene langs Nordøyvegen. Tabell 3.1 viser lengde, dypeste punkt og minste bergoverdekning for henholdsvis Haramsfjordtunnelen, Nogvafjordtunnelen og Fjørtoftfjordtunnelen. Alle drives med tverrsnitt T8,5 som gir vegbredde på 6,5 m (Karlson og Grob, 2018a,b,c). Tunnelklassen bestemmes ut fra tunnellengde og trafikkmengde målt i årsdøgntrafikk (ÅDT) som forventes 20 år etter åpning (Statens vegvesen, 2020a). De undersjøiske tunnelene ved Nordøyvegen har tunnelklasse B, som tilsvarer en trafikkmengde på ÅDT = 4000.

**Tabell 3.1: Lengde, dypeste punkt og minste bergoverdekning til de tre undersjøiske tunnelene ved Nordøyvegen (Karlson og Grob, 2018a,b,c).**

Tunnel	Lengde	Dypeste punkt	Minste bergoverdekning
Haramsfjordtunnelen	3500 m	113 m.u.h.	ca. 24 m
Nogvafjordtunnelen	5730 m	135 m.u.h.	ca. 25 m
Fjørtoftfjordtunnelen	3680 m	126 m.u.h.	ca. 25 m

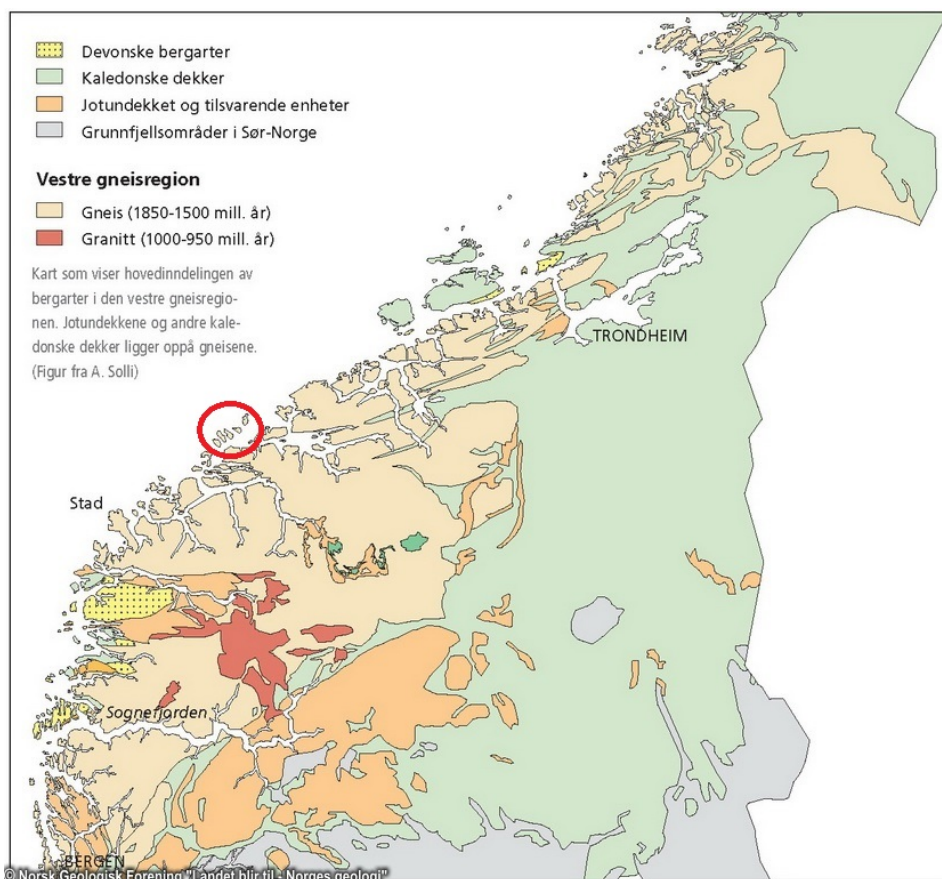
Tabell 3.2 viser tidspunkt for oppstart av tunneldriving ved de seks stoffene, samt hvor stor andel av tunnelene som var drevet ved oppstart av masteroppgaven i midten av januar 2020 og mot masterslutt i mai 2020. Driving fra Hestøya rekker ikke å komme under sjøen i løpet av masteroppgaven, og driving fra Myklebust starter etter masteroppgaven er levert. Dermed er det de resterende fire stoffene som blir fokusområde videre.

Tabell 3.2: Oversikt over tidspunkt for oppstart ved tunnelstøffene og hvor stor andel av tunnelene som var drevet ved oppstart og mot avslutning av masteroppgaven (Møre og Romsdal fylkeskommune, 2020c).

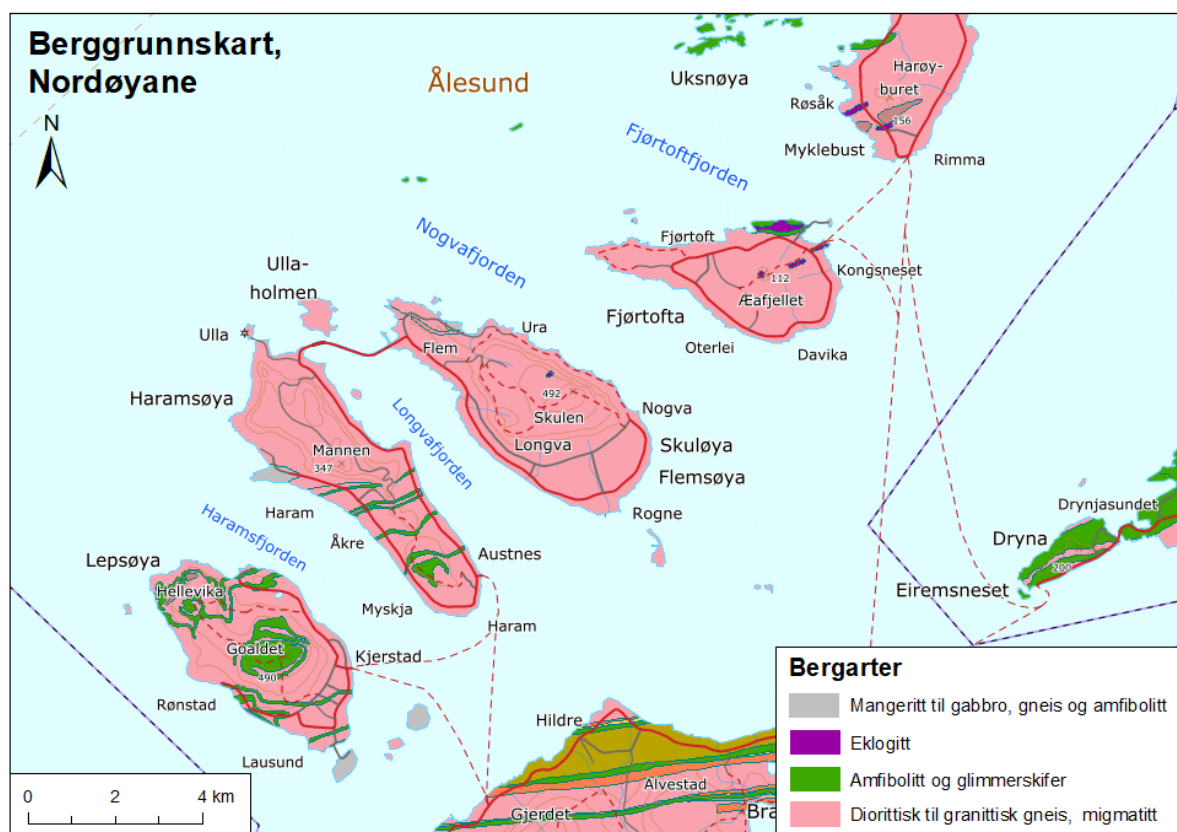
Tunnel	Påhugg	Oppstart driving	Drevet per 13. jan. 2020	Andel drevet per 13. jan. 2020	Drevet per 15. mai 2020	Andel drevet per 15. mai 2020
Haramsfjordtunnelen	Hestøya	Jan. 2020	0 m	31 %	565 m	60 %
	Austnes	Mar. 2019	1099 m		1536 m	
Nogvafjordtunnelen	Longva	Mar. 2019	789 m	28 %	1048 m	43 %
	Fjørtofta S	Mai 2019	829 m		1433 m	
Fjørtoftfjordtunnelen	Fjørtofta N	Mar. 2019	1225 m	33 %	1906 m	52 %
	Myklebust	Jun. 2020	0 m		0 m	
<b>TOTALT</b>			3942 m	31 %	6488 m	50 %

### 3.2 Regionalgeologi

Nordøyane er en del av det geologiske området som kalles for *den vestre gneisregionen* (Nordgulen og Andresen, 2013). Regionen ligger mellom Sogn og Nord-Trøndelag, og vest for de kaledonske skyvedekkenene. Se figur 3.2. Her finnes grunnfjell av prekambrisk alder som er sterkt påvirket av den kaledonske fjellkjedefoldningen for 400-500 millioner år siden. Berggrunnen består hovedsaklig av granittiske gneiser og migmatitter. I migmatittene kan det forekomme lag og linser med glimmerrike gneiser og amfibolitt.



Figur 3.2: Regionalgeologisk kart med bergartsinndeling. Nordøyane er markert med rød sirkel. Gneisene er omdannet grunnfjell og ligger underst. Fra Nordgulen og Andresen (2013) (figur fra A. Solli).

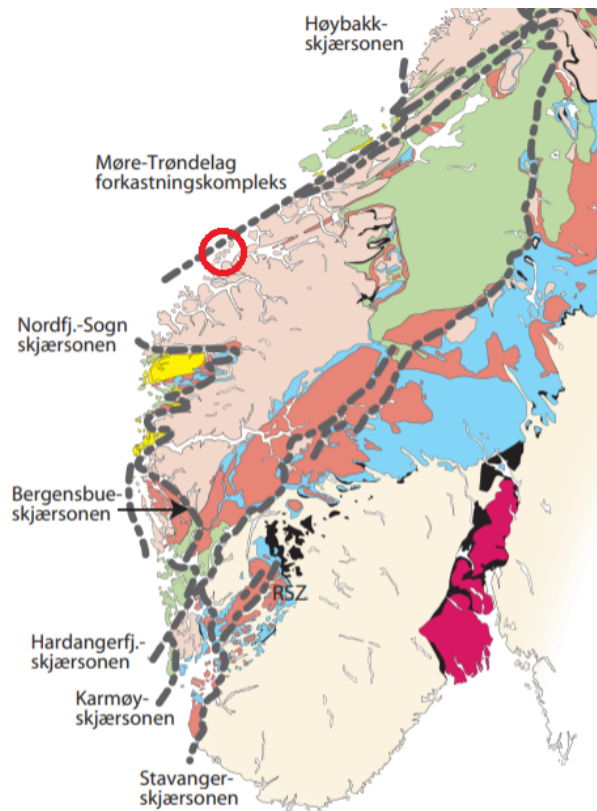


**Figur 3.3:** Berggrunnskart over Nordøyane, bearbejdet i programvaren ArcMap basert på «Berggrunn 250» fra NGU (2020a). «Topografisk Norgeskart» fra Kartverket (2020) er benyttet som bakgrunnskart.

En mer nøyaktig beskrivelse av geologien langs Nordøyvegen fremkommer av NGUs berggrunnskart N250 (målestokk 1:250 000), som er vist i figur 3.3. Her beskrives den dominerende bergarten som «diorittisk til granittisk gneis, migmatitt». På Haramsøya og Fjørtofta forekommer det i overflaten lag og linser i gneisen med «amfibolitt og glimmerskifer». På Fjørtofta, Harøya og Skuløya/Flemsøya forekommer det linser med eklogitt. Eklogitt er en høymetamorf bergart som dannes under høye trykk og temperaturer på store dyp. Bergarten er et resultat av at grunnfjellet ble presset ned i dypet og omdannet under den kaledonske fjellkjedefoldningen, og ført opp igjen til overflaten da fjellkjeden kollapset og kontinentplatene drev fra hverandre. På Fjørtofta er det også gjort funn av mikrodiamanter i gneisene, som antas å ha blitt dannet på over 100 kilometers dyp (Fossen *et al.*, 2013). Dette vitner også om hvilke store krefter bergartene på Nordøyane har vært utsatt for. På Hestøya består berggrunnen primært av gabbro, noe som skiller seg ut fra resten av området rundt tunneltraséene.

Nordøyane ligger på randen av Møre-Trøndelag forkastningskompleks (MTF), en sidelengs skjærsone med orientering NØ-SV som strekker seg langs mørekysten mot Snåsa. Se figur 3.4. Ved MTF foregikk det sidelengs bevegelse da de kaledonske skyvedekkene ble strekt under fjellkjedekollapsen i devon (Fossen, Dallman og Andersen, 2013). Det er mulig at svakhetssoner som krysser Nordøyvegen tilhører dette forkastningskomplekset.





Figur 3.4: Devonske skjærsoner. Nordøyane er markert med rød sirkel og ligger på randen av Møre-Trøndelag forkastningskompleks, MTF (Fossen, Dallman og Andersen, 2013).

---

## 4 | Forundersøkelser ved Nordøyvegen

Dette kapitlet tar for seg forundersøkelsene ved de undersjøiske tunnelene ved Nordøyvegen. Først kommer en kort og generell beskrivelse av hensikten med og oppbyggingen av forundersøkelser i avsnitt 4.1. Videre presenteres utførte grunnundersøkelser langs Nordøyvegen hver for seg i avsnitt 4.2. Avslutningsvis kommenteres undersøkelsesomfanget i avsnitt 4.3.

### 4.1 Generelt

Formålet med forundersøkelsene er først å oppnå et grunnlag for å vurdere prosjektets gjennomførbarhet og vanskelighetsgrad (Statens vegvesen, 2020a). Deretter er formålet å kartlegge de ingeniørgeologiske forholdene på tunnelnivå. En kombinasjon av resultater og tolkninger fra alle forundersøkelsene blir grunnlag for en geologisk modell langs tunneltraséene, samt prognoser for bergmassekvalitet og sikringsomfang. Den geologiske modellen oppdateres underveis etter hvert som nye opplysninger om forholdene foran stoff avdekkes under driving.

Forundersøkelsene til et prosjekt deles inn i forprosjekt og detaljstudier (Nilsen, 2016):

- Ved forprosjektet vurderes gjennomførbarheten av prosjektet. Tilgjengelige kart, rapporter og flybilder studeres («desk study»). Besøk til nærliggende tunneler eller bergrom er nyttig for å samle erfaringer fra driving under tilsvarende geologiske forhold. Enkeltbefaring til nøkkelpunkter langs traséen for en første vurdering av ingeniørgeologiske forhold kan utføres.
- Detaljundersøkelsene er den mest omfattende delen av forundersøkelsene. Den omfatter geofysiske undersøkelser, boringer, grundig ingeniørgeologisk feltkartlegging og laboratorietester av innsamlede prøver. Basert på disse resultatene og tolkningene utarbeides ingeniørgeologisk rapport for konkurransegrunnlag, som inngår i anbudsdocumentene.

Forundersøkelser utføres trinnvis. Det vil si at neste grunnundersøkelse baseres på resultatet fra forrige. Det er viktig å utføre undersøkelsene i riktig rekkefølge for å få mest mulig informasjon ut av dem. Basert på forprosjektet blir det bestemt om prosjektet kan gjennomføres, og kritiske punkter som krever ekstra kartlegging fastsettes. Deretter kan disse kritiske områdene undersøkes nærmere under detaljundersøkelsene. God planlegging og gjennomføring av forundersøkelsene er avgjørende for bedre forutsigbarhet, både geologisk og økonomisk.

### 4.2 Utførte forundersøkelser ved Nordøyvegen

Under forstudiet til Nordøyvegen har topografiske kart og flybilder blitt studert før grunnundersøkelsene ble utført (Karlson og Grob, 2018a,b,c). Dette ga en oversikt over lineamenter i terrenget som kunne undersøkes nærmere med grunnundersøkelser.

Tabell 4.1 viser en oversikt over utførte grunnundersøkelser før byggestart av Nordøyvegen. Følgende

presentasjon av disse er en sammenstilling av informasjonen i de utarbeidede geologiske rapportene for konkurransegrunnlag (Karlson og Grob, 2018a,b,c), og tar også for seg hvilke opplysninger metodene har gitt samt hvilke begrensninger de kan ha. Prinsipp for hvordan undersøkelsene utføres presenteres ikke, da det antas at dette er kjent for leseren.

**Tabell 4.1: Oversikt over utførte grunnundersøkelser for de undersjøiske tunnelene langs Fv. 659 Nordøyvegen. Sammenstilt fra tilgjengelig grunnlagsmateriale under befaring til prosjektet.**

Grunnundersøkelser	Utført av	Årstall
Akustikk	Geomap Norge AS	2001
Refraksjonsseismikk	Geoteam	1988
	Geomap Norge AS	2001, 2002, 2010, 2011, 2012, 2016
Magnetisk og batymetrisk sjøbunnskartlegging	NGU	2011
Berggrunnsgeologisk og strukturgeologisk kartlegging ved Brandalsryggen	NGU	2011
Ingeniørgeologisk feltkartlegging	Statens vegvesen	2012
Styrt kjerneboring	Entreprenørservice AS, Devico	2012
Kjernelogging	Norconsult	2012
Tynnslipmikroskopering av kjerneprøver	SINTEF	2012
Vanntapsmålinger i kjernehull	Geodrilling	2012
Seismisk tomografi	Geomap Norge AS	2016
Grunnboringer	Statens vegvesen	2010, 2015, 2016, 2017
Kontrollboring	Statens vegvesen	2017

#### 4.2.1 Akustikk

Langs alle de undersjøiske delene av traséene ble det utført akustikk (refleksjonsseismikk) av Geomap AS i tidlig planfase i 2001. Ved akustisk profilering kan store områder kartlegges på kort tid. Metoden gir løsmassetykkelse og dybde til bergoverflaten. Fra disse målingene utarbeides det kotekart og profiler over sjøbunnsstopografien under sedimentene (Statens vegvesen, 2020b). Det er viktig å være klar over kunstige effekter fra refleksjonene, som multipler, bowties, punktrefektorer og diffraksjon (NGU, 2020b). Gjennom omfattende prosessering fjernes mesteparten av disse negative effektene. Likevel er sammenligning med resultater fra eventuelt andre undersøkelser og god geologisk forståelse essensielt for å oppdage eventuelle gjenværende kunstige effekter og komme fram til en god geologisk modell.

Siden undersjøiske tunneler skal planlegges ut fra krav om minste bergoverdekning på 50 m, er akustisk profilering viktig for å kartlegge gjennomførbarheten langs mulige traséer (Statens vegvesen, 2020b). På bakgrunn av resultatene fra akustikken velges det ut noen potensielle tunneltraséer som undersøkes grundigere med refraksjonsseismikk.

---

## 4.2.2 Refraksjonsseismikk

Refraksjonsseismikk er utført langs alle tunneltraséene i helhet, unntatt delen av Nogvafjordtunnelen som går under fjellet Skulen på Skuløya/Flemsøya. Geoteam utførte refraksjonsseismiske undersøkelser på land ved Austnes i 1988. Ellers er det Geomap AS som har utført all refraksjonsseismikk på land og under Haramsfjorden, Nogvafjorden og Fjørtoftfjorden. Målingene er utført i flere omganger, først i 2001 (sjø) og i 2002 (land). Deretter er supplerende refraksjonsseismiske målinger utført i 2010, 2011, 2012 og 2016. Tabell 4.2 viser omfanget av utført refraksjonsseismikk for de undersjøiske delene av tunneltraséene ved Nordøyvegen. Dekningsgraden varierer mellom 1,5 og 1,8, og anses som normal dekningsgrad ifølge Nilsen (2020).

**Tabell 4.2: Utførte løpemeter (lm) med refraksjonsseismikk for de undersjøiske delene av tunneltraséene og tilhørende dekningsgrad (Karlsen og Grob, 2018a,b,c).**

Tunnel	Utført refraksjonsseismikk	Undersjøisk lengde	Dekningsgrad
Haramsfjordtunnelen	4000 lm	2200 lm	1,8
Nogvafjordtunnelen	4200 lm	2800 lm	1,5
Fjørtoftfjordtunnelen	4100 lm	2530 lm	1,7

Tolkninger fra refraksjonsseismiske undersøkelser gir dybde til fast fjell og seismiske hastigheter i både løsmasser og berg (Statens vegvesen, 2020b). Lavhastighetssoner kan tolkes som svakhetssoner.

Mulige feilkilder til refraksjonsseismikken kan være (NGU, 2020c):

- **Hastighetsinversjon:** For å tolke refraksjonsseismikken riktig, forutsettes det at hastigheten i grunnen øker med dypet. Dette er et krav for at bølgene skal refrakteres fra et grensesjikt, som er prinsippet refraksjonsseismikken baseres på. Hastighetsinversjon skjer når hastigheten avtar fra ett lag til det neste nedover i dypet, og bølgene vil ikke brytes og registreres fra dette grensesjiktet.
- **Blindsonelag:** Hastigheten øker mot dypet som forutsatt, men et lag er så tynt at bølgene fra det underliggende laget ankommer mottakeren først. Det tynne laget blir dermed oversett.
- **Manglende kontrast:** En laggrense overses fordi lagene har lik seismisk hastighet til tross for ulik geologi.
- **Geofonavstand:** For stor avstand mellom geofonene kan resultere i at et lag overses.
- **Siderefraksjon:** Dersom laggrensen mellom løsmasser og fjell ikke er tilnærmet horisontal, kan tolket *dybde* til fjell bli mindre ved at det heller er *avstanden* til fjellet som vises. Siderefraksjon gjør også at svakhetssoner i dype og trange depresjoner kan være vanskelige å oppdage på grunn av mangel på signaler fra bunnen av sonen. Ved å sammenligne refraksjonsseismikken med akustiske målinger og seismisk tomografi, kan eventuelle feil oppdages.

Refraksjonsseismikken avslører ikke hva en lavhastighetszone består av (Palmstrøm *et al.*, 2003). Det er derfor usikkert om en sone for eksempel består av tett oppsprukket bergmasse uten leire eller om det er en svakhetszone med svelleleire. Dersom det finnes en skarp depresjon i fjelloverflaten, har en blind-

---

test utført av Westerdahl (2003) vist at refraksjonsseismikk vil tolke denne som en svakhetsone mot dypet med mulig forvitring øverst. Dette behøver ikke å stemme med virkeligheten, og kan resultere i en feilvurdering ved at det tolkes verre bergmasseforhold enn det i virkeligheten er. Uoverensstemmelsen kommer av at det finnes flere modeller som kan tilfredsstillende de refraksjonsseismiske målingene på grunn av begrenset datagrunnlag. I de fleste tilfeller er det stor sannsynlighet for at en tydelig depresjon i fjelloverflaten er begynnelsen på en svakhetsone mot dypet. Poenget er at det viktig å være klar over at tolkingene fra de refraksjonsseismiske målingene ikke er en 100 % korrekt fasit over bergmasseforholdene, til tross for at metoden har vist seg å gi mange gode tolkninger i tidligere prosjekter. Også ved kabelheng, som er at en del av kabelen med geofoner henger fritt i vannet utfor en bratt skrent, kan det tolkes verre bergmasseforhold enn det er i virkeligheten (Westerdahl, 2003). Dette kan skje dersom sjøbunnstopografien ikke er kartlagt med tilstrekkelig nøyaktighet med akustikk. Da kan seismisk operatør tro at kabelen ligger langs sjøbunnen, mens den i ett punkt henger fritt i vannet. Siden lydsignalene da må spres gjennom vannet før de når sjøbunnen, vil de bruke lengre tid til mottaker. Dette medfører at tolket seismisk hastighet reduseres.

En annen begrensning er at refraksjonsseismikken bare beskriver forholdene i bergmassen nær overflaten (Rønning, 2003). Basert på forholdene i de øverste metrene, tolkes forholdene videre under. Det er utfordrende å følge svakhetssoner mot dypet, anslå deres orientering og forutse forholdene på tunnelnivå. Sammenstilling med seismisk tomografi og styrt kjerneboring kan redusere denne usikkerheten.

#### **4.2.3 Styrt kjerneboring**

Entreprenørservice AS har i 2012 bort tre retningsstyrte kjerneboringer ved Nordøyvegen, ett for hver tunnel. Devico har hatt ansvar for retningsstyringen av hullene. Kjerneboringene er utført i strandsone og ved begynnelsen av undersjøisk trasé, siden det er knyttet ekstra stor usikkerhet til forholdene her grunnet liten bergoverdekning. Ved å styre kjerneboringen kan hullene følge tenkt tunneltrasé i størst mulig grad fram til ønsket punkt (Palmstrøm *et al.*, 2003). Dette er mer kostbart enn konvensjonell kjerneboring, og det er derfor viktig å få mest mulig informasjon fra prøvene gjennom grundig kjernelogging. Ved logging av kjernene fra Nordøyvegen er observasjoner som bergartstype, sprekkefylling, kjerne- tap og bergmasseparametre til Q-verdien registrert, etter kravene i *Håndbok V520 «Tunnelveiledning»* (Statens vegvesen, 2020b). Bergartsgrenser og pegmatittganger er observert. Ut fra RQD-verdier er svakhetssoner identifisert (Karlson og Grob, 2018a,b,c). Dette er deretter sammenstilt med tolkningene fra refraksjonsseismikken. Kjerneloggingen ble utført av Norconsult i 2012.

Kjerneboring er et nålestikk i bergmassen, og viser bare hvordan forholdene er i en liten andel av tunneltraséen. Svake strukturer i bergmassen som har liten vinkel til kjerneboringen kan følge det over en lengre strekning enn strukturer som er normalt på hullet. Dette er med å påvirke resultatene fra kjerneloggingen.

Tabell 4.3 gir oversikt over de tre styrte kjerneboringhullene, BH1-BH3 (Karlson og Grob, 2018a,b,c). Fra

Tabell 4.3: Retningsstyrte kjerneboringer utført ved Nordøyvegen (Karlson og Grob, 2018a,b,c).

Hull-ID.	Tunnel	Start boring	Retning	Lengde
BH1	Haramsfjordtunnelen	Hestøya	NØ	515 m
BH2	Fjørtoftfjordtunnelen	Myklebust, Harøya	SSV	552 m
BH3	Nogvafjordtunnelen	Fjørtofta sør	SV	445 m

hvert hull er det tatt ut 12 prøver fra fire ulike dybder i hullet. Disse ble sendt videre til SINTEF for tynnslipmikroskopering og bestemmelse av mineralinnhold i 2012. Dette er nyttig for å analysere de mekaniske egenskapene til noen av bergartene som tunnelene skal drives i. Mesteparten av tunnelene er antatt til å gå gjennom gneisbergarter. Tynnslipmikroskoperingen har vist at gneisen inneholder omtrent 25% av slitasjemineralet kvarts. Ellers varierer innholdet av andre slitasjemineraler, som epidot (0-5%), titanitt (spor-1%), granat (0-2%) og zirkon (spor). Av slitasjemineraler inneholder amfibolitten varierende mengde kvarts (0-15%), epidot (0-2%) og granat (0-15%). Metagabbroen på Hestøya inneholder slitasjemineralene granat (5%) og (titano-)magnetitt (2%). Til tross for en viss andel slitasjemineraler i bergartene, antas abrasiviteten som middels (tilsvarer normal slitasje på borutstyret).

#### *Vanntapsmålinger i kjerneborhull*

Geodrilling har i 2012 utført vanntapsmålinger med både enkelt- og dobbeltpakker i de tre kjerneborhullene. Formålet var å kartlegge lekkasje i bergmassen for å kunne forutsi muligheten for vannlekkasje under driving. Resultatene er omregnet til Lugeon-verdier, som er vanntap i liter per minutt per meter borhull ved et overtrykk på 1 MPa (10 bar) (Palmstrøm *et al.*, 2003). For grundigere beskrivelse og resultater henvises det til de ingeniørgeologiske rapportene for konkurransegrunnlag (Karlson og Grob, 2018a,b,c).

#### **4.2.4 Seismisk tomografi**

Seismisk tomografi kan gi en oversikt over svakhetssoner og bergmassekvalitet mellom borhull og sjøbunn, som representeres ved seismiske hastigheter (Statens vegvesen, 2020b). Metoden er bedre egnet enn vanlig refraksjonsseismikk når strukturene i berggrunnen er veldig heterogene, og vil resultere i en mer detaljert tolkning (NGU, 2020d).

Ved Nordøyvegen utførte Geomap AS seismisk tomografi mellom hvert av de tre kjerneborhullene og sjøbunnen i 2016. Ladninger ble plassert i borhull og hydrofoner på sjøbunnen. For Haramsfjordtunnelen dekker metoden 400 m av den undersjøiske traséen, og for Fjørtoftfjordtunnelen og Nogvafjordtunnelen dekker metoden henholdsvis 280 m og 390 m av de undersjøiske traséene (Karlson og Grob, 2018a,b,c). For alle tilfellene viser tomografien god overensstemmelse med antatte svakhetssoner fra refraksjonsseismikken og kjerneloggingen i første halvdel av hullet. Bergmassekvaliteten lengre innover i hullene stemmer derimot ikke helt overens med refraksjonsseismikken og kjerneloggingen, da den blir dårligere. Likevel er det ikke noe grunnlag for å si at tomografien viser store avvik som vil få konsekvenser for gjennomførbarheten av tunnelene, verken når det gjelder bergmassekvaliteten eller

---

bergoverdekningen. Den seismiske tomografien har i stor grad vært med på å bekrefte tolkningene fra refraksjonsseismikken og kjerneloggingen.

#### **4.2.5 Ingeniørgeologisk feltkartlegging**

Ved Nordøyvegen har Ganerød og Lutro (2011) fra NGU utført berggrunnsgeologisk og strukturgeologisk kartlegging, med ekstra fokus på den ustabile Brandalsryggen ved Longva på Skuløya/Flemsøya. Basert på vurderingene fra kartleggingen ble traséen til Nogvafjordtunnelen lagt utenfor dette partiet, noe som resulterte i omtrent 1 km lengre tunnel (Karlson, 2020). I 2012 utførte *Berg- og geoteknikk-seksjonen* til Statens vegvesen Region midt ingeniørgeologisk feltkartlegging ved de ikke-undersjøiske delene av traséene, der det er tilgjengelige bergblotninger.

Under feltkartlegging registreres bergblotninger, bergarter og eventuelle bergartsgrenser (Statens vegvesen, 2020b). Strukturer i bergmassen beskrives, som sprekker, folder og foliasjon. Måling av strukturenes orientering gir et inntrykk av hvilke sprekesett som er fremtredende og som kan antas å fortsette også i traséenes undersjøiske del. Sprekkes tetthet, utholdenhet, ruhet og fylling er også viktige opplysninger, særlig med tanke på stabilitetsvurderinger. Svakhetssoner som har blitt observert under forstudiet kartlegges. Løsmasseforhold, hydrogeologiske forhold og eventuell skred- og flomfare vurderes også.

Bergblotningene som studeres er dagberg som er påvirket av forvittringsprosesser. Dette gjør at sprekefylling kan være vasket bort, oppsprekingsgraden kan være større og bergmassens karakter kan være annerledes sammenlignet med lengre ned mot dypet. Den største begrensningen ved ingeniørgeologisk feltkartlegging, er usikkerheten knyttet til overføring av observerte bergmasseforhold i dagen til antatte bergmasseforhold på tunnelnivå. Dette blir ekstra utfordrende ved kompliserte tektoniske forhold, eller dersom stor løsmassemekktighet, tett bebyggelse eller vann begrenser bergblotninger som kan kartlegges (Palmstrøm *et al.*, 2003). For tunnelene ved Nordøyvegen er det vann som begrenser tilgangen til bergoverflaten, og dermed blir det ekstra utfordrende å anta bergmasseforholdene på tunnelnivå i de undersjøiske delene.

Resultatene og tolkningene fra den ingeniørgeologiske feltkartleggingen ved Nordøyvegen er beskrevet i de nevnte geologiske rapportene for konkurransegrunnlag (Karlson og Grob, 2018a,b,c). I det følgende kommer en oppsummering av bergarter, strukturelle forhold og diverse ingeniørgeologiske vurderinger langs tunneltraséene som anses som interessante for masteroppgaven.

#### ***Bergarter***

I forbindelse med grundig berggrunns- og strukturgeologisk kartlegging rundt Brandalsryggen, ble det utarbeidet et berggrunnsgeologisk kart over Nordøyane basert på tidligere feltkartlegginger, se vedlegg A (Ganerød og Lutro, 2011). Denne kartlagte bergartfordelingen stemmer godt overens med den beskrevne geologien fra NGUs berggrunnskart N250 i avsnitt 3.2, men inneholder i tillegg grenser mellom



de ulike gneistypene.

### Strukturelle forhold

Siden det er totalt seks sprekkeroser med målinger (en for hvert påhuggsområde), har jeg valgt å sammenstille resultatene fra disse i tabell 4.4. Strukturmålingene viser stor variasjon i strøk og fall. Gneisene har varierende foliasjonsretning (F1), som vitner om myk deformasjon. Det er kartlagt fem gjennomsettende strukturer (S1-S5) som er dannet av sprø deformasjon. Sprekkesett S1 og S2 opptrer på Haramsøya, Skuløya/Flemsøya, Fjørtofta og Harøya. Sprekkesett S3, S4 og S5 er mest fremtredende i gabbroen på Hestøya, og i mindre grad på resten av øyene. Det finnes også sporadiske og mindre gjennomsettende strukturer. For grundigere beskrivelse av strukturene og kartlegging av svakhetssoner ved påhuggene, henvises det til de ingeniørgeologiske rapportene for konkurransegrunnlag (Karlson og Grob, 2018a,b,c)

**Tabell 4.4: Strøk og fall til gjennomsettende strukturer på Nordøyane. Legg merke til den varierende foliasjonsretningen F1, som tilhører gneisene. Sammenstilt fra Karlson og Grob (2018a,b,c).**

	F1	S1	S2	S3	S4	S5
<b>Hestøya</b>				011/68 Ø	253/65 N	310/78 NØ
<b>Haramsøya</b>	053/3 SØ	032/76 SØ	160/69 SV			
<b>Skuløya/Flemsøya</b>	060/77 SØ – 133/85 SV, 247/72 N – 327/53 NØ	035/50 SØ 049/89 SØ	148/83 SV		273/79 N, 091/80 S – 084/77 S	
<b>Fjørtofta</b>	053/90 SØ – 088/85 S, 266/66 N	031/31 SØ	161/78 SV	011/68 Ø		
<b>Harøya</b>	260/54 N	040/64 SØ	176/85 V		091/80 S – 084/77 S	348/63 NØ

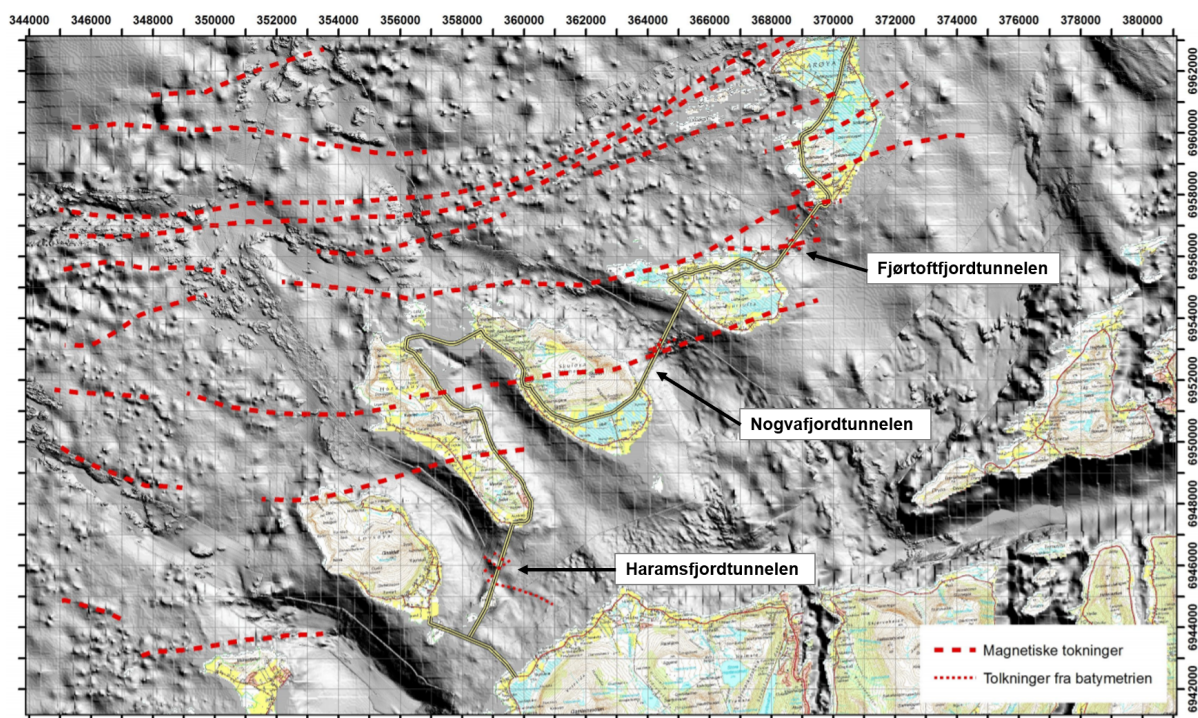
### Ingeniørgeologiske vurderinger

På bakgrunn av feltkartleggingen kombinert med tolkningene fra de geofysiske grunnundersøkelsene og styrt kjerneboring, er det utført ingeniørgeologiske vurderinger. Dette omfatter bergoverdekning i tunnelene, antatt plassering av svakhetssoner, bergmassekvalitet langs traséene, bergspenninger i tunnelene, forhold ved påhuggene, prognoser for innlekkasje i tunnelene, vurderinger av naturfare og anvendelse av sprengsteinmasse. Det henvises til de ingeniørgeologiske rapportene for konkurransegrunnlag for å lese om mer nøyaktig om dette (Karlson og Grob, 2018a,b,c). I denne masteroppgaven er det hovedsaklig de ingeniørgeologiske vurderingene om plassering av svakhetssoner og antatt bergmassekvalitet som er av interesse. Dette presenteres for utvalgte partier i kapittel 7-9.

#### 4.2.6 Andre forundersøkelser

- NGU har gjennomført **magnetisk og batymetrisk sjøbunnskartlegging**, se figur 4.1. Disse målingene har avdekt anomalier som tilhører Møre-Trøndelags-forkastningssone (MTF), og Nordøyane er lokalisert på kanten av disse (Dehls, Olesen og Rønning, 2012). Det er dermed mulig at sideforkast-

ninger fra MTF krysser tunneltraséene. De magnetiske målingene viste at ingen av strukturene ved Haramsfjordtunnelen tilhørte MTF. Det ser ut til at Nogvafjordtunnelen krysser en sideforkastning til MTF midtfjords, og batymetrien har kartlagt strukturer med samme retning. Fjørtoftfjordtunnelen krysser to sideforkastninger som tilhører MTF. De avdekte sideforkastningene har usikker plassering med 200 m og slakt fall. Generelt begrenser sedimentdekket på sjøbunnen mengden med strukturer fra batymetriske målinger som kan tolkes.



Figur 4.1: Tolkninger av magnetiske og batymetriske målinger rundt Nordøyane. Modifisert etter Dehls, Olesen og Rønning (2012).

- **Grunnboringer** er utført i alle påhuggsområdene unntatt på Hestøya for å sjekke løsmasseforholdene (Karlson og Grob, 2018a,b,c). Det er *Berg- og geoteknikkseksjonen* til Statens vegvesen Region Midt som har utført boringene, i 2012, 2015, 2016 og 2017.
- **Kontrollboring** er utført ved Austnes på Haramsøya for å bestemme løsmassemektingen og sammenligne resultatet med tolkningene fra refraksjonsseismikken (Karlson og Grob, 2018b). Det ble funnet godt samsvar mellom de to metodene, med avvik  $< 1$  m. Også dette er utført av *Berg- og geoteknikkseksjonen* til Statens vegvesen Region Midt, i 2017.

### 4.3 Undersøkellesomfang og geoteknisk kategori

Nødvendig undersøkelsesomfang for et prosjekt avgjøres ved å fastsette prosjektets geotekniske kategori (GK). Norsk Bergmekanikkgruppe (NBG) har utarbeidet *Veileder for bruk av Eurokode 7 til bergteknisk prosjektering*. Eurokode 7 er den europeiske standarden som beskriver geoteknisk prosjektering, og NBGs veileder tar for seg hvordan denne standarden kan benyttes for konstruksjoner i berg (Nilsen *et al.*, 2011). Geoteknisk kategori bestemmes ut fra prosjektets pålitelighetsklasse og vanske-

lighetsgrad, se tabell 4.5. For de undersjøiske tunnelene ved Nordøyvegen gjelder følgende (Karlson og Grob, 2018a,b,c):

1. **Pålitelighetsklasse CC/RC 3** (eng. «Consequence class/Reliability class»): «Grunn- og fundamenteringsarbeider og undergrunnsanlegg i kompliserte tilfeller.»
2. **Vanskelighetsgraden klassifiseres som høy**: «Uoversiktlig eller vanskelige grunnforhold og et prosjekt som er påvirket av grunnforholdene. Grunnforholdene kan bare delvis fastlegges og undersøkelser under bygging kan være nødvendig.» Grunnen til denne klassifiseringen er hovedsaklig at mesteparten av bergoverflaten langs tunneltraséene ligger under vann. Dette medfører store usikkerheter til hvordan bergmasseforholdene egentlig er på tunnelnivå, og hvor svakhetssoner vil opptre.

**Tabell 4.5: Definisjon av geoteknisk kategori (GK) basert på pålitelighetsklasse og vanskelighetsgrad, iht. Eurokode 7 (Nilsen *et al.*, 2011).**

Pålitelighetsklasse	Vanskelighetsgrad		
	Lav	Middels	Høy
CC/RC 1	1	1	2
CC/RC 2	1	2	2/3
CC/RC 3	2	2/3	3
CC/RC 4*	*	*	*

\*Vurderes særskilt.

Tabell 4.5 gir da at den geotekniske kategorien er 3 for tunnelprosjektene. Dette medfører krav om uavhengig kontroll i tillegg til kollegakontroll, både under prosjektering og driving. Et høyt omfang av forundersøkelser er nødvendig for å oppnå en best mulig modell over ingeniørgeologiske forhold langs tunneltraséene. Ved Nordøyvegen er dette oppfylt ved at flere av de presenterte grunnundersøkelsene er utført på samme sted for å utfylle hverandre og dermed redusere usikkerheten til tolkningene. Eksempelvis sammenstilles refraksjonsseismikk, styrt kjerneboring, seismisk tomografi og feltkartlegging. Til tross for dette vil det også være behov for undersøkelser i drivefasen, som beskrives videre i kapittel 5.

Ifølge Karlson og Grob (2018a,b,c) er omfanget av forundersøkelser like høyt for alle de tre undersjøiske tunnelene ved Nordøyvegen. Styrt kjerneboring og seismisk tomografi er bare utført langs en liten del av hver undersjøiske trasé, noe som medfører at innad for hver tunnel varierer undersøkelsesomfanget. Dermed er det noe større usikkerhet knyttet til drifvingen av de delene der styrt kjerneboring ikke er utført.

---

## 5 | Ingeniørgeologiske undersøkelser under driving av Nordøyvegen

Ingeniørgeologiske undersøkelser som utføres under driving kan ses på som «utsatte forundersøkelser» (Nilsen *et al.*, 2011). Undersøkelsene gir opplysninger som gjerne skulle vært kjent før driving, men metodene er ikke praktisk mulig eller veldig kostbare å gjennomføre på forhånd. Undersøkelser under driving kan også ses på som «kontroll av grunnforholdene», med det formål å kontrollere om bergmasse- og vannforholdene foran stoff er som antatt fra forundersøkelsene, og oppdage uventede problematiske forhold før de når stoff.

Ifølge Palmstrøm *et al.* (2003) er det ingen spesielle krav til undersøkelser under driving av berganlegg. Typer og omfang av undersøkelser må vurderes og tilpasses i hvert enkelt tilfelle. *Håndbok N500 «Veg-tunneler»* (Statens vegvesen, 2020a) og *Håndbok V520 «Tunnelveiledning»* (Statens vegvesen, 2020b) beskriver hvilke ingeniørgeologiske undersøkelser som kan utføres under tunneldriving. Det stilles ekstra undersøkelseskrav ved driving av undersjøiske tunneler siden disse har geoteknisk kategori 3 (se avsnitt 4.3). Byggherre har bestemt hvilke undersøkelsesmetoder som skal benyttes ved Nordøyvegen, med utgangspunkt i kravene i de nevnte håndbøkene. I tillegg er det gjort særskilte vurderinger for å tilpasse undersøkelsesomfanget til vanskelighetsgraden av prosjektet. Dette har resultert i at følgende undersøkelser benyttes under driving (Karlson og Grob, 2018a,b,c):

- Sonderboring med slaghammer
- Kjerneboring foran stoff
- MWD og borparametertolkning
- Kartlegging på stoff og prøvetaking
- Eventuelt deformasjonsmålinger

I de følgende avsnittene beskrives kravene mer nøyaktig og hvordan metodene gjennomføres for tunnelene ved Nordøyvegen. For noen av metodene presenteres det også generelle erfaringer fra kontrollingeniører og ingeniørgeolog ved prosjektet.

### 5.1 Sonderboring med slaghammer

Når det trengs informasjon om bergmasse- og vannforholdene foran stoff, skal det utføres sonderboring med slaghammer med overlapp på omtrent 8 m (Karlson og Grob, 2018a,b,c). For undersjøiske tunneler er det krav til at sonderboring benyttes systematisk under kote 0, grunnet et uendelig stort potensiale for vanninntrengning som kan gi alvorlige konsekvenser (Statens vegvesen, 2020a). Ved liten og usikker bergoverdekning, i soner med dårlig bergmassekvalitet og i områder med bestemte innlekkasjekrav, er det også krav om systematisk sonderboring.

Disse kravene medfører at det utføres systematisk sonderboring langs hele traséen for alle de tre un-

---

dersjøiske tunnelene ved Nordøyvegen, med 4-6 hull (Karlson og Grob, 2018a,b,c). Siden tunnelene er undersjøiske, skal sonderhullene bores over tunnelheng. Der bergoverdekningen er mindre enn 35 m, skal det utføres ekstra kontroll av bergoverdekningen. Dette gjøres ved at det 5. og eventuelt 6. sonderhullet vinkles omtrent 45° opp i forhold til tunnelaksen. De vinklede hullene skal ende 20 m over tunnelhengen. Lilla soner i tunnelprofilene i vedlegg B viser partiene der vinklede sonderhull skal bores. Overlapp på sonderhullene økes til 10 m i soner der det kjernebores foran stoff.

## 5.2 Kjerneboring foran stoff

Kjerneboring foran stoff skal benyttes i tillegg til sonderboring med slaghammer inn mot større svakhetssoner som er kartlagt fra forundersøkelsene (Statens vegvesen, 2020b). Formålet er å samle ytterligere informasjon om bergmasseforholdene foran stoff.

For tunnelene ved Nordøyvegen skal det kjernebores foran stoff på undersjøiske strekninger når ett eller begge av de to følgende kravene er oppfylt:

1. Seismisk hastighet er 3000 m/s eller lavere ifølge refraksjonsseismikken.
2. Bergoverdekningen er 40 m eller mindre.

Partier i tunnelene som oppfyller ett eller begge av disse kravene, er merket med blå farge i tunnelprofilene i vedlegg B.

I de geologiske rapportene for konkurransegrunnlag var det krav til kjerneboring foran stoff ved bergoverdekning mindre enn 50 m (Karlson og Grob, 2018a,b,c). Dette ble redusert til 40 m etter innvilget søknad om fravik på bakgrunn av råd fra referansegruppa v/Bjørn Nilsen og Anders Beitnes. Begrunnelsen for dette var at svakhetssoner som skal krysses i områdene med bergoverdekning 40-50 m ikke anses som ekstra utfordrende (Nilsen og Beitnes, 2018). Omfanget av forundersøkelsene i disse områdene har også vært høy med styrt kjerneboring og tomografi i borhullene i tillegg til refraksjonsseismikk. Omfattende akustikk har gitt et godt bilde av bergoverflaten og blitt verifisert med fjellkontrollboringer. Bergmasseforholdene er altså ganske sikre i nevnte områder. Det ble dermed ansett som tilstrekkelig å kjernebore foran stoff ved bergoverdekning mindre enn 40 m i stedet for ved bergoverdekning mindre enn 50 m, gitt at det ikke er indikasjoner på betydelige svakhetssoner fra andre undersøkelser og sonderboringen blir dokumentert og fulgt tett opp av ingeniørgeolog.

Kjerneboring foran stoff skal utføres som et supplement til den systematiske sonderboringen ved Nordøyvegen. Overlapp mellom hver runde skal være 10 m (Karlson og Grob, 2018a,b,c). Kjernehullet skal bores i øvre del av stoffen, med en maksimal avstand fra hengen på 5 m (Karlson, 2020). Kjerneboringen skal starte 25 m før lav bergoverdekning og/eller dårlig bergmassekvalitet, og skal ikke avsluttes før 25 m etter problematisk sone er passert.

Ved kjerneloggingen bestemmes borkjernenens Q-verdi for hver meter. Under befarings fikk jeg bli med på kjernelogging, og Karlson (2020) påpekte noen spesielle punkter ved gjennomføring av loggingen:

- 
- RQD kan ikke settes lik 0, for da resulterer det i  $Q = 0$ . Selv om alle bitene i en kjerne er mindre enn 10 cm, så settes RQD-verdien likevel til en minimumsverdi på 10.
  - $J_w$  holdes lik 1 siden vannforholdene i en kjerne ikke kan vurderes.
  - SRF-verdien tallfestes ved å se på om kjernen representerer deler av en svakhetsone eller kompetent berg. I praksis betyr det at kompetent berg gir  $SRF = 1$  og sterk knust/oppstukket berg gir  $SRF = 5$ . Dersom omtrent halve kjernen er sterkt knust/oppstukket, settes  $SRF = 2,5$ .

### 5.3 MWD og borparametertolkning

MWD skal utføres ved boring av alle typer hull under driving (Statens vegvesen, 2018). Borparametertolkning gir opplysninger om styrke, oppsprekking og vannforhold foran stuff, som kan benyttes som supplerende grunnlag ved vurdering av bore- og injeksjonsopplegget.

Ved Nordøyvegen registreres ikke MWD-data for kjernehellene foran stuff (Karlson, 2020). Ellers registreres sonderhull, injeksjonshull, salvehull og boltehull. WiFi skal være tilgjengelig på alle stoffene for å kunne laste opp MWD-data umiddelbart og benytte borparametertolkningen underveis.

#### 5.3.1 Generelle erfaringer fra kontrollingeniører ved Nordøyvegen

Under befaring til Nordøyvegen i uke 8 ble det snakket med tre av kontrollingeniørene på prosjektet, Marit Bakken Gjørva, Ivar Nils Båtberget og Ken Ove Vassgård. De to førstnevnte er kontrollingeniører ved Austnes og Longva, mens Vassgård er kontrollingeniør ved tunnelstoffene på Fjørtofta. De fortalte hvordan de benytter seg av MWD underveis i tunneldrivingen.

Generelt er det de yngre kontrollingeniørene som benytter borparametertolkning under driving. Kontrollingeniør Gjørva er en av disse, og synes det er et veldig nyttig verktøy, først og fremst fordi MWD gjør det enklere å kontrollere hva entreprenøren borer til enhver tid (Møre og Romsdal fylkeskommune, 2020e). Geometri-tegninger fra Bever Control AS (2020) viser plassering av alle hull med tilhørende stikning. WiFi på stuff gjør at borparametertolkningene, med hardhet, oppsprekking og vannforhold, i teorien kan lastes opp innen kort tid mens hun er på stuff. I praksis blir tolkningene lastet opp når hun kommer tilbake til kontoret grunnet mangel på nettbrett på stuff og dårlig oppløsning av 3D-tolkninger på mobiltelefon. Gjørva benytter seg av registrert borsynk og tolket hardhet fra MWD-målingene. Disse parametrene gir gode indikasjoner på fjellkvaliteten foran stuff. Hun har også eksempler å vise til der MWD-tolkningene har vist tydelig bergartsskille foran stuff. Tolkede vannforhold stemmer dårlig, mens tolket oppsprekking stemmer noe. MWD-målingene fra ulike stuffer kan ikke sammenlignes siden det er relative verdier ut fra kalibrering opp mot forholdene ved hver respektive stuff. Dette anser Gjørva som en begrensning ved bruk av MWD.

Kontrollingeniørene Båtberget og Vassgård har ikke hatt noen opplæring i bruk av MWD-målinger under driving. De benytter seg dermed bare av det de observerer underveis i sonderboringen når de er tilstede, som er borsynk, farge på borevannet og mengde innlekkasje. Båtberget understreker at verk-

---

tøyet er nyttig og har kommet for å bli, men at han ikke benytter det på grunn av dårlig datakunnskap. En utfordring med metoden er at sensorer og trykket på borrhigen må være optimalisert for at MWD-resultatene skal kunne tolkes riktig. Vassgård mener borparametertolkning kan benyttes til å verifisere bergmasseforholdene som tolkes fra de mer tradisjonelle undersøkelsesmetodene, som kartlegging og sonder- og kjerneboring, men det kan ikke benyttes til å tolke forholdene alene. Han poengterer at dersom det er god fjellkvalitet som går over i en tydelig svakhetssone, så vil dette vises som en klar overgang i borparametertolkningen. Men en slik sone vil også oppdages ved observasjon under sonderboringen fra borrhigen. Dermed tilfører ikke MWD-tolkningene noen ekstra opplysninger til den tradisjonelle sonderboringen. Derimot gir MWD god dokumentasjon av forholdene langs tunneltraséene ved Nordøyvegen.

## 5.4 Kartlegging på stoff og prøvetaking

For å oppfylle dokumentasjonskravet om beskrivelse av bergforholdene og utført sikring, er kartlegging på stoff sentralt (Statens vegvesen, 2020a). Kartleggingen registreres elektronisk i programmet *Nova-point Tunnel – Geologi og bergsikring* (forkortes videre som NP). I tillegg til å være nyttig for drifts- og vedlikeholdsfase, er kartlegging på stoff essensielt for å observere de faktiske forholdene i tunnelen og ta gode avgjørelser med tanke på sikring og videre drivestrategi.

Ved Nordøyvegen utføres kartleggingen systematisk etter hver salve. Ved gode bergmasseforhold der fjellet ikke sikres med sprøytebetong før neste salveboring, kan eventuelt flere salver kartlegges under ett. Kartleggingen utføres etter at utlasting av salven, rensking, pigging og vasking av bergoverflaten er utført av entreprenør. Hver salve fotograferes. Det kartlegges med penn og papir. Dette resulterer i at dobbeltregistrering må utføres for at registreringene skal lagres elektronisk i NP. Vedlegg C viser fremstillingen av dokumentert kartlegging i NP, der kartlegging etter Q-metoden og på utbrettsprofil er sammenstilt med påført bergsikring og tolket hardhet fra MWD-målinger. Eksempelet er tatt fra Fjørtoftfjordtunnelen (Møre og Romsdal fylkeskommune, 2020f).

### 5.4.1 Prøvetaking

Det skal tas prøve av eventuell leire som oppdages under kjerneboringen eller under kartlegging på stoff dersom det er mistanke om svelleleire (Karlson og Grob, 2018a,b,c). Denne skal testes i laboratorium. Ved røntgendiffraksjon (XRD-analyse) kan mineralinnholdet og innholdet av svellende mineraler bestemmes. Frisvelling og svelletrykk kan også bestemmes gjennom egne tester. Resultatene gir en klassifikasjon av svelleegenskapene til materialet, og er nyttig ved dimensjonering av hvilket trykk den permanente sikringen skal tåle.

Ved driving av tunnelene langs Nordøyvegen har det vært få forekomster av leire som sprekkefylling som er store nok til å ta prøve av (Karlson, 2020). Per 22.05.2020 er det utført tester av svelleegenskaper på to prøver ved SINTEF i Trondheim. SINTEF har også utført borbarhetstester av en av bergartene som



---

det drives i. Resultatene fra disse testene presenteres i kapittel 6.

Under befarings til Nordøyvegen i uke 8 ble det tatt med prøver til laboratorietesting ved NTNU: Én prøve av omvandlet kjernemateriale og to prøver av sleppemateriale. Disse undersøkelsene presenteres også i kapittel 6.

## **5.5 Deformasjonsmålinger**

Ifølge Karlson og Grob (2018a,b,c) skal deformasjonsmålinger utføres i større svakhetssoner, særlig dersom det har blitt påvist svelleleire.

Ved Nordøyvegen har det per 22.05.2020 ikke blitt utført deformasjonsmålinger. Ifølge Karlson (2020) følges det nøye med på om sprøytebetongen sprekker opp, noe som vil være en indikasjon på at sikringen kan være for svak. Deformasjonsmålinger er mer aktuelt å installere når det er påvist store mektigheter med svelleleire, noe som ikke har vært tilfelle i tunnelene langs Nordøyvegen ennå.

## **5.6 Sluttkommentar**

Som det er beskrevet i dette kapitlet, utføres det et høyt omfang av ingeniørgeologiske undersøkelser ved driving av tunnelene langs Nordøyvegen. Innsamlede observasjoner, resultater og tolkninger fra de ulike undersøkelsene vil bli presentert og diskutert nærmere i kapittel 8 og kapittel 9.

---

## 6 | Laboratorieundersøkelser

Dette kapittelet tar for seg laboratorieundersøkelser som har blitt utført i forbindelse med masteroppgaven. Kapittelet er todelt:

- Avsnitt 6.1 tar for seg analyse av svelleleire på totalt tre prøver, derav to prøver med sleppemateriale fra Fjørtofftjordtunnelen og en prøve med omvandlet kjernemateriale fra Nogvafjordtunnelen. I tillegg har SINTEF utført tester av svelleegenskaper på to prøver med sleppemateriale, og Kvarstein (2017) har testet en prøve med materiale fra styrt kjerneboring i forbindelse med sin masteroppgave. Disse resultatene presenteres også for å relatere mine verdier til andre målinger og illustrere variasjonsområde.
- Avsnitt 6.2 tar for seg petrografisk analyse for bergartsbestemmelse av en steinprøve fra Haramsfjordtunnelen. Dette omfatter makroskopisk og mikroskopisk beskrivelse.

Hver del består av en beskrivelse av utførte undersøkelsesmetoder, observasjoner og analyseresultater, og avsluttes med en kort diskusjon og oppsummering. Det antas at de utførte testene er kjente for leseren, så beskrivelsen som gis går ikke inn på detaljer. Avslutningsvis, i avsnitt 6.3, presenteres også resultater fra en borbarhetsanalyse som SINTEF har utført på samme steinprøve som petrografisk analyse er utført på.

Laboratorieundersøkelsene har blitt gjennomført ved Institutt for geovitenskap og petroleum ved NTNU, ved ingeniørgeologisk laboratorium, kjemisk/mineralogisk laboratorium, sliplaboratoriet og EM-laboratoriet. Jeg har utført mesteparten av prøveprepareringen under veiledning av laboratorieansatt Jon Runar Drotninghaug. Av hensyn til smittevern i forbindelse med Covid-19 (koronavirus), ble resten av prøveprepareringen, XRD-analyse, frissvellingstest og svelletrykkstest utført av laboratorieansatte ved NTNU. Det er derfor begrenset med bildemateriale fra utførelsen av testene.

### 6.1 Analyse av sleppemateriale og kjernemateriale

Sleppemateriale består av en blanding av bergartsfragmenter (grovfraksjon) og leirmateriale (finfraksjon). Leirmaterialet kan være et resultat av 1) omdannelse av feltspat i nedknust materiale eller sidebergart, eller 2) hydrotermal tilførsel og avsetning (Nilsen, 2016). Leirmineraler som kan absorbere store mengder vann og få en volumøkning kalles for svelleleire. Forekomster av svelleleire i en tunnel kan påvirke dimensjonering av den permanente sikringen. I de fleste tilfeller vil det være vanskelig å avgjøre om finkornet sleppemateriale i tunnelen er svellende basert på kvalitative undersøkelser in-situ. Analyse på laboratoriet er derfor hensiktsmessig for å foreta en kvantitativ bestemmelse av eventuelle svelleegenskaper.

Under driving av tunnelene ved Nordøyvegen har det som nevnt i avsnitt 5.4.1 vært få forekomster med leire av betydelig størrelse. Ved befarings til prosjektet ble det likevel funnet noe sleppemateriale som

---

kunne være interessant å analysere grundigere.

### 6.1.1 Beskrivelse av undersøkelsesmetoder for sleppe- og kjernemateriale

For å analysere eventuelle svelleegenskaper til prøvene, er det benyttet tre analysemetoder:

1. XRD-analyse (røntgendiffraksjon) for identifisering av svellende mineraler
2. Frisvellingstest
3. Svelletrykksmåling i ødometer

#### *Preparering av prøvene*

Til XRD-analysen ble en representativ del av hver prøve på omtrent 30 g tatt ut og tørket i tørkeskap v/45°C. Deretter ble grove partikler fjernet ved å slemme opp prøven med vann i en målesylinder. Store partikler synker fortere enn små, og etter 1 t 45 min ble de øverste 20 cm av vannsøylen tatt ut. Partiklene i dette vannet var < 6 µm. Materialet ble filtrert og tørket for XRD-analyse.

Til testing av frisvelling og svelletrykk er det nødvendig å skille ut partikler < 20 µm. Dette ble gjort ved først å våtsikte prøvene, deretter avdampe partikler < 20 µm i tørkeskap v/45 °C. De tørkede partiklene ble så malt i porselensmølle.

#### *XRD-analyse*

Det finnes to metoder for å utføre mineralogiske analyser av geologisk materiale ved hjelp av XRD: 1) Analyse av bulkprøver, der hele prøven knuses ned til ca. 10 µm, og 2) Analyse av fraksjonen < 6 µm fra prøven (Tijhuis, 2020). Ved analyse av bulkprøver blir mineralinnholdet i prøven kvantifisert, men tilstedeværelse av svellende mineraler vises ikke så godt. For å påvise eventuell tilstedeværelse av svellende mineraler benyttes metode 2. Da blir ikke mineralinnholdet kvantifisert. Når fraksjonen < 6 µm skilles ut, fjernes kvarts, feltspat og andre mineraler som ikke eroderes så lett. Igjen i prøven er hovedsakelig leirmineraler, noe glimmer og kloritt/kaolinit.

Når selve XRD-analysen gjennomføres, blir prøven belyst med en monokromatisk røntgenstråle. Analysen baserer seg på prinsippet om at refleksjon av en røntgenstråle som treffer en krystallstruktur vil avhenge av gitterstrukturen til krystallen (NGU, 2018). Strålen sendes inn i prøven med ulike innfallsvinkler ( $\theta$ ). Ved noen vinkler reflekteres strålen ut med samme vinkel som den ble sendt inn med, og disse registreres av en detektor (Tijhuis, 2020). Refleksjonsvinkelen avhenger av avstanden  $d$  mellom planene i krystallstrukturen, som vil variere mellom ulike mineraler. Registreringene resulterer i et diffraktogram med ulike topper. Her er intensitet av reflektert stråle på y-aksen og atomavstanden  $d$  på x-aksen (eventuelt refleksjonsvinkelen  $2\theta$ , som tilsvarer innfallsvinkel + utfallsvinkel, og henger sammen med  $d$ ). Hvert mineral har et unikt mønster i diffraktogrammet, som et fingeravtrykk (NGU, 2018). Ved å sammenligne diffraktogrammet fra prøven med mønstre for kjente mineraler, kan mineralinnholdet identifiseres.

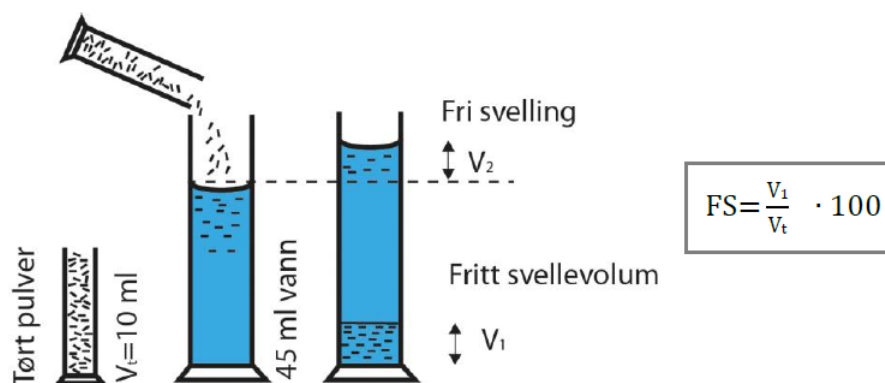
Etter analysen tas prøven ut og legges i en eksikator med etylenglykol i 20 timer v/60 °C (Tijhuis,

2020). Dette gjøres for at glykoldampen skal bløte opp prøven og treng inn i gitterstrukturen i mineraler som er svellende. Avstanden  $d$  mellom atomene blir da større i mineraler som sveller, noe som vil resultere i et annerledes diffraktogram når glykolprøven så analyseres ved XRD. Ved å legge de to diffraktogrammene over hverandre kan tilstedeværelse av svellende mineraler bestemmes ved at toppene til glykolprøven er forskjøvet mot større atomavstand  $d$ .

XRD-analyse for prøvene med sleppe- og kjernemateriale fra Nordøyvegen er utført ved kjemisk/mineralogisk laboratorium av senioringeniør Laurentius Tjihuis. Her benyttes instrumentet *Bruker D8 Advance* for å gjennomføre testen, og programvaren *DIFFRAC.EVA* benyttes til å identifisere mineralene i diffraktogrammet (Tjihuis, 2020). Røntgenrøret er laget av Co og har bølglengde på 1,79 Å. Innfallsvinkelen  $\theta$  til strålen er 1,5°, og økes deretter med 0,005° for hver måling til innfallsvinkelen når 40°.

### Frisvellingstest

I frisvellingstesten måles det hvor mye vann et leirmateriale potensielt kan binde i suspensjon (Mao, Nilsen og Dahl, 2011). 10 ml ( $V_t$ ) med tørre partikler < 20  $\mu\text{m}$  får svulle fritt ved sedimentasjon ved at de drysses i en målesylinder med 45 ml destillert vann. Tallet for fri svelling (FS) er et mål på det nye volumet ( $V_1$ ) materialet inntar etter svulleprosessen, og uttrykkes i prosent av opprinnelig volum ( $V_t$ ). Se figur 6.1.



**Figur 6.1: Prinsipp for frisvellingstesten, der 10 ml tørt pulver ( $V_t$ ) drysses i målesylinder med 45 ml destillert vann. Etter 1-2 døgn med sedimentasjon kan fri svelling (FS) beregnes etter gitt formel.  $V_2$  benyttes for å beregne parameteren fritt svellevolum (FSV), som ikke beskrives nærmere i denne masteroppgaven. Modifisert etter Statens vegvesen (2016).**

Det finnes flere standarder for klassifisering av svelleegenskaper. Jeg har valgt å benytte klassifisering i henhold til Norsk Bergmekanikkgruppe (NBG), som er den generelle standarden i Norge. Tabell 6.1 viser klassifisering av svelleegenskapene til leirmaterialet basert på beregnet verdi for fri svelling.

Frisvellingstesten er en indekstest som gir en indikasjon på om det forekommer svelleleire i sleppematerialet. Ytre betingelser, som tilgang til vann som kan absorberes, vannets ionekonsentrasjon og om sleppematerialet har rom for volumutvidelse, vil avgjøre om en forekomst med svelleleire vil oppføre seg som den potensielt kan gjøre ifølge frisvellingstesten (Brekke, 1965).

**Tabell 6.1: Klassifisering av fri svelling og svelletrykk i henhold til NBG (1985).**

Klassifisering	FS [%]	Svelletrykk [MPa]
Meget stor / høyt	> 200	> 0,75
Stor / høyt	140-200	0,30-0,75
Middels	100-140	0,10-0,30
Lite / lavt	< 100	< 0,10

Frisvellingstesten er gjennomført av overingeniør Jon Runar Drotninghaug, ved analyselaben ved ingeniørgeologisk laboratorium.

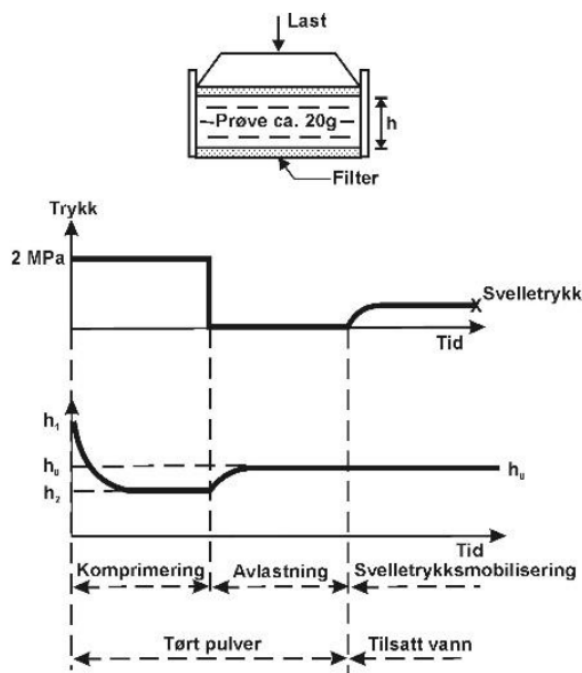
### *Svelletrykksmåling*

Svelletrykksmåling utføres i et ødometer. Metoden skal simulere forholdene som leirmaterialet opplever in-situ: Før tunnelen drives er leirmaterialet komprimert inne i sleppen. Ved driving gjennom sonen vil materialet avlastes. Sikring påføres og begrenser mulighet for volumutvidelse. Etter en tid vil tilgangen på vann avgjøre i hvor stor grad leirmaterialet sveller gitt at det inneholder svellende mineraler, og dermed hvor stort trykk materialet vil påføre den installerte sikringen.

Prøven som skal testes i ødometeret består av 20 g tørt pulver i fraksjonen < 20  $\mu\text{m}$  (Statens vegvesen, 2016). Først komprimeres prøven ved forkonsolidering til 2 MPa til deformasjonen er overstått, i 24 timer. Se figur 6.2, der  $h$  tilsvarer høyden på prøven i ødometerskålen. Deretter avlastes prøven til deformasjonen er overstått for andre gang, i 2 timer. Prøvehøyden som er oppnådd nå ( $h_0$ ) skal holdes konstant av apparaturet gjennom resten av forsøket. Videre tilsettes destillert vann, og prøven vil mobilisere et svelletrykk som registreres systematisk inntil det stabiliseres. Dette tar vanligvis omtrent ett døgn. Svelletrykk under konstant volum defineres som det trykket som ble påført for at prøven skulle beholde prøvehøyden  $h_0$  ved forsøkets slutt (Nilsen, 2016).

Tabell 6.1 viser klassifisering av leire basert på målte svelletrykk i ødometer, i henhold til den generelle standarden til NBG. Det må poengteres at svelletrykket som måles med ødometeret er relativt og gir bare mulighet til å sammenligne ulike leirprøver. Testen er dermed en indekstest. Svelletrykket som opptrer i tunnelen kan være både mindre og større enn resultatet fra laboratoriet. Dette vil avhenge av indre og ytre betingelser (Brekke, 1965). Særlig tettheten til materialet in-situ er en av de avgjørende indre faktorene. I testen forkonsolideres prøven til 2 MPa, uten at den virkelige komprimeringsgraden in-situ er kjent. Andre indre faktorer er blant annet andelen leir, ionekonsentrasjonen og vanninnholdet i sleppematerialet. De ytre betingelsene omfatter tilgang til vann som kan absorberes, vannets ionekonsentrasjon og om sleppematerialet har rom for volumutvidelse. Svelletrykk målt i ødometer er altså ikke representativt for in-situ svelletrykk som bergsikringen utsettes for (Mao, Nilsen og Dahl, 2011). Likevel gir det en indikasjon på leirens aktivitet.

Svelletrykksmålingene er utført ved analyselaben ved ingeniørgeologisk laboratorium, av overingeniør



Figur 6.2: Svelletrykksmåling ved konstant volum (Statens vegvesen, 2016).

Jon Runar Drotninghaug.

### 6.1.2 Observasjoner og analyseresultater av sleppe- og kjernemateriale

Tabell 6.2 gir en oversikt over prøvene som er samlet inn under befaring til Nordøyvegen, og hvilke tester som er utført på dem. Følgende gjennomgås hver prøve for seg, med beskrivelse, bilde, observasjoner under testingen og analyseresultater.

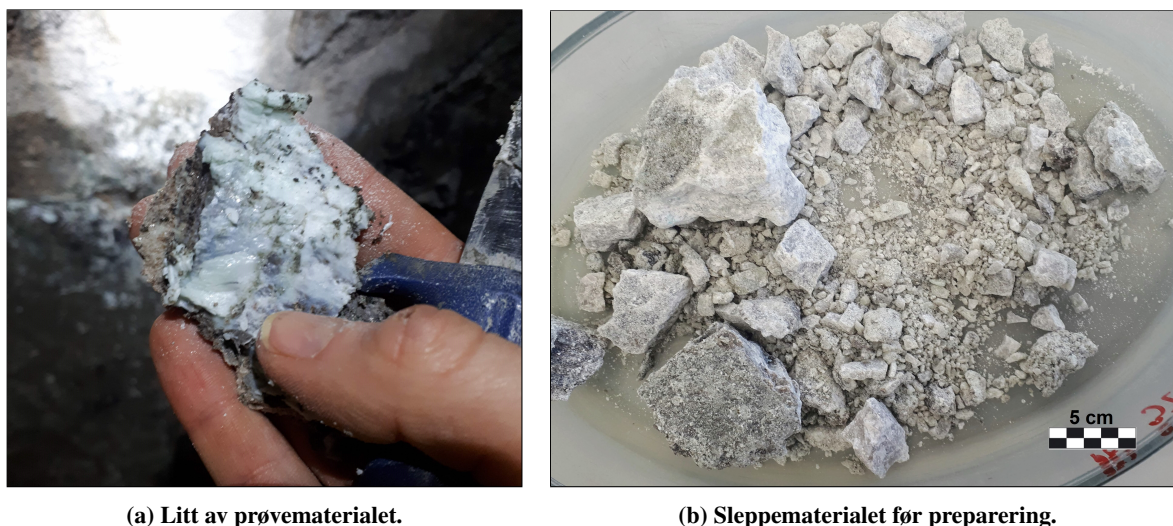
Tabell 6.2: Oversikt over prøvene som ble samlet inn under befaring og testet på laboratoriet.

Prøvenavn	Pel nr.	Beskrivelse	Utførte undersøkelser
<b>Prøve 1</b>	32190	2 cm bred sprekkefylling,	- XRD
	Tunnelprøve	hvit og oppsmuldret, en	- Fri svelling
	Fjørtofta N	andel er finkornet og klebrig, resten er kvarts	- Svelletrykk
<b>Prøve 2</b>	32150	4-5 cm bred sprekkefylling,	- XRD
	Tunnelprøve	tydelig anrikning av grønne	- Fri svelling
	Fjørtofta N	mineraler	- Svelletrykk
<b>Prøve 3</b>	23698	Svakt omdannet kjerne-	- XRD
	Kjerneprøve	materiale, består av sand,	
	Longva	grus og stein.	

#### Prøve 1: Pel nr. 32190

Under befaring til stoff ved Fjørtofta N 20.02.2020, ble det tatt med en prøve av 2 cm bredt sprekkebelegg fra venstre side i tunnelveggen, under påført sprøytebetong. Sprekken var steil og hadde strøk omtrent parallelt med tunnelaksen. Alt materialet var hvitt, med noe anrikning av biotitt innimellom.

Noen fragmenter var klebrige, som biten i figur 6.3a, med en glatt overflate på grunn av fuktighet. Andre fragmenter var harde og kunne ikke ripes i med kniv. De reagerte heller ikke ved tilsetning av saltsyre (HCl), så disse fragmentene antas å være kvarts. Hele prøven er vist i figur 6.3b, før prepareringen startet. En av de største bergartsfragmentene hadde antydning til et tynt dekke med sprøytebetong, så denne ble tatt bort fra resten av prøvematerialet.



Figur 6.3: Prøve 1 fra pel nr. 32190 i Fjørtoftfjordtunnelen (Birkeli, 2020).

Ved tilsetning av destillert vann ble de klebrige fragmentene først enda glattere før de løste seg gradvis opp. Vannet fikk en hvit farge, som skummet melk. Våtsiktingen ble utført uten spesielle utfordringer.

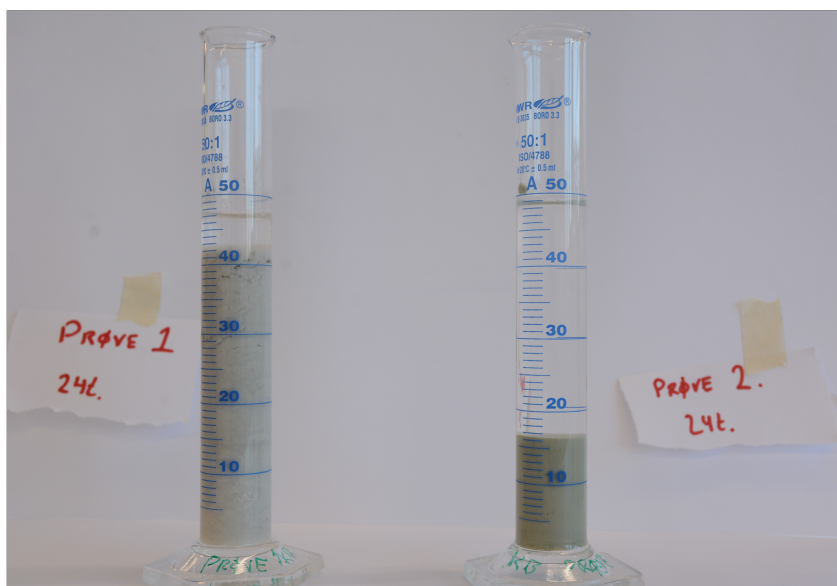
Prøven hadde ikke nok materiale  $< 20 \mu\text{m}$  til å kjøre svelletrykkmålingen på et areal på  $20 \text{ cm}^2$ . For at prøven skulle bli prekonsolidert til 2 MPa, ble det i stedet benyttet 10 g av fraksjonen  $< 20 \mu\text{m}$  i en ring med areal  $10 \text{ cm}^2$  og prekonsolidering på 200 N (Drotninghaug, 2020). Dette anses ikke å ha noen spesiell innvirkning på resultatet.

Tabell 6.3: Analyseresultater for prøve 1 (pel nr. 32190).

Laboratorietest	Resultat	Figur	Vedlegg
Fri svelling	420 %	6.4	E
Andel materiale $< 20 \mu\text{m}$	2,4 %	-	E
Svelletrykk	0,40 MPa	6.5	-
XRD-analyse	Muskovitt Montmorillonitt	-	D

Figur 6.4 viser prøven etter 24 timer sedimentering, med FS = 420 %. Utviklingen av svelletrykk skjedde gradvis og er vist i figur 6.5, med høyeste svelletrykk på 0,40 MPa. Ut fra klassifisering i tabell 6.1, har prøven *meget stor* fri svelling og *høyt* svelletrykk. Andel materiale  $< 20 \mu\text{m}$  er 2,4 %. Dermed er det bare en liten andel av sleppematerialet som potensielt kan svulle så mye som resultatene tilsier. XRD-analysen viser et klart innhold av svellende mineraler i vedlegg D, ved at toppene i diffraktogrammet til





Figur 6.4: Bilde fra frisvelling for prøve 1 og prøve 2 etter 24 timer.

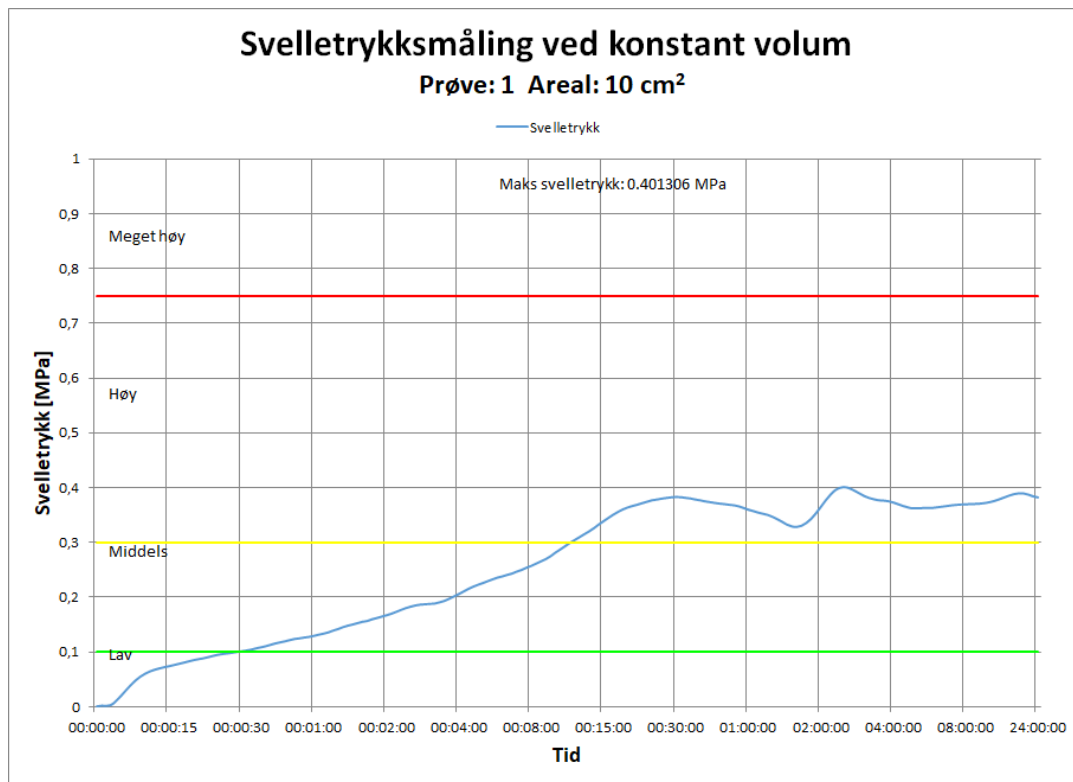
den glykolbehandlede prøven er forskjøvet mot venstre i forhold til toppene til ubehandlet prøve. Det svellende mineralet montmorillonitt, som tilhører smektitt-gruppen, er påvist. En oppsummering av alle analyseresultatene er gitt i tabell 6.3.

#### *Prøve 2: Pel nr. 32150*

Under befaring til stoff ved Fjørtofta N 20.02.2020, ble det også tatt med en prøve av sleppemateriale fra høyre side i tunnelveggen, under påført sprøytebetong. Sleppen var steil og hadde strøk omtrent normalt på tunnelaksen. Bergart i nærheten ble vurdert til å være amfibolitt. Materialet var lett å skrape ut med kniv, og det var ikke noe problem å fylle en pose. Bredden på sleppen var 4-5 cm. Se figur 6.6a, der prøvelokaliteten i tunnelveggen er markert med rødt. Figur 6.6b viser prøvematerialet før det ble preparert i laboratoriet. Materialet smuldret lett opp i fingrene og inneholdt stor andel små, flakige fragmenter. Noen av de største fragmentene var dekket med et glatt grønnlig belegg som kunne ripes i med negl. Resten av prøven var også grønnlig, trolig med høyt innhold av leirmineralet kloritt. Ifølge kontrollingeniør Ken Ove Vassgård, er dette sleppematerialet normalt i området før og etter pel nr. 32150 (Møre og Romsdal fylkeskommune, 2020e). Det har blitt observert mange steder i tunnelen, oftest bare som en tynn sprekefylling. Det var derfor ønskelig å teste om prøve 2 består av svellende mineraler.

Ved preparering ble materialet først lagt i destillert vann. Også vannet fikk da en grønnlig farge. I tillegg «skummet» vannet, som om det var tilsatt såpe. Skummingen fortsatte under hele våtsiktingen. Våtsiktingen tok ekstra lang tid fordi det var krevende å få vasket av et belegg med finstoff på mange av fragmentene.

I svelletrykkstesten ble prøven kjørt med et areal på 20 cm<sup>2</sup> og prekonsolidering på 400 N for å oppnå et prekonsolideringstrykk på 2 MPa.



**Figur 6.5: Utvikling av svulletrykk for prøve 1.**

Figur 6.4 viser prøve 2 etter sedimentering i 24 timer, FS = 160 %. Svulletrykksutviklingen er vist i figur 6.7, med tilnærmet flat kurve som utviklet seg til et minimalt svulletrykk på 0,03 MPa. Resultatene tilsvarer *stor* fri svelling og *lavt* svulletrykk ifølge klassifisering i tabell 6.1. Andel materiale < 2 µm er 2,8 %. De relativt små resultatene fra svulleanalysen stemmer godt overens med XRD-analysen. I vedlegg D er det ingen forskyvning av toppene i diffraktogrammet til den glykolbehandlede prøven i forhold til toppene til ubehandlet prøve, som vil si at prøven ikke inneholder svullende mineraler. Lizarditt er et grønt mineral i serpentinegruppen, som kan ha gitt den karakteristiske grønnfargen til prøven. Tabell 6.4 viser en oppsummering av alle analyseresultatene.

**Tabell 6.4: Analyseresultater for prøve 2 (pel nr. 32150).**

Laborrietest	Resultat	Figur	Vedlegg
Fri svelling	162 %	6.4	E
Andel materiale < 20 µm	2,8 %	-	E
Svulletrykk	0,03 MPa	6.7	-
XRD-analyse	Lizarditt	-	D
	Kalsitt		
	Dolomitt		

### Prøve 3: Pel nr. 23698

Figur 6.8 viser kjernematerialet som er valgt ut fra kjerneboringene i samråd med veileder Bjørn Nilsen. Kjerneboringen er utført fra pel nr. 23643,5 fra Longva-stuffen i Haramsfjordtunnelen. Prøven er tatt



(a) Lokalitet for prøve 2.



(b) Sleppematerialet før preparering.

Figur 6.6: Prøve 2 fra pel nr. 32150 i Fjortoftfjordtunnelen (Birkeli, 2020).

fra kasse 11, og tilsvarer pel nr. 23698. I kjerneloggen er bergarten beskrevet som gneis. Materialet er sterkt oppknust. Sprekkeflatene er svakt omvandlet, som vises med et tynt lag med finstoff og sand. Det vil være interessant å teste om feltspatmineraler i gneisen har blitt omvandlet til leirmineraler med svellende egenskaper.

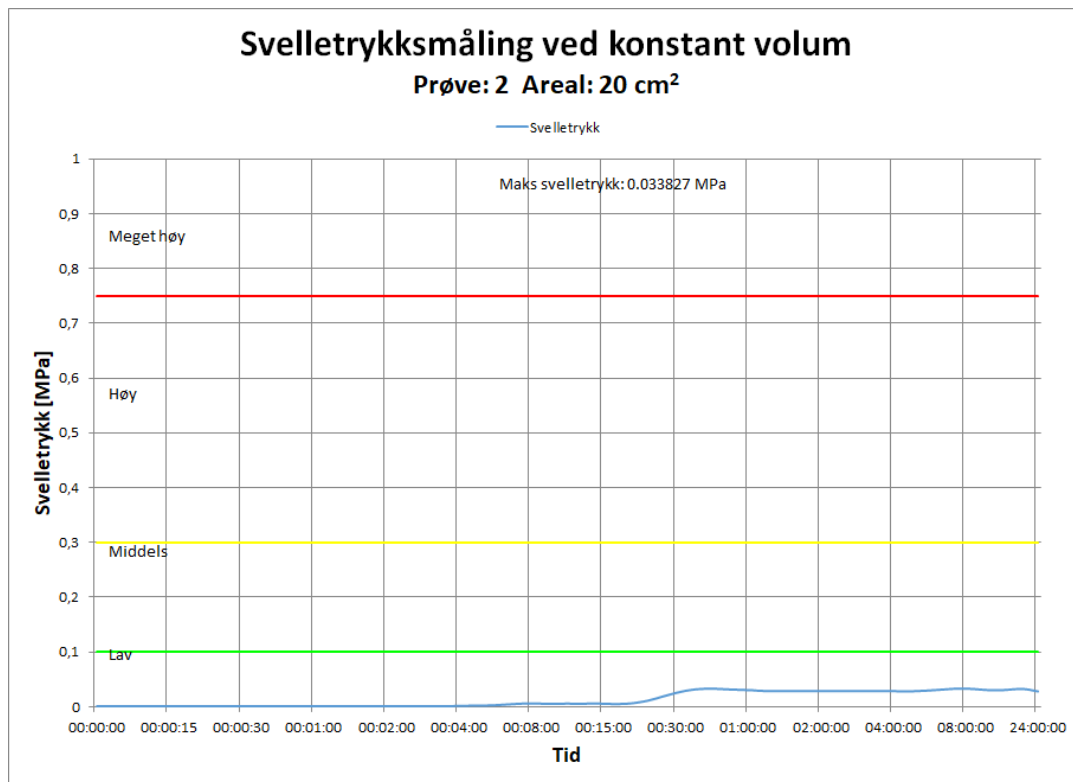
Prøvematerialet er testet ved røntgendiffraksjon (XRD-analyse) for å påvise eventuell tilstedeværelse av svellende mineraler. Det var ikke nok finstoff på det omvandlede kjernematerialet til å utføre frisvel-lingstest og svelletrykksmåling. Dette er et vanlig problem for prøver av kjernemateriale, fordi finstoff ofte vaskes bort av borvannet under kjerneboringen (Karlson, 2020). Under prøveprepareringen ble materialet lagt i destillert vann for å prøve å løse det opp i større grad. De største fragmentene løste seg ikke opp i mindre biter når det ble forsøkt å dele dem med fingrene.

Tabell 6.5: Analyseresultater for prøve 3 (pel nr. 23698).

Labororientest	Resultat	Vedlegg
Fri svelling	Ikke utført*	-
Andel materiale < 20 µm	0,7 %	E
Svelletrykk	Ikke utført*	-
XRD-analyse	Muskovitt Kloritt Montmorillonitt	D

\*Frisvellingstest og svelletrykksanalyse er ikke utført på grunn av for lite materiale < 20 µm.

Diffraktogrammene fra XRD-analysen vises i vedlegg D. Her er toppene til den glykolbehandlede prøven forskjøvet mot venstre i forhold til ubehandlet prøve, som vil si at det er påvist svellende mineraler i prøven. Montmorillonitt er påvist, som tilhører den svellende gruppen med leirmineraler som heter smektitt. Det antas at dette har sitt opphav i nedbryting av feltspatmineralene i gneisen. Oppsummering av analyseresultatene er vist i tabell 6.5.



Figur 6.7: Utvikling av svelletrykk for prøve 2.

### 6.1.3 Diskusjon og oppsummering av sprekke- og kjernemateriale

En oppsummerende oversikt over analyseresultatene som er produsert under masteroppgaven er presentert i tabell 6.6. Her er i tillegg resultatene fra SINTEFs to prøver (Eggen, 2019a,b) og resultatene fra Kvarstein (2017) sine laborietester lagt ved. Disse prøvene er tatt av leirmateriale i gneis, i motsetning til prøve 2 og prøve 3 som er tatt fra et parti med mye amfibolitt.

Testing av sleppe- og kjernemateriale fra tunnelene ved Nordøyvegen har vist at det forekommer svellende leire. Av de fire XRD-analysene som er utført, er svellende leirmineraler fra smektitgruppen påvist i tre av dem. Sprekkefylling bestående av svellende mineraler vil over tid kunne gi redusert friksjon og styrke (Nilsen og Palmstrøm, 2000).

Analyseresultatene må vurderes i sammenheng med måten prøvene forekommer på. Prøve 1 har *meget stor* fri svelling og *høyt* svelletrykk. Til tross for at andel materiale < 20 µm bare er 2 %, kan det likevel ha betydning på stabiliteten dersom belegget forekommer på en stor andel av sprekken. Resultatene bør derfor tas i betraktning når permanent sikring bestemmes. Prøve 2 har minimalt svelletrykk som ikke kommer til å gi stabilitetsproblemer. At prøven likevel har *stor* fri svelling trenger ikke å være en motsigelse, da erfaringer har vist at det er dårlig korrelasjonen mellom FS og svelletrykk (Mao, Nilsen og Dahl, 2011). XRD-analysen har påvist kalsitt og dolomitt i prøve 2, noe som i teorien kan medføre dannelse av karst i berggrunnen. Erfaringer fra tidligere tunnelprosjekter viser at karstdannelse ikke har medført problemer (Nilsen, 2020). Likevel kan det ikke utelukkes helt. I prøve 3 er andel materiale



Figur 6.8: Kjernematerialet til prøve 3 fra pel nr. 23698 (Birkeli, 2020).

Tabell 6.6: Oppsummering av analyseresultater for sleppe- og kjernemateriale, inkludert tester utført av SINTEF og Kvarstein (2017). Klassifiseringen er gjort i henhold til NBG (1985).

Prøvenavn	BESKRIVELSE		EGENSKAPER		
	Bergart (visuelt)	Mineraler (XRD-analyse)	Fri svelling [%]	Svettestrykk [MPa]	Andel materiale < 20 µm [%]
<b>Prøve 1</b>	Klebrig, glatt og hvit	Muskovitt	420	0,40	2
Pel nr. 32190	sprekkefylling, 2 cm	Montmorillonitt*	<i>Meget stor</i>	<i>Høyt</i>	
Tunnelprøve	bred, med bergarts- fragmenter av kvarts. Fra venstre side i tunnelvegg.				
<b>Prøve 2</b>	Oppsmuldret og grønt	Lizarditt	162	0,03	3
Pel nr. 32150	sleppemateriale. 4-5 cm	Kalsitt	<i>Stor</i>	<i>Lavt</i>	
Tunnelprøve	bredde, fra høyre side i tunnelvegg.	Dolomitt			
<b>Prøve 3</b>	Svakt omvandlet gneis	Muskovitt	Ikke utført	Ikke utført	1
Pel nr. 23698	fra kjerneboring	Kloritt			
Kjerneprøve		Montmorillonitt*			
<b>Fjørtøftjordtunnelen</b>	Leirmateriale fra sleppe	Ikke utført	240	0,36	8
Pel nr. 30940-30945	i gneis, innsendt av		<i>Meget stor</i>	<i>Høyt</i>	
(SINTEF, Eggen (2019a))	byggherre				
<b>Nøgvafjordtunnelen</b>	Leirmateriale fra sleppe	Ikke utført	192	0,48	11
Pel nr. 23016	i gneis, innsendt av		<i>Stor</i>	<i>Høyt</i>	
(SINTEF, Eggen (2019b))	byggherre				
<b>Nøgvafjordtunnelen</b>	Leirholdig og kompakt	Kloritt	145	Ikke utført	Ikke oppført
Pel nr. 27873	knusningssone i eklogitt	Laumonitt	<i>Stor</i>		
Kjerneprøve	og gneis, fra styrt	Mikroklin			
(Kvarstein, 2017)	kjerneboring	Muskovitt			
		Albitt			
		Beidellitt*			

\*Tilhører smektitt-gruppen, en gruppe leirmineraler som sveller i kontakt med vann.

---

< 20 µm bare 1 %. Siden det er usikkert hvor mye av finstoffet som er vasket ut fra kjerneprøven under boringen, er det vanskelig å si om denne andelen egentlig var større in-situ. Det antas likevel at eventuelle svelleproblemer er liten basert på testresultatene kombinert med de visuelle observasjonene av prøven.

Dersom det forekommer andre ugunstige forhold i tunnelen, kan sleppemateriale med moderate verdier for FS og svelletrykk være tilstrekkelig for en betraktelig reduksjon av stabiliteten (Mao, Nilsen og Dahl, 2011). I slike tilfeller er svelling som oftest ikke hovedårsaken til problemene, men det vil kunne ha negativ påvirkning. Svelleanalysen må dermed alltid vurderes i sammenheng med helhetsbildet i tunnelen.

Ifølge Statens vegvesen (2020b) vil et svelletrykk på 0,5 MPa (målt i ødometer) belaste den påførte sikringen med 0,2 MPa. Erfaringsmessig er 0,2 MPa grensen for om uarmert utstøpning og sprøytebetong påføres skade eller ikke (Rokoengen, 1973). Dermed skal det installeres tung bergsikring med armerte sprøytebetongbuer dersom målt svelletrykk i ødometeret overstiger 0,5 MPa. Det er ikke tilfellet for noen av prøvene langs Nordøyvegen så langt, og sonene har dermed blitt normalt sikret etter Q-systemets sikringsklasser med sprøytebetong og CT-bolter, som vist i vedlegg H. Det må bemerkes at det bare er tatt én prøve fra hver sleppe. Det er dermed ikke mulig å vurdere representativiteten til prøvene. Verdier for fri svelling og svelletrykk vil variere innad i en sleppe, så det kan forventes at det finnes materiale med både høyere og lavere verdier enn de som er målt her. Ved å bestemme permanent sikring ut fra én prøve, kan det resultere i ulik sikring avhengig av hvor i sleppen prøven er tatt fra. Som påpekt ved beskrivelse av undersøkelsesmetodene i avsnitt 6.1.1, er frisvellingstest og svelletrykksmåling indekstester som måler den potensielle svelleevnen og -trykket. Hvordan svelleleiren i prøvene vil oppføre seg i tunnelen avhenger av indre og ytre betingelser. Et annet moment er at det er vanskelig å samle inn uforstyrrede prøver med alt tilhørende finstoff. Dermed ødelegges den opprinnelige strukturen og kompaksjonen til materialet. Likevel gir resultatene en indikasjon på hvilke svelleforhold som kan forventes, og til tross for begrensningene gir testene mer informasjon enn å ikke utføre tester i det hele tatt.

## **6.2 Petrografisk analyse for bergartsbestemmelse**

Under befaring til Nordøyvegen i uke 8 var Austnes-stuffen i Haramsfjordtunnelen inne i en sone bestående av en veldig hard bergart som medførte høy slitasje på borutstyret og redusert inndrift. Denne sonen tilsvarer parti 2, som er utvalgt for nærmere analyse og beskrives i kapittel 7. Byggherre valgte å sende steinprøver fra pel nr. 5575 til SINTEF for borbarhetstesting og bergartsbestemmelse. Da prøvene ankom SINTEF fikk jeg se på dem 10.03.2020. I samråd med Joakim Eggen, laboratorieleder ved SINTEF, ble det avtalt at jeg skulle få et håndstykke av prøvene som deres geolog valgte ut. Dette håndstykket har blitt undersøkt nærmere.

---

## 6.2.1 Beskrivelse av undersøkelsesmetoder

For å bestemme mineralinnholdet i bergartsprøven, har det blitt utført optisk mikroskopering av tynnslip som gir mikroskopisk beskrivelse. Det har også blitt utført makroskopisk vurdering av steinprøven.

### *Preparering av prøve*

Tynnslip ble laget ved sliplaboratoriet, av avdelingsingeniør Håkon Fjærli. Restmaterialet etter prepareringen ble også overlevert slik at en makroskopisk beskrivelse kunne gjøres.

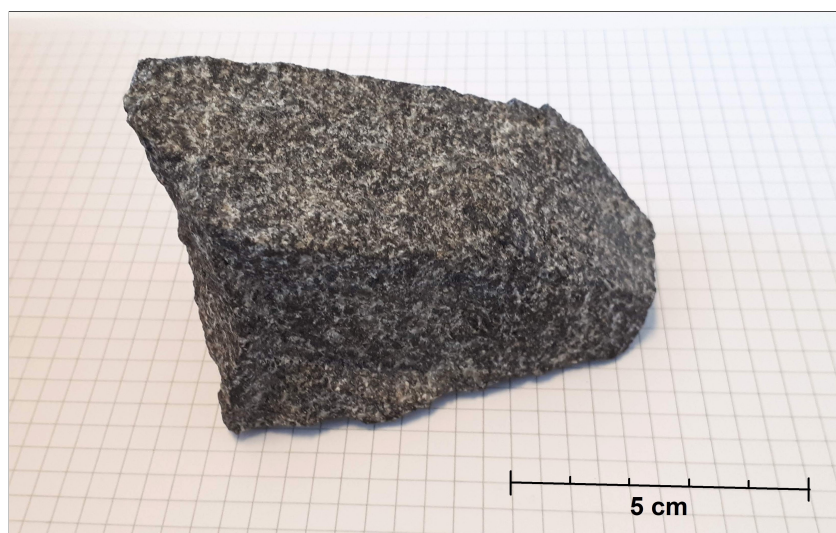
### *Petrografisk analyse*

En petrografisk analyse omfatter to deler: 1) Makroskopisk beskrivelse basert på hvordan prøven observeres med det blotte øyet og med lupe. Farge, kornstørrelse, struktur, eventuell forvitningsgrad og mineraler observeres på makronivå (Statens vegvesen, 2016). 2) Mikroskopisk beskrivelse som utføres ved å se på tynnslip av prøven i optisk mikroskop. Ved å studere tynnslipet i planpolarisert lys (PPL) og krysspolarisert lys (XPL) kan mineralene identifiseres. Petrografisk analyse ble utført under veiledning av professor Mai Britt Mørk.

## 6.2.2 Observasjoner og analyseresultater fra petrografisk analyse

### *Makroskopisk beskrivelse*

Bergartsprøven fremstår som mørk med litt grønnskjær, se figur 6.9. Den har høy anriking av mørke mineraler, i tillegg til noen lyse. Kornstørrelsen er middels, og det er ikke observert noe forvitring. Prøven er tyngre enn normalt og har massiv struktur, uten noen form for lagdeling. Basert på dette antas den å ha magmatisk opprinnelse.



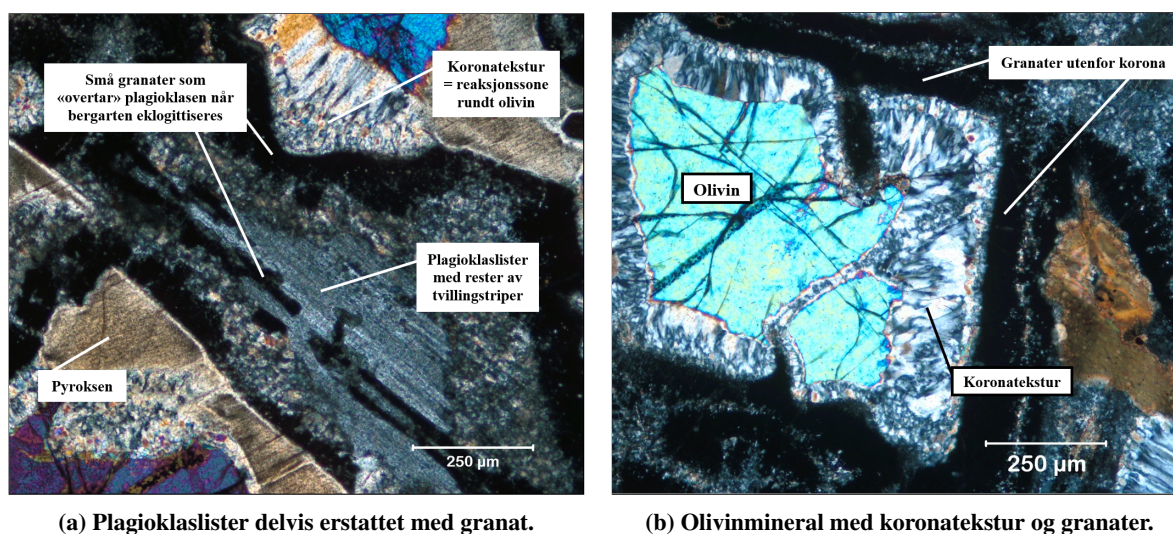
Figur 6.9: Bergartsprøve fra pel nr. 5575 i Haramsfjordtunnelen (Birkeli, 2020).

### *Mikroskopisk beskrivelse*

Vedlegg F viser oversiktsbilde av en representativ del av prøven, i henholdsvis PPL og XPL. Det er ikke tegn til foliasjon, og kornstørrelsen er varierende. Hovedmineralene er feltspat (plagioklas), pyroksen,

olivin og granat, med en liten andel biotitt og opake mineraler.

Bergarten har en tydelig gabbrostruktur, med mineralene plagioklas, olivin og pyroksen, som opprinnelig er en magmatisk bergart. Plagioklasen er listeformet, med grå farge i PPL. Generelt er plagioklasen mye omdannet, som kan ses ved at den har små inneslutninger i XPL. Den opprinnelige magmatiske bergarten har blitt utsatt for metamorfose i eklogitt-facies (høyt trykk og temperatur) (Mørk, 2020). Dette kan ses ved at plagioklasen har reagert og blitt erstattet med granat, som er de svarte mineralene i XPL som «overtar» plagioklasen, se figur 6.10a. Det observeres rester av plagioklas som ikke er omdannet, siden de viser antydning til tvillingstriper.



Figur 6.10: Detaljbilder fra XPL av tynnslip fra pel nr. 5575 (Birkeli, 2020).

Olivinmineralene er fargeløse i PPL og fargerike i XPL, med tydelige riss gjennom kornene. Dette er friske olivinmineraler. På kanten er de omdannet, som vises med en koronatekstur rundt. Koronateksturen er en metamorf reaksjonssone mellom olivin og plagioklas. Se figur 6.10b, som også viser tydelige granater utenfor reaksjonsskanten.

Det siste opprinnelige mineralet i den magmatiske bergarten er pyroksen, som ses ved brune og relativt store korn i XPL. Disse kornene har krystallisert mellom plagioklaslistene og gitt bergarten en ofittisk struktur. Gjennom metamorfose har noe pyroksen blitt omdannet til det grønne pyroksenmineralet omfacitt, som er et av hovedmineralene i den høymetamorfoserte bergarten eklogitt (Mørk, 2020).

Oppsummert kan bergarten kalles for en **delvis eklogittisert olivingabbro med koronatekstur**. At den er delvis eklogittisert betyr av en stor andel av plagioklasen er erstattet med granat, men at metamorfoseprosessen ikke har kommet så langt at bergarten har blitt til en eklogitt.

### 6.2.3 Diskusjon og oppsummering av petrografisk analyse

På Hestøya er det kartlagt metagabbro, en gabbro som er noe omdannet men fortsatt har sin opprinnelige struktur som grovkornet og plagioklasrik. Flere steder på Nordøyane er det kartlagt linser med eklogitt.



---

Mørk (1985) har foretatt studier på disse gabbro- og eklogittforekomstene på Nordøyane. På Flemsøya har det blitt kartlagt en forekomst som er på et metamorfosestadium mellom gabbro og eklogitt, nemlig en koronagabbro. I denne bergarten danner granat og pyroksen koronatekstur mellom magmatisk olivin og ustabil listeplagioklas. De primære magmatiske strukturene er fortsatt synlige. Mineralinnholdet og strukturen til denne forekomsten tilsvarer den analyserte bergartsprøven fra pel nr. 5575. Dette forklarer hvorfor prøven har høy densitet, siden plagioklas (densitet = 2,6) har blitt erstattet med granat (densitet = 3,6-4,3) (Nilsen og Palmstrøm, 2000). Granat har hardhet = 7-7,5. I prøven er granatkornene så små at de bare observeres i mikroskop. Mange små granater resulterer i stort totalt overflateareal, som igjen medfører høyere slitasje enn om granatene hadde vært synlige i håndstykket.

SINTEF har også utført petrografisk analyse for bergartbestemmelse av samme steinprøve. Deres geolog konkluderte med at prøven inneholdt mineralene feltspat (antatt plagioklas), olivin, pyroksen, serpentin, og noe biotitt og opake mineraler (Dahlen, 2020). Bergarten ble klassifisert som en diabas, som er gangbergarten til magma med gabbroittisk sammensetning. SINTEFs observasjoner skiller seg noe ut fra mine. De mener olivinkornene har en rand av serpentin i stedet for en koronatekstur, og de har ikke observert mikrogranatene utenfor denne reaksjonssonen som har erstattet listeplagioklas. Jeg vurderer granatkornene til å være den beste forklaringen på at bergarten oppleves knallhard å bore i.

Gjennom den petrografiske analysen har det blitt konkludert med at bergartsprøven er en delvis eklogittisert olivingabbro med koronatekstur, som videre i masteroppgaven kalles for olivingabbro. Ifølge Mørk (2020) forekommer slike koronittiske olivingabbroer som linser og lag innimellom den sterkt foldede og høymetamorfoserte gneisen som finnes på Nordøyane. Det anses derfor som mulig å møte på mer eller mindre eklogittiserte gabbroer flere steder langs tunneltraséene, men det er veldig vanskelig å forutsi hvor de forekommer når de ikke rekker opp i dagen.

### **6.3 Borbarhetstester fra SINTEF**

Byggherre har per 22.05.2020 sendt inn én prøve med prøveblokker til SINTEFs berg- og geoteknikkavdeling i Trondheim. Formålet var å bestemme borbarhetsegenskapene. Teori og metode for testene blir ikke beskrevet i masteroppgaven siden det ikke er jeg som har utført dem. Resultatene er presentert i tabell 6.7. Det er også beregnet densitet på  $3,44 \text{ g/cm}^3$ , som anses som høy densitet for en bergart.

Som vist i tabellen, har borbarhetstestene gitt indekser med ekstreme verdier. Borsynkindeksen (DRI) kan beskrives som bergartens sprøhetstall korrigert for overflatehardhet (Dahlen, 2020). En ekstremt lav verdi tilsier at det vil være tidkrevende å bore i bergarten. Borslitasjeindeksen (BWI) er en indeks for forventet borslitasje, og en ekstremt høy verdi av denne tilsier høy slitasje og liten levetid på borutstyret. DRI og BWI er funnet fra diagrammer i vedlegg G. Her er verdien til indeksene for steinprøven fra Haramsfjordtunnelen markert med røde piler. Verdiene havner utenfor erfaringsområdet, som er markert med de svarte linjene i diagrammet. På grunn av dette anses indeksene som usikre (Nilsen, 2020). Det anses også som merkelig at steinprøven har lav AV, men likevel ekstremt høy BWI.

---

**Tabell 6.7: Testresultat, beregnede indekser og klassifiseringer for bestemmelse av borbarhetsegenskaper på steinprøve fra Haramsfjordtunnelen, pel nr. 5575 (Dahlen, 2020).**

<b>Egenskap</b>	<b>Gjennomsnittsverdi</b>
Sprøhetstall ( $S_{20}$ )	24,9 <i>Ekstremt lav</i>
Sievers' J verdi (SJ)	1,6 <i>Ekstremt høy overflatehardhet</i>
Slitasjeverdi hardmetall (AV)	7,0 <i>Lav</i>
Borsynkindeks (DRI)	16 <i>Ekstremt lav</i>
Borslitasjeindeks (BWI)	82 <i>Ekstremt høy</i>

---

## 7 | Utvalgte partier for nærmere analyse

For å begrense oppgaven er det i samråd med veileder valgt å plukke ut noen partier i tunnelene som skal analyseres nærmere. Dette kapittelet gir først en beskrivelse av hvilke momenter som har blitt tatt i betraktning ved utvelgelse av partier. Videre følger en presentasjon av hvert av de utvalgte partiene. Dette innebærer en beskrivelse av partiene basert på prognosene fra utførte forundersøkelser, og deretter en begrunnelse for hvorfor akkurat disse partiene er plukket ut. De seismiske profilene som det henvises til kan ses på kartene over partiene. Avslutningsvis gir tabell 7.1 en oppsummerende oversikt over de utvalgte partiene.

### 7.1 Betrakte momenter ved utvelgelse av partier

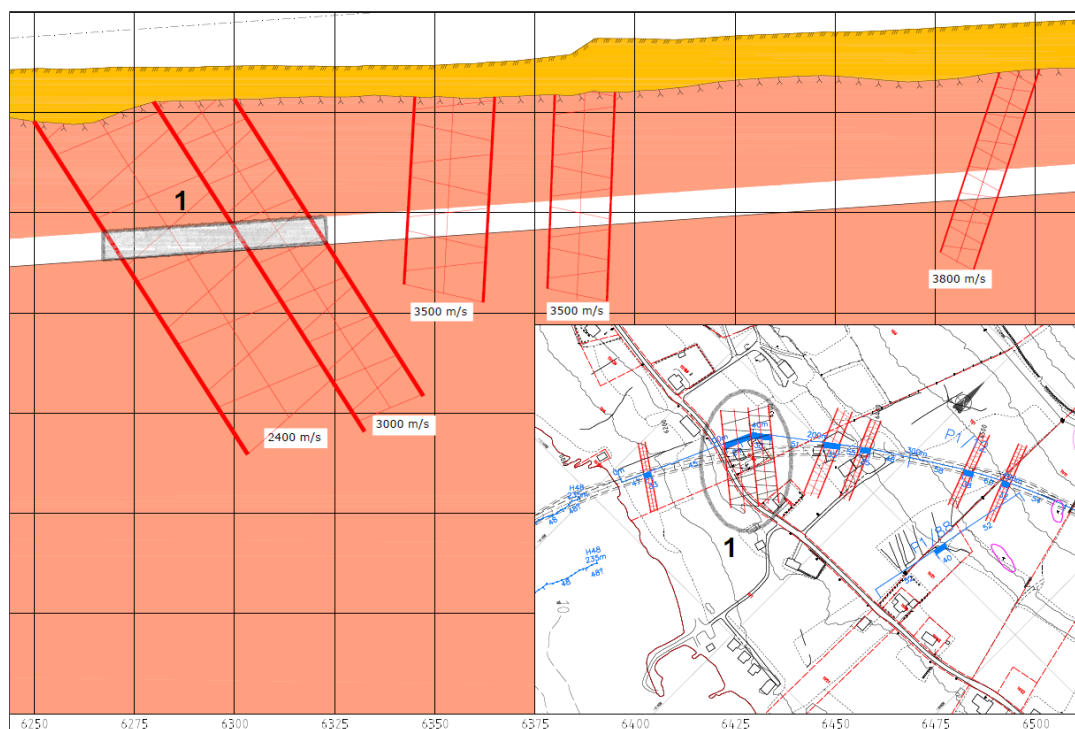
Oversiktskart og profiler for de undersjøiske tunnelene er gjennomgått for å finne partier som kan være interessante å studere videre. Ved utvelgelsen er det lagt vekt på følgende punkter:

- Partiene må være innenfor den delen av tunnelene som er ferdig drevet eller som kan forventes å bli ferdig drevet i løpet av masteroppgaven. Dette er en forutsetning for at undersøkelser under driving skal kunne vurderes opp mot utførte forundersøkelser. Det velges ikke partier fra Hestøya-stuffen som startet driving i januar 2020, siden den trolig ikke kommer under sjøen i løpet av masterperioden. Det velges heller ikke partier fra Myklebust-stuffen, som starter driving etter masterslutt i juni 2020.
- Svakhetssoner med lave seismiske hastigheter og lav bergoverdekning kan potensielt medføre store stabilitetsproblemer. Det er ekstra viktig at undersøkelsene som utføres i disse sonene gir tilstrekkelig og riktig informasjon om forholdene foran stuff. Noen slike soner kan dermed være interessante å studere.
- Det er en fordel om utvalgte partier er dekket med flere undersøkelsesmetoder, både før byggestart og under driving. Dette vil gi et større grunnlag for sammenligning og vurdering av metodenes nytteverdi.
- Partier som fra forundersøkelsene antas å bestå av en annen bergart enn den dominerende gneisen kan være av interesse. Da kan det analyseres om bergartstolkningene fra forundersøkelsene stemmer med resultater og tolkninger fra undersøkelser på stuff.
- Partier der uventede fjellforhold har resultert i redusert inndrift vil være interessante å analysere, siden det ofte er slike partier som medfører forsinkelse og større kostnader for et prosjekt. Befaring til Nordøyvegen ga et innblikk i hvilke utfordringer som har oppstått under driving. To av tunnelstoffene, Austnes og Longva, var på dette tidspunktet inne i utfordrende bergmasse. Dette ble ansett som to interessante partier å velge for grundigere analyse, og det var en fordel at jeg fikk reise ut til stuffene og observere forholdene i disse sonene.
- Under befaring var det ønskelig å finne sleppemateriale fra en eller flere av tunnelene som kunne tas med og testes i laboratorium. Funn av slikt prøvemateriale er tatt med som et moment ved utvelgelse

av partier.

Den endelige bestemmelsen av utvalgte partier ble gjort under befaringen til Nordøyvegen i uke 8. Samtidig var det da mulig å få tilgang til relevant grunnlagsmateriale for de utvalgte partiene for videre studie. Når partiene presenteres i de følgende avsnittene, er informasjonen hentet fra de ingeniørgeologiske rapportene for konkurransegrunnlag (Karlson og Grob, 2018a,b,c) om ikke annet er oppgitt.

## 7.2 Parti 1: Pel nr. 6326-6268



Figur 7.1: Profil og kart over parti 1, ved pel nr. 6326-6268. Modifisert utsnitt fra Karlson og Grob (2018b).

### 7.2.1 Beskrivelse

Parti 1 er i Haramsfjordtunnelen og drives fra Austnes-stuffen. Tunnelen er på dette punktet under land. Utførte forundersøkelser over partiet er refraksjonsseismikk og ingeniørgeologisk feltkartlegging.

Seismisk profil P1/12 går langs tunneltraséen og dekker parti 1. Tolkningen har vist at det er 8-14 m med løsmassedekke over bergoverflaten. Fra refraksjonsseismikken er det også tolket to svakhetssoner rett etter hverandre, se figur 7.1. Den første har seismisk hastighet lik 3000 m/s (tilsvarer bergmasseklasse F, ekstremt dårlig) og antatt plassering ved pel nr. 6326-6300. Den andre har seismisk hastighet lik 2400 m/s (tilsvarer bergmasseklasse G, eksepsjonelt dårlig) og antatt plassering ved pel nr. 6300-6268. Strøket til begge sonene antas å være normalt på tunneltraséen. Bergoverdekningen i parti 1 er under 30 m. Antatt bergartstype er gneis.

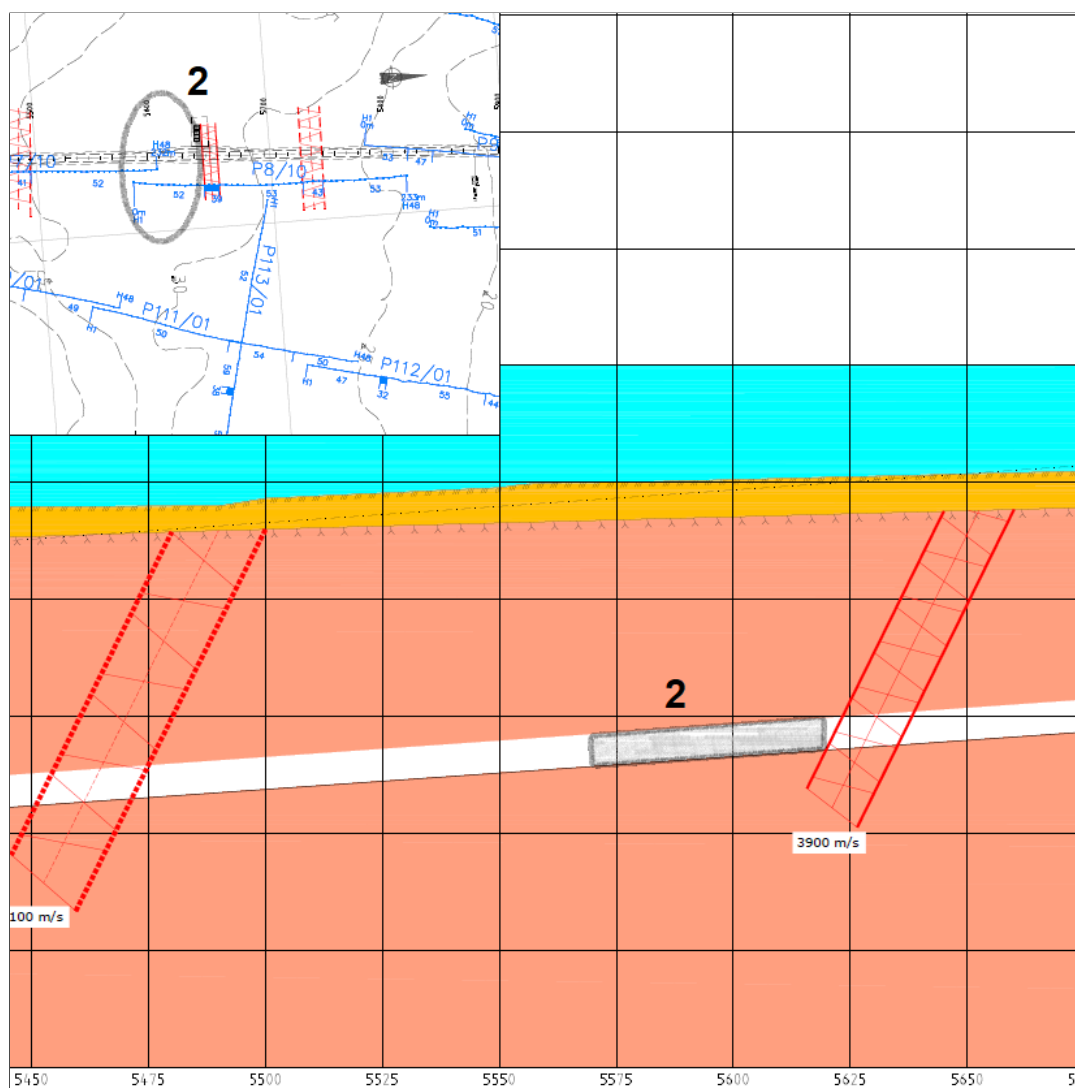
På grunn av løsmasseoverdekning på 5-14 m på Austnes, fantes det få bergblotninger over tunneltraséen. Feltkartleggingen er derfor basert på blotninger i fjellområdet nord for traséen. Her var strukturene

lite fremtredende og så vidt synlige i flybildene. Orienteringen og fallvinkelen til svakhetssonene er stipulert ut fra kartlagte sprekker. Svakhetssonene i parti 1 følger omtrentlig strøkretningen til sprekkesett S2 på 160, men fallet antas å gå i motsatt retning, mot NØ.

### 7.2.2 Begrunnelse

Parti 1 i Haramsfjordtunnelen er valgt fordi partiet er antatt å ha en kombinasjon av lav seismisk hastighet og liten bergoverdekning. Dette tilsier at det kan oppstå stabilitetsproblemer som gjør det utfordrende å drive gjennom sonen. Siden sonen ikke er undersjøisk, er det mulig å vurdere hvordan utført feltkartlegging og refraksjonsseismikk på land utført før byggestart stemmer overens med undersøkelser under driving.

### 7.3 Parti 2: Pel nr. 5620-5569



Figur 7.2: Profil og kart over parti 2, ved pel nr. 5620-5569. Modifisert utsnitt fra Karlson og Grob (2018b).

---

### 7.3.1 Beskrivelse

Parti 2 drives også fra Austnes-stuffen i Haramsfjordtunnelen, se figur 7.2. Utførte forundersøkelser her er akustikk og refraksjonsseismikk.

Seismisk profil P8/10 dekker parti 2. Partiet har seismisk hastighet lik 5200 m/s, og kommer etter en sone med seismisk hastighet på 3900 m/s. Legg merke til at seismisk hastighet før og etter denne sonen har omtrent like seismiske hastigheter, henholdsvis 5300 og 5200 m/s. Det er altså ingen tydelig endring i seismisk hastighet i de øverste metrene i berggrunnen før og etter 3900 m/s-sonen. På bakgrunn av dette antas det at samme bergart opptrer begge stedene (Karlson, 2020). Det antas også at partiene med høye seismiske hastigheter fortsetter nedover mot dypet siden refraksjonsseismikken ikke antyder noe annet.

Overliggende vannsøyle er omtrent 25 m og løsmassemekktigheten er rundt 8 m. Bergoverdekningen over tunnelen er 40-45 m, og det er derfor ikke krav til kjerneboring foran stuff under driving. Berggrunnen i parti 2 antas å bestå av gneis. Dette er vurdert ut fra geologisk feltkartlegging på de omkringliggende øyene samt seismisk hastighet.

### 7.3.2 Begrunnelse

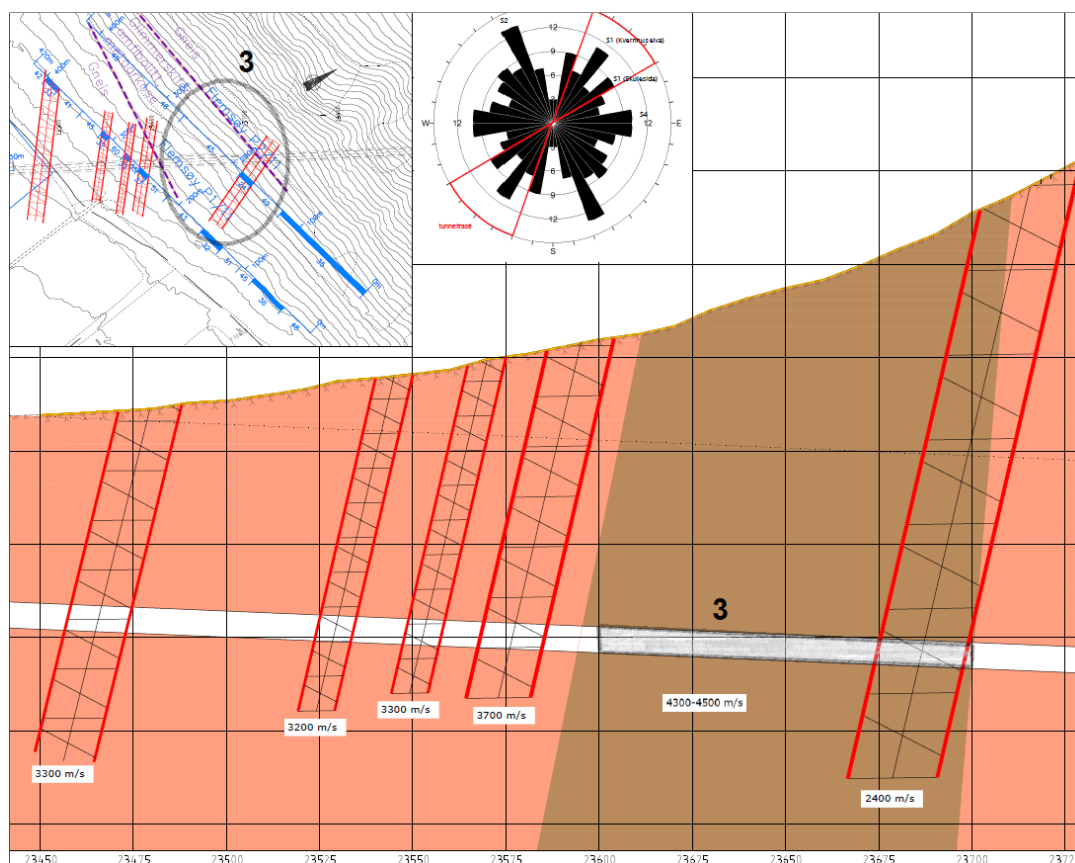
Ved befaring til Nordøyvegen i uke 8, var Austnes-stuffen inne i parti 2. Under sonder- og salveboringen opplevdes det stor slitasje på borutstyret, noe som de ikke hadde opplevd tidligere i tunnelen. Kontrollingeniørene kalte bergarten for gabbro på grunn av dens høye egenvekt, massive struktur og innhold av mørke mineraler (Møre og Romsdal fylkeskommune, 2020e). Likevel var det usikkert hvilken bergart det egentlig var, siden gabbro ikke inneholder det slitende mineralet kvarts. Parti 2 ble altså valgt fordi forundersøkelsene ikke har forutsett at det skulle forekomme en annen bergart en gneis her, og dette har fått negative virkninger på inndriften. Det vil dermed være interessant å analysere partiet nærmere.

## 7.4 Parti 3: Pel nr. 23600-23700

### 7.4.1 Beskrivelse

Parti 3 drives fra Longva-stuffen i Nogvafjordtunnelen, se figur 7.3. Partiet er under land. Utførte forundersøkelser er refraksjonsseismikk på land og ingeniørgeologisk feltkartlegging, med detaljert berggrunnsgeologisk og strukturgeologisk kartlegging utført av NGU (Ganerød og Lutro, 2011).

Refraksjonsseismikk utført langs tunneltraséen på land fra Longva slutter ved pel nr. 23450. Over parti 3 finnes det altså ikke tolket refraksjonsseismikk langs traséen. Derimot er det skutt to seismiske profiler som krysser tunnelen med spiss vinkel på omtrent 45°, P1/11 og P2/11. Disse har ifølge Geomap (2011) avdekt en løsmassemekktighet på rundt 20 m, som av uviss grunn ikke er tegnet inn i figur 7.3. Ifølge tolkninger fra refraksjonsseismikken skal første 79 m av parti 3 ved pel nr. 23600-23679 ha seismisk hastighet lik 4300-4500 m/s. Siste 21 m ved pel nr. 23679-23700 antas å være en svakhetsone med seismisk hastighet lik 2400 m/s (tilsvarer bergmasseklasse G, eksepsjonelt dårlig). Denne sonen krysser



Figur 7.3: Profil og kart over parti 3, ved pel nr. 23600-23700. Modifisert utsnitt fra Karlson og Grob (2018c).

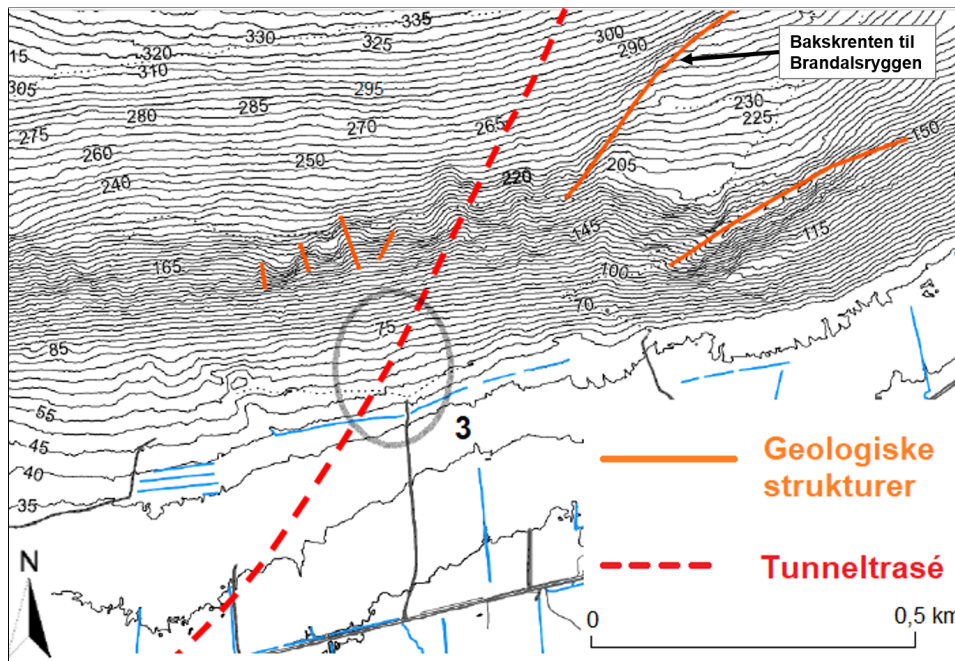
tunnelen med en omtrentlig vinkel på  $50^\circ$ . Bergoverdekningen langs parti 3 er økende, fra 80-110 m.

Nogvafjordtunnelen er lagt utenfor det ustabile området Brandalsryggen som ligger nordøst for tunnelpåhugget. Ifølge Ganerød og Lutro (2011) er det ikke kartlagt noen betydelige sprekkesoner langs den landlige tunneltraséen ved Longva. Det er heller ingen tegn til bevegelse bakenfor baksprekken som skiller Brandalsryggen fra resten av fjellområdet. På grunn av tykt løsmassedecke over tunneltraséen, er det kartlagt blotninger i fjellområdet for å få et bilde av sprekkesettene og eventuelle svakhetssoner som kan finnes igjen i tunnelen. Orienteringen til tolkede lavhastighetssoner fra refraksjonsseismikken er basert på orienteringen til geologiske strukturer og lineamenter som er observert i fjellsiden like ved traséen. Et utsnitt av disse vises i figur 7.4. Strukturene rett nord for parti 3 er begrunnelsen for antatt strøk til sonen på 2400 m/s (jf. figur 7.3). Baksikrenten til Brandalsryggen er markert.

Detaljert berggrunnskart i vedlegg A viser at det er tolket en sone med glimmerskifer, amfibolitt og metaarkose i dagen over parti 3. Ifølge Karlson og Grob (2018c) er det «mulig» at disse bergartene opptrer i parti 3, og dette er markert med brun farge i figur 7.3.

#### 7.4.2 Begrunnelse

Drivingen fra Longva-stuffen har vært utfordrende helt fra start fordi andelen dårlig bergmasse har vært mye større enn forventet (Karlson, 2020). Ved befaring i uke 8 var stuffen ved pel nr. 23654, og hadde



Figur 7.4: Utsnitt av kart over geologiske strukturer på Flemsøya/Skuløya. Markert område på tunneltraséen tilsvarer omtrentlig lokasjon for parti 3. Modifisert etter Karlson og Grob (2018c).

problemer med at utført injeksjon ikke tettet bergmassen som ønsket. Bergmassen var også her av mye dårligere kvalitet enn forventet fra forundersøkelsene, og byggherre lurte på hvordan inndriften kunne forventes å bli videre. Det ble dermed vurdert som interessant å se nærmere på partiet som stoffen var i under befaring.

## 7.5 Parti 4: Pel nr. 27900-27858

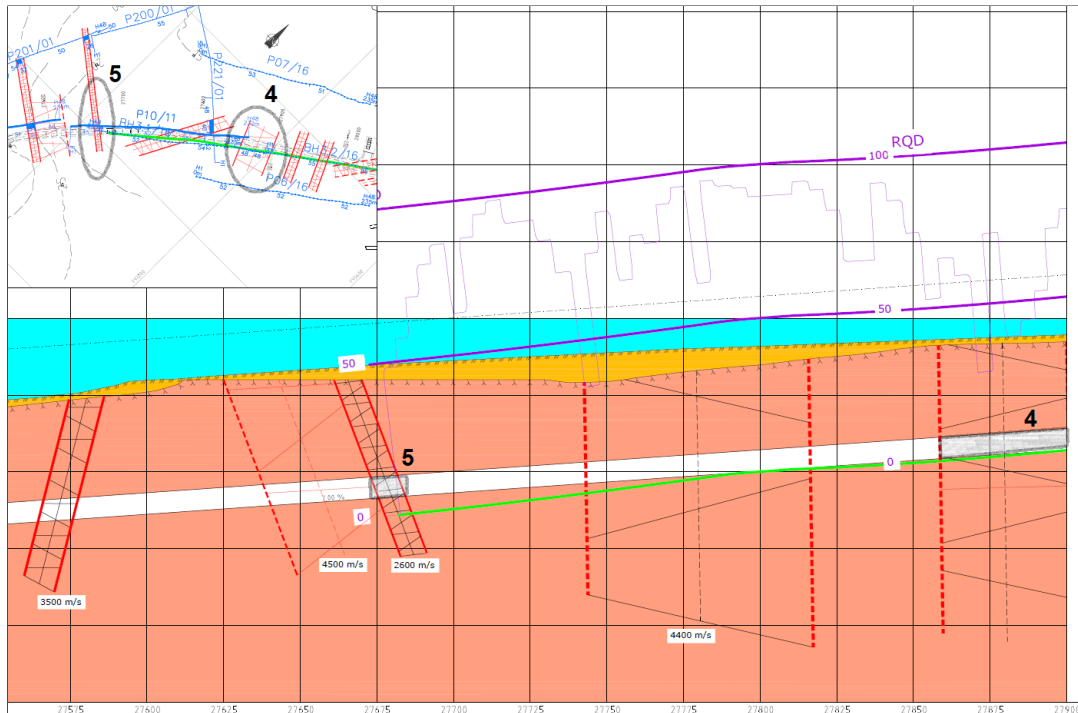
### 7.5.1 Beskrivelse

Parti 4 drives fra stoffen Fjørtofta S, og er en del av Nogvafjordtunnelen. Se figur 7.5. Utførte forundersøkelser er akustikk, refraksjonsseismikk, styrt kjerneboring fra land og seismisk tomografi mellom kjerneboring og sjøbunn.

Basert på utført refraksjonsseismikk i profil BH3.1/16 og profil BH3.2/16 langs tunneltraséen, har seismisk hastighet i parti 4 blitt tolket til å være 4800 m/s i de øverste metrene i bergmassen, med seismiske hastigheter på 5500 og 5400 m/s henholdsvis før og etter partiet. Seismikken har altså tolket en reduksjon i den seismiske hastigheten i parti 4 i forhold til bergmassen omkring, men 4800 m/s tilsvarer bergmasseklasse A/B (lite oppsprukket). Det skulle derfor ikke være noen grunn til å forvente en svakhetssone i parti 4 basert på refraksjonsseismikken.

Det retningsstyrte kjerneborhullet fra Fjørtofta sør, BH3, går gjennom parti 4. Logging av disse bor-kjernene utført av Norconsult (2012), gav lav RQD på store deler av partiet. Se lilla graf plassert over parti 4 i figur 7.5. På grunn av denne høye oppsprekningen antas det at partiet er en svakhetssone som refraksjonsseismikken ikke har oppdaget. Mer detaljert beskrivelse av resultatene fra kjerneloggingen





**Figur 7.5: Profil og kart over parti 4 ved pel nr. 27900-27858 og parti 5 ved pel nr. 27685-27672. Modifisert utsnitt fra Karlson og Grob (2018c).**

og seismisk tomografi mellom BH3 og sjøbunnen presenteres i kapittel 8.

Antatt bergart i parti 4 er gneis. Bergoverdekningen er 25-30 m, med opptil 10 m overliggende vannsøyle og omtrent 2 m løsmassedecke.

## 7.5.2 Begrunnelse

Parti 4 er valgt på bakgrunn av at det er utført mange typer undersøkelser av bergmasseforholdene her, særlig før byggstart. Dette gir en mulighet til å sammenstille resultater fra refraksjonsseismikk, styrt kjerneboring og seismisk tomografi opp mot ingeniørgeologiske undersøkelser som utføres under drif. I tillegg ser det fra forundersøkelsene ut til at parti 4 er en svakhetsone som refraksjonsseismikken ikke har oppdaget. Dette anses som interessant å analysere nærmere.

## 7.6 Parti 5: Pel nr. 27685-27672

### 7.6.1 Beskrivelse

Parti 5 drives også fra Fjørtofta S og er en del av Nøgvafjordtunnelen i figur 7.5. Utførte forundersøkelser er akustikk og refraksjonsseismikk.

Seismisk profil P10/11 langs tunneltraséen dekker partiet, og tolkningen av dette viser en 13 m lavhastighetszone på 2600 m/s. Seismisk profil P201/01 går omtrent parallelt med og vest for tunneltraséen. I dette profilet har det også blitt tolket en lavhastighetszone på 2600 m/s, som antas å være samme sone som i parti 5. På bakgrunn av dette har strøket til sonen blitt bestemt. Den krysser tunneltraséen med omtrent rett vinkel. Sonens orientering er også stipulert basert på sprekkemålinger fra den ingeniørgeo-

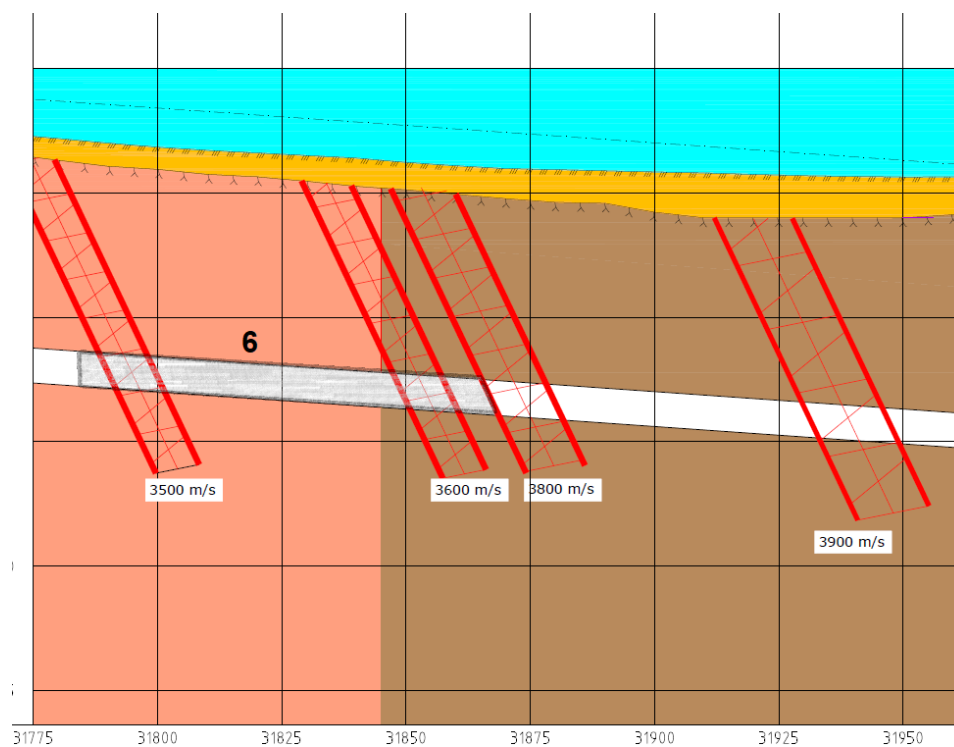
logiske kartleggingen på land, men dette er usikkert ifølge Karlson og Grob (2018c). Lavhastighetssonens orientering kan dermed avvike fra tolket orientering.

Bergoverdekningen over tunnelnivå er 30 m, deretter omtrent 5 m med løsmassedekke og en vannsøyle på omtrent 15 m over. Antatt bergart er gneis.

## 7.6.2 Begrunnelse

En svakhetszone med lav seismisk hastighet kombinert med liten bergoverdekning kan gi utfordringer under driving. Sonen er undersjøisk, noe som medfører et potensiale for ukontrollert vanninntrengning med høyt trykk. I tillegg økes usikkerheten angående dens plassering og orientering i forhold til tunneltraséen.

## 7.7 Parti 6: Pel nr. 31783-31865

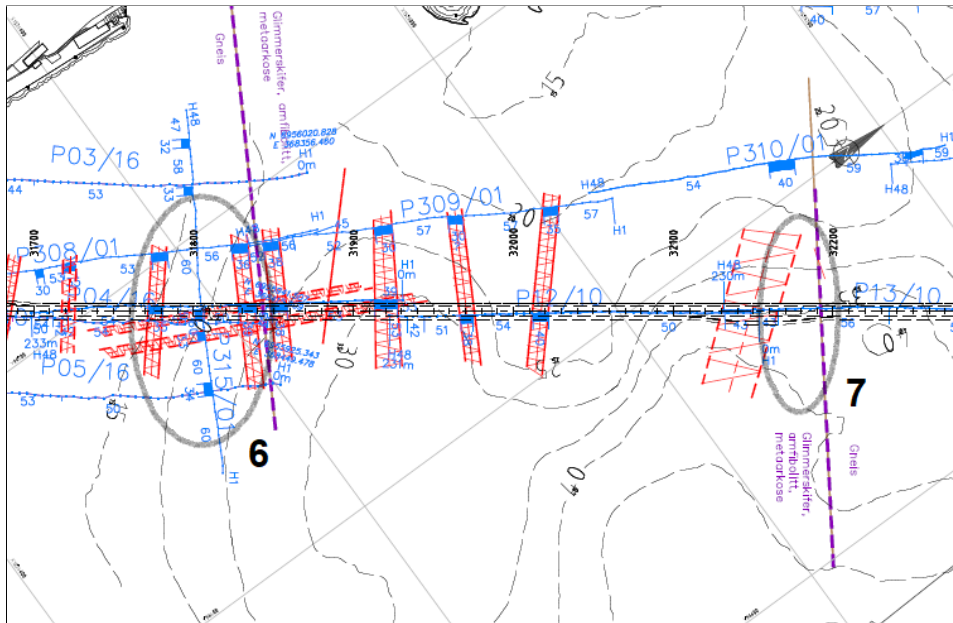


Figur 7.6: Profil over parti 6, pel nr. 31783-31865. Modifisert utsnitt fra Karlson og Grob (2018a).

### 7.7.1 Beskrivelse

Parti 6 vises i figur 7.6 og 7.7, og er en del av Fjørtoftfjordtunnelen som drives fra Fjørtofta N. Utførte forundersøkelser er akustikk og refraksjonsseismikk.

Det er utført flere runder med refraksjonsseismikk langs ulike profiler i parti 6, som vist i figur 7.7. Tolkning av seismiske profiler parallelt med tunneltraséen, P308/01 og P11/10, viser svakhetssoner med seismisk hastighet lik 3500-3600 m/s (Geomap, 2002, 2011). Disse har strøk normalt på traséen. Mellom disse har bergmassen god kvalitet med seismisk hastighet lik 5000-5500 m/s. Tolkning av seismisk profil på tvers av tunnelen, P315/01, viser derimot en lavhastighetszone på 3100 m/s som kan



Figur 7.7: Kart over parti 6 ved pel nr. 31783-31865, og parti 7 ved pel nr. 32150-32202. Modifisert utsnitt fra Karlson og Grob (2018a).

gå langs tunnelen i hele parti 6 (Geomap, 2002). Det er en tydelig hyppig oppreden av svakhetssoner i området, noe som kan ha sammenheng med en sideforkastning fra MTF som ser ut til å gå rett nord for Fjørtofta med strøk VNV-ØSØ. Denne er kartlagt fra batymetriske målinger av strukturene i Fjørtoftfjorden (Dehls, Olesen og Rønning, 2012).

Sprekkemålinger fra ingeniørgeologisk feltkartlegging på land er grunnlaget for antagelsene om svakhetssonenes strøk og fall:

- Tversgående svakhetssoner (3500-3600 m/s): Retning sammenfallende med S2-strukturen på Fjørtofta, som har strøk lik 167. Fallretning er antatt mot NØ basert på batymetriske målinger av sideforkastning til MTF. Dersom dette stemmer vil sonene møtes i hengen først.
- Langsgående svakhetszone (3100 m/s): Antas å tilhøre S3-strukturen, som har orientering 011/68 Ø.

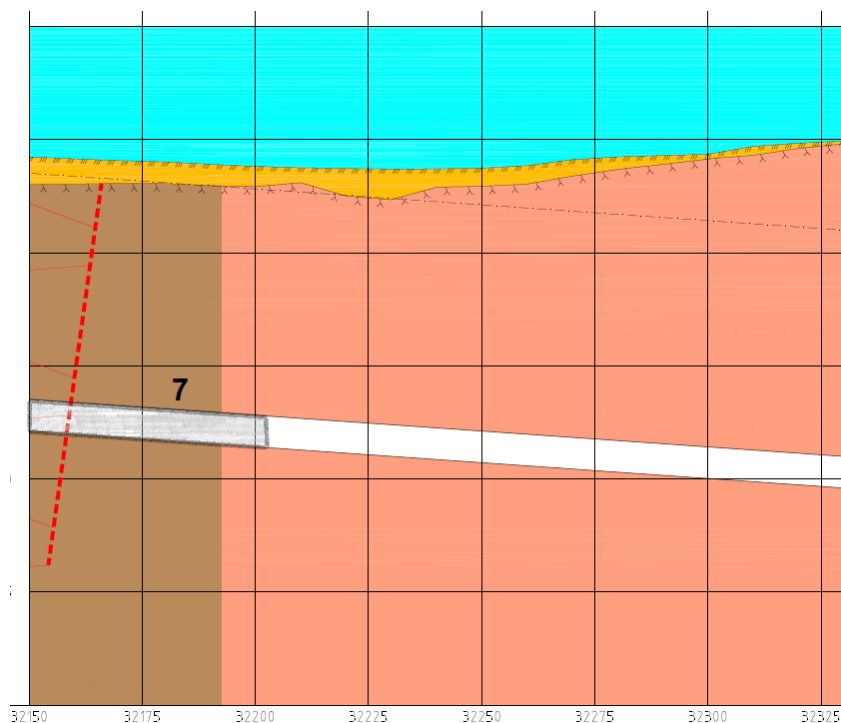
I parti 6 er bergoverdekningen 35 m, løsmassedekket 4-6 m og den overliggende vannsøylen 15-20 m. Detaljert berggrunnskart i vedlegg A viser at det er kartlagt glimmerskifer, amfibolitt og metaarkose nord på Fjørtofta. Basert på dette er det «mulig» at disse bergartene vil opptre i parti 6, med en «mulig» bergartsgrense mellom gneis og glimmerskifer/amfibolitt/metaarkose ved pel nr. 31845.

### 7.7.2 Begrunnelse

Parti 6 er valgt på grunn av at de refraksjonsseismiske tolkningene har vist mange svakhetssoner både på tvers av og langs med tunneltraséen. Svakhetssoner med spiss vinkel til tunnelen vil følge den over en lengre strekning. Den langsgående svakhetssonen antas å ha et relativt steilt fall på 68°. Steiltstående og leirfylte slepper med liten vinkel til tunnelaksen kan ifølge Nilsen (2016) medføre stabilitetsproblemer, så dette kan også bli et mulig problem ved den langsgående svakhetssonen i parti 6. Det vil også være

interessant å analysere om undersøkelser under driving påviser den «mulige» bergartsgrensen rundt pel nr. 31845, og om bergartsgrensen i det hele tatt finnes.

## 7.8 Parti 7: Pel nr. 32150-32202



Figur 7.8: Profil over parti 7, ved pel nr. 32150-32202. Modifisert utsnitt fra Karlson og Grob (2018a).

### 7.8.1 Beskrivelse

Parti 7 drives også fra Fjørtofta N i Fjørtoftfjordtunnelen. Utførte forundersøkelser er akustikk og refraksjonsseismikk.

Seismisk profil P13/10 langs tunneltraséen dekker parti 7, se figur 7.7. De første 9 m er tolket til å være en svakhetssone med seismisk hastighet lik 4300 m/s (tilsvarer bergmasseklasse C), mens resten av partiet har seismisk hastighet lik 5600 m/s. Svakhetssonens plassering stemmer bra med batymetriske målinger som viser at en sideforkastning fra MTF med strøk VNV-ØSØ finnes her.

Bergoverdekningen i parti 7 er rundt 50 m. Løsmassedekket er 4-6 m og den overliggende vannsøylen er på omtrent 30 m. I likhet med parti 6, er det også i parti 7 stipulert en «mulig» bergartsgrense på bakgrunn av kartlagt glimmerskifer, amfibolitt og metaarkose nord på Fjørtofta, se detaljert berggrunnskart i vedlegg A. Grensen mellom glimmerskifer/amfibolitt/metaarkose og gneis kan i parti 7 ved pel nr. 32193, se figur 7.8.

### 7.8.2 Begrunnelse

Parti 7 er valgt fordi det er antatt fra forundersøkelsene at det skal bestå av en annen bergart enn den dominerende gneisen. Under befaring til stoffen ved Fjørtofta N i uke 8, var stoffen ved pel nr. 32202.

---

Det ble da funnet sprekke materiale i området bak stuff som ble tatt med for laboratorietesting. Dermed ble det vurdert som interessant å gjøre en grundigere analyse av partiet.

## **7.9 Tabell med oversikt over utvalgte partier**

Tabell 7.1 gir en oversikt over utvalgte partier langs Nordøyvegen som er beskrevet i de foregående avsnittene, og som skal analyseres nærmere i neste kapittel. Tabellen viser også forventet bredde, seismisk hastighet og bergoverdekning basert på forundersøkelsene, og hvilke undersøkelser som er utført under driving.

Tabell 7.1: Oversikt over utvalgte partier for nærmere analyse i masteroppgaven.

Partinr.	Stuff	Pel nr. fra - til	Bredde	$V_p$ fra seismiske forundersøkelser	Berg-overdekning	Utførte forundersøkelser	Undersøkelser under driving	Merknad
1	Austnes (Haramsfjordtunnelen)	6326 - 6268	26 m + 32 m	3000 m/s + 2400 m/s	< 30 m	Refraksjonsseismikk, feltkartlegging	Sonderboring m/MWD, kjerneboring, tunnelkartlegging	- Ikke undersjøisk - To svakhetssoner rett etter hverandre
2	Austnes (Haramsfjordtunnelen)	5620 - 5569	51 m	5200 m/s	40-45 m	Akustikk, refraksjonsseismikk	Sonderboring m/MWD, tunnelkartlegging, prøve til borbarhetstest og petrografisk analyse	- Undersjøisk - En uventet bergart som sliter mye på borutstyret
3	Longva (Nogvafjordtunnelen)	23600 - 23700	79 m + 21 m	4300-4500 m/s + 2400 m/s	80-110 m	Refraksjonsseismikk, feltkartlegging	Sonderboring m/MWD, kjerneboring, tunnelkartlegging, XRD-analyse av prøve fra borkjerne	- Ikke undersjøisk - Bare antatt svakhets-sone siste 21 m
4	Fjørtofta S (Nogvafjordtunnelen)	27900 - 27858	42 m	4800 m/s	25-30 m	Akustikk, refraksjonsseismikk, styrt kjerneboring, seismisk tomografi i borhull	Sonderboring m/MWD, kjerneboring, tunnelkartlegging	- Undersjøisk - Styrt kjerneboring viser RQD < 50, men ikke synlig i seismikken
5	Fjørtofta S (Nogvafjordtunnelen)	27685 - 27672	13 m	2600 m/s	30 m	Akustikk, refraksjonsseismikk	Sonderboring m/MWD, kjerneboring, tunnelkartlegging	- Undersjøisk
6	Fjørtofta N (Fjørtoftfjordtunnelen)	31783 - 31865	82 m	3100-3600 m/s	35 m	Akustikk, refraksjonsseismikk	Sonderboring m/MWD, kjerneboring, tunnelkartlegging	- Undersjøisk - «Mulig» bergartsgrense
7	Fjørtofta N (Fjørtoftfjordtunnelen)	32150 - 32202	52 m	4300-5600 m/s	50 m	Akustikk, refraksjonsseismikk, feltkartlegging	Sonderboring m/MWD, tunnelkartlegging, laboratorie-tester av sprekkefylling	- Undersjøisk - «Mulig» bergartsgrense

## 8 | Gjennomgang av utvalgte partier

I dette kapittelet presenteres utførte ingeniørgeologiske undersøkelser med tilhørende resultater og tolkninger for hvert av de utvalgte partiene. Resultatene og tolkningene fra utført akustikk, refraksjonsseismikk og ingeniørgeologisk feltkartlegging ble presentert under beskrivelsen av hvert parti i kapittel 7. Det refereres til beskrivelsene av disse prognosene når forundersøkelsene gjennomgås. Grundig gjennomgang av tilgjengelig grunnlagsmateriale har resultert i en forholdsvis detaljert presentasjon av utførte undersøkelser under driving. Dette anses som nødvendig for å få et helhetlig inntrykk av hvilke resultater undersøkelsene har gitt og hvordan driveforholdene har vært i hvert parti. Eventuelle utfordringer fra drivingen i partiene tas opp fortløpende, og observasjoner fra undersøkelsene sammenlignes der det er naturlig. For utførte undersøkelser under driving er følgende grunnlagsmateriale brukt:

- Kjerneboringene foran stuff beskrives ut fra kjernelogger som jeg har fått tilgang til fra prosjektet (Møre og Romsdal fylkeskommune, 2020b).
- Om ikke annet presiseres, baserer avsnittene med utført kartlegging på stuff seg på både notater fra kontrollingeniørenes dagbøker (Møre og Romsdal fylkeskommune, 2020a) og registrert kartlegging i *Novapoint Tunnel - Geologi og bergsikring* (Møre og Romsdal fylkeskommune, 2020f). Alle figurene som viser kartlegging fra NP er utsnitt herfra.
- Dagbøkene har også gitt god informasjon om observasjoner fra sonderboringene, som et supplement til sonderbøringsrapporter fra entreprenør (Skanska, 2019/2020).
- Nettstedet <https://beverteamonline.azurewebsites.net/> har blitt benyttet for å få tilgang til borparametertolkningene fra MWD-data (Bever Control AS, 2020). Her finnes det MWD-data og borparameter-tolkninger for langhull (sonder- og injeksjonshull), salvehull og boltehull. Det er valgt å fokusere på langhullene, siden disse gir informasjon om forholdene langt foran stuff. Borparametertolkningene fra langhullene kan dermed benyttes mer aktivt når avgjørelser tas i drivefasen. Det er også valgt å bare se på tolket hardhet, siden hardhet er den borparameter-tolkningen som erfaringsmessig stemmer best med de virkelige forholdene (Møre og Romsdal fylkeskommune, 2020e).

Når utført kartlegging på stuff presenteres, beskrives bergmassekvaliteten ut fra Q-verdi, bergmasseklasse eller sikringsklasse (SK). Sammenhengen mellom bergmasseklasse, Q-verdi og sikringsklasse som benyttes ved Nordøyvegen vises i vedlegg H. Tabell 8.1 viser en forenklet versjon.

Basert på gjennomgangen av undersøkelsene som utføres i parti 1-7, vil det avslutningsvis bli gjort en samlet vurdering av nytteverdien til metodene i avsnitt 8.8.

### 8.1 Parti 1: Pel nr. 6326-6268

#### 8.1.1 Forundersøkelser

En oppsummering av utførte forundersøkelser med relevante resultater og tolkninger er presentert i tabell 8.2. Mer detaljert beskrivelse er tidligere gitt i avsnitt 7.2.1.

**Tabell 8.1: Sammenheng mellom bergmasseklasse, kartlagt Q-verdi og sikringsklasse for permanent sikring (Statens vegvesen, 2020a).**

Bergmasseklasse	Q-verdi	Sikringsklasse
A/B Lite oppsprukket	$Q > 10$	SK I
C Moderat oppsprukket	$Q = 10 - 4$	SK II
D Tett oppsprukket	$Q = 4 - 1$	SK III
E Svært dårlig	$Q = 1 - 0,2$ $Q = 0,2 - 0,1$	SK IV-a SK IV-b
F Ekstremt dårlig	$Q = 0,1 - 0,01$	SK V
G Eksepsjonelt dårlig	$Q < 0,01$	SK VI

**Tabell 8.2: Oppsummering av resultater og tolkninger fra utførte forundersøkelser for parti 1, pel nr. 6326-6268 i Haramsfjordtunnelen.**

Utførte forundersøkelser	Resultater/tolkninger
Refraksjonsseismikk	- Løsmassedekke 8-14 m
	- Bergoverdekning < 30 m
	- Pel nr. 6326-6300: $V_p = 3000$ m/s
	- Pel nr. 6300-6268: $V_p = 2400$ m/s
Ingeniørgeologisk feltkartlegging	- Svakhetssoner: Strøk lik 160, fall mot NØ
	- Bergart: Gneis

## 8.1.2 Undersøkelser under driving

### Kjerneboring fra pel nr. 6341

Siden parti 1 består av to soner med seismisk hastighet  $\leq 3000$  m/s, har det blitt utført kjerneboring foran stoff. Kjerneboringen startet ved pel nr. 6341 og boret 69 m til pel nr. 6272. Fra parti 1 kan følgende punkter fra kjerneloggen oppsummeres:

- Bergartstypen varierer mellom ulike gneisbergarter: Granittisk gneis, øyegneis, amfibolittisk gneis og båndgneis. Noen steder har gneisen innslag av granat, pyritt, glimmer, kalk eller pegmatitt.
- Det ser ut til at det er en svakhetszone ved pel nr. 6313-6287. Se bilder av kjernene i vedlegg J, med avmerket omtrentlig når sonen starter og slutter med røde piler. Her er lange partier med sterkt oppsprukket og til dels oppknust berg, med leirbelegg på sprekker. Flere seksjoner har kjernetap og noe kalkutslag på sprekken. Q-verdien ligger mellom 0,06-1,0. Innimellom er det totalt 6 m med  $Q = 1-5$ , hvilket betyr at det kan forventes små bedre partier innad i den dårlige sonen.
- Etter svakhetssonen blir bergmassekvaliteten gradvis bedre, med  $Q = 9-62$  de siste 4 m av kjernehullet.

Den antatte totale bredden på sonene lik 58 m er over dobbelt så bred som den observerte svakhetssonen



---

på omtrent 26 m. Den dårlige bergmassekvaliteten kan forventes å stoppe omtrent 20 m før antatt, ved pel nr. 6287.

#### *Sonderboring med slaghammer*

- **4 hull á 30 m fra pel nr. 6334:** Det merkes en dårlig sone 18-20 m frem. Dette tilsvarer ved pel nr. 6316-6314, og stemmer godt overens med antatt svakhetssone fra kjerneboringen ved pel nr. 6313. Sonen ser ut til å komme fra venstre side mot høyre, med fall mot NNØ. Fallretning ser altså ut til å stemme med antagelsene fra forundersøkelsene. Ingen vannlekkasje.
- **4 hull á 29,5 m fra pel nr. 6311:** Høy borsynk (> 4 m/min) første 6-8 m (fram til pel nr. 6305-6303), ellers jevn borsynk videre innover (2,5-3,5 m/min). Kvartsåre etter 20 m. Ingen vannlekkasje.
- **4 hull á 29,5 m fra pel nr. 6291:** Betydelig bedre fjell, med jevn borsynk (2,5-3,0 m/min) og lite fastboring. Særlig etter 15 m blir fjellet hardt. Dette tilsvarer pel nr. 6276, som er der kjerneboringen viste fjell med god kvalitet (bergmasseklasse A/B) i slutten av kjernehullet. Vannlekkasje på 3-4 l/min i ett hull, ellers tørt.

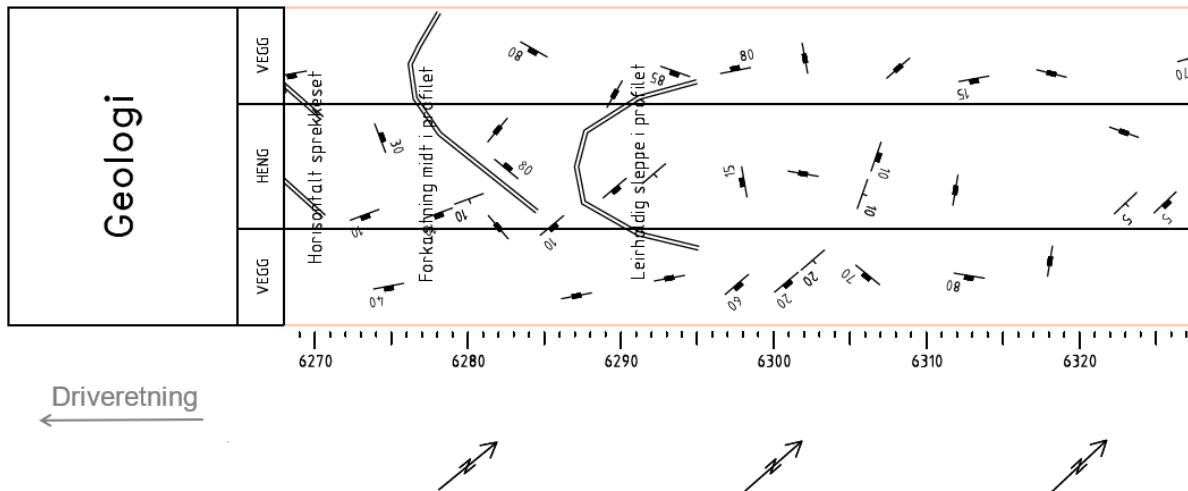
#### *MWD og borparametertolkning*

I vedlegg K.1 vises en figur med tolket hardhet for de presenterte sonderhullene langs parti 1 (Bever Control AS, 2020). Figuren har også med noen forbolter (korte hull), som automatisk fulgte med når tegningen ble generert. For sonderhullene kan det observeres at hardheten fra pel nr. 6334 gradvis endres fra større andel gul (borsynk = 3,2-3,8 m/min) til større andel rød (borsynk = 4,6-5,3 m/min). Det tyder altså på at borsynken gradvis har økt på dette strekket, noe som kan være på grunn av dårligere bergmasse. I tillegg observeres det at borsynken er ujevn, som også er en indikasjon på dårlig bergmasse. Midt i sonderhullene fra pel nr. 6291 (tilsvarende slutten av kjernehullet) øker hardheten litt igjen og bergmassekvaliteten kan forventes å bli bedre. Legg også merke til at hardheten reduseres til svart (borsynk > 5,3 m/min) mot slutten av siste sonderboring. Dette er utenfor parti 1, men tyder på at bergmassekvaliteten forverres videre framover.

#### *Kartlegging på stoff*

Under kartlegging på stoff er det tydelig at resultatene fra utført kjerneboring har vært veiledende for avgjørelser som har blitt tatt. Se figur 8.1 for utført kartlegging med Q-metoden og på utbrettsprofil som er registrert i NP. Ved pel nr. 6323 settes SRF = 2,5 på grunn av at det forventes at stoffen kommer inn i en svakhetssone noen meter lengre framme.  $Q = 1,1$  (SK III). Det blir også besluttet å utvide profilet og bruke forbolter c/c 0,5 m ved pel nr. 6319 av samme grunn som over. I tillegg skytes det reduserte salvelengder på 3-4 m. Videre salveboring fra pel nr. 6319 hadde problemer med å bore kuttet på grunn av at berget i nedre del av stoffen var oppsprukket og forvitret. Det kan dermed tyde på at antagelsen fra sonderboringen om at svakhetssonen faller mot NNØ (som tilsvarer motsatt retning av driveretningen) stemmer. Det fortsettes med forbolter fra pel nr. 6315 grunnet resultatene fra kjerneboringen. Ved pel nr. 6311 settes SRF = 5, siden det drives i svakhetssonen. Bergmassekvaliteten beregnes til  $Q = 0,33$

RQD/Jn		50/9,0	50/9,0	60/9,0	60/9,0	50/9,0	50/9,0	30/9,0	50/9,0
Jr/Ja		1,5/3,0	1,5/3,0	1,5/3,0	1,5/3,0	1,5/3,0	1,5/3,0	1,5/3,0	1,5/3,0
Jw/SRF		0,66/1,0	1,0/1,0	0,66/1,0	0,66/1,0	1,0/2,5	1,0/5,0	1,0/5,0	1,0/2,5
Q-Verdi		1,8	2,8	2,2	2,2	1,1	0,56	0,33	1,1
Bergklasse									
Injeksjon									



Figur 8.1: Utsnitt fra registrert kartlegging i *Novapoint Tunnel* for parti 1. Tegnforklaring finnes i vedlegg C.

(SK IV-a). Tettere forbolter benyttes videre på grunn av tett oppsprekking, og det ser ut til å være lite innspenning i fjellet som er av rufsete kvalitet. Der det fra kjerneboringen forventes noe bedre kvalitet benyttes det vanlig forbolting igjen (c/c 0,5 m).  $Q = 0,56$ , men sikringsklassen er tilsvarende som tidligere (SK IV-a). Ved pel nr. 6295-6271 økes det til SK III.  $Q = 1,1-2,8$ . På bakgrunn av bedre fjell ifølge kjerneboring og sonderboring, avsluttes det med spiling, utvidet profil og reduserte salvelengder.

### 8.1.3 Oppsummering og videre driving

I parti 1 skulle tunnelen krysse to lavhastighetssoner på henholdsvis 3000 og 2400 m/s ifølge refrak-sjonsseismikken. Både kjerneboring foran stuff, sondeboring m/MWD og tunnelkartlegging bekreftet at tunnelen måtte krysse én svakhetssone, men den var smalere enn antatt.

Etter parti 1 måtte det injiseres basert på at neste sonderboring hadde innlekkasje på 11 l/min. Bergmassen var her veldig oppsprukket med noen steile slepper fra heng til høyre vegg. Sikringsklassen ble da økt til SK IV-a igjen.  $Q = 0,38-0,63$  og  $SRF = 2,5$  fram til pel nr. 6247, totalt 24 m.

## 8.2 Parti 2: Pel nr. 5620-5569

### 8.2.1 Forundersøkelser

Tabell 8.3 viser en oppsummering av relevante resultater og tolkninger fra utførte forundersøkelser fra parti 2. For mer detaljert beskrivelse henvises det til avsnitt 7.3.1.

Tabell 8.3: Oppsummering av resultater og tolkninger fra utførte forundersøkelser for parti 2, pel nr. 5620-5569 i Haramsfjordtunnelen.

Utførte forundersøkelser	Resultater/tolkninger
Akustikk	- Sjødybde ca. 25 m - Løsmassedekke ca. 8 m
Refraksjonsseismikk	- Bergoverdekning 40-45 m - $V_p = 5200$ m/s
Ingeniørgeologisk feltkartlegging på land	- Bergart: Gneis

## 8.2.2 Undersøkelser under driving

### *Sonderboring med slaghammer*

Følgende sonderboringer har gitt informasjon om parti 2 i Haramsfjordtunnelen:

- **4 hull á 30 m fra pel nr. 5625:** Ifølge tunnelbas var fjellet tørt og godt, men mot slutten var det knallhardt å bore i.
- **4 hull á 30 m fra pel nr. 5604:** Fjellet var knallhardt å bore i, det tok 1,5 time per hull. Ingen vannlekkasje i noen av hullene.
- **2 hull á 30 m fra pel nr. 5583:** På grunn av veldig hardt fjell ble det besluttet å bore 2 sonderhull i stedet for 4 dersom de 2 første var tørre. Det var tilfellet her. Ved å redusere antall sonderhull kunne tunnelens inndrift bli mindre påvirket av det harde fjellet.

### *MWD og borparametertolkning*

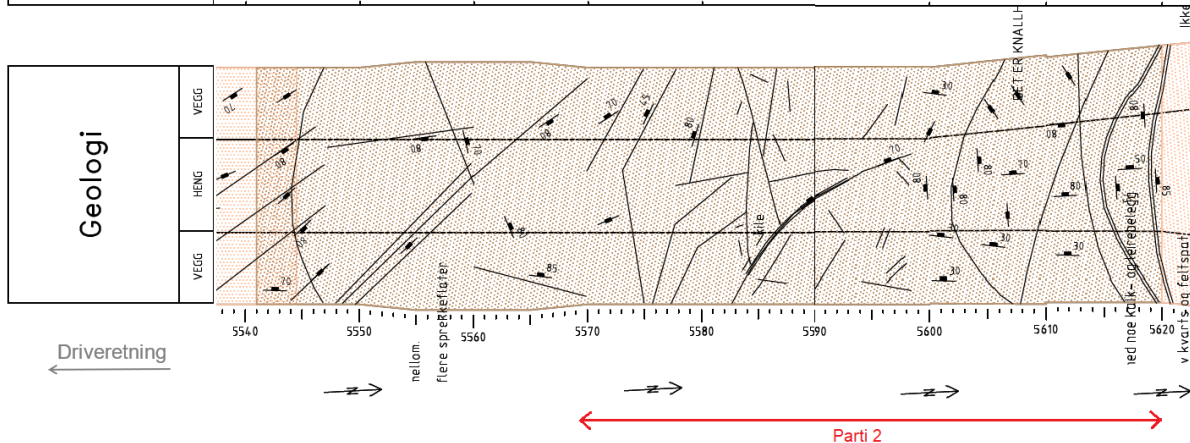
Det har vært litt problemer med MWD under sonderboringene. Registrert MWD av ett hull fra pel nr. 5604 og ett hull fra pel nr. 5583 mangler, se figur med tolket hardhet for sonderhullene i vedlegg K.2 (Bever Control AS, 2020). Figuren viser at en stor andel av sonderhullene har lys og mørk blå farge, som tilsvarer laveste borsynk og dermed høy hardhet. Som nevnt over, var sonderhullene fra pel nr. 5625 knallharde å bore mot slutten ifølge tunnelbas. Borparametertolkningene for disse sonderhullene viser ikke at borsynken ble særlig redusert mot slutten, så dette ser ikke ut til å stemme helt overens. Borparametertolkningene viser også at særlig det registrerte sonderhullet fra pel nr. 5583 skiller seg fra resten ved at borsynken er betydelig høyere med rød og svart farge (som tilsier betydelig lavere tolket hardhet). Dette ser ikke ut til å stemme med hva som ble erfart under boringen av dette sonderhullet, da det ble opplevd som veldig hardt å bore.

### *Kartlegging på stoff, befaring og prøvetaking*

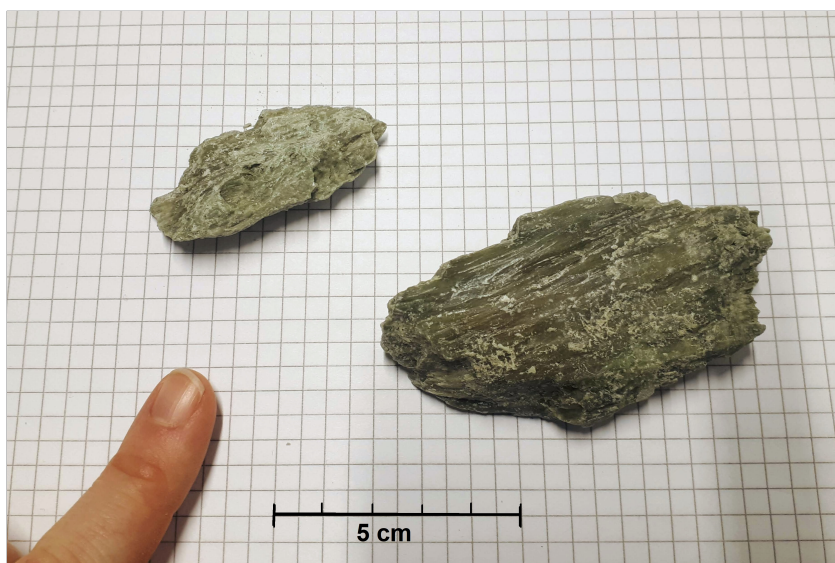
Fra pel nr. 5620 beskrives bergarten i dagboka som mørk grå gneis, med glitring av glimmer. Det kartlegges to tydelige slepper: Et 20 cm tykt lag med kvarts og feltspat og et 50 cm tykt lag med et glatt og grønt mineral og litt leire. Begge sleppene er steile og har strøk normalt på tunnelen, se registreringer fra NP i figur 8.2. Figur 8.3 viser to biter fra det sistnevnte laget, som jeg fikk se under befaring til prosjektet. Mineralet er flakig, såpeglatt, har grønnskjær og kan lett ripes i med negl. Det er

vurdert til å være mineralet talk. Her settes  $Q = 2,9$  (SK III).

RQD/Jn	75/9,0	50/9,0	50/9,0	60/9,0	50/12	60/12	75/6,0	80/6,0	80/6,0	70/6,0	70/6,0	70/9,0	70/9,0
Jr/Ja	15/4,0	15/4,0	15/4,0	15/4,0	1,0/4,0	1,0/4,0	3,0/4,0	2,0/2,0	2,0/2,0	2,0/2,0	2,0/2,0	2,0/2,0	1,5/4,0
Jw/SRF	10/2,5	1,0/1,0	1,0/1,0	1,0/1,0	1,0/1,5	1,0/1,0	1,0/1,0	10/1,0	1,0/1,0	1,0/1,0	1,0/1,0	1,0/1,0	1,0/1,0
Q-Verdi	13	2,1	2,1	2,5	0,69	1,9	9,4	13	13	12	12	7,8	2,9
Bergklasse													
Injeksjon													



Figur 8.2: Utsnitt fra registrert kartlegging i Novapint Tunnel for parti 2. Se vedlegg C for tegnforklaring.



Figur 8.3: Antatt talk fra parti 2 (Birkeli, 2020).

Ved pel nr. 5615-5610 øker bergmassekvaliteten til  $Q = 7,8$  (SK II). Bergarten ser ikke ut til å være gneis lenger. Egenvekten er høyere enn normalt, og i tillegg til innhold av mørke mineraler kalles den derfor for «gabbro», uten at dette er testet nærmere. Bergmassekvaliteten øker videre til  $Q = 12$  (SK I) ved pel nr. 5610. Kontrollingeniørene beskriver fjellet som veldig hardt og grovblokkete ( $RQD = 70$ ), med litt slepper og sprekker. Problemet i parti 2 er altså ikke dårlig bergmassekvalitet, men hardt berg som reduserer inndriften og sliter på borutstyret.

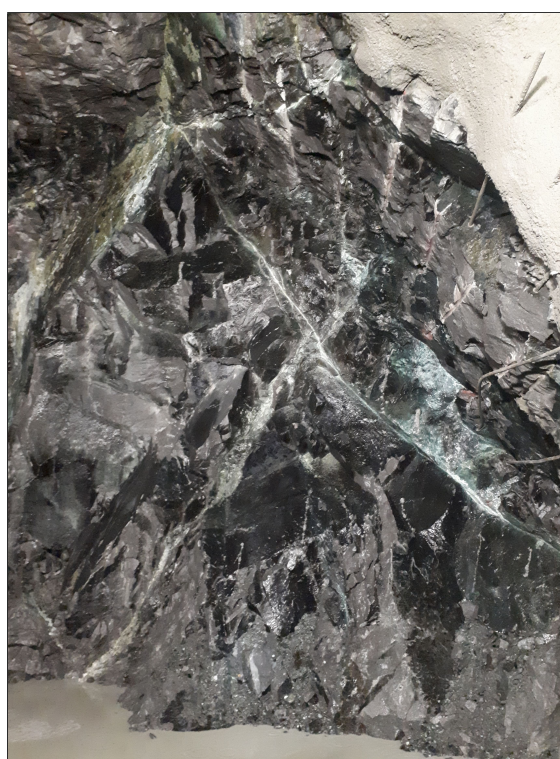
Videre er bergmassekvaliteten stabilt god til tross for den harde bergarten,  $Q = 12-13$  (SK I). Fra pel nr. 5583 reduseres kvaliteten til  $Q = 9,4$  (SK II) og deretter  $Q = 1,9$  (SK III), på grunn av tilstedeværelse av

sprekkebelegg med lav friksjon og etter hvert høyere oppsprekking. Ved pel nr. 5578-5573 mistes profilet på grunn av blokkutfall i hengen. For å rette opp profilet benyttes forbolter og redusert salvelengde ved videre driving.  $Q = 0,69$  (SK IV-a).

Under befaring til stoffen 18.02.2020, var jeg med på kartleggingen fra pel nr. 5572-5569 med kontrollingeniør Ivar Nils Båtberget. Dette tilsvarer siste del av parti 2. Se figur 8.4 for bilder av stoffen. Fjellet er fortsatt hardt, massivt og grovblokkete. Det forekommer flere sprekker og slepper med grønt og hvitt sprekkebelegg som er glatt, trolig kloritt. Kloritt er et mineral med lav friksjon som vil påvirke skjærstyrken til sprekkene, særlig dersom sprekkene er plane og det er vann tilstede (Nilsen og Palmstrøm, 2000). I dette tilfellet vurderes sprekkene å være glatte og plane ( $J_r = 1$ ), men det er ikke tegn til vann. Oppsprekkingen i profilet er moderat, og det er synlige borpiper i venste side og høyre vederlag.



(a) Venstre del



(b) Høyre del

**Figur 8.4:** Kartlegging av salve ved pel nr. 5572-5569 i Haramsfjordtunnelen (Birkeli, 2020). Legg merke til tydelig grønt og hvitt sprekkebelegg på plane sprekker i ellers mørkt og massivt fjell.

Tre prøveblokker fra pel nr. 5575 ble samlet inn for laboratorietesting hos SINTEF. Det har blitt utført borbarhetstester og petrografisk analyse. Beskrivelse, resultater og diskusjon er tidligere presentert i kapittel 6, og viste at bergarten er en olivingabbro med mikrogranater.

### 8.2.3 Oppsummering og videre driving

Fra forundersøkelsene var det ikke forventet problematiske driveforhold i parti 2. Det var antatt at bergmassen hovedsaklig skulle bestå av gneis, fordi refraksjonsseismikken ikke viste noen spesiell endring i  $V_p$ . Likevel viste det seg at en olivingabbro med mikrogranater forekom, og bergarten reduserte inn-

---

driften på grunn av dens ekstremt høye hardhet som medførte lav borsynk og høy slitasje på borutstyret. Alle undersøkelsene som er utført under driving stemmer relativt godt overens med hverandre.

Videre har sonderboringer og tilhørende borparametertolkninger blitt benyttet for å forutse når sonen med olivingabbro slutter (Karlson, 2020). Overgang til normal hardhet forekommer rundt pel nr. 5540 ifølge «tolket hardhet» (Bever Control AS, 2020). I dagboka står følgende kommentar fra salveboring pel nr. 5537-5532,5: «Bløtere og mere porøst «vanlig» fjell virker til å være nå. Så mest sannsynlig ferdig med den harde gabbroen og de grove blokkene» (Møre og Romsdal fylkeskommune, 2020a). Figur 8.2 viser kartlagt bergartsgrense ved pel nr. 5545-5541. Olivingabbroen har fulgt tunnelen i omtrent 80 m.

### 8.3 Parti 3: Pel nr. 23600-23700

#### 8.3.1 Forundersøkelser

En oppsummering av relevante resultater og tolkninger fra forundersøkelsene er presentert i tabell 8.4. For mer detaljert beskrivelse henvises det til avsnitt 7.4.1.

**Tabell 8.4: Oppsummering av resultater og tolkninger fra utførte forundersøkelser for parti 3, pel nr. 23600-23700 i Nøgvafjordtunnelen**

Utførte forundersøkelser	Resultater/tolkninger
Refraksjonsseismikk	- Løsmassedekke ca. 20 m
	- Bergoverdekning 80-110 m
	- Pel nr. 23600-23679: $V_p = 4300-4500$ m/s
	- Pel nr. 23679-23700: $V_p = 2400$ m/s
Ingeniørgeologisk feltkartlegging	- 2400 m/s-sone: Strøk 050 ift. tunneltrasé, steilt fall
	- «Mulig» bergart: Glimmerskifer, amfibolitt, metaarkose

#### 8.3.2 Undersøkelser under driving

Basert på forundersøkelsene var det ikke forventet å kjernebore før de siste 30 m av parti 3. På grunn av dårligere bergmasseforhold enn antatt, med mye innlekkasje, ble det besluttet å kjernebore tidligere. Dette ville gi en bedre oversikt over vann- og bergmasseforholdene videre foran stuff, og dermed bedre forutsigbarhet under driving. Det er utført to runder med kjerneboring foran stuff som dekker parti 3. Disse presenteres i det følgende.

##### *Kjerneboring fra pel nr. 23608*

Kjerneboringen startet ved pel nr. 23608, og måtte ifølge dagboka avsluttes etter 48 m på grunn av stor innlekkasje på 200 l/min. Enden av kjernehullet kom dermed til pel nr. 23656. Punkter som kan oppsummeres fra kjerneloggen er som følger:

- Bergarten er hovedsaklig gneis, med to soner med eklogitt med bredde på henholdsvis 2 og 10,5 m.
- Der  $SRF > 1$ , antas det å være svakhetssoner. Første 3 m av kjerneboringen tilhører en svakhetszone med  $Q = 0,04-1,2$ . Her er materialet sterkt oppsprukket med noe grønn glimmer og kalk på sprekke-

---

planene.

- Videre er forholdene bedre i noen meter før det kommer en ny svakhetssone med  $Q = 0,07-0,9$  ved pel nr. 23617-23628. I denne sonen er det flere meter med helt oppsprukket materiale som består av grus og stein. Ved slutten av sonen er det innlekkasje på 20 l/min ifølge dagboka.
- Fra pel nr. 23629-23645 er forholdene bedre med  $Q = 0,4-17$ . Mesteparten av disse metrene er eklogitt.
- Kjernehullet avslutter med en ny svakhetssone fra pel nr. 23646-23656 med  $Q = 0,07-0,7$ . Bergmasseforholdene bedres ikke mot slutten av hullet.

Det er tydelig at bergmasseforholdene er mye dårligere enn forventet fra forundersøkelsene. I dette området var det stipulert bergmassekvalitet  $Q = 4-10$  (Karlson og Grob, 2018c), noe som absolutt ikke stemmer overens med de reelle forholdene. Dette diskuteres i kapittel 9.

#### *Kjerneboring fra pel nr. 23644*

Kjerneboringen overlapper den forrige med 12 m. Kjernehullet er 66 m langt, fra pel nr. 23644-23710. Kjerneloggingen ble utført under befaring til prosjektet i uke 8, og jeg fikk delta på logging av noen kasser sammen med ingeniørgeolog Kåre Ingolf Karlson, se figur 8.5. Følgende punkter kan oppsummeres fra kjerneloggen:

- Basert på at forundersøkelsene stipulerte at gjeldende bergart fra pel nr. 23595-23700 skulle være glimmerskifer, amfibolitt og metaarkose, ble det foretatt en sammenligning av bergarten i kjernekasene med bilder av metaarkose (Karlson, 2020). De tynne båndene i bergarten hadde først gjort at bergarten ble tolket til å være gneis, men etter ny vurdering ble den tolket til å være laminert metaarkose. Denne bergarten kan dermed ha vært gjeldende også i forrige kjernelogg. Kjernen består av ren metaarkose fram til pel nr. 23674, deretter en veksling mellom gneis, amfibolitt og metaarkose fram til pel nr. 23682, og resten er vurdert til å være ren gneis.
- Fram til pel nr. 23689 er det omtrent 45 m sammenhengende svakhetssone med  $Q = 0,07-0,88$ . Innimellom kommer det totalt 5 m med bedre bergmassekvalitet ( $Q > 1,3$ ), men disse er ikke sammenhengende. Generelt er svakhetssonen preget av sterk oppsprekking med innhold av småstein og noe grus. Noen steder er det kalkbelegg på sprekkeflatene.
- Fra pel nr. 23690-23710 forbedres bergmassekvaliteten betydelig.  $Q = 1-32$ , med størst andel i bergmasseklasse C ( $Q = 4-10$ ).

Kjerneboringen ble stoppet etter at det var boret gjennom 20 m bergmasse av god kvalitet. Innlekkasjen var da totalt 300 l/min. Ifølge forundersøkelsene skulle overgangen mellom svakhetssonen med seismisk hastighet lik 2400 m/s og bedre bergmassekvalitet være fra pel nr. 23699, noe som virker å stemme greit med at kjerneboringen viser bedre bergmassekvalitet fra pel nr. 23690.

Det er utført XRD-analyse av svakt omvandlet kjernemateriale fra pel nr. 23698, som tilsvarer slutten av parti 3. Beskrivelse, resultater og diskusjon er tidligere presentert i kapittel 6, navngitt som prøve 3.



Figur 8.5: Kjernelogging av pel nr. 23658-23662, som jeg fikk delta på ved befaring til Nordøyvegen. I denne kassen er bergarten vurdert til å være laminert metaarkose. De tre øverste kjernemetrene har SRF = 2,5, mens de to nederste kjernemetrene har SRF = 5 (Birkeli, 2020).

### *Sonderboring med slaghammer*

Følgende presenteres sonderboringene med slaghammer som er utført og har gitt informasjon om bergmasse- og vannforholdene i parti 3.

- **2 hull á 30 m fra pel nr. 23593:** Sonderboring rapporten sier at det merkes slepper ved 18 m og 26-28 m, som tilsvarer ved pel nr. 23611 og pel nr. 23619-23621. Vannlekkasje på totalt 160 l/min for begge hullene. Borvannet er grått. Videre benyttes hullene som en del av injeksjonsskjermen. Under boring av injeksjonshullene på venstre side merkes det også en problemsone 22 m foran stuff, ved at hullene bores fast. Dette samsvarer greit med at det fra kjerneboringen ble observert en svakhetssone fra pel nr. 23617. I tillegg er det stor innlekkasje i noen av skjermhullene, med anslagsvis 100 l fra ett hull og 40-50 l fra tre hull. Kombinasjon av vann og dårlig bergmasse gjør at det kan forventes problemer ved driving gjennom sonen.
- **2 hull á 30 m og 1 hull á 24 m fra pel nr. 23608:** Hull oppe til venstre bores tett fra 10-15 m, tilsvarer fra pel nr. 23616. Her forventes det dårlig sone både fra tidligere sonderboring og kjerneboring (som utføres etter denne sonderboringen). Hull oppe til høyre var bedre å bore. Hull nede til høyre var dårlig å bore fra 11 m, og ble avsluttet etter 24 m fordi det ble boret tett. Total innlekkasje er 120 l/min på alle hullene, mest i hull oppe til venstre.
- **4 hull á 19 m fra pel nr. 23632:** Greit å bore, untatt sleppe ved pel nr. 23644. Det stemmer bra med at kjerneboringen viste at ny svakhetssone begynner ved pel nr. 23646. Bare innlekkasje i venstre side, totalt på 110 l/min.
- **4 hull á 24 m fra pel nr. 23654:** En del vann i venstre side under boringen, totalt 70 l/min. Høyre



---

side er tilnærmet tørr. Borer tett ved pel nr. 23665 og 23671 i hull oppe til venstre. Generelt dårligere å bore i venstre enn høyre side.

- **2 hull á 24 m fra pel nr. 23670:** Hull boret i høyre og venstre vederlag. Total innlekkasje på 120 l/min, like mye på hver side.
- **4 hull á 24 m fra pel nr. 23693:** Ingen fastboring, så det er tydelig bedre bergmasseforhold. Det er fortsatt innlekkasje, totalt på 52 l/min fordelt på alle hullene.

### *MWD og borparametertolkning*

I vedlegg K.3 er figur med tolket hardhet fra langhull (sonderhull og skjermhull til injeksjon) presentert (Bever Control AS, 2020). Hullene viser varierende tolket hardhet gjennom partiet. Det er vanskelig å skille ut hvilke hull som er sonderhull siden tettheten med injeksjonshull er så høy. Figur 8.6 viser den tolkede hardheten i partiet basert på MWD-data fra boring av alle hulltyper. Her legges det særlig merke til et veldig dårlig område i hengen ved pel nr. 23600-23615, med borsynk  $> 5,3$  m/min (rød og svart farge). Ifølge dagboka ble dette observert på borparametertolkningsbildene underveis, slik at dårligere bergmassekvalitet var forventet foran stoff basert på dette. Videre var det problemer med nettverket i tunnelen i én uke, noe som begrenset muligheten for å benytte seg av borparametertolkningene under driving.

Fra figur 8.6 kan det også legges merke til at høyre side (ved økende pel nr.) har generelt bedre kvalitet som uttrykkes gjennom borsynk  $< 3,1$  m/min (lys og mørk blå farge). Dette stemmer bra med hva som er opplevd under sonderboringene, da det har vært dårligst fjellkvalitet og mest vanninntrengning på venstre side.

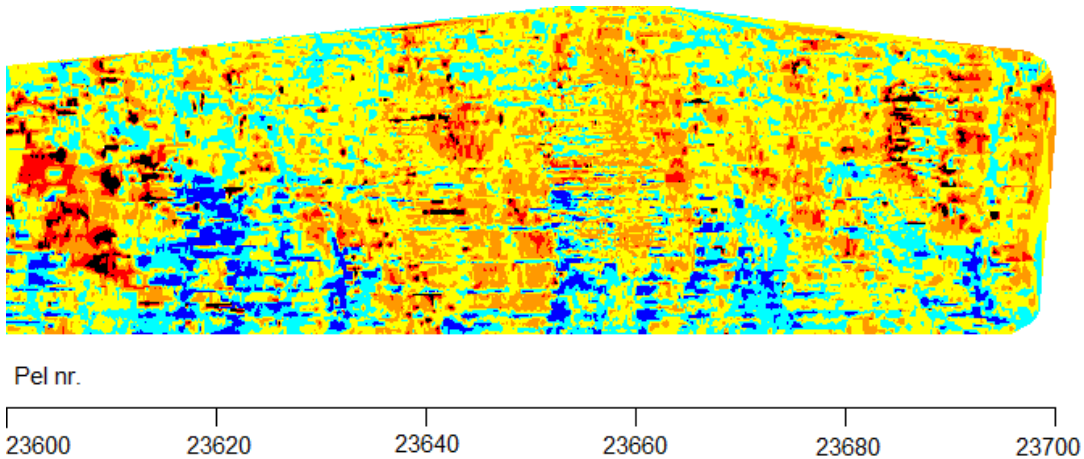
### *Kartlegging på stoff og befaring*

På grunn av problemer med krasj i programvare på Longva-stuffen, var ikke tunnelkartleggingen ferdig registrert i NP innen masteroppgavens slutt. Derfor er det ikke vist figur med kartlegging på utbrettsprofil og etter Q-metoden fra parti 3. Følgende beskrivelse av utført kartlegging er basert på notater fra dagboka (Møre og Romsdal fylkeskommune, 2020a), samt egne observasjoner under befaring.

Gneis har vært den dominerende bergarten helt fra drivestart på Longva. Under kartlegging ved pel nr. 23597-23600 observeres det en ny bergart som faller ned fra hengen og inn i stoffen. Bergarten har uryddig struktur, er lys grå, smuldrer lett opp og defineres som glimmergneis. Nedre del av stoffen er fortsatt massiv og grå gneis. Fra forundersøkelsene var det forventet en blanding av glimmergneis, amfibolitt og metaarkose i parti 3, så dette stemmer bra med at det opptrer en ny bergart her.  $Q = 0,5$  (SK IV-a).

Glimmergneisen er utfordrende å bore i. Den oppsmuldrede og uryddige strukturen resulterer i noe utrasing. Ved neste kartlegging ser det ut til at sonen med glimmergneis forsvinner. Gneisen som nå er i hengen observeres som mer myk enn tidligere. Under boring av injeksjonsskjerm er det store borepro-

Tolket hardhet		
Bekrivelse	Verdi	Farge
Opp til 2,3 m/min	-50.000	Blå
2,3 - 3,1 m /min	-30.000	Cyan
3,2 - 3,8 m/min	0.000	Gul
3,9 - 4,5 m/min	20.000	Oransje
4,6 - 5,3 m/min	40.000	Rødt
Over 5,3 m/min	100.000	Svart
500	500.000	Svart



Figur 8.6: Tolket hardhet sett ovenfra for parti 3 (Bever Control AS, 2020).

blemer fra pel nr. 23606, særlig i øvre del. Her er det også innlekkasje med høyt trykk. Basert på dette blir det bestemt at kjerneboring skal utføres (se over), og armerte sprøytebetongbuer monteres. Ved pel nr. 23606-23609 er  $Q = 0,2$  (SK IV-b). Fjellet er dårlig og smuldrer lett opp, og det er noe utfall mellom forboltene. Buer monteres videre, og profilet utvides for plass til doble buer. I tillegg må omfattende injeksjon utføres på grunn av stor innlekkasje, noe som er tidkrevende. Videre er bergmassen sterkt oppsprukket med rustfarge grunnet oksidering. Ved pel nr. 23633-23643 reduseres sikringsklassen til SK IV-a,  $Q = 0,83$ . Gneisen er grå, med et brunlig leirbelegg på noen flater og steil oppsprekking. Det er tydelig sterkere oppsprekking og dårligere kvalitet i venstre halvdel av profilet, noe som også blir gjeldende videre.

Befaring ble utført til stoff 19.02.2020 sammen med Bjørn Nilsen og Kåre Ingolf Karlson. På vei innover i tunnelen ble det observert mye drypp og sildring. Det var tydelig at utført injeksjon ikke hadde fungert helt optimalt. Det kan være vanskelig å finne riktig injeksjonsteknikk, som oftest er den beste løsningen å prøve seg fram underveis (Karlson, 2020). Under befaringen var stoffen ved pel nr. 23654. Vegger, vederlag og heng var innsprutet, og den pågående aktiviteten var injeksjon. Det var dermed bare mulig å kartlegge selve stoffen, som vises i figur 8.7. Gneisen var rødlig med oksiderte flater. Det ble ikke funnet antydning til leir, men sprekkeplanene var dekt med et tynt siltig/sandig belegg. Foliasjonen var tydelig horisontal. Stoffen var noe rufsete, med småfallent fjell nede til høyre (vises akkurat ikke på figur 8.7). Fra særlig ett boltehull i venstre vegg rant det flere liter med vann per minutt. Det kan tyde

---

på at boltehullet har punktert injeksjonsskjermen og truffet på en vannkanal i gneisen (Nilsen, 2020).



**Figur 8.7:** Longva-stuffen ved pel nr. 23654 (parti 3) under befaring 19.02.2020. Legg merke til horisontal struktur (foliasjon) i gneisen, særlig tydelig til venstre. Profilene er utvidet for havarilomme (Birkeli, 2020).

Fram til pel nr. 23693 sikres profilet etter SK IV-a ( $Q = 0,3-0,8$ ). Bergmassen består av rødlig gneis med mørke lag. Sprekkeflatene er fortsatt oksiderte, med noe grønt sprekkemineral. Til tider er venstre side meget sterkt oppsprukket. Ved pel nr. 23670 deler berget seg i flak som er parallelle med stuffen. Videre er det mye steile sprekker som dominerer. Gneisens foliasjon er ikke kommentert. Siste del av parti 3 øker bergmassekvaliteten til  $Q = 1,7-2,2$  (SK III).

### 8.3.3 Oppsummering og videre driving

Kjerneboring foran stuff har i parti 3 gitt mye nyttig informasjon om forholdene foran stuff. Omtrentlig pel nr. for hvor dårligere bergmasse skulle komme har også blitt bekreftet ved sonderboring med slaghammer. Sonderboring har i tillegg vært ekstra nyttig for å gi mål på innlekkasje til planlegging av forinjeksjon. Siden det ikke var stipulert dårlige bergmasseforhold i de første 79 m av parti 3, ble det også vanskelig å stole på de refraksjonsseismiske tolkningene videre. Kjerneboringen var da særlig nyttig for å få visuell informasjon om hvor lenge den dårlige sonen ville vare. Dette er viktig for byggherre å vite, siden inndriften reduseres kraftig når dårlige partier som ikke var forventet varer over en lengre periode.

Fra forundersøkelsene var det stipulert en «mulig» sone med glimmerskifer, amfibolitt og metaarkose i parti 3. Bergarten i kjernene har blitt tolket til å være hovedsaklig gneis, med noe eklogitt, en sone med metaarkose og noe amfibolitt. Under tunnelkartleggingen har særlig en sone med glimmerskifer i begynnelsen av parti 3 skilt seg ut. Deretter ble bergarten videre beskrevet som mykere gneis, noe som kan ha vært metaarkose. Som nevnt under kjerneboringen fra pel nr. 23644, kan det være vanskelig å skille mellom gneis med tynne bånd og laminert metaarkose når det bare skal vurderes ut fra en kjerne.

---

Under befaring ble pel nr. 23654 tolket til å være gneis, mens kjerneboringen fra samme pel nr. ble tolket til å være metaarkose. I hvor stor grad tunnelen faktisk har drevet gjennom metaarkose er derfor usikkert.

Videre etter parti 3 har driveforholdene fortsatt vært utfordrende på Longva-stuffen. Etter prat med Karlson (2020) 27.04.2020, kan følgende oppsummeres: Fjellkvaliteten har blitt bedre i samsvar med det kjerneboringen fra pel nr. 23644 viste siste 20 m, ved at fjellet er mer storblokkete enn i parti 3. Kartlagt Q-verdi gir fortsatt SK III. Fortsatt er det problemer med mye innlekkasje som medfører tidkrevende forinjeksjon og redusert inndrift.

## 8.4 Parti 4: Pel nr. 27900-27858

### 8.4.1 Forundersøkelser

En oppsummering av relevante resultater og tolkninger fra utførte forundersøkelser i parti 4 presenteres i tabell 8.5. Følgende presenteres en mer detaljert beskrivelse av retningsstyrt kjerneboring fra land og seismisk tomografi i kjernehull. For detaljer angående de resterende forundersøkelsene henvises det til avsnitt 7.5.1.

**Tabell 8.5: Oppsummering av resultater og tolkninger fra utførte forundersøkelser for parti 4, pel nr. 27900-27858 i Nogvafjordtunnelen.**

Utførte forundersøkelser	Resultater/tolkninger
Akustikk	- Sjødybde ca. 10 m - Løsmassedekke ca. 2 m
Refraksjonsseismikk	- Bergoverdekning 25-30 m - $V_p = 4800$ m/s
Ingeniørgeologisk feltkartlegging på land	- Bergart: Gneis
Styrt kjerneboring fra land	- Pel nr. 27900-27873: Gjennomsnittlig RQD 50 - Pel nr. 27873-27871: Kjerne av svakhetsone - Pel nr. 27871-27854: Gjennomsnittlig RQD 60
Seismisk tomografi i kjernehull	- $V_p = 4000-4200$ m/s på tunnelnivå

#### *Retningsstyrt kjerneboring fra Fjørtofta sør*

Norconsult (2012) har logget kjernene fra den styrte kjerneboringen. Parti 4 tilsvarer omtrent 221-267 m inn i kjernehullet. Her er det først boret med borhullsdiameter  $d = 32$  mm i 7,5 m, deretter med borhullsdiameter  $d = 50$  mm i 38,5 m. Basert på kjerneloggingen kan parti 4 deles inn i tre deler (Norconsult, 2012):

1. **Dårlig bergmasse inn mot svakhetssonen (221-248,3 m):** Flere partier der bergmassen er tett oppsprukket og/eller oppknust. Bergartstype veksler mellom granittisk gneis, amfibolittisk gneis og amfibolitt, med noe innslag av pegmatitt. Antall sprekkesett er økende fra 2 til 3 innover i borhullet. Sprekkeplanene varierer mellom glatte/bølgete og rue/plane. Inn mot kjernen av svakhetssonen har noen sprekker tynt leirbelegg. RQD varierer mye (0-96), gjennomsnittlig verdi er omtrent 50.

- 
2. **Svakhetssonens kjerne (248,3-249,5):** Oppknust og hardpakket leirsone med bergartsfragmenter. I nærheten finnes grafittaktig belegg på sprekkeplan. Figur 8.8 markerer start og slutt på svakhetssonens kjerne. Dette tilsvarer omtrent pel nr. 27873-27871.



Figur 8.8: Borkjerner 245-250 m fra styrt kjerneborhull fra Fjørtofta sør. Start og slutt på svakhetssonens kjerne er markert. Modifisert etter Norconsult (2012).

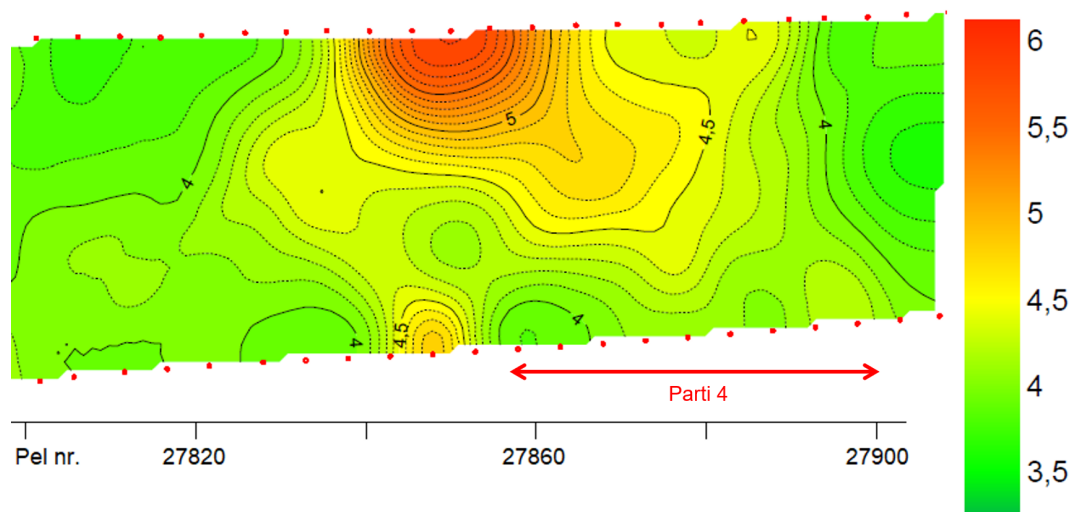
3. **Dårlig bergmasse etter svakhetssonen (249,5-267 m):** Flere partier der bergmassen er tett oppsprukket og eller oppknust. Bergartstype veksler mellom mørk gneis, lys gneis og eklogitt, med noe innslag av pegmatitt. Antall sprekkesett er 3 og reduseres mot slutten. Noen sprekkeplan har tynt leirbelegg eller grafittaktig belegg. Ruheten karakteriseres som glidespeil. Store variasjoner i RQD (27-100), gjennomsnittlig verdi er omtrent 60.

Norconsult (2012) har ikke bestemt Q-verdi for kjernene, siden det er vanskelig å bestemme parametrene som omhandler spenningsforholdene i bergmassen ( $J_w$  og SRF) basert på observasjon av borkjerner.

Kvarstein (2017) har i sin masteroppgave utført frivellingstest og XRD-analyse på materiale fra det som er kartlagt som svakhetssonens kjerne i den retningsstyrte kjerneboringen. Resultatene er presentert i kapittel 6.

#### *Seismisk tomografi mellom kjernehull og sjøbunn*

Undersøkelserapporten til Geomap (2017) tar for seg den tomografiske undersøkelsen som er utført mellom BH3 og sjøbunnen over. Kabel med hydrofoner ble lagt ut som en tilnærmet rett linje langs sjøbunnen over kjernehullet BH3. Eksplosiver ble plassert i BH3 for å initiere skudd som ble registrert i hydrofonene. Etter prosessering av måledataene og geofysisk inversjon, oppnås en tolket hastighetsfordeling i berggrunnen. Et utsnitt av denne vises i figur 8.9. Tomografien viser at forventet seismisk hastighet på tunnelnivå i parti 4 er 4000-4200 m/s. I de øverste metrene i bergmassen er det større variasjon, 3800-5300 m/s. Ifølge Geomap (2017) er hastigheten nærmest konstant høy langs hele borhullet, som indikerer god bergmassekvalitet. Det poengteres likevel at veldig små soner med oppsprukket bergmasse kan opptre fordi tomografiens oppløsning ikke er tilstrekkelig til å oppdage slike.



Figur 8.9: Utsnitt av tolkede seismiske hastigheter,  $V_p$ , [km/s] langs Nøgvafjordtunnelen, basert på tomografi mellom kjerneborhull BH3 og sjøbunn. Posisjon til skudd og hydrofoner er vist med røde prikker. Parti 4 er markert. Modifisert etter Geomap (2017).

## 8.4.2 Undersøkelser under driving

### Kjerneboring fra pel nr. 27955

Kjerneboring foran stuff et utført på bakgrunn av krav om kjerneboring ved bergoverdekning < 40 m langs undersjøisk trasé. Parti 4 er dekt av kjerneboringen fra pel nr. 27955. Totalt er kjernehullet 106 m, til pel nr. 27849. Fra kjerneloggen kan følgende punkter som gjelder parti 4 oppsummeres:

- Bergarten veksler mellom ulike typer gneis – granittisk, amfibolittisk og båndet gneis. Noe innslag av granat.
- Ved pel nr. 27901-27874 er det 27 m med sammenhengende svakhetsone med  $Q = 0,01-0,3$ . Rett før sonen er det god fjellkvalitet med 18 m sammenhengende bergmasseklasse A/B. Omtrent midt i sonen forekommer det 1 m med  $Q = 3,8$ . Ellers er sonen sterkt oppsprukket og oppknust (RQD = 10-27, gjennomsnittlig verdi er omtrent 13), med noe leire på sprekkeplanene. Ved pel nr. 27888-27881 er kornstørrelsen fra leir til omtrent 7 cm. Dette ser ut til å være svakhetssonens kjerne på grunn av den sterke oppknusningen, leirinnholdet og  $Q = 0,02-0,04$ . Bergarten beskrives som mekanisk svak. Plassering for svakhetssonens kjerne stemmer ikke overens med plasseringen fra den retningsstyrte kjerneboringen, som var ved pel nr. 27873-27872. Dette vil avhenge av hvor i profilet borhullene er plassert i forhold til hverandre, samt svakhetssonens strøk og fall.
- Fra pel nr. 27873 forbedres fjellkvaliteten til  $Q = 3,8$ . Deretter er  $Q = 8-74$  resten av parti 4, med 93% i bergmasseklasse A/B ( $Q > 10$ ). RQD = 53-99, gjennomsnittlig verdi er 82.

Kjerneboringen for parti 4 viser altså en veldig tydelig svakhetsone først, etterfulgt av bergmasse med god kvalitet.

---

### *Sonderboring med slaghammer*

Sonderboringer som har gitt informasjon om forholdene foran stoff i parti 4 presenteres i de følgende punktene. I den andre og den tredje sonderboringen ble det boret to ekstra hull i hengen med 45° vinkel i forhold til tunnelaksen, på grunn av forventet svakhetszone fra retningsstyrt kjerneboring kombinert med liten bergoverdekning

- **4 hull á 29 m fra pel nr. 27922:** Siste 7 m av sonderboringen går i parti 4. Borvannet er grått. Total innlekkasje på 2 l/min. Ellers tørre og fine forhold.
- **6 hull á 29 m fra pel nr. 27899:** Borsynken er jevn og fin hele veien, og fjellet vurderes som bra framover. Hullet til venstre i hengen har litt vannsig, 5 l/min. Grå og rød farge på borvannet. Rød farge kan tyde på noen forekomster av leire, som stemmer bra overens med observerte leirforekomster i kjerneboringen
- **6 hull á 29 m fra pel nr. 27878:** Jevn borsynk. I de to hullene i høyre side er borvannet rødbrunt ved henholdsvis 6 og 10 m. Dette tilsvarer ved pel nr. 27872 og 27868. Ellers er borvannet grått. Det er ingen innlekkasje.

### *MWD og borparametertolkning*

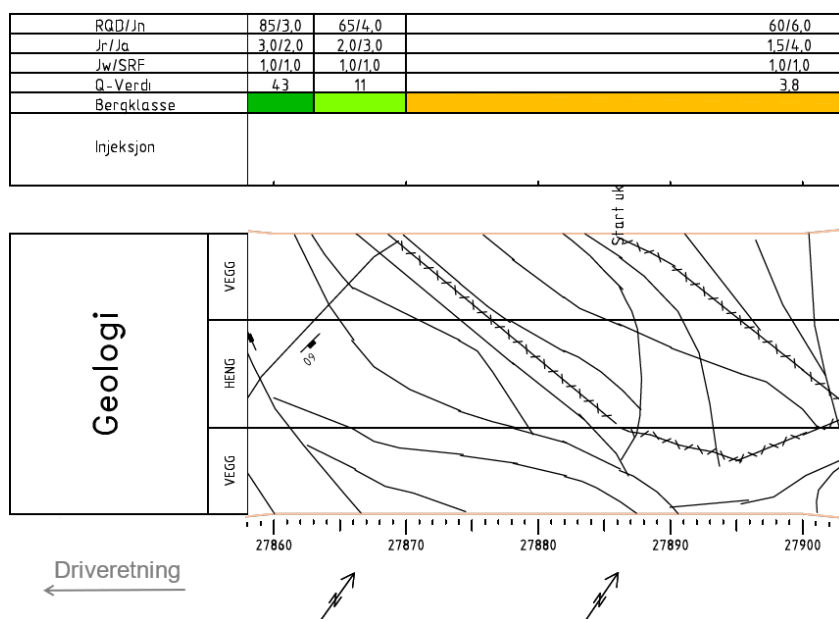
Tolket hardhet i sonderhullene i parti 4 fra Bever Control AS (2020) er vist i vedlegg K.4. To av sonderhullene fra første sonderboring har en tydelig overgang til mykere bergmasse (oransje farge) ved henholdsvis pel nr. 27910 og 27900. Generelt viser ikke borparametertolkningen en like tydelig overgang fra god bergmassekvalitet til svakhetszone som kjerneboringene har antydnet, så fra tolket hardhet alene vil det ikke forventes en svakhetszone. Videre har partiet primært «normalisert bergmasseverdi, middelsboring» (gul farge), med noe lavere hardhet som kan indikere dårligere bergmasse innimellom.

### *Kartlegging på stoff*

I begynnelsen av parti 4 er fjellet kartlagt som oppsprukket og forvitret, med endel langsgående sprekker med leir. Profilet står av seg selv.  $Q = 3,8$  (SK III). Fjellet oppleves som greit å bore i ifølge tunnelbas, og det vurderes å endre til SK II. Før pel nr. 27894-27890 blir det noe utfall i venstre vegg og vederlag som resulterer i forbolter på venstre side av profilet.  $Q$ -verdien beholdes på  $Q = 3,8$ . Dette blir gjeldende helt til pel nr. 27870, og fram hit kartlegges det to svakhetssoner  $< 1$  m som krysser tunnelprofilet på skrå. Disse er tegnet inn på utbrettsprofil i NP i figur 8.10. Fra pel nr. 27870 forbedres bergmassekvaliteten til  $Q = 11$  og deretter  $Q = 43$  (SK I, bergmasseklasse A/B). Dette stemmer bra med at kjerneboringen foran stoff viste at svakhetssonen skulle slutte ved pel nr. 27873.

### **8.4.3 Oppsummering**

Langs parti 4 er det utført et høyt omfang av ingeniørgeologiske undersøkelser, både før og under driving. Fra refraksjonsseismikken ble det tolket relativt høy seismisk hastighet, og fra tomografien noe lavere. Logging av kjernene fra det retningsstyrte kjernehullet fra Fjortofta sør viste mye dårligere berg-



Figur 8.10: Utsnitt fra registrert kartlegging i *Novapoint Tunnel* for parti 4. Tegnforklaring følger i vedlegg C.

massekvalitet enn antatt fra de seismiske undersøkelsene, og antok i tillegg dårlig kvalitet i hele partiet. Svakhetssonen hadde en 1-2 m bred kjerne med sterkt oppknust materiale og leire. Ifølge Kvarstein (2017) sine laboratorieresultater kan det forventes smektitt i svakhetssonens kjerne som potensielt kan medføre stor fri svelling.

Kjerneboringen foran stuff viste en veldig tydelig svakhetszone første halvdel av partiet, etterfulgt av bergmasse med god kvalitet. Her ble kjernen til svakhetssonen, med leire og sterk oppknusing, observert til å være omtrent 7 m. Tunnelkartleggingen har ikke opplevd så dårlig kvalitet som denne svakhetssonen skulle tilsi, men pel nr. for plassering av en dårligere sone stemmer godt overens med kjerneboring foran stuff. Tunnelkartleggingen stemmer også godt overens med sonderboringene. Ved andre sonderboring ble det observert rød farge på borvannet, som stemmer bra i forhold til kartlagte svakhetssoner < 1 m. Under tredje sonderboring var det bare rødbrunt borvann på høyre side. Dette stemmer bra med at svakhetssonen forsvinner ut fra tunnelprofilen i høyre side, rundt pel nr. 27870.

## 8.5 Parti 5: 27685-27672

### 8.5.1 Forundersøkelser

Tabell 6.6 viser relevante resultater og tolkninger fra utførte forundersøkelser i parti 5. For mer detaljerte beskrivelser henvises det til avsnitt 7.6.1.

### 8.5.2 Undersøkelser under driving

#### *Kjerneboring fra pel nr. 27758*

Det er kjerneboret 120 m foran stuff fra pel nr. 27758 til pel nr. 27638, både på grunn av bergoverdekning < 40 m og mulig lavhastighetszone  $\leq 3000$  m/s. Følgende punkter som gjelder parti 5 kan oppsummeres fra kjerneloggen:



Tabell 8.6: Oppsummering av resultater og tolkninger fra utførte forundersøkelser for parti 5, pel nr. 27685-27672 i Nøgvafjordtunnelen.

Utførte forundersøkelser	Resultater/tolkninger
Akustikk	- Sjødybde ca. 15 m - Løsmassedekke ca. 5 m
Refraksjonsseismikk	- Bergoverdekning 30 m - $V_p = 2600$ m/s - Strøk ca. normalt på tunneltrasé
Ingeniørgeologisk feltkartlegging på land	- Bergart: Gneis - Usikker orientering av svakhetszone

- Bergarten er gneis. Noen steder er det kalkbelegg på sprekkeplan.
- Bergmassekvaliteten er dårligst de to første og to siste metrene av partiet, med henholdsvis  $Q = 0,4-1,9$  og  $Q = 0,3-0,7$ . RQD = 10-15. De to siste metrene har SRF = 2,5.
- Resten av parti 4, fra pel nr. 27683-27673, har bra kvalitet.  $Q = 2-29$ , gjennomsnittlig  $Q = 7,8$  (bergmasseklasse C).

Det er altså ingen observasjoner fra kjerneloggen som tilsier at en så utfordrende lavhastighetszone som antatt skal forekomme i parti 4.

#### *Sonderboring med slaghammer*

På grunn av usikkerheten rundt den tolkede plasseringen av lavhastighetssonen, blir sonderboring i god avstand før tolket plassering viktig for å avdekke hvor sonen egentlig befinner seg. Følgende sonderboring gjelder for parti 5:

- **6 hull á 29 m fra pel nr. 27689:** 2 av hullene er vinklet  $45^\circ$  oppover i hengen i forhold til tunnelaksen på grunn av liten bergoverdekning kombinert med tolket plassering av lavhastighetszone. I disse hullene er det ingen vannlekkasje. De resterende fire hullene er også tørre. Borvannet er grått i alle hull og borsynken er jevn. Det er altså ikke observert noen tegn til svakhetszone i parti 5.

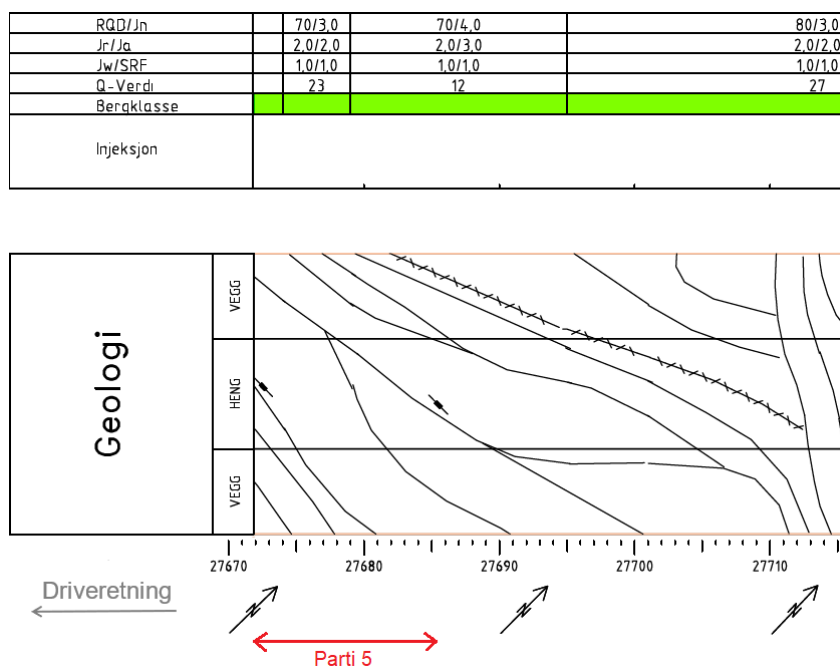
#### *MWD og borparametertolkning*

Vedlegg K.5 viser tolket hardhet for sonderhull i parti 5. Sonderhullene viser litt mykere bergmasse (oransje farge) på venstre side. Ellers har bergmassen «normalisert bergmasseverdi» som indikerer middelsboring, og borsynken er særlig jevn gjennom hullene på høyre side. Fjellkvaliteten antas å være god.

#### *Kartlegging på stuff*

Ved pel nr. 27712-27683 (før parti 5) ble det registrert en svakhetszone  $< 1$  m som startet i hengen og gikk ut i høyre side, se tegning på utbrettsprofil fra NP i figur 8.11. Hele parti 5 har god kvalitet, tilhører bergmasseklasse A/B og sikres etter SK I. Fra pel nr. 27685-27679 er  $Q = 12$ . Fjellet beskrives her som noe blokkete, men kvaliteten er god. Videre fra pel nr. 27679-27674 er  $Q = 23$ , og fjellet er mer massivt

uten blokker, med fin kontur. De to siste metrene av parti 5 er litt mer oppsprukket igjen, og  $Q = 12$ .



Figur 8.11: Utsnitt fra registrert kartlegging i Novapoint Tunnel for parti 5. Se vedlegg C for tegnforklaring.

### 8.5.3 Oppsummering og videre driving

I parti 5 var det fra forundersøkelsene stipulert at en lavhastighetssone på 2600 m/s skulle krysse tunnelen. Verken kjerneboring foran stoff eller sonderboring m/MWD viste antydning til en så dårlig sone. Hele partiet ble kartlagt som fjell med god bergmassekvalitet, bergmasseklasse A/B (SK I). Videre observeres det heller ikke noen lavhastighetssone etter parti 5. Også her kartlegges fjellet til bergmasseklasse A/B.

## 8.6 Parti 6: Pel nr. 31783-31865

### 8.6.1 Forundersøkelser

I tabell 8.7 presenteres relevante resultater og tolkninger fra utførte forundersøkelser i parti 6. For mer detaljert beskrivelse henvises det til avsnitt 7.7.1.

### 8.6.2 Undersøkelser under driving

#### Kjerneboring fra pel nr. 31771

Kjerneboring foran stoff er utført i parti 6 fordi bergoverdekningen er mindre enn 40 m. Boringen startet ved pel nr. 31771 og er 153 m lang, fram til pel nr. 31924. Fra kjerneloggen kan det som gjelder parti 6 oppsummeres i følgende punkter:

- Bergarten er primært rødlig gneis, amfibolittisk gneis og båndgneis, med noen meter eklogitt med innslag av pyritt.
- Før parti 6 starter viser kjerneloggen varierende bergmassekvalitet med 3 m med svakhetssone (SRF

**Tabell 8.7: Oppsummering av resultater og tolkninger fra utførte forundersøkelser for parti 6, pel nr. 31783-31865 i Fjørtoftfjordtunnelen.**

Utførte forundersøkelser	Resultater/tolkninger
Akustikk	- Sjødybde 15-20 m - Løsmassedekke 4-6 m
Refraksjonsseismikk	- Bergoverdekning 35 m - Pel nr. 31783-31788: $V_p = 3100$ m/s (langsgående) - Pel nr. 31788-31802: $V_p = 3500$ m/s (tversgående) - Pel nr. 31802-31847: $V_p = 3100$ m/s (langsgående) - Pel nr. 31847-31862: $V_p = 3600$ m/s (tversgående) - Pel nr. 31862-31865: $V_p = 3100$ m/s (langsgående)
Ingeniørgeologisk feltkartlegging på land	- Bergart: Gneis - Pel nr. 31845: «Mulig» bergartsgrense til glimmerskifer, amfibolitt, metaarkose

= 5), ellers gjennomsnittlig  $Q = 2,3$ . Denne kvaliteten fortsetter inn i parti 6 til pel nr. 31800: De første 17 m av parti 6 er  $Q = 0,07-8,6$ , gjennomsnittlig  $Q = 1,7$ . Talk er observert på sprekker. Noen sprekker har kalkbelegg.

- Ved pel nr. 31801-31823 forbedres bergmassekvaliteten, hovedsaklig med  $Q = 4,5-74$ . Totalt 5 m innefor denne sonen har  $Q = 1,0-3,1$ , men spredt innimellom den gode bergmassen. Det er ingen antydning til svakhetssone.
- Videre øker oppsprekkingsgraden, og bergmassekvaliteten blir gradvis dårligere. Ved pel nr. 31824-31846 er  $Q = 0,02-4,0$ , med totalt 4 m med svakhetssone ( $SRF = 5$ ). Det er grønn talk på sprekker i hele sonen, og noe tynt belegg med lys grå leir. Kloritt er også observert.
- Resten av parti 6, ved pel nr. 31847-31865, forbedres bergmassekvaliteten.  $Q = 0,6-25$ , gjennomsnittlig  $Q = 7,1$  (bergmasseklasse C).

Den stipulerte bergartsgrensen fra gneis til glimmerskifer/amfibolitt/metaarkose observeres ikke i bor-kjernene fra parti 6.

#### *Sonderboring med slaghammer*

Følgende sonderboringer har gitt informasjon om forholdene foran stuff i parti 6:

- **4 hull á 29 m fra pel nr. 31776:** Jevn borsynk i alle hull. Tørre forhold. I høyre del av profilet veksler fargen på borvannet mellom grå og rød, og det ble påtruffet leire ved 6-10 m og fra 26 m. I venstre del av profilet var borvannet grått før det ble hvitt ved 25 m og deretter grått igjen. Dette kan også tyde på leire.
- **4 hull á 29 m fra pel nr. 31797:** Grått borvann i alle hull. Total innlekkasje på 18 l/min, som resulterte i en runde med forinjeksjon før videre driving.
- **4 hull á 29 m fra pel nr. 31812:** Alle hullene var fine å bore, med jevn borsynk. Borvannet var grått. Vannlekkasje på 1,5 l/min i hull i venstre vederlag, ellers tørt.

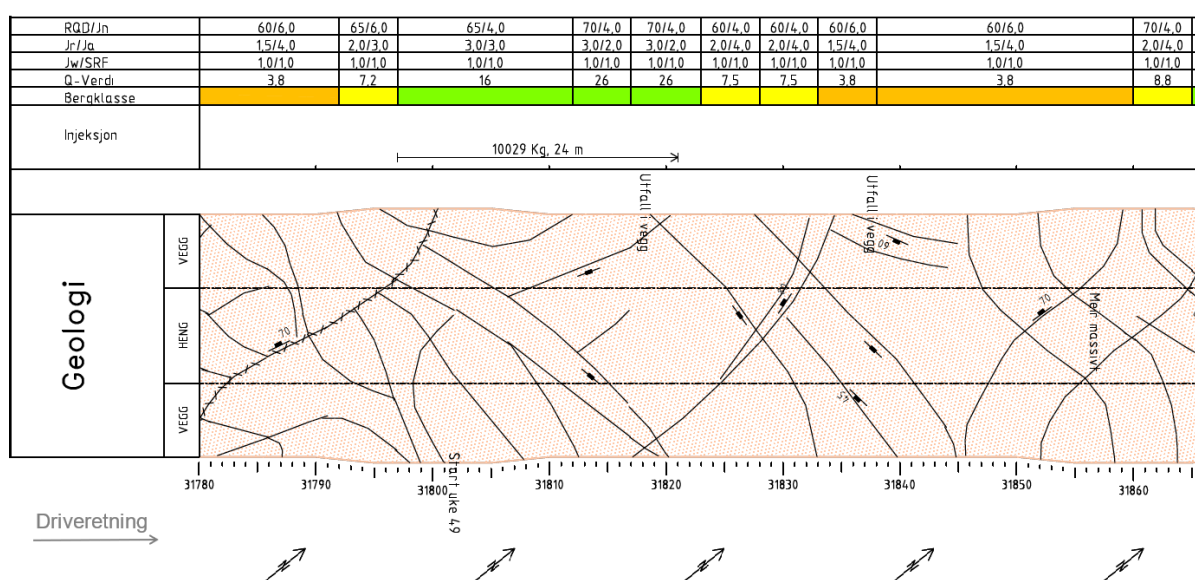
- **4 hull á 29 m fra pel nr. 31834:** Tre av hullene var vanskelige å bore fram til 15 m (pel nr. 31849) på grunn av dårlig og mykt fjell. Siste halvdel av hullene var fine å bore. Innlekkasje på 2 l/min fra hull i høyre vegg, ellers tørre forhold.
- **4 hull á 29 m fra pel nr. 31854:** De to nederste hullene på stoffen var veldig vanskelige å bore på grunn av dårlig fjell, mens de to øverste hullene var fine å bore. Basert på dette kan det ifølge tunnelbas forventes å drive i litt dårligere fjell fremover siden det drives på synk. Alle hullene hadde et lite sig med vann, totalt i underkant av 1 l/min. Fargen på borvannet var lys grå.

### MWD og borparametertolkning

I vedlegg K.6 vises tolket hardhet fra MWD-målinger for langhull i parti 6. Det er noe varierende hardhet fra mykere og dårligere bergmasse (rød farge) til hardere bergmasse (lys blå farge). Særlig viser injeksjonshullene fra pel nr. 31797 mykere bergmasse i heng og venstre vederlag. Ellers er det ingen tydelige store endringer i hardheten. Mesteparten av hullene har middels hardhet (gul farge), med noe innslag av dårligere fjell.

### Kartlegging på stoff

I hele parti 6 kartlegges den gjeldende bergarten som gneis. Fra pel nr. 31783 beskrives fjellet som rødrustet, mykt og oppsprukket, med litt leire på sprekkeflatene. En svakhetszone < 1 m, med nordlig strøk og fall 70° V, krysser tunnelprofilen fra høyre til venstre side (se figur 8.12). Q = 3,8 (SK III), og økes videre til Q = 7,2 (SK II). Det utføres injeksjon ved pel nr. 31797-31821. Bergmassekvaliteten økes deretter til Q = 16-26 (SK I) ved pel nr. 31797. Fjellet beskrives som mekanisk sterkt, og profilet står fint. To steile sprekkesett preger bergmassen.



Figur 8.12: Utsnitt fra registrert kartlegging i Novapoint Tunnel for parti 6. Tegnforklaring følger i vedlegg C.

Ved pel nr. 31824 reduseres bergmassekvaliteten til Q = 7,5 (SK II), deretter til Q = 3,8 (SK III) ved pel nr. 31833. Det observeres talk som sprekkefylling, noe som reduserer friksjonen på sprekken.

---

Fjellet blir mer rufsete, med noe utfall i venstre vegg ved pel nr. 31838. Ved pel nr. 31860-31865 økes bergmassekvaliteten til  $Q = 8,8$  (SK II). Her beskrives fjellet som mer massivt og mindre oppsprukket.

### 8.6.3 Oppsummering

Parti 6 i Fjørtoftfjordtunnelen ligger i et område med hyppig opptreden av svakhetssoner ifølge refraksjonsseismikken, både på tvers av og langs med tunneltraséen. Den langsgående svakhetssonen på 3100 m/s kunne potensielt ha redusert stabiliteten i tunnelen over en lengre strekning, men ser ikke ut til å ha påvirket drivingen i noen grad. De tversgående svakhetssonene på 3500-3600 m/s ser heller ikke ut til å ha medført nevneverdig dårlig bergmassekvalitet. Den første ble registrert i NP som en svakhetszone < 1 m. Den andre ble ikke registrert som svakhetszone under tunnelkartleggingen i det hele tatt, men som bergmasse med noe redusert kvalitet (bergmasseklasse C).

Første sonderboring avdekte leire ved rød og hvit farge på borvannet. Dette stemmer bra med plassering av den kartlagte svakhetssonen < 1 m som er inntegnet i figur 8.12. Ifølge den siste sonderboringen kunne det forventes driving i dårlig fjell. Dette ser ikke ut til å ha blitt registrert under tunnelkartleggingen, noe som kan bety at den dårlige fjellkvaliteten i sonderhullene ikke var dårlig nok til å påvirke totalstabiliteten i hele tunnelprofilen.

Den noe dårligere bergmassekvaliteten i siste halvdel av parti 6, kommer av at det ble observert talk som sprekkefylling (bergmasseparameter  $J_a = 4$ ). Dette stemmer godt med observert talk på sprekkeplanene fra kjerneboringen foran stuff, der det i tillegg ble observert noe kloritt. Den reduserte bergmassekvaliteten stemmer også godt med at tre av sonderhullene fra pel nr. 31834 var vanskelige å bore. Bergarten i hele parti 6 er kartlagt til å være gneis. «Mulig» bergartsgrense til glimmerskifer/amfibolitt/metaarkose ved pel nr. 31845 ble ikke observert. Likevel kan sprekkefyllinger bestående av talk og kloritt indikere at det finnes en annen bergart i nærheten. Grunnen til det er at sprekkefyllinger i gneiser vanligvis består av kvarts og omdannet feltspat, og ikke talk og kloritt. De observerte sprekkefyllingene antas altså å ha sitt opphav i en annen bergartstype enn gneis.

## 8.7 Parti 7: Pel nr. 32150-32202

### 8.7.1 Forundersøkelser

En oppsummering av relevante resultater og tolkninger fra utførte forundersøkelsene i parti 7 er presentert i tabell 8.8. Mer detaljerte beskrivelser er tidligere presentert i avsnitt 7.8.1.

### 8.7.2 Undersøkelser under driving

Følgende presenteres undersøkelsene som er utført under driving i parti 7.

#### *Sonderboring med slaghammer*

- **4 hull á 29 m fra pel nr. 32136:** Alle hullene var fine å bore, med jevn borsynk. Borvannet hadde lys grå farge. Total innlekkasje på 10 l/min.

**Tabell 8.8: Oppsummering av resultater og tolkninger fra utførte forundersøkelser for parti 7, pel nr. 32150-32202 i Fjørtoftfjordtunnelen.**

Utførte forundersøkelser	Resultater/tolkninger
Akustikk	- Sjødybde ca. 30 m - Løsmassedekke 4-6 m
Refraksjonsseismikk	- Bergoverdekning ca. 50 m - Pel nr. 32150-32159: $V_p = 4300$ m/s - Pel nr. 32159-32202: $V_p = 5600$ m/s
Ingeniørgeologisk feltkartlegging på land	- «Mulig» bergart: Glimmerskifer, amfibolitt, metaarkose - Pel nr. 32193: «Mulig» bergartsgrense til gneis

- **4 hull á 29 m fra pel nr. 32158:** Jevn borsynk i alle hull. Grått borvann, og ingen innlekkasje.
- **4 hull á 29 m fra pel nr. 32180:** Like forhold som ved forrige sonderboring. Jevn borsynk, grått borvann, og ingen innlekkasje.

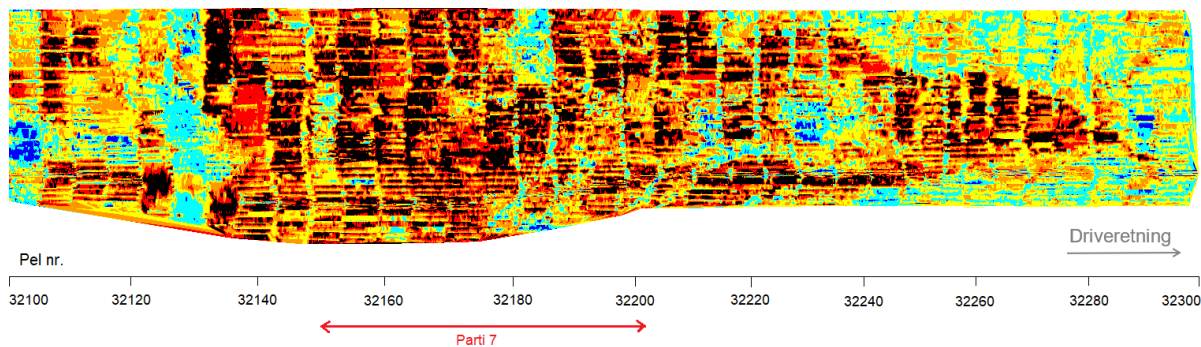
#### *MWD og borparametertolkning*

Tolket hardhet for sonderhullene i parti 7 presenteres i vedlegg K.7. Sonderhullene viser jevnt over rask boring (oransje og rød farge), som tyder på myk bergmasse. At bergmassen er mykere enn referanseverdiene, betyr ikke nødvendigvis at det kommer til å oppstå stabilitetsproblemer. Dette blir bekreftet fra observasjonene under sonderboringen, som ikke oppdager markante slepper eller plutselige forandringer i bergforholdene. Borsynken er jevnt høy. Fra forundersøkelsene ble det antatt at gjeldende bergart i parti 7 skulle være glimmerskifer, amfibolitt og metaarkose. Dette er omdannede sedimentære bergarter som er noe svakere enn massiv gneis (Nilsen og Palmstrøm, 2000). En mulig forklaring på den raske boringen kan dermed være at parti 7 består av svakere bergarter enn gneis, noe som vil bekreftes eller avkreftes under tunnelkartleggingen.

Siden tolket hardhet ikke endrer seg betydelig til hardere bergmasse mot slutten av parti 7, ser det ut til at den «mulige» bergartsgrensen fra forundersøkelsene ikke forekommer ved pel nr. 32193. Borparametertolkningsbilder med tolket hardhet i bergmassen videre framover, viser at en overgang til bergmasse med normal hardhet starter omtrent ved pel nr. 32240 i vegg og omtrent ved pel nr. 32280 i hengen, se figur 8.13. Det kan tyde på at partiet med mykere bergmasse faller i motsatt retning av driveretningen.

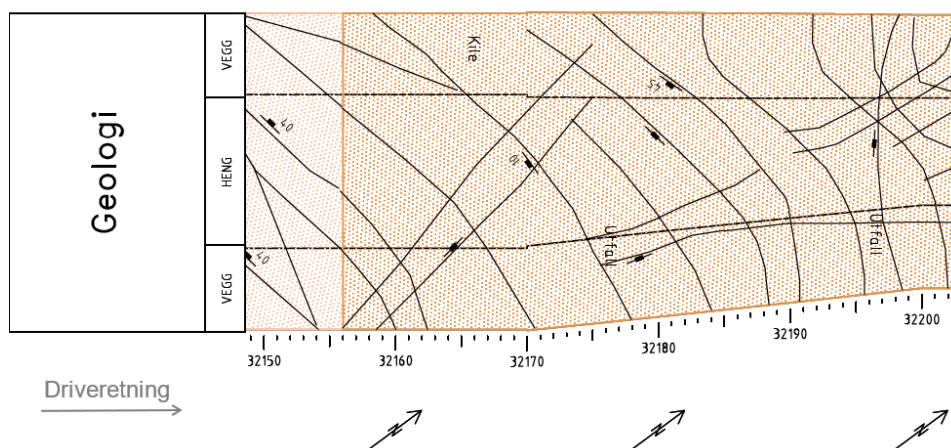
#### *Kartlegging på stoff, befaring og prøvetaking*

Dette avsnittet er basert på tegning fra NP samt egen befaring til stoff. Figur 8.14 viser registrert kartlegging på utbrettsprofil og etter Q-metoden. Ved pel nr. 32150 har bergmassen god kvalitet med liten oppsprekingsgrad og ett dominerende sprekkesett.  $Q = 30$  (SK I). Fra pel nr. 32156 registreres en annen bergartstype enn gneis som blir gjeldende for resten av partiet. Fjellkvaliteten reduseres noe på grunn av et siltig/sandig sprekkebelegg og litt leir, til  $Q = 16-18$  (SK I). Fra pel nr. 32190 øker oppsprekingen mer og to sprekkesett er dominerende, som resulterer i  $Q = 8$  (SK II).



**Figur 8.13: Tolket hardhet ved pel nr. 32100-32300 i Fjørtoftfjordtunnelen, basert på MWD-data fra alle hull. Parti 7 er markert. Det ser ut til å være en overgang til mykere bergmasse ved pel nr. 32240 i vegg og pel nr. 32280 i heng. Modifisert etter Bever Control AS (2020).**

RQD/Jn	90/3,0	80/3,0	70/3,0	70/6,0
Jr/Ja	2,0/2,0	2,0/3,0	2,0/3,0	2,0/3,0
Jw/SRF	1,0/1,0	1,0/1,0	1,0/1,0	1,0/1,0
Q-Verdi	30	18	16	7,8
Bergklasse				
Injeksjon				



**Figur 8.14: Utsnitt fra registrert kartlegging i Novapint Tunnel for parti 7. Se vedlegg C for tegnforklaring.**

Befaring til stoffen ved Fjørtofta N ble utført 20.02.2020 sammen med kontrollingeniør Ken Ove Vassgård. Stoffen var da ved pel nr. 32202, som tilsvarer slutten av parti 7. Forrige salve var dekt med sprøytebetong og bolter, så det var bare stoffen som var synlig. Stoffen var noe uryddig, og midt i den var en en 20-30 cm bred åre med hvitt mineral. Gjeldende bergart ble vurdert til å være amfibolitt. De to dominerende sprekkesettene var tydelige. Sprekker i stoffen som var tilnærmet parallelle med tunneltraséen var fylt med et hvitt sprekkebelegg, mens tversgående sprekkeflater hadde et mer grønnlig og glinsende belegg. Se fotografert stoff i figur 8.15. Det ble tatt med to prøver av antatt tilsvarende sprekkebelegg, men fra tidligere pel nr. XRD-analyse, frisvellingstest og svelletrykksmåling ble utført. Beskrivelse, resultater og diskusjon av disse laboratorietestene er tidligere presentert i kapittel 6.

Vassgård trodde det var mye kalk i berggrunnen her på grunn av sur lukt i tunnelen (Møre og Romsdal fylkeskommune, 2020e). Det ble derfor tatt med en steinprøve for å lettere gjøre en visuell bergartsbe-



**Figur 8.15:** Stuff fotografert fra borryggen under befaring, ved pel nr. 32202 (Birkeli, 2020).

stemmelse i dagslys, og for å teste om bergarten reagerte med saltsyre. Steinen ble tatt fra nedre del av veggen på høyre side, ved pel nr. 32192. Denne vises i figur 8.16, og viser tegn til deformasjon. Bergarten bruste ikke ved påføring av saltsyre, så det var dermed ikke en kalkstein. Den hadde et belegg som lett kunne ripes i med negl og som var grønt, glatt, såpeaktig og tydelig prismatisk. Bruddflatene som ikke var dekket med dette grønne belegget bestod av et hardt og mørkt mineral som antas å være amfibol, med noe kvarts og små granater. Belegget antas å bestå av talk og kloritt. Det er tydelig at parti 7 befinner seg i en sone der mange ulike bergarter forekommer uten noe system. Etter videre driving beskrives sonen som en blanding av bergartene og mineralene grønnstein, amfibolitt, talk, kleberstein, kalkspat og kvarts på senere NP-tegninger.



**Figur 8.16:** Steinprøve fra pel nr. 32192 i parti 7 (Birkeli, 2020). Nede til venstre er det noe sprøytebetong på prøven. Ellers er mye av den dekket med et tynt grønt og glatt belegg der mineralkornene har prismatisk form.



---

### 8.7.3 Oppsummering og videre driving

I parti 7 har det vært gode bergmasseforhold, som forventet fra forundersøkelsene. Den «mulige» bergarten glimmerskifer/amfibolitt/metaarkose var antatt å følge partiet fram til pel nr. 32193. Ifølge NP-tegningen begynner sonen med annen bergartstype enn gneis ved pel nr. 32156. Siden jeg under befaring vurderte bergarten ved prøvelokaliteten ved pel nr. 32150 til å være amfibolitt, antas det at overgangen fra gneis først forekommer i veggene og deretter i hengen. Lavere hardhet i borparametertolkningene kan være en indikasjon på annen bergartstype enn gneis. Da viser i så fall figur 8.13 at bergartsovergangen begynner enda tidligere, ved pel nr. 32132. Det har blitt kartlagt en blanding av ulike bergarter og mineraler i parti 7: Grønnstein, amfibolitt, talk, kleberstein, kalkspat og kvarts. «Mulig» bergartsgrense tilbake til gneis forekommer ikke der den var forventet.

Tunnelkartlegging og borparametertolkninger fra videre driving etter parti 7 viser god overensstemmelse ved at både bergartsgrense tilbake til gneis og overgang til bergmasse med normal hardhet forekommer rundt pel nr. 32270-32280. Totalt er bredden på sonen med grønnstein, amfibolitt, osv. omtrent 120 m, noe som er mye smalere enn den forventede bredden fra forundersøkelsene på omtrent 350 m (fra pel nr. 31845 i parti 6 til pel nr. 32193 i parti 7).

## 8.8 Samlet vurdering av nytteverdien til utførte undersøkelser under driving av Nordøyvegen

Som en oppsummering for hele kapittelet, kommer det nå en vurdering av nytteverdien til utførte ingeniørgeologiske undersøkelser under driving av tunnelene langs Nordøyvegen. Vurderingen er basert på resultatene/tolkningene fra undersøkelsene i parti 1-7 som er presentert i de foregående avsnittene.

### 8.8.1 Kjerneboring foran stuff

Kjerneboring foran stuff er utført i fem av de syv utvalgte partiene. I alle tilfellene har metoden hatt høy nytteverdi ved at den har verifisert eller avkreftet forhold som var forventet fra refraksjonsseismikken. Parti 1 er et eksempel på hvordan resultatene fra kjerneboringen aktivt ble benyttet når avgjørelser om utvidet profil, reduserte salvelengder og forbolting ble tatt. Kjerneboringen her kartla også svakhetssonens bredde med mye større nøyaktighet enn det som var antatt fra seismikken. I parti 3 har kjerneboringen vært ekstra nyttig, siden forundersøkelsene her ikke stemte og skapte stor usikkerhet angående forholdene. Basert på borkjernene ble det forutsett når bedre bergmasse kunne forventes.

Kontrollingeniør Vassgård påpeker at det som har blitt registrert i kjerneboringene også har blitt møtt i tunnelene (Møre og Romsdal fylkeskommune, 2020e). Men dersom en kjernelogg antar dårlige bergmasseforhold, betyr det ikke at det er gjeldene for hele tunnelprofilen. Parti 4 er et eksempel på dette. Her skulle det ifølge kjerneloggen drives gjennom en tydelig svakhetssone på 28 m, med stor andel i bergmasseklasse F. Byggherren kartla to svakhetssoner < 1 m som ikke påvirket totalstabiliteten mer enn til bergmasseklasse D. Dette understreker det faktum at kjerneboring foran stuff er et nålestikk i

---

tunnelprofilen.

Basert på den gjennomgangen som er gjort av kjerneboringer foran stoff i utvalgte partier, vurderes kjerneboringen til å ha stor verdi. Den gjør det mulig å vurdere vanskelighetsgraden til bergmassen foran stoff, og driving gjennom eventuelle svakhetssoner kan planlegges bedre.

### **8.8.2 Sonderboring med slaghammer**

Den systematiske sonderboringen har hatt høy nytteverdi ved at den har verifisert registreringer fra kjerneboringen i flere punkter i stoffen. Den har også gitt gode og raske målinger på innlekkasje, som avgjørelser i forhold til injeksjon har blitt basert på. Tunnelbas merker godt når man kommer til dårlig fjell ved fastboring, og rød/brun farge på borvannet har gitt riktige indikasjoner på leirforekomster foran stoff. En fastboring kan ifølge Karlson (2020) resultere i at bergmasseforholdene lenger inn i borhullet også oppleves dårlige, selv om de ikke nødvendigvis er det. Grunnen er at borsynken ikke alltid blir like jevn etter å ha passert dårlig bergmasse. For flere av de utvalgte partiene virker det ikke som at dette har vært et problem. Et unntak er siste sonderboring i parti 6, som tydelig antok dårlig fjell i nedre del av stoff grunnet vanskelige boreforhold. Tunnelkartleggingen viste tvert imot bedre fjellkvalitet lengre fremover. Sonderboringen kan altså feiltolkes. Men i mesteparten av tilfellene i de utvalgte partiene ved Nordøyvegen har sonderboring med slaghammer gitt riktig og veldig nyttig informasjon om forholdene foran stoff.

### **8.8.3 MWD og borparametertolkning**

MWD og borparametertolkning har hatt varierende nytteverdi under driving av parti 1-7. Dette varierer først og fremst med om kontrollingeniørene har valgt å benytte seg av programvaren, men også med at det har vært problemer med nettverk på stoff. Av borparametertolkningene er oppsprekking og vannforhold ikke benyttet på grunn av stor usikkerhet, så dette har hatt lav nytteverdi. Tolket hardhet gir derimot en god verifisering av det som er observert og opplevd under kjerne- og sonderboring. Eksempel på et unntak her er tolket hardhet fra første sonderboring i parti 2. Her hadde tunnelbas opplevd knallhardt fjell mot slutten av hullet, mens borparametertolkningen ikke viste at borsynken var redusert. Et annet viktig poeng med tolket hardhet, er at lav hardhet ikke trenger å være en indikasjon på stabilitetsproblemer. Som vist i parti 7, kan det også tyde på en annen type bergart. Så for at borparametertolkning skal ha høy nytteverdi under driving, må kontrollingeniørene få opplæring i programvaren og kritisk sammenstille tolkningene med andre undersøkelser. MWD gir aldri noen nye opplysninger enn kjerneboring, sonderboring og kartlegging. MWD bare verifiserer det som er registrert med andre metoder, og gir dermed en nyttig dokumentasjon av forholdene. Alle tall fra boreprosessen blir lagret digitalt og kan vurderes i etterkant dersom det blir nødvendig.

### **8.8.4 Kartlegging på stoff med prøvetaking**

Tunnelkartlegging i parti 1-7 har hatt høy nytteverdi ved at det gir «fasiten» på hvordan bergmasse- og vannforholdene er. Det oppnås et helhetsbilde av forholdene i hele tunnelprofilen, og ikke bare nålestikk

---

som ved kjerne- og sonderboring. Basert på dette bestemmes sikring, og kartleggingen er også viktig for å få en god geologisk modell slik at bergmassen som blir gjemt bak sikringen er kjent. En bedre forståelse av hvordan geologien opptrer på tunnelnivå er nyttig ved at det gir et bedre grunnlag for å tolke kommende undersøkelser foran stoff.

Parti 6 viser at kartleggingen kan hjelpe til med å forutsi forholdene foran stoff underveis i drivingen. Her ble sprekkefyllinger bestående av talk og kloritt kartlagt, noe som antas å være en indikasjon på at bergartstypen snart endres fra gneis. Til tross for at dette ikke skjedde før 320 m senere i tunnelen, antas det å være en sammenheng mellom talk og kloritt som sprekkefylling og bergmasse bestående av grønnstein, amfibolitt, talk, kleberstein, kalkspat og kvarts. Dette var også gjeldende i parti 2, der det ble kartlagt en 50 cm tykk sleppe med mineralet talk før bergarten endret seg fra gneis til olivingabbro.

Når det gjelder prøvetaking, har dette høy nytteverdi så lenge det blir tatt prøver av relevante leirforekomster slik at disse ikke overses. Borbarhetstester og tynnslipmikroskopering er tester der det tar noe tid å få prøveresultatene, og i parti 2 var den harde bergarten passert når resultatene ankom. Disse resultatene har nok ikke hatt noen spesiell nytteverdi for selve drivingen i parti 2, men heller høy nytteverdi ved å gi bedre geologisk forståelse av området. Bedre geologisk forståelse er sentralt for at det skal være mulig å gjøre bedre vurderinger av kommende geologi som Haramsfjordtunnelen skal drive gjennom. Resultatene fra testene har også hatt nytteverdi ved at de bekrefter at bergarten i parti 2 er som entreprenøren har opplevd, nemlig ekstremt hard. Dermed er det geologien som er hovedårsaken til den dårlige inndriften i partiet, og ikke nødvendigvis heft fra entreprenørens side.

---

## 9 | Diskusjon

I dette kapittelet diskuteres observasjonene og analysene fra parti 1-7. Det gjøres først ved at bergmassekvaliteten i form av Q-verdier sammenlignes. Q-verdiene fra de seismiske forundersøkelsene er estimert fra korrelasjonen mellom  $V_p$  og Q som presenteres innledningsvis i avsnitt 9.1. Videre i avsnittet forklares parametre som kan påvirke den seismiske hastigheten som tolkes i berggrunnen, samt hvilken effekt forinjeksjon kan ha på kartlagt Q-verdi i tunnelen. Dette gir et bedre grunnlag for videre diskusjon. Deretter presenteres diagrammene med Q-verdier langs parti 1-7 i avsnitt 9.2. Det tas med Q-verdier som er oppnådd fra forundersøkelser, kjerneboring foran stuff og tunnelkartlegging. Basert på dette diskuteres det hvordan forventet bergmassekvalitet stemmer overens med både bergmassekvalitet logget fra kjerneprøver og bergmassekvalitet kartlagt for hele tunnelprofilen. For hvert parti diskuteres mulige forklaringer til eventuelle avvik mellom Q-verdiene.

Avsnitt 9.3 tar så for seg hvordan utførte undersøkelser under driving har blitt benyttet til å predikere vannforholdene foran stuff. I avsnitt 9.4 kommer en vurdering av om andre opplegg for undersøkelser under driving kunne blitt benyttet i parti 1-7. Videre kommer en kommentar til undersøkelsesomfanget i tunnelene ved Nordøyvegen. Avslutningsvis, i avsnitt 9.6, diskuteres generelle trender som er observert ved gjennomgang av grunnlagsmateriale fra alle utførte ingeniørgeologiske undersøkelser i drivefasen.

### 9.1 Korrelasjon mellom $V_p$ og Q

#### 9.1.1 Korrelasjonsformler

P-bølgehastigheten ( $V_p$ ) fra refraksjonsseismiske undersøkelser kan i mange tilfeller relateres direkte til bergmassekvaliteten (Statens vegvesen, 2010a). Ved å ha sikre korrelasjonsformler mellom  $V_p$  og Q-verdi kan bergmassekvaliteten forutses ut fra seismikken, og noe av usikkerheten knyttet til tunnel-driving kan reduseres. Basert på empirisk data fra driving av tunneler og bergrom i hardt berg i flere land, inkludert Gjøvikhallen i Norge, er følgende korrelasjon mellom  $V_p$  og Q funnet (Barton, 2002):

$$V_p \approx 3,5 + \log Q \quad [\text{km/s}] \quad (9.1)$$

Hastigheten i bergmassen vil ifølge Statens vegvesen (2010a) påvirkes av flere faktorer, blant annet:

1. Bergartstype
2. Trykkstyrke (UCS) til bergarten
3. Anisotropi i bergarten
4. Vinkel mellom største hovedspenning og seismisk registreringsretning

Ved å kartlegge disse faktorene kan et normalisert bergmassekvalitetstall,  $Q_c$ , beregnes. Ifølge Barton (2002) er det en sterk korrelasjon mellom UCS og Young's modulus  $E$ , som igjen påvirker  $V_p$  i bergmassen. Ligning 9.1 antar at bergarten er hard, med UCS = 100 MPa. For å benytte korrelasjonen ved

---

svakere eller sterkere bergarter kan følgende normaliserte ligninger benyttes:

$$V_p \approx 3,5 + \log Q_c \quad (9.2)$$

$$Q_c = Q \times \frac{UCS}{100} \quad (9.3)$$

Kombinasjon av disse ligningene gir følgende korrelasjon:

$$Q = 10^{V_p - 3,5} \times \frac{100}{UCS} \quad (9.4)$$

Dette resulterer i at den virkelige Q-verdien i bergmassen øker i forhold til  $Q_c$  dersom bergarten er svakere ( $UCS < 100$  MPa), og reduseres dersom bergarten er sterkere ( $UCS > 100$  MPa).

Ved testing av  $V_p$  i laboratorieprøver av bergarter, kan foliasjon og skifrihet medføre ulik seismisk hastighet langs med og på tvers av lagdelingen (Barton, 2002). Slik anisotropi i en bergart kan også medføre anisotrope seismiske hastigheter i bergmassen, antagelig i kombinasjon med varierende fordeling av sprekkesett.

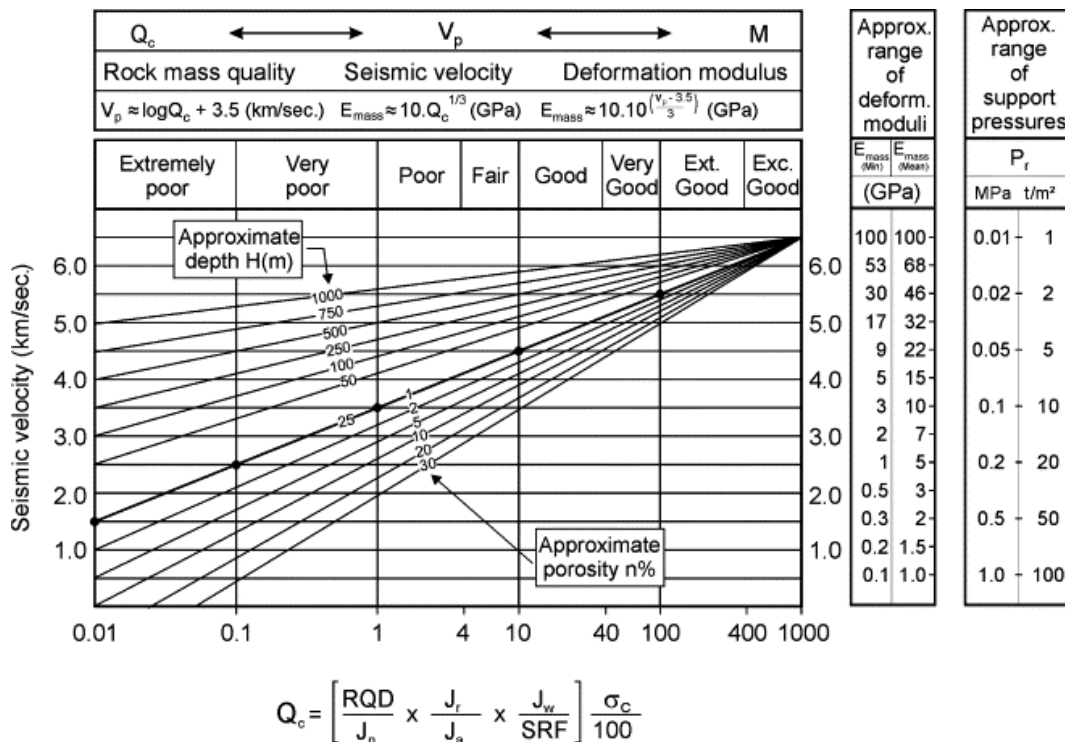
### 9.1.2 Innspenningseffekt og påvirkning av porøsitet

Ligningene over gjelder for grunne tunneler og bergrom med dybde 25-50 m. Ved økende dybde eller spenning, har den seismiske hastigheten  $V_p$  en tendens til å øke (Barton, 2002). Dette kalles for innspenningseffekt eller dybdeavhengighet. Forklaringen ligger i at  $V_p$  avhenger av oppsprekingsgraden i bergmassen (Gjelsnes og Eidesen, 2013). Økende bergoverdekning medfører større innspenning, slik at bergmassen kan oppfattes som tett til tross for sterk oppsprekking. Leire i sprekker i dypet kan være mer kompakt og virke tettende på bergmassen, som medfører høyere seismisk hastighet. Kartlagt Q-verdi av en kjerne fra samme sone ville derimot blitt lav grunnet leirinnhold og høy oppsprekking. Innspenningseffekten må tas hensyn til når Q-verdi beregnes fra  $V_p$  som er målt ved dybde  $> 50$  m.

Tektoniske horisontale spenninger kan også gi innspenningseffekt i likhet med høy bergoverdekning. På Nordvestlandet er det ifølge Myrvang (2002) målt horisontale spenninger som er høyere enn de vertikale gravitative spenningene. Dette kommer av kompresjon fra den atlantiske midthavsryggen, såkalt «ridge push». Det kan derfor ikke utelukkes at det finnes høye horisontale spenninger langs Nordøyvegen som vil gi bedre innspenning, og dermed påvirke korrelasjonen fra  $V_p$  til Q. Ifølge de ingeniørgeologiske rapportene for konkurransegrunnlag, kan områder langs traséene som påvirkes av MTF ha lave horisontalspenninger (Karlson og Grob, 2018a,c). Siden spenningsmålinger ikke er utført ved Nordøyvegen, er det vanskelig å vurdere påvirkning av «ridge push» og MTF ytterligere.

Porøsiteten i bergarten påvirker også seismisk hastighet. Høyere porøsitet gir en reduksjon i  $V_p$  siden lydbølgene bruker lengre tid på å spres i luft enn i berg (Barton, 2002). Figur 9.1 viser hvilken effekt dybde [m] og porøsitet [%] har på  $V_p$ , og hvordan korrigeringer kan utføres for å ta hensyn til dette.

Legg merke til at innspenningseffekten i figuren kommer av vertikale spenninger (fra dybden), mens det som nevnt også er en mulighet for innspenning i grunn bergmasse som følge av høye horisontale spenninger. Figuren viser også sammenheng mellom  $Q_c$  og  $E$ -modul, som ikke kommenteres videre her. Korreksjonslinjene er utarbeidet ved tilpasning til felldata fra hele verden. Ved dype lokasjoner er det da benyttet tomografi mellom borhull (Barton *et al.*, 1995).



Figur 9.1: Korreksjon av  $V_p$  basert på innspenningseffekt (dybde) og bergartens porøsitet (Barton, 2002).  $\sigma_c$  tilsvarer trykkstyrken UCS.

### 9.1.3 Påvirkning av lagdeling i bergmassen, eksempel fra Nordkapptunnelen

Driving av nordre trasé av Nordkapptunnelen i 1995-1999, er et godt eksempel på høye seismiske hastigheter fra forundersøkelsene som stemte veldig dårlig med de virkelige bergmasseforholdene i tunnelen (Palmstrøm *et al.*, 2003). Dette medførte feiltolkning av driveforhold og stabilitet, økte kostnader og omtrent ett års forsinkelse. Basert på seismikken skulle 90 % av tunnelen drives i godt fjell (Duås, Eggen og Veien, 2016). Det viste seg at bergmassekvaliteten i virkeligheten var dårlig til svært dårlig fjell. Geologisk går den nordre delen av tunneltraséen gjennom svakt metamorfoserte sedimentære lagpakker, bestående av kvartsitter (sandsteinener), gråvakke og leirskifre. Under drivingen ble lagpakkene kartlagt med nær horisontalt til svakt fall, med intens foldning lokalt. Tykkelsen på lagpakkene var i mm-cm-skala. Oppsprekningen var tett og gikk langs foliasjonen/skifrihetsplanet i alle bergartene, kombinært med glatte sprekkeflater. Bergmassen ble karakterisert som sukkerbitfjell i store deler av nordre trasé. I ettertid har det blitt konkludert med at den spesielle og tette lagdelingen gjorde at gode lag kamouflerte dårlige lag under (Duås, Eggen og Veien, 2016). Dermed ble ikke de dårlige lagene registrert under forundersøkelsene.

---

### 9.1.4 Effekt av forinjeksjon på Q-verdi

Noe annet som er verdt å merke seg før Q-verdiene langs parti 1-7 presenteres, er hvilken effekt forinjeksjon kan ha på bergmassekvaliteten. Gjennom undersøkelser i bergmasse med spesifikke Q-parametre før forinjeksjon, har Barton (2002) kartlagt små forbedringer av de fleste parametrene som et resultat av injiseringen. Forbedringene baserer seg på at det mest permeable og minst gunstige sprekkesettet injiseres. Dette oppfylles ikke når det er leire tilstede i et sprekkesett, fordi minste verdi av  $J_r/J_a$  vil da ikke tilsvare sprekkesettet med høyest permeabilitet. I slike tilfeller vil ikke forinjeksjon ha en like stor positiv påvirkning på Q-verdien. Desto høyere en Q-verdi er fra før, desto vanskeligere vil det være å forbedre tilhørende Q-parametre med forinjeksjon.

## 9.2 Diagrammer med sammenstilte Q-verdier i utvalgte partier

Basert på de seismiske hastighetene fra forundersøkelsene ved Nordøyvegen, er ligning 9.4 benyttet til beregning av forventet bergmassekvalitet i parti 1-7. Følgende antagelser er gjort:

- Porøsiteten i bergartene er ikke testet, men på grunn av høy metamorfosegrad antas den å være minimal (1 %).
- Verdiene for  $V_p$  er enten funnet ved refraksjonsseismikk eller ved seismisk tomografi på dybde < 50 m. Dermed har det ikke vært nødvendig å korrigere for dybdeavhengighet som vist i figur 9.1.
- Det ses bort fra innspenningseffekt som kommer fra eventuelle tektoniske horisontale spenninger fra den atlantiske midthavsryggen.
- Trykkstyrken (UCS) til bergartene er ikke testet. Benyttede UCS-verdier er basert på en oversikt over gjennomsnittlig UCS fra skandinaviske bergarter testet hos SINTEF/ NTNU (Nilsen og Palmstrøm, 2000, s. 22). I denne oversikten har gneis UCS = 130 MPa, amfibolitt har UCS = 107 MPa og glimmerskifer har UCS = 71 MPa. Metaarkose er ikke oppført i oversikten. Tabell 9.1 viser UCS-verdier for relevante bergarter i parti 1-7 som er benyttet i ligning 9.4 ved korrelasjon mellom  $V_p$  og Q. I partier der det fra forundersøkelsene var antatt «mulig» glimmerskifer/amfibolitt/metaarkose, er det i samråd med Nilsen (2020) valgt å benytte en redusert verdi av UCS til amfibolitt. UCS er da satt til 100 MPa. Dette begrunnes med at de generelle erfaringene fra driving viser større andel amfibolitt enn glimmerskifer og metaarkose i tunnelene.

**Tabell 9.1: Verdier for trykkstyrke (UCS) som benyttes i ligning 9.4 ved korrelasjon mellom  $V_p$  og Q-verdi i parti 1-7.**

Bergart	UCS [MPa]
Gneis	130
Glimmerskifer/amfibolitt/metaarkose	100

Det må påpekes at det også er benyttet en korrelasjon mellom  $V_p$  og Q-verdi i de ingeniørgeologiske rapportene for konkurransegrunnlag, for å anta hvor stor andel av tunnelene som kunne forventes å drive i de ulike bergmasseklassene (Karlson og Grob, 2018a,b,c). Selve korrelasjonsformelen mellom  $V_p$  og Q som er benyttet der er ikke oppgitt, men tabell 9.2 viser sammenhengen som er vist i rapportene.



Tabellen viser også hvordan rapportenes sammenheng samsvarer med ligning 9.4 som benyttes i masteroppgaven. Legg merke til at lave seismiske hastigheter gir bedre Q-verdier med ligning 9.4 som jeg benytter enn det som er oppgitt i rapportene. Dette påpekes for å vise at det finnes ulike korrelasjonsformler mellom  $V_p$  og Q, og den som benyttes videre i masteroppgaven vil gi noe høyere Q-verdier i diagrammene enn forventet i rapportene når  $V_p < 3500$  m/s.

**Tabell 9.2: Sammenligning av korrelasjon mellom  $V_p$  og Q-verdi som er benyttet i de ingeniørgeologiske rapportene for konkurransegrunnlag (Karlson og Grob, 2018a,b,c) og som jeg benytter i parti 1-7 (ligning 9.4).**

$V_p$ [m/s]	> 4500	4500-4000	4000-3500	3500-3000	3000-2500	< 2500
<b>Q-verdi fra ingeniørgeologiske rapporter</b>	> 10	10-4	4-1	1-0,1	0,1-0,01	< 0,01
<b>Q-verdi fra ligning 9.4*</b>	> 10	10-3,2	3,2-1	1-0,32	0,32-0,1	< 0,1

\* Gitt at UCS = 100 MPa, slik at  $Q = Q_c$ .

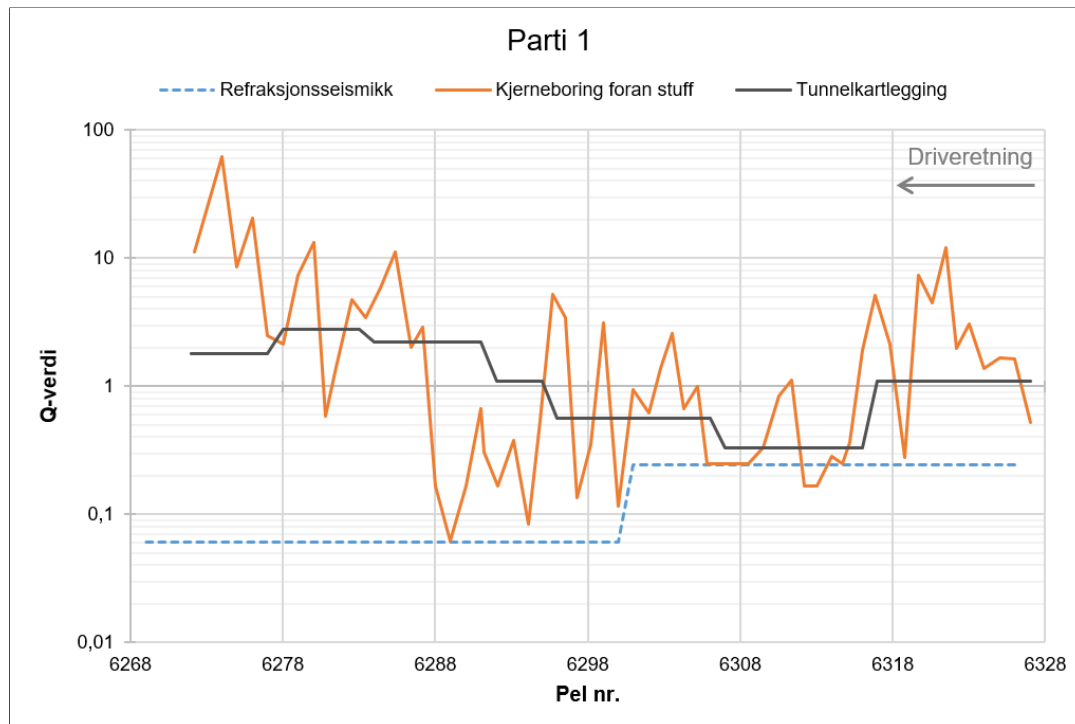
Q-verdier fra utført kjerneboring under driving og kartlegging i tunnelen er fastsatt av ingeniørgeologer og kontrollingeniører ved Nordøyvegen.

Formålet med de følgende diagrammene er få et konkret grunnlag for å vurdere om antatt bergmassekvalitet fra forundersøkelsene stemmer overens med bergmassekvalitet fra ingeniørgeologiske undersøkelser under driving, og dermed kunne diskutere korrelasjonen mellom  $V_p$  og Q-verdi. Det kan også vurderes om undersøkelsene under driving bidrar med supplerende informasjon til forundersøkelsene som stemmer med de virkelige forholdene i partiene. Tunnelkartleggingen anses som den nærmeste «fasiten» på bergmasse- og vannforholdene i tunnelene.

### 9.2.1 Parti 1

Diagrammet i figur 9.2 viser Q-verdier i parti 1 funnet med forskjellige undersøkelsesmetoder. Fra refraksjonsseismikken var det forventet dårlig bergmassekvalitet i form av to etterfølgende svakhetssoner. Den første svakhetssonen, med  $Q = 0,24$ , ble passert med registrerte Q-verdier fra kjerneboring og tunnelkartlegging som stemmer godt overens med refraksjonsseismikken. Vel og merke var denne svakhetssonen smalere enn antatt fra refraksjonsseismikken, så det kan tyde på at sonen smalner mot dypet. Q-verdiene fra kjerneboring har en feilkilde. Parameteren SRF er nemlig satt lik 1 langs hele borhullet, noe som ikke stemmer ut fra hvor oppsprukket noen av kjernene er (Karlson, 2020). I senere kjernelogger er dette tatt i betraktning etter anbefaling fra prosjektets referansegruppe v/Bjørn Nilsen, og verdien til SRF blir da vurdert for hver meter i tillegg til de andre bergmasseparametrene. Dette betyr at kjerneloggen fra pel nr. 6341-6272 viser litt bedre bergmassekvalitet enn virkeligheten der SRF-verdien burde vært satt til 2,5 eller 5. I dårligste tilfellet der  $Q = 0,06$  ville ny verdi med SRF = 5 gitt  $Q = 0,012$ .

Etter passering av første svakhetszone har Q-verdiene kartlagt under driving gradvis økt, og bergmassekvaliteten var ikke så dårlig som refraksjonsseismikkens svakhetszone med  $Q = 0,06$  skulle tilsi. Re-



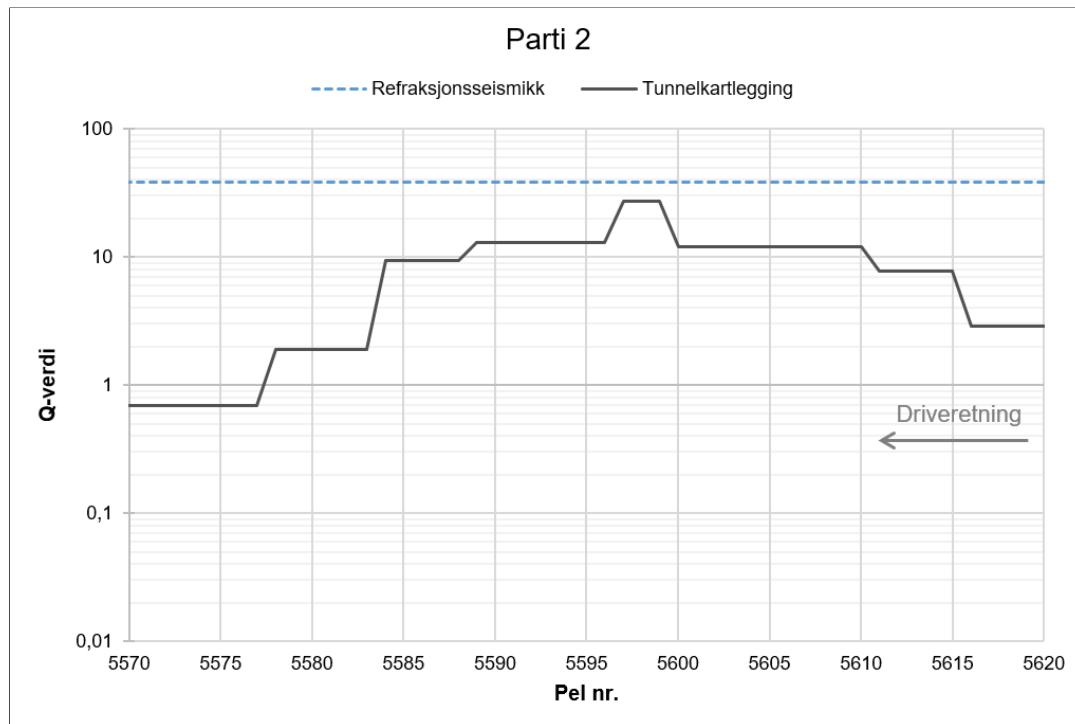
Figur 9.2: Q-verdi langs parti 1, pel nr. 6326-6268 i Haramsfjordtunnelen. Ved beregning av Q-verdi fra kjerneboring foran stuff er det ikke tatt hensyn til SRF, noe som resulterer i bedre fremstilt bergmassekvalitet der SRF burde vært økt.

gistreringer i NP viser at etter parti 1 reduseres kvaliteten til  $Q = 0,38-0,63$  og  $SRF = 2,5$  fra pel nr. 6271-6247. Det er mulig at dette tilsvarer den andre svakhetssonen i parti 1 (2400 m/s-sonen), men med noe bedre kvalitet enn forventet. Feil antatt fallvinkel på sonen er en mulig forklaring på at den kom senere enn forventet. I parti 1 har dermed refraksjonsseismikkens antagelser om plassering av to markerte svakhetssoner stemt godt, men det er indikasjoner på feil fallvinkel for 2400 m/s-sonen.

### 9.2.2 Parti 2

Siden refraksjonsseismikken er basert på de øverste metrene i bergmassen, er den forventede bergmassekvaliteten i figur 9.3 også basert på dette. Som presentert i kapittel 7, ble  $V_p$  i parti 2 antatt å tilhøre bergarten gneis. Under driving viste det seg at parti 2 bestod av en olivingabbro med mikrogranater. Siden olivingabbroen har veldig høy densitet ( $3,44 \text{ g/cm}^3$ ), burde den gitt høyere seismisk hastighet dersom den nådde opp til sjøbunnen. Det er derfor sannsynlig at olivingabbroen er en linse i gneisen som ikke når opp til sjøbunnen, slik at det ikke er mulig å registrere den med refraksjonsseismikk (Mørk, 2020). Dette medfører at de presenterte Q-verdiene fra refraksjonsseismikk og tunnelkartlegging langs parti 2 i figur 9.3 ikke gjelder for samme bergart. Det vurderes derfor som urimelig å sammenligne de to grafene.

Dersom linsen med olivingabbro hadde nådd opp til sjøbunnen og blitt registrert av refraksjonsseismikken, kan det antas at tolket seismisk hastighet ville vært  $V_p = 6200-6700 \text{ m/s}$ , basert på NGU (2020c) sine verdier for gabbro. Ved å benytte  $V_p = 6,2 \text{ km/s}$  og  $UCS = 248 \text{ MPa}$  (Nilsen og Palmstrøm, 2000, s.



Figur 9.3: Q-verdier langs parti 2, pel nr. 5620-5569 i Haramsfjordtunnelen. Grafene representerer Q-verdier til to forskjellige bergarter, gneis (fra refraksjonsseismikken) og olivingabbro (fra tunnelkartleggingen). Det anses dermed som urimelig å sammenligne grafene.

22, verdi for gabbro) i korrelasjonsformelen i ligning 9.4, blir forventet bergmassekvalitet fra seismikken  $Q = 202$ . Dette er en mye høyere verdi enn det tunnelkartleggingen viser. Siden olivingabbroen er en omdannet gabbro, kan det dermed være mer rimelig å anta at  $V_p = 6,0$  km/s, som tilsvarer omtrentlig hastighet i metagabbroen på Hestøya (Karlson, 2020). Gitt at UCS er uendret blir  $Q = 128$ , som fortsatt er mye høyere enn bergmassekvaliteten i tunnelen. På bakgrunn av dette vurderes korrelasjonsformelen mellom  $V_p$  og  $Q$  (ligning 9.4) til å stemme dårlig for olivingabbro.

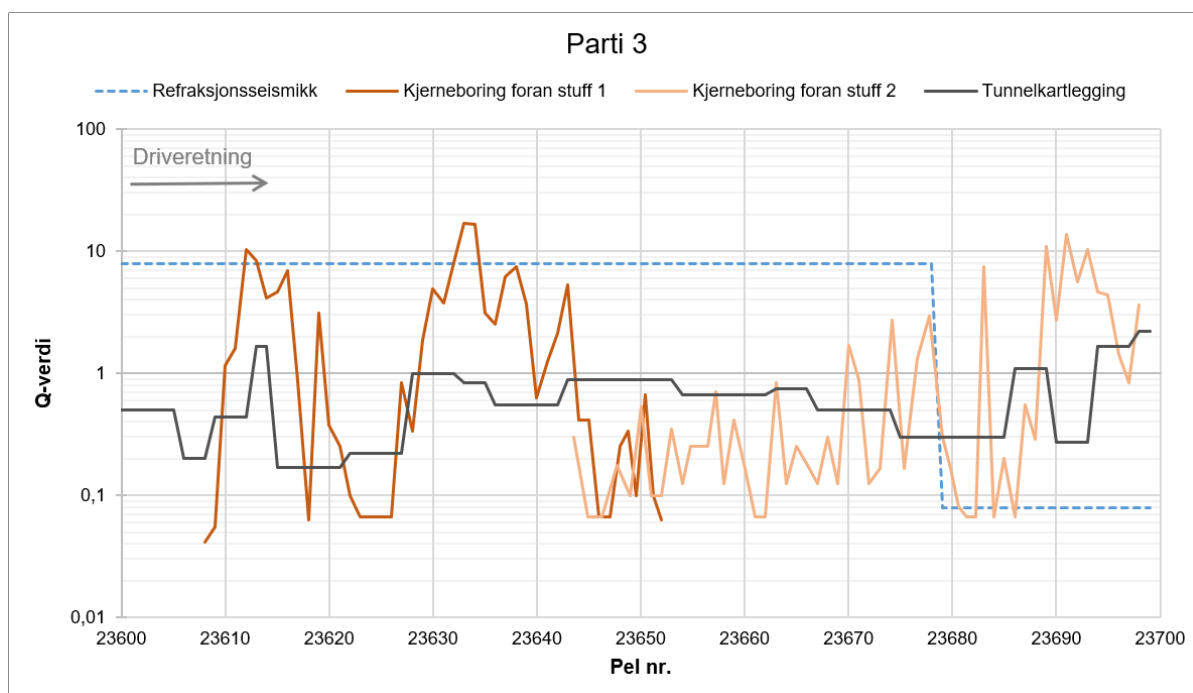
### 9.2.3 Parti 3

Figur 9.4 viser Q-verdier fra ulike undersøkelsesmetoder langs parti 3.

#### *Mulige forklaringer på dårlig korrelasjon mellom $V_p$ og $Q$*

Korrelasjon mellom  $V_p$  og  $Q$  har gitt feil tolkning av bergmasseforholdene, siden det bare var forventet dårlig bergmassekvalitet siste 21 m av partiet. Følgende diskuteres mulige forklaringer.

Av de utvalgte partiene, skiller parti 3 seg ut ved å ha størst bergoverdekning (80-110 m) samt det nesten 500 m høye fjellet «Skulen» like ved. Refraksjonsseismiske målinger baserer seg på de øverste metrene i bergmassen, og forholdene på tunnelnivå tolkes ut fra dette. Ved større bergoverdekning er det mer geologi som kan forandre seg med dybden. Dette har allerede vist seg gjeldende for parti 3, der tolket sone med glimmerskifer/amfibolitt/metaarkose i dagen ikke forekom i like stor grad som forventet fra feltkartleggingen. Forskjellige bergartstyper vil påvirke  $V_p$  i bergmassen ulikt ved at de i utgangspunktet har ulike egenskaper. Dette synes likevel ikke å være en god nok forklaring alene på



Figur 9.4: Q-verdier langs parti 3, pel nr. 23600-23700 i Nogvafjordtunnelen.

den dårlige korrelasjonen. Når det gjelder bergmassekvalitet og dybde, er det rimelig å forvente at Q-verdien vil øke med økende overdekning siden dette gir bedre innspenning av eksisterende sprekkesett. Gitt at korrelasjonsformelen stemmer, ser det heller ut til at det motsatte har skjedd i parti 3.

Under befaring til parti 3 ble det observert tydelig horisontal foliasjon i gneisen ved pel nr. 23654. Dersom denne lagdelingen fortsetter oppover mot dagen, er forventet seismisk hastighet basert på refraksjonsseismiske målinger i bergmasse med horisontal foliasjon. Seismisk hastighet påvirkes av anisotropi, ved at  $V_p$  er større langs en lagdeling enn på tvers av den (Barton, 2002). Når lagdelingen er flat vil lydbølgene også gå i denne retningen ved refraksjonsseismikk (Nilsen, 2020), og følgelig tolkes  $V_p$  til å være noe høyere. Fra forundersøkelsene er det kartlagt foliasjon med steilt fall på Flemsøya/Skuløya (se F1 i tabell 4.4). Foliasjonen er derimot ikke kartlagt rett over parti 3 på grunn av 20 m løsmassedecke, men den er antatt å følge F1. Dette kan ha medført at seismikken har vist noe bedre forhold enn reelt, siden den horisontale foliasjonen ikke var kjent og da heller ikke kunne bli tatt høyde for under tolkningen.

Dersom det forekommer høye tektoniske horisontale spenninger over parti 3 som følge av «ridge push», kan det også ha påvirket tolket  $V_p$  til å være bedre enn i virkeligheten.

Problemet i parti 3 er ikke at seismikken har oversett en tydelig svakhetszone, men at generelt dårlig bergmasse er tolket til å være bedre enn den er. Kombinert med høy innlekkasje har det resultert i lave kartlagte Q-verdier. Jeg vurderer den beste forklaringen på uoverensstemmelsen til å være feiltolkning av seismikken på grunn av ukjent horisontal foliasjon og til dels usikre bergartstyper, i kombinasjon med mulighet for høye horisontale spenninger som kan ha gitt innspenningseffekt. I tillegg vil ikke

---

seismikken nødvendigvis avsløre vannforholdene, som i dette tilfellet har bidratt til redusert kartlagt bergmassekvalitet i parti 3 ved å redusere  $J_w$ .

#### *Høyere Q-verdi fra kjerneboring foran stuff enn tunnelkartlegging*

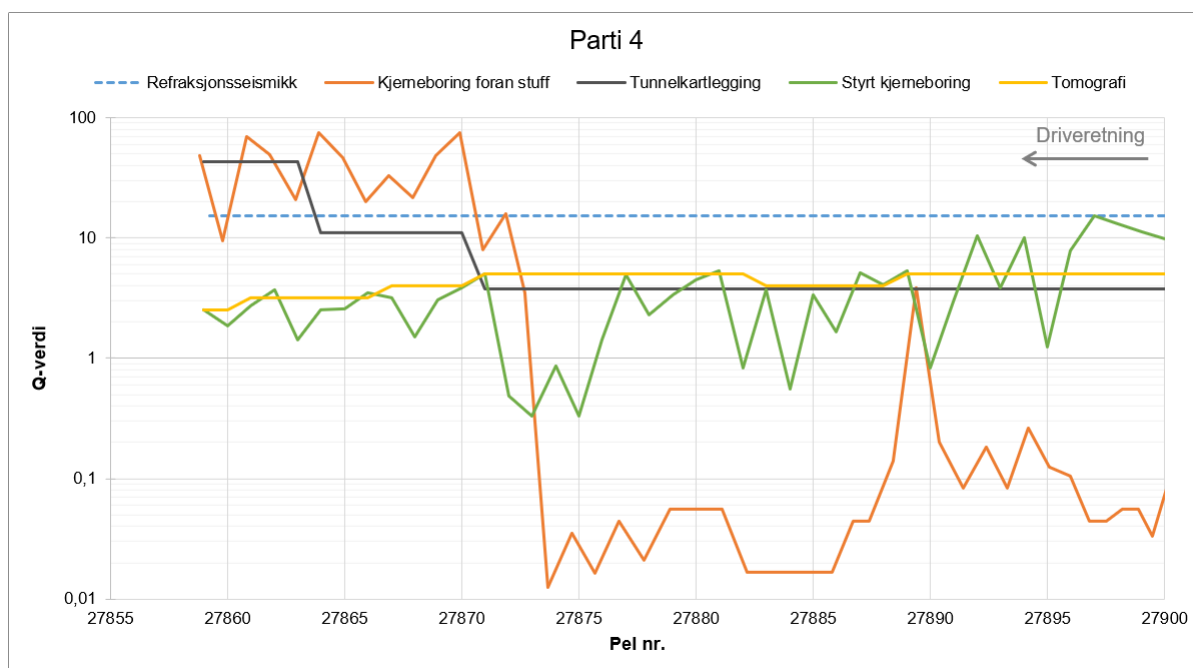
I parti 3 er det tre soner som utpeker seg der kjerneboring har gitt høyere bergmassekvalitet enn tunnelkartlegging over flere meter: Pel nr. 23611-23616, 23630-23639 og 23689-23695. Det kan nesten se ut som at kjerneboringen har gitt «misvisende» indikasjoner på forholdene ved at de har blitt tolket mye bedre enn virkeligheten. Generelt viser den store variasjonen i Q-verdi innad i grafene for kjerneboring at boringen er et nålestikk i stoffen som bare representerer forholdene i ett punkt. I de nevnte sonene der det er logget relativt god kvalitet, kan noe av forklaringen være at  $J_w$  er satt til 1, da det ikke er mulig å gi noe estimat på sprekkevannstallet under kjerneboring.  $J_w = 1$  indikerer «tørre bergrom eller mindre innsig (fuktig eller noen få drypp)» (NGI, 2015, s. 52), men i virkeligheten har store innlekkasje-problemer resultert i omfattende forinjeksjon. Injiseringen har heller ikke vært helt vellykket, slik at en mer reell verdi for sprekkevannstallet i tunnelen vil være  $J_w = 0,66$  «middels innsig, av og til utvasking av sprekkefyllinger (mange drypp/regn)» (NGI, 2015, s. 52).

#### *Effekt av forinjeksjon?*

Det er som nevnt utført omfattende forinjeksjon i hele parti 3. På grunn av veldig få forekomster med leirbelegg på sprekke, er det teoretisk mulig at injiseringen har hatt en positiv innvirkning på Q-verdien. I praksis er det vanskelig å si om dette har skjedd, siden Q-verdiene fra tunnelkartleggingen ikke er så mye bedre enn Q-verdiene fra de to kjerneboringene i figur 9.4. Forinjeksjonen har heller ikke vært så vellykket som ønskelig, noe som trolig har minimert muligheten til forbedring av bergmassekvalitet ved forinjeksjon. Likevel skiller pel nr. 23645-23669 seg ut ved at tunnelkartleggingen har gitt jevnt bedre Q-verdi enn kjerneboringen, så selv om det er usikkert kan det være mulig at forinjeksjonen har hatt positiv innvirkning på bergmassekvaliteten her.

#### **9.2.4 Parti 4**

Av de utvalgte partiene er det utført flest undersøkelser i parti 4, noe som resulterer i flere interessante momenter som kan diskuteres. Q-verdier langs partiet er vist i figur 9.5. Det er tydelig at utført korrelasjon mellom  $V_p$  og Q ikke har gitt en riktig tolkning av de virkelige bergmasseforholdene i mesteparten av parti 4. Mulige forklaringer på dette diskuteres i følgende avsnitt. Både retningsstyrt kjerneboring og kjerneboring foran stuff viser at det forekommer bergmasse med til dels mye dårligere kvalitet enn tunnelkartleggingen. Seismisk tomografi er ansett som en metode som gir bedre og mer detaljerte tolkninger enn vanlig refraksjonsseismikk ved heterogene forhold (NGU, 2020d). Det ser også ut til å være tilfellet i store deler av parti 4. Sammenlignet med tunnelkartleggingen, har tomografien vist seg å stemme bra ved pel nr. 27900-27871.



Figur 9.5: Q-verdier langs parti 4, pel nr. 27900-27858 i Nøgvafjordtunnelen.

#### *Mulige forklaringer på dårlig korrelasjon mellom $V_p$ og $Q$*

Av de fire opplistede faktorene som ble nevnt i avsnitt 9.1.1, omhandler de tre første bergarten og dens mekaniske egenskaper og struktur. Verken kjerneboring eller tunnelkartlegging viser noen endring i bergartstype i parti 4. Den samme bergarten opptrer gjennom både hele kjernehullet og tunnelprofilet, og det er ingen grunn til å anta at dens trykkstyrke eller anisotropi endrer seg betraktelig gjennom partiet. Det samme gjelder for den fjerde faktoren, vinkelen mellom største hovedspenning og seismisk registreringsretning.

I kjerneloggen fra styrt kjerneboring ble svakhetssonens kerne beskrevet som en hardpakket leirsone (Norconsult, 2012). Høy konsolideringsgrad vil dempe lydbølgene mindre og gi høyere seismisk hastighet, og tilsynelatende bedre forhold. Dette kan være en forklaring på hvorfor tomografien på tunnelnivå har vist høyere  $Q$ -verdi enn kjerneboringene. Ved kjernelogging vil leirforekomster redusere  $Q$ -verdien kraftig, mens seismikken ikke kan avsløre hva en eventuell lavhastighetszone består av. Forklaringen gjelder ikke for refraksjonsseismikken, siden det er lite sannsynlig at en eventuell leirsone har vært veldig hardpakket i de øverste delene av bergmassen.

Under refraksjonsseismikken i Nordkapptunnelen ble dårlige horisontale lagpakker kamouflert under gode lag (jf. avsnitt 9.1.3). Basert på denne erfaringen, er det mulig at den dårlige sonen i parti 4 har blitt kamouflert av et bedre overliggende lag. Anisotropi i bergmassen vil ha større innvirkning på  $V_p$  enn på sikringsklasse (Nilsen, 2020). Det betyr at ved sterkt anisotrope forhold kan tolket  $V_p$  bli høyere dersom anisotropien ikke er kjent og kan bli tatt høyde for, mens kartlagt  $Q$ -verdi og tilhørende sikringsklasse ikke nødvendigvis påvirkes til det bedre av anisotropien.

---

Det må også poengteres at korrelasjonsformelen som er benyttet (ligning 9.4) er empirisk. Dette gir en usikkerhet til Q-verdiene fra refraksjonsseismikken, og kan også være årsaken til at de stemmer dårlig med bergmassekvaliteten fra de andre undersøkelsene. På den andre siden er samme korrelasjonsformel også benyttet for den seismiske tomografien, og denne korrelasjonen ser ut til å stemme godt der refraksjonsseismikken ikke stemmer. Et siste punkt er at tunnelkartleggingen har gitt klart høyere Q-verdier enn kjerneboringene, spesielt i forhold til kjerneboringen foran stuff. Den dårlige sonen var altså ikke så dårlig som kjerneboringene tilsa, og dermed var ikke refraksjonsseismikken like feilaktig som først antatt basert på kjerneboringenes Q-verdier.

#### *Retningsstyrt kjerneboring vs. kjerneboring foran stuff*

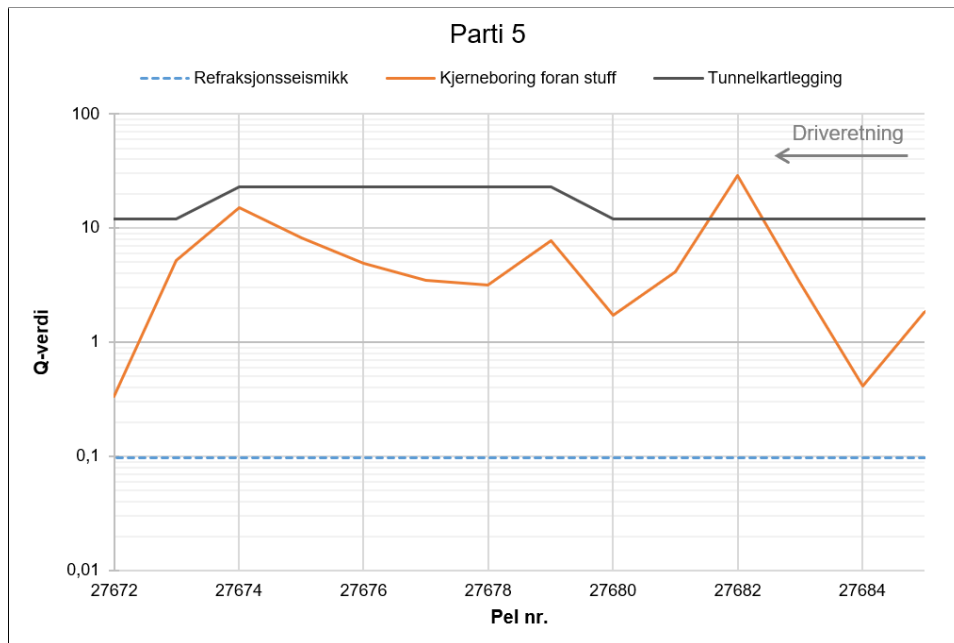
Noe annet som er verdt å merke seg i parti 4, er forskjellen i antatt bergmassekvalitet fra styrt kjerneboring og kjerneboring foran stuff. Styrt kjerneboring har gitt betydelig høyere Q-verdier ved pel nr. 27900-27874. En av grunnene til det er at Norconsult (2012) bare bestemte fire av de seks bergmasseparametrene da de logget kjernene, siden  $J_w$  og SRF er vanskelige parametre å bestemme ved å observere kjerner (NGI, 2015). RQD,  $J_n$ ,  $J_r$  og  $J_a$  er bergmasseparametrene som ble fastsatt. For å presentere Q-verdier fra styrt kjerneboring, har jeg valgt å sette  $J_w$  og SRF lik 1 ved beregning av Q, noe som er en forenkling. Dette kan resultere i et for positivt inntrykk av bergmassen.

Byggherren, derimot, tok hensyn til SRF ved kjerneboring under driving. Ved å sette SRF = 2,5-5, ville grafen for styrt kjerneboring (grønn graf) fått lavere Q-verdier. Likevel ville den ikke blitt like lav som grafen for kjerneboring foran stuff (oransje graf). Dette viser at kjerneboringer er nålestikk i tunnelprofilet som kan treffe på forskjellige forhold bare innen noen få meters avstand. Grønn og oransje graf med Q-verdier fra kjerneboringer viser dermed noe av variasjonen i bergmassekvaliteten innad i tunnelprofilet. Det må også påpekes at kjerneboring er subjektivt, og sammen med ulikt erfaringsnivå kan dette medføre noe variasjon i observasjoner og vurderinger under loggingen.

#### **9.2.5 Parti 5**

Figur 9.6 viser diagram med fordeling av Q-verdier i parti 5. Her var det fra refraksjonsseismikken forventet en svakhetssone med  $Q = 0,1$ . Både kjerneboring foran stuff og tunnelkartlegging viser at bergmassekvaliteten i partiet er god, med høyest Q-verdier for tunnelkartleggingen og noe lavere og mer varierende for kjerneboringen.

Fra forundersøkelsene ble det påpekt at orienteringen til tolkede svakhetssoner er usikker, særlig i sjøen. Sonen i parti 5 ble tolket på to seismiske profiler. Dette burde øke sannsynligheten for at antatt plassering er riktig, og at bare fallvinkelen er feil siden sonen ikke forekommer i parti 5. Men tunnelkartleggingen har vist at det ikke forekommer noen lavhastighetssone verken før eller etter parti 5. Det ser altså ut til at sonen ikke eksisterer, og det antas at de seismiske målingene er feiltolket. Dersom det er en skrent over parti 5 som ikke er tilstrekkelig kartlagt med akustikken, kan en mulig forklaring være kabelheng. Da vil refraksjonsseismikken tolke en lavhastighetssone under kabelhenget som egentlig ikke finnes.



Figur 9.6: Q-verdier langs parti 5, pel nr. 27685-27672 i Nogvafjordtunnelen.

Det samme kan skje dersom det er en skarp depresjon i fjelloverflaten (jf. avsnitt 4.2.2).

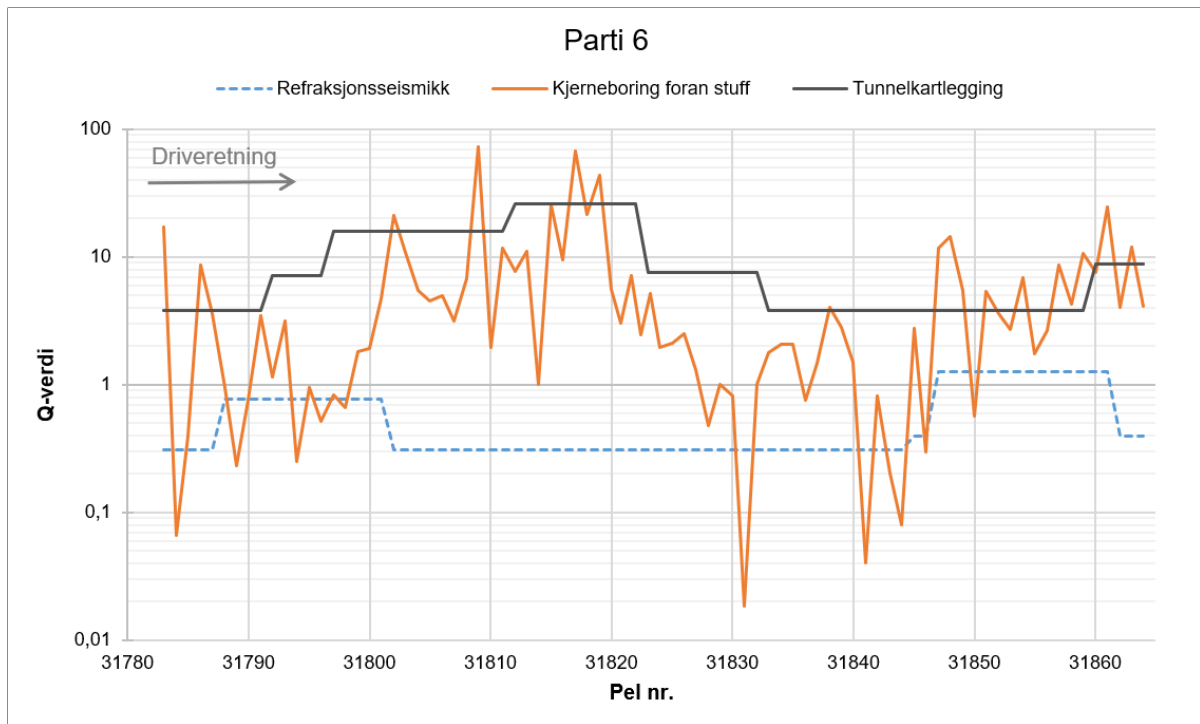
### 9.2.6 Parti 6

Refraksjonsseismikken tolket svakhetssoner med  $Q = 0,3-1,3$  i parti 6, se figur 9.7. Sonene med best kvalitet antas å være tversgående, mens sonene med dårligst kvalitet antas å være langsgående. Seismikkens Q-verdi er lavere enn den virkelige bergmassekvaliteten som tunnelkartleggingen viser. Som nevnt i avsnitt 7.7.1, kan svakhetssonene i parti 6 ha sammenheng med en sideforkastning av MTF. Dette kan medføre lavere horisontalspenninger enn normalt og følgelig mindre innspenning, slik at  $V_p$  reduseres. Kjerneboring foran stuff har gitt noen usammenhengende metere med lavere Q-verdier enn seismikken, men stort sett er Q-verdien høyere i kjernene. De to dårligere sonene fra kjerneboringen, ved pel nr. 31784-31800 og pel nr. 31828-31846, kan ha sammenheng med de antatte tversgående svakhetssonene. Fallvinkelen ser i så fall ut til å være litt større enn antatt siden dårligere soner ble truffet litt før forventet (jf. figur 7.6). Disse to sonene hadde likevel ikke like dårlig kvalitet som seismikken antok, da tunnelkartleggingen ikke har gitt Q-verdier som tilsvarer svakhetssoner og SRF er satt lik 1 (se avsnitt 8.6.2). Ved nevnte pel nr. har likevel bergmassekvaliteten vært så lav som  $Q = 3,8$ , hovedsaklig på grunn av talk som sprekkebelegg som gir  $J_a = 4$ .

Den langsgående lavhastighetssonen ( $Q = 0,3$ ) ser ikke ut til å ha påvirket bergmassekvaliteten i tunnelen. Det antas dermed at denne sonen har hatt en annen fallvinkel enn forventet slik at den ikke har truffet tunneltraséen.

Ved pel nr. 31797-31821 er det utført forinjeksjon. Her er også Q-verdien fra tunnelkartleggingen vesentlig bedre enn områdene som ikke er injisert. Det er vanskelig å si om forinjeksjonen kan ha forbedret Q-parametrene i noen grad, siden trenden til Q-verdiene fra kjerneboring foran stuff også ser ut til å øke





Figur 9.7: Q-verdier langs parti 6, pel nr. 31783-31865 i Fjørtoftfjordtunnelen.

i dette området. Generelt ser det ut til å være god sammenheng mellom trenden til kjernesens Q-verdi og kartlagt bergmassekvalitet, ved at Q-verdien først øker, deretter synker og til slutt øker noe igjen.

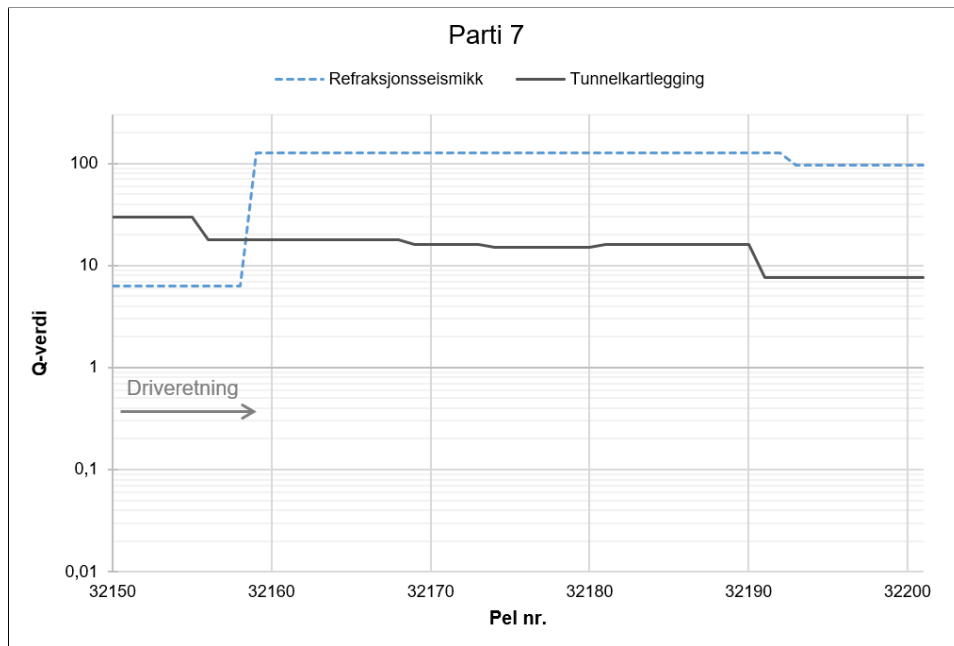
### 9.2.7 Parti 7

Q-verdier langs parti 7 er vist i figur 9.8. I mesteparten av partiet har bergmassekvaliteten vært dårligere enn det korrelasjonen mellom seismikkens  $V_p$  og Q tilsier. Likevel er fjellkvaliteten god, med  $Q = 8-30$ . Fra refraksjonsseismikken er  $Q = 126$  i store deler av partiet. Tunnelkartlegging gir sjelden  $Q > 100$ , da bergmasse- og vannforholdene må være veldig gode for at kontrollingeniør skal gi bergmasseparametrene «ekstremt» høye verdier (Nilsen, 2020). For parti 7 antas det derfor at dårlig samstemming mellom Q-verdiene fra refraksjonsseismikk og tunnelkartlegging kommer av at benyttet korrelasjonsformel (ligning 9.4) ikke stemmer for denne bergmassen, som viste seg å bestå av en blanding av grønnstein, amfibolitt, talk, kleberstein, kalsitt og kvarts (jf. avsnitt 8.7.2).

## 9.3 Vannforhold under driving

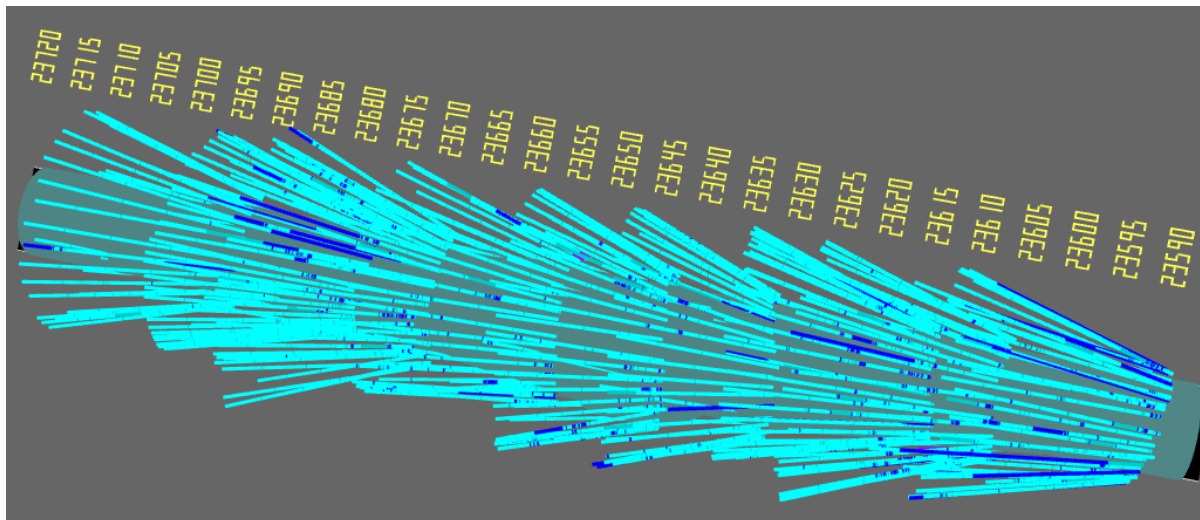
Vannforhold i tunnelene har ikke vært en hoveddel av masteroppgaven. Hovedsaklig har det blitt sett på forhold som angår stabilitet og sikringsbehov basert på bergmassekvalitet. I grunnlagsmaterialet som er gjennomgått finnes det også endel data som gir grunnlag for å si noe om innlekkasje, så det anses derfor som naturlig å diskutere litt mer rundt hva utførte undersøkelser under driving har gitt med tanke på prediksjon av vannforhold foran stuff.

MWD gir borparametertolkningen «tolket vann» i borhullene foran stuff. Som nevnt innledningsvis til



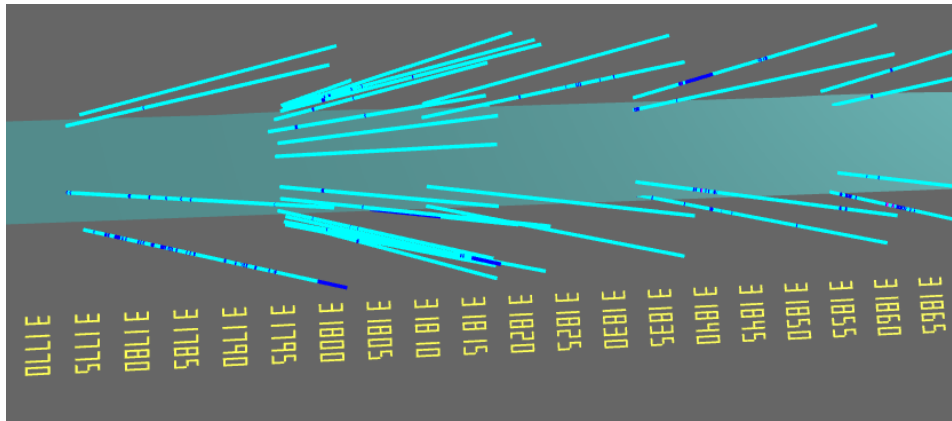
Figur 9.8: Q-verdier langs parti 7, pel nr. 32150-32202 i Fjørtoftfjordtunnelen.

kapittel 8, valgte jeg bare å se på «tolket hardhet» i parti 1-7. Vannforhold fra MWD har erfaringsmessig stemt dårlig, og blir derfor ikke benyttet under driving ved Nordøyvegen (Møre og Romsdal fylkeskommune, 2020e). Følgende skal jeg likevel se på de tolkede vannforholdene i parti 3 og parti 6, som er de to utvalgte partiene der forinjeksjon har blitt utført. Basert på det kan jeg gjøre min egen vurdering av hvilken nytteverdi MWD kan ha med tanke på tolkede vannforhold under driving.



Tolket vann		
Bekrivelse	Verdi	Farge
Ikke vannforstyrrelse	5.000	
Noe vannforstyrrelse	8.000	
Vannforstyrrelse	25.000	
Store vannforstyrrelser	100.000	

Figur 9.9: «Tolket vann» i parti 3, Nøgvafjordtunnelen (Bever Control AS, 2020).



Figur 9.10: «Tolket vann» i parti 6, Fjørtoftfjordtunnelen (Bever Control AS, 2020). Samme fargeskala som i figur 9.9 gjelder.

- «Tolket vann» i langhullene i parti 3 er vist i figur 9.9. Mange hull har vannforstyrrelse (mørk blå farge), men borparametertolkningen gir ikke noe mål på hvor stor innlekkasjen er. Siden sonderhullene går i ett med injeksjonshullene, er det vanskelig å vurdere hvordan de tolkede vannforholdene i sonderhullene er i forhold til den målte innlekkasjen etter utført boring.
- Figur 9.10 viser «tolket vann» i langhullene i parti 6. På bakgrunn av total innlekkasje på 18 l/min i sonderboringen ved pel nr. 31797, ble det utført en runde med forinjeksjon. Borparametertolkningen i figuren viser ikke noen indikasjon på at det er mer vannforstyrrelse i hullene i injeksjonsskjermen enn i resten av sonderhullene i partiet, heller tvert imot. Første sonderboring har ett hull med tydelige vannforstyrrelser ifølge borparametertolkningen, men tunnelbas opplevde tørre forhold her ifølge sonderboringens rapporten (se avsnitt 8.6.2).

Basert på disse to partiene, er det tydelig at MWD-tolkninger kan gi indikasjoner på at enkelte partier har større innlekkasje enn andre, men det ser ikke nødvendigvis ut til å stemme med innlekkasjen som måles etter sonderboringene. Jeg har også sett på tolkede vannforhold i sonderhull i de resterende partiene. Blant disse finnes det mange tilfeller der det på bakgrunn av MWD er tolket vannforstyrrelser, men i tilhørende sonderboringens rapporter beskrives hullene som tørre. Noe av forklaringen på feil borparametertolkning kan være at borevannet kan virke forstyrrende på de naturlige vannforholdene i bergmassen. Det er derfor veldig forståelig at kontrollingeniørene ikke benytter seg av denne borparametertolkningen under driving.

På bakgrunn av utførte analyser av undersøkelser i parti 1-7, er systematisk slaghammerboring den klart beste metoden for å registrere vannforholdene foran stoff. Da måles konkrete tall på mengde innlekkasje for hvert sonderhull etter boring. Likevel er det viktig å være klar over at sonderhullene kan unngå å treffe de vannbærende kanalene i bergmassen, samt at vannforholdene kan endre seg med tiden. Dette fikk store konsekvenser under driving av Atlanterhavstunnelen, ved at innlekkasjen økte med tiden slik at utført forinjeksjon ikke var tilstrekkelig for å unngå rasutvikling på stoff i dårlig bergmasse (Statens vegvesen, 2010b). I parti 1-7 ved Nordøyvegen har det ikke vært noen tilfeller der innlekkasjen fra son-

---

derhullene har vist slike feilaktige forhold. I parti 3 var det vel og merke problemer med å forinjisere tilstrekkelig, men dette hadde hovedsaklig sin årsak i hvilket injeksjonsmiddel som ble benyttet og at injeksjonsriggen var gammel og utslitt (Møre og Romsdal fylkeskommune, 2020e). Vann i berg er komplekst og omtrent umulig å forutsi. Vannet følge kanaler i bergmassen, og forholdene kan variere over korte avstander avhengig av dette. Tunnelen kan være «uheldig» å treffe større vannkanaler, eller «heldig» å unngå dem. Dette kan ikke planlegges på forhånd. Derfor er den systematiske sonderboringen veldig nyttig ved at innlekkasjen måles og tiltak kan iverksettes før det drives videre.

Et annet poeng er at sonderboringen er en relativt rask undersøkelse. Dermed får ikke vannet like god tid til å strømme gjennom bergmassen til borhullet som ved kjerneboring foran stuff. Ifølge Karlson (2020) medfører dette at kjerneboring gir et mer realistisk mål på innlekkasjen enn vanlig sonderboring. Men kjerneboring utføres bare i ett punkt i stoffen, så da er sannsynligheten for å unngå å treffe vannbærende kanaler enda større. Sammenstilling av målt innlekkasje fra kjernehull og sonderhull kan da være nyttig for å få et bedre bilde av vannforholdene foran stuff.

#### **9.4 Vurdering av alternative undersøkelser under driving**

Kunne noen andre ingeniørgeologiske undersøkelser blitt utført under driving i parti 1-7, enten i stedet for eller som supplement til metodene som er beskrevet i de foregående kapitlene? Særlig i parti 2 og parti 3 har entreprenøren opplevd driveforhold som har redusert inndriften betydelig, ved at bergmasseforholdene har stemt veldig dårlig overens med antatte forhold fra forundersøkelsene. I slike partier blir det ekstra viktig å utføre undersøkelser under driving som gir bedre forutsigbarhet angående hvor lenge de dårlige forholdene kan vare.

Lengden på en kjerneboring foran stuff ved Nordøyvegen er som oftest 50-150 m lang. Den geofysiske metoden TSP (refleksjonsseismikk) hadde i den undersjøiske tunnelen Xiang'an-tunnelen i Kina et prediksjonsområde på 50-300 m foran stuff (Shi *et al.*, 2016). Dette vil avhenge av bergmassens oppsprekking. I parti 3 antas det at prediksjonsområdet ville blitt mindre enn kjerneboringens på grunn av sterkt oppsprukket bergmasse. I parti 2 kunne prediksjonsområdet derimot blitt større siden fjellet er hardt og grovblokkete. TSP ville da gitt en rask tolkning av hvor lenge det kunne forventes å drive gjennom olivingabbroen, siden den har så distinkte egenskaper i forhold til den vanlige gneisen. På den andre siden kreves det utstyr til TSP, opplæring og tolkningskompetanse, noe som anses som lite hensiktsmessig å investere i underveis i drivingen. Samtidig er tunneltraséen bestemt og skal drives uansett, og ekstra undersøkelser med TSP vil ikke gjøre selve drivingen noe enklere. Det kunne likevel vært interessant å teste ut hvordan TSP hadde stemt opp mot sonderboring m/MWD og kartlegging på stuff i parti 2.

I parti 3 ble det anbefalt av Nilsen (2020) å studere lineamentskart og flybilder på nytt. Dette ble gjort under forprosjektet (jf. avsnitt 4.1), men kan være nyttig å gjenta under drivingen. Man har da en konkret problemstilling å fokusere på ved at bergmasse- og vannforholdene i tunnelen er observert. Studie av

---

kart kan på dette tidspunktet tilføre flere detaljer til den geologiske modellen. Strukturer på kartene kan sammenlignes med kartlagte strukturer i tunnelen. Basert på dette kan det vurderes om det finnes en sammenheng som kan benyttes for å forutsi forholdene videre.

## 9.5 Kommentar til undersøkelsesomfang

Det høye undersøkelsesomfanget langs Nordøyvegen har sin bakgrunn i kravene for å kunne drive tunnel med bergoverdekning < 40 m. Godkjent fravik for mindre bergoverdekning ble redusert fra 50 m til 40 m på bakgrunn av at det ble utført omfattende forundersøkelser som kunne gi et relativt sikkert bilde av bergoverflaten (jf. avsnitt 5.2). I parti 4 har slike omfattende forundersøkelser blitt utført. Til tross for at tunnelkartleggingen ikke avdekte noen tydelig svakhetsone i partiet, var det høye undersøkelsesomfanget likevel nødvendig for å redusere risikoen under driving. Driving gjennom svakhetssoner med potensielt ustabil materiale kan få store konsekvenser når det ikke er forventet, spesielt ved liten bergoverdekning. Dette gjør også at kravene til kjerneboring foran stoff ved bergoverdekning < 40 m og/eller ved  $V_p \leq 3000$  m/s, samt intensivt sonderboring inn mot forventede svakhetssoner, vurderes som gode tiltak som har redusert risikoen så langt i tunneldrivingen.

## 9.6 Observerte generelle trender

Diskusjoner i avsnitt 9.2 er basert på sammenstilling av observasjoner for hvert enkelt parti. I det følgende kommer en overordnet diskusjon over generelle trender basert på det jeg har observert i alle partiene gjennom masteroppgaven.

### 9.6.1 Kjerneboring foran stoff vs. tunnelkartlegging

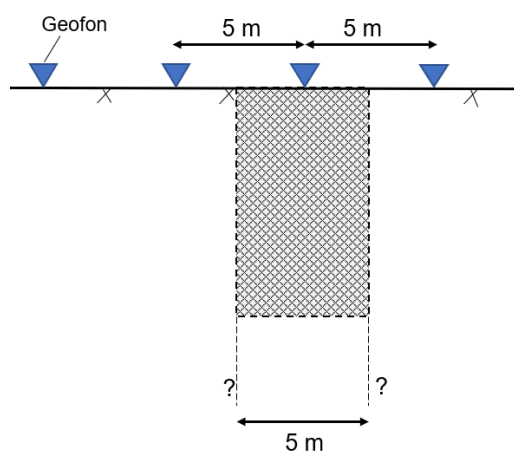
I mesteparten av partiene der kjerneboring er utført under driving, svinger Q-verdiene fra kjerneboringen rundt Q-verdiene fra tunnelkartleggingen. Generelt gir kjerneboringene foran stoff noe dårligere bergmassekvalitet enn tunnelkartleggingen. Dette stemmer bra med erfaringer fra Karlson (2020), som begrunner det med at bergmassen er mindre innspent i kjernene enn i tunnelprofilen. Da sprekker kjernene lettere opp og RQD reduseres.

En annen grunn til at tunnelkartleggingen ofte viser bedre bergmassekvalitet enn forventet fra kjerneboringene, er at en Q-verdi fra kartleggingen har tatt hele tunnelprofilen i betraktning. Kontrollingeniørene registrerer det som vil påvirke totalstabiliteten i tunnelen under «byggherrens halvtime». Ved kjerneboring bestemmes alltid bergmasseparametrene ut fra sprekkeplanet med minst gunstige forhold, og som potensielt kan påvirke stabiliteten mest negativt. Men det er ikke sikkert at forholdene på dette sprekkeplanet vil påvirke totalstabiliteten i tunnelen, siden det vil avhenge av hvordan disse «minst gunstige forholdene» forekommer i hele tunnelprofilen. Dermed kan det tenkes at Q-verdiene fra kjerneboringen i større grad gjenspeiler variasjonen innad i tunnelprofilen. Dersom borhullet har truffet noe av den dårligste bergmassen i profilen, representerer Q-verdien «worst case». Om de loggede bergmasseforholdene fra kjernene gjelder for hele tunnelprofilen og totalstabiliteten, blir ikke avslørt før kartlegging på stoff

utføres. Dette er parti 4 et godt eksempel på. Kjerneboringen må her ha truffet en dårligere sone som ikke påvirket totalstabiliteten like mye som fryktet, ved at det er vesentlig forskjell mellom Q-verdiene ved pel nr. 27900-27873 (jf. figur 9.5). Dette skjer særlig dersom den dårligere sonen har liten vinkel til tunnelaksen, slik at den følger tunnelen en lengre strekning enn om den hadde gått på tvers av tunnelen.

### 9.6.2 Ulik grad av variasjon i bergmassekvalitet

Diagrammene med Q-verdier i parti 1-7 viser hvordan ulike undersøkelser presenterer ulik grad av variasjon i bergmassekvalitet. Refraksjonsseismikkens Q-verdier viser minst variasjon siden de er beregnet fra  $V_p$ , som igjen er beregnet som et gjennomsnitt av  $V_p$  mellom geofonene (Nilsen, 2020). Benyttet geofonavstand ved refraksjonsseismikken langs Nordøyvegen er 5 m (Geomap, 2011). Dersom en geofon for eksempel er plassert rett over en 5 m bred svakhetszone, vil sonen deles opp og bli med i et gjennomsnitt av  $V_p$  mellom geofonene. Se illustrasjon i figur 9.11. På denne måten vil også variasjoner i bergmassekvaliteten jevnes ut.



Figur 9.11: Illustrasjon som viser geofon plassert rett over en 5 m bred svakhetszone.

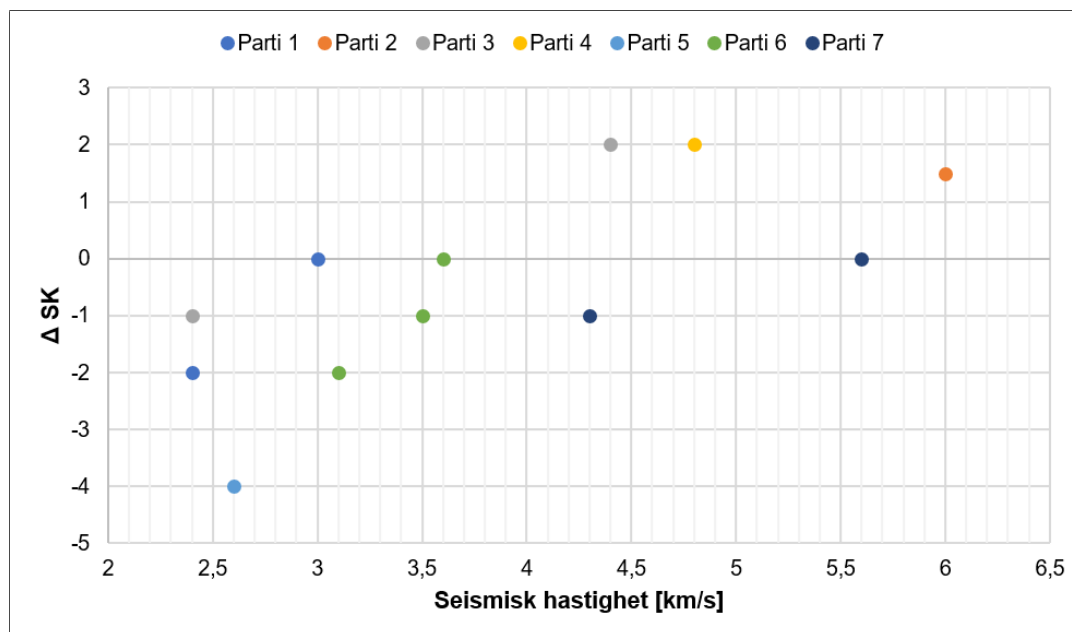
Utførte kjerneboringer i de utvalgte partiene viser derimot stor variasjon i bergmassekvalitet over korte avstander. Dette kommer av at Q-verdien fastsettes for hver meter når kjernene logges, samt at Q-verdien beskriver de minst gunstige forholdene i hver kjerne. Ved store lokale forskjeller i bergmasseforholdene, vil logget Q-verdi svinge mye innen korte avstander.

Tunnelkartlegging viser mer variasjon enn seismikk og mindre variasjon enn kjerneboring. En ny Q-verdi registreres for hver salve, det vil si for hver 3.-5. m (avhengig av om det skytes full eller redusert salvelengde). I tillegg er kontrollingeniørene bevisste på at det ikke plutselig skal økes med to sikringsklasser når fjellkvaliteten forbedres, selv om det ville blitt gjort under kjernelogging av samme parti (Møre og Romsdal fylkeskommune, 2020e). Noen ganger holder kontrollingeniørene også igjen Q-verdien på et litt lavere nivå enn hva som egentlig observeres, for å holde sikringsklassen nede til de er helt sikre på at en dårlig sone er passert. Alt dette resulterer i at det ikke blir noen store sprang i Q-verdi slik som i kjerneloggingen.

### 9.6.3 Samlet vurdering av benyttet korrelasjonsformel mellom $V_p$ og Q

Basert på observasjonene i de utvalgte partiene, er det forsøkt å analysere om det er en sammenheng mellom tolket seismisk hastighet  $V_p$  og om sikringsklassen SK økes eller reduseres i forhold til forventet når det drives gjennom partiet. Se figur 9.12. Dette kan gi et grunnlag for å vurdere korrelasjonsformelen som er benyttet fra  $V_p$  til Q, siden sikringsklasse bestemmes ut fra Q-verdi. Det er valgt å se på

endring i sikringsklasse ( $\Delta SK$ ), fordi sikringsklasse som økes mye i forhold til forventet resulterer i økt sikringsmengde og økte kostnader for prosjektet.



Figur 9.12: Sammenheng mellom tolket seismisk hastighet  $V_p$  og endring i sikringsklasse ( $\Delta SK$ ) i forhold til forventet SK som er basert på beregnet Q-verdi fra korrelasjonsformelen. Seismisk hastighet for olivingabbroen i parti 2 er satt til 6 km/s basert på dens høye densitet, uten at dette er testet.

- $\Delta SK < 0$  betyr at det har blitt sikret etter lavere sikringsklasse enn forventet, hvilket betyr at bergmasseforholdene var bedre enn antatt fra refraksjonsseismikken (Q-verdien har økt).
- $\Delta SK > 0$  betyr at det har blitt sikret etter høyere sikringsklasse enn forventet, hvilket betyr at bergmasseforholdene var verre enn antatt fra refraksjonsseismikken (Q-verdien har blitt redusert).

Det må påpekes at datagrunnlaget er tynt for å dra noen konklusjoner fra denne analysen, siden det bare er benyttet informasjon fra de utvalgte partiene. Likevel kan følgende trender observeres fra figur 9.12:

1. Ingen soner med  $V_p < 4,3$  km/s har økt sikringsklassen i forhold til forventet. Tvert imot har sikringsklassen ofte blitt redusert.
2.  $V_p > 4,3$  km/s gir ofte økt sikringsklasse i forhold til forventet.
3. Refraksjonsseismikken antar oftest dårligere Q-verdi enn det tunnelkartleggingen viser.

En mulig forklaring til punkt 3 kan være at refraksjonsseismikken er basert på målinger de øverste metrene i bergmassen (Rønning, 2003). Siden det er sannsynlig at oppsprekkings- og forvittringsgraden reduseres med økende overdekning, kan forholdene oppleves bedre på tunnelnivå. Det er også en tendens til at svakhetssoner vil smalne mot dypet og dermed påvirke tunnelen i mindre grad enn antatt.

For tre soner i figur 9.12 har utført sikringsklasse stemt overens med antatt sikringsklasse. For sonene der  $\Delta SK \neq 0$ , er det ikke nødvendigvis feil korrelasjonsformel som er forklaringen. Mulige forklaringer på avvik mellom forventede og kartlagte Q-verdier har blitt diskutert i avsnitt 9.2. Basert på disse

---

analysene vurderes feil korrelasjonsformel å være en mulig forklaring på uoverensstemmelser mellom refraksjonsseismikk og kartlagt Q-verdi i parti 2, parti 4, og parti 7, som alle er partier der tolket  $V_p$  var relativt høy. Legg merke til at  $\Delta SK = 0$  i parti 7, fordi både forventet og kartlagt Q-verdi tilhørte SK I. Likevel var endringen i Q-verdi over 100, så det antas at korrelasjonsformelen kan være grunnen til denne dårlige overensstemmelsen.

Den benyttede korrelasjonsformelen er empirisk, og det må derfor ikke tas for gitt at den stemmer. Utført analyse viser at det kan vurderes å revidere formelen til å stemme bedre for de lokale geologiske forholdene langs Nordøyvegen, særlig for berggrunn med relativt høy seismisk hastighet. For å få et grunnlag for å vurdere en slik forbedring av korrelasjonen kan det være nyttig å utføre bergspenningsmålinger i flere punkter langs tunneltraséen. Utarbeidelse av en mer gjeldende korrelasjon vil ikke ha stor verdi for den pågående drivingen av Nordøyvegen, men for senere tunnelprosjekter vil det være både interessant og nyttig.



## 10 | Konklusjon

Masteroppgavens formål har vært å vurdere nytteverdien av ingeniørgeologiske undersøkelser som benyttes under driving av de undersjøiske tunnelene ved Nordøyvegen. Gjennomgang av utførte undersøkelser i sju utvalgte partier i tunnelene har gitt grunnlag for å analysere metodenes resultater opp mot hverandre, og diskutere mulige forklaringer på hvorfor de eventuelt ikke stemmer overens. Spesielt er det fokusert på sammenligning av Q-verdier fra seismikk, kjerneboring og tunnelkartlegging. De viktigste funnene fra masterarbeidet kan oppsummeres i følgende punkter:

- Det er i mange tilfeller knyttet stor usikkerhet til tolkningene fra refraksjonsseismikken langs Nordøyvegen. I de utvalgte partiene antar seismikken oftest dårligere bergmassekvalitet enn det tunnelkartleggingen viser, men det finnes unntak. Usikkerheten fra seismikken har blitt redusert ved å sammenstille tolkningene med supplerende grunnundersøkelser, både før og spesielt under driving.
- Utført kjerneboring under driving vurderes å ha stor verdi. Borkjernene gjør det mulig å vurdere vanskelighetsgraden til bergmassen foran stoff ved visuell observasjon, og driving gjennom eventuelle svakhetssoner kan planlegges bedre. Metoden har vist særlig nytte ved å forutse når bedre bergmasse kunne forventes på Longva-stuffen i Nøgvafjordtunnelen.
- Systematisk sonderboring med slaghammer har hatt høy nytteverdi ved å gi raske indikasjoner på dårligere bergmasse, leirforekomster og innlekkasje. Sonderboringen har fungert som en god verifisering av kjerneboring foran stoff der det er utført.
- MWD og borparametertolkning har hatt varierende nytteverdi under driving. Opplæring og villighet til å benytte seg av programvaren blant kontrollingeniørene er avgjørende, i tillegg til godt nettverk på stoff. Tolket hardhet har gitt gode verifiseringer på både dårligere bergmasse og annen type bergart foran stoff. MWD tilfører ikke nye opplysninger, men bekrefter det som allerede er registrert under kjerne- og sonderboring. Det resulterer i god dokumentasjon av forholdene.
- Kartlegging på stoff gir mulighet til å vurdere totalstabiliteten i tunnelen, og i hvor stor grad resultatene/tolkningene fra de andre undersøkelsene stemmer med den kartlagte «fasiten». Dette har veldig høy nytteverdi. Observasjoner fra kartleggingen kan bidra til å vurdere hvordan bergmasseforholdene vil utvikle seg videre foran stoff. Sprekkefylling i gneis bestående av talk og kloritt antas å være en indikasjon på kommende endring i bergart.
- Basert på utførte laboratorietester av svelleegenskaper, anbefales det å følge med på sprøytebetongen rundt pel nr. 32190-32200 i Fjørtoftfjordtunnelen. Her er det påvist montmorillonitt, *meget stor* fri svelling og *høyt* svelletrykk i sleppematerialet. Disse forholdene kan kreve spesiell permanent sikring. Muligheten for svelleproblematikk vurderes likevel som liten på grunn av andel fraksjon  $< 10 \mu\text{m} = 2 \%$ .
- Testing av svelleegenskaper til kjernemateriale fra parti 3 på Longva-stuffen viser begynnende omdannelse av feltpat til montmorillonitt. Basert på de visuelle observasjonene av prøven samt at andel

---

$< 10 \mu\text{m} = 1 \%$ , vurderes sannsynligheten for svelleproblemer som liten.

- Gjennom petrografisk analyse har en steinprøve fra parti 2 på Austnes-stuffen blitt vurdert til å være en delvis eklogittisert olivingabbro med koronatekstur. Bergarten inneholder mye mikrogranater, noe som forklarer dens ekstreme hardhet som har medført stor slitasje på borutstyret. Borbarhetstester har gitt *ekstremt lav* DRI og *ekstremt høy* BWI. Olivingabbroen var ikke forventet fra forundersøkelsene fordi den trolig ligger som en linse i gneisen som ikke når opp til sjøbunnen.
- Mulige forklaringer på dårlig samstemming mellom seismisk hastighet  $V_p$  og kartlagt Q-verdi har blitt diskutert. I noen tilfeller ligger forklaringen i at forventet svakhetszone fra refraksjonsseismikken har hatt en annen fallvinkel, slik at den har nådd tunnelnivå et annet sted. I andre tilfeller er det vanskelig å finne én tydelig forklaring. Det er mulig at usikre geologiske forhold mellom overflaten og tunnelnivå har medført feiltolkning av målingene, eller at den empiriske korrelasjonsformelen fra  $V_p$  til Q ikke er gjeldende.
- Måling av innlekkasje i sonderhull og kjernehull er den beste metoden for å predikere vannforholdene foran stuff, og dette har gitt riktige indikasjoner ved Nordøyvegen. Tolket vann fra MWD-data har i mange tilfeller gitt tolkninger som ikke stemmer med sonderboringene, så derfor benyttes ikke disse borparametertolkningene under driving.
- Kjerneboring foran stuff ved Nordøyvegen har stemt godt med det som er kartlagt i tunnelen. Kjerneboringens Q-verdier svinger rundt de kartlagte Q-verdiene, og gjenspeiler variasjonen innad i tunnelprofilen. Generelt viser kjerneboringen noe lavere Q-verdi enn tunnelkartleggingen, siden bergmasseparametrene i kjerneloggen bestemmes fra sprekkeplanet med minst gunstige forhold. Om disse «minst gunstige» forholdene vil påvirke totalstabiliteten i tunnelen, blir avslørt under tunnelkartleggingen.
- I soner med  $V_p < 4300$  m/s har sikringsklassen (SK) ofte blitt redusert i forhold til forventet. Der  $V_p > 4300$  m/s har SK derimot ofte økt i forhold til forventet.

Videre vil det være interessant å revidere korrelasjonsformelen slik at den i større grad tilpasses den gjeldende geologien langs Nordøyvegen. Det vil da være nyttig å utføre bergspenningsmålinger i flere punkter langs tunneltraséene. En slik revidering vil ikke ha stor verdi for pågående driving, men anses som nyttig for senere tunnelprosjekter i lignende bergmasse.

## Referanseliste

- Barton, N. (2002) Some new Q-value correlations to assist in site characterisation and tunnel design. I: *International journal of rock mechanics and mining sciences* 39.2, s. 185–216. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(02\)00011-4](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(02)00011-4).
- Barton, N. *et al.* (1995) The influence of joint properties in modelling jointed rock masses. I: *8th ISRM Congress*. International Society for Rock Mechanics og Rock Engineering.
- Bever Control AS (2020) *Bever Team Online. Tunnel planlegging og rapportering*. Tilgjengelig fra: <https://beverteamonline.azurewebsites.net/>. (Hentet: Januar-mai 2020).
- Birkeli, K. (2019) *Vurdering av alternative opplegg for undersøkelser under driving*. Prosjektoppgave. Trondheim: Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet. Institutt for geovitenskap og petroleum.
- Birkeli, K. (2020) *Bilder tatt i forbindelse med masteroppgaven*.
- Blindheim, O. T., Sam Lorgen A/S og Norconsult (1988) *Nordøyvegen. Vegutredning*. Statens vegvesen, Møre og Romsdal.
- Brekke, T. L. (1965) On the measurement of the relative potential swellability of hydrothermal montmorillonite clay from joints and faults in Pre-Cambrian and Paleozoic rocks in Norway. I: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. Bd. 2. 2. Elsevier, s. 155–165.
- Dahlen, K. A. (2020) *Prøvningsrapport. Bestemmelse av borbarhetsegenskaper*. Rapportnr. 20020IG. SINTEF.
- Dehls, J. F., Olesen, O. og Rønning, J. S. (2012) *Magnetisk og batymetrisk kartlegging ved vegprosjektet Fv. 659 Nordøyvegen, Møre og Romsdal*. (Nr. 2012.012). Trondheim: Norges geologiske undersøkelse.
- Drotninghaug, J. R. (2020) *Resultater fra svelleanalyse og personlig kommunikasjon i forbindelse med masteroppgaven*. Overingeniør Jon Runar Drotninghaug ved ingeniørgeologisk laboratorium ved Institutt for geovitenskap og petroleum, NTNU.
- Duås, M. W., Eggen, S. og Veien, H. (2016) *Sammenligning av Q-verdier fra planleggings- og drivefasen i vegtunneler*. Bacheloroppgave. Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet.
- Eggen, J. (2019a) *Prøvningsrapport. Svelleegenskaper. Ødometerforsøk for måling av svelletrykk og fri svelling på en prøve fra Fjørtoftfjordtunnelen, Fv. 659 Nordøyvegen*. Rapportnr. 19041IG. SINTEF.
- Eggen, J. (2019b) *Prøvningsrapport. Svelleegenskaper. Ødometerforsøk for måling av svelletrykk og fri svelling på en prøve fra Nogvafjordtunnelen, pel 23016*. Rapportnr. 19046IG. SINTEF.
- Fossen, H., Dallman, W. og Andersen, T. B. (2013) Fjellkjeden går til grunne. I: *Landet blir til*. Red. av Ramberg, I. B. *et al.* 2. utg. Trondheim: Norsk Geologisk Forening. Kap. 7, s. 234–261.
- Fossen, H. *et al.* (2013) En fjellkjede blir til. I: *Landet blir til*. Red. av Ramberg, I. B. *et al.* 2. utg. Trondheim: Norsk Geologisk Forening. Kap. 6, s. 180–233.

- 
- Ganerød, G. V. og Lutro, O. (2011) *Berggrunnsgeologisk og strukturgeologisk kartlegging i forbindelse med prosjektet Fv. 659 Nordøyvegen, Møre og Romsdal*. Rapportnr. 2011.049. Trondheim: Norges geologiske undersøkelse.
- Geomap (2002) *Nordøyvegen, Fjørtoftfjorden. Akustiske og refraksjonsseismiske målinger*. Rapportnr. 211304.01.
- Geomap (2011) *Nordøyvegen. Refraksjonsseismiske målinger*. Rapportnr. 312302.
- Geomap (2017) *Tomography survey in Nordøyvegen area*. Rapportnr. 161021.2.
- Gjelsnes, H. C. og Eidesen, J. M. (2013) Korrelasjon mellom Q-verdier fra kjerneprøver og seismiske hastigheter for E39 Rogfast. I: *Fjellsprenningsdagen, bergmekanikkdagen, geoteknikkdagen 2013*. Red. av Frogner, E. *et al.* Nr. 26. Oslo: Norsk Jord- og Fjellteknisk Forbund.
- Karlson, K. I. (2020) *Personlig kommunikasjon i forbindelse med masteroppgaven*. Ingeniørgeolog Kåre Ingolf Karlson ved Møre og Romsdal fylkeskommune.
- Karlson, K. I. og Grob, C. (2018a) *Fv. 659 Nordøyvegen, Fjørtoftfjordtunnelen, ingeniørgeologisk rapport for konkurransegrunnlag*. 40090-GEOL-8. Molde: Statens vegvesen.
- Karlson, K. I. og Grob, C. (2018b) *Fv. 659 Nordøyvegen, Haramsfjordtunnelen, ingeniørgeologisk rapport for konkurransegrunnlag*. 40090-GEOL-6. Molde: Statens vegvesen.
- Karlson, K. I. og Grob, C. (2018c) *Fv. 659 Nordøyvegen, Nøgvafjordtunnelen, ingeniørgeologisk rapport for konkurransegrunnlag*. 40090-GEOL-7. Molde: Statens vegvesen.
- Kartverket (2020) *Åpne WMS-tjenester – wms.topo4*. Tilgjengelig fra: [http://status.kartverket.no/tjenester/openwms.py?fbclid=IwAR2Xck3KTfKysrHiD\\_2U-yB-UhJsk3szC6Ru9eLxOWATSpvvhQqWDEV7HT4](http://status.kartverket.no/tjenester/openwms.py?fbclid=IwAR2Xck3KTfKysrHiD_2U-yB-UhJsk3szC6Ru9eLxOWATSpvvhQqWDEV7HT4). (Hentet: 26. april 2020).
- Kvarstein, I. H. (2017) *Analyse av forventede forhold og mulige vannsikringsløsninger for planlagte undersjøiske tunneler langs Nordøyvegen*. Masteroppg. Trondheim: Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet. Institutt for geovitenskap og petroleum.
- Lutro, O. (2011) *Berggrunnskart over Nordøyane*. Vedlegg 01 til Rapport 2011.049. Norges geologiske undersøkelse.
- Mao, D., Nilsen, B. og Dahl, F. (2011) Laboratory testing of swelling gouge from weakness zone - principle and recent update. I: *45th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*. American Rock Mechanics Association.
- Myrvang, A. (2002) Hvordan står det til med bergspenningene i Norge? I: *Fjellsprenningsdagen, bergmekanikkdagen, geoteknikkdagen 2002*. Red. av Nilsen, B. *et al.* Nr. 38. Oslo: Norsk Jord- og Fjellteknisk Forbund.
- Møre og Romsdal fylkeskommune (2020a) *Dagbok til kontrollingeniørene ved Nordøyvegen*. Tilgjengelig for lesning under befarings uke 8.
- Møre og Romsdal fylkeskommune (2020b) *Kjernelogger fra Nordøyvegen*. Tilsendt på epost fra ingeniørgeolog Kåre Ingolf Karlson.

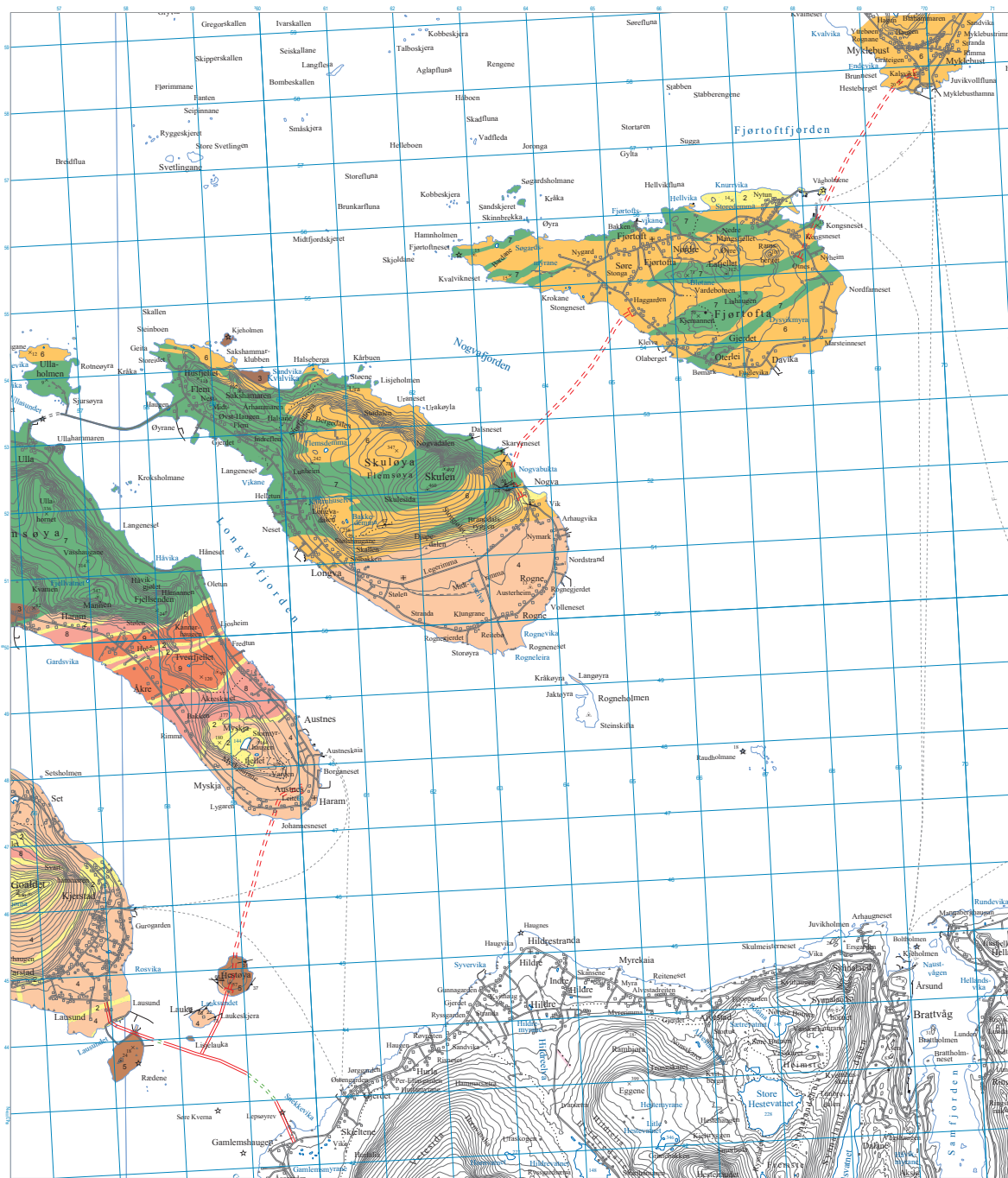
- 
- Møre og Romsdal fylkeskommune (2020c) *Nordøyvegen, Møre og Romsdal fylkeskommune*. Tilgjengelig fra: <https://www.facebook.com/nordoyvegen/?redirect=false>. (Hentet: 24. januar og 20. mai 2020).
- Møre og Romsdal fylkeskommune (2020d) *Om prosjektet*. Tilgjengelig fra: <https://mrfylke.no/om-oss/prosjekta-vaare/vegprosjekt/fv.-659-nordoyvegen/om-prosjektet>. (Hentet: 24. januar 2020).
- Møre og Romsdal fylkeskommune (2020e) *Personlig kommunikasjon i forbindelse med befarings til Nordøyvegen*. Kontrollingeniører Ivar Nils Båtberget, Marit Bakken Gjørva og Ken Ove Vassgård, ved tunnelene langs Nordøyvegen for Møre og Romsdal fylkeskommune.
- Møre og Romsdal fylkeskommune (2020f) *Tegninger fra Novapoint Tunnel - Geologi og bergsikring*. Tilsendt på epost fra kvalitetsrådgiver Carina Farstad.
- Mørk, M. B. E. (1985) A gabbro to eclogite transition on Flemsøy, Sunnmøre, western Norway. I: *Chemical Geology* 50.1-3, s. 283–310.
- Mørk, M. B. E. (2020) *Personlig kommunikasjon i forbindelse med masteroppgaven*. Professor ved Institutt for geovitenskap og petroleum, NTNU.
- NBG (1985) *Ingeniørgeologi berg - Håndbok*. Oslo: Tapir forlag.
- NFF (2008) *Håndbok nr. 05: Tung bergsikring i undergrunnsanlegg*. Norsk Forening for Fjellsprengningsteknikk. ISBN: 978-82-92641-09-5.
- NFF (2019) *Publication no. 28: Digitalisation in Norwegian tunneling*. Norwegian Tunneling Society. ISBN: 978-82-92641-45-3.
- NGI (2015) *Bruk av Q-systemet*. Oslo: Allkopi AS.
- NGU (2018) *XRD-analyser*. Tilgjengelig fra: <https://www.ngu.no/fagomrade/xrd-analyser>. (Hentet: 5. mai 2020).
- NGU (2020a) *Berggrunn N250*. Tilgjengelig fra: <https://kartkatalog.geonorge.no/metadata/berggrunn-n250/7c39be66-77b6-4b74-b58d-53b6bee90067>. (Hentet: 25. april 2020).
- NGU (2020b) *Refleksjonsseismikk - metodebeskrivelse*. Tilgjengelig fra: [https://www.ngu.no/sites/default/files/Refleksjonsseismikk%20metodebilag\\_0.pdf](https://www.ngu.no/sites/default/files/Refleksjonsseismikk%20metodebilag_0.pdf). (Hentet: 31. mars 2020).
- NGU (2020c) *Refraksjonsseismikk - metodebeskrivelse*. Tilgjengelig fra: [https://www.ngu.no/sites/default/files/Refraksjon\\_beskrivelse\\_ny.pdf](https://www.ngu.no/sites/default/files/Refraksjon_beskrivelse_ny.pdf). (Hentet: 19. mars 2020).
- NGU (2020d) *Seismisk tomografi, metodebeskrivelse*. Tilgjengelig fra: <https://www.ngu.no/upload/Norges%20geologi/Geofysikk/Bakkegeofysikk/Seismikk/REFR-tomografi.pdf>. (Hentet: 5. februar 2020).
- Nilsen, B. (2016) *Ingeniørgeologi-berg grunnkurskompendium*. NTNU, Institutt for geologi og bergteknikk.
- Nilsen, B. (2020) *Personlig kommunikasjon i forbindelse med masteroppgaven*. Professor i ingeniørgeologi, Bjørn Nilsen, ved Institutt for geovitenskap og petroleum, NTNU.
- Nilsen, B. og Beitnes, A. (2018) *Vedr. Fravik for mindre bergoverdekning*. Brev til Møre og Romsdal fylkeskommune og Statens vegvesen Region Midt, januar 2018.
-

- 
- Nilsen, B. og Palmstrøm, A. (2000) *Handbook No 2: Engineering geology and rock engineering*. Oslo: Norwegian Group for Rock Mechanics (NBG).
- Nilsen, B. et al. (2011) *Veileder for bruk av Eurokode 7 til bergteknisk prosjektering*. Norsk Bergmekanikkgruppe.
- Norconsult (2012) *FV 659 Nordøyvegen. Kjernelogging*. Rapportnr. 5124620.01.
- Nordgulen, Ø. og Andresen, A. (2013) De eldste bergartene dannes. I: *Landet blir til*. Red. av Ramberg, I. B. et al. 2. utg. Trondheim: Norsk Geologisk Forening. Kap. 3, s. 62–119.
- NRK (2018) *Dette er historia om Nordøyvegen*. Tilgjengelig fra: <https://www.nrk.no/mr/dette-er-historia-om-nordoyvegen-1.14326264>. (Hentet: 2. mars 2020).
- Palmstrøm, A. et al. (2003) *Publikasjon nr. 101: Miljø og samfunnstjenlige tunneler - Riktig omfang av undersøkelser for berganlegg*. Oslo: Statens vegvesen, Vegdirektoratet Teknologiavdelingen.
- Rokoengen, K. (1973) *Svelleegenskaper hos leirsoner i fjell*. Ph.d.-avh. Norges Tekniske Høgskole.
- Rønning, J. S. (2003) *Publikasjon nr. 102: Miljø og samfunnstjenlige tunneler - Delprosjekt A, Forundersøkelser - Sluttrapport*. Oslo: Statens vegvesen, Vegdirektoratet Teknologiavdelingen.
- Shi, P. et al. (2016) Geological Investigation and Tunnel Excavation Aspects of the Weakness Zones of Xiang'an Subsea Tunnels in China. I: *Rock Mechanics and Rock Engineering*, s. 1–15. DOI: [10.1007/s00603-016-1076-z](https://doi.org/10.1007/s00603-016-1076-z).
- Skanska (2019/2020) *Sonderboringsrapporter fra entreprenør ved Nordøyvegen*. Tilsendt på epost fra ingeniørgeolog Kåre Ingolf Karlson.
- Statens vegvesen (2010a) *Arbeider foran stuff og stabilitetssikring i vegtunneler*. Nr. 2538. Utarbeidet av Pedersen, K. B., Kompen, R. og Kveen, A. 45 sider. Vegdirektoratet - Teknologiavdelingen.
- Statens vegvesen (2010b) *Geologi RV64 Atlanterhavstunnelen Ingeniørgeologisk sluttrapport*. Nr. 2010079835-03. Region midt - Ressursavdelinga. Berg- og geoteknikkseksjonen.
- Statens vegvesen (2016) *Håndbok R210 «Laboratorieundersøkelser»*. Vegdirektoratet.
- Statens vegvesen (2018) *Håndbok R761 Prosesskode 1 – Standard beskrivelsestekster for vegkontrakter*. Oslo: Vegdirektoratet.
- Statens vegvesen (2020a) *Håndbok N500 «Vegtunneler»*. Vegdirektoratet.
- Statens vegvesen (2020b) *Håndbok V520 «Tunnelveiledning»*. Vegdirektoratet.
- Tijhuis, L. (2020) *Resultater fra XRD-analyse og personlig kommunikasjon i forbindelse med masteroppgaven*. Senioringeniør Laurentius Tijhuis ved kjemisk/mineralogisk laboratorium ved Institutt for geovitenskap og petroleum, NTNU.
- Westerdahl, H. (2003) *Seismisk modellering. Modellering av seismiske data over løsmassefylte depresjoner, svakhetssoner og ved kabelheng*. NGI Rapport 2001042-3; og «Miljø- og samfunnstjenlige tunneler», Rapportnr. 32. Oslo: Statens vegvesen, Vegdirektoratet Teknologiavdelingen.

# Vedlegg A: Detaljert berggrunnskart etter Lutro (2011)

Tunneltraséene som er tegnet inn stemmer ikke helt med tunnelenes endelige plassering, spesielt Nogvafjordtunnelen. Tegnforklaring følger på neste side.

Én rute tilsvare 1 km.



## Berggrunnskart over Nordøyane

-  2 Glimmerskifer, amfibolitt og meta-arkose
  -  3 Granatholdig gabbro
  -  4 Granittisk bergart med eklogittlinse
  -  5 Granatholdig gabbro
  -  6 Migmatittisk gneis, øyegneis
  -  7 Diorittisk gneis med mafiske inneslutninger
  -  8 Granittisk gneis uten eklogittlinser
  -  9 Granittisk gneis med deformerte mafiske ganger
-  25 Foliasjon, skiffrighet. Flatens fall er angitt, 25° mot SØ
-  Prosjektert veg
-  Prosjektert bru
-  Prosjektert tunnel

Området er kartlagt av Mike Terry, Peter Robinson og Jared Butler.  
Lepsøya, Haramsøya, Flemssøya/Skuløya og Fjørtofta er i hovedsak kartlagt av Mike Terry i målestokk 1:10000.  
Kartleggingen foregikk i årene 1995 til 2002.  
Den sørlige delen av Harøya er kartlagt av Jared Butler, pågår ennå, 2011.  
Peter Robinson har kartlagt Hestøya og øyene sør vest for den.  
Dette kartet er all hovedsak basert på en forenklet versjon av Mike Terrys kart brukt i publikasjoner basert på hans doktorgradsarbeid.

Referanse til kartet: Lutro, O. 2011: Berggrunnskart over Nordøyane  
Vedlegg 01 til Rapport 2011.049  
Norges geologiske undersøkelse

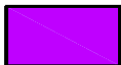


## Vedlegg B: Undersjøiske tunnelprofiler

Vedlegg B.1, B.2 og B.3 viser profiler av de undersjøiske delene til henholdsvis Haramsfjordtunnelen, Nøgvafjordtunnelen og Fjørtoftfjordtunnelen. Områder der ekstra undersøkelser på stoff skal gjennomføres er merket med blå farge for kjerneboring og lilla farge for vinklede sonderhull. Se følgende tegnforklaring for utdypning:

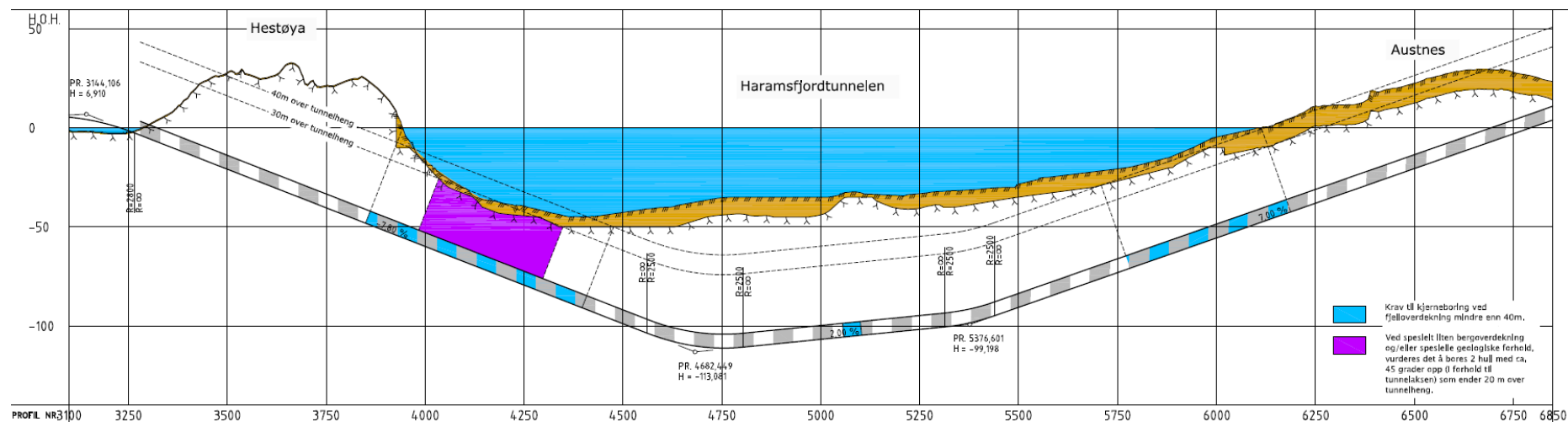


Krav til kjerneboring ved fjelloverdekning mindre enn 40m.

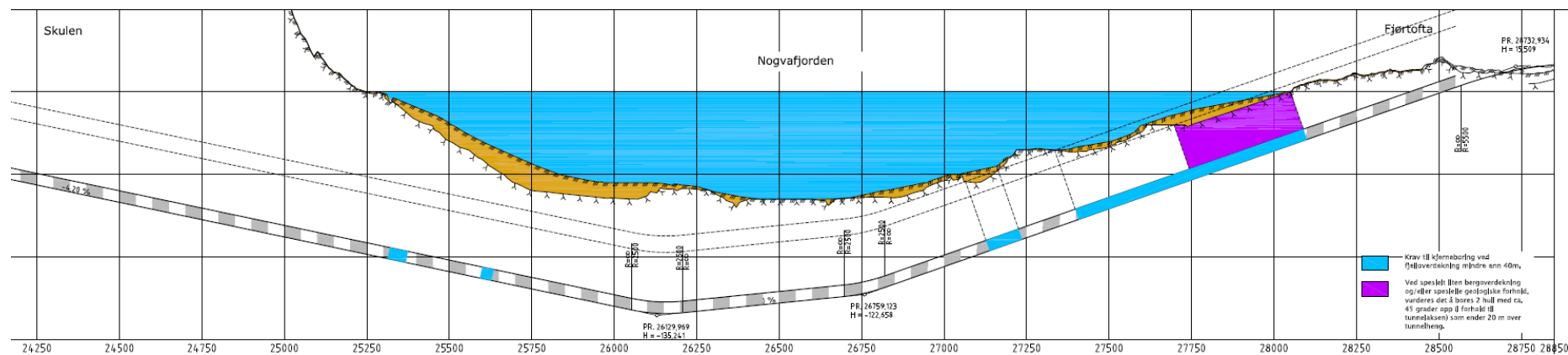


Ved spesielt liten bergoverdekning og/eller spesielle geologiske forhold, vurderes det å bores 2 hull med ca. 45 grader opp (i forhold til tunnelaksen) som ender 20 m over tunnelheng.

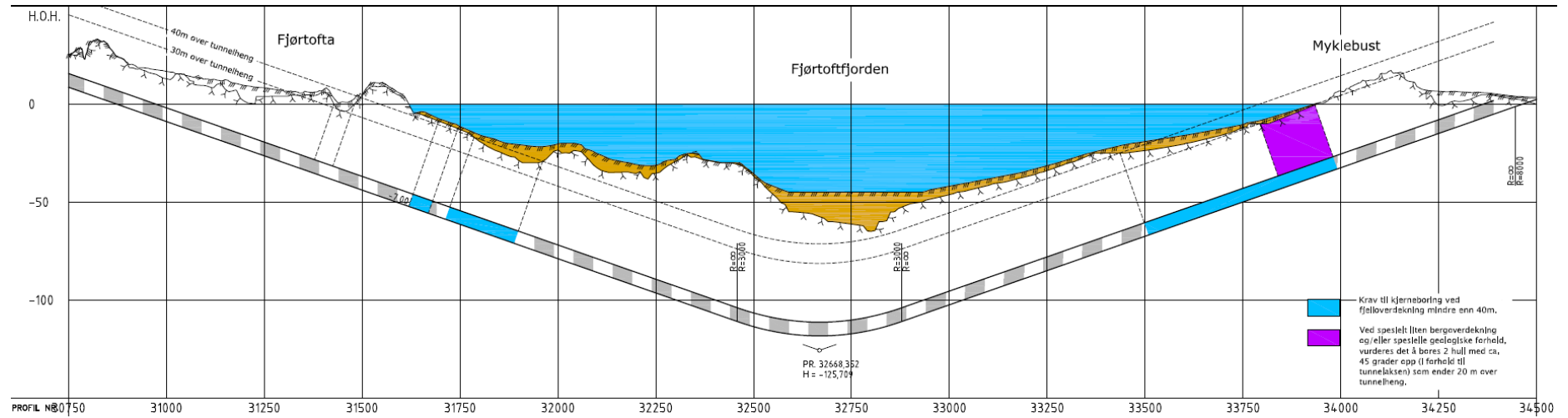
## B.1 Haramsfjordtunnelen



## B.2 Nogvafjordtunnelen



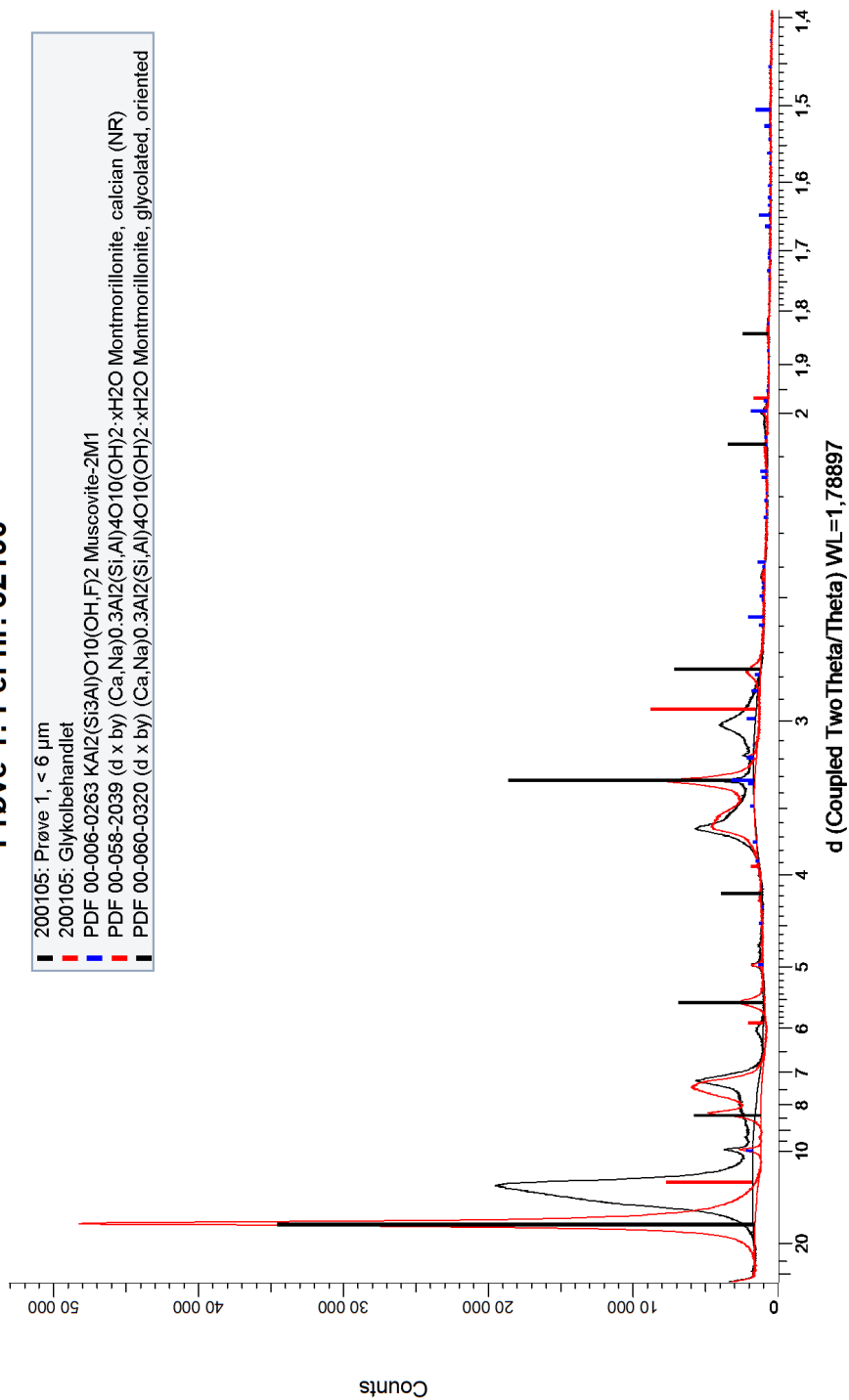
### B.3 Fjørtofftjordtunnelen



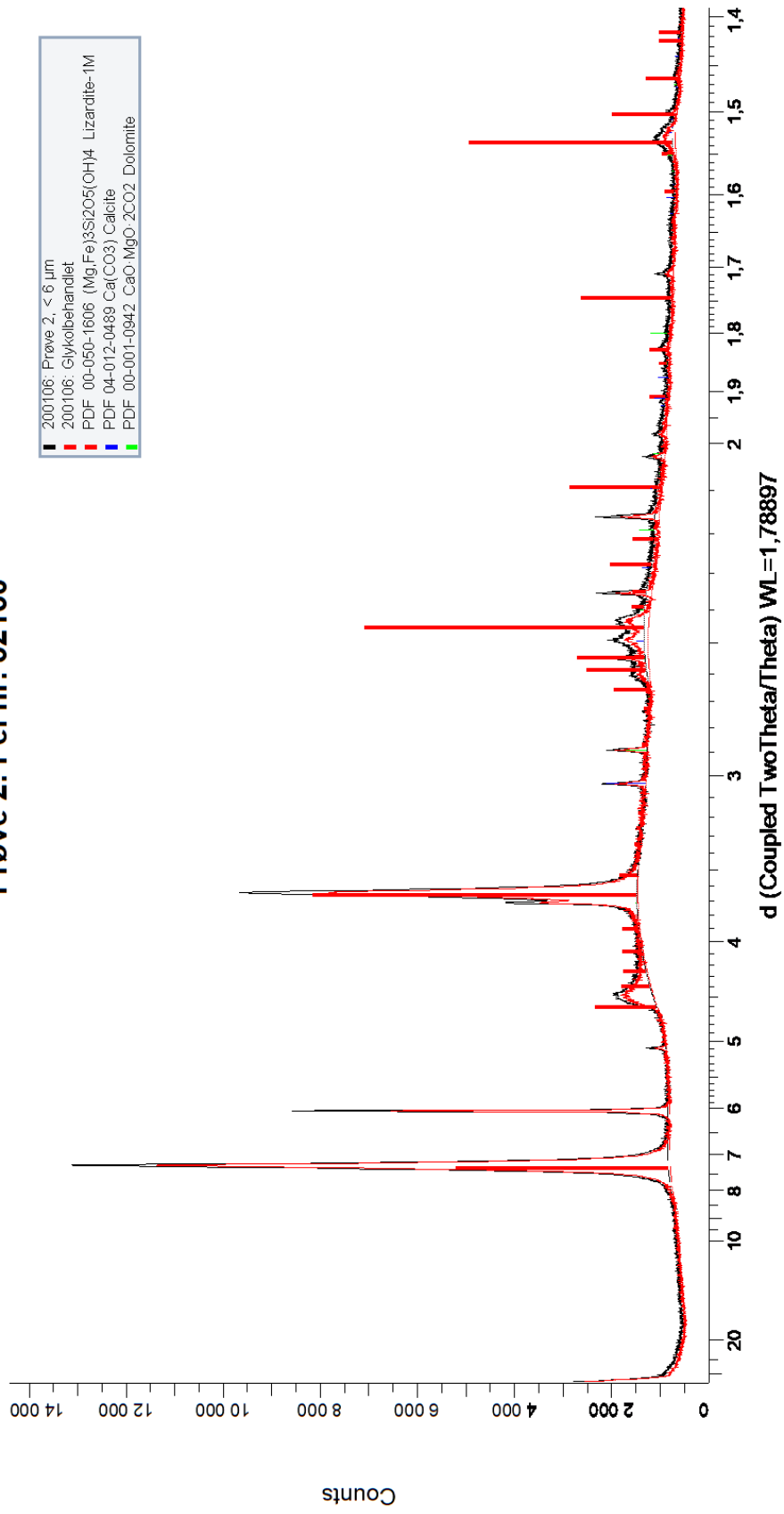


# Vedlegg D: Diffraktogrammer fra XRD-analyse

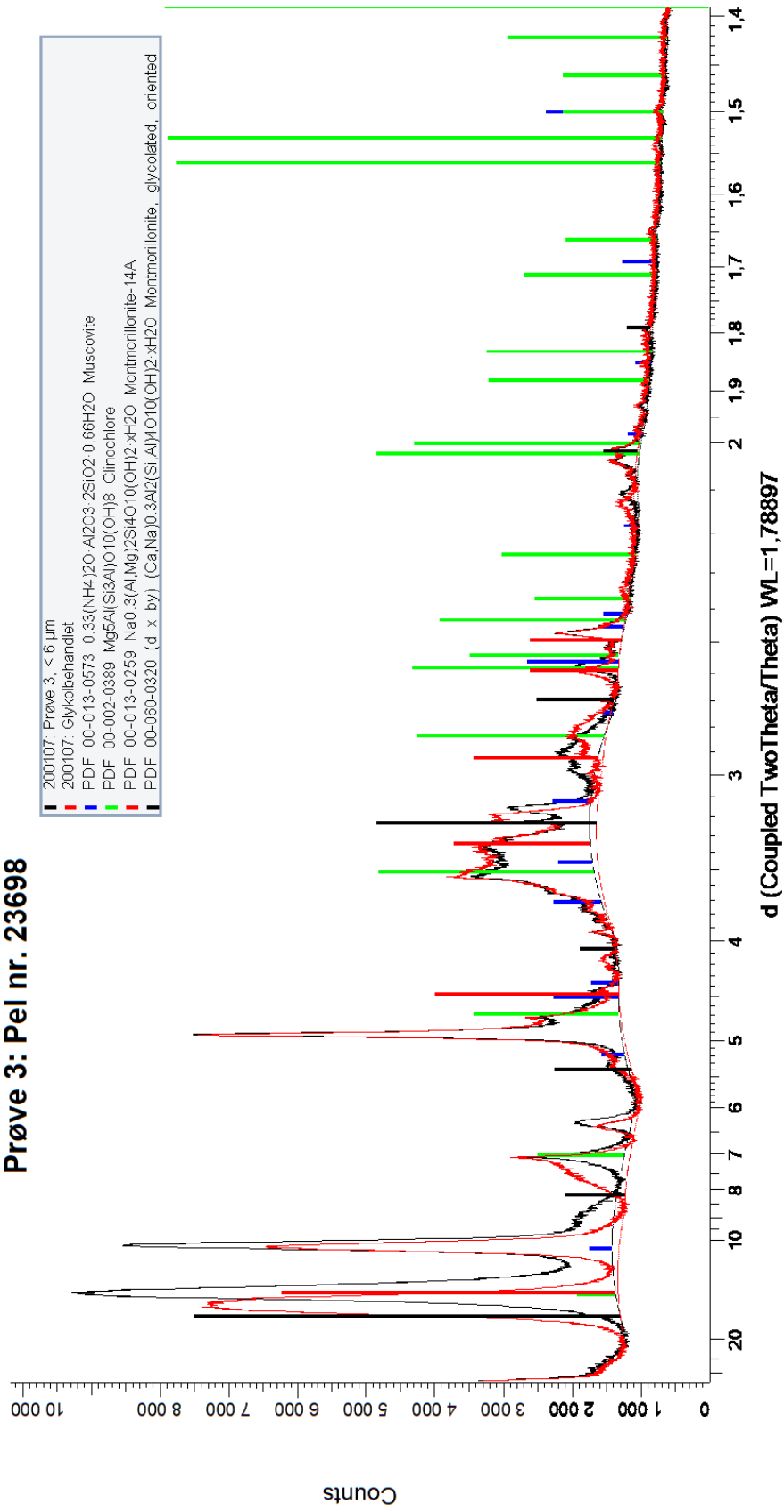
## Prøve 1: Pel nr. 32190



## Prøve 2: Pel nr. 32150



### Prøve 3: Pel nr. 23698



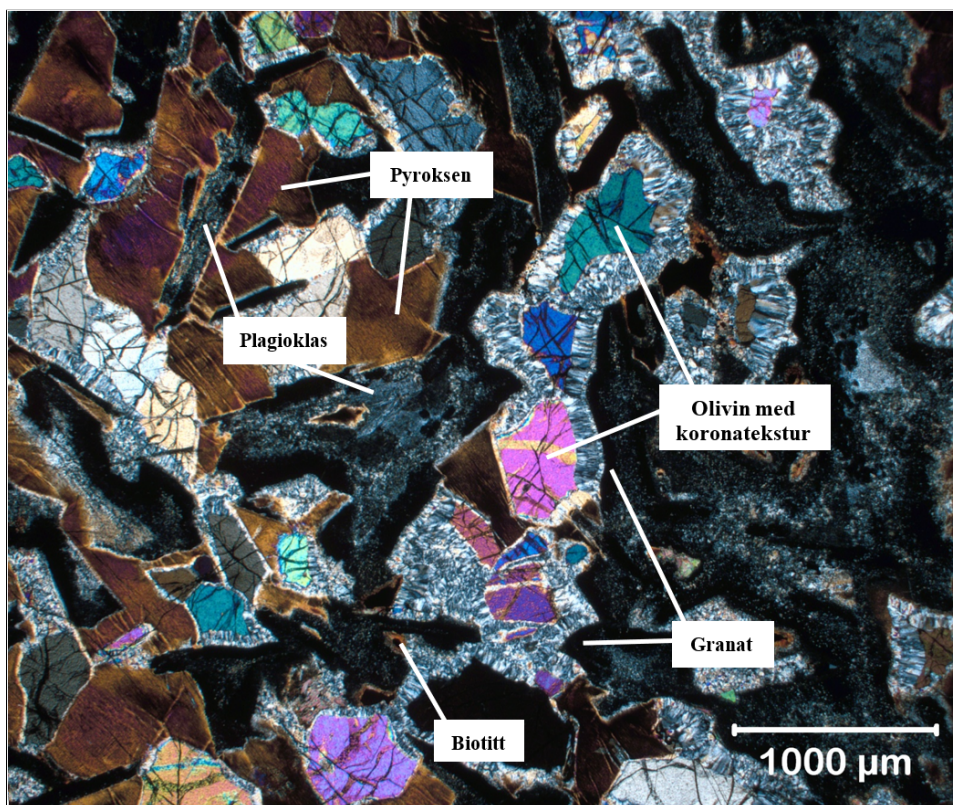
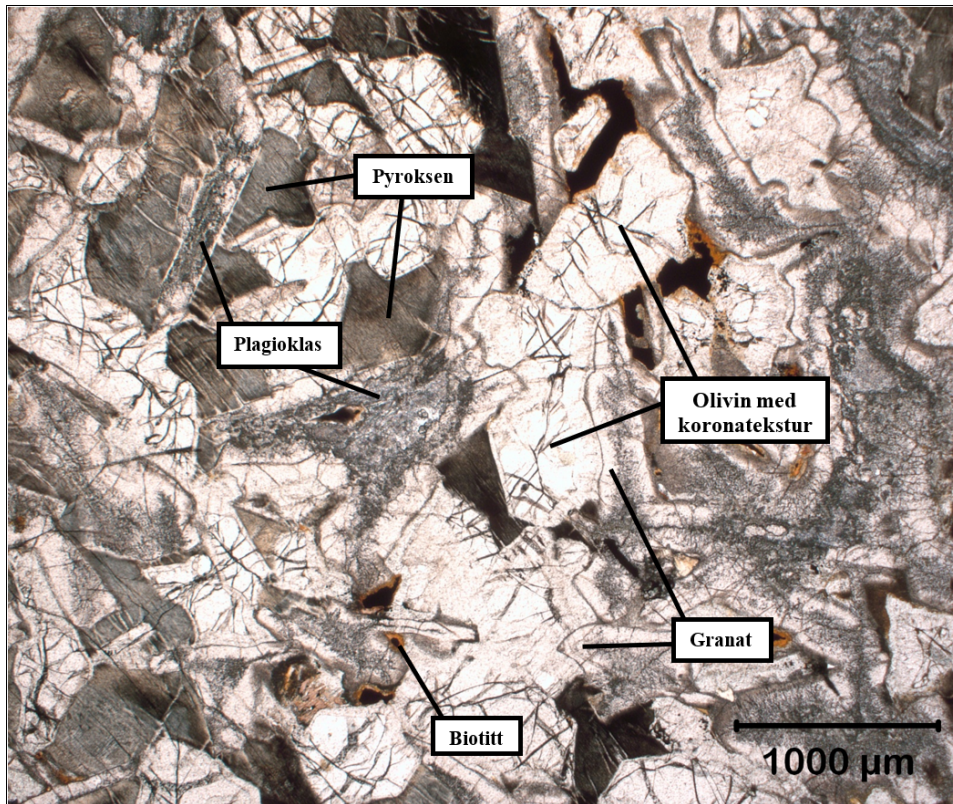
## Vedlegg E: Frisvelling

<b>Svelleprøver Kristine Birkeli</b>								
<b>VEKT</b>	<b>&gt; 20 µm [g]</b>	<b>&lt; 20 µm [g]</b>	<b>Total [g]</b>	<b>Prosentandel materiale &lt; 20 µm</b>	<b>FRISVELLING</b>	<b>Volum tørt materiale, Vt</b>	<b>Volum av sedimentert materiale etter 24 timer, V1</b>	<b>Frisvelling (FS = (V1/Vt)*100%</b>
<b>Prøve 1</b>	693,2	17,2	710,4	2,42 %	<b>Prøve 1</b>	10	42	420 %
<b>Prøve 2</b>	1139	32,6	1171,6	2,78 %	<b>Prøve 2</b>	10	16,2	162 %
<b>Prøve 3</b>	136,8	1,0	137,8	0,73 %	<b>Prøve 3</b>	for lite materiale til frisvelling		



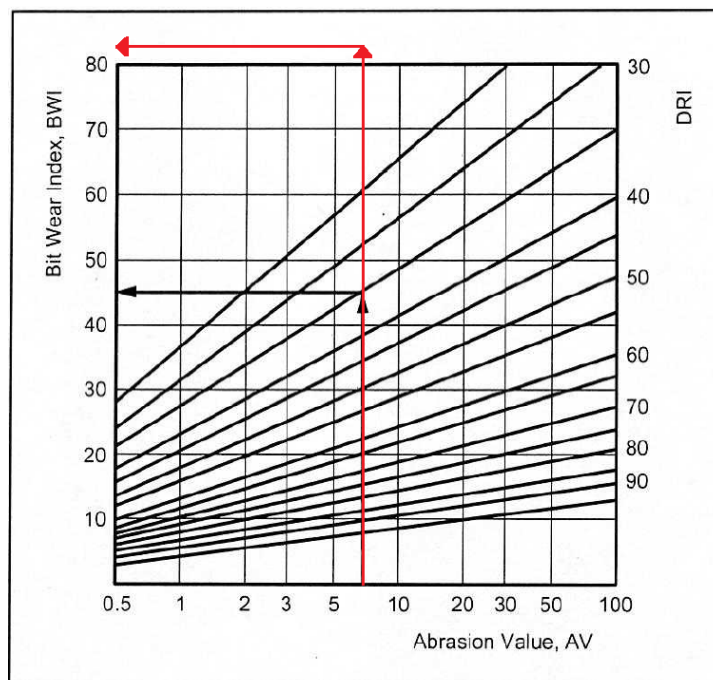
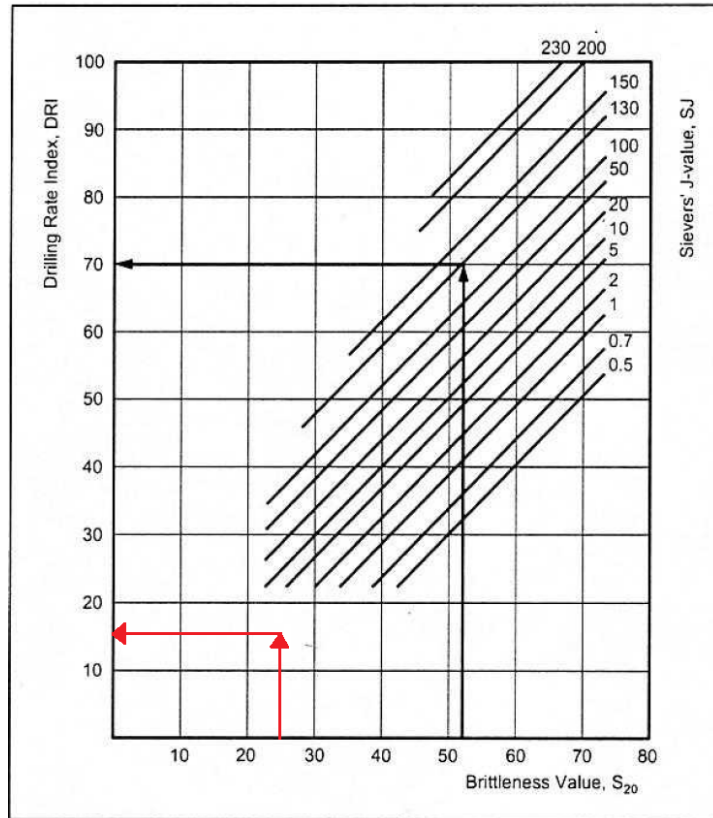
## Vedlegg F: Mikroskopibilder

Bergartsprøve fra pel nr. 5575, ved henholdsvis PPL og XPL. Bilder er tatt av Birkeli (2020).



# Vedlegg G: Borbarhetsdiagrammer

Beregning av borbarhetsindeksene DRI og BWI for steinprøve fra pel nr. 5575 i Haramsfjordtunnelen (tilhører parti 2). Verdier fra Dahlen (2020).



## Vedlegg H: Sammenheng mellom bergmasseklasse, Q-verdi og sikringsklasse

Fra *Håndbok N500 «Vegtunneler»* (Statens vegvesen, 2020a).

Bergmasse klasse	Bergforhold Q-verdi (sprengt berg)	Sikringsklasse Permanent sikring
A/B	Lite oppsprukket bergmasse. Midlere sprekkeavstand > 1m. Q = 100 – 10	Sikringsklasse I - Spredt bolting - Sprøytebetong B35 E700, tykkelse 80 mm
C	Moderat oppsprukket bergmasse. Midlere sprekkeavstand 0,3 – 1 m Q = 10 – 4	Sikringsklasse II - Sprøytebetong B35 E700, tykkelse 80 mm - Systematisk bolting c/c 2 m
D	Tett oppsprukket bergmasse eller lagdelt skifrig bergmasse. Midlere sprekkeavstand < 0,3 m. Q = 4 - 1	Sikringsklasse III - Sprøytebetong B35 E1000, tykkelse 100 mm - Systematisk bolting c/c 1,75 m
E	Svært dårlig bergmasse.  Q = 1 - 0,2 ----- Q = 0,2 - 0,1	Sikringsklasse IV - Sprøytebetong B35 E1000, tykkelse 150 mm - Systematisk bolting, c/c 1,5 m ----- - Sprøytebetong B35 E1000, tykkelse 150 mm - Systematisk bolting, c/c 1,5 m - Armerte sprøytebetongbuer. Buedimensjon E30/6 ø20 mm, c/c buer 2–3 m, Buene boltes systematisk, c/c bolt = 1,5 m, boltelengde 3–4 m - Sålestøp vurderes
F	Ekstremt dårlig bergmasse.  Q = 0,1 - 0,01	Sikringsklasse V - Sprøytebetong B35 E1000, tykkelse 150–250 mm - Systematisk bolting, c/c 1,0 – 1,5 m - Armerte sprøytebetongbuer Buedimensjon D60/6+4, ø20 mm, c/c buer 1,5–2 m Buene boltes systematisk, c/c 1,0 m, boltelengde 3–6 m Doble buer kan erstattes med gitterbuer. - Armert sålestøp, pilhøyde min. 10 % av tunnelbredden
G	Eksepsjonelt dårlig bergmasse, stort sett løsmasse, Q < 0,01	Sikringsklasse VI - Driving og permanent sikring dimensjoneres spesielt



# Vedlegg I: Parameterverdier for Q-systemet

1 Oppsprekkingstall (Rock Quality Designation)	pr. m <sup>3</sup>	RQD
A Meget sterkt oppsprukket	>27	0-25
B Sterkt oppsprukket	20-27	25-50
C Moderat oppsprukket	13-19	50-75
D Lite oppsprukket	8-12	75-90
E Meget lite oppsprukket	0-7	90-100

Anm.: i) Når RQD er ≤ 10 (inkludert 0), blir verdien 10 brukt ved utregning av Q-verdi  
ii) RQD-intervaller på 5, dvs. 100, 95, 90 osv er tilstrekkelig nøyaktig

2 Tall for sprekkeseett	J <sub>n</sub>
A Massivt, ingen eller få sprekker	0,5-1,0
B Ett sprekkeseett	2
C Ett sprekkeseett + sporadiske sprekker	3
D To sprekkeseett	4
E To sprekkeseett + sporadiske sprekker	6
F Tre sprekkeseett	9
G Tre sprekkeseett + sporadiske sprekker	12
H Fire eller flere sprekkeseett, meget sterkt oppsprukket, sukkerbitberg osv	15
E Oppknust berg, jordaktig	20

Anm.: i) Ved tunnelkryss brukes (3 x J<sub>n</sub>)  
ii) I portaler brukes (2 x J<sub>n</sub>)

3 Sprekkeruhetstall	J <sub>r</sub>
a) Bergkontakt, og b) bergkontakt før 10 cm skjærdeformasjon	
A Diskontinuerlig, hakkete (ru eller glatte)	4
B Ru, bølgete	3
C Glatte, bølgete	2
D Glidespeil, bølgete	1,5
E Ru, plane	1,5
F Glatte, plane	1
G Glidespeil, plane	0,5
Anm.: Første del av beskrivelsen (Ru, glatt etc.) gjelder ruhet/glatthet. Andre del gjelder ujevnheter i størrelsesorden dm, m.	
c) Ingen bergkontakt ved skjærdeformasjon	
H Sprekketylling med leir, silt, sand, grus eller knust berg tykk nok til å hindre bergkontakt	1
Anm.: i) Når sprekketavstanden i det aktuelle sprekkesettet er mer enn 3 m adderes 1 til ruhetstallet ii) J <sub>r</sub> =0,5 brukes for plane sprekker med glidespeil og lineasjon der lineasjon er orientert langs sannsynlig bevegelsesretning	

4 Tall for sprekketylling	Φ <sub>r</sub> (ca)	J <sub>a</sub>
a) Bergkontakt		
A Sammenvekste sprekker med harde mineraler som kvarts, feltspat, epidot		0,75
B Uomvandlede sprekkelater, bare overflateoksidasjon	25-35°	1
C Svakt omvandlede sprekkelater. Uoppbløtlig mineralbelegg, sandpartikler, oppknust berg, uten leir.	25-30°	2
D Siltig eller sandig sprekkelatelegg, litt leir (ikke svelleleire)	20-25°	3
E Oppbløtlig leirbelegg med lav friksjon f.eks kaolinit eller glimmer. Også kloritt, talk, gips, grafitt o.a. Kun små mengder svelleleire	8-16°	4
b) Bergkontakt før 10 cm skjærdeformasjon (tynn mineraltylling)		
F Sandige partikler, oppknust berg, ikke leir	25-30°	4
G Sterkt overkonsolidert (hardpakket), uoppbløtlig tylling av leirmateriale (kontinuerlig, tykkelse < 5 mm)	16-24°	6
H Middels eller litt overkonsolidert tylling av oppbløtlig leirmateriale (kontinuerlig, tykkelse < 5 mm)	12-16°	8
J Tylling av svelleleire (kontinuerlig, tykkelse < 5 mm). Ja-verdien avhenger av prosentvis innhold av svelleleire.	6-12°	8-12
c) Ingen bergkontakt ved skjærdeformasjon (tykk mineraltylling)		
K Soner og bånd av knust eller desintegret berg og leir. Sterkt overkonsolidert (hardpakket) uoppbløtlig tylling.	16-24°	6
L Soner og bånd av knust eller desintegret berg og leir. Middels til litt overkonsolidert uoppbløtlig tylling.	12-16°	8
M Soner og bånd av leir eller knust eller desintegret berg. Ja-verdien avhenger av prosentvis innhold av svelleleire.	6-12°	8-12
N Tykke, kontinuerlige soner eller bånd med leir, silt eller sand. Sterkt overkonsolidert (hardpakket), uoppbløtlig.	16-24°	10
O Tykke, kontinuerlige soner eller bånd med leir. Middels til litt overkonsolidert, oppbløtlig.	12-16°	13
P Tykke, kontinuerlige soner eller bånd med leir. Ja-verdien avhenger av prosentvis innhold av svelleleire.	6-12°	13-20

5 Sprekkjevannsfaktor	J <sub>w</sub>
A Tørre bergrom, fukt eller spredte drypp	1
B Dryppregn, Stedvis utvasking av sprekketylling.	0,66
C Stor innlekkasje eller høyt trykk i berg med sprekker uten tylling	0,5
D Stor innlekkasje eller høyt trykk. Utvasking av sprekketylling.	0,33
E Meget stor innlekkasje eller vanntrykk ved utsprengning, avtagende med tiden	0,2-0,1
F Meget stor innlekkasje eller vanntrykk. Ikke avtagende med tiden. Ofte utvasking av knust bergmasse	0,1-0,05

Anm.: i) Faktorene C til F er antatte. J<sub>w</sub>-verdien økes når dreneringstiltak blir utført  
ii) Spesielle stabilitetsproblemer ved isdannelse er ikke vurdert

6 Spenningsfaktor	SRF		
a) Svakhetssoner som skjærer tunnelen og som kan medføre nedfall			
A Hyppig opptreden av svakhetssoner som inneholder leir eller kjemisk omvandlet berg. Avspent sideberg. Alle dybder.			10
B Hyppig opptreden av svakhetssoner i kompetente (stive) bergarter (uten leir). Avspent sideberg. Alle dybder.			7,5
C Enkle svakhetssoner med eller uten leir eller kjemisk omvandlet berg. Anleggets dybde ≤ 50 m.			5
D Ukonsoliderte, åpne sprekker, sterkt oppsprukket, sukkerbitberg. Alle dybder.			5
E Enkle svakhetssoner med eller uten leir eller kjemisk omvandlet berg. Anleggets dybde > 50 m.			2,5
Anm.: i) SRF verdiene reduseres med 25-50% når svakhetssonene bare innvirker på stabiliteten, men ikke skjærer anlegget.			
b) Harde, kompetente bergarter, bergtrykkproblemer			
	σ <sub>1</sub> /σ <sub>3</sub>	σ <sub>3</sub> /σ <sub>c</sub>	SRF
H Lave spenninger, åpne sprekker. Utfall av blokker pga. lav spenning. Vanligvis nær overflaten.	>200	<0,01	2,5
J Middels høye spenninger, gunstige spenningsforhold.	200-10	0,01-0,3	1
K Høye spenninger. Vanligvis gunstige stabilitetsforhold. Kan være ugunstig for veggstabilitet.	10-5	0,3-0,4	0,5-2
L Moderat avskalling etter mer enn 1 time i massivt berg.	5-3	0,5-0,65	5-50
M Avskalling og bergslag etter få minutter i massivt berg.	3-2	0,65-1	50-200
N Intenst bergslag og umiddelbart dynamisk deformasjonsbrudd i massivt berg.	<2	>1	200-400
Anm.: ii) I tilfeller med sterkt anisotrop, jomfruelig spenningsfelt (dersom målinger foreligger): når 5 ≤ σ <sub>1</sub> / 10 ≤ σ <sub>3</sub> , reduseres σ <sub>3</sub> til 0,75 σ <sub>3</sub> . Når σ <sub>1</sub> /σ <sub>3</sub> > 10, reduseres σ <sub>3</sub> til 0,5 σ <sub>3</sub> , hvor σ <sub>3</sub> = enaksial trykkfasthet, σ <sub>1</sub> og σ <sub>3</sub> er henholdsvis største og minste hovedspenning og σ <sub>3</sub> = maksimal tangentialspenning (antatt fra elastisitetsteorien). iii) Når tunnelhengens dybde under fjelloverflaten er mindre enn spennvidden, økes SRF fra 2,5 til 5, unntatt ved høye horisontalspenninger (se H)			
c) Tyteberg: plastisk flytning av inkompetente bergarter under påvirkning av høye spenninger			
O Moderat tyteberg		1-5	5-10
P Intens tyteberg		>5	10-20
Anm.: iv) Tilfeller av tyteberg kan forekomme for dybder H=350 Q <sup>1/3</sup> (Singh et al., 1992). Bergmassenes trykkfasthet kan estimeres fra scm » scm/100 x 0.7xg x Q <sup>1/3</sup> (MPa) hvor g = bergartens egenvekt i kN/m <sup>3</sup> , og scm = bergmassens trykkfasthet.			
d) Svellende berg: Kjemisk svelleaktivitet som avhenger av tilgangen på vann			
R Moderat svelling			5-10
S Intens svelling			10-15

Anm.: For J<sub>r</sub> og J<sub>a</sub> brukes verdier fra det sprekkesettet som er mest ugunstig for stabiliteten både med hensyn til orientering og skjærstyrke, τ = σ<sub>n</sub> tan<sup>2</sup>(J<sub>r</sub>/J<sub>a</sub>). Velg sprekkeseett eller diskontinuitet hvor utglidning mest sannsynlig vil skje.

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF}$$



Statens vegvesen

Ref: R. Lien og F. Løseth

# Vedlegg J: Kjerneboring foran stuff i parti 1, pel nr. 6317-6283

Antatt start og slutt på svakhetssone er merket med røde piler.





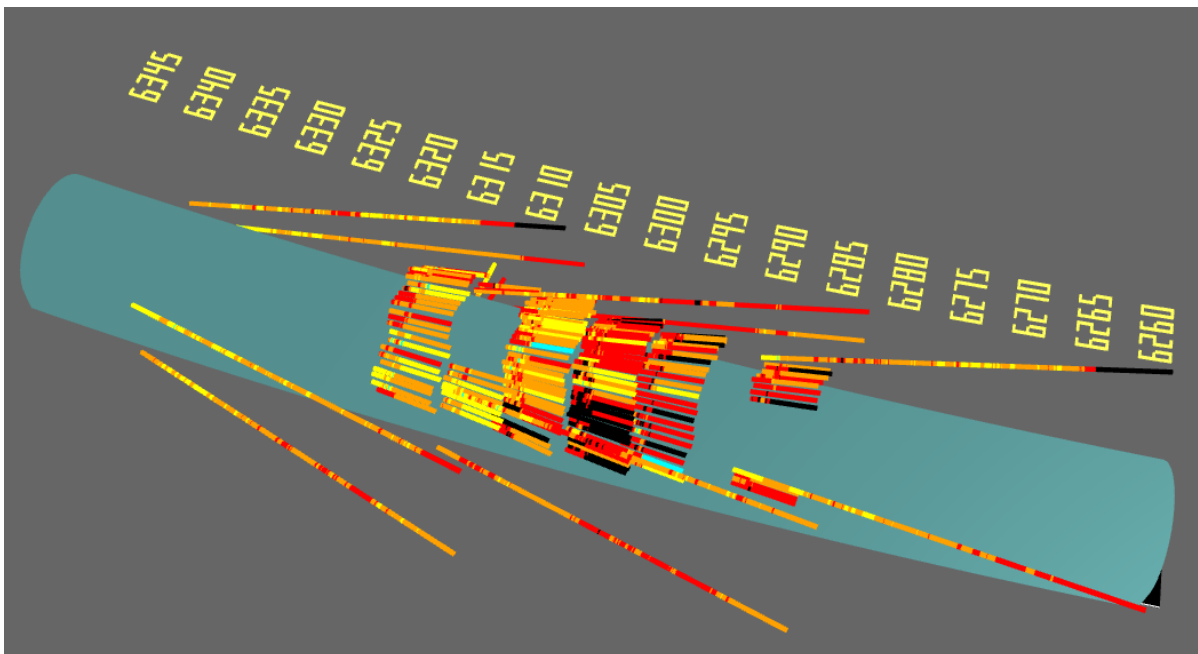
## Vedlegg K: Borparametertolkninger

I dette vedlegget presenteres tolket hardhet i borede langhull (sonder- og eventuelle injeksjonshull) i de utvalgte partiene, basert på systematiske MWD-målinger under driving. Tolket vann presenteres for parti 3. Figurene er fremstilt fra tilgjengelig materiale på nettstedet <https://beverteamonline.azurewebsites.net/> (Bever Control AS, 2020).

Fargeskalaen som benyttes varierer noe fra parti til parti, siden resultatene hele tiden må kalibreres opp mot de gjeldende forholdene på stedet og tolkningene dermed er relative. Det er derfor lagt med egen fargeskala for hvert parti.

### K.1 Parti 1: Pel nr. 6326-6268

Sonderhull (lange) og hull til forbolter (korte):

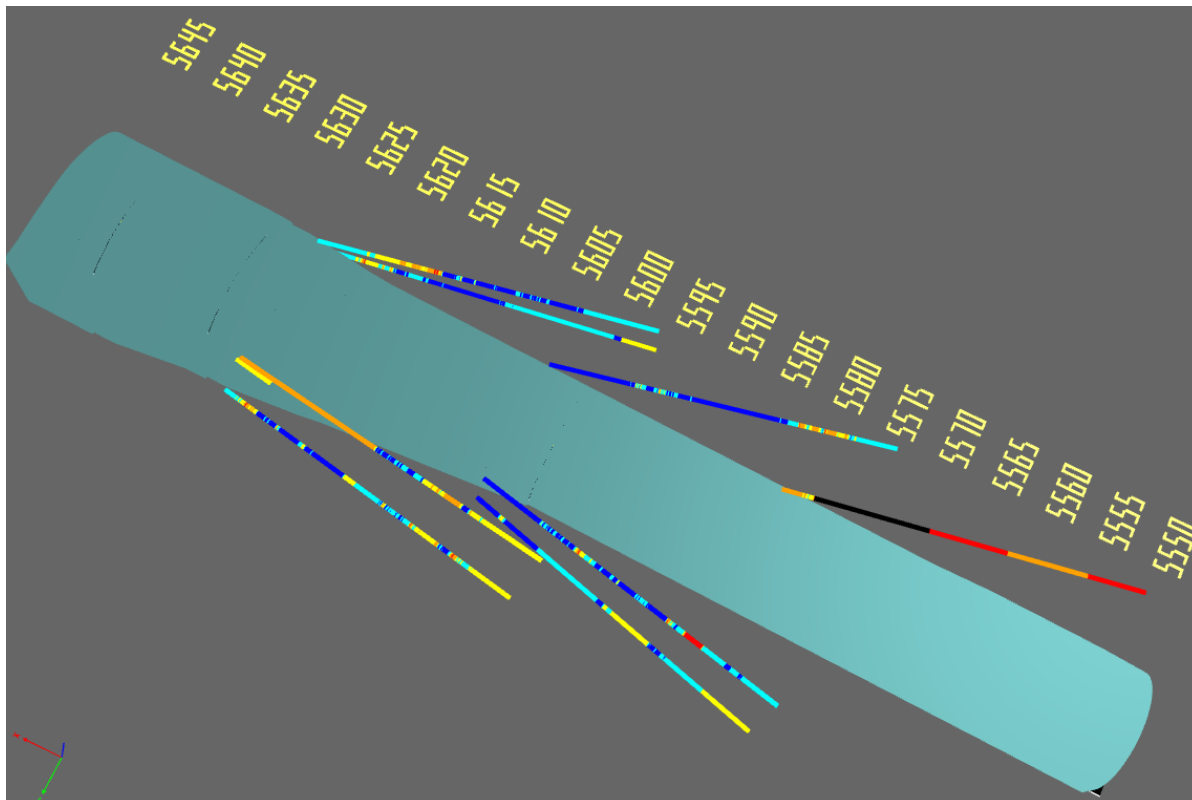


Tolket hardhet		
Beskrivelse	Verdi	Farge
Opp til 2,3 m/min	-40.000	Blue
2,3 - 3,1 m /min	-20.000	Cyan
3,2 - 3,8 m/min	0.000	Yellow
3,9 - 4,5 m/min	20.000	Orange
4,6 - 5,3 m/min	40.000	Red
Over 5,3 m/min	500.000	Black



## K.2 Parti 2: Pel nr. 5620-5569

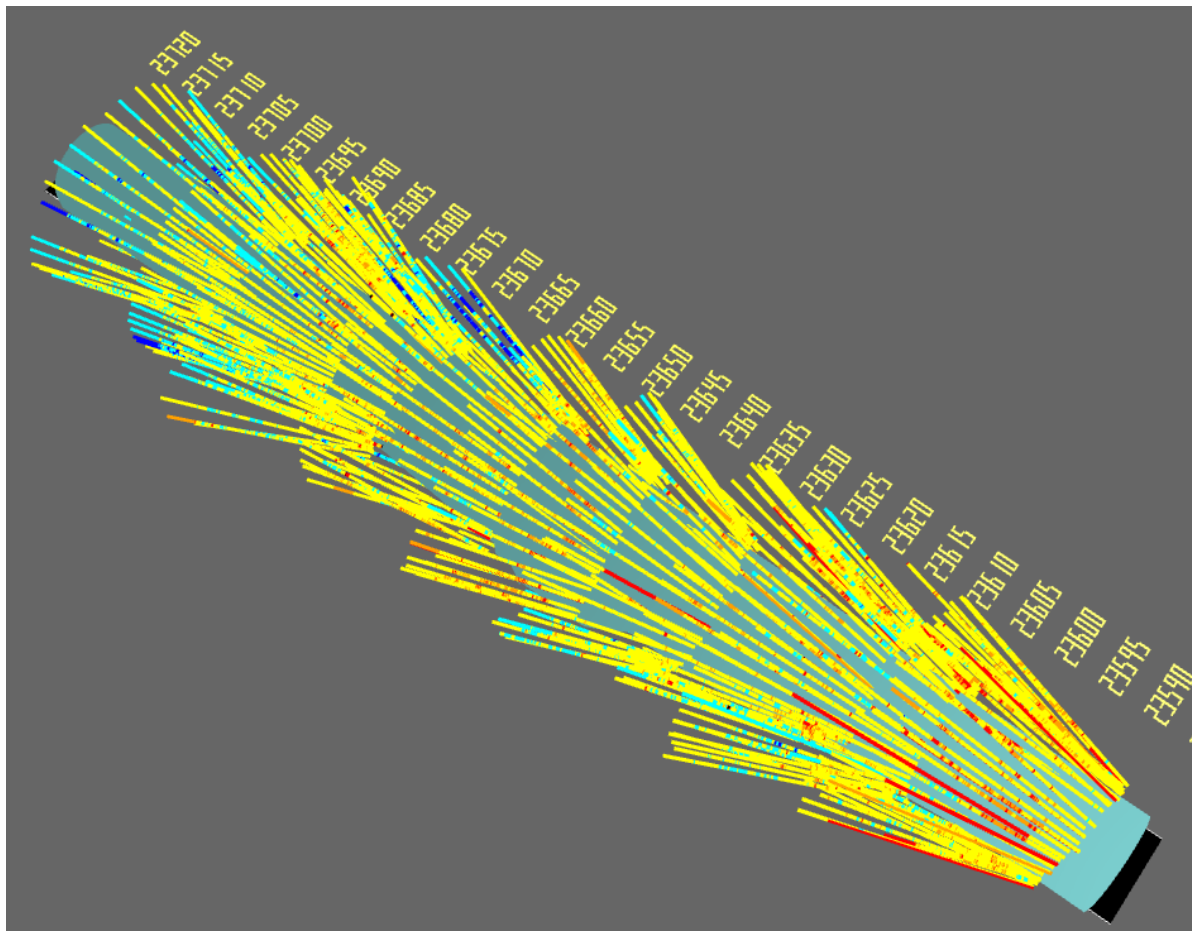
Sonderhull:



Tolket hardhet		
Bekrivelse	Verdi	Farge
Opp til 2,3 m/min	-40.000	Blue
2,3 - 3,1 m /min	-20.000	Cyan
3,2 - 3,8 m/min	0.000	Yellow
3,9 - 4,5 m/min	20.000	Orange
4,6 - 5,3 m/min	40.000	Red
Over 5,3 m/min	500.000	Black

### K.3 Parti 3: Pel nr. 23600-23700

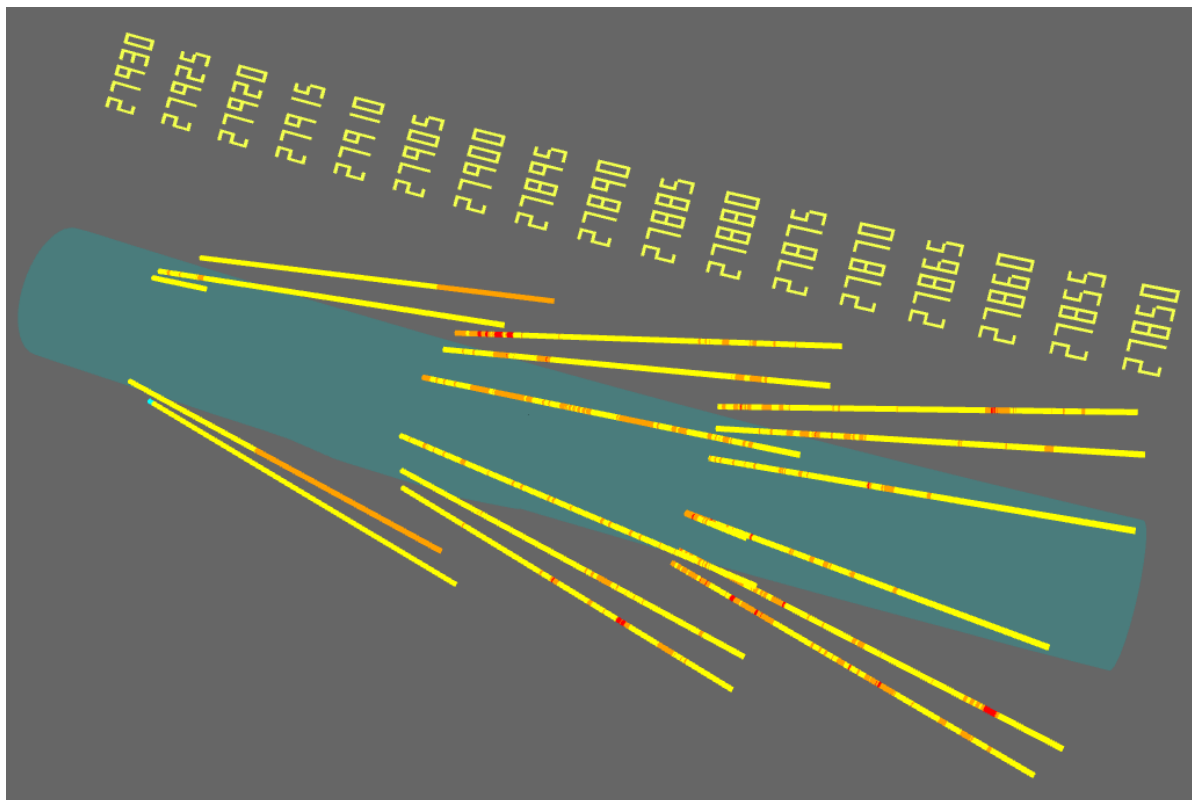
Sonderhull og injeksjonshull:



Tolket hardhet		
Bekrivelse	Verdi	Farge
Opp til 2,3 m/min	-50.000	Blue
2,3 - 3,1 m /min	-30.000	Cyan
3,2 - 3,8 m/min	0.000	Yellow
3,9 - 4,5 m/min	20.000	Orange
4,6 - 5,3 m/min	40.000	Red
Over 5,3 m/min	100.000	Black
500	500.000	Black

#### K.4 Parti 4: Pel nr. 27900-27858

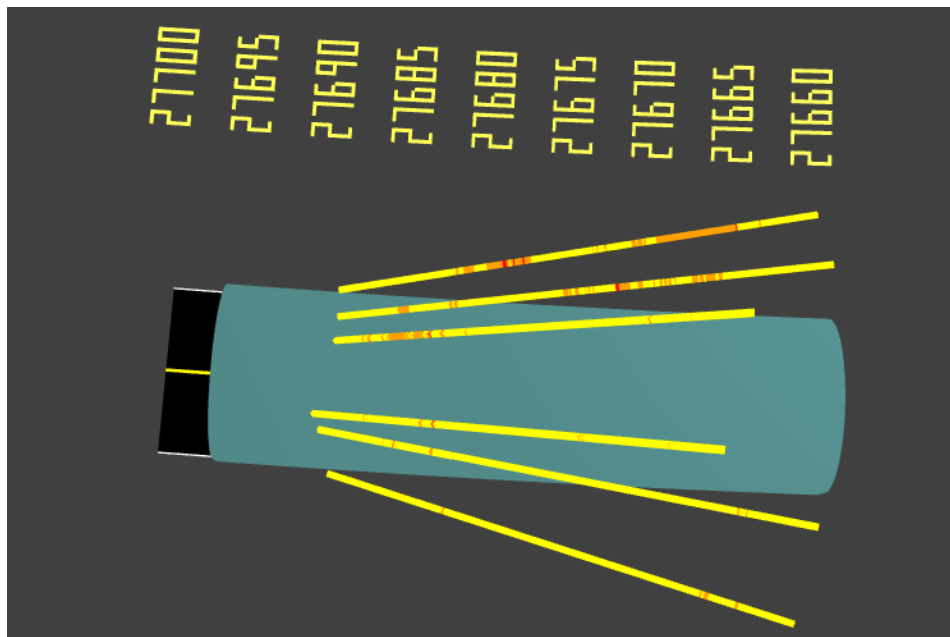
Sonderhull:



Tolket hardhet		
Bekrivelse	Verdi	Farge
Sakte boring indikerer hard bergmasse	-50.000	Blue
Saktere boring indikerer hardere bergmasse	-30.000	Cyan
Normalisert bergmasseverdi, middelsboring	0.000	Yellow
Normalisert bergmasseverdi, middelsboring	20.000	Yellow
Raskere boring indikere mykere bergmasse	40.000	Orange
Rask boring indikerer mykere bergmasse	100.000	Red
500	500.000	Black

## K.5 Parti 5: Pel nr. 27685-27672

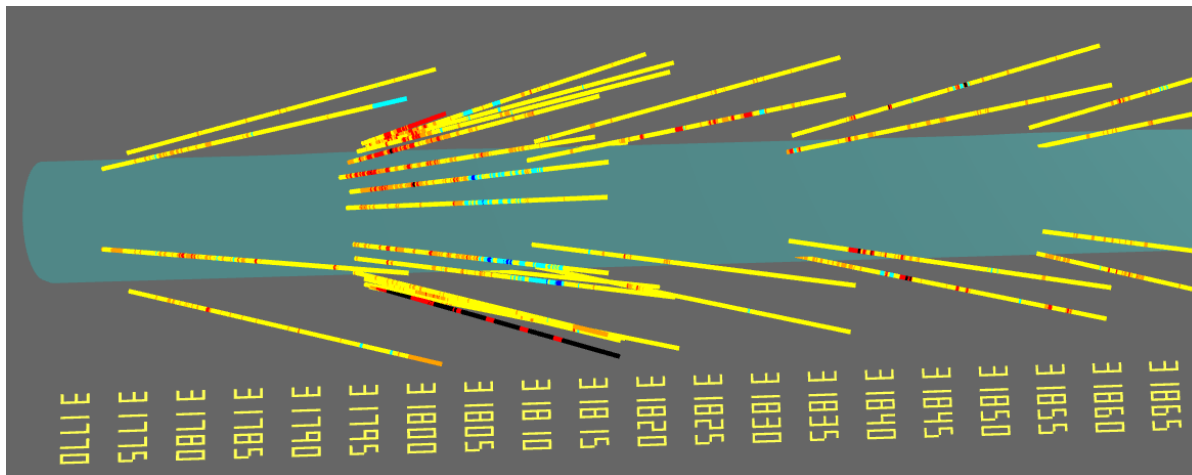
Sonderhull:



Tolket hardhet		
Bekrivelse	Verdi	Farge
Sakte boring indikerer hard bergmasse	-50.000	Blue
Saktere boring indikerer hardere bergmasse	-30.000	Cyan
Normalisert bergmasseverdi, middelsboring	0.000	Yellow
Normalisert bergmasseverdi, middelsboring	20.000	Yellow
Raskere boring indikere mykere bergmasse	40.000	Orange
Rask boring indikerer mykere bergmasse	100.000	Red
500	500.000	Black

## K.6 Parti 6: Pel nr. 31783-31865

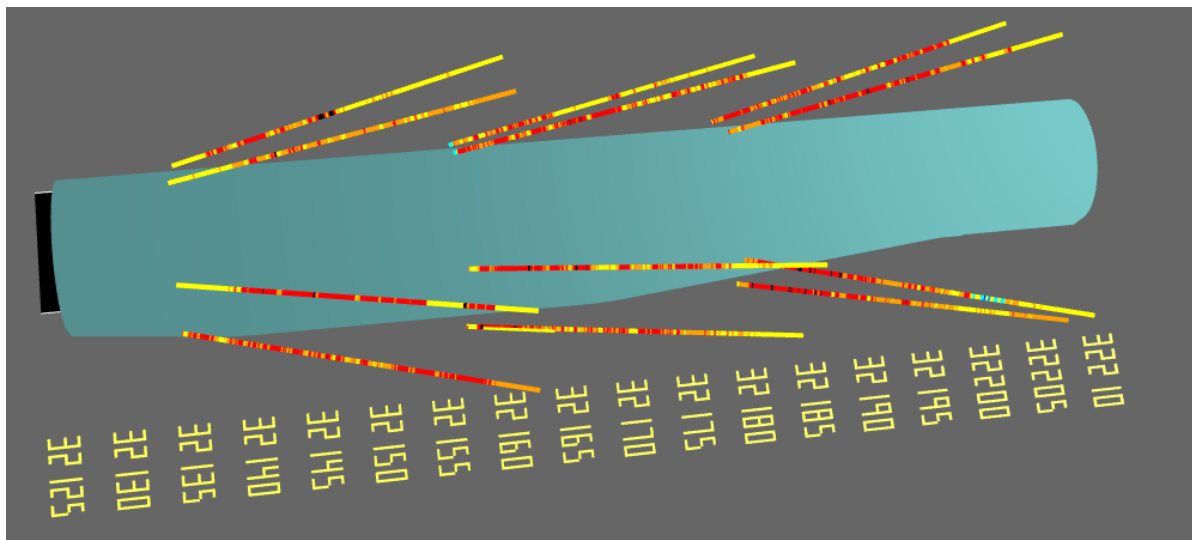
Sonderhull og injeksjonshull:



Tolket hardhet		
Bekrivelse	Verdi	Farge
Sakte boring indikerer hard bergmasse	-50.000	Blue
Saktere boring indikerer hardere bergmasse	-30.000	Cyan
Normalisert bergmasseverdi, middelsboring	0.000	Yellow
Normalisert bergmasseverdi, middelsboring	20.000	Yellow
Raskere boring indikere mykere bergmasse	40.000	Orange
Rask boring indikerer mykere bergmasse	100.000	Red
500	500.000	Black

## K.7 Parti 7: Pel nr. 32150-32202

Sonderhull:



Tolket hardhet		
Bekrivelse	Verdi	Farge
Sakte boring indikerer hard bergmasse	-50.000	Blue
Saktere boring indikerer hardere bergmasse	-30.000	Cyan
Normalisert bergmasseverdi, middelsboring	0.000	Yellow
Normalisert bergmasseverdi, middelsboring	20.000	Yellow
Raskere boring indikere mykere bergmasse	40.000	Orange
Rask boring indikerer mykere bergmasse	100.000	Red
500	500.000	Black

