

# Analyse av forventede forhold og mulige vannsikringsløsninger for planlagte undersjøiske tunneler langs Nordøyvegen

**Ingvild Hide Kvarstein**

Tekniske geofag

Innlevert: juni 2017

Hovedveileder: Bjørn Nilsen, IGP

Medveileder: Kåre Ingolf Karlson, Statens vegvesen, region midt

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Institutt for geovitenskap og petroleum





## MASTEROPPGAVEN

- Kandidatens navn:** Ingvild Hide Kvarstein
- Oppgavens tittel:** Analyse av forventede ingeniørgesologiske forhold og mulige vannsikringsløsninger for planlagte undersjøiske tunneler langs Nordøyvegen
- English title:** Analysis of anticipated engineering geological conditions and alternative concepts for water protection of planned subsea road tunnels at Nordøyvegen
- Utfyllende tekst:**
- Som del av fergefri forbindelse til Nordøyen er det planlagt tre undersjøiske tunneler med lengde 3,4 – 5,6 km. Det er gjennomført omfattende forundersøkelser for prosjektet i form av ingeniørgesologisk kartlegging på land, kjerneboring, akustikk og refraksjonsseismikk for de undersjøiske delene av tunnelene, m.m. Hovedtema for denne masteroppgaven er vannproblematikk knyttet de planlagte tunnelene. Masteroppgaven representerer en oppfølging av fordypnings-prosjekt utført av samme student høsten 2016, hvor det på grunnlag av litteraturstudier ble gjort en forstudie av mulige metoder for håndtering av innlekkasje i undersjøiske tunneler.

På grunnlag av gjennomgang og vurdering av resultater fra forundersøkelsene for de planlagte tunnelene skal det innledningsvis i dette masterprosjektet utarbeides en prognose for forventede ingeniørgesologiske forhold og utfordringer for tunnelene, spesielt med tanke på vannlekkasje. På grunnlag av den utarbeidede prognosen skal det så foretas en systematisk vurdering og diskusjon av behov for vannsikring langs tunnelene, og av mulige metoder for vannsikring.

Prognosen skal inkludere injeksjon under driving av tunnelene så vel hvelvløsninger/ vannsikring for driftsfasen. Flere alternative metoder for vannsikring skal diskuteres mot hverandre, ut fra kriterier som funksjon, bestandighet, pris, trafikkmengde m.v. Nye, «innovative» metoder skal inkluderes i vurderingene.
  - Oppgaven gjennomføres i samarbeid med Statens vegvesen, Region midt med ingeniørgesolog Kåre Ingolf Karlson som kontaktperson og eksternt medveileder.
- Studieretning:** Ingeniør- og miljøgesologi
- Hovedprofil:** Ingeniørgesologi og bergmekanikk
- Tidsrom:** 15.1.- 11.6.2017

  
Bjørn Nilsen, Professor/hovedveileder

SKJEMAET TAS INN SOM SIDE 1 I MASTEROPPGAVEN  
NTNU, 26 januar 2017

## FORORD

Denne masteroppgaven er skrevet som siste ledd i utdannelsen tekniske geofag ved NTNU, studieretning ingeniør- og miljøgeologi, og hovedprofil ingeniørgeologi og bergmekanikk. Oppgavens tittel og oppgavetekst er definert av professor Bjørn Nilsen ved institutt for geovitenskap og petroleum som også har vært hovedveileder. Oppgaven er skrevet i samarbeid med Statens vegvesen, og Kåre Ingolf Karlson ved Statens vegvesen region midt har vært ekstern veileder. Oppgaven er i sin helhet skrevet av Ingvild Hide Kvarstein.

Jeg vil rette en stor takk til Bjørn og Kåre for deres hjelp underveis i skriveprosessen, både i høst da jeg arbeidet med forstudie/prosjektoppgave, og i vår da masteroppgaven har blitt skrevet. Takk til Bjørn for gode diskusjoner og hjelp underveis. Hver gang jeg har gått fra kontoret ditt har jeg hatt en god følelse angående oppgaven, og ditt rolige vesen har bidratt til fravær av stress i prosessen med å skrive masteroppgave. Kåre, tusen takk for at jeg har kunne kontakte deg med konkrete spørsmål om Nordøyvegen og lekkasjeforhold i Atlanterhavstunnelen. Utover dette vil jeg takke geologer på som har arbeidet eller arbeider med Karmøytunnelen og Ryfylketunnelen; Erik Jensen og Magni Mausest for Ryfylketunnelen og Rune Stumo for Karmøytunnelen. Til slutt vil jeg takke en rekke personer som også har bidratt faglig til oppgaven: Anne-Merete Gilje, Gunnar Lotsberg, Svein Nordløyken, Gunnar Vistnes og Karl Gunnar Hoter.

Trondheim, 10. juni 2017

Ingvild Hide Kvarstein



## SAMMENDRAG

I forbindelse med utbyggingen av fylkesveg 659 Nordøyvegen skal det bygges tre undersjøiske tunneler. I denne masteroppgaven har det overhengende målet vært å utarbeide en innlekkasjeprognose for de tre tunnelene, samt å vurdere metoder for å håndtere innlekkasje (herunder forinjeksjon og vannsikringshvelv).

Lekkasjekrav angis på bakgrunn av konsekvenser for omgivelser, anleggsdriften og til slutt den ferdige tunnelen. For å imøtekomme kravet kan det injiseres under drift og etableres vannsikringshvelv. Det finnes ulike strategier for injeksjon, blant annet avhengig av bergartstype. Injeksjonsomfanget må tilpasses innlekkasjen på stoffen. Det finnes ulike hvelvløsninger for å håndtere restlekkasje, og parametere som levetid, vedlikeholdsbehov og investeringskostnad vil variere for de ulike løsningene. I tillegg bør en analyse av de totale kostnadene inngå i vurderingsgrunnlaget for valg av hvelvløsning.

Gjennom en studie av tre referanseprosjekter har erfaringer fra lekkasjeforhold blitt forsøkt overført til lekkasjeprognosen for tunnelene langs den planlagte Nordøyvegen. Tunnelene langs Nordøyvegen vil drives i granittisk gneis, og erfaring tilsier at lekkasjer kan forekomme i åpne sprekker/svakhetssoner da dette er en stiv bergart. Seismiske forundersøkelser er avgjørende for å anslå lekkasjefomfang i forbindelse med svakhetssoner. Basert på seismikk kan Q-verdi og bergmasseklasse anslås. I tillegg vil hovedspenningsretning, løsmasser på havbunn (mektighet og type), bergartsgrenser og bergoverdekning være av betydning for innlekkasjen i tunnelene. Fra en borkjerne er det tatt prøver fra en svakhetsone for å karakterisere leire. Det ble funnet noe leire, og denne ble klassifisert som middels aktiv smektitt basert på frisvelling og XRD-analyse.

Basert på innlekkasjeprognosen er det flere lengre strekker i tunnelene hvor det antas tørre forhold, eller med ubetydelige små lekkasjer (for eksempel delvis fuktige partier uten drypp). Dette indikerer at det er gode muligheter for å sette igjen disse uten vannsikringshvelv dersom forholdene tillater det. Blant løsninger godkjent av Statens vegvesen anbefales det sprøytebetingshvelv med membran.

## **ABSTRACT**

Three subsea tunnels are planned for county road 659 Nordøyvegen. The overall aim for this master thesis has been to develop a prediction of the expected water leakage in the tunnels, and evaluate methods to handle leakage (including pre-grouting and tunnel lining design).

The contractual limit for maximum water leakage is based on consequences for the environment, the constructional phase and finally the operational phase. Pre-grouting during the excavation of the tunnel and installing waterproof tunnel lining can be used to comply with this demand. There are many different pre-grouting strategies according to e.g. the rock type. The amount of pre-grouting is directly dependent on the tunnel-face conditions. There are different tunnel lining systems to handle the secondary water ingress. Variables such as technical lifespan, the need for maintenance and investment cost should be taken into consideration when deciding upon tunnel lining design.

A study of three reference projects has been done, where experiences from water ingress has been attempted transferred to the planned tunnels along Nordøyvegen. The tunnels at Nordøyvegen will be excavated in granite gneiss, and it is expected that leaking of water may occur through open cracks/weakness zones since the rock is of brittle character. Seismic surveys are crucial when estimating water ingress through weakness zones. Q-values and rock quality classification can be approximated from seismic surveys. The direction of the largest principal stress, quaternary deposits on the ocean floor, rock boundaries and rock cover are also of significance in terms of water ingress. Samples were taken from a weakness zone in the core drillings to study appearance of clay. Some clay was found, and it was classified as medium active smectite based on swell index and XRD-analysis.

The water leakage prediction reveal that the tunnels have several long sections where zero or insignificant water ingress (such as partially moist areas without dripping) is expected. If conditions allow it, tunnel lining may be left out for these sections. From the list of approved designs by the Norwegian Public Roads Administration, shotcrete lining with membrane is recommended for the tunnels.

## INNHold

Kapittel 1	Innledning.....	1
1.1	Bakgrunn for oppgaven .....	1
1.2	Metode .....	3
1.3	Avgrensninger .....	4
Kapittel 2	Viktige momenter fra forstudiet .....	5
2.1	Krav til tetthet .....	5
2.2	Injeksjon for å imøtekomme lekkasjekrav .....	6
2.3	Hvelvløsninger for å ivareta restlekkasje .....	8
2.4	Supplement til forstudiet .....	10
Kapittel 3	Regionalgeologi Nordøyvegen.....	12
Kapittel 4	Ingeniørgeologi langs Nordøyvegen .....	14
4.1	Tunnelprofiler .....	14
4.2	Utførte forundersøkelser .....	15
4.3	Generelt om oppsprekking og svakhetssoner langs Nordøyvegen .....	15
4.4	Ingeniørgeologi langs Haramsfjordtunnelen .....	20
4.5	Ingeniørgeologi langs Nogvafjordtunnelen .....	23
4.6	Ingeniørgeologi langs Fjørtoftfjordtunnelen .....	25
Kapittel 5	Regionalgeologi, ingeniørgeologi og erfaringer fra referanseprosjekter .....	29
5.1	Atlantehavstunnelen .....	29
5.2	Karmøytunnelen .....	34
5.3	Ryfylketunnelen.....	43
Kapittel 6	Oppsummering av lekkasjeforhold og vannsikring fra referanseprosjekter .....	51
Kapittel 7	Laborrietesting av materiale fra svakhetssone .....	54
7.1	Testmaterialet .....	55
7.2	Preparering av prøvematerialet.....	59
7.3	Fri svelling .....	60

7.4	XRD-analyse for å påvise innhold av svellemineral .....	61
7.5	Anvendelse av resultater.....	64
Kapittel 8	Prognose for vannlekkasje og injeksjon under driving .....	65
8.1	Parametere i lekkasjeprognosen .....	65
8.2	Injeksjonsprognose og strategi .....	69
8.3	Prognose for Haramsfjordtunnelen.....	70
8.4	Prognose for Nogvafjordtunnelen .....	75
8.5	Prognose for Fjørtoftfjordtunnelen .....	83
Kapittel 9	Aktuelle hvelvløsninger for Nordøyvegen .....	89
9.1	Hvelvløsninger.....	89
9.2	Omfang av vann- og frostsikringshvelv .....	91
Kapittel 10	Diskusjon.....	93
10.1	Innlekkasjeprognose .....	93
10.2	Potensielle svakheter med prognosen .....	94
10.3	Injeksjonsprognose og strategi.....	95
10.4	Valg av vann – og frostsikringshvelv .....	98
Kapittel 11	Konklusjon .....	99
Kapittel 12	Videre arbeid .....	101
Kapittel 13	Kildeliste .....	102
Kapittel 14	Vedlegg .....	106

# Kapittel 1

## Innledning

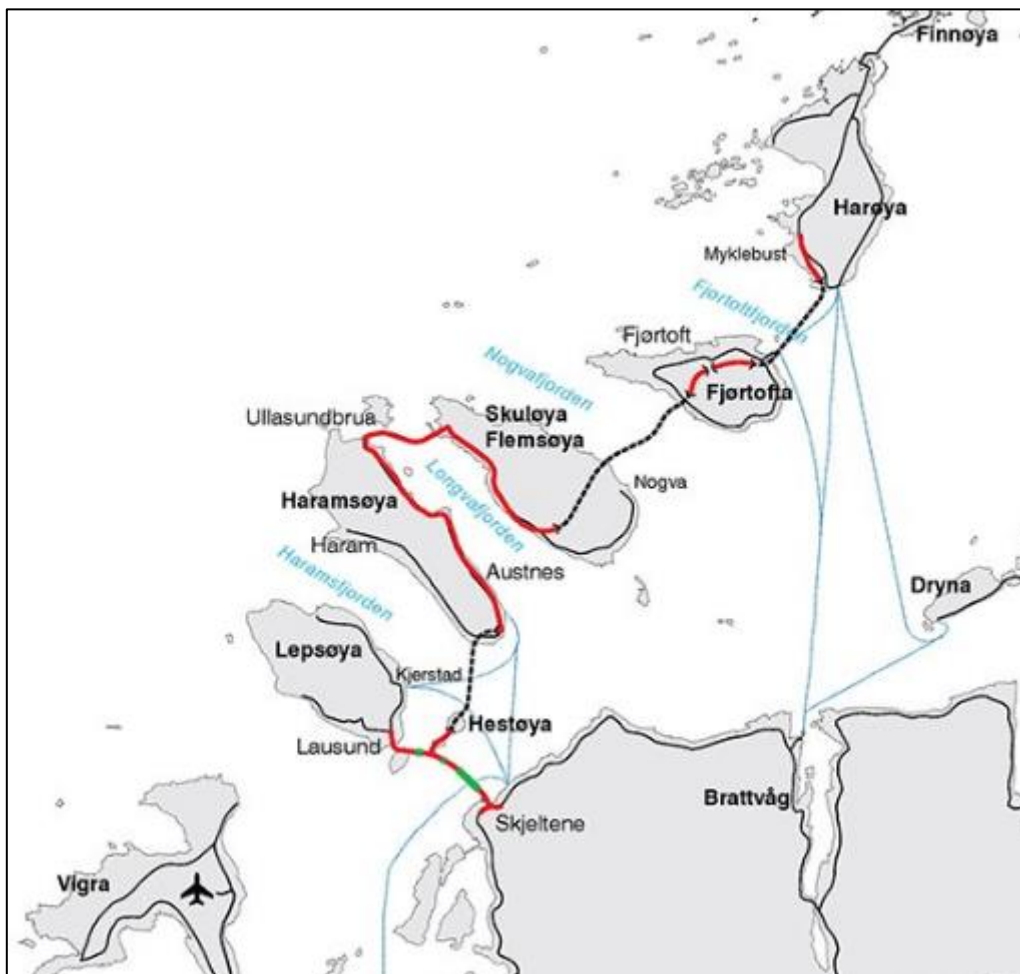
### 1.1 BAKGRUNN FOR OPPGAVEN

For tunneler skal det foreligge krav til maksimal innlekkasje (tetthetskrav), da vann i tunnelen kan by på utfordringer i både byggefase og driftsfase. Dette gjelder både lokalt i tunnelen men også for nærliggende natur og bebyggelse som er sårbare for grunnvanns- og poretrykksendringer. I Statens vegvesen sin håndbok N500 *Vegtunneler (2016b)* heter det seg at forundersøkelser blant annet skal omfatte krav til begrensnig av innlekkasje for ulike deler av tunnelen. Dette skal være basert på poretrykksmålinger og potensielt skadeomfang. I tillegg skal det videre fastsettes influensområde, vurderes flora og faunas sårbarhet, og kartlegges områder som er sensitive for setninger. Vannreservoarer og myrområder skal også registreres. I geologisk rapport til reguleringsplanen skal det angis anbefalt tillatt innlekkasje langs tunneltraséen.

I forundersøkelsene skal det utredes hvilke tiltak som må til for å tilfredsstille lekkasjekravet, og i den geologiske rapporten skal det angis det forventede omfanget av injeksjonsarbeid (Statens vegvesen, 2016b). I byggefase er det vanlig at innlekkasje vurderes basert på sonderboringer, eller eventuelt kjerneboringer på stoff. Dersom lekkasjen fra sonderhullene overstiger en gitt verdi skal det injiseres, slik at tetthetskravet imøtekommes. Restlekkasjen som oppstår håndteres i driftsfase med vann- og frostsikringshvelv samt pumper. Hvelvet leder lekkasje i heng og vegger til grøften. Pumpestasjoner frakter vannet ut av tunnelen (Klüver og Kveen, 2004).

Et karakteristisk trekk for undersjøiske tunneler er det uendelige overliggende reservoaret av potensielt lekkasjevann. Det dypeste punktet finner gjerne sted midtfjords, og tunnelgeometrien sørger for at alt lekkasjevann må pumpes ut av tunnelen (Nilsen, 2012). For undergrunnsanlegg er det utfordrende å produsere troverdige prognoser for innlekkasje. Samtidig vil gode prognoser kunne bidra til god planlegging av injeksjonsarbeid, og også kunne resultere i økonomiske besparelser. Gode prognoser vil også kunne bidra til å forhindre miljø- og setningsskader innenfor influensområdet (Holmøy, 2008b).

Fylkesveg 659 Nordøyvegen er en planlagt veg som skal gi fastlandsforbindelse mellom Skjeltene i Haram kommune og Nordøyane i Haram og Sande kommune. Prosjektet består blant annet av tre undersjøiske tunneler. Denne masteroppgaven tar for seg de tre planlagte undersjøiske tunnelene langs Nordøyvegen med hensyn på lekkasjeprosblematikk. Hovedmålet med oppgaven er å utarbeide en troverdig prognose for innlekkasje og injeksjonsbehov, samt å diskutere ulike løsninger for vannsikring. Et oversiktskart over de tre tunnelene er vist i Figur 1. Fra sør til nord går de planlagte tunneltraséene under Haramsfjorden (Haramsfjordtunnelen), Nogvafjorden (Nogvafjordtunnelen) og Fjørtoftfjorden (Fjørtoftfjordtunnelen). Haramsfjordtunnelen vil forbinde Hestøya med Haramsøya. Nogvafjordtunnelen vil forbinde Skuløya/Flemsøya med Fjørtofta, og Fjørtoftfjordtunnelen vil forbinde Fjørtofta og Harøya (Statens vegvesen, 2017). Tunnelene befinner seg i den vestre gneisregionen i Norge, og geologien er preget av grunnfjell omdannet under den kaledonske orgenese (Fossen, *et al.*, 2013).



Figur 1: Oversiktsbilde over de planlagte tunnelene. De svarte, stiplede linjene indikerer tunneltraséene.

Alle tunnelene er planlagt med tverrsnitt 8,5 meter, og faller innunder tunnelklasse B. Haramsfjordtunnelen har forventet ÅDT (årsdøgntrafikk) 1200, og har maksimal dybde 115 meter under havet. Denne blir omtrent 3450 meter lang. Nogvafjordtunnelen og Fjørtoftfjordtunnelen har begge forventet ÅDT 500. Maksimal dybde blir henholdsvis 135 og 123 meter under havet, med tunnallengder 5635 meter og 3435 meter. Tunnelene er lavtrafikkerte. De vil ha en maksimal stigning på 10%.

Denne oppgaven er en videreføring av prosjektoppgave/forstudie høst 2016 av samme forfatter. Forstudiet hadde som overordnet mål å sammenlikne aktuelle hvelvløsninger og metoder for å håndtere innlekkasje i undersjøiske tunneler. Den tok for seg tre ulike undersjøiske tunneler (også omtalt som referanseprosjekter) med hensyn på lekkasjeproblematikk og utført vannsikring. Referanseprosjektene var Atlanterhavstunnelen, Karmøy-tunnelen og Ryfylketunnelen. Disse er videre omtalt i denne masteroppgaven, men det er gjort et dypere dykk i konkrete forhold som gir lekkasje, og hvordan disse utfordringene har blitt håndtert. Dette er del av grunnlagsmaterialet som ligger bak den endelige lekkasje- og injeksjonsprognosen mot slutten av oppgaven.

## **1.2 METODE**

Grunnlagsmateriale for denne oppgaven er tilgjengelig og aktuell litteratur fra tidsskrift, bøker, konferanser og internett. Av håndbøker fra Statens vegvesen har nyeste versjon blitt benyttet. Enkelte geologiske rapporter og skriv fra Statens vegvesen har blitt innhentet via e-postkorrespondanse, og ikke alle disse er tilgjengelig på internett. Innhenting rundt konkrete opplysninger rundt lekkasjetall og injeksjonsmengder er gjort via e-post korrespondanse med ansatte i Statens vegvesen.

Det har blitt foretatt laboratorieundersøkelser av materiale fra en antatt svakhetssone langs tunneltraséen for Nogvafjordtunnelen. Materialet ble innhentet fra NGU (Norges geologiske undersøkelse) sitt borkjernelager på Løkken verk i Sør-Trøndelag. Det var forventet å finne leire i sonen da dette var beskrevet i kjerneloggingen. Materialet ble testet i ingeniørgeologisk laboratorie på NTNU.

Oppgaven inkluderer subjektive vurderinger fra enkeltpersoner kontaktet i forbindelse med oppgaven. Blant disse geologer på referanseprosjekter og prosjektleder innenfor vann- og frost i et entreprenørfirma. Gjennom studieforløpet for denne masteroppgaven har det gjentatte ganger blitt nevnt at (ingeniør)geologi er et erfaringsfag. Forfatteren har derfor valgt å inkludere

synspunkt og erfaringer fra aktuelle personer med tanke på erfaringsoverføring til aktuelle prosjekter.

### **1.3 AVGRENSNINGER**

Av laboratorieforsøk ble utført fri svelling og XRD-analyse. Det ble ikke testet svelletrykk. Ettersom TBM (tunnelboremaskin) ikke er en aktuell drivemetode for de undersjøiske tunnelene i prosjektet Nordøyvegen, er heller ikke betongelementer for TBM inkludert i denne oppgaven. Oppgaven består av en prognose for innlekkasje og tetting (injeksjon). Ytre konsekvenser av lekkasje og drøfting av influensområder er ikke inkludert i oppgaven.



# Kapittel 2

## Viktige momenter fra forstudiet

### 2.1 KRAV TIL TETTHET

Tetthetskrav skal fastsettes i den geologiske rapporten. Det skal også tiltak for å imøtekomme kravet, og deriblant antatt injeksjonsomfang (Statens vegvesen, 2016b). Tabell 1 angir typiske krav for norske tunneler, og er hentet fra NFF (Norsk forening for fjellsprengningsteknikk) sin håndbok nummer 06; *Praktisk berginjeksjon for undergrunnsanlegg* (NFF, 2010). Funksjonskrav legger kriterier for hvor store lekkasjer som kan aksepteres i tunneler. Dette baserer seg på hvilke konsekvenser lekkasjer i tunnelen kan ha for omgivelsene, selve anleggsdriften og for det ferdige anlegget. Det konkrete lekkasjekravet angis ofte som liter per minutt per 100 meter tunnel (eller per kilometer tunnel). Ut ifra strenge krav er tillatt innlekkasje satt til 5 l/min/100m tunnel (NFF, 2010). I følge Statens vegvesen sin nettside om injeksjon (Statens vegvesen, 2016) er det i undersjøiske tunneler (og for enkelte landtunneler med lavbrekk) utgiftene forbundet med utpumping av lekkasjevann avgjørende for hvilket lekkasjekrav som blir gjeldene.

Tabell 1: Typiske innlekkasjekrav (NFF, 2010).

	Strenge krav	Middels krav	Moderate krav
<b>Tillatt lekkasje</b>	5 l/min/100m	10 l/min/100m	20 l/min/100m
<b>Funksjonskrav</b>	Sensitive omgivelser	Moderat sensitiv	Anleggsavhengig

Dersom funksjonskravet er anleggsavhengig, er det typisk med krav på 20 l/min/100m tunnel. Dette tilsier en gjennomsnittlig lekkasje på 200 l/min/km tunnel. I dette tilfellet vil ikke miljø eller nærliggende bebyggelse stå i fare for å påvirkes negativt av drenering eller grunnvannssenking. For de tre undersjøiske tunnelene på Nordøyvegen er kravet satt noe høyere. I den geologiske rapporten står det skrevet at lekkasjer ned til tunnelen vil kunne ha en drenerende effekt på overliggende løsmasser. Dette gjelder særlig for områdene ved påhugget, da overdekningen her vil være liten sammenliknet med resten av tunnelen. Samtidig er det beskrevet at det generelt er lite sannsynlig at grunnvannssenking vil oppstå. Unntaket er påhugget på Flemsøya/Skuløya og Fjørtofta. Samtidig vil eventuelle små endringer ikke ha

negativ effekt for influensområdet, da dette består av myrområder hvor det tidligere er iverksatt dreneringstiltak. Kjerneboringer har gitt lite lekkasje. Det forventes moderat krav til tetting av tunnelene (Grob og Karlson, 2014). Klüver og Kveen (2004) foreslår at et moderat krav til innlekkasje kan tillate lekkasje over 15 l/min/100m tunnel (150 l/min/km tunnel). For Nordøyvegen er kravet til lekkasje satt til 300 l/min/km tunnel.

I Statens vegvesen sin rapport nr. 130 utarbeidet av Norconsult (2012) blir det anbefalt samlet gjennomsnittlig innlekkasje på 10-20 l/min/100m tunnel for lavtrafikkerte tunneler. Likevel er kravene for undersjøiske tunneler anbefalt strengere, da saltvann kan føre med seg store korrosjonsskader. Rapporten foreslår at det for nye tunneler bør jobbes mot at samlet gjennomsnittlig lekkasje ikke overstiger ca. 5 l/min/100m tunnel. Det strenge kravet har bakgrunn i at det skal etterstribes å oppnå 100 års levetid for bergsikringskonstruksjonen. Dette gjelder for tunneler som ikke skal støpes ut (Norconsult, 2012a). I følge NFFs håndbok nr. 06 er pumpekapasitet et forhold som har stor betydning for injeksjonsomfanget i undersjøiske tunneler (NFF, 2010). Ofte vil ikke innlekkasjen være konstant i tunneler. Over tid vil det foregå en naturlig tetting av vannførende sprekker. Flere faktorer kan bidra til dette, blant annet kjemiske utfellinger, svelling og avleiring. Resultatet blir reduksjon i lekkasje, og en nedgang i energibruk til pumpene (Hem, 2003).

## **2.2 INJEKSJON FOR Å IMØTEKOMME LEKKASJEKRAV**

Statens vegvesen har utarbeidet strategiske mål for nye vegtunneler. Et av disse er at tunneler skal dimensjoneres slik at tunnelkonstruksjonen og bergsikringen har en teknisk levetid på 100 år. I tillegg skal vann- og frostsikringshvelv ha en levetid på 50 år. For å imøtekomme målene er et av tiltakene å øke bruken av forinjeksjon. Dette er fordi forinjeksjon bidrar til gode arbeidsbetingelser/økt stabilitet når primærsikringen installeres, samtidig som tunnelens levetid drar fordel av få eller ingen vannlekkasjer (Norconsult, 2012a).

Grovt sett er det to strategier innenfor forinjeksjon; systematisk forinjeksjon og behovsprøvd forinjeksjon. Systematisk injeksjon er vanlig i områder med strenge krav til tetthet, og vil si at hele tunnelstrekningen injiseres med nødvendig overlapp. Det er vanlig med for eksempel 24 meters hull, og at ny injeksjonsrunde skjer etter tre salver à fem meters lengde. Dette gir en overlapp på ni meter. Behovsprøvd injeksjon går ut på at det på stuff kontinuerlig vurderes om injeksjon er nødvendig. Det er vanlig at en målbar grenseverdi setter kriteriet for når injeksjon skal utføres, i form av lekkasje fra sonderhull (eller eventuelt kjerneborhull). For undersjøiske

tunneler skal det sonderbores systematisk når tunnelen er under kote 0. Generelt skal sonderboring utføres med MWD (Measurement While Drilling) (Statens vegvesen, 2016b).

I tillegg til å øke tettheten i tunnelen vil injeksjon også ha en positiv effekt på stabiliteten i fjellmassene. Dette kan illustreres ved Q-verdi. Sprekkene i bergmassen fylles av sement, og den totale bergmassen (inkludert sementen) vil få en ny og forbedret Q-verdi. Økningen i Q-verdi vil kunne gi en økning på inntil to kvalitetsklasser dersom bergmassen har vann tilstede. Dersom bergmassen ikke inneholder vann, vil bergmassekvaliteten kunne økes med en klasse. For at denne sammenhengen skal være gjeldene er det vesentlig at sementen trenger godt inn i omliggende sprekker. Inntrengningen kan reduseres dersom sprekkematerialet består av leir (Roald, 2003).

Klüver og Kveen (2004) beskriver hvordan bergartsegenskaper er avgjørende for valg av injeksjonsstrategi. De deler inn bergmassen grovt i fire kategorier, og beskriver strategi deretter. Videre følger en kort oppsummering av de ulike kategoriene;

#### **Bergartstype A.**

Stive bergarter med åpne sprekker uten belegg. Høy konduktivitet, men lett å injisere. Eksempelvis sandsteiner, Oslofjelllets lavabergarter og granitter. Injeksjonsstrategi: lange injeksjonshull opptil 45 meter (forutsatt god overdekning), og få hull (ned mot 7-8 ved gode forhold og tverrsnitt T8,5 meter). Vann/ement-forhold bør være lavt. Dette for å unngå uheldig stort omfang av injisering grunnet god konduktivitet i bergmassen.

#### **Bergartstype B.**

Metamorf bergmasse som er middels lett å injisere. Belegg på sprekker, som gjerne er leiromvandlet og med kanaldannelse. Blant annet prekambriske gneiser faller innenfor kategorien. Injeksjonsstrategi bør tilpasses varierende sprekketrylling som sand, silt og bergartsfragmenter. Økt leirinnhold gir nedsatt injiserbarhet. Hullengde bør ligge mellom 15-30 meter, med flere hull enn for bergartstype A (15-40 hull). Mye leire og strenge tetthetskrav bør resultere i kortere men flere injeksjonshull. Dessuten bør injeksjonstrykket være høyt under slike forhold. Vann/ement-forhold foreslås mellom 1,2 og 0,9 innledningsvis. Deretter kan dette reduseres til 0,5 når trykket øker til 60-80 bar. Avslutningstrykket bør ligge enda høyere.

#### **Bergartstype C.**

Tettere bergarter av plastisk karakter, herunder fyllitt, leirskifer og grønnstein med flere. Disse kjennetegnes med lav konduktivitet. Sprekker/slepper er gjerne tette med høyt leirinnhold. Dette gir dårlig kommunikasjon mellom injeksjonshullene i skjermen. Små

kanaler kan føre til hyppige små lekkasjer, gjerne i forbindelse med større svakhetssoner. Anbefalt strategi er stort hullantall, relativt korte hull og gjerne høyt trykk mot slutten av injiseringen. En bør vise forsiktighet med å redusere vann/ement-forholdet for å sikre best mulig flytegenskaper.

### **Bergartstype D.**

Innenfor denne kategorien kan det oppstå store og også ekstreme vannlekkasjer. Dette er grunnet bergmasse som har undergått tektonisk påvirkning (kan gi svært åpen oppsprekking) eller karstfenomener (åpne rom i berget). Ingen spesiell strategi er anbefalt konkret for denne bergartstypen, selv om det nevnes at ved ekstreme tilfeller har det fungert å pumpe inn store betongmasser. For å lykkes med tunneldriving bør lekkasjene påvises tidlig foran stoff, slik at god planlegging og gjennomføring er mulig.

Tunnelene i referanseprosjektene er alle injisert ut ifra en strategi som tilsier behovsprøvd injeksjon. For Ryfylketunnelen er lekkasjekravet satt til 200 l/min/km tunnel. Grunnlaget for å vurdere injeksjon baserer seg på lekkasje i sonderhull, og observasjon og måling av lekkasje på stoff. Overstiger lekkasjen det som tillates skal det injiseres (Norconsult, 2012c, 2012b). Ved driving av Karmøytunnelen var samme tettestrategi gjeldene. Fra sonderhullene var det tillatt maksimalt 2 liter per minutt fra et enkelthull. Samlet skulle ikke lekkasjen fra alle sonderhullene overstige 5 liter per minutt. Disse verdiene ble satt med bakgrunn i et gjennomsnittlig lekkasjekrav på 200 liter/min/km tunnel (Hatlenes, 2011). For Atlanterhavstunnelen var det krav om maksimal innlekkasje under 300 l/min/km tunnel. Geolog for prosjektet var Kåre Ingolf Karlson i Statens vegvesen region midt. Han utdyper via e-post korrespondanse at det i kontrakten var spesifisert at dersom samlet lekkasje fra alle sonderhullene (4-6 hull) overstiger 10 l/min skulle det injiseres (pers. kom., Karlson, 2016).

Injeksjonsstrategi vil påvirke økonomien i et prosjekt. Investeringer i forinjeksjon for å forhindre lekkasjer vil på sikt kunne lønne seg da levetidskostnader og driftskostnader ved utpumping av lekkasjevann bør inkluderes i det totale regnestykke for prosjektet (NFF, 2010).

### **2.3 HVELVLØSNINGER FOR Å IVARETA RESTLEKKASJE**

Ulike metoder for vannsikring (og eventuell frostsikring) av tunneler er presentert i Tabell 2. Løsningene i de fire første radene er alle godkjente som fullverdige løsninger i Statens vegvesen sin håndbok om vegtunneler (2016b). Som det fremkommer av tabellen er det mest vanlig med hvelv av betongelementer eller sprøytebetong i norske vegtunneler. Jernbaneverket (2015) har i sin rapport *Anbefalte konstruksjonsprinsipper* diskutert ulike hvelvløsninger. Selv om det er

viktig å være bevisst at det er ulike dimensjoneringskriterier og behov for veg- og jernbane, er flere av momentene fra rapporten overførbare. Spesielt er det beskrevet utfordringer med ulike hvelv. Et hvelv av betongelementer er en robust løsning. Elementene er massive, noe som krever løfteutstyr og kompetanse hos montører. I tillegg må store volum fraktes fra produsent og til tunnelen. Geometriske utfordringer i nisjer kan oppstå. Hvelv av sprøytebetong ansees for å være noe mer fleksibelt. Sprøytebetonghvelvet vannsikres med membran, eller vann- og frostsikres med PE-skum. Sistnevnte er for jernbanetunneler ikke lenger godkjent, med bakgrunn i potensiell brannfare knyttet til bruken av PE-skum. Buvik (2007) beskriver fullskala branntester som er utført for å undersøke brannfarer med PE-skum. Konklusjonen med testene var at PE-skummet, brannsikret med sprøytebetong, fortsatt skal være godkjent for vegtunneler. Samtidig bør det etterstrebes å finne ikke-brennbare erstatninger til PE-skum på sikt. Både hvelv av sprøytebetong og hvelv av betongelementer er fleksible med tanke på frostsikring. For betonghvelv anvendes XPS-plater, og for sprøytebetonghvelv anvendes PE-skum (Statens vegvesen, 2016b).

*Tabell 2: Oversikt over ulike hvelvløsninger. De ulike verdiene baserer seg noe på tabell 2 fra rapporten **Jernbanetunneler: anbefalt konstruksjonsprinsipp** (Jernbaneverket, 2015). Verdiene for løsningen membran/sprøytebetong er basert på erfaringer fra prosjektingeniør for vann- og frostsikring i entreprenør Skanska AS, da denne løsningen ikke var inkludert i rapporten fra Jernbaneverket. Merk at prosjektspesifikke detaljer og løsninger kan medføre avvik fra forholdene beskrevet i tabellen.*

<b>Aktuelle løsninger</b>	<b>Investeringskostnad</b>	<b>Vedlikeholdsbehov</b>	<b>Antatt levetid</b>	<b>Anvendt</b>
<b>Membran/Betongelementer</b>	Middels/Høy	Middels	Høy	Mye
<b>Membran/sprøytebetong</b>	Middels/Lav	Høyt	Middels	Mye
<b>PE-skum/sprøytebetong</b>	Middels	Høyt	Middels	Mye (avtagende)
<b>Kontaktstøp med membran</b>	Høy	Lavt	Høy	Middels (økende)
<b>Sprøytbar membran/sprøytebetong</b>	Lav	Lavt	Høy	Lite/under utvikling

Kontaktstøpt hvelv med membran er i motsetning til betongelementer plass-støpt. Løsningen skiller seg også fra hvelv av sprøytebetong og betongelementer ved at konstruksjonen er i direkte kontakt med den bakenforliggende bergsikringen. Løsningen er i utgangspunktet

uisolert. En klar fordel med denne hvelvløsningen er at det kreves minimalt med vedlikehold i løpet av levetiden (Jernbaneverket, 2015). Statens vegvesen (2016a) beskriver fordelene med denne type vannsikring med at hvelvet monteres uten forankringsbolter og andre korrosjonsutsatte deler. Samtidig er det en klar fordel at det ikke er rom bak hvelvet. Dette fjerner mulighet for eventuell frostoppbygging bak hvelvet. Ved brann vil heller ikke flammene kunne spre seg bak hvelvet. Løsningen er beskrevet av Norconsult (2012a) i deres rapport om strategi for bygging av nye vegtunneler. Her foreslås det at hvelvløsningen skal være aktuell for tunneler som er middels- eller høytrafikkerte ( $8\ 000 < \text{ÅDT} < 15\ 000$ ). Det må tas høyde for at det teoretiske profilet må utvides med omtrent 35 cm for å romme hvelvet. I Norconsults rapport påpekes det spesielt fordelene med at det ikke er rom bak hvelvløsning. Dette er en av flere tiltak som skal kunne sikre en levetid på minst 50 år for vann- og frostsikringen, noe som er et av de overliggende målene i rapporten.

Sprøytbar membran er en innovativ løsning som enda ikke er godkjent for vegtunneler av vegvesenet. I tunnelen påføres membranen i en såkalt sandwich-konstruksjon bestående av tre komponenter i rekkefølgen; sprøytebetong (fiberarmert) – sprøytbar membran – sprøytebetong (fiberarmert). Den sprøytbare membranen er noen millimeter tykk, og eliminerer behovet for annen type membran eller PE-skum (Holter, 2014). Løsningen kan være aktuell for veg- og jernbanetunneler der forholdene tillater det. Ideelt bør ikke det hydrostatiske trykket overstige 700 kPa (7 bar), da det enda ikke er beskrevet hvordan trykk utover dette påvirker konstruksjonen. I tillegg bør ikke konstruksjonen utsettes for temperaturer under 3°C (i praksis kan lufttemperaturen være vesentlig lavere) (Holter, 2015). Fordeler med denne type løsning er lavt materialforbruk, lav investeringskostnad, lite transport av materialer og utstyr og ukomplisert montering (Jernbaneverket, 2015).

## **2.4 SUPPLEMENT TIL FORSTUDIET**

Som et nyttig supplement til forstudie har undertegnede vært i møte med prosjektleder for vann- og frostsikring i entreprenørselskapet Skanska AS, Svein Nordløkken. Ved å innlemme noen erfaringer fra en entreprenørs synspunkt vil det kunne være mulig å oppnå et mer nyansert sammenlikningsgrunnlag for vann- og frostløsninger. Dette kapittelet er et resultat av samtaler med Nordløkken.

Ved bestemmelse av vann- og frostsikringsshvelv er det viktig at det tas hensyn til tunnelklasse. Like etter spiller gjerne det økonomiske en vesentlig rolle. Basert på interne dokumenter og tall kan han opplyse at sprøytebetonghvelv med membran er en rimeligere løsning enn PE-skum.

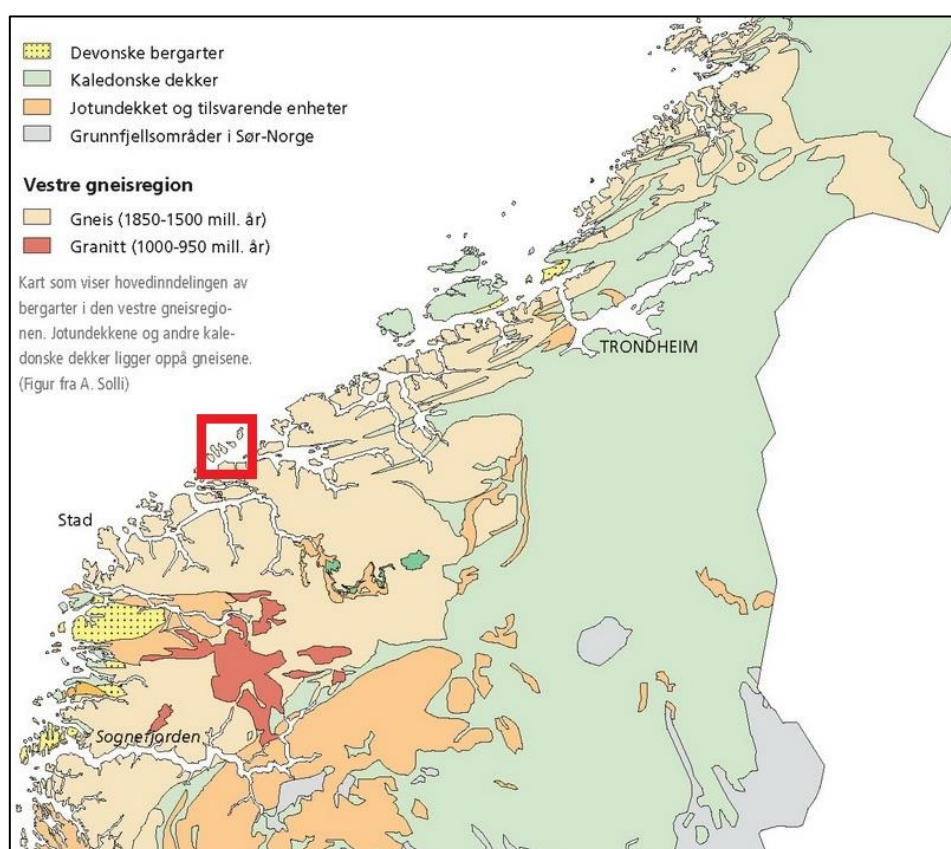
Et grovt overslag peker mot at kostnaden ligger omtrent 100 kr lavere per kvadratmeter for membranløsningen. Ettersom begge hvelvene består av sprøytebetong er det generelt sett prisen for PE-skum og membran som utgjør forskjellen. Merk at prisforskjellen er gitt ut ifra et generelt snitt. Det finnes mange ulike varianter innenfor membran og PE-skum. For eksempel leveres PE-skum med ulik tykkelse, den kan være kryssbundet eller ikke kryssbundet, og leveres med eller uten «leppe». Hvelv av betongelementer er en dyrere løsning enn sprøytebetonghvelvene. Ut ifra et generelt snitt er prisforskjellen mellom komplett betongelementhvelv (med betongelementer, bakenforliggende membran og alt av festeanordninger) og sprøytebetonghvelv med PE-skum vesentlig større enn mellom de ulike hvelvene av sprøytebetong.

Logistikken rundt montering og transport av hvelvløsningen kan også inkluderes i en sammenlikning av løsningene. PE-skum krever mer transport enn membran, samtidig som membranen er noe raskere å montere. Betongelementer krever igjen enda mere transport. Når det gjelder levetid har Nordløkken har en teori som tilsier at membran gjerne holder seg noe bedre enn PE-skum, uten at det finnes noe konkret dokumentasjon på dette. Teorien går ut på at PE-skum over tid vil stå og vibrere, noe som gjør at boltehullene vil utvide seg over tid. Betongelementer har igjen enda bedre levetid, og er lettere å vedlikeholde enn sprøytebetonghvelv. Avslutningsvis påpeker Nordløkken at best levetid og minst vedlikeholdskostnader oppnås gjennom kontaktstøpt hvelv (pers. kom., Nordløkken, 2017).

# Kapittel 3

## Regionalgeologi Nordøyvegen

*Den vestre gneisregionen* er betegnelsen på et stort område i Norge som er dominert av prekambriske bergarter. Blant bergartene finner vi forskjellige granittiske gneiser og migmatitter. Migmatittforekomstene kan inneholde linser og lagvis amfibolitt og glimmerrik gneis. Områdets utstrekning kan betraktes på Figur 2.



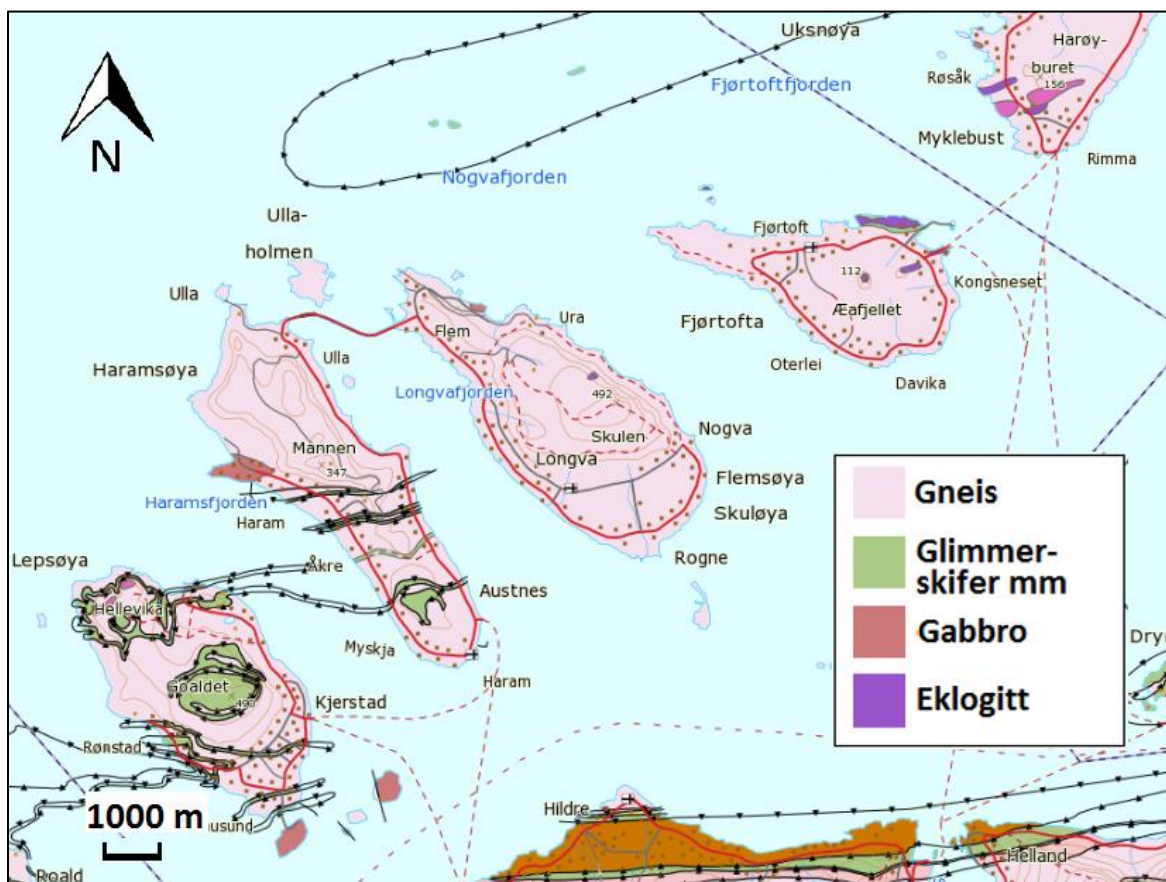
*Figur 2: Bergartsinndeling i den vestre gneisregionen. Øst for regionen ligger kaledonske dekker. Disse ligger stratigrafisk høyere enn gneisregionen. Illustrasjon av A. Solli, side 113 (Nordgulen og Andresen, 2007). Den røde firkanten markerer Nordøyvegen.*

Figur 3 viser geologien ved Nordøyvegen. Majoriteten av berggrunnen i Møre og Romsdal er dominert av gneis, med dannelse i perioden mellomprekambrium. NGUs (Norges Geologiske Undersøkelse) berggrunnskart med skala 1:250 000 beskriver gneisen som «Hornblenderik migmatittgneis, mørk, rik på amfibolittlag og linser». Linsene forekommer på Haramsøya og



Fjørtofta, og består av glimmerskifer, granat-glimmerskifer, glimmergneis og granatamfibolitt. Disse har en øst-vest strøketning med noen avvik. Enkelte plasser på Harøya, Fjørtofta og Skuløya/Flemsøya er det kartlagt eklogittforekomster. Ettersom eklogitt er en metamorf bergart omdannet under ekstremt høye trykk og temperaturer, tyder dette på at migmatittgneisen i området også er omdannet under ekstreme forhold (Sigmond, 2012). Dette er et resultat av at den vestre randen av Baltika ble subduert under den kaledonske fjellkjededannelsen. Møre og Romsdal er et eksempel på et område som ble presset spesielt langt ned, og høytrykksbergarter er derfor vanlig i regionen (Nordgulen og Andresen, 2007).

Noen av svakhetssonene langs Nordøyvegen er trolig del av en større sidelengs skjærson, kjent som Møre-Trøndelag forkastningskompleks. Komplekset er preget av sidelengs bevegelse i blant annet Devon-tiden, og strøketningen er hovedsakelig sørvest-nordøst. Bevegelsen fant sted etter den kaledonske fjellkjedefoldingen, da kontinentene drev fra hverandre igjen etter at kollisjonskreftene avtok. Skjærsonen er derfor en sidelengsforkastning dannet av ekstensjonskrefter (Fossen, Dallman og Andersen, 2013).

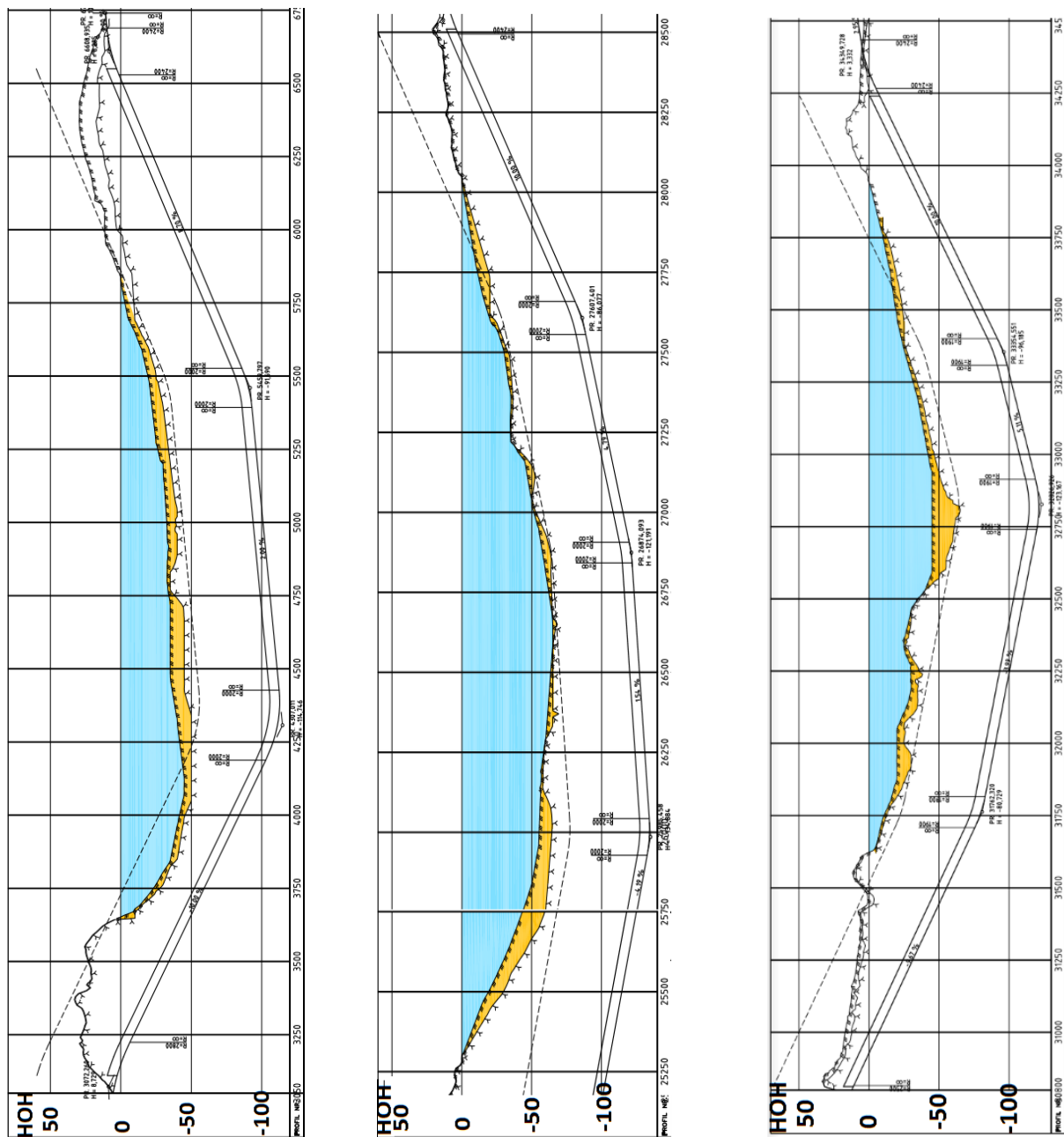


Figur 3: Geologisk kartutsnitt fra berggrunnsgeologidatabasen til NGU. Berggrunnskart N250. Tilgjengelig fra [www.ngu.no](http://www.ngu.no).

# Kapittel 4

## Ingeniørgeologi langs Nordøyvegen

### 4.1 TUNNELPROFILER



Figur 4: Profiler over tunnelene. Fra venstre: Haramsfjordtunnelen, Nogvafjordtunnelen, Fjørtoftfjordtunnelen. Profilet for Nogvafjordtunnelen mangler den sørligste biten av tunnelen (den delen som går under Flemsøya/Skuløya) (Grob og Karlson, 2014).

## 4.2 UTFØRTE FORUNDERSØKELSER

Berg- og geoteknikkseksjonen i Statens vegvesen har foretatt geologisk kartlegging og undersøkelser for de undersjøiske tunnelene, med hjelp av ulike aktører. På grunnlag av dette er det gitt ut en ingeniørgeologisk rapport. Rapporten ble ferdigstilt i 2014. De utførte undersøkelsene er:

- Feltkartlegging på utvalgte områder
- Studier av topografisk kart og flyfoto
- Akustikk og refraksjonsseismikk
- Styrt kjerneboring med vanntapsmåling
- Magnetisk og batymetrisk kartlegging
- Grunnboringer
- Tynnslipmikroskopering

For detaljerte beskrivelse av undersøkelsene henvises det til rapporten (Grob og Karlson, 2014).

## 4.3 GENERELT OM OPPSPREKKING OG SVAKHETSSONER LANGS

### NORDØYVEGEN

**Oppsprekking:** Under feltkartleggingen ble det registrert oppsprekking. Rapporten viser til fem sprekkesett, samt foliasjon. Disse ble kartlagt i (eller i umiddelbar nærhet til) påhuggsområdene. Generelt er sprekeavstanden varierende, og gneisen opptrer i stor grad som massiv. Sprekkene er gjerne plane eller svakt bølgete, og sprekkeruheten veksler mellom glatt og svak ru (Grob og Karlson, 2014). Ettersom sprekkene er registrert i dagen, må det tas forbehold om at sprekkarakter på større dyp vil kunne ha andre karakteristiske egenskaper. En av årsakene til dette er at sprekker under grunnvannspeilet vil være fylt med vann. Sprekkefyllet kan derfor også variere fra overflaten, og friksjonen kan være redusert grunnet belegg som kan ha blitt dannet. Samtidig vil en kunne anta at sprekkene i dagsonen vil ha svakere karakter da temperaturforskjeller vil kunne føre til oppsprekking (Nilsen og Broch, 2012).

Videre følger en generell beskrivelse av de fem sprekkesettene og foliasjon (Grob og Karlson, 2014):

**S1:** Opptrer som gjennomsettende på alle lokaliteter med unntak av Hestøya. Det er stor variasjon av strøk- og fallretninger. Planheten er enten plan eller svakt bølgete.

**S2:** Opptrer i likhet med S1 som gjennomsettende på alle lokaliteter med unntak av Hestøya. Sprekkeavstanden er observert til minimum noen desimeter, og maksimalt et par meter. Planheten er enten plan eller svakt bølgete.

Sprekkesettene S1 og S2 består av sprekker som gjerne er lukket (uten sprekkefyll). Ruheten varierer fra glatt til svakt ru, med enkelte avvik.

**S3 – S5:** S3, S4 og S5 finnes på Hestøya og er ikke like fremtredende på andre lokaliteter. S3 er observerbare også på Fjørtofta. S3-S5 har ulike strøk/fall-retning, men felles er at sprekkenes fremstår som plane, med enkelte svakt bølgete avvik. Sprekkenes er i de fleste observerte tilfeller ru.

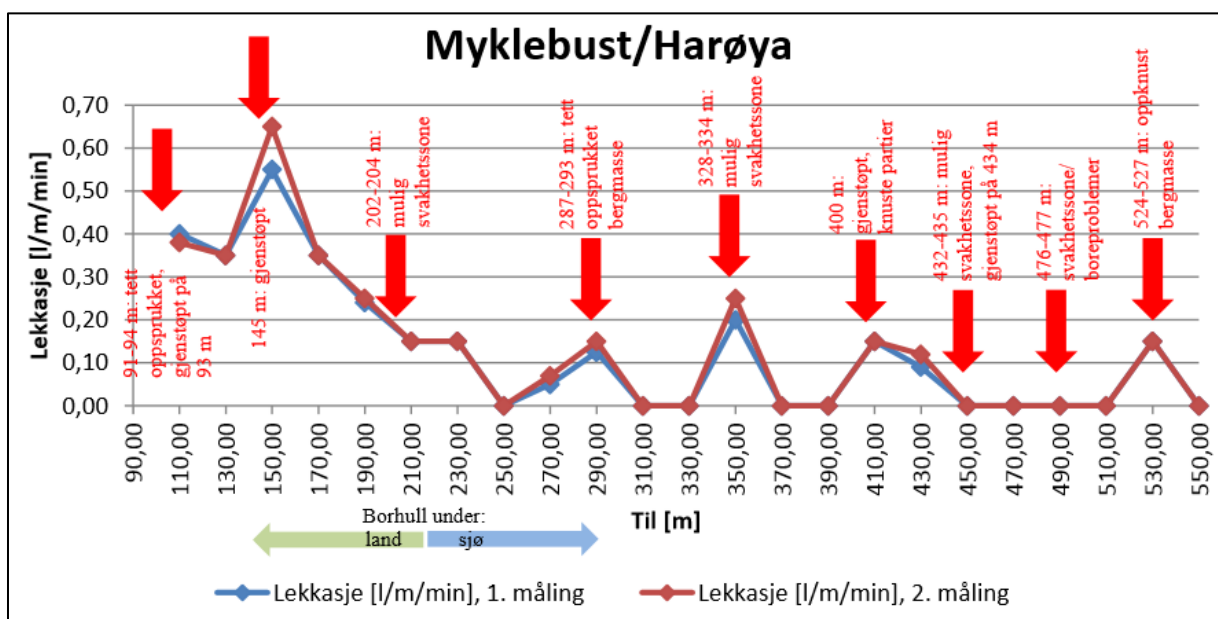
**F1:** Det ble observert foliasjon i gneisen på nesten alle de kartlagte lokasjonene. Unntaket var Hestøya. I følge berggrunnskart fra NGU er dette rimelig, da Hestøya består av gabbro og ikke gneis. Foliasjonen byr på store variasjoner når det gjelder strøk og fall. Generelt er gneisen massiv, og sprekkeavstanden veksler mellom noen titalls centimeter til flere meter. Enkelte plasser opptrer den med tettere sprekkeavstand. Foliasjonen har bølgete struktur (sprekkeruhet).

I følge kjerneboringer er det sprekkefyll på «en god del sprekker». Fyllet er registrert som epidot, grafitt og leire. I følge NGI (Norges geotekniske institutt) sin håndbok om bruk av Q-systemet vil eksempelvis sprekkefyll av epidotmineraler ikke være synonymt med en reduksjon av stabilitet. Ved beregning av Q-verdi vil en sammenvokst sprekke med et hardt mineral som epidot gi en  $J_a$ -verdi på 0,75, noe som vil øke Q-verdien i forhold til en  $J_a$ -verdi på over 1. På den andre siden vil sprekkefyll av grafitt og leire senke friksjonen i sprekkenes, noe som vil redusere Q-verdien (NGI, 2015).

**Svakhetssoner og vanntapsmålinger:** Det er utført vanntapsmålinger fra alle kjerneborhullene. Disse er beskrevet i den geologiske rapporten (Grob og Karlson, 2014). En generell betraktning av disse er at det var lite innlekkasje i borhullene. Enkelte variasjoner tyder på noen åpne, vannførende sprekker/soner. Det er av interesse å sammenlikne vanntapsmålinger med antatte svakhetssoner fra de seismiske resultatene og kjerneloggingen. Vanntapsmålinger under Nogvafjorden (utført fra Fjørtofta) viste svært liten variasjon i registreringene under sjø, og alle registreringene var under 0,5 l/m/min. Det var ingen klar sammenheng mellom svakhetssoner og vanntap. Dette kan skyldes leire i soner. Det var bedre korrelasjon under Haramsfjorden. Høyeste lekkasje ble målt til ca. 4 l/m/min, og forklaringen på dette var en åpen sprekke. To andre steder ble det registrert forhøyet innlekkasje (sammenliknet med resten av borhullet). Dette var i forbindelse med to svakhetssoner. Det var omtrent 30-40 meter mellom

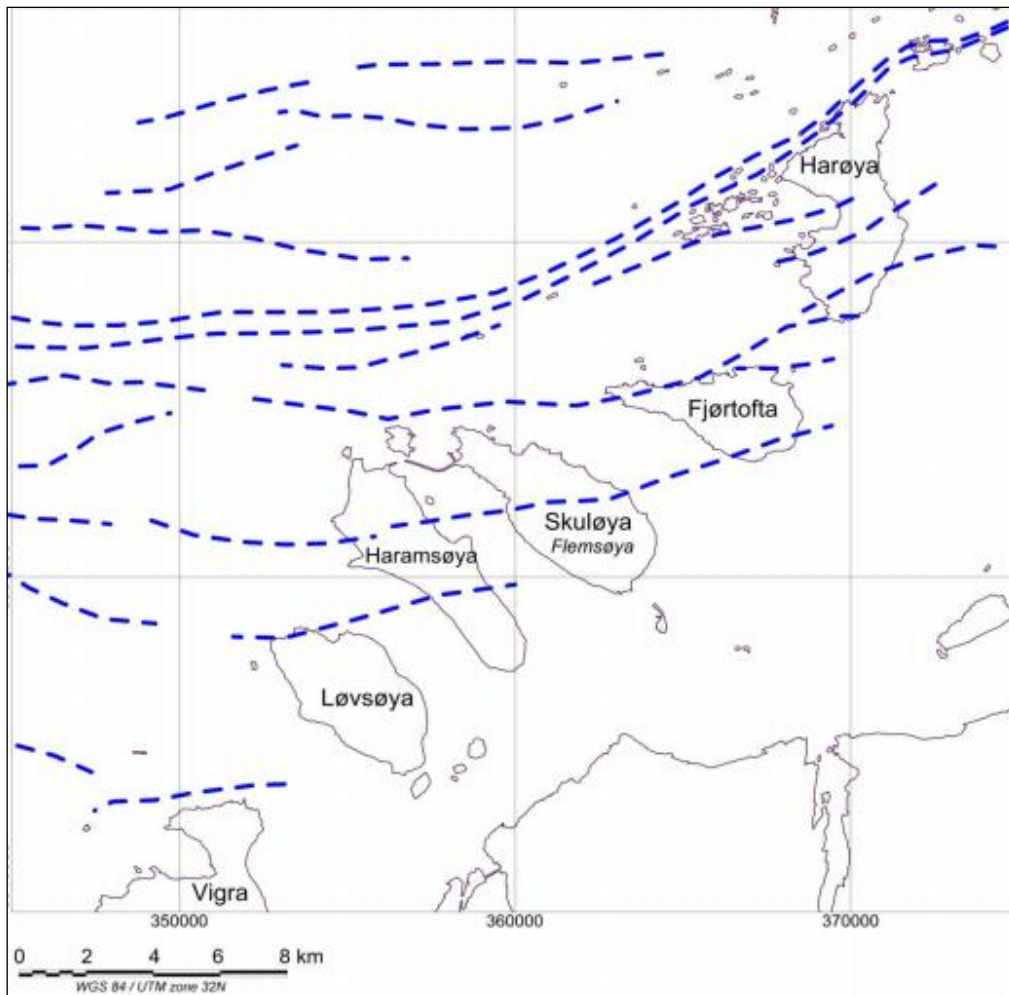
svakhetssonene, og lekkasjen var høy også mellom disse. Dette antyder noe forhøyet lekkasje sentralt i sonen men også i sideberget. Svakhetssonene har ifølge seismiske undersøkelser Q-verdi over 3000 m/s. Under fjørtoftfjorden var det mer variasjon i lekkasjen, selv om denne også var lav for dette borhullet. Vanntapsmålingene for Fjørtoftfjorden er illustrert i

Figur 5. Grafen er tatt med for å illustrere mulige sammenhenger mellom svakhetssoner, oppsprekking og lekkasje. For eksempel sank lekkasjen til 0 mellom 310 og 330. Deretter traff borhullet på en mulig svakhetszone, og innlekkasjen økte til 0,25 l/m/min. Mellom 350 og 370 synker lekkasjen til 0 igjen. Dette antyder at noe økt lekkasje har funnet sted sentralt i sonen.



Figur 5: Vanntapsmålinger fra kjerneboret under Fjørtoftfjorden, boret fra Myklebust på Harøya. Målingen startet ved 90 m, så grafen viser verdiene til meter «x», f.eks. (fra 90 m) til 110 m var vanntapet 0,4 l/m/min (Grob og Karlson, 2014).

**Regionale svakhetssoner:** NGU (Norges Geologiske Undersøkelse) ga i 2012 ut en rapport om magnetisk og batymetrisk kartlegging i Haram kommune (Dehls, Olesen og Rønning, 2012). Kartleggingen ble utført i samarbeid med Statens vegvesen Region Midt i forbindelse med vegprosjektet Fv. 659 Nordøyvegen, og omtales også i den ingeniørgeologiske rapporten. Dataene ble samlet inn i 2011. Fra de magnetisk innsamlede dataene ble det konstruert et tolkningsbilde over forkastninger og svakhetssoner (Figur 6).



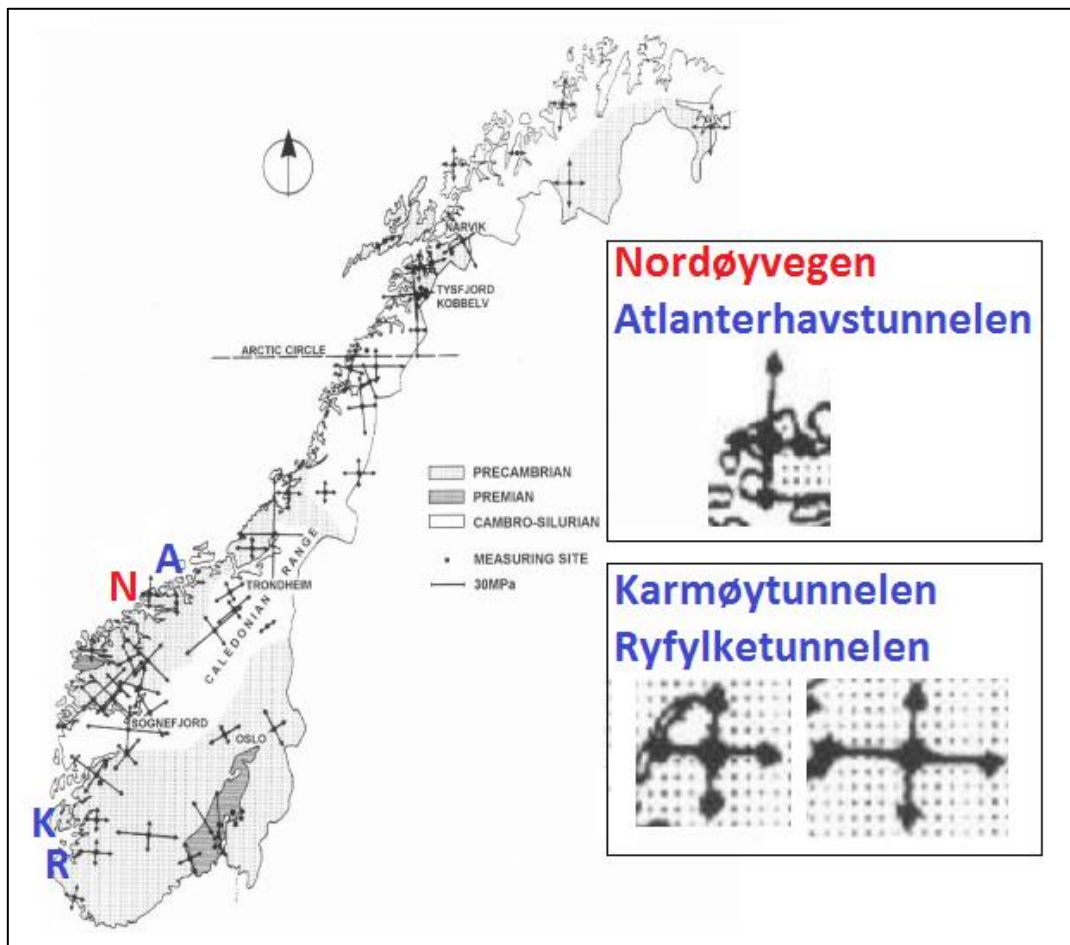
Figur 6: Tolkning av forkastninger og svakhetssoner fra magnetiske målinger (Dehls, Olesen og Rønning, 2012).

En sammenlikning av de planlagte tunneltraséene og svakhetssonene på Figur 6 indikerer at typisk strøkretning for svakhetssonene i området ikke avviker veldig fra retningen på tunneltraseene for de undersjøiske tunnelene. Totalt krysser traseene tre svakhetssoner som er forgreininger av Møre-Trøndelag forkastningskompleks. Strøkretning på sideforkastningene ser ut til å følge sporadiske sprekkesett observert på land på øyene langs Nordøyvegen (Grob og Karlson, 2014).

**Regionale spenningsforhold:** De horisontale hovedspenningene for Nordøyvegen kan betraktes på Figur 7. Med hensyn på referanseprosjektene er Atlanterhavstunnelen og Nordøyvegen relativt nærliggende når det gjelder retning på horisontalspenninger, og fra Figur 7 er det tydelig at størrelse og retning på hovedspenning for disse skiller seg noe ut fra de to



andre referansetunnelene. For Atlanterhavstunnelen og Nordøyvegen er størst hovedspenning omtrent N-S. For Karmøy-tunnelen og Ryfylketunnelen er største hovedspenning i Ø-V retning.



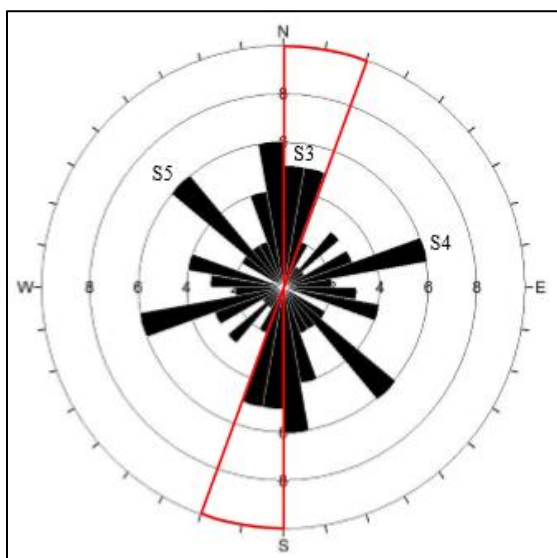
Figur 7: Retninger av horisontalspenninger i Norge (Myrvang, 2001). Omtrent plassering av Nordøyvegen (rødt) og referanseprosjekter (blått) er angitt. Nærmeste hovedspenninger er skalert opp.

Med hensyn på ingeniørgeologiske utfordringer er det relevant å sammenlikne retning på den største horisontale hovedspenningen og hovedsprekkeretningen. I lekkasjesammenheng er dette fordi størst vannlekkasjer ofte finner sted i sprekker med liten eller ingen vinkel til største hovedspenning (Holmøy, 2008a). Det er også viktig å være bevisst hvor stor vinkel det er mellom hovedspenning og tunneltraséen. Dersom tangentialspenningen overstiger bergmassens styrke vil det i massivt berg (for eksempel granittisk gneis) kunne oppstå sprakeberg. Alvorlighetsgraden kan varere fra små avskallinger til tungt sprak (Myrvang, 2001). I slik sammenheng ville en ugunstig orientering av tunneltraséene i Nordøyvegen vært Ø-V. I den geologiske rapporten (Grob og Karlson, 2014) står det skrevet at det er ingen tegn til høye bergspenninger langs Nordøyvegen. Bakgrunnen for dette er topografi, ingen synlige tegn på

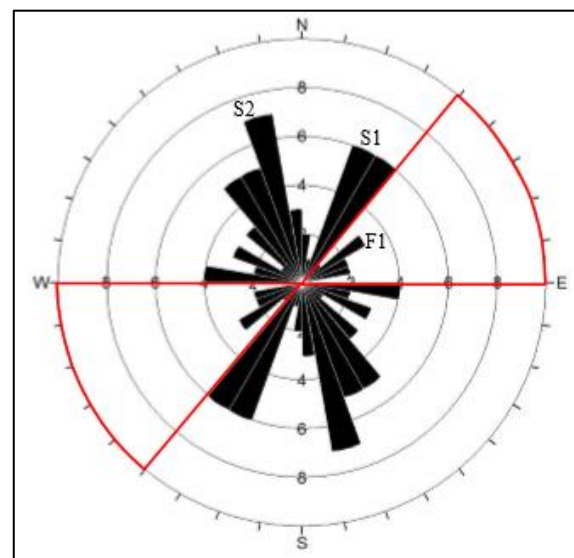
bergoverflaten og at det er vanlig bergspenninger i området. Det er heller ikke forventet høy spenningsantropi, selv om Figur 7 antyder en viss antropi. Det er ikke utført bergspenningsmålinger, og det er uvisst om regional spenningstilstand er tatt med i beregningen. I forhold til områder med høye spenninger (for eksempel grunnfjellsområdene på Vestlandet) er horisontalspenningene for Nordøyvegen lave.

#### 4.4 INGENIØRGEOLOGI LANGS HARAMSFJORDTUNNELEN

**Oppsprekking:** Oppsprekkingen i dagsonen er illustrert som sprekkeroser i den ingeniørgeologiske rapporten (Grob og Karlson, 2014). Figur 9 viser sprekkerose for påhugget på Hestøya, og Figur 8 viser sprekkerose for påhugget på den andre siden av tunnelen, på Haramsøya. På Haramsøya heter påhuggsområdet Austnes. De røde strekene indikerer retningen til tunneltraséen. Når det gjelder orientering av bergrom er det ønskelig at markante sprekker og slepper som kan skape problemer, krysser tunneltraseen med størst mulig vinkel. På den måten unngås det at trøblete sprekker følger tunnelen over et lengre strekke, salve etter salve. For eksempel er S2 orientert svært gunstig ved tunnelpågugget Austnes. Det er også tilfelle for S5 og S4 på Hestøya, hvor traseen ligger på halveringslinjen for største skjærsvinkel mellom S4 og S5. Ved påhugg Austnes vil S1 kun ha en liten vinkel i forhold til traseen (10-20 grader). På Hestøya vil sprekkesettet S3 ligge parallelt med traseen. Det er derfor rimelig å anta at det er spesielt S1 og S3 som vil kunne gi eventuelle stabilitetsutfordringer og økt sikringsbehov for Haramsfjordtunnelen.



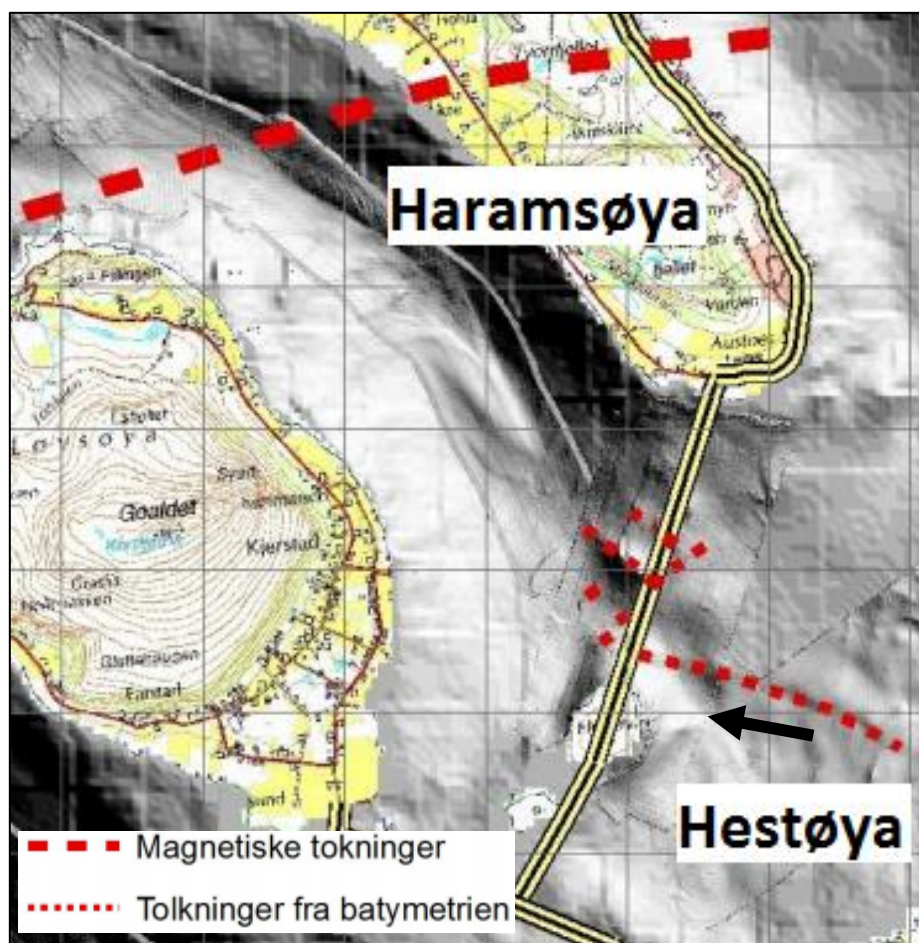
Figur 9: Sprekkerose basert på kartlegging av dagsone ved påhuggsområde Hestøya (Grob og Karlson, 2014).



Figur 8: Sprekkerose basert på kartlegging av dagsone ved påhuggsområde Austnes på Haramsøya (Grob og Karlson, 2014).



**Svakhetssoner:** Tunnelen vil ifølge de batymetriske registreringene krysse flere mindre svakhetssoner. Seismiske målinger viser likevel at det ikke eksisterer større svakhetssoner langs denne tunneltraséen. Sonene er antatt å ha en liten mektighet, og har varierende strøkretning, se Figur 10. Hastigheten varierer mellom 2900 m/s til 4000 m/s. Utfordringer knyttet til svakhetssoner er mer gjeldende for de to andre tunnelene (Dehls, Olesen og Rønning, 2012). I den geologiske rapporten (Grob og Karlson, 2014) er det beskrevet at svakhetssoner i gabbroen på Hestøya vil følge S5-strukturer. Bredden på sonene varierer mellom 5 og 20 meter. I gneisen finnes blant annet svakhetssoner med strøkretning 280-290 grader. Disse faller steilt mot NØ. Majoriteten av svakhetssonene i Haramsfjordtunnelen vil krysse tunnelen med vinkler i intervallet 40-90 grader (Grob og Karlson, 2014).

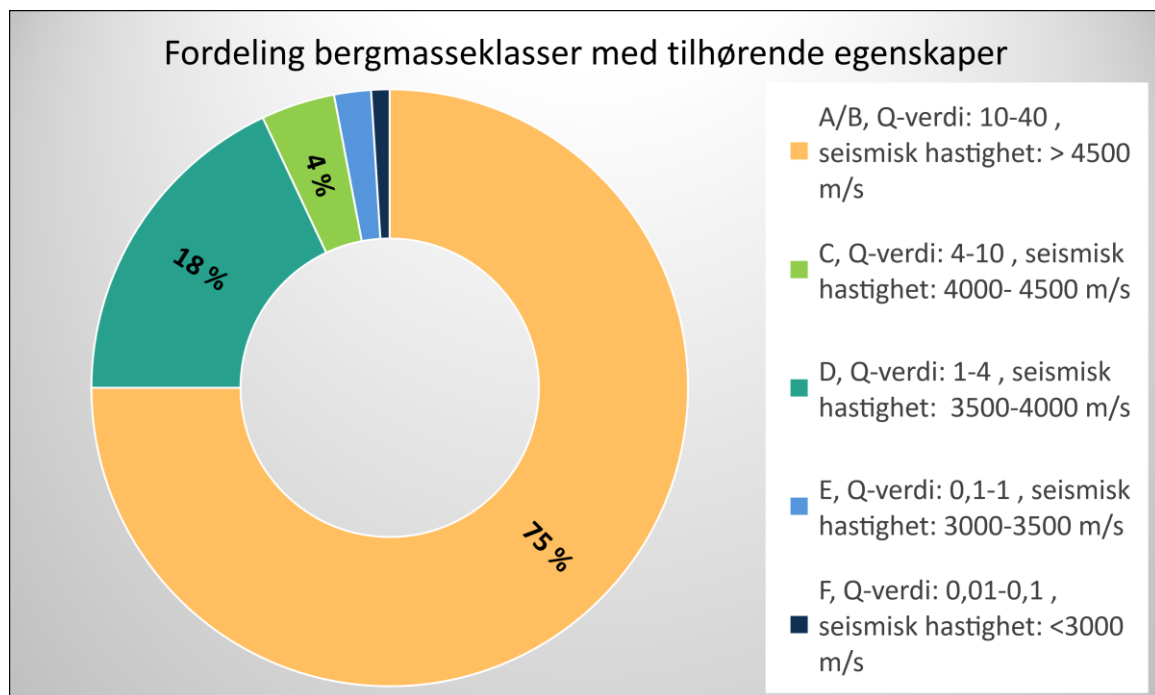


Figur 10: Utsnitt av resultat fra batymetriske og magnetiske tolkninger, presentert i NGU-rapporten. Merk at traséen ikke er korrekt utformet, denne er kun lagt inn som en rett linje (Dehls, Olesen og Rønning, 2012).

**Overdekning:** Generelt foreligger det krav om minimum 50 meters overdekning for undersjøiske tunneler i Norge. Det kan imidlertid søkes om dispensasjon fra kravet, forutsatt at tunnelforholdene tilsier at det er forsvarlig (Nilsen og Henning, 2009). For Haramsfjordtunnelen er det godkjent redusert overdekning (< 50 meter) mellom pel nummer 3650 og pel nummer 4230 (totalt 580 meter). Overdekningen utover denne strekningen er mellom 50 og 60 meter.

Styrt kjerneboring og refraksjonsseismikk er anvendt for å kontrollere at bergmassekvaliteten er tilfredsstillende. Kjerneboringen er utført fra nord på Hestøya, og er i retning nord-øst. I strandsonen er kjerneboringen tilnærmet parallell med tunneltraséen, hvor den ligger ca. 12 meter over traséen. På dette strekket vil tunnelen krysse bergartsgrensen mellom den karakteristiske bergarten på Harøya, metagabbro, og gneis. Seismikken viser til åtte svakhetssoner, men generelt er kvaliteten på bergmassen god. Seks ut av de åtte svakhetssonene har en tykkelse på maksimalt 3 meter. De resterende to har tykkelser på 10 og 18 meter, ut ifra kjerneboringen. Det er også beskrevet i kjerneloggen at det finnes det en seksjon med 1 meter hardpakket leire i svakhetssonen som er 10 meter tykk.

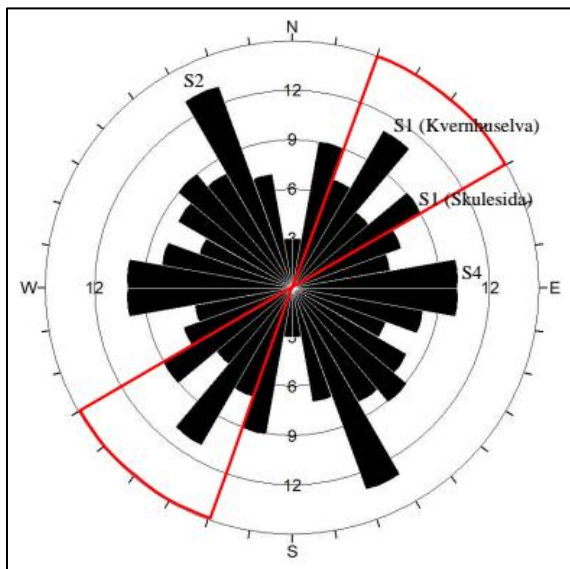
**Bergmassekvalitet:** Basert på seismikkregistreringer kan det anslås en prosentmessig fordeling av bergmasseklasser langs tunnelen. Denne er illustrert i Figur 11.



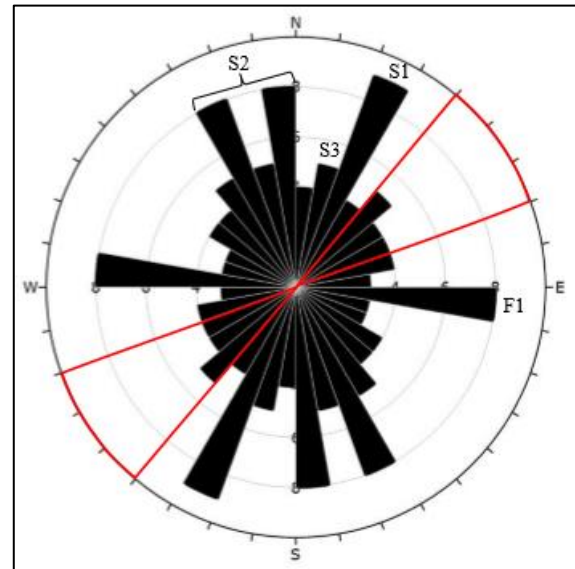
Figur 11: Prosentvis fordeling over bergmasseklasser langs tunneltraséen under Haramsfjorden, basert på seismikk. Tallene er hentet fra den geologiske rapporten (Grob og Karlson, 2014).

## 4.5 INGENIØRGEOLOGI LANGS NOGVAFJORDTUNNELEN

**Oppsprekking:** Påhugget på Skuløya/Flemsøya er preget av varierende oppsprekking og spesielt er S1 og S2 dominerende sprekkesett. Orienteringen til S1 vil ligge mer eller mindre parallelt med traseen, samtidig som S2 krysser traséen med god vinkel. I tillegg er det registrert sporadiske og mindre gjennomsettende strukturer. Spesielt ved påhugg Skuløya/Flemsøya vil S1 være parallell tunneltraséen. Figur 12 og Figur 13 illustrerer oppsprekkingen i sprekkeroser.



Figur 13: Sprekkerose basert på kartlegging av dagsone ved påhuggsområde Skuløya/Flemsøya (Grob og Karlson, 2014).



Figur 12: Sprekkerose basert på kartlegging av dagsone ved påhuggsområde Fjørtofta (sør) (Grob og Karlson, 2014).

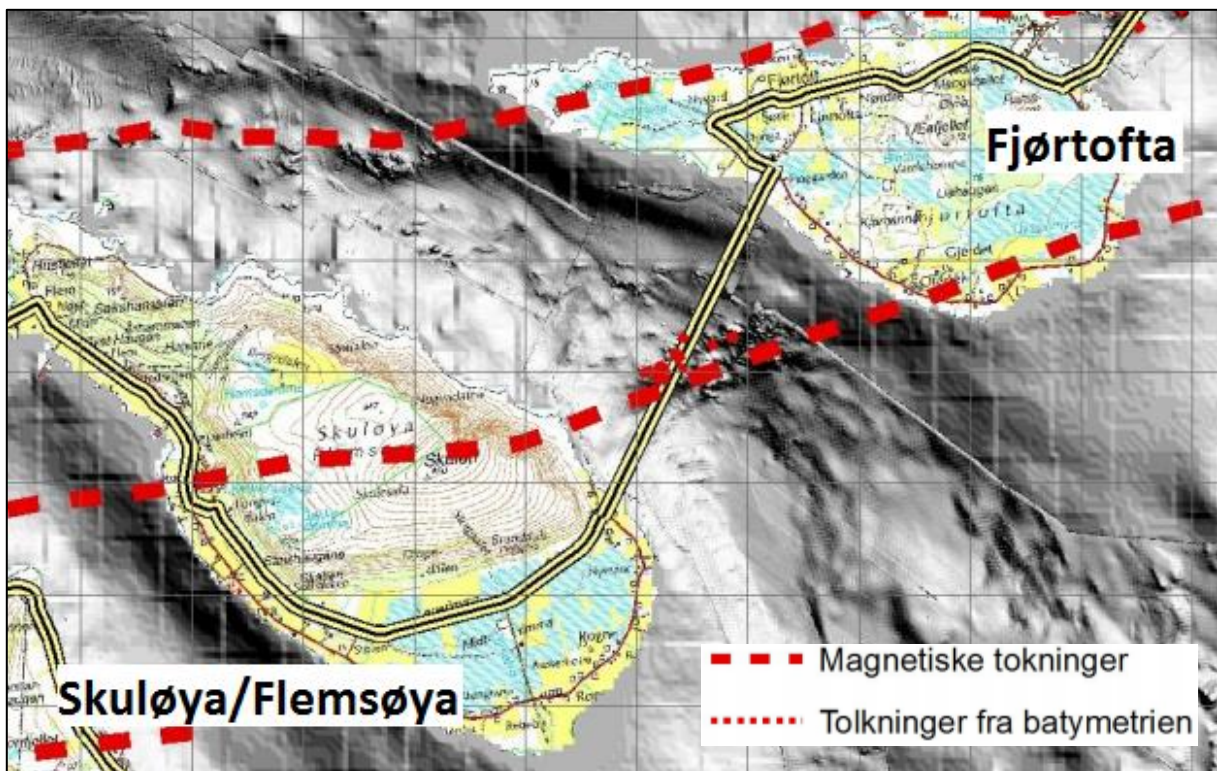
**Svakhetssoner:** Mellom Skuløya/Flemsøya og Fjørtofta er det forventet at traseen vil krysse en eller flere svakhetssoner med mektighet på opptil 20 meter. Fra de magnetiske dataene ble det tolket at traseen krysser en svakhetszone halvveis mellom øyene (se fete, stiplede linjer på Figur 14). Dette støttes av batymetrien (se smale, stiplede linjer på Figur 14). Tilgjengelig refraksjonseeismikk fra området viser flere svakhetssoner mellom de to øyene med hastigheter mellom 2800 m/s og 4000 m/s (Dehls, Olesen og Rønning, 2012).

Totalt er det kartlagt fem svakhetssoner midtfjords og mot Fjørtofta. Disse ligger parallelt med hverandre. Ifølge profiler vedlagt den ingeniørgeologiske rapporten, vil tunnelen ha en dybde rundt omkring 100 meter for det aktuelle området. Svakhetssonene har en bredde på mellom 10 og 18 meter, med hastigheter mellom 3500 m/s og 4000 m/s (Dehls, Olesen og Rønning, 2012). Disse opptrer på et område over ca. 500 meters lengde (Grob og Karlson, 2014). I tillegg er det



kartlagt enkelte mindre soner ( $< 5\text{ m}$  mektighet), også midtfjords. Her er den seismiske hastigheten noe lavere,  $2700\text{ m/s}$  på det minste. Ifølge rapporten bør ikke sonen midtfjords by på vesentlige problemer for drivingen. Enkelte svakhetssoner opptrer også nærmere land. Disse har imidlertid større avstand seg imellom enn samlingen midt mellom øyene (Dehls, Olesen og Rønning, 2012). En av disse er beskrevet nedenfor, under *overdekning*

Seismiske data tyder på at det finnes noen få svakhetssoner langs S1-strukturen. S1 har en strøkretning som varierer med  $0\text{-}10$  grader i forhold til traséen. Sonene har en mektighet på  $5\text{-}15$  meter, med seismiske hastigheter ned mot  $3200\text{ m/s}$  (Grob og Karlson, 2014). Grunnet orienteringen vil sonene kunne ha stor bredde i tunnelen selv om mektigheten ikke er spesielt stor.

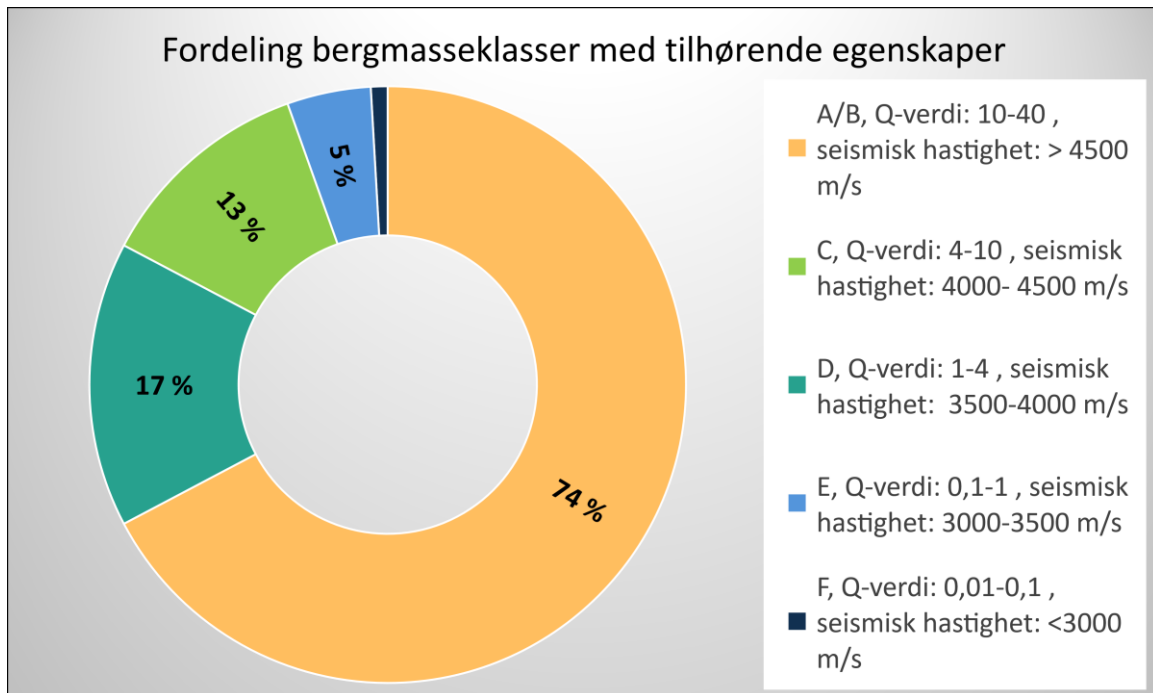


Figur 14: Utsnitt av resultat fra batymetriske og mangetiske tolkninger, presentert i NGU-rapporten. Merk at traséen ikke er korrekt, denne er kun lagt inn som en rett linje (Dehls, Olesen og Rønning, 2012).

**Overdekning:** Overdekningen er under  $50$  meter for et sammenhengende strekke på  $310$  meter, mellom pel nummer  $27740$  og pel nummer  $28050$ . Styrt kjerneboring er gjort fra land på Fjørtofta. Det er kjerneboret omtrent til pel nummer  $27680$ . Det er også utført refraksjonsseismikk for deler av strekket. Undersøkelsene viser til fire svakhetssoner. Tre av disse har mektighet over fem meter. Fra styrt kjerneboring er det mulig å si noe konkret om

kvaliteten på svakhetssonene. Blant annet viste kjerneboringene at det i nærheten av Fjørtofta, mellom profil nummer 27800 og 27900, er en betydelig svakhetssone på 47 meter. Denne er stedvis tett oppsprukket med grafittbelegg på sprekkeplan, samt at det foreligger et parti med en meter tettpakket leire (Grob og Karlson, 2014).

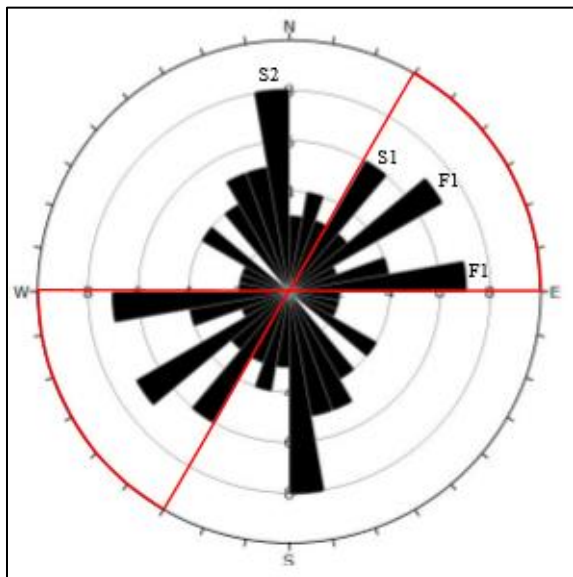
**Bergmassekvalitet:** Basert på seismikkregistreringer kan det anslås en prosentmessig fordeling av bergmasseklasser langs tunnelen. Denne er illustrert i Figur 15.



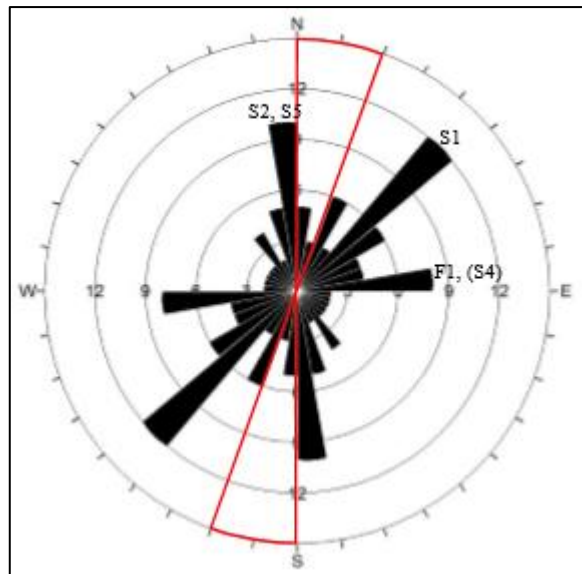
Figur 15: Prosentvis fordeling over bergmasseklasser langs tunneltraséen under Nogvaffjorden, basert på seismikk. Tallene er hentet fra den geologiske rapporten (Grob og Karlson, 2014).

#### 4.6 INGENIØRGEOLOGI LANGS FJØRTOFTFJORDTUNNELEN

**Oppsprekking:** Ved det nordligste påhugget på Fjørtofta har både S1 og F1 en strøkretning som gjør at de følger traséen. I tillegg faller F1 vertikalt (90 grader), noe som er ugunstig for stabiliteten i veggene. Ved horisontalt liggende sprekker, vil det derimot kunne være stabilitetsutfordringer i heng. Tunnelen er plassert mer gunstig i forhold til S2, som krysser traséen med minst 30 grader. På Harøya vil S2 og S5 ha en vinkel på under 10 grader i forhold til traséen. S2 har et subvertikale fall (85 grader vest), noe som kan gi stabilitetsutfordringer i vegger. Samtidig har S1 en krysningsvinkel på 20 grader. F1 og S4 krysser tunnelen med 60 grader på Harøya. Figur 16 og figur 17 illustrerer oppsprekkingen i sprekkeroser.



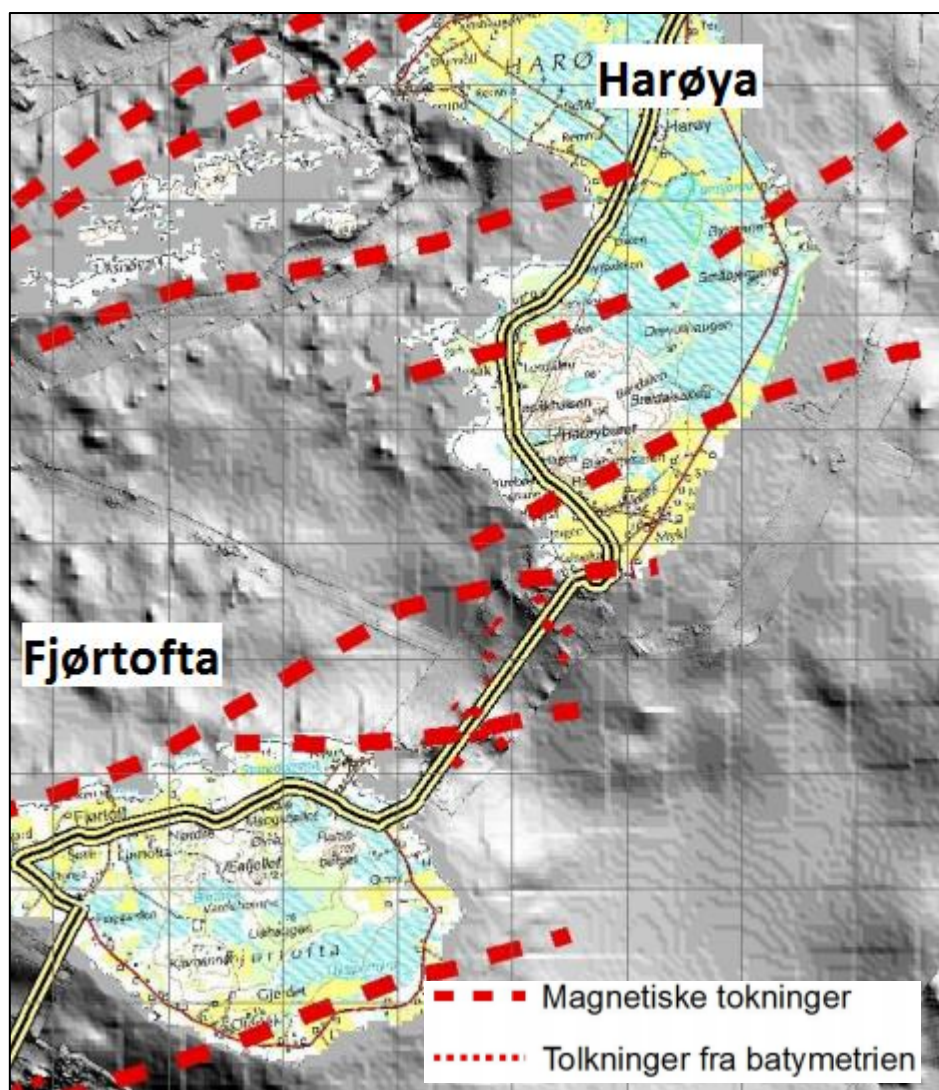
Figur 17: Sprekkerose basert på kartlegging av dagsone ved påhuggsområde Fjørtofta nord (Grob og Karlson, 2014).



Figur 16: Sprekkerose basert på kartlegging av dagsone ved påhuggsområde Myklebust på Harøya (Grob og Karlson, 2014).

**Svakhetssoner:** Den nordligste tunnelen vil ifølge magnetiske data krysse to betydelige svakhetssoner. Figur 18 indikerer strøkretning for svakhetssonene. Refraksjonsseismikk støtter opp under eksistensen av en av disse (den sørligste). Det antas at sonen har en mektighet på omtrent 40 meter, og den seismiske hastigheten er registrert som 3800 meter/sekund. Denne går ut i sjøen fra land like nord for påhugget på Fjørtofta. Refraksjonsseismikken indikerer kun mindre svakhetssoner ved strandsonen til Harøya. Kun et fåtall av disse har mektighet over 15 meter. Den seismiske hastigheten varierer mellom 3100 og 4000 meter/sekund. I tillegg krysser traséen en forgreining av Møre-Trøndelag forkastningskompleks. Sonen har seismisk hastighet som varierer mellom 3400 og 4000 meter/sekund, og er mindre enn 10 meter bred der den krysser tunnelen. Sonene karakteriseres i rapporten som dårlig fjell, men ikke meget dårlig fjell (Dehls, Olesen og Rønning, 2012).

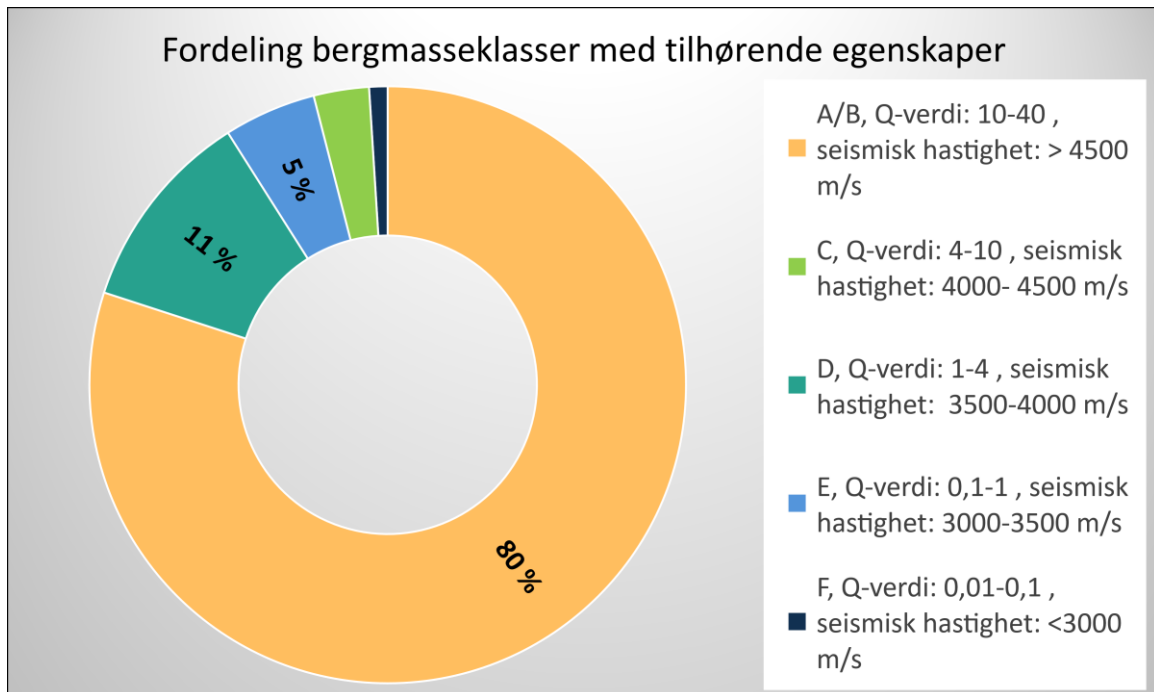




Figur 18: Utsnitt av resultat fra batymetriske og magnetiske tolkninger, presentert i NGU-rapporten. Merk at traséen ikke er korrekt, denne er kun lagt inn som en rett linje (Dehls, Olesen og Rønning, 2012)

**Overdekning:** Like sør for Myklebust (Harøya) er overdekningen mindre enn 50 meter. Dette gjelder mellom pel nummer 33550 og pel nummer 33970 (totalt 420 meter). Det mangler seismiske data for 190 meter av disse grunnet liten havdybde. Fra kjerneboring er det registrert 15 dårlige soner, med maksimal mektighet fem meter. Det antas at minst tre av disse er svakhetssoner. To av disse er beskrevet som oppsprukket med knust kjerne, og det er leire eller glidespeilt på enkelte sprekkeplan (Grob og Karlson, 2014).

**Bergmassekvalitet:** Basert på seismikkregistreringer kan det anslås en prosentmessig fordeling av bergmasseklasser langs tunnelen. Denne er illustrert i Figur 19.



Figur 19: Prosentvis fordeling over bergmasseklasser langs tunneltraséen under Fjørtoftfjorden, basert på seismikk. Tallene er hentet fra den geologiske rapporten (Grob og Karlson, 2014).



# Kapittel 5

## Regionalgeologi, ingeniørgeologi og erfaringer fra referanseprosjekter

Prosjektene omtalt i forstudien (prosjektoppgave) er følgende:

1. Fylkesveg 64 Atlanterhavstunnelen (2009)
2. Fylkesveg 47 Karmøytunnelen, T-forbindelsen (2013)
3. Riksveg 13 Ryfylketunnelen, Ryfastforbindelsen (-)

Sistnevnte er fortsatt i drivefasen, mens de to første ble ferdigstilt som beskrevet i parentes.

Videre følger beskrivelse av regionalgeologi, ingeniørgeologi og vannsikringsløsninger for de ulike prosjektene.

### 5.1 ATLANTERHAVSTUNNELEN

**Geologi:** Atlanterhavstunnelen er en undersjøisk tunnel mellom Kristiansund og Averøy på Nordmøre. I likhet med Nordøyvegen er tunnelen lokalisert i den vestre gneisregionen. Gneisen i området har partier med amfibolitt, pegmatitt og glimmerbergarter. Bergarten er hovedsakelig av god kvalitet (Karlson, 2008). Kåre Ingolf Karlson var kontrollingeniør på prosjekt Atlanterhavsveien. Ved direkte spørsmål om hvilke forhold som hadde størst betydning for innlekkasje i Atlanterhavstunnelen valgte han å svare at bergartstype hadde størst betydning for innlekkasjen. Dette fordi en stiv bergart kan inneholde åpne sprekker (pers. kom., Karlson, 2017).

**Svakhetssoner:** I 2009 uttalte professor Bjørn Nilsen ved NTNU at Atlanterhavstunnelen kanskje kan karakteriseres som Norges mest krevende undersjøiske tunnel (Statens vegvesen, 2009). Bakgrunnen for denne beskrivelsen er det mye omtalte raset som gikk under drivefasen. I vedlegg til den geologiske sluttrapporten (Todnem, 2010) er det beskrevet svakhetssoner påtruffet under drivingen av tunnelen. Her er 19 svakhetssoner nevnt, inklusive rassonen. Figur 20 viser en av svakhetssonene. Ved en gjennomgang av de 19 svakhetssonene kan enkelte fellestrekk belyses;

1. Samtlige soner er kartlagt som amfibolittisk gneis eller kun amfibolitt, eventuelt med innslag av andre bergarter/mineraler.
2. Mange av sonene er klart avgrenset av sideberg med markant bedre kvalitet. Enkelte soner blir beskrevet som partier med dårlig fjell uten klar avgrensning.
3. Q-verdi i sonene varierer mellom 0,01 og 1,3.
4. Q-verdi sideberg varierer mellom 0,8 og 8,3 (for soner der dette er angitt).
- 5. Sonene beskrives som tørre, og ingen av sonene blir beskrevet som fuktige/våte (bortsett fra rassonen).**
6. For åtte av sonene er det utført test av svelleleire (fri svelling for alle sonene, og svelletrykk og XRD for seks av sonene). Av disse åtte sonene inneholdt samtlige aktiv svelleleire eller middels aktiv svelleleire.



*Figur 20: Markert, subvertikal sleppe, går ut i venstre vegg. Like rundt sleppen er berget kartlagt som noe oppknust, sideberget angis som middels godt fjell. Q-verdi sone: 0,6-0,75. Q-verdi sideberg: 3,3-6,2 (Todnem, 2010).*

Rassonen var i en divisjon for seg selv når det gjaldt innlekkasje. Kort fortalt var bakgrunnen for raset en oppknust forkastningssone med seismisk hastighet ned mot 2500-2800 meter/sekund og fjelloverdekning på ca. 45 meter (230 meter under havoverflaten). Ved inngangen til sonen viste sonderboringen dårlig fjell, men lite lekkasje. Det var ikke forventet at sonene skulle være av dårligere karakter enn tidligere passerte svakhetssoner. Stoffen ble injisert, og injeksjonsskjermen bestod av 11 tonn industrisement fordelt over ti hull. Etter dette fulgte et parti på omtrent 10-13 meter med noe bedre fjell, før stoffen igjen viste dårlig kvalitet og kraftig oppsprukket bergmasse. Det ble besluttet å drive videre med utvidet profil og redusert salvelengde. I tillegg til radielle bolter ble det utført forbolting, og det ble påført sprøytebetong med tykkelse 20 centimeter. Kort tid etter begynte utført sikring å rase ned, og raset utviklet seg drastisk. For ytterligere beskrivelser av hvordan raset forplantet seg og driving gjennom sonen henvises det til geologisk sluttrapport (Todnem, 2010) eller eventuelt forstudiet til denne masteroppgaven (Kvarstein, 2016). Ved forsering av sonen ble det ble målt vanntrykk opp mot 23 bar, noe som i teorien er det høyeste vanntrykket som kan oppnås med 230 meter vannsøyle. Det oppstod betydelig lekkasje av sjøvann, og maksimal vannlekkasje fra et borehull ble målt til 500 liter per minutt (Karlson, 2008; Todnem, 2010). Palmstrøm (2014) beskriver at en feilvurdering førte til at sonen ikke ble injisert godt nok, og at det derfor startet å lekke betydelige mengder sjøvann inn i tunnelen.

**Overdekning:** Kun korte sekvenser av den undersjøiske delen av tunnelen hadde mindre enn 50 meter overdekning. Rassonen er et eksempel på en sãnn sekvens.

**Vanntrykk:** I rassonen utviklet det seg vanntrykk på opptil 230 bar (Todnem, 2010). Her var det 45 meter overdekning, og 230 meter opp til havoverflaten.

**Innlekkasje og vannsikring:** Følgende avsnitt baserer seg i stor grad på datainnsamling i forundersøkelsene for denne masteroppgaven (Kvarstein, 2016). Dette ansees å være svært relevant også for masteroppgaven da faktisk lekkasje opp imot forventet lekkasje og lekkasjekrav gir grunnlagsdata for å vurdere lekkasje for prosjektet Nordøyvegen.

Innlekkasjetall finnes ved å registrere vannmengdene som pumpes ut av tunnelen ved hjelp av pumpestasjoner. Innlekkasjemålinger for Atlanterhavstunnelen er registrert i løpet av en uke og er gjengitt i Tabell 3. En sammenlikning av målingene viser nedgang på 4 av 5 pumpestasjoner fra mars/april 2009 til jan/feb 2010. For å sammenlikne med lekkasjekravet (som for Atlanterhavstunnelen ble satt til 300 l/min/km tunnel), kan målingene fra pumpestasjonene summeres for hver registreringsperiode, for så å dividere lekkasjen på antall kilometer tunnel

(5,735 km). Tall fra januar/februar 2010 viser en samlet gjennomsnittlig lekkasje på 115 l/min/km tunnel. Dette er en nedgang på 38,9 % fra 2009. I november 2016 ble det foretatt en ny måling. Målingene viser en ytterligere nedgang på 6,8 % fra 2010. Reduksjonen har vært størst mellom de to første målingene, før de nye målingene antyder en viss stabilisering av lekkasjen. Alle målingene har befunnet seg godt under lekkasjekravet (Kvarstein, 2016). Nedgangen i innlekkasje kan forklares ved at vannførende sprekker vil kunne naturlig tettes over tid. Årsaker til dette kan være kjemisk utfelling, svelling og avleiring (Hem, 2003).

*Tabell 3: Innlekkasjemålinger til pumpestasjoner i Atlanterhavstunnelen, for mars/april 2009 og januar/februar 2010 (Kvarstein, 2016).*

<b>Stasjon</b>	<b>Mars/april 2009</b>	<b>Jan/feb 2010</b>	<b>Nov 2016</b>
<b>Til F2</b>	30,0 l/min	98,9 l/min	
<b>Til F3</b>	104,0 l/min	31,4 l/min	
<b>Til F4 (fra begge sider)</b>	633,0 l/min	492,0 l/min	
<b>Til F5</b>	120,0 l/min	19,6 l/min	
<b>Til F6</b>	30,0 l/min	18,1 l/min	
<b>Total lekkasje</b>	917,0 l/min	660 l/min	618 l/min
<b>Per kilometer tunnel</b>	159,9 l/min/km	115,1 l/min/km	107,8 l/min/km

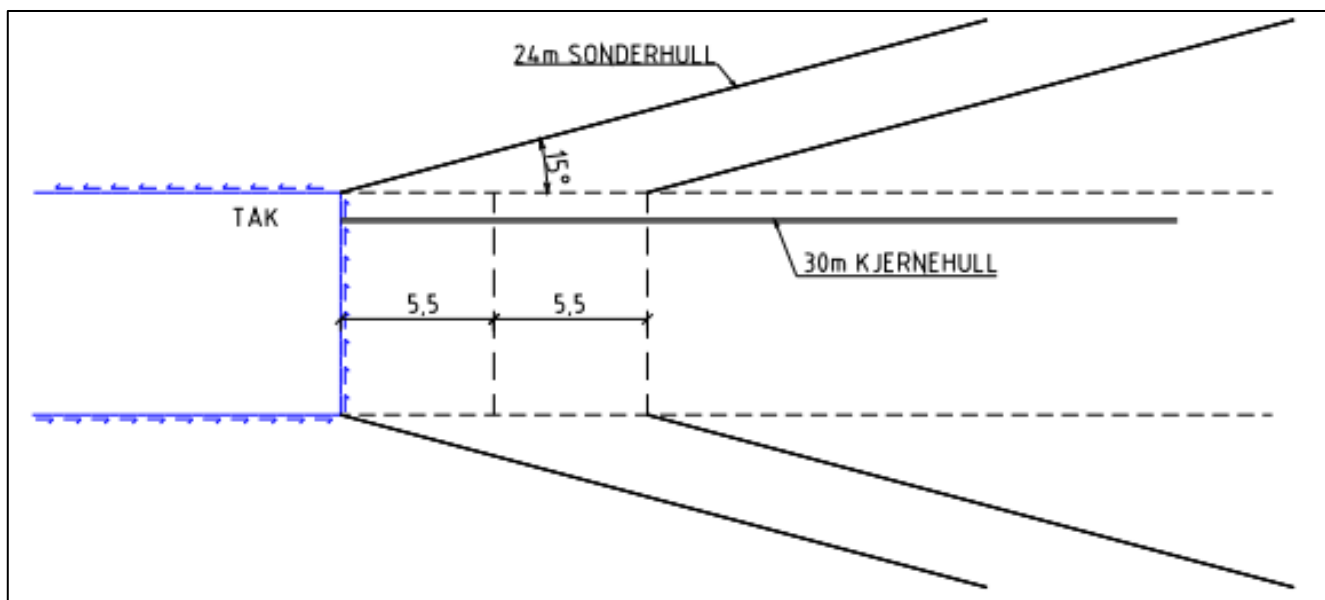
Fra den ingeniørgeologiske sluttrapporten er det ført opp mengder sement anvendt til injeksjon. Oversikten viser at det ble brukt 873 tonn industrisement, 835 tonn mikrosegment og dermed totalt 1708 tonn industri- og mikrosegment i injeksjonsskjermer. 1217 tonn av denne mengden gikk med i svakhetssonen hvor raset gikk. Kontraktfestet mengde var 1540 tonn (Todnem, 2010).

Kontrollingeniør Kåre Ingolf Karlson påpeker via e-postkommunikasjon at innlekkasjen generelt var betydelig større enn forventet. Om man derimot ekskluderer rassonen fra regnestykket, var lekkasjen som forventet (per. kom., Karlson, 2017). Innlekkasjekravet var på 300 l/min/km, og ved åpning av tunnelen var innlekkasjen god innenfor dette kravet, noe som kommer frem av Tabell 3.

I Atlanterhavstunnelen er det anvendt tunnelduk som vannsikring. Det henvises til forstudie til denne masteroppgaven for en vurdering av denne løsningen (Kvarstein, 2016). Tunnelduk er ikke lenger en godkjent løsning for vannsikring av tunnel (Statens vegvesen, 2016b).

**Erfaringer rundt lekkasjeprosedyre:** Kontrollingeniør Kåre Ingolf Karlson har gjennom personlig erfaringsutveksling via e-post poengtert viktigheten med at eventuelt lekkasjevann må få tid til å drenerer inn mot sonderhullene før tunnelen drives videre. Spesielt viktig er dette for soner man ut ifra forundersøkelser antar er dårlige. Det er vanlig at det er tunnelriggen som borer sonderhullene, og denne prosessen går ofte så fort at det er lett å undervurdere hvilken effekt innlekkasje har på stabiliteten i bergrommet. Karlson understreker at terskelen for å benytte kjerneboring i tillegg til eller istedenfor sonderboring bør være lav dersom det forventes dårlig bergmasse. Dette er nyttig både fordi kjerneboring gir informasjon om bergets beskaffenhet, samtidig som lekkasjevannet får mer dreneringstid da prosessen er langsommere enn ved hammerboring (pers. kom., Karlson, 2017).

Figur 21 illustrerer et eksempel som forklarer noe av det Karlson beskriver. Her er det boret sonderhull på 24 meter for hver andre salve, og kjerneboret 30 meter inn foran stuff. Det bør være minimum 4-6 sonderhull. I dette eksempelet er det forventet å treffe på en svakhetszone, kartlagt som en lavhastighetszone gjennom seismiske forundersøkelser. Dette støttes av sonderhullene (med boreparametertolkning/MWD). Kjerneboringen gir mulighet til å kartlegge sonen før driving, i tillegg til at det drenerer vann (Pedersen, Kompen og Kveen, 2010).



Figur 21: Skisse over tunnelstuff hvor det både er boret sonderhull og kjernehull. Her er salvelengden 5,5 meter (Pedersen, Kompen og Kveen, 2010)

## 5.2 KARMØYTUNNELEN

Karmøytunnelen er del av den såkalte T-forbindelsen. Tunnelen krysser både Karmsundet og Førresfjorden, som ligger henholdsvis vest og øst for Fosen. Under Fosen møtes de to armene i en rundkjøring. Nordover fra rundkjøringen går en tredje arm mot Haugesund. I vest er tunnelportalen lokalisert i Karmøy, i øst er tunnelportalen lokalisert i Mjåsund (E39) (Dahle, 2013).

Stumo og Vikane (2011) karakteriserer byggingen av Karmøytunnelen som komplisert. Mye av bakgrunns materialet og prognoser for tunnelen var basert på Statpipe-prosjektet, som går parallelt med T-forbindelsen, 1 km sør for denne. Prosjektet omfatter gassrørledninger i tilsvarende regionalgeologi som for Karmøytunnelen. Byggingen av Statpipetunnelen bød på store utfordringer med bakgrunn i geologien under begge fjordkryssingene, men spesielt under Karmsundet.

Tidligere student ved NTNU Catrine Hatlenes skrev sin masteroppgave om Karmøytunnelen mens tunnelen var i drivefasen (Hatlenes, 2011). Ved avsluttende masteroppgave gjenstod 6 % av drivingen av tunnelen. Deler av kapittelet om Karmøytunnelen baserer seg på hennes arbeid. Oppgaven fikk Statens vegvesen sin pris for beste masteroppgave innen vei- og samferdsel ved NTNU, og er omtalt i den geologiske sluttrapporten. Det har derfor vært naturlig å anvende den som en av flere kilder i dette kapittelet.

**Geologi:** Geologien i Karmøytunnelen er oppsummert på neste side i Figur 23. Totalt er det fem bergarter i tunnelen. Disse er

- Grønnstein
- Grønnskifer
- Metasandstein
- Fyllitt
- Granittisk gneis (grunnfjell)

Den dominerende bergarten er granittisk gneis av prekambrisk alder. Fra rundkjøringen og vestover (under Karmsundet) er bergartene mer komplekse. Denne delen av tunnelen beveger seg inn i et godt bevart ofiolittkompleks, og bergartene her er del av dette komplekset (Moen, 2012). Grønnsteinen er omdannet basalt, og puteformede strukturer kan observeres. I grønnsteinen finnes det gangbergarter av basaltisk karakter opp til en meters mektighet (Fossen, *et al.*, 2013). I selve Karmsundet anslo forundersøkelsene at bergarten ville være metasandstein.

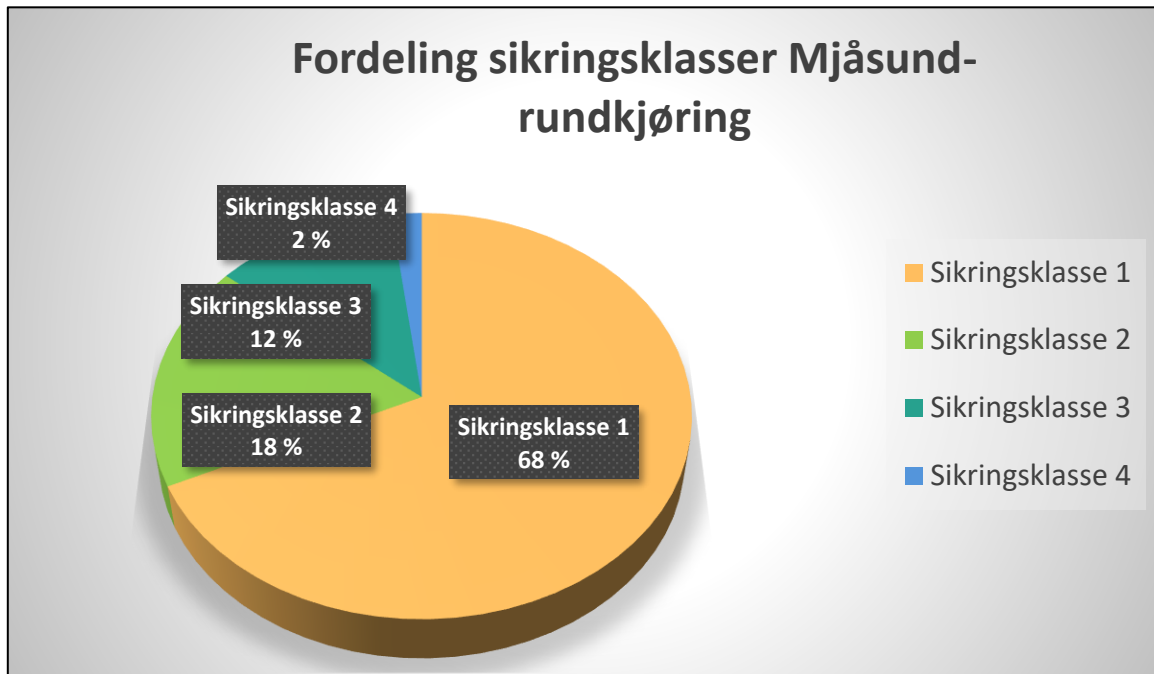
Hatlenes (2011) undersøkte prøver fra Karmsundet, og beskrev soner med bergarter med høyt innhold av kloritt og glimmer med tydelige leirslepper. Disse befant seg innimellom mer kompetent berg. Sonene ble beskrevet som fyllonitt.

Mellom fyllitten og gneisen er det en klar definert bergartsgrense. Dette er en tektonisk grense mellom ofiolittkomplekset og grunnfjellet (Stumo og Vikane, 2011). Mellom de andre bergartene er det mer glidende overganger (Moen, 2012). Som det fremkommer av profilene i Figur 23 er tunneltraséen under Førresfjorden plassert i granittiske gneisbergarter. Erfaringer fra denne delen av Karmøy-tunnelen er derfor spesielt interessante ved erfaringsoverføring til tunnelene ved Nordøyvegen. Den største utfordringer knyttet til vannlekkasjer oppstod mellom vestre del av Førresfjorden og rundkjøringen i sentrum av tunnelen. Med andre ord er denne lekkasjen knyttet til gneissonen (Hatlenes, 2011).

Generelt er det god fjellkvalitet i gneisbergarten. Kompetent gneis i Førresfjorden beskrives av Hatlenes (2011) som godt og hardt fjell. Enkelte leirsoner (< 50 cm) ble påtruffet i gneisen. Laboratorietesting viste svelletrykk på opp mot 1,1 MPa, men etterkontroll viste at dette ikke medførte oppsprekking. I forbindelse med svakhetssoner kunne gneisen være av mer oppknust og forvitret karakter (Stumo og Vikane, 2011). Generelt gav gneisen gode driveforhold (med unntak ut partiet med lekkasjepoblemer). Det viser kartlagte Q-verdier gjennom tunnelen, se Figur 22. Sikringsklassene baserer seg på den kartlagte bergkvaliteten (Q-verdi) og tilhørende gitte bergklasser (A-G). Sammenliknet med de to andre tunnelarmene med rundkjøringen i sentrum, er en større prosentandel av tunnelen under Førresfjorden sikret i henhold til sikringsklasse 1. Svakhetszone P og R (se Figur 23) er sikret i henhold til sikringsklasse 4. Til sammenlikning har bergartene i tunnelarmen under Karmsundet (i ofiolittkomplekset) noe dårligere beskaffenhet og kvalitet. Bergartsgrensene under sundet hadde spesielt mye dårligere kvalitet enn grunnfjellet (Moen, 2012).

Grønnstein og grønnskifer bød på generelt gode driveforhold, med stabil bergmasse. Metasandsteinen (fyllonitt) var forespeilet å by på større drivevansker med bakgrunn i utfordringer i det nært anliggende Statpipe-prosjektet. Kort oppsummert måtte 444 meter av Statpipetunnel støpes (full utstøpning) grunnet finknuste bergmasser og leireforekomster. Det 330 meter lange partiet med denne bergarten ble likevel forsert uten å møte på like dårlige forhold beskrevet for Statpipetunnelen. Utfordringen ble heller bergartsgrensen/svakhetssonen mellom grønnskifer og metasandstein. Mer om dette under *svakhetssoner*. Etter

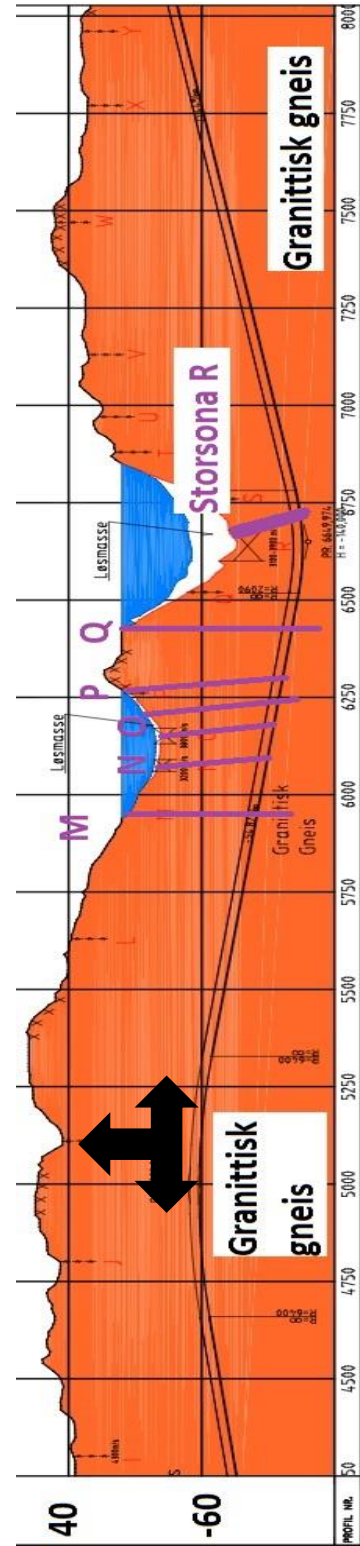
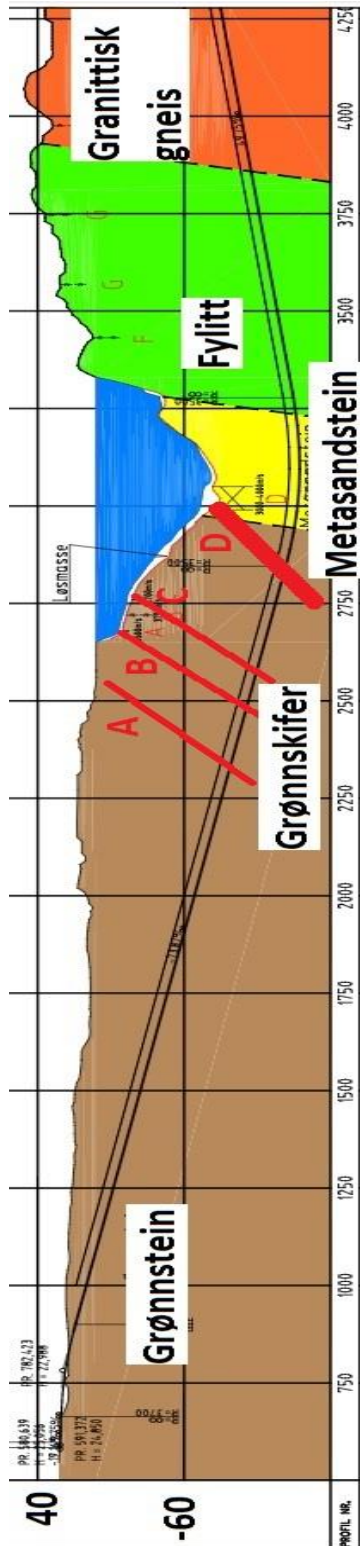
metasandsteinpartiet ble fylltittet påtruffet. Denne var av mer kompetent og stabil karakter, med varierende skifrihetsgrad (Moen, 2012).



Figur 22: Sikringsklasser for tunnelarmen under Førresfjorden (gneis) (Moen, 2012).

Geolog ved prosjektet var blant annet Rune Stumo, tidligere ansatt i Statens vegvesen. Via personlig kommunikasjon i form e-post har han belyst sine erfaringer om innlekkasje fra prosjektet t-forbindelsen. Det ble ikke foretatt noe analyse eller studie av hvilke bergarter som ga lite eller mye lekkasje. Rumos personlige erfaring tilsier at det er vanskelig å klassifisere (med god statistisk kvalitet) forhold som gir mest lekkasje. Man kan godt si at stive bergarter som gneis gir åpnere sprekker og at fylltitter er tettere, men slik trenger det ikke være (Pers. kom., Rumo, 2017).





Figur 23: Geologisk profil for Karmøy-tunnelen. Til venstre: fra påhugg Karmøy til Fosen (Karmsundet). Dårlige soner markert med rødt. Til høyre: fra Fosen til påhugg Mjåsund (Førresfjorden). Dårlige soner markert med lilla. Rundkjøring markert med piler som representerer retning på tunnelarmer. Pil opp henviser til arm mot Haugesund, hvis profil ikke er inkludert her. Basert på profiler fra geologisk sluttrapport (Moen, 2012)

**Svakhetssoner:** Det var forventet at drivingen under Karmsundet skulle krysse en strekning med flere dårlige partier på grunn av en stor svakhetszone i metasandsteinen. Antagelsene var i stor grad basert på erfaringer fra Statpipe-prosjektet. Likevel var de faktiske forholdene bedre enn antatt, da svakhetssonens mektighet var omtrent halvpart av det som var forventet (Stumo og Vikane, 2011). Figur 23 viser at sone D er den største svakhetssonen, og at den er lokalisert i den dypeste delen av tunneltraséen under Karmøysundet. I realiteten ble denne påtruffet tidligere enn det Figur 23 tilsier (Hatlenes, 2011). En naturlig forklaring på dette er at forundersøkelsene (seismikken) beskrev sonen med fall på 90 grader, men virkeligheten var fallet 45 grader. Sonen representerte overgangen fra grønskifer til metasandstein (fyllonitt), og preget tunneltraséen over 130 meter. (Moen, 2012). Sonen ble forsert ved hjelp av tung bergsikring over 145 meter (Hatlenes, 2011).

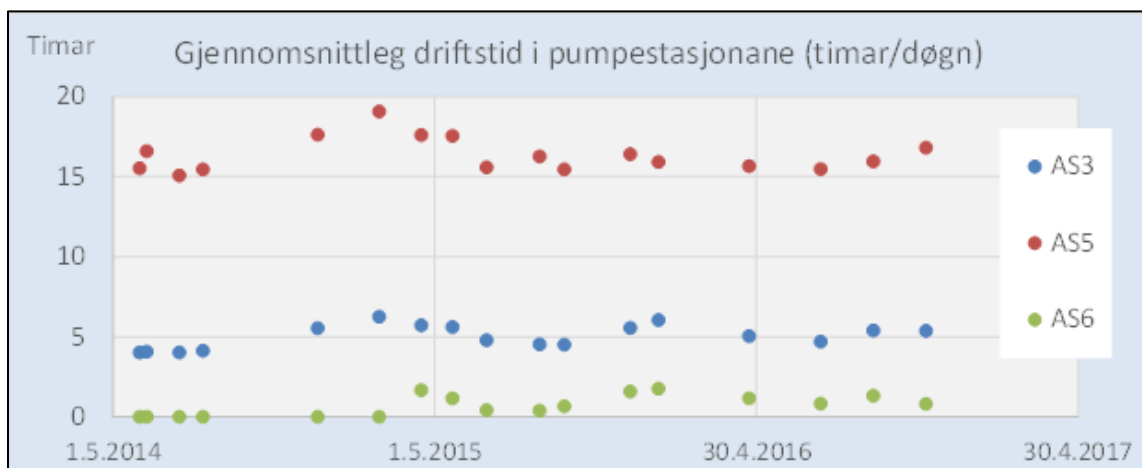
Fra rundkjøringen og østover mot Førresfjorden, ble flere svakhetssoner påtruffet. Noe aktiv leire ble dokumentert i sonene. Disse hadde for øvrig liten mektighet. Svakhetssonene hadde enkelte vannførende sprekker. Dette resulterte i flere runder med injeksjonsarbeid (Stumo og Vikane, 2011). Under Førresfjorden er det i Figur 23 beskrevet seks svakhetssoner, fra M til R. Sone M var sonen som bød på størst lekkasjeutfordringer. Sonen var omtrent 20 meter bred, og måtte injiseres fire runder. Noe restlekkasje forekom etter tetningsarbeidet. Q-verdier for sonen lå mellom 1,5 og 3,1 (Moen, 2012).

Sone R (også kalt «storsona») var forespeilet å inneholde oppknust berg med mulig lekkasjeutfordringer. Sonen ligger plassert midt under Førresfjorden, som en naturlig svakhetszone langs fjorden. De seismiske forundersøkelsene beskrev sonen som en lavhastighetszone med seismisk hastighet 3100 m/s. Fra kjerneboring ble sonen tolket som en 27 meter bred knusningssone. Enkelte partier ble beskrevet som silt, leire og grus. Ved driving ble Q-verdien anslått til å være nede i 0,05 på det verste. Det ble tydelig at injeksjonsarbeidet ble utført «fra dårlig fjell og inn i dårlig fjell». Med andre ord ble arbeidet igangsatt da stoffen allerede var plassert i sona. En viktig lærdom er at det bør injiseres «fra godt fjell og inn i dårlig fjell» (Moen, 2012).

**Overdekning:** Et problemområde i forbindelse med liten fjelloverdekning er beskrevet i geologisk sluttrapport. Dette er ikke inkludert i denne oppgaven, da det er snakk om påhugget på land. For de undersjøiske delene av tunnelen er kravet om 50 meters overdekning imøtekommet, se Figur 23.

**Vanntrykk:** Største tunneldybde under Førresfjorden er 136 meter. Største tunneldybde under Karmsundet er 139 meter (Hatlenes, 2011). Dette gir et maksimalt vanntrykk på henholdsvis 13,6 bar og 13,9 bar. Vanntrykk (eller utfordringer knyttet til vanntrykk) er ikke nevnt i geologisk rapport (2009), geologisk sluttrapport (2012), masteroppgaven til Hatlenes (2011) eller på foredrag om byggingen av T-forbindelsen på Fjellspregningsdagen (2011).

**Vannsikring og lekkasjetall:** I kontrakten for T-forbindelsen er det angitt maks innlekkasje fra sonderhullene. Det tillates ikke lekkasje over 2 liter per minutt fra et enkelt sonderhull, og samlet ikke mer enn 5 liter per minutt fra alle sonderhullene (Hatlenes, 2011). Det ble utført sonderboringer for hver fjerde salve. Hullene hadde en lengde på 28 meter (med 8 meters overlapp) (Moen, 2009). Dette gir en maksimal innlekkasje på 200 liter/min/km tunnel.



Figur 24: Driftstid for pumpene i Karmøy-tunnelen (T-forbindelsen). AS3 pumper ut vann fra Karmsundet, og AS5 for Førresfjorden. AS6 er portalpumpestasjon i portalområdet Mjåsund. Denne var ikke i drift i starten (pers. kom., Lotsberg, 2017).

Lekkasjen i Karmøy-tunnelen har vært stabil over tid. Totalt har lekkasjen vært 8 l/s. Under Karmsundet har lekkasjen vært 2 l/s, mens resterende 6 l/s lekkasje har funnet sted under Førresfjorden og langs den nordlige armen til Haugesund. Den vestre delen har derfor vært uvanlig tørr. Systematisk injeksjon kombinert med akseptabel bergkvalitet har vært årsaken til dette (Pers. kom., Lotsberg, 2016). Figur 24 viser antall timer i døgnet pumpene i tunnelen har vært i drift. AS5 (rød) er pumpen som tar for seg lekkasjevann fra Førresfjorden. Sammenliknet med AS3 (blå), som pumper ut restlekkasje fra Karmsundet, har denne hatt en driftstid på omtrent ti timer mer i døgnet. Vann fra vegarealet like utenfor portalene er hovedårsaken til

svingninger i vannmengder og dermed driftstimer i diagrammet. Dette gjør at innlekkasjen i tunnelen er mer stabil enn det fremkommer av diagrammet (pers. kom., Lotsberg, 2017). Vann- og frostsikringen i Karmøytunnelen er PE-skum brannsikret med sprøytebetong. For mer informasjon om denne type løsning henvises det til forstudie til denne masteroppgaven (Kvarstein, 2016).

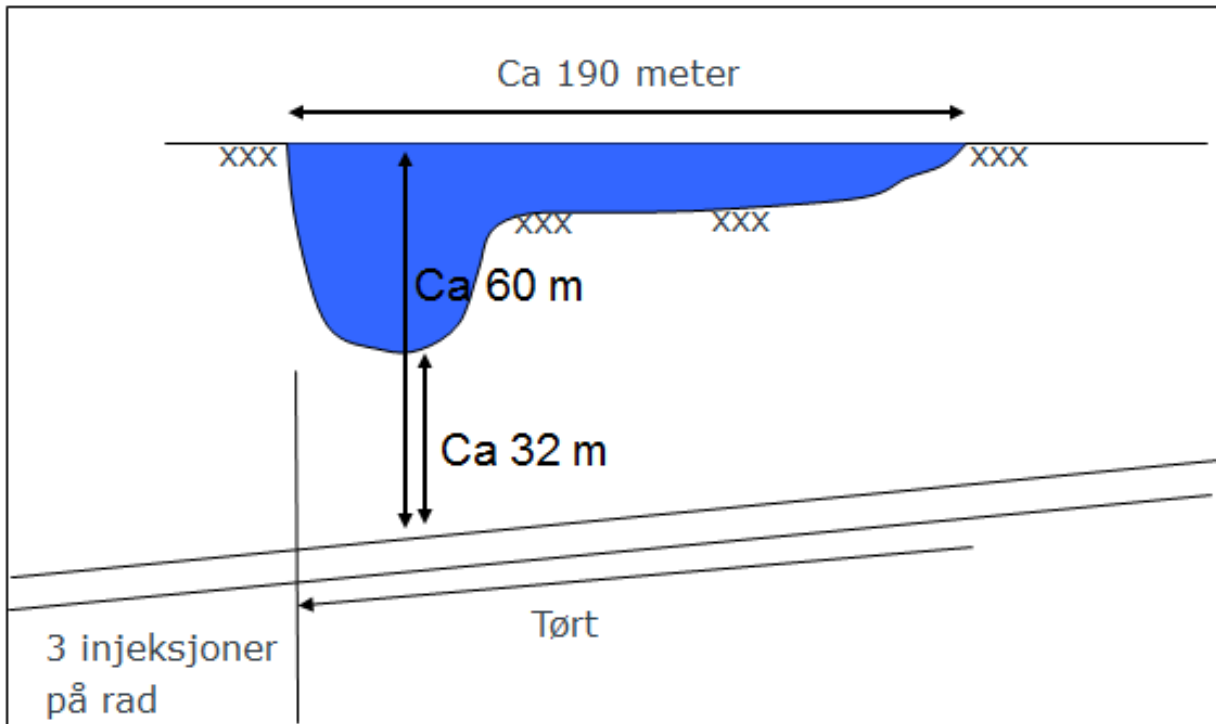
På bakgrunn av Statpipe-prosjektet anslo forundersøkelser at 800 meter av T-forbindelsen måtte støpes ut (totalt 10% av tunnelen). Realiteten ble at 400 meter ble sikret med tung bergsikring, men ingen utstøping. Injeksjon ble benyttet som både vanntetting og stabilitetsforbedrende tiltak i enkelte svakhetssoner. Langs 1800 meter av tunnelen er det utført injeksjon. Det antatte injeksjonsbehovet ble oversteget med 30 % i form av antall meter injisert. Samtidig utgjør antall tonn injeksjonsmasse 69 % av oppgitt masse i kontrakten (Stumo og Vikane, 2011). Det totale forbruket av injeksjonsmasse ble 182 kg/m tunnel mot det kontraktfestede 264 kg/m tunnel. I tunnelen ble det systematisk sonderboret. På forhånd var det bestemt å kjernebore alle partier under sjø. Dette viste seg å være meget gunstig for å kunne ligge i forkant med planlegging av strategi rundt driving og sikring. For enkelte strekker ble det overflødig med både sonderboring og kjerneboring. Det var da tilfelle at kjerneboringen erstattet behovet for systematisk sonderboring. Dette må sies å være årsaken til at 78% av den kontraktfestede mengden sonderboring er utført. Fullstendige sikringsmengder er beskrevet i Tabell 4.

Tabell 4: Sikringsmengder i Karmøy-tunnelen (T-forbindelsen). Både utført sikring og prognoser i kontrakten er inkludert (Moen, 2012). Injeksjon, sonderboring og kjerneboring er uthevet med blå bakgrunnsfarge da dette er spesielt relevant for vannlekkasjer.

	Kontrakt	Utført	% av kontrakt	Enhet/m kontrakt	Enhet/m utført
Meter	8890	8890	100 %		
Bolter (stk)	48000	47830	100 %	5,4	5,4
Sprøytebetong (m <sup>3</sup> )	30400	36085	119 %	3,4	4,1
Spiling (stk)	7150	11130	156 %	0,8	1,3
Støp (m)	800	0	0 %	0,1	0
Sålestøp (m <sup>3</sup> )	5000	597	12%	0,6	0,1
Buer (stk)	280	69	25 %	0,03	0,008
Injeksjon (tonn)	2352	1622	69 %	0,264 (264 kg/m)	0,182 (182 kg/m)
Sonderboring (m)	80000	62000	78 %	9,0	7,0
Kjerneboring (m)	700	1708	244 %	0,08	0,2

**Erfaringer rundt lekkasjeprosedyrer:** Det er svært nyttig å kunne belyse spesielle forhold og erfaringer fra et prosjekt, slik at det kan forekomme erfaringsoverføring til andre prosjekter. Et eksempel på dette er forholdene rundt forseringen av partiet under Litlavatnet (se Figur 25). Litlavatnet er en innsjø på Tysvær og ligger like vest for påhugg Mjåsund. I forundersøkelsene ble det beskrevet at vannstanden er mellom 0,5 og 1,5 meter, mens bunnsedimentene har en maksimal tykkelse på 27 meter. Bergoverdekningen mellom tunnelen og innsjøen er minst 30 meter. Seismiske undersøkelser avdekket ingen svakhetssoner for dette partiet (Stumo, 2009). I geologisk sluttrapport (Moen, 2012) står det at det var forventet å påtreffes vannlekkasjer under Litlavatnet. Dette stemte ikke. Det skulle vise seg at drifingen skulle gå problemfritt, og nesten hele strekket på 190 meter ble sikret ut ifra sikringsklasse 1. Rune Stumo beskriver likevel at det ble påtruffet en lekkasjesone like etter Litlavatnet ble passert. Her var det nødvendig å injisere tre salver etter hverandre. Det er naturlig å anta at bunnsedimentene har fungert som naturlig tettemekanisme i eventuelle steile sprekker fra innsjøen og ned til tunnelen (Pers. kom., Stumo, 2017). Eksempelet illustrerer godt effekten av slam på sjø-/havbunn. Da innsjøen var forsert opphørte også effekten av den naturlige tettingen,

og det oppstod betydelige vannlekkasjer. Mest sannsynlig har vann fra innsjøen funnet veier ned i fjellet via sprekker fra ytterkanten av innsjøen der sedimenteringen var lav.



Figur 25: Enkel skisse over Litlavatnet (Tysvær) med beskrivelse av vannforhold og injeksjon i den underliggende tunnelen (Pers. kom., Stumo, 2017).

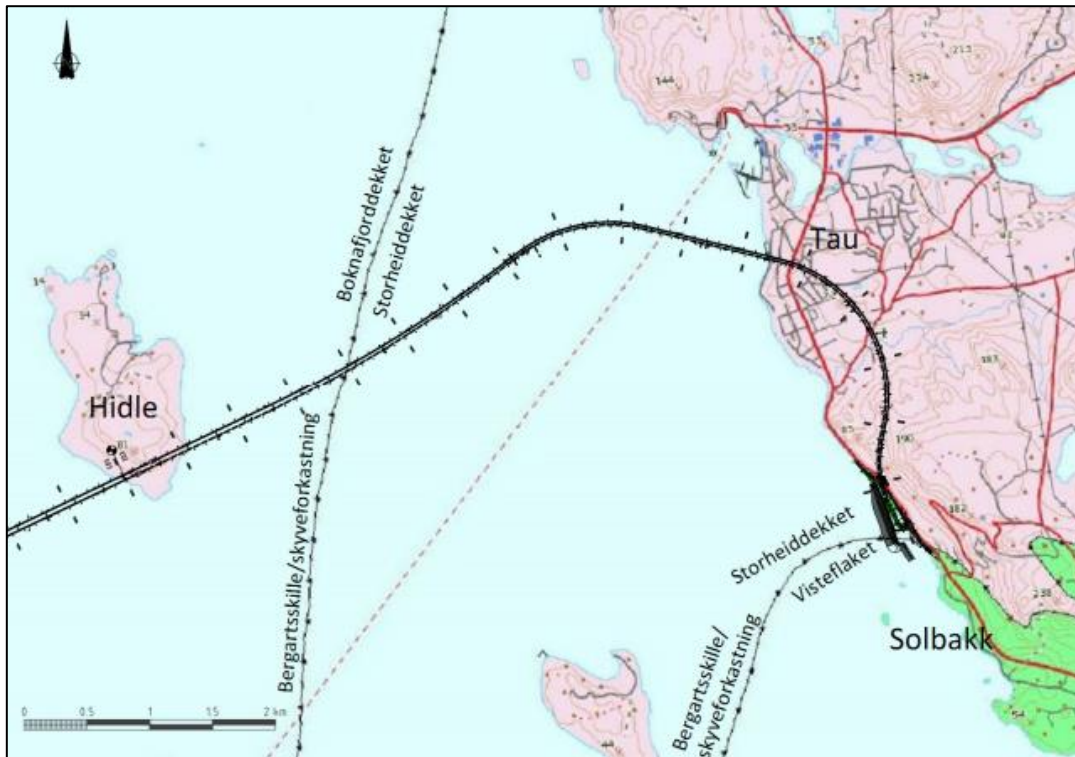
Stumo påpeker at det er vanskelig å produsere gode og troverdige lekkasjeprogner før drivingen er påbegynt (Pers. kom., Stumo, 2017). For T-forbindelsen ble det spesielt gjort to tiltak for å sikre tunnelproduksjon (det ble antatt svært utfordrende driveforhold);

1. Systematisk sonderboring for hver 4. salve (8 meters overlapp) (Moen, 2009)
2. Systematisk kjerneboring 60-120 meter foran stuff i krevende undersjøiske områder

I utgangspunktet ble det besluttet å kjernebore grunnet fravær av kjerneboring i grunnundersøkelsene. Verdien av dette var stor. Spesielt i utfordrende partier hvor en i god tid hadde anledning til å planlegge sikringen allerede før stuffen stod inne i det dårlige partiet. Kjerneboringen ble et verdifullt verktøy som tillot en nøye planlagt driving, og at tiltak ble iverksatt i god tid (Moen, 2012; Stumo og Vikane, 2011). Sonderboring ble anvendt til å avdekke fjellforhold, liten overdekning og sjekke for vannlekkasjer (Moen, 2009).

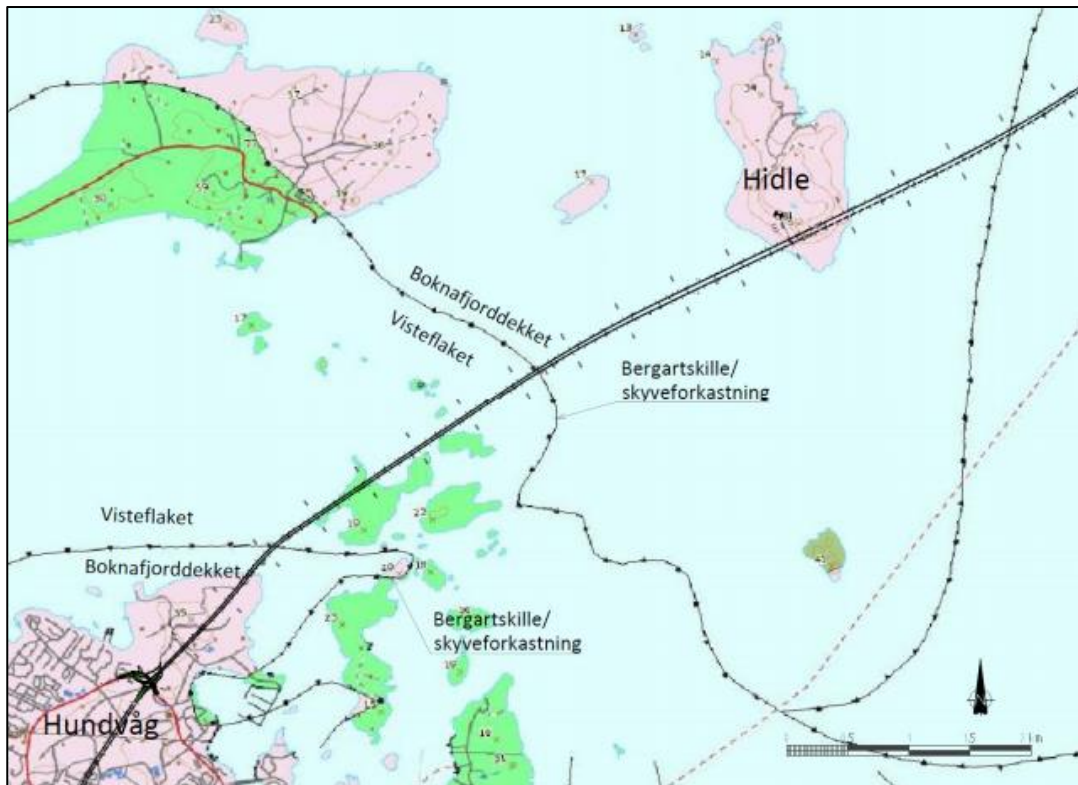
### 5.3 RYFYLKETUNNELEN

Det foreligger to entrepriser for ryfylketunnelen. Den drives fra hver side av to ulike entreprenøren. Dette er årsaken til at det også foreligger to forskjellige ingeniørgeologiske rapporter for konkurransegrunnlag, en for hver entreprise. Disse omhandler begge grunnforhold og regionalgeologi. Tunnelen drives fra Solbakk (påhugg øst) og Hundvåg (påhugg vest). Tunneltrase og geologi (inkludert skyvedekker) kan betraktes på Figur 26 og Figur 27.



Figur 26: Fra påhugg Solbakk (øst). Kartutsnitt fra berggrunnskart på NGU sine nettsider. 1:250 000. Rosa partier er gneis, grønne partier er fylitt (Norconsult, 2012b).





Figur 27: Fra Hundvåg (vest). Kartutsnitt fra berggrunnskart på NGU sine nettsider. 1:250 000. Rosa partier er gneis, grønne partier er fyllitt (Norconsult, 2012c).

**Geologi:** Området er preget av to bergarter, gneis og fyllitt. Tunneltraséen krysser flere kaledonske skyvedekker, og bergartene har noe ulik karakter avhengig av skyvedekket de opptrer i. Fra Solbakk er det Storheidekket som er gjeldende, før tunnelen krysser inn i Boknafjorddekket i Hidlefjorden (Norconsult, 2012b). Påhugg Hundvåg ligger også i Boknafjorddekket. Det vil si at tunnelen krysser inn i dette skyvedekkenet to ganger. Området i mellom fastlandet og halvveis ut til øya Hidle er del av Visteflaket (Norconsult, 2012c). Totalt er det tre skyvedekker involvert i tunnelstrekningen. Disse er ytterligere beskrevet i Tabell 5.



Tabell 5: Oversikt over ulike skyvedekker for Ryfylketunnelen. Innholdet er basert på NGU rapport om geologiske og geofysiske undersøkelser fra Rogfastprosjektet (Rønning, et al., 2006) og NGUs database for geologiske enheter (NGU, u.å.).

Skyvedekke (øverst-nederst)	Bergarter	Alder bergarter
<b>Boknafjorddekket</b>	Granittisk gneis. Linser av marmor, glimmerskifer og amfibolitt.	Prekambrium.
<b>Storheidekket</b>	Sterkt båndet granittisk gneis, glimmerrikt. Linser av marmor og glimmerskifer.	Prekambrium.
<b>Visteflaket</b>	Kvartsrik glimmerskifer og fyllitt. Soner med sandstein og kvartsittbenker.	Kambrium/ordovicium.

Fyllitt og glimmerskifer betegnes som duktile bergarter. Disse er metamorfe skifere, som relativt lett lar seg plastisk deformere. I forhold til andre bergarter vil disse ofte være tørrere. Dette gjelder både for mer intakte masser og oppknuste soner, i sammenlikning med tilsvarende oppsprekking i de fleste andre bergarter. Granitt på den andre siden er en typisk sprø bergart. Granittisk gneis vil sprekke opp annerledes enn fyllitt. Mens fyllitt gjerne danner plateformede blokker, vil granitten sprekke opp i nær kubiske blokker (Palmstrøm, 1997).

Dette samspiller godt med erfaringer fra Ryfylketunnelen. Gneis og granitt på prosjektet kjennetegnes som godt fjell, men mer injeksjonskrevende da det generelt er mer åpne sprekker. Fyllitten blir beskrevet med at «den tetner godt mot vann og er både lett lastbar og tungsprengt» (Gjærevold, 2015). I Visteflaket er det også enkelte partier med rene kvartsittbenker, og disse ble i den geologiske rapporten forutsett til å kunne gi store lekkasjer (Norconsult, 2012c). Dette støttes av kontrollingeniør på prosjektet, Anne-Merete Gilje. Hun kan meddele at fyllitten har vært mye tettete sammenliknet med gneisen. Per april 2017 er det blitt injisert betydelig mer på Solbakk-siden av tunnelen i forhold til Hundvåg-siden (pers. kom., Gilje, 2017). Ved å sammenlikne informasjonen om skyvedekkerne i Tabell 5 med tunneltraséen på Figur 27 og Figur 26 gir dette god mening, da tunnelen treffer på Visteflaket med fyllitt i nærheten av påhugg Hundvåg. Generelt har forekomster av fyllitt overgått det som var antatt i forundersøkelsene. Fyllitten på Hundvåg har større mektighet og utbredelse, og på Solbakk ble det påtruffet en lengre sone. Her var det ikke forventet fyllitt i det hele tatt (pers. kom., Gilje, 2017).

**Oppsprekking:** Salvene i tunneldrivingen blir systematisk kartlagt med hensyn på Q-verdi. Fylltitten er en relativt tett bergart med lite oppsprekking. Generelt har  $J_n$  hatt lav verdi, og antall sprekkese sett er gjerne ett. Det må likevel nevnes at enkelte unntak har gitt injeksjonsbehov. For gneisen har  $J_n$  hatt en høyere verdi da antall sprekkese sett ofte er minimum to. Det har ikke vært uvanlig at antall sprekkese sett har vært tre i gneisen. Disse sprekkene er mer åpne enn sprekkene i fylltitten (pers. kom., Jensen, 2017).

**Svakhetssoner:** De ingeniørgeologiske rapportene for prosjektet beskriver totalt 44 svakhetssoner. Disse er klassifisert i svakhetssoneklasser (I-IV), hvor klasse IV karakteriseres med svært dårlig og ustabil med vanskelige driveforhold. Alle klassene blir betegnet med mulig vannlekkasjer i sonen og i sideberget, med unntak av klasse I hvor det kun er fare for vannlekkasjer i sonen.

Seks strekninger av tunnelen er beskrevet som spesielt krevende for drivefasen. Disse kjennetegnes med for eksempel liten overdekning og lav seismisk hastighet (< 4000 m/s). I enkelte strekninger er det forventet «... dårlig bergmasse med stor fare for rasutvikling og mulighet for vannlekkasjer i sone og sideberg.» (Norconsult, 2012c, 2012b).

Det er kjent at vannlekkasjer gjerne opptrer i sprekker nærliggende svakhetssoner, og ikke i selve svakhetssonen (Nilsen og Palmstrøm, 2001). Med tanke på bergartenes karakteristiske egenskaper er det naturlig å anslå at innlekkasje har inntruffet i sideberget til svakhetssoner i gneis, vel som sentralt i sonen.

**Overdekning:** Enkelte partier av tunneltraséen har en overdekning som ikke møter det generelle kravet om minimum 50 meter. Mellom påhugg Hundvåg og Hidle (øyen som ligger midt fjords) har 155 meter av tunnelen en overdekning mellom 44 meter og 50 meter. Mellom påhugg Solbakk og Hidle er den minste overdekningen 54 meter (Norconsult, 2012c, 2012b).

I en artikkel i tidsskriftet *Fjellsprenger 'n* (Gjærevold, 2015) beskriver anleggsleder Tor Rognli i AF Anlegg (entreprenøren som driver fra påhugg Hundvåg) at det generelt er lite lekkasje tilknyttet partier med liten overdekning for Ryfylketunnelen. Årsaken til dette er slam fra havbunnen som naturlig tetter sprekker. Innlekkasje finner først og fremst sted under holmer og skjær. Kontrollingeniør for entrepris E02 (inkluderer tunneldriving fra påhugg Hundvåg) Erik Jensen, spesifiserer at lekkasjer oftest forekommer der det er lite bunnslam i den overliggende havbunnen. Bunnslam vil være med på å naturlig tette de dypgående sprekkene som tunnelen påtreffer. Lite bunnslam er typisk for strandsoner eller partier som ligger under land (inkludert holmer, skjær og øyer) (pers. kom., Jensen, 2017).

**Vanntrykk:** Ryfylketunnelen er på det meste 291 meter under havet dyp. Dette medfører at maksimalt teoretisk vanntrykk kan nå 29,1 bar. I verdenssammenheng er -291 meter rekorddypt, da den dypeste undersjøiske tunnelen per dags dato er Eiksundtunnelen. Rogfasttunnelen overtar rekorden når den åpner i 2024. Den geologiske rapporten for Rogfasttunnelen beskriver at det for andre dyptliggende tunneler, som Eiksundtunnelen (-287 meter) og Hitratunnelen (-264 meter), ikke har oppstått spesielle problemer med injeksjon. Dagens teknologi og utstyr for injeksjon takler vanntrykk godt 100 bar trykk, og spesialutstyr kan også levere opp mot 200 bar trykk (Holmøy, *et al.*, 2012).

**Vannsikring og lekkasjetall:** I Ryfylketunnelen foreligger det krav til maksimalt 200 l/min/km tunnel (100 l/min/km i hvert av de to løpene). Øyvind Hamre, en av byggelederne på prosjektet, meddeler at begge løpene har gjennomsnittlig hatt innlekkasje på ca. 180 liter/min/km tunnel for de fire første kilometerne med driving i gneisbergarten. Etter dette ble det påtruffet fyllitt, og lekkasjen har dermed sunket til liten eller ingen lekkasje i tunnelen (pers. kom., Hamre, 2016). Den største lekkasjen fra et sonderhull har vært omtrent 100 liter i minuttet. Dette ble målt i gneisen før fyllitten ble påtruffet fra påhugg Solbakk (pers. kom., Mausset, 2017).



*Figur 28: Montering av PE-isolasjonsmatter i entreprise E03 i Ryfylketunnelen. Disse har en tykkelse på 45 mm. Det monterings armeringsmatter over, før det avsluttes med 8 cm sprøytebetong for brannbeskyttelse (Pers. Kom., Mausset, 2017). Foto: Øyvind Ellingsen/Statens vegvesen.*

Tunnelen er delt i to entrepriser, og det foreligger ulike løsninger for vann- og frostsikring fra de to sidene. Geolog Erik Jensen er kontrollingeniør for entreprise E03, og geolog Magni Mausset er kontrollingeniør for E02. For entreprise E03, som inkluderer tunneldriving av Ryfylketunnelen fra påhugg Hundvåg, er det som vann- og frostsikring valgt PE-skum (tykkelse 45 millimeter). PE-skummet er kryssbundet og påført nettarmert sprøytebetong i tunnelen. Det er membran ved portalområdet (pers. kom., Jensen, 2017). Montering av PE-isolasjonsmatter er vist i Figur 28. For entreprise E02 (tunneldriving fra Solbakk) falt valg av vannsikring på hvelv av sprøytebetong, brannsikret med sprøytebetong. Denne løsningen er priset noe lavere enn hvelv med PE-skum. Vegvesenet er godt fornøyd med valg av denne løsningen for entreprise E02. Den eneste ulempen de har erfart er at PE-skum er noe mer fleksibelt da dette lar seg montere rett på knøl og dermed er enklere å benytte for mindre, fuktige felt som kan finne seg i et lengre tørt strekke (pers. kom., Mausset, 2017).

Antatt injeksjonsbehov for Ryfylketunnelen er 6000 tonn sement. I tunnelens to løp er det injisert totalt 1771 tonn etter gjennomsnittlig 6579 meter med driving fra påhugg Solbakk (pers. kom., Mausset, 2017). Fra påhugg Hundvåg er det injisert 1089 tonn sement totalt i begge løpene etter gjennomsnittlig 6684 meter driving (pers. kom., Jensen, 2017). Tallene er samlet inn tidlig mai 2017. Dette tilsvarer totalt 2860 tonn når omtrent 837 meter av tunnelen gjenstår, og et ca. gjennomsnittlig forbruk på 21,62 tonn per 100 meter tunnel. Fra Hundvåg er drevet gjennom mer fyllitt i forhold til Solbakk. Injeksjonstallene fra Solbakk antas mer relevante opp mot Nordøyvegen. Her er det gjennomsnittlig injisert 26,92 tonn per 100 meter tunnel totalt for begge løpene. Det ligger an til at injeksjonsomfanget blir vesentlig lavere enn antatt.

Det presiseres at Ryfylketunnelen består av to løp, og Atlanterhavstunnelen og Ryfylketunnelen består av et løp.

### ***Erfaringer rundt lekkasjeproblematikk:***

Entreprise E03: Erik Jensen vurderer utfordringer med vann i tunnelen for entreprise E03 fra Hundvåg som minimale. I noen få tilfeller har sonderboring vist større lekkasjer (> 100 liter/minutt). Ved hjelp av injeksjon har disse partiene enkelt latt seg tette. Mer ugunstig vil det være dersom drypp/små lekkasjer forekommer i forbindelse med aktiv leire. Dette er fordi partier med mindre lekkasjer sjeldent blir injisert. For denne delen av tunnelen har det hittil kun blitt påtruffet vannlekkasjer og leire samtidig et fåtall ganger. Løsningen har vært å øke permanentsikringen i form av bolter og sprøytebetong ved slike tilfeller (pers. kom., Jensen, 2017).

Lekkasjer på stoff har generelt vært uproblematisk å tette. For entrepriser E03 har den største utfordringen i forbindelse med innlekkasje dreid seg om å tette uforutsette lekkasjer. Med dette menes at det har blitt påtruffet vann under bolting av salve, til tross for at det ikke forekom lekkasjevann fra sonderhullene. Jensen omtaler slike lekkasjer som krevende å få tettet. Fin-Bolt (kombinasjonsbolt) har blitt forsøkt benyttet for å stanse lekkasjene fra borhullene. Dette har gitt liten effekt. I slike tilfeller har det vært utfordrende å tilfredsstille lekkasjekravet, og stoffmannskapet har opplevd at utstyret deres ruster. Jensen påpeker at det er vanskelig å forutse lekkasjer. Enkelte faktorer kan gi en pekepinn på hva som kan forventes av lekkasjer, eller fungere som en logisk forklaring på lekkasjer man har påtruffet. Slike faktorer kan være bergartstype, overdekning og holmer/øyer (lite bunnslam på havbunn). Forholdene på stoff gir mer sikker informasjon om faktiske lekkasjeforhold. Det er derfor viktig at det sonderbores rutinemessig for å få et bilde på både bergkvalitet og lekkasjer (pers. kom., Jensen 2017).

Entrepriser E02: Geolog Magni Maset meddeler at det generelt har det vært mer lekkasje for entrepriser E02 fra Solbakk, sammenliknet med E03. Dette har sannsynligvis direkte sammenheng med geologien i området, da denne delen av tunnelen i større grad består av bergarten gneis. Lekkasjer har forekommet både under land og under sjø, hvorav de største lekkasjene har funnet sted under sjø i tilknytning til svakhetssoner i gneis. Av utfordringer knyttet til vann i tunnelen, har entreprenøren meldt om direkte slitasje på utstyr (rust), og indirekte slitasje som følge av punktutvasking av vegbane. Humpete og dårlig veg under driving betyr ekstra påkjenninger for arbeidskjøretøy og maskiner i tunnelen. Vannlekkasjer har også ført til utfordringer med sprøytebetongen. Vann på bergoverflaten gir dårlig heft til sprøytebetongen, da det kan bygge seg opp vanntrykk bak betongkonstruksjonen. Dette kan resultere i nedfall i form av større flak. Dersom nedfallet forekommer noen timer etter sprøyting kan sikringsarbeidet vanskeliggjøres, og medføre risiko for arbeidere på stoff. Erfaringer fra Ryfylketunnel er imidlertid at slike nedfall gjerne skjer samtidig som sprøytingen foregår. Det har i perioder vært delvis utfordrende å tette lekkasjer foran stoff. Systematisk injeksjon for hver 5. meter og i enkelte tilfeller doble injeksjoner har vært løsningen på krevende lekkasjepartier. Som for entrepriser E03, har det skjedd at lekkasjevann fra bolting har oppstått, til tross for tørre sonderboringer gjennom partiet.

Generelt påpeker Maset at det er viktig at det er avklart mellom entreprenør og byggherre hvem som står med ansvaret ved injeksjon. For Ryfylketunnelen er det byggherre som står ansvarlig for injeksjon og står dermed for alle direkte utgifter tilknyttet dette. Samtidig oppleves det at entreprenør sitter på mer erfaring og kunnskap rundt injeksjonsarbeid og injeksjonsbehov.

Ryfylketunnelen har hatt overraskende mye lekkasje (i gneisbergarten), noe kontrakten ikke har tatt høyde for. Det er derfor viktig med et godt samarbeid slik at begge partene er enig i fremgangsmåte og tettestrategi (pers. kom., Mausest, 2017).

# Kapittel 6

## Oppsummering av lekkasjeforhold og vannsikring fra referanseprosjekter

I Tabell 6 er blant annet tallfestede parametere knyttet til lekkasje og injeksjon oppsummert. Tre ulike vann- og frostsikringsløsninger er representert. Både Karmøytunnelen (T-forbindelsen) og Ryfylketunnelen har/skal få montert hvelvløsning med sprøytebetong. I Karmøytunnelen er det montert PE-skum i hele tunnelen, mens det for Ryfylketunnelen er en todelt entreprise med hver sitt alternativ; entreprise fra påhugg Solbakk (E02) har sprøytebetonghvelv med membran, mens motgående entreprise fra Hundvåg (E03) har sprøytebetonghvelv med PE-skum. De to entreprisene har forskjellige løsninger ettersom ulike kontrakter gir ulike priser (fra entreprenørens side), og membranløsningen ligger under PE-skumløsningen i pris. Restlekkasjen i de to ferdigstilte tunnelene overstiger ikke de satte lekkasjekravene. Foreløpig lekkasje i Ryfylketunnelen overstiger heller ikke kravet. Atlanterhavstunnelen har en hvelvløsning som ikke er godkjent i den nyeste håndboken om vegtunneler (Statens vegvesen, 2016b). Følgende løsninger er presentert som mulig alternativer i håndboken;

- Hvelv av sprøytebetong.
  - Montres med **membran** ved lav frostmengde (frostmengde  $F_{10} < 8000 \text{ h}^\circ\text{C}$ ). Ved lav frostmengde *kan* PE-skum benyttes som alternativ, prosjektspesifikk løsning.
  - Monteres med **PE-skum** ved høy frostmengde (frostmengde  $F_{10} < 8000 \text{ h}^\circ\text{C}$ ). Membran ikke nødvendig.
- Hvelv av betongelementer.
  - Monteres med membran bak elementene.
  - Monteres med eller uten frostisolasjon XPS avhengig av frostmengde som beskrevet ovenfor.
- Kontaktstøpt hvelv med membran.

Alle tunneler skal også ha vann- og frostsikring i portalområdet. Her anvendes membran (Statens vegvesen, 2016b).

Tabell 6: Oppsummerte forhold fra referanseprosjektene.

Tunnel (åpnet)	Vann- og frostsikring	Lengde [km]	Lekkasjekrav [l/min/km]	Lekkasje [l/min/km]	Kommentar til lekkasje	Antatt injeksjonsbehov [tonn]	Utført injeksjon [tonn]	% av kontrakt
<b>Atlantehavstunnelen (2009)</b>	Tunnelduk	5,735	300	108 (reg. nov 2016)	Redusert fra 160 l/min/km i 2009 grunnet naturlig tetting.	1540	1708	111%
<b>Karmøy tunnelen (2013)</b>	Hvelv av sprøytebetong og PE-skum	8,942	200	54 (reg. nov/des 2016)	Jevnt over vært stabil lekkasje. Størst lekkasje under Førresfjorden.	2352	1622	69%
<b>Ryfylketunnelen (-)</b>	Hvelv av sprøytebetong. PE-skum fra Hundvåg, membran hvelv fra Solbakk.	14,100	200	180 (reg. etter 4 km i gneis under driving)	Registret lekkasje er i partier med gneis. Fyllingen gir liten/ingen lekkasje	6000	Under bygging	Under bygging



Injeksjonsbehovet i Atlanterhavstunnelen viste seg å være større enn antatt. Samtidig ble 1217 tonn av total injeksjonsmasse 1708 tonn anvendt i den mye omtalte svakhetssonen hvor raset gikk. I lys av dette kan det ikke sies at 11 % overstigning av anslått injeksjonsbehov var spesielt mye. For Karmøytunnelen var situasjonen motsatt. Kun 69 % av kontraktfestet injeksjonsbehov ble oppfylt. Erfaringer fra Statpipe-prosjektet bidro til en pessimistisk fastsettelse av prognoser for driveforholdene i tunnelen, og det var antatt at forholdene under Karmsundet skulle by på større problemer. Samtidig var forseringen av svakhetssone R under Førresfjorden noe mer krevende enn antatt. Vannlekkasjer har likevel ikke bydd på omfattende utfordringer under drivingen av Karmøytunnelen. I Ryfylketunnelen ligger det an til at injeksjonsomfanget blir lavere enn antatt.

Involverte geologer fra Statens vegvesen på de tre prosjektene har alle fått henvendelser fra undertegnede med spørsmål om hvilke forhold de opplevde var med på å gi innlekkasje. Kort oppsummert ble følgende forhold trukket frem som avgjørende;

- Bergartstype
- Naturlig tetting i form av bunnslam
- Tette løsmasser på fjor/sjøbunn
- Svakhetssoner i tilknytning stiv bergart

Det er en felles oppfatning om at stive bergarter byr på mer åpne og dermed potensielt mer vannførende sprekker enn tette bergarter. Eksempler som blir trukket frem er gneis og fyllitt. I Ryfylketunnelen har kartlegging ut ifra Q-systemet gitt lavere  $J_n$  (antall sprekesett) i fyllitt i forhold til gneis. Geolog Kåre Ingolf Karlson (Atlanterhavstunnelen) beskrev at sprekke i gneis gjerne var åpne og vannførende. Geolog Rune Stumo (Karmøytunnelen) poengterer likevel at det ikke trenger å være sånn. Dette støttes videre av geolog Erik Jensen (Ryfylketunnelen, E03) som understreker at det finnes unntak og at de har opplevd å måtte injisere fyllitt. Geolog Magni Mausest (Ryfylketunnelen, E02) meddeler at de største innlekkasjene har kommet under land i tilknytning til svakhetssoner i gneis. Et annet viktig forhold som poengteres av geologer i Ryfylketunnelen og Karmøytunnelen er viktigheten av bunnslam på hav/sjøbunn. Dette vil bidra med å naturlig tette vertikale sprekker fra havbunnen tunnelen eventuelt måtte treffe på. Dette gir økt sannsynlighet for lekkasjer i strandsoner eller under øyer for undersjøiske tunneler. I Karmøytunnelen ble dette erfart spesielt under forseringen av Litlavatnet. Direkte under vannet var tunnelen tørr. Lekkasjene ble først påtruffet like etter vannet. Geolog Rune Stumo mener at bunnslam i innsjøen eller eventuelt tett moreneavsetning var årsaken til det tørre partiet.

# Kapittel 7

## Laboratorietesting av materiale fra svakhetszone

Totalt er det boret tre borhull i forbindelse med prosjekteringen av Nordøyvegen. Disse er:

- 1) BH1 Hestøy
- 2) BH1 Fjørtoft
- 3) BH1 Hestøy

Kjerneloggingen er utført av ingeniørgeologer fra Norconsult i tidsrommet 05.11.12 - 14.11.12. I etterkant ble kjernene fraktet til NGU sitt lager på Løkken verk, hvor de oppbevares permanent. Kjerneloggingen er dokumentert gjennom datarapporten *Kjernelogging (Sandøy, Loftesnes og Todnem, 2012)*.

Tidligere har det ikke vært foretatt laboratorietester på leire i kjernene. Den bakenforliggende årsaken til dette er at det for de fleste tilfeller er observert for lite leire til å teste. Derimot oppfordrer den geologiske rapporten (Grob og Karlson, 2014) til testing av svelleleire, dersom sonderboringen avslører større leirepartier. I både den geologiske rapporten og i datarapporten for kjernelogging er det beskrevet partier med såkalt hardpakket leire. I den geologiske rapporten er det blant annet beskrevet at: «I borkjernene fra Hestøya ble det funnet en sone med 1 m tykk, hardpakket leire i en 9,6 m bredd svakhetszone» (Grob og Karlson, 2014).

I samråd med veileder ble det besluttet at det ville vært interessant å innhente prøver fra aktuelle partier på borkjernene for å teste for svelleegenskaper. Leire i sprekker er et av flere forhold som vil kunne påvirke permeabiliteten i bergmassen. Åpne sprekker uten leirfylling vil resultere i god permeabilitet, samtidig som økende leirinnhold vil redusere permeabiliteten (gitt at innspenningen er tilstrekkelig). I det norske grunnfjellet, herunder gneisregionen, vil det kunne være tilfelle at store deler av sonematerialet i svakhetssoner er omvandlet til leire. Årsaken til dette er nedknusning og kjemisk omvandling. I slike tilfeller vil leira kunne gi stabilitetsproblemer som overstiger eventuelle positive tetteeenskaper (Klüver og Kveen, 2004). Samtidig er det typisk at vannførende sprekker ikke er lokalisert i selve svakhetssonen,

men heller i oppsprukket sideberg og enkeltsprekker, gjerne i umiddelbar nærhet til svakhetssonen. Sonen i seg selv vil være relativt tett på grunn av leiren (Nilsen og Palmstrøm, 2001). Det er ofte knyttet store utfordringer til tunneldriving gjennom svakhetssoner som inneholder svelleleire. Et eksempel på dette er raset som gikk i Hanekleivtunnelen i 2006, fem år etter tunnelen åpnet for trafikk i 2001. Raset skjedde i en forkastningssone hvor Q-verdien var kartlagt til 0,01-0,02. Svellende leirmineraler er antatt å være en av flere faktorer som trigget raset. Svellingen var mest sannsynlig et resultat av vannfylte sprekker og opphoping av fukt bak vann- og frostsikrigshvelvet. XRD-analyse av sonen påviste svellemineraler (smektitt) i sonen. Gjennom frisvellingstest ble det registrert moderat aktiv svelling (150%) (Mao, *et al.*, 2015).

Aktuelle tester for leire med antatt svellende egenskaper er fargetest for påvisning av svellende mineraler, røntgendiffraksjon for mineralbestemmelse, svelletrykksmåling og frisvelling (NFF, 2008).

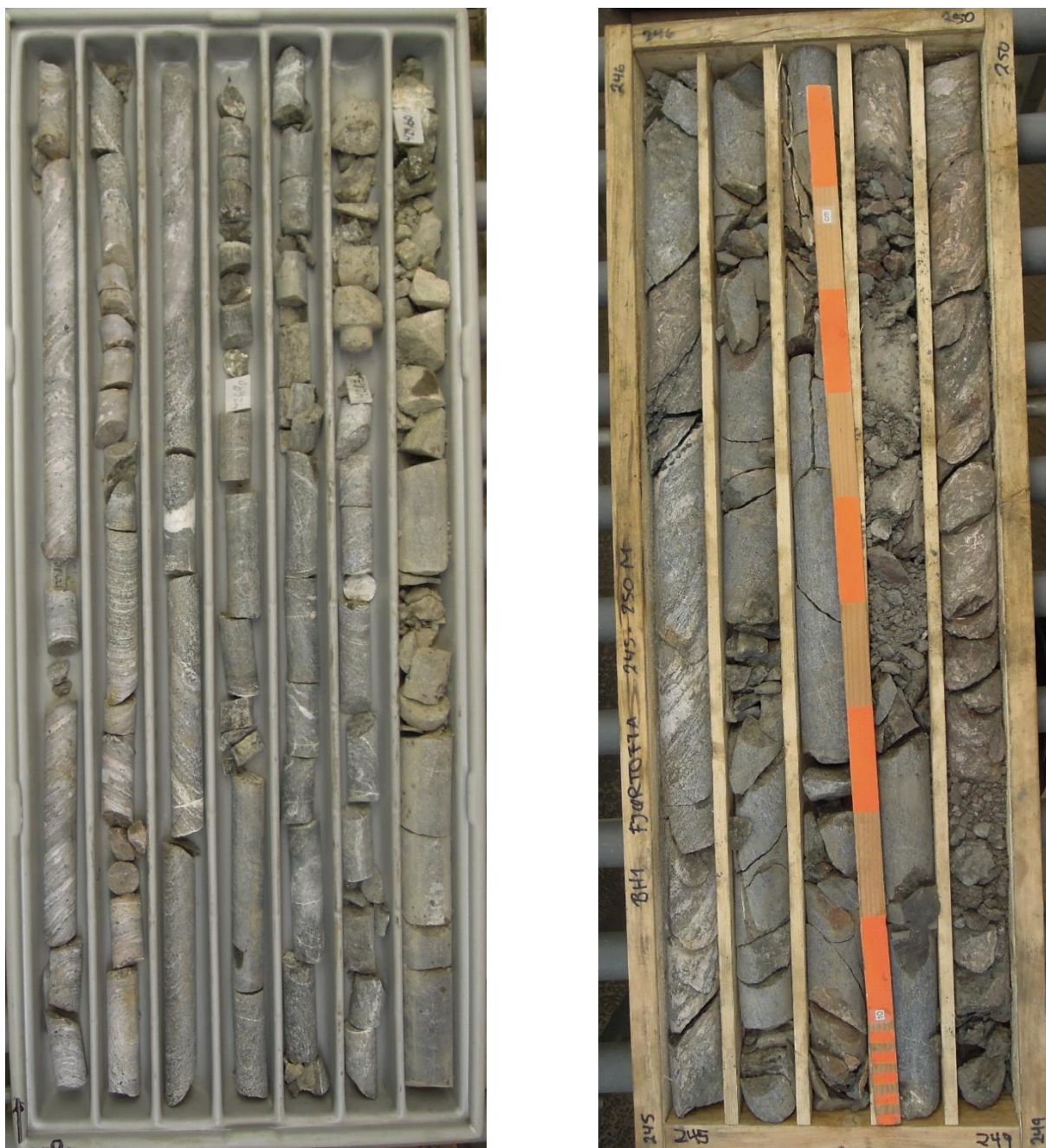
## 7.1 TESTMATERIALET

Fra kjerneloggen (Sandøy, Loftesnes og Todnem, 2012) ble det vurdert hvilke lokaliteter som kunne inneholde relativt mye leire, og som dermed var aktuelle for nærmere undersøkelser. De aktuelle lokalitetene er gjengitt i Tabell 7.

Tabell 7: Oversikt over lokaliteter på borkjernene som er aktuelle for laboratorietesting. Innholdet i tabellen er hentet fra datarapporten (Sandøy, Loftesnes og Todnem, 2012).

Borhull	Lokalitet, fra-til	Lengde	Beskrivelse
<b>BH1</b> <b>Hestøya</b>	420,5-430,1	9,6	MULIG SVAKHETSSONE Oppsprukket bergmasse, og flere knuste partier. Bergart: Øyegneis/Båndgneis/Eklogitt/Amfibolitt. RQD: 10-100 (gjennomsnitt: 45). Dårligst parti: 428,5-429,7. Her er en sone med knust berg og hardpakket leire. Liten kjernediameter i dette området.
<b>BH1</b> <b>Fjørtofta</b>	248,3-249,5	1,2	SVAKHETSSONE Oppknust/oppsprukket leirsone, med hardpakket leire og oppknust bergmasse. I området rundt svakhetssonen observeres grafittaktig belegg på sprekkeplan.

BH1 Hestøya går fra Hestøya og under Haramsfjorden. BH1 Fjørtofta går fra Fjørtofta og under Nogvafjorden. Lokalitetene beskrevet i Tabell 7 ble studert på Løkken verk. Bilde av kjerneboksene med lokalitetene kan sees på Figur 29. Bakgrunnen for valg av lokaliteter er at beskrivelsen henviser til partier med hardpakket leire.



Figur 29: Borkjerneboksene med aktuelle lokaliteter. Til venstre: Hestøya (423,5-429,7), til høyre: Fjørtofta (245-250)

**Lokalitet Hestøya:** I kjerneloggen (Sandøy, Loftesnes og Todnem, 2012) blir sonen beskrevet som oppknust med vekslende vertsbegarter. Det dårligste partiet (428,5-429,7) skal inneholde hardpakket leire og knust bergmasse. Nærbilder fra det dårlige partiet kan sees på Figur 30 og Figur 31.



Figur 30: Nærbilde av borkjernen fra Hestøya, lokalitet 429,60 meter. Foto: Ingvild Kvarstein.



Figur 31: Nærbilde av borkjernen fra Hestøya, lokalitet 428,70 meter (øverst) og 429,2 meter (nederst). Foto: Ingvild Kvarstein.



I den geologiske rapporten (Grob og Karlson, 2014) fremkommer det at lokaliteten skal inneholde en 1 meter tykk sone med hardpakket leire. Denne skal befinne seg i en svakhetssone med totalt 9,6 meter mektighet. Etter å ha studert borkjerne-kassen både visuelt og ved å prøve å smuldre opp fragmenter i hånden ble det besluttet å ikke teste materialet i laboratorium. I samråd med ansatte på Løkken verk fra NGU ble det konkludert med at majoriteten av materialet var såpass intakt at det ikke kan betegnes som hardpakket leire. Kjerne fra Fjørtofta var av mer oppknust karakter, og det var derfor naturlig å ta prøver fra disse borkjernene.

**Lokalitet Fjørtoft:** Det er beskrevet i datarapporten (Sandøy, Loftesnes og Todnem, 2012) at partiet 248,30-249,50 er en oppknust leirsone bestående av hardpakket leire og knuste masser. Et nærbilde av partiene 248,48- 248,87 og 249,48-249,87 kan betraktes på Figur 32 (se svarte piler).



*Figur 32: Kjerne-kasse med aktuell lokalitet fra Fjørtofta. Den nest nederste raden viser 248,48-248,87 og nederste raden viser 249,48-249,87. Foto: Ingvild Kvarstein.*



*Figur 33: Nærbilde av borkjernelokalitet 248,80. Området er merket med rød ring i Figur 32. Foto: Ingvild Kvarstein.*

Partiet er kartlagt som en knusningssone som er leirholdig i den geologiske rapporten. I tillegg står det skrevet at berget er mekanisk svakt og med grafittbelegg (Grob og Karlson, 2014). Undertegnede vil beskrive enkeltpartier i svakhetssonen som oppsmuldret eklogitt, mest sannsynlig utsatt for forvitring fra vann i sprekker. Dette kan betraktes på Figur 33. Andre partier er noe mer intakte, slik som partiet 249,50-250,00 (se nederste rad i Figur 32).

Det ble tatt to prøver fra borkjernene fra Fjørtofta. Prøve 1 ble hentet mellom profil nummer 248,4 og 248,6. Prøve 2 ble hentet mellom profil nummer 249,2 og 249,4. Dato for innhenting var 7. mars 2017. Alle testene ble utført ved ingeniørgeologisk laboratorium ved institutt for geovitenskap og petroleum, NTNU, under veiledning av overingeniør Gunnar Vistnes.

## **7.2 PREPARERING AV PRØVEMATERIALET**

Prøven ble preparert. Det innebar å sikte prøven slik at finstoff ( $< 20 \mu\text{g}$ ) ble separert ut ved sikting. For partier i berget som ikke er direkte knyttet til en svakhetsone kan det være en utfordring å ta ut prøver med nok finstoff. Svelleleire kan likevel avdekkes ved hjelp av mineralidentifikasjon ved å studere for eksempel borkjernene (Vegdirektoratet, 2015). Etersom undertegnede opplevde at kjerneloggingen (Sandøy, Loftesnes og Todnem, 2012) var noe upresise i sin beskrivelse av leirforekomster i svakhetssonene, ble det en utfordring å skaffe prøver med nok finstoff. Fra prøve 1 ble det skilt ut 25 gram finstoff, og fra prøve 2 ble det skilt ut 5 gram finstoff.

### 7.3 FRI SVELLING

**Teori:** Frisvelling benyttes for å kategorisere hvor aktive svelleegenskapene i leirmineralene er. Svelling forekommer når leirmineralene kommer i kontakt med vann. Basert på volumøkning klassifiseres prøven i en av kategoriene beskrevet i Tabell 8. Figur 34 viser en skisse av forsøket.

Tabell 8: Klassifisering av leirmineraler ut ifra frisvelling (Vegdirektoratet, 2015).

Fri Svelling (FS)	Kategori	Typiske mineraler
> 150 %	Svært aktivt	Smektittgruppen
120-150 %	Middels aktivt	Vermikulitt
80-120 %	Lite aktivt	Kalonittgruppen
< 80 %	Ikke aktivt	Illitt, kloritt

Fri svelling (FS) er den prosentvise volumendringen av prøven, og beregnes;

$$FS = \frac{V_1}{V_t} \times 100 \%$$

$V_1$  er sedimentert volum, og  $V_t$  er volum av tilført prøvemateriale.

Ved tunneldriving tar det gjerne litt tid for vannet å komme til etter at salvesprenging har funnet sted. Effekten av svelling er derfor ikke umiddelbar (Vegdirektoratet, 2015).

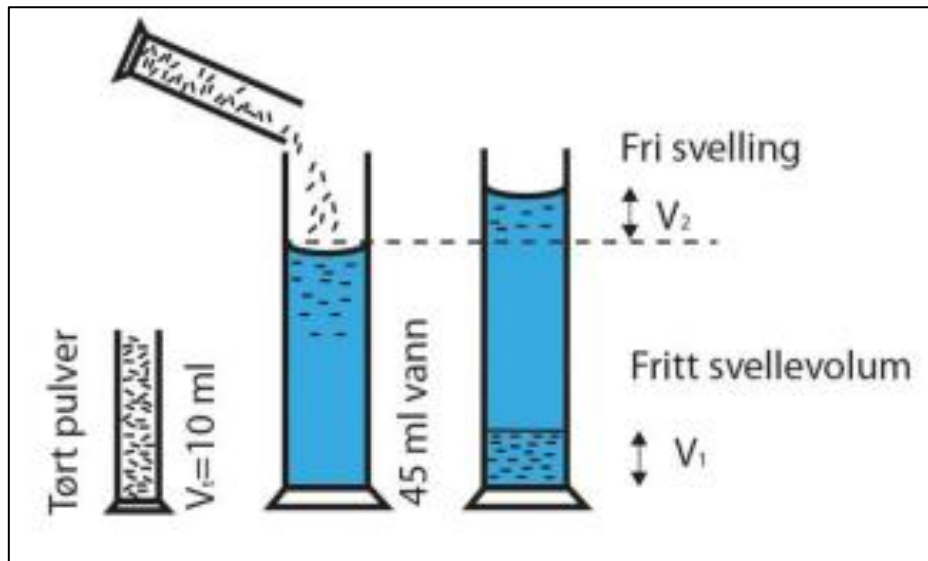
**Metodebeskrivelse:** 10 ml tørt finstoff fra prøve 1 ble målt opp. 45 ml destillert vann ble helt over i en 50 ml stor målesylinder. Finstoffet ble drysset forsiktig over målesylinderen med vannet i et meget rolig tempo. Dette for at materialet ikke skulle klumpe seg på vannoverflaten. I følge laboratoriehåndboken fra Statens vegvesen (2015) skal prøven stå urørt i ett til to døgn. Overingeniør Gunnar Vistnes mente at resultatet kunne leses av etter dette uten at resultatet blir påvirket av tiden (pers. kom., Vistnes, 2017). Av praktiske årsaker ble prøvende stående på laboratoriet i nøyaktig fem dager før den ble avlest av overingeniør Gunnar Vistnes. Dessverre presterte en av de ansatte på laboratoriet å knuse målesylinderen med prøven i før undertegnede fikk tatt bilde av sylindren. Fri svelling ble beregnet på bakgrunn av avlesningen til Vistnes.

**Resultater:**

$$FS = \frac{V_i}{V_t} \times 100 = \frac{145 \text{ ml}}{10 \text{ ml}} \times 100 = 145 \%$$



Dette gir en klassifisering som «middels aktivt».

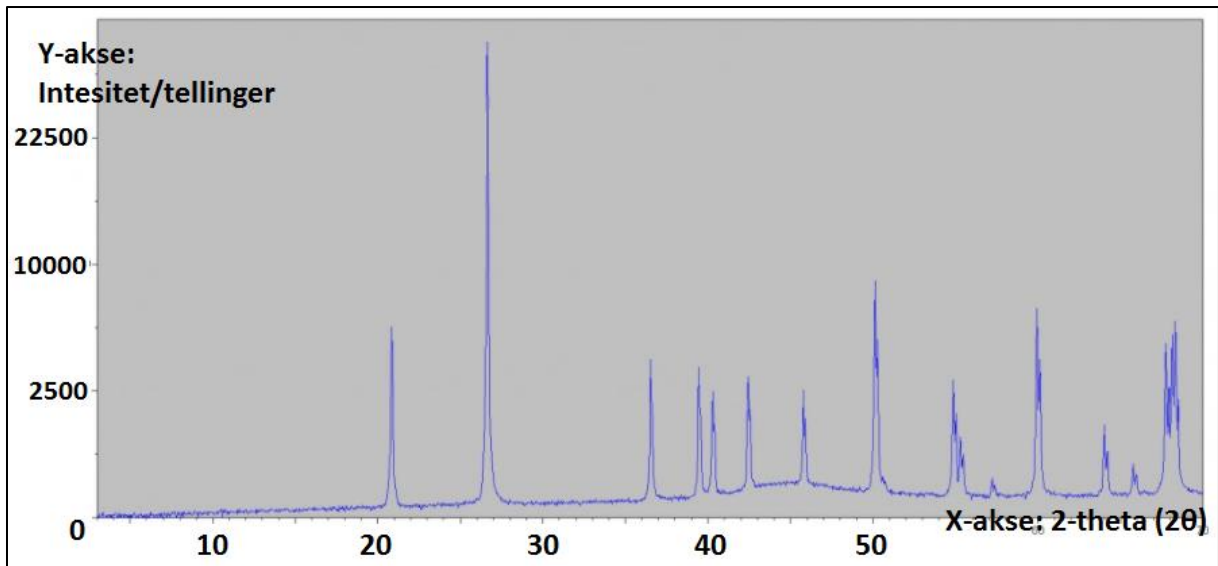


Figur 34: Skisse av frissvellingstest.  $V_2$  er ikke aktuell for å lese av fri svelling, men kan benyttes for å finne en annen parameter kalt fritt svellevolum (FSV) (Vegdirektoratet, 2015).

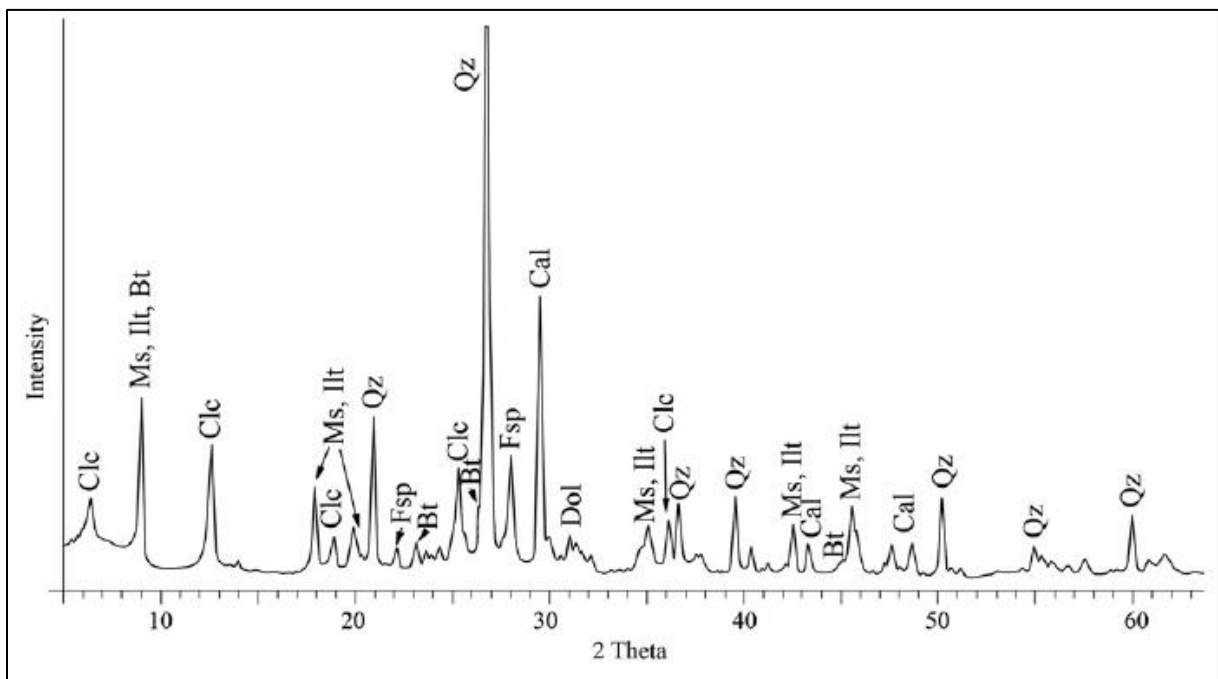
**Diskusjon:** Det var uheldig at avlesningen ikke ble gjort av undertegnede, selv om det festes stor tiltro til overingeniør Gunnar Vistnes. Dette noteres likevel som en potensiell feilkilde. For å støtte opp under resultatet ble det av undertegnede besluttet å utføre en XRD-test.

#### 7.4 XRD-ANALYSE FOR Å PÅVISE INNHOLD AV SVELLEMINERAL

**Teori:** Prøvemengden for innsendte feltprøver er minimum 100 gram (Vegdirektoratet, 2015). Prinsippet for XRD-analyse er at alle mineraler har sitt eget «fingeravtrykk» som kan avleses gjennom røntgendiffraksjon. Her sendes røntgenstråler med varierende innfallsvinkel ( $\theta$ ) på prøven. Korresponderende utfallsvinkel registreres og resultatet blir et diffraktogram. Ved å sammenlikne med kjente vinkler i en database kan mineralene i prøven bestemmes. Vinkelen er avhengig av gitterstrukturen i krystallene i prøven, relatert til avstanden mellom ulike plansett (NGU, 2005). Et eksempel på et diffraktogram er vist i Figur 35. Figur 36 er diffraktogram fra XRD-analyse av en leire. Ved å sammenlikne det mulig å lese at hovedkomponenten i Figur 35 er kvarts.



Figur 35: Eksempel på diffraktogram, produsert av XRD-analyse. Her er kvarts hovedkomponenten (NGU, 2015).

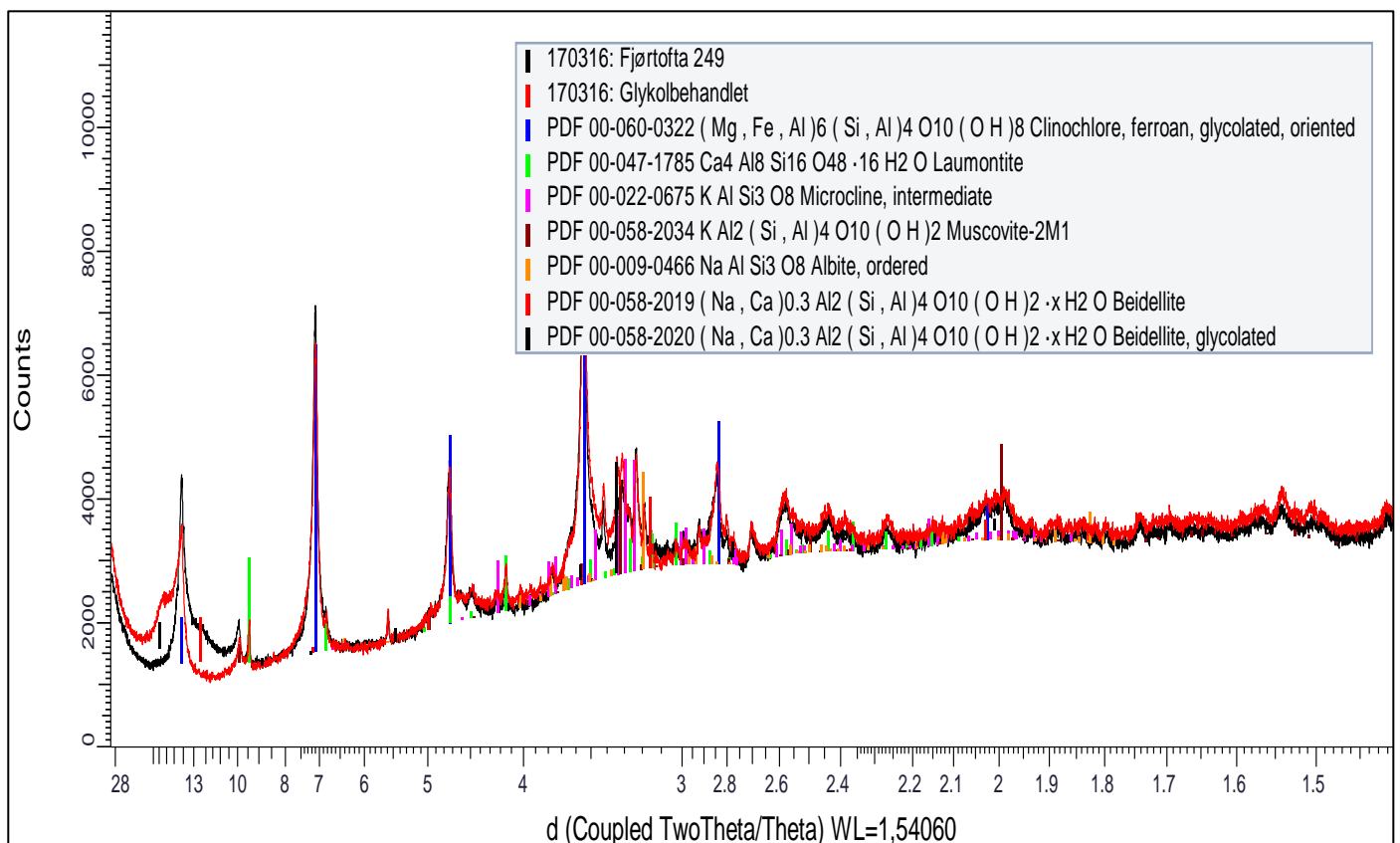


Figur 36: XRD av rå leire. Qz er forkortelsen for Quartz (kvarts på norsk) (Ionescu, et al., 2014). Her er de ulike toppene kartlagt. Toppene med kvarts sammenfaller med toppene i Figur 35.

XRD-analyse er en av tre tester som kan benyttes for å teste svellemateriale. Testen bidrar med mineralidentifikasjon (Vegdirektoratet, 2015). For praktisk tunneldriving betyr dette at drivemetoder og valg av sikring kan tilpasses eventuelle svellende mineraler. Mineralbestemmelse av leire fra svakhetssoner kan bidra til at dannelse og karakter av svakhetssonen kan kartlegges, herunder forventet utbredelse av sonen. Både intakte prøver og prøver fra svakhetssoner kan testes. Eksempler på mineraler/bergarter av betydning for tunnelprosjekter er svellende leirmineraler og bergarter som gir dårlig heft mellom berg og sprøytebetong (NFF, 2008).

**Metodebeskrivelse:** Analysen har blitt utført ved EM-laboratoriet. Overingeniør Gunnar Vistnes har vært hjelpelig med veiledning. Materiale mindre enn 6 µm fra prøve 2 ble testet. Testen ble utført i sin helhet av en ansatt ved ingeniørgeologisk laboratorium. Prøven gjennomgikk XRD-analyse to ganger. Først uten glykolbehandling og deretter uten glykolbehandling.

**Resultater:**



Figur 37: Resultater av XRD-analyse.

Resultatene er presentert i Figur 37. Den svarte grafen er prøven uten glykolbehandling. Den røde grafen er diffraktogrammet etter glykolbehandling. Uten svellende mineraler hadde grafene vært helt like. I Figur 37 kan en se at de første røde toppene ligger noe til venstre for de tilsvarende svarte toppene. Denne forskyvningen indikerer at mineraler i prøven har svullet etter glykolbehandling. Basert på diffraktogram av kjente mineraler kan en tolke at prøven inneholder smektitt.

**Diskusjon:** Det er ikke mulig å si noe om mengde og aktivitet ut ifra XRD-analysen utført her. Mengden fordi det bare er fraksjoner under 6 µm som har blitt testet. I teorien består derfor mye av prøven av potensielt svellende mineraler, og mye av det andre er fjernet. Det var fortsatt noen andre mineraler igjen i prøven, som ikke var av svellende karakter. Et bedre mål på aktivitet oppnås gjennom tester som frisvelling og svelletrykk.

## 7.5 ANVENDELSE AV RESULTATER

Det er viktig å poengtere at testene beskrevet ovenfor har blitt utført på materiale hentet fra *en* av mange svakhetssoner som vil påtreffes under drivingen av de tre undersjøiske tunnelene. Med andre ord er testene kun gyldige for en svakhetsone i Nogvafjordtunnelen, som i kjerneloggen (2012) er beskrevet å finne sted mellom 248,3 og 249,5 meter. Det er ikke gitt at resultatene fra testene er gjeldende for andre svakhetssoner. I følge Klüver og Kveen (2004) vil leirens mektighet og karakteristiske egenskaper med stor sannsynlighet variere mellom de ulike svakhetssonene/sprekkesettene. Fri svelling og XRD-analyse peker mot at den aktuelle svakhetssonen inneholder middels aktive smektittmineraler.

Smektitt er betegnelsen på en gruppe svellemineraler. Vermikulitt og montmorilonitt er eksempler på mineraler som faller inn under denne kategorien. Dette er sekundære mineraler dannet fra forvitring. Smektitt har den egenskapen at leiren kan både ta til seg vann (svelle) og avgi vann (krympe) avhengig av hvilket eksternt trykk de utsettes for. I svakhetssoner kan smektitt forekomme som fyll i sprekker, årer, brudd eller forkastninger (Selmer-Olsen og Palmstrøm, 1989).

# Kapittel 8

## Prognose for vannlekkasje og injeksjon under driving

### 8.1 PARAMETERE I LEKKASJEPROGNOSEN

Forsker ved SINTEF Berg- og geoteknikk Kristin H. Holmøy har gjennom sin doktorgrad forsket på prognoser for vannlekkasjer i fremtidige tunnelanlegg. Åtte hypoteser som tar for seg geologiske parametere og vannlekkasjer i tunnelen ble vurdert ut ifra seks norske tunneler. De ulike prognosene presenteres her (direkte sitert);

- 1. Vannlekkasjene er mindre i berg med Q-verdier lavere enn 0,1, enn i berg med Q-verdi mellom 0,1 og 10. Dette er basert på antagelsen om at kjernemateriale i svakhets-/forkastningssoner består av leire som tetter berget.**
2. Vannførende sprekker danner en vinkel med nærliggende regionale forkastninger på  $45^\circ \pm 15^\circ$ .
- 3. Vannførende sprekker er tilnærmet parallelle med største hovedspenning.**
4. Vannlekkasjer minker ved økende fjelloverdekning, fordi større gravitasjonskrefter fører til lukking av sprekker i bergmassen.
5. Stor mektighet av permeable løsmasser og/eller vann/sjø over en tunnel fører til store vannlekkasjer, grunnet reservoarkapasitet og potensiale for god vannledningsevne mellom løsmasser og bergmasser.
6. Eruptive bergarter (inkludert dypbergarter, gangbergarter og vulkanske bergarter) gir større vannlekkasjer enn metamorfe og sedimentære bergarter, dette på grunn av at eruptive bergarter ofte er sprøe.
- 7. Markerte bergartsgrenser gir store vannlekkasjer på grunn av økt oppsprekning.**
8. Brede svakhetssoner gir relativt større vannlekkasjer (l/min per 25 m) enn smale svakhetssoner.

(Holmøy, 2008b).

Som en kommentar til prognose 1 nevnes det at sjansen for å påtreffes vannlekkasjer var størst i bergmasse med Q-verdi mellom 0,6 og 15. For ytterligere beskrivelser av teorier bak hypotesene og metode henvises det til doktorgraden (Holmøy, 2008a). De hypotesene som fikk støtte av forskningen til Holmøy er uthevet. Hypotesene som fikk «ingen støtte», «lav til middels støtte» og «middels støtte» er ikke omtalt videre i denne masteroppgaven. Holmøy anbefaler at det prognose for vannlekkasje utarbeides på bakgrunn av tilgjengelig geologisk informasjon og forundersøkelser. Det poengteres at det er vanskelig å tallfeste lekkasje i en prognose. Derfor kan det være aktuelt at prognosen inneholder beskrivelser som små, moderat, stor og ekstrem stor vannlekkasje (Holmøy, 2008b). Til tross for at prognosene er begrenset i den forstand at de baserer seg på studier av seks norske tunneler, anses de av undertegnede som et godt utgangspunkt når prognoser for vannlekkasjer skal utarbeides. De er derfor inkludert i utarbeidelsen av prognosene i denne oppgaven.

Seismiske registreringer spiller en stor rolle i planleggingsfasen av en undersjøisk tunnel. I følge Nilsen (2012) anvendes ofte data fra akustisk profilering (som dekker store områder) for å bestemme den mest gunstige korridoren under fjorden. Videre plasseres tunneltraséen i korridoren ved hjelp av mer omfattende refraksjonsseismikk. De seismiske dataene gir grunnlag for å kartlegge antatte svakhetssoner under fjorden som skal krysses, da en svakhetszone kjennetegnes ved lav seismisk hastighet (< 4000 meter per sekund). Refraksjonsseismikk bidrar også med informasjon om løsmasser på havbunnen. I tillegg kan kjerneboringer fra land gi direkte informasjon om bergmassen. Retningsstyrt kjerneboring gjør det mulig å bore fra land, ned til tunneltraséen og parallelt med denne. Ved kryssing av svakhetssoner kan kartlegging av borkjerner fra det aktuelle partiet gi utvidet informasjon om bergmassekvaliteten og oppsprekingsgrad. Det vil være interessant å sammenlikne funn fra kjerneboringen med seismiske data for å predikere omfanget av svakhetssoner langs tunnelen.

Forundersøkelsene til Nordøyvegen inkluderer blant annet akustikk, refraksjonsseismikk og kjerneboring. Profiler for de tre tunnelene med svakhetssoner, seismikk og kjerneboring kan studeres i vedlegg 1-10. Seismisk hastighet er knyttet til bergmassekvalitet og antatt Q-verdi i den geologiske rapporten. Dette er presentert i tabell 5-7 i rapporten. Disse er gjengitt i Figur 38.

Andre forhold som inngår i prognosen er basert på erfaringer fra referanseprosjekter. Nøyaktig profilnummer for påhugg er hentet fra reguleringsplanene for tunnelene (Statens vegvesen, 2013a, 2013b; Statens vegvesen og Reinertsen AS, 2013; Statens vegvesen og Norplan AS, 2013). Det er ikke forventet store avvik fra disse (pers. kom., Karlson, 2017).

Komplett liste over parametere og forhold som er tatt høyde for i prognosen:

- **Seismisk hastighet, Q-verdi og bergmasseklasse i svakhetssoner:**
  - Seismisk hastighet < 3000 (Q-verdi i intervallet 0,01-0,1, klasse F): sonen er antatt tett med potensielle lekkasjer i sideberg/ytterkant av sonen.
  - Seismisk hastighet mellom 3000 – 4000 (Q-verdi i intervallet 0,1-4, klasse E-D): vannlekkasjer kan oppstå både i sideberg/ytterkant av sonen og i sentrale deler av sonen.
- **Overdekning:** Overdekning under 50 meter gir økt sjanse for lekkasje
- **Løsmassemektighet og løsmassekarakter:** løsmasser av tett karakter (morene og leire) gir gode tettegenskaper. Økt mektighet gir økt tetthet i svakhetssonen.
- **Eventuell kjernelogg:** det er undersøkt samsvar mellom kjernelogg og seismiske hastigheter. Beskrivelse av kjerneloggen kan påvirke prognosen dersom det er beskrevet oppsprekningsgrad og leirinnhold.
- **Retning på svakhetssoner sammenliknet med hovedspenning:** det er antatt at størst innlekkasje forekommer i svakhetssoner orientert parallellt med største hovedspenning.
- **Øyer og strandsoner:** Grunnet fravær av tettende løsmasser bidrar ikke øyer og strandsoner til naturlig tetting av vannførende sprekker. Svakhetssoner under øyer eller under typiske strandsoner har økt konduktivitet sammenliknet med svakhetssoner under leire eller morene.
- **Bergart:** Svakhetssoner i stive bergarter gir åpne og potensielt vannførende sprekker
- **Bergartsgrenser:** Disse antas å være oppsprukket med god konduktivitet.

Innlekkasjer angis hovedsakelig som tørt/ubetydelige små, moderate, stor og ekstremt stor. Det understrekes at lekkasjeklassen «ekstremt stor» ikke har blitt benyttet for Nordøyvegens tunneler, da det ikke fantes grunnlag for å anta så store lekkasjer. Forfatteren har tillatt seg å angi «mellomklasser» i prognosen for eksempel moderat – stor innlekkasje. Dette har blitt gjort i tvilstilfeller hvor det er uvisst om seksjonen bør klassifiseres med moderat eller stor innlekkasje, eller der en mellomting av injeksjonsklassene er forventet. Hovedformålet med prognosen er ikke å tallfeste antatte lekkasjeverdier for de ulike seksjonene, men heller å sette de i forhold til hverandre. Det angis derfor *ikke* grenseverdier for de ulike lekkasjeklassene i denne oppgaven.

Som et eksempel på slike tallfestede kategorier foreslår Palmstrøm og Stille (2010) følgende klassifisering av lekkasjemengder i bergrom (målt langs 10 meter av tunnelen);

- «Dry conditions» (tørt) =lekkasjemengder < 0,1 l/min
- «Seepage» (innsig) =lekkasjemengder 0,1-1 l/min
- «Dripping» (drypp) =lekkasjemengder 1-10 l/min
- «Flowing» (innstrømming) =lekkasjemengder 10-500 l/min
- «Heavily flowing» (høy innstrømming) =lekkasjemengder 500-5000 l/min
- «Water in-burst» (vannrelatert utrasing) =lekkasjemengder > 5000 l/min

Tabell 5: Antatte bergmasseklasser for tunnelen under Haramsfjorden, basert på seismikkresultatene.

Bergmasseklasse		Typiske egenskaper		Antatt % fordeling langs tunnelen
		Q-verdier	Seismiske hastigheter (m/s)	
A/B	God	10-40	> 4500	ca. 75 %
C	Middels	4-10	4000-4500	ca. 4 %
D	Dårlig	1-4	3500-4000	ca. 18 %
E	Svært dårlig	0,1-1	3000-3500	ca. 2 %
F	Ekstremt dårlig	0,01-0,1	< 3000	ca. 1 %

Tabell 6: Antatte bergmasseklasser for tunnelen under Nogauffjorden, basert på seismikkresultatene.

Bergmasseklasse		Typiske egenskaper		Antatt % fordeling langs tunnelen
		Q-verdier	Seismiske hastigheter (m/s)	
A/B	God	10-40	> 4500	ca. 74 %
C	Middels	4-10	4000-4500	ca. 13 %
D	Dårlig	1-4	3500-4000	ca. 7 %
E	Svært dårlig	0,1-1	3000-3500	ca. 5 %
F	Ekstremt dårlig	0,01-0,1	< 3000	ca. 1 %

Tabell 7: Antatte bergmasseklasser for tunnelen under Fjørtoft Åfjorden, basert på seismikkresultatene.

Bergmasseklasse		Typiske egenskaper		Antatt % fordeling langs tunnelen
		Q-verdier	Seismiske hastigheter (m/s)	
A/B	God	10-40	> 4500	ca. 80 %
C	Middels	4-10	4000-4500	ca. 3 %
D	Dårlig	1-4	3500-4000	ca. 11 %
E	Svært dårlig	0,1-1	3000-3500	ca. 5 %
F	Ekstremt dårlig	0,01-0,1	< 3000	ca. 1 %

Figur 38: Bergmassekvalitet, Q-verdier og seismiske hastigheter for de undersjøiske tunnelene langs Nordøyvegen (Grob og Karlson, 2014).



## 8.2 INJEKSJONSPROGNOSE OG STRATEGI

Det er i denne oppgaven utarbeidet en lekkasjeprognose for tunnelene langs Nordøyvegen. Det vil derfor være naturlig å basere injeksjonsbehovet på denne prognosen. Lekkasjeprognosen har fire lekkasjeklasser (kun tre benyttes da det ikke fantes grunnlag for å benytte klassen «ekstremt stor»). Forfatteren av denne oppgaven anser det som ønskelig med en tilsvarende forenklet inndeling i ulike injeksjonsklasser. I prognosen blir injeksjon under driving angitt som injeksjonsklasse 0,1,2 eller 3. Injeksjonsomfanget er økende fra 0 – 3. Det vil si at klassen tørt/ubetydelige små lekkasjer krever ingen injeksjon (klasse 0), mens moderate lekkasjer krever et noe økt omfang av injeksjon (klasse 1) og så videre. Ekstremt store vannlekkasjer tilsvarer injeksjonsklasse 3. Det angis ingen konkret injeksjonsmengde for de fire klassene, da dette vil variere og må tilpasses forholdene underveis. Inndelingen i klasser skal likevel kunne gi en pekepinn i retning nødvendig omfang.

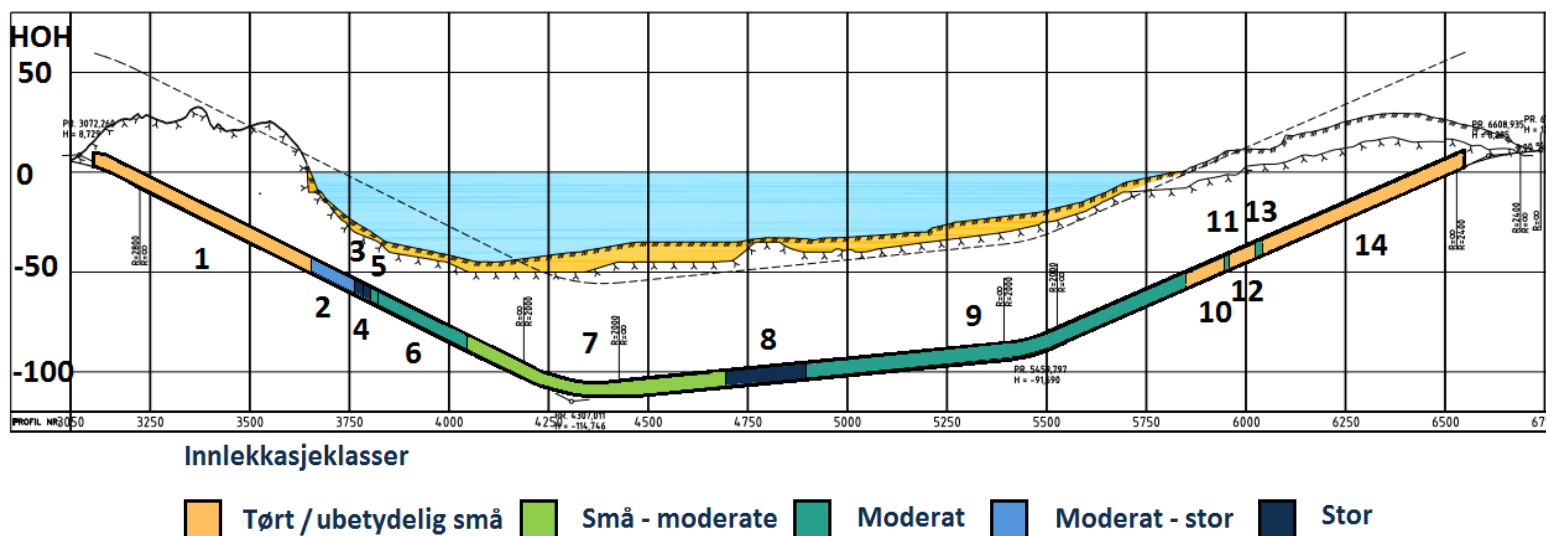
I den geologiske rapporten for Nordøyvegen (Grob og Karlson, 2014) er det ikke beskrevet injeksjonsstrategi eller forventet omfang. Derimot står det at ut ifra erfaring med prekambrisk gneis og tilsvarende bergarter antas det at det må injiseres en del. Det er også nevnt positive korttidsvirkninger av injeksjon; at oppsprukket berg blir forsterket og at problemer med vann på stoff kan reduseres. For de undersjøiske tunnelene langs Nordøyvegen legges det opp til behovsprøvd injeksjon. I tråd med erfaringer fra Atlanterhavstunnelen anbefales det at vannet får tid til å vise seg i borhullene. Det er viktig at prosessen med å bore sonderhull og vurdere lekkasjen fra disse ikke går for fort.

I publikasjonen *Berginjeksjon i praksis* (Klüver og Kveen, 2004) beskrives ulike injeksjonsstrategier ut ifra bergartstype. Bergartstypene og tilhørende injeksjonsstrategi er beskrevet som fire kategorier/typer. Disse er beskrevet i kapittel 2.2. Prekambrisk gneis faller innenfor bergartstype B, og injeksjonsstrategi bør tilpasses varierende sprekkefylling som sand, silt og bergartsfragmenter. Dette er blant annet fordi økt leirinnhold gir nedsatt injiserbarhet. Det anbefales hullengde mellom 15 og 30 meter og antall hull bør være mellom 14 og 40. Dette gjelder for tunneltverrsnitt T8,5. Tunnelene langs Nordøyvegen har dette tverrsnittet. Der det forekommer mye leire bør det bores flere injeksjonshull, men med noe kortere lengde. For slike forhold (mye leire) bør også injeksjonstrykket være relativt høyt. Innledningsvis kan vann/semest-forholdet være mellom 0,9 og 1,2. Deretter anbefales det å redusere ned mot 0,5 mens injeksjonstrykket øker til omtrent 70 bar. Avsluttende trykk kan ligge på ca. 100 bar. Spesielle hensyn bør tas ved liten bergoverdekning. Disse er gjengitt i Tabell 9.

Tabell 9: Tiltak ved redusert bergoverdekning (Klüver og Kveen, 2004).

Reduser innsats på følgende parametere	Øk innsats på følgende parametere
Hullengde	Antall injeksjonshull
Injeksjonstrykk	Omfattende observasjonsopplegg med hensyn til masseutgang i stuff og i dagen
Injeksjonstid per hull	Omfattende tilpasning av så lavt v/c-forhold som praktisk mulig, eventuelt tilsats av akselerator
Injeksjonsmengde per hull	
Unngå høyt v/c-forhold grunnet masseutbredelse	

### 8.3 PROGNOSE FOR HARAMSFJORDTUNNELEN



Figur 39: Grafisk illustrasjon av innlekkasjeprognose i Haramsfjordtunnelen.

#### Seksjon 1: Profilnummer 3120 – 3650 (under land)

Seksjonen går under land. Bergarten er metragabbro. Denne er beskrevet som massiv i geologisk rapport. Den antas å være mer seig enn sprø, da gabbro beskrives som en seig bergart (Palmstrøm, 1997). Bergarten i seg selv gir derfor gode forutsetninger for lite innlekkasje. Det

finnes marine strandavsetninger i deler av påhuggsområdet. Ellers er det begrenset eller ingen løsmasser over tunnelstrekket som går under land. Seismiske undersøkelser viser til to svakhetssoner på land. Det er antatt Q-verdier på over 1 for disse sonene. Enkelte lekkasjer i forbindelse med svakhetssonene kan forekomme. Det er typisk at innlekkasjen skjer via enkeltsprekker i sideberget til svakhetssonene, men også lekkasjer sentralt i sonene kan forekomme.

Antatt lekkasje: tørt/ubetydelige små lekkasjer.

Antatt injeksjonsklasse: 0.

### **Seksjon 2: Profilnummer 3650 -3760**

Partiet har løsmassedekke mellom 0 og omtrent 5 meter. Overdekningen er mindre enn 50 meter. En mindre svakhetsone med seismisk hastighet 3900 m/s krysses. Det forventes noe lekkasje for denne seksjonen i forbindelse med svakhetssonen, grunnet liten overdekning og lite løsmassedekke. Leikkasje oppstår typisk i sideberg men også lokalt i sonen kan det inntreffe. I kjerneloggen er det ikke beskrevet leire i svakhetssonen.

Antatt lekkasjegrade: moderat - stor lekkasje.

Antatt injeksjonsklasse: 1 - 2.

### **Seksjon 3: Profilnummer 3760 – 3780**

Like før bergartsgrensen (og svakhetsone) mellom gabbro og gneis. Sprekker tilknyttet den kommende grensen/svakhetssonen antas vannførende. Kjerneloggen beskriver partiet som tett oppsprukket/knust kjerne uten leire. Gabbroen har gått fra å være homogen til å bli mer finkornig og noe svakere. Det er redusert løsmassemektighet på havbunn. Fjelloverdekningen er under 50 meter. Her forventes det lekkasjer langs potensielt åpne enkeltsprekker. Forholdene ligger til rette for store lekkasjer.

Antatt lekkasje: stor lekkasje.

Antatt injeksjonsklasse: 2.

### **Seksjon 4: Profilnummer 3780 – 3800**

Bergartsgrense. Kjerneloggen beskriver en mulig svakhetsone der grensen går med sprøtt og svakt berg, gjennomgående oppknust. Litt leire på sprekkeplan er beskrevet. Seismisk hastighet for grensen er satt til 4400 m/s. Dette er i øvre sjikt av bergmasseklasse C med middels god

bergmassekvalitet. Løsmassedekket har redusert mektighet grunnet markert skrent langs havbunnsberget. Overdekning under 50 meter. Det antas et stort potensiale for innlekkasje.

Antatt lekkasje: stor lekkasje.

Antatt injeksjonsklasse: 2.

#### **Seksjon 5: Profilnummer 3800 – 3820**

Like etter grense/svakehtsone. Løsmassedekket er omtrent 5 meter tykt. Overdekning under 50 meter. Vannførende sprekker i utkant av svakhetssonen kan gi lekkasjer.

Antatt lekkasje: moderat lekkasje.

Antatt injeksjonsklasse: 1.

#### **Seksjon 6: Profilnummer 3820 - 4047**

Strekket har en overdekning mindre enn 50 meter. Det krysses fire svakhetssoner med sesimisk hastighet mellom 3100 m/s og 4200 m/s. Kjerneloggen beskriver også disse sonene. I følge denne skal to av sonene ikke inneholde leire. En skal inneholde litt leire, og den siste (og også mektigste) svakhetssonen på 9,6 meter bredde skal ifølge kjerneloggen inneholde en sone med knust berg og hardpakket leire. Sistnevnte ble undersøkt på Løkken verk, og leirinnholdet ble vurdert til lite, men middels aktivt. Seksjonen vurderes til moderat lekkasje. Denne oppstår typisk i ytterkant av sonene, men kan også forekomme mer sentralt i soner med lite leirinnhold.

Antatt lekkasje: moderat lekkasje.

Antatt injeksjonsklasse: 1.

#### **Seksjon 7: Profilnummer 4047 – 4704**

Fra profilnummer 4047 stiger løsmassemektigheten til 11 meter. I seksjonen varierer mektigheten mellom 8-11 meter. Det forventes gode tetteegenskaper i løsmassene. Det krysses fem svakhetssoner med seismisk hastighet mellom 3100 og 3900 m/s. Q-verdier mellom 0,1 og 4 er forventet i sonene. Bergoverdekning over 50 meter fra profilnummer 4230. Det forventes ingen lekkasje mellom svakhetssonene. I forbindelse med svakhetssonene kan det oppstå mindre lekkasjer både i sideberg og sentralt i sonene.

Lekkasjegrad: små - moderate lekkasjer.

Antatt injeksjonsklasse: 0 - 1.

### **Seksjon 8: Profilnummer 4704 – 4894**

Bergoverflaten på havbunnen danner en knaus og løsmassedekket reduseres til 1,4 - 2 meter. To svakhetssoner gra fra kanusen og ned til tunnelen. Den siste av disse har seismisk hastighet på 2900 m/s. Dette gir grunnlag for å vurdere sonen som relativt tett grunnet knusningsgrad og potensielt leirinnhold. Mektigheten på denne sonen er kun noen få meter. Det er forventet lekkasjer både i, og før og etter den første svakhetssonen. Lekkasjer i forbindelse med den andre svakhetssonen er forventet i ytterkant eller i sideberget til sonen. Grunnet redusert løsmassedekke og potensielt vannførende sprekker er potensiale for lekkasje stort.

Antatt lekkasje: stor lekkasje.

Antatt injeksjonsklasse: 2.

### **Profilnummer 9: Profilnummer 4894 – 5842**

Løsmassemektighet mellom 5 og 8 meter. Reduseres til 0 langs de siste 150 meterne. Dette er betegnet som strandsone, noe som teller negativt i lekkasjesammenheng da det bidrar mindre til naturlig tetting enn tettere løsmasser/avsetninger. I denne seksjonen krysser tunnelen fem svakhetssoner. Den første har seismisk hastighet på 3200 meter/sekund. De fire siste av disse har relativt høy seismisk hastighet for svakhetszone å være. Bergmasseklassen er antatt D med Q-verdier mellom 1 og 4 for disse sonene. Dette åpner opp for lekkasje i sonene (og også i nærliggende sprekker), dersom eventuelt leirinnhold ikke tilsier at sprekkenes er tette.

Antatt lekkasje: moderat lekkasje.

Antatt injeksjonsklasse: 1.

### **Seksjon 10: Profilnummer 5842 – 5940 (under land)**

Seks svakhetssoner er kartlagt der tunnelen går under land, og den første av disse befinner seg i seksjonen. Seismisk hastighet er 3300 meter/sekund, og det antas at lekkasje kan oppstå sentralt i sonen og i sideberget. Det foreligger begrenset dokumentasjon av løsmasseforholdene på land for seksjonen. Basert på observasjoner ved påhugget antas det marine strandavsetninger som ligger over morene. Morenen antas tett.

Antatt lekkasje: tørt/ubetydelige små lekkasjer.

Antatt injeksjonsklasse: 0.

### **Seksjon 11: Profilnummer 5940 – 5960 (under land)**

Sideberg til svakhetszone. Den påfølgende svakhetssonen har en seismisk hastighet på 2400 meter/sekund, og det antas oppknust materiale og dårlig konduktivitet i selve sonen. Derimot er det mer sannsynlig at lekkasje finner sted i siderget før og etter sonen. Det foreligger begrenset dokumentasjon av løsmasseforholdene på land for seksjonen. Basert på observasjoner ved påhugget antas det marine strandavsetninger som ligger over morene. Morenen antas tett.

Antatt lekkasje: moderat lekkasje.

Antatt injeksjonsklasse: 1.

### **Seksjon 12: Profilnummer 5960-6020 (under land)**

Svakhetszone. Selve sonen antas tett med maksimalt små lekkasjer, . En av disse sonene har en mektighet på omtrent 50 meter. Denne har lav seismisk hastighet, og bergmassekvaliteten er antatt ekstremt dårlig (klasse F). I lekkasjesammenheng antas sonen som tett, men lekkasjer kan fort oppstå i randen av sonen. Det foreligger begrenset dokumentasjon av løsmasseforholdene på land for seksjonen. Basert på observasjoner ved påhugget antas det marine strandavsetninger som ligger over morene. Morenen antas tett.

Antatt lekkasje: tørt/ubetydelige små lekkasjer.

Antatt injeksjonsklasse: 0.

### **Seksjon 13: Profilnummer 6020 – 6040 (under land)**

Sideberg til svakhetszone. Den påfølgende svakhetssonen har en seismisk hastighet på 2400 meter/sekund, og det antas oppknust materiale og dårlig konduktivitet i selve sonen. Derimot er det mer sannsynlig at lekkasje finner sted i siderget før og etter sonen. Det foreligger begrenset dokumentasjon av løsmasseforholdene på land for seksjonen. Basert på observasjoner ved påhugget antas det marine strandavsetninger som ligger over morene. Morenen antas tett.

Antatt lekkasje: moderat lekkasje.

Antatt injeksjonsklasse: 1.

### **Seksjon 14: 6040 -6550 (under land)**

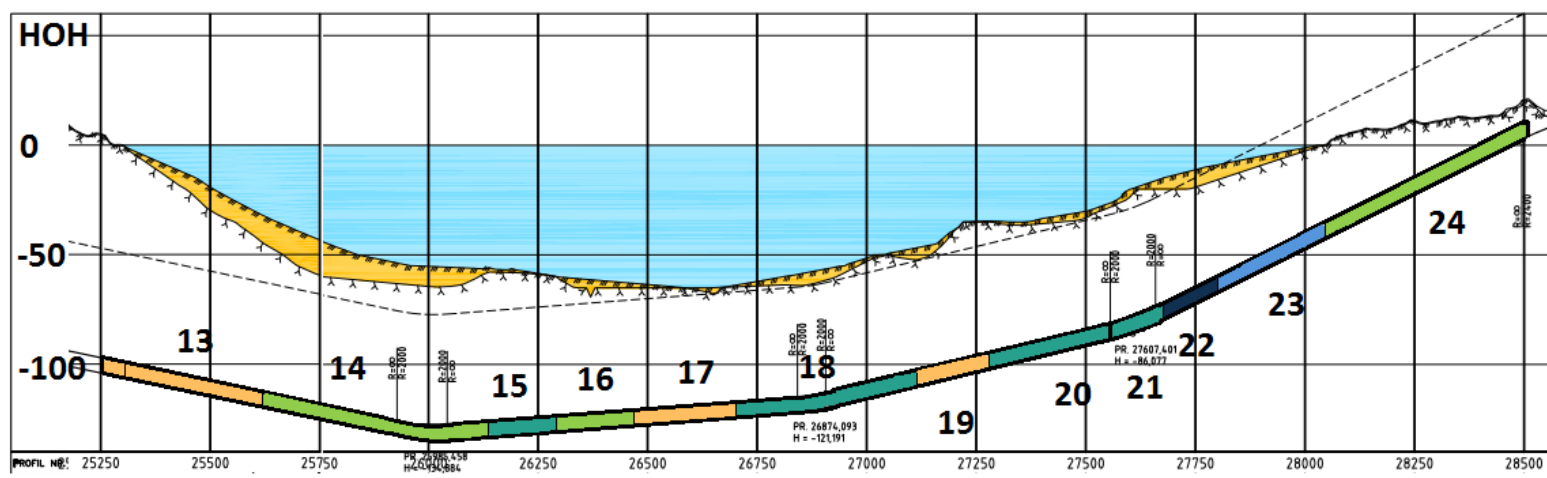
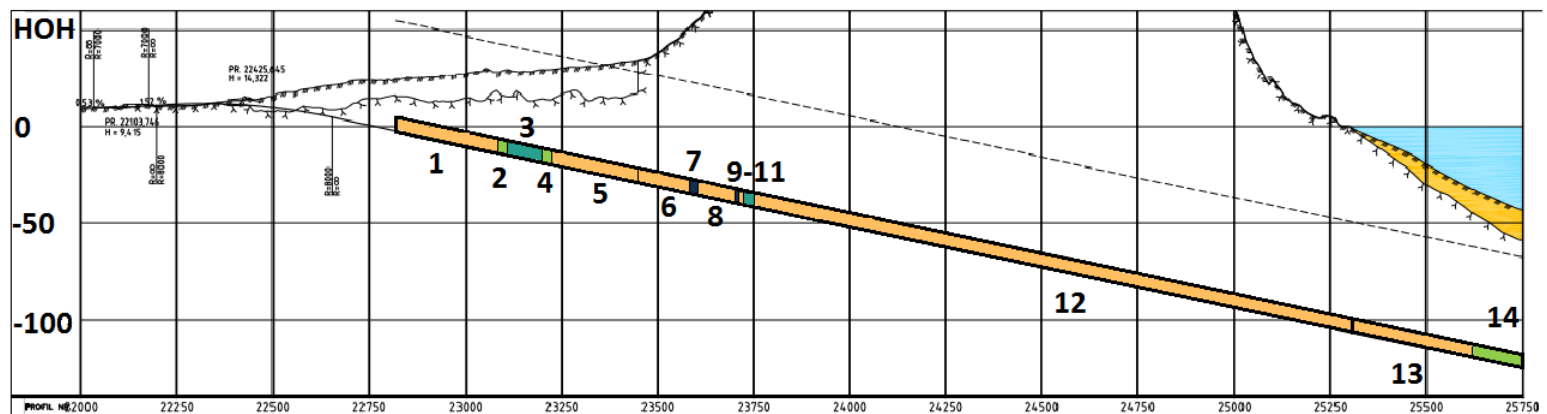
De resterende fire sonene under land har vesentlig mindre mektighet enn den foregående, og er av bedre bergmassekvalitet. Alle sonene befinner seg i partier med med god fjelloverdekning. Ved påhuggsområdet ved Austnes er løsmassene beskrevet som marine strandavsetninger som

ligger over morene. Morenen antas tett. Mektigheten er totalt 5-10 meter. Ingen overliggende innsjøer/vann. Det antas ingen eller små lekkasjer (forbundet med svakhetssonene).

Antatt lekkasje: tørt/ubetydelige små lekkasjer.

Antatt injeksjonsklasse: 0.

## 8.4 PROGNOSE FOR NOGVAFJORDTUNNELEN



### Innlekkasjeklasser

Tørt / ubetydelig små
  Små - moderate
  Moderat
  Moderat - stor
  Stor

Figur 40: Grafisk illustrasjon av innlekkasjeprognose i Nogvafjordtunnelen.

### **Seksjon 1: 22725 – 23080 (under land)**

I følge løsmassekart (NGU) består løsmassene i stor grad av myr/torv og noe strandavsetninger for denne første delen av tunnelen. Det er varierende mektighet på løsmassene, seismiske undersøkelser viste 10 meter. Grunnboringer ble utført rundt påhuggsområdet. Fra disse ble det kartlagt 8-10 meter sand/silt og morenemateriale. I påhuggsområdet ble det også påvist et 5 meter tykt leirelag. Generelt ligger myren (mektighet 1-2 meter) over silt/leire og morene. På tross av sandforekomster forventes tunnelstrekket relativt tørt grunnet overvekt av myr (og dermed et tett bunnlag). Ingen svakhetssoner er forventet for seksjonen.

Antatt lekkasje: tørt/ubetydelige små lekkasjer.

Antatt injeksjonsklasse: 0.

### **Seksjon 2: Profilnummer 23080 – 23100 (under land)**

Bergmasse i umiddelbar nærhet til mektig svakhetsone. Svakhetssonen har bergmassekvalitet D/E. Noe lekkasje kan forekomme i randsonen av sonen, samtidig vil det være lite sannsynlig at disse er av vesentlig størrelse grunnet det antatt tette løsmassedekket (beskrevet i seksjon 1).

Antatt lekkasje: små - moderate lekkasjer.

Antatt injeksjonsklasse: 0 - 1.

### **Seksjon 3: Profilnummer 23100 – 23190 (under land)**

Svakhetssonene på land er beskrevet som tett oppsprukket eller duktil svakhetsone. Det antas at sonen er tett oppsprukket. Seismisk hastighet varierer mellom 3400 meter/sekund og 3700 meter/sekund over den ca. 80 meter brede sonen. Det antas Q-verdier mellom 0,5 og 4. Det antas at lekkasjer kan oppstå sentralt i sonen, spesielt dersom sonen er oppknust. Løsmassedekket er av samme karakter og mektighet som for seksjon 1, og vil kunne bidra til økt tetthet i sprekker/svakhetssonen.

Antatt lekkasje: moderat lekkasje.

Antatt injeksjonsklasse: 1.

### **Seksjon 4: Profilnummer 23190 – 23210 (under land)**

Bergmasse i umiddelbar nærhet til mektig svakhetsone. Svakhetssonen har bergmassekvalitet D/E. Det forventes noe lekkasje i randsonen/sideberget til sonen. Løsmassedekket er av samme karakter og mektighet som for seksjon 1.



Antatt lekkasje: små - moderate lekkasjer.

Antatt injeksjonsklasse: 0 - 1.

### **Seksjon 5: Profilnummer 23210 – 23450 (under land)**

Det er god løsmasseoverdekning, og generelt ligger forholdene til rette for lite lekkasjer langs seksjonen. Det antas tett silt/leirelag under myrområder over tunnelen. Fire svakhetssoner krysses. Den tredje av disse har bergmassekvalitet F. Denne antas tett, samtidig som mindre lekkasjer kan oppstå i tilhørende sideberg. For de resterende tre svakhetssonene er seismisk hastighet mellom 3300 meter/sekund og 4000 meter/sekund. Noen lekkasjepunkter kan oppstå både sentralt i sonen og langs enkeltsprekker i nærliggende sideberg. Grunnet løsmassedekket er det antatt kun små lekkasjer.

Antatt lekkasje: tørt/ubetydelige små lekkasjer.

Antatt injeksjonsklasse: 0.

### **Seksjon 6: Profilnummer 23450 – 23575 (under land)**

Ved profilnummer 23450 er det en skarp overgang i løsmassedekket, fra rundt 10 meter til 0 meters mektighet. Bergoverdekningen er god, da tunnelen beveger seg under fjellsiden av «Skulen» - den høyeste toppen på Skuløya/Flemsøya (492 m.o.h). Seksjonen krysser to mindre svakhetssoner med seismiske hastigheter på 3200 meter/sekund og 3500 meter/sekund. Det antas små lekkasjer kan oppstå i forbindelse med disse, både sentralt i sonene og i sideberget.

Antatt lekkasje: små lekkasjer.

Antatt injeksjonsklasse: 0.

### **Seksjon 7: Profilnummer 23575 – 23590 (under land)**

Svakhetszone i forbindelse med bergartsgrense. Seismisk hastighet er 3700 m/s, noe som tilsvarer bergmasseklasse D. Ingen løsmasser over berg, men god bergoverdekning. Erfaring tilsier at vannlekkasjer i bergartsgrenser kan oppstå. Disse kan i ytterste konsekvens være store. Påfølgende ny bergart er av relativt tett karakter. Det er derfor rimelig å anta at lekkasjer forekommer i grensen/svakhetssonen. Spesielt gjelder dette om sonen er av oppknust karakter uten leire.

Antatt lekkasje: stor lekkasje.

Antatt injeksjonsklasse: 2.

### **Seksjon 8: Profilnummer 23590 – 23700 (under land)**

Bergart er glimmerskifer, amfibolitt og metaarkose. Glimmerskifer er å regne som duktil bergart. I Atlanterhavstunnelen ble bergartene i svakhetssonene beskrevet som amfibolittisk gneis eller kun amfibolitt. Disse sonene ble beskrevet som tørre (bortsett fra rassonen). Ingen løsmasser over berg, men god bergoverdekning.

Antatt lekkasje: tørt/ubetydelige små lekkasjer.

Antatt injeksjonsklasse: 0.

### **Seksjon 9: Profilnummer 23700 – 23710 (under land)**

Parti mellom bergartsgrense og nærliggende svakhetszone. Den forestående svakhetssonen antas relativt tett, og det er sannsynlig at lekkasjer oppstår i dette partiet like etter sonen. Her vil både potensielt vannførende sprekker i forbindelse med svakhetssonen (i ytterkant) kunne gi lekkasjer, samtidig som bergartsgrensen kan by på lekkasjer også.

Antatt lekkasje: stor lekkasje.

Antatt injeksjonsklasse: 2.

### **Seksjon 10: Profilnummer 23710-23730 (under land)**

Svakhetszone like etter bergartsgrense. Lav seismisk hastighet (2400 m/s) og bergmasseklasse F. Selve svakhetssonen antas oppknust og tett grunnet finstoff/leir. Det antas likevel gode muligheter for lekkasje i randsonen av svakhetssonen.

Antatt lekkasje: tørt/ubetydelige små lekkasjer.

Antatt injeksjonsklasse: 0.

### **Seksjon 11: Profilnummer 23730-23750 (under land)**

Vannførende sprekker i nærhet kan gi lekkasjer, spesielt siden sonen antas tett. Ingen løsmasser over berg, men god bergoverdekning.

Antatt lekkasje: moderat lekkasje.

Antatt injeksjonsklasse: 1.

### **Seksjon 12: Profilnummer 23750 – 25300 (under land)**

Siste seksjon under land. På Flemsøye/Skuløya over første halvdel av tunnelstrekket ligger toppen «Skulen». Dette gir god bergmasseoverdekning. Det er ikke utført seismiske undersøkelser for seksjonen.

Antatt lekkasje: tørt/ubetydelige små lekkasjer.

Antatt injeksjonsklasse: 0.

### **Seksjon 13: Profilnummer 25300 – 25620**

Undersjøisk del av tunnelen starter. Krav til 50 meters overdekning innfris. Sammenliknet med den nord-østre siden av undersjøisk del er løsmassedekket godt, og det øker til maksimal mektighet på 16 meter ved profil 25750. Det antas gode tettegenskaper i løsmassene. Denne første undersjøiske seksjonen krysser to svakhetssoner. Seismisk hastighet for disse er 2300 meter/sekund og 2500 meter/sekund. Disse antas oppknust men også tette. Enkelte små lekkasjer kan forekomme i sideberget/ytterkanten til sonene, men disse antas ubetydelige grunnet godt løsmassedekke.

Antatt lekkasjer: tørt/ubetydelige små lekkasjer.

Antatt injeksjonsklasse: 0.

### **Seksjon 14: Profilnummer 25620 – 26141**

Seksjonen har spesielt god løsmasseoverdekning. Denne varierer mellom 16 meter (ved profilnummer 25750) og 9 meter (ved profilnummer 26141). Seksjonen krysser syv mindre svakhetssoner. Disse har relativt varierende karakter, og seismisk hastighet varierer fra 3200 meter/sekund (bergmasseklasse E) til 4100 meter/sekund (bergmasseklasse C). Ettersom alle disse har Q-verdier mellom 0,1-10, antas det at eventuelle små lekkasjer kan forekomme i sideberg og også mer sentralt i sonen. God løsmasseoverdekning gir grunnlag for å anta små lekkasjer. To soner er orientert tilnærmet parallelt med største hovedspenning, noe som gir økt sannsynlighet for lekkasjer her. Samtidig ligger disse i område med 16 meters løsmassemektighet.

Antatt lekkasje: små - moderate lekkasjer.

Antatt injeksjonsklasse: 0 - 1.

### **Seksjon 15: Profilnummer 26141 – 26285**

Seksjonen består av en knaus/rygg på havbunnen, og løsmassedekket har en mektighet mellom 0 – 2 meter. Bergoverdekningen er på omtrent 80 meter. Omtrent ved profilnummer 16150 krysses en svakhetssone med seismisk hastighet 4000 meter/sekund. Eventuelle lekkasjer kan oppstå i forbindelse med sonen, både sentralt i sonen og i sideberget. Tunnelen er noe mer utsatt for potensiell lekkasje, da enkeltsprekker mellom havbunnen og tunnelen vil kunne være vannførende.

Antatt lekkasje: moderat lekkasje.

Antatt injeksjonsklasse: 1.

### **Seksjon 16: Profilnummer 26285 - 26470**

Løsmassene har varierende mektighet, fra 0 meter til 6 meter, da havdybden reduseres trinnvis mot Fjørtofta. Unntaket er en renne ved profilnummer 26375 med noe økt mektighet. Seksjonen krysser fire svakhetssoner. Disse har bergmasseklasse C – E. Det antas at lekkasjer kan oppstå sentralt i sonene og i sideberget tilknyttet sonene, spesielt grunnet noe redusert løsmassedekke. Bergoverdekningen er over 50 meter.

Antatt lekkasje: små - moderate lekkasjer.

Antatt injeksjonsklasse: 0 - 1.

### **Seksjon 17: Profilnummer 26470 – 26700**

Seksjonen krysser ingen svakhetssoner ifølge de seismiske undersøkelsene. Løsmassemektingen er svært redusert, og maksimalt kun noen meter. Enkeltsprekker mellom havbunnen og tunnelen kan potensielt by på lekkasjer, men grunnet fraværet av svakhetssoner antas det kun små eller ingen lekkasjer.

Antatt lekkasje: tørt/ubetydelige små lekkasjer.

Antatt injeksjonsklasse: 0.

### **Seksjon 18: 26700 – 27120**

Syv svakhetssoner krysses i seksjonen. Disse har alle antatt Q-verdi mellom 1 og 10. Det antas at lekkasjer kan oppstå sentralt i sonen og i sideberget tilknyttet sonene. Løsmassemektingen varierer mellom 0 og 6 meter. Det er størst mektighet midt i seksjonen, og minst mektighet i

ytterkantene. Selv om strekket behandles som en seksjon vil det være noe forhøyet sannsynlighet for lekkasjer rundt profilnummer 26700 og profilnummer 27050.

Antatt lekkasje: moderat lekkasje.

Antatt injeksjonsklasse: 1.

### **Seksjon 19: 27120 – 27270**

Seksjonen krysser ingen svakhetssoner ifølge de seismiske undersøkelsene. Løsmassemektigheten er svært redusert grunnet et «trinn» på havbunnen mot Fjørtofta, og maksimalt kun noen meter. Enkeltsprekker mellom havbunnen og tunnelen kan potensielt by på lekkasjer, men grunnet fraværet av svakhetssoner antas det kun små eller ingen lekkasjer.

Antatt lekkasje: tørt/ubetydelige små lekkasjer.

Antatt injeksjonsklasse: 0.

### **Seksjon 20: 27270 – 27550**

Fem mindre svakhetssoner med seismisk hastighet mellom 3100 meter/sekund og 4100 meter/sekund skal krysses. Sonene har mektighet på omtrent 5-10 meter. Ettersom alle har Q-verdi over 0,1 antas det at lekkasjer kan oppstå både sentralt i sonene og i tilhørende sideberg. Løsmassenes mektighet varierer fra omtrent 0 meter i starten av seksjonen til 6 meter rundt profilnummer 27450. De er svakt avtagende derfra og ut seksjonen.

Antatt lekkasje: moderat lekkasje.

Antatt injeksjonsklasse: 1.

### **Seksjon 21: 27550 – 27680**

Rundt 27620 er løsmassemektigheten noe redusert grunnet enda et «trinn». Den stiger likevel raskt opp til 8 meter. Seksjonen inkluderer en svakhetszone ved profilnummer 27640 og denne har lav seismisk hastighet, 2600 meter/sekund. Selve sonen (som er rundt 5 meter bred) antas tett, men grunnet lav løsmasseoverdekning kan det antas at enkeltsprekker i forbindelse med svakhetssonen (i sideberget) kan være av god konduktivitet. Sonen er orientert slik at kun få grader skiller retningen på sonen og største hovedspenning.

Antatt lekkasje: moderat lekkasje.

Antatt injeksjonsklasse: 1.

## **Seksjon 22: 27680 – 27800**

20 meter ut i seksjonen påtreffes en større svakhetsone, med bredde på omtrent 80-90 meter. Den seismiske hastigheten i sonen er kartlagt til 4000 meter/sekund. Nærliggende seismiske verdier er høye, og antatt bergmasseklasse er C. Dette gir mulighet for lekkasje både sentralt i sonen og i sprekker i sideberg tilknyttet sonen. Frem til profilnummer 27730 er mektigheten på løsmassene maksimalt 8 meter. Etter dette avtar mektigheten jevnt til havbunnen går over i land, ved profilnummer 28039. Til tross for at sonen befinner seg i et parti med relativt god løsmassedekke antas det at dette er består av sand (strandsone), noe som gir dårlige tetteeenskaper. Sonens orientering er nokså parallell største hovedspenning. Fra profilnummer 27740 (midt i sonen) er bergoverdekningen mindre enn 50 meter. I følge kjerneloggen er det leire i svakhetssonen.

Antatt lekkasje: stor lekkasje.

Antatt injeksjonsklasse: 2.

## **Seksjon 23: 27800 -28039**

Bergoverdekning under 50 meter. Fra 28039 er det berg i dagen og ingen løsmasseoverdekning. Seksjonen krysser tre svakhetssoner. Kjerneloggen beskriver den første (størst av de tre, med mektighet på omtrent 50 meter) som stor og betydelig, med hardpakket leire i midten av sonen. Denne såkalte leiren ble undersøkt i lab. Mengden var liten, men ble analysert til middels aktiv smektitt. Det antas noe redusert konduktivitet i sonen grunnet leire. De resterende to sonen beskrives som oppknust/knust masse og delvis med leire på sprekkeplan. Det antas lite leire basert på laboratorieundersøkelsene, og potensielle lekkasjer kan oppstå i sonene og i ytterkant av disse.

Antatt lekkasje: moderat - stor lekkasje.

Antatt injeksjonsklasse: 1 - 2.

## **Seksjon 24: Profilnummer 28039 – 28510 (under land)**

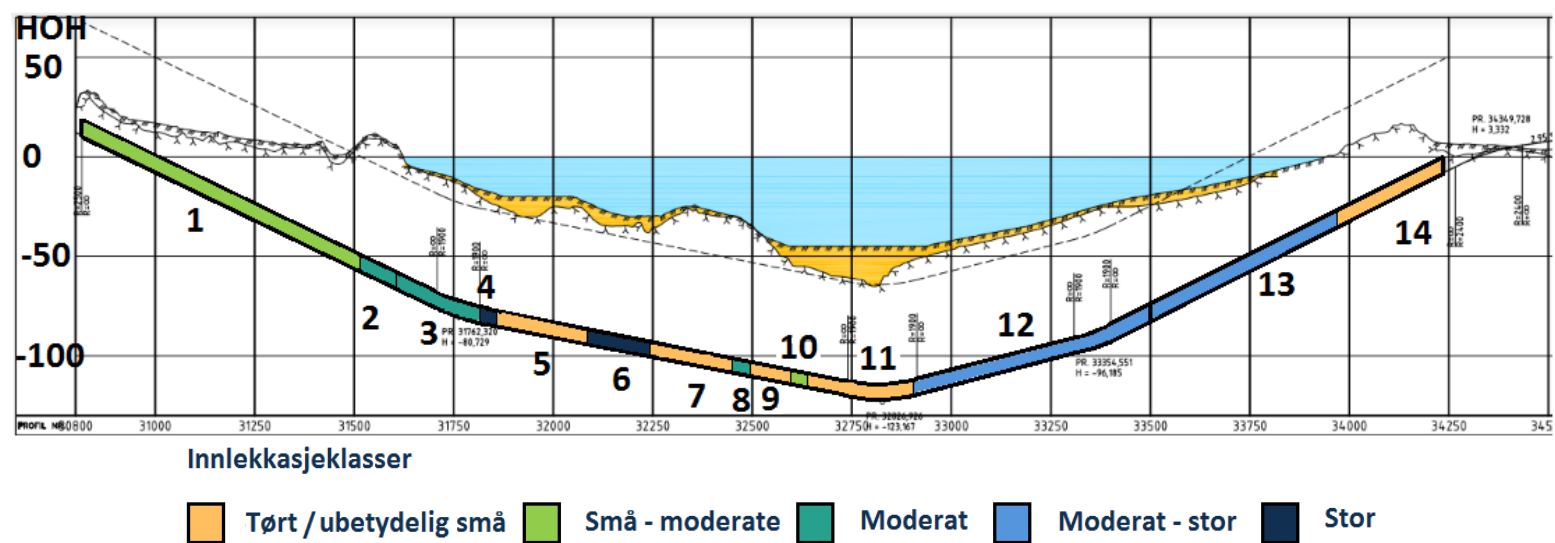
Seksjonen under land består blant annet av fire svakhetssoner. De har seismisk hastighet mellom 3200 meter/sekund og 4000 meter/sekund, og ingen av de ansees for å være tette. Lekkasje punkt kan forekomme sentralt i sonen og i sprekker i sideberget. Samtidig er det ingen overliggende vann/innsjøer. Avsetningene over seksjonen består i all hovedsak av

strandavsetninger. Ved påhugget er det maksimalt 2 meter med løsmasser. Det er begrenset grunnvannspotensial, men noe drenering av løsmassene kan forekomme.

Antatt lekkasje: små - moderate lekkasjer.

Antatt injeksjonsklasse: 0 - 1.

## 8.5 PROGNOSE FOR FJØRTOFTFJORDTUNNELEN



Figur 41: Grafisk illustrasjon av innlekkasjeprognose for Fjortoftfjordtunnelen.

### Seksjon 1: 30820 – 31520 (under land)

Påhugget ligger i et område med berg i dagen/tynt løsmassedekke. Løsmassene domineres av marine strandavsetninger og myr. Denne første seksjonen av tunnelen krysser fem svakhetssoner av relativt lik karakter, samt en antatt svakhetszone av noe dårligere kvalitet. Sistnevnte ligger vinkelrett på største hovedspenning, mens de fem første sonene har kun en liten vinkel til største hovedspenning. Seismiske hastigheter varierer fra 3600-3900 meter/sekund i de fem første sonene, noe som tilsier bergmassekvalitet D, og antatt Q-verdi mellom 1 og 4. Disse bør ikke by på nevneverdige utfordringer for drift eller føre til nevneverdig innlekkasje. Noe drenering av løsmassene kan forekomme (men ikke skadelig drenering). Eventuelle små lekkasjer kan forekomme i sideberg og mer sentralt i svakhetssonene.

Antatt lekkasje: små - moderate lekkasjer.

Antatt injeksjonsklasse: 0 - 1.

### **Seksjon 2: Profilnummer 31520 – 31600 (under land)**

Markert svakhetsone på omtrent 30-30 meters mektighet, inklusive sideberg. Relativt høy seismisk hastighet til å være svakhetsone, 3900 meter/sekund. Lekkasjer kan oppstå i både ytterkant og sentralt i sonen.

Antatt lekkasje: moderat lekkasje.

Antatt injeksjonsklasse: 1.

### **Seksjon 3: Profilnummer 31600 – 31830**

I løpet av første del av seksjonen går tunnelen over til å ligge under fjorden. Tunnelen krysser 3 svakhetssoner før bergartsgrensen ved profilnummer 31850. Disse har seismiske hastigheter som tilsvarer bergmasseklasse E og Q-verdi mellom 0,1 og 1. Løsmassene er mest sannsynlig sand da seksjonen går under strandsonen til Fjørtofta.

Antatt lekkasje: moderat lekkasje.

Antatt injeksjonsklasse: 1.

### **Seksjon 4: 31830 – 31870**

Parti med bergartsgrense, da tunnelen går inn i et parti med glimmerskifer, amfibolitt og metaarkose. Denne «nye» bergarten forekommer over et strekke på omtrent 350 meter, til profilnummer 32200. Glimmerskifer er å regne som duktil bergart. I Atlanterhavstunnelen ble bergartene i svakhetssonene beskrevet som amfibolittisk gneis eller kun amfibolitt. Disse sonene ble beskrevet som tørre (bortsett fra rassonen). Like etter grensen, er det kartlagt en svakhetsone. Denne krysser grensen lenger opp mot havbunnen. Overdekningen har en mektighet på omtrent 6 meter over bergartsgrensen. Det antas at løsmassene fremdeles er av sand-karakter. Potensiale for lekkasje er stort.

Antatt lekkasje: stor lekkasje.

Antatt injeksjonsklasse: 2.



### **Seksjon 5: Profilnummer 31870 -32110**

Bergarten gjennom seksjonen er glimmerskifer, amfibolitt og metaarkose. Denne i seg selv antas tett. Seksjonen krysser fire svakhetssoner av relativt lik karakter, med seismiske hastigheter mellom 3800 – 4000 meter/sekund. Med bakgrunn i Q-verdi antas det at lekkasjer kan oppstå i sideberg og sentralt i sonen. På den andre siden er bergarten såpass duktil at sannsynligheten for lekkasje antas liten. Løsmassedekket varierer mellom 7,5 meter på det meste, til 3,5 meter på det minste.

Antatt lekkasje: små lekkasjer.

Antatt injeksjonsklasse: 0.

### **Seksjon 6: Profilnummer 32110 - 32240**

Seksjonen krysser først en antatt svakhetszone. Denne har mektighet på omtrent 40 meter, og den seismiske hastigheten er relativt god; 4000 meter/sekund. 30 meter lenger inn antas bergartsgrense til gneis. Svakhetssonen danner 45° vinkel med største hovedspenning. Ettersom svakhetssonen ligger såpass tett til grensen angis potensiell lekkasje samlet, til tross for at svakhetssonen har høy seismisk hastighet. Bergartsgrensen antas oppsprukket og kan føre til store lekkasjer. Mektigheten på løsmassedekket er 3,5 meter like etter grensen grunnet en smal rygg. Over svakhetssonen er mektigheten omtrent 6 meter. Det antas at lekkasjevann kan sige inn i tunnelen via oppsprukket grense (og eventuelt langs sideberget til svakhetssonen) grunnet liten løsmasseoverdekning.

Antatt lekkasje: stor lekkasje.

Antatt injeksjonsklasse: 2.

### **Seksjon 7: Profilnummer 32240 – 32440**

Partiet går gjennom gneisfjell, uten svakhetssoner. Løsmassene over har varierende mektighet; etter ryggen beskrevet i seksjon fem kommer et «søkk» med mektighet 8,5 meter. Dette går raskt nedover grunnet en bred og nokså horisontal rygg de neste 250 meterne. Dette kjennetegner størsteparten av seksjonen. Her er mektigheten mellom 1 og 6 meter før den reduseres til 0 ved profilnummer 3245. Med andre ord er mektigheten generelt noe lav over ryggen. Enkeltprekker kan gi vannlekkasjer, men siden det ikke er kartlagt noen svakhetssoner antas det liten sannsynlighet for vannlekkasjer av betydning.

Antatt lekkasje: tørt/ubetydelige små lekkasjer.

Antatt injeksjonsklasse: 0.

### **Seksjon 8: Profilnummer 32440 - 32490**

Seksjonen inkluderer sideberg og svakhetssone med seismisk hastighet 3900 meter/sekund. Det antas lekkasjemuligheter både i sideberg og lokalt i sonen. Løsmassene over er for denne seksjonen fraværende. Dette gir økt potensiale for lekkasje.

Antatt lekkasje: moderat lekkasje.

Antatt injeksjonsklasse: 1.

### **Seksjon 9: Profilnummer 32490 - 32605**

Strekke uten svakhetssoner. Enkeltsprekker kan gi vannlekkasjer, men siden det ikke er kartlagt noen svakhetssoner antas det liten sannsynlighet for vannlekkasjer av betydning. Løsmassedekket øker fra 0 til 6,5 meter. Havbunnen skrår ned mot det dypeste punktet på fjorden som finner sted ved ca. profilnummer 32800.

Antatt lekkasje: tørt/ubetydelige små lekkasjer.

Antatt injeksjonsklasse: 0.

### **Seksjon 10: Profilnummer 32605 – 32650**

Svakhetssone inkludert sideberg. Sonen har seismisk hastighet 3600 meter/sekund, noe som tilsvarer bergmassekvalitet D og Q-verdi intervall 0,1-1. Det antas at lekkasjer kan oppstå i sideberg/ytterkant av sonen og også sentralt i sonen. Overdekningen er litt over 50 meter, og det er omtrent 9,5 meter løsmasser over berget. Dette er mest sannsynlig finkorning materiale, og teller positivt på tettheten i eventuelle sprekker.

Antatt lekkasje: små - moderate lekkasjer.

Antatt injeksjonsklasse: 0 - 1

### **Seksjon 11: Profilnummer 32650 – 32900**

Seksjonen går under den dypeste delen av fjorden. Midtfjords går det en renne (- 64 meter under havoverflaten) med steile vegger. Her er også løsmassemektigheten størst og måler 20 meter. Etter dette avtar løsmassemektigheten relativt raskt med havbunnens trinnvise stigning. Ved ca. profilnummer 32900 er mektigheten 3,5 meter. Til tross for midtfjordkryssing og kryssing av

svakhetszone antas det at seksjonen byr på lite lekkasje grunnet løsmassemekktigheten, og stor vinkel mellom retning på svakhetszone og største hovedspenning.

Antatt lekkasje: tørt/ubetydelige små lekkasjer.

Antatt injeksjonsklasse: 0.

### **Seksjon 12: Profilnummer 32900 – 33500**

Et langt strekke med relativt jevn mektighet på berg, omtrent 60 meter. Stigningen på berget er trinnvis flere steder. Dette gir overganger mellom stigning og flate partier med liten eller ingen løsmasseoverdekning. Mellom profil 33021 og 33379 er mektigheten 4 meter i starten, men avtar til 0,6 meter mot slutten. Derfra øker mektigheten til 5 meter mot slutten av seksjonen. Første halvdel av seksjonen (frem til ca. profilnummer 33140) går gjennom fire svakhetssoner med relativt høy seismisk hastighet (alle over 3500 meter/sekund). Q-verdi er mellom 1 og 4. Disse har en orientering som ligger nærmere retningen på minste hovedspenning, noe som er positivt med tanke på lekkasje. Lekkasje kan oppstå i sideberg/ytterkant av sonene og også sentralt i sonene.

Antatt lekkasje: moderat - stor lekkasje.

Antatt injeksjonsklasse: 1 - 2.

### **Seksjon 13: Profilnummer 33500 – 33970**

Fra profil 33500 er bergoverdekning mindre enn 50 meter. Minste overdekning på 28 meter inntreffer under strandsonen. Strandsonen starter omtrent ved profilnummer 33375. Det mangler seismiske data mellom profilnummer 33780 – 33970. Seksjonen krysser fire svakhetssoner; de to første med seismisk hastighet i øvre sjikt for en svakhetszone, minst 3800 meter/sekund. De to neste er beskrevet i kjerneloggen. Den første beskrives som knust kjerne og leire på sprekkeplan. Den andre skal være tett oppsprukket med leire eller glidespeil på enkelte sprekkeplan. Mektigheten på sonene er omtrent 1 meter og 3 meter. Det antas lekkasjer i ytterkant og sideberg, samt sentralt i de fire sonene. Leiren vil ha positive tetteeenskaper.

Antatt lekkasje: moderat - stor lekkasje.

Antatt injeksjonsklasse: 1 - 2.

#### **Seksjon 14: Profilnummer 33970 – 34220 (under land)**

Ved profilnummer 33970 går tunnelen inn under Harøya, og er ikke lenger under fjorden. Fire svakhetssoner skal forseres dette siste tunnelstrekket under land. Disse veksler mellom bergmasseklasse D og E. Det er antatt at alle de fire svakhetssonene har Q-verdier over 0,1. Dette gjør det mulig for lekkasjer å oppstå både sentralt i svakhetssonene og i sideberg i forbindelse med svakhetssonene. På land finnes ingen løsmasser over svakhetssonene. Fra profilnummer 34210 (etter svakhetssonene) finnes løsmasser. Frem til profilnummer 34330 har disse en mektighet mellom 1,4 og 6 meter. For siste bit av tunnelen er løsmassedekket noe mer redusert. Løsmassene på land er beskrevet som tredelt: sand av siltig/grusig karakter ligger mellom overliggende matjord og underliggende morene. Sistnevnte antas tett. Det er ingen overliggende vann/innsjøer.

Antatt lekkasje: tørt/ubetydelige små lekkasjer.

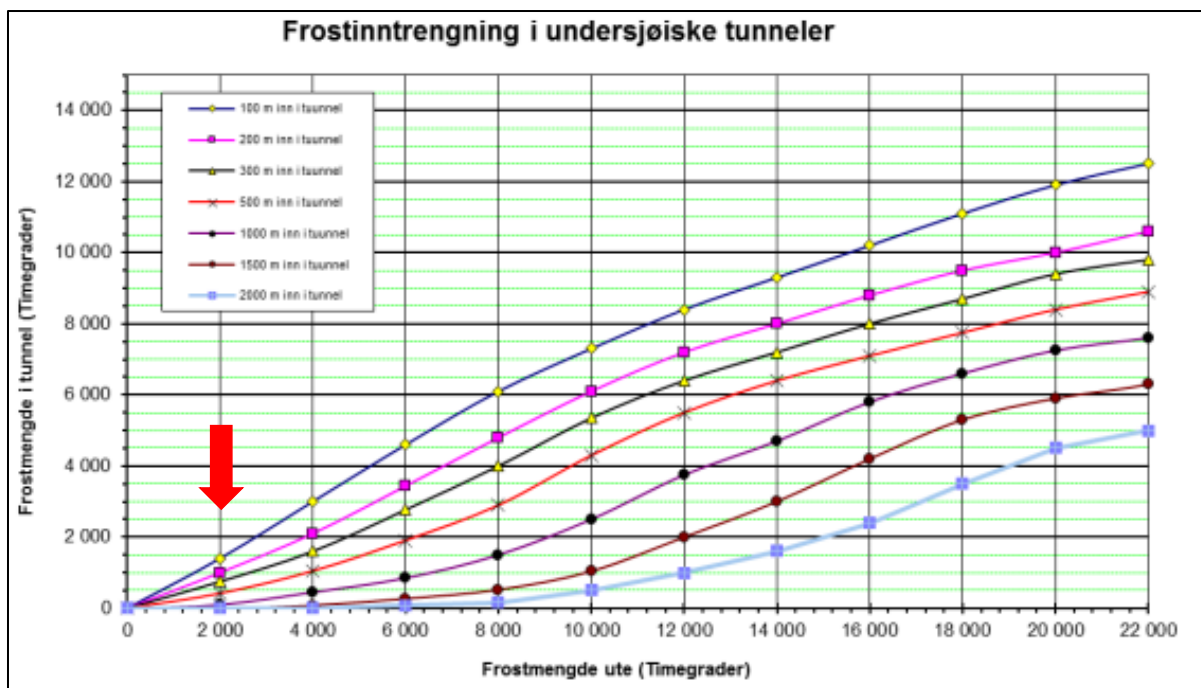
Antatt injeksjonsklasse: 0.

# Kapittel 9 Aktuelle hvelvløsninger for Nordøyvegen

## 9.1 HVELVLØSNINGER

Tunnelene langs Nordøyvegen er undersjøiske tunneler klassifisert som tunnelklasse B. Alle er lavtrafikkerte, med ÅDT 1200 eller 500. Dette legger grunnlag for hvilke løsninger som ansees som aktuelle. Det heter seg i Statens håndbok R510 *Vann- og frostsikring i tunneler* at: «(...). Ut over dette velges konstruksjonstype ut fra trafikkmengde, kjøretøyhastighet, tunnellengde, tunnelstandard, estetikk, frostmengde, krav til vedlikehold, økonomi og forventet levetid.» (Statens vegvesen, 2014).

I håndbok N500 *Vegtunneler* er det gitt hvilke hvelvløsninger som er aktuelle for hvilke tunnelklasser. For tunnelklasse A og B skal det sikres med hvelv av sprøytebetong. For alle tunnelklasser skal det også sikres med tunnelportal med membran. Sprøytebetonghvelvet kan enten bestå av membran eller PE-skum (Statens vegvesen, 2016b). Disse konkrete spesifikasjonene gjør at det for Nordøyvegen i praksis er to løsninger å velge mellom. Basert på kapittel 2 som omhandler viktige momenter fra forstudie er det lite som skiller disse to løsningene av hva angår vedlikehold og forventet levetid. Etter samtale med prosjektleder for vann- og frostsikring i Skanska AS ble det klart at det er det inngår ulik investeringskostnad for de to løsningene. Dette er basert på firmaets innkjøpspriser per 4. mai 2017. Basert på disse tallene ligger membran under PE-skum i pris (pers. kom., Nordløyken, 2017). Det er likevel viktig å vurdere de totale kostnadene for hele levetiden (livssyklus-kostnader). Hvis investeringskostnadene er lave, kan det utføres mer vedlikehold sammenliknet med en løsning med høyere investeringskostnader. Dette med forbehold om like økonomiske rammer. Levetiden til sprøytebetonghvelv er satt til middels. Selv om investeringskostnadene er relativt lave for begge løsningene, vil de totale kostnadene potensielt bli store dersom det kreves mye vedlikehold eller utskiftninger før levetiden er oppfylt. Estetisk sett vil PE-skum og membran begge dekkes av sprøytebetong for tilstrekkelig brannsikring.



Figur 42: Oversikt over hvordan frostmengde ute påvirker frostmengde i undersjøisk tunnel. Rød pil angir frostmengden i Sande og Haram kommune (Statens vegvesen, 2016a).

For Haram og Sande kommune er det oppgitt frostmengde  $F_{10}$  gitt som 2 000 h°C (Statens vegvesen, 2014). Som det fremkommer av Figur 42 vil frostmengden i tunnelen ligge under den oppgitte frostmengden. Merk at frostmengden ved tunnelpåhugget kan variere fra det som er oppgitt for kommunen. Det er derfor viktig å tallfeste frostmengde lokalt ved påhugg for tunnelene. I håndbok N500 er det gitt at det ikke er nødvendig med frostisolasjon ved frostmengde,  $F_{10}$ , under 8 000 h°C (Statens vegvesen, 2016b). Det er derfor rimelig å anta at uisolert membranløsning med sprøytebetong tilfredsstiller kravene gitt av Statens vegvesen med hensyn på frostisolasjon.

Følgende anbefaling er gjort på bakgrunn av sitatet innledningsvis i delkapittelet fra håndbok R510 (Statens vegvesen, 2014). For Nordøyvegen foreslås det bruk av sprøytebetonghvelv vannsikret med membran. Frostisolasjon ansees som unødvendig, forutsatt at lokale frostmengder ved påhugg ikke overstiger 8 000 h°C.

Oppsummerte fordeler med membran i forhold til PE-skum:

- Noe rimeligere investeringskostnad
- Redusert logistikk (transport) i monteringsfasen
- Unødvendig å frostsikre
- Reduserer bruk av brannfarlig materiale

I en slik konkret anbefaling kan det ikke unngås å trekke frem den enda ikke godkjente hvelvløsningen med sprøytebar membran. Løsningen har investeringskostnader som i mange tilfeller ikke overstiger sprøytebetonghvelv, samtidig som det kreves mindre vedlikehold av hvelvet. Materialforbruket ved montering er lav, og det kreves enkelt utstyr for å sprøyte på membranen. Dette medfører også lave transportkostnader (Jernbaneverket, 2015). Metoden inkluderer ikke frostisolasjon, men Holter påpeker at i for eksempel undersjøiske tunneler vil lekkasje av vann være en større utfordring enn frostmengde (pers. kom., Holter, 2016). Dersom Statens vegvesen godkjenner metoden og den fungerer godt i praksis, kan dette potensielt være et meget godt alternativ til eksisterende hvelvløsninger, der forholdene ligger til rette for det.

## **9.2 OMFANG AV VANN- OG FROSTSIKRINGSHVELV**

For de undersjøiske tunnelene langs Nordøyvegen må det tas stilling til om det er fordelaktig å etablere hvelvløsning for vannsikring langs hele eller deler av tunnelen. Undertegnede anser det som utfordrende og ikke minst urealistisk å skulle basere et slikt valg utelukkende på en lekkasjeprognose. Hvor godt prognosen stemmer med de faktiske tunnelforholdene gjenstår å se. Valg av hvelv-omfang besluttet etter driving. Videre følger en diskusjon av forhold som må tas hensyn til.

Tunnelene langs Nordøyvegen har en forventet trafikkmengde på 500 eller 1200 (ÅDT), og de er lavtrafikkerte. I følge Statens vegvesen sine nettsider er prosjektets total kostnad 3,80 milliarder kroner (Statens vegvesen, 2017). I anslag (kostnadsberegning) for Nordøyvegen er det antatt at 90 % tunnallengdene vannsikres. Dette er basert på erfaringstall for undersjøiske tunneler (pers. kom., Karlson, 2017). En kan anta at en vurdering rundt omfanget vannsikringshvelv blant annet avhenger av budsprisen og totaløkonomien i prosjektet. Reduksjon i antall meter vannsikringshvelv vil kunne bidra til økonomiske besparelser for prosjektet.

Dersom seksjoner i tunnelene viser seg å være tørre over en viss periode, kan det være aktuelt å la disse stå uten vannsikringshvelv. I følge Hem (2003) og Nilsen (2012) vil naturlig tetting av vannførende sprekker kunne gi en nedgang i lekkasjemengde over tid. Dersom det etter driving erfares at enkelte tunnelsekvenser er helt tørre, vil det være naturlig å tro at tidseffekten bidrar til at disse sekvensene fortsatt vil være tørre i fremtiden. Det understrekes likevel at dette ikke er sikker vitenskap.

I totalregnestykket må endetetting av hvelvene inkluderes. Med andre ord må kostnadene ved å endetette to hvelvseksjoner vurderes mot kostnadene ved å ha et sammenhengende hvelv. Nødvendig avstand mellom to endetettede hvelv må også vurderes. I følge Karlson (pers. kom., 2017) vil ulike hvelvløsninger kreve ulike lengder mellom to endetettede hvelv for å unngå trykk/sug-laster fra trafikken. Eksempelvis vil sprøytebetonghvelv med membran eller PE-skum være relativt likt utformet som et tunnelstrekke sikret med bolt og sprøytebetong (primærsikring). Hvelvløsning med for eksempel betongelementer skiller seg mer ut fra primærsikret berg, og det vil kreves et lengre strekke mellom to endetettede hvelv for å oppnå tilstrekkelige små trafikklaster.

Et kontinuerlig hvelv vil gi sammenhengende og systematisk etablering. Fordelen med dette er at usikkerheten knyttet til utviklingen av lekkasjer over tid elimineres. I tillegg slipper man å ta hensyn til kostnader ved å endetette hvelv og at det er tilstrekkelig avstand mellom disse. Små lekkasjer vil medføre økt vedlikehold, og de sparte kostnadene ved å *ikke* vannsikre med hvelv med drypplekkasjer blir overført til drift og vedlikehold. Dette kan medføre at totalsummen blir større enn ved å sammenhengende vannsikre med hvelv. Dette understreker viktigheten av at kun helt tørre partier eventuelt står igjen uten vannsikringshvelv.

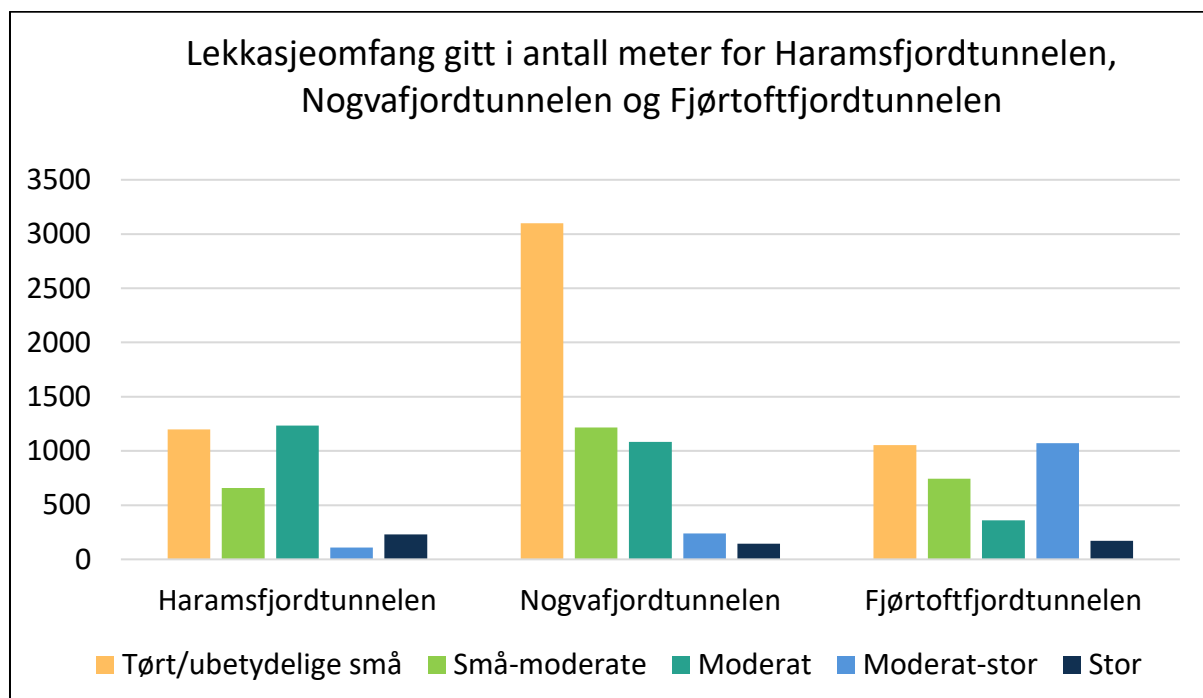


# Kapittel 10 Diskusjon

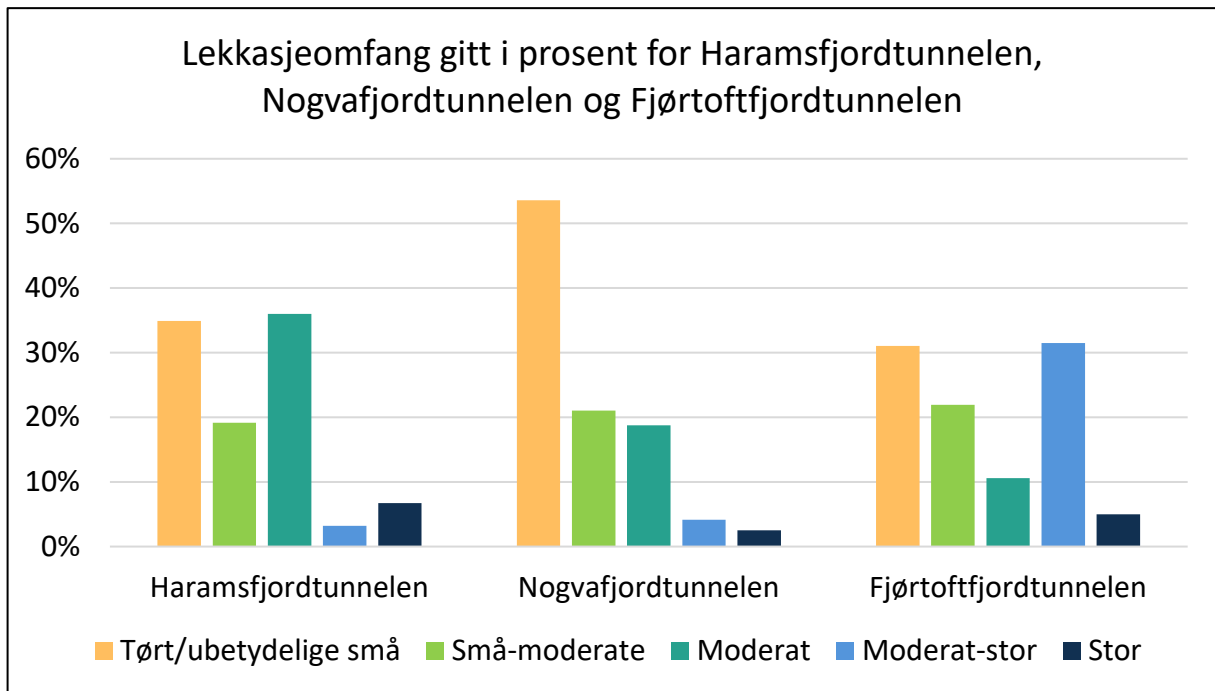
## 10.1 INNLEKKASJEPROGNOSE

Prognosene i denne oppgaven er i stor grad basert på doktoravhandlingen til Holmøy (2008a) og fire geologers erfaringer fra tre referanseprosjekter. I kostnadsberegningen for Nordøyvegen er det vurdert at 90% av lengdene skal vannsikres (pers. kom., Karlson, 2017). Dette innebærer at tørre partier kan stå uten vannsikring. I følge prognosen i denne oppgaven kan det forventes partier som er tørre eller har ubetydelige små lekkasjer. Ubetydelige små lekkasjer kan være for eksempel at deler av stoffen er fuktig.

Figur 43 og Figur 44 viser fordelingen mellom de ulike lekkasjeklassene i de ulike tunnelene. I Haramsfjordtunnelen er det antatt at 1198 meter (35% av tunnelen) har ubetydelige små eller ingen lekkasjer. I Nogvafjordtunnelen antas det at 3100 meter (54% av tunnelen) har ubetydelige små eller ingen lekkasjer, og i Fjørtoftfjordtunnelen er 1055 meter (31% av tunnelen) antatt tørr eller med kun ubetydelige små lekkasjer. Totalt sett utgjør dette 44% av tunnellengden for de undersøiske tunnelene.



Figur 43: Antall meter med tørr/ubetydelige små, små-moderate, moderate, moderat-stor og stor lekkasje. Det antas at ekstremt store lekkasjer ikke vil forekomme. Total lengde er for Haramsfjordtunnelen 3430, for Nogvafjordtunnelen 5785 og for Fjørtoftfjordtunnelen 3400.



*Figur 44: Prosentandel med tørt/ubetydelige små, små-moderate, moderate, moderat-stor og stor lekkasje. Det antas at ekstremt store lekkasjer ikke vil forekomme. Total lengde er for Haramsfjordtunnelen 3430, for Nogvafjordtunnelen 5785 og for Fjørtoftfjordtunnelen 3400.*

## 10.2 POTENSIELLE SVAKHETER MED PROGNOSEN

Kapittel 8.1 tar for seg parameterne som inngår i prognosen. Det var viktig for undertegnede at prognosen er konsekvent med hensyn til disse parameterne. Det vil blant annet si at samtlige svakhetssoner med seismiske hastigheter under 3000 meter/sekund (og dermed Q-verdier under 0,1) er antatt tette. Lekkasjen vil for disse sonene kunne oppstå i ytterkant og sideberget av sonen. Alle soner med Q-verdi over 0,1 er angitt som potensielt vannførende. Her kan lekkasjer oppstå både sentralt i sonen men også i ytterkant og i sideberget. Forholdet mellom Q-verdi og lekkasjer er basert på doktorgraden til Holmøy (Holmøy, 2008a). Doktorgraden igjen er basert på en studie av seks norske tunneler. Derfor vil det være knyttet usikkerhet til om denne relasjonen er overførbart til tunnelforholdene langs Nordøyvegen.

En stor usikkerhet i prognosen er leire i svakhetssonene. Leirinnhold er kun inkludert og vurdert i prognosen der hvor dette er beskrevet i kjerneloggen. Det er i forbindelse med denne oppgaven foretatt laboratorietesting av prøvemateriale fra det som er beskrevet som en svakhetszone i kjerneloggen. Kjerneloggen beskrev et parti med hardpakket leire. Etter en visuell betraktning av det aktuelle partiet var det uklart for undertegnede om denne beskrivelsen stemte. Det som

var beskrevet som hardpakket leire fremstod som oppsprukket bergmasse med varierende grad av intakte partier, men ikke hardpakket leire. I den forbindelse ble det innhentet fotografi av kjernen som var tatt under kjerneloggingen for å undersøke om kjernene visuelt sett bestod av mer leire under loggingen, eller om leiren for eksempel var spylt vekk. Det viste seg at kjernene så akkurat like ut under loggingen. Samtidig så kan eventuell leire ha blitt mer kompakt og nærmest «forsteinet» over tid. I kontakt med vann bør slik leire være mulig å smuldre opp. Under preparering av prøvemateriale ble prøven våtsiktet. Noe av de mer intakte bitene var mulig å smuldre med håndkraft. Totalt sett var innhold av finstoff i prøvene relativt lite. Dette ble testet og klassifisert som middels aktiv smektitt. Resultatet gjenspeiler kun leiren i en av svakhetssonene langs Nordøyvegen og det er usikkert om dette vil være gjeldende for andre svakhetssoner. Seismiske hastigheter sier heller ingenting om leirinnhold. Det vil derfor være usikkerhet knyttet til konduktiviteten i svakhetssonene da denne påvirkes av leirinnhold.

Prognosen produsert i denne masteroppgaven er basert på undertegnedes (en uerfaren students) funn. Den er basert på tilgjengelig litteratur og erfaringer innhentet fra referanseprosjekter. Det er utfordrende å produsere en troverdig lekkasjeprognose, og selv om det er klart definerte parametere i prognosen finnes det aldri regler uten unntak. Et eksempel på dette er den mye omtalte rassonen/svakhetssonen i Atlanterhavstunnelen. Den seismiske hastigheten for sonen var gjennomgående 2800 meter/sekund. Fjelloverdekningen var 45 meter. Løsmassedekket ovenfor hadde en mektighet på 20 meter, og bestod av morenemateriale. I prognosen i denne masteroppgaven ville sonen ha blitt angitt som tett, med mulighet for store lekkasjer i randsone og i sideberg. Til tross for redusert fjelloverdekning ville det blitt antatt gode tetteeenskaper i løsmassene på havbunnen. I realiteten ble det påtruffet svært dårlig fjell i denne sonen, og et påfølgende ras medførte ekstremt store vannlekkasjer i tunnelen (Karlson, 2008). Dette illustrerer blant annet at stabilitetsutfordringer og innlekkasjer kan henge sammen. I prognosen er det ikke tatt høyde for soner med lave seismiske hastigheter (< 3000 meter/sekund) vil kunne gi utrasinger som fører med seg lekkasjer i soner med liten bergoverdekning (< 50 meter).

### **10.3 INJEKSJONSPROGNOSE OG STRATEGI**

Injeksjonsprognosen i denne oppgaven er direkte avhengig av innlekkasjeprognosen. En annen måte å lage injeksjonsprognose kunne vært å kun basere injeksjonsklassene på Q-verdi. Et forslag til injeksjonsklasser er hentet fra den geologiske rapporten for E39 Rogfast (Holmøy, *et al.*, 2012). Her beskrives tre injeksjonsklassene med tilhørende injeksjonsstrategi for Rogfast. Injeksjonsklassene er gjengitt direkte i Tabell 10. Denne inndelingen tar kun høyde for Q-verdi,

og parametere som type bergart, overdekning og løsmasseforekomst er ikke inkludert. Det kan tenkes at en modell som inkluderte samtlige av disse parameterne ville vært i overkant komplisert. Dette er derimot parametere forfatteren har vektlagt i sin innlekkasjeprogno, og det forekommer en subjektiv vurdering av de ulike parameterenes viktighet (vekting av de ulike parameterne). Dette gjør at injeksjonsprognosen i denne oppgaven ikke utelukkende er basert på Q-verdier.

Tabell 10: Injeksjonsklasser basert på Q-verdi for E39 Rogfast. Hullgeometri og omfang er inkludert (Holmøy, et al., 2012).

	<b>Injeksjonsklasse 1</b>	<b>Injeksjonsklasse 2</b>	<b>Injeksjonsklasse 3</b>
<b>Q-verdi</b>	>4	0,1-4	<0,1
<b>Vanskelighetsgrad</b>	Enkel	Middels til vanskelig	Vanskelig
<b>Innlekkasje</b>	Kan forekomme stor innlekkasje	Forventer størst innlekkasje	Forventer innlekkasje i overgangen til svakhetssoner
<b>Hullgeometri</b>	20-30 hull	25-40 hull	40-60 hull
<b>Omfang (% av lengden som må injiseres)</b>	15%	50%	40%

Injeksjonsklassene i Rogfast-rapporten baserer seg på følgende:

- Q-verdien under 0,1 tilsier ofte at bergmassen er oppknust med leire som tetter bergmassen.
- Q-verdier mellom 0,1 og 4 tilsier ofte at bergmassen kan ha en viss oppsprekingsgrad. Enkelte åpne sprekker kan forekomme. Samtidig kan det også forekomme sprekke materiale med tettende egenskaper. Potensielt vanskelige forhold/høy lekkasje.
- Q-verdier over 4 har mindre oppsprekking og redusert leire på sprekker.

Det kan være dristig å forsøke å utarbeide en mer nøyaktig prognose enn gitt i kapitel 8 for injeksjonsbehovet for de undersjøiske tunnelene langs Nordøyvegen. Samtidig er det innhentet informasjon om injeksjonsmengder fra tre referanseprosjekter. Injeksjonsmasseforbruk er oppsummert i Tabell 11. Å ta et snitt av injeksjonsmengder anvendt i disse prosjektene kan være en mulig metode for å anslå en mer konkret og tallfestet prognose. Samtidig må det

vrderes om disse tallene er overførbare til Nordøyvegen, og om dette i seg selv er hensiktsmessig.

Basert på geologi, regionale spenningsforhold og tunneltraséens retning i forhold til største hovedspenning er Atlanterhavstunnelen mest lik de undersjøiske tunnelene langs Nordøyvegen. I en direkte sammenlikning burde (ideelt sett) hovedsprekkeretningen for prosjektene blitt sammenlignet med de regionale hovedspenningsretningene. Dette vil være en faktor som kan si noe om potensiale for vannlekkasje i sprekke/svakhetssonene, da de største lekkasjene gjerne forekommer i sprekker parallelt med den største hovedspenningsretningen. I geologiske rapporter for prosjektene er oppsprekking beskrevet. For Nordøyvegen er det beskrevet fem hovedsprekkeretninger og foliasjon. Disse har svært varierende retning avhengig av hvor de er kartlagt. En sammenlikning av lekkasje/injeksjonsbehov ut ifra retning på hovedspenning/hovedsprekkeretning basert på rapporten anses derfor som lite hensiktsmessig, da resultatet av dette hadde blitt uklart og lite nøyaktig.

Samtidig er det naivt å tro at injeksjonsomfanget i Atlanterhavstunnelen er direkte overførbare til Nordøyvegen. Ut ifra studiene gjort i denne masteroppgaven er det mange forhold som påvirker lekkasjeforholdene i en tunnel. I Atlanterhavstunnelen var det relativt få lekkasjer med unntak av rassonen. 1217 tonn av totalt 1708 tonn (71%) injeksjonsmasse gikk med kun i sonen. Dette illustrerer at injeksjonsomfang er direkte avhengig av forholdene på stuff, og vil variere fra prosjekt til prosjekt. Forfatter av denne oppgaven har ansett det som verdifullt å innhente erfaringer fra ulike prosjekter med hensyn på forhold som gir lekkasje. Dette har direkte nytteverdi for driving av andre tunneler med tanke på forutsigbarhet og hvilke forhold en kan forvente. Samtidig er hvert prosjekt unikt, og det stilles spørsmålstegn ved hvorvidt det er hensiktsmessig å forsøke å sammenlikne injeksjonsmengder.

*Tabell 11: Injeksjonsmengder i Atlanterhavstunnelen, Ryfylketunnelen og Karmøytunnelen. Tallene for Ryfylketunnelen er samlet for begge løp.*

<b>Tunnel</b>	<b>Atlanterhavstunnelen</b>	<b>Ryfylketunnelen</b>	<b>Karmøytunnelen</b>
<b>Total injeksjon</b>	1708	2860 (837 meter driving gjenstår)	1622
<b>Injeksjon per 100 meter tunnel</b>	29,78	21,62 (to løp)	18,14

## 10.4 VALG AV VANN – OG FROSTSIKRINGSHVELV

For tunnelprosjekter må det tas valg rundt vann-/frostsikringshvelv. Statens vegvesen definerer hvilke hvelv som er godkjent for ulike tunnelklasser (Statens vegvesen, 2016b). De oppdaterte håndbøkene er derfor et naturlig utgangspunkt. Samtidig er det viktig å være bevisst de tekniske fordelene og utfordringene for de ulike løsningene. For de undersjøiske tunnelene på Nordøyvegen er det i denne oppgaven anbefalt hvelv av sprøytebetong med membran som vannsikring. Dette er en godkjent løsning for tunnelklasse B. Hvelvet ble anbefalt grunnet relativt lave investeringskostnader og enkel monteringslogistikk. I tillegg er det unødvendig å frostsikre tunnelen, samt at materialet ikke utgjør samme brannfare som den alternative løsningen med PE-skum. Det er også tatt høyde for middels lang levetid, og et noe høyt vedlikeholdsbehov. Forfatter av oppgaven har selv ingen praktisk erfaring med de ulike løsningene, og en mer erfaren person ville kanskje vurdert fordeler/ulempene annerledes.

Valg av hvelvløsning baserer seg i stor grad på økonomiske rammer for et prosjekt. I en slik kostnadsvurdering er det imidlertid flere parametere enn investeringskostnaden som bør inkluderes. LCC-analyse (Life-Cycle Cost, livssyklus-kostnader) bør benyttes som et verktøy i prosessen med å vurdere ulike løsninger for vann- og frostsikring i tunnel. Dette anbefales i rapport nr. 131 utgitt av den svenske stiftelsen Bergteknisk Forening (Eriksson og Edelman, 2014). LCC er en metode for å estimere total kostnad for et produkt gjennom hele levetiden. Blant disse kostnadene finner en blant annet innkjøp, vedlikehold, indirekte kostnader til samfunnet i form av trafikkutgifter. Dersom valg av løsning i stor grad tas med hensyn på investeringskostnadene, kan det føre til en løsning som ikke er optimal ut ifra de økonomiske rammene for et prosjekt. Kostnader knyttet til hele den tekniske levetiden (dimensjonerende levetid) bør derfor medregnes.

# Kapittel 11 Konklusjon

De undersjøiske tunnelene langs Nordøyvegen befinner seg i den vestre gneisregionen. Med unntak av et mindre parti med gabbro, er det granittisk gneis (prekambrisk) langs tunneltraséen. Dette er en stiv bergart, og erfaring tilsier at innlekkasje kan forekomme langs åpne sprekker/svakhetssoner. Innlekkasjeprognozen utarbeidet i denne oppgaven kan benyttes som en pekepinn mot de lekkasjeforholdene en kan forvente å påtreffe under driving av tunnelene. Beskrivelsene av seksjonene kan også bidra med en bevisstgjøring rundt hvilke ingeniørgeologiske forhold som er gjeldende for de ulike seksjonene, deriblant overdekning og svakhetssoner (herunder seismisk hastighet).

Et stort fokus i denne oppgaven har vært å undersøke hvilke forhold som gir innlekkasje i tunneler. Ved å studere aktuelle prosjekter drevet under relativt like bergforhold vil en kunne oppnå god kunnskapsoverføring. For de tre referanseprosjektene studert i denne oppgaven er det beskrevet konkrete forhold som bidrar til **økt** innlekkasje:

- Liten bergoverdekning
- Liten mektighet på overliggende løsmasser, eller løsmasser med god hydraulisk konduktivitet. Eksempler:
  - Driving under øyer og skjær i fjorden gir dårlig løsmasseoverdekning og økt fare for innlekkasje.
  - Strandsoner har løsmasser med god konduktivitet og bidrar dårlig til tetting av vannførende sprekker i underliggende berg.
- Stive bergarter
- Bergartsgrenser

Kristin H. Holmøy beskriver i sin doktorgrad (Holmøy, 2008a) ytterligere to ingeniørgeologiske forhold som relevante for innlekkasje:

- Q-verdi under 0,1 gir redusert innlekkasje i forhold til Q-verdier mellom 0,1 og 10.
- Størst lekkasje skjer langs sprekker tilnærmet parallelle med største hovedspenning.

Alle de listede forholdene er inkludert i lekkasjeprognozen i denne oppgaven.

For å imøtekomme lekkasjekravet på 300 l/min/km tunnel må det injiseres under driving og etableres vannsikringshvelv. Injeksjonsomfanget må tilpasses stoff-forholdene, for eksempel er det forventet varierende sprekkefylling som sand, silt og bergartsfragmenter. Den overordnede strategien bør være behovsprøvd injeksjon, og det bør sonderbores (eller eventuelt kjernebores der forholdene tilsier det) systematisk for å måle innlekkasje og vurdere om det er behov for injeksjon. Ved sonderboring er det viktig at vannet får tid nok til å vise seg. Generelt anbefales hullengde mellom 15 og 30 meter under injeksjon, og antall hull bør være mellom 14 og 40. Ved leire, i for eksempel svakhetssoner, bør det bores flere og kortere injeksjonshull, og trykket bør økes.

Injeksjonsprognosen baserer seg på innlekkasjeprognose for prosjektet. For å håndtere restlekkasjer i de undersjøiske tunnelene langs Nordøyvegen anbefales det hvelv av sprøytebetong og membran. Dersom det etter driving er partier som er tørre, og som har vært tørre hele tiden, bør det være anledning til å utelate vannsikringshvelv for disse partiene. På grunn av mauring/naturlig tetting av vannførende sprekker, er det grunn til å tro at lekkasje ikke vil oppstå der det allerede er tørt. Samtidig kan det ikke antas at lekkasjer forsvinner over tid. Tunnelen med størst andel tørre partier eller partier med ubetydelige små lekkasjer er Nogvafjordtunnelen (50%). Minst halvparten av tunnelstrekningene i de tre tunnelene havnet i innlekkasjeklassen tørr/ubetydelige små lekkasjer eller mellomklassen små-moderate lekkasjer. Etersom injeksjonsprognosen baserer seg på at injeksjon tilpasses lekkasjeforholdene, er det ikke definert hvilket omfang som kreves der det for eksempel er antatt moderate lekkasjer eller små-moderate lekkasjer. Det kan derfor forekomme at det ikke kreves injeksjon for disse partiene.

Feltkartlegging av oppsprekking ved påhuggsområdene tilsier at enkelte sprekkesett eller foliasjon er orientert slik at de danner liten eller ingen vinkel med de planlagte tunneltraséene. Det er utfordrende å vurdere hvordan disse vil påvirke stabiliteten i tunnelen, da det er uvisst hvordan disse vil fremstå lenger ned i berget. Generelt vil steile sprekker kunne redusere stabiliteten i vegger, mens mer horisontale sprekker vil kunne by på stabilitetsutfordringer i heng.



## Kapittel 12 Videre arbeid

Det anbefales å utføre spenningsmålinger for å bestemme retning på største hovedspenning i området ved Nordøyvegen. Dette er data som vil kunne bidra til en enda bedre lekkasjeprognose.

Det vil være av interesse å se om lekkasjeprognosen stemmer overens med de faktiske lekkasjeforholdene som oppstår under driving av tunnelene. Det er viktig å følge opp prognoser slik at nye erfaringer kan tilføres kunnskapsgrunnlaget for å utarbeide så gode prognoser som mulig. Ved å sammenlikne prognoser med faktisk forhold kan det vurderes hvor god prognosen var, og om antagelser rundt ulike parameteres betydning bør justeres.

Prognosen i denne oppgaven er i stor grad basert på innhentede erfaringer fra ulike prosjekter og en doktorgrad som tar for seg ulike ingeniørgeologiske forholds innvirkning på innlekkasje. Om mulig burde Statens vegvesen (eller en annen aktør) lage en veileder for utarbeiding av innlekkasjeprognose for tunneler. Veiledningen kan oppdateres etter hvert som forskning resulterer i nye bidrag. Dette vil blant annet senke terskelen for å utarbeide innlekkasjeprognoser, og gjennom dette føre til en bedre bevisstgjøring rundt ingeniørgeologiske forhold og innvirkningen de har på innlekkasje.

# Kapittel 13 Kildeliste

- Buvik, H. (2007) *FoU Tunnelutvikling. Sluttrapport Fase 1: Brann- og frostsikring*. Statens vegvesen.
- Dahle, O. H. (2013) *T-forbindelsen, Byggeindustrien*.
- Dehls, J. F., Olesen, O. og Rønning, J. S. (2012) *Magnetisk og batymetrisk kartlegging ved vegprosjektet Fv. 659 Nordøyvegen, Møre og Romsdal.*: NGU.
- Eriksson, M. og Edelman, M. (2014) *Lcc analyser för vattenavlednings- och bergförstärkningssystem*. (BeFo rapport 131). Stockholm.
- Fossen, H., Dallman, W. og Andersen, T. B. (2013) *Fjellkjeden går til grunne. Landet blir til*. Norsk Geologisk Forening (NGF).
- Fossen, H., *et al.* (2013) *En fjellkjede blir til. Landet blir til*. Norsk Geologisk Forening (NGF).
- Gjærevold, E. (2015) *Underfjords i Stavanger, Fjellsprenger'n*, s. 6-11.
- Grob, C. og Karlson, K. I. (2014) *Geologi. Fv 659 Nordøyvegen. Ingeniørgeologisk rapport for reguleringsplan*.
- Hatlenes, C. (2011) *T-forbindelsen - Analyse av ingeniørgeologiske forhold knyttet til kryssning av svakhetssoner i undersjøisk tunnel*, NTNU.
- Hem, L. J. (2003) *Naturlig tetting av lekkasjer inn i tunneler*, (3).
- Holmøy, K. H. (2008a) *Significance of geological parameters for predicting water leakage in hard rock tunnels*, NTNU.
- Holmøy, K. H. (2008b) *Sammenhenger mellom ingeniørgeologiske forhold og vannlekkasjer i berg - resultat av studier av 6 norske tunneler, Fjellsprengningsdagen, bergmekanikkdagen, geoteknikkdagen 2008*.
- Holmøy, K. H., *et al.* (2012) *Geologisk rapport for E39 Rogfast*. Trondheim: SINTEF Byggforsk infrastruktur.
- Holter, K. G. (2014) *Loads on Sprayed Waterproof Tunnel Linings in Jointed Hard Rock: A Study Based on Norwegian Cases, Rock Mechanics and Rock Engineering*, 47(3), s. 1003-1020.
- Holter, K. G. (2015) *Properties of waterproof sprayed concrete tunnel linings*, NTNU.
- Ionescu, C., *et al.* (2014) *Insights into the EPR characteristics of heated carbonate-rich illitic clay, Applied Clay Science*.
- Jernbaneverket (2015) *Rapport Jernbanetunneler: anbefalt konstruksjonsprinsipp*.
- Karlson, K. I. (2008) *RV 64 Atlanterhavstunnelen - lekkasjesone 230 m under havoverflaten, Fjellsprengningsdagen, bergmekanikkdagen, geoteknikkdagen 2008*..
- Klüver, B. H. og Kveen, A. (2004) *Berginjeksjon i paksis Miljø- og samfunnstjenelige tunneler*. Vegdirektoratet s. 68.
- Kvarstein, I. (2016) *Forstudie av mulige metoder for håndtering av innlekkasje i undersjøiske vegtunneler*, Prosjektoppgave, NTNU.

- Mao, D., *et al.* (2015) A Case Study of Tunnel Instability in Weakness Zone Containing Swelling Clay, i Professor Ming Lu, N. T. U., *et al.* (red.) *Shotcrete for Underground Support XII*. Singapore.
- Moen, P. A. (2009) *Fjellkvalitet og sikringsmetoder Karmøy tunnelen*. Statens vegvesen.
- Moen, P. A. (2012) *Geologisk sluttrapport t-forbindelsen Haugesund*. Statens vegvesen.
- Myrvang, A. (2001) Bergmassens spenningstilstand *Bergmekanikk*. Trondheim: Institutt for geologi og bergmekanikk.
- NFF (2008) Håndbok nr 05 "Tung bergsikring i undergrunnsanlegg", s. 75.
- NFF (2010) Håndbok nr 06 "Praktisk berginjeksjon for underjordsanlegg", s. 96.
- NGI (2015) *Bruk av Q-systemet*. Oslo: NGI.
- NGU Løsmasser - nasjonal løsmassedatabase.
- NGU (2005) *XRD-analyser*. Tilgjengelig fra: [http://www.ngu.no/upload/Norges%20geologi/NGUlab/NGU\\_LAB\\_XRD\\_analyser.pdf](http://www.ngu.no/upload/Norges%20geologi/NGUlab/NGU_LAB_XRD_analyser.pdf) (Hentet: 29. april 2017).
- NGU (2015) *XRD-analyser*. Tilgjengelig fra: <https://www.ngu.no/fagomrade/xrd-analyser> (Hentet: 29. april 2017).
- NGU (u.å.) *Database for geologiske enheter*. Tilgjengelig fra: [www.ngu.no](http://www.ngu.no) (Hentet: 18. mars 2017).
- Nilsen, B. og Palmstrøm, A. (2001) *Stability and water leakage of hard rock subsea tunnels*. Tilgjengelig fra: <http://folk.ntnu.no/bnilsen/IS-KYOTO%202001.pdf> (Hentet: 05. oktober 2016).
- Nilsen, B. og Henning, J. E. (2009) Thirty years of experience with subsea tunnels *Proc. Strait crossings 2009*. Tapir, s. 35-44.
- Nilsen, B. (2012) Characteristics of Water Ingress in Norwegian Subsea Tunnels.
- Nilsen, B. og Broch, E. (2012) *Ingeniørgeologi-berg grunnkurskompendium*. Trondheim: NTNU.
- Norconsult (2012a) *Etatsprogrammet Moderne vegtunneler - Strategi for bygging av nye vegtunneler*. Statens vegvesen.
- Grunnlagsdokument*. Vegdirektoratet. Tilgjengelig fra: [http://www.vegvesen.no/\\_attachment/380980/binary/652557](http://www.vegvesen.no/_attachment/380980/binary/652557).
- Norconsult (2012b) *Ingeniørgeologisk rapport for konkurransegrunnlag – Entreprise E02 Solbakk-tunnelen fra Solbakk*. Statens vegvesen.
- Norconsult (2012c) *Ingeniørgeologisk rapport for konkurransegrunnlag – Entreprise E03 Solbakk-tunnelen fra Hundvåg*. Statens vegvesen.
- Nordgulen, Ø. og Andresen, A. (2007) Jordas urtid. *Landet blir til 2*. utg. Trondheim: Norsk Geologisk Forening (NGF).
- Palmstrøm, A. (1997) *En kort innføring i ingeniørgeologi*. Berdal Strømme.
- Palmstrøm, A. og Stille, H. (2010) *Rock engineering* Thomas Telford Limited.
- Palmstrøm, A. (2014) Norske tunnelbyggere verdens beste - en myte? *Fjellspregningsdagen 2014*. Oslo.

- Pedersen, K. B., Kompen, R. og Kveen, A. (2010) *Arbeider foran stuff og stabilitetssikring i vegtunneler*. (Teknologirapport nr. 2538): Statens vegvesen.
- Roald, S. (2003) Sammenheng mellom injeksjon og stabilitetsforhold mot fjellets mekaniske egenskaper og sikring *Fjellspregningsdagen, bergmekanikkdagen, geoteknikkdagen 2003*. Oslo.
- Rønning, J. S., et al. (2006) *Geological and geophysical investigations for the ROGFAST project*. NGU.
- Sandøy, T., Loftesnes, K. og Todnem, L. (2012) *Kjernelogging (Fv 659 Nordøyvegen)*: Norconsult.
- Selmer-Olsen, R. og Palmstrøm, A. (1989) Tunnel collapses in swelling clay zones, *Tunnels & Tunneling*, November.
- Sigmond, E. M. O. (2012) *Berggrunnen i Norge*. 2. utg. Trondheim.
- Statens vegvesen og Reinertsen AS (2013) Reguleringsplan Skjeltne - Lepsøya - Austnes.
- Statens vegvesen (2016) *Injeksjon*. Tilgjengelig fra: <http://www.vegvesen.no/fag/teknologi/Tunneler/bygging-og-sikring/Injeksjon> (Hentet: 17. april 2017).
- Statens vegvesen (2009) *Atlantehavstunnelen - Norges kanskje mest krevende undersjøiske tunnel*. Tilgjengelig fra: <http://www.vegvesen.no/Ferdigprosjekt/atlanterhavstunnelen> (Hentet: 23. mars 2017).
- Statens vegvesen (2013a) Reguleringsplan Myklebust.
- Statens vegvesen (2013b) Reguleringsplan Fjørtofta.
- Statens vegvesen og Norplan AS (2013) Reguleringsplan Skuløya/Flemsøya.
- Statens vegvesen (2014) *Håndbok R510 "Vann og frostsirking i tunnel"*.
- Statens vegvesen (2016a) *Håndbok V520 "Tunnelveiledning"*. Vegdirektoratet.
- Statens vegvesen (2016b) *Håndbok N500 "Vegtunneler"*.
- Statens vegvesen (2017) *Fakta om Fv. 659 Nordøyvegen*. Tilgjengelig fra: <http://www.vegvesen.no/Fylkesveg/fv659nordoyvegen/Fakta> (Hentet: 22. mai 2017).
- Stumo, R. (2009) *Geologisk rapport T-forbindelsen*. Region vest, Ressursavdelingen, Vegteknisk seksjon.
- Stumo, R. og Vikane, K. (2011) Bygging av undersjøisk tunnel på T-forbindelsen, *Fjellspregningsdagen, bergmekanikkdagen, geoteknikkdagen 2011*, s. 12.
- Todnem, L. (2010) *RV64 Atlantehavstunnelen ingeniørgeologisk sluttrapport*. Statens vegvesen.
- Vegdirektoratet (2015) *Håndbok R210 Laboratorieundersøkelser 116 Analyse av svelleleire*. Statens vegvesen.

## **PERSONLIG KOMMUNIKASJON (PERS. KOM.):**

Gilje, Anne-Merete (2016): Kontrollingeniør Ryfastforbindelsen.

Hamre, Øyvind (2016): Byggeleder Ryfylketunnelen.

Holter, Karl Gunnar (2016): Førsteamanuensis ved Institutt for geovitenskap og petroleum (NTNU) og ingeniørgeolog i BASF.

Jensen, Erik (2017): Geolog i Statens vegvesen, Ryfylketunnelen (entreprise E03).

Karlson, Kåre Ingolf (2016, 2017): Geolog i Statens vegvesen, region midt. Ekstern veileder for masteroppgaven. Geolog for Atlanterhavstunnelen.

Lotsberg, Gunnar (2016, 2017): Geolog i Statens vegvesen, region vest.

Mauset, Magni (2017): Geolog i Statens vegvesen, Ryfylketunnelen (entreprise E02).

Nordløkken, Svein (2017): Prosjektleder, vann- og frostløsninger, Skanska AS.

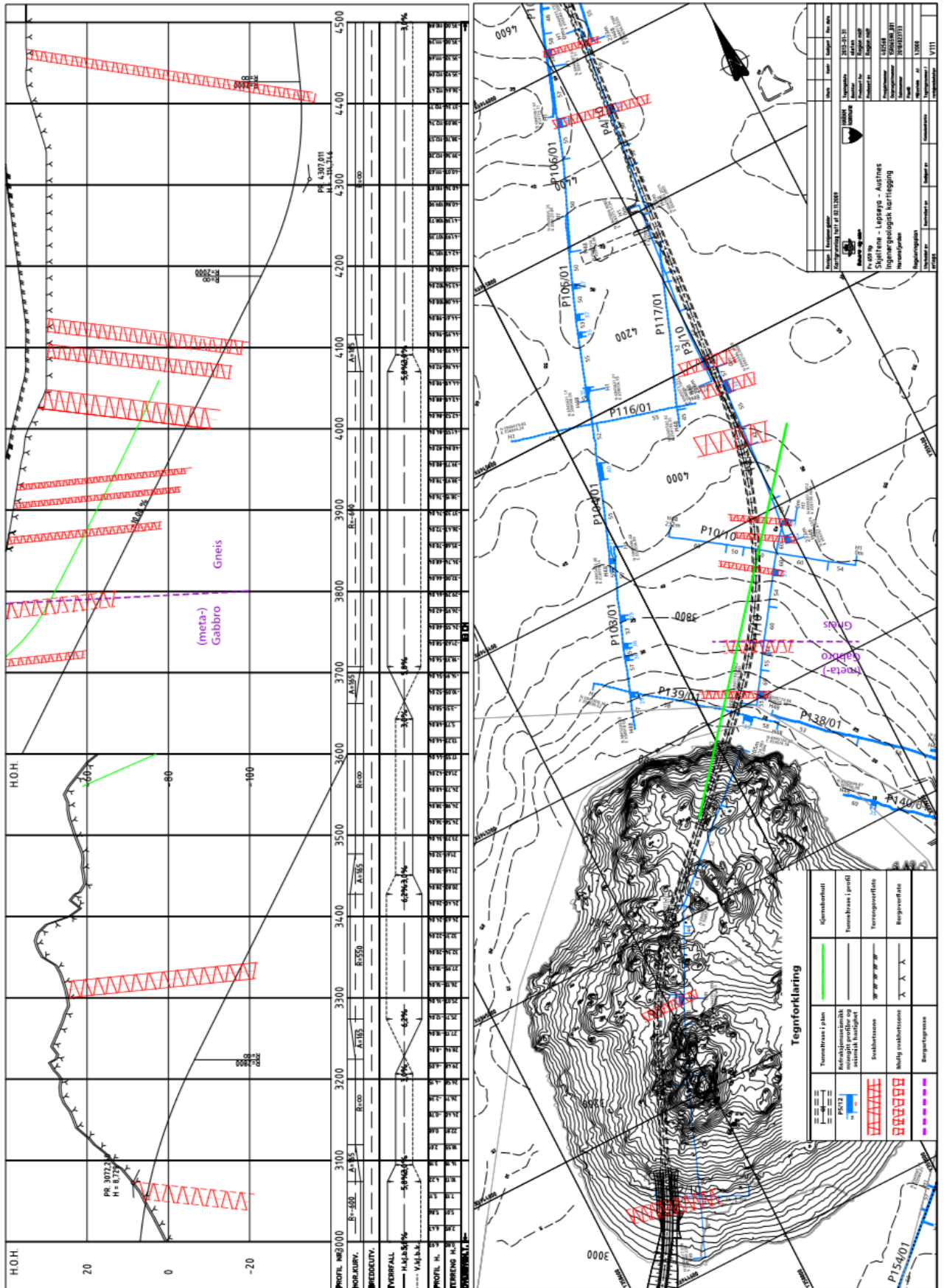
Stumo, Rune (2017): Tidligere geolog i Statens vegvesen, Karmøytunnelen (T-forbindelsen).

Vistnes, Gunnar (2017): Overingeniør og veileder på ingeniørgeologisk laboratorium.

# Kapittel 14 Vedlegg

Vedlegg nummer	Beskrivelse
1	Ingeniørgeologisk kartlegging Skjeltne – Lepsøya – Austnes (Haramsfjorden)
2	Ingeniørgeologisk kartlegging Skjeltne – Lepsøya – Austnes (Haramsfjorden)
3	Ingeniørgeologisk kartlegging Skjeltne – Lepsøya – Austnes (Haramsfjorden)
4	Ingeniørgeologisk kartlegging Fjørtofta (Nogvafjorden)
5	Ingeniørgeologisk kartlegging Fjørtofta (Nogvafjorden)
6	Ingeniørgeologisk kartlegging Fjørtofta (Nogvafjorden)
7	Ingeniørgeologisk kartlegging Fjørtofta (Nogvafjorden)
8	Ingeniørgeologisk kartlegging Fjørtofta (Fjørtofttfjorden)
9	Ingeniørgeologisk kartlegging Fjørtofta (Fjørtofttfjorden)
10	Ingeniørgeologisk kartlegging Fjørtofta (Fjørtofttfjorden)

# VEDLEGG 1

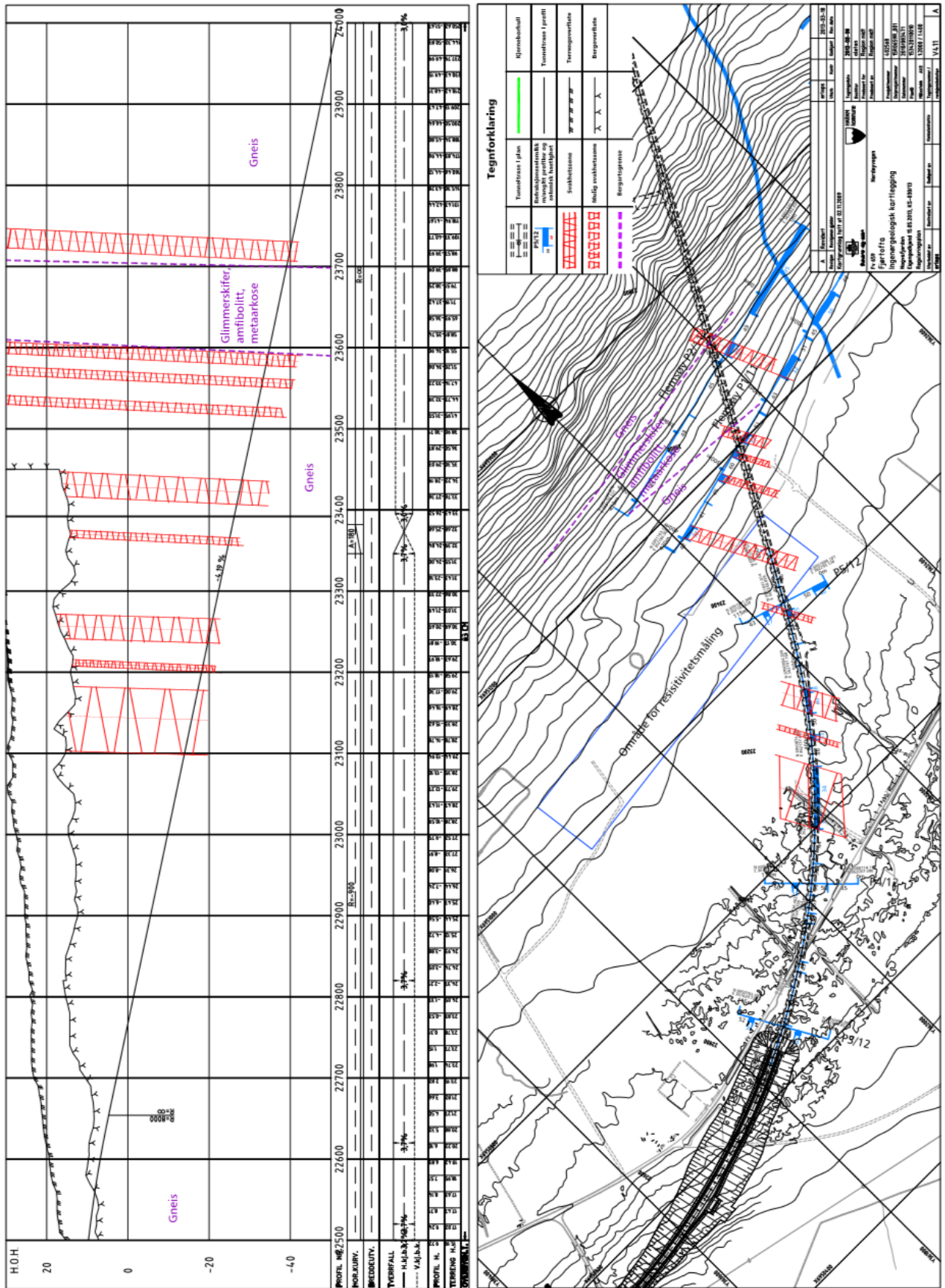








# VEDLEGG 4















# VEDLEGG 9

