

Prognose for innlekkasje og injeksjonsbehov i Ryfylketunnelen

Tord Are Meisterplass

Tekniske geofag

Innlevert: november 2015

Hovedveileder: Bjørn Nilsen, IGB

Medveileder: Anne-Merete Gilje, Statens Vegvesen

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for geologi og bergteknikk

Forord

Denne masteroppgaven er utført ved Institutt for geologi og bergmekanikk ved NTNU, vår og høst 2015. Oppgaven er utført i samarbeid med Anne-Merete Gilje som kontaktperson i Statens Vegvesen og med Professor Bjørn Nilsen som veileder. Målet med oppgaven var å utarbeide en detaljert prognose for innlekkasje og injeksjonbehov i Ryfylketunnelen. Prognosen baserer seg i stor grad på studentens fordypningsprosjekt høsten 2014, samt feltstudie og erfaringsdata fra den allerede drevne delen av tunnelen. Oppgaven er i hovedsak et gjettverk, hvor den største utfordringen var å formulere en prognosemodell samt å argumentere for hvilke variabler som henholdsvis var relevante og forutsigbare.

Jeg vil gjerne rette en spesiell takk til Professor Bjørn Nilsen for veiledning, inspirasjon og hyggelige samtaler. Bjørn er en kilde til kunnskap på både faglig og personlig nivå, og eg er svært takknemlig for å ha hatt Bjørn som min veileder.

En stor takk vil jeg også rette til Anne-Merete Gilje og kontoret til Statens Vegvesen i Stavanger for en hyggelig mottagelse og åpenhet om interne forhold. Jeg fikk et svært godt bilde av SVV og fagmiljøet der.

Jeg vil gi en stor takk til mine foreldre og familie for gjennomlesing, gode innspill og støtte gjennom prosessen.

Til slutt vil eg takke kjæresten min Natalie Brennan for den enorme støtten, distraheringen og kjærligheten. Uten deg ville det vært vanskelig å fullføre oppgaven.

Sammendrag

For å bygge undersjøiske tunneler må en drive gjennom bergmasse hvor en har svært begrensede muligheter til forundersøkelser og hvor dårlige bergmasser kan gi store konsekvenser. En startet bygging av Ryfylketunnelen sommeren 2014. Tunnelen vil bli verdens dypeste og lengste siviltrafikkerte undersjøiske tunnel når den står ferdig i 2019. I samband med dette var det av interesse å studere faren for innlekkasje og injeksjonsbehovet langs den udrevne delen av tunneltraséen, og å formulere en prognose. Den betydelige mangel på litteratur og prognoseverktøy for vannlekkasjer i bergrom har tvunget datagrunnlaget i denne prognosen til å i stor grad være basert på erfaringsdata.

Tunneltraséen forventes å gå gjennom to kaledonske skyvedekker av gneis og et av fyllitt med et antatt impermeabelt lag av morene over mesteparten av berget, basert på anbudsrapporten til Norconsult. De ingeniørgeologiske forholdene er vurdert som stedege og dermed står erfaringsdata fra den drevne delen av tunnelen og erfaringer fra nærliggende, ingeniørgeologisk sammenlignbare berggrunnsanlegg for mye av grunnlagsmaterialet. Samtidig vurderes etablerte modeller for innlekkasje og injeksjonsprosedyrer fra berganlegg over hele landet.

Prognosen er en subjektiv tolkning av hvilke innlekkasjer og injeksjonsprosedyrer en kan forvente av de ingeniørgeologiske forholdene i tunneltraséen, og er en kvalifisert tolkning. De ingeniørgeologiske forholdene som er vurdert forutsigbare og relevante er;

- Forventet bergartstype og tilhørende egenskaper
- Seismisk hastighet som indikerer oppsprekkingsgrad mhp. svakhetssoner o.l
- Topografiske forhold av betydning
- Forventet bergmassekvalitet basert på empirisk data
- Orientering av sprekker og knusningssoner
- Permeabiliteten og mektigheten av løsmassedekket

Forventet injeksjonsbehov baseres på oppknusningsgrad og bergartstype etter NFF's retningslinjer. Av udreven bergmasse forventes 19,1 % av Visteflakets fyllitt, 8,2 % av Boknafjorddekkets gneis og 14,6 % av Storheidekkets gneis å være påvirket av svakhetssoner. Disse svakhetssonene utgjør en fare for innlekkasje, hvor Storheidekkets gneis forventes å ha høyest risiko. Bergartsgrensen mellom fyllitt og gneis og dypprenene i Storheidekkets gneis er vurdert som spesielt utsatte områder. Til sammen forventes 13,3 % av tunneltraséen bergmasse å gi lekkasjer som krever injeksjonsarbeid. Visteflakets fyllitt og Boknafjorddekkets gneis forventes å være noe vanskeligere å injisere pga. sprekkematerialer, mens Storheidekkets 'renere' gneis forventes å være lettere. Nord-sør orienterte sprekkesett og svakhetssoner forventes å gi noe høyere lekkasje pga hovedspenningens orientering. Det er mulig å møte ekstremtilfeller hvor en har fullt vanntrykk, men moderne utstyr skal kunne håndtere dette. Systematisk sonderboring skal gi et godt bilde av vannforholdene i bergmassen forran stuff og anses som et essensielt sikkerhetstiltak. Dette er spesielt viktig om en møter ekstremtilfeller. Injeksjon forran stuff har også gitt betydelig bedre resultat enn bak stuff, og burde utføres dersom sonderboringen viser tilstrekkelig høy vannføring.

Summary

To build a subsea tunnel one have to drive through rock mass under water, which has limited opportunities for geological analysis, but where poor rock masses could have major consequences. The Ryfylke Tunnel began construction in the summer of 2014 and will be the world's deepest and longest civilian subsea tunnel when completed in 2019. As a result, it was of immense interest to study the risk of water leakage and the injection requirements along the remaining part of the tunnel, and to formulate a prognosis. The significant lack of literature and forecasting tools for water leakages in caverns has forced data in this prognosis to be largely empirical based.

The tunnel is expected to go through two Caledonian thrust sheets of gneiss and one of phyllite with an assumed impermeable layer of moraine over most of the rock, based on Norconsult's report. The engineering geological conditions are considered indigenous, thus the empirical data is mainly from the driven portion of the tunnel and from nearby, engineering geology comparable bedrock facility. Established models for water leakage and injection procedures from mining facilities across the country are also considered.

The prognosis is a subjective interpretation of which engineering geological conditions in the tunnel one can expect water leakages from, and will demands injection procedures, The engineering geological conditions that are considered predictable and relevant are;

- Expected rock type and its properties
- Seismic velocity describing fracturing degree with respect to weakness zones etc.
- Topographical factors of importance
- Expected rock mass quality based on empirical data
- Orientation of fractures and crush zones
- Permeability and thickness of the soil covering

Expected injection requirements are based on rock fracturing and type by NFF's guidelines. Of the remaining rock mass it is expected that 19.1% of Visteflakets phyllite 8.2% of Boknafjord gneiss and 14.6% of Storheidekkets gneiss being affected by weakness zones. These pose a potential water leakage risk, where Storheidekkets gneiss is expected to be at highest risk. Rock border between phyllite and gneiss and the gulleys in Storheidekkets gneiss are considered particularly vulnerable areas with respect to water leakage. Altogether 13.3% of the tunnel route rock mass is expected to give waterleaks requiring injection work. Visteflakets phyllite and gneiss Boknafjord tire is expected to be somewhat more difficult to inject because of a higher content of clay in the rock fractures, while Storheidekkets 'cleaner' gneiss is expected to be easier. The north-south oriented fracture sets and weakness zones are expected to result in somewhat higher leakage because the main force orientation. It is possible to meet extreme cases with full water pressure, but modern equipment is expected to handle it. Systematic probe drilling provides a good picture of water conditions ahead and is considered an essential safety measure. This is especially important for potential extreme cases. Injection ahead compared with injection after excavation also provides a considerably better and thus should be performed if the probes drilling show sufficiently high water flow.

Innhold

Forord	1
Sammendrag	i
Summary	ii
Innhold	v
Tabeller	vii
Figurer	x
1 Introduksjon	1
1.1 Bakgrunn	1
1.2 Formål	2
1.3 Fremgangsmåte	2
1.4 Begrensinger	3
2 Ingeniørgeologiske forhold rundt Ryfylketunnelen	5
2.1 Regionalgeologien	7
2.2 Regionale lineasjoner	9
2.3 Spenningsfordeling	10
2.4 Forundersøkelser	11
2.4.1 Grunnboring	12
2.4.2 Grovhullboring	12
2.4.3 Ingeniørgeologiske kartlegging	12
2.5 Seismikk	15
2.6 Ingeniørgeologiske forhold	16
3 Erfaringsdata fra vannlekkasjer i undersjøiske tunneler	19
3.1 Generelle oppfatninger angående vannlekkasjer	20
3.1.1 Geologi	20

3.1.2	Strukturgeologiske forhold	21
3.1.3	Sprekker	23
3.1.4	Spenningstilstand og overdekning	23
3.1.5	Løsmassedekke	24
3.2	Forhold av spesiell betydning for innlekkasje i Ryfylketunnelen	25
3.2.1	Geologi	26
3.2.2	Svakhetssoner (Strukturgeologiske forhold)	27
3.2.3	Oppsprekking og spenningsbilde	27
3.2.4	Løsmassedekket	29
3.2.5	Overdekning	29
3.3	Høyt vanntrykk	29
3.4	Ekstremtilfeller	30
4	Injeksjonsstrategier	31
4.1	Injisering i berg	31
4.2	Prosedyre	31
4.3	Geologi	37
4.4	Svakhetssoner	38
5	Erfaringsdata fra ferdigdrevet tunnel	39
5.1	Injisert områder	39
5.2	Boknafjorddekket	42
5.2.1	Sprekkesystemer	42
5.2.2	Sprekkesystemer ved innlekkasje	43
5.2.3	Bergmassekvalitet ved Q-verdi	44
5.3	Visteflaket	47
5.3.1	Sprekkesystemer	47
5.3.2	Sprekkesystemer ved innlekkasje	48
5.3.3	Bergmassekvalitet ved Q-verdi	49
5.4	Storheidekket	53
5.4.1	Sprekkesystemer	53
5.4.2	Sprekkesystemer ved innlekkasje	55
5.4.3	Bergmassekvalitet ved Q-verdi	56
5.5	Oppsummering	60
5.5.1	Boknafjorddekket	61
5.5.2	Visteflaket	61
5.5.3	Storheidekket	61
6	Feltstudie og laboratoriumundersøkelser	63
6.1	Forfatterens observasjoner	63
6.1.1	Hundvågstuffen	63
6.1.2	Solbakkstuffen	65
6.2	Laboratorieundersøkelser	66
6.2.1	Svelleegenskaper	67
6.2.2	Mineralsammensetning ved XRD-analyse	70
6.3	Oppsummering	73

7	Prognose for innlekkasje og injeksjon	75
7.1	Begrunnelse for valg av metode	75
7.2	Illustrering av prognosen	77
7.3	Prognosen pel for pel	78
7.4	Statistisk fordeling av prognosen	98
8	Avsluttende diskusjon	101
9	Konklusjon	103
10	Videre arbeid	105
	Referanser	107
	Vedlegg	111
10.1	VEDLEGG 1: Ingeniørgeologisk plan og profil, tegning 02-V01-221 . . .	111
10.2	VEDLEGG 2: Ingeniørgeologisk plan og profil, tegning 03-V01-221 . . .	115
10.3	VEDLEGG 3: Eksempel på Novapoint-logg	118
10.4	VEDLEGG 4: Resultat fra XRD-analyse	120
10.5	VEDLEGG 5: Prognosen	130
10.6	VEDLEGG 6: Detaljer fra lekkasjeunkt	133

Tabeller

2.1	Geologisk beskrivelse av de kaledonske dekkeenhetene	7
2.2	Grunnboring utført for Ryfylketunnelen	12
2.3	Ingeniørgeologiske vurderinger av blotninger	13
2.4	Fordeling av seismiske måleresultater under sjø	15
2.5	Fordeling av seismiske måleresultater på land	15
2.6	Liste over alle seismiske lavhastighetssoner	17
3.1	Ingeniørgeologiske relevante tunneler fra prosjektoppgaven	25
3.2	Største vannlekkasjer i sammenlignbare tunnelene til Ryfylketunnelen	26
3.3	Forhold mellom hovedspenning, tunnelretning og vannførende sprekker	28
4.1	NFF's anbefalinger injeksjonsmaterialer	35
5.1	Oversikt over tunnelmeter drevet og injisert	41
6.1	Oversikt over laboratorieundersøkelser	67
6.2	Klassifisering av svelleegenskapens aktivitet basert på frisvelling	68
6.3	Klassifisering av fri svelling og svelletrykk	69
6.4	Resultater fra svelletesting	70
6.5	XRD-analysens resultater for de fire prøvene	71
7.1	Injeksjonsklasser mhp bergkvalitet og oppsprekingszone	76
7.2	Fordeling av forventet totalt injeksjonsbehov og innlekkasje	98
7.3	Fordeling av forventet injeksjonsbehov og innlekkasje for skyvedekka	99

Figurer

1.1	Oversiktsbilde for Rv. 13 Ryfylke fastlandsforbindelse	1
2.1	Berggrunnskart ved Ryfylketunnelen med bergartsgrenser	6
2.2	Regionalgeologiske snitt langs Ryfylketunnelen	6
2.3	Løsmassekart ved Ryfylketunnelen	8
2.4	Lineament i regionalgeologien rundt Ryfylketunnelen	9
2.5	Lineamenta på sørvestlandet og rundt Ryfylketunnelen i roseplott	10
2.6	Sprekkerose fra Hundvåg	13
2.7	Sprekkerose fra Sandøy og Odda, og Hidle	14
2.8	Sprekkerose fra Solbakk	14
3.1	Vannets livsløp i bakken	19
3.2	Konduktivitet til forskjellige bergarter	21
3.3	Typisk struktur til forkastings- og knusningssoner	22
3.4	Sprekkesystem ved Sauda	28
4.1	NFF's eksempel på injeksjonsskjerm salvelengde i lengderetning	33
4.2	NFF's eksempel på boring av injeksjonshull med en 3-boms borrhøg	33
4.3	NFF's eksempel på en injeksjonsskjerm	34
4.4	NFF's sjekkliste for injeksjonsprosessen	36
4.5	Borplan for injeksjon ved T-forbindelsen	38
5.1	Injisert masse langs tunneltraséen	40
5.2	Sprekkerose fra gneisen på stuff ved Hundvåg	42
5.3	Sprekkerose fra injisert gneis ved Hundvåg	43
5.4	Registrert Q-verdi langs Boknafjorddekket	45
5.5	Distribusjon av Q-verdi fra Boknafjorddekkets gneis	46
5.6	Boksplokk av Q-verdi distribusjon og injeksjonsmasse krevd iht. Q-verdi	47
5.7	Sprekkerose fra fyllitten på stuff ved Hundvåg	48
5.8	Sprekkerose fra injisert fyllitt ved Hundvåg	49
5.9	Registrert Q-verdi langs Visteflaket	50

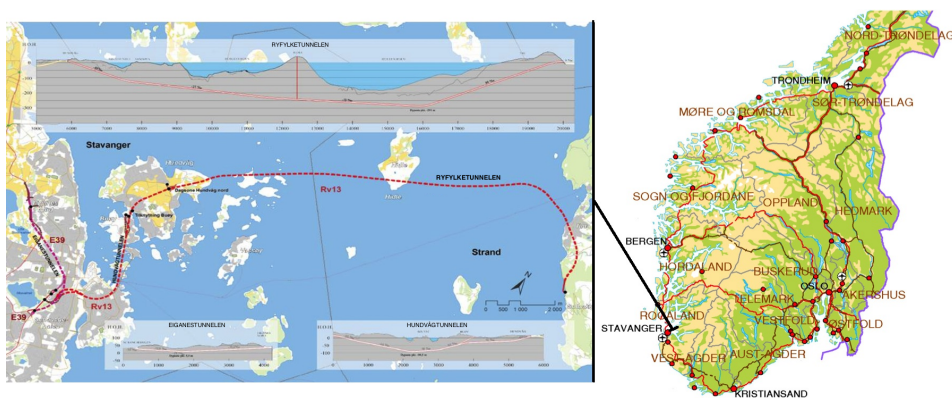
5.10	Distribusjon av Q-verdi fra Visteflakets fyllitt	51
5.11	Kumulativ fordeling av Q-verdi for Visteflakets fyllitt	52
5.12	Boksplokk av Q-verdi distribusjon og injeksjonsmasse krevd iht. Q-verdi	52
5.13	Sprekkerose fra gneisen på stoff ved Solbakk	54
5.14	Sprekkesett i grunt berg sammenligna med dypt berg ved Solbakk	55
5.15	Sprekkerose fra injisert gneis ved Solbakk	55
5.16	Injiserte sprekksett i grunt berg sammenligna med dypt berg ved Solbakk	56
5.17	Registrert Q-verdi langs Solbakkstuffedens løp A	57
5.18	Registrert Q-verdi langs Solbakkstuffedens løp B	58
5.19	Distribusjon av Q-verdi fra Storheidekkets gneis	59
5.20	Boksplokk av Q-verdi distribusjon og injeksjonsmasse krevd iht. Q-verdi	60
6.1	Illustrering av hvordan gneisens sprekksett påvirker Hundvågtraséen	63
6.2	Bilde av gneisen ved Hundvåg tunnelinngang	64
6.3	Bilde av fyllitten ved Hundvåg tunneltrasé	65
6.4	Bilde av gneisen ved Solbakk tunneltrasé	66
6.5	Prinsippkisse for testing av frivelling	68
6.6	Prinsippkisse for testing av svelletrykk	69
6.7	Prinsippkisse av XRD-refleksjon	71
7.1	Prognosen langs tunneltraséets bergmasse, del 1	77
7.2	Prognosen langs tunneltraséets bergmasse, del 1	78
7.3	Søylediagram for forventet total innlekkasje og injiseringsbehov	99
7.4	Søylediagram for forventet innlekkasje og injiseringsbehov for skyvedekka	100

Kapittel 1

Introduksjon

1.1 Bakgrunn

Samfunnet i Ryfylke har siden midten av 1970-tallet jobbet mot et samband med fylkeshovedstaden Stavanger. Hovedformålet er å korte ned reisetiden mellom Ryfylke og Nord-Jæren, å avlaste trafikstrykket i Stavanger og på Hundvåg, samt å stimulere videre utvikling og busetting nær Stavanger og på Solbakk. Løsningen på disse problemene er Ryfasttunnelene; Et samband på tre tunneler, hvor Ryfylketunnelen vil bli verdens dypeste og lengste sivilt trafikkerte undersjøiske tunnel.



Figur 1.1: Figuren viser oversiktsbilde av Rv. 13 Ryfylke fastlandsforbindelse (Vegvesen, 2008). Entreprisen Ryfylketunnelen drives i to deler, og ved øya Hilde vises skille mellom entreprise E02 og E03

Ryfylketunnelen vil bli 14,3 km lang og gå 292 meter under havet. Tunnelen drives med

to løp med tverrsnitt T8,5. Den bratteste stigningen er 7 % i 4 km opp mot Solbakk, det vil være gjennomgående tverrsnitt hver 250. meter og en fjellhall er planlagt under øya Hidle dersom berggrunnen tillater det. Drivingen av Ryfylketunnelen er godt i gang, og i skrivende tid er ca. 3 km drevet fra Solbakkstuppen og ca. 2 km fra Hundvågstuppen. I denne masteroppgaven vil en innlekkasje- og injeksjonsprognose for den resterende delen av Ryfylketunnelen bli presentert.

1.2 Formål

Hovedformålet med masteroppgava er å utarbeide en detaljert prognose for innlekkasje og injeksjonsbehov for den udrevne delen av tunneltraséen til Ryfylketunnelen. Et delmål vil derav være å formulere en metodikk for utarbeidelse av prognosen, som vil fungere som et prognoseverktøy. Arbeidet med dette bygger i stor grad på resultatene fra fordypningsprosjektet (Meisterplass, 2014), og er en naturlig videreføring.

Det finnes mange undergrunnsanlegg hvor ukontrollert innlekkasje har skapt problemer for driving og stabilitet, men det finnes lite litteratur rundt vannlekkasjer i berg og ingen anvendbare prognoseverktøy. En god prognose kan minske usikkerheten knyttet til vannlekkasje, kunne gi prosjektet større trygghet og ta et skritt mot et prognoseverktøy som er anvendbar i industri. Det er også mulig at en god modell vil kunne gi grunnlag for videre forskning på innlekkasje i berggrunn, og dermed øke forståelsen med hensyn på fremtidige prosjekter.

1.3 Fremgangsmåte

Mangel på håndfast litteratur og prognoseverktøy gjør at masteroppgaven i stor grad baseres på erfaringsdata fra sammenlignbare berganlegg, og for alle praktiske formål er et gjettverk. Det er en eksplorativ oppgave hvor dataen er valg av forfatter gjennom subjektiv tolkning av dens relevans, og en tolkning av hvilke variabler som er forutsigbare og relevante for innlekkasje.

Litteratursøket for oppgaven baseres på erfaringer fra norske berganlegg og norske standarder fra de siste 30 årene. Tunneltraséen går gjennom tre spesielle kaledonske skyvedekker som kun gjør de sammenlignbare med nærliggende bergmasse med sammenliknbar geologisk historie. Samtidig vurderes etablerte modeller for innlekkasje og injeksjonsprosedyrer fra berganlegg over hele landet for ingeniørgeologiske sammenlignbare forhold.

Forfatteren har også hatt tilgang til erfaringsdata fra den drevne delen av tunnelen, samt bergartsprøver og observasjoner fra feltstudie. Erfaringsdataen er vurdert med svært stor tyngde og legger hovedgrunnlaget for prognosen. Her er sprekesett og bergmassens Q-verdi ved permeabelt og impermeabelt berg, samt oppførsel rundt strukturgeologiske kjenne-tegn og svakhetssoner vurdert.

For den udrevne delen av tunnelen er grunnlagsmaterialet fra forundersøkelser vurdert som den mest pålitelige beskrivelsen av berggrunnen. Her nevnes spesielt de ingeniørgeologiske rapportene GEO-E02 og GEO-E03 Norconsult produserte for entreprenørens konkurransegrunnlag. Dette vil også være dominerende for hvilke ingeniørgeologiske forhold en kan forutse og som vil utgjøre datagrunnlaget for prognosen.

Bruk av ingeniørgeologiske programvarer for å modellere bergmassens egenskaper er neglisjert i masteroppgaven. Forfatteren og veilederen kom til enighet om at det var for mange og usikre variabler i prognosen for å kunne produsere en modell med tilstrekkelig lav usikkerhet og som gav mening.

1.4 Begrensinger

Det gir mening å skille mellom direkte og indirekte begrensinger; hvor de direkte begrensingene er feilkilder i anvendt data, mens de indirekte begrensingene er feilkilder som kommer av et lite utviklet fagområde med stor usikkerhet og med mangel på anerkjente modeller.

En utfordring gjennom oppgaven har vært mangel på kunnskap og prognoseverktøy for vannlekkasje og injeksjon i berganlegg. Forfatteren har derfor gjort et litteraturstudie for å anslå hvilke ingeniørgeologiske forhold som skaper vannlekkasje generelt, i nærområdet og spesifikk for Ryfylketunnelen, samt å foreslå et enkelt prognoseverktøy for en lekkasje- og injeksjonsprognose. En konsekvens av at dette kun inngår i en masteroppgave er at grunnlagsmaterialet for hver enkelt konklusjon kan være tynt, at valgene tatt ikke er godt nok grunnlagt og at de derfor kan være unøyaktige og/eller gale.

Erfaringsdata fra drevet fjell er loggført av flere ingeniørgeologer hvor en kan tydelig observere subjektiviteten i loggføringen. Det stilles også spørsmål ved entreprenørens injeksjonsprosedyrer fra Solbakkstuppen. Alt dette kan gi falske bilder av berggrunns kvaliteten og dens egenskaper, som kan spre seg til prognosen.

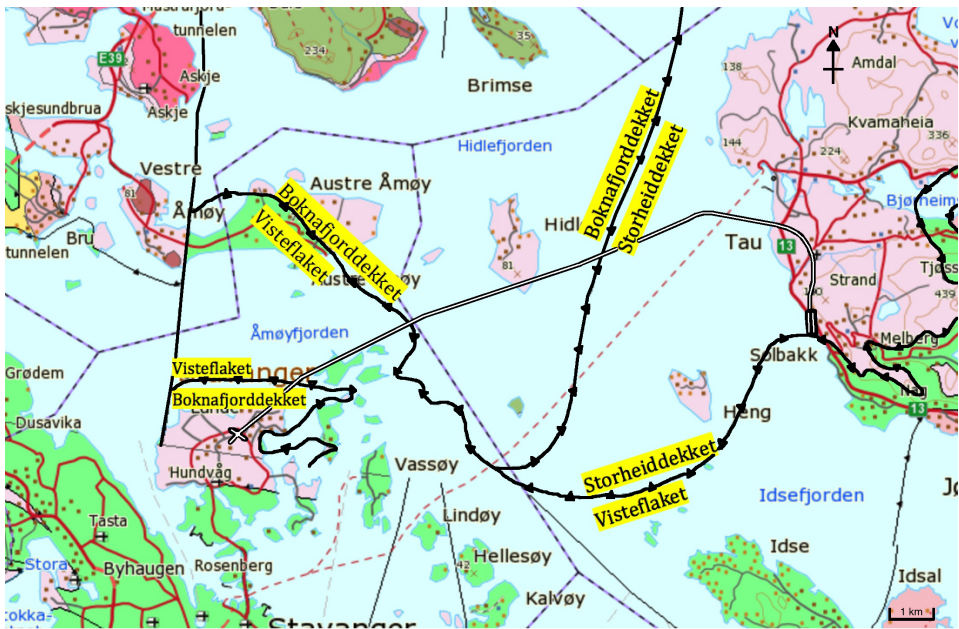
De ingeniørgeologiske kartleggingene baseres på prøvetakning på land og vil ikke gi et riktig bilde av hva som skjer ved tunneldybden. Det følger derfor med en del usikkerhet i antagelser om bergkvalitet, sprekkesystem og andre ingeniørgeologiske forhold. De registrerte svakhetssonene og bergartsgrensene er basert på seismiske undersøkelser. Dette fører med seg en del usikkerhet, spesielt med tanke på fallet til svakhetssonene og bergartsgrensene. Erfaringsmessig er mektigheten og kvaliteten på svakhetssoner vanskelig å predikere med seismikk.

Forfatteren var ute for en alvorlig ulykke påsken 2015. I samband med dette kom forfatteren og veileder frem til at det var naturlig å basere oppgaven på innsamlet erfaringsdata før ulykken, da det var svært krevende for forfatteren å komme tilbake til oppgaven og til feltet.

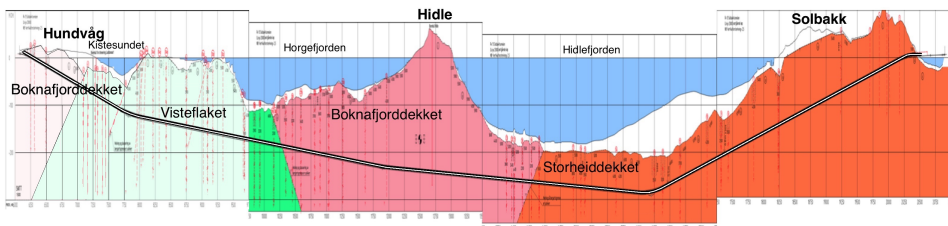
Kapittel 2

Ingeniørgeologiske forhold rundt Ryfylketunnelen

De ingeniørgeologiske forholdene rundt Ryfylketunnelen er grundig gjennomgått i prosjektoppgaven (Meisterplass, 2014) som masteren bygger på. I dette kapitlet vil en kortere presentasjon bli gitt. Leseren henvises til prosjektoppgaven for en mer detaljert og utfyllende beskrivelse.



Figur 2.1: Utsnitt fra NGU's berggrunnskart (1:250 000) (NGU, 2015) med inntegnet tunneltrasé og grensene mellom de tre dekkeenhetene. Grensene er vurdert som bergartsskilte/skyvesoner. Grønn farge er fyllitt. Rosa farge er gneis (Meisterplass, 2014)



Figur 2.2: Regionalgeologisk snitt langs tunneltraséen. Forskjell i farge skyldes forskjell i i rapportene for entrepriser E02 og E03 (Norconsult, 2012a,b). Disse profilene er vist i større og mer detaljert format i vedlegg 1 og 2. Løsmassene over tunneltraséen er illustrert med hvit farge (Meisterplass, 2014)

2.1 Regionalgeologien

Berggrunnen i området består av kaledonske skyvedekker over prekambrisk, stedeget gneisbergart. Ryfylketunnelen går gjennom de tre dekkeenheter Visteflaket, Storheidekket og Boknafjorddekket, som illustrert i figur 2.1, 2.2, vedlegg 1 og 2. Bergartsbeskrivelse for de forskjellige skyvedekka er gitt i tabell 2.1 (Meisterplass, 2014; Norconsult, 2012a,b). Merk at bergartsgrensene under sjø er grove tolkningen med stor usikkerhet knyttet til seg.

Tabell 2.1: Aktuelle kaledonske dekkeenheter i området og overordnet beskrivelse av disse. (merk; Storheidekket og Boknafjorddekket går under samme beskrivelse) (Meisterplass, 2014; Norconsult, 2012a,b)

Dekkeenhet	Beskrivelse
Boknafjorddekket (Øverst)	Dekkene består av båndet gneis, hvor Storheidekket ofte er mer glimmerrikt. Foliasjonen i begge dekkeenheter er relativt flattliggende, noe som samsvarer med den horisontale dekkeoppbyggingen under dannelsen av den kaledonske fjellkjeden
Storheidekket (I midten)	
Visteflaket (Nederst)	Langs Ryfylketunnelen består Visteflaket av fyllitter, stedvis rike på kvartslinser. Kvarstglimmerskifer, soner med rene kvartsikkbenker og sandstein forekommer

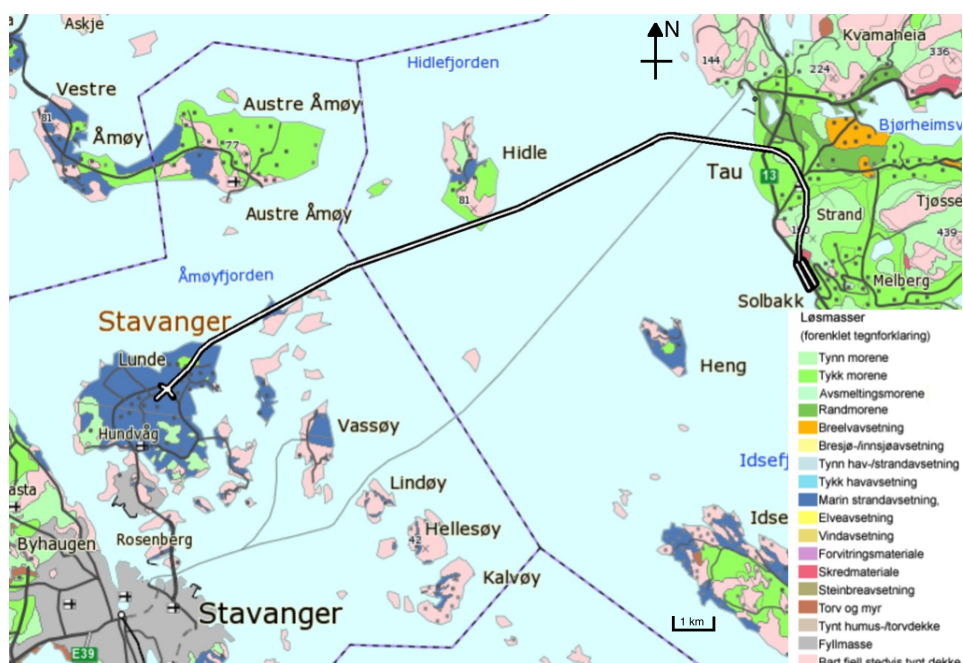
Tunneltraséen vil gå gjennom Boknafjorddekket fra påhugg ved Hundvåg til bergartsgrensa i Kistesundet, og fra bergartsgrensa i Horgefjorden, forbi øya Hidle og til bergartsgrensa i Hidlefjorden. Dette er illustrert i figur 2.2. Boknafjorddekket består i hovedsak av gneis. Denne er kvarts- og feltspatrik, stedvis båndet og klassifiseres fra granodiorittisk til diorittisk og tonalittisk gneis (NGU, 2015). I grovhullsboringen på øya Hidle ble det også påvist en del mørke mineral som amfibol og biotitt.

Tunneltraséen går gjennom Storheidekket fra bergartsgrensen i Hidlefjorden til påhugg ved Solbakk. Gneisen her er også stedvis kvarts- og feltspatrik, samt stedvis båndet. Den er klassifisert som drandiorittisk til tonalittisk (kvartsdiorittisk) og diorittisk gneis (NGU, 2015).

Mellom Hidle og Hundvåg går tunneltraséen gjennom Visteflaketets fyllitt. Fyllitten er kvartsrik med spredte lag av metaarkose, kvartstitt og karbonførende fyllitt (NGU, 2015). Det har vært påvist tytefjell i svakhetssoner (Norconsult, 2012b). I prosjektoppgaven ble ei større kvartstittlag i overgangen mellom fyllitt og gneis i Horgefjorden vurdert som sannsynlig (Meisterplass, 2014).

I prosjektoppgaven ble det påpekt at Visteflaket ”står topografisk høyt og bratt” i forhold til gneisen rundt. Fylltitten ble derfor vurdert som motstandsdyktig og en kan forvente gode bergforhold i Visteflaket relativt til omliggende bergart (Meisterplass, 2014).

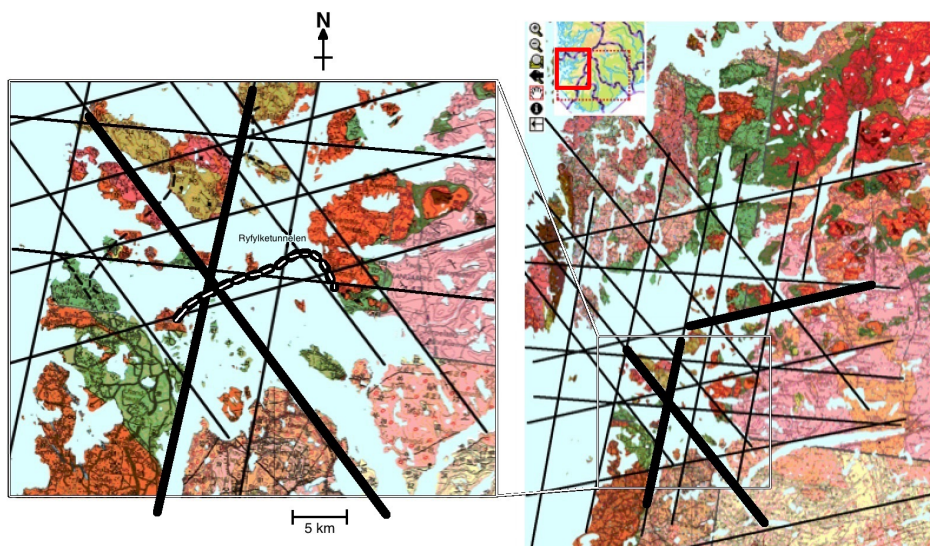
Løsmassene i nærområdet til Ryfylketunnelen er tolket til å være dominert av morene langs berggrunnen med noen sporadiske marine strandavsetninger på toppen. Morenen har vanligvis høyere seismisk hastighet (2000 - 2400 m/s) enn sand, silt og leire (1500 - 2000 m/s). Dette er grunnlaget for den seismiske kartleggingen av løsmassene under sjø. Løsmassekartet for området er gitt i figur 2.3, samt illustrert i det regionalgeologiske profilet i figur 2.2, vedlegg 1 og 2 (Meisterplass, 2014; Norconsult, 2012a,b).



Figur 2.3: Løsmassekart (1:250 000) ved Ryfylketunnelen, produsert av NGU (NGU, 2015) med forenklet teinforklaring og tunneltrasé (Meisterplass, 2014)

2.2 Regionale lineasjoner

I prosjektoppgaven ble det presentert tre forskjellige lineamentstolkninger; Gabrielsen's tolkning av satellittbilder (Braathen et al., 2002), NGU's lineamentskart (NGU, 2015) og forfatterens egen tolkning av lineament i berggrunnskart (Meisterplass, 2014). Gabrielsens og NGU's tolkning er enige om at tunneltraséen krysser to store lineament i Horgefjorden vest for øya Hidle. Forfatterens tolkning er grundigere og indikerte at tunneltraséen krysser tre store lineasjoner i Horgefjorden og to i Hildefjorden. I figur 2.4 er forfatterens tolkning presentert med Gabrielsens og NGU' tolkning markert som tykke lineament. Leseren henvises til prosjektoppgaven for de originale tolkningene.

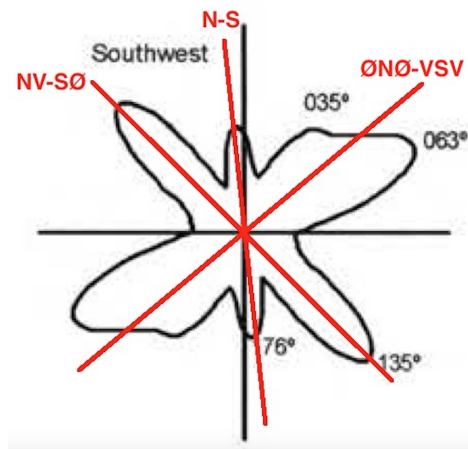


Figur 2.4: Lineament i regionalgeologien rundt Ryfylketunnelen. Gabrielsens og NGU's tolkning av lineament er de tykke markeringene (Meisterplass, 2014; Braathen et al., 2002; NGU, 2015)

Av figur 2.4 ser en at tre tydelige regionale lineament går igjen. Disse har omtrentlig orientering NV-SØ (nordvest - sørøst), N-S (nord - sør) og ØNØ-VSV (øst/nordøst - vest/sørvest). Dette gir et bilde på hvilken orientering svakhetssoner knyttet til lineasjoneene kan ha. Gabrielsens og NGU's lineament krysser tunneltraseen ved bergartsgrensen mellom Visteflaket og Boknafjorden i Horgefjorden. Dette er også det største vandedypet til tunneltraséen på vestsiden av øya Hidle, og et område med mange registrerte svakhetssoner (Meisterplass, 2014).

Et fjerde system orientert VNV-ØSØ (vest/nordvest - øst/sørøst) var også funnet av forfatteren. Dette systemet krysser øya Hidle, har stor usikkerhet knyttet til seg og den vurderes ikke med hensyn på svakhetssoner (Meisterplass, 2014).

Et roseplott av registrerte lineamenter ble produsert av Gabrielsen (Braathen et al., 2002). I prosjektoppgaven ble trenden til lineamentene rundt Ryfylketunnelen vurdert og markert inn i roseplottet for lineament på sørvestlandet. Det var god korrelasjon. Roseplottet er illustrert i figur 2.5 hvor de røde linjene er trenden til lineamenta ved nær Ryfylketunnelen (Meisterplass, 2014).



Figur 2.5: Lineamenta på sørvestlandet og rundt Ryfylketunnelen i roseplott. De røde linjene er forfatterens tolkning av lineamenter nær Ryfylketunnelen (Meisterplass, 2014; Braathen et al., 2002)

2.3 Spenningsfordeling

En kan for grunne berganlegg på Vestlandet anta med en viss usikkerhet at hovedspenningen står normalt og horisontalt på kystlinja (Nilsen, 2014-2015). Dette forebygges av målinger til SINTEF, som viser at hovedspenningen nær kystlinja til Stavanger er orientert Ø-V (Holmøy, 2014). Området rundt Ryfylketunnelen domineres av fjell og fjorder hvor topografien forventes å påvirke spenningsbildet og en kan oppleve store variasjoner innenfor små områder (Myrvang, 1996).

I prosjektoppgaven ble fire forskjellige spenningsmålinger nær Ryfylketunnelen analysert. Disse var spenningsmålinger ved Finnøytunnelen (Larsen et al., 2008), Statpipe gasstunnel ved Kårstø (Dahlø, 1996; Hansen, 1997), Tastavarden fjellhall (Holter and Lund, 1996) og SINTEF's regionale tolkning (Holmøy, 2014).

De horisontale spenningen viste seg å være svært store og ble tolket som et resultat av platetektonikk og topografi. Hovedspenningen nær Ryfylketunnelen ble tolket som Ø-V-orientert med potensialet for variasjon over små avstander, topografiske forhold og/eller struktureologiske forhold (Meisterplass, 2014).

2.4 Forundersøkelser

Grunnundersøkelser for Ryfylketunnelen startet på oppdrag fra Statens Vegvesen i år 1999 og ble fullført sommeren 2014. Grunnlagsmaterialet for tolkning av ingeniørgeologiske forhold langs tunneltraséen er følgende forundersøkelser og rapporter:

Forundersøkelser

- [1] Geomap, 2006. Rapport 251709.01. Ryfast, vegtunnel mellom Stavanger og Tau. Supplerende refraksjonsseismiske målinger utført i 2005, (Geomap, 2006).
- [2] GeoPhysix, 2012. Rapport 12021. Rv. 13, Stavanger - Solbakk (Ryfylketunnelen, Ryfast), (Geophysix, 2012).
- [3] Norconsult, 2012, Rapport GEO-007. Geoteknisk datarapport Solbakk, (Norconsult, 2012c).
- [4] Norconsult, 2012, Rapport GEO-009. Geoteknisk datarapport Hundvåg Nord, (Norconsult, 2012d).
- [5] GeoPhysix, 2014, Rapport refraksjonsseismikk prosjekt nr. 14001, Refraksjonsseismiske undersøkelser for Rv13 Ryfast, (Geophysix, 2014).

Geologiske rapporter

- [6] Multiconsult, 2008, revidert 2009. Rapport 115417-2. Rv. 13 Ryfast og Eiganestunnelen. Geologisk Rapport, (Multiconsult, 2008, revidert 2009).
- [7] Norconsult, 2012, Ingeiørgeologisk rapport for konkurransefrunnlag - Entreprise E03 Ryfylketunnelen fra Hundvåg, (Norconsult, 2012b).
- [8] Norconsult, 2012, Ingeiørgeologisk rapport for konkurransefrunnlag - Entreprise E02 Ryfylketunnelen fra Solbakk, (Norconsult, 2012a).

Annet grunnlagsmateriale

- [9] NGU, Berggrunnskart, (NGU, 2015).

2.4.1 Grunnboring

Det ble hovedsakelig utført grunnboring for tunneltraséen for å fastslå dyp til fast fjell. For det meste ble totalsondering utført, men for påhugg ved Hundvåg og ved Lundesneset var det supplert med fjellkontrollboring. Dybde til berg er vist i tabell 2.2. En mer utfyllende tabell finnes i prosjektoppgaven. Løsmassenen ved påhugg for Hundvåg og Solbakk ble karakterisert som morene, mens ved Lunde og ut mot fjorden ved Hundvåg er løsmassen dominert av sand, stein og grus (Meisterplass, 2014).

Tabell 2.2: Oversikt over dybde til berg ved de utførte grunnboringene for tunneltraséen (Meisterplass, 2014; Norconsult, 2012a,b)

Område; plassering	Dybde til berg
Påhugg Hundvåg; Hundvågtunnelen	2 - 8,5 m
Påhugg Hundvåg; pel 6200 - 6350	0,7 - 5 m
Lunde; pel 6500 - 6600	0,6 - 6,5 m
Lundesneset; pel 7000 - 7300	9 - 51 m
Tau; ca 140 m vest for pel 19500	6,8 m
Solbakk; ca 75-150 m vest for pel 20300	2,5 - 17,4 m
Påhugg Solbakk; pel 20380 - 20430	1 - 7,9 m

Ved Lundesneset er løsmassemektigheten opp mot 51 meter, og er den største målte dybden til berg på land langs tunneltraséen. Dette kan også observeres i figur 2.2.

2.4.2 Grovhullboring

Vegteknisk avdeling for Statens Vegvesen utførte i 2004 grovhullsboring ned til kvote -260 på sørspissen av øya Hidle. Borkakset prøver ble tatt hver 50 meter for mikroskopiering (32x forstørrelse) og kartlegging av bergarter. Bergarten bestod av kvarts- og feltspatrik gneis med en del mørke mineraler, hovedsakelig amfibol og biotitt. Bergarten var tilsynelatende uforandra i hele borehullet, og den antas å kun være en del av Boknafjorddekket. Ingen betydelige vannmengder ble påtruffet under boring (Multiconsult, 2008, revidert 2009; Meisterplass, 2014).

2.4.3 Ingeniørgeologiske kartlegging

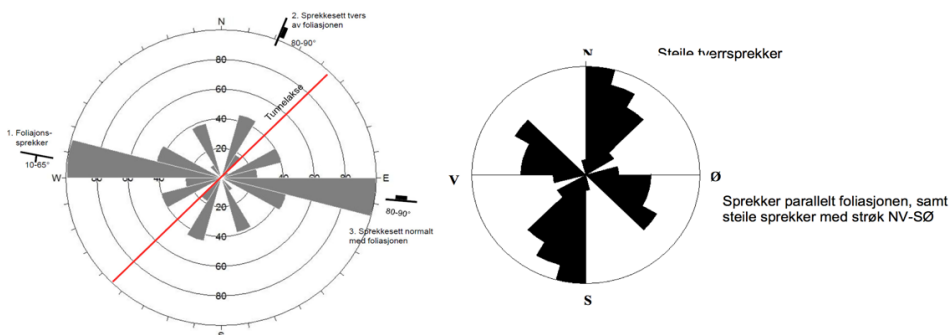
I byggeplanfasen utførte Multiconsult (Multiconsult, 2008, revidert 2009) og Norconsult (Norconsult, 2012a,b) ingeniørgeologisk kartlegging for entreprisene til Ryfylketunnelen. Q-verdi, RMR (rock mass rating), RMI (rock mass index) og sprekkeroser ble produsert på oppdrag fra Statens Vegvesen. Vurderingene ble tatt fra bergblotninger ved Solbakk, Odda, Sandøya og nordsiden av Hundvåg. Spesifikke lokaliteter og observasjonsresultater finnes i prosjektoppgaven og rapportene til Norconsult. Oppsummering av vurderingene er gitt i tabell 2.3 nedenfor.

Tabell 2.3: Ingeniørgeologiske vurderinger av blotninger i Boknafjorddekket ved Hundvåg, Visteflaket ved Sandøy og Odda, og Storheidekket ved Solbakk (Meisterplass, 2014; Norconsult, 2012a,b). Gitte verdier er gjennomsnitt og [endepunkt] fra ingeniørgeologiske vurderingsresultat

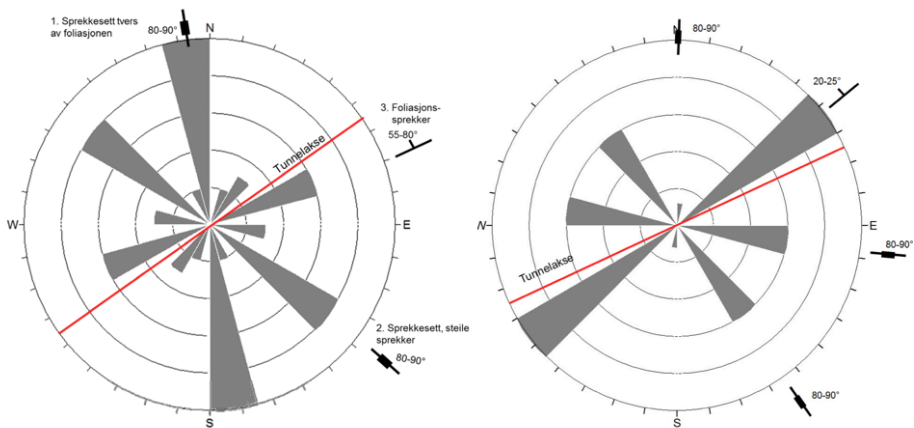
Skyvedekke	Bergarts-karakter	Oppsprekking (sprekker/meter)	RMR	Q-verdi	Vurdering
Boknafjord-dekket	Gneis	8,4 - 14 [3 - 25]	58,9 - 63,2 [40 - 75]	5,6 - 7,6 [0,5 - 20]	Q-verdi: God RMR: Brukbar
Visteflaket	Fyllitt	4,6 - 8,8 [<1 - 15]	74 - 80 [65 - 90]	25,4 - 32,4 [5 - 55]	Q-verdi: God RMR: God
Storhei-dekket	Gråstripet foldet gneis	0,3 - 1,3 [0,05 - 3]	77 - 86 [75 - 90]	33,2 - 47 [11 - 65]	Q-verdi: God - meget god RMR: God - meget god

Merk at registreringene tabell 2.3 bygger på er utført på berg i dagen. Erfaringsmessig er berget i dagen mer motstandsdyktig enn det en møter i dypet. Antatte verdier for bergspenninger ble også anvendt ved utrekning av Q-verdi ved tunnelkote (Norconsult, 2012a,b; Meisterplass, 2014).

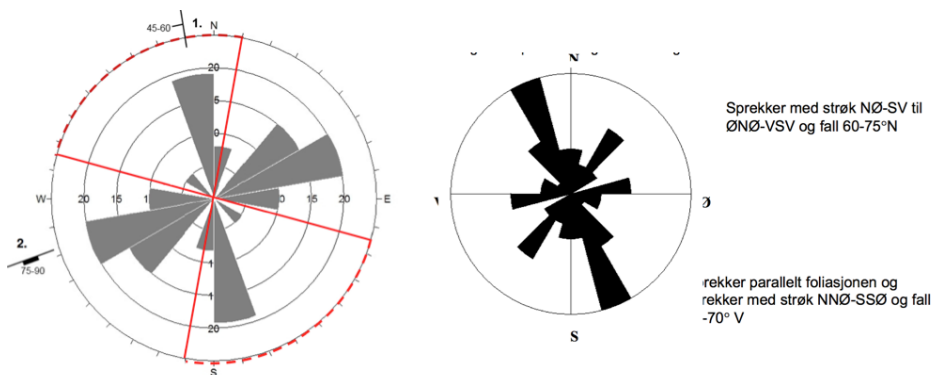
Sprekkeroser i nærområdet ble i 2008 kartlagt av Multiconsult i samband med reguleringsplanen. Senere ble en ny kartlegging utført av Norconsult i samband med anbudsrapportene. Sprekkelogging er subjektivt undersøkelse. Det forekom derfor forskjeller i de produserte sprekkerosene. Dette er spesielt tydelig i sprekkerosene fra Hundvåg i figur 2.6. Sprekkerosene fra forundersøkelsene er gitt i figur 2.6 - 2.8 nedenfor (Norconsult, 2012a,b; Multiconsult, 2008, revidert 2009; Meisterplass, 2014).



Figur 2.6: Sprekkerose fra Boknafjorddekkets gneis ved Hundvåg. Vestre sprekkerose er registrert av Norconsult (Norconsult, 2012b). Høyre sprekkerose er registrert av Multiconsult (Multiconsult, 2008, revidert 2009). Rød strek illustrerer tunnelaksen



Figur 2.7: Sprekkerose fra Sandøy og Odda, og Hidle. Vestre sprekkerose er fra Visteflakets fyllitt ved Sandøy og Odda. Høyre sprekkerose er fra Boknafjorddekkets gneis ved øya Hidle. Rød strek illustrerer tunnelaksen .



Figur 2.8: Sprekkerose fra Storheidekkets gneis ved Solbakk. Vestre sprekkerose er registrert av Norconsult (Norconsult, 2012a). Høyre sprekkerose er registrert av Multiconsult (Multiconsult, 2008, revidert 2009). Rød strek illustrerer tunnelaksen

Det er tre sprekkesett som går igjen. Det første er omtrentlig orientert Ø-V, det andre er N-S og det tredje er NØ-SV (Meisterplass, 2014).

2.5 Seismikk

Kartlegging av svakhetssonene nær Ryfylketunnelen har i hovedsak vært fra akustiske- og refraksjonsseismiske resultat på land og under sjø. Svakhetssoner ble hovedsakelig definert som seismiske lavhastighetssoner hvor lyd hastigheten er lavere enn 4000 m/s. Soner med høyere hastighet kan også defineres som svakhetssoner dersom spesielle tilfeller tilsier dette (Norconsult, 2012a,b).

Seismiske undersøkelser har blitt utført i tre hovedomganger i perioden fra år 2000 - 2012. I perioden fra år 2000 - 2006 utførte GEOMAP undersøkelsene (Geomap, 2005, 2006). Senere ble disse supplert av Geophysix i perioden fra år 2007 - 2009, og med nye undersøkelser sommeren 2012 for anbudsrapporten til entrepriser E03 (Geophysix, 2012). Detaljer om hvor seismikken ble skutt finnes i prosjektoppgaven. Til sammen ble det skutt 32098 meter seismikk hvor 53 svakhetssoner ble registrert over tunneltraséen (Meisterplass, 2014). Fordelingen av seismiske resultat er vist i tabell 2.4 og 2.5 nedenfor.

Tabell 2.4: Fordeling målt seismisk hastighet under sjø over tunneltraséen (Norconsult, 2012a,b)

Under sjø	Kistesundet		Horgefjorden		Hidlefjorden	
	#meter	Prosent	#meter	Prosent	#meter	Prosent
>5500 m/s	1015	40 %	1883	32 %	6130	29,8 %
5000 - 5500 m/s	561	22 %	1999	33 %	10082	49,0 %
4500 - 5000 m/s	399	15 %	1172	20 %	2113	10,3 %
4000 - 4500 m/s	324	13 %	278	5 %	1052	5,1 %
3500 - 4000 m/s	182	7 %	223	4 %	552	2,7 %
3000 - 3500 m/s	58	2 %	310	5 %	536	2,6 %
<3000 m/s	15	1 %	82	1 %	107	0,5 %
SUM	2553	100 %	5947	100 %	20572	100,0 %

Tabell 2.5: Fordeling av målt seismisk hastighet på land over tunneltraséen (Norconsult, 2012a,b)

På land	Solbakk og Tau		Lundsneser og Hundvåg	
	#meter	Prosent	#meter	Prosent
>5500 m/s	183	21,0 %	286	12 %
5000 - 5500 m/s	556	63,9 %	479	22 %
4500 - 5000 m/s	84	9,7 %	846	40 %
4000 - 4500 m/s	15	1,7 %	114	5 %
3500 - 4000 m/s	18	2,1 %	197	9 %
3000 - 3500 m/s	5	0,6 %	21	1 %
<3000 m/s	9	1,0 %	230	11 %
SUM	870	100 %	2155	100 %

Fra tabell 2.4 og 2.5 kan en se at omtrent 8 % av berget kan klassifiseres som svakhetssoner. Konsentrasjonen på land er naturligvis høyere, da en i større grad kan observere

svakhetssoner i naturen og seismiske målinger er orientert deretter. En ser også at Hidlefjorden har noe bedre resultat enn Kistesundet og Horgefjorden. Horgefjorden gir dårligst seismiske resultater (Meisterplass, 2014; Norconsult, 2012a,b). En må merke seg at fordelingen i tabell 2.4 og 2.5 bare gir den seismiske fordelingen. En må studere soneplasingene i vedlegg 1 og 2 for naturen og utbredelsen til de enkelte svakhetssonen, samt sonefrekvensen over tunneltraséen for å oppnå tilfredsstillende innsikt over svakhetssonenes innvirkning på tunnelen.

2.6 Ingeniørgeologiske forhold

Ingeniørgeologiske forhold for et undergrunnsprosjekt vil alltid ha en viss usikkerhet knyttet til seg. Dette gjelder spesielt dersom det er en undersjøisk tunnel, hvor kontakt med bergoverflaten er begrenset. Kvalifiserte tolkninger av forholdene blir gjort på grunnlag av forundersøkelser, befaringer, flyfoto, geologiske og topografiske kart.

Et ingeniørgeologisk profil langs Ryfylketunnelen ble produsert til anbudsrapporten, og er vedlagt som vedlegg 1 og 2 (Norconsult, 2012a,b). Tolkning av svakhetssoner og lineament ble også lagt inn i profilene. I tabell 2.6 er detaljene til disse sonene oppgitt.

Det ble funnet svakhetssoner med seismisk hastighet helt ned til 2200 m/s og flere soner med seismisk hastighet på 2500 m/s. Majoriteten av disse områdene finner en i sone nr. 20 - 22 og sone nr. 28c - 29b i tabell 2.6. Felles for de er at de ligger nær bergartsgrenser. Mektighetene på svakhetssonene ligger generelt innenfor 10 - 70 meter. Sone nr. 14 med høy seismisk hastighet er definert som svakhetszone da den har en mektighet på 150 meter (Meisterplass, 2014).

Tabell 2.6: Seismiske lavhastighetssoner som krysser traséen til Ryfylketunnelen Norconsult (2012a) Norconsult (2012b). 'a' er soner tolket fra lineamentskart. Sonene plassering er visualisert på Norconsults lengdeprofil i vedlegg 1 og 2

Sone nr.	Pel nr.	Bergoverdekning [m]	Løsmasseoverdekning [m]	Sjødyb [m]	Bergart	Seismisk hastighet [m/s]	Sonebredde [m]
1	20175	75	0	0	Gneis	-	10
2	20025	85	0	0	Gneis	-	10
3	19965	95	0	0	Gneis	-	5
4	19870	105	0	0	Gneis	-	5
5	19705	85	0	0	Gneis	-	5
6	10240	115	0	5	Gneis	3700	10
6b	18150	80	40	0	Gneis	3000	>25
7	17840	115	15	40	Gneis	4200	35
8	17430	70	50	80	Gneis	3500	20
9	17350	80	50	80	Gneis	2500-3200	35
10	17100	85	55	80	Gneis	4200	30
11	16660	65	110	80	Gneis	3700-4600	25
12	16380	65	110	100	Gneis	3200-3700	80
13	16250	70	95	110	Gneis	3500	70
14	15620	70	50	160	Gneis	4000-4200	150
15	15140	70	20	180	Gneis	3500	70
16	15075	70	20	180	Gneis	4000	20
17	14950	70	20	175	Gneis	3800	10
18	14405	80	5	175	Gneis	2600-3200	15
19	14285	80	15	165	Gneis	3200	15
20	14140	70	20	160	Gneis	2200-3300	20
21	14015	75	30	150	Gneis	2400-4000	20
22	13970	75	25	155	Gneis	2400-3500	10
23	13940	75	25	155	Gneis	3800	20
24	11970	170	0	45	Gneis	4000	7
25	11610	120	15	65	Gneis	4000	50
25b	11270	140	0	60	Gneis	3600	10
25c	11040	110	15	60	Gneis	3700	20
26	10900	125	10	60	Gneis	3400	10
27	10815	120	10	70	Gneis	3700	30
27b	10590	90	30	65	Gneis	3400	15
28	10480	95	10	70	Fyllitt	3200	15
28b	10350	80	30	75	Fyllitt	3500	30
28c	10140	53	40	80	Fyllitt	2500	15
29	10150	53	30	95	Fyllitt	2500	35
29b	10125	53	20	100	Fyllitt	2500	35
30	9925	65	20	90	Fyllitt	3200	10
31	9845	60	25	90	Fyllitt	2900	40
32	9680	65	15	85	Fyllitt	3000	30
32b	9660	75	10	80	Fyllitt	a	<5
32c	9285	145	10	0	Fyllitt	a	5
32d	9175	145	5	0	Fyllitt	a	5-10
33	9085	135	15	10	Fyllitt	3100	15
33b	9070	130	10	10	Fyllitt	a	<5
33c	9020	130	10	5	Fyllitt	a	5
34	8750	130	25	5	Fyllitt	3900	30
34b	8425	130	0	0	Fyllitt	3500	40
34c	8315	130	0	0	Fyllitt	a	5
34d	8215	125	0	0	Fyllitt	a	5-15
34e	8095	125	0	0	Fyllitt	a	5
34f	8065	100	0	0	Fyllitt	a	<5
34g	8025	110	5	5	Fyllitt	a	5-10
35	7960	90	10	15	Fyllitt	4000	10
35b	-	90	-	-	Fyllitt	3000	10

36	7780	52	30	30	Gneis	3700	15
37	7445	52	20	15	Gneis	3500	30
38	7395	52	20	10	Gneis	3900	25
39	7320	45	25	5	Gneis	3900	40
40	7300	42	0	0	Gneis	3000	14
41	7170	30	30	0	Gneis	3600	25
42	7095	22	50	0	Gneis	2500	70
43	6490	22	5	0	Gneis	3700	10
44	6290	20	0	0	Gneis	a	<5
45	6240	9	0	0	Gneis	4300	<5

Kapittel 3

Erfaringsdata fra vannlekkasjer i undersjøiske tunneler

Vannlekkasje i berg, for bergrom under land og under vann, er et lite utviklet fagfelt hvor det rår stor usikkerhet. Blant fagfolk og mellom ny og gammel litteratur vil en finne mange forskjellige meninger om hva som gir vannlekkasje og hvordan det forekommer. En tendens til enighet om hvordan vannlekkasje forekommer har oppstått i nyere tid, men det er fremdeles svært vanskelig å forutse vannlekkasjer i bergrom.



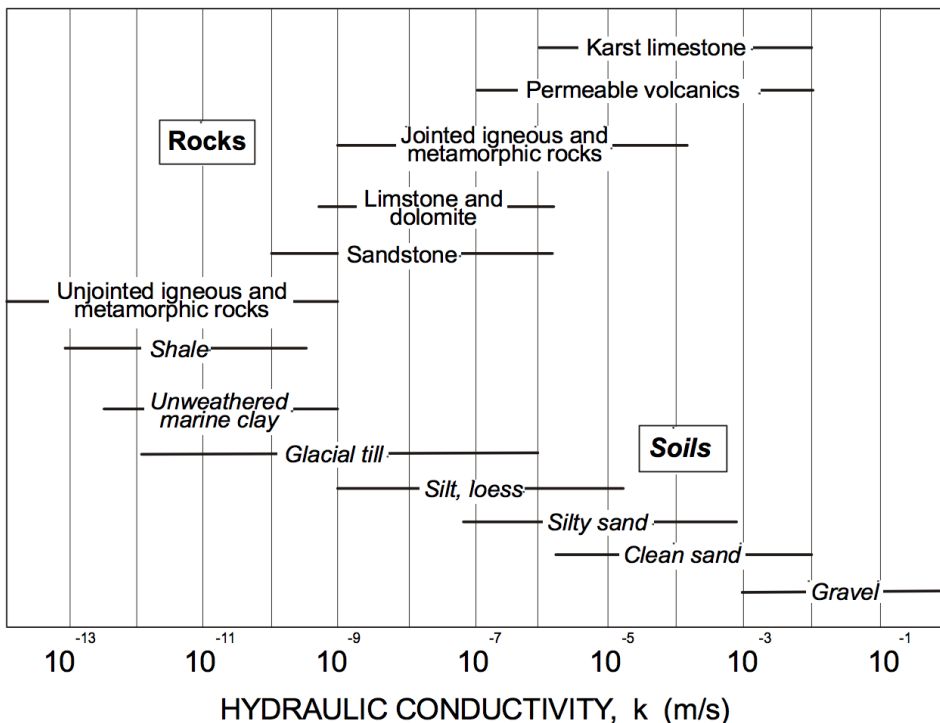
Figur 3.1: Vannets livsløp i bakken (Holmøy, 2008)

3.1 Generelle oppfatninger angående vannlekkasjer

3.1.1 Geologi

Norsk bergart er fersk, ofte ugjennomtrengelig og med et tynt lag av forvitret material på toppen. Dette er et resultat av metamorfisk omvandling under den kaledonsk fjellkjededannelse som skapte velutviklede bergarter. Senere skrapte isbreene bort de forvittra og/eller svake materialene, for å la de motstandsdyktige bergartene stå igjen (Dahn et al., 2008). De vannførende egenskapene til norsk berg er derfor ofte relatert til oppsprekking i berget. Klüver og Kveen kategoriserte i år 2000 norske bergmasser inn i fire kategorier med hensyn på vannledningsevne. Essensen av kategoriseringen er hvordan norsk bergart reagerer på deformasjon og om mineralene i berget danner sprekkebelegg. Ved deformasjon vil ofte en stiv og hard bergart være mer mottagelig for oppsprekking enn en mykere bergart. Eksempelvis den harde gneisen mot den myke fyllitten en møter i Ryfylketunnelen. De fire bergartskategoriene er gitt i følgende liste (Klüver and Kveen, 2004):

- **Bergartstype A:** Bergmassen med åpne sprekker uten vesentlig sprekkebelegg. Her nevnes sandsteiner, kvartsitter, granitter, osv.. Konduktiviteten er gjennomgående høy.
- **Bergartstype B:** Bergmasser med sprekkefylling i sprekkeene, og typisk med tendens til kanaldannelse. Her nevnes prekambriske gneiser og andre tilsvarende metamorfe bergarter. Leirinnholdet er i stor grad avhengig av tilstedeværelsen til feltspat, spesielt alkaliefeltspat. Bergmassen utgjør majoriteten av norsk berggrunn og anses som middels- til høykonduktiv.
- **Bergartstype C:** Tette og plastiske bergarter, hvor det er høy grad av sprekkefylling og små kanaler i tynne sprekker. Her nevnes fyllitt, andre skifertyper og grønnstein. Lav konduktivitet er ofte tilfelle men det dannes små kanaler i varierende antall, som fører til små men mange lekkasjer.
- **Bergartstype D:** Bergmasser med karstfenomen eller tektonisk påvirkning som fører til ekstremt åpen oppsprekking og/eller åpne bergrom som igjen gir ekstremt høy konduktivitet. Her nevnes spesielt kalkstein.



Figur 3.2: Generell konduktiviteten til de forskjellige bergartene (Freeze and Cherry, 1979)

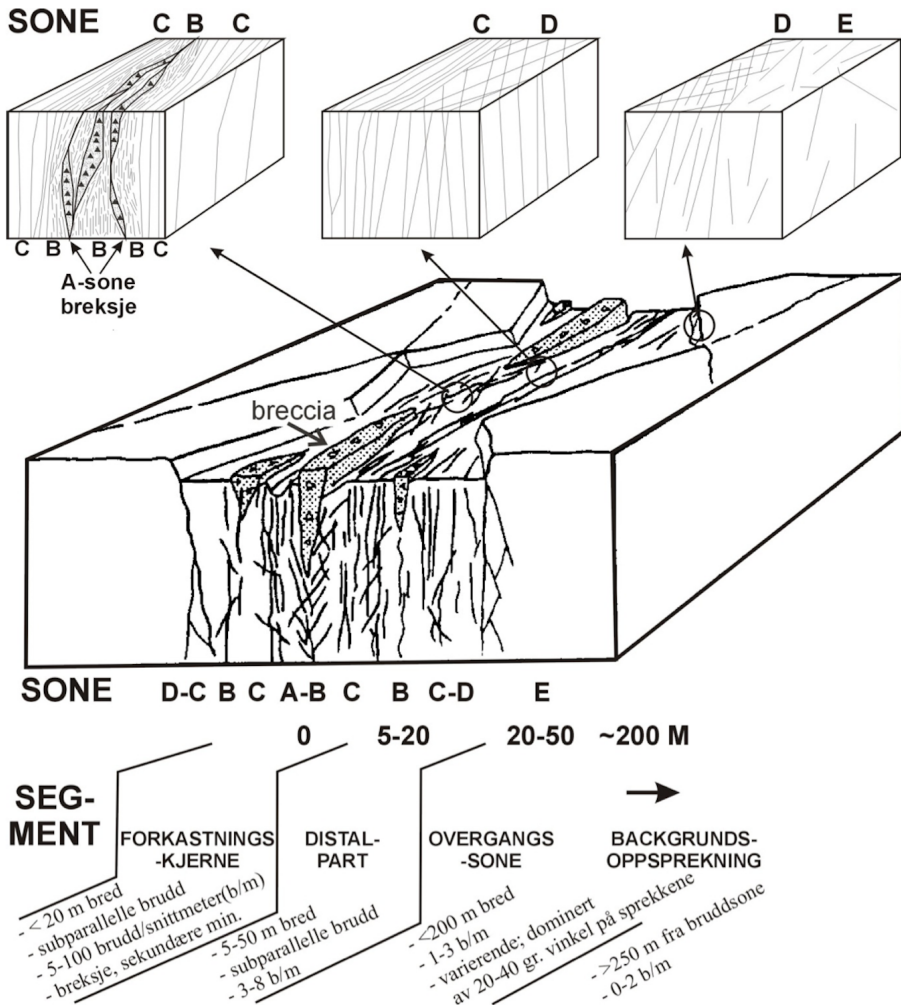
Figur 3.2 viser en allmenn godtatt generalisering for hvilke hydrauliske konduktiviteter en kan forvente av de forskjellige bergartene. Kristin Holmøy fant i sitt studie en svak sammenheng mellom Q-verdi til berg og vannlekkasje. Bergmasse med Q-verdi mellom 0,6 - 15 opplevde størst vannlekkasje. Dersom bergmassen ble dårligere og Q-verdien var lavere enn 0,1 opplevde en forminsknet vannlekkasje (Holmøy, 2008).

En opplevde også større vannlekkasje ved bergartsgrenser, hvor markerte grenser gav større risiko for lekkasje enn flytende overganger mellom bergartsgrenser. Ved bergartsgrenser, spesielt dersom det er forkastingsgrenser, har bergarten opplevd store spenningen som ofte resulterer i vannførende sprekkedannelse (Holmøy, 2008).

3.1.2 Strukturgeologiske forhold

Svakhetssoner er den geologiske strukturen som skaper flest utfordringer for tunneler og underjordsanlegg, men erfaring har vist at selve sonen gir lite vannlekkasje dersom sonen er rekrystallisert. Som nevnt tidligere har dårlig berg med lav Q-verdi vist en tendens til lav vannføring. Dette er et resultat av velutviklet nedknusing og kjemiske omdannelse som gir høyt leirinnhold og lav permeabilitet. Med hensyn på dette forkastes den logiske anta-

gelsen om at svakhetssoner og forkastinger naturligvis gir vannlekkasje. I stede forventes det vannlekkasje i de gjennomgående, leirfrie sprekkenes som ofte dannes i overgangen mellom friskt berg og oppknuste soner (Nilsen and Palmström, 2001; Klüver and Kveen, 2004). Denne sonen er illustrert som C-sonen i figur 3.3.



Figur 3.3: Typisk struktur og sprekkedannelse til forkastings- og knusningssoner i norsk berg (Braathen and Gabrielsen, 2000). Figuren er rediger av Kristin Holmøy for bruk i doktorgradsavhandlingen hennes (Holmøy, 2008)

Figur 3.3 gir et godt bilde av generell oppsprekking til berg rundt forkastings- eller knusningssoner. Oppsprekkingen kan deles inn i fem forskjellige soner; A-, B-, C-, D-, og E-sonen. Her er A- og B-sonen kjernen av sonen. I norsk bergart er A- og B-sonen ofte

velutviklet; det vil si rekrystallisert og relativt tett. C-sonen er overgangen mellom kjerne og den distale, friskere bergmassen. Denne sonen har ofte parallelle, gjennomgående sprekker som er antatt å gi høyest vannlekkasje. D-sonen består av to sprekkesystem orientert ca. 60° på hverandre med mindre kontinuitet enn hva en opplever i C-sonen. E-sonen er overgangssonen til helt frisk sidebergart og mindre påvirket av deformasjonene (Braathen and Gabrielsen, 2000).

Dersom en har en slik sone med slakt fall vil en kunne forvente høyere vannstrøm i sideberget over den tette sonen, og mindre under. Denne siden betegnes som den distale siden. Strekksprekker orientert omtrent 45° på hovedsonen har vist seg å være åpne, gjennomgående og vannførende (Klüver and Kveen, 2004).

Hvordan fjordene ligger er henger ofte sammen med hvordan de svake lagene i berget er orientert. Ofte vil en finne de største svakhetssonene i grunnfjellet sammen med den dypeste delen av fjorden. Dette er også ofte et kritisk område i utsprenningen av tunnelen (Nilsen and Palmström, 2001).

Forkastingsplan er et resultat av en strukturgeologiske hendelse hvor friksjonen mellom bergmassene danner en knusningssone mellom seg. Disse sonene oppfører seg tilsvarende som svakhetssoner innad i bergmasser, men har ofte større helning. Dette gir en høyere vannføring i berget over sonen og fare for vannlekkasje er til stede (Meisterplass, 2014). Bergartsgrensen mellom fyllitten og gneisen er mellom en myk og hard bergart, som gir en økt risiko for vannlekkasjer Klüver and Kveen (2004).

3.1.3 Sprekker

Som nevnt er norsk bergart ofte impermeabel, hvor vann beveger seg mellom sprekker. Konduktiviteten til bergmassen er derfor avhengig av naturen til sprekke. Avgjørende faktorer er sprekkintensitet og kontinuitet, sprekkform, konsistensen av småfragmenter i sprekke og spenningstilstanden på sprekke. Som illustrert i figur 3.3 vil en knusningssone resultere i et mangfold av sprekker, hvor egenskapene og konduktiviteten varierer. Forskjellige bergarter vil også gi forskjellige egenskaper til sprekke. Hvorvidt sprekke er i kontakt med hverandre er essensielt for vannledningsevnen. Eksempelvis vil sprekkesystemer med få, men lange og gjennomgående sprekker ofte ha høyere konduktivitet enn sprekkesystemer med mange, men korte sprekker (Braathen and Gabrielsen, 2000).

Erfaringsmessig vil en oppleve større vannføring i sprekker med brattere fall enn $50-55^\circ$. Sprekkesystem påvirket av lavere spenninger og uten leirinnhold vil også ha vannføringspotensial. Sprekke parallelt med tunnelen vil ofte gi utfordrende forhold, hvor tverrsprekker er enklere å sikre mot (Nilsen and Palmström, 2001; Klüver and Kveen, 2004)

3.1.4 Spenningstilstand og overdekning

Det er naturlig å anta at konduktiviteten til berg og sprekker avtar med dypet da bergspenningene øker og tillater mindre rom for vannføring, og at en ved stor overdekning vil møte

tette, ikke-vannførende sprekker (Nilsen, 2014-2015; Klüver and Kveen, 2004). Dette var en av hypotesene i doktorgradsavhandlingen til Dr. Holmøy, men det var ikke funnet en signifikant sammenheng (Holmøy, 2008).

Det var derimot funnet en sammenheng mellom sprekkeorienteringen, hovedspenningsretning og evnen til å lede vann. Det er sannsynlig å forvente høyere vannføring i sprekker og svakhetssoner orientert tilnærmet ($\pm 30^\circ$) parallell med største hovedspenning (Holmøy, 2008). Undersjøiske tunneler i Norge er ofte relativt grunne berganlegg hvor den horisontale spenningen vil være dominerende, med en liten vertikal spenning. En kan også oppleve store variasjoner over små avstander på grunn av topografiske spenningspåvirkninger til fjord- og fjellandskapet (Klüver and Kveen, 2004).

3.1.5 Løsmassedekke

Det rår uenighet om hvorvidt løsmassedekket påvirker vannlekkasje i underliggende bergmasse. Statens Vegvesens handbok N104 (Klüver and Kveen, 2004) argumenterer for at impermeabel løsmasse forebygger mot innlekkasjer i bergmassen under, mens Holmøy's doktorgradsavhandling ikke fant noen sammenheng som støtter dette (Holmøy, 2008).

3.2 Forhold av spesiell betydning for innlekkasje i Ryfylketunnelen

Dette delkapittelet presenterer konklusjonen til prosjektoppgaven som masteroppgaven bygger på. Ved å vurdere erfaringsdata fra relevante undersjøiske tunneler ble en rekke ingeniørgeologiske forhold av spesiell betydning for vannlekkasje i Ryfylketunnelen presentert. En kan forvente tilsvarende lik oppførsel av berg i sammenlignbar bergmasse for sammenlignbare bergprosjekt. De sammenlignbare tunnelen er presentert i tabell 3.1, hvor begrunnelse for valg er beskrevet under 'Ingeniørgeologiske forhold'. For en mer detaljert utgreiing av tunnelene henvises leseren til prosjektoppgaven.

Tabell 3.1: Tabellen viser hvilke tunnelprosjekt som ble vurdert til å være ingeniørgeologisk sammenlignbare og relevante for Ryfylketunnelen i prosjektoppgaven (Meisterplass, 2014)

Relevante prosjekt	Ingeniørgeologiske forhold	Problemsoner
Mastrafjordtunnelen	<ul style="list-style-type: none"> - Går gjennom Boknafjorddekkets gneis. - Ligger svært nærme Ryfylketunnelen. - Er en undersjøisk tunnel. 	Ingen vannlekkasje som krevde injisering. Lekkasjen størst i NØ-SV-orienterte sprekker. Mesteparten av lekkasjen fant sted i overgangen mellom glimmerskifer og gneis
Byfjordtunnelen	<ul style="list-style-type: none"> - Går gjennom fyllitten fra Visteflaket - Går gjennom Boknafjorddekkets gneis. - Ligger svært nærme Ryfylketunnelen. - Er en undersjøisk tunnel. - Går dypt (-223 m) 	Bergartsgrensen mellom harde og svake bergarter gav lekkasje som krevde injisering. Vannlekkasjen var størst i Ø-V-orienterte sprekker. Seismiske hastighet her var målt til 3700 m/s og 2600 m/s.
Finnøy-tunnelen	<ul style="list-style-type: none"> - Går gjennom Byfjorddekkets gneis. - Ligger svært nærme Ryfylketunnelen. - Er en undersjøisk tunnel. - Går dypt (-200) 	Det oppstod vannlekkasje i gneisen under Hanasand som krevde omfattende injeksjonsarbeid. Lekkasjen oppstod i gjennomgående sprekker nær svakhetssoner
IVAR avløpstunnel	<ul style="list-style-type: none"> - Går gjennom fyllitten fra Visteflaket. - Ligger svært nærme Ryfylketunnelen. - Er en undersjøisk tunnel. 	Lekkasje oppstod nær en skyvesone og med lav overdekning i fyllitten. To ubetydelige lekkasjer i Ø-V-orienterte sprekker oppsto lenger inne på land
T-forbindelsen	<ul style="list-style-type: none"> - Går gjennom fyllitt og gneis. - Ligger nærme Ryfylketunnelen. - Er en undersjøisk tunnel. 	Steil og oppsprukket svakhetssone i gneis gav betydelig vannlekkasje. Sonen hadde ikke løsmassedekke og ikke noe leirebelegg.
Statpipe-tunnelen	<ul style="list-style-type: none"> - Går gjennom fyllitt og gneis. - Ligger nærme Ryfylketunnelen. - Er en undersjøisk tunnel. 	Opplevde lekkasje som krevde injisering i både fyllitt og gneis. Bergkvaliteten var dårlig for store deler av traséen.
Sauda vannkraftverk	<ul style="list-style-type: none"> - Går gjennom grunnfjellsbergart - Går gjennom fyllitt - Ligger relativt nærme Ryfylketunnelen 	Grunnfjellet har vannførende spaltsprekker. Sprekkene var gjennomgående og tolket som overgangssonen til en stor forkasting
Atlantehavstunnelen	<ul style="list-style-type: none"> - Går gjennom gneis. - Er en undersjøisk tunnel. - Går dypt (-250 m) 	Svært oppknuet og vannmetta knusningsone i ytterkanten av en svakhetssone, med lav bergoverdekning og fullt vanntrykk.
Bjørøy-tunnelen	<ul style="list-style-type: none"> - Går gjennom gneis. - Er en undersjøisk tunnel. 	Svært oppsprukket og vannførende gneis førte til hyppige lekkasjer og systematisk injeksjon. Et stort sprekkesett fylt med sand og kontakt med overflaten gav store problem

Tunnelene i tabell 3.1 opplevde forskjellige typer vannlekkasje, hvor de største vannlek-

kasjene er beskrevet i tabell 3.2. Av tabell 3.2 ser en at flesteparten av lekkasjene fremkom i sammenheng med svakhetssoner. Disse lekkasjesonene er kort beskrevet i tabell 3.1. En kan også notere seg at gneis er bergarten som har gitt flest lekkasjeproblemer.

Tabell 3.2: Detaljer fra de største vannlekkasjene i de sammenlignbare tunnelen til Ryfylketunnelen (Meisterplass, 2014).

a) = detaljert informasjon var ikke funnet

Tunnel	Bergart	Lokalisert største lekkasje	Maks innlekkasje per sonderingsborehull.	Utført injeksjon	Løsmasse dekke
Mastrafjord	Boknafjord gneis	NV-SØ sprekkese	a) Liten innlekkasje	Ikke utført	a)
Byfjord	Boknafjord gneis og kvartsitt	Bergartsgrense	101 l/min	42 tonn injisert	3-12 m Morene
Finnøy	Boknafjord gneis med amfibolitt	Sprekkesoner nær svakhetssoner	165 l/min	70 injeksjonsrunder	0-12 m Kompakt morene
IVAR avløp	Visteflaket's fyllitt	Nær skyvesone med liten overdekning	50-60 l/min	Betydlig injisering	0
T-forbindelsen	Gneis	Svakhetszone	Stor innlekkasje	Fire injeksjonsrunder	0
Karmsund	Fyllitt	Svakhetszone	300 l/min	32 tonn injisert	5-10 m
Førdefjord	Gneis	Sprekkesoner nær svakhetssoner	a) Stor innlekkasje	injisert	5-20 m
Førlandsfjord	Gneis	Sprekkesoner nær svakhetssoner	a) Middels innlekkasje	injisert	10-30 m
Sauda vannkraft	Gneis	Sprekkesoner	>300 l/min	Betydlig injisering	0 m
Bjørøy	Gneis	Tensjonssprekk	4-500 l/min	Betydlig injisering	Permeabel løsmasse
Atlantehav	Gneis	Overgang til svakhetszone	500 l/min	Betydlig injisering	Permeabel løsmasse

3.2.1 Geologi

Ryfylketunnelen vil gå gjennom bergartene som dominerer Visteflaket, Storheidekket og Boknafjorddekket. Disse er beskrevet i kapittel 2 og i tabell 2.1 som kaledonske skyvedekker av fyllitt og gneis, respektivt (Norconsult, 2012a,b).

Gneisen i nærområdet har vist tendens til gjennomgående oppsprekking som har ført til lekkasje. Tilstedeværelsen av sprekkbelegg har vært en avgjørende faktor for permeabiliteten til gneisen, hvor tilstedeværelsen har resultert i tørr bergmasse (Meisterplass, 2014).

Fyllitten i nærområdet har gitt vedvarende små lekkasjer langs hele tunneltraséen, men få større lekkasjer som krevde injisering. De store lekkasjene i fyllitt har vært til stede ved liten overdekning eller ved bergartsgrenser. Tilstedeværelsen til kvartsittbenker i fyllitten har gitt stedvis høy vannlekkasje (Meisterplass, 2014).

Erfaringer fra sammenlignbare undergrunnsanlegg er at potensialet for store, konsentrerte vannlekkasjer er størst i gneisen, mens fyllitten opplevde en liten og jevn sig av vann over

hele traséen. Gjennomgående og vannførende sprekkesystem er vanligere i gneisen i området, og en antar derfor at gneisen vil gi de største lekkasjeproblerne (Meisterplass, 2014).

Erfaringsdata i prosjektoppgaven fra T-forbindelsen (Finnøytunnelen, Førdefjordstunnelen og Førlandsfjordtunnelen) fant vannlekkasje i berg med relativt god bergmasse (Q-verdi; 1 - 20). Dette underbygget Dr. Holmøys funn om at bergmasse med Q-verdi mellom 0,6 - 15 gir høyere vannlekkasje. Det kan derfor forventes tilsvarende forhold i Ryfylketunnelen (Meisterplass, 2014).

3.2.2 Svakhetssoner (Strukturgeologiske forhold)

For Ryfylketunnelen ble det i prosjektoppgaven konkludert med at svakhetssoner i gneisen er de ingeniørgeologiske forholdene som gav størst risiko for vannlekkasje. Mer presist så er det overgangen mellom friskt berg og svakhetssoner som ble vurdert som største faresonen, der sprekkesystemer har høy frekvens, lite leirbelegg og kontinuitet. Dette kan en observere fra tabell 3.2 (Meisterplass, 2014).

I fylltitten er det opplevd mindre vannlekkasjer i berggrunnsanlegg rundt Ryfylketunnelen. Lav overdekning og bergartsgrenser har hatt en tydeligere tendens til å gi vannlekkasje for fylltittisk berg. Med bergartsgrenser nevnes overgangen til kvartsittsoner som spesielt utsatte. En forventer derfor at driving gjennom svakhetssoner i Visteflakets fylltitt vil gi få vannlekkasjer (Meisterplass, 2014).

Bergartsskille har også vist tendens til å gi vannlekkasje. Spesielt dersom det er en tydelig grense mellom bergartene. Fall på grensene, og svakhetssonene, har vist tendens til forhøyende vannføring i distal side av sonen (Meisterplass, 2014).

3.2.3 Oppsprekking og spenningsbilde

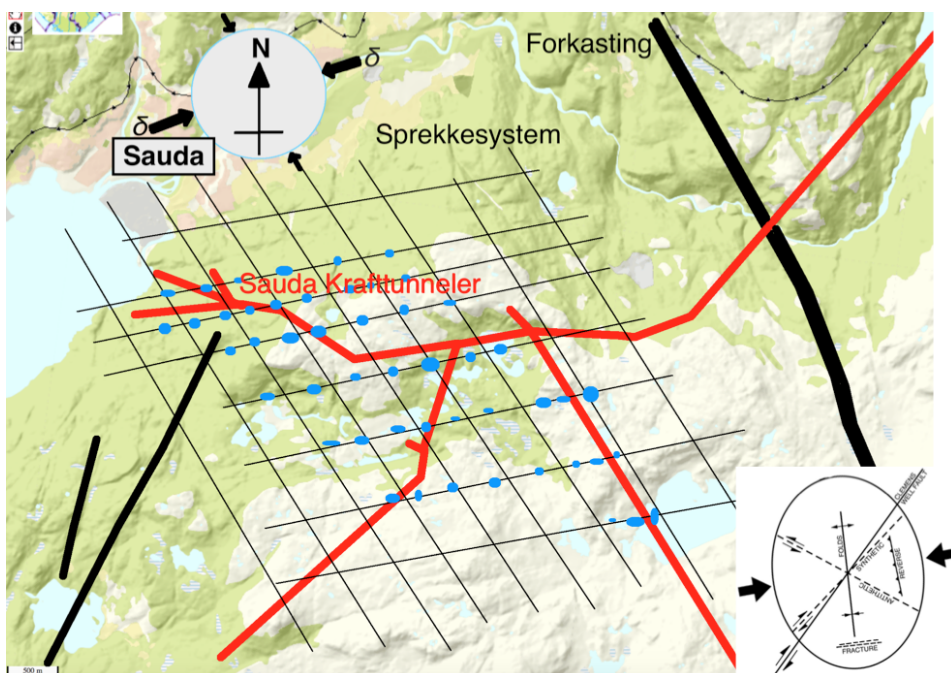
Sprekkesystemene har vært den harde bergmassens hovedleder for vann i nærliggende tunneler, mens for de mykere bergartene har sprekkesystemet ofte vært tette. En har opplevd størst lekkasje i Ø-V orienterte sprekker, som en ser av tabell 3.3 (Meisterplass, 2014).

Få spenningsmålinger er utført i nærområdet, og med stor usikkerhet knyttet til seg. Det ble likevel konkludert med at hovedspenningsretningen er omtrent Ø-V, men potensial for variasjon (Meisterplass, 2014).

Sammenhengen mellom orienteringen til vannførende sprekker og hovedspenningen er vist i tabell 3.3 under. En ser en klar trend til lav vinkel mellom de to.

Tabell 3.3: Hvilke orientering hovedspenningen og tunnelen har på de vannførende sprekke i de relevante tunnelene fra prosjektoppgaven. For de tunnelene der det ikke er gjort spenningsmåling er SINTEF reginalspenningskart eller nære prosjekter med spenningsmålinger brukt (Meisterplass, 2014)

Tunnel	Bergart	Vannførende sprekkeorientering	Tunnel orientering	Forholdet mellom tunnel og sprekke	Hovedspenning -orientering	Forhold sprekke og spenning	Beskrivelse
Mastrafjord	Gneis	NV-SØ	NØ-SV	90°	~ Ø-V	45°	Sprekkesone nær svakhetszone
Byfjord	Fyllitt	Ø-V	NØ-SV	45°	~ Ø-V	0°	Jevn lekkasje
Byfjord	Gneis	Ø-V	NØ-SV	45°	~ Ø-V	0°	Bergartsgrense - kvartsitt -fyllitt
Finnøy	Gneis	~ SØ-NV	Ø-V	45°	N100°Ø	35°	Sprekkesone uavhengig og nær svakhetszone
IVAR	Fyllitt	-	NV-SØ	-	(NØ-SV) ?	-	Nær bergartsovergang og skyvesone. Liten overdekning
T-forbindelsen	Gneis	-	Ø-V	-	N-S	-	Svakhetszone
Statpipe	Grønnstein	NØ-SV	Ø-V	45°	N-S	45°	Sprekkesett
Statpipe	Fyllitt	NØ-SV til NV-SØ	Ø-V	45° - 90°	N-S	0° - 45°	Sprekkesett, svakhetssoner og bergartsgrense
Statpipe	Gneis	N-S til NNV-SSØ	Ø-V	67,5° - 90°	N-S	0° - 22,5°	Sprekkesone nær svakhetszone
Sauda	Gneis	ØNØ-VSV	-	-	Ø-V	0° - 22,5°	Sprekkesystem
Atlantehav	Gneis	Ø-V	N-S	90°	N-S	90°	Knust grense til svakhetszone med fullt vanntrykk
Bjørøy	Gneis	NNV-SSØ	N-S	0° - 22,5°	VNV-ØSØ	45°	Opne, sandfylte sprekkesone



Figur 3.4: Illustrering av sprekesystem som ble skapt av en forkasting ved Sauda Vannkraftverk. Tykke svarte streker er forkastinger. Tynne svarte streker er sprekesystem. Blå prikker illustrerer hvilke sprekesystem som gav vannlekkasje. Røde streker er tunnelsystemet til Sauda Vannkraftverk (Meisterplass, 2014). Spenningsellipsen nede til venstre illustrerer generell reaksjon for berg utsatt for spenning (Law et al., 2001)

i figur 3.4 ser en hvordan sprekkesystemet ved Sauda vannkraftverk bredde seg ut i grunnberget. Sprekkesystemet orientert ØNØ-VSV gav store vannlekkasjer. Disse sprekkenene ligger nær parallelt med hovedspenningen (Storkås et al., 2006). Spenningsellipsoiden nede til høyre i figur 3.4 er en generell tolkning av hvordan bergmasse reagerer på spenninger (Law et al., 2001). Fra denne ser en at en kan forvente åpne sprekker parallelt med hovedspenningen.

3.2.4 Løsmassedekket

Fra ingeniørgeologisk sammenlignbare tunneler fantes en trend som tilsa at impermeabelt morenedekket av betydelig størrelse har fungerer som forminskende for vannlekkasjer i nærrområde til Ryfylketunnelen (Meisterplass, 2014).

3.2.5 Overdekning

Det ble ikke funnet noen sammenheng mellom overdekning og vannlekkasje, da tunneltraséen har jevn overdekning. Det ble derimot funnet en sammenheng mellom topografi og lekkasje, hvor vannlekkasjens plassering viste en trend til å oppstå i den slakeste bakken ned mot dyprennen (Meisterplass, 2014).

3.3 Høyt vanntrykk

Ryfylketunnelen vil bli verdens dypeste vegtunnel når den er ferdig og vil møte helt spesielle ingeniørgeologiske forhold. Blant disse er muligheten for høyt vanntrykk, hvor maksimalt vanntrykk kan nå 29,2 bar (292 meter vannsøyle).

For å injisere mot vannlekkasje er det nødvendig at injiseringstrykket er høyere enn vanntrykket. Det krever en viss standard av injeksjonsrigger og en tilstrekkelig god bergmasse. Siden moderne utstyr tilfredsstiller kravene som måtte oppstå er den lokale bergkvaliteten den avgjørende faktor (Klüver and Kveen, 2004). For en tilfredsstillende injisering burde injiseringstrykket være 50 bar høyere enn statisk vanntrykk (Garshol, 2001).

Det skal ikke være noe problem å utføre en suksessfull injeksjonsprosess mot 20-30 bar vanntrykk med moderne utstyr. Normale injiseringsrigger i dag har kapasitet til å påføre opp til 100 bars trykk dersom nødvendig (Blindheim et al., 2005). I Eiksundtunnelen, hvor en hadde potensielt vanntrykk på 29 bar, var ikke vanntrykket vurdert til å være et stort problem for drivingen (Árnason, 2008).

Det er derfor bergmassens kvalitet som ofte er avgjørende for om injiseringen er suksessfull. Dersom en har ustabile grunnforhold vil det gjøre injiseringen vanskelig. Dårlige bergmasser kan være knyttet til svakhetssoner, markerte bergartsgrenser, forkastinger, o.l. (Nilsen and Palmström, 2001). Sonderboring er derfor et krav i undersjøiske tunneler for å

ha muligheten til å fullføre en suksessfull injeksjon av problemsoner dersom det er nødvendig (Vegvesen, 2010). Mange anser sonderboring i undersjøiske tunneler som det viktigste elementet for sikkerhet (Árnason, 2008).

3.4 Ekstremtilfeller

For undersjøiske tunneler kan konsekvensene ved en alvorlig svakhetsone bli svært store, og i verste fall stenge prosjektet. En har tilfeller hvor tunneltraséen har møtt oppsprukket bergmasser med stor vannføring og høyt leirinnhold under stort trykk. I disse tilfeller har fremdriften stoppet og inngående bergsikring har vært nødvendig. I noen tilfeller har tilstanden vært kritisk hvor utrasing og vannlekkasjer har vært vanskelige å stoppe (Nilsen and Palmström, 2001; Nilsen, 2010).

To eksempel på ekstremtilfeller er presentert i prosjektoppgaven; Bjørøytunnelen og Atlanterhavstunnelen, hvor en møtte svært krevende forhold som på tross av sonderboring skapte store problemer.

Atlanterhavstunnelen går gjennom gneis, dypt under sjøen (-250 m) og møtte en svakhetsone med knust berg som skapte store problemer. Under drivingen møtte de flere vanlige svakhetssoner som ble passert uten større problem. Ved pel 6242 ble det utført sonderboring inn i svakhetssonen som indikerte dårlig bergmasse, men liten vannlekkasje. Injisering ble utført for sikkerhets skyld. Når de nådde sonen viste det seg å være ekstremt dårlig bergmasse hvor 10 meter av berget i taket raste ut. En betongplugg ble støpt og gjentatte injiseringsomganger ble utført. Det ble målt fullt vanntrykk i sonen, noe som gjorde injiseringsprosessen vanskeligere (Nilsen, 2010). Dette var berg som har tilsvarende lik natur som gneisen en møter i Ryfylketunnelen (Meisterplass, 2014).

Bjørøytunnelen går gjennom gneis, har lav fjelloverdekning og møtte en ekstensjonsone fylt med sediment fra Jura som gav svært vanskelige driveforhold. Drivingen av Bjørøytunnelen var basert på injeksjon da de møtte vannlekkasjer over mesteparten av tunneltraséen (Meisterplass, 2014). På grunn av ufullstendig seismisk kartlegging var ikke sonen registrert og dette sinket tunnelarbeidet kraftig. Sonen hadde svært høy permeabilitet og veldig dårlig stabilitet som krevde gjentatte og grundige injiseringstiltak, drenering og mekanisk sikring for å drive gjennom den (Nilsen, 2010). Dette er også en situasjon som Ryfylketunnelen kan møte, og som en må være klar over (Meisterplass, 2014).

Injeksjonsstrategier

4.1 Injisering i berg

For de fleste moderne norske bergrom er injeksjon brukt som tetting av vannlekkasje. Det foregår ved å pumpe sement inn i porene og/eller sprekke i berget. En skiller mellom to typer injeksjonsmiddel; sementbasert og kjemisk. Sementbasert er mest brukt og det groveste, mens mikrosemeter (sementbasert) er spesialisert for strengere krav og mindre sprekkeåpninger. Berginjeksjon har også stabiliserende virkning på berget (Nilsen and Broch, 2011).

Funksjonskrav med hensyn på inn- eller utlekkasjer i undergrunnsanlegg bestemmes av tre hovedtema; konsekvensene for lekkasje på ytre miljø, anleggsdriften og for det permanente anlegget (Hognestad et al., 2010). I Ryfylketunnelen er det ansett som lite sannsynlig at tunneldrivingen gir betydlige konsekvenser for ytre miljø. Innlekkasjekravet er derfor vurdert med hensyn til tunneldriving og permanent driftsituasjon til 10 l/min/100 m per løp. Dette er definert som middels strenge krav. Systematisk sonderboring utføres i hele tunnelens lengde og gir entreprenøren vurderingsgrunnlag for behov av injisering (Norconsult, 2012b).

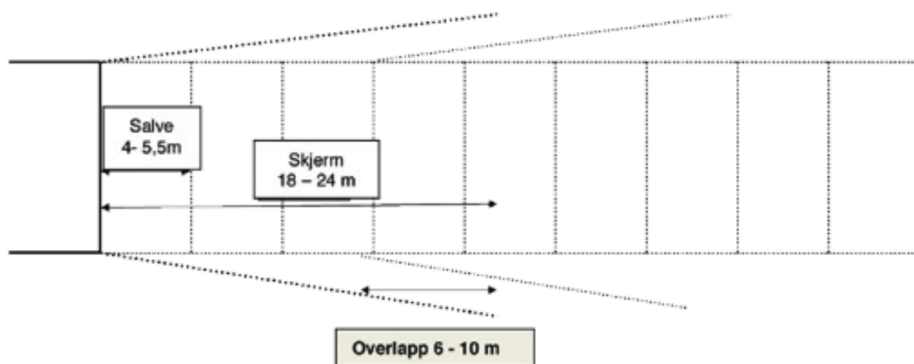
4.2 Prosedyre

Injeksjonsteknikk i tunneldriving har eksistert i over 60 år, men har utviklet seg mye de siste 20 årene. Skandinavia har vært ledende innen teknologien og streber mot å utvikle mer effektive og økonomiske strategier (BAFS, 2011). Moderne injeksjon anses nå som et komplisert fagfelt som stiller store krav til ferdighet og en inngående forståelse for geologien (Hognestad et al., 2010). Design av injeksjonsskjermen bestemmes slik at lekkasjekravene blir møtt. Norges Forening for Fjellsprengningsteknikk presenterer i figur 4.4 en sjekklister for injeksjonsprosessen.

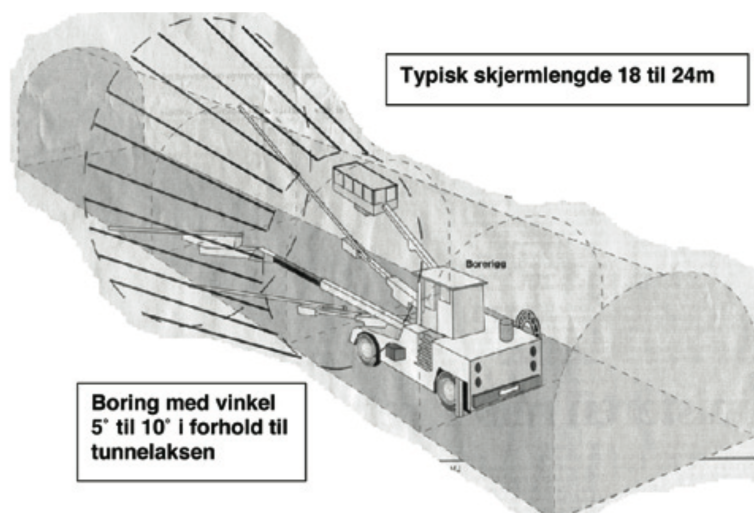
En hydrogeologisk vurdering utføres på grunnlag av geologiske forundersøkelser, sonderboring og vanntapsmåling, som vist i figur 4.4, for å framstilling en injeksjonsstrategi. Den vanligste formen for injeksjon er forinjeksjon. Denne metoden består av å bore injeksjonshull i en skjerm forran stoffen. For en vellykket injeksjon er viktig at skjermen tilpasses forholdene, at videre boring og sprengning ikke skader injeksjonsskjermen og at injisering også foretas i stoffen (Vegvesen, 2010). Erfaringsmessig har en fått bedre injeksjonsresultater ved systematisk forinjeksjon. En vil da unngå forflyttelse av lekkasjen inn i ikke-injiserte områder (Wedervang and Jenssen, 2013).

Injeksjonsarbeidet starter ved å plassere pakningen i injeksjonshullet. Videre sprøytes injeksjonsmiddelet (sementsuspensjon eller flytende kjemiske stoffer) inn i hullet ved høyt trykk. Injeksjonstrykk opp til 100 bar (1000 meter vannsøyلة) anvendes for å sikre tilfredsstillende inntrengning i berget (Nilsen and Broch, 2011). Det er vanlig å anvende prinsippet om 'Aktiv injeksjon', hvor en tilstreber en kontinuerlig trykkoppbygging i injeksjonsprosessen til en når et forhåndsbestemt sluttrykk; som er stoppkriteriet. Dette gjør en ved å variere v/c-forholdet (vann-sement) fra tynne masser til tykkere masser. En vil også tilstrebe så lavt v/c-forhold som mulig for å oppnå tilsiktet masseinnngang (Klüver and Kveen, 2004). Detaljer omkring dette er beskrevet nedenfor. Dersom injeksjonsarbeidet viser seg å være lite vellykket i ettertid kan en etterinjisere berget. Det er ikke ønskelig, da det erfaringsmessig er mye vanskeligere å oppnå gode resultater ved etterinjeksjon (Nilsen and Broch, 2011).

Injeksjonshullene har krav til borhullsdiameter på 45-64 mm, som varieres med tørkehastigheten til sementen (Hognestad et al., 2010). Standard tykkelse er 51 eller 64 mm (Vegvesen, 2010). Ved gjentatt injisering er det vanlig med overlapp i størrelsesorden 6-10 meter, som illustrert i figur 4.1. Størrelsen på overlappet mellom injeksjonsskjermene varierer med tetthetskrav, innlekkasjeforhold og bergforhold. Hullretningen er vanligvis 5-10° i forhold til tunnelaksen, som vist i figur 4.2. I figuren er det brukt en 3-boms borrhigg og en typisk skjerm lengde på 18-24 meter, noe som er vanlig (Hognestad et al., 2010).

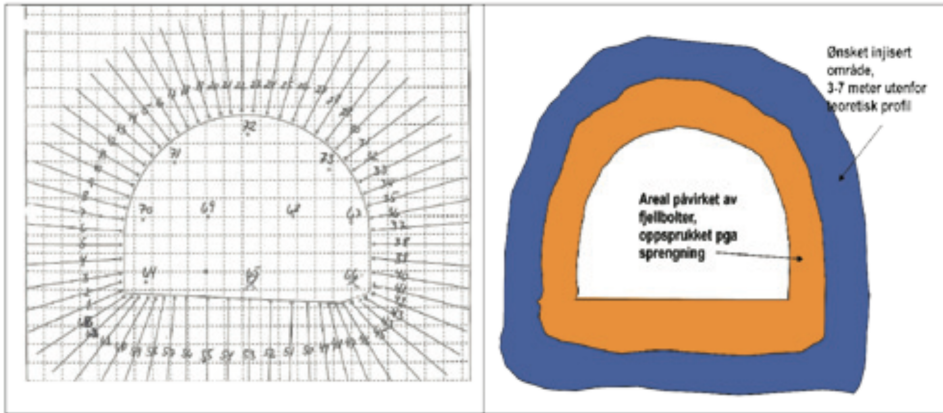


Figur 4.1: NFF's eksempel på injeksjonsskjerm salvelengde i lengderetning (Hognestad et al., 2010)



Figur 4.2: NFF's eksempel på boring av injeksjonshull med en 3-boms borrhigg (Hognestad et al., 2010)

Antall injeksjonshull på stoffen varierer med tetthetskravene, men også i stor grad med hvilke bergartstyper en møter. Dette er spesifisert nedenfor i delkapittel 4.2 Geologi, men som regel krever fjell med gjennomgående sprekker færre injeksjonshull mens tett fjell med ukontinuerlige sprekker krever flere borehull (Klüver and Kveen, 2004). Det ønsket injiserte området skal ideelt skjermme hele profilet og berget som er påvirket av sprenging og mekanisk sikring. Dette er vist i profil i figur 4.3, og kalles en injeksjonsskjerm. Av figuren vises at ønsket injisert område er hele 3-7 meter utenfor profilet for å unngå vannførende kanaldannelse under sprengningen eller sikringen (Hognestad et al., 2010).



Figur 4.3: NFF's eksempel på en injeksjonsskjerm (Hognestad et al., 2010)

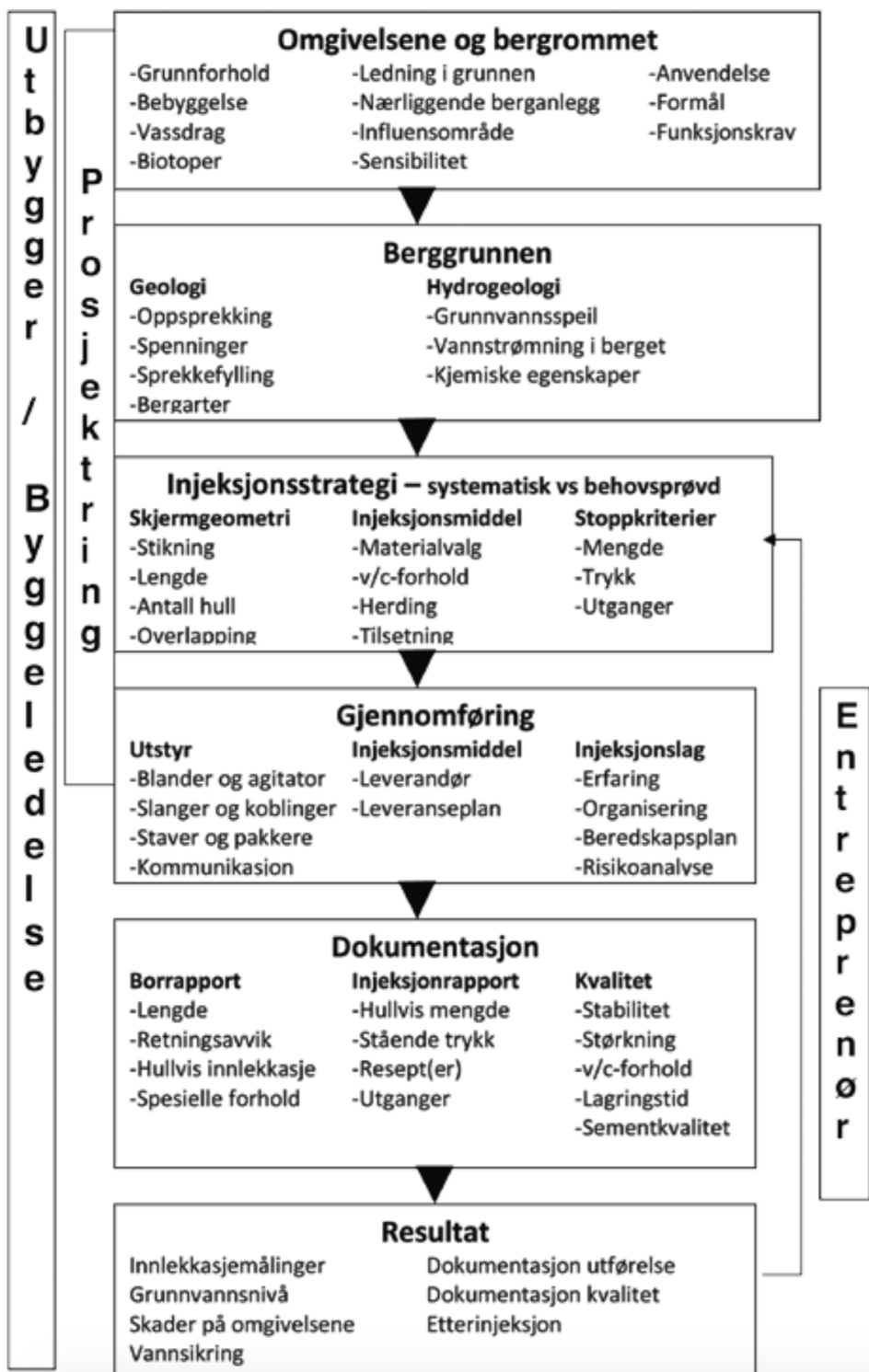
For å kunne injisere med trykk plasseres en tett pakning i utkanten av injeksjonshullet. Vanlig avstand til stuff er 1,5-2,5 meter, men denne økes ved spesielle forhold. Det skiller mellom høytrykk og lavtrykks pakning ved 60 bars trykk. Det finnes flergangspakninger, men det vanligste er engangspakninger. Ved høyt vanntrykk og utfordrende montering kan en skjære av tuppen på pakkere eller borer et avlastningshull for å minske vanntrykket bak pakkere. Ved ekstreme tilfeller kan en støpe 'Standpipes' inn i hullet. Utpressing eller feilmontering av pakkere har vist seg å være en av de store årsakene til ulykker ved injeksjonsarbeid. Det kreves derfor gode rutiner for å unngå dette (Hognestad et al., 2010).

En skiller mellom sementbasert og ikke-sementbasert injeksjonsmateriale. Videre skiller en sementbasert mellom industrisement og mikrosegment avhengig av kornstørrelsen. Hvikle sement en anvender er bestemt av krevd inntrengningsevne for berget. Industri-sement er brukt for opne sprekker med høy Lugeonverdi, mens mikrosegment og ikke-sementbasert er for små sprekker med lav Lugeonverdi. Valg av injeksjonsmaterialer er standardisert i tabell 4.1 (Hognestad et al., 2010). I moderne tid er sementbasert injeksjonsmaterial vanligst, mens ikke-sementbasert injeksjonsmaterialer er mest brukt ved spesialtilfeller som etterinjeksjon, ekstra injeksjonsomgang eller store vanninnbrudd (Nilsen and Broch, 2011). En tilfører også stabiliserende stoffer for å stabilisere injeksjonsmassen og unngå at den skiller ut sementet under trykk, såkaltet 'bleeding'. I Norge er silikaslurry det vanligste produktet (Hognestad et al., 2010).

Tabell 4.1: NFF's anbefalinger for valg av injeksjonsmaterialer med hensyn på sprekestørrelser og/eller Lugeonverdi (Hognestad et al., 2010)

Type og størrelse av sprekk/åpning (Sprekkemateriale)	Typisk Lugeonverdi	Injeksjonsmateriale
Åpna kanaler, karst (stein/grus)	>50	Standardsement CEM I 42,5 RR med tilslag av sang/grus
Store sprekker, <1 cm åpning (grov grus)	10 - 50	Standardsement CEM I 42,5 RR med tilslag av silika eller P/ekspanderende tilsetninger
Middels store sprekker, 0,3 - 1 cm (grus)	3 - 15	Standardsement CEM I 42,5 RR med SP-tilslag og silika
Små sprekker, 0,01 - 0,1 cm (grov-middels grov sand)	1 - 5	Mikrosementer med SP-tilsetning og silika
Svært små sprekker, >0,01 cm (fin-/mellomsand)	<1	Fineste mikrosement med SP-tilsetning/silika og/eller silikater, epoxy, kolloidal silika, polyuretan
Spesialtilfeller	Rennende vann	Vurder akselerator/ ekspanderende tilsetninger eller polyuretan

Alternativer til injisering som vannsikring kan være en vanntett betongutstøping eller en membraniserende utstøping. Dette kan være aktuelt dersom en treffer berg med så lav stabilitet at injeksjon ikke gir tilstrekkelig tett og/eller stabiliserende resultater (Karlsrud et al., 2003). Et eksempel på dette er Atlanterhavstunnelen.



Figur 4.4: Sjekkliste for injeksjon av Norsk Forening for Fjellsprenningsteknikk (Hognestad et al., 2010)

4.3 Geologi

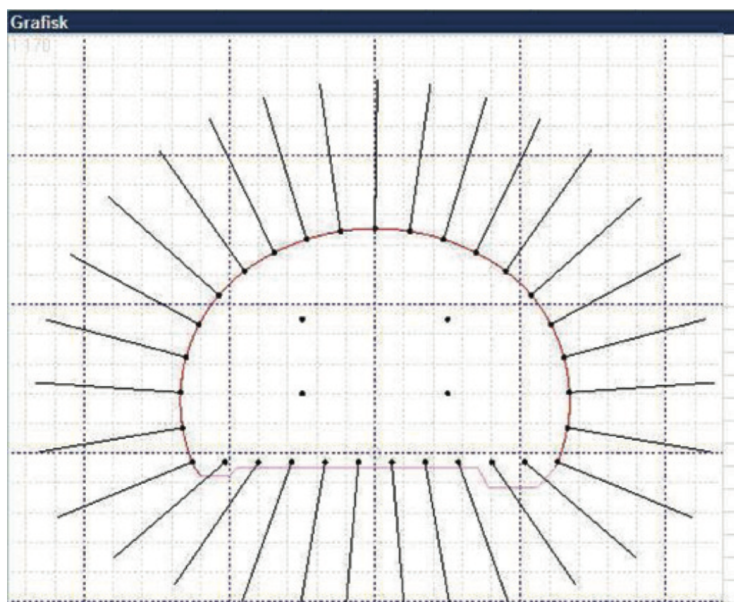
Som nevnt tidligere deles bergmassen inn i fire kategorier med forskjellige konduktive egenskaper. Denne inndelingen brukes også når injeksjonsstrategi bestemmes, da bergartenestypene er bestemmende for hvordan en injiserer best mulig. Injeksjonstrategiene for de fire bergartene er som følger (Klüver and Kveen, 2004) ;

- **Bergartstype A:**
Bergmasse med åpne sprekker og uten vesentlig sprekkebelegg. Typisk for sandstein, kvartsitt, granitter, o.l.. Denne bergartstypen er ofte lett å injisere, hvor en kan operere med lange og få injeksjonshull. Vann/sement-forholdet (v/c-forholdet) bør være lavt, helt ned til 0,5, for å unngå ukontrollert utbredelse. Vanlig industrisement vil som regel være tilfredsstillende. Det kan være vanskelig å injisere ved steile svakhetssoner. Her vil sonen ofte være tett da leirinnholdet kan være høyt.
- **Bergartstype B:**
Bergmasse hvor sprekkeene ofte har sprekkefylling og tendens for kanaldannelse. Typisk for gneiser og andre tilsvarende metamorfe bergarter. Denne bergartstypen er middels lett å injisere, da mengden sprekkefylling varierer med tilstedeværelsen til feltspat. En kan operere med 15-30 m hullengde og fra 15-40 hull ved tunneltverrsnitt T8,5. En kan forvente å måtte bruke svært høyt trykk (100 bar) ved en vellykket injeksjon, der en vil starte med høyt v/c-forhold (1,2-0,9) og avslutte med lavt v/c-forhold (0,5). Finheten på sementen bestemmes av bergets motstand mot inn-trengning. Svakhetssoner og knusningssoner har ofte økt leirmengde som gir tettere bergmasse og nedsatt injiserbarhet.
- **Bergartstype C:**
Plastiske og tette bergmasser med høy grad av sprekkefylling og små kanaler i tynne sprekker. Typisk for metamorfe sedimenter som leirskifer, fyllitter, glimmerskifer, grønnstein o.l.. Denne bergarten er vanskelig å injisere på grunn av den lave konduktiviteten. Små og tette sprekker med høyt leireinnhold danner små kanaler med liten kontinuitet. Det opereres med mange og korte injeksjonshull med høyt trykk og svært fin sement. Det anbefalte massen er mikrosegment hvor tillegg av mikrosilika vurderes, og en begynner ofte med v/c-forhold på 0,9 hvor en reduserer forholdet forsiktig gjennom injeksjonsprosessen.
- **Bergartstype D:**
Bergmasser for ved karstfenomen eller tektonisk påvirkning har ekstremt åpne sprekker eller åpne rom i berg. Ofte ved kalkstein. Denne bergmassen kan gi svært store vannlekkasjer og noen steder ekstreme vanninnbrudd. Det er ingen anbefalt tettningmaterial, men det nevnes at det har vært vellykket å pumpe inn betongmasse og injeksjonsmasser inklusive mauringsmateriale. En har hatt erfaringer med disse type lekkasjer nær skyvesoner i bergklasse B i Sør-Norge. Disse fenomenene har også opptradd helt ned til 2-300 meter bergoverdekning.

4.4 Svakhetssoner

Svakhetssoner gir ofte varierende hydrogeologiske forhold relativt med omliggende bergarter. Dette kan derfor by på utfordringer. For norsk grunnfjell der nedknusingen og omvandlingen ofte er godt utviklet er det sideberget med gjennomgående, leirfattige sprekkesystem som gir vannlekkasjen. Dårlig utført injeksjon i disse områdene vil kunne medvirke rasutvikling i leirsonen samt gi potensial for vannlekkasje i sidebergarten (Klüver and Kveen, 2004).

I den undersjøiske tunnelen T-forbindelsen er det sammenlignbare geologiske forhold til Ryfylketunnelen (Meisterplass, 2014). Det var utført vellykket injisering i T-forbindelsen ved kryssing av svakhetssoner. Funksjonskravene la til rette for kontinuerlig sonderboring med 4 hull a 28 meter, to i såle og to i vederlag. Injeksjon ble utført når de målte mer enn to liter/min fra enkelthull eller mer enn 5 liter/min totalt. Standard skjerm var fulgt med 36 hull og 24 meters lengde. Injiseringsstrykket var opp til 60 bar med maks 2000 liter per hull som standard. Industrisement med normal resept var standard, hvor en startet med v/c-forhold på 0,8 for 500 liter og avslutta med v/c-forhold på 0,6. Standard borplan er vist i figur 4.5 nedenfor (Hognestad et al., 2010).



Figur 4.5: Standard borplan for injeksjon ved T-forbindelsen (Hognestad et al., 2010)

Erfaringsdata fra ferdigdrevet tunnel

En stor del av erfaringsdataen er presentert i PDF-fremvisning fra dataprogrammet Novapoint. Dette er et dataprogram som blant annet brukes for å registrere ingeniørgeologiske forhold i drevet bergmasse. Et eksempel er vist i vedlegg 3. I norsk, impermeabel bergmasse er det sprekker i bergarten som er vannførende (Gudmundsson, 2000; Meisterplass, 2014; Holmøy, 2008; Klüver and Kveen, 2004). Det var ikke mulig for forfatteren å anslå hvilke bergmasser eller hvilke sprekkesett som gav inn- lekkasje. Hele den injiserte bergmassen og vedliggende sprekkesett ble derfor vurdert for hver lekkasje.

Det foreligger en usikkerhet ved den ingeniørgeologiske kartleggingen av sprekkesystem og sprekkeroser fra forundersøkelsene. Dette er fordi en ikke kan si sikkert hvordan sprekkenene brer seg i dypet i forhold til overflaten, en har begrenset tilgang på bart berg i overflaten og fordi sprekketolkning en subjektiv tolkning (Nilsen, 2014-2015). Alle sprekkerosene produsert gjennom oppgaven produsert av studenten i programvaren til 'Youngtechnology inc'. og alle statistiske fremstillinger i oppgaven er produsert av forfatter ved hjelp av softwaret *Microsoft Excel*.

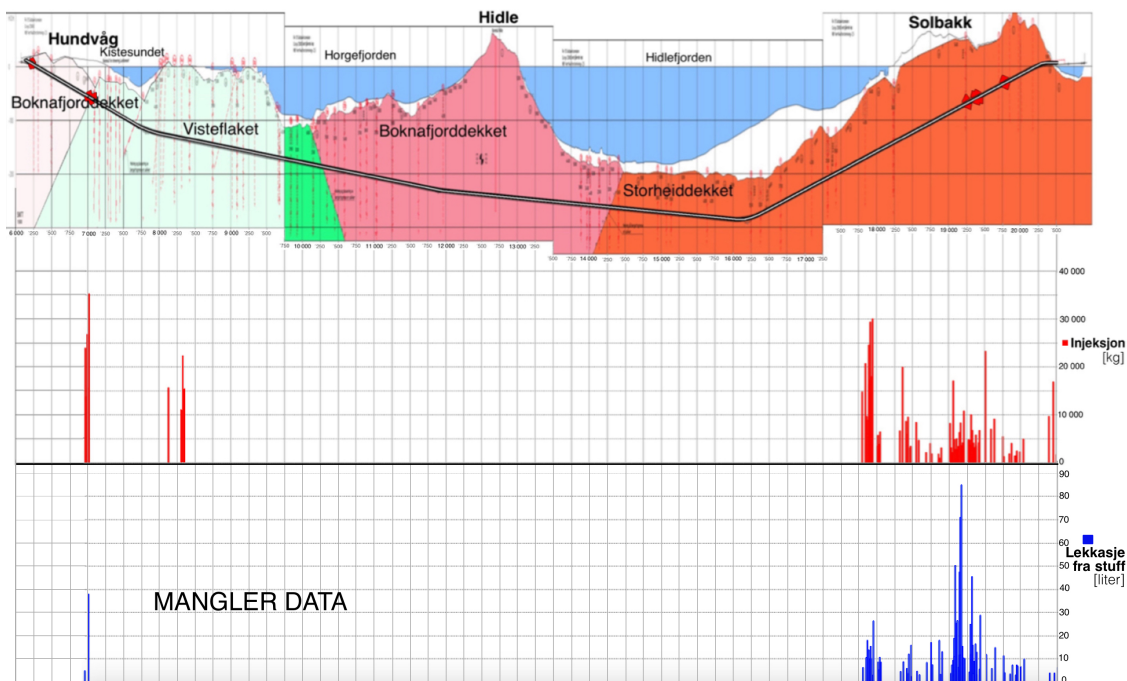
5.1 Injisert områder

For å lage en prognose av innlekkasje og injeksjonsbehov gir det mening å studere hvor en har opplevd lekkasjer som krevde injeksjon i den utsprengte delen av tunnelen. I dataverktøyet Novapoint blir nøkkeldata registrert og kan nås i ettetid. Relevante ingeniørgeologiske forhold vurdert er bergmassekvaliteten (definert ved Q-systemet), sprekkesett, lekkasje på stoff, injisert masse, strukturgeologiske forhold og svakhetssoner.

Figur 5.1 viser hvor langs tunneltraséen sonderboringen gav høy lekkasje, hvor det har blitt injisert mot innlekkasje og hvor mye. De røde prikkene langs traséen illustrerer hvor

en har drevet gjennom svakhetssoner i berget. Av figur 5.1 ser en at Storheidekket har opplevd stor vannlekkasje, mens den grunne, drevne delen av Boknafjorddekket har gitt lite innlekkasje. Det kan observeres at bergartsgrensen mellom Boknafjordens gneis og Visteflaks fyllitt gav lekkasjeproblemer hvor omfattende injeksjonsarbeid krevdes og at en ikke har møtt innlekkasje i fyllitten under vann, men under land.

En ser ikke noen tydelig sammenheng mellom topografien og innlekkasje i drevet del av Ryfylketunnelen. I Visteflaket passerte traséen en dyprenne (pel 7800) uten lekkasjer under dyprennen eller fra sideliggende bergmasse. Ved Storheidekkets gneis var største målte lekkasje fra stuff ved en renne i dagen (pel 18350), men en møtte også lekkasje fra opphøyninger i berget og fra topografiske flanker. Det må nevnes at entreprenøren for E02-Solbakk har hatt problem med injiseringsstrategiene sine og hvorvidt de har utført suksessfulle injeksjonsrunder er usikkert (Vegvesen, 2015).



Figur 5.1: Ingeniørgeologisk profil av Ryfasttunnelen med oversikt over injisert masse i drevet del av tunnelen. Svakhetssoner er markert på traséen med røde prikker

Data fra figur 5.1 er registrert av kontrollingeniør og entreprenør på stuff. Data er presentert i vedlegg 6. En ser vedgående lav injeksjonsmasse i Solbakkstuffen, som sannsynligvis kommer av utilfredsstillende injeksjonsrutiner og uvellykkede injeksjoner. De registrerte Q-verdiene i vedlegg 6 er subjektive målinger med stort potensial for feilkilder, og vurderes deretter.

Antall dreve tunnelmeter i hver av skyvedekken og hvor stor andel av de som har blitt injisert er oppgitt i tabell 5.1. En ser at selv om en stor del av tunnelen i Storheidekkets gneis fra Solbakkstufven har blitt injisert, så er forbruket relativt lavt. Grunnen til det er de små mengdene sement injisert i berget under hver omgang. For Boknafjorddekkets gneis fra Hundvågstufven er andelen tunnelmeter injisert lav, mens forbruket av injeksjon over hele skyvedekket er relativt høyt. Grunnen til dette at lekkasjene en møtte i bergartsgrensen mellom gneisen og fyllitten krevde store mengder injeksjon for å tette. I Visteflakets gneis har en opplevd liten andel tunnelmeter injisert og et normalt til noe høyt forbruk, sammenlignet med andre undersjøiske tunneler (Nilsen and Palmström, 2001; Holmøy et al., 2015-02-02)

Tabell 5.1: Oversikt over tunnelmeter dreve og injisert i de tre skyvedekka (Vegvesen, 2015)

<i>Datert 01/3-2015</i>	Tunnelmeter [m]	Tunnelmeter injisert [m]	Lekkasje [%]	Forinjeksjon forbruk [kg/m]
Boknafjorddekket	1790	125	6,98	64,4
Visteflaket	2459	106	4,31	32,0
Storheidekket	5351	1626,5	30,4	139,3

Ingeniørgeologiske forhold av interesse ved injisert bergmasse er tabellert beskrevet i vedlegg 6. Tabellen sorteres etter tunnelens pelnummer for å ha mulighet til å plassere registreringene mot de ingeniørgeologiske forundersøkelsene. Målt lekkasje og injisert masse er hentet fra entreprenørens interne logg. I disse loggene finnes også trykkparameter og v/c-forhold for injeksjonen, som blir presentert i kapittel 4. Bergmassekvaliteten er beskrevet av Q-verdiene som er vurdert av kontrollingeniører på stoff. Q-verdien er minste Q-verdi registrert langs bergmassen sonderborehullene berører, da det ikke var mulig å bestemme fra hvilke bergmasse som gav innlekkasje. Sprekkeretningene er vurdert subjektivt av forfatteren som de sprekkesettene som dominerte i bergmassen sonderborehullene, basert på kontrollingeniørens kartlagte sprekkesett (Vegvesen, 2015).

Dataen i tabellen i vedlegg 6 presenteres med hensyn på orientering til sprekkesett og trenden til Q-verdien ved innlekkasje. For sprekkesettene blir de presentert i sprekkeroser, mens Q-verdiene analyseres statistisk for en trend.

Ved to-løps tunnel er praksisen at et løp skal drives minst 50 meter forran det andre (Vegvesen, 2014). Erfaringsmessig vil injeksjonsarbeidet fra den fremste tunnelen forebygge innlekkasjer for det bakerste løpet, og en kan forvente mindre injeksjonsarbeid i det bakerste tunnelløpet (Wedervang and Jenssen, 2013). Fra vedlegg 6 ser en at det stemmer for Hundvåg-stufven hvor det fremste løpet, løp L24, har injisert 53,3% mer sementmasse enn det bakerste løpet. Solbakk-stufven har ikke hatt 50 meter mellom løpene til enhver tid, og det fremste løpet, løp B, har bare injisert 13% mer sementmasse enn det bakerste løpet.

5.2 Boknafjorddekket

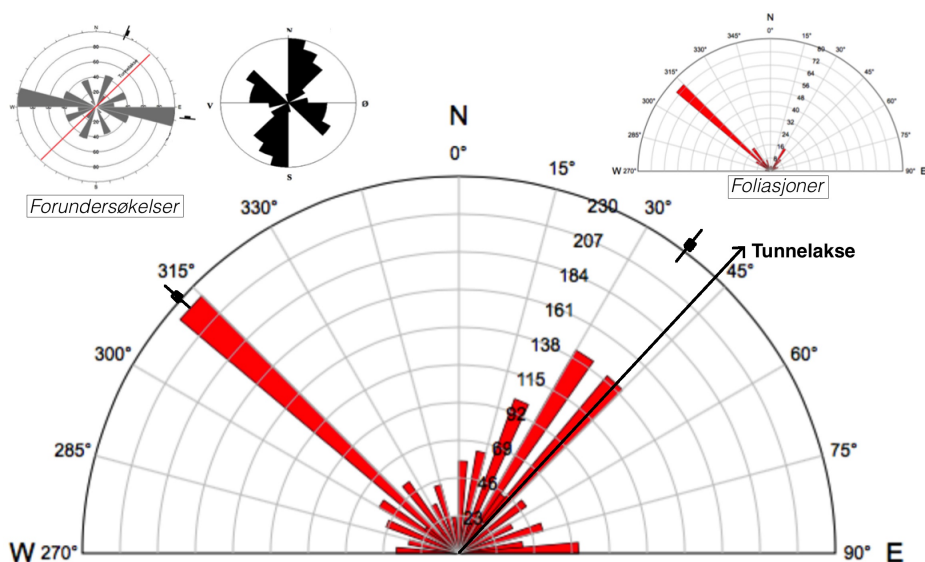
Ryfylketunnelen er drevet gjennom Boknafjorddekket fra Hundvåg i Entreprise E03. Her har en møtt foliert gneis med høyt innhold av glimmermineraller og liten grad av innlekasje (Vegvesen, 2015).

5.2.1 Sprekkesystemer

Evnen til å lede vann i hardt berg er, som nevnt tidligere, i stor grad avhengig av naturen til sprekkesystemer. Det gir derfor mening å studere sprekkesett en har møtt på stoff under driving av Ryfylketunnelen.

Det foreligger en usikkerhet i den ingeniørgeologiske kartleggingen av sprekkesystem og sprekkeroser fra forundersøkelsene. Dette er fordi en ikke kan si sikkert hvordan sprekke-
ne brer seg i dypet i forhold til overflaten, en har begrenset tilgang på bart berg i overflaten og fordi sprekke-
tolkning er subjektiv tolkning (Nilsen, 2014-2015). Ved store datasett vil denne feilen minke.

Sprekkesystemer for Boknafjordens gneis er presentert i figur 5.2. All dataen er hentet fra sprekkekartlegging i Novapoint-loggen. Disse er utført av kontrollingeniøren på stoff.

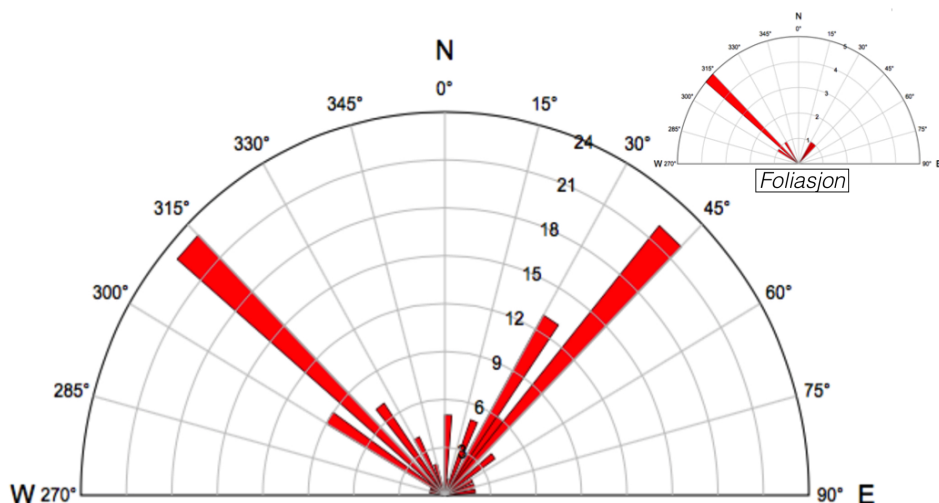


Figur 5.2: Sprekkerose fra sprekkesett i Novapoint-loggen til Boknafjordgneisen til Entreprise E03 på Hundvåg. Oppe i hjørnene er sprekkeroser kartlagt i dagen vist for sammenligning (Norconsult, 2012b; Multiconsult, 2008, revidert 2009) Oppe til høyre er sprekkerose fra den kartlagte foliasjonen i gneisen, hvor orienteringen er NV-SØ-dominert (Vegvesen, 2015).

Av figur 5.2 ser en at to meget godt utviklet sprekkesystem orientert NV-SØ og NØ-SV dominerer, hvor sprekkesettet orientert NV-SØ følger foliasjonen til gneisen. Merk at dette er målinger fra grunt berg (kote +10 til -55) og er ikke nødvendigvis representativt for dypt berg i samme skyvedekke. Sammenlignet med sprekkerosene produsert i forundersøkelsene av Norconsult (Norconsult, 2012b) og Multiconsult (Multiconsult, 2008, revidert 2009) ser en liten korrelasjon med Norconsults tolkning, mens det er noe likhet med Multiconsults tolkning. Dette viser hvor usikre og subjektive disse forundersøkelsene er.

5.2.2 Sprekkesystemer ved innlekkasje

Sprekkesettens egenskap til å lede vann er ofte avhengig av dens kontinuitet og orientering til hovedspenningen. Disse egenskapene kan tolkes ved å se på trender i en sprekkerose. Da det ikke er mulig å anslå hvilke sprekker eller berg som gav vannlekkasje blir hele den injiserte bergmassen på 25 meter vurdert. Det vurderes om bergmassene som krevde injisering gir et konsentrert, vannførende sprekkesett som skiller seg ut fra sprekkesettet over hele tunneltraséen. Det kan bety høy grad av kontinuitet i sprekkesettene og/eller et ugunstig forhold til hovedspenningen (Meisterplass, 2014). Sprekkerose fra injisert bergmasse i Boknafjorddekkets gneis er illustrert i figur 5.3.



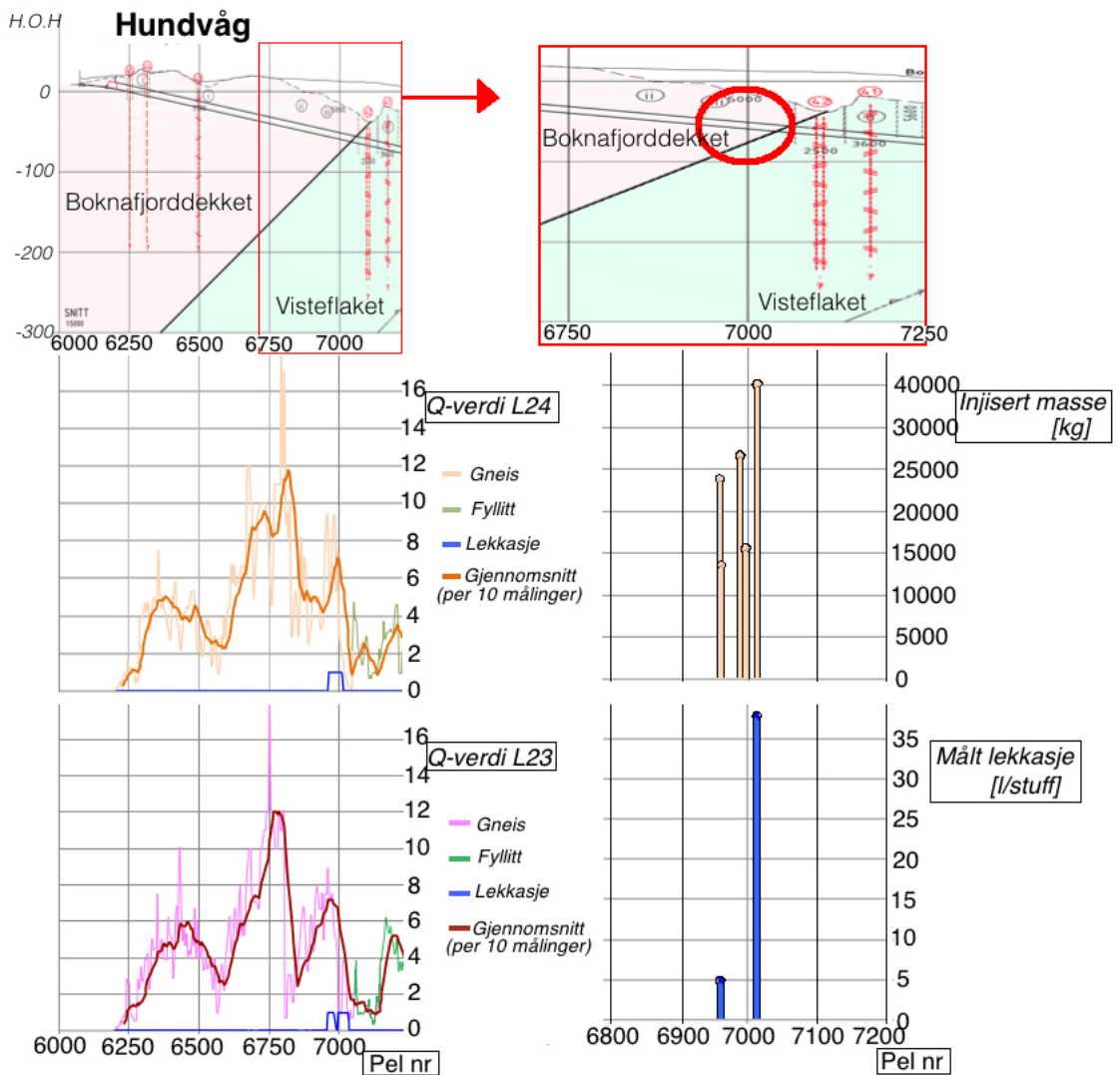
Figur 5.3: Sprekkerose fra injisert bergmasse ved Boknafjorddekkets gneis. Foliasjonen til den injiserte bergmassen er vist oppe til høyre. Data er tatt fra Novapoint-loggen (Vegvesen, 2015).

Figur 5.3 viser to vannførende sprekker. Dette er de samme sprekkesettene som en finner i ikke-injisert bergmasse langs tunneltraséen i Boknafjorddekket, som vist i figur 5.2, og har derfor ikke en trend som skiller seg ut. Det injiserte området som gir grunnlag til figur 5.2 er fra 55 tunnelmeter, ved overgangen til fyllitt, og har derfor en betydelig grad av usikkerhet knyttet til seg.

5.2.3 Bergmassekvalitet ved Q-verdi

Q-verdien beskriver bergmassens kvalitet. I Ryfylketunnelen blir Q-verdien vurdert for hver salvelengde av kontrollingeniøren på stuff. Studie utført av Holmøy viste fant at Q-verdi mellom 0,6 - 15 gav høyest vannlekkasje (Holmøy, 2008). Hvorav SINTEF og COWI anslo Q-verdi fra 0,1 til 1 som den mest vannførende, basert på Lungeon-test av kjerneboringer for Rogfastprosjektet, relativt nær Ryfylketunnelen (Holmøy et al., 2015-02-02). Q-verdien vurderes for å undersøke om bergmassens egenskap til å lede vann finnes innenfor et bestemt Q-verdi-intervall.

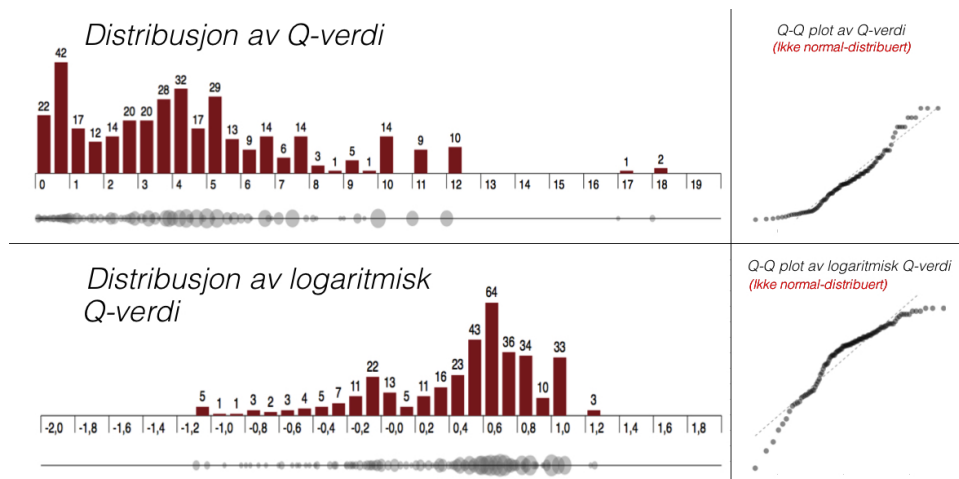
Q-verdien registrert under driving i Boknafjorddekkets gneis er illustrert til venstre i figur 5.4 for løp 23 og løp 24 nedenfor. Lekkasjeområdet er markert, forstørret og vist til venstre i figur 5.4.



Figur 5.4: Registrerte Q -verdier under driving for løp 23 og løp 24 til Boknafjorddekkets gneis til venstre. Injisert masse og lekkasjen fra sonderborehulla er vist over lekkasjeområdet til høyre. Gneisen fra Boknafjorddekket finnes fra pel 6200 til pel 7050. Profilet er fra forundersøkelsene (Norconsult, 2012b), hvor forfatteren har flyttet bergartsgrensen. Q -verdi, injisert masse og målt lekkasje er hentet fra interne dokument (Vegvesen, 2015).

Av figur 5.4 får en inntrykk av at Q -verdien varierer fra 0,5 til 10, med noen verdier fra under 0,5 og noen opp til 18. En ser en klar sammenheng mellom de to løpene og hvordan svakhetssonene fra forundersøkelsene gir lavere Q -verdier, men ikke noe innlekkasje. Det kan også sees at innlekkasjen kommer rett før en markert svakhetszone og bergartsgrense.

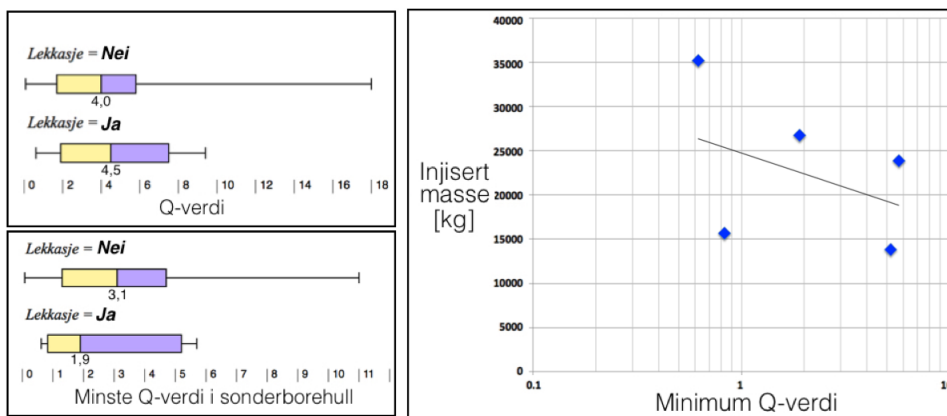
For å undersøke sammenhengen mellom innlekkasje og Q-verdi må en undersøke distribusjonen over hele tunneltraséen og for det konsentrerte innlekkasjeområdet. Dersom det finnes en tydelig trend skal disse distribusjonene kunne skilles fra hverandre. Distribusjonen til Q-verdien er illustrert i figur 5.5 nedenfor.



Figur 5.5: Distribusjon av Q-verdi og logaritmisk Q-verdi registrert i Boknafjorddekkets gneis (Vegvesen, 2015) og testet for normalfordeling i et Q-Q-plot.

Av figur 5.5 ser en at distribusjonen av Q-verdier i Boknafjorddekkets gneis fra kote +10 til kote -55 er fra 0,8 til 6 og ikke normalfordelt. Normalfordeling for logaritmisk Q-verdi ble også testet da Q-verdien er definert i en logaritmisk skala, men det var ikke normalfordelt. Det utelukker derfor simple statistiske predikeringer.

Boknafjorddekkets gneis hadde kun en, konsentrert innlekkasje. Dette var i overgangen til bergartsgrensen til Visteflakets fyllitt, og var i forundersøkelsen antatt som en problemsone (Meisterplass, 2014). Bergartsgrensen er registrert som brå med et tydelig bergartsskille (Vegvesen, 2015). Hyppig endring i bergmassekvaliteten sammen med innlekkasjer gjør det vanskelig å bestemme hvilke del av den injiserte bergmassen som gav lekkasje. En løsning på det kan være å undersøke den laveste registrerte Q-verdien for hvert sonderborehull (25 meter) (Holmøy, 2008). I figur 5.6 er det satt opp et boksplokk av Q-verdien og minste-Q-verdi i injisert berg og ikke-injisert berg, hvor ingen signifikant forskjell var funnet. Minste Q-verdi i injisert bergart er også sammenlignet med krevd injeksjonsmasse i figur 5.6, hvor en negativ trend ble funnet.



Figur 5.6: Boksploott av Q -verdi distribusjonen mhp injisert bergmasse til venstre. Til høyre er forholdet mellom injisert masse og minste Q -verdi illustrert (Vegvesen, 2015)

Av boksploottene i figur 5.6 ser en to forskjeller mellom injisert og ikke-injisert bergmasse. For hele den injiserte bergmassen er Q -verdien høyere ved lekkasje, mens for minste Q -verdi i sondeborehullet møter en lavere Q -verdier ved lekkasje. For å forklare dette ser en på Q -verdi-trenden i figur 5.5, hvor en ser at innlekkasje oppstod i overgangen til svakhetssoner ved bergartsgrensen. Denne bergmassen er kjent som den distale delen, hvor bergmassekvaliteten vil gå fra god til dårlig, og vil møte et svært gjennomgående og vannførende sprekkesett (Braathen and Gabrielsen, 2000; Holmøy, 2008).

Til høyre i figur 5.6 ser en at en har opplevd mer krevende innlekkasjer ved mindre Q -verdi, frem til Q -verdien er så lav at den ikke er vannførende lenger. Dersom en studerer Q -verdiene nær innlekkasjene i gneis i figur 5.5 ser en stopp i innlekkasje ved laveste Q -verdi. Dette er spesielt tydelig for løp 23. De mest krevende innlekkasjene er derav forventet ved Q -verdi 0,6-5, hvorav høyere Q -verdi vil gi mindre krevende vannlekkasjer, og mindre Q -verdi vil gi impermeabel bergmasse.

5.3 Visteflaket

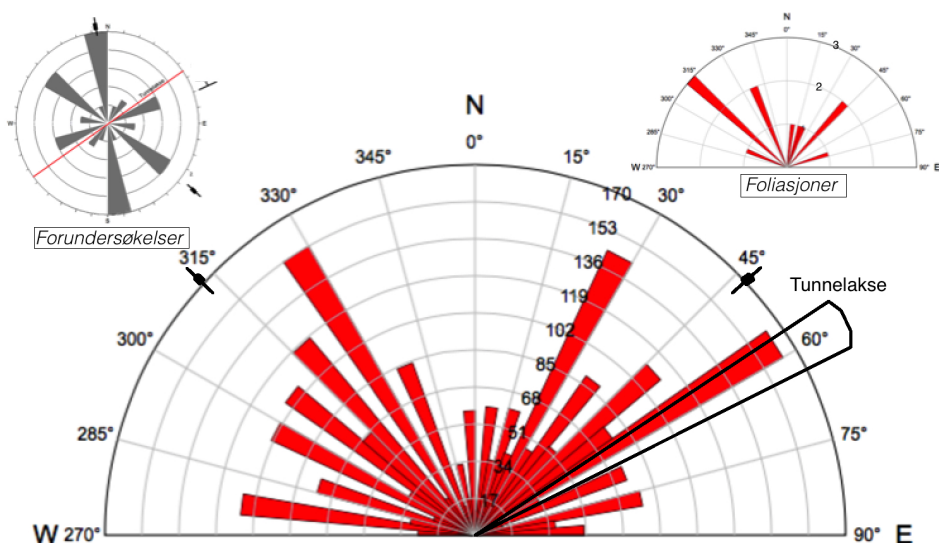
Ryfylketunnelen er drevet gjennom Visteflaket fra Hundvåg i Entreprise E03. Her har en møtt fyllitt rik på grafitt, andre mørke mineraler og rene kvartsittiske ganger. Fyllitten er erfaringsmessig av veldig god kvalitet (Vegvesen, 2015).

5.3.1 Sprekkesystemer

Fyllitt tilhører bergartstype C, som ofte er tette og plastiske bergarter. Det forventes høy grad av oppsprekking men liten grad av kontinuitet i sprekkesettene. Det er vanlig å møte høy grad av sprekkefylling og små kanaldannelser i fyllitten (Klüver and Kveen, 2004;

Meisterplass, 2014).

Sprekkekartleggingen for Visteflaket er utført subjektivt av kontrollingeniør på stoff og presentert i ei sprekkerose i figur 5.7. All data er hentet fra Novapoint-loggen (Vegvesen, 2015).



Figur 5.7: Sprekkerose fra sprekkeseett i Novapoint-loggen til Visteflaket's fyllitt til Entreprise E03 på Hundvåg. Oppe til venstre er sprekkerosen kartlagt i dagen vist for sammenligning (Norconsult, 2012b). Oppe til høyre er sprekkerose fra den kartlagte foliasjonen i fyllitten (Vegvesen, 2015).

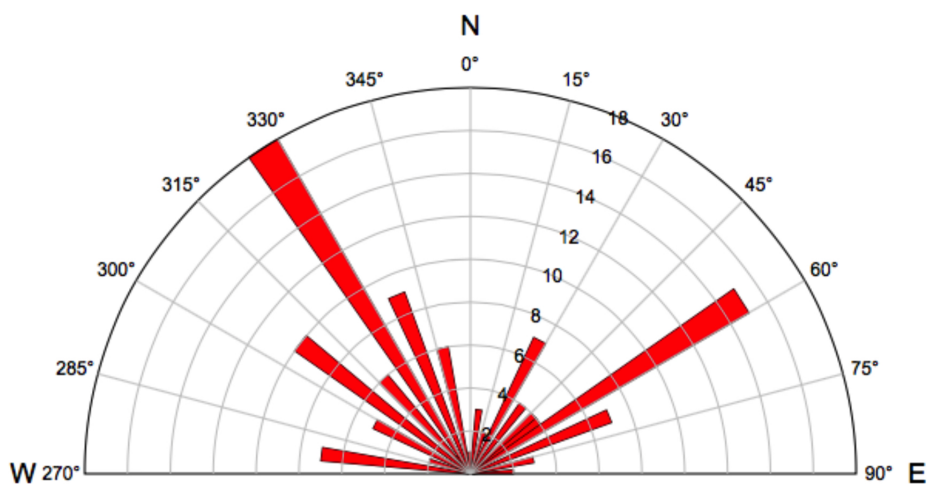
Av figur 5.7 ser en to sprekkeseett som dominerer med en stor grad av variasjon i orientasjonen. Disse sprekkeseettene er orientert NV-SØ og NØ-SV. Variasjonen i orientering kan være et resultat av foldning i fyllitten. Sammenlignet med sprekkeseett i Boknafjoddekket fra figur 5.2 kan en likhet observeres, hvorav variasjonen i sprekkorienteringen i gneisen er svært liten i forhold til fyllitten (Vegvesen, 2015).

Sprekkerosene produsert i forundersøkelsene av Norconsult (Norconsult, 2012b) for fyllitten viser en tendens til de to sprekkeseettene, men også et sprekkeseett orientert N-S som ikke er funnet i tunnelen.

5.3.2 Sprekkesystemer ved innlekkasje

Sprekkeseettets egenskap til å lede vann avhenger av bergarten de brer seg i. I fyllitt forventes vedvarende, små innlekkasjer over hele traséen, med få store innlekkasjer. Erfaring

fra nærliggende tunneler er at fyllitten har majoriteten av innlekkasjene under land. Der som en møter på vedvarende kvartsittbenker i fyllitten vil innlekkasje fra kontinuerlige, leirfrie sprekesett kunne oppstå (Meisterplass, 2014). På samme måte som i Boknafjordsgneisen har det ikke vært mulig å bestemme hvilke bergmasse eller sprekesett som har gitt lekkasje. Hele den injiserte bergmassen på 25 tunnallengdemeter blir derfor vurdert. Sprekkerosen fra injisert bergmasse i Visteflaketets fyllitt er vist i figur 5.8.



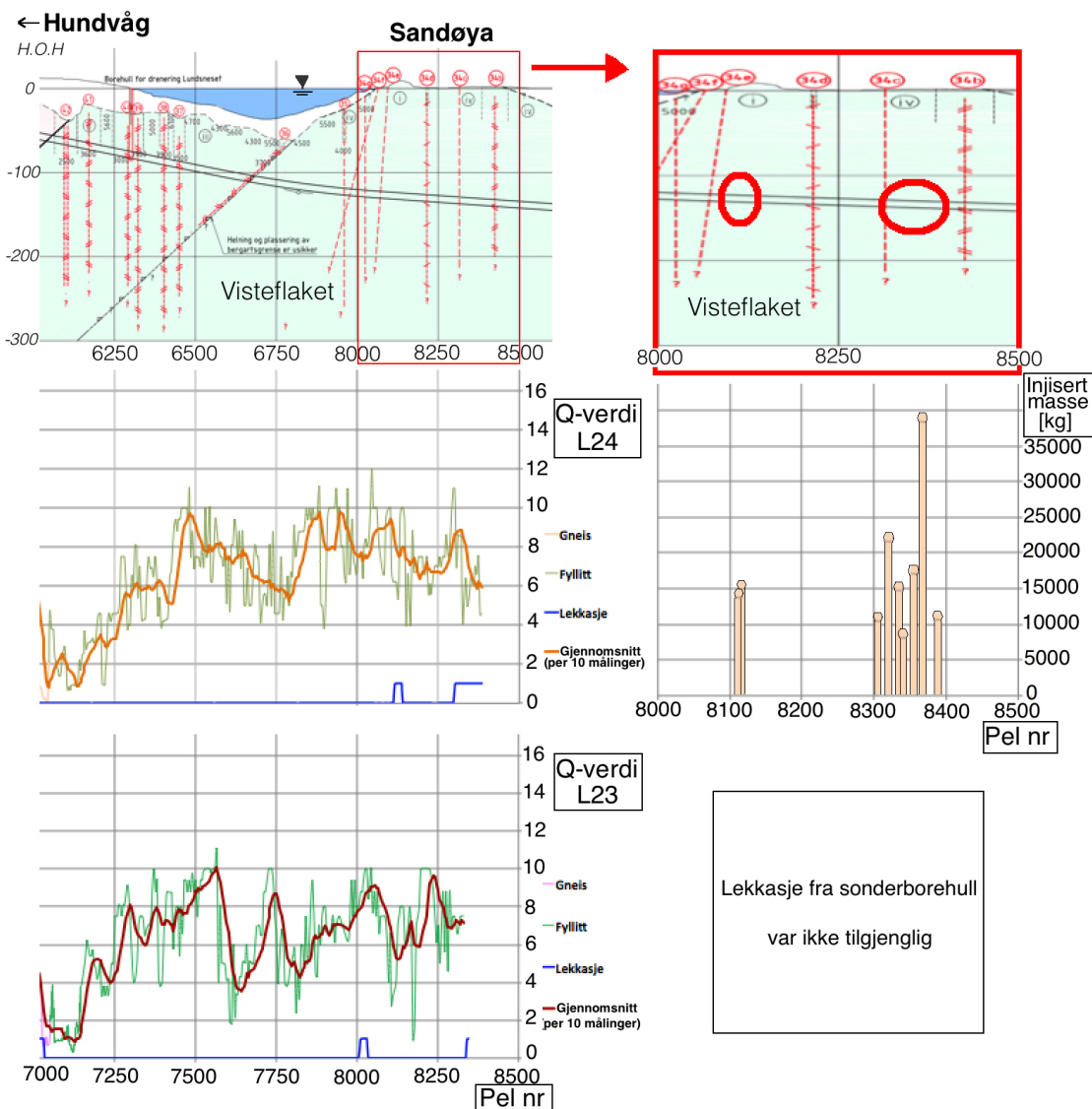
Figur 5.8: Sprekkerose fra injisert bergmasse ved Visteflaketets fyllitt. Det var ikke registrert foliasjoner ved injisert bergmasse. Data er tatt fra Novapoint-loggen (Vegvesen, 2015).

Figur 5.8 viser to dominerende sprekesett orientert NV-SØ og NØ-SV, med stor variasjon. Dette er de samme sprekesettene som en finner i ikke-injisert bergmasse langs tunneltraséen i Visteflaket, som vist i figur 5.2, og har derfor ikke en trend som skiller seg ut.

5.3.3 Bergmassekvalitet ved Q-verdi

Siden Visteflaketets fyllitt har helt andre egenskaper enn Boknafjorddekkets gneis, gir det mening å test Q-verdien på samme måte. Dr. Holmøy's konklusjon om at lekkasje finnes i Q-verdi-intervallet mellom 0,6 - 15 er basert på metamorfe leirsteiner og grunnfjells-gneis (Holmøy, 2008), og kan derfor anvendes for fyllitt. SINTEF og COWIs studie av innlekkasjeproblematikk for Rogfast-prosjektet var basert på tester i grønnstein og grunnfjells-gneis, og er derfor ikke anvendbar for fyllitten.

Q-verdiene registrert av kontrollingeniørene på stuff er illustrert til venstre i figur 5.9 nedenfor. Til høyre i figur 5.9 er lekkasjeområdet forstørret og injisert masse illustrert. Det fantes ingen data på lekkasje fra sondeborehull i Novapoint-loggen (Vegvesen, 2015).

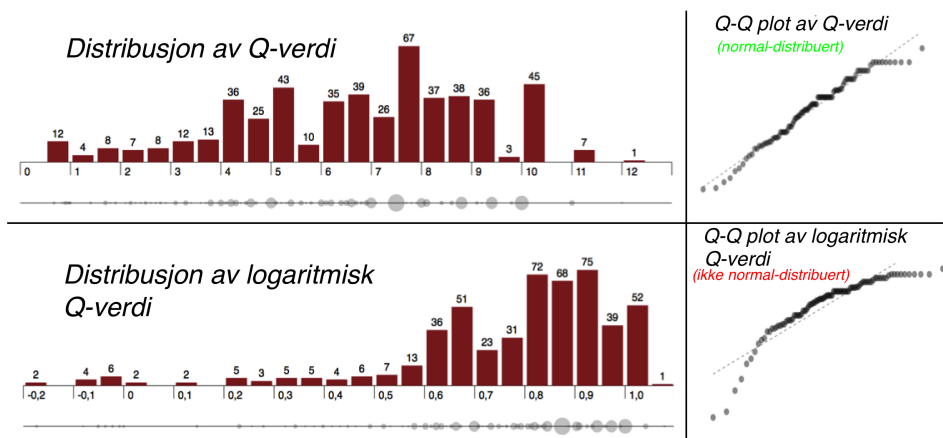


Figur 5.9: Registrerte Q -verdier under driving for løp 23 og løp 24 til Visteflaket's fyllitt til venstre. Injisert masse er vist over lekkasjeområdet til høyre. Bergartsgrensen mellom gneis og fyllitt finnes ved pel 7050. Profilet er fra forundersøkelsene (Norconsult, 2012b), hvor forfatteren har flyttet bergartsgrensen. Q -verdien er tolket av kontrollingeniøren for hver salvelengde. Q -verdi, Injisert masse og målt lekkasje er hentet fra interne dokument (Vegvesen, 2015).

Av figur 5.9 får en inntrykk av at Visteflaket's fyllitt er av relativt stabil og god kvalitet. Q -verdien ligger jevn mellom 2 - 10, og en ser lavere Q -verdi i områder hvor seimiske for-

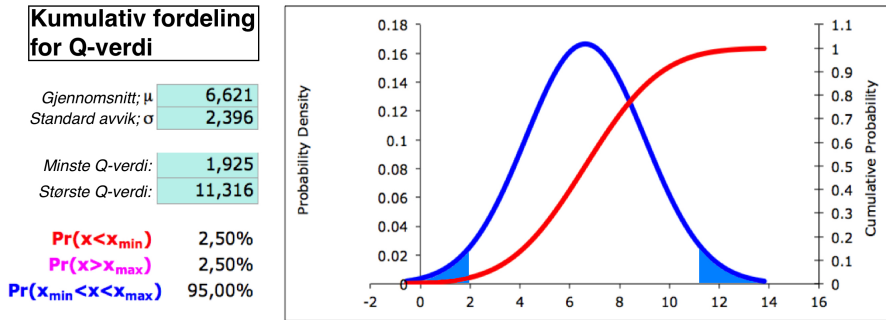
undersøkelser har møtt svakhetssoner. Bergmassekvaliteten ser også ut til å være jevn ved økende overdekning. En har opplevd størsteparten av innlekkasjene under land. Dette har vært tilfelle for undergrunnsanlegg i samme skyvedekket, deriblant IVAR-avløpstunnel og Statpipe-tunnelen (Meisterplass, 2014).

En undersøkelse av sammenhengen mellom innlekkasje og Q-verdi foretas med samme mål for Boknafjorddekkets gneis; å prøve å finne en trend. Dersom det finnes en tydelig trend skal disse distribusjonene kunne skilles fra hverandre. Distribusjonen til Q-verdien er illustrert i figur 5.10 nedenfor.



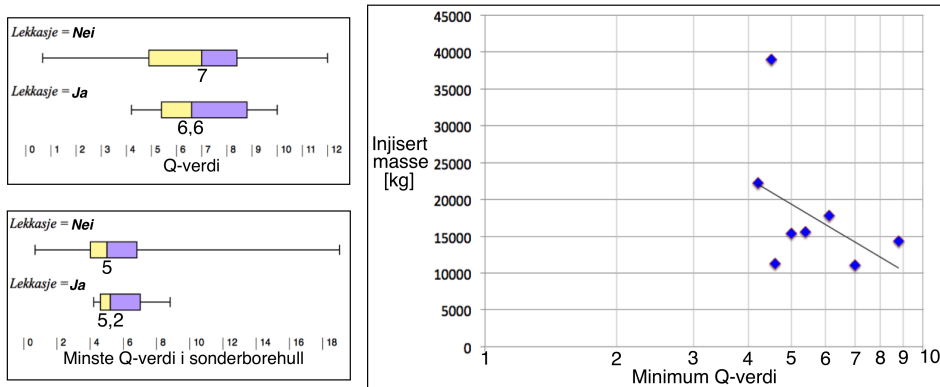
Figur 5.10: Distribusjon av Q-verdi og logaritmisk Q-verdi registrert i Visteflaketts fyllitt (Vegvesen, 2015) og testet for normalfordeling i et Q-Q-plot.

Av figur 5.10 ser en at distribusjonen av Q-verdier i Visteflaketts fyllitt er fra 1 - 11, og viser tendenser til normalt distribusjon. Distribusjonen til logaritmisk Q-verdi er også vist i figur 5.10, men er ikke normalt distribuert. En komulativ fordeling av Q-verdiene er satt opp. Denne er illustrert i figur 5.11 nedenfor, hvor en ser at en kan forvente Q-verdi mellom 1,9 - 11,3 i normal bergmasse gjennom Visteflaketts fyllitt med 95% sikkerhet.



Figur 5.11: Kumulativ fordeling av Q-verdi for Visteflakets fyllitt, hvor Q-verdi intervallet for vanlig bergmasse har 95% sikkerhet

Visteflakets fyllitt har hatt noen innlekkasjer som har krevd injiserings. Disse har kommet under land, i det tunneltraséen passerer under Sandøya. Dette er et område svært konsentrert av svakhetssoner, hvorav lavhastighetssoner og regionale lineament møtes (Meisterplass, 2014). Det var ikke mulig å fastslå hvilke bergmasse som gav lekkasje, da hele den injiserte bergmassen ser ut til å gå gjennom relativt godt berg (Q-verdi fra 4-10). Den laveste Q-verdien per injeksjonslengde undersøkes derfor, og skal gi brukbare resultat (Holmøy, 2008). Dette kan sees i figur 5.12, hvor boksplokk av Q-verdi og minste Q-verdi for injisert og ikke-injisert bergmasse er illustrert ved boksplokk til venstre. Til høyre er minste Q-verdi i logaritmisk skala sammenlignet med krevd injeksjonsmasse, hvor en negativ trend ble funnet.



Figur 5.12: Boksplokk av Q-verdi distribusjonen mhp injisert bergmasse til venstre. Til høyre er forholdet mellom injisert masse og minste Q-verdi illustrert (Vegvesen, 2015)

Fra figur 5.12 kan en se en forskjell mellom injisert og ikke-injisert bergmasse. Boksplokk-

tet til venstre gir et inntrykk av at innlekkasje i fyllitt skjer ved god bergmasse, definert ved Q-verdi fra 4 - 9. Det er sannsynlig at ved dårligere bergmasse vil fyllittens mineralsammensetning gjøre den impermeabel. Grafen til høyre i figur 5.12 viser en trend hvor lavere Q-verdi gir høyere vannlekkasje, ned til et punkt hvor lavere Q-verdi er ved impermeabel bergmasse.

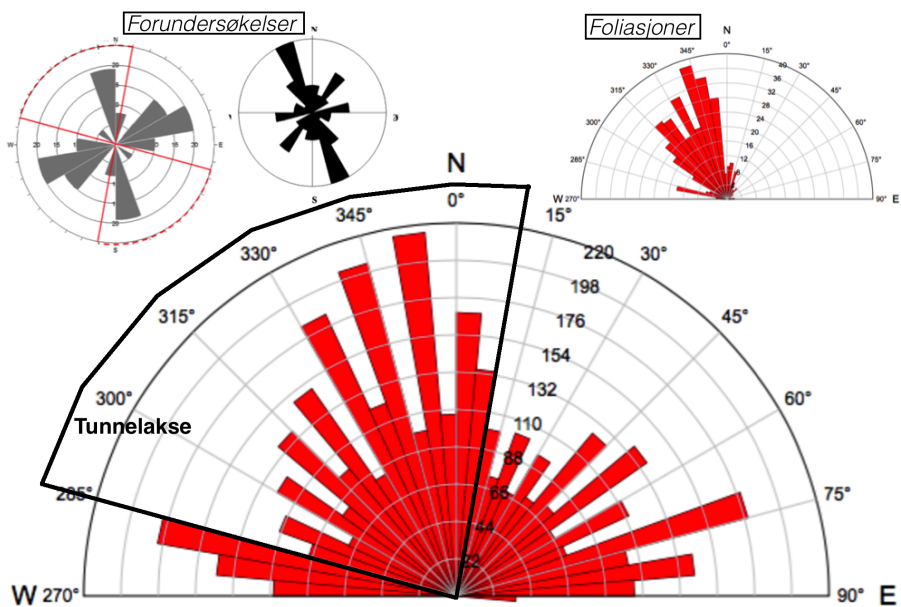
5.4 Storheidekket

Entreprise E02 for Ryfylketunnelen går gjennom Storheidekket fra Solbakk. Her drives tunnelen gjennom en relativt god gneis med lite glimmermineraler i seg og med mindre grad av sprekkefylling enn en har møtt i Boknafjorddekkets gneis.

5.4.1 Sprekkesystemer

Boknafjorddekkets gneis tilhører bergartsklasse B, hvor en forventer å møte kanaldannelse ved sprekkesystemer. Dersom en har et høyt innhold av feltspat vil en forvente høy grad av leirinnhold i sprekkeene, hvorav en renere bergart vil ha mindre sprekkefylling (Klüver and Kveen, 2004; Meisterplass, 2014)

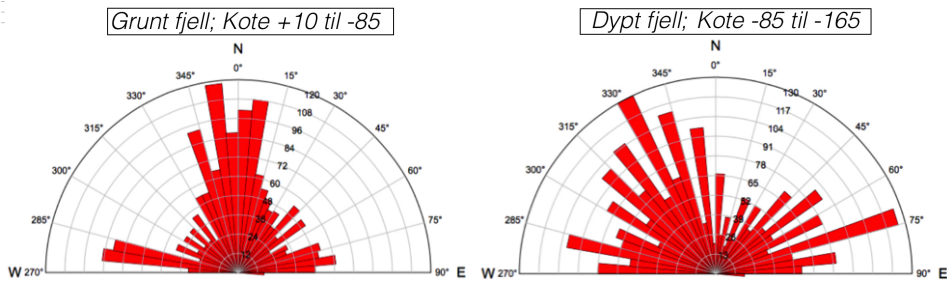
Sprekkekartleggingen er utført subjektivt av kontrollingeniøren på stuff og presentert i en sprekkerose i figur 5.13. All data er hentet fra Novapoint-loggen (Vegvesen, 2015).



Figur 5.13: Sprekkerose fra forfatterens tolkning av sprekkesett i Novapoint-loggen til Storheidekrets gneis til Entreprise E02 på Solbakk (Vegvesen, 2015). Foliasjonen er vist oppe til høyre og er orientert NNV-SSØ. Oppe til venstre er sprekkeroser fra forundersøkelsene vist for sammenligning (Norconsult, 2012b; Multiconsult, 2008, revidert 2009)

Av figur 5.13 ser en to sprekkesett som dominerer. De er orientert NNV-SSØ og Ø-V, hvor retningen har stor grad av variasjon. Foliasjonen i gneisen viser høy grad av kontinuitet og er orientert NNV-SSØ med noe variasjon. I tunnelen har en møtt sprekker orientert i alle retninger. Det kan bety høy grad av oppsprekking og foliasjon i Storheidekrets gneis.

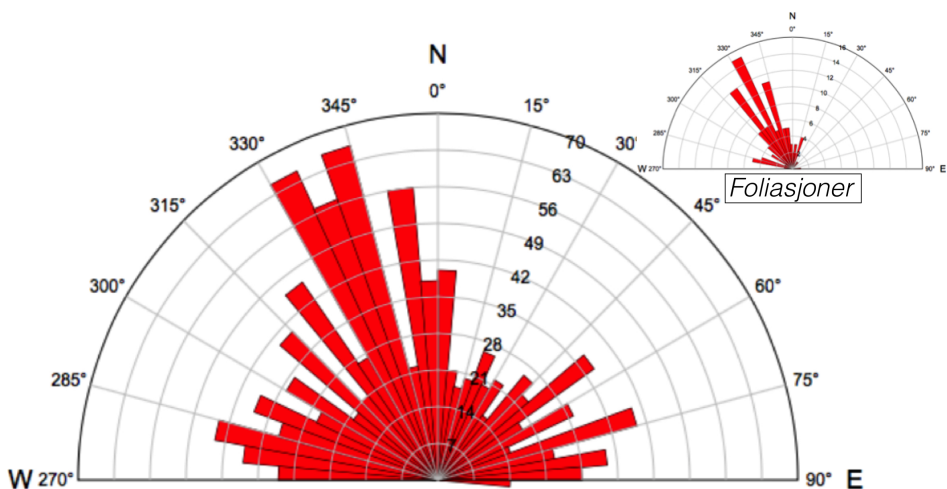
Tunneltraséen gjennom Storheidekker går fra kote +10 til - 290. Naturen til sprekkesettene vil kunne forandre seg ved høyere overdekning. Det gir derfor mening å sammenligne sprekkerosene ved grunt og dypt fjell for den drevne delen av tunnelen. Dette er illustrert i figur 5.14, hvor en ser at sprekkesettet orientert N-S er mindre dominerende i dypet, mens NNV-SSØ og ØNØ-VSV gjør seg mer dominerende i dypt berg.



Figur 5.14: Sprekkerose fra forfatterens tolkning av sprekkesett i Novapoint-loggen til Storheidekkets gneis til Entreprise E02 på Solbakk ved grunt og dypt berg (Vegvesen, 2015)

5.4.2 Sprekkesystemer ved innlekkasje

Storheidekkets gneis er tolket som en ren, god gneis med lite innhold av glimmer- og leirmineraler (Vegvesen, 2015). Dette gjør at en kan forvente høyere innlekkasje og vannstrømning i bergmassen enn hos en glimmer og leirik gneis. Kontinuiteten og sprekkesettenes forhold til hovedspenningen i berget vil derfor påvirke bergmassens vannlednings-evne i stor grad (Meisterplass, 2014). Det er ikke mulig å anslå hvilke sprekkesett som gav vannlekkasje i sonderborehullet. Sprekkesett langs hele den 25 meter lange bergmassen vil derfor bli vurdert med samme tyngde (Holmøy, 2008), og presentert i sprekkerosen i figur 5.15 nedenfor.

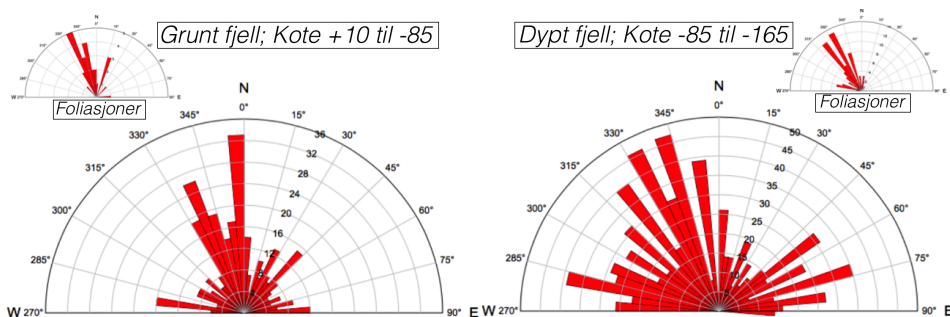


Figur 5.15: Sprekkerose fra injisert bergmasse ved Storheidekkets gneis. Foliasjonen i den injiserte bergmassen er vist oppe til høyre. Data er tatt fra Novapoint-loggen (Vegvesen, 2015).

Figur 5.15 viser to dominerendes sprekkesett, på samme måte som en fant i ikke-injisert

bergmasse fra figur 5.13. Disse er orientert NNV-SSØ og Ø-V. Sprekkesettet orientert NNV-SSØ henger sammen med foliasjonen i bergmassen og viser mindre variasjon enn det samme sprekkesettet for hele tunneltraséen. Sprekkesettet orientert Ø-V har en stor variasjon i orienteringen, på samme måte som en ser for hele tunneltraséen. Siden sprekkesettene fra injisert bergmasse ikke skiller seg ut fra sprekkesett i ikke-injisert bergmasse, er ingen spesiell trend funnet.

På samme måte som delkapittel 5.4.1 beskriver, gir det mening å skille sprekkesystemene med hensyn på kote. Sprekkesystemer for vannførende bergmasse for grunt og dypt berg er vist i figur 5.16.



Figur 5.16: Injiserte sprekkeroser fra forfatterens tolkning av sprekkesett i Novapoint-loggen til Storheidekkets gneis til Entreprise E02 på Solbakk ved grunt og dypt berg (Vegvesen, 2015)

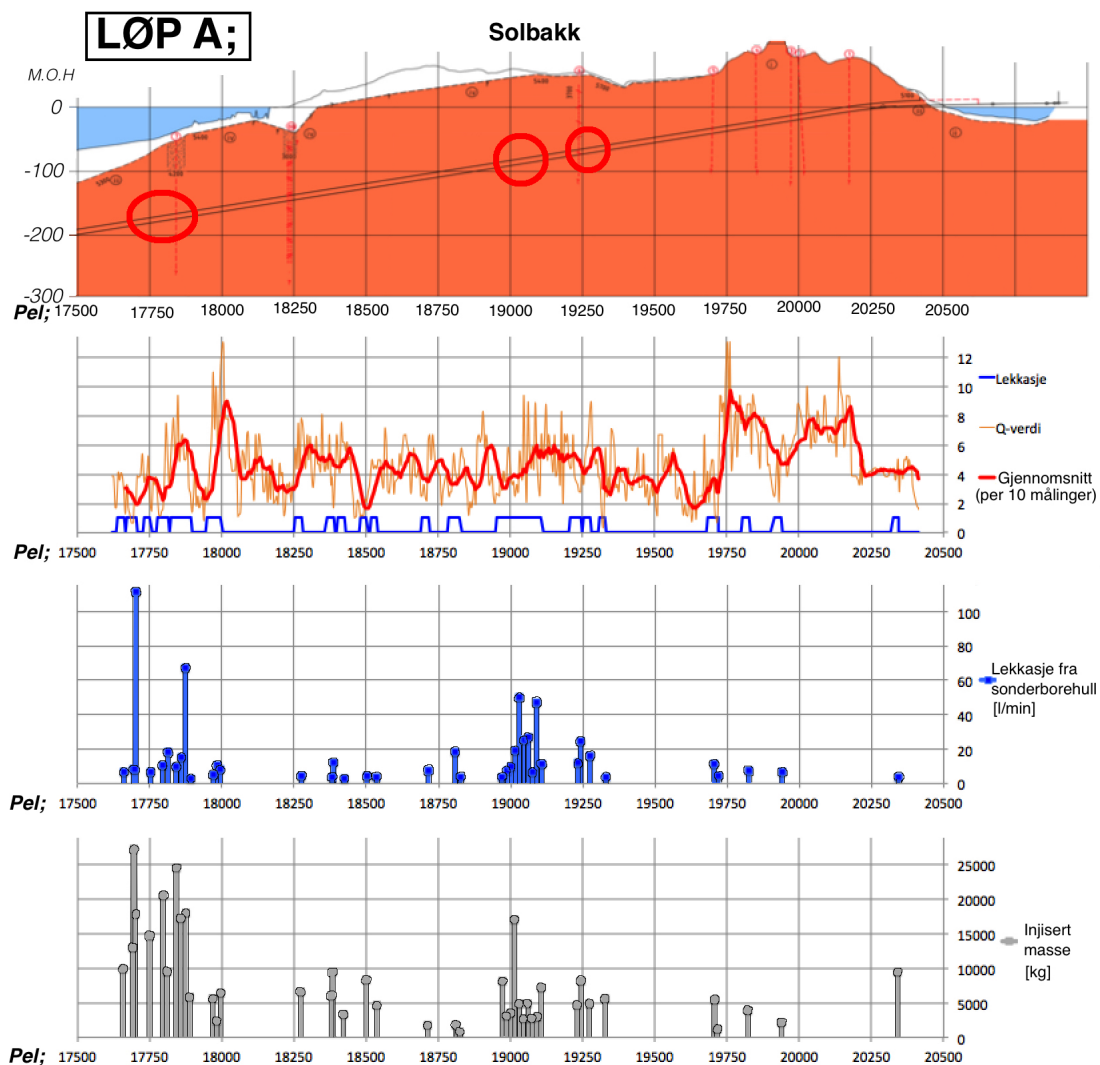
Sprekkesett i injisert bergmasse vist i figur 5.16 fra grunt og dypt fjell er veldig lik sprekkesett fra hele tunneltraséen for grunt og dypt fjell, som en ser i figur 5.14. Vannførende sprekkesett viser derfor ingen spesiell trend som skiller de fra resten av sprekkene i tunnelen.

5.4.3 Bergmassekvalitet ved Q-verdi

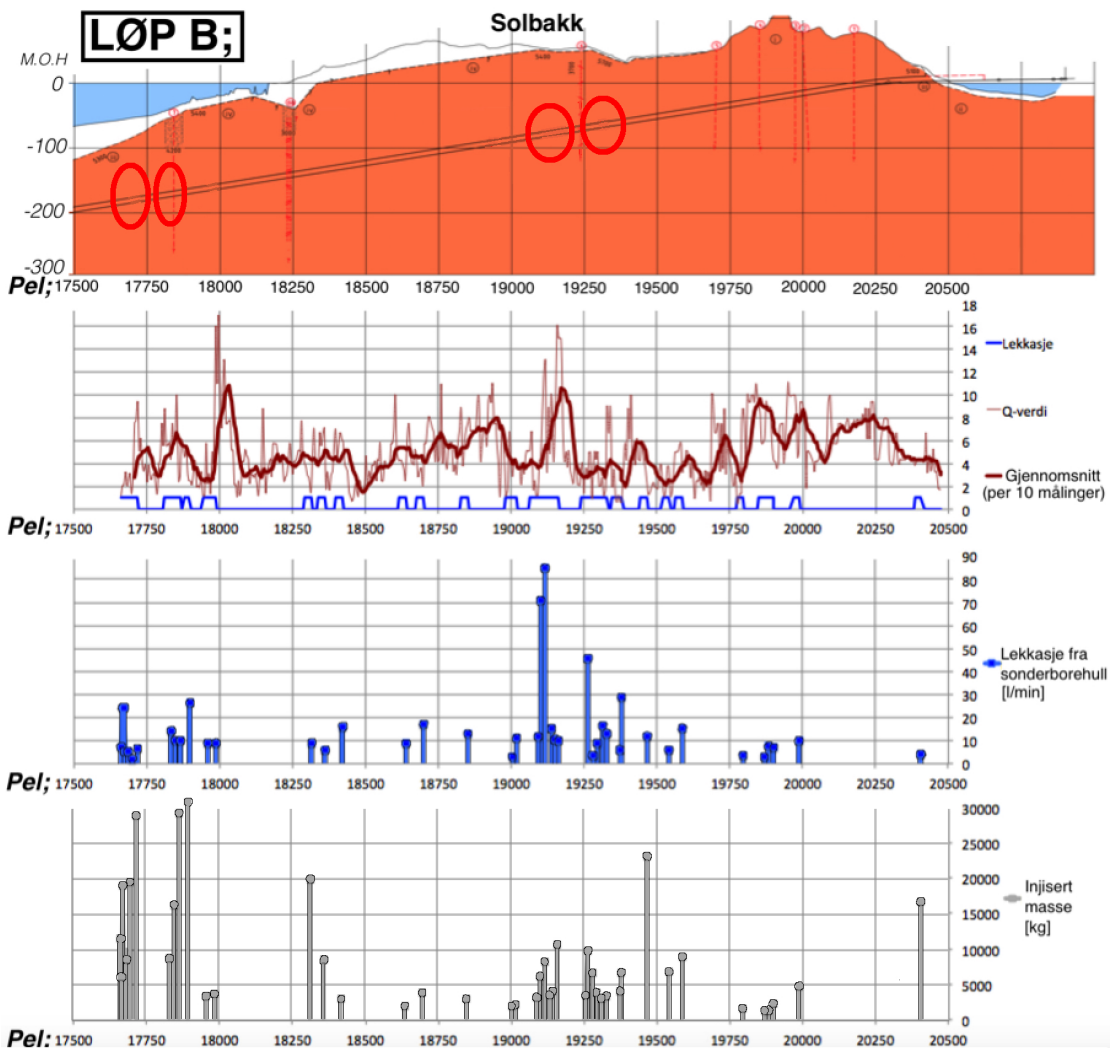
Storheidekkets gneis har så langt vært av bedre kvalitet enn Boknafjorddekket, men har gitt betydelig mer lekkasje. Den rene gneisen har hatt lite sprekketrylling og liten grad av glimmer- og leirminerale i seg, relatert til Boknafjorddekkets gneis. Sprekketryllingene registrert varierer fra uomvandlet sprekketrylling til siltig eller sandig sprekketrylling, med kun et mindretalls sprekkesett hvor leire er registrert (Vegvesen, 2015). Dette er parametre som blir vurdert når Q-verdien blir fastsatt. Det gir derfor mening å studere hvilke Q-verdier en har ved innlekkasjer. For gneisen i Storheidekket er både dr. Holmøys konklusjon om risikoen for innlekkasje er størst innen Q-verdi 0,6-15 (Holmøy, 2008), og SINTEF & COWI sin om at risikoen er størst innen Q-verdi fra 0,1-1,0 relevante (Holmøy et al., 2015-02-02).

Q-verdiene registrert av kontrollingeniørene på stoff for løp A og løp B er illustrert i figur 5.17 og 5.18 nedenfor, respektivt. Q-verdiene er tolket av kontrollingeniørene på stoff for

hver salvelengde. All data presentert i figur 5.17 og 5.18 er hentet fra Novapoint-loggen (Vegvesen, 2015). Merk at frem til pel 18800 ligger Løp A fremfor løp B. Etter pel 18800 er fremdriften relativt lik og stoffene ligger omtrent side ved side. Dette er relevant med hensyn på hvordan injeksjonen i tunnellopene påvirker hverandre.



Figur 5.17: Registrerte Q -verdier under driving for løp A til Storheidekkets gneis. Lekkasje og injisert masse er vist under registrert Q -verdi (Vegvesen, 2015). Profilert er fra forundersøkelsene er produsert i forundersøkelsen (Norconsult, 2012a).



Figur 5.18: Registrerte Q -verdier under driving for løp B til Storheidekkets gneis. Lekkasje og injisert masse er vist under registrert Q -verdi (Vegvesen, 2015). Profilet er fra forundersøkelsene er produsert i forundersøkelsen (Norconsult, 2012a).

Fra figur 5.17 og 5.18 ser en én likhet mellom Q-verdiene til løp A og B, hvor grafen til gjennomsnittet til Q-verdien oppfører seg relativt likt. Når en observerer Q-verdi-grafene kan en observere at en svært stor variasjon innenfor korte avstander er gjennomgående for hele tunneltraseén, sammenlignet med Visteflaket og Boknafjorddekkets registreringer vist i figur 5.4 og 5.9. En ser også to store innlekkasje-områder i Solbakk-stuffen. Disse er markert med røde ringe i profilet i figur 5.17 og 5.18. Detaljer er gitt i listen under (Meisterplass, 2014).

1. Løp A

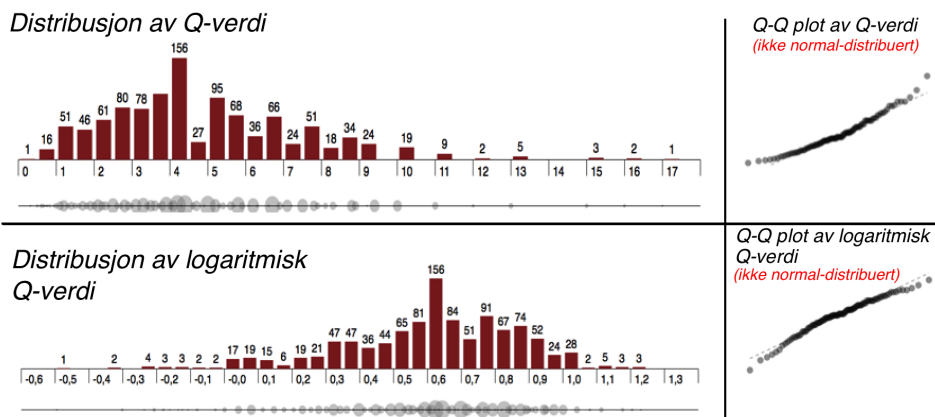
- Pel 17670 - 18000: *Nær svakhetssoner nr. 7; seismisk hastighet 4200 m/s og >25 m bred. Q-verdi fra 0,8-9*
- Pel 18800 - 19150 og 19230 - 19330: *Nær svakhetssoner nr. 6; seismisk hastighet 3700 m/s og 10 m bred. Q-verdi fra 2-9*

1. Løp B

- Pel 17670 - 17730 og 17840 - 17990: *Nær svakhetssoner nr. 7; seismisk hastighet 4200 m/s og >25 m bred. Q-verdi fra 1,2-10*
- Pel 19090 - 19170 og 19260 - 19380: *Nær svakhetssoner nr. 6; seismisk hastighet 3700 m/s og 10 m bred. Q-verdi fra 0,8-16*

Av figur 5.17 og 5.18 ser en at Q-verdi til bergmassen er relativt uforandret ved økende dyp. En kan derfor forvente en lik trend videre i Storheidekkets gneis.

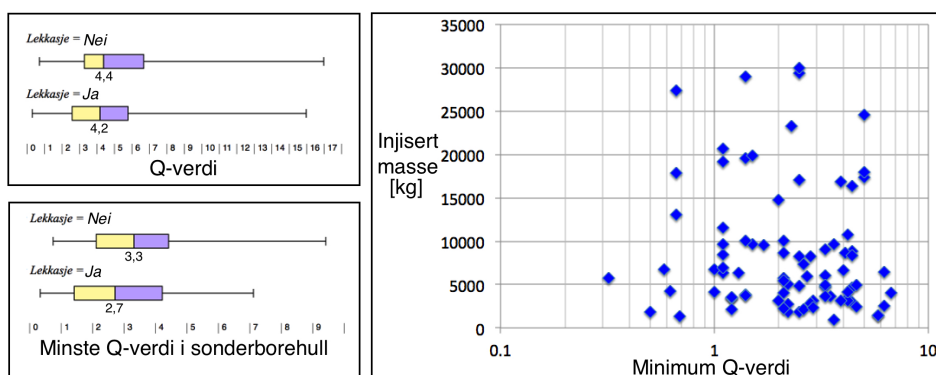
For å undersøke distribusjonen av Q-verdi nærmere testes distribusjonen av Q-verdien mot en normalfordeling og Q-verdiene ved injisert bergmasse testes mot hele den drevne bergmassen. Distribusjonen til Q-verdien for løp A og løp B til Storheidekkets gneis er vist i figur 5.19 nedenfor.



Figur 5.19: *Distribusjon av Q-verdi og logaritmisk Q-verdi registrert i Storheidekkets gneis (Vegvesen, 2015) og testet for normalfordeling i et Q-Q-plot.*

Av figur 5.19 ser en at distribusjonen til verken Q-verdien eller logaritmisk Q-verdi for Storheidekkets gneis er normalfordelt. Sammenlignet med gneisen i Boknafjorddekket har Storheidekkets gneis bedre kvalitet og langt færre soner hvor Q-verdien er lavere enn 1, men også færre soner hvor Q-verdien er over 10.

På samme måte som for Boknafjorddekkets og Visteflakets bergmasse har det ikke vært mulig for forfatteren å bestemme hvor i den injiserte bergmassen innlekkasjen oppstod. Å vurdere den Q-verdien for hvert sonderborehull (25 meter) har tidligere gitt brukbare resultater (Holmøy, 2008), og denne metoden blir anvendt også her. I figur 5.20 er et boksplokk av Q-verdien og minste-Q-verdi i injisert berg og ikke-injisert berg illustrert. Ingen signifikant forskjell ble funnet. Minste Q- verdi i injisert bergart er også sammenlignet med krevd injeksjonsmasse i figur 5.20.



Figur 5.20: Boksplokk av Q-verdi distribusjonen mhp injisert bergmasse for Storheidekkets gneis til venstre. Til høyre er forholdet mellom injisert masse og minste Q-verdi illustrert (Vegvesen, 2015)

Av figur 5.20 ser en relativt liten forskjell mellom injisert og ikke-injisert bergmasse. Det betyr at innlekkasje skjer i bergmasse med høy Q-verdi så vel som bergmasse med lav Q-verdi. Til høyre i figur 5.20 ser en imidlertid en trend til at bergmasse med Q-verdi fra 0,7-5 oftes gir krevende vannlekkasjer. Tilsynelatende vil høyere Q-verdi gi vannlekkasjer som krever mindre injeksjon, og lavere Q-verdi gir sjelden vannlekkasje.

5.5 Oppsummering

Ved å studere erfaringsdata fra den drevne delen av tunnelen får en informasjon om hvordan oppsprekningen er, hvilke sprekesett som har gitt vannlekkasje og hvilken bergmassekvalitet en har møtt. Det gir også et bilde på hvordan overflatetopografien, løsmassedekket og registrerte lavhastighetssoner påvirker berget rundt tunneltraséen. Til sammen gir det en indikasjon på hvilke forhold en vil møte senere.

5.5.1 Boknafjorddekket

For Boknafjorddekkets gneis er sprekkesettene kontinuerlige, orientert normalt på hverandre og orientert NØ-SV og NV-SØ, hvorav foliasjonen hadde svært lite variasjon og var orientert NØ-SV. Dette var også sprekkesystemene en hadde innlekkasjer i.

Boknafjorddekkets gneis møtte mange svakhetssoner og bergmassekvaliteten ved Q-verdi var ofte dårlig (under 4). Det er sannsynlig å ha sammenheng med tunneltraséens lave bergmasseoverdekning. Mangel på innlekkasjer gjennom disse sonene tyder på impermeable sprekkesystemer i gneisen. Ved den ene innlekkasje bar bergmassen preg av å gå gjennom distal sone, nær heng i oppknusningssone før en brå bergartsgrensen. Dette er egenskaper som gjør den ekstremt utsatt for innlekkasjer (Braathen and Gabrielsen, 2000; Klüver and Kveen, 2004; Holmøy, 2008; Meisterplass, 2014).

Fra erfaringsdata kan en anslå at Boknafjorddekkets gneis er relativ motstandsdyktig mot innlekkasjer, på tross av dårlig bergmasse og høy oppsprekking.

5.5.2 Visteflaket

For Visteflaket's fyllitt er sprekkesettene kontinuerlige, men med høy grad av variasjon innenfor orienteringen. Sprekkesettene var orientert NV-SØ og NØ-SV, i likhet med Boknafjordgneisen. Folieringen var også orientert på denne måten, hvorav folieringsretningen NV-SØ dominerte. Fra innlekkasjene i Visteflaket ser en en tydelig trend til utbredelsen av foliasjonen og hvilke sprekkesett som har gitt vannlekkasje, og en god likhet til hele tunnelens sprekkesystemer.

På tross av berg med høy konsentrasjon av svakhetssoner og regionale lineament har fyllittens bergmasse og Q-verdi vært svært god. Bergartsgrensen fra Boknafjorddekket gav svært dårlig bergmasse i lang tid (Q-verdi fra 0,5-4) uten vannlekkasje, men etter det har Q-verdien vært stabilt høy (mellom 2-12). Innlekkasje skjedde i god bergmasse, hvor erfaringsdata gav inntrykk av at Q-verdi under 4 gir impermeabel bergmasse og at laveste Q-verdi før dette gir mest krevende innlekkasjer. Innlekkasjene fant også sted under bart fjell, noe som entreprenørene på stuff forventet (Vegvesen, 2015). Dette er trender en har sett i fyllitt før (Meisterplass, 2014).

Fra erfaringsdata kan en forvente uforutsette lekkasjer i god fyllitt, mens svakhetssoner og oppknust fyllitt erfaringsmessig vil ha impermeable egenskaper.

5.5.3 Storheidekket

For Storheidekkets gneis er sprekkesettene flytende og med høy grad av variasjon. I grunt fjell er settene orientert N-S og Ø-V, hvorav ved dypere fjell går trenden mot NNV-SSØ og ØNØ-VSV. Det er mulig at sprekkesystemet vil bli mer og mer likt det en møter i Boknafjorddekkets gneis ned mot bergartsovergangen mellom disse to gneisene. Foliasjonen til

Storheidekkets gneis viser høy grad av kontinuitet og noen grad av variasjon i retning. Foliasjonens orietering dreier mot vest nedover i dypet, og mot foliasjonsretningen en har i Boknafjordgneisen.

Sammenlignet med Boknafjorddekkets gneis har en hatt bedre bergmassekvalitet ved registrerte Q-verdier i Storheidekkets gneis, men med større variasjon over korte avstander og mange svakhetssoner hvor Q-verdien har vært lavere enn 1. Storheidekkets gneis har også hatt innlekkasjer jevnt over hele tunneltraséen. En har møtt to konsentrerte og krevende innlekkasjerområder, en under land og en under sjø. Hvorav Q-verdier fra 0,6-3 har gitt de mest krevende innlekkasjene. Bergmasse av dårligere kvalitet er oftest impermeabel, og bergmasse av høyere kvalitet har oftest mindre krevende innlekkasjer. Det er ikke funnet noen tydelig trend mellom erfaringsdata og innlekkasjer.

Bergmassekvaliteten ved Q-verdi vil derfor ikke være en sentral parameter i en prognose for om en møter vannlekkasje i Storheidekket, men kan være bestemmende for hvor stor vannlekkasje en møter og hvor mye injeksjon som kreves for å tette berget.

Kapittel 6

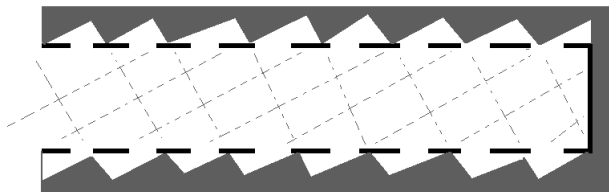
Feltstudie og laboratoriumundersøkelser

6.1 Forfatterens observasjoner

Den 4. februar 2015 drog forfatteren på tredagers befaring i Ryfylketunnelen. Under befaring ble stoffen fra Hundvåg og Solbakk besøkt og erfaringer fra arbeidere ble utvekslet. Mesteparten av tunneltraséen var sperret av for sivile og dekket av sprøytebetong, så visuelle undersøkelser og prøvetaking av bergartene ble i hovedsak utført på bergblotninger utenfor tunnelen, ved stoff eller ved bergblotninger uten sprøytebetong i portene mellom de to tunnellopene.

6.1.1 Hundvågstoffet

Hundvågtraséen starter i Boknafjorddekkets gneis. Denne gneisen viste tydelige og gjennomgående sprekkesett som kunne sees som tydelige hakk i tunnelen. Dette er illustrert i figur 6.1 nedenfor, hvor en ser hvordan sprekkesettene former tunneltraéen rundt den planlagte traséen i sort.



Figur 6.1: Illustrering av hvordan gneisens sprekkesett påvirker Hundvågtraséen, sett ovenifra

Entreprenøren på Hundvåg beskrev gneisen som 'dårlig' og vanskelig å drive gjennom. Gneisen var heller ikke av god nok kvalitet til å nyttes som tilslag i tunnelen på grunn av høyt innhold av glimmer. Dette kan sees i bilde i figur 6.2 av gneisen ved tunnelinngang.



Figur 6.2: *Bilde av gneisen ved Hundvåg tunnelinngang*

Av bilde i figur 6.2 kan en se en av de to dominerende sprekkesettet orientert NØ-SV. En kan også se glimmer oppe til venstre i bildet, hvor sprøytebetongen ikke har klart å feste seg til berget. En også observere en helt mørk sprekkedylling som går igjen i sprekken nederst mot venstre. Denne er vasket vekk av reinvær øverst i sprekken, men finnes enda helt nede på bildet.

Omtrent ved pel 7000 går tunneltraseen gjennom en markert bergartsgrense og går inn i Visteflakets fyllitt. Fyllitten er beskrevet av entreprenørene på stuff som kvartsrik og av god kvalitet. Undersøkelse av fyllitten ble utført i ene porten mellom tunnellopene omtrent ved pel 7200. Fyllitten er mørk i fargen og ved pel 7200 klassifiserte forfatter og veileder fyllitten som rik på grafitt basert på visuelle tolkninger. To bilder fra fyllitten er vist i figur 6.3



Figur 6.3: *Bilde av fylltitten ved Hundvåg tunneltrasé. Bildet til venstre er fra stuff ved pel 8115 (bolt oppe til høyre for skalering). Bilde til høyre er fra porten mellom tunnellopene ved pel 7200*

Av bildene i figur 6.3 kan en observere fylltitten som en mørk fyllitt. En ser tydelig folieringen ved glimmerlagene og variasjonen innad i sprekkesettene. På bilde til venstre kan en se injiseringssementen med gul farge. Sementen følger sprekkesettet orientert NØ-SV. En kan også se små kvartslag i hvit på stuff i bildet til venstre. I bildet til venstre ser en et nærbilde av fylltitten. Det ble her funnet grafitt mellom sprekkene, basert på in-situ vurderinger av veileder og forfatter. En møtte også litt vandrypp over hele traséen gjennom fylltitten. Fylltitten er rik på mørke mineraler som entreprenøren beskriver som dårlige mineraler, på tross av fylltittens gode kvalitet. GSI-verdi av fylltitten ble vurdert til å være omtrent 25, basert på in-situ tolkning.

6.1.2 Solbakkstuppen

Solbakktraséen går i skrivende stund bare gjennom Storheidekkets gneis. Denne gneisen er av god kvalitet og har tydelig lagdelinger mellom mineralene. Entreprenøren beskriver gneisen som solid og god å drive gjennom, men med høy innlekkasje. Et bilde av solbakkstuppen og gneisen en møter er vist i figur 6.4.



Figur 6.4: *Bilde av gneisen ved Solbakk tunneltrasé. Bildet til venstre er fra stuff ved pel 17757. Bilde til høyre er fra en gneisblokk på ca 1 kubikk fra Solbakkstuffen.*

Av bilde til venstre i figur 6.4 kan en se at den mest dominerende sprekkesettet sett fra stuff er horisontalt og viser ikke tegn til å være vannførende. To vertikale sprekkesett orientert omtrent NØ-SV og NV-SØ ble også observert på stuff, hvor en så tegn til vannføring i disse. I bildet til høyre ser en et bilde av gneisen. En ser god lagdeling mellom de mørke og lyse mineralene. Gneisen gir inntrykk av å være massiv og svært ren med lavt innhold av glimmer.

Under befaring på entrepriser E03 på Solbakk ble det nevnt at entreprenørene har hatt problemer med injeksjonsarbeidet. Svært små mengder injeksjonsmasse ble brukt for hver injeksjonsrunde i begynnelsen av drivefasen. Det ble stilt spørsmål til hvorvidt disse injeksjonene var vellykkede, og om en annen injeksjonsstrategi kunne tettet bergmassen mer effektivt.

6.2 Laboratorieundersøkelser

I samband med potensialet for innlekkasje i Ryfylketunnelen er noen relevante laboratorieundersøkelser utført. Innlekkasje i norsk bergart er i stor grad avhengig av egenskapene til sprekkesystemet gav det mening å undersøke sprekke materialelts svelleegenskaper. Der som det har svelleegenskaper vil det kunne hindre vannets strømming gjennom sprekkesettene (Klüver and Kveen, 2004; Meisterplass, 2014).

Det har også vært relevant å finne ut av mineralsammensetningen til bergartene. Tilstedeværelsen av feltspat, og da spesielt alkaliefeltspat, i gneis er interessant da feltspatmineralen kan omdannes til svellende leirmineraler (Nilsen and Broch, 2011). Mengden kvarts og kvartsitt i fyllitt er også av interesse da kvartslinser i fyllitten erfaringsmessig ofte er vannførende (Klüver and Kveen, 2004; Meisterplass, 2014).

Å bygge en spenningsanalytisk modell ble vurdert som lite interessant og er derfor ikke

utført. Usikkerhetene i hvilke variabler som er relevante for innlekkasje, hyppig endring i bergspenninger over korte avstander, mangel på sikre spenningsmålinger i området og relativt grunt berganlegg ville gitt denne analysen svært høy usikkerhet (Meisterplass, 2014; Holmøy et al., 2015-02-02). Av samme grunn er det ikke utført mekanisk testing av bergartene. Det ble vurdert mer relevant for Ryfylketunnelen å studere ingeniørgeologiens påvirkning på innlekkasjer individuelt.

Laboratorieundersøkelsene er utført ved Institutt for geologi og bergteknikk under veiledning av laboratorieansatte ved NTNU og SINTEF. De to undersøkelsene er testing av leires svelleegenskaper og XRD-analyse. Disse er ansett som kjente og pålitlige tester. Testene utført er vist i tabell 6.1 under.

Tabell 6.1: Oversikt over laboratorieundersøkelser. Prøve A-D er utført av forfatter, mens de resterende er utført av SINTEF på oppdrag for Ryfylketunnelen (Vegvesen, 2015)

ID	Pel	Bergart	Ønsket informasjon	Utførte undersøkelser
Prøve A	6279	Glimmerrik gneis	Svelleegenskaper Mineralsammensetning	Fri svelling og XRD-analyse
Prøve B	6835	Glimmerrik gneis	Svelleegenskaper Mineralsammensetning	Fri svelling og XRD-analyse
Prøve C	8115	Fyllitt	Svelleegenskaper Mineralsammensetning	Fri svelling og XRD-analyse
Prøve D	17757	Gneis	Svelleegenskaper Mineralsammensetning	XRD-analyse
Prøve 14005IG	19783	Gneis	Svelleegenskaper	Svelletrykksmåling ved SINTEF
Prøve 14011IG	19709	Gneis	Svelleegenskaper	Svelletrykksmåling ved SINTEF
Prøve 14061IG	18812	Gneis	Svelleegenskaper	Fri svelling og svelletrykksmåling ved SINTEF
Prøve 14072IG	18492	Gneis	Svelleegenskaper	Fri svelling og svelletrykksmåling ved SINTEF

6.2.1 Svelleegenskaper

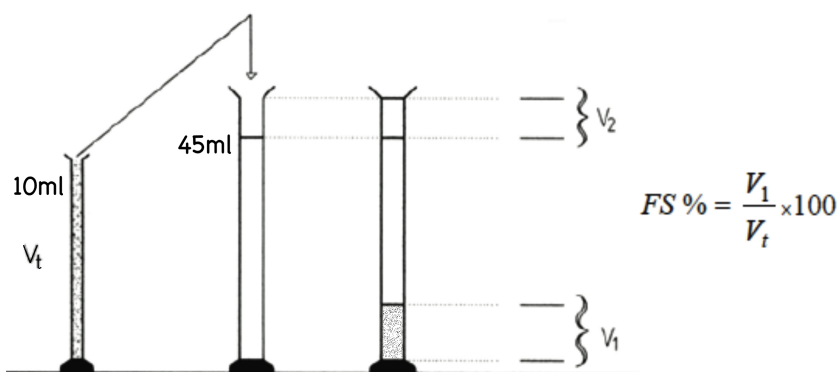
Svelling er en tidsavhengig volumutvidelse av mineraler ved en fysisk-kjemisk reaksjon med vann (Stefanus, 1999). De vanligste svellemineralene i Norge er smektitt og montmorillitt. Disse mineralene er et resultat av omvandlet feltspat i bergmassen (Nilsen and Broch, 2011).

Det er ofte vanskelig å utføre en kvantitativ bestemmelse av finkornig sleppematerial in situ (Nilsen and Broch, 2011), noe som gjør klassifisering av sleppematerial i laboratorie viktig. Sleppematerialets svelleegenskaper er svært sentralt mhp. bestemmelse av permanente sikringsmiddel, men er også nyttig ved vurdering av innlekkasjepotensial (Vegvesen, 2005). Svelleleire er ofte tett og kan gjøre sprekkene impermeable (Nilsen, 2014-2015).

Svelleprøvene prepareres ved å skille ut partikler større enn 20 um. Dette foregår ved oppslemming av prøvematerialet for så dispergering av partikler mindre enn 20 um ved

Navier-Stokes teorem. Deretter avslemmes væsken med nevnte partikler, væsken tørkes og partiklene finnales ved en porselensmølle (Sørløkk et al., 2007). Svelling testes på to måter; frisvelling og svelletrykkmåling.

Frisvelling testes ved å la den tørre leirfraksjonen innta et volum ved å svulle fritt i vann ved sedimentasjon. Tallet for fri svelling, FS, uttrykkes i prosent av det tørre leirfraksjonsvolumet på 10 ml (Vegvesen, 2005). En prinsippskisse er vist i figur 6.5. Test av frisvelling ble utført under veiledning av Gunnar Vistnes.



Figur 6.5: Prinsippskisse av testing av frisvelling (Vegvesen, 2005)

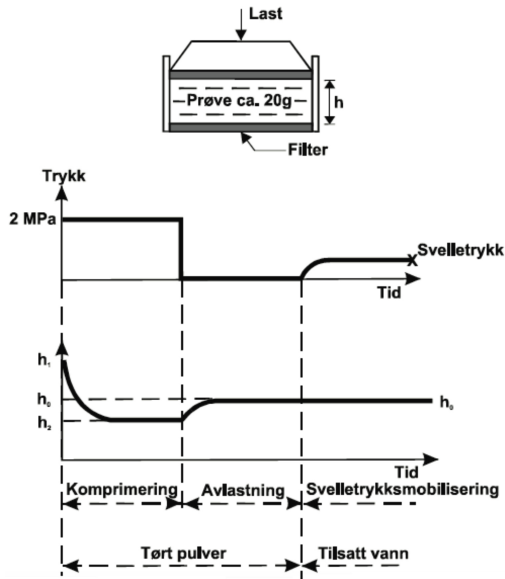
Hvilken grad av aktivitet en kan forvente ut av resultatene på frisvellingen er klassifisert i tabell 6.2 (SINTEF, 2005). I norske, inaktiv leire er frisvelling på 40-70 % vanlig. Aktiv norske svelleleire har normalt en frisvelling fra 100-200 %, og ved ekstreme tilfeller kan en møte frisvelling opp mot 400% (Nilsen and Broch, 2011).

Tabell 6.2: Klassifisering av svelleegenskapens aktivitet basert på fri svelling (SINTEF, 2005)

Klassifisering	Fri svelling [%]
Inaktiv	< 80 %
Lite aktiv	80 - 120
Middels aktiv	120 - 150
Aktiv	> 150

Svelletrykkmåling testes ved et ødometer, hvor målet er å simulere forholdene leirmaterialet opplever in-situ. Ødometeret påfører leirmaterialet 2 MPa trykk over 24 timer for å simulere forholdene i massivt berg. Så avlastes prøven i 2-3 timer for å simulere forholdene ved driving gjennom sprekkesystemene med leirmaterialet. Prøven har i dette tidsrommet mulighet for elastisk utviding på 0,5-1 mm av prøvhøyden. Til slutt plasseres prøven i et

ødometer, destillert vann tilføres og volumet holdes konstant. Svelletrykkmålingen måles og registreres (Nilsen and Broch, 2011). En prinsippskisse er vist i figur 6.6 nedenfor:



Figur 6.6: Prinsippskisse for testing av svelletrykk ved konstant volum (Nilsen and Broch, 2011)

Hvilken grad av aktivitet en kan forvente av resultatene fra svelletrykkstesten er klassifisert i tabell 6.3, foreslått av Norsk Bergmekanikkgruppe (NBG, 2000).

Tabell 6.3: Klassifisering av fri svelling og svelletrykk iht. NBG (NBG, 2000)

Klassifisering	Fri svelling [%]	Svelletrykk [Mpa]
Lav	< 100	< 0,10
Middels	100 - 140	0,10 - 0,30
Høy	140 - 200	0,30 - 0,75
Meget høy	> 200	> 0,75

Resultatene fra svellestesting er vist i tabell 6.4, hvor prøve A og B er fra Boknafjorddekkets gneis, prøve C er fra Visteflaketts fyllitt og de resterende prøvene er fra Storheidekkets gneis.

Tabell 6.4: Resultater fra svelletesting

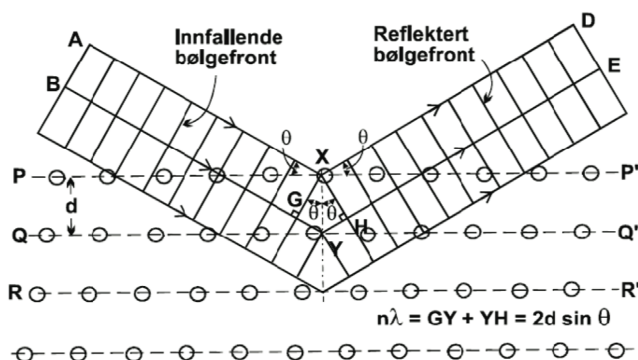
Prøve	Material < 20 µm	Fri svelling	Høyeste svelletrykk
A	X	230 og 220 %	-
B	X	130%	-
C	X	100%	-
14005IG	9%	-	0,81
14011IG	9%	-	0,94
14061IG	20%	209%	0,81
14072IG	28%	336%	1,74

Fra resultatene av svelletesting i tabell 6.4 ser en at det er påvist svelleleire i sleppematerial fra både Boknafjorddekkets og Storheiddekkets sleppematerial, hvor Storheiddekkets sleppematerial har påvist svelleegenskaper ved 4/4 undersøkelser. Boknafjorddekkets sleppematerialer hadde svellende egenskaper nær overflaten, mens prøven i dypere bergart var lite aktiv. Visteflakets sleppematerial hadde ikke svellende egenskaper.

6.2.2 Mineralsammensetning ved XRD-analyse

For å bestemme mineralsammensetningen har det blitt utført en røntgendiffraksjon av bergartsprøver tatt av forfatter i Ryfylketunnelen.

Røntgendiffraksjon, referert til som XRD-analyse, bestemmer ulike element i prøvematerial kvalitativt og semikvantitativ. XRD-analysen baseres på at alle mineralkrystallene har unik tredimensjonal struktur. Disse krystallene opptrer derav som en serie av parallelle plan i ulike retninger, med avstand 'd'. Avstand 'd' varierer for ulike krystallstrukturer, som fører til varierende refleksjonsvinkel av røntgenstrålen. Denne vinkelen, og intensiteten på den reflekterte strålen, registreres og tolkes for å identifisere mineralet og kvantiteten. Ved en suksessfull analyse kreves det at bølgelengden, λ , på den innkommende strålen er tilnærmet lik avstanden 'd' mellom de parallelle planene i krystallstrukturen. Vinkelen, θ , på den innkommende strålen må også oppfylle Briggs lov (Thornhill, 1999). Dette er illustrert i figur 6.7 nedenfor.



Figur 6.7: Prinsippskisse på hvordan strålingen reflekteres i XRD-analyse, beskrivd ved Briggs lov (Nilsen, 2008)

XRD-analyse ved NTNU og SINTEF utføres på bergmateriale med kornstørrelse på < 20 mikrometer, hvorav den kan utføres på kornstørrelser ned til 5-10 mikrometer (Thornhill, 1999). En vil få bedre statistikk desto mindre kornstørrelser en har, helt til en når minstegrensa for hva XRD-analysen klarer å registrere. Kystallstrukturen går ved denne grensen over til å bli amorf og vil registreres som bakgrunnsstøy (Hatlenes, 2011). XRD-analysen har også en nedre deteksjonsgrense på 2000 ppm., hvorav mineraler av lavere forekomst ikke vil bli oppdaget. Dette kan overkommes med en XRF-analyse som har en lavere deteksjonsgrense om nødvendig (Thornhill, 1999).

XRD-analysen for mineralsammensetning har blitt utført ved EM-laboratoriet ved Institutt for geologi og bergmekanikk, NTNU, under ledelse av overingeniør Laurentius Tjihuis. Resultatene fra analysen er vist i tabell 6.5 nedenfor. De nøyaktige resultatene er vist i vedlegg 4.

Tabell 6.5: XRD-analysens resultater for de fire prøvene

Hovedgruppe	Mineral	Prøve A		Prøve B		Prøve C		Prøve D
		A > 20 um	A < 20 um	B > 20 um	B < 20 um	C > 20 um	C < 20 um	D > 20 um
	Kvarts	43,58%	19,61%	48,60%	4,12%	32,48%	11,37%	32,53%
	Glimmer	5,48%	28,36%	8,39%	14,18%	39,74%	59,86%	2,13%
	Plagioklas	35,20%	11,80%	23,90%	4,30%	11,61%	11,16%	41,82%
	Kalifeltspat					0,35%	0,13%	23,48%
	Pyroksen	1,60%	5,79%	1,83%	3,55%	1,84%	2,58%	
	Kalsitt	2,47%		3,77%		0,85%		0,04%
	Kaolinit		12,90%	12,91%	71,64%			
	Kloritt	2,00%	20,05%			13,11%	14,91%	
	Sorosilikat	9,16%	1,50%		2,22%			
	Sulfid	0,51%		0,60%				

Fra tabell 6.5 ser en klare likheter i mineralsammensetningen til prøve A og B. Disse er begge fra Boknafjorddekkets gneis, men med 750 meters avstand. De er begge tatt fra sleppematerial i sprekker under driving av ingeniørgeolog på stoff og ble presentert til

forfatteren for testing. Prøve C er tatt fra sleppematerial fra Visteflakets fyllitt i heng på Hundvågstuppen av forfatter. Prøve D er tatt fra Storheidekkets gneis på Solbakkstuppen av forfatter. Det vart ikke funnet tilstrekkelig mengde kornstørrelse under 20 um i prøve D til å testes.

- **Prøve A;**

- Kornstørrelse > 20 um viser en dominerende mineralsammensetning som er vanlig for gneis, hvor kvarts og albitt dominerer. Epidot er også et dominerende mineral. Mineralsammensetningen er svært varierende, som tyder på en 'uren' gneis.
- Kornstørrelse < 20 um viser en dominerende mineralsammensetning som er vanlig for gneis, hvorav en har et relativt høyt innhold av glimmer og kloritt i de minste kornene. Disse to mineralene opptre ofte flakete og med en sjiktgitterstruktur, hvorav glimmer er mer elastisk. Høy variasjon i mineralsammensetning tyder også på 'uren' gneis.

- **Prøve B;**

- Kornstørrelse > 20 um viser også en lik mineralsammensetning som prøve A, med unntak av kaolinitt i stedet for kloritt og epidot. Kaolinitt er et leirmineral med flakete egenskaper. Dette er tein på en 'uren' og flakete gneis.
- Kornstørrelse < 20 um er dominert av kaolinitt. Dette leirmineralet er ikke kjent for å ha svellende egenskaper, men har flakete struktur med stor overflateareal og tettende egenskaper.

- **Prøve C;**

- Kornstørrelse > 20 um viser en bergart dominert av kvarts og glimmer (muskovitt), som er vanlig for fyllitt. Den har også feltspat (mikroklin), kloritt og pyritt i seg, som er vanlig å finne i fyllitt. Det var også funnet diposid og kalsitt i fyllitten, som er mer uvanlig og tyder på en noe 'uren' fyllitt.
- Kornstørrelse < 20 um er svært lik de større kornene, men mer dominert av glimmer ved muskovitt.

- **Prøve D;**

- Kornstørrelse > 20 um viser en mineralsammensetning til en 'ren' gneis, med lite glimmermineral og høyt innhold (65,30%) feltspatmineraler.

6.3 Oppsummering

Boknafjorddekkets sleppematerial opplevde svellende egenskaper i ene sleppematerialet vist i prøve A, men liten svelleaktivitet i prøve B. Variasjonen kan henge sammen med variasjonen en ser i mineralsammensetningen fra XRD-analysen, hvor prøva A har større innhold av feltspatmineraler. Resultatene fra laboratorieundersøkelsene beskriver Boknafjorddekkets gneis som uren, rik på glimmer og flakete mineraler, men fattig på feltspatmineraler sammenlignet med Storheiddekkets gneis. Sprekkesettene kan forventes å ha varierende svellende egenskaper og liten permeabilitet pga- høyt innhold av flakete mineraler.

Visteflakets sleppematerialer viste ikke svellende egenskaper. XRD-analysen viser at også fyllitten har et stor mangfold av mineraler og kan skildres som 'uren'. Innholdet av kvarts er høyt, med det er de flakete mineralene som dominerer med glimmer og kloritt. Resultatene fra laboratorieundersøkelsene indikerer en kvartsrik fyllitt hvor det er sannsynlig at kvartslinser oppstår, men den størsteparten av fyllitten vil ha impermeable egenskaper pga høyt innhold av flakete mineraler.

Storheiddekkets sleppematerialer opplevde høy grad av svellende egenskaper, samt i 4/4 forskjellige prøver. Det er sannsynlig at den høye andelen av feltspatmineralen i Storheiddekkets gneis er blitt omdannes til svellende leirmineraler. Fra XRD-analysen ser en at Storheiddekkets gneis er en svært 'ren' gneis med et lite innhold av glimmer og flakmineraler. Resultatene fra laboratorieundersøkelsene indikerer at sprekkesettene permeabilitet i stor grad er avhengig av tilstedeværelsen av svelleleire. Dersom en har sprekkesett uten leire er det sannsynlig at den har god permeabilitet pga mangel på tettende glimmer og flakmineraler.

Prognose for innlekkasje og injeksjon

7.1 Begrunnelse for valg av metode

Prognosen deles inn i tre klasser; klasse 1, 2 og 3. En høyere grad av nøyaktighet og detaljert prognose anses som ikke praktisk mulig. Disse klassene er inndelt med bergmassekvalitet som hovedvariabel og beskrivd i tabell 7.1 nedenfor. Det skilles også mellom forventet stor, middels, liten eller ingen lekkasje sammen med hvor krevende injeksjonsarbeidet forventes å være. Det må også nevnes at liten innlekkasje ikke nødvendigvis krever injeksjon av bergmassen.

Grad av innlekkasje og injeksjonsbehov baseres i hovedsak på erfaringsdata fra drevet delen av Ryfylketunnelen, som presentert i kapittel 5. Samtidig vurderes erfaringer fra sammenlignbare berganlegg fra prosjektoppgaven, presentert i kapittel 3.2, og generelle erfaringer med hensyn på strukturgeologien, bergspenning, bergart, og resten av variablene presentert i kapittel 3.1 og 4. Eksempelvis kan en forvente jevn innlekkasje gjennom tunneltraséen til Storheidekket uten at all bergmasse krever injisering.

Som følge av at svakhetssonene består av forskjellige oppsprekkingssoner med forskjellig grad av oppknusning og sprekkeegenskaper gir det mening å skille mellom injeksjonskravene og innlekkasjene en møter i de forskjellige sonene. Disse sonene er detaljert beskrivd som A, B, C, D og E-soner i kapittel 3.1. For praktiske formål blir inndelingen av svakhetssonene forenklet og generalisert etter denne modellen.

Tabell 7.1: Injeksjonsklasser med hensyn på bergkvalitet (Holmøy et al., 2015-02-02) og oppsprekingszone fra figur 3.3

Klasse	Bergmassekvalitet	Injeksjonsstrategi
1	Q-verdi > 4 Oppsprekingszone E	Systematisk sonderboring Forinjeksjon etter krav ved geoteknisk kategori 3 (> 3 l/min fra ett sonerborehull eller 5 l/min fra alle) Industrisement er forventet å være tilfredsstillende som injeksjonsmasse. Injeksjonsskjerm med 20-30 hull på 18-24 meter.
2	4 > Q-verdi > 1 Oppsprekingszone C og D	Systematisk sonderboring Forinjeksjon etter krav ved geoteknisk kategori 3 (> 3 l/min fra ett sonerborehull eller 5 l/min fra alle) Industrisement er forventet å være dominerende som injeksjonsmasse, med supplerende mikrosegment Injeksjonsskjerm med 25-40 hull på 18-24 meter. Kontroll av resultat med mulighet for supplerende injeksjonsrunde.
3	1 > Q-verdi Oppsprekingszone A og B	Systematisk sonderboring. Injeksjon kan fungere som bergsikring. Forinjeksjon etter krav ved geoteknisk kategori 3 (> 3 l/min fra ett sonerborehull eller 5 l/min fra alle) Mikrosegment og spesialsegmenter forventes å være nødvendig supplement til industrisement. Injeksjonsskjerm med >40 hull på 15-18 meter. Kontroll av resultat med mulighet for supplerende injeksjonsrunde. Anvendelse av dreneringsrør vurderes.

Injeksjonsklasse 1 forventes å finnes i massiv bergart med få sprekker, hvor innlekkasje ikke utgjør et stort problem. Dette er den dominerende oppsprekingssonen E, som en finner i frisk bergmasse mellom svakhetssoner. En kan møte på store innlekkasjer ved kontinuerlige sprekker, men disse vil ofte være mulig å oppnå tilfredsstillende tetthet ved injeksjon. Denne injeksjonsklassen anses som enkel. Det er mulig å møte sprekkesett med høyt vanntrykk, hvor injeksjonsarbeidet kan bli mer krevende, men det skjer sjelden.

Injeksjonsklasse 2 forventes å være mest utsatt for innlekkasjer. Dette er typisk for oppsprekingszone C og D, som en møter i overgangen mellom friskt berg og svakhetssoner. Bergmassen i injeksjonsklasse 2 er mer oppsprukket enn injeksjonsklasse 1, men har ikke blitt omkrystallisert, noe som en ofte møter i injeksjonsklasse 3. Her er derfor de mest permeable sprekkesettene.

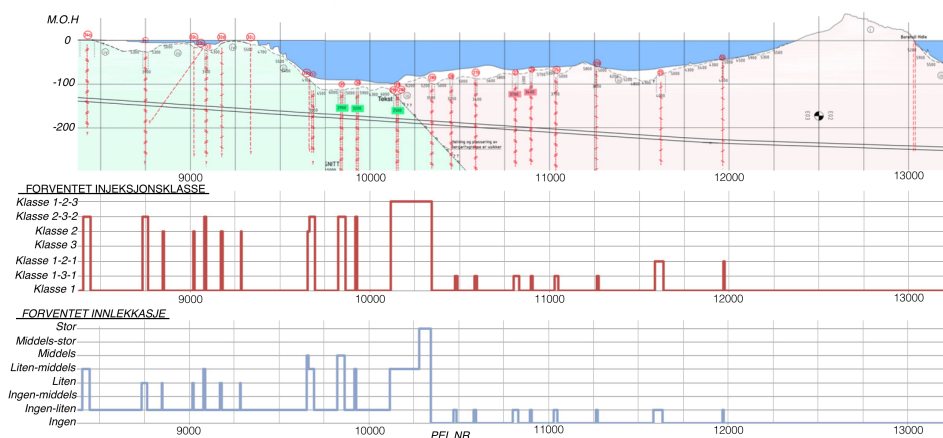
Injeksjonsklasse 3 gir erfaringsmessig ikke de største innlekkasjene. Dette er typisk for oppsprekingszone A og B, som representerer svakhetssonens kjerne. Men dersom en møter vannlekkasjer er disse ofte krevende å tette tilfredsstillende, hvor antall injeksjonshull ofte økes og spesielt benyttes.

Det er bare den gjennstående delen av tunnelen som blir vurdert i dette kapittelet.

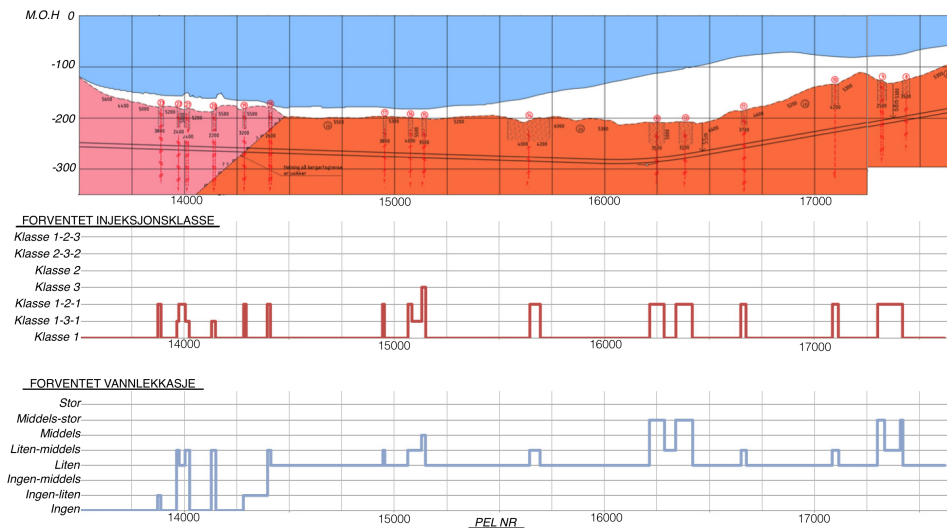
7.2 Illustrering av prognosen

For å lettere få et overblikk over prognosen av innlekkasje og injeksjon for Ryfylketunnelen er dette illustrert sammen med profilet av traséet i berggrunnen. Verdiene er tatt fra detaljene i prognosen. Illustreringen av prognosen er vist i figur 7.1 og 7.2. Disse kan også sees i større format i vedlegg 5.

I prognosen og i figur 7.1 og 7.2 kan en observere at klasse 1 bergmasse med høy seismisk hastighet har forskjellig forventet innlekkasje. Dette kommer av erfaringsdataene fra den drevne delen av tunnelen, hvor en har opplevd forskjellig innlekkasje i den friske bergmassene. En stor del av denne bergmassen har ikke krevd injiseringsarbeid, som er grunnen til at de er definert som klasse 1 i den forventete injeksjonsklassen. Det betyr ikke at en garantert ikke møter lekkasjer her, men at det er mindre sannsynlig. En kan også forvente å møte mer lekkasje i Storheidekkets gneis, basert på erfaringsdataen, som en kan se av prognosen.



Figur 7.1: Prognosen langs tunneltraséets bergmasse, del 2



Figur 7.2: Prognosen langs tunneltraséets bergmasse, del 2

7.3 Prognosen pel for pel

Hvor de respektive svakhetssonene passerer tunneltraséen er usikkert. I prognosen antas de plasseringene som vurdert i forundersøkelsen (Norconsult, 2012a,b), men det understrekes at dette er antagelser. Prognosen er også grafisk presentert i figur 7.1, figur 7.2 og vedlegg 5.

Pel 8385 - 8405

Bergart
Injeksjonsklasse
Forventet lekkasje

Visteflakets fyllitt
Klasse 1
Ingen - liten

Frisk bergmasse med gjennomgående høy seismisk hastighet. Bergmassen er under land uten betydningsverdig løsmasse over.

Pel 8405 - 8445

Bergart
Injeksjonsklasse
Forventet lekkasje

Visteflakets fyllitt
Klasse 2 - 3 - 2
Liten - middels

Antatt oppsprukket bergmasse med lav seismisk hastighet. Påvirket bergmasse antas å være 40 meter bred, hvor behov for injeksjonsklasse 2 og 3 kan forventes. Sonen er orientert skrått på antatt hovedspenning, og spenningens påvirkning er derfor usikker. Bergmassen er under land uten løsmassedekke over, som erfaringsmessig har gitt lek-

kasje i Visteflakets fyllitt. Det forventes ikke å møte store innlekkasjer, da sprekkene i fyllitten erfaringsmessig er for lite permeabel.

Pel 8445 - 8735

Bergart
Injeksjonsklasse
Forventet lekkasje

Visteflakets fyllitt
Klasse 1
Ingen - liten

Frisk bergmasse med gjennomgående høy seismisk hastighet. Bergmassen er under land med løsmasse over.

Pel 8735 - 8765

Bergart
Injeksjonsklasse
Forventet lekkasje

Visteflakets fyllitt
Klasse 2 - 3 - 2
Liten

Antatt oppsprukket bergmasse med lav seismisk hastighet. Påvirket bergmasse antas å være 30 meter bred, hvor behov for injeksjonsklasse 2 og 3 kan forventes. Sonen er orientert nær normalt på antatt hovedspenning, som erfaringsmessig gir mindre permeable sprekkesett. Bergmassen er under vann med løsmassedekke over, som erfaringsmessig ikke gir lekkasje i Visteflakets fyllitt.

Pel 8765 - 8847

Bergart
Injeksjonsklasse
Forventet lekkasje

Visteflakets fyllitt
Klasse 1
Ingen - liten

Frisk bergmasse med gjennomgående høy seismisk hastighet. Bergmassen er under vann med løsmasse over.

Pel 8847 - 8852

Bergart
Injeksjonsklasse
Forventet lekkasje

Visteflakets fyllitt
Klasse 2
Liten

Svakhetssone tolka fra lineament. Påvirket bergmasse antas å være smal (<5 meter), hvor behov for injeksjonsklasse 2 kan forventes. Sonen er orientert parallellt på antatt hovedspenning, som erfaringsmessig gir mer permeable sprekkesett. Bergmassen er under vann med løsmassedekke over, som erfaringsmessig ikke gir lekkasje i Visteflakets fyllitt.

Pel 8852 - 9017

Bergart
Injeksjonsklasse

Visteflakets fyllitt
Klasse 1

Forventet lekkasje

Ingen - liten

Frisk bergmasse med gjennomgående høy seismisk hastighet. Bergmassen er under vann med løsmasse over.

Pel 9017 - 9023

Bergart

Visteflakets fyllitt

Injeksjonsklasse

Klasse 2

Forventet lekkasje

Liten

Svakhetssone tolka fra lineament. Påvirket bergmasse antas å være smal (<5 meter), hvor behov for injeksjonsklasse 2 kan forventes. Sonen er orientert normalt på antatt hovedspenning, som erfaringsmessig gir mindre permeable sprekkesett. Bergmassen er under vann med løsmassedekke over, som erfaringsmessig ikke gir lekkasje i Visteflakets fyllitt.

Pel 9023 - 9077

Bergart

Visteflakets fyllitt

Injeksjonsklasse

Klasse 1

Forventet lekkasje

Ingen - liten

Frisk bergmasse med gjennomgående høy seismisk hastighet. Bergmassen er under vann med løsmasse over.

Pel 9077 - 9087

Bergart

Visteflakets fyllitt

Injeksjonsklasse

Klasse 2 - 3 - 2

Forventet lekkasje

Liten - middels

Antatt oppsprukket bergmasse med lav seismisk hastighet. Påvirket bergmasse antas å være 10 meter bred, hvor behov for injeksjonsklasse 2 og 3 kan forventes. Sonen er orientert nær parallellt på antatt hovedspenning, som erfaringsmessig gir mer permeable sprekkesett. Bergmassen er under vann med løsmassedekke over, som erfaringsmessig ikke gir lekkasje i Visteflakets fyllitt.

Pel 9087 - 9170

Bergart

Visteflakets fyllitt

Injeksjonsklasse

Klasse 1

Forventet lekkasje

Ingen - liten

Frisk bergmasse med gjennomgående høy seismisk hastighet. Bergmassen er under vann med løsmasse over.

Pel 9170 - 9180

Bergart

Visteflakets fyllitt

Injeksjonsklasse
Forventet lekkasje

Klasse 2
Liten

Svakhetszone tolka fra lineament. Påvirket bergmasse antas å være 10 meter bred, hvor behov for injeksjonsklasse 2 kan forventes. Sonen er orientert normalt på antatt hovedspenning, som erfaringsmessig gir mindre permeable sprekkesett. Bergmassen er under vann med løsmassedekke over, som erfaringsmessig ikke gir lekkasje i Viste-flakets fyllitt.

Pel 9180 - 9282

Bergart
Injeksjonsklasse
Forventet lekkasje

Viste-flakets fyllitt
Klasse 1
Ingen - liten

Frisk bergmasse med gjennomgående høy seismisk hastighet. Bergmassen er under land med løsmasse over.

Pel 9282 - 9287

Bergart
Injeksjonsklasse
Forventet lekkasje

Viste-flakets fyllitt
Klasse 2
Liten

Svakhetszone tolka fra lineament. Påvirket bergmasse antas å være smal (< 5 meter), hvor behov for injeksjonsklasse 2 kan forventes. Sonen er orientert skrått på antatt hovedspenning, og spenningens påvirkning er derfor usikker. Bergmassen er under land med løsmassedekke over, som erfaringsmessig har gitt lekkasje i Viste-flakets fyllitt.

Pel 9287 - 9655

Bergart
Injeksjonsklasse
Forventet lekkasje

Viste-flakets fyllitt
Klasse 1
Ingen - liten

Frisk bergmasse med gjennomgående høy seismisk hastighet. Bergmassen er under vann med løsmasse over. Topografien er bratt, hvor lekkasjer erfaringsvis kan oppstå.

Pel 9655 - 9665

Bergart
Injeksjonsklasse
Forventet lekkasje

Viste-flakets fyllitt
Klasse 2
Middels

Svakhetszone tolka fra lineament. Påvirket bergmasse antas å være 10 meter bred, hvor behov for injeksjonsklasse 2 kan forventes. Sonen er orientert normalt på antatt hovedspenning, som erfaringsmessig gir mindre permeable sprekkesett. Bergmassen er under vann med løsmassedekke over, som erfaringsmessig ikke gir lekkasje i Viste-flakets fyllitt.

Det topografiske tolket lineamentet krysser overgangen til en nevneverdig svakhets-sone langs tunneltraséen. Det er derfor sannsynlig å møte flere sprekkesett og sjansen for permeabel bergmasse er til stede. Topografien over traséen er også bratt, noe som erfaringsmessig har gitt innlekkasje.

Pel 9665 - 9695

Bergart
Injeksjonsklasse
Forventet lekkasje

Visteflakets fyllitt
Klasse 2 - 3 - 2
Liten - middels

Antatt oppsprukket bergmasse med svært lav seismisk hastighet (3100 m/s). Påvirket bergmasse antas å være 30 meter bred, hvor behov for injeksjonsklasse 2 og 3 kan forventes. Sonen er orientert skrått på antatt hovedspenning, og spenningens påvirkning er derfor usikker. Bergmassen er under vann med løsmassedekke over, som erfaringsmessig ikke gir lekkasje i Visteflakets fyllitt. Men topografien over traséen er bratt, som erfaringsmessig har gitt innlekkasje.

Den svært lave seismiske hastigheten indikerer en godt utviklet klasse 3-svakhets-sone, hvor rekrytalliseringsen ofte gir lav permeabilitet. Det kan også bety en godt utviklet klasse 2-sone, hvor permeabiliteten kan være relativt høy.

Pel 9695 - 9825

Bergart
Injeksjonsklasse
Forventet lekkasje

Visteflakets fyllitt
Klasse 1
Ingen - liten

Frisk bergmasse med gjennomgående høy seismisk hastighet. Bergmassen er under vann med løsmasse over.

Pel 9825 - 9865

Bergart
Injeksjonsklasse
Forventet lekkasje

Visteflakets fyllitt
Klasse 2 - 3 - 2
Middels

Antatt oppsprukket bergmasse med svært lav seismisk hastighet (2900 m/s). Påvirket bergmasse antas å være 40 meter bred, hvor behov for injeksjonsklasse 2 og 3 kan forventes. Sonen er orientert skrått på antatt hovedspenning, og spenningens påvirkning er derfor usikker. Bergmassen er under vann med løsmassedekke over, som erfaringsmessig ikke gir lekkasje i Visteflakets fyllitt.

Den svært lave seismiske hastigheten indikerer en godt utviklet klasse 3-svakhets-sone, hvor rekrytalliseringsen ofte gir lav permeabilitet. Det kan også bety en godt utviklet klasse 2-sone, hvor permeabiliteten kan være relativt høy.

Pel 9865 - 9920

Bergart
Injeksjonsklasse
Forventet lekkasje

Visteflakets fyllitt
Klasse 1
Ingen - liten

Frisk bergmasse med gjennomgående høy seismisk hastighet. Bergmassen er under vann med løsmasse over.

Pel 9920 - 9930

Bergart
Injeksjonsklasse
Forventet lekkasje

Visteflakets fyllitt
Klasse 2 - 3 - 2
Liten - middels

Antatt oppsprukket bergmasse med svært lav seismisk hastighet (3200 m/s). Påvirket bergmasse antas å være 10 meter bred, hvor behov for injeksjonsklasse 2 og 3 kan forventes. Sonen er orientert mellom skrått og normalt på antatt hovedspenning, og spenningens påvirkning er derfor usikker. Bergmassen er under vann med løsmasse-dekke over, som erfaringsmessig ikke gir lekkasje i Visteflakets fyllitt.

Den svært lave seismiske hastigheten indikerer en godt utviklet klasse 3-svakhetszone, hvor rekryttering ofte gir lav permeabilitet. Det kan også bety en godt utviklet klasse 2-soner, hvor permeabiliteten kan være relativt høy, men den lave sonebredden kan bety mindre krevende injeksjonsarbeid.

Pel 9930 - 10115

Bergart
Injeksjonsklasse
Forventet lekkasje

Visteflakets fyllitt
Klasse 1
Ingen - liten

Frisk bergmasse med gjennomgående høy seismisk hastighet. Bergmassen er under vann med løsmasse over.

Pel 10115 - 10280

Bergart
Injeksjonsklasse
Forventet lekkasje

Visteflakets fyllitt
Klasse 1 - 2 - 3
Liten - middels

Oppsprukket bergmasse med svært lav seismisk hastighet (2500 m/s) er registrert nær bergartsgrensen mellom fyllitt og gneis. Påvirket bergmasse tolkes i den ingeniørgeologiske forundersøkelsen som en vertikal svakhetszone (Norconsult, 2012b,a), mens forfatterens tolkning er en knusningsone fra en bergartsgrense steilt fallende mot øst. Erfaringer fra kapittel 5.3 tyder på at en ikke møter store lekkasjer i fyllitten nær bergartsgrensen. Bergmassekvaliteten i fyllitten er erfaringsmessig lav, og eventuelle lekkasjer vil kreve injeksjonsklasse 2 og 3. Sonen er antatt normalt på hovedspenning, som erfaringsmessig gir mindre permeable sprekkesett. Bergmassen er under vann med løs-

massedekke over, som erfaringsmessig ikke gir lekkasje i Visteflakets fyllitt.

Pel 10280 - 10345

Bergart

Boknafjorddekkets gneis

Injeksjonsklasse

Klasse 3 - 2 - 1

Forventet lekkasje

Stor

Oppsprukken bergmasse med svært lav seismisk hastighet (2500 m/s) er registrert nær bergartsgrensen mellom fyllitt og gneis. I dette området er gneisen påvirket av bevegelsen mellom de kaledonske skyvedekkene. Erfaringer fra kapittel 5.3 tyder på at en møter en vedvarende bergmasse med høy permeabilitet og vannføring som krever omfattende injeksjonsarbeid. Bergmassekvaliteten er erfaringsmessig varierende, og en kan derfor forvente injeksjonsklasse 1, 2 og 3. Sonen er antatt normalt på hovedspenning, som erfaringsmessig gir mindre permeable sprekkesett. Bergmassen er under vann med løsmassedekke over, som erfaringsmessig har forminkende effekt for lekkasje i gneis.

Pel 10345 - 10472

Bergart

Boknafjorddekkets gneis

Injeksjonsklasse

Klasse 1

Forventet lekkasje

Ingen

Frisk bergmasse med gjennomgående høy seismisk hastighet. Bergmassen er under vann med løsmasse over.

Pel 10472 - 10487

Bergart

Boknafjorddekkets gneis

Injeksjonsklasse

Klasse 1 - 3 - 1

Forventet lekkasje

Ingen - liten

Antatt oppsprukket bergmasse med lav seismisk hastighet (3200 m/s). Påvirket bergmasse antas å være 15 meter bred, hvor behov for injeksjonsklasse 1 og 3 kan forventes. Sonen er orientert skrått på antatt hovedspenning, og spenningens påvirkning er derfor usikker. Bergmassen er under vann med løsmassedekke over, som erfaringsmessig har forminkende effekt på lekkasje i gneis.

Den lave seismiske hastigheten i gneisen betyr sannsynligvis en klasse 3-svakhetszone, hvor rekrystalliseringen ofte gir lav permeabilitet. Det kan også bety en godt utviklet klasse 2-soner, hvor permeabiliteten kan være relativt høy. Mineralsammensetningen i Boknafjordgneisen er 'uren' og har høyt innhold av sjiktminerale, som derimot indikerer lav permeabilitet.

Pel 10487 - 10583

Bergart

Boknafjorddekkets gneis

Injeksjonsklasse

Klasse 1

Forventet lekkasje

Ingen

Frisk bergmasse med gjennomgående høy seismisk hastighet. Bergmassen er under vann med løsmasse over.

Pel 10583 - 10597

Bergart

Boknafjorddekkets gneis

Injeksjonsklasse

Klasse 1 - 3 - 1

Forventet lekkasje

Ingen - liten

Antatt oppsprukket bergmasse med lav seismisk hastighet (3400 m/s). Påvirket bergmasse antas å være 15 meter bred, hvor behov for injeksjonsklasse 1 og 3 kan forventes. Sonen er orientert normalt på antatt hovedspenning, som erfaringsmessig gir mindre permeable sprekkesett. Bergmassen er under vann med løsmassedekke over, som erfaringsmessig har forminkende effekt på lekkasje i gneis.

Den lave seismiske hastigheten i gneisen betyr sannsynligvis en klasse 3-svakhetszone, hvor rekrystalliseringen ofte gir lav permeabilitet. Det kan også bety en godt utviklet klasse 2-soner, hvor permeabiliteten kan være relativt høy. Mineralsammensetningen i Boknafjordgneisen er 'uren' og har høyt innhold av sjiktmineraler, som derimot indikerer lav permeabilitet.

Pel 10597 - 10800

Bergart

Boknafjorddekkets gneis

Injeksjonsklasse

Klasse 1

Forventet lekkasje

Ingen

Frisk bergmasse med gjennomgående høy seismisk hastighet. Bergmassen er under vann med løsmasse over.

Pel 10800 - 10830

Bergart

Boknafjorddekkets gneis

Injeksjonsklasse

Klasse 1 - 3 - 1

Forventet lekkasje

Ingen - liten

Antatt oppsprukket bergmasse med lav seismisk hastighet (3700 m/s). Påvirket bergmasse antas å være 30 meter bred, hvor behov for injeksjonsklasse 1 og 3 kan forventes. Sonen er orientert normalt på antatt hovedspenning, som erfaringsmessig gir mindre permeable sprekkesett. Bergmassen er under vann med løsmassedekke over, som erfaringsmessig har forminkende effekt på lekkasje i gneis.

Den lave seismiske hastigheten i gneisen betyr sannsynligvis en klasse 3-svakhetszone, hvor rekrystalliseringen ofte gir lav permeabilitet. Det kan også bety en godt utviklet klasse 2-soner, hvor permeabiliteten kan være relativt høy. Mineralsammensetningen i Boknafjordgneisen er 'uren' og har høyt innhold av sjiktmineraler, som derimot indi-

kerer lav permeabilitet.

Pel 10830 - 10895

Bergart

Boknafjorddekkets gneis

Injeksjonsklasse

Klasse 1

Forventet lekkasje

Ingen

Frisk bergmasse med gjennomgående høy seismisk hastighet. Bergmassen er under vann med løsmasse over.

Pel 10895 - 10905

Bergart

Boknafjorddekkets gneis

Injeksjonsklasse

Klasse 1 - 3 - 1

Forventet lekkasje

Ingen - liten

Antatt oppsprukket bergmasse med lav seismisk hastighet (3400 m/s). Påvirket bergmasse antas å være 10 meter bred, hvor behov for injeksjonsklasse 1 og 3 kan forventes. Sonen er orientert normalt på antatt hovedspenning, som erfaringsmessig gir mindre permeable sprekkesett. Bergmassen er under vann med løsmassedekke over, som erfaringsmessig har forminkende effekt på lekkasje i gneis.

Den lave seismiske hastigheten i gneisen betyr sannsynligvis en klasse 3-svakhetszone, hvor rekrystalliseringen ofte gir lav permeabilitet. Det kan også bety en godt utviklet klasse 2-soner, hvor permeabiliteten kan være relativt høy. Mineralsammensetningen i Boknafjordgneisen er 'uren' og har høyt innhold av sjiktmineraler, som derimot indikerer lav permeabilitet.

Pel 10905 - 11030

Bergart

Boknafjorddekkets gneis

Injeksjonsklasse

Klasse 1

Forventet lekkasje

Ingen

Frisk bergmasse med gjennomgående høy seismisk hastighet. Bergmassen er under vann med løsmasse over.

Pel 11030 - 11050

Bergart

Boknafjorddekkets gneis

Injeksjonsklasse

Klasse 1 - 3 - 1

Forventet lekkasje

Ingen - liten

Antatt oppsprukket bergmasse med lav seismisk hastighet (3700 m/s). Påvirket bergmasse antas å være 20 meter bred, hvor behov for injeksjonsklasse 1 og 3 kan forventes. Sonen er orientert normalt på antatt hovedspenning, som erfaringsmessig gir mindre permeable sprekkesett. Bergmassen er under vann med løsmassedekke over,

som erfaringsmessig har forminkende effekt på lekkasje i gneis.

Den lave seismiske hastigheten i gneisen betyr sannsynligvis en klasse 3-svakhetszone, hvor rekrytlliseringen ofte gir lav permeabilitet. Det kan også bety en godt utviklet klasse 2-soner, hvor permeabiliteten kan være relativt høy. Mineralsammensetningen i Boknafjordgneisen er 'uren' og har høyt innhold av sjiktmineraler, som derimot indikerer lav permeabilitet.

Pel 11050 - 11265

Bergart	Boknafjorddekkets gneis
Injeksjonsklasse	Klasse 1
Forventet lekkasje	Ingen

Frisk bergmasse med gjennomgående høy seismisk hastighet. Bergmassen er under vann med løsmasse over.

Pel 11265 - 11275

Bergart	Boknafjorddekkets gneis
Injeksjonsklasse	Klasse 1 - 3 - 1
Forventet lekkasje	Ingen - liten

Antatt oppsprukket bergmasse med lav seismisk hastighet (3600 m/s). Påvirket bergmasse antas å være 10 meter bred, hvor behov for injeksjonsklasse 1 og 3 kan forventes. Sonen er orientert normalt på antatt hovedspenning, som erfaringsmessig gir mindre permeable sprekkesett. Bergmassen er under vann uten løsmassedekke over, og vannet har fri tilgang til svakhetssonen.

Den lave seismiske hastigheten i gneisen betyr sannsynligvis en klasse 3-svakhetszone, hvor rekrytlliseringen ofte gir lav permeabilitet. Det kan også bety en godt utviklet klasse 2-soner, hvor permeabiliteten kan være relativt høy. Mineralsammensetningen i Boknafjordgneisen er 'uren' og har høyt innhold av sjiktmineraler, som derimot indikerer lav permeabilitet.

Pel 11275 - 11585

Bergart	Boknafjorddekkets gneis
Injeksjonsklasse	Klasse 1
Forventet lekkasje	Ingen

Frisk bergmasse med gjennomgående høy seismisk hastighet. Bergmassen er under vann med løsmasse over.

Pel 11585 - 11635

Bergart	Boknafjorddekkets gneis
Injeksjonsklasse	Klasse 1 - 2 - 1

Forventet lekkasje

Ingen - liten

Antatt oppsprukket bergmasse med noe lav seismisk hastighet (4000 m/s). Påvirket bergmasse antas å være 50 meter bred, hvor behov for injeksjonsklasse 1 og 2 kan forventes. Sonen er orientert normalt på antatt hovedspenning, som erfaringsmessig gir mindre permeable sprekkesett. Bergmassen er under vann med løsmassedekke over, som erfaringsmessig har forminkende effekt på lekkasje i gneis.

Den noe lave seismiske hastigheten i gneisen kan bety en klasse 2-sone, hvor permeabiliteten kan være relativt høy. Mineralsammensetningen i Boknafjordgneisen er 'uren' og har høyt innhold av sjiktmineraler, som derimot indikerer lav permeabilitet.

Pel 11635 - 11967

Bergart

Boknafjorddekkets gneis

Injeksjonsklasse

Klasse 1

Forventet lekkasje

Ingen

Frisk bergmasse med gjennomgående høy seismisk hastighet. Bergmassen er under vann med løsmasse over.

Pel 11967 - 11974

Bergart

Boknafjorddekkets gneis

Injeksjonsklasse

Klasse 1 - 2 - 1

Forventet lekkasje

Ingen - liten

Antatt oppsprukket bergmasse med noe lav seismisk hastighet (4000 m/s). Påvirket bergmasse antas å være 7 meter bred, hvor behov for injeksjonsklasse 1 og 2 kan forventes. Sonen er orientert normalt på antatt hovedspenning, som erfaringsmessig gir mindre permeable sprekkesett. Bergmassen er under vann uten løsmassedekke over, og vannet har fri tilgang til svakhetssonen.

Den noe lave seismiske hastigheten i gneisen kan bety en klasse 2-sone, hvor permeabiliteten kan være relativt høy. Mineralsammensetningen i Boknafjordgneisen er 'uren' og har høyt innhold av sjiktmineraler, som derimot indikerer lav permeabilitet.

Pel 11974 - 13875

Bergart

Boknafjorddekkets gneis

Injeksjonsklasse

Klasse 1

Forventet lekkasje

Ingen

Frisk bergmasse med gjennomgående høy seismisk hastighet. Bergmassen er under land og vann med varierende løsmassedekke over.

Pel 13875 - 13890

Bergart

Boknafjorddekkets gneis

Injeksjonsklasse
Forventet lekkasje

Klasse 1 - 2 - 1
Ingen - liten

Antatt oppsprukket bergmasse med noe lav seismisk hastighet (3800 m/s). Påvirket bergmasse antas å være 15 meter bred, hvor behov for injeksjonsklasse 1 og 2 kan forventes. Sonen er orientert normalt på antatt hovedspenning, som erfaringsmessig gir mindre permeable sprekksett. Bergmassen er under vann med løsmassedekke over, som erfaringsmessig har forminkende effekt på lekkasje i gneis.

Den noe lave seismiske hastigheten i gneisen kan bety en klasse 2-sone, hvor permeabiliteten kan være relativt høy. Mineralsammensetningen i Boknafjordgneisen er 'uren' og har høyt innhold av sjiktmineraler, som derimot indikerer lav permeabilitet.

Pel 13890 - 13965

Bergart
Injeksjonsklasse
Forventet lekkasje

Boknafjorddekkets gneis
Klasse 1
Ingen

Frisk bergmasse med gjennomgående høy seismisk hastighet. Bergmassen er under vann med løsmasse over.

Pel 13965 - 13975

Bergart
Injeksjonsklasse
Forventet lekkasje

Boknafjorddekkets gneis
Klasse 1 - 3 - 1
Liten - middels

Antatt oppsprukket bergmasse med svært lav seismisk hastighet (2400 m/s). Påvirket bergmasse antas å være 10 meter bred, hvor behov for injeksjonsklasse 1 og 3 kan forventes. Sonen er orientert nær parallellt på antatt hovedspenning, som erfaringsmessig gir mer permeable sprekksett. Bergmassen er under vann med løsmassedekke over, som erfaringsmessig har forminkende effekt på lekkasje i gneis.

Den lave seismiske hastigheten i gneisen betyr sannsynligvis en klasse 3-svakhetsone, hvor rekrylliseringen ofte gir lav permeabilitet. Det kan også bety en godt utviklet klasse 2-sone, hvor permeabiliteten kan være relativt høy. Mineralsammensetningen i Boknafjordgneisen er 'uren' og har høyt innhold av sjiktmineraler, som derimot indikerer lav permeabilitet.

Pel 13975 - 14005

Bergart
Injeksjonsklasse
Forventet lekkasje

Boknafjorddekkets gneis
Klasse 1, 2 eller 3
Ingen - stor

Frisk bergmasse med gjennomgående høy seismisk hastighet mellom to nære og svært oppsprukne svakhetssoner. Bergmassen er under vann med løsmasse over. Det er sann-

synlig at bergmassen mellom svakhetssonene er påvirket og at gjennomgående sprekkesett som en møter i bergklasse C kan forekomme. En kan forvente behov for injeksjonsklasse 2.

Sør for tunneltraséen krysser de to svakhetssonene hverandre. Her er faren for svært oppkjust og svært permeabel bergmasse til stede. Dersom det er tilfelle kan en forvente behov for injeksjonsklasse 3 og høyt vanntrykk.

Pel 14005 - 14025

Bergart

Boknafjorddekkets gneis

Injeksjonsklasse

Klasse 1 - 3 - 1

Forventet lekkasje

Liten - middels

Antatt oppsprukket bergmasse med svært lav seismisk hastighet (2400 m/s). Påvirket bergmasse antas å være 20 meter bred, hvor behov for injeksjonsklasse 1 og 3 kan forventes. Sonen er orientert nær normalt på antatt hovedspenning, som erfaringsmessig gir mindre permeable sprekkesett. Bergmassen er under vann med løsmassedekke over, som erfaringsmessig har forminkende effekt på lekkasje i gneis.

Den lave seismiske hastigheten i gneisen betyr sannsynligvis en klasse 3-svakhetszone, hvor rekrytalleringer ofte gir lav permeabilitet. Det kan også bety en godt utviklet klasse 2-soner, hvor permeabiliteten kan være relativt høy. Mineralsammensetningen i Boknafjordgneisen er 'uren' og har høyt innhold av sjiktmineraler, som derimot indikerer lav permeabilitet.

Pel 14025 - 14130

Bergart

Boknafjorddekkets gneis

Injeksjonsklasse

Klasse 1

Forventet lekkasje

Ingen

Frisk bergmasse med gjennomgående høy seismisk hastighet. Bergmassen er under vann med løsmasse over.

Pel 14130 - 14150

Bergart

Boknafjorddekkets gneis

Injeksjonsklasse

Klasse 1 - 3 - 1

Forventet lekkasje

Liten - middels

Antatt oppsprukket bergmasse med svært lav seismisk hastighet (2200 m/s). Påvirket bergmasse antas å være 20 meter bred, hvor behov for injeksjonsklasse 1 og 3 kan forventes. Sonen er orientert nær normalt på antatt hovedspenning, som erfaringsmessig gir mindre permeable sprekkesett. Bergmassen er under vann med løsmassedekke over, som erfaringsmessig har forminkende effekt på lekkasje i gneis.

Den svært lave seismiske hastigheten i gneisen betyr sannsynligvis en klasse 3-svakhetszone,

hvor rekrystalliseringen ofte gir lav permeabilitet. Det kan også bety en godt utviklet klasse 2-sone i overgangene, hvor permeabiliteten kan være relativt høy. Mineralsammensetningen i Boknafjordgneisen er 'uren' og har høyt innhold av sjiktmineraler, som derimot indikerer lav permeabilitet.

Pel 14150 - 14282

Bergart	Boknafjorddekkets gneis
Injeksjonsklasse	Klasse 1
Forventet lekkasje	Ingen

Frisk bergmasse med gjennomgående høy seismisk hastighet. Bergmassen er under vann med løsmasse over.

Pel 14282 - 14297

Bergart	Boknafjorddekkets gneis
Injeksjonsklasse	Klasse 1 - 2 - 1
Forventet lekkasje	Ingen - liten

Antatt oppsprukket bergmasse med noe lav seismisk hastighet (3200 - 3800 m/s). Påvirket bergmasse antas å være 15 meter bred, hvor behov for injeksjonsklasse 1 og 2 kan forventes. Sonen er orientert normalt på antatt hovedspenning, som erfaringsmessig gir mindre permeable sprekkesett. Bergmassen er under vann med løsmassedekke over, som erfaringsmessig har forminkende effekt på lekkasje i gneis.

Den noe lave seismiske hastigheten i gneisen kan bety en klasse 2-sone, hvor permeabiliteten kan være relativt høy. Mineralsammensetningen i Boknafjordgneisen er 'uren' og har høyt innhold av sjiktmineraler, som indikerer lav permeabilitet.

Pel 14297 - 14397

Bergart	Boknafjorddekkets gneis til Storheidekkets gneis
Injeksjonsklasse	Klasse 1
Forventet lekkasje	Ingen - liten

Frisk bergmasse med gjennomgående høy seismisk hastighet. Bergmassen er under vann med løsmasse over. En jevn overgang fra Boknafjorddekkets gneis til Storheidekkets gneis forventes. Erfaringsmessig er Storheidekkets gneis 'renere', med lavere innhold av sjiktmineraler og har gitt flere lekkasjer.

Pel 14397 - 14412

Injeksjonsklasse	Storheidekkets gneis Klasse 1 - 2 - 1
Forventet lekkasje	Liten - middels

Antatt oppsprukket bergmasse med svært lav seismisk hastighet (2600 m/s). Påvirket bergmasse antas å være 15 meter bred, hvor behov for injeksjonsklasse 1 og 2 kan forventes. Sonen er orientert nær normalt på antatt hovedspenning, som erfaringsmessig gir mindre permeable sprekkesett. Bergmassen er under vann med løsmassedekke over, som erfaringsmessig har forminkende effekt på lekkasje i gneis.

Den svært lave seismiske hastigheten i gneisen kan betyr en klasse 3-svakhetszone, hvor rekrytlliseringen ofte gir lav permeabilitet. Det kan også bety en godt utviklet klasse 2-sone, hvor permeabiliteten kan være relativt høy. Mineralsammensetningen i Storheidekkets gneis er 'ren' og har et lavt innhold av sjiktmineraler, som derimot indikerer større sannsynlighet for behov for injeksjonsklasse 2, hvor høy permeabilitet kan forekomme.

Pel 14412 - 14945

Storheidekkets gneis

Injeksjonsklasse

Klasse 1

Forventet lekkasje

Liten

Frisk bergmasse med gjennomgående høy seismisk hastighet. Bergmassen er under vann med løsmasse over.

Pel 14945 - 14955

Storheidekkets gneis

Injeksjonsklasse

Klasse 1 - 2 - 1

Forventet lekkasje

Liten - stor

Antatt oppsprukket bergmasse med noe lav seismisk hastighet (3800 m/s). Påvirket bergmasse antas å være 10 meter bred, hvor behov for injeksjonsklasse 1 og 2 kan forventes. Sonen er orientert skrått på antatt hovedspenning, og spenningens påvirkning er derfor usikker. Bergmassen er under vann med løsmassedekke over, som erfaringsmessig har forminkende effekt på lekkasje i gneis.

Den noe lave seismiske hastigheten i gneisen betyr sannsynligvis en klasse 2-sone, hvor permeabiliteten kan være relativt høy. Mineralsammensetningen i gneiss gneis er 'ren' og har et lavt innhold av sjiktmineraler, som indikerer et behov for injeksjonsklasse 2, hvor høy permeabilitet kan forekomme.

Pel 14955 - 15065

Storheidekkets gneis

Injeksjonsklasse

Klasse 1

Forventet lekkasje

Liten

Frisk bergmasse med gjennomgående høy seismisk hastighet. Bergmassen er under vann med løsmasse over.

Pel 15065 - 15085

Injeksjonsklasse
Forventet lekkasje

Storheidekkets gneis
Klasse 1 - 2 - 1
Liten - stor

Antatt oppsprukket bergmasse med noe lav seismisk hastighet (4000 m/s). Påvirket bergmasse antas å være 20 meter bred, hvor behov for injeksjonsklasse 1 og muligens 2 kan forventes. Sonen er orientert skrått på antatt hovedspenning, og spenningens påvirkning er derfor usikker. Bergmassen er under vann med løsmassedekke over, som erfaringsmessig har forminkende effekt på lekkasje i gneis.

Den noe lave seismiske hastigheten i gneisen kan bety en klasse 2-sone, hvor permeabiliteten kan være relativt høy. Mineralsammensetningen i Storheidekkets gneis er 'ren' og har et lavt innhold av sjiktmineraler, som indikerer et behov for injeksjonsklasse 2, hvor høy permeabilitet kan forekomme.

Pel 15085 - 15130

Injeksjonsklasse
Forventet lekkasje

Storheidekkets gneis
Klasse 1
Liten

Frisk bergmasse med gjennomgående høy seismisk hastighet. Bergmassen er under vann med løsmasse over.

Pel 15130 - 15150

Injeksjonsklasse
Forventet lekkasje

Storheidekkets gneis
Klasse 1 - 2 - 1
Middels - stor

Antatt oppsprukket bergmasse med lav seismisk hastighet (3500 m/s). Påvirket bergmasse antas å være 20 meter bred, hvor behov for injeksjonsklasse 1 og 2 kan forventes. Sonen er orientert nær normalt på antatt hovedspenning, som erfaringsmessig gir mindre permeable sprekkesett. Bergmassen er under vann med løsmassedekke over, som erfaringsmessig har forminkende effekt på lekkasje i gneis.

Den noe lave seismiske hastigheten i gneisen kan bety en klasse 2-sone, hvor permeabiliteten kan være relativt høy. Mineralsammensetningen i Storheidekkets gneis Storheidekket er 'ren' og har et lavt innhold av sjiktmineraler, som indikerer et behov for injeksjonsklasse 2, hvor høy permeabilitet kan forekomme. Dette området er den topografiske dypeste delen av Storheidekket, hvor en erfaringsmessig kan møte lekkasjer.

Pel 15150 - 15645

Injeksjonsklasse

Storheidekkets gneis
Klasse 1

Forventet lekkasje

Liten

Frisk bergmasse med gjennomgående høy seismisk hastighet. Bergmassen er under vann med løsmasse over.

Pel 15645 - 15695

Injeksjonsklasse
Forventet lekkasje

Storheidekkets gneis
Klasse 1 - 2 - 1
Liten - stor

Antatt oppsprukket bergmasse med noe lav seismisk hastighet (4000 m/s). Påvirket bergmasse antas å være 150 meter bred, hvor behov for injeksjonsklasse 1 og muligens 2 kan forventes. Sonen er orientert nær normalt på antatt hovedspenning, som erfaringsmessig gir mindre permeable sprekkesett. Bergmassen er under vann med løsmassedekke over, som erfaringsmessig har forminkende effekt på lekkasje i gneis.

Den noe lave seismiske hastigheten i gneisen kan bety en klasse 2-sone, hvor permeabiliteten kan være relativt høy. Mineralsammensetningen i Storheidekkets gneis er 'ren' og har et lavt innhold av sjiktmineraler, som indikerer et behov for injeksjonsklasse 2, hvor høy permeabilitet kan forekomme.

Pel 15695 - 16215

Injeksjonsklasse
Forventet lekkasje

Storheidekkets gneis
Klasse 1
Liten

Frisk bergmasse med gjennomgående høy seismisk hastighet. Bergmassen er under vann med løsmasse over.

Pel 16215 - 16285

Injeksjonsklasse
Forventet lekkasje

Storheidekkets gneis
Klasse 1 - 2 - 1
Middels - stor

Antatt oppsprukket bergmasse med lav seismisk hastighet (3500 m/s). Påvirket bergmasse antas å være 70 meter bred, hvor behov for injeksjonsklasse 1 og 2 kan forventes. Sonen er orientert nær normalt på antatt hovedspenning, som erfaringsmessig gir mindre permeable sprekkesett. Bergmassen er under vann med løsmassedekke over, som erfaringsmessig har forminkende effekt på lekkasje i gneis.

Den noe lave seismiske hastigheten i gneisen kan bety en klasse 2-sone, hvor permeabiliteten kan være relativt høy. Mineralsammensetningen i Storheidekkets gneis er 'ren' og har et lavt innhold av sjiktmineraler, som indikerer et behov for injeksjonsklasse 2, hvor høy permeabilitet kan forekomme. Dette området er den topografiske dypeste delen av Storheidekket, hvor en erfaringsmessig kan møte lekkasjer.

Pel 16285 - 16340

Injeksjonsklasse
Forventet lekkasje

Storheidekkets gneis
Klasse 1
Liten - middels

Frisk bergmasse med gjennomgående høy seismisk hastighet. Bergmassen er under vann med løsmasse over. Denne sonen er mellom to alvorlige svakhetssoner i en topografisk faresone. Sjansen for at bergmassen er påvirket av dette er til stede, og det kan gi mer kontinuerlige og permeable sprekkesett.

Pel 16340 - 16420

Injeksjonsklasse
Forventet lekkasje

Storheidekkets gneis
Klasse 1 - 2 - 1
Middels - stor

Antatt oppsprukket bergmasse med lav seismisk hastighet (3200 m/s). Påvirket bergmasse antas å være 80 meter bred, hvor behov for injeksjonsklasse 1 og 2 kan forventes. Sonen er orientert nær normalt på antatt hovedspenning, som erfaringsmessig gir mindre permeable sprekkesett. Bergmassen er under vann med løsmassedekke over, som erfaringsmessig har forminkende effekt på lekkasje i gneis.

Den noe lave seismiske hastigheten i gneisen kan bety en klasse 2-sone, hvor permeabiliteten kan være relativt høy. Mineralsammensetningen i Storheidekkets gneis er 'ren' og har et lavt innhold av sjiktmineraler, som indikerer et behov for injeksjonsklasse 2, hvor høy permeabilitet kan forekomme. Dette området er den topografiske dypeste delen av Storheidekket, hvor en erfaringsmessig kan møte lekkasjer.

Pel 16420 - 16650

Injeksjonsklasse
Forventet lekkasje

Storheidekkets gneis
Klasse 1
Liten

Frisk bergmasse med gjennomgående høy seismisk hastighet. Bergmassen er under vann med løsmasse over.

Pel 16650 - 16675

Injeksjonsklasse
Forventet lekkasje

Storheidekkets gneis
Klasse 1 - 2 - 1
Liten - stor

Antatt oppsprukket bergmasse med noe lav seismisk hastighet (3700 m/s). Påvirket bergmasse antas å være 25 meter bred, hvor behov for injeksjonsklasse 1 og 2 kan forventes. Sonen er orientert nær normalt på antatt hovedspenning, som erfaringsmessig gir mindre permeable sprekkesett. Bergmassen er under vann med løsmassedekke

over, som erfaringsmessig har forminkende effekt på lekkasje i gneis.

Den noe lave seismiske hastigheten i gneisen kan bety en klasse 2-sone, hvor permeabiliteten kan være relativt høy. Mineralsammensetningen i Storheidekkets gneis er 'ren' og har et lavt innhold av sjiktmineraler, som indikerer et behov for injeksjonsklasse 2, hvor høy permeabilitet kan forekomme.

Pel 16675 - 17085

	Storheidekkets gneis
Injeksjonsklasse	Klasse 1
Forventet lekkasje	Liten

Frisk bergmasse med gjennomgående høy seismisk hastighet. Bergmassen er under vann med løsmasse over.

Pel 17085 - 17115

	Storheidekkets gneis
Injeksjonsklasse	Klasse 1 - 2 - 1
Forventet lekkasje	Liten - middels

Antatt oppsprukket bergmasse med noe lav seismisk hastighet (4200 m/s). Påvirket bergmasse antas å være 30 meter bred, hvor behov for injeksjonsklasse 1 og 2 kan forventes. Sonen er orientert nær normalt på antatt hovedspenning, som erfaringsmessig gir mindre permeable sprekkesett. Bergmassen er under vann med løsmassedekke over, som erfaringsmessig har forminkende effekt på lekkasje i gneis.

Den noe lave seismiske hastigheten i gneisen kan bety en klasse 2-sone, hvor permeabiliteten kan være relativt høy. Mineralsammensetningen i Storheidekkets gneis er 'ren' og har et lavt innhold av sjiktmineraler, som indikerer et behov for injeksjonsklasse 2, hvor høy permeabilitet kan forekomme.

Pel 17115 - 17300

	Storheidekkets gneis
Injeksjonsklasse	Klasse 1
Forventet lekkasje	Liten

Frisk bergmasse med gjennomgående høy seismisk hastighet. Bergmassen er under vann med løsmasse over.

Pel 17300 - 17335

	Storheidekkets gneis
Injeksjonsklasse	Klasse 1 - 2/3 - 1
Forventet lekkasje	Middels - stor

Antatt oppsprukket bergmasse med isvært lav seismisk hastighet (2500 m/s). Påvirket bergmasse antas å være 35 meter bred, hvor behov for injeksjonsklasse 1, 2 og 3 kan forventes. Sonen er orientert parallellt på antatt hovedspenning, som erfaringsmessig gir mer permeable sprekkese. Bergmassen er under vann med løsmassedekke over, som erfaringsmessig har forminkende effekt på lekkasje i gneis.

Den svært lave seismiske hastigheten indikerer en godt utviklet klasse 3-svakhetszone, hvor rekrystalliseringen ofte gir lav permeabilitet. Mineralsammensetningen i Storheidekkets gneis er 'ren' og har et lavt innhold av sjiktmineraler, som indikerer en klasse 2-sone, hvor høy permeabilitet kan forekomme. Dette området er en topografiske dyprenne, hvor en erfaringsmessig kan møte lekkasjer.

Pel 17335 - 17410

	Storheidekkets gneis
Injeksjonsklasse	Klasse 1 - 2 - 1
Forventet lekkasje	Liten - middels

Frisk bergmasse med gjennomgående høy seismisk hastighet. Bergmassen er under vann med løsmasse over. Denne sonen er mellom to alvorlige svakhetssoner i en topografisk faresone. Sjansen for at bergmassen er påvirket av dette er til stede, og det kan gi mer kontinuerlige og permeable sprekkese.

Pel 17410 - 17430

	Storheidekkets gneis
Injeksjonsklasse	Klasse 1 - 2 - 1
Forventet lekkasje	Middels - stor

Antatt oppsprukket bergmasse med lav seismisk hastighet (3500 m/s). Påvirket bergmasse antas å være 20 meter bred, hvor behov for injeksjonsklasse 1 og 2 kan forventes. Sonen er orientert skrått på antatt hovedspenning, og spenningens påvirkning er derfor usikker. Bergmassen er under vann med løsmassedekke over, som erfaringsmessig har forminkende effekt på lekkasje i gneis.

Den noe lave seismiske hastigheten i gneisen kan bety en klasse 2-sone, hvor permeabiliteten kan være relativt høy. Mineralsammensetningen i Storheidekkets gneis er 'ren' og har et lavt innhold av sjiktmineraler, som indikerer et behov for injeksjonsklasse 2, hvor høy permeabilitet kan forekomme. Dette området er en topografiske dyprenne, hvor en erfaringsmessig kan møte lekkasjer.

Pel 17430 - 17620

	Storheidekkets gneis
Injeksjonsklasse	Klasse 1
Forventet lekkasje	Liten

Frisk bergmasse med gjennomgående høy seismisk hastighet. Bergmassen er under

vann med løsmasse over.

7.4 Statistisk fordeling av prognosen

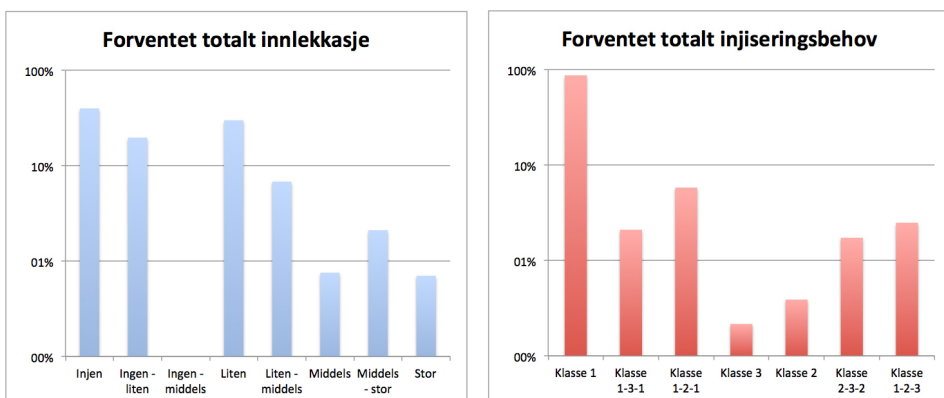
Det gir mening å studere hvor stor andel av tunnelen en kan forvente å finne de forskjellige injeksjons- og lekkasjeklassene, som definert i prognosen. Dette er presentert i tabell 7.2 og 7.3, hvor tabell 7.2 er for den totale tunneltraséen og tabell 7.3 skiller mellom de forskjellige skyvedekkene.

Fra tabell 7.2 og søylediagram 7.3 ser en at frisk bergmasse med høy seismisk hastighet dominerer med 87,3 % av tunneltraséen, og at ingen til liten innlekkasje er forventet i 89,6% av tunneltraséen. En kan derav merkes fra tabell 7.2 at forventet lekkasjenivå større enn liten innlekkasje forventes i 10,4 % av tunneltraséen. Merk at dette er svært usikre tall!

For å kunne lese tallene i tabell 7.2 riktig er det nødvendig å skille vurderingene fra de forskjellige skyvedekka fra hverandre. I tabell 7.3 kan en observere disse forskjellene. Det gir mening å tolke Visteflakets 'Ingen - liten forventet lekkasje' som bergmasse som ikke krever injeksjonsarbeid, mens Boknafjorddekkets 'Ingen - liten forventet lekkasje' kan kreve injeksjonsarbeid og Storheidekkets 'Ingen forventet lekkasje' ikke nødvendigvis krever injeksjonsarbeid. Fra dette kan en tolke 86,7 % av tunneltraséen som bergmasse hvor en forventer innlekkasjer som ikke krever injeksjonsarbeid, og 13,3 % hvor en kan forvente injeksjonsarbeid. Merk at dette er svært usikre tall!

Tabell 7.2: Fordeling av forventet totalt injeksjonsbehov og innlekkasje for gjennstående del av tunneltraséen

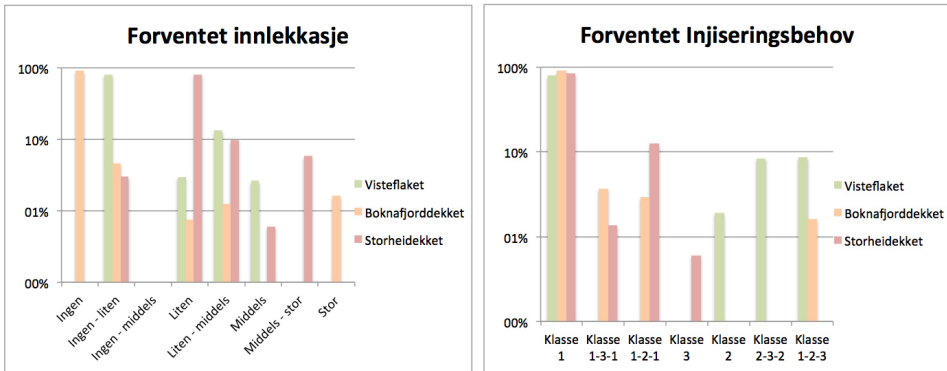
		TOTALT	
		(meter)	(prosent)
Forventet Injiseringsbehov	Klasse 1	8058	87,3%
	Klasse 1-3-1	194	2,1%
	Klasse 1-2-1	537	5,8%
	Klasse 3	20	0,2%
	Klasse 2	36	0,4%
	Klasse 2-3-2	160	1,7%
	Klasse 1-2-3	230	2,5%
Forventet Lekkasjenivå	Injen	3686	39,9%
	Ingen - liten	1820	19,7%
	Ingen - middels	0	0,0%
	Liten	2769	30,0%
	Liten - middels	630	6,8%
	Middels	70	0,8%
	Middels - stor	195	2,1%
Stor	65	0,7%	



Figur 7.3: Søylediagram for forventet total innlekkasje og injiseringsbehov oppgitt i prosent. Merk logaritmisk y-akse

Tabell 7.3: Fordeling av forventet injeksjonsbehov og innlekkasje for gjennstående del av de tre skyvedekka.

		Visteflaket		Boknafjorddekket		Storheidekket	
		(meter)	(prosent)	(meter)	(prosent)	(meter)	(prosent)
Forventet Injiseringsbehov	Klasse 1	1534	80,9%	3686	91,8%	2838	85,4%
	Klasse 1-3-1	0	0,0%	149	3,7%	45	1,4%
	Klasse 1-2-1	0	0,0%	117	2,9%	420	12,6%
	Klasse 3	0	0,0%	0	0,0%	20	0,6%
	Klasse 2	36	1,9%	0	0,0%	0	0,0%
	Klasse 2-3-2	160	8,4%	0	0,0%	0	0,0%
	Klasse 1-2-3	165	8,7%	65	1,6%	0	0,0%
Forventet Innlekkasje	Ingen	0	0,0%	3686	91,8%	0	0,0%
	Ingen - liten	1534	80,9%	186	4,6%	100	3,0%
	Ingen - middels	0	0,0%	0	0,0%	0	0,0%
	Liten	56	3,0%	30	0,7%	2683	80,7%
	Liten - middels	255	13,5%	50	1,2%	325	9,8%
	Middels	50	2,6%	0	0,0%	20	0,6%
	Middels - stor	0	0,0%	0	0,0%	195	5,9%
	Stor	0	0,0%	65	1,6%	0	0,0%



Figur 7.4: Søylediagram for forventet innlekkasje og injiseringsbehov for de tre skyvedekka, oppgitt i prosent. Merk logaritmisk y-akse

Sammenlignet med erfaringsdata fra den drevne delen av tunnelen, som en ser av tabell 5.1 angir prognosen en større del av traséen som potensielle problemsoner for Visteflaket og Boknafjorddekket, mens den gir en mye mindre andel for Storheidekket. En må merke at disse tallene ikke direkte kan sammenlignet med erfaringsdataene, da injeksjonsrundene går over 25 meter av tunneltraséen og injiserer derfor bergmasse som ikke har betydningsverdig innlekkasje. Traséen har også gått gjennom svakhetssoner uten lekkasje, hvor prognosen vurderer alle sakhetssonene som potensielle innlekkasjesoner. Men det skal nevnes at disse tallene baseres i stor grad på erfaringsdata fra den drevne delen av tunneltraséen.

Avsluttende diskusjon

En prognose på vannlekkasje i en undersjøisk tunnel vil ha en svært stor usikkerhet knyttet til seg. Det er usikkert hvilke variabler som dominerer innlekkasjen, og usikkert hvor og til hvilke grad en møter disse variablene. Det foreligger usikkerhet knyttet til testing med hensyn på tunnelen og hvor tunneltraséen vil møte de forskjellige bergartstypene (Holmøy, 2008). Det finnes også svært få etablerte modeller og fagfeltet er lite utviklet. Prognosen tok derfor hensyn til erfaringsdata fra nærliggende, sammenlignbare tunneler og erfaringsdata fra den drevne delen av tunnelen for å finne ingeniørgeologiske sammenlignbare forhold som en kan forvente å møte i den gjennstående delen av tunnelen.

Erfaringer fra nærliggende tunneler gir en god indikasjon på hvilke problemer en har møtt i sammenlignbare tilfeller. Spesielt relevant er hvor en har møtt innlekkasjer og hvilke rolle svakhetssonene har spilt på disse. Disse erfaringene gjelder for andre tunneler med andre ingeniørgeologiske forhold, men den enorme mangfoldigheten innen ingeniørgeologiske forhold gjør at det finnes ingen garanti for at det samme vil forekomme. Det er mulig at de sammenlignbare ingeniørgeologiske forholdene for Ryfylketunnelen avviker fullstendig.

For å ha påliteleg erfaringsdata stilles det strenge krav til entreprenørens utføring og byggherrens loggføring. Spesielt ved Solbakkstuffen kan en stille spørsmål ved injeksjonsmengden injisert ved møtt innlekkasje. Majoriteten av injeksjonene er på mindre enn 5 tonn injeksjonsmasse, noe som er svært lite, og en kan stille spørsmål ved effekten av disse injeksjonene. Ved korrekt injeksjonsutførelse er det mulig at Storheidekkets gneis ville krevd betydelig mindre injeksjon for å oppnå tilstrekkelig tetthet, og at erfaringsdataen gir et feil bilde som påvirker prognosen negativt.

En ser av sprekkerosene i figur 5.2 og 5.14 at sprekkesystemene til Storheidekket ligner mer og mer på sprekkesystemet en ser i Boknafjorddekket dypere i berggrunnen mot bergartsgrensen øst for øya Hidle. Det er derfor mulig at bergartsgrensen mellom disse skyvedekka er jevn, og derved at en møter mindre innlekkasje i Storheidekket når det nærmer seg Boknafjorddekket. Dersom det forekommer kan en forvente mindre lekkasje i Storhei-

dekket enn erfaringsdataen og prognosen indikerer. For Solbakkstuppen har entreprenøren vist dårlig oppfølging på minimum 50 meters avstand mellom stoffene. Det gjør også at en mister den forebyggende effekten injeksjonsarbeidet fra den fremste stoffen har på den bakerste stoffen.

I prognosen forventes det liten lekkasje i Visteflakets fyllitt og svært liten lekkasje i Boknafjorddekkets gneis. Men i overgangen mellom de to forventes stor innlekkasje hvor store injeksjonsmengder kreves. Dette er fordi en møtte stor innlekkasje som krevde store injeksjonsmengder i den drevne overgangen mellom disse skyvedekka, men også fordi tilsvarende bergartsgrense i sammenlignbare tunneler har gitt innlekkasje (Meisterplass, 2014). Foruten det har Visteflakets fyllitt erfaringsmessig mest lekkasje under land, mens Boknafjorddekkets godt utviklede sprekkefylling har gitt liten lekkasje. Prognosen forventer at dette er trender som fortsetter.

Ekstremtilfeller defineres som tilfeller hvor en opplever svært stor innlekkasje, og dermed hvor vanlige tettningsmetoder ikke er tilstrekkelig. Å forutse slike soner er per i dag for Ryfylketunnelen ikke praktisk mulig, og det gir derfor mer mening å ha en handlingsplan klar dersom en skulle møte slike soner (Nilsen, 2014-2015). Det nevnes at rutinemessig sonderboring er til nå den beste metoden for å unngå å drive inn i ekstremtilfeller uten tilstrekkelige tiltak. Å studere eksempler på suksessfull håndtering av ekstremsoner gir mening, og blandt disse er Atlanterhavstunnelen og Bjørøytunnelen ingeniørgeologisk sammenlignbare (Meisterplass, 2014). Disse er presentert i delkapittel 3.4. En bør merkes at disse er retningslinjer, og at dersom en møter på ekstremtilfeller burde stor varsomhet utføres.

Konklusjon

Ryfylketunnelen går gjennom tre kaledonske skyvedekker, hvor en vil møte forskjellige ingeniørgeologiske forhold og derav forskjellige innlekkasjer. Disse tre skyvedekka er funnet til å være Visteflakets fyllitt, Boknafjorddekkets urene gneis og Storheidekkets rene gneis.

Visteflakets fyllitt hører til bergartstype C og har et noe høyt innhold av kvarts. Det forventes å møte de største innlekkasjene under land for fyllitten, mens under vann forventes fyllitten å være relativt tett og av god kvalitet. 19,1 % av udrevet bergmasse defineres som svakhetssoner, hvor en kan møte innlekkasjer. Injeksjonsbehovet forventes å bestå av mange og korte injeksjonshull hvor mikrosegment og mikrosilika benyttes.

Boknafjorddekkets gneis hører til bergartstype B og blir ansett som en uren gneis med et høyt innhold av sprekke materiale. Det forventes å møte stor innlekkasje nær overgangen til Visteflaket, men ellers forventes Boknafjordgneisen å være relativt tett. 8,2 % av udrevet bergmasse defineres som svakhetssoner, hvor en kan møte innlekkasjer. Boknafjorddekkets gneis har også vist seg å kreve store mengder injeksjonsmasser dersom en møter innlekkasjer. Injeksjonsarbeidet kan kreve høyt injeksjonstrykk og mikrosegment dersom bergmassen viser motstand mot sementinntrengning.

Storheidekkets gneis Hører til bergartstype B, men er en ren gneis med et lavt innhold av sprekkefylling. Det forventes å møte hyppige lekkasjer over hele traséen, og spesielt under dypprenene rundt pel 16300 og 17300. 14,6 % av udrevet bergmasse defineres som svakhetssoner, hvor en kan møte innlekkasjer, samt 4,7 % av frisk bergmasse som anses som spesielt utsatt. Mangel på sprekkefylling gjør bergmassen relativt lett å injisere, hvor industrisement ofte vil være tilstrekkelig. Det stilles spørsmål ved entreprenørens utføring av injeksjon, og derved muligheten for upålitelige grunnlagsdata.

Ekstremtilfeller har forekomme i ingeniørgeologisk sammenlignbare tunneler og konsekvensomfanget av disse gjør de relevant for vurdering. Sonderboring og en klar

handlingsplan anses som de to beste tiltakene mot ekstremtilfeller, hvor erfaringer fra Atlanterhavstunnelen og Bjorøytunnelen benyttes. Fullt vanntrykk anses derimot ikke som et problem å injisere mot da maksimalt vanntrykk (29,2 bar) er betydelig mindre enn maksimalt injeksjonstrykk (100 bar).

Kapittel 10

Videre arbeid

Fagfeltet som dekker vannlekkasjer i undersjøiske tunneler er etter 30 år fremdeles lite utviklet. Det fører til at ambudsrundene og omfanget av arbeidet med undersjøiske tunneler er forbundet med stor usikkerhet. Det er forfatterens håp at denne masteroppgaven kan være til hjelp for fremtidige, grundigere undersøkelse og forskning på lekkasjer i tunneler.

Det vil være av interesse å studere hvorvidt prognosen var vellykket, eventuelt på hvilke punkt den var god og på hvilke punkt den var dårlig. Dette kan gi indikasjoner på hva en burde jobbe videre med for å komme nærmere en praktisk brukbar modell for vannlekkasje og injiseringsbehov i bergrom.

Bibliografi

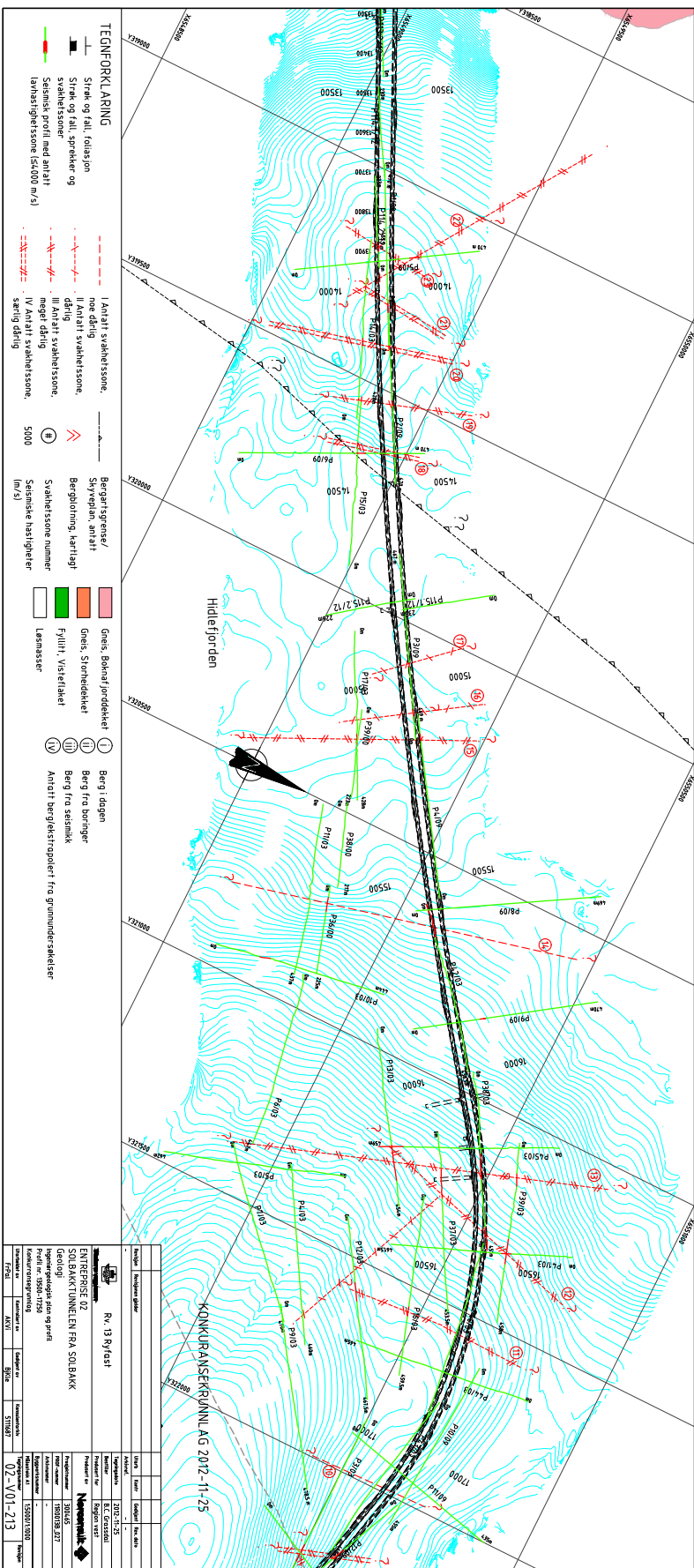
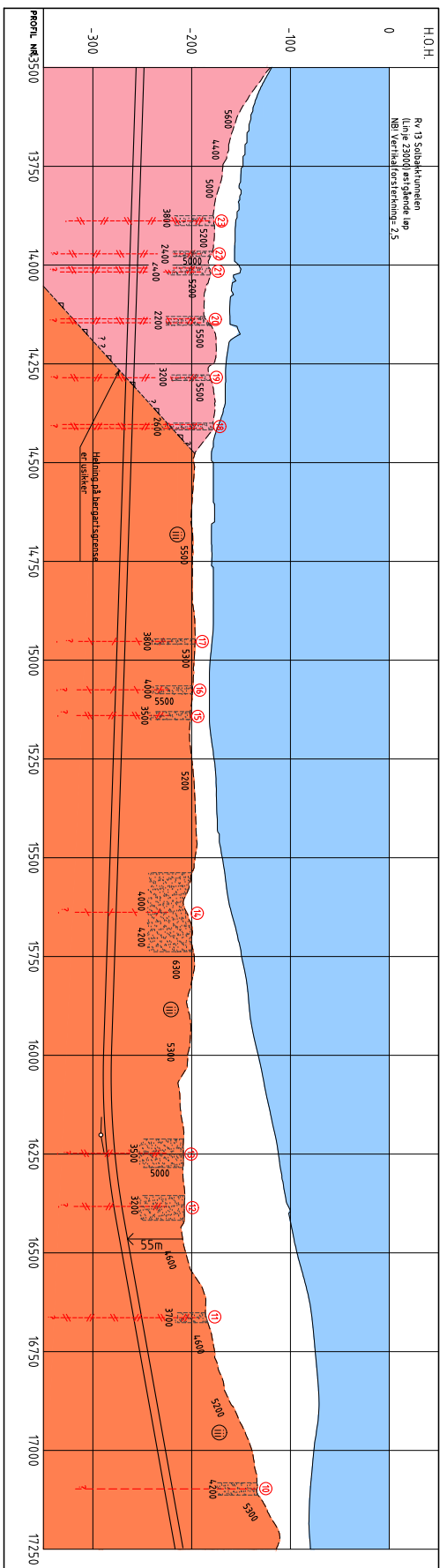
- Árnason, S. G., 2008. Prognose for tettingsinjeksjon i rogfast undersjøisk tunnel. masteroppgave. Tech. rep., NTNU.
- BAFS, 2011. Pre-excavation grouting in rock tunneling.
- Blindheim, O. T., Grøv, E., Nilsen, B., 2005. Nordic sub sea tunnel projects. *Tunnelling and Underground Space Technology* 20, 570–580.
- Braathen, A., Dehls, J., Roberts, D., Gabrielsen, R. H., 2002. Tectonic lineaments of Norway. *Norwegian journal of geology* Volume 82 (153-174).
- Braathen, A., Gabrielsen, R. H., 2000. Bruddsoner i fjell bruddsoner i fjell – oppbygning og definisjoner, gråsteinen 7. Tech. rep., Norges geologiske undersøkelse.
- Dahlø, T. S., 1996. Hydraulic fracturing tests kårstø gas terminal. rapport stf22. f96045. Tech. rep., SINTEF.
- Dahn, R., Sveian, H., Thoresen, M. K., 2008. Nord-trøndelag og fosen - geologi og landskap. NGU 3. opplag.
- Freeze, R. A., Cherry, J. A., 1979. *Groundwater*. Prentice-Hall, Inc, New Jersey, 604.
- Garshol, K., 2001. Modern grouting techniques. NFF Publication n. 12 - Water control in Norwegian tunnelling, 81–88.
- Geomap, 2005. Rapport 251707.01. ryfast, vegtunnel mellom stavanger og tau. samlereport for målinger utført i 2000, 2003 og 2004. Tech. rep., Statens Vegvesen.
- Geomap, 2006. Rapport 251709.01. ryfast, vegtunnel mellom stavanger og tau. supplerende refraksjonsseismiske målinger utført i 2005. Tech. rep., Statens Vegvesen.
- Geophysix, 2012. Rapport 12021. rv. 13, stavanger - solbakk (solbakk tunnelen, ryfast). Tech. rep., Statens Vegvesen.
- Geophysix, 2014. Rapport refraksjonsseismikk prosjekt nr. 14001, refraksjonsseismiske undersøkelser for rv13 ryfast. Tech. rep., Statens Vegvesen.

-
- Gudmundsson, A., 2000. Fracture dimensions, displacements and fluid transport. *Journal of Structural Geology* 22, 1221–1231.
- Hansen, S. E., 1997. 3-dimensjonal bergspenningsmåling - kårstø utbyggingsprosjekt. rapport f97060. Tech. rep., SINTEF.
- Hatlenes, C., 2011. T-forbindelsen. analyse av ingeniørgeologiske forhold knyttet til kryssning av svakhetssoner i undersjøisk tunnel. masteroppgave. Tech. rep., NTNU.
- Hognestad, H. O., Fagermo, J. I., et al, 2010. Praktisk berginjeksjon for underjordsanlegg. Håndbok nr. 06 NFF (Norsk forening for fjellsprenningsteknikk).
- Holmøy, K. H., 2008. Significance of geological parameters for predicting water leakage in hard rock tunnels. Tech. rep., Doctoral Theses at NTNU.
- Holmøy, K. H., 2014. Forelesingstittel 'dagens tema; vann og spenninger', SINTEF Byggeforsk, Geologi og bergteknikk.
- Holmøy, K. H., Trinh, N., Bergh, I. S. B., Rise, T., 2015-02-02. Geologisk rapport for e39 rogfast, revidert. SINTEF og COWI.
- Holter, K. G., Lund, M., 1996. Bergmekaniske beregninger samt instrumentering og målinger i tastavarden - en fjellhall med 27 meter spenn i fyllitt. Tech. rep., Fjellsprenningsteknikk, Bergmekanikk/geoteknikk.
- Karlsrud, K., Erikstad, L., Snilsberg, P., 2003. Undersøkelser og krav til innlekkasje for å ivareta ytre miljø. Statens Vegvesen Teknologiavdelingen.
- Klüver, B. H., Kveen, A., 2004. Berginjeksjon i praksis. Tech. rep., Vegdirektoratet.
- Larsen, T., Jakobsen, P. D., Dahle, H., 2008. Finnfast, 2d bergspenningsmåling i takhull. Sintef Rapport.
- Law, R. D., Eriksson, K., Davisson, C., 2001. Formation, evolution, and inversion of the middle tertiary diligencia basin, orocopia mountains, southern california. Department of Geological Sciences, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia 24061-0420, USA.
- Meisterplass, T. A., 2014. Analyse av ingeniørgeologiske forhold av spesiell betydning for innlekkasje i ryfylketunnelen. Prosjektoppgave NTNU.
- Multiconsult, 2008, revidert 2009. Rapport 115417-2. rv. 13 ryfast og eiganestunnelen. geologisk rapport. Tech. rep., Statens Vegvesen.
- Myrvang, A., 1996. Kompendium i bergmekanikk. Institutt for geologi og bergmekanikk, NTNU.
- NBG, 2000. Engineering geology and rock engineering. Norwegian Group for Rock Mechanics.
- NGU, September 2015. Berggrunnskart, løsmassekart, brønn database.
URL <http://www.ngu.no/no/hm/Kart-og-data/>
-

-
- Nilsen, B., 2008. Tung bergsikring av tunneler og bergrom; (4) sikring mot svelleleire. NTNU.
- Nilsen, B., 2010. Cases of instability caused by weakness zones in norwegian tunnels. Bulletin of Engineering Geology and the Environment.
- Nilsen, B., 2014-2015. Personlig kommunikasjon under arbeid, institutt for geologi og bergteknikk, NTNU.
- Nilsen, B., Broch, E., 2011. Ingeniørgeologi-berg grunnkurskompendie. NTNU.
- Nilsen, B., Palmström, A., 2001. Stability and water leakage of hard rock subsea tunnels. Tech. rep., Conf. on Modern Tunneling Science and Technology.
- Norconsult, 2012a. Ingeniørgeologisk rapport for konkurransesfrunnlag - entreprise e02 solbaktunnelen fra solbakk. Tech. rep., Statens Vegvesen.
- Norconsult, 2012b. Ingeniørgeologisk rapport for konkurransesfrunnlag - entreprise e03 solbaktunnelen fra hundvåg. Tech. rep., Statens Vegvesen.
- Norconsult, 2012c. Rapport geo-007. geoteknisk datarapport solbakk. Tech. rep., Statens Vegvesen.
- Norconsult, 2012d. Rapport geo-009. geoteknisk datarapport hundvåg nord. Tech. rep., Statens Vegvesen.
- SINTEF, 2005. Notat for utførelse av svelletrykkmåling. Utarbeidet av Simon Alexander Hagen, 12.
- Sørløkk, T., Rokoengen, K., Nilsen, B., 2007. Geologiske laboratorieundersøkelser. NTNU.
- Stefanus, W., 1999. Tunneling in a swelling and squeezing ground.
- Storkås, H. O., Engelstad, Ø., Lunde, S., 2006. Saudaprojektet – entreprise b1/b2 utfordringer. Tech. rep., Fjellsprengingsteknikk, Bergmekanikk/geoteknikk.
- Thornhill, M., 1999. Atomic spectroscopy 1/ atomic spectroscopy 2. Geologiske analysemetoder ved NTNU.
- Vegvesen, S., 2005. Laboratorieundersøkelse. Håndbok 14.
- Vegvesen, S., 2008. Informasjonsbrosjyre - rv. 13 ryfylkes fastlandsforbindelse (ryfast) e39/rv. 13 stavanger-solbakk reguleringsplan med konsekvensutredning. Informasjonsbrosjyre.
- Vegvesen, S., 2010. Håndbok 021. Statens Vegvesen Vegdirektorat.
- Vegvesen, S., 2014. Håndbok n500, vegtunneler. Vegdirektoratet.
- Vegvesen, S., 2015. Interne dokument.
- Wedervang, T., Jenssen, L. E. N., 2013. Injeksjonsarbeid ved knappetunnelen. NTNU Masteroppgave.

Vedlegg

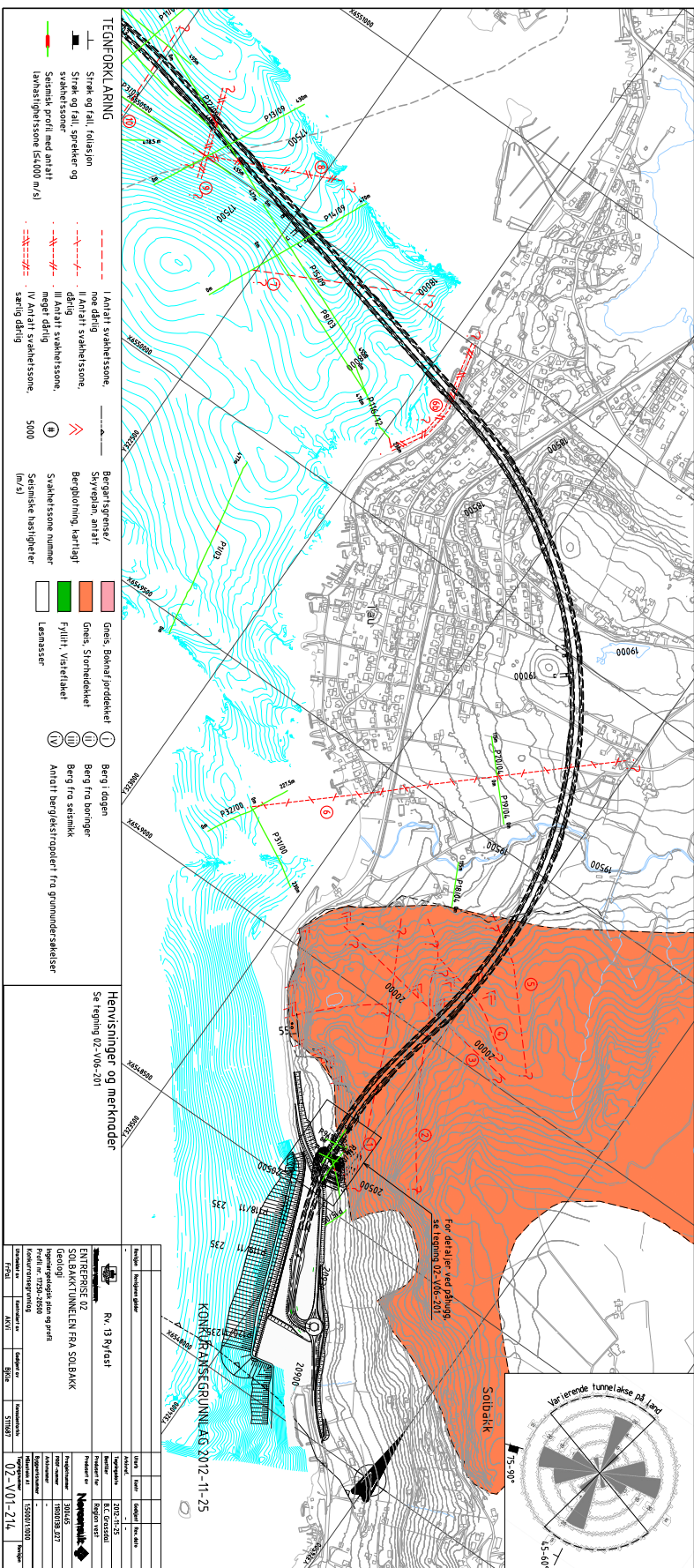
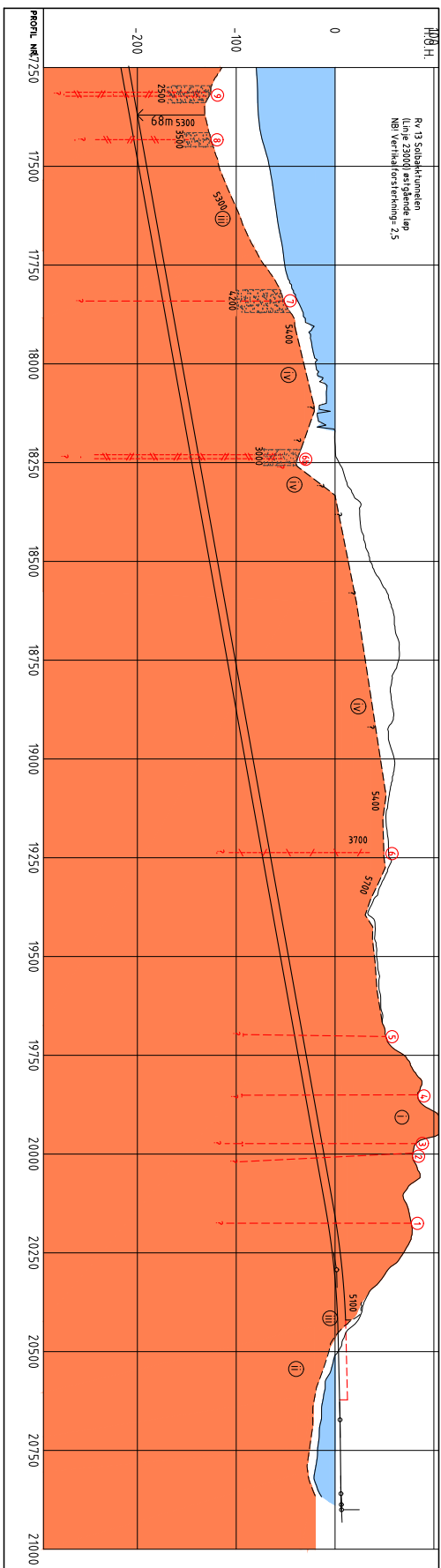
10.1 VEDLEGG 1: Ingeniørgeologisk plan og profil, tegning 02-V01-221



- TEGNFORKLARING**
- Strøk og fall, relasjon
 - Strøk og fall, sprekker og
 - Svakhetssoner
 - Seismisk profil med antatt løvstøttestreke (5400 m/s)
 - I Antatt svakhetszone, noe dårlig
 - I Antatt svakhetszone, dårlig
 - I Antatt svakhetszone, meget dårlig
 - I Antatt svakhetszone, særlig dårlig
 - Bergartsgrense/Skyevyren, antatt
 - Bergartsgrense/ Berghelling, kartlagt
 - Svakhetszone nummer
 - Seismiske hastigheter (m/s)
 - Grens, Bokstaf fordekket
 - Grens, Stenbeddekket
 - Fyllitt, Vissefeltet
 - Lønnsasser
 - Berg i dagen
 - Berg fra bokstaf
 - Berg fra seismisk
 - Antatt bergartstopper fra grunnundersøkelser

Rn. 13 Rv/1st	
ENTRERISE 02	
SOLA/BAKKTUNNELN RA. SOLBAKK	
Geologi	
Oppdragsleder: [Name]	
Kontrollert av: [Name]	
Tegnet av: [Name]	
Sjefteknisk: [Name]	
Tegningens nummer: 02-V01-213	
Tegningens dato: 2012-11-25	
Prosjekt nr.: [Number]	
Kontrollert av: [Name]	
Sjefteknisk: [Name]	
Tegningens nummer: 02-V01-213	
Tegningens dato: 2012-11-25	

Rv 13 Solbakk-tunnelen
 (Lini nr 2300) vestgående lopp
 NBI Verhållingsforstørrelsing = 2,5



TEKNISKE FORKLARINGER

Strøe og fall, felleisjjon
 svakhetssoner
 Sæstast profil med anratt
 (lønsmålingsstasjon 50000 m/s)

I Anratt svakhetssoner,
 II Anratt svakhetssoner,
 III Anratt svakhetssoner,
 IV Anratt svakhetssoner
 særlig dbrg

Berggransers/
 Skryvplan, anratt
 Bergoppløsing, kartlagt
 Svakhetssoner nummer
 Sæstastiske hastigheter
 (m/s)

Gra, Bøland/grøddetekt
 Gna, Stundetekt
 Fyllit, Væretaket
 Lønsmåser

Berg i dagen
 Berg fra beranik
 Anratt bergdetektorer fra grunnunder-sæstaster

Henvistninger og merknader
 Se tegning 02-V06-201

Rn: 13 Rv/16st
 ENVIKBERG 02
 SOLBAKKTUNNELN RFA SOLBAKK
 Geologi
 Ingeniørprosjekt og profil
 KONTROLLSISTEM
 02-V01-214

KONKRETTANSEGRUNNLAG 2012-11-25

For detaljer ved påbygg,
 se tegning 02-V06-201

Solbakk

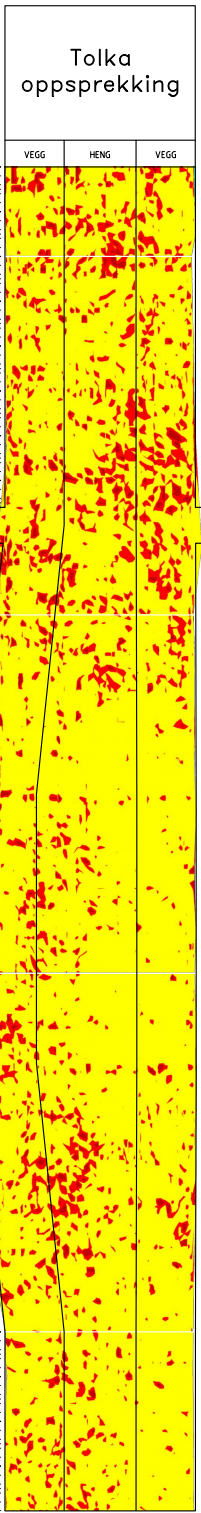
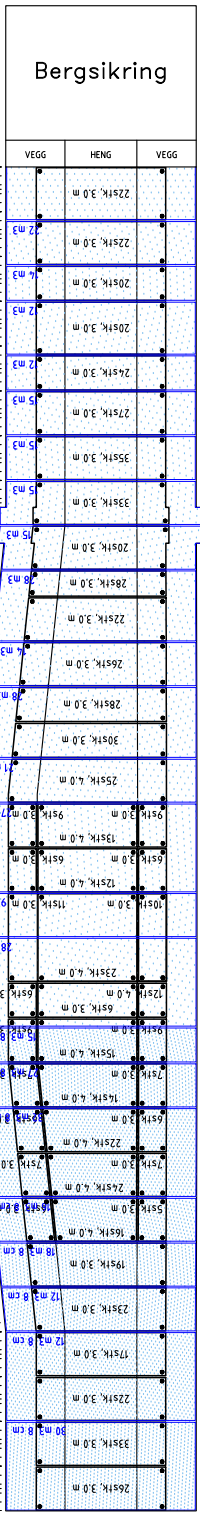
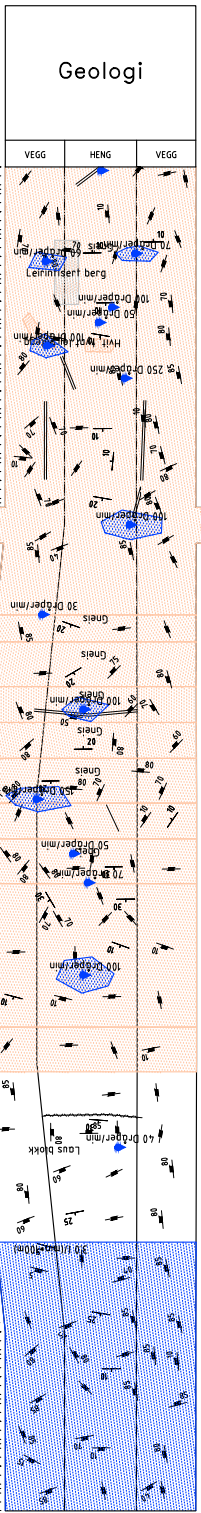
75-90°
 45-60°
 Verifiserende tunnelatase på land

10.2 VEDLEGG 2: Ingeniørgeologisk plan og profil, tegning 03-V01-221

10.3 VEDLEGG 3: Eksempel på Novapoint-logg

ROD/lin	0	800/0	851/0	900/0	950/0	1000/0	1050/0	1100/0	1150/0	1200/0	1250/0	1300/0	1350/0	1400/0	1450/0	1500/0	1550/0	1600/0	1650/0	1700/0	1750/0	1800/0	1850/0	1900/0	1950/0	2000/0		
J/L/m	0	1573,0	1573,0	1573,0	1573,0	1573,0	1573,0	1573,0	1573,0	1573,0	1573,0	1573,0	1573,0	1573,0	1573,0	1573,0	1573,0	1573,0	1573,0	1573,0	1573,0	1573,0	1573,0	1573,0	1573,0	1573,0	1573,0	
M/S/RF	0	100/0	100/0	100/0	100/0	100/0	100/0	100/0	100/0	100/0	100/0	100/0	100/0	100/0	100/0	100/0	100/0	100/0	100/0	100/0	100/0	100/0	100/0	100/0	100/0	100/0	100/0	100/0
Q-verdi	1,5	4,0	4,3	5,0	4,7	3,9	4,9	3,9	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3
Bergklasse																												

injeksjon	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
1																															



Beregning

- Kombinasjonslinjestykke, vedbukk stoff
- Enderoknede, vedbukk stoff
- Andre boreteigen, vedbukk stoff

Geologiske registreringer

- Spekkeseit
- Følisjon
- Sprekk
- Slippe
- Sokkeltstene smulere enn 1 m
- Sokkeltstene bredere enn 1 m
- Avskjelling etter 1 time
- Avskjelling etter 15 minutter
- Intens bergtog

Bergarter

- Fyllitt
- Gneiss
- Leirfjell berg

Vann / sirkling

- Lekkepunkt
- Lekkeage områdelintervall

Bergklasser

- A - Svartefjellstrøm god (4,0-10,0)
- B - God (10-4,0)
- C - Middels (4-10)
- D - Dårlig (1-4)
- E - Svært dårlig (0,1-1)
- F - Ekstremt dårlig (0,01-0,1)
- G - Eksplosjonert dårlig (0,001-0,01)
- Ikke kartlagt med Q-verdi

Tolketilstand (NPR)

- 50 - 25
- 25 - 0
- 0 - 15
- 15 - 25
- 25 - 50
- 50 - 75

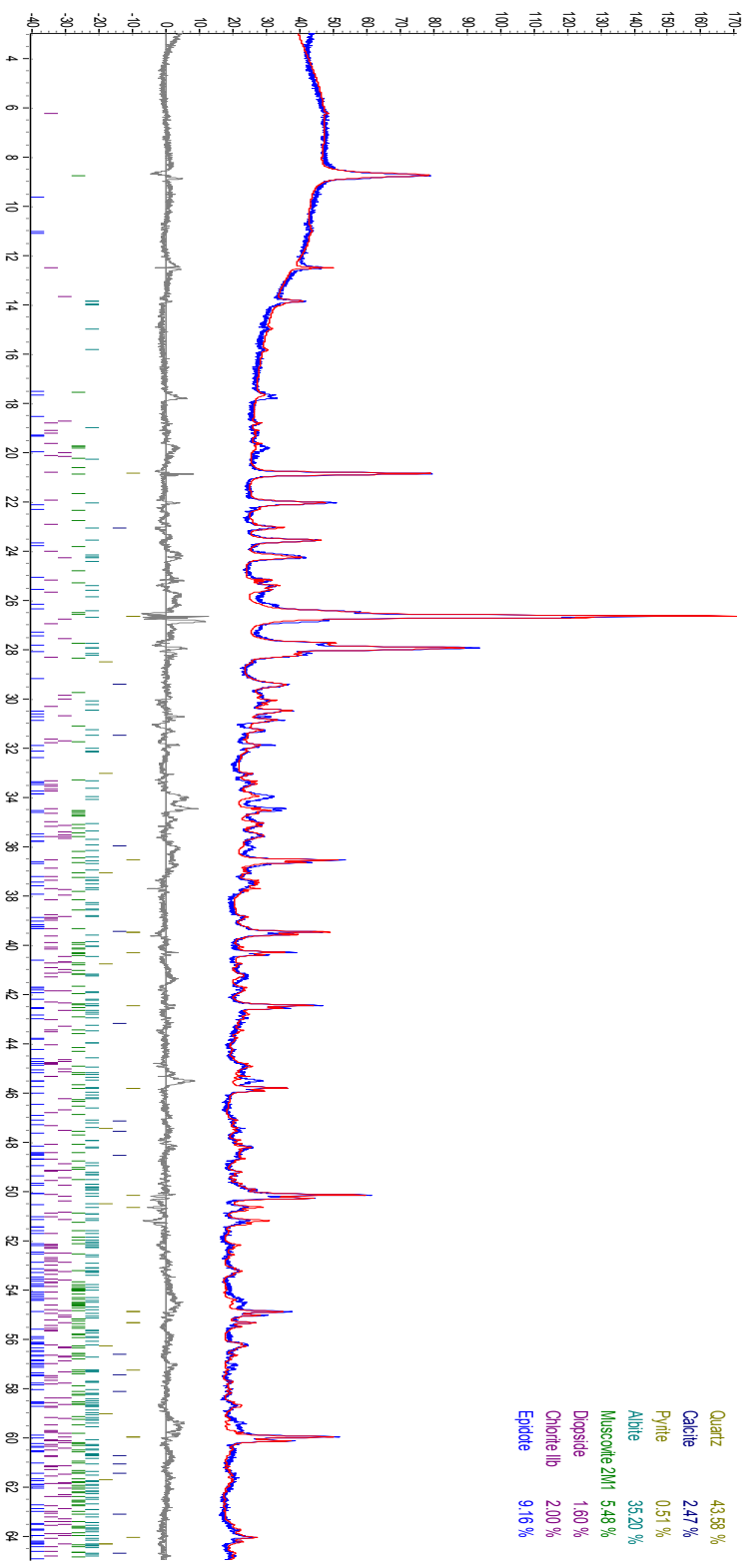
Tilstandsklasser

- 0-15
- 15-25
- 25-35
- 35-45
- 45-55
- 55-65
- 65-75
- 75-85
- 85-95
- 95-105

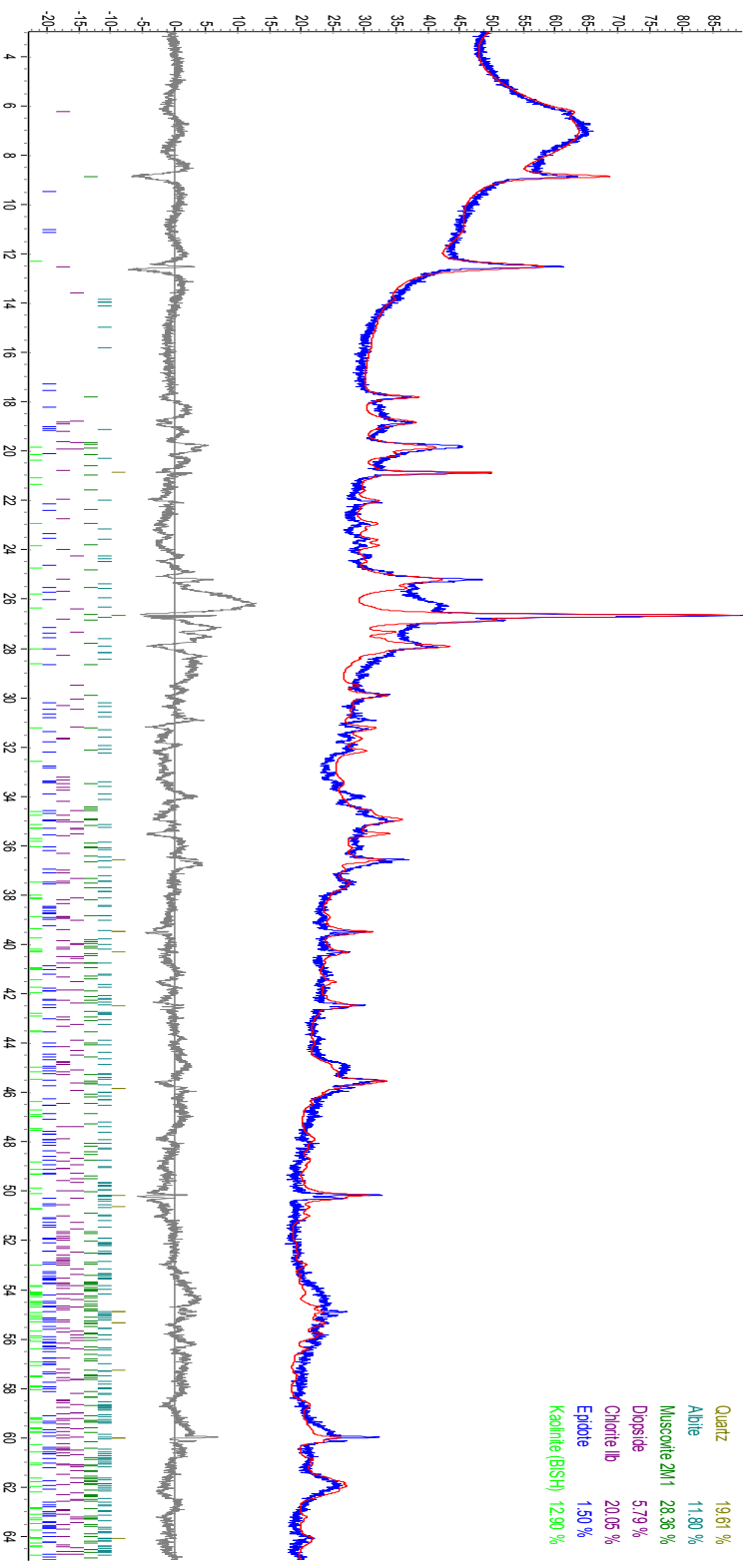
Parti	Parti nr	Parti nr	Parti nr	Parti nr	Parti nr	Parti nr	Parti nr	Parti nr	Parti nr
1	0-15	15-25	25-35	35-45	45-55	55-65	65-75	75-85	85-95
2	15-25	25-35	35-45	45-55	55-65	65-75	75-85	85-95	95-105
3	25-35	35-45	45-55	55-65	65-75	75-85	85-95	95-105	105-115
4	35-45	45-55	55-65	65-75	75-85	85-95	95-105	105-115	115-125
5	45-55	55-65	65-75	75-85	85-95	95-105	105-115	115-125	125-135
6	55-65	65-75	75-85	85-95	95-105	105-115	115-125	125-135	135-145
7	65-75	75-85	85-95	95-105	105-115	115-125	125-135	135-145	145-155
8	75-85	85-95	95-105	105-115	115-125	125-135	135-145	145-155	155-165
9	85-95	95-105	105-115	115-125	125-135	135-145	145-155	155-165	165-175
10	95-105	105-115	115-125	125-135	135-145	145-155	155-165	165-175	175-185
11	105-115	115-125	125-135	135-145	145-155	155-165	165-175	175-185	185-195
12	115-125	125-135	135-145	145-155	155-165	165-175	175-185	185-195	195-205
13	125-135	135-145	145-155	155-165	165-175	175-185	185-195	195-205	205-215
14	135-145	145-155	155-165	165-175	175-185	185-195	195-205	205-215	215-225
15	145-155	155-165	165-175	175-185	185-195	195-205	205-215	215-225	225-235
16	155-165	165-175	175-185	185-195	195-205	205-215	215-225	225-235	235-245
17	165-175	175-185	185-195	195-205	205-215	215-225	225-235	235-245	245-255
18	175-185	185-195	195-205	205-215	215-225	225-235	235-245	245-255	255-265
19	185-195	195-205	205-215	215-225	225-235	235-245	245-255	255-265	265-275
20	195-205	205-215	215-225	225-235	235-245	245-255	255-265	265-275	275-285
21	205-215	215-225	225-235	235-245	245-255	255-265	265-275	275-285	285-295
22	215-225	225-235	235-245	245-255	255-265	265-275	275-285	285-295	295-305
23	225-235	235-245	245-255	255-265	265-275	275-285	285-295	295-305	305-315
24	235-245	245-255	255-265	265-275	275-285	285-295	295-305	305-315	315-325
25	245-255	255-265	265-275	275-285	285-295	295-305	305-315	315-325	325-335
26	255-265	265-275	275-285	285-295	295-305	305-315	315-325	325-335	335-345
27	265-275	275-285	285-295	295-305	305-315	315-325	325-335	335-345	345-355
28	275-285	285-295	295-305	305-315	315-325	325-335	335-345	345-355	355-365
29	285-295	295-305	305-315	315-325	325-335	335-345	345-355	355-365	365-375
30	295-305	305-315	315-325	325-335	335-345	345-355	355-365	365-375	375-385

10.4 VEDLEGG 4: Resultat fra XRD-analyse

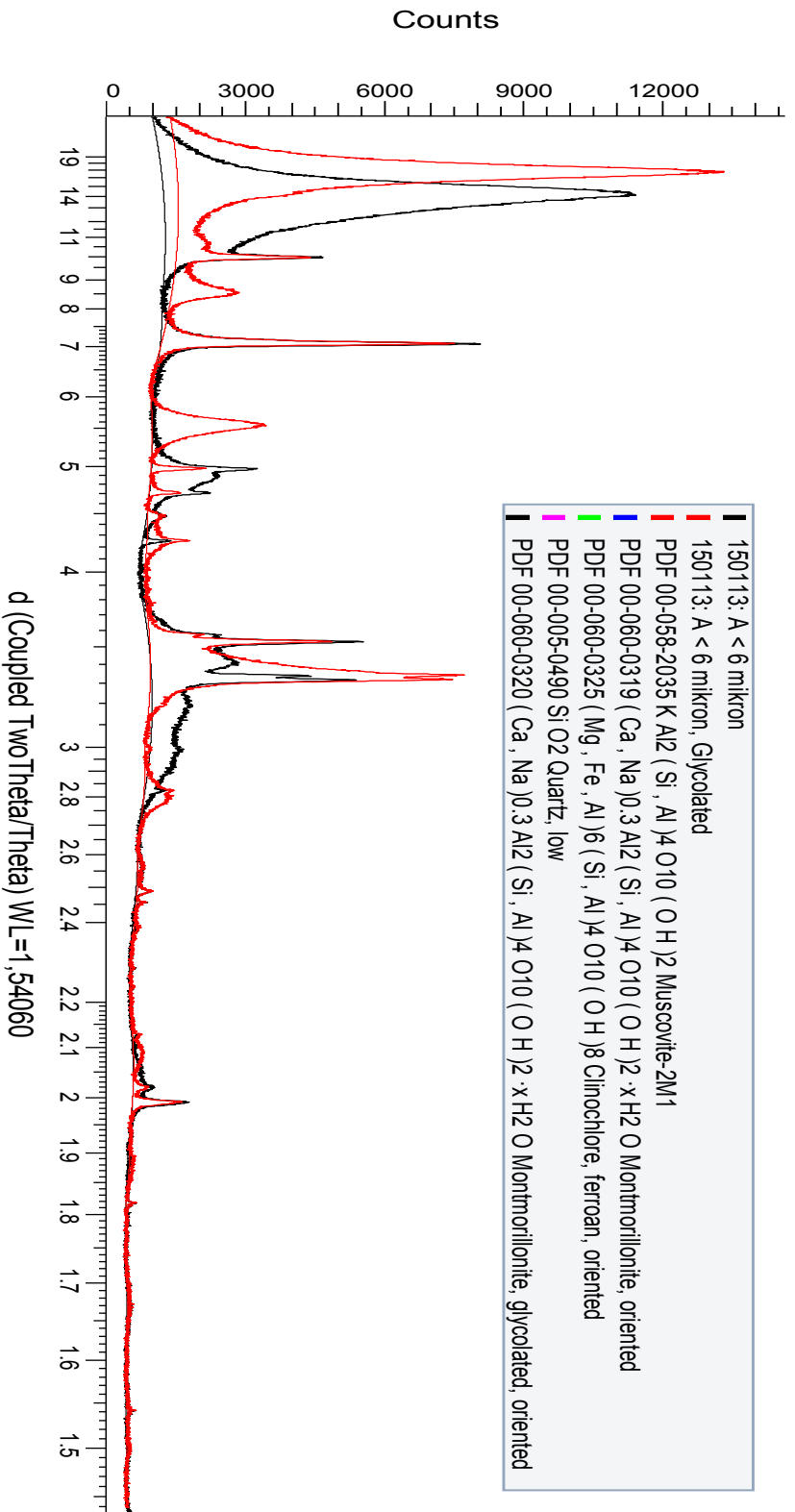
150112: A>20 um



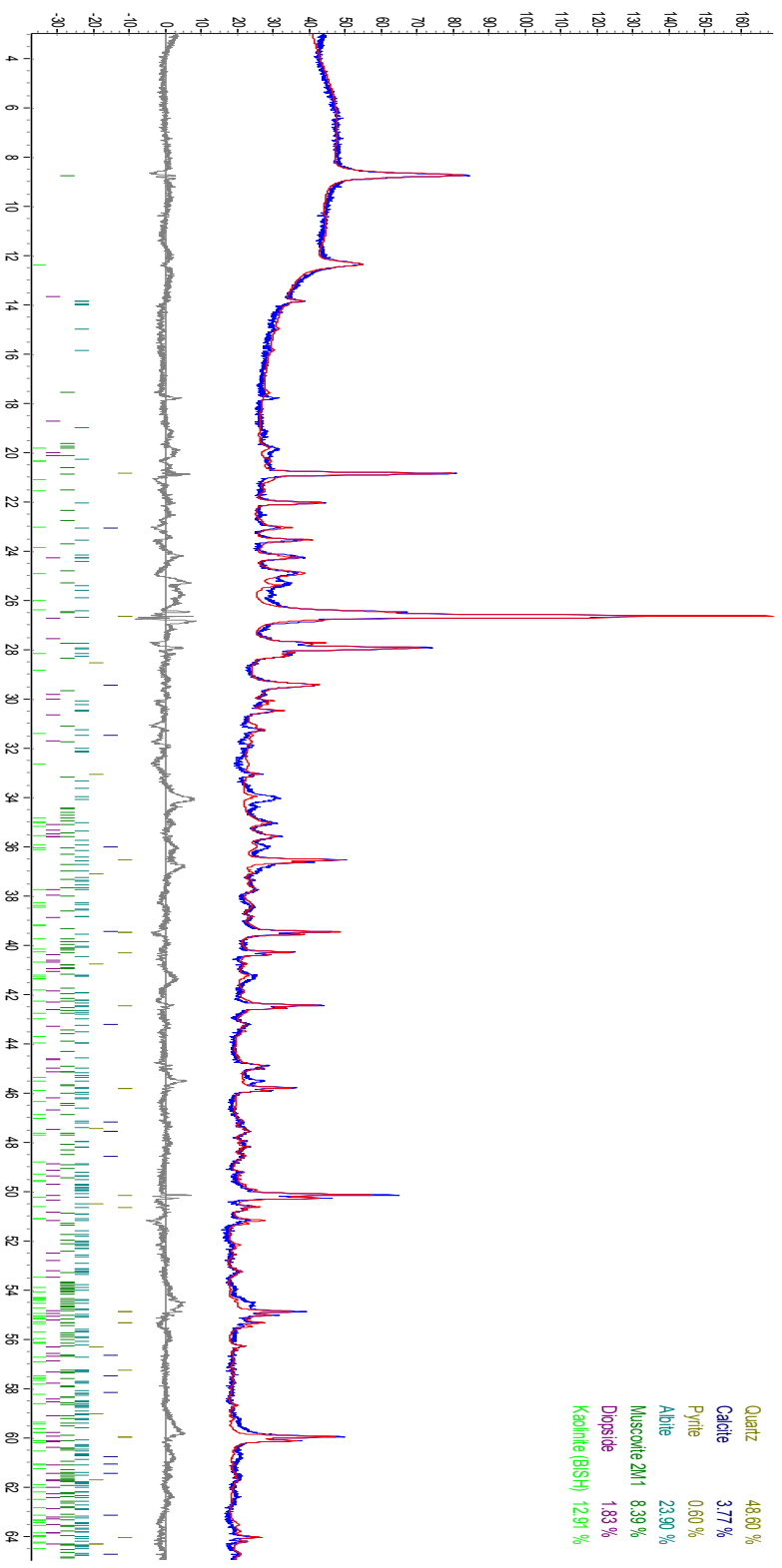
150113: A <20 um



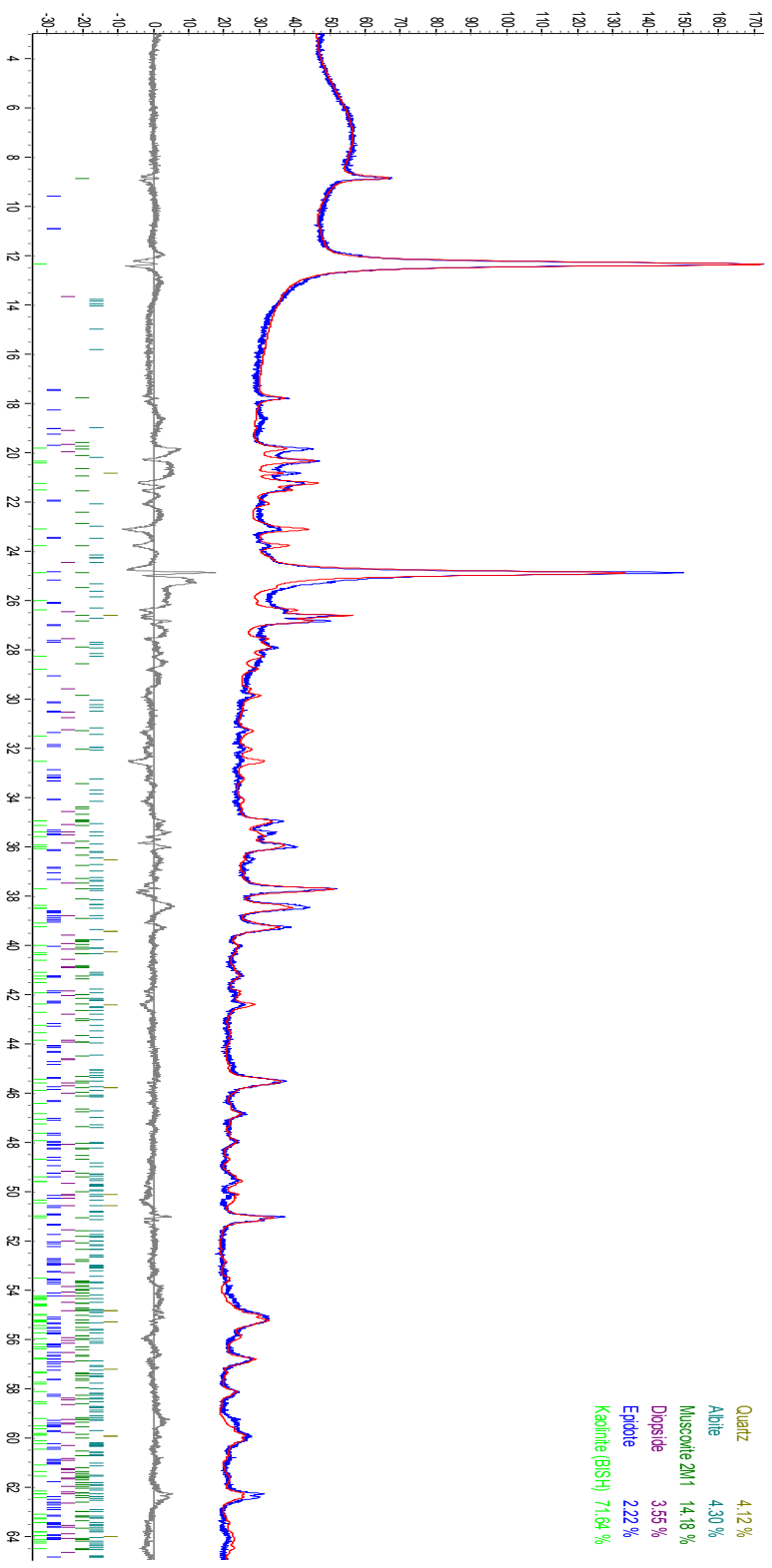
Quartz	19.61 %
Albite	11.80 %
Muscovite 2M1	28.36 %
Diopside	5.79 %
Chlorite lb	20.05 %
Epidote	1.50 %
Kaolinite (BSH)	12.90 %

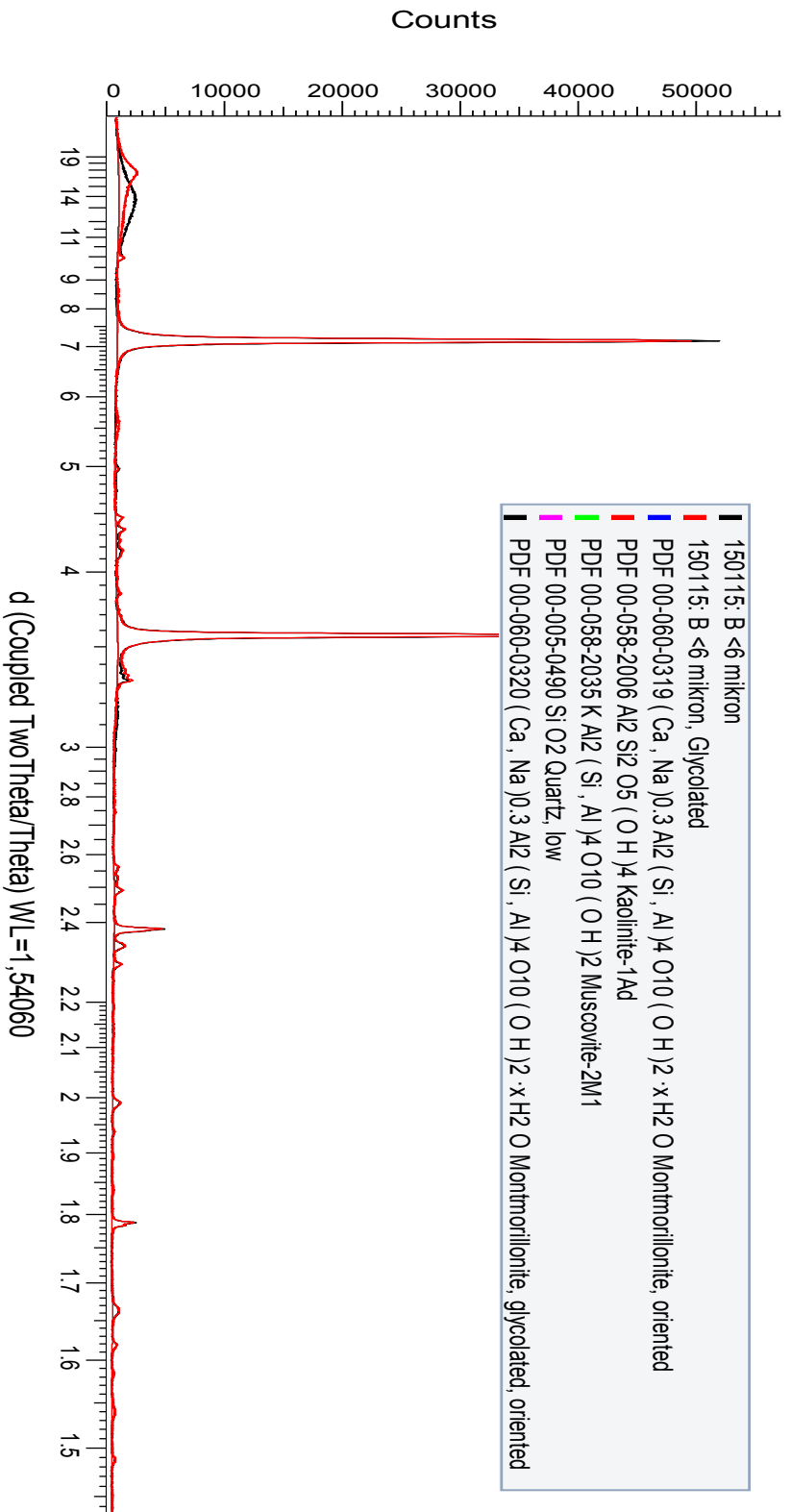


150114: B >20 um

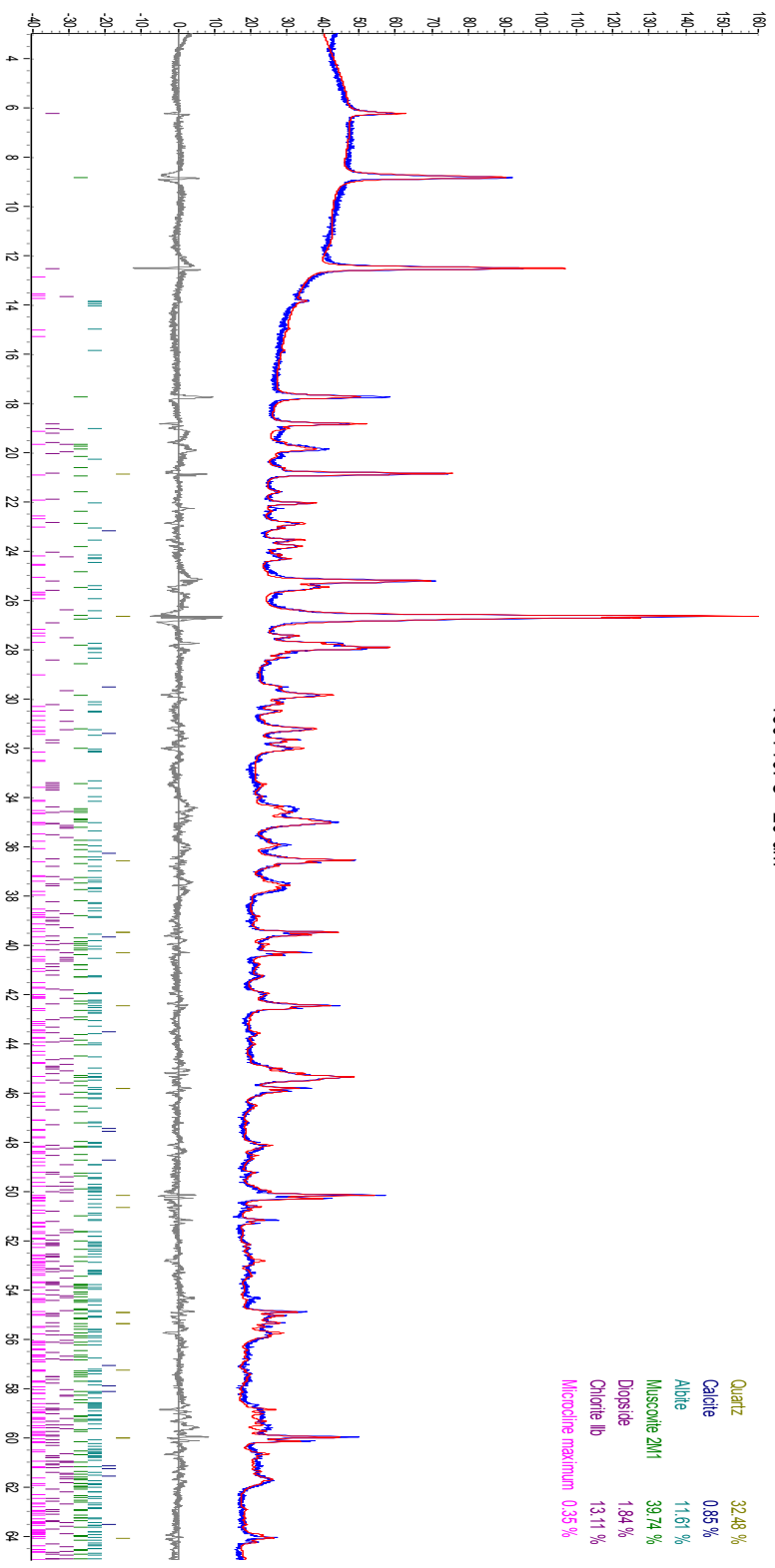


150115: B <20 µm

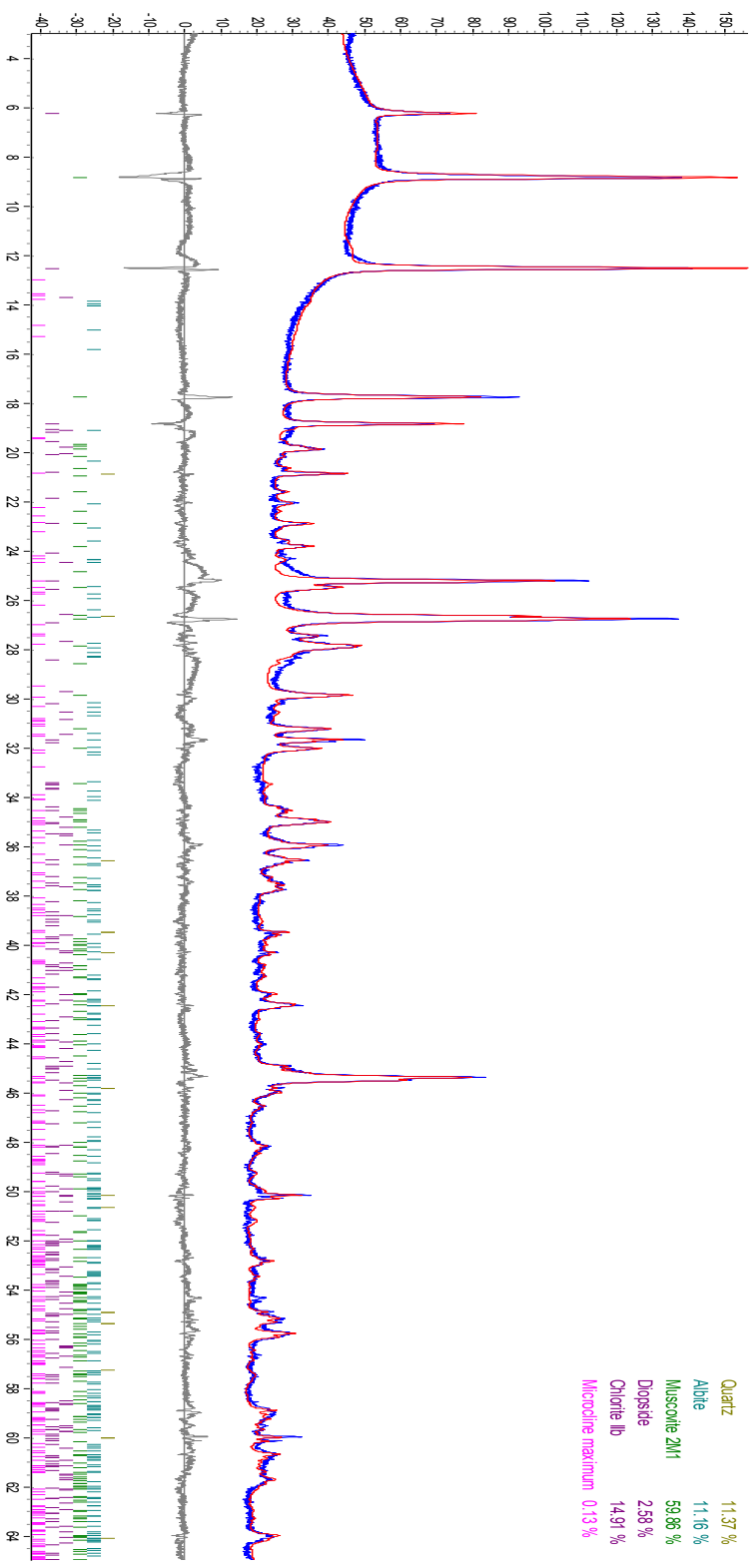




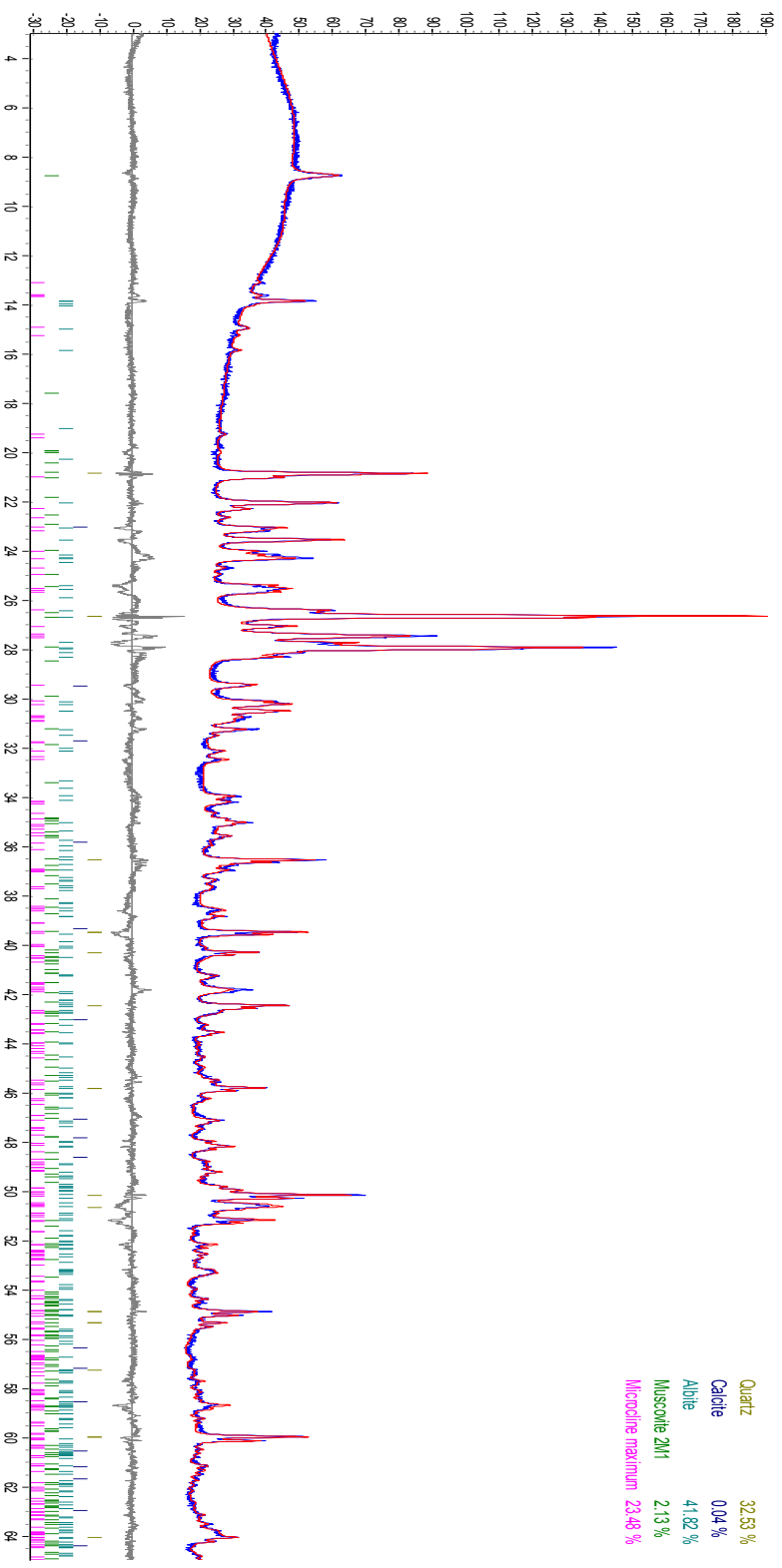
150116: C >20 um



150117: C <20 um



150118: D >20 µm

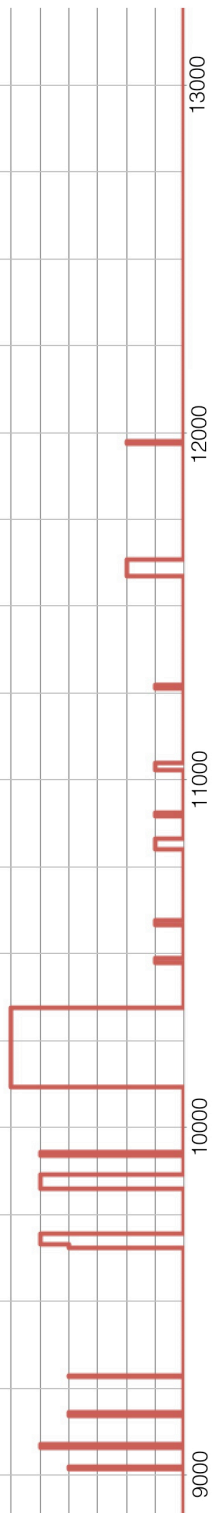


10.5 VEDLEGG 5: Prognosen



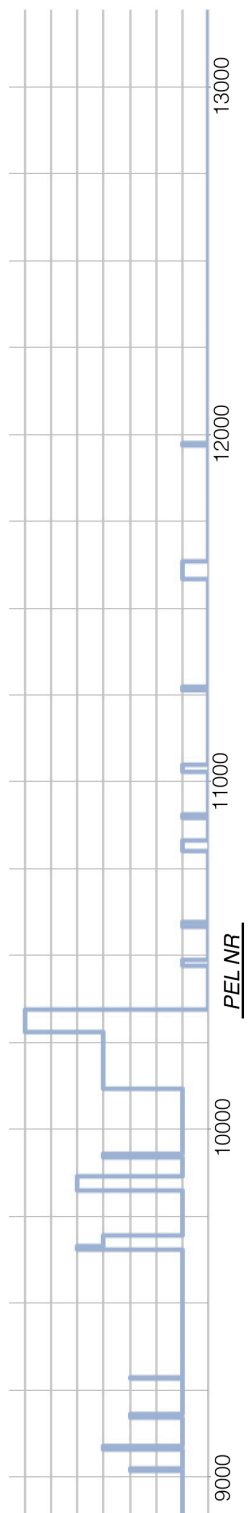
FORVENTET INJEKSJONSKLASSE

- Klasse 1-2-3
- Klasse 2-3-2
- Klasse 2
- Klasse 3
- Klasse 1-2-1
- Klasse 1-3-1
- Klasse 1



FORVENTET INNLEKKASJE

- Stor
- Middels-stor
- Middels
- Liten-middels
- Liten
- Ingen-middels
- Ingen-liten
- Ingen



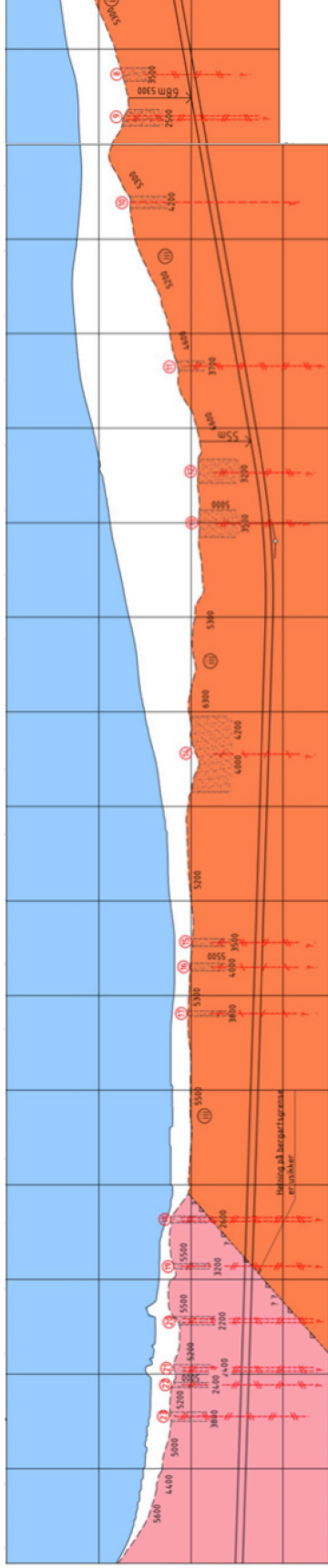
PEL NR

M.O.H 0

-100

-200

-300



17000

16000

15000

14000

FORVENTET INJEKSJONSKLASSE

Klasse 1-2-3

Klasse 2-3-2

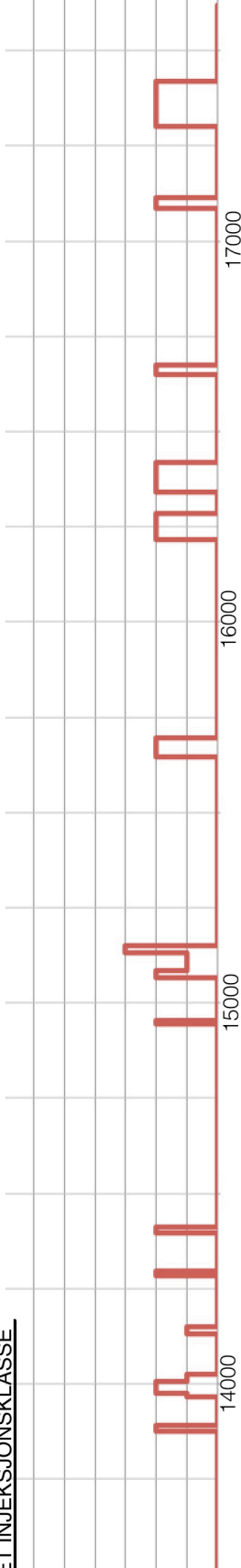
Klasse 2

Klasse 3

Klasse 1-2-1

Klasse 1-3-1

Klasse 1



17000

16000

15000

14000

FORVENTET VANNLEKKASJE

Stor

Middels-stor

Middels

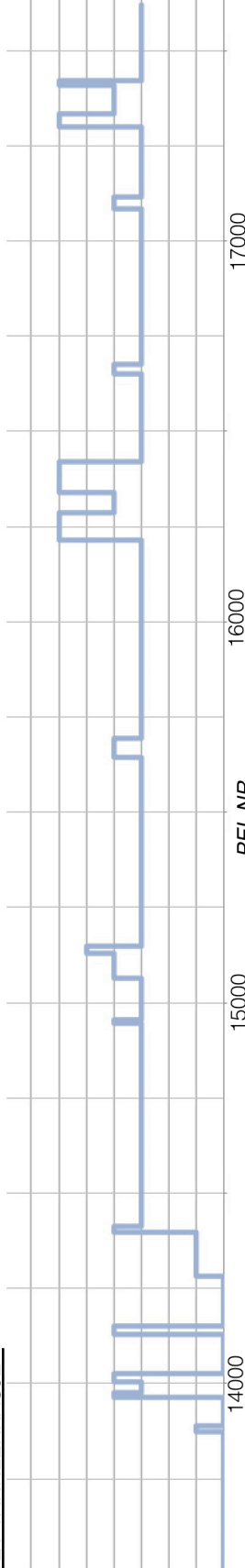
Liten-middels

Liten

Ingen-middels

Ingen-liten

Ingen



17000

16000

15000

14000

PEL NR

10.6 VEDLEGG 6: Detaljer fra lekkasjeunkt

Stuff	Løp	Pel	Målt lekkasje [l/stuff]	Injeksjons- mengde [kg]	Q-verdi	Novapoint		Bergart	Merknad
						1. Sprekke retning [°]	2. Sprekke retning [°]		
E02-Solbakk	A	-5		9691	3,5			Gneis	
E02-Solbakk	B	0		3427	3,1			Gneis	
E02-Solbakk	A	20457	6,4	1721	3			Gneis	
E02-Solbakk	B	20413	4,0	16864	4,4	50	353	Gneis	
E02-Solbakk	A	20348	4,0	9679	4	45	355	Gneis	
E02-Solbakk	B	19993	10,0	4920	7,7	42	21	Gneis	
E02-Solbakk	A	19944	6,8	2262	4,1	277	79	Gneis	Ø-V Slepper
E02-Solbakk	B	19903	7,0	2462	6,6	341	94	Gneis	Ø-V Sprekk
E02-Solbakk	B	19890	7,5	1475	9,1	330	72	Gneis	
E02-Solbakk	B	19876	3,2	1434	7,4	311	20	Gneis	
E02-Solbakk	A	19830	7,5	4058	8	310	5	Gneis	Homogent berg
E02-Solbakk	B	19775-90							SVAKHETSSONE, Q = 0,5, bredde = 15 m, retning = Ø-V
E02-Solbakk	B	19799	3,6	1873	3,4	348	294	Gneis	Fra stor svakhetszone
E02-Solbakk	A	19723	4,2	1314	2,5	302	92	Gneis	Slepper og sprekker
E02-Solbakk	A	19709	11,5	5460	3,8	93	355	Gneis	
E02-Solbakk	B	19591	15,0	9096	4,8	284	40	Gneis	
E02-Solbakk	B	19545	6,0	6991	2,5	354	80	Gneis	
E02-Solbakk	B	19468	12,0	23241	4	138	320	Gneis	
E02-Solbakk	B	19384	28,9	6730	0,75	71	45	Gneis	Fra svakhetszone
E02-Solbakk	B	19365-80							SVAKHETSSONE, Q = 0,6, bredde = 15 m, retning = ØNØ-VSV
E02-Solbakk	B	19374	5,7	4192	2,2	48	350	Gneis	I svakhetszone
E02-Solbakk	B	19335	13,0	3584	3,4	65	3	Gneis	
E02-Solbakk	A	19334	3,5	5780	2,1	348	70	Gneis	Svakhetszone
E02-Solbakk	A	19320-30							SVAKHETSSONE, Q = 0,5, bredde = 10 m, retning = ØNØ-VSV
E02-Solbakk	B	19318	16,6	3173	3,2	71	5	Gneis	
E02-Solbakk	B	19301	9,1	4117	3,6	2	60	Gneis	Fra medium svakhetszone
E02-Solbakk	B	19285	3,8	6751	3,3	60	4	Gneis	Nær/fra medium svakhetszone
E02-Solbakk	A	19280	16,0	4967	5,7	338	80	Gneis	Nær svakhetszone
E02-Solbakk	B	19269	45,5	10009	2,9	45	347	Gneis	Nær svakhetssoner
E02-Solbakk	B	19263		3781	7,7	47	346	Gneis	Nær svakhetssoner
E02-Solbakk	A	19248	25,0	3529	3	332	75	Gneis	
E02-Solbakk	A	19248	12,0	4710	3	333	79	Gneis	2x injisering
E02-Solbakk	B	19235-45							SVAKHETSSONE, Q = 2, bredde = 10 m, retning = ØNØ-VSV
E02-Solbakk	A	19233	4,5	4811	4,5	330	80	Gneis	
E02-Solbakk	B	19168	10,3	10794	10,5	322	55	Gneis	NNV-SSØ sprekk
E02-Solbakk	B	19152	10,5	4164	7,38	335	50	Gneis	NNV-SSØ sprekk
E02-Solbakk	B	19137	15,5	3619	8,7	325	53	Gneis	NNV-SSØ sprekk
E02-Solbakk	B	19122	85,0	8324	8,5	326	55	Gneis	Foliasjon dominerer
E02-Solbakk	A	19113	11,8	4591	5,3	60	2	Gneis	NV-SØ slepper
E02-Solbakk	A	19112	11,8	2752	5,7	65	358	Gneis	2x injisering
E02-Solbakk	B	19107	71,0	6333	2,8	328	50	Gneis	
E02-Solbakk	A	19096	47,5	2974	5,4	310	78	Gneis	
E02-Solbakk	B	19092	11,8	3413	3,1	57	323	Gneis	
E02-Solbakk	A	19081	6,5	2763	1,1	300	80	Gneis	
E02-Solbakk	A	19066	26,6	5039	4,6	305	50	Gneis	
E02-Solbakk	A	19051	25,5	2803	3,9	60	335	Gneis	N-S sprekk
E02-Solbakk	A	19036	50,3	4861	1,1	355	291	Gneis	N-S Sprekk
E02-Solbakk	B	19025	11,2	2341	3,9	50	356	Gneis	Nær liten ø-v svakhetszone

E02-Solbakk	A	19021	19,0	17060	3,7	0	45	Gneis	
E02-Solbakk	B	19009	2,8	2141	3,5	50	0	Gneis	Ved liten ø-v svakhetszone
E02-Solbakk	A	19006	9,5	2033	4,4	0	295	Gneis	
E02-Solbakk	A	19005	2,6	1557	4,4	0	295	Gneis	
E02-Solbakk	A	18991	7,5	3133	3,62	0	48	Gneis	
E02-Solbakk	A	18976	3,9	8225	2,9	0	291	Gneis	
E02-Solbakk	B	18856	13,2	3114	6,6	16	318	Gneis	
E02-Solbakk	A	18830	3,5	972	4,3	325	35	Gneis	
E02-Solbakk	A	18815	18,1	1833	3,5	7	325	Gneis	
E02-Solbakk	A	18720	7,6	1874	3,3	305	23	Gneis	To sprekker (ø-V og NNv-SSø)
E02-Solbakk	B	18702	17,2	4037	2,9	305	350	Gneis	Nær nv-sø svakhetszone
E02-Solbakk	B	18643	8,6	2135	4,1	15	312	Gneis	NV-Sø sprekk
E02-Solbakk	A	18542	3,3	4676	4,5	312	43	Gneis	
E02-Solbakk	A	18507	4,8	8420	1,6	325	70	Gneis	
E02-Solbakk	A	18429	2,6	3433	5,8	0	90	Gneis	
E02-Solbakk	B	18424	16,0	3107	5,9	290	7	Gneis	
E02-Solbakk	A	18393	12,2	9531	4	5	293	Gneis	Injeksjon fra svakhetszone
E02-Solbakk	A	18388	3,9	6069	4,6	12	300	Gneis	Injeksjon fra svakhetszone
E02-Solbakk	B	18365	6,0	8647	6	13	85	Gneis	Leire i sprekken
E02-Solbakk	B	18317	8,9	19914	3	80	5	Gneis	
E02-Solbakk	A	18280	4,7	6649	5,9	2	78	Gneis	UNDER LAND
E02-Solbakk	A	18005	8,7	6442	8,1	29	51	Gneis	UNDER SJØ
E02-Solbakk	B	17992	8,7	3866	6,6	340	75	Gneis	N-S sprekk
E02-Solbakk	A	17990	10,8	2487	8,2	84	338	Gneis	Nær liten svakhetszone
E02-Solbakk	A	17975	5,4	5702	5,6	348	89	Gneis	Nær liten svakhetszone
E02-Solbakk	B	17963	8,7	3458	2,8	340	280	Gneis	Nær liten n-s svakhetszone
E02-Solbakk	B	17901	26,5	30009	3,6	40	353	Gneis	ø-V og NV-Sø sleppe
E02-Solbakk	A	17896	3,2	5972	4,32	315	47	Gneis	Nær medium svakhetszone
E02-Solbakk	A	17880	67,7	17996	5,6	344	315	Gneis	
E02-Solbakk	B	17870	10,3	29344	2,7	291	45	Gneis	ø-V og NV-Sø sleppe
E02-Solbakk	A	17864	15,5	17358	6,9	315	40	Gneis	
E02-Solbakk	B	17853	10,2	16393				Gneis	
E02-Solbakk	A	17848	9,7	24559				Gneis	
E02-Solbakk	B	17838	14,0	8883				Gneis	
E02-Solbakk	A	17818	18,1	9656				Gneis	
E02-Solbakk	A	17802	10,7	20686				Gneis	
E02-Solbakk	A	17757	6,4	14783				Gneis	
E02-Hungvåg	L23	6205-80							SVAKHETSSONE, Q = 0,08-2, bredde = 75 m, retning = NV-Sø
E02-Hungvåg	L23	6961		23890	7,8	320	42	Gneis	Bergartsgrense ved pel 7050
E02-Hungvåg	L24	6962	5	13820	7,9	310	38	Gneis	Bergartsgrense ved pel 7045
E02-Hungvåg	L24	6989		26765	5,6	300	35	Gneis	40 m bred svakhetszone
E02-Hungvåg	L23	6997		15638	1,6	308	41	Gneis	100 meter bred svakhetszone
E02-Hungvåg	L23	7013	38,0	35210	2,6	295	35	Gneis	(Q; 0,6-3), injeksjon i gneisdelen
E02-Hungvåg	L23	7105-35							SVAKHETSSONE før bergartsgrense, Q = 0,4-0,9, bredde = 30 m, retning = ø-V
E02-Hungvåg	L24	7017-7045							SVAKHETSSONE før bergartsgrense, Q = 0,09-0,8, bredde = 30 m, retning = NV-Sø
E02-Hungvåg	L23	8112		14369				Fyllitt	Utenfor logg
E02-Hungvåg	L24	8116		15632				Fyllitt	(Q; 0,8-0,09) uten injeksjon
E02-Hungvåg	L24	8306		11089				Fyllitt	Utenfor logg
E02-Hungvåg	L24	8320		22219				Fyllitt	Utenfor logg
E02-Hungvåg	L24	8335		15339				Fyllitt	Utenfor logg