

Christian Henrik Thomassen Ibsen

Berginjeksjon vurdert i forhold til Q-systemet og in-situ bergspenninger

Masteroppgave i Geologi, miljø- og geoteknologi

Veileder: Eivind Grøv

Mai 2021

Christian Henrik Thomassen Ibsen

Berginjeksjon vurdert i forhold til Q-systemet og in-situ bergspenninger

Masteroppgave i Geologi, miljø- og geoteknologi
Veileder: Eivind Grøv
Mai 2021

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



Kunnskap for en bedre verden



MASTEROPPGAVEN 60 poeng

Kandidatens navn: Christian Henrik Thomassen Ibsen

Oppgavens tittel: Berginjeksjon vurdert i forhold til Q-systemet og in-situ bergspenninger

English title: Rock mass grouting assessed in relation to the Q-system and in-situ stresses

Utfyllende tekst: Oppgaven har som mål å vurdere hvorvidt det er mulig å identifisere en relasjon mellom utført injeksjon og geologiske trekk i bergmassen som injiseres. Det er av interesse for tunnelbransjen å etablere kunnskap om hvilke geologiske faktorer som fører til økt bruk av injeksjonsmasse, siden injeksjon typisk medfører betydelige kostnader ved driving av tunneler.

Data samles fra to undersjøiske veitunneler i Nørdøyvegen, et prosjekt med Skanska AS som entreprenør og Møre og Romsdal fylkeskommune som byggherre. Innsamling av data er gjort i samarbeid med ingeniørgeolog Kåre Ingolf Karlson som kontaktperson fra fylkeskommunen.

Opgaven inneholder:

- En litteraturstudie med teori om vann i berg og sementbasert forinjeksjon.
- Evaluering av geologiske forhold og injeksjon i utvalgte tunnelpartier.
- Kvantitative analyser av korrelasjonen mellom mengde injeksjonsmasse og geologiske parametere.

Det legges fokus på forholdet mellom mengde injeksjonsmasse og Q-systemet, inkludert Q-verdi og de inngående parameterne i Q-systemet. I tillegg undersøkes det om orienteringen på diskontinuiteter henger sammen med masseforbruket, og om antatte retninger på in-situ hovedspenninger kan korreleres med dette.

Ansvarlig faglærer og hovedveileder for oppgaven er Prof. II Eivind Grøv, Institutt for geovitenskap og petroleum.

Studieretning: Geologi

Hovedprofil: Miljø- og geoteknologi

Tidsrom: 23.08.2020-15.05.2021

Eivind Grøv

Faglærer

SKJEMAET TAS INN SOM SIDE 1 I MASTEROPPGAVEN
NTNU, 11 mai 2021

Sammendrag

Innlekkasje av vann er ofte en stor hindring under driving av tunneler og bergrom. Vann fra grunnvann eller vannmasser strømmer ned gjennom diskontinuiteter i bergmassen og kan føre til saktere fremgang og økte kostnader. Sementbasert forinjeksjon den vanligste metoden for å redusere innlekkasje i norske tunneler, slik at tetthetskravene oppfylles. Siden injeksjon typisk medfører store kostnader, er det gunstig å redusere overforbruk av injeksjonsmasse.

Masteroppgavens hovedformål er å undersøke om sammenhenger kan trekkes mellom forbruket av injeksjonsmasse og geologien innenfor injeksjonsskjermer. Det brukes data fra to undersjøiske veitunneler i Nordøyvegen, et infrastrukturprosjekt i Møre og Romsdal. Tunnelene er injisert med høyt trykk, hovedsakelig i prekambrisk grunnfjellsgneis, som vil si at oppgaven mest nøyaktig gjenspeiler resultater for høytrykksinjeksjon i ortogneiser og lignende metamorfe bergarter.

Geologi og injeksjon evalueres individuelt i 12 tunnelpartier, og det utføres kvantitative analyser av korrelasjonen mellom mengde injeksjonsmasse og geologiske parametere for 48 injeksjonsskjermer. Det analyseres parametere innenfor Q-systemet (Q-verdi, RQD, RQD/J_n, J_r/J_a og SRF) og sprekkese sett subparallele med største hovedspenning. Det vurderes, til tross for at det ikke er gjort spenningsmålinger ved Nordøyvegen, at største hovedspenning i området er orientert Ø-V.

Ingen sterke korrelasjoner ble funnet mellom mengde injeksjonsmasse og de geologiske parametere, som vil si at det ikke kan konkluderes at sammenhenger finnes. To moderate korrelasjoner observeres, som indikerer trender for at lavere verdier av J_r/J_a og sprekkese sett subparallele med største hovedspenning korrelerer med større masseforbruk.

Av de tre tunnelstoffene som oppgaven ser på, ser injeksjonsskjermene fra Longva stoff til å skille seg ut. Om kun Longva stoff tas i betraktning får masseforbruk sterk korrelasjon med både Q-verdi, alle undersøkte Q-parametere unntatt SRF og sprekkese sett subparallele med Ø-V.

Gjennom evaluering av partiene kommes det fram til at de fleste injeksjonsskjermene har større masseforbruk ved lave Q-verdier, med unntak som inkluderer alle partier i tunnelstoffene Fjørtofta sør og to partier i stoffene Fjørtofta nord. Bergmassen i disse skjermene er hovedsakelig av høy kvalitet, og det brukes moderate eller store mengder injeksjonsmasse. Det observeres også at injeksjonsskjermer vanligvis overlapper i større grad i bergmasse med lave Q-verdier.

Abstract

Water leakage is often a large obstacle during the excavation of tunnels and rock caverns. Water from groundwater or bodies of water flows down through discontinuities in the rock mass and can lead to slower progress and increased costs. Cement pre-grouting is the most common method of reducing water leakage in Norwegian tunnels, such that the sealing requirements are met. Since grouting generally entails high costs, it is advantageous to reduce the overconsumption of grout.

This master's thesis' main objective is to investigate whether links can be drawn between the grout consumption and the geology within grout curtains. The data used are from two undersea road tunnels in Nordøyvegen, an infrastructure project in Møre og Romsdal. The tunnels are grouted with high pressure, mainly in Precambrian gneisses, meaning that the thesis most accurately reflects the results of high pressure grouting in orthogneisses and similar metamorphic rock.

Geology and grouting are assessed individually in 12 tunnel sections, and quantitative analyses of the correlation between the amount of grout and geological parameters for 48 grout curtains. There are analyses of parameters from the Q-system (Q-value, RQD, RQD/ J_n , J_r/J_a and SRF) and joint sets which are subparallel with the largest principal stress. It is estimated, despite there being no stress-measurements at Nordøyvegen, that the largest principal stress in the area is E-W.

No strong correlations were found between amount of grout and the geological parameters, meaning that it cannot be concluded that any relationships exist. Two moderate correlations are observed, indicating trends in which lower values of J_r/J_a and joint sets subparallel with the largest principal stress correlate with greater grout consumption.

Out of the three tunnel faces examined in the thesis, the grout curtains from the Longva face appear to stand out. If only the Longva face is considered, grout consumption is strongly correlated with Q-value, all investigated Q-parameters except SRF and joint sets which are subparallel with E-W.

Through the assessment of the tunnel sections, it is reached that most grout curtains have a larger grout consumption at lower Q-values, with exceptions that include all sections from the tunnel face Fjørtofta sør and two sections from the face Fjørtofta nord. The rock mass in these grout curtains is mainly of high quality, and moderate or large amounts of grout are used. It is also observed that grout curtains usually overlap to a greater extent in rock mass with low Q-values.

Forord

Denne masteroppgaven er skrevet som avsluttende ledd i masterstudiet geologi realfag ved Institutt for geovitenskap og petroleum ved NTNU, med fordypning miljø- og geoteknologi. Oppgaven er på 60 studiepoeng, tilsvarende to semestre, og ble fullført våren 2021.

Først og fremst vil jeg takke min veileder Eivind Grøv for flere gode diskusjoner, både ansikt til ansikt og i digitale møter, og svar på spørsmål gjennom e-post underveis. Jeg vil også rette en takk til professor Charlie Chunlin Li fra NTNU for hjelp med å vurdere spenningsforholdene ved Nordøyvegen og Helene Strømsvik fra SINTEF for grundige svar på spørsmål om hennes studier.

Videre vil jeg takke ingeniørgeolog Kåre Ingolf Karlson, min kontaktperson fra Møre og Romsdal fylkeskommune, for hjelp med innsamling av data fra Nordøyvegen, inkludert geologisk kartlegging, ingeniørgeologiske rapporter og andre materialer fra Statens vegvesen og fylkeskommunen, i tillegg til raske svar på spørsmål om prosjektet sendt på e-post.

Takk til prosjektingeniør Henrik Kvikne fra Skanska for hans arbeid med å få tak i injeksjonsdata og data fra sonderboringer, og opprette tilgang til borparametertolkninger fra Bever Control sine nettsider. Takk også til Emil Festin og Christian Haugen Svendsen fra Bever Control for detaljerte beskrivelser av hvordan datainnsamling og presentasjon av MWD-data utføres.

Til slutt vil jeg takke min familie for støtten jeg har fått gjennom studiene og for bidrag til korrekturlesning.

Trondheim, 10. mai 2021

Christian Henrik Thomassen Ibsen

Innholdsfortegnelse

Sammendrag	iii
Abstract	v
Forord.....	vii
Innholdsfortegnelse	ix
1 Innledning.....	1
1.1 Bakgrunn.....	1
1.2 Formål og oppbygging.....	1
1.3 Omfang og begrensninger.....	2
2 Teori.....	3
2.1 Hydrogeologi og innlekkasje	3
2.1.1 Strømning av vann i berg	4
2.1.2 Innlekkasje og geologiske parametere.....	5
2.2 Sementbasert forinjeksjon.....	12
2.2.1 Tetningskrav og stoppkriterier	13
2.2.2 Injeksjonstrykk og hydraulisk jekking.....	15
2.2.3 Injeksjonsmassens sammensetning.....	17
2.2.4 Injeksjon og bergmassens egenskaper	20
2.2.5 Injeksjonspraksis i Norge.....	25
3 Nordøyvegen.....	27
3.1 Prosjektbeskrivelse	27
3.2 Regionalgeologi	29
3.3 Geologiske forhold og ingeniørgeologi.....	32
3.3.1 Forundersøkelser	32
3.3.2 Svakhetssoner og oppsprekking	33
3.3.3 Bergspenninger.....	35
3.3.4 Undersøkelser under driving	37
3.3.5 Injeksjon.....	39

4 Datainnsamling og metode.....	41
4.1 Innsamling av geologiske data	41
4.1.1 Bergarter.....	41
4.1.2 Q-verdi og parametere	41
4.1.3 Diskontinuiteter	42
4.1.4 Bergspenninger.....	42
4.1.5 Innlekkasje	42
4.2 Innsamling av injeksjonsdata	43
4.2.1 Injeksjonsskjermer	43
4.2.2 Injeksjonsmasse	43
4.3 Utvalg av partier.....	44
4.4 Metode for analyse av injeksjonsskjermer.....	46
4.4.1 Geologiske parametere og injeksjon.....	46
4.4.2 Tolkning av geologiske data	49
4.4.3 Tolkning av injeksjonsdata	50
4.4.4 Korrelasjonsanalyse	51
5 Evaluering av injiserte partier.....	54
5.1 Parti 1: Pel nr. 23275-23363	55
5.1.1 Geologi.....	55
5.1.2 Injeksjon.....	57
5.1.3 Oppsummering	57
5.2 Parti 2: Pel nr. 23654-23768	58
5.2.1 Geologi.....	58
5.2.2 Injeksjon.....	60
5.2.3 Oppsummering	60
5.3 Parti 3: Pel nr. 23775-23892	61
5.3.1 Geologi.....	61
5.3.2 Injeksjon.....	63
5.3.3 Oppsummering	63
5.4 Parti 4: Pel nr. 24091-24175	64
5.4.1 Geologi.....	64

5.4.2 Injeksjon.....	66
5.4.3 Oppsummering	66
5.5 Parti 5: Pel nr. 26280-26256	67
5.5.1 Geologi.....	67
5.5.2 Injeksjon.....	69
5.5.3 Oppsummering	69
5.6 Parti 6: Pel nr. 26790-26766	70
5.6.1 Geologi.....	70
5.6.2 Injeksjon.....	72
5.6.3 Oppsummering	72
5.7 Parti 7: Pel nr. 27160-27139	73
5.7.1 Geologi.....	73
5.7.2 Injeksjon.....	75
5.7.3 Oppsummering	75
5.8 Parti 8: Pel nr. 27438-27370	76
5.8.1 Geologi.....	76
5.8.2 Injeksjon.....	78
5.8.3 Oppsummering	78
5.9 Parti 9: Pel nr. 32079-32139	79
5.9.1 Geologi.....	79
5.9.2 Injeksjon.....	81
5.9.3 Oppsummering	81
5.10 Parti 10: Pel nr. 32396-32420	82
5.10.1 Geologi.....	82
5.10.2 Injeksjon.....	84
5.10.3 Oppsummering	84
5.11 Parti 11: Pel nr. 32700-32817	85
5.11.1 Geologi.....	85
5.11.2 Injeksjon.....	87
5.11.3 Oppsummering	87
5.12 Parti 12: Pel nr. 32840-32944	88

5.12.1 Geologi.....	88
5.12.2 Injeksjon.....	90
5.12.3 Oppsummering	90
6 Analyse av injeksjonsskjermer	91
6.1 Geologiske forhold i injeksjonsskjermer	91
6.2 Korrelasjon mellom geologi og injeksjon.....	98
6.2.1 Q-systemet og injeksjon.....	98
6.2.2 Diskontinuiteter og injeksjon	109
7 Diskusjon	113
7.1 Diskusjon om evaluering av partier.....	113
7.1.1 Oppsummering av partier.....	113
7.1.2 Tunnelstuffer	114
7.1.3 Mulige feilkilder.....	115
7.2 Diskusjon om analyse av injeksjonsskjermer	118
7.2.1 Q-systemet og injeksjon.....	118
7.2.2 Subparallele diskontinuiteter og injeksjon.....	122
7.2.3 Usikkerhet i injeksjonsdata	124
8 Konklusjon	125
9 Videre arbeid.....	127
Referanseliste	128
Vedlegg A: Novapoint Tunnel (Geologisk kartlegging).....	1
Vedlegg B: Sammendragsrapporter.....	2
B.1 Injeksjonsrapport	2
B.2 Sonderboringsrapporter.....	7
Vedlegg C: Borparametertolkning (MWD)	9
C.1 Parti 1: Pel nr. 23275-23363.....	9
C.2 Parti 2: Pel nr. 23654-23768.....	10
C.3 Parti 3: Pel nr. 23775-23892.....	11
C.4 Parti 4: Pel nr. 24091-24175.....	12

C.5 Parti 5: Pel nr. 26280-26256.....	13
C.6 Parti 6: Pel nr. 26790-26766.....	14
C.7 Parti 7: Pel nr. 27160-26139.....	15
C.8 Parti 8: Pel nr. 27438-27370.....	16
C.9 Parti 9: Pel nr. 32079-32139.....	17
C.10 Parti 10: Pel nr. 32396-32420.....	18
C.11 Parti 11: Pel nr. 32700-32817.....	19
C.12 Parti 12: Pel nr. 32840-32944.....	20
Vedlegg D: Diskontinuiteter	21
D.1 Parti 1: Pel nr. 23275-23363	21
D.2 Parti 2: Pel nr. 23654-23768	23
D.3 Parti 3: Pel nr. 23775-23892	24
D.4 Parti 4: Pel nr. 24091-24175	26
D.5 Parti 5: Pel nr. 26280-26256	28
D.6 Parti 6: Pel nr. 26790-26766	29
D.7 Parti 7: Pel nr. 27160-26139	30
D.8 Parti 8: Pel nr. 27438-27370	31
D.9 Parti 9: Pel nr. 32079-32139	32
D.10 Parti 10: Pel nr. 32396-32420	33
D.11 Parti 11: Pel nr. 32700-32817	34
D.12 Parti 12: Pel nr. 32840-32944	35
Vedlegg E: Injeksjonsskjermer	36
E.1: Injeksjonsparametere	36
E.2 Q-verdier og parametere.....	37
E.3 Sprekkesett som er subparallele med utvalgte strøk	38

1 Innledning

1.1 Bakgrunn

Tunneler i berg er utsatt for innlekkasje fra overliggende grunnvann eller vannmasser. I norsk berg, som i stor grad består av harde bergarter, strømmer vannet gjennom sprekker og andre diskontinuiteter inn i tunnelen, og kan føre til setninger og skade på økosystemer i terrenget over.

Sementbasert forinjeksjon er den mest brukte metoden i Norge for å oppfylle tetningskrav ved driving av tunneler. Sprekker og hulrom i bergmassen foran tunnelstuff tettes med sement, vanligvis med høyt trykk. Omtrent 20-30% av norske tunnelprosjekters drivekostnader kommer som følge av injeksjon (Holmøy et al., 2015), og det er derfor viktig å etablere hvilke faktorer som fører til økt bruk av injeksjonsmasse.

Forholdet mellom geologi og injeksjon, inkludert forbruket av injeksjonsmasse, var undersøkt i forskningsprosjektet «Miljø- og samfunnstjenlige tunneler» i rapporter av Klüver og Kveen (2004) og Barton (2003). Det vurderes som viktig å bygge på denne kunnskapen og forske videre på sammenhengen mellom mengde injeksjonsmasse og geologien til bergmassen som injiseres. Om slike korrelasjoner trekkes, kan det dras mer nytte av forundersøkelser og undersøkelser på stoff av geologien i tunneltraseer.

1.2 Formål og oppbygging

Det har vært etablert at innlekkasje i tunneler korrelerer med bergmassens Q -verdi og orienteringen av diskontinuiteter sammenlignet med orienteringen av største hovedspenning (Holmøy, 2008). Med grunnlag i forholdet som eksisterer mellom innlekkasje og injeksjon, undersøkes teori om sammenhengen mellom sementbasert forinjeksjon og de nevnte geologiske faktorene.

Oppgavens hensikt er å evaluere geologiske forhold i tunnelen og se etter korrelasjoner med injeksjonen som utføres. Masseforbruket analyseres mot Q -systemet og orienteringen av diskontinuiteter i forhold til spenninger, med data fra tunneler i prosjektet Fv. 659 Nordøyvegen.

Oppgaven er delt inn i kapitler med følgende innhold:

- Litteraturstudie som omfatter teori om vann i berg og sementbasert forinjeksjon.
- Beskrivelse av prosjektet Fv. 659 Nordøyvegen.

-
- Presentasjon av datainnsamling og metoder for å analysere dataene.
 - Evaluering av geologi og injeksjon i tunnelpartier.
 - Kvantitativ analyse av masseforbruk og geologiske parametere for injeksjonsskjermer.
 - Diskusjon av evaluering av partier og kvantitativ analyse.
 - Konklusjon for oppgaven.
 - Forslag for videre arbeid.

1.3 Omfang og begrensninger

To av de tre undersjøiske veitunnelene i Nordøyvegen undersøkes for å gjøre omfanget mer håndterlig, og siden disse to tunnelene har mest injeksjonsproblematikk. Det brukes stort sett data fra tunnelene som var tilgjengelig høsten 2020. Det injiseres stort sett med høyt trykk, og resultatene kan dermed relateres best til andre tunneler der det er utført høytrykksinjeksjon.

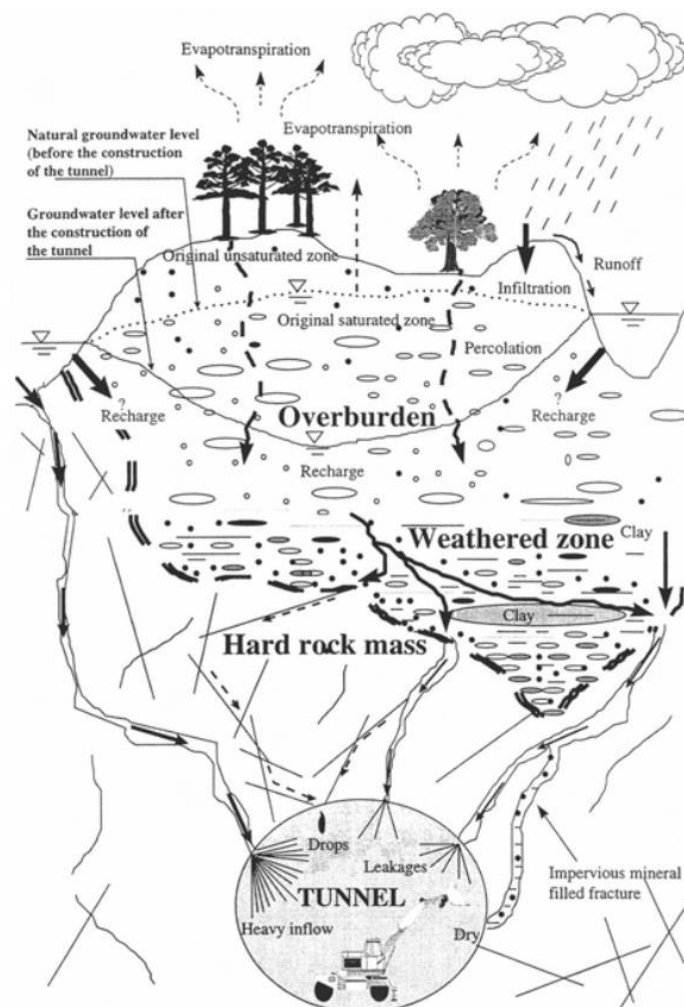
Utvalget av data avgrenses videre ved å velge 12 partier som er fullstendig eller for det meste injiserte. Partier uten injeksjon undersøkes ikke, ettersom det ikke er nødvendig å ha et representativt utvalg av tunnelens geologi. Målet er heller å vurdere forhold mellom geologi og forbruk av injeksjonsmasse. Tunnelpartiene som undersøkes går hovedsakelig gjennom harde og folierte metamorfe bergarter, for det meste grunnfjellsgneis, som vil si at resultater og konklusjoner best reflekterer egenskapene til lokale bergartstyper.

Enkelte faktorer tas ikke i betraktning, inkludert geologiske vurderinger på stuff som ikke inngår i geologisk kartlegging, variasjoner i injeksjonstrykk og mulig hydraulisk jekking. Oppgaven vurderer påvirkningen av bergspenninger, men ingen spenningsmålinger er tatt ved Nordøyvegen. For denne grunn må hovedspenningsretninger vurderes ut fra andre datakilder.

2 Teori

2.1 Hydrogeologi og innlekkasje

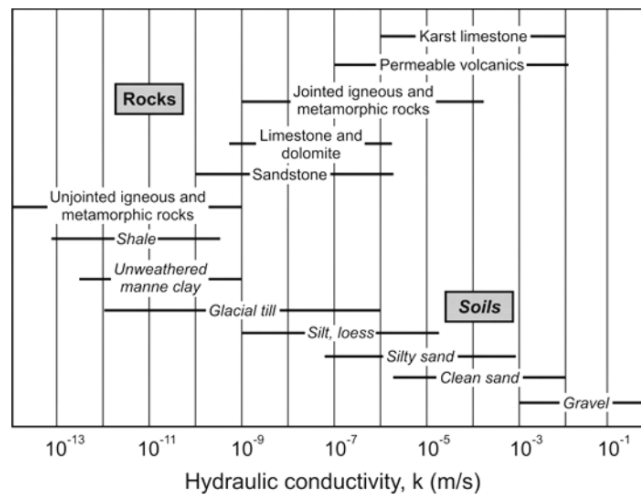
Det vil oppstå lekkasjer i de fleste tunneler ettersom de som regel ligger under grunnvannsspeilet eller under vannmasser som hav eller innsjøer. Innlekkasje kan sakke ned fremdriften til prosjektet og dermed føre til økte kostnader, samt øke behov for kostbar injeksjon og bergsikring (Holmøy og Nilsen, 2014). I tillegg kan lekkasje inn i tunneler medføre senkning av grunnvannsnivå etterfulgt av setningsskader på bygninger og infrastruktur, eller medføre økologisk skade ved drenering av overliggende innsjøer (Holmøy og Nilsen, 2014). Figur 2.1 gir en oversikt over forskjellige geologiske strukturer og faktorer som kan medføre innlekkasjer i bergrom (diskuteres nærmere i kapittel 2.1.2).



Figur 2.1: Skisse av vannets strømning gjennom berggrunnen og lekkasje inn i tunnel (Cesano, 2001).

2.1.1 Strømning av vann i berg

Når vann beveger seg gjennom et materiale påvirkes strømmingen av både materialets permeabilitet (k), et mål på mengden og kontinuiteten av hulrom og porer som vann kan strømme gjennom, og vannets strømmingsegenskaper. Et materiales hydrauliske konduktivitet (K) representerer disse to faktorene, og kan være en nøyaktig beskrivelse av homogene bergmasser eller seksjoner av heterogene bergmasser på mindre skala (Gustafson, 2012). Figur 2.2 viser typisk hydraulisk konduktivitet for bergarter og løsmasser med forskjellig permeabilitet.



Figur 2.2: Typisk hydraulisk konduktivitet i bergarter og løsmasser. Modifisert av Holmøy (2008) etter Freeze og Cherry (1979).

Vann strømmer generelt sett gjennom heterogene bergmasser i sprekker, og det er derfor nyttig å bruke modeller som beskriver vannstrømning gjennom sprekkeplan. I en sprekke mellom to flate parallelle plan gis transmissiviteten, sprekkes vannføringskapasitet, som (Gustafson, 2012):

$$T_f = \frac{\rho g}{\mu} \cdot \frac{b^3}{12} \quad (2.1)$$

hvor ρ er vannets densitet, μ er vannets viskositet, g er tyngdeakselerasjon og b er sprekkes hydrauliske sprekkeåpning. Den hydrauliske sprekkeåpningen er en representasjon av sprekkeåpningen som best forklarer vannstrømningen i sprekken. Den kan tilnærmes ved å defineres som medianen av sprekkes fysiske åpning, en parameter som vil variere langs en ru sprekke (Zimmerman og Bodvarsson, 1996). I Formel 2.1 kan man se at transmissiviteten til en sprekke er proporsjonal med sprekkeåpningen i tredje potens. En liten økning i sprekkeåpningens bredde kan altså medføre en stor økning i sprekkes vannføringskapasitet. Eksempelvis vil en dobling av sprekkeåpningen føre til en åttedobling av sprekkes transmissivitet.

2.1.2 Innlekkasje og geologiske parametere

Professor Rolf Selmer-Olsen undersøkte i 1981 sammenhengen mellom geologiske forhold og innlekkasje i 11 norske tunneler. Oppfatningen var i utgangspunktet at vannlekkasjer med høyt trykk opptrer tilfeldig, begrunnet i antakelsen at størrelsen på vannførende diskontinuiteter ikke kan forutsies. Selmer-Olsen (1981) konkluderer med at det ser ut til å være flere fellestrekk mellom forholdene rundt «store lekkasjer dypt i fjellet»:

- Lekkasjesprekker står steilt, der 85% har fallvinkel større enn 70° og 5% har fallvinkel mindre enn 60° .
- Oftest har bare ett av områdetets sprekesett store lekkasjer.
- Store lekkasjer opptrer i knusningssoner og sprekker med stor utholdenhet.
- Vanntrykket tilsvarer svært ofte overdekningen.
- Lekkasjesprekker ligger i sterke og stive bergarter med moderat eller liten oppsprekking.
- De største lekkasjene er i kanaler gjennom sprekker med kalsittfyllinger.
- Få sprekker i vannførende sprekesett gir betydningsfull lekkasje.
- Lekkasjesprekker ligger ca. 45° på strøket på den regionale forkastningen i området.

De fleste av Selmer-Olsens postulater beskrives av Holmøy (2008) som «allmenn kunnskap», ettersom sammenhengene i ettertid har vært bekreftet i flere tunnelprosjekter. Holmøy påpeker at forholdet mellom vannførende sprekker og sprekeorienteringer er relativt ukjent, og ser for den grunn på sprekeorienteringenes påvirkning på innlekkasje som en relevant problemstilling. Ut fra Holmøys (2008) åtte hypoteser om innlekkasje i tunnel får fire «sterk støtte», og to får «lav/middels støtte».

Sterk støtte (Holmøy, 2008):

- Det er større innlekkasje i bergmasse med Q-verdier mellom 0,1 og 10, enn i bergmasse med Q-verdier under 0,1.
- Vannførende diskontinuiteter er subparallele med største hovedspenning ($\pm 30^\circ$).
- Stor mektighet med permeable løsmasser eller innsjø/sjø over en tunnel fører til økt innlekkasje.
- Innlekkasje er større ved fremtredende bergartsgrenser.

Middels eller lav støtte (Holmøy, 2008):

- Vannførende sprekker ligger i en vinkel på $45^\circ \pm 15^\circ$ fra store nærliggende forkastningssoner.
- Det er større innlekkasje i magmatiske bergarter enn andre bergartstyper.

Selmer-Olsen (1981) og Holmøy (2008) sine funn støttes av teori om vann i berg i forhold til forskjellige geologiske parametere. Holmøy (2008) nevner fem geologiske parametere som påvirker innlekkasje i tunneler og bergrom: sprekkekarakter, spenningssituasjon, forkastninger og nærliggende sprekker, eruptivganger og overdekningens sammensetning og mektighet. Disse beskrives nærmere i følgende avsnitt.

Sprekkekarakter

Sprekkes karakter i en bergmasse vil variere avhengig av bergartstypen. Stive bergarter som granitt eller kvartsitt inneholder åpne sprekker med store utstrekninger, mens mykere bergarter som leirskifer danner tettere sprekker (Løset, 2006). Bergartens mineralsammensetning påvirker mengden og typen sprekefylling, der felsiske bergarter med høyere kvartsinhold er motstandsdyktige mot forvitring og mørke, mafiske bergarter inneholder mineraler som lett forvitrer til leirmineraler og knust bergmasse som tetter sprekker i bergmassen og reduserer dens permeabilitet (Gustafson, 2012).

Ifølge Selmer-Olsen (1981) skal det være betydelig større innlekkasje i steile sprekker. Dette støttes av Cesano et al. (2000) som observerer en korrelasjon mellom stor innlekkasje og steile sprekker i en systematisk analyse av innlekkasje i svenske tunneler. En større mengde sprekesett med forskjellige orienteringer vil bidra til flere forbindelser mellom bergmassens sprekker og dermed øke bergmassens permeabilitet og eventuelle lekkasjer i bergrom (Løset, 2006).

Klüver (2000) definerer fire bergartsgrupper som representerer hoveddelen av Fastlands-Norges geologi. Bergartstyper er klassifisert ut fra hydraulisk konduktivitet og injiserbarhet, som hovedsakelig bestemmes av sprekker og andre diskontinuiteter. I Tabell 2.1 er det gitt et sammendrag av klassifiseringen.

Tabell 2.1: Fastlands-Norges fire hovedbergartstyper, og deres hydrauliske konduktivitet og injiserbarhet (Klüver, 2000).

Bergartstype	Sprekkeåpning	Hydraulisk konduktivitet	Injiserbarhet	Bergarter
A	Åpne sprekker, uten vesentlig sprekkbelegg.	Høy	Vanligvis lett å injisere.	Sandstein, kvartsitt, Oslofeltets lavabergarter, syenitt, granitt m.m.
B	Sprekker med sprekkfylling, og tendens til kanaldannelse.	Middels	Middels lett å injisere.	Grunnfjellsgneis og tilsvarende metamorfe bergarter.
C	Høy grad av sprekkfylling, og opptreden av små kanaler	Lav	Ofte meget vanskelig å injisere.	Leirskifer, fyllitt, glimmerskifer, grønnstein m.m.
D	Ekstremt åpne hulrom.	Meget høy	Vanskelig ettersom spesielle tettemetoder kan være nødvendige.	Bergarter påvirket av karstfenomener (kalkstein) eller tektonikk.

Q-systemet, utviklet av NGI, klassifiserer bergmasser med den følgende formelen (NGI, 2015):

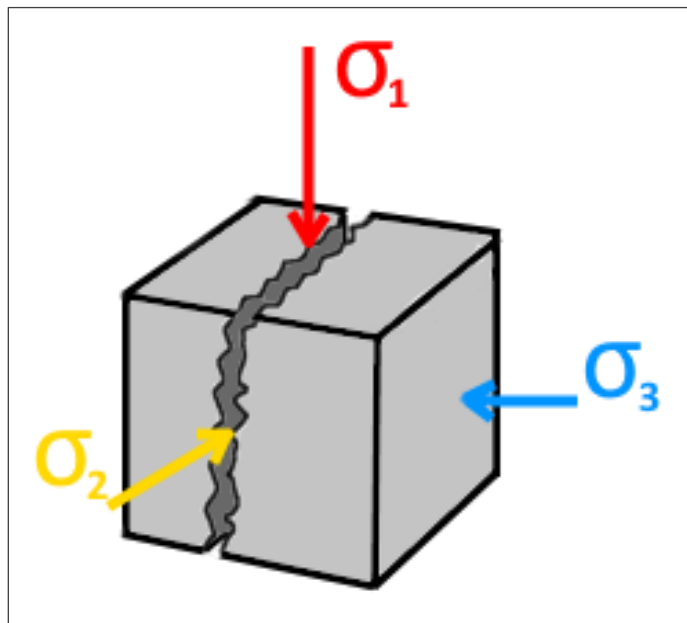
$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF} \quad (2.2)$$

der RQD er en oppsprekkingsfaktor, J_n representerer antall sprekkesett, J_r representerer sprekkenes ruhet, J_a representerer sprekkfyllingen, J_w representerer vannforhold i sprekken og SRF er en bergspenningsfaktor. Disse parameterne inngår i Q-verdiens tre hovedfaktorer som, fra venstre til høyre i Formel 2.2, representerer bergmassens oppsprekkingsgrad, minimale skjærfasthet og opptredende spenning (NGI, 2015).

En av Holmøys sterkt støttede hypoteser sier at det er størst innlekkasje i bergmasse med Q-verdier mellom 0,1 og 10. Antakelsen som er gjort av Holmøy (2008) er at en svært oppsprukket bergmasse med Q-verdi lavere enn 0,1 vil ha en større mengde impermeabel sprekkfylling (leire), og at bergmasser med en Q-verdi over 10 ikke har en tilstrekkelig mengde sprekkplan og kontinuitet mellom sprekker. Begge disse faktorene vil føre til mindre lekkasje sammenlignet med bergmasser der Q-verdi ligger mellom 0,1 og 10, som har sterk oppsprekking med relativt lite leirfylling.

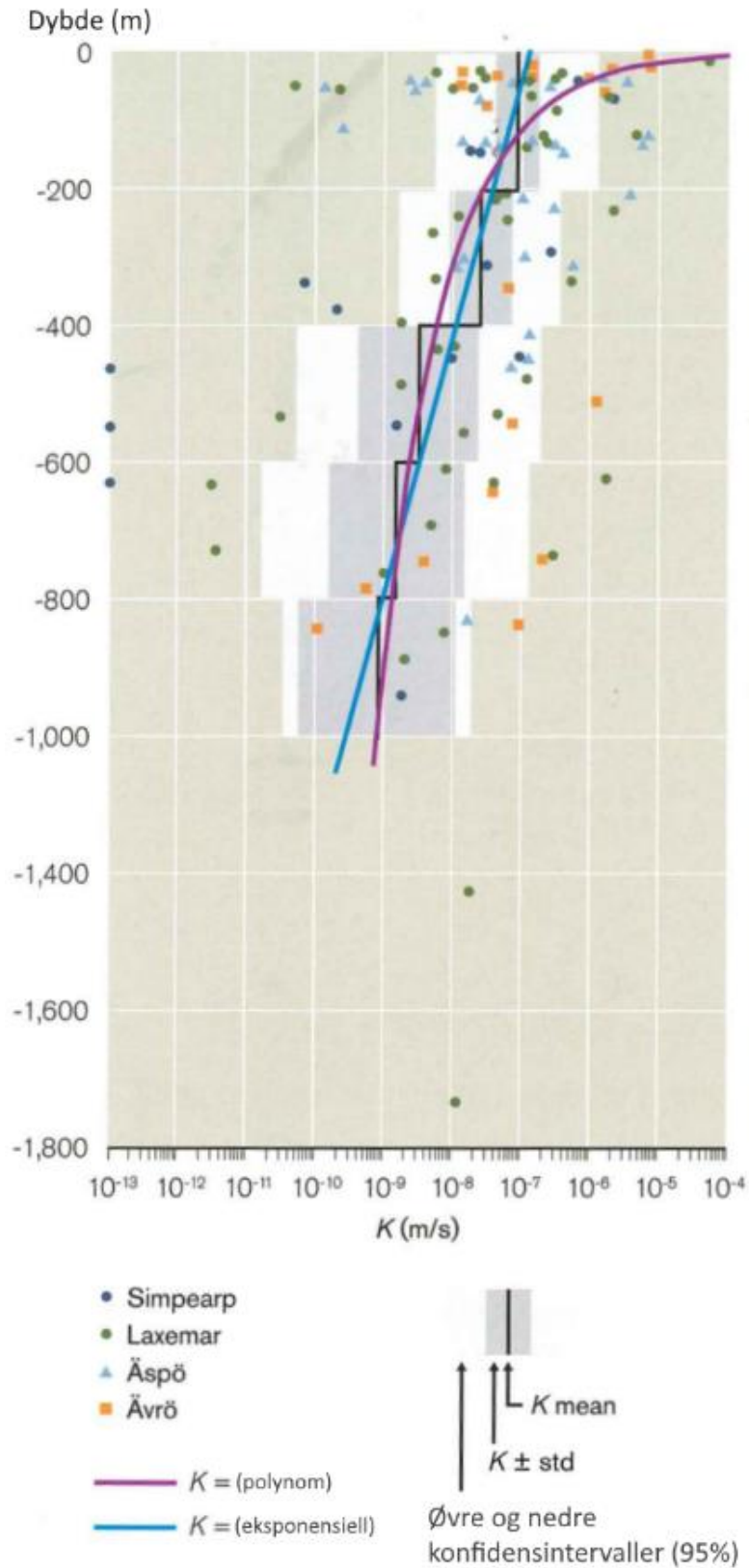
Spennings situasjon

Dersom en sprekk påføres en trykkspenning normalt på sprekkplanet vil sprekken som regel komprimeres og føre til at sprekkåpningen blir mindre, og som diskutert i kapittel 2.1.1 vil selv en liten reduksjon i sprekkåpningen medføre en stor nedgang i sprekkens transmissivitet (Formel 2.1). For denne grunn er vannførende sprekkers orientering sterkt korrelert med hovedspenningsretningene, der den minste hovedspenningen (σ_3) oftest står nær normalt på det vannførende sprekkplanet, og følgelig at den største hovedspenningen (σ_1) er subparallel med sprekkens strøk (Holmøy, 2008). En slik subparallel sprekk med økt transmissivitet illustreres i Figur 2.3.



Figur 2.3: Sprekk som er parallel med σ_1 , der σ_3 står normalt på planet.

Bergspenninger påvirker vannforholdene i berggrunnen, eksempelvis ved at bergmassens permeabilitet reduseres ved større dybder (Figur 2.4). Den økte overdekningen fører til større gravitasjonsspenninger som lukker sprekkåpninger og dermed minker sprekkenes kapasitet for vannføring (Gustafson, 2012). Mot dypet nærmes hydrostatisk spenningstilstand, der spenningene i alle retninger går mot å bli like store, og følgelig blir normalspenningene på alle sprekkplanet like (Klüver og Kveen, 2004). Ved store hydrostatiske spenninger reduseres sprekkåpningen og transmissiviteten til sprekker med alle orienteringer.

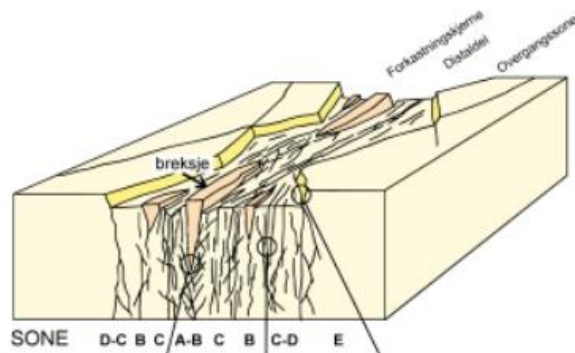


Figur 2.4: Trend for hydraulisk konduktivitet og dybde (Oskarhamn kjernekraftverk). Modifisert etter Gustafson (2012).

Forkastninger og nærliggende sprekker

Holmøy (2008) regner forkastningssoner til å være den viktigste faktoren for bergmassens vannføring når det gjelder innlekkasje i bergrom, siden forkastninger består av en sone med sterkere oppsprekking enn omliggende bergmasse. I denne oppgaven brukes det mer generelle begrepet «svakhetszone» for å beskrive bergmasse av en betydelig lavere kvalitet langs et plan. En svakhetszone kan bestå av flere typer geologiske strukturer, inkludert forkastninger, tensjonsprekker og andre soner med oppsprukkede, knuste og forvitrede bergmasser (Gustafson, 2012, Løset, 2006).

Svakhetssoner som ble dannet ved store bevegelser, spesielt store forkastninger, har ofte av en kjerne med sterkt omvandlet og knust bergmasse. Faktorer som plastisk deformasjon under høy temperatur og trykk og omvandling av mineraler til leirmineraler og andre sjiktisilikater, fører til at kjernen har betydelig lavere permeabilitet (Gustafson, 2012). En forkastnings tette kjerne kan sees i Figur 2.5 i sonene A og B, figurens distaldel (C og D) med lange parallelle brudd har høyest permeabilitet og størst kapasitet for innlekkasje (spesielt C) og overgangssonen (E) har en avtagende bruddtetthet og kontinuitet (Braathen og Gabrielsen, 2000). Leire og annet finstoff fra en impermeabel kjerne kan eroderes vekk over tid av vann, spesielt i tilfeller der spennings-situasjonen har endret over tid og ført til økt vannstrømning (Løset, 2006).



Figur 2.5: Skisse av en steil forkastning med en bruddsones distinkte soner (Braathen og Gabrielsen, 2000).

Permeabiliteten av svakhetssoner i forhold til omkringliggende bergmasse vil variere, men høyere sprekkekonsentrasjoner øker uansett sannsynligheten for at noen sprekker har riktig karakter og orientering for å være vannførende (Gustafson, 2012). I likhet med Selmer-Olsen (1981) sine observasjoner, kan forkastningsbevegelser danne åpne og vannførende sprekker, ofte med lave spenninger eller strekkspenninger, omtrent 45° på forkastningenes strøk (Palmstrøm et al., 2003).

Eruptivganger

Eruptivganger dannes når magma trenger inn i bergmassen, ofte som et nær vertikalt plan, og deretter størkner. Grensen mellom gangbergarten og sidebergarten er ofte svært vannførende ettersom magmaen krymper under størkning, og enkelte gangbergarter kan ha en høy oppsprekingsgrad og dermed høy permeabilitet (Løset, 2006).

Overdekningens sammensetning og mektighet

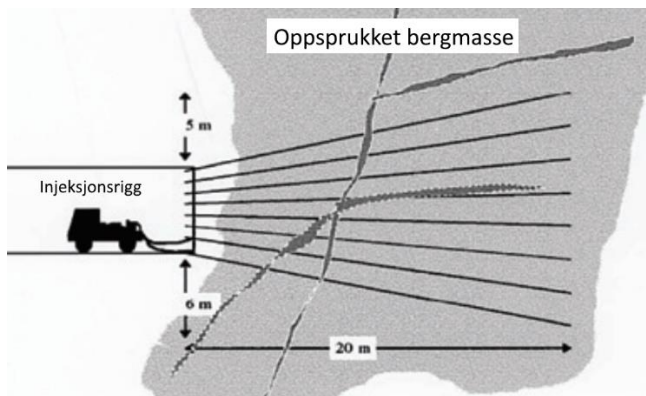
Cesano et al. (2000) konkluderer med at betydelige innlekkasjer kan knyttes til faktorer som tunnelens dybde, den overliggende topografien, typen løsmasser over berggrunnen og løsmassenes mektighet. Dersom tunnelen ligger under en dalbunn møtes større innlekkasjer siden daler ofte dannes ved erosjon av vannførende svakhetssoner i dagen. I tillegg korreleres innlekkasje i tunneler positivt med overliggende porøse løsmasser, spesielt for tykke løsmasselag, ettersom vann lagres i akviferer som kan strømme gjennom oppsprukket bergmasse til tunnelen.

En tredje observasjon av Cesano et al. (2000) er at flere situasjoner med store innlekkasjer finner sted ved større bergoverdekninger. En mulig forklaring som nevnes er at tunneler på større dyp i forhold til grunnvannsnivået har en større «cone of drainage», et kjegleformet influensområde av overliggende grunnvann som kan dreneres. Større mengder vann kan da strømme mot tunnelen og registreres som innlekkasje. Cesano et al. (2000) observerer at større bergoverdekninger fører til flere store innlekkasjer, men at dette ikke gjelder små innlekkasjer, noe som kan forklares med at mindre sprekkeåpninger lukkes av gravitasjonsspenninger. Både spenningssituasjonen og «cone of drainage» påvirker innlekkasjen i tunneler avhengig av overdekningen, men faktoren med størst påvirkning avhenger av hvor dypt tunnelen ligger og sprekkekarakteristikken (Grøv, 2021).

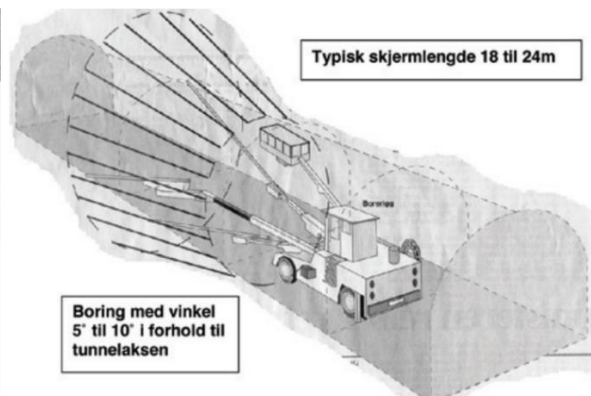
Undersjøiske tunneler vil ikke påvirkes av en «cone of drainage» og en større mektighet av overliggende løsmasser vil ikke øke innlekkasjen, ettersom potensialet for innlekkasje er uendelig. Kontinuerlige lag med mindre permeable løsmasser, eksempelvis leire, kan derimot føre til at lekkasjen i undersjøiske tunnelpartier reduseres betraktelig (Nilsen, 2014).

2.2 Sementbasert forinjeksjon

Injeksjon med sementbaserte produkter er den vanligste formen for berginjeksjon i norske tunneler, der injeksjonsmasse pumpes gjennom borehull inn i bergmasse foran stoff (Figur 2.6), en prosess som kalles forinjeksjon. En injeksjonsrigg pumper injeksjonsmassen, som er blandet på stoff, inn i en injeksjonsskjerm som består av vinklede borehull radielt rundt stoffen (Figur 2.7). Pakkere i borehullene fungerer som ventiler som slipper inn injeksjonsmassen, men bygger opp trykket ved å ikke la massen strømme ut av hullene (Holmøy et al., 2015). Kjemisk injeksjon med andre injeksjonsmaterialer benyttes som regel i spesielle tilfeller, slik som etterinjeksjon i partier med store restlekkasjer (Hognestad et al., 2010).



Figur 2.6: Forinjeksjon i oppsprukket bergmasse (Hognestad et al., 2010).



Figur 2.7: Boring av injeksjonsskjerm (Hognestad et al., 2010).

Når injeksjonsmassen pumpes inn i bergmassen tettes åpne sprekker, eller nye sprekker som åpnes ved hydraulisk jekking (utdypes i kapittel 2.2.2), og fører til en reduksjon i bergmassens konduktivitet (Stille, 2015). Den injiserte sonen rundt tunnelen gir redusert innlekkasje slik at tunnelens tetthetskrav oppfylles, der strengere krav kan oppfylles ved å redusere sonens konduktivitet eller ved å øke dens tykkelse (Grøv et al., 2014). Injeksjon av bergmasse utføres i andre prosjekter enn tunneler, spesielt i dammer og tilhørende fundamenter (Lombardi, 2003), noe som er utenfor oppgavens omfang.

2.2.1 Tetningskrav og stoppkriterier

I Norge er det oppdragsgiver som har ansvaret for å bestemme tetningskrav i bergrom, eksempelvis Statens vegvesen som er byggherren for veiprosjekter (Hansen et al., 2017). Det er internasjonal praksis å angi innlekkasje i liter vann per minutt for hver 100 m tunnel. Tabell 2.2 gir en oversikt over tetningskrav i norske tunneler ut fra områdets sensitivitet for setninger eller urbanisering.

Tabell 2.2: Vanlige tetningskrav i norske tunneler. Modifisert etter Hansen et al. (2017).

Innlekkasje [l/min/100m]	Tunneltype	Type miljø
2 - 5	Urbane tunneler	Høy sensitivitet for setninger
5 - 10	Urbane tunneler	Sensitiv for setninger eller skade på dyr og planter
10 - 30	Urbane tunneler	Moderat sensitivitet
> 30	Rurale tunneler	Ingen betydelig sensitivitet

Når innlekkasjen inn i en tunnel reduseres vil det skje mindre senkning av grunnvannsnivået, og dermed forhindres setningsskader på overliggende bebyggelse og infrastruktur (Aarset et al., 2011). For denne grunn har urbane tunneler i områder med setningsfare strenge tetningskrav (Tabell 2.2). Vann som lekker inn kan også drenere vassdrag og skade økosystemer (Aarset et al., 2011). Tabell 2.2 viser at tunneler under områder med sårbart plante- og dyreliv har strenge krav.

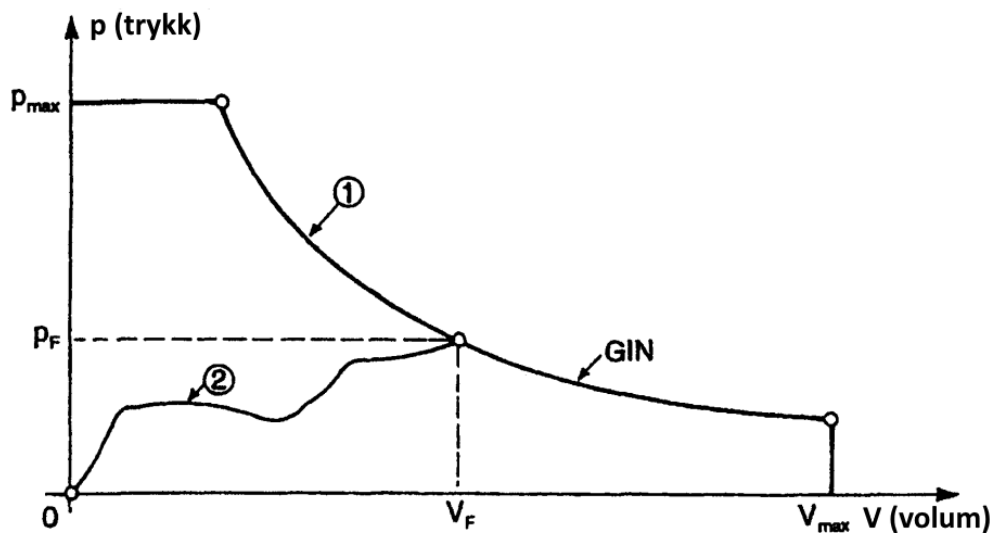
Stoppkriterier brukes for å vurdere når injeksjonen skal stoppes, ved at kriteriet oppfylles når utvalgte parametere oppfyller visse krav. I mesteparten av berginjeksjonens historie har valg av stoppkriterium og andre injeksjonsparametere stort sett hatt grunnlag i erfaring og empiriske metoder, men i nyere tiår har forskning bidratt til å utvikle analytiske metoder med mål om å optimalisere injeksjonsprosessen (Stille, 2015). I Norge er følgende empiriske stoppkriterier ofte brukt, med betydelig variasjon avhengig av prosjekt og riggoperatør (Strømsvik, 2019a):

- Etter et utvalgt sluttrykk nås, sammen med minimal eller ingen strømming av injeksjonsmasse, stoppes injeksjonen.
- Etter et utvalgt volum er injisert, med utilstrekkelig reduksjon i strømmingen og/eller utilstrekkelig økning i trykket, minskes vann/sement-forholdet (v/c-forholdet).
- Etter et utvalgt maksimalt volum er injisert, med utilstrekkelig reduksjon i strømmingen og/eller utilstrekkelig økning i trykket, stoppes injeksjonen.

To metoder for å vurdere stoppkriterium diskuteres i de neste avsnittene.

GIN metoden

Med GIN metoden, presentert av Lombardi og Deere (1993), vurderes stoppkriterium for injeksjon basert på empiriske erfaringer og teoretiske beregninger. Metoden balanserer injeksjonstrykket (p) med volumet av sement injisert inn i bergmassen (V), der injeksjonen stoppes når kurven som representerer produktet av trykk og volum, «Grout Intensity Number» (GIN), møtes (Figur 2.8). Ved å stoppe injeksjonen når GIN nås, unngås hydraulisk jekking i bergmassen (Lombardi, 2003). Ifølge Rafi og Stille (2015a) har metoden hatt varierende resultater i prosjekter som følge av at empiriske regler for metoden og selve stoppkriteriet ikke er godt nok definert, og det konkluderes med at den bør anvendes varsomt ved lave overdekninger eller høye tetningskrav.



Figur 2.8: GIN-kurven (1) og en linje fra injeksjonsstart til slutt når GIN nås (2). Modifisert etter Lombardi (2003).

RTGC metoden

«Real Time Grouting Control Method» (RTGC), presentert av Kobayashi et al. (2008), setter stoppkriteriet til når ønsket inntrengning er nådd i den minste sprekkeåpningen som skal tettes, eller før inntrengningen i den største sprekkeåpningen har nådd en maksimalverdi. Det må brukes sanntidsdata fra injeksjonsrigger for å estimere sprekkeåpninger i bergmassen og beregne spredningen av injeksjonsmasse (Kobayashi et al., 2008). Ifølge Rafi og Stille (2014) har metoden vist seg til å være egnet for å tolke hydraulisk jekking i tidligere studier, og injeksjon med RTGC som stoppkriterium har i enkelte studier hatt bedre resultater enn eldre empiriske metoder og GIN metoden.

2.2.2 Injeksjonstrykk og hydraulisk jekking

Injeksjonstrykket er en avgjørende faktor i injeksjonsforløpet, der trykket driver injeksjonsmassen inn i berget. For denne grunn spres injeksjonsmassen raskere ved høyere trykk (Gothäll og Stille, 2008). Når injeksjonsmasse pumpes inn i en bergmasse må injeksjonstrykket være stort nok for å kunne motvirke vanntrykket, og det må dermed brukes et høyere injeksjonstrykk ved store overdekninger med høyt vanntrykk (Grøv et al., 2014).

Siden større trykkspenninger normalt på sprekkeplan minker sprekkeåpningen og permeabiliteten til bergmasser (beskrives i kapittel 2.1.2 under *Spenningsituasjon*), er bergspenningene og deres relasjon til injeksjonstrykket en relevant faktor for injeksjonsprosessen. Ved injeksjon i tunneler med anisotrope spenningsforhold, spesielt ved lave overdekninger, kan det hende at sprekkesettet med størst sprekkeåpning er injiserbart med det utvalgte trykket, men at høyere trykk må brukes for å injisere sprekkesett med andre orienteringer (Klüver og Kveen, 2004).

Hydraulisk jekking

Dersom injeksjonsmasse presses inn i en sprekke, og injeksjonstrykket overstiger spenninger som står normalt på sprekken, kan det skje en deformasjon av sprekken der sprekkeåpningen utvides (Gothäll og Stille, 2008). Dette fenomenet kalles hydraulisk jekking, eller «jekking», og størrelsen på deformasjonen er avhengig av hvor mye injeksjonstrykket overskrider normalspenningene på sprekken, spredningen av injeksjonsmassen og bergmassens elastisitetsmodul (Stille, 2015).

Sprekkes deformasjon er innledningsvis elastisk og kalles «elastisk jekking». Selv om denne deformasjonen teoretisk sett er reversibel, vil den ikke nødvendigvis kunne reverseres ettersom sprekken er fylt med injeksjonsmasse under trykk (Rafi og Stille, 2014). Ifølge en ligning av Stille et al. (2012) skjer det en irreversibel deformasjon av bergmassen, kalt «ultimat jekking», når injeksjonstrykket er omtrent tre ganger større enn normalspenningen på sprekken (Stille, 2015). Ligningen antar ideelle forhold der sprekken er horisontal med uendelig spredning av injeksjonsmasse, som vil si at et betydelig større injeksjonstrykk kan aksepteres ved begrenset spredning (Stille et al., 2012).

Hydraulisk jekking kan ha både positive og negative konsekvenser. Elastisk jekking kan føre til tetning av sprekker med mindre sprekkeåpninger som ellers ikke er injiserbare og spre injeksjonsmassen lengre (Rafi og Stille, 2015), men på den andre siden vil spesielt irreversibel deformasjon åpne små, vannførende sprekker utenfor den injiserte sonen (Stille et al., 2012). De mulige positive aspektene til hydraulisk jekking kan begrunne bruken av høyere injeksjonstrykk, mens injeksjon med lavere trykk vil unngå de negative konsekvensene av jekking.

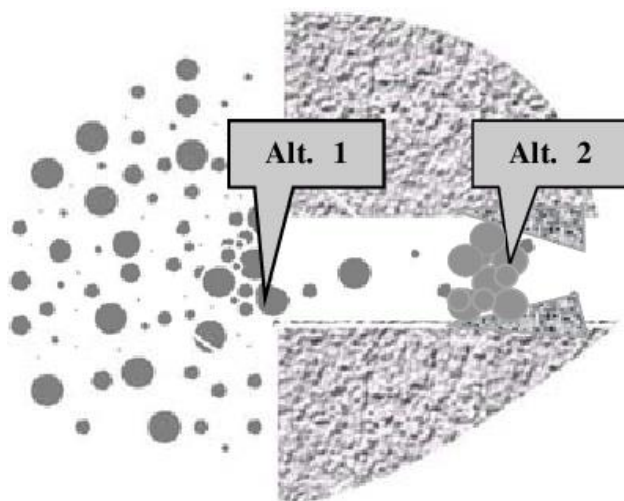
Konsekvenser av høyt injeksjonstrykk

Klüver og Kveen (2004) konkluderer med at det er ønskelig å injisere med så høyt trykk som kan tillates ved de lokale forholdene og påpeker at injeksjon med høyere trykk i større grad kan overvinne sprekkenes ruhet og sprekkefyllinger. Dette støttes av Draganović og Stille (2011), der resultatene av et laboratorieforsøk indikerer at høye injeksjonstrykk gir økt inntrengning i bergmassen, som følge av erosjon av sprekkeoverflatene og ved at trykket holder sprekken åpen.

Bruk av et høyt injeksjonstrykk, og den resulterende jekkingen av bergmassen, fører til økt bruk av injeksjonsmasse, og kan medføre større tidsbruk, økte kostnader, heving av terrenget og lekkasje av injeksjonsmasse i dagen (Hognestad et al., 2010, Rafi og Stille, 2015b). Disse negative konsekvensene er spesielt fremhevet om injeksjonen skjer ved lav overdekning eller i bergmasse med lave spenninger, ettersom det da er mindre motstand mot injeksjonstrykket (Hognestad et al., 2010). For denne grunn anbefaler ikke Klüver og Kveen (2004) høyt injeksjonstrykk i bergmasser med lave spenninger og åpne sprekker.

2.2.3 Injeksjonsmassens sammensetning

Sementbaserte injeksjonsmaterialer skal ifølge Hognestad et al. (2010) være stabile, flyte lett og størkne så raskt som mulig etter injeksjon. Typen sement, andelen vann i sementblandingen og tilsetningsstoffer må bestemmes slik at injeksjonsmassen møter de nevnte funksjonskravene. Injeksjonsmassen skal være stabil for å unngå «bleeding», der sementpartiklene synker og skilles fra vannet. Negative konsekvenser av «bleeding» inkluderer dannelsen av permeable kanaler i den størknede injeksjonsmassen og reduksjon av sementens levetid (Stille, 2015). Et annet uønsket fenomen, filterkakedannelse, skjer når sementkorn sammenbindes til partikler som er for store til å trenge inn i sprekker (Figur 2.9), og fører til redusert inntrengning i bergmassen (Stille, 2015).



Figur 2.9: Filterkakedannelse i en sprekke, ved sprekkes inngang (Alt. 1) og i et parti med redusert sprekkeåpning (Alt. 2) (Eklund og Stille, 2008).

Sementens kornstørrelse

Kornstørrelsen til sementen kan beskrives med verdien D_{95} , som er større enn 95% av sementkornene. Partikkelstørrelsene for injeksjonssement kategoriseres slik av Statens vegvesen (2018): standard injeksjonssement (industriement) har D_{95} mindre enn 40 μm , mikroement har D_{95} mindre enn 25 μm og ultrafin sement har D_{95} mindre enn 13 μm . Injeksjonsmassens viskositet er generelt sett proporsjonal med kornstørrelsen, der sementer med mindre kornstørrelse er mer viskøse (Mirza et al., 2013). Større sementkorn kan skape vanskeligheter når injeksjonsmassen skal trenge inn i forholdsvis små sprekkeåpninger. En tommelfingerregel sier at sementens maksimale kornstørrelse ikke skal være større enn en tredjedel av sprekkeåpningen for at injeksjonsmassen skal kunne strømme uhindret (Stille, 2015).

Resultatene til Draganović og Stille (2011) sin studie viser at finkornede sementer stort sett har bedre inntrengningsevne enn sementer med større korn, men at veldig finkornede sementer kan ha betydelig redusert inntrengning som følge av flokkulering og filterkakedannelse. Ifølge Stille (2015) er flokkuleringen spesielt utbredt for sementkorn med størrelse 2-5 μm . Bohloli et al. (2019) observerte minst «bleeding» i sementen med størst andel finstoff og minste D_{95} . Industrisement holder ikke godt på vannet dersom andelen vann i sementblandingen (v/c-forholdet) er for stor, mens enkelte mikrosemeter ikke opplever «bleeding», selv ved store andeler vann i forhold til sement (Hognestad et al., 2010).

I en studie av Strømsvik (2019b) indikeres det at hydraulisk jekking skjer oftere når det injiseres med industrisement enn ved injeksjon med mikrosegment. Forbruket av injeksjonsmasse måles til å være større ved bruk av industrisement enn mikrosegment, som ifølge Strømsvik (2019b) kan forklares ved at flytespenningen og viskositeten er høyere og at herdetiden er lengre. Mikrosegment er dyrere enn ordinær industrisement, men det mindre forbruket av finkornede sementer kan i noen tilfeller føre til besparelser (Grøv et al., 2014).

Vann/sement-forhold

Sement med et høyt vann/sement-forhold (v/c-forhold) har lavere viskositet og flytespenning, noe som gir en tynnere injeksjonsmasse med evnen til å trenge lengre inn i sprekker (Stille, 2015). Dette støttes av Draganović og Stille (2011), som observerer at sementer med høye v/c-forhold har bedre inntrengning.

Ifølge Klüver og Kveen (2004) kan injisering med et høyere v/c-forhold ha følgende negative konsekvenser: økt bruk av injeksjonsmasse, økt fare for hydraulisk jekking, lengre herdetid og at herdet sement er mer utsatt for «bleeding» og har lavere styrke. Det nevnes at høye v/c-forhold, kombinert med for høye injeksjonstrykk, er hovedårsaken for hydraulisk jekking i berg. En studie av Bohloli et al. (2019) målte lengre herdetid for høye v/c-forhold, «bleeding» skjedde i større grad med høyt v/c-forhold i resultater fra Mirza et al. (2013) og herdet sement med høyt v/c-tall ble målt til å ha lavere trykkfasthet av Bohloli et al. (2018).

Tilsetningsstoffer

Tre typer tilsetningsstoffer i injeksjonsmasse nevnes av Hognestad et al. (2010): stabiliserende stoffer, superplastiserende stoffer og akselerator til styrt herding. Deres beskrivelse av Hognestad et al. (2010) formidles i de neste to avsnittene.

Stabiliserende stoffer reduserer «bleeding» og forlenger størkningen, men må ikke øke sementens viskositet for mye. Et eksempel på et stabiliserende stoff er silikaslurry, også kjent som mikrosilika (Klüver og Kveen, 2004), som er en løsning av mikrosilika i vann. Bentonitt er et leirmineral som fungerer som et stabiliserende stoff, men kan minke sementens inntrengningsevne i sprekker som følge av mineralenes flisige kornform.

Superplastiserende stoffer brukes for å hindre at sementkorn fnokker seg sammen og danner større partikler, og gir dermed injeksjonsmassen bedre inntrengning i sprekker. Akseleratorer brukes for å raskere oppnå et mottrykk fra injeksjonsmassen på bergmassen, slik at tidsbruken reduseres.

Pozzolaner er stoffer som kan erstatte deler av sementpartiklene i injeksjonsmassen for økonomiske eller miljørelaterte grunner, men i tillegg til å fungere som fyllstoff har pozzolaner tilleggseffekter på sementen (Holmøy et al., 2015):

- Slagg: «Økt bindetid, langsommere hydratisering og tregere fasthetsutvikling.»
- Flygeaske: «Økt kohesjon, redusert «bleeding» og økt styrke.»

Mikrosilika (silikaslurry) nevnes også av Holmøy et al. (2015) som en pozzolan som øker sementens bindetid og samtidig fører til mindre «bleeding».

2.2.4 Injeksjon og bergmassens egenskaper

Klüvers kategorisering av bergarter etter hydraulisk konduktivitet og injiserbarhet, presentert i Tabell 2.1 i kapittel 2.1.2, utdyper forslag for injeksjonsprosedyre i bergartstypene (Klüver, 2000):

- **Bergartstype A:** Et gjennomgående høyt injeksjonstrykk anbefales. V/c-forholdet bør helst være lavt (ned mot 0,5), men et høyt v/c-tall er riktig i svært knuste soner der injeksjonsmasse har vanskelighet for å trenge inn. Industrisement anbefales i de fleste tilfeller, men mikroement bør brukes i visse svakhetssoner og eruptive ganger.
- **Bergartstype B:** I sprekker med leirefylling anbefales så høyt injeksjonstrykk som mulig, opp til ca. 100 bar. Injeksjon bør oftest begynne med et v/c-forhold på ca. 0,9 og fullføres med en injeksjonsrunde med v/c på ca. 0,5. Industri- og mikroement kan brukes.
- **Bergartstype C:** Høyt trykk og mikroement anbefales for å trenge inn i små sprekker og kanaler. Et v/c-forhold på 0,9 foreslås, men bør forsiktig reduseres i løpet av injeksjonen for å opprettholde inntrengning i bergmassen.
- **Bergartstype D:** Ekstreme innlekkasjer grunnet store hulrom kan stoppes ved å først pumpe inn betong med passende grovt tilslagsmateriale, og følge opp med sementbasert injeksjon.

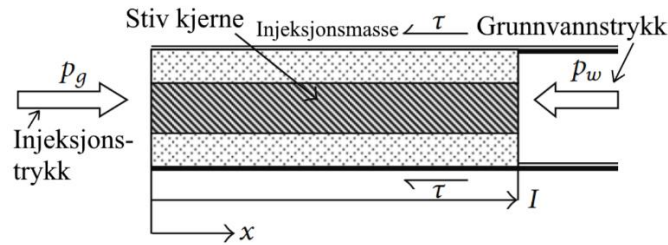
Disse fremgangsmetodene anbefales som en del av «aktiv injeksjon», en injeksjonsstrategi som beskrives i kapittel 2.2.5, ettersom bergmassens egenskaper i stor grad påvirker spredningen av injeksjonsmasse og injeksjonens sluttresultat.

Spredning av injeksjonsmasse i bergmassen

Når injeksjonsmasse beveger seg gjennom en sprekk kan den beskrives som en Bingham væske. Dette vil si at injeksjonsmassen må påføres en viss skjærspenning før den begynner å strømme, der injeksjonsmasser med høyere viskositet må utsettes for en høyere skjærspenning (Stille, 2015). Den nødvendige skjærspenningen (τ) uttrykkes av Stille (2015) i den følgende formelen:

$$\tau = \tau_0 + \mu \cdot \frac{dv}{dz} \quad (2.3)$$

der τ_0 er flytegrensen, μ er viskositeten og dv/dz er hastighetsgradienten. Injeksjonsmassen består av en stiv kjerne omringet av flytende injeksjonsmasse som påføres tilstrekkelig skjærspenning (Figur 2.10). Når injeksjonsmassen i hele sprekken består av den stive kjernen, og maksimal inntrengning (I_{\max}) er nådd, stopper spredningen av injeksjonsmassen (Stille, 2015).



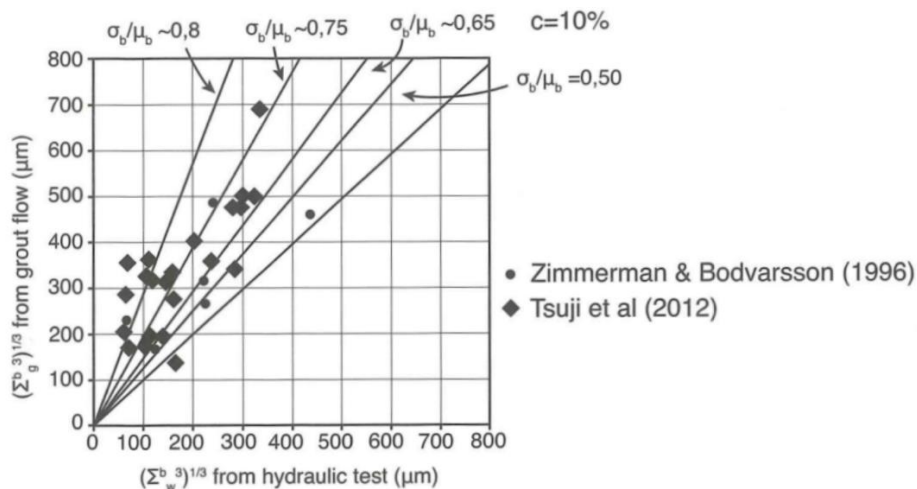
Figur 2.10: Injeksjonsmassens inntrengning i en sprekk. Modifisert etter Gustafson et al. (2013).

Injeksjonsmassens inntrengningsevne er i stor grad påvirket av sprekkenes egenskaper, inkludert sprekkåpning, sprekkeruhet og sprekketryll. Det kan gå med større mengder injeksjonsmasse i bergmasse med høyere oppsprekingsgrad og sprekker med lite sprekketryll ettersom inntrengningsevnen blir betydelig større (Klüver og Kveen, 2004). Klüver (2000) karakteriserer i sin inndeling av norske bergartstyper, beskrevet i kapittel 2.1.2 (Tabell 2.1), forbruket av injeksjonsmasse som følge av bergartenes oppsprekking (Tabell 2.3).

Tabell 2.3: Injeksjonsmasseforbruk i Fastlands-Norges fire hovedbergartstyper (Klüver, 2000).

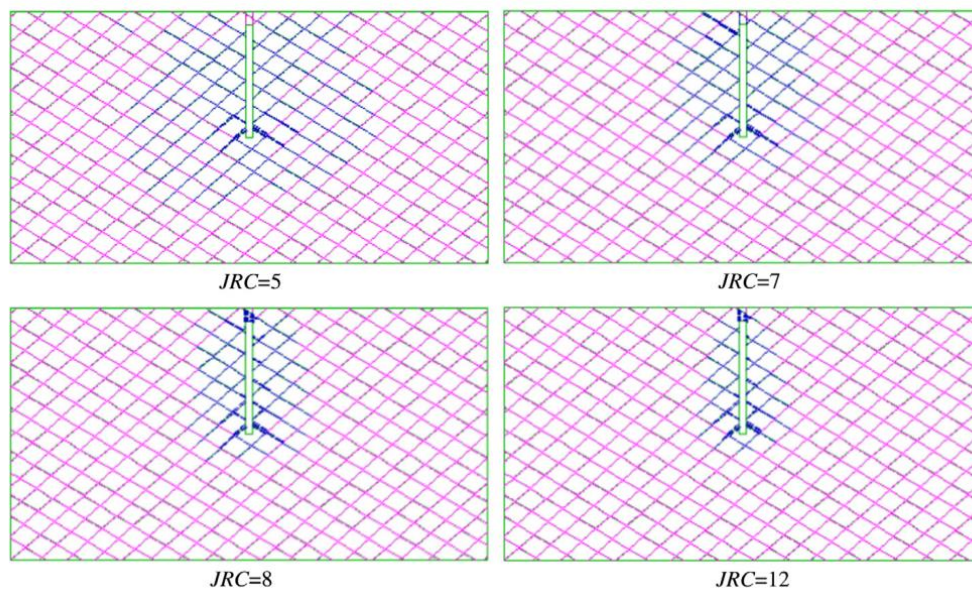
Bergartstype A	Bergartstype B	Bergartstype C	Bergartstype D
Høyt masseforbruk	Middels masseforbruk	Lavt masseforbruk	Variierende masseforbruk

I motsetning til vannstrømning, som er betinget av hydraulisk sprekkåpning (forklart i kapittel 2.1.1), er injeksjonsmassens spredning avhengig av den fysiske sprekkåpningen. Ifølge Stille (2015) er det påvist at den fysiske sprekkåpningen blir ytterligere større enn den hydrauliske sprekkåpningen ved større hydrauliske sprekkåpninger (Figur 2.11).



Figur 2.11: Forhold mellom hydraulisk sprekkåpning (x-akse) og fysisk sprekkåpning (y-akse) (Stille, 2015).

Barton (2003) skrev, i sammenheng med prosjektet «Miljø- og samfunnstjenlige tunneler», en rapport om utfordringer og løsninger relatert til forinjeksjon. I rapporten presenteres det at en større sprekkeruhet (JRC, «Joint roughness coefficient») motvirker spredningen av injeksjonsmasse ved å bidra til en mindre «effektiv sprekkåpning». Siden injeksjonsmassen består av sementkorn er inntrengingen inn i en sprekk i større grad påvirket av sprekkenes ruhet enn for strømmende vann, der vann strømmer i mikrosprekker selv finkornede sementer ikke kan penetrere. Når hydraulisk jekking forekommer blir sprekkeplanene nær fullstendig kontinuerlige og sprekkeruhetens påvirkning på spredningen nærmer seg null (Barton, 2003). Dette støttes i en studie av Saeidi et al. (2013), der numeriske og analytiske modeller av injeksjonsmassens spredning indikerer at høyere sprekkeruhet (JRC) gir mindre inntrengning i bergmassen (Figur 2.12).



Figur 2.12: Modellering av injeksjonsmassens inntrengning i berg med forskjellig JRC. Modifisert etter Saeidi et al. (2013).

Steile svakhetssoner med leire og eruptivganger kan føre mye vann, og dermed kreve kompliserte injeksjonsarbeider (Klüver, 2000). Det er vanskelig å injisere leirfylte kjerner med moderat permeabilitet, der leirmineralene kan vaskes ut av vann (Gustafson, 2012). Helt nedknuste og finmalte forkastningssoner i bergarter som kvartsitt er tilnærmet impermeable, og bør ifølge Klüver (2000) injiseres med høyt trykk og høyt v/c-forhold. I permeable svakhetssoner gjør injeksjonen generelt sett en god jobb med å tette de mest vannførende sprekkenes med store sprekkåpninger, men vannet kan da ledes til de mindre sprekkenes som ikke tettes og bidra til innlekkasje (Gustafson, 2012).

Q verdi og injeksjonsmasse

Siden Q-systemet er basert på bergmassens sprekker og spenningsforhold, er Q-verdien og dens parametere knyttet til bergmassens vannføring (diskutert i kapittel 2.1.2). Når sprekker fylles med injeksjonsmasse øker også bergmassens kompetanse og dermed Q-verdi (Barton, 2002). Et eksempel på en parameter som endres er J_w , som nærmer verdien for tørre bergrom ettersom forinjeksjon har som hovedmål å redusere innlekkasje (Strømsvik, 2020).

Den uinjisererte bergmassens Q-parametere påvirker også spredningen av injeksjonsmasse, ettersom spredning av injeksjonsmasse er betinget av både sprekker og spenningssituasjonen (se kapittel 2.2.2). En numerisk modellering gjennomført av Saeidi et al. (2013) viser god korrelasjon mellom høyere verdier for Q-parameteren RQD (mindre oppsprekking) og lavere inntrenging av injeksjonsmasse, noe som støttes av større observert masseforbruk i bergmasser med stor oppsprekking (Klüver og Kveen, 2004). Siden større sprekkeruhet (JRC) reduserer inntrengningen av injeksjonsmasse (Barton, 2003), kan den samme påstanden gjelde for Q-parameteren for sprekkeruhet (J_r). Barton (1987) uttrykker at JRC og J_r «åpenbart er forbundet», og kommer med forslag for konvertering av verdier mellom de to parameterne (Figur 2.13).

Relation between J_r and JRC_n Subscripts refer to block size (cm)		J_r	JRC_{20}	JRC_{100}
I	rough	4	20	11
	smooth			
	slickensided			
Stepped				
IV	rough	3	14	9
	smooth			
	slickensided			
Undulating				
VII	rough	1.5	2.5	2.3
	smooth			
	slickensided			
Planar				
IX	rough	1.0	1.5	0.9
	smooth			
	slickensided			
Planar				

Figur 2.13: Forslag til konvertering mellom JRC og Q-parameter « J_r » (Barton, 1987).

Studier har vært gjennomført som undersøker mulige korrelasjoner mellom Q-parametere og injeksjonsmasse med data fra injeksjonsarbeid. Rastegarnia et al. (2017) tok målinger av en rekke geologiske parametere for hver 5. meter i sonderhull før de ble injisert. Ut fra dette ble en signifikant negativ korrelasjon observert mellom bergmassens Q-verdi og mengden injeksjonsmasse i kg/m borehull. En annen type undersøkelse av korrelasjonen mellom Q-systemet og masseforbruk ble gjort av Bhasin et al. (2002) med data fra Frøyatunnelen i Trøndelag. Q-parametere fra kartlegging på stoff ved ordinær driving av tunnelen ble brukt og korrelert med injeksjonsdata fra tunnelen. Studien viste følgende sammenhenger mellom masseforbruk og parametere (Bhasin et al., 2002):

- **Q-verdi:** Ingen klar sammenheng, men en trend viser lave Q-verdier gir større forbruk.
- **RQD og J_n :** Ingen klar sammenheng for RQD, svak trend for høyt forbruk ved lav RQD. Svak sammenheng for J_n . Når forholdet RQD/ J_n er mindre enn 2 øker forbruk betraktelig.
- **J_a og J_r :** Ingen klar sammenheng for verken J_a eller J_r , men begge viser en svak trend med injeksjonsmengde. Når forholdet J_r/J_a minker, øker masseforbruk betraktelig.
- **J_w og SRF:** J_w er stort sett lik 1 og kan ikke korreleres. SRF verdier høyere enn 1 er korrelert med større forbruk av injeksjonsmasse.

I en studie av parametere som påvirker forbruk av injeksjonsmasse fant Strømsvik (2019b) ingen korrelasjoner mellom mengde injeksjonsmasse og Q-parametere, med unntak i J_a som hadde en svak trend der større verdier av parameteren gir større masseforbruk. Den manglende korrelasjonen for de andre Q-parametere kan ifølge Strømsvik (2019b) mulig forklares ut fra at verdiene fastsettes ved kartlegging for å dimensjonere bergsikring, ikke for injeksjonsformål, og det faktum at kartleggingen gjøres i bergmasse med sprekker som allerede er injisert. I personlig korrespondanse meddeler Strømsvik (2020) sin oppfatning at metoden brukt av Rastegarnia et al. (2017) er mer nøyaktig enn metoden brukt av Bhasin et al. (2002) og Strømsvik (2019b), ettersom detaljerte målinger tas for hvert enkelt sonderhull før hullet injiseres.

2.2.5 Injeksjonspraksis i Norge

I Norge, Sverige og Finland er berggrunnen generelt sett av god kvalitet, noe som fører til at tettemetoder slik som full betongutstøping normalt sett ikke må brukes. For denne grunn er det standard praksis å bruke sementbasert forinjeksjon som en permanent løsning på innlekkasje i tunneler (Dalmalm, 2004).

Det skilles mellom systematisk injeksjon, der det bestemmes at det skal injiseres langs en viss tunnelstrekning, og behovsprøvd injeksjon der forholdene foran stuff etter hver salve bestemmer om det skal injiseres (Hognestad et al., 2010). Det injiseres systematisk når tunnelen har store innlekkasjekrav (Tabell 2.4) og der senkning av grunnvannstand og drenering av vassdrag kan forårsake skader over tunnelen (Aarset et al., 2011). Behovsprøvd injeksjon utføres vanligvis i Norge ved å måle om lekkasjen gjennom sonderhull foran stuff overskrider en forhåndsbestemt verdi (Hansen et al., 2017). I undersjøiske tunneler benyttes det behovsprøvd injeksjon informert av lekkasje gjennom systematisk borede sonderhull, ettersom det regnes som mer økonomisk å pumpe ut vann fra små innlekkasjer enn å utføre systematisk injeksjon (Nilsen, 2014).

Tabell 2.4: Tommelfingerregel for injeksjonsprosedyre avhengig av innlekkasjekrav (Grøv et al., 2014).

	Systematisk injeksjon	Behovsprøvd injeksjon
Innlekkasje [l/min/100m]	2-15	>15

Som vist i Figur 2.7 i starten av kapittel 2.2, har injeksjonsskjermer i norske tunneler vanligvis en skjerm lengde på 18-24 m, med borehull på stuff radielt langs tunnelens kontur som bores med en vinkel på 5-10° for å gi skjermen riktig tykkelse (Hognestad et al., 2010). Dimensjoneringen av injeksjonsskjermen, inkludert antall hull, hullengden og retningen på hullene er avhengig av bergmassens egenskaper, spesielt oppsprekkingen (Aarset et al., 2011). Et typisk overlapp mellom to injeksjonsskjermer er 6-10 m (Hognestad et al., 2010).

Det er vanlig å begynne injeksjon ved tunnelens såle og gradvis injisere hullene oppover mot hengen (Hognestad et al., 2010). Dette gjøres for å unngå krevende etterinjeksjon i sålehullene og slik at injeksjonsmassen «presser» vannet i berget opp og foran stuff (Hognestad et al., 2010).

Som forklart i kapittel 2.2.1 er det standard praksis i Norge å følge empiriske og erfaringsbaserte stoppkriterier for injeksjon avhengig av injeksjonstrykket, strømmingen og/eller masseforbruket. I en rapport fra forskningsprosjektet «Miljø- og samfunnstjenlige tunneler» omtaler Klüver og

Kveen (2004) injeksjonsstrategien «aktiv injeksjon», som kjennetegnes med en kontinuerlig trykkoppbygging mot høyst mulig sluttrykk, og reguleres ved å endre v/c-forholdet. Injeksjonsmetoden er utformet for norsk berggrunn, og forslag for injeksjonsprosedyre i Norges fire hovedbergartstyper, som definert av Klüver (2000), utdypes i kapittel 2.2.4. Bruken av høyt trykk i aktiv injeksjon har som mål å erodere sprekkefyllingene og framskynde hydraulisk jekking for å øke inntrengningen i bergmassen (Klüver og Kveen, 2004). Dette reflekteres i de høye injeksjonstrykkene brukt i Norge, der maksimalt injeksjonstrykk kan nå opp til 100 bar ved gunstige overdekninger og forhold på overflaten (Tabell 2.5).

Tabell 2.5: Typiske maksimalverdier for injeksjonstrykk i urbane tunneler (Grøv et al., 2014).

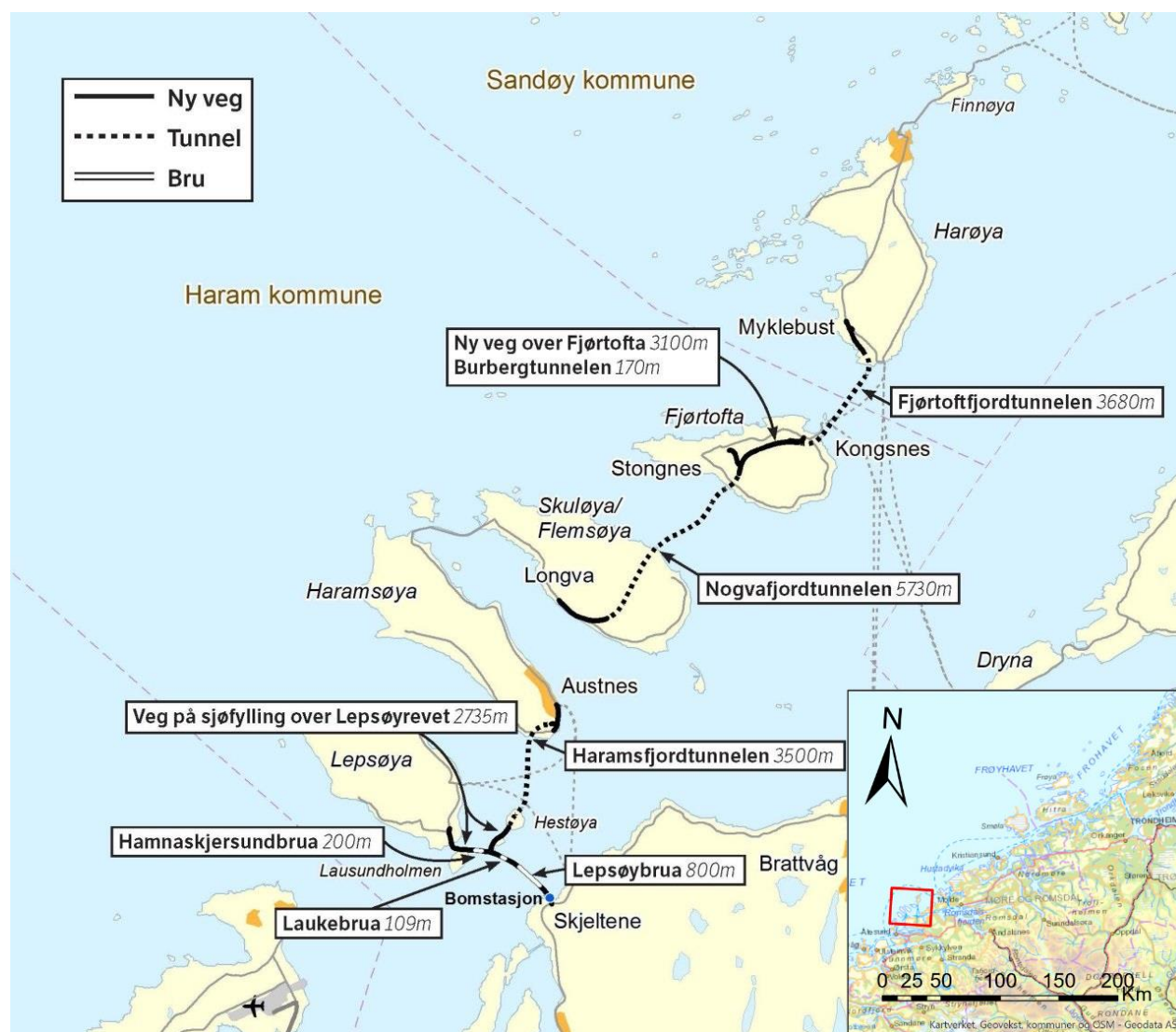
Bergoverdekning	Maks-injeksjonstrykk (vegger og heng)	Maks-injeksjonstrykk (såle)
0-5 m	20 bar	30 bar
5-15 m	40 bar	60 bar
>15 m	100 bar	100 bar

Maksimalverdiene gitt i Tabell 2.5, med injeksjonstrykk opp til 100 bar, representerer injeksjon med ordinær industrisement, mens det brukes mer moderate trykk på 50-70 bar ved injeksjon med mikrosegment (Grøv et al., 2014). Industrisementer som ikke produseres spesielt for injeksjon, slik som Norcem industrisement, er typiske i norske tunnelprosjekter (Holmøy et al., 2015). Slike sementer er dominerende i norsk tunnelindustri, og ifølge Grøv et al. (2014) kan det hende at spesialproduserte mikrosegmenter ikke har blitt tatt i bruk i like stor grad som forventet som følge av at de er omtrent 3-5 ganger dyrere i Norge. I norske tunnelprosjekter brukes som regel v/c-forhold mellom 0,5 og 0,9, i motsetning til v/c-forhold på 0,8-1,0 i Sverige (Grøv et al., 2014).

3 Nordøyvegen

3.1 Prosjektbeskrivelse

Prosjektet Fv. 659 Nordøyvegen har som mål å opprette veiforbindelser mellom Nordøyane (Lepsøya, Haramsøya, Flemsøya/Skuløya, Fjørtofta og Harøya) og fastlandet, og dermed gi fastlandsforbindelse til Nordøyane sine omtrent 2700 innbyggere og forbedret transport for andre privatpersoner og næringsliv (Møre og Romsdal fylkeskommune, u.å.). Nordøyvegen omfatter nye veier (inkludert vei på sjøfyllinger), tre broer, en miljøtunnel på land og tre undersjøiske veitunneler (Figur 3.1).



Figur 3.1: Oversiktskart over Nordøyvegen, med prosjektets beliggenhet i Møre og Romsdal markert i rødt. Modifisert etter Møre og Romsdal fylkeskommune (u.å.) i ArcGIS Pro (Esri, 2021), med bakgrunnskart fra Geodata AS (2021).

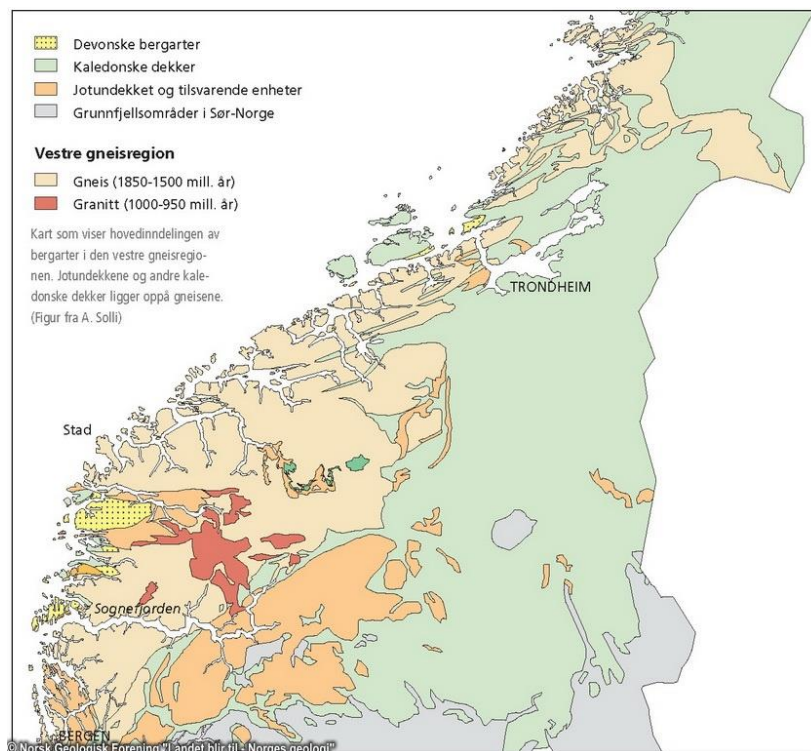
Kontrakt for entreprise, som omfatter hele prosjektet unntatt elektroinstallasjoner og fem forskjæringer for tunnelpåhugg, ble inngått av Skanska Norge AS i desember 2018 (Statens vegvesen, 2019c). Fysisk anleggsvirksomhet begynte i februar 2019 med Statens vegvesen som utførende byggherre. Rollen som byggherre har siden blitt overført til Møre og Romsdal fylkeskommune (Karlson, 2021). Til dags dato er kostnadsrammen 5,6 milliarder kr, og målet er at hele prosjektet være ferdigstilt til sommeren 2022 (Møre og Romsdal fylkeskommune, u.å.).

Nordøyvegens tre undersjøiske veitunneler utgjør en stor del av prosjektet. Disse er Haramsfjordtunnelen på 3500 m, Nogvafjordtunnelen på 5730 m og Fjørtoftfjordtunnelen på 3260 m (Karlson og Grob, 2018a, 2018b, 2018c). Haramsfjordtunnelen og Fjørtoftfjordtunnelen er begge undersjøiske i omtrent 65% av tunnelenes lengde, og Nogvafjordtunnelen består av omtrent 50% undersjøisk tunnel. Siste gjennomslag ble gjort i Nogvafjordtunnelen nær masteroppgavens slutt (4. mai), etter gjennomslag i de andre to tunnelene.

Karlson (2020) formidlet i et digitalt møte at det var møtt på størst problematikk ved driving av Nogvafjordtunnelen og Fjørtoftfjordtunnelen, mens forholdene på Haramsfjordtunnelens stuffer stort sett hadde vært stabile. Spesielt for tunnelstoffene «Longva» og «Fjørtofta nord» har det vært behov for omfattende forinjeksjon, og selv etter injeksjon har visse tunnelpartier registrert store mengder restlekkasje. Basert på Karlsons anbefalinger begrenses oppgavens omfang til å kun ta for seg Nogvafjordtunnelen og Fjørtoftfjordtunnelen. For denne grunn diskuteres ikke Haramsfjordtunnelen videre i oppgaven.

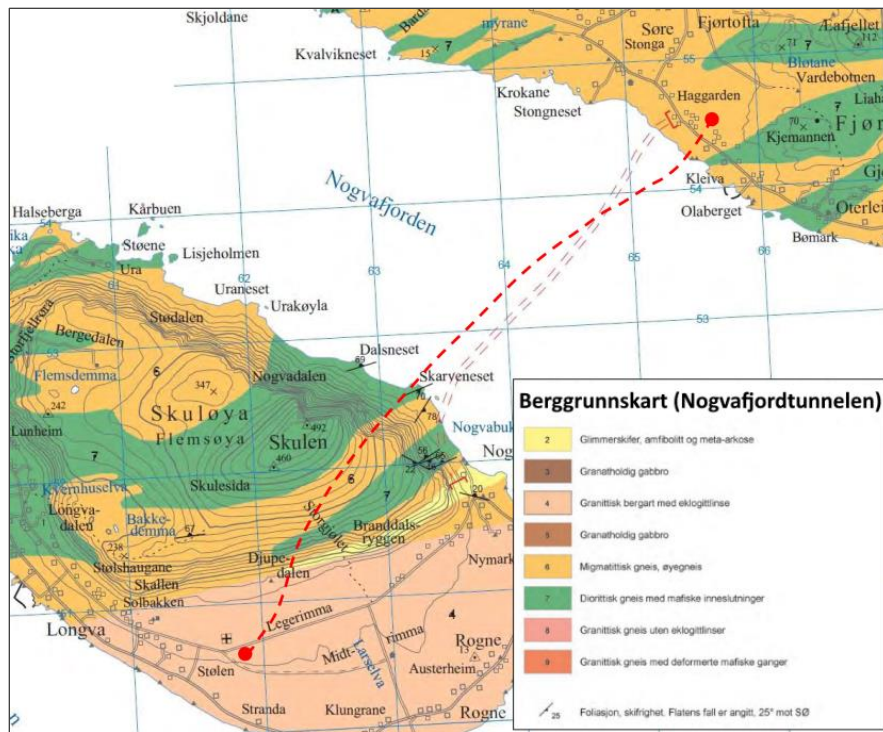
3.2 Regionalgeologi

Fv. 659 Nordøyvegen befinner seg i en norsk geologisk region kjent som *Den vestre gneisregionen* (Figur 3.2), som hovedsakelig består av granittiske gneiser og migmatitter dannet for 1700 til 1500 millioner år siden (Nordgulen og Andresen, 2013). Regionens grunnfjell, som strekker seg langs kysten fra Nordhordland til Namdalen, har også innslag av glimmerrik gneis, amfibolitt, gabbro og yngre granitter (Nordgulen og Andresen, 2013).



Figur 3.2: Kart som viser Den vestre gneisregionens utbredelse og omkringliggende bergarter (Nordgulen og Andresen, 2013).

De to tunnelene som undersøkes forbinder de følgende tre øyene: Skuløya/Flemsøya, Fjørtofta og Harøya. Berggrunnen til alle øyene er stort sett prekambrisk med granittiske eller diorittiske gneiser og migmatitter, samt omvandlede granitter (Ganerød og Lutro, 2011). Kaledonske skyvedekker, bestående av glimmerskifer, amfibolitt og meta-arkose, er kartlagt på Skuløya/Flemsøya og Fjørtofta (Ganerød og Lutro, 2011). Figur 3.3 og 3.4 viser berggrunnsgeologiske kart som omfatter tunneltraseene til henholdsvis Nogvafjordtunnelen og Fjørtoftfjordtunnelen, med tunneltrasé markert i skarpt rødt (tidligere utkast av traseene er tegnet med lysere rødfarge).

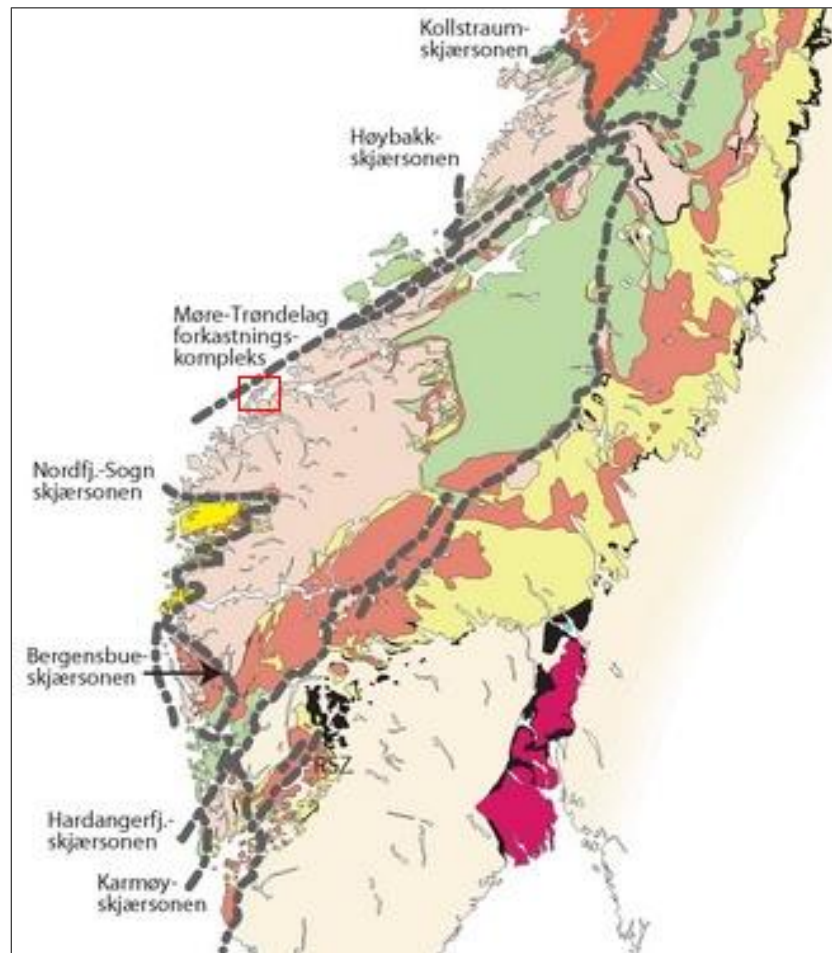


Figur 3.3: Berggrunnskart av Nogatfjordtunnelen. Modifisert etter Karlson og Grob (2018c).



Figur 3.4: Berggrunnskart av Fjortoftfjordtunnelen. Modifisert etter Karlson og Grob (2018a).

Som følge av tektonisk aktivitet i devon ble det dannet store skjærsoner som kuttet opp både kaledonske skyvedekker og grunnfjellet. En av disse bevegelsessonene er Møre-Trøndelag forkastningskompleks (MTF), en sidelengs skjærsoner som nærmest tangerer kysten til Møre og Romsdal og fortsetter nordøst inn i Trøndelag (Fossen et al., 2013). Nordøyane ligger i nærheten av MTF (Figur 3.5), og forkastningssoner/svakhetssoner nær Nordøyvegen er tolket til å være del av forkastningskomplekset (Dehls et al., 2012).



Figur 3.5: Devonske skjærsoner i Norge, med Nordøyane (nær MTF) markert i rødt. Modifisert etter Fossen et al. (2013).

3.3 Geologiske forhold og ingeniørgeologi

3.3.1 Forundersøkelser

Tunnelprosjekter i Norge går gjennom en undersøkelsesfase på fire trinn før bygging: tidlig planfase, kommunedelplan, reguleringsplan og geologisk rapport for konkurransegrunnlag (Statens vegvesen, 2020). I forundersøkelser utarbeides det først en preliminær utforming av tunnelstrekningen, etterfulgt av detaljerte studier som inkluderer ingeniørgeologisk kartlegging, geofysikk, boring, prøvetaking og laboratorietesting (Nilsen, 2016, Hansen et al., 2017).

Ved tunnelbygging i Norge skal det følges krav fra Eurokode 7, der hvert prosjekt tildeles én av tre «geotekniske kategorier». Veitunneler skal i utgangspunktet kategoriseres innenfor geoteknisk kategori 3, kategorien med de høyeste kravene, og undersjøiske tunneler skal i alle tilfeller falle under geoteknisk kategori 3 gjennom prosjektering og under tunneldrift (Statens vegvesen, 2020).

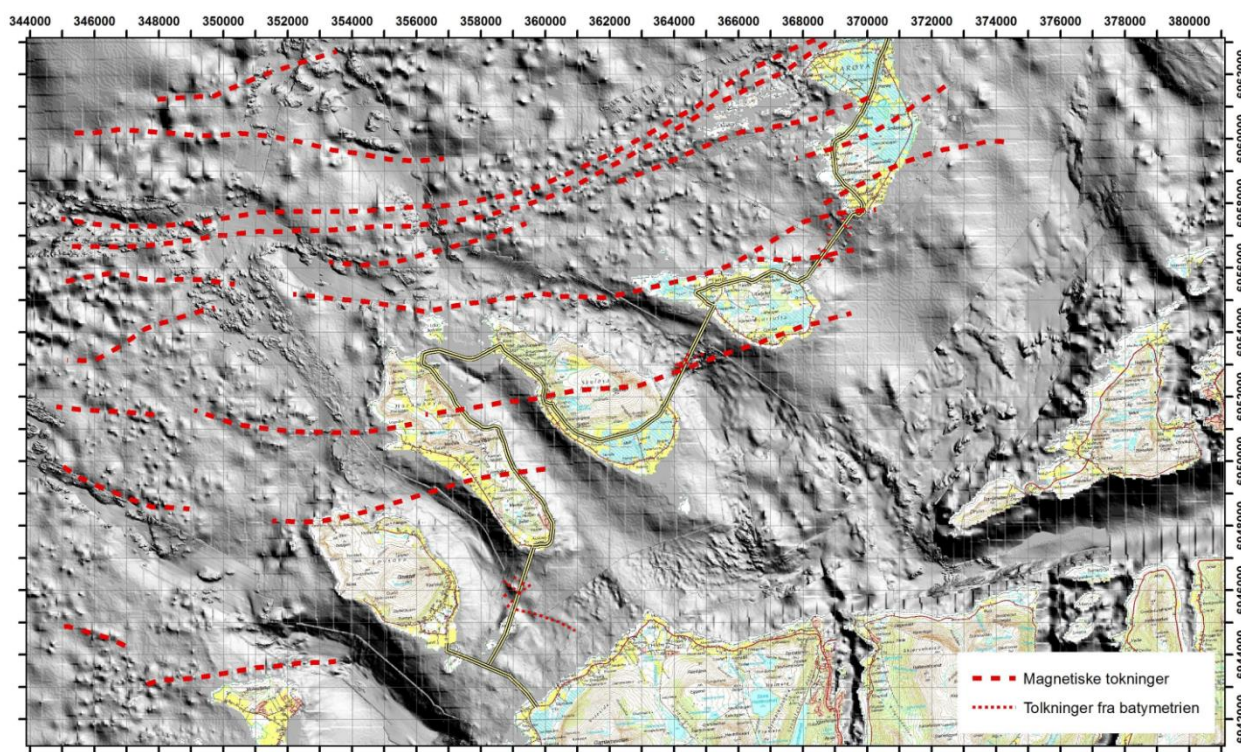
Prosjektets vanskelighetsgrad er for Nogvafjordtunnelen og Fjørtoftfjordtunnelen vurdert til å være høy, grunnet «uoversiktlige eller vanskelige grunnforhold» (Karlson og Grob, 2018a, 2018c). Nordøyvegens undersjøiske tunneler må klassifiseres som geoteknisk kategori 3, og det er dermed økte krav for forundersøkelser og planlegging av drive- og sikreforhold (Nilsen et al., 2011). De følgende forundersøkelsene ble utført ved Nordøyvegen:

- Refleksjons- og refraksjonsseismikk
- Magnetiske og batymetriske undersøkelser
- Ingeiørgeologisk feltkartlegging
- Styrt kjerne logging, kjerneboring og vanntapsmåling (Lugeon-test) i kjerne hull
- Seismisk tomografi
- Tynnslipsmikroskopering
- Grunnboringer og kontrollboringer av løsmasser

Alle forundersøkelsene beskrives i detalj i de ingeniørgeologiske rapportene for konkurransegrunnlag (Karlson og Grob, 2018a, 2018c).

3.3.2 Svakhetssoner og oppsprekking

Magnetiske tolkninger av Nordøyane indikerer forkastninger/svakhetssoner med strøk grovt sett ØNØ-VSV, i et linsemønster som er typisk for områder påvirket av regionale sideforkastninger (Dehls et al., 2012). Videre påpeker Dehls et al. (2012) at slike mønstre kan observeres langs Møre-Trøndelag forkastningssone i analyser av Nasuti et al. (2012). Med batymetriske data tolkes svakhetssoner i mindre skala langs havbunnen over tunneltraseene. Strukturer med strøk SV-NØ er tolket på bunnen av Nogvafjorden, og Fjørtoftfjorden har strukturer med strøk VNV-ØSØ (Dehls et al., 2012).

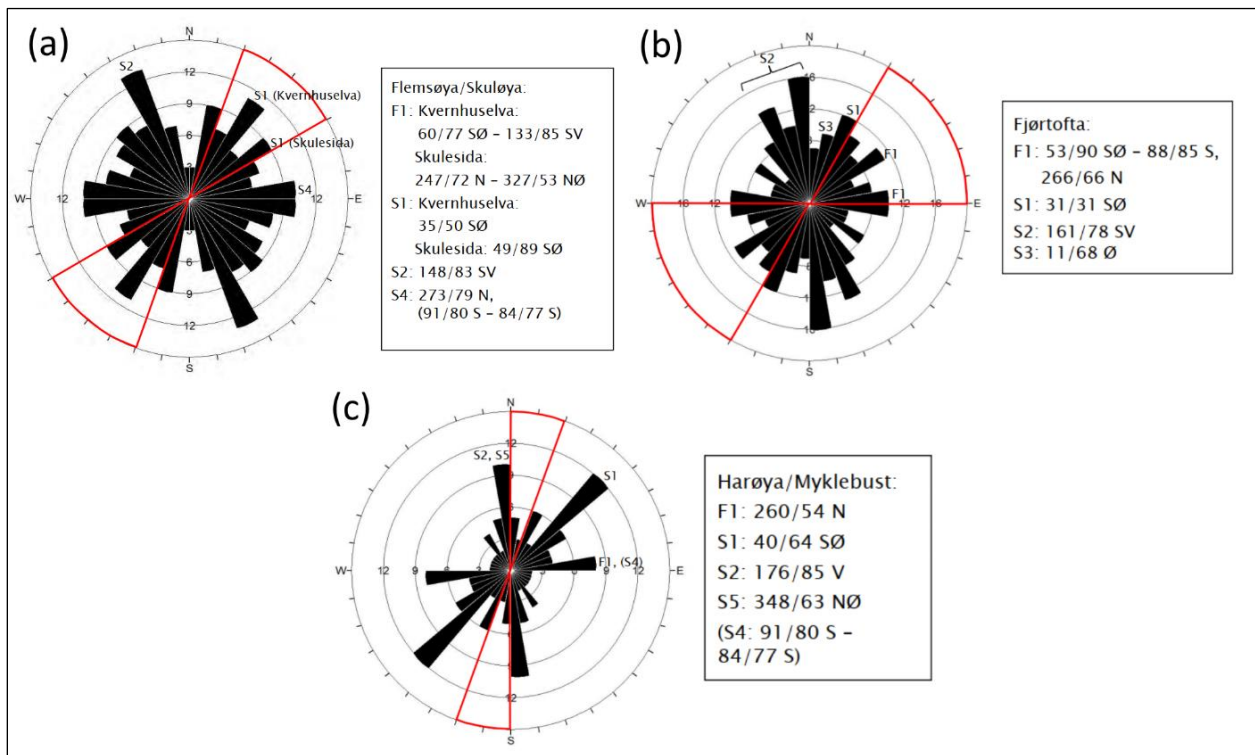


Figur 3.6: Magnetiske og batymetriske tolkninger av undersjøiske geologiske strukturer (Dehls et al., 2012). Påtegnede tunneltraseer er fra tidligere utkast som nå er utdaterte.

Den detaljerte kartleggingen av svakhetssoner langs tunneltraseene tar utgangspunkt i data fra flere runder refraksjonsseismikk, der soner med lav seismisk hastighet identifiseres som mulige svakhetssoner. Deretter korreleres lavhastighetssonene med data fra kjernelogging, seismisk tomografi og ingeniørgeologisk feltkartlegging for å vurdere hvor refraksjonsseismikken har tolket en reell svakhetsone (Karlson og Grob, 2018a, 2018c).

Feltkartlegging på land ble utført på Nordøyane ved registrering av diskontinuiteters strøk og fall ved bergblotninger. De samlede målingene for de tre øyene som ligger på hver side av Nogvafjordtunnelens og Fjørtoftfjordtunnelens traseer, vist som sprekkeroser i Figur 3.7, har en foliasjon med varierende retning (F1) og fem tolkede sprekkesett (S1-S5). Sprekkesett med strøk NNV-SSØ (S2), NØ-SV (S1) og Ø-V (S4) er fremtredende på Skuløya/Flemsøya, sprekkesett S2 (NNV-SSØ) er størst på Fjørtofta med innslag av sprekkesett S1 og S3 (NØ-SV) og sprekkesett S1 (NØ-SV) og S2 (NNV-SSØ) dominerer området nært påhugget på Harøya (Karlson og Grob, 2018a, 2018c).

Data om sprekkesett fra fastlandets overflate ekstrapoleres til tunneltraseens dybde, både der traseen ligger under land og sjøbunnen, for å komme fram til mulige orienteringer for de tolkede svakhetssonene (Karlson og Grob, 2018a, 2018c). Tunnelaksen skal helst krysse sprekker og svakhetssoner med en vinkel nær 90 grader, slik at så lite som mulig av tunnelen skjærer sprekkplanet.



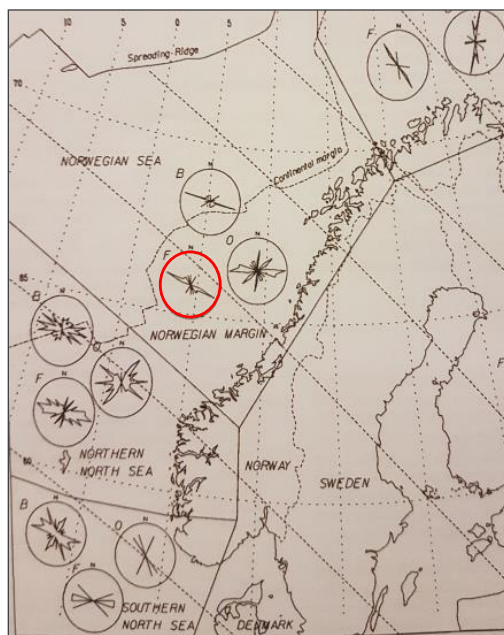
Figur 3.7: Sprekkeroser for kartlagte diskontinuiteter på øyene på hver side av Nogvafjorden og Fjørtoftfjorden: Flemsøya/Skuløya (a), Fjørtofta (b) og Harøya (c). Rød strek representerer tunnelakse. Modifisert etter Karlson og Grob (2018a, 2018b).

3.3.3 Bergspenninger

Spenningsforholdene ved Nordøyane er ikke godt kjent ettersom det hittil, i mai 2021, ikke er utført spenningsmålinger i prosjektområdet. Det ble antatt lave spenninger ettersom nærliggende øyer ikke har en ekstrem topografi (Karlson og Grob, 2018a, 2018c). Professor Charlie Li støtter i personlig kommunikasjon at topografi trolig påvirker spenningene i liten grad ettersom Nøgvafjorden og Fjørtoftfjorden ikke er dype og siden fjellene og landmassene rundt fjordene ikke er store nok for å ha en betydelig påvirkning på bergspenningene (Li, 2021). I tillegg kan det ifølge Li (2021) antas at spenningene er anisotropiske grunnet relativt lav overdekning.

Forskjellige typer data ble brukt i Holmøy (2008) sin doktorgradsavhandling for å vurdere spenningsretninger i forskjellige tunneler, inkludert regionale trender for spenningsretninger, nærliggende spenningsmålinger og storskala svakhets- og forkastningssoner. I de neste avsnittene evalueres retningen på største hovedspenning (σ_1) ved Nordøyane.

Fejerskov et al. (2000) samlet sammen spenningsmålinger fra alle nylige spenningsstudier t.o.m. år 2000 fra Norges fastland og norsk kontinentalsokkel. Spenningsmålinger, hovedsakelig fra Norskehavet utenfor kysten til Nordøyane, er markert i rødt i Figur 3.8 og viser en konsekvent regional trend der største hovedspenning er orientert NV-SØ. Spenningsorienteringen beskrives som en konsekvens av «ridge push» fra midthavsryggen vest i Norskehavet (Fejerskov et al., 2000).



Figur 3.8: Største hovedspenningsretninger, hovedsakelig målinger fra norsk sokkel. Modifisert etter Fejerskov et al. (2000).

25 km øst for Nordøyane ble spenningsmålinger tatt med hydraulisk splitting i 2017 og 2018 (markert i Figur 3.9) i forbindelse med det planlagte tunnelprosjektet under Romsdalsfjorden (Larsen og Hagen, 2017, 2018). Målingene av sprekkeorientering ble tatt ved vertikale dybder på henholdsvis 120-143 m og 167-204 m, og begge undersøkelsene indikerte at største hovedspenning er orientert Ø-V. Storskala geologiske strukturer tolket ut fra magnetiske data har, i likhet med Nordøyvegens tolkede svakhetssoner, strøk ØNØ-VSV (Olesen og Ofstad, 2015).



Figur 3.9: Spenningsmålinger øst for Nordøyane. Produsert i ArcGIS Pro, med bakgrunnskart fra Geodata AS (2021).

Etter diskusjon med Li (2021) konkluderes det med at største hovedspenning ved Nordøyane er orientert mellom Ø-V og NV-SØ ettersom øyene ligger mellom Romsdalsfjorden og Norskehavets «ridge push». Grunnet den korte avstanden på 25 km mellom Nordøyveggen og de to diskuterte spenningsmålingene, og siden magnetisk tolkede svakhetssoner er likt orientert i begge områdene, antas det at største hovedspenning for prosjektområdet kan tilnærmes til Ø-V (Li, 2021).

3.3.4 Undersøkelser under driving

Det utføres undersøkelser under driving siden det kan hentes ytterligere og mer nøyaktig informasjon om berggrunnen fra en etablert tunnel med kortere avstand til området som skal undersøkes (Nilsen, 2016). Undersøkelsene styrker kunnskap om grunnforholdene foran stuff før tunnelen drives videre, og vurderer geologiske parametere i utgravde tunnelseksjoner. Undersøkelsene benyttet fra Nogvafjord- og Fjørtoftfjordtunnelens tunnelstuffer beskrives i de neste avsnittene.

Sonderboring

Sonderboring er en undersøkelsesmetode der innlekkasjen i bergrom måles ved å først bore sonderhull foran stuff og deretter registrere lekkasjen ut av hvert sonderhull i l/min (Statens vegvesen, 2018). Ifølge Nilsen (2014) er systematisk sonderboring det viktigste elementet for sikkerhet i undersjøiske tunneler, ettersom store vannlekkasjer og ustabile bergmasser kan oppdages i god tid før tunnelstuffen har nådd problemområdet. Det er pålagt å utføre systematisk sonderboring, i utgangspunktet med fire sonderhull, i Nordøyvegens undersjøiske tunnelpartier, men systematisk sonderboring benyttes også i resten av tunnelene (Karlson og Grob, 2018a, 2018c).

Kjerneboring

Kjerneboring foran stuff er en viktig metode for å samle informasjon om karakteren til undersjøiske svakhetssoner (Nilsen, 2014). For denne grunn utføres kjerneboring av sonderhull i Nogvafjord- og Fjørtoftfjordtunnelen der seismikk har indikert svakhetssoner med seismisk hastighet mindre eller lik 3000 m/s (Karlson og Grob, 2018a, 2018c). Undersjøiske tunneler med seksjoner der bergoverdekning er mindre enn 50 m må godkjennes av Vegdirektoratet (Statens vegvesen, 2020). For tunnelene i Nordøyvegen var det gitt tillatelse for å drive partier med redusert overdekning, med krav om at kjerneboring foran stuff skal benyttes ved overdekninger på under 40 m (Nilsen og Beitnes, 2018).

MWD

Alle tunneler som drives i Norge skal ha utstyr for automatisk logging av borehull, også kjent som «Measurement While Drilling» (MWD) (Statens vegvesen, 2018). Parameterne som logges kontinuerlig ved MWD er typisk sett borsynk (m/min), rotasjonstrykk (bar), matetrykk (bar), slagtrykk (bar), rotasjonshastighet (rpm), vanntrykk (bar) og vannmengde (l/min) (NFF, 2019). For Nordøyvegens tunneler utføres det borparameterinterpretasjon i sonderhull langs hele tunnelstrekningene (Karlson og Grob, 2018a, 2018c), og de nevnte parameterne brukes for å beregne tre tolkede MWD-parametere: «tolket hardhet», «tolket oppsprekking» og «tolket vann».

Geologisk kartlegging på stuff

Det er pålagt å utføre geologisk kartlegging av tunnelprofilen langs hele tunnelens lengde, der bergmassens kvalitet anslås ved at bergmassens Q-verdi kartlegges, diskontinuiteters karakter og orientering registreres og eventuell leire og restlekkasjer vurderes (Statens vegvesen, 2020). Kartlegging utføres som regel etter hver tunnelsalve, som vanligvis er 5 m lang, men flere salver kan kartlegges samtidig dersom berget fra tidligere salver ikke enda er påført sprøytebetong eller tildekket (Statens vegvesen, 2018). Målet med den geologiske kartleggingen er hovedsakelig å bestemme permanent bergsikring langs tunnelen (Statens vegvesen, 2020).

I tillegg til disse kravene fra Statens vegvesen sine håndbøker, gjøres følgende i Nordøyvegen: det fotograferes før sprøyting med betong, leirmaterialer fra slepper analyseres i laboratorium og deformasjonsmålinger tas i større svakhetssoner, spesielt soner med svelleleire (Karlson og Grob, 2018a, 2018c).

3.3.5 Injeksjon

Det utføres behovsprøvd injeksjon i Nordøyvegens tunneler, informert av de systematiske sonderboringene som gjennomføres langs hele tunnallengdene. Injeksjonen har som mål å oppfylle et «moderat» tetningskrav på 200 l/min/km tunnel (Karlson og Grob, 2018a, 2018c). Videre forklaring av injeksjonsprosedyren i tunnelene kommer fra kommunikasjon med Karlson (2021).

Injeksjonsskjermene har en standard hullengde på 24 m, og antall hull for hver skjerm varierer avhengig av lokale forhold. Dersom bergoverdekningen er større enn 20 m er det vanlig med omtrent 30 injeksjonshull, og det brukes ofte rundt 40 hull om overdekningen er mindre. Pakkere plasseres 2 m inn i borehull og injeksjonsstaver legges inn i hvert hull før pumping av injeksjonsmasse begynner. Sluttrykk ved injeksjon er 80 bar for overdekninger over 20 m, og er lavere om bergoverdekningen er mindre (Tabell 3.1).

Tabell 3.1: Sluttrykk ved injeksjon i Nordøyvegens tunnelpartier med overdekninger på 20 m eller mindre.

Bergoverdekning	Sluttrykk (Tunnelens heng/vegger)	Sluttrykk (Tunnelens såle/stuff)
10-20 m	40 bar	60 bar
5-10 m	20 bar	30 bar
<5 m	Trykk avtales spesielt.	Trykk avtales spesielt.

Det benyttes både industrisement og mikrosegment i Nordøyvegen, og det brukes generelt sett lavere v/c-forhold for industrisement enn for mikrosegment. Seks resepter som brukes i injeksjon av tunnelene er gitt i Tabell 3.2. De neste avsnittene legger fram fremgangsmåter for injeksjon som brukes i tunnelene som forklart av Karlson (2021), men det finnes unntak der injeksjonen utføres på annet vis.

Tabell 3.2: Resepter for sementbasert injeksjonsmasse i Nordøyvegens tunneler.

Resept nr.	V/c-forhold	Sementtype	Superplastiserende middel	Silikaslurry
1	0,9	Industrisement	2%	10%
2	0,7	Industrisement	2%	10%
3	0,5	Industrisement	2%	8%
4	1,0	Mikrosegment	1%	-
5	0,8	Mikrosegment	1%	-
6	0,6	Mikrosegment	1%	-

Injeksjon med >20 m overdekning

Om det skal brukes industrisement begynner injeksjonen med $v/c = 0,9$ fram til 500 l er brukt for hvert hull (hvis mindre enn 500 l er brukt, avsluttes injeksjonen om sluttrykket holdes i 2 minutter). Deretter pumpes inntil 1000 l sement med $v/c = 0,7$ (<1000 l sement og sluttrykk i 2 minutter fører til avslutning), og til slutt brukes $v/c = 0,5$ inntil 2500 l sement totalt er brukt i hullet. Om 2500 l er brukt uten å ha nådd sluttrykk, ventes det i 1-2 timer før pumping fortsetter med $v/c = 0,5$. Om det nås 5000 l reduseres sluttrykket til 50 bar for hullet.

Med mikrosegment brukes først $v/c = 1,0$ som byttes til $v/c = 0,8$ om det er brukt 500 l i hullet uten å ha nådd sluttrykket. Etter 1000 l sement uten å nå sluttrykk minskes v/c -forholdet til 0,6, og det pumpes inntil 2500 l (om sluttrykk ikke nås) før det utføres styrt herding med akselerator.

Injeksjon med 0-20 m overdekning

For industrisement pumpes det også med $v/c = 0,9$, etterfulgt av $v/c = 0,7$ og til slutt $v/c = 0,5$. Forskjellen ved lave overdekninger er at det brukes inntil 500 l sement når $v/c = 0,7$ og inntil 1800 l for $v/c = 0,5$ fram til det «las hvile» i 1-2 timer. I tillegg økes ventetiden for å vurdere om sluttrykk er nådd fra 2 til 5 minutter.

Mikrosegment bruker de samme tre reseptene: $v/c = 1,0$, $v/c = 0,8$ og $v/c = 0,6$. Volum sement som brukes for de tre stegene (om sluttrykk ikke oppnås) er som følger: 300 l, 300 l og til slutt 700 l før det utføres styrt herding med akselerator.

Tiltak ved lave bergspenninger

Det forklares i de ingeniørgeologiske rapportene for Nordøyvegen at områder med lave spenninger kan kreve redusert injeksjonstrykk og/eller mindre v/c -forhold, og det kan være nødvendig å injisere i flere omganger. I slike bergmasser med liten innspenning kan det være nødvendig å først opprette en injisert sone med lavt injeksjonstrykk og deretter injisere en hovedskjerm med høyere trykk (Karlson og Grob, 2018a, 2018c).

4 Datainnsamling og metode

4.1 Innsamling av geologiske data

4.1.1 Bergarter

Bergartene langs tunnelene er kartlagt i geologisk kartlegging, men kartleggingen av typen bergarter kan være relativt grov siden hovedmålet er å vurdere bergmassens kvalitet for dimensjonering av bergsikring. For denne grunn brukes bergarter registrert i ingeniørdagbøker, sendt på e-post av Karlson (2020), om mer nøyaktig informasjon finnes.

Ifølge Karlson (2020) kan det være vanskelig å markere betydelige grenser mellom Nordøyvegens bergarter, ettersom mange av grensene er diffuse overganger mellom forskjellige typer gneiser. En av Holmøy (2008) sine støttede hypoteser var at det eksisterer en sammenheng mellom store bergartsgrenser og innlekkasje, men det kan bli vanskelig å etablere tydelige bergartsgrenser i tunnelene som undersøkes.

4.1.2 Q-verdi og parametere

Tilgjengelige data for Q-verdi og tilhørende parametere kommer fra geologisk kartlegging på stoff. Ettersom lengden på salver varierer og siden flere salver kan kartlegges i ett, endres "oppløsningen" på kartleggingen. Verdiene leses av utbrettet og antas til å være representative for hver kartlagt seksjon av bergmasse.

Kartleggingen utføres etter bergmassen er injisert, og medfører dermed usikkerhet angående bergmassens reelle Q-verdi. Dersom målinger av Q-parametere var tatt i faste intervaller foran stoff før injeksjon, slik som metoden benyttet av Rastegarnia et al. (2017), ville mer nøyaktige data vært tilgjengelige. Strømsvik (2019b) anerkjente at metoden er mer nøyaktig, men grunnet mangel på data før injeksjon ble Q-verdier fra geologisk kartlegging brukt i studiens analyse.

«Tolket oppsprekking» registrert ved MWD sees på i tillegg til geologisk kartlegging for å gi ekstra kontekst til Q-parametere som representerer oppsprekking. Dette gjøres ut fra å tolke 3D-visualiseringer av «tolket oppsprekking» langs salvehull og sonderhull. Data hentes fra Bever Control sine nettsider (Bever Control AS, 2021).

4.1.3 Diskontinuiteter

Diskontinuiteter er også registrert i den geologiske kartleggingen. Holmøys hypotese om innlekkasje i diskontinuiteter subparallele med største hovedspenning inkluderte sprekker og foliasjon (Holmøy, 2008). Derfor brukes målinger av både foliasjons- og sprekkeorientering i denne oppgaven.

Symboler for strøk og fall i utbrett måles ved å bruke "On Screen Protractor", en Java-applikasjon som kan brukes til å måle vinkler på en dataskjerm (Straffi, 2012). Metoden for å lage polplott og sprekkerose i programmet DIPS (Rocscience Inc., 2021), er å føre inn alle målinger av strøk og fall fra seksjonen av utbrettet som undersøkes inn i en tabell.

4.1.4 Bergspenninger

Ettersom ingen spenningsmålinger er tatt for Nordøyvegen, ble en evaluering av største hovedspenningsretning gjort i kapittel 3.3.3 med grunnlag i regionale spenningstrender, prosjektområdets geologi og nærliggende spenningsmålinger. Etter diskusjon med Li (2021) ble største hovedspenningsretning vurdert til å være orientert Ø-V.

Holmøy (2008) sin hypotese om innlekkasje og orienteringen av sprekker, i forhold til største hovedspenning, tar ikke for seg størrelsen av spenningene. Siden hypotesen kun omfatter spenningenes orientering, regnes det ikke som nødvendig å vite størrelsen av bergspenningene ved Nordøyvegen.

4.1.5 Innlekkasje

Sammenhenger mellom vann i berg og injeksjon kan bare vurderes om man observerer vannstrømningen gjennom bergmasse som ikke er tettet med sement. Derfor må målinger av innlekkasje være tatt foran stoff, før injeksjon. Ettersom det utføres systematisk sonderboring foran stoff langs hele tunnelenes lengde, regnes dette til å være en god måte å måle innlekkasjen i uninjisert bergmasse langs tunneltraseen. Det brukes ikke målinger fra kontrollhull siden disse bores innenfor injeksjonsskjermen etter bergmassen foran stoff er injisert (Statens vegvesen, 2018).

Innlekkasje i hvert sonderhull leses fra sonderbøringsrapporter (eksempel i Vedlegg B.2), der lekkasjen fra hvert sonderhull er gitt i l/min og plasseringen av de spesifikke sonderhullene er markert med tall under «sonderhullplassering».

Betydelig restlekkasje kartlegges på utbrett for geologisk kartlegging. I tillegg informerer Q-parameteren J_w (sprekkevannsfaktoren) om vannforholdene i den injiserte bergmassen, og dermed hvor effektiv forinjeksjonen har vært.

MWD parameteren «tolket vann» sees på som supplement til innlekkasje fra sonderboringer og målinger av restlekkasje. Dette gjøres ut fra å tolke 3D-visualiseringer av «tolket vann» langs salvehull og sonderhull. Data hentes fra Bever Control sine nettsider (Bever Control AS, 2021).

4.2 Innsamling av injeksjonsdata

4.2.1 Injeksjonsskjermer

Det brukes data fra sammendragsrapporter for injeksjon, slik som eksempelet i Vedlegg B.1, for å fastsette plasseringen og dimensjonene til hver injeksjonsskjerm som oppgaven ser på. Alle injeksjonsskjermer starter på et visst pelnummer, der hvert nummer representerer én meter langs tunnelenes lengde. I tillegg finnes informasjon om antall hull, lengden på skjermer og om flere skjermer starter på samme pelnummer.

4.2.2 Injeksjonsmasse

Mengden injeksjonsmasse som brukes er den sentrale verdien som skal anvendes i denne oppgavens hypoteser. «Mengde injeksjonsmasse» refererer til mengden sement som er brukt ved én injeksjonsskjerm, men ekskluderer eventuell sement i kjernehull.

Injeksjonsdata hentes fra sammendragsrapporter (eksempel i Vedlegg B.1), der mengde sement brukt i skjermen er gitt i kg. Dette gjøres for hvert pelnummer med en injeksjonsskjerm, ettersom hver skjerm er representert som et datapunkt i senere analyse. En studie av Strømsvik (2019b) viste ingen korrelasjon mellom mengde injeksjonsmasse og antall hull eller hulldybde. Ut fra disse resultatene bestemmes det at man helst bør sammenligne det totale forbruket av injeksjonsmasse for en hel skjerm med lokal geologi, ikke individuelle injeksjonshull. Sementtypen (kornstørrelsen) som brukes i skjermen hentes på samme måte.

Data for v/c-forhold er kun gitt for individuelle hull, i rapportenes kolonner «W/C» og «VOLUME» (eksempel i Vedlegg B.1, s. 3-6). Data for hvert hull føres manuelt fra rapporter og legges deretter sammen. Dersom det finnes motsigende data om mengde eller sammensetning av injeksjonsmasse, for eksempel i geologisk kartlegging, brukes alltid sammendragsrapport.

4.3 Utvalg av partier

Et mål med oppgaven er å nærmere analysere injiserte deler av veitunnelene. For at dette skal være mulig begrenses oppgaven til at bare visse tunnelpartier skal analyseres.

De to tunnelene som undersøkes består av til sammen fire tunnelstuffer, der Nogvafjordtunnelen har Longva stuff i sør og Fjørtofta sør stuff i nord og Fjørtoftfjordtunnelen har Fjørtofta nord stuff i sør og Myklebust stuff i nord. Karlson (2020) forklarer at Longva og Fjørtofta nord stuff har hatt størst injeksjonsproblematikk og at det er injisert mindre i Fjørtofta sør enn Longva. Ut fra injeksjonsdata som var tilgjengelige i høst 2020 var det ingen registrerte injeksjonsskjermer for Myklebust stuff. For denne grunn er det kun mulig å se på de tre andre tunnelstoffene. Det bestemmes at det skal være fire partier for hver av de tre stoffene (12 partier totalt), for å ha en lik mengde partier i hver stuff og siden det regnes som en håndterbar mengde å evaluere.

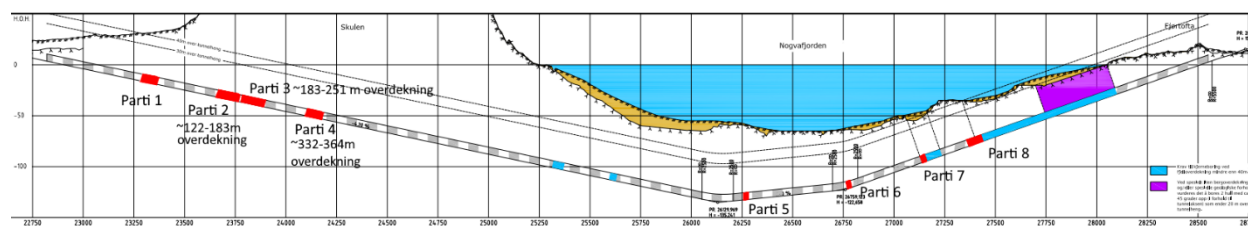
Partiene som velges trenger ikke å være representative for Nordøyvegen, ettersom det ikke er et mål å komme med en spesifikk konklusjon om prosjektet, men heller å se på sammenhenger mellom geologi og injeksjon. Derfor brukes det ikke detaljerte kriterier for å bestemme hvilke deler av tunnelene som blir med i partiene. Det gjøres heller et utvalg ut fra et grovt forsøk på å inkludere injiserte seksjoner fra ulike deler av hver stuff.

Hvert parti defineres ut fra starten på en injeksjonsskjerm til slutten av en siste injeksjonsskjerm. Det kan være forskjellige lengder på partiene og andelen av partiet som er injisert vil variere, men siden oppgaven handler om injeksjon bør en stor andel av hvert parti bestå av injisert bergmasse.

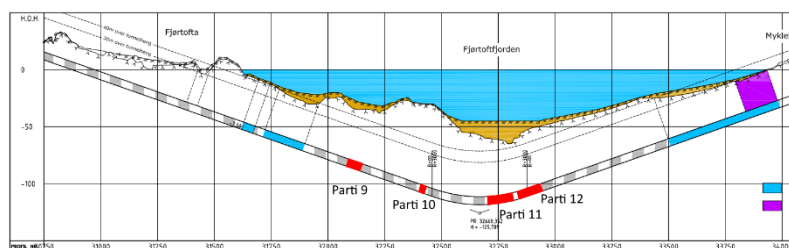
De valgte partiene presenteres i Tabell 4.1, med informasjon om partienes plassering, lengde og relevante injeksjonsdata. Antall injeksjonsskjermer som er angitt i tabellen er det faktiske antallet injeksjonsskjermer i partiet, inkludert skjermer som begynner på samme pelnummer. Slike «dobbeltskjermer» vises som én skjerm i Vedlegg E grunnet antakelser som gjøres for den kvantitative analysen i kapittel 6. Injeksjonsmassen i kg/m skjerm teller ikke lengdene til begge skjermer som starter på samme pelnummer, ettersom det er fullstendig overlapp. Siden Fjørtofta sør har «motsatt» driveretning i forhold til de andre to stoffene, starter partiene på et større pelnummer enn slutten av partiet, som vil si at Parti 8 ble drevet før Parti 5. Figur 4.1 og Figur 4.2 inneholder vertikale profiler av henholdsvis Nogvafjordtunnelen og Fjørtoftfjordtunnelen med alle partier påtegnet i rødt.

Tabell 4.1: Oversikt over de 12 tunnelpartiene som undersøkes i oppgaven, og tilhørende injeksjonsskjermer.

Tunnelstuff	Parti	Pelnummer	Lengde [m]	Skjermer (antall)	Injeksjonsmasse [kg/m skjerm]
Longva	1	23275-23363	88	5	1823,0
	2	23654-23768	114	10 (2 «dobbelt»)	1381,6
	3	23775-23892	117	4	425,3
	4	24091-24175	84	7	1083,7
Fjørtofta sør	5	26280-26256	24	1	1583,3
	6	26790-26766	24	1	2196,0
	7	27160-27139	21	1	1963,7
	8	27438-27370	68	2	1811,1
Fjørtofta nord	9	32079-32139	60	2	1149,0
	10	32396-32420	24	1	1776,5
	11	32700-32817	117	8	1542,0
	12	32840-32944	104	8	1730,1



Figur 4.1: Partier i Nøgvafjordtunnelen (Longva og Fjørtofta sør stuff). Modifisert etter Statens vegvesen (2019a).



Figur 4.2: Partier i Fjørtoftfjordtunnelen (Fjørtofta nord stuff). Modifisert etter Statens vegvesen (2019b).

De valgte partiene evalueres individuelt i kapittel 5. Geologiske forhold vurderes ved å se på sonderboring, MWD og geologisk kartlegging på stuff. Injeksjonsskjermene innenfor partiene og mengden injeksjonsmasse blir også sett på. Det legges fokus på mengdene injeksjonsmasse i hver enkelt skjerm, ettersom dette senere kan bidra til bedre forståelse av resultatene til de kvantitative analysene av injeksjonsskjermer i kapittel 6.

4.4 Metode for analyse av injeksjonsskjermer

En kvantitativ analyse av korrelasjoner mellom visse geologiske data og mengden injeksjonsmasse brukt gjøres, med resultater i kapittel 6 «Analyse av injeksjonsskjermer». Hvert enkelt datapunkt representerer en tunnelseksjon definert av en injeksjonsskjerm, der alle skjermene som ligger fullstendig innenfor partiene beskrevet i kapittel 4.3 (Tabell 4.1) skal være representert. Bruken av hver injeksjonsskjerm som et datapunkt støttes av resultatene til Strømsvik (2019b), som indikerte at hulldybde og antall hull i skjermen ikke har stor relevans og at det dermed er bedre å se på hver skjerm i sin helhet. Siden oppgavens partier for det meste består av grunnfjellsgneis og lignende metamorfe bergarter, vil analysen reflektere egenskapene til de dominerende bergartene.

4.4.1 Geologiske parametere og injeksjon

Som grunnlag for hypotesene i slutten av kapittel 4.4.1, antas det at mengden innlekkasje korrelerer med mengden injeksjonsmasse som brukes for hver skjerm. Holmøy (2008) sine støttede hypoteser om innlekkasje kan da brukes som et startpunkt for å bestemme hvilke geologiske parametere som bør undersøkes for å se om de korrelerer med masseforbruket.

Q-verdi og parametere

Holmøy (2008) fikk sterk støtte for en hypotese om at Q-verdier under 0,1 hadde mindre innlekkasje enn Q-verdier mellom 0,1 og 10. Siden Q-verdier under 0,1 ikke opptrer i noen av partiene som undersøkes (se kapittel 5), kan ikke den samme hypotesen vurderes i forhold til mengde injeksjonsmasse. Det undersøkes heller om det finnes korrelasjoner mellom Q-verdi/parametere og masseforbruk dersom Q-verdier under 0,1 ikke er til stede.

Som diskutert i kapittel 2.2.4 viste Rastegarnia et al. (2017) en signifikant negativ korrelasjon mellom Q-verdi og mengde injeksjonsmasse, altså at masseforbruket økte i bergmasser med mindre Q-verdier. Studien hadde tilgang på detaljert informasjon om bergmassen i hvert borehull før injeksjon, noe som ikke er tilgjengelig for Nordøyvegen. I stedet brukes Q-verdier fra geologisk kartlegging på stoff, i likhet med analysene gjort av Bhasin et al. (2002) og Strømsvik (2019b).

I tillegg til å undersøke korrelasjonen mellom bergmassens Q-verdi og injeksjonsmassebruk, kan en rekke av parameterne som inngår i Q-systemet også være relevante. En mindre verdi for oppsprekkingsfaktoren (RQD) representerer tettere oppsprekking, og en mindre verdi av

oppsprekkingsgraden (RQD/J_n) vil si at blokkstørrelsen i bergmassen er mindre. Dersom masseforbruken er større i mer oppsprukket bergmasse, noe som støttes av Klüver og Kveen (2004), kan det hende at mindre verdier av RQD og RQD/J_n korrelerer med større mengde injeksjonsmasse. Denne antakelsen styrkes av studien til Bhasin et al. (2002), som fant en svak trend for økt massebruk ved lav RQD og en betydelig økning i masseforbruk for mindre verdier av RQD/J_n . Numeriske modeller som viser større inntrengning i bergmasser med lavere RQD (Saeidi et al., 2013), peker også på økt massebruk.

Det er demonstrert at større sprekkeruhet (JRC) reduserer inntrengningsevnen av injeksjonsmassen i bergets sprekker (Barton, 2003, Saeidi et al., 2013), og JRC kan direkte korreleres med sprekkeruhetstallet i Q-systemet (J_r) (Barton, 1987). I tillegg er tallet for sprekkefylling (J_a) den eneste Q-parameteren der Strømsvik (2019b) observerer en trend med masseforbruk. Bhasin et al. (2002) tolker at forholdet J_r/J_a er sterkere korrelert med mengden injeksjonsmasse, sammenlignet med de individuelle parameterne J_r og J_a som viser svake trender. Det er ifølge resultatene vanskeligere for injeksjonsmasse å trenge inn i sprekker med større skjærfasthet.

Som følge av at det kartlegges i injisert bergmasse er vannparameteren J_w redusert (Strømsvik, 2020), noe som også gjelder forholdet J_w/SRF , virker ikke disse parameterne relevante å analysere. Spenningsfaktoren SRF kan derimot være verdt å undersøke ettersom lave spenninger, åpne sprekker og løse blokker eller tilstedeværelse av svakhetssoner kan ha store påvirkninger på injeksjonsprosessen (Klüver og Kveen, 2004).

Med grunnlag i det som er kjent om forholdet mellom en bergmasses Q-verdi/Q-parametere og masseforbruket i injeksjonen, konkluderes det med at oppgaven skal se på bergmassens:

- Q-verdi
- RQD
- RQD/J_n
- J_r/J_a
- SRF

Orienteringen av diskontinuiteter

Holmøy (2008) sin hypotese om at vannførende diskontinuiteter er subparallele med retningen av største hovedspenning fikk sterk støtte. I likhet med denne hypotesen, kan det undersøkes om det brukes større mengder injeksjonsmasse dersom diskontinuiteter er subparallele med største hovedspenning. Orienteringen av sprekker bestemmes ut fra geologisk kartlegging på stoff (kapittel 4.1.3) og største hovedspenningsretning er vurdert til å være Ø-V i kapittel 3.3.3. Fallet til sprekkesett er ikke vist til å være betingende for masseforbruk, til tross for at det er en faktor for store innlekkasjer (Selmer-Olsen, 1981). For denne grunn inkluderes sprekkesett med alle fall.

Trykkspenninger som står normalt på sprekkeplan fører til at sprekkeåpningen komprimeres (Holmøy, 2008), og injeksjonsmassens inntrengning i en sprekke er betinget av størrelsen på den fysiske sprekkeåpningen (Stille, 2015). Dette støttes av Klüver og Kveen (2004) sine observasjoner av tunneler med anisotrope spenninger, der enkelte sprekkesett hadde større sprekkeåpninger som var mer injiserbare. Sprekkesettene som lettest injiseres kan altså ha større sprekkeåpninger som følge av spenningssituasjonen, der sprekkeplanen er subparallele med største hovedspenning.

Det konkluderes med at det er relevant å undersøke om det brukes mer injeksjonsmasse i diskontinuiteter som er subparallele med største hovedspenning.

Hypoteser

Parameterne som bedømmes til å være verdt å undersøke kan, med grunnlag i tidligere begrunnelser, inngå i hypoteser om deres korrelasjoner med mengden injeksjonsmasse som brukes. Analysen mellom geologiske parametere og injeksjonsmasse skal undersøke følgende hypoteser:

1. *Hypoteser som omhandler Q-verdier og deres parametere (For Q-verdier over 0,1):*
 - 1.1. Mindre injeksjonsmasse brukes i injeksjonsskjermer med større Q-verdier.
 - 1.2. Mindre injeksjonsmasse brukes i injeksjonsskjermer med større RQD.
 - 1.3. Mindre injeksjonsmasse brukes i injeksjonsskjermer med større RQD/J_n.
 - 1.4. Mindre injeksjonsmasse brukes i injeksjonsskjermer med større J_r/J_a.
 - 1.5. Mindre injeksjonsmasse brukes i injeksjonsskjermer med mindre SRF.
2. Det er større injeksjonsmassebruk i injeksjonsskjermer med sprekker som er subparallele med største hovedspenningsretning.

4.4.2 Tolkning av geologiske data

Det brukes geologiske parametere for hver injeksjonsskjerm, som beskrevet i kapittel 4.1, for å undersøke mulige sammenhenger med mengde injeksjonsmasse pr. skjerm. En mer presis beskrivelse av hvordan disse dataene tolkes er gitt i de følgende avsnittene.

Q-verdi og parametere

Siden injeksjonsdata er gitt for hver injeksjonsskjerm (ofte med dybde på 24 m), i motsetning til den geologiske kartleggingen som kan gjøres for hver salve (ofte 4-5 m), kan det hende at forskjellige Q-verdier opptrer innenfor hver enkelt skjerm. Det er ikke mulig å vite hvor mye injeksjonsmasse som medgår i hver del av skjermen ettersom ett tall beskriver masseforbruket i hele skjermens lengde. Det bestemmes derfor at et vektet gjennomsnitt av Q-verdier eller Q-parametere, avhengig av hvor stor andel av skjermen de representerer, skal tas for å beskrive bergmassekvaliteten i injeksjonsskjermene.

Noen salver blir ikke kartlagt, som vil si at Q-verdier ikke er angitt i enkelte seksjoner av tunellens lengde. Om deler av bergmassen innenfor en injeksjonsskjerm ikke er kartlagt, gjøres et estimat ved å sette Q-verdien/Q-parameteren i området til gjennomsnittet av verdiene til bergmassen direkte før og etter seksjonen som ikke er kartlagt.

Orienteringen av diskontinuiteter

Det skal sees på hvilke sprekkesett som eksisterer innenfor injeksjonsskjermen som undersøkes, i stedet for å kun bruke sprekkesett som ser ut til å være dominante i skjermen. Dette gjøres ettersom det mest kartlagte sprekkesettet ikke nødvendigvis har størst påvirkning på forbruket av injeksjonsmasse. Et sprekkesett vurderes til å være subparallelt med største hovedspenningsretning om strøket ligger innenfor $\pm 30^\circ$ (Holmøy, 2008).

Målingene av diskontinuiteter plottes for hver injeksjonsskjerm i programmet DIPS, der punkt-konsentrasjoner vises med konturlinjer som er farget fra lys grønn (lav konsentrasjon) til rød (høy konsentrasjon). I skjermene som tolkes til å ha mange strøk- og fallmålinger regnes punkt-konsentrasjoner med den 7. fargen («lime grønn») som en indikasjon på et sprekkesett. En mer subjektiv vurdering av sprekkesett, ut fra punkt-konsentrasjon og håndtegnede strukturer i geologisk kartlegging, gjøres i skjermene med få målinger, grunnet større usikkerhet.

Innlekkasje

Innlekkasjedata for hver skjerm skal brukes for å gi ytterligere kontekst til analysene av geologiske parametere og injeksjonsmasse, ettersom hypotesene er basert på hypoteser om innlekkasje (Holmøy, 2008).

Siden hvert datapunkt er definert ut fra en injeksjonsskjerm, må disse korreleres med sonderhullenes lekkasjemålinger. Sonderboringer kan tas ved pelnummer som ligger noen meter før eller etter en injeksjonsskjermens første pelnummer, og sonderhullene har i mange tilfeller ikke samme lengde som injeksjonshullene, der de ofte har dybder på omtrent 30 m i forhold til 24 m. Til tross for usikkerheten, vurderes det at sonderboringer som har fullstendig overlapp med injeksjonsskjermer er akseptable representasjoner av innlekkasje i skjermene.

Noen injeksjonsskjermer kan ikke korreleres med en enkelt sonderboring. Dette gjelder spesielt der injeksjonsskjermer ligger tett sammen med liten avstand mellom pelnummer. For å være på den sikre siden utelukkes datapunkter for injeksjonsskjermer som ikke kan knyttes til en enkelt sonderboring.

4.4.3 Tolkning av injeksjonsdata

Mengden injeksjonsmasse brukt i hver skjerm i kg og skjermens plassering og lengde tas fra sammendragsrapporter (kapittel 4.2). Variasjonen i lengden til forskjellige injeksjonsskjermer korrigeres ved at masseforbruket gis i kg/m for hver skjerm.

Dersom to eller flere injeksjonsskjermer starter på samme pelnummer, anses disse som samme skjerm. Dette vil si at injeksjonsdata i sammenfallende skjermes adderes og representerer ett datapunkt. Om skjermene har forskjellige lengder brukes den lengste skjermelengden.

4.4.4 Korrelasjonsanalyse

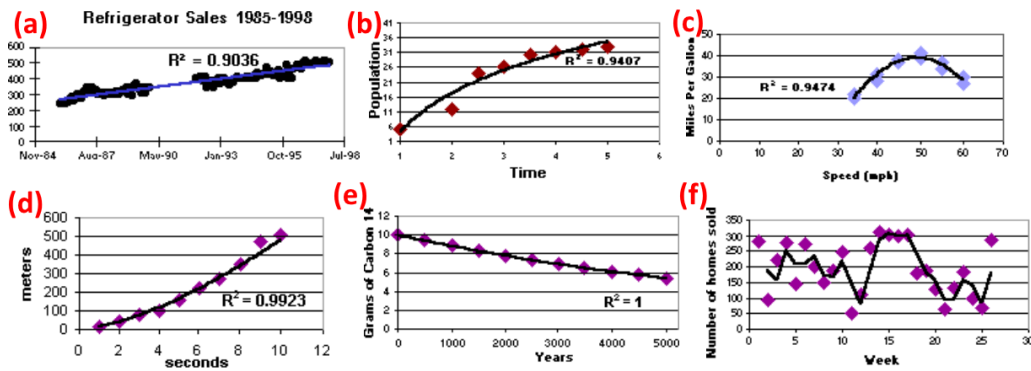
Hypotesene fra kapittel 4.4.1 skal undersøkes ved å se om korrelasjoner eksisterer mellom geologiske parametere og injeksjonsmasse i data fra Nordøyvegen. To enkle statistiske metoder benyttes, og beskrives fortløpende i teksten.

Korrelasjon mellom Q-verdi og injeksjonsmasse

Det gjennomføres en analyse av Q-verdien/Q-parameterne og mengden injeksjonsmasse brukt i injeksjonsskjermene som undersøkes. Data for hver enkelt skjerm, snittverdien av den geologiske parameteren og mengde injeksjonsmasse, føres inn i punktdiagrammer i Microsoft Excel for Microsoft 365. På diagrammene fremstilles trendlinjer basert på en regresjonsmodell av punktene. Andelen av variasjonen som forklares av modellen er representert med r^2 , som er kvadratet av korrelasjonskoeffisienten (r), der verdien til r ligger mellom -1 og 1, og en større absoluttverdi ($|r|$) betyr at punktene har større sammenheng (Løvås, 2005).

Ifølge Cesano et al. (2000) kan «geologiske eller hydrogeologiske variabler» regnes til å ha en høy korrelasjon ved $|r| > 0,5$. Dette vil si at r^2 på over 0,25 kan tolkes til å vise sterk korrelasjon for geologiske variabler. Henriksen (2008) ser på verdier av $|r| < 0,3$ som upålitelige, og konkluderer med at de ikke kan brukes til å forutsi hydraulisk konduktivitet som funksjon av en geologisk variabel. I denne analysen aksepteres altså $|r|$ over 0,5 ($r^2 > 0,25$) til å bety sterk korrelasjon (hypotesen støttes), og $|r|$ mellom 0,5 og 0,3 ($0,25 > r^2 > 0,09$) til å bety moderat korrelasjon. Det ligger en forskjell i at Cesano et al. (2000) og Henriksen (2008) undersøkte hydrogeologi i berg, mens denne oppgaven omhandler korrelasjoner mellom geologiske parametere og injeksjonsmasseforbruk. For å kompensere for økt usikkerhet brukes de nevnte definisjonene for «sterk korrelasjon» og «moderat korrelasjon», som er mer konservative enn kriteriene brukt av (Holmøy, 2008), der $|r|$ mellom 0,2 og 0,3 betyr «lav til moderat støtte» og $|r|$ større enn 0,3 betyr «støtte» (sterk støtte). En moderat korrelasjon vil ikke støtte hypotesen, men kan være en indikasjon på en trend.

Flere typer regresjon kan utføres i Excel, og gi forskjellige trendlinjer (Figur 4.3). Det kan ifølge Løvås (2005) velges mellom lineær regresjon og ulike typer ikke-lineære regresjoner ut fra hvordan trendlinjen ser ut til å passe gjennom visuell inspeksjon, og størrelsen på r^2 kan hjelpe å indikere hvor godt kurven passer.



Figur 4.3: Trendlinjer i Excel: lineær (a), logaritmisk (b), polynom (c), potens (d), eksponentiell (e) og glidende gjennomsnitt (f). Modifisert etter Microsoft Corporation (u.å.).

Selv om hypotesene omhandler visse Q-parametere (presentert i kapittel 4.4.1), vises plott for J_n , J_a og J_r siden de inngår i hypotesenes parametere og kan bidra med ytterligere kontekst. Denne analysen skal først og fremst utføres for alle de undersøkte injeksjonsskjermene, men i tillegg skal separate diagrammer lages for de tre tunnelstoffene for å se om det finnes forskjeller mellom data og sammenhengene i ulike deler av tunnelene.

Korrelasjon mellom subparallele sprekkesett og injeksjonsmasse

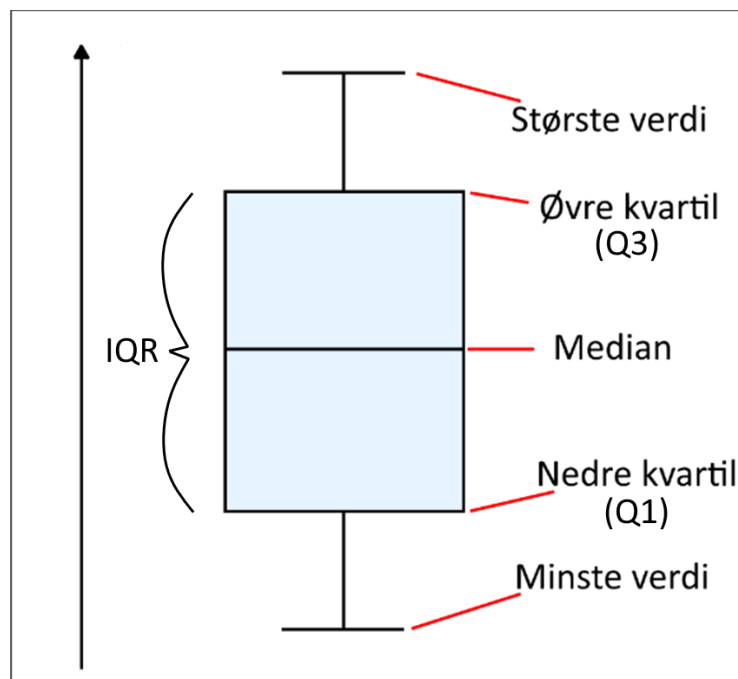
For å finne ut om det brukes mer injeksjonsmasse i skjermene med diskontinuiteter som er subparallele med antatt største hovedspenningsretning (σ_1) deles injeksjonsskjermene i to utvalg:

1. **Subparallele diskontinuiteter:** Minst ett sprekkesett har strøk $\emptyset\text{-V} \pm 30^\circ$.
2. **Ikke subparallele diskontinuiteter:** Ingen sprekkesett har strøk $\emptyset\text{-V} \pm 30^\circ$.

Det utføres deretter en T-test (to utvalg, antatt to ulike varianser) med Analyseverktøyet til Microsoft Excel for Microsoft 365. Dette er en uparet T-test der to forskjellige utvalg sammenlignes for å påvise forskjeller mellom gruppene, noe som kan gjøres om p-verdien (sannsynligheten for å få et likt eller mer ekstremt resultat, om det ikke finnes en forskjell mellom gruppene) er liten nok. Testen gir en ensidig p-verdi og en tosidig p-verdi som er dobbelt så stor som den ensidige p-verdien. En tosidig test gir to bidrag til p-verdien, ettersom det undersøkes for store og små verdier på begge sider av sannsynlighetsfordelingen (Løvås, 2005). Siden tilgjengelige data ikke gir en god basis for å være sikker på at det enten brukes mer eller mindre injeksjonsmasse, brukes den mer konservative tosidige p-verdien. Det antas at parameterne er normalfordelte, siden dette er et krav for å utføre en T-test.

I studien til Cesano et al. (2000), der store og små innlekkasjer sine sammenhenger med geologiske variabler undersøkes, brukes p-verdi $< 0,05$ som «sterk korrelasjon», p-verdi mellom 0,05 og 0,1 som «moderat korrelasjon» og det beskrives at svakere korrelasjoner (selv med p-verdi $> 0,1$) kan tolkes ut fra visuell inspeksjon av boksplott. I likhet med Holmøy (2008), som brukte Cesano et al. (2000) sine vurderinger for r-verdier, aksepterer denne oppgaven den nevnte kategoriseringen av p-verdier for korrelasjon mellom geologiske variabler. Hypotesen støttes kun med sterke korrelasjoner, men en moderat korrelasjon kan være en nyttig indikator på en trend.

Boksplott (også i Excel) skal brukes for å visualisere forskjellen i de to utvalgene, og kan støtte mulige korrelasjoner. Dette gjelder, som nevnt ovenfor, spesielt for svakere korrelasjoner med lave p-verdier (Cesano et al., 2000). Boksplottet til hvert utvalg er definert ut fra dets median (større enn 50% av observasjonene), og nedre og øvre kvartiler (større enn henholdsvis 25% og 75% av observasjonene) (Løvås, 2005). Nedre og øvre kvartil kalles henholdsvis Q1 og Q3, og avstanden mellom kvartilene kalles interkvartil rekkevidde (IQR). Punkter med svært store eller små verdier sammenlignet med resten av utvalget (utliggere) ekskluderes automatisk i Excel for å øke leseligheten til diagrammet. Figur 4.4 gir en visuell oversikt over et boksplott. I likhet med analysen av Q-verdier og injeksjonsmasse, lages det boksplott for alle skjerner samlet og for de tre ulike tunnelstoffene for å se om det finnes forskjeller fra stoff til stoff.



Figur 4.4: Skisse av et boksplott. Minste og største verdi ekskluderer ofte observasjoner som regnes som utliggere.

5 Evaluering av injiserte partier

De tolv partiene valgt i kapittel 4.3 presenteres hver for seg i dette kapitlet. Geologiske forhold (kapittel 4.1) og injeksjonsdata (kapittel 4.2) blir evaluert for hvert parti etterfulgt av oppsummeringer der geologi og injeksjon i partiet diskuteres.

De geologiske data som undersøkes er innlekkasje fra sonderboringer, borparametertolkninger (MWD) av oppsprekking og vann og geologisk kartlegging av stuff. Figurer for utbrett av geologisk kartlegging er presist lagt sammen til komposittbilde i program for bilderedigering i tilfeller der partiet ligger på flere enn én pdf-side. Det brukes tabeller fra NGI (2015) for å vurdere hva verdien av Q-parametere betyr. I tillegg beskrives bergmassens kvalitet i noen tilfeller som «god», «middels», «dårlig» eller «svært dårlig» ut fra klassifiseringen av Q-verdi gitt i tegnforklaring for geologisk kartlegging (tilgjengelig i Vedlegg A). Injeksjonsskjermene presenteres, inkludert dybde og plasseringen av skjermene, mengde injeksjonsmasse, type sement og v/c-forhold.

Det velges å begrense oppgaven ved å ikke se på antall hull i skjermene (kan finnes i Vedlegg E.1) eller injeksjonstrykket som brukes og eventuell jekking. Dette gjøres ettersom de regnes til å være de minst viktige parameterne for å gi kontekst til oppgavens sentrale problemstillinger, og siden injeksjonsdata da må vurderes for hvert borehull.

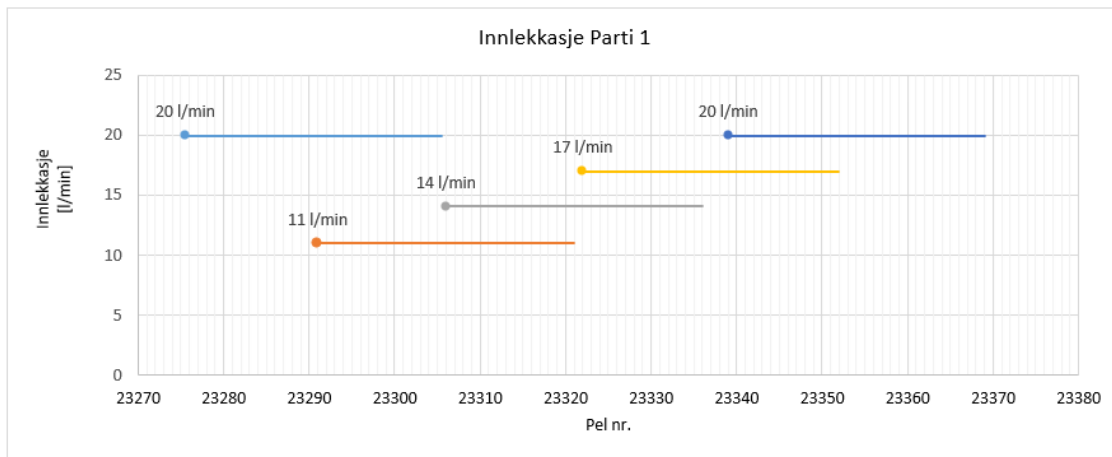
I evalueringen av partier refereres det ofte til relative retninger, slik som «start», «slutt», «høyre» og «venstre». Starten av partiet er enten partiets laveste eller høyeste pelnummer, avhengig av hvilken retning tunnelen drives i. Venstre og høyre side av tunnelen for hvert parti sees på i forhold til driveretningen ved tunnelstufen. I et eksempel der tunnelen drives mot nord er øst til høyre og vest til venstre.

5.1 Parti 1: Pel nr. 23275-23363

5.1.1 Geologi

Sonderboring

Fem sonderboringer, alle med fire hull på 30 m, ble utført innenfor Parti 1 med totale innlekkasjer fra 11 l/min til 20 l/min (Figur 5.1). Ut fra rapporter for sonderboring kommer innlekkasjen stort sett fra de to øverste hullene, spesielt hull øpe til høyre.



Figur 5.1: Innlekkasje i sonderboringene innenfor Parti 1. Pel nr. (start) for sonderboringene er markert med en prikk.

MWD

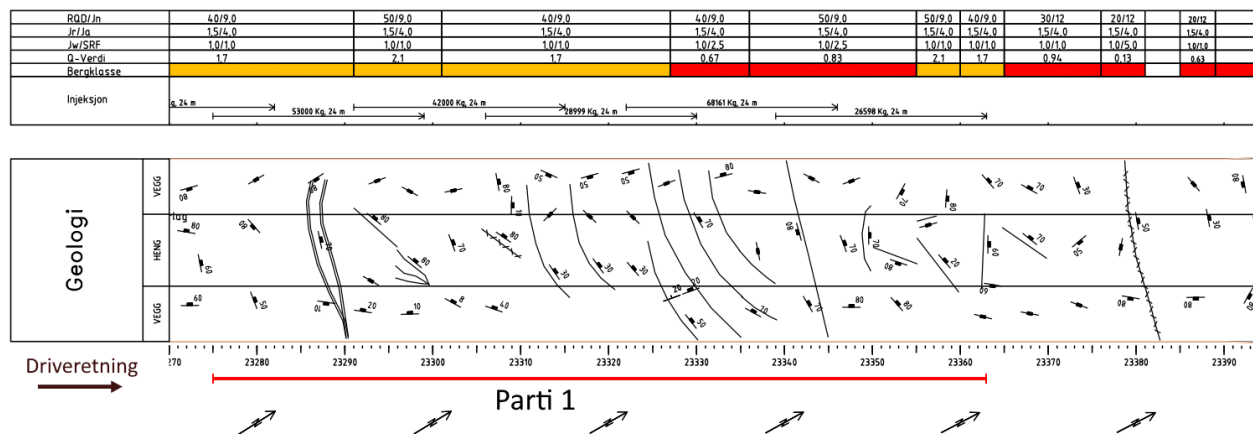
MWD for partiets borehull er tilgjengelig i Vedlegg C.1. Tolket oppsprekking for partiet ligger stort sett innenfor kategorien «lite oppsprukket», men borparametertolkning innenfor pel nr. 23275-23300 og 23320-23350 tolker en større andel av «oppsprukket» og «meget oppsprukket» bergmasse. For begge seksjonene ser bergmassen ut til å være mest oppsprukket på høyre side av tunnelprofilet.

Verdiene for tolket vann er jevnt sett lave. Ved noen borehull er det tolket større vannforstyrrelse, spesielt for hull innenfor seksjonene med pel nr. 23280-23290, 23310-23320 og 23335-23350.

Geologisk kartlegging på stoff

Kartlegging av tunnelpartiet vises i utbrett i Figur 5.2. Ved pel nr. 23275-23327 er $Q = 1,7-2,1$ med liten endring i Q -parameterne. Ved pel nr. 23327- 23355 (hovedsakelig granatførende gneis) økes SRF fra 1,0 til 2,5 og dermed blir $Q = 0,67-0,83$. Pel nr. 23355-23363 har, i likhet med den første delen av partiet, $Q = 1,7-2,1$. Hele partiet består av gneiser, der mye er båndgneis og amfibolittisk gneis. RQD ligger på enten 40 eller 50, som er nær grensen mellom dårlig og middels oppsprekking. $J_n = 9,0$ for hele Parti 1, som vil si at det er tolket tre sprekkesett for hver kartlagt salve.

Diskontinuiteter i partiet er presentert i Vedlegg D.1. 51 sprekkemålinger og én måling av foliasjon viser at sprekkesett innenfor partiet har strøk NNØ-SSV og ØNØ-VSV. De to største sprekkesettene er spredt langs hele partiets lengde, men de påtegnede linjene i utbrettet tyder på at sprekker med strøk ØNØ-VSV er mest fremtredende. Ut fra mengden målinger i kartleggingen ser det ut som om sprekkesett med strøk ØNØ-VSV er spesielt fremtredende fram til pel nr. 23306.



Figur 5.2: Geologisk kartlegging av Parti 1, med injeksjonsskjermer under «Injeksjon». Tegnforklaring i Vedlegg A.

5.1.2 Injeksjon

Hele partiets lengde er injisert med til sammen 218 758 kg industrisement, altså 2485,9 kg/m parti. De fem injeksjonsskjermene har dybder på 24 m, som gir et gjennomsnitt på 1823,0 kg/m skjermdybde. Skjermene overlapper hverandre med 7-9 m. Injeksjonsskjermen med størst forbruk ligger ved pel nr. 23322 og skiller seg ut fra resten av skjermene med et forbruk på 68 161 kg industrisement (Figur 5.2).

Totalt i partiet har tyntflytende resepter med $v/c = 0,9$ og $v/c = 0,7$ vært brukt på 63 336 l injeksjonsmasse, og 143 450 l injeksjonsmasse er tyktflytende med $v/c = 0,5$. Standardresepter for sement i Nordøyvegen beskrives i Tabell 3.2 (kapittel 3.3.5).

5.1.3 Oppsummering

Parti 1 består av fullstendig injisert bergmasse, med fem overlappende injeksjonsskjermer. Bergmassekvaliteten i partiet rangerer fra «svært dårlig» til «dårlig». Oppsprekkingen er på grensen mellom dårlig og middels, med fremtredende sprekkesett orientert med strøk ØNØ-VSV. Begge seksjonene med økt «tolket oppsprekking» ser ut til å sammenfalle med lavere verdier for RQD i geologisk kartlegging. Det er ingen store variasjoner i innlekkasje fra sonderboringene, noe som også reflekteres i «tolket vann» for partiet. Strekningen med $SRF = 2,5$ har ikke lavere RQD, som kan tyde på at det ikke er en svakhetssone, men at det heller er kompetent berg med lave spenninger.

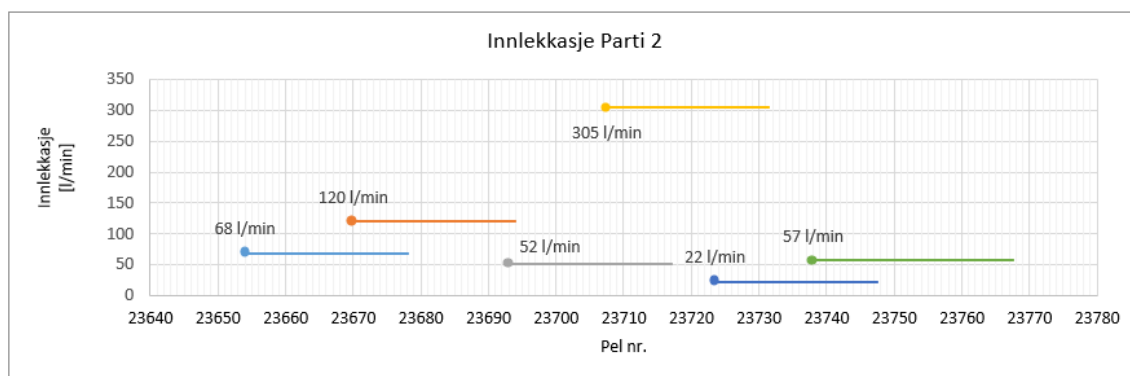
Injeksjonsskjermen med størst forbruk av sement sammenfaller med redusert Q-verdi, og kartlagte sprekker i området ser ut til å stort sett ha strøk ØNØ-VSV.

5.2 Parti 2: Pel nr. 23654-23768

5.2.1 Geologi

Sonderboring

Seks sonderboringer ble utført innenfor Parti 2, der fem har hull med lengde 24 m og én boring har hullengde 29,5 m (pel nr. 23738). Sonderboringene med pel nr. 23670, 23723,5 og 23738 består av to sonderhull, mens resten bruker fire hull. Mengde innlekkasje rangerer fra 22 l/min til 305 l/min (Figur 5.3). Rapporter for sonderboring viser at innlekkasjen stort sett kommer fra de to øverste hullene, spesielt hull oppe til venstre i stuffen.



Figur 5.3: Innlekkasje i sonderboringene innenfor Parti 2. Pel nr. (start) for sonderboringene er markert med en prikk.

MWD

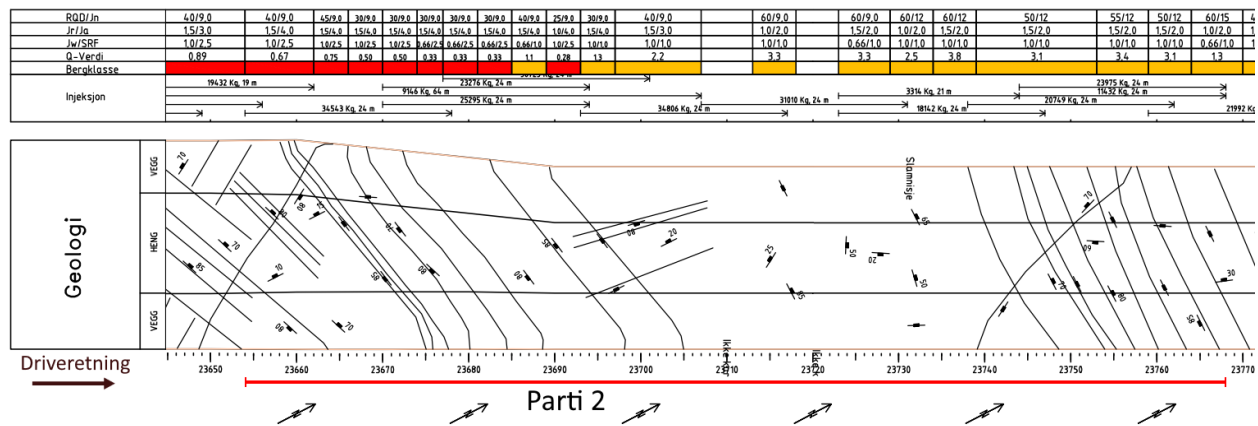
MWD for partiets borehull er tilgjengelig i Vedlegg C.2. Bergmassen mellom pel nr. 23700 og 23740 tolkes for det meste som «lite oppsprukket», og det ser ut til å være tolket mest oppsprekking for pel nr. 23655-23665, 23670-23685 og 23750-23760 (mye «oppsprukket» og «meget oppsprukket» bergmasse). Området med størst oppsprekking, mellom pel nr. 23655 til 23685, ser ut til å kutte tunnelen i en diagonal der oppsprekkingen først opptrer på venstre av tunnelen og gradvis beveger seg mot høyre, mens oppsprekking for pel nr. 23750-23760 står nærmere 90 grader på tunnelprofilen.

Verdiene for tolket vann er lave i de fleste hullene, men et mønster med «vannforstyrrelse» følger diagonalen nevnt i forrige avsnitt ved pel nr. 23665 til 23685 med mest tolket vann på høyre side av tunnelen, og sporadiske vannforstyrrelser registreres ved pel nr. 23745-23760. Ved pel nr. 23655-23665 er det tolket «store vannforstyrrelser» på høyre side.

Geologisk kartlegging på stoff

Kartlegging av tunnelpartiet vises i utbrett i Figur 5.4. Starten av partiet, fra pel nr. 23654 til 23685, og salven med pel nr. 23689-23693 har dårlig bergmassekvalitet med $Q = 0,28-0,75$. Disse delene av partiet har $RQD = 25-40$ og $SRF = 2,5$, og består av en blanding av gneis, meta-arkose og amfibolitt. J_a økes fra 2-3 i omkringliggende berg til 4, som kan tyde på mer leire i sprekkene. Resten av partiet har Q -verdier mellom 1,1 og 3,8, med gjennomgående høyere RQD -verdier, og bergarten beskrives som «grå gneis». Fra starten av partiet til pel nr. 23729 er $J_n = 9$ (tre tolkede sprekkesett), etterfulgt av $J_n = 12$ (tre sprekkesett pluss tilfeldige sprekker) fram til pel nr. 23764 og videre der $J_n = 15$ (fire eller flere sprekkesett). Middels innsig av vann er registrert ($J_w = 0,66$) ved følgende pelnummer: 23674-23689, 23723-23729 og 23764-23768.

Diskontinuiteter i partiet er presentert i Vedlegg D.2. Det er målt 36 sprekker i geologisk kartlegging, som viser at det mest dominerende sprekkesettet har strøk Ø-V. Påtegnede linjer i geologisk kartlegging og antall målinger støtter at dette sprekkesettet spesielt er fremtredende i starten og slutten av partiet (pel nr. 23654-23695 og 23740-23768).



Figur 5.4: Geologisk kartlegging av Parti 2, med injeksjonsskjermer under «Injeksjon». Tegnforklaring i Vedlegg A.

5.2.2 Injeksjon

Hele partiets lengde er injisert med en total mengde på 265 267 kg sement, altså 2326,9 kg/m parti. Alle injeksjonsskjermer unntatt skjerm for pel nr. 23744 er bare injisert med industrisement, mens denne enkelte skjermen har brukt 23 975 kg industrisement og 11 432 kg mikrosegment. De seks injeksjonsskjermene som ikke starter på samme pelnummer har dybder på 24 m, og for to pelnummer (23670 og 23723) er det injisert med to skjermer hver, der én skjerm har dybde 21 m. Antakelsen fra kapittel 4.4.3, at lengden på mer enn én skjerm pr. pelnummer ikke bør brukes, tas i bruk for å komme fram til et masseforbruk på 1823,0 kg/m skjermdybde. Det er en stor variasjon i overlappet mellom injeksjonsskjermene, der skjermene overlapper mest for pel nr. 23670-23701 og minst for pel nr. 23701-23723.

Tyntflytende resepter med $v/c = 1,0$, $v/c = 0,9$ og $v/c = 0,7$ representerer 227 177 l injeksjonsmasse, og 51 394 l er mer tyktflytende sement med $v/c = 0,5$. Standardresepter for sement i Nordøyvegen beskrives i Tabell 3.2 (kapittel 3.3.5).

5.2.3 Oppsummering

Parti 2 er fullstendig injisert, og består av ti injeksjonsskjermer, der fire skjermer kan betegnes som to «dobbeltskjermer» som starter på samme pelnummer. Starten av partiet har «svært dårlig» bergmassekvalitet, med redusert Q-verdi som følge av lavere RQD og økt SRF, og kan dermed tolkes som en svakhetssone. Områdene med redusert RQD ser ut til å korrelere med flere målinger av diskontinuiteter, stort sett med strøk Ø-V. MWD data for «tolket oppsprekking» viser større oppsprekking i de samme delene av partiet der oppsprekking er indikert av geologisk kartlegging, i tillegg til å vise lignende orienteringer av tolkede diskontinuiteter. Sonderboringen med innlekkasje på 305 l/min skiller seg ut ved å ha betydelig større lekkasje enn andre målinger. Ellers er mer innlekkasje målt i sonderhull til venstre i tunnelen, noe som står i motsetning til større mengder «tolket vann» på høyresiden av partiet.

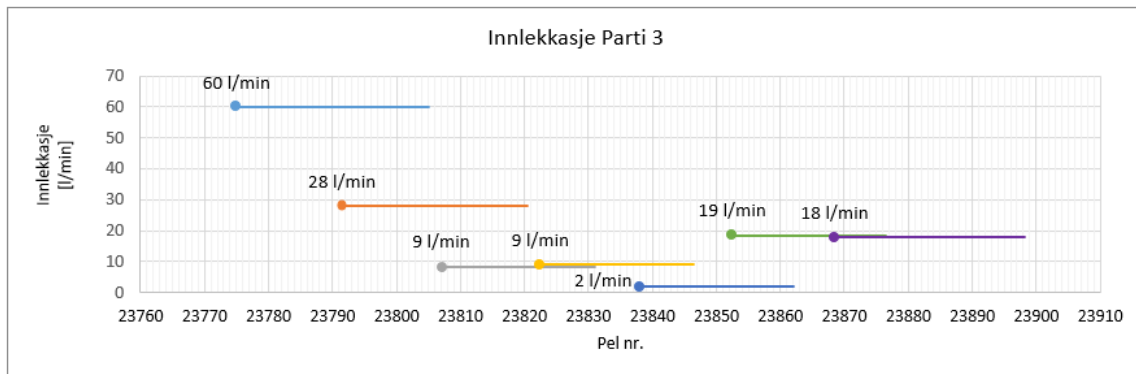
Det er større overlapp mellom skjermene i delene av partiet der Q-verdier er lavest og sprekker har strøk Ø-V. Med økt tetthet av skjermer følger større injeksjonsmasseforbruk i seksjonene med dårligere bergmasse. Delene av partiet med $J_w = 0,66$ tyder på at det har vært utilstrekkelig injeksjon, ettersom betydelig restlekkasje bør unngås.

5.3 Parti 3: Pel nr. 23775-23892

5.3.1 Geologi

Sonderboring

Syv sonderboringer, der de første to består av to sonderhull og resten av fire sonderhull, med lengder mellom 24-30 m ligger innenfor Parti 3. Lekkasje målt fra sonderboringene er høyest i starten av partiet (60 og 28 l/min), går over til å være lav (9 og 2 l/min) og øker til slutt til 19 og 18 l/min. Sammendragsrapporter viser at innlekkasje i partiet i stor grad kommer fra de øverste hullene, og at det ikke er en stor forskjell mellom lekkasje fra venstre og høyre side.



Figur 5.5: Innlekkasje i sonderboringene innenfor Parti 3. Pel nr. (start) for sonderboringene er markert med en prikk.

MWD

MWD for partiets borehull er tilgjengelig i Vedlegg C.3. Tolket oppsprekking er stort sett «lite oppsprukket», men en tynt plan av «meget oppsprukket» bergmasse kan tydes for pel nr. 23785-23790. Bergmasse med større andeler som er «noe oppsprukket» og «oppsprukket» tolkes for pel nr. 23795-23805, 23870-23880 og 23885-23892.

Det er bare tolket sporadiske vannforstyrrelser i starten av partiet, med store seksjoner uten vannforstyrrelse. Fra pel nr. 23850 til 23885 tolkes en større grad av vannforstyrrelse på høyre side av tunnelen.

5.3.2 Injeksjon

Fra partiets start ved pel nr. 23775 til pel nr. 23816 og for pel nr. 23852-23892 er tunnelen injisert (69,2% av partiet). Til sammen er det brukt 43418,6 kg mikroement, altså 371,1 kg/m over hele partiets lengde. Til sammen er det fire injeksjonsskjermer, alle med dybde 24 m, som vil si at det er brukt 425,3 kg/m skjermdybde. Overlapp mellom skjermer som møtes er 7-8 m.

V/c-forhold på 1,0 og 0,8 er brukt for 50477,5 l injeksjonsmasse, og mer tyktflytende sement med $v/c = 0,6$ er brukt for 1970,3 l. Standardresepter for sement i Nordøyvegen beskrives i Tabell 3.2 (kapittel 3.3.5).

5.3.3 Oppsummering

Parti 3 er injisert i sin start og slutt, med to injeksjonsskjermer for hver injiserte seksjon. Disse to delene av partiet har gjennomgående lavere bergmassekvalitet som følge av økt oppsprekking reflektert i RQD og J_n , i tillegg til sprekkenes friksjonsforhold (J_r/J_a). Målingene av sprekkers orienteringer gir at det dominerende sprekkesett har strøk NØ-SV, men også at sprekker orientert Ø-V er fremtredende i starten av partiet. Seksjonen på starten av partiet, der RQD er lav, sammenfaller med posisjonen til det tolkede planet med «meget oppsprukket» bergmasse ifølge MWD-data. RQD er også lavere ved pel nr. 23868-23874 og 23879-23892, og det tolkes mer «oppsprukket» og «noe oppsprukket» bergmasse i samme del av partiet. Innlekkasjedata fra sonderboringene ser ikke ut til å korrelere med tolket vann, ettersom mest lekkasje måles i starten av partiet, der det tolkes lite vannforstyrrelse av MWD. I tillegg er mesteparten av målt innlekkasje fra venstre side av stoffen, men borparametertolkning gir mest vannforstyrrelse på høyre side.

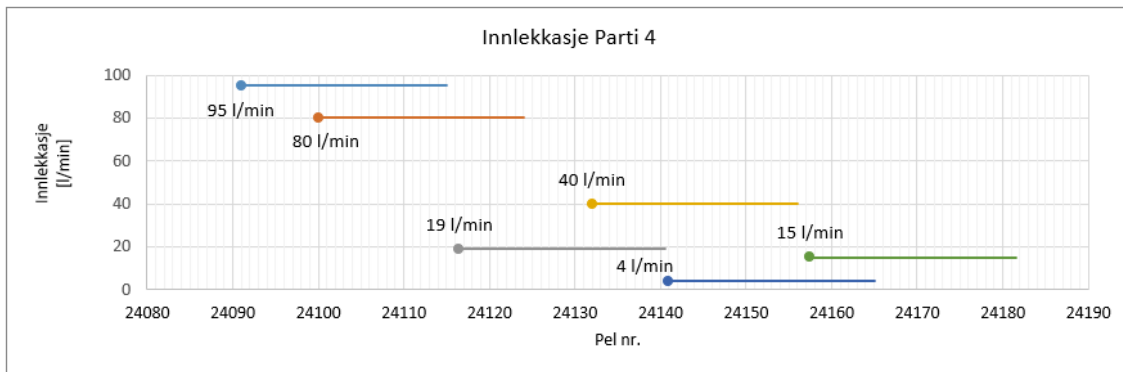
En jevnt lav mengde injeksjonsmasse er brukt i de fire injeksjonsskjermene (7181,6-14 281 kg), med litt høyere masseforbruk for pel nr. 23775 til 23816 enn de siste to skjermene. Disse to skjermene med lavest pelnummer ligger der bergmassekvaliteten er lavere og sprekkesett orientert i retning Ø-V er fremtredende.

5.4 Parti 4: Pel nr. 24091-24175

5.4.1 Geologi

Sonderboring

Seks sonderboringer, alle med hulldybde 24 m, ble utført innenfor Parti 4 med total lekkasje målt fra 4 l/min til 95 l/min (Figur 5.7). De to første sonderboringene, fra pel nr. 24091 og 24100, har henholdsvis to og tre sonderhull der innlekkasjen er størst på venstre side, og måler størst innlekkasje i partiet (95 l/min og 80 l/min). De fire resterende målingene av innlekkasje, fra 4 til 40 l/min, er fra sonderboringer med fire hull der størst lekkasje kommer fra høyre side.



Figur 5.7: Innlekkasje i sonderboringene innenfor Parti 4. Pel nr. (start) for sonderboringene er markert med en prikk.

MWD

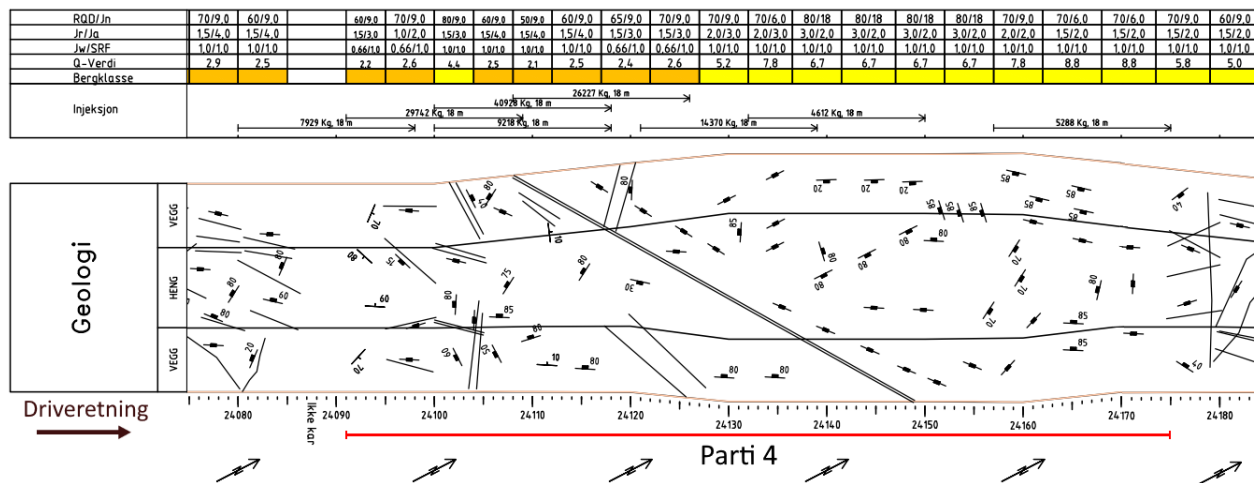
MWD for partiets borehull er tilgjengelig i Vedlegg C.4. Fra pel nr. 24100 til 24120 er en større andel av bergmassen tolket til å ligge mellom «noe oppsprukket» og «meget oppsprukket», sammenlignet med resten av partiet. Tolkede plan med oppsprukket bergmasse kutter tunnelen ved å først møtes på venstre side og fortsette diagonalt over til høyre side av tunnelen. Dette kan også observeres i mindre skala for pel nr. 24160-24165. Resten av partiet faller stort sett under «lite oppsprukket».

Det tolkes mest «vannforstyrrelse» for pel nr. 24095-24135, spesielt på høyresiden av tunnelen. I resten av partiet finner borparametertolkning ikke vannforstyrrelse.

Geologisk kartlegging på stoff

Kartlegging av tunnelpartiet vises i utbrett i Figur 5.8. Starten av partiet, fra pel nr. 24091 til 24127 har Q-verdier mellom 2,1 og 4,4. Her er gjennomsnittsverdien av RQD noe lavere enn for resten av partiet, forholdet J_r/J_a er gjennomgående lavere og flere salver registrerer $J_w = 0,66$. For pel nr. 24127-24175 er $Q = 5,2-8,8$. I deler med lavere Q-verdier er $J_n = 9$ (tre sprekkesett), og det tolkes to sprekkesett som følge av at $J_n = 6$ for resten av partiet. For pel nr. 24136,5-24157 er $J_n = 18$, ettersom parameteren multipliseres med 3 i tunnelkryss. Bergarten i hele partiets lengde betegnes kun som «gneis».

Diskontinuiteter i partiet er presentert i Vedlegg D.4 (målinger utenfor injeksjonsskjermer markert i lys grå). 64 kartlagte sprekker og 6 målinger av foliasjon indikerer et dominerende sprekkesett med strøk NØ-SV for hele partiet. To andre store sprekkesett som tolkes er orientert Ø-V og N-S, der starten av partiet (pel nr. 24095-24120) ser ut til å korrelere med Ø-V og N-S ser ut til å være fremtredende for pel nr. 24120-24150.



Figur 5.8: Geologisk kartlegging av Parti 4, med injeksjonsskjermer under «Injeksjon». Tegnforklaring i Vedlegg A.

5.4.2 Injeksjon

Partiet er injisert ved pel nr. 24091-24150 og 24157-24175 (91,7% av partiet). Det er brukt 136 545 kg mikrosegment, som vil si 1625,5 kg/m parti. Partiet inneholder syv injeksjonsskjermer, alle med dybde 18 m, som gir et masseforbruk på 1083,7 kg/m skjerm. Overlapp mellom skjermene er størst for pel nr. 24091-24126, ettersom injeksjonsskjermer ligger tettere. For disse fire skjermene er det også i snitt brukt mer injeksjonsmasse enn for partiets tre andre skjermene.

Det brukes tynne v/c-forhold på 1,0 og 0,8 for 131 244 l injeksjonsmasse, og sement med v/c = 0,6 er brukt for 16 924 l sement. Standardresepter for sement i Nordøyvegen beskrives i Tabell 3.2 (kapittel 3.3.5).

5.4.3 Oppsummering

Parti 4 er injisert langs nesten hele partiets lengde, med unntak i pel nr. 24150-24157. Partiet kan deles opp ved pel nr. 24127, der bergmassen før er dominert av «dårlig» bergmasse og har lavere RQD og J_r/J_a enn kartlagte salver med større pelnummer. Det mest fremtredende sprekkesettet langs hele partiet er orientert NØ-SV, sprekkesett med strøk Ø-V tolkes for pel nr. 24095-24120 og sprekker med strøk N-S ligger ved pel nr. 24120-24150. Borparametertolkning av økt oppsprekking (pel nr. 24100-24120) sammenfaller med lavere kartlagte RQD-verdier. Innlekkasje er størst i de to første sonderboringene, der mest lekkasje er målt fra hull på venstre side. MWD tolker mer vannforstyrrelse ved starten av partiet, på samme sted som disse sonderboringene, men tolket vann er størst på høyre side av tunnelen.

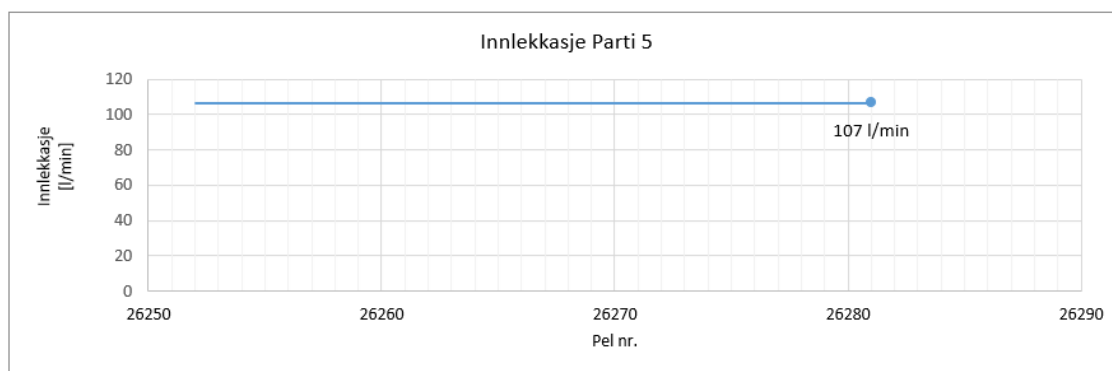
De fire første injeksjonsskjermene er plassert tett med store overlapp og har et større forbruk av injeksjonsmasse pr. skjerm enn de tre siste skjermene. De fire skjermene med lavest pelnummer befinner seg i delen av partiet med lavest Q-verdi, med sprekkesett orientert NØ-SV og Ø-V. Kartlagte salver med $J_w = 0,66$ indikerer problemer med restlekkasje, som kan være en følge av utilstrekkelig injeksjon.

5.5 Parti 5: Pel nr. 26280-26256

5.5.1 Geologi

Sonderboring

Én sonderboring, med fire hull og hullengde 29 m, ble utført innenfor Parti 5 med innlekkasje på 107 l/min (Figur 5.9). Størst lekkasje måles i de to sonderhullene til venstre, der hull oppe til venstre registrerer 85 l/min og det måles 20 l/min i hull nede til venstre.



Figur 5.9: Innlekkasje i sonderboringen innenfor Parti 5. Pel nr. (start) for sonderboringen er markert med en prikk.

MWD

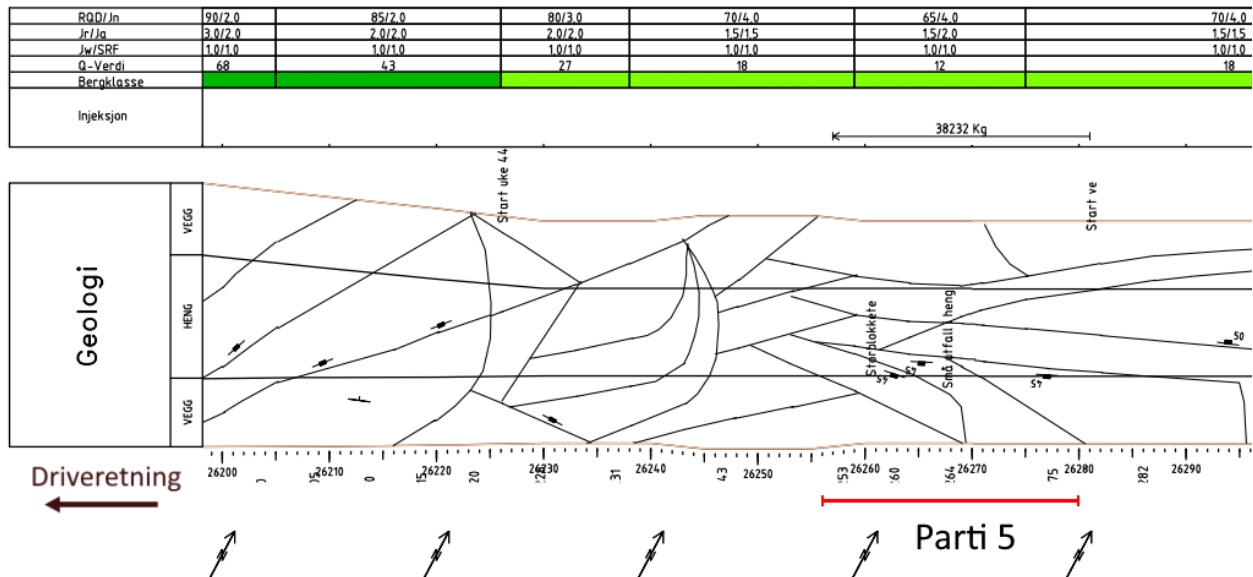
MWD for partiets borehull er tilgjengelig i Vedlegg C.5. Tolket oppsprekking er nesten fullstendig innenfor kategorien «lite oppsprukket», med noen få spredte punkter med oppsprukket bergmasse tolket for pel nr. 26265-26256.

Det tolkes stort sett «ikke vannforstyrrelse». Unntaket er tre linjer på venstresiden av tunnelstuppen med tolket «vannforstyrrelse» og «stor vannforstyrrelse», som ser ut til å følge starten av borehullene til hver salve.

Geologisk kartlegging på stoff

Kartlegging av tunnelpartiet vises i utbrett i Figur 5.10. Bergmassens kvalitet er kartlagt i tre salver, med $Q = 12$ og $Q = 18$, som kan regnes som «god» bergmasse. RQD-verdier er henholdsvis 65 og 70, og $J_n = 4$ langs partiets lengde, som vil si at det tolkes to sprekkesett. Bergarten i partiet beskrives som «varierende gneiser».

Diskontinuiteter i partiet er presentert i Vedlegg D.5. De tre målingene gjort av sprekker, i tillegg til linjene på utbrett, støtter et dominerende sprekkesett med orientering ØNØ-VSV.



Figur 5.10: Geologisk kartlegging av Parti 5, med injeksjonsskjerm under «Injeksjon». Tegnforklaring i Vedlegg A.

5.5.2 Injeksjon

Siden partiet er definert av én injeksjonsskjerm er hele lengden injisert. Det er brukt totalt 38 000 kg industrisement, som gir mengden 1583,3 kg/m over hele partiets lengde (det samme som skjermdybden på 24 m). I utbrett (Figur 5.10) var skjermen påtegnet med start på pel nr. 26281, men det går ut fra at sammendragsrapporten har rett, og dermed at pelnummer er 26280. I tillegg er mengden injeksjonsmasse på utbrettet registrert som 38 232 kg, et tall som ikke brukes for samme grunn.

Det brukes v/c-forhold på 0,9 og 0,7 for 47 129 l injeksjonsmasse, og 3845 l sement er tyktflytende med $v/c = 0,5$. Standardresepter for sement i Nordøyvegen beskrives i Tabell 3.2 (kapittel 3.3.5).

5.5.3 Oppsummering

Parti 5 består av fullstendig injisert bergmasse, definert av én injeksjonsskjerm med dybde 24 m. Bergmassens kvalitet er «god», med lav oppsprekking og to tolkede sprekkesett. De sporadiske borparametertolkningene av oppsprekking gjør det vanskelig å vurdere korrelasjoner. Det mest fremtredende sprekkesettet har strøk ØNØ-VSV. Innlekkasjen i partiets sonderboring er stor (107 l/min) og mesteparten av målt lekkasje kommer fra venstre i tunnelstuppen, noe som passer med MWD som tolker større vannforstyrrelser på venstre side av partiet.

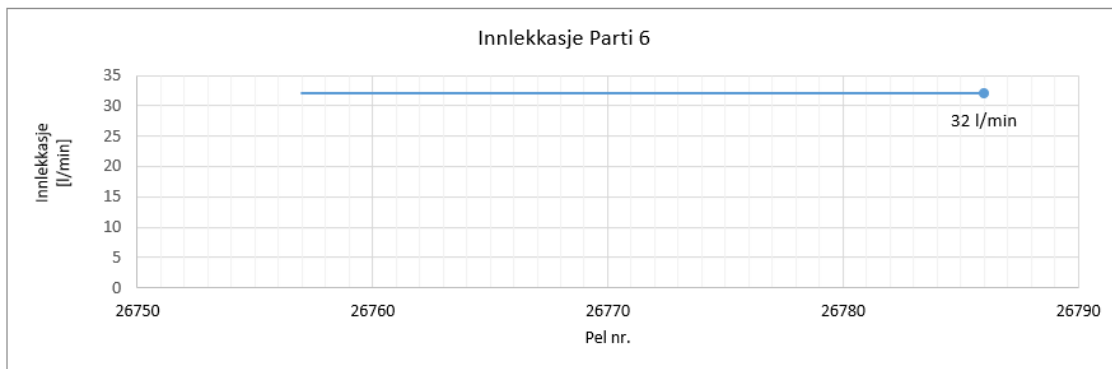
Mengden injeksjonsmasse som er brukt (38 000 kg) kan mulig være stor i forhold til høy Q-verdi og RQD i partiet, i lys av antakelsene som brukes for hypotesene undersøkt i kapittel 6.

5.6 Parti 6: Pel nr. 26790-26766

5.6.1 Geologi

Sonderboring

Én sonderboring, med fire hull og hullengde 29 m, ble utført innenfor Parti 6 og registrerer innlekkasje på 32 l/min (Figur 5.11). All lekkasje kommer fra sonderhullene på venstre side av tunnelstuffen, der det er målt 28 l/min oppe til venstre og 4 l/min nede til venstre.



Figur 5.11: Innlekkasje i sonderboringen innenfor Parti 6. Pel nr. (start) for sonderboringen er markert med en prikk.

MWD

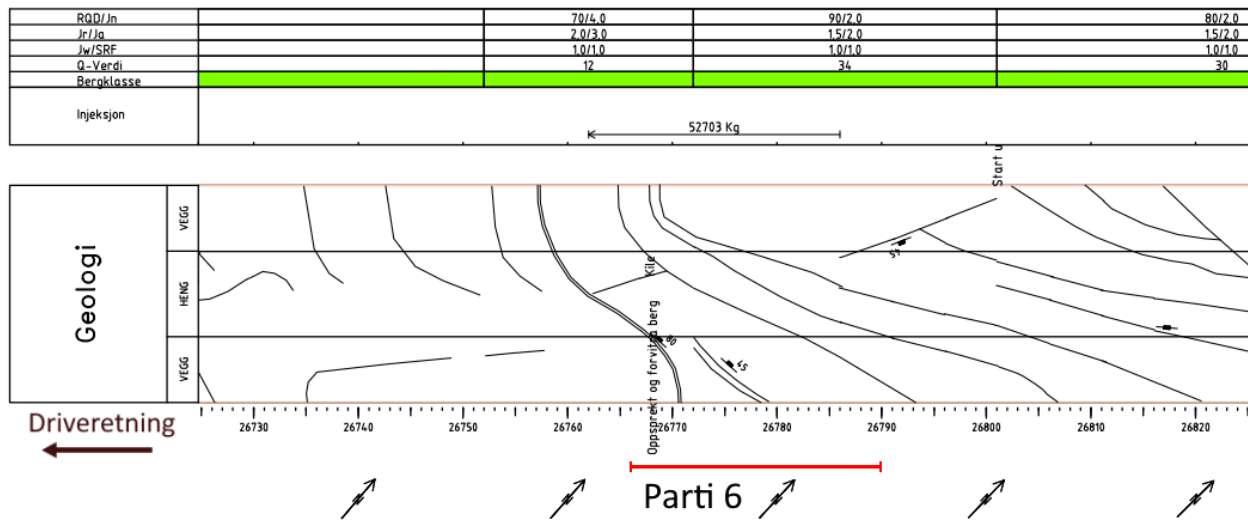
MWD for partiets borehull er tilgjengelig i Vedlegg C.6. Tolket oppsprekking er for det meste «lite oppsprukket», men små seksjoner med mer oppsprukket bergmasse tolkes på venstre side av pel nr. 26780-26775 og 26770-26766.

Ifølge MWD har mesteparten av partiet «ikke vannforstyrrelse». Unntaket er fem linjer på venstresiden av tunnelstuffen med tolket «vannforstyrrelse» og «stor vannforstyrrelse», som følger starten av borehullene til hver salve.

Geologisk kartlegging på stoff

Kartlegging av tunnelpartiet vises i utbrett i Figur 5.12. Partiet består av to kartlagte salver med «god» bergmasse, der den første har høyere bergmassekvalitet ($Q = 34$) enn den andre ($Q = 12$). Partiet har lav oppsprekking ($RQD = 70-90$), og det tolkes ett sprekkesett for den første salven til for den siste. Bergarten er betegnet som «varierende gneiser».

Diskontinuiteter i partiet er presentert i Vedlegg D.6. De to målingene av sprekker indikerer et sprekkesett orientert Ø-V, som basert på tegninger på utbrett ser ut til å være fremtredende.



Figur 5.12: Geologisk kartlegging av Parti 6, med injeksjonsskjerm under «Injeksjon». Tegnforklaring i Vedlegg A.

5.6.2 Injeksjon

Siden partiet er definert av én injeksjonsskjerm er hele lengden injisert. Det brukes 52 703 kg industrisement, som gir mengden 2196,0 kg/m over hele partiets lengde (det samme som skjermdybden på 24 m). I utbrett (Figur 5.12) har påtegnet skjerm start på pel nr. 26786, men det går ut fra at sammendragsrapporten har rett, og dermed at pelnummer er 26790.

Det brukes v/c-forhold på 0,9 og 0,7 for 13 852 l injeksjonsmasse, og v/c = 0,5 for 29 718 l sement. Standardresepter for sement i Nordøyvegen beskrives i Tabell 3.2 (kapittel 3.3.5).

5.6.3 Oppsummering

Parti 6 sine dimensjoner og plassering er definert av én injeksjonsskjerm med dybde 24 m. Bergmassekvaliteten er «god» med lite oppsprekking, og det er tolket ett og to sprekkesett i forskjellige deler av partiet. Økt tolket oppsprekking av MWD nærmere slutten av partiet kan henge sammen med den lavere verdien for RQD i partiets siste kartlagte salve. Partiets dominerende sprekkesett har strøk Ø-V. Innlekkasje i sonderboringen kommer fullstendig fra hull på venstre side, og «tolket vann» indikerer vannforstyrrelser i borehull venstre side av tunnelstuppen.

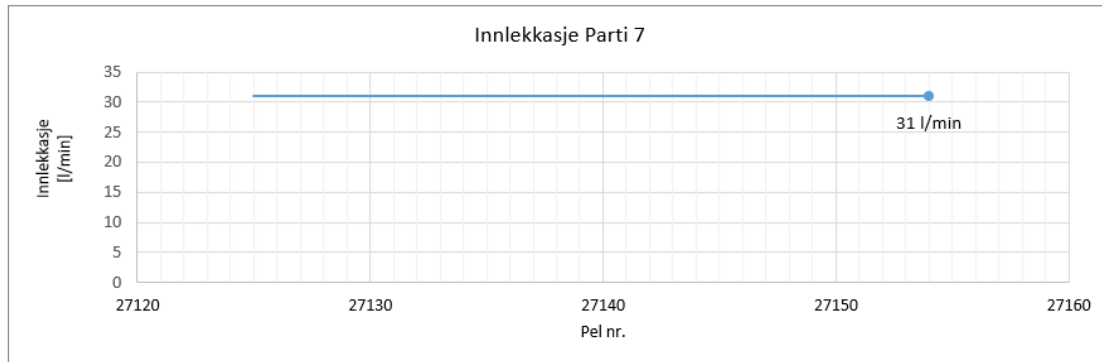
Det brukes en stor mengde injeksjonsmasse (52 703 kg), noe som ikke ville vært forventet i en skjerm med god bergmassekvalitet og høye RQD-verdier ifølge hypoteser som undersøkes i kapittel 6.

5.7 Parti 7: Pel nr. 27160-27139

5.7.1 Geologi

Sonderboring

Én sonderboring, med ett hull på 29 m, ble utført for Parti 7 og har innlekkasje på 31 l/min (Figur 5.13). Dette sonderhullet ble boret oppe til høyre i tunnelstuffen.



Figur 5.13: Innlekkasje i sonderboringen innenfor Parti 7. Pel nr. (start) for sonderboringen er markert med en prikk.

MWD

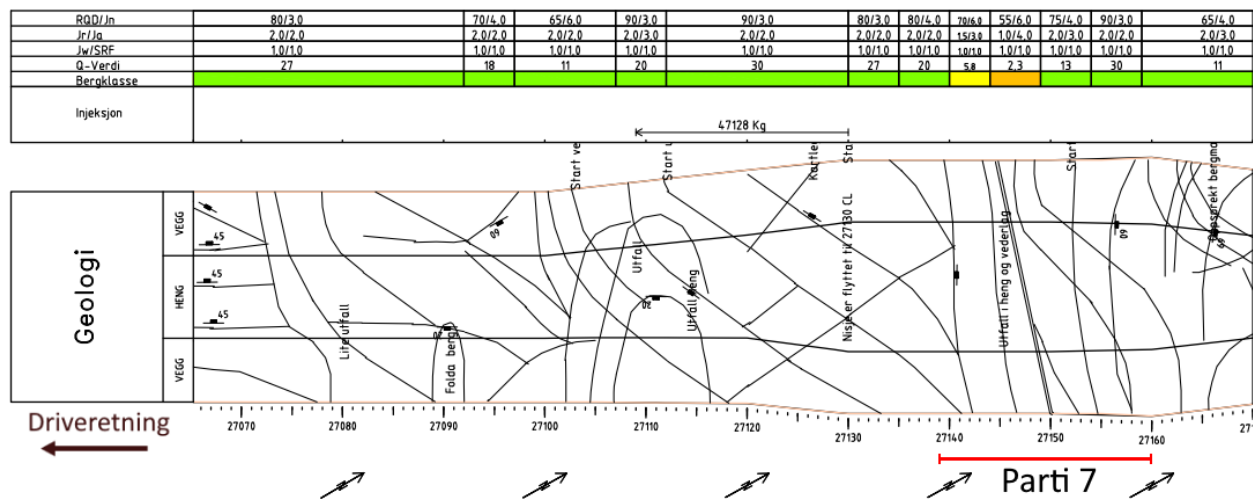
MWD for partiets borehull er tilgjengelig i Vedlegg C.7. Tolket oppsprekking viser «lite oppsprukket» bergmasse for mesteparten av partiet, med en større konsentrasjon av oppsprukket bergmasse tolket på høyresiden av tunnelstuffen ved pel nr. 27155-27145.

Det tolkes mest vannforstyrrelse på høyresiden av stuffen for pel nr. 27155-27145, og på venstre side ved pel nr. 27145-27140.

Geologisk kartlegging på stoff

Kartlegging av tunnelpartiet vises i utbrett i Figur 5.14. Delen av partiet med lavest bergmassekvalitet er pel nr. 27149-27140, der $Q = 2,3-5,8$. Delen skiller seg spesielt ut med lave verdier av forholdet J_r/J_a , moderat til høy oppsprekking ($RQD = 55-70$) og $J_n = 6$ som vil si to sprekkesett pluss tilfeldige sprekker. Resten av partiet har bergmasse med «god» kvalitet ($Q = 11-30$) med gjennomgående høye verdier for RQD. Partiets bergart beskrives kun som «varierende gneiser».

Diskontinuiteter i partiet er presentert i Vedlegg D.7. De to målingene gjort av sprekker, i tillegg til linjene på utbrett, indikerer et sprekkesett med strøk VNV-ØSØ.



Figur 5.14: Geologisk kartlegging av Parti 7, med injeksjonsskjerm under «Injeksjon». Tegnforklaring i Vedlegg A.

5.7.2 Injeksjon

Partiet er definert av én injeksjonsskjerm med dybde 21 m, og hele lengden er dermed injisert. Det er til sammen brukt 47 128 kg sement, som gir 1963,7 kg/m parti/skjerm. I utbrettet (Figur 5.14) var skjermen plassert med startpel på pel nr. 27130, men det antas at riktig informasjon ligger i sammendragsrapporten som sier pel nr. er 27160.

V/c-forhold 0,9 og 0,7 brukes for 13 255 l injeksjonsmasse, og 28 142,6 l sement er tyktflytende med $v/c = 0,5$. Standardresepter for sement i Nordøyvegen beskrives i Tabell 3.2 (kapittel 3.3.5).

5.7.3 Oppsummering

Parti 7 er fullstendig injisert, og er begrenset av én injeksjonsskjerm med dybde 21 m. Bergmassekvaliteten er «dårlig» til «middels» for pel nr. 27149-27140, sammenlignet med resten av partiet der bergmassen er av «god» kvalitet. Oppsprekking er større i de kartlagte salvene med større Q-verdi, og pelnummer med størst «tolket oppsprekking» overlapper delvis med disse salvene. Det tolkes et fremtredende sprekkesett med strøk VNV-ØSØ. Siden innlekkasje er målt i ett sonderhull er det ikke mulig å sammenligne med tolkningene av vannforstyrrelser delvis på høyre og venstre side av partiet.

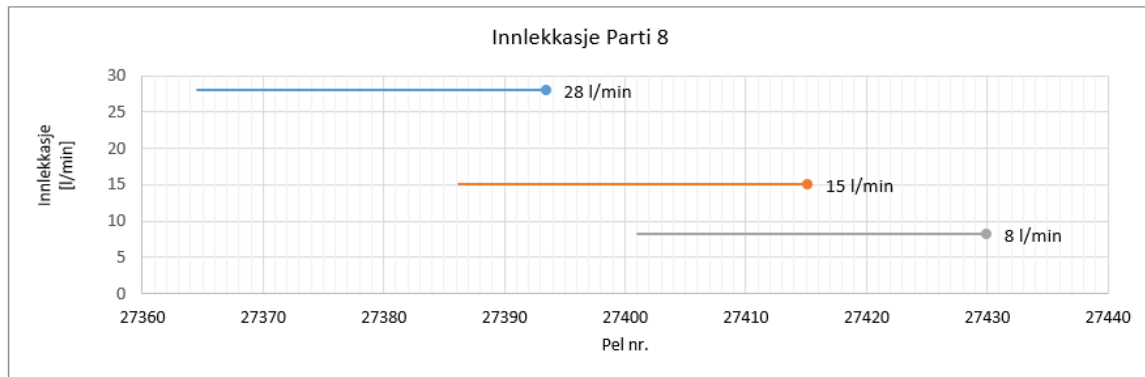
Det brukes en betydelig mengde injeksjonsmasse (47 128 kg), noe som ikke ville vært forventet i en skjerm der Q-verdien i snitt er høy ifølge hypoteser som undersøkes i kapittel 6.

5.8 Parti 8: Pel nr. 27438-27370

5.8.1 Geologi

Sonderboring

Tre sonderboringer, alle med fire hull på 29 m, ble utført innenfor Parti 8 med totale innlekkasjer fra 8 l/min til 28 l/min, og starten av partiet (høyere pelnummer) har lavere innlekkasje enn slutten av partiet (Figur 5.15). Rapporter for sonderboringene ved pel nr. 27415,2 og 27393,5 registrerer jevn innlekkasje på høyre og venstre side, med mer lekkasje i hull på bunnen. Innlekkasjen i hvert enkelt hull er ikke gitt for sonderboringen som starter ved pel nr. 27430.



Figur 5.15: Innlekkasje i sonderboringene innenfor Parti 8. Pel nr. (start) for sonderboringene er markert med en prikk.

MWD

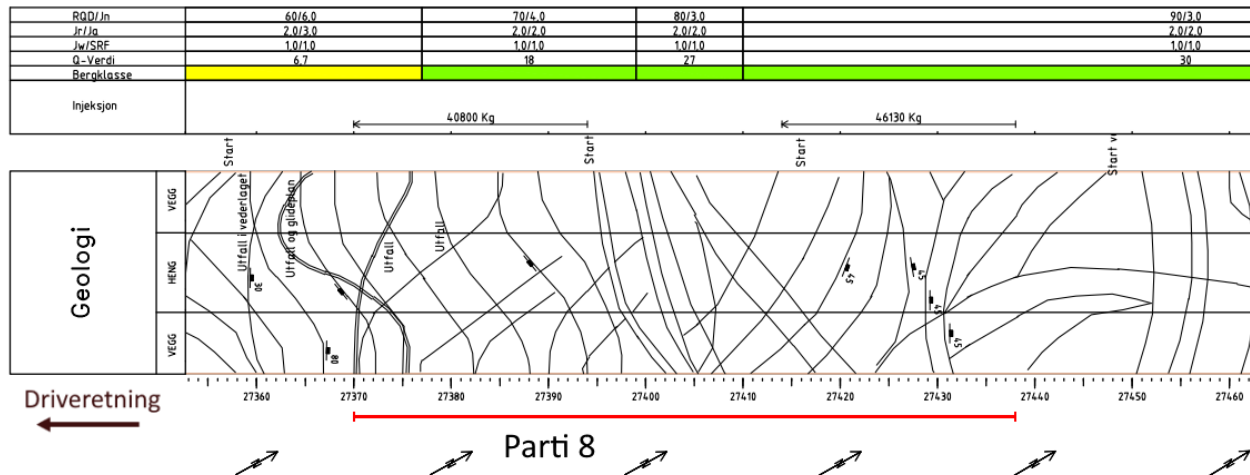
MWD for partiets borehull er tilgjengelig i Vedlegg C.8. Mesteparten av partiet er ifølge borparametertolkning «lite oppsprukket», med mer (men fortsatt spredt) tolket oppsprekking ved pel nr. 27420-27415, pel nr. 27405-27395 og venstresiden av tunnelen ved pel nr. 27380-27375.

Det er stort sett «ikke vannforstyrrelse» langs hele lengden av tunnelens venstreside. De største konsentrasjonene av tolket vann er på høyre side rundt pel nr. 27400 og 27390.

Geologisk kartlegging på stoff

Kartlegging av tunnelpartiet vises i utbrett i Figur 5.16. Starten av partiet, pel nr. 27438-27377, har «god» bergmassekvalitet ($Q = 18-30$) med RQD fra 70 til 90, og består hovedsakelig av lyse granittiske gneiser med noe eklogitt og amfibolittisk gneis. Resten av partiet har bergmasse av «middels» kvalitet ($Q = 6,7$) som skiller seg ut fra resten av partiet ved å ha større oppsprekking (RQD = 60) og mer omvandlede sprekkeflater med litt leir ($J_a = 3$). Bergarten der betegnes som «varierende gneiser». Fra partiets start til pel nr. 27399 er $J_n = 3$, og det tolkes dermed ett sprekkesett. Resten av partiet har $J_n = 4-6$, som vil si at to gjennomgående sprekkesett tolkes.

Diskontinuiteter i partiet er presentert i Vedlegg D.8. Fem sprekkemålinger viser at sprekkesett innenfor partiet har strøk NV-SØ og Ø-V. Ut fra plasseringen av målingene, i tillegg til linjene i utbrettet, kan det tolkes at strøk NV-SØ er mest fremtredende for pel nr. 27438-27415 og at sprekkesettet orientert Ø-V er dominerende ved pel nr. 27415-27370.



Figur 5.16: Geologisk kartlegging av Parti 8, med injeksjonsskjermer under «Injeksjon». Tegnforklaring i Vedlegg A.

5.8.2 Injeksjon

Partiet er injisert ved pel nr. 27438-27414 og 27394-27370 (70,6% av partiet). Til sammen er det brukt 85930,8 kg industrisement, altså 371,1 kg/m parti. De to injeksjonsskjermene har dybde 24 m, og det brukes dermed 1811,1 kg/m skjermdybde. Det er ikke overlapp mellom skjermene.

Det brukes et v/c-forhold på 0,9 og 0,7 for 43880,1 l injeksjonsmasse, og tyktflytende sement med $v/c = 0,5$ er brukt for 33973,1 l. Standardresepter for sement i Nordøyvegen beskrives i Tabell 3.2 (kapittel 3.3.5).

5.8.3 Oppsummering

Parti 8 er injisert i partiets start og slutt, med en injeksjonsskjerm på hver side av partiet. Fra starten av partiet til pel nr. 27377 har bergmassen «god» kvalitet, og bergmassen videre i partiet har lavere RQD og større Ja. Frem til pel nr. 27415 domineres partiet av et sprekkesett med strøk NV-SØ, og etter dette pelnummeret er flere sprekker orientert Ø-V. Det ser ikke ut til å være store korrelasjoner mellom kartlagt RQD og stedene der MWD tolker mer oppsprekking. Det er heller ikke overenstemmelse i målinger av sonderhull med like mengder innlekkasje på høyre og venstre side, og MWD som nesten eksklusivt tolker vannforstyrrelse på venstre side av tunnelen.

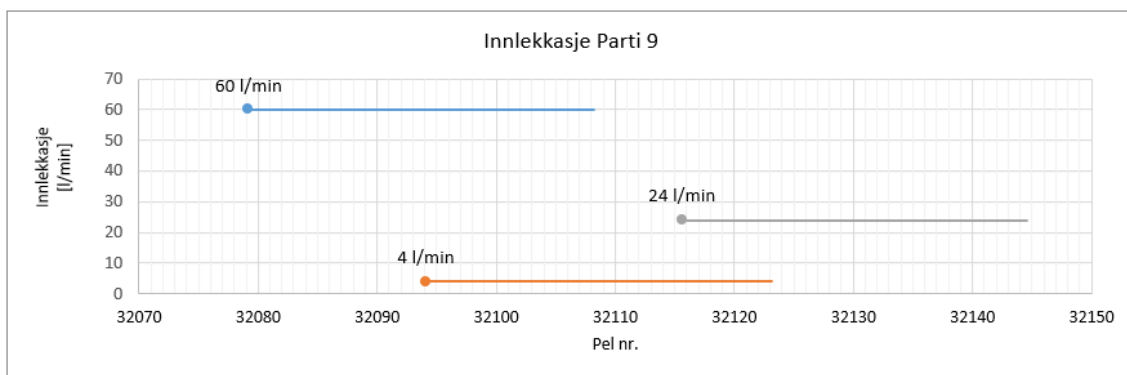
Mengdene injeksjonsmasse som brukes i de to skjermene ser ikke ut til å korrelere godt med noen av dataene som er diskutert. Om det kan tolkes en viss forskjell brukes det noe mer injeksjonsmasse i skjermen der Q-verdi og RQD er høyere, noe som går mot antakelsene i hypoteser som undersøkes i kapittel 6, og dominerende sprekkesett har strøk NV-SØ.

5.9 Parti 9: Pel nr. 32079-32139

5.9.1 Geologi

Sonderboring

Tre sonderboringer, alle med fire hull på 29 m, ble utført innenfor Parti 9 med totale innlekkasjer fra 4 l/min til 60 l/min (Figur 5.17). Sonderboringene på starten og slutten av partiet har betydelig større innlekkasje enn ved pel nr. 32094,1. Rapporter for sonderboringene indikerer at det ikke er store forskjeller i mengder lekkasje fra ulike hullplasseringer i stoffen.



Figur 5.17: Innlekkasje i sonderboringene innenfor Parti 9. Pel nr. (start) for sonderboringene er markert med en prikk.

MWD

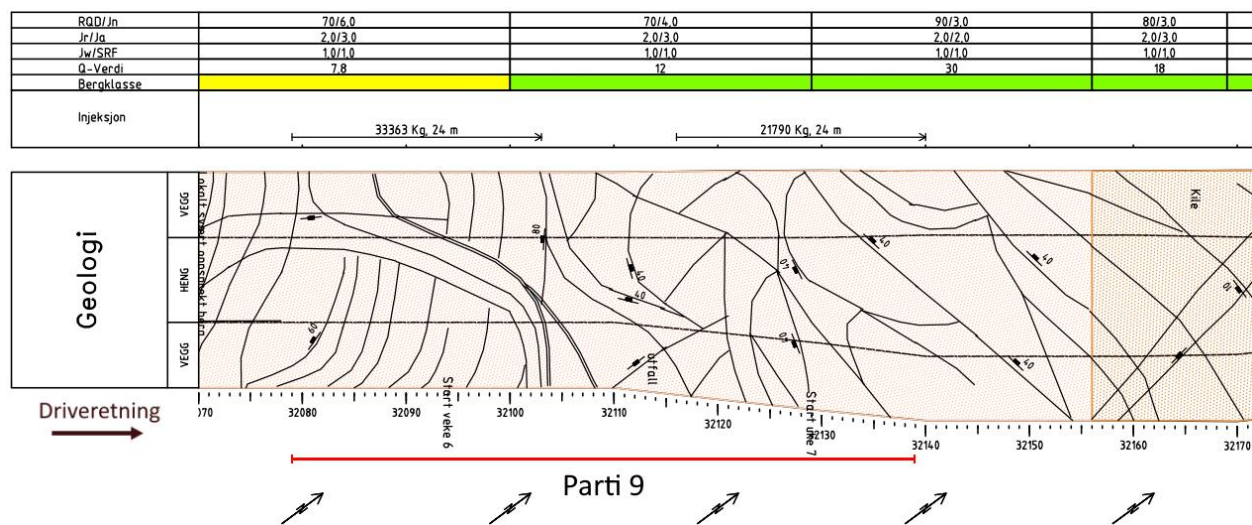
MWD for partiets borehull er tilgjengelig i Vedlegg C.9. For pel nr. 32079-32095 ser det ut til å være et diagonalt plan med økt oppsprekking, og det er en høyere konsentrasjon av mer tolket oppsprekking mellom pel nr. 32120 og 32135.

Tolket vann er størst ved pel nr. 32080-32085 på venstresiden av tunnelen, 32095-32105 til høyre og ved pel nr. 32120-32125.

Geologisk kartlegging på stuff

Kartlegging av tunnelpartiet vises i utbrett i Figur 5.18. Den første delen av partiet (pel nr. 32079-32100) har bergmasse med $Q = 7,8$ og $RQD = 70$. Resten av partiet har bergmasse av «god» kvalitet ($Q = 12-30$) og forholdsvis lav oppsprekking ($RQD = 70-90$). Fra partiets start til pel nr. 32129 er $J_n = 4-6$, som vil si at det tolkes to fremtredende sprekkesett. I resten av partiet tolkes ett sprekkesett ettersom $J_n = 3$. Hele partiets bergart er amfibolitt.

Diskontinuiteter i partiet er presentert i Vedlegg D.9 (målinger utenfor injeksjonsskjermer markert i lys grå). Ni sprekkemålinger og tegninger på utbrett indikerer at fremtredende sprekkesett innenfor partiet først har strøk NV-SØ, og mot slutten av partiet har strøk VNV-ØSØ.



Figur 5.18: Geologisk kartlegging av Parti 9, med injeksjonsskjermer under «Injeksjon». Tegnforklaring i Vedlegg A.

5.9.2 Injeksjon

Partiet er injisert ved pel nr. 32079-32103 og 32115-32139 (80% av partiet). Det er til sammen brukt 55 153 kg industrisement, altså 919,2 kg/m over hele partiets lengde. Siden partiet har to injeksjonsskjermer med dybde 24 m, er det brukt 1 149,0 kg/m skjerm. Det er ikke overlapp mellom skjermene. Partiets siste injeksjonsskjerm er tegnet på utbrett med pelnummer 32116, men informasjon fra sammendragsrapport brukes (pel nr. 32115).

Det brukes v/c-forhold på 0,9 og 0,7 for 36 907,5 l injeksjonsmasse, og mer tyktflytende sement med v/c = 0,5 er brukt for 15 444,8 l. Standardresepter for sement i Nordøyvegen beskrives i Tabell 3.2 (kapittel 3.3.5).

5.9.3 Oppsummering

Parti 9 er definert ut fra to injeksjonsskjermer i start og slutt, og det er dermed injisert på hver side av partiet. Bergmassens kvalitet er lavest fram til pel nr. 32100 med lavere Q-verdi og RQD enn resten av partiet. Først i partiet har det dominerende sprekkesettet strøk NV-SØ, og mot slutten av partiet er flere sprekker orientert i retning VNV-ØSØ. MWD tolker et plan med større oppsprekking innenfor delen av partiet med lavest bergmassekvalitet og lavest RQD, men det tolkes også økt oppsprekking i deler av bergmassen som skal ha høyere kvalitet. Det måles mest innlekkasje på starten og slutten av partiet, med lite innlekkasje i sonderboringen midt i partiet. På grunn av overlapp mellom de tre sonderboringene er det vanskelig å trekke paralleller mellom lekkasjemålingene og tolket vann.

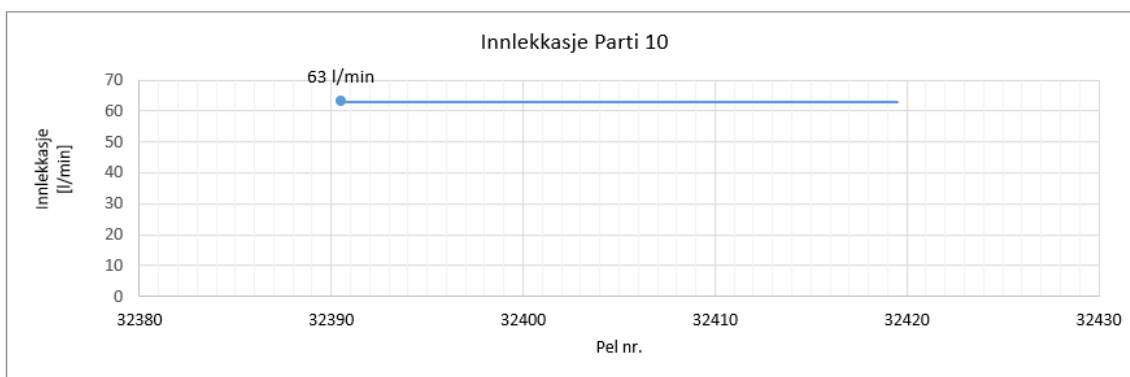
Det brukes relativt store mengder injeksjonsmasse i begge skjermene, noe som ikke forventes i bergmasse fra høyere «middels» til «god» bergmassekvalitet og høye RQD-verdier, ifølge hypoteser som undersøkes i kapittel 6. Det brukes fortsatt mer injeksjonsmasse i injeksjonsskjermen i den dårligste bergmassen med lavest Q-verdi og RQD der fremtredende sprekkesett har strøk NV-SØ (pel nr. 32079), sammenlignet med skjermen ved pel nr. 32115 der sprekkesett Ø-V ser ut til å dominere.

5.10 Parti 10: Pel nr. 32396-32420

5.10.1 Geologi

Sonderboring

Én sonderboring, med fem hull på 29 m, ble utført innenfor Parti 10 med en total innlekkasje på 63 l/min (Figur 5.19). Det måles kun lekkasje i to sonderhull på øvre side av stoffen, der det måles 60 l/min i hull oppe til venstre og 3 l/min i hull oppe til høyre.



Figur 5.19: Innlekkasje i sonderboringen innenfor Parti 10. Pel nr. (start) for sonderboringen er markert med en prikk.

MWD

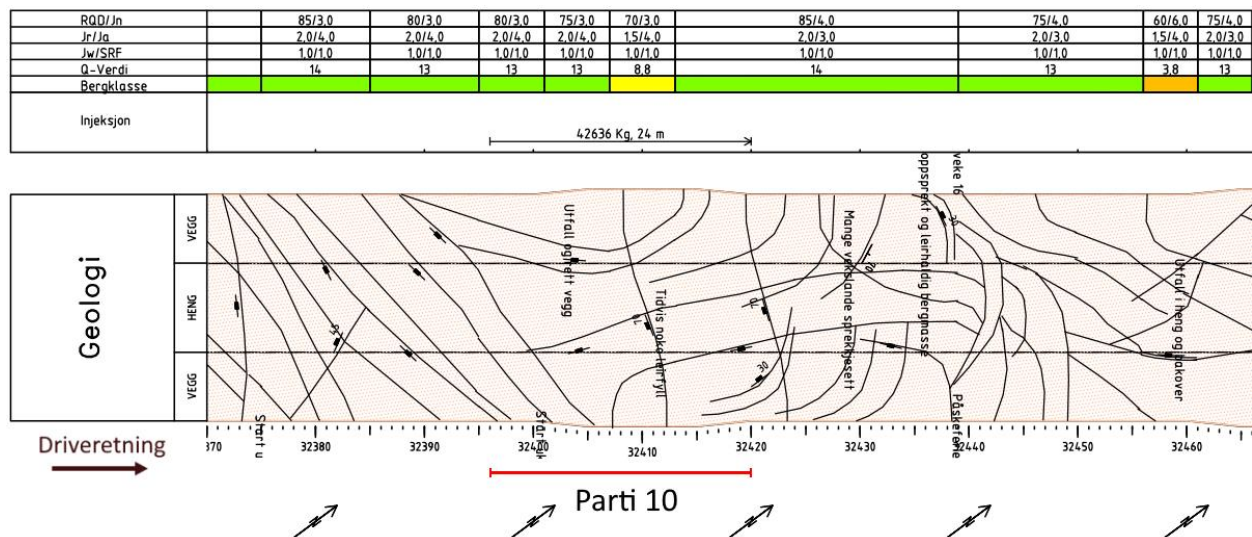
MWD for partiets borehull er tilgjengelig i Vedlegg C.10. Det tolkes mest oppsprekking ved pel nr. 32400-32410, med en økt konsentrasjon av «noe» til «meget» oppsprukket bergmasse.

Det tolkes «ikke vannforstyrrelse» for nesten hele partiet. Korte seksjoner av tolket vannforstyrrelse i borehull er spredt langs hele partilengden.

Geologisk kartlegging på stuff

Kartlegging av tunnelpartiet vises i utbrett i Figur 5.20. Bergmassens kvalitet er lavest for pel nr. 32407-32413, der $Q = 8,8$, $RQD = 70$ og $J_r = 1,5$. Før og etter denne kartlagte salven kan bergmassen regnes som «god» ettersom Q -verdi enten er 13 eller 14, med høyere RQD og J_r . Siden $J_n = 3$ fra starten av partiet til pel nr. 32413, tolkes det ett sprekkesett pluss tilfeldige sprekker, og for resten av partiet er det tolket to sprekkesett ($J_n = 4$). Bergarten i partiet beskrives som «varierende gneiser».

Diskontinuiteter i partiet er presentert i Vedlegg D.10. De fire sprekkemålingene innenfor partiet tolket sammen med linjene i utbrettet, peker på at de to sprekkesettene i partiet har strøk Ø-V og NNØ-SSV.



Figur 5.20: Geologisk kartlegging av Parti 10, med injeksjonsskjerm under «Injeksjon». Tegnforklaring i Vedlegg A.

5.10.2 Injeksjon

Partiet er begrenset av én injeksjonsskjerm, som vil si at hele partiet er injisert. Totalt forbruk av injeksjonsmasse er 42 636 kg industrisement, altså 1776,5 kg/m over hele partiets lengde/skjermdybden.

Det brukes v/c-forhold på 0,9 og 0,7 for 22 261,9 l injeksjonsmasse, og 17 286,4 l sement er tyktflytende med $v/c = 0,5$. Standardresepter for sement i Nordøyvegen beskrives i Tabell 3.2 (kapittel 3.3.5).

5.10.3 Oppsummering

Parti 10 er fullstendig injisert, og er begrenset av én injeksjonsskjerm med dybde 24 m. Bergmassens kvalitet er «god» i mesteparten av partiet, med en reduksjon i Q-verdi i en kartlagt salve i midten der RQD og J_r er redusert. Sprekkesett med strøk Ø-V og NNØ-SSV er til stede i partiet. Det er delvis overlapp mellom seksjonen med lavest RQD og der det er tolket mest oppsprekking med MWD. Mest innlekkasje kommer fra borehull oppe til venstre for tunnelstuppen, men borparametertolkning av vannforstyrrelse indikerer ikke mer vann i spesifikke deler av partiet.

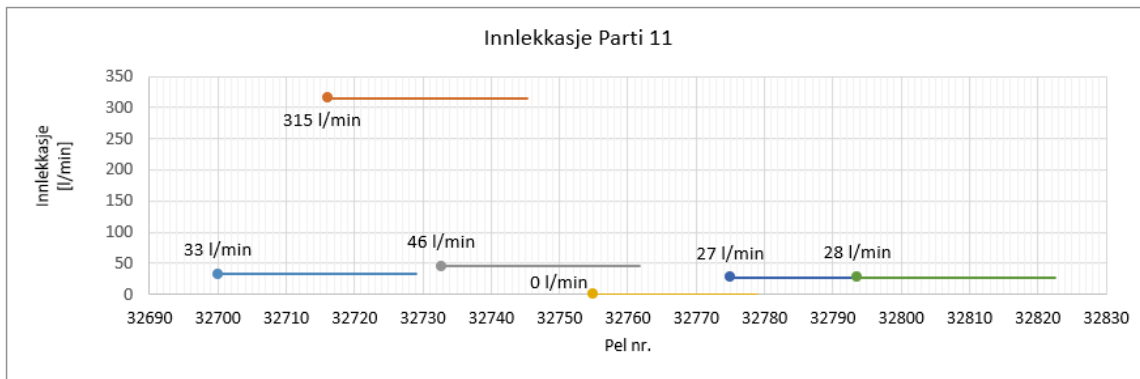
Det brukes en betydelig mengde injeksjonsmasse (42 636 kg) i bergmasse som for det meste er av «god» kvalitet og lav oppsprekking, noe som ser ut til å peke i motsatt retning av hypotesene som undersøkes i kapittel 6.

5.11 Parti 11: Pel nr. 32700-32817

5.11.1 Geologi

Sonderboring

Seks sonderboringer med fire hull, fem boringer på 29 m og én boring på 24 m, ble utført innenfor Parti 11 med totale innlekkasjer fra 0 l/min til 315 l/min (Figur 5.21). De to sonderboringene med lavest og høyest innlekkasje skiller seg ut fra resten, der lekkasje ligger mellom 27 l/min og 46 l/min. De fleste rapportene for sonderboring har ikke informasjon om hvilke hull som har mest innlekkasje.



Figur 5.21: Innlekkasje i sonderboringene innenfor Parti 11. Pel nr. (start) for sonderboringene er markert med en prikk.

MWD

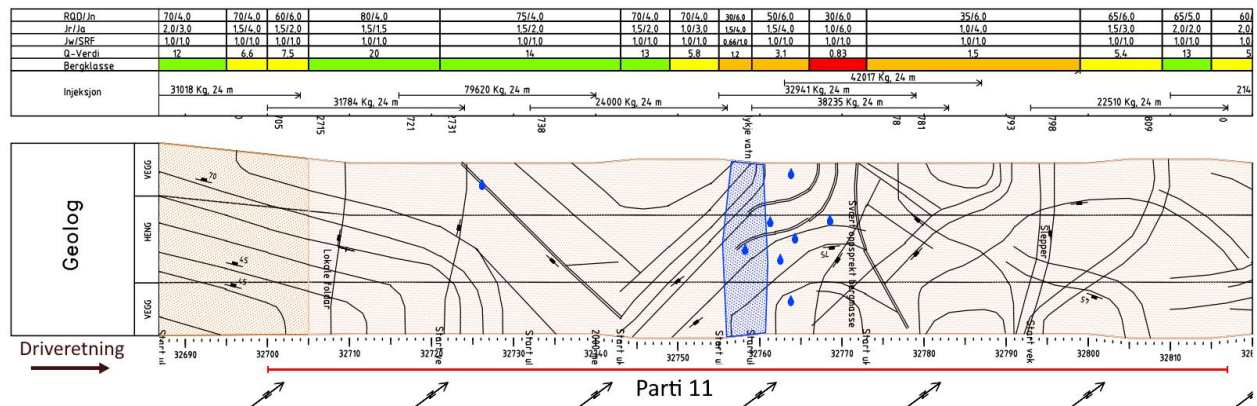
MWD for partiets borehull er tilgjengelig i Vedlegg C.11. Tolket oppsprekking er større for pel nr. 32746-32780, der mest «meget oppsprukket» bergmasse tolket for pel nr. 32760-32770. I delene av partiet med stor oppsprekking ser det ut til å være mest oppsprukket på venstre side.

Det tolkes mest vann for pel nr. 32745-32765, siden det er en større konsentrasjon av «vannforstyrrelse» og «store vannforstyrrelser». Innenfor denne delen av partiet er det mest tolket vann rundt pel nr. 32755.

Geologisk kartlegging på stoff

Kartlegging av tunnelpartiet vises i utbrett i Figur 5.22. Den kartlagte salven med lavest bergmassekvalitet ved pel nr. 32766-32773 har $Q = 0,83$, $RQD = 30$ og $J_a = 6$ (som kan tyde på større leirinnhold). På hver side av den dårligste bergmassen, ved pel nr. 32755-32766 og pel nr. 32773-32799, har bergmasse litt høyere kvalitet ($Q = 1,2-3,1$) med i snitt noe høyere RQD og $J_a = 4$. Resten av partiet består av bergmasse med «middels» til «god» kvalitet ($Q = 5,0-20$) og forholdsvis lite oppsprekking ($RQD = 60-80$). Det er tolket to dominerende sprekkesett for hver kartlagt salve innenfor partiet ettersom $J_n = 4-6$. Det er kartlagt et intervall av mye restlekkasje ved pel nr. 32756-32760, og punktlekkasjer registreres i stor grad for pel nr. 32758-32769 og for pel nr. 32726. I tillegg er $J_w = 0,66$ ved pel nr. 32766-32773 og pel nr. 32755-32759. Bergartene i hele partiet beskrives kun som «varierende gneiser».

Diskontinuiteter i partiet er presentert i Vedlegg D.11. Tolv målinger av sprekker og én måling av foliasjon, samt linjer på utbrettet, viser at to fremtredende sprekkesett fra starten av partiet til omtrent pel nr. 32730 er orientert NV-SØ og NØ-SV. Etter dette pelnummeret blir sprekkesett med strøk N-S og Ø-V mer dominante.



Figur 5.22: Geologisk kartlegging av Parti 11, med injeksjonsskjermer under «Injeksjon». Tegnforklaring i Vedlegg A.

5.11.2 Injeksjon

Partiet er fullstendig injisert med 296 056 kg industrisement, tilsvarende 2530,4 kg/m over hele partiets lengde. De åtte injeksjonsskjermene innenfor partiet dybder på 24 m, som vil si at det brukes 1542,0 kg/m skjermdybde. De fleste skjermene har overlapp mellom hverandre på 8 m, men rundt pel nr. 32755-32783 starter flere skjermene ved nære pelnummer og det er dermed mye større overlapp. Det brukes en stor mengde injeksjonsmasse i skjermen ved pel nr. 32715 (70 620 kg). Utbrettet viser at det er medgått 38 235 kg i skjerm for pel nr. 32759, men det antas at den riktige mengden er 41 833 kg, som er gitt i injeksjonsrapporten.

Resepeter med $v/c = 0,9$ og $v/c = 0,7$ brukes for 171 821,6 l injeksjonsmasse, og 119 370,8 l sement har $v/c = 0,5$. Standardresepter for sement i Nordøyvegen beskrives i Tabell 3.2 (kapittel 3.3.5).

5.11.3 Oppsummering

Parti 11 er fullstendig injisert og inneholder åtte injeksjonsskjermene. Bergmassens kvalitet er verst ved pel nr. 32755-32799 (i stor grad grunnet lav RQD og høy J_a), spesielt pel nr. 32766-32773 der Q-verdi er lavest. Resten av partiet har bergmasse av «middels» til «god» kvalitet. Det tolkes to dominante sprekkesett for hver salve i partiet, der den første delen av partiet har sprekkesett med strøk NV-SØ og NØ-SV og sprekkesett med strøk N-S og Ø-V blir mer fremtredende mot slutten av partiet. MWD-tolkninger av de mest oppsprukkede delene av partiet overlapper delvis med salver med lavest kartlagt RQD. Det tolkes mest vannforstyrrelse med MWD i den samme delen av partiet der det er kartlagt store mengder restlekkasje, men sonderboringene ved disse pelnumrene måler liten til ingen lekkasje. Et kartlagt sleppe orientert Ø-V har hatt betydelig restlekkasje ved pel nr. 32726, som ligger innenfor sonderboringen med størst innlekkasje (315 l/min).

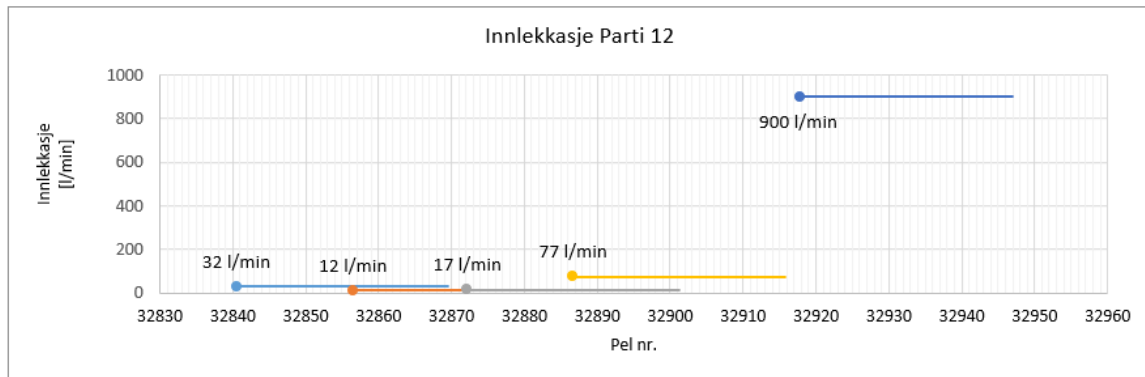
Sonderboringen med størst lekkasje har et stort overlapp med injeksjonsskjermen som har størst masseforbruk (pel nr. 32715-32739). Det brukes store mengder injeksjonsmasse fra starten av partiet til pel nr. 32749 i bergmasse med god kvalitet og lav oppsprekking, noe som motstrider hypoteser som undersøkes i kapittel 6. Delen av partiet med flere skjermene som står tett opp mot hverandre (pel nr. 32755-32783) er fullstendig innenfor den dårligste kartlagte bergmassen i partiet, med sprekkesett orientert N-S og Ø-V. De kartlagte salvene med $J_w = 0,66$ kan være indikasjoner på det ikke var gjort tilstrekkelig injeksjonsarbeid.

5.12 Parti 12: Pel nr. 32840-32944

5.12.1 Geologi

Sonderboring

Fem sonderboringer med dybde 29 m ble utført, to med to hull og tre med fire hull. Totale innlekkasjer rangerer fra 17 l/min til 900 l/min (Figur 5.23). Sonderboringen med målt lekkasje på 900 l/min skiller seg ut fra resten av målingene, der den nest største innlekkasjen er 77 l/min. Alle unntatt én skjerm har ikke informasjon om fordelingen av lekkasje i de forskjellige hullene, så det er ikke mulig å vurdere på hvilken side av tunnelen det er mest innlekkasje.



Figur 5.23: Innlekkasje i sonderboringene innenfor Parti 12. Pel nr. (start) for sonderboringene er markert med en prikk.

MWD

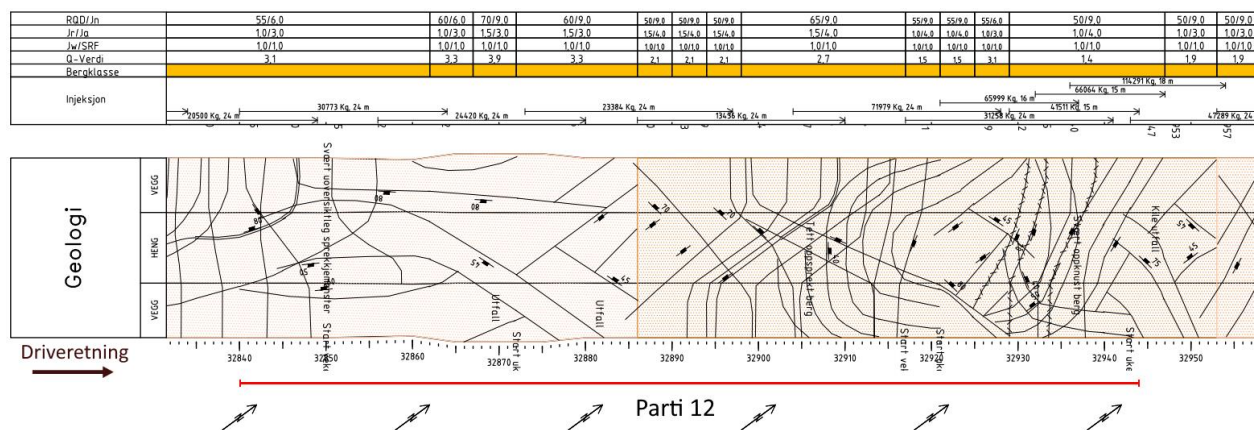
MWD for partiets borehull er tilgjengelig i Vedlegg C.12. Store deler av partiet har lite tolket oppsprekking, men større konsentrasjoner av «meget oppsprukket» bergmasse kan observeres ved pel nr. 32885-32895 og pel nr. 32930-32944.

Det tolkes mest vannforstyrrelse for pel nr. 32915-32944, og det er en relativt høy konsentrasjon av tolket vann ved pel nr. 32885-32895.

Geologisk kartlegging på stoff

Kartlegging av tunnelpartiet vises i utbrett i Figur 5.24. Hele partiet består av «dårlig» bergmasse med $Q = 1,4-3,9$, og kan deles opp i fire deler fra start til slutt. Fra starten av partiet fram til pel nr. 32886 er bergarten «varierende gneiser» og bergmassekvaliteten er forholdsvis høy sammenlignet med resten av partiet ($Q = 3,1-3,9$), $RQD = 55-70$ og $J_a = 3$ som vil si sprekkebelegg kan være siltig med litt leir. Resten av partiet består av en blanding av grønnstein, amfibolitt og gneis. Ved pel nr. 32886-32898 har bergmassen relativt stor oppsprekking ($RQD = 50$) og $J_a = 4$ som kan bety at sprekker inneholder oppbløtelig leirbelegg. Den neste delen av partiet består av en enkelt kartlagt salve (pel nr. 32898-32917) med $Q = 2,7$, $RQD = 65$ og $J_a = 4$. Ved pel nr. 32917-32944 er Q -verdi mellom 1,4 og 3,1, med gjennomgående høy oppsprekking ($RQD = 50-55$) og $J_a = 3-4$. For mesteparten av partiet er $J_n = 9$, og det tolkes dermed tre sprekkesett. Delene av partiet med $J_n = 6$, der det tolkes to sprekkesett pluss tilfeldige sprekker er som følger: pel nr. 32840-32867 og pel nr. 32925-32929.

Diskontinuiteter i partiet er presentert i Vedlegg D.12. 28 målinger av sprekker, i tillegg til linjer på utbrettet, indikerer sprekkesett med strøk NØ-SV og N-S fram til pel nr. 32886, og at resten av partiet domineres av sprekkesett orientert N-S og Ø-V, med større andel sprekker orientert NNV-SSØ mot slutten av partiet.



Figur 5.24: Geologisk kartlegging av Parti 12, med injeksjonsskjermer under «Injeksjon». Tegnforklaring i Vedlegg A.

5.12.2 Injeksjon

Hele partiet er injisert med 302 760 kg, altså 2911,2 kg/m over hele partiets lengde. Det har vært injisert i åtte skjermmer, seks med dybde 24 m og to med dybdene 16 m og 15 m. Følgelig blir masseforbruket 1730,1 kg/m skjermdybde. Overlapp mellom injeksjonsskjermene er på 7-8 m fram til pel nr. 32917, der det blir stort overlapp mellom nærliggende skjermmer, mange med stort forbruk av injeksjonsmasse.

Tyntflytende resepter med $v/c = 0,9$ og $v/c = 0,7$ representerer 363 434 l sement, og 37 537 l er sement med $v/c = 0,5$. Volum injeksjonsmasse for alle skjermene i dette partiet er automatisk avrundet, som reflekteres i disse tallene. Standardresepter for sement i Nordøyvegen beskrives i Tabell 3.2 (kapittel 3.3.5).

5.12.3 Oppsummering

Parti 12 er fullstendig injisert og inneholder åtte injeksjonsskjermmer. Hele partiets bergmasse er av «dårlig» kvalitet. Delene av partiet der bergmasse har lavest Q-verdier, RQD = 50-55 og relativt høy J_a er pel nr. 32886-32898 og pel nr. 32917-32944. For mesteparten av partiet kartlegges det tre sprekkeseett, med unntak i noen salver der det tolkes to sprekkeseett pluss tilfeldige sprekker. Sprekkeseett med strøk NØ-SV og N-S ser ut til å være dominante ved starten av partiet, sprekker med strøk N-S og Ø-V er fremtredende videre i partiet og flere sprekker orientert NNV-SSØ observeres på slutten av partiet. Borparametertolkninger av oppsprekking indikerer at det er størst oppsprekking i de to nevnte seksjonene der RQD-verdier er lavest. MWD for tolket vann tolker at slutten av partiet, der sonderboringen med størst innlekkasje (900 l/min) ble utført, har størst vannforstyrrelse. Bergartsgrensen mellom gneis og «grønnstein, amfibolitt og gneis» ser ut til å dele opp partiet, der de første pelnumrene (gneis) i snitt har høyere RQD og lavere J_a enn resten av partiet.

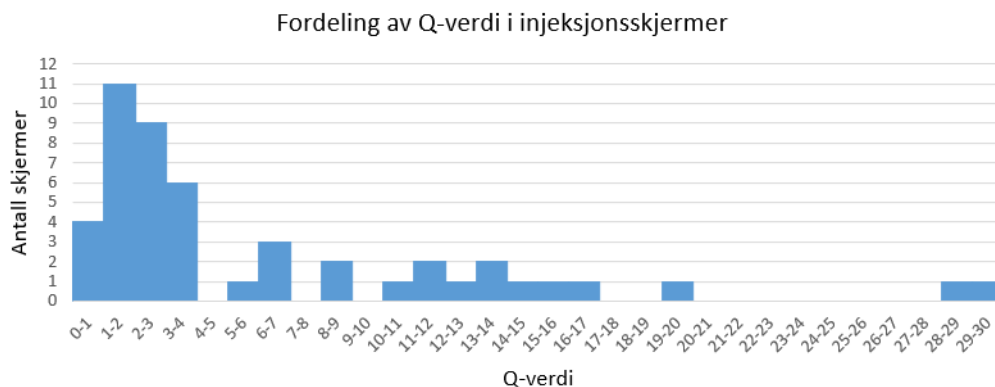
Sonderboringen med størst innlekkasje er i samme del av partiet som de overlappende injeksjonsskjermene på slutten av partiet, der det er brukt mye injeksjonsmasse på noen få pelnummer. I tillegg er disse skjermene plassert i bergmasse med de laveste RQD-verdiene i partiet og sprekkeseett med strøk N-S, Ø-V og NNV-SSØ.

6 Analyse av injeksjonsskjermer

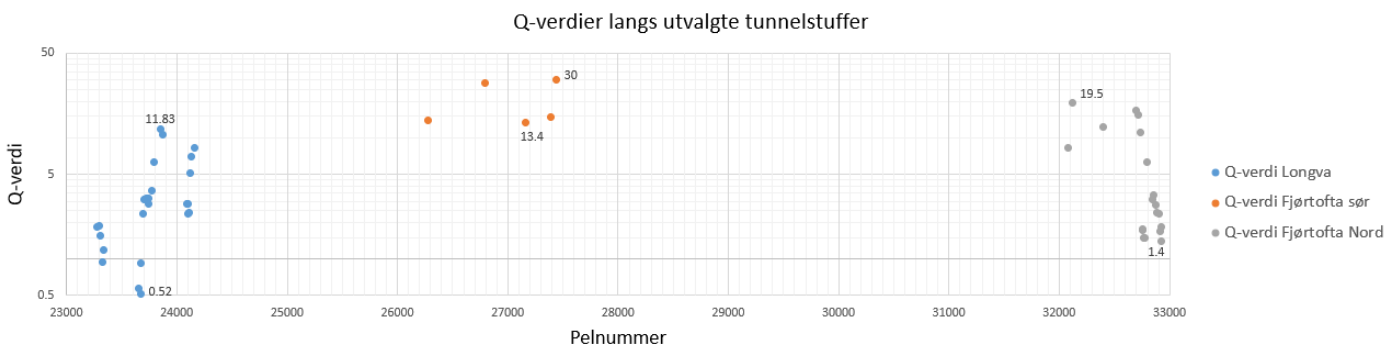
6.1 Geologiske forhold i injeksjonsskjermer

Geologiske data brukt i kvantitativ analyse

De geologiske parameterne som brukes i analysene er gitt for 48 injeksjonsskjermer i Vedlegg E, der Q-verdiene og Q-parameterne innenfor skjermene ligger i Vedlegg E.2. Ut fra data i vedlegget viser det seg at Q-verdiene rangerer fra 0,52 til 30, der fordelingen av verdiene er uttrykt med et histogram i Figur 6.1. Figur 6.2 viser plasseringen av skjermene og Q-verdien for hver skjerm. Det kan observeres at verdier i Fjørtofta sør stoff er jevnt sett større enn for de andre to tunnelstoffene og at det finnes flere seksjoner med Q-verdier mindre enn 5 innenfor Longva og Fjørtofta nord stoff. Q-verdi øker fra pel nr. 23677 til pel nr. 23852 (0,9 til 11,8) og for pel nr. 24091-24157 (2,4 til 8,4), og en reduksjon observeres for pel nr. 32700-32775 (16,7 til 1.5).



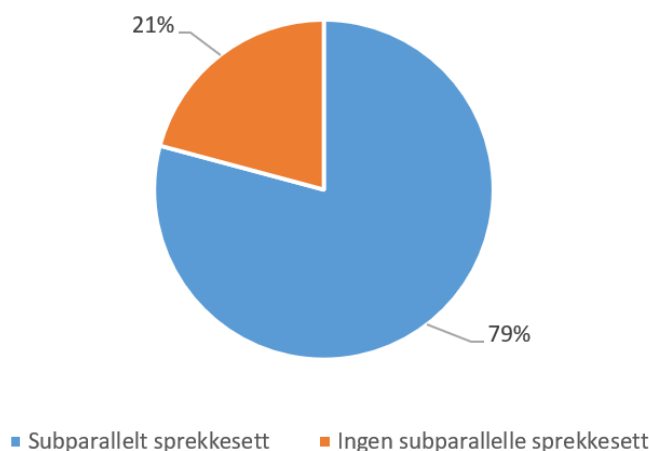
Figur 6.1: Histogram av Q-verdier for alle undersøkte injeksjonsskjermer.



Figur 6.2: Q-verdier i injeksjonsskjermer plottet for hvert pelnummer (start). Største og minste verdier for hver skjerm er markert. Y-akse er logaritmisk.

Data for sprekkeseett innenfor hver skjerm ligger i Vedlegg E.3, delt inn i sprekkeseett som er subparallele ($\pm 30^\circ$) med fire forskjellige strøk: N-S ($0-180^\circ$), NØ/SV ($45-225^\circ$), Ø-V ($90-270^\circ$) og NV-SØ ($135-315^\circ$). I forhold til den antatte største hovedspenningen Ø-V har 38 injeksjonsskjermer sprekkeseett med subparallele strøk, og 10 skjermer har ikke subparallele sprekkeseett (Figur 6.3).

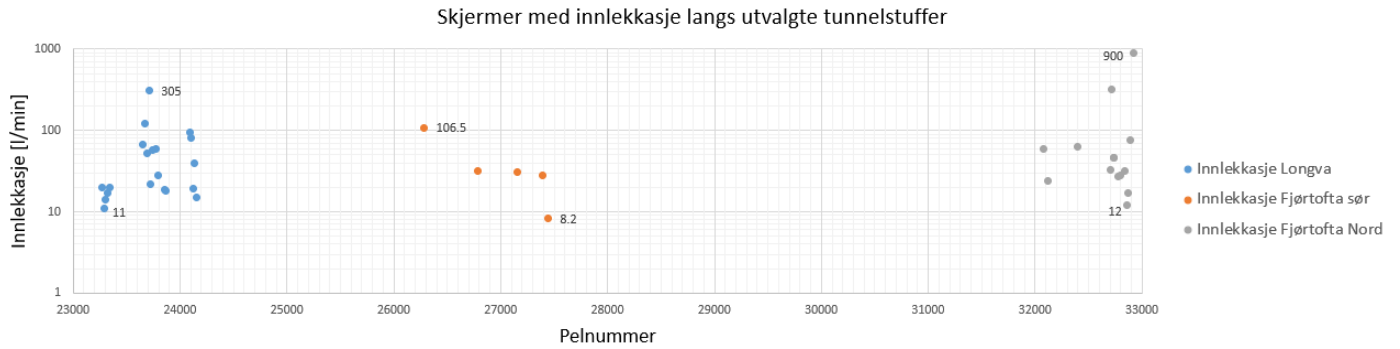
Sprekkeseett i injeksjonsskjermer



Figur 6.3: Andel injeksjonsskjermer med minst ett sprekkeseett med strøk Ø-V $\pm 30^\circ$.

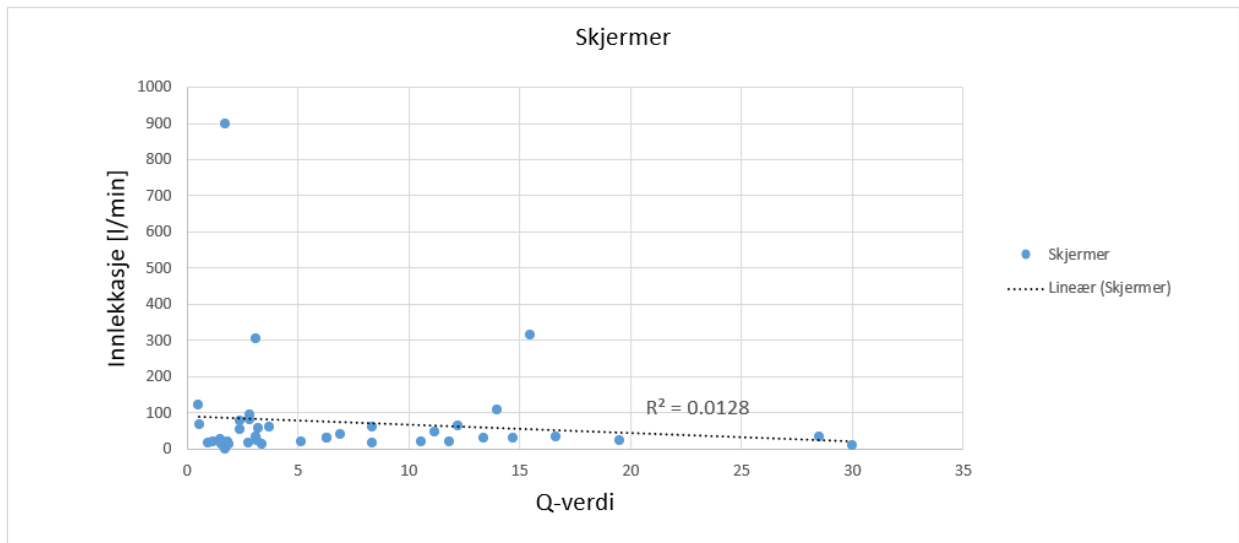
Innlekkasje

Som forklart i kapittel 4.4.2 under *Innlekkasje*, korreleres sonderboringer med nærliggende injeksjonsskjermer for å komme til et estimat av innlekkasje for hver skjerm. Dette er totalt 39 boringer, som vil si at 9 injeksjonsskjermer ikke inkluderes. Målingen ved pel nr. 32755 registrerer ingen lekkasje fra hullene, mens resten av sonderboringene har innlekkasje fra 8,2 l/min til 900 l/min. Innlekkasje i alle injeksjonsskjermer der sonderboringer har registrert lekkasje vises i Figur 6.4. Innlekkasjen ligger mellom 10 l/min og 100 l/min for de fleste skjermene, og det ser ut til å skje brå endringer i løpet av få pelnummer både for Longva og Fjørtofta nord stuff.

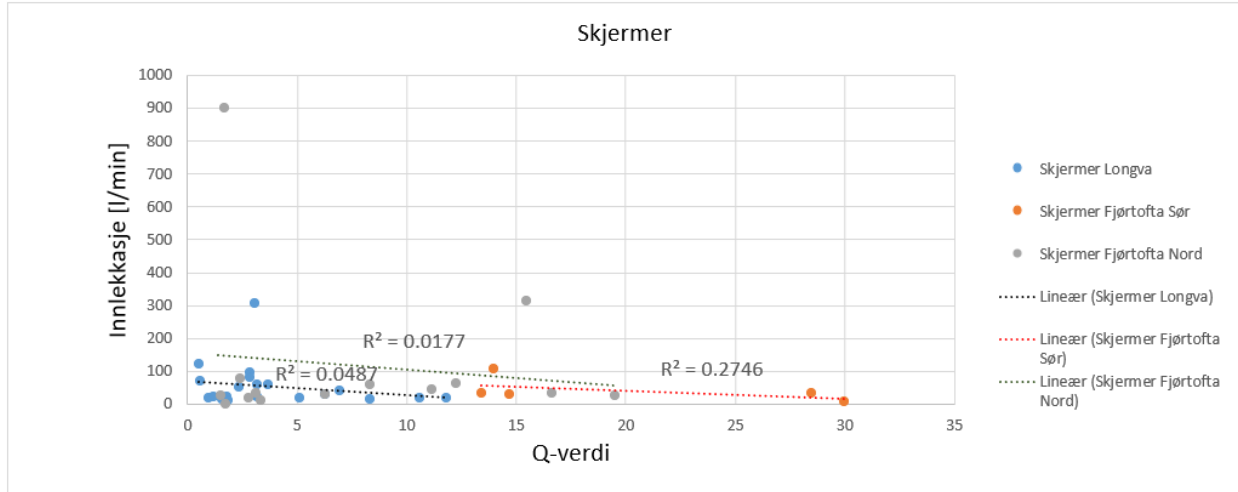


Figur 6.4: Innlekkasje i injeksjonsskjermer plottet for hvert pelnummer (start). Største og minste verdier for hver skjerm er markert. Y-akse er logaritmisk.

Trenden mellom innlekkasje og Q-verdi kan sees for alle inkluderte skjermer i Figur 6.5 og for hver tunnelstuf i Figur 6.6. Det benyttes lineære trendlinjer ettersom de er kompatible med datasettet, som inneholder en nullverdi, i tillegg at de korrelerer visuelt. Data for Q-verdi mot innlekkasje ser ikke ut til å korrelere for alle skjermer samlet, men innlekkasjen i Fjørtofta sør stuf er sterkt korrelert med Q-verdien.

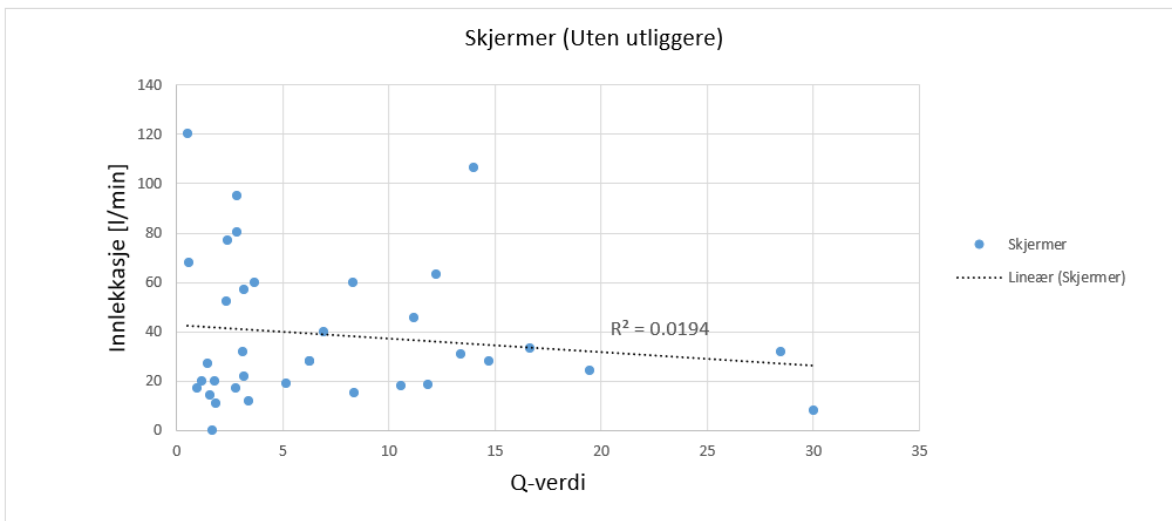


Figur 6.5: Innlekkasje plottet mot Q-verdi for hver injeksjonsskjerm.

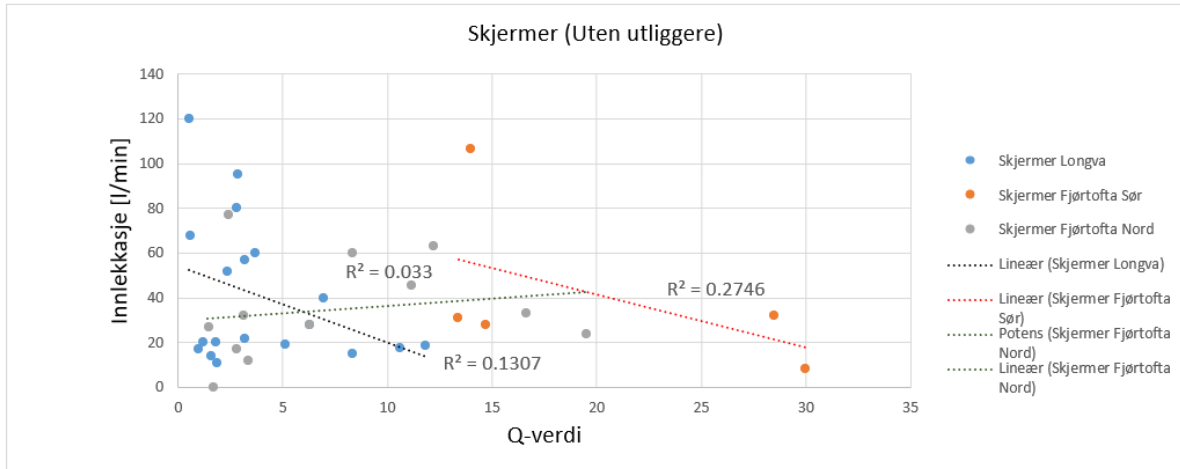


Figur 6.6: Innlekkasje plottet mot Q-verdi for hver injeksjonsskjerm, inndelt etter tunnelstuf.

Punktdiagrammene for innlekkasje mot Q-verdi ser ut til å ha enkelte punkter med betydelig større innlekkasje som gjør det vanskeligere å vurdere hva trendene som regel er i de fleste injeksjonsskjermene. For denne grunn lages det diagrammer som fjerner skjermer med innlekkasjeverdier som kan regnes som «utliggere». Dette gjøres ved å bruke en statistisk tommelfingerregel som ekskluderer verdier over $Q3 + 1,5 \text{ IQR}$ eller under $Q1 - 1,5 \text{ IQR}$. Det viser seg da at skjermer med innlekkasje større enn 125,63 l/min ikke inkluderes. Det lages diagrammer uten utliggere for alle skjermer (Figur 6.7) og inndelt etter stuf (Figur 6.8). Det er ingen god korrelasjon mellom alle skjermer, men en negativ trend observeres i to nær parallelle trendlinjer for Longva og Fjørtofta sør. Fjørtofta nord ser ut til å ha punkter innenfor hver av disse trendlinjene.

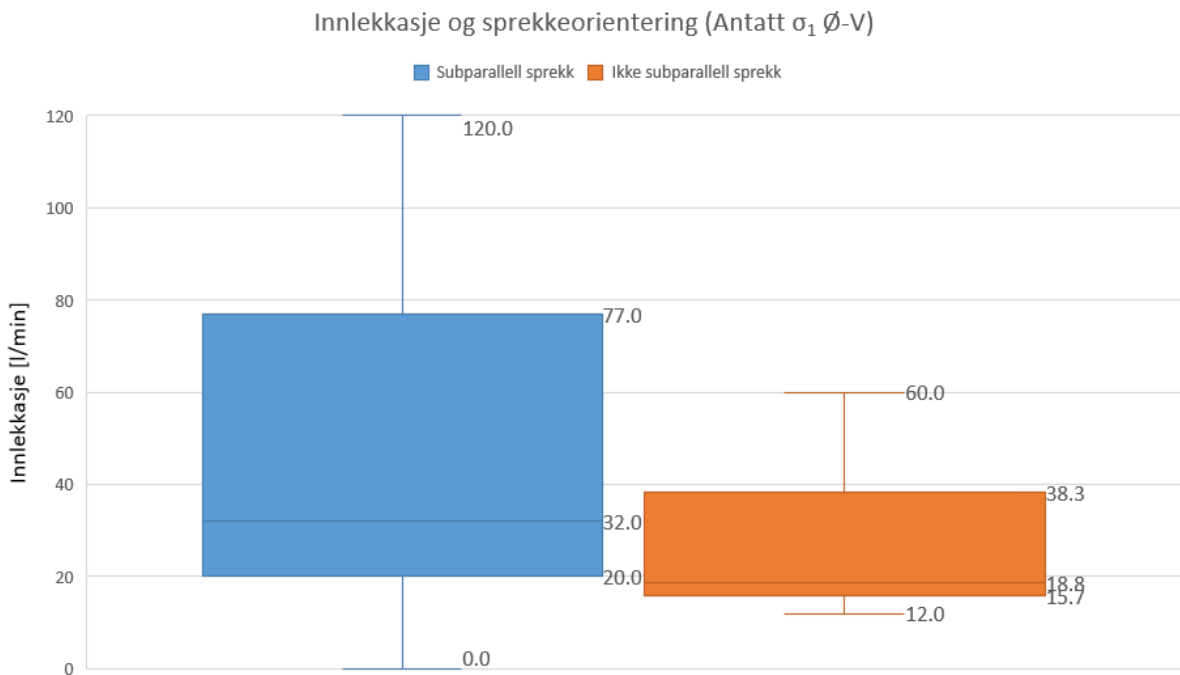


Figur 6.7: Innlekkasje plottet mot Q-verdi for hver injeksjonsskjerm, uten utliggere.



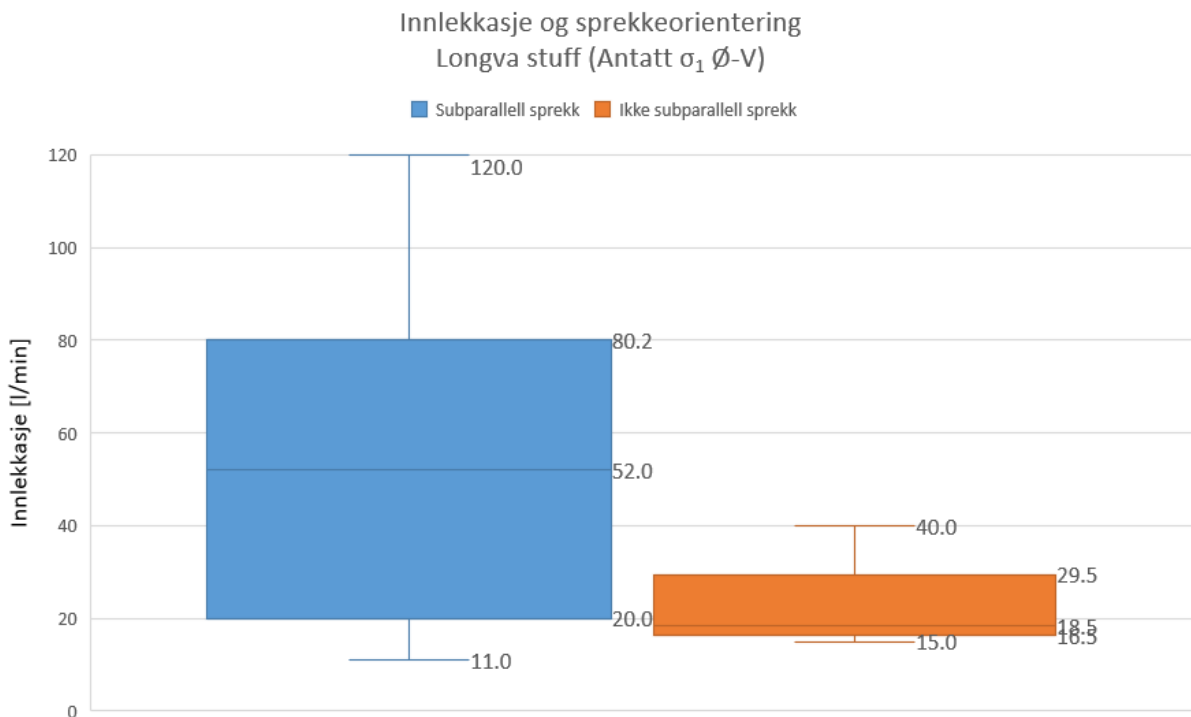
Figur 6.8: Innlekkasje plottet mot Q-verdi for hver injeksjonsskjem, inndelt etter tunnelstuff, uten utliggere.

Innlekkasjen varierer også mellom skjermer med minst ett subparallell sprekesett og skjermer uten et subparallelt sprekesett i forhold til antatt σ_1 (\emptyset -V). Boksplott i Figur 6.9 viser at innlekkasjen i skjermer med subparallele sprekesett har en median på 32 l/min mens det andre utvalget har en median på 18,8 l/min.

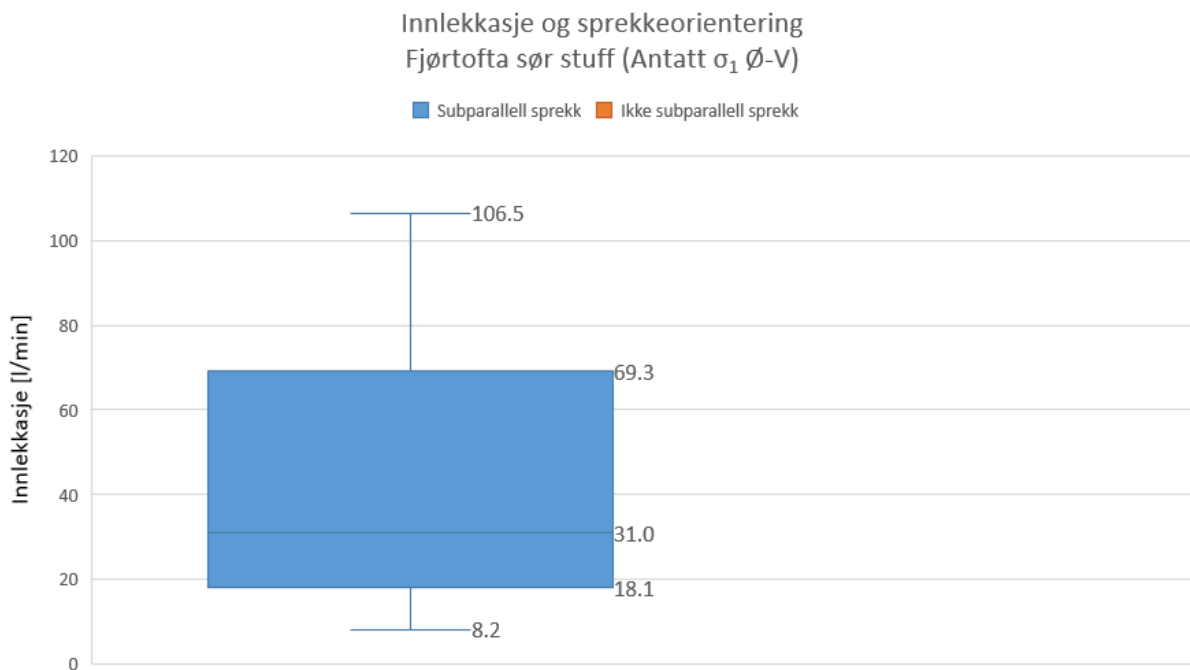


Figur 6.9: Boksplott for alle skjermer - innlekkasje for to utvalg.

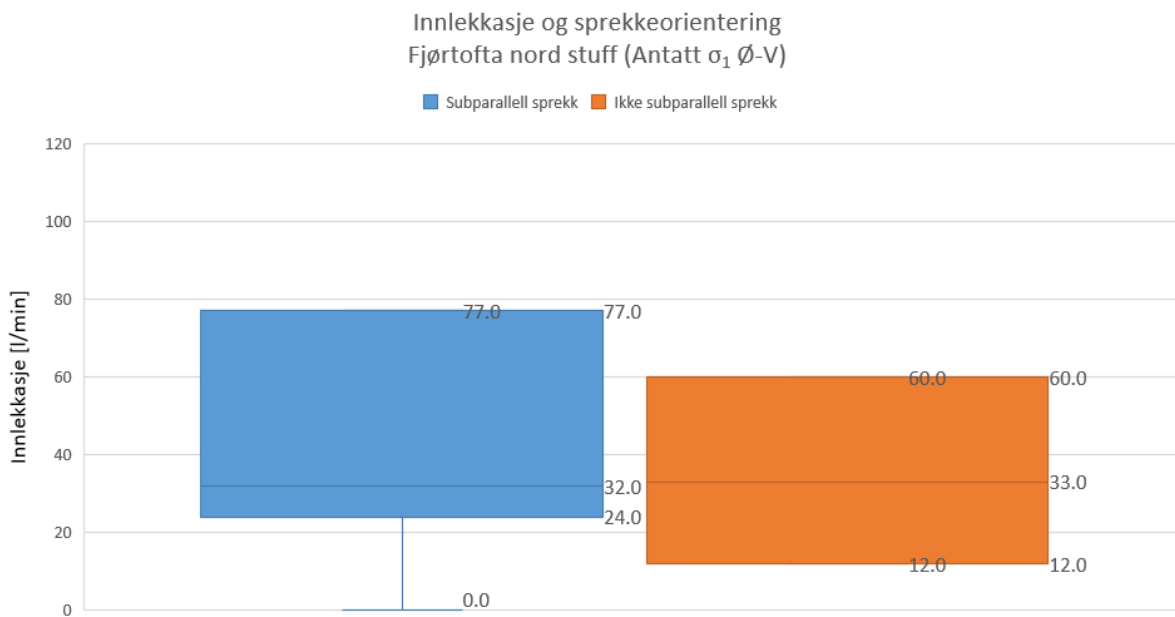
Innlekkasjen i forhold til subparallele sprekkese sett illustreres for de tre tunnelstoffene: Longva (Figur 6.10), Fjørtofta sør (Figur 6.11) og Fjørtofta Nord (6.12). Det er mye lekkasje i Longva stuff sine skjermene med subparallele sprekkese sett (median på 52 l/min), sammenlignet med skjermene uten likt orienterte sprekkese sett (median på 18,5 l/min). Alle injeksjonsskjermene som tilhører Fjørtofta sør har subparallele sprekkese sett, der medianverdi for innlekkasje er 31 l/min. Innlekkasjen i de to utvalgene er like for Fjørtofta nord: medianen for skjermene med subparallele sprekkese sett er 32 l/min og medianen er 33 l/min for skjermene uten subparallele sprekkese sett.



Figur 6.10: Bokplott for skjermene i Longva stuff - innlekkasje for to utvalg.



Figur 6.11: BoksploTT for skjerner i Fjørtofta sør stoff - innlekkasje for kun ett utvalg er tilgjengelig.



Figur 6.12: BoksploTT for skjerner i Fjørtofta nord stoff - innlekkasje for to utvalg.

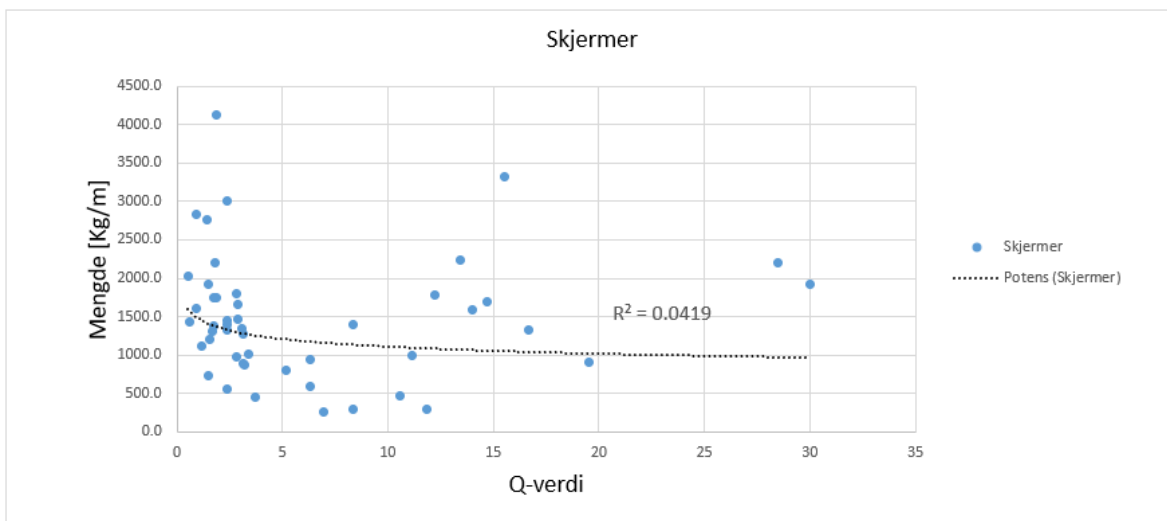
6.2 Korrelasjon mellom geologi og injeksjon

6.2.1 Q-systemet og injeksjon

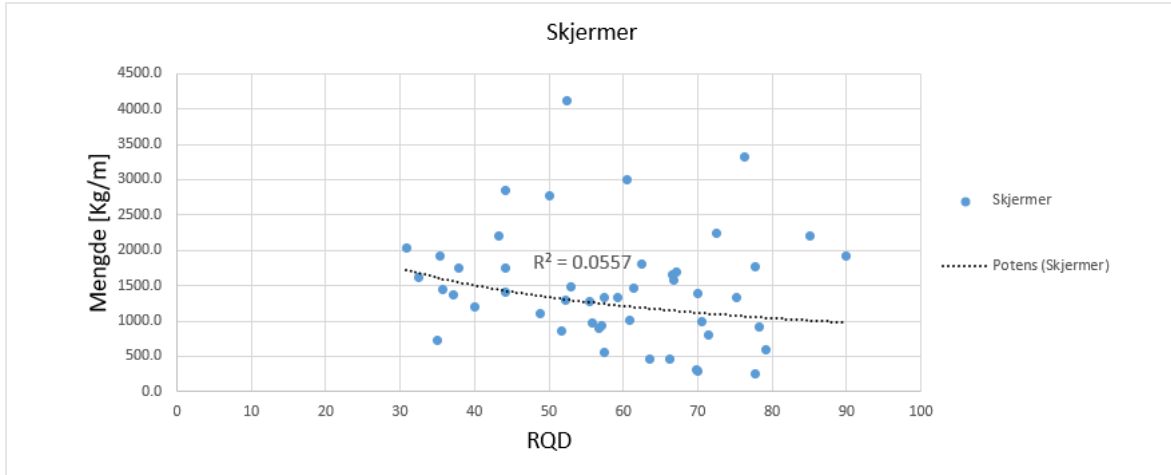
Korrelasjon for alle injeksjonsskjermer

Mengde injeksjonsmasse for hver skjerm, tilgjengelig i Vedlegg E.1, korreleres med parametere fra Q-systemet (Vedlegg E.2) gjennom metoden beskrevet i kapittel 4.4.4 under *Korrelasjon mellom Q-verdi og injeksjonsmasse*. Hypoteser støttes om det finnes en «sterk korrelasjon» der trendlinjen har $r^2 > 0,25$, mens en «moderat korrelasjon» vil si at $0,25 > r^2 > 0,09$.

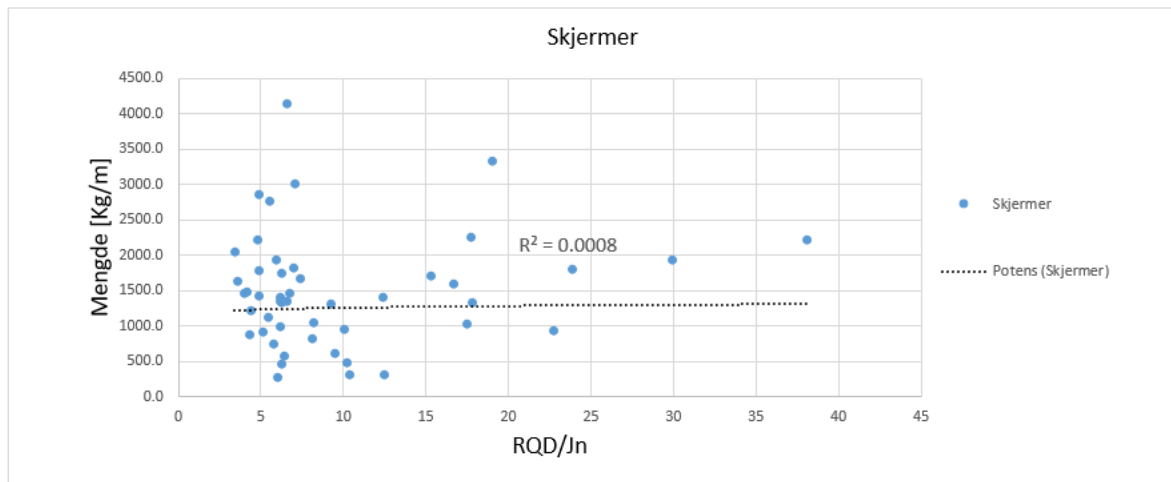
Først og fremst undersøkes korrelasjoner mellom alle injeksjonsskjermene, med fokus på parameterne som granskes i hypotesene: Q-verdi, RQD, RQD/J_n, J_r/J_a og SRF. Hypotesene gjelder kun for Q-verdier over 0,1. Ut fra visuelle inspeksjoner og størrelsen på r^2 bestemmes det at trendlinjen «potens» passer best, og den brukes dermed videre i analysen. Punktdiagrammer for mengde injeksjonsmasse og de nevnte parameterne kan sees i Figur 6.13, Figur 6.14, Figur 6.15, Figur 6.16 og Figur 6.17. Ut fra verdiene for r^2 kan ingen parametere regnes til å ha en sterk korrelasjon med masseforbruk, og én parameter (J_r/J_a) har en negativ trend med $r^2 = 0,2072$ (Figur 6.16) og faller dermed under «moderat korrelasjon». Dette vil si at ingen av hypotesene relatert til Q-systemet kan støttes rett ut.



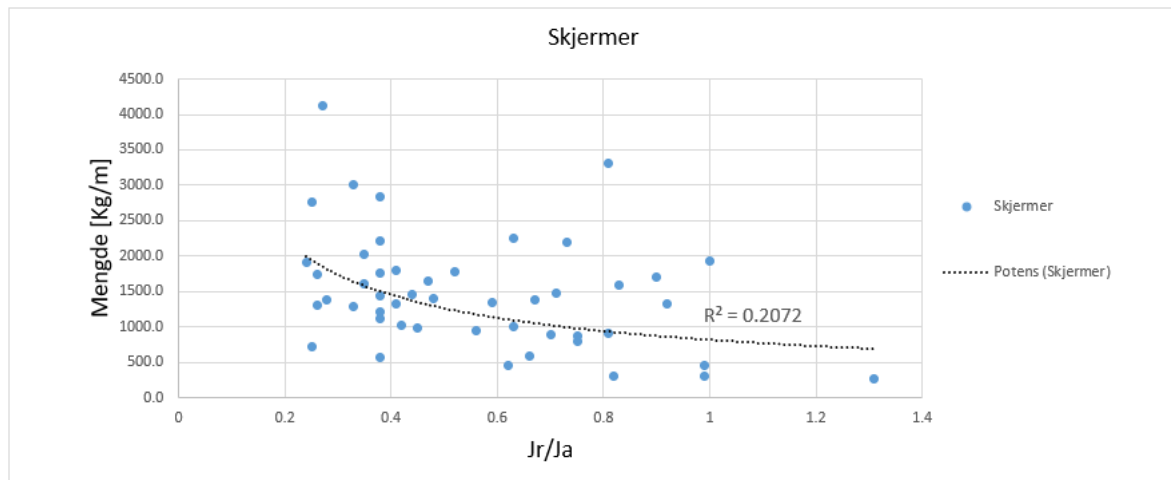
Figur 6.13: Q-verdi og mengde injeksjonsmasse for hver injeksjonsskjerm, med trendlinje (potens).



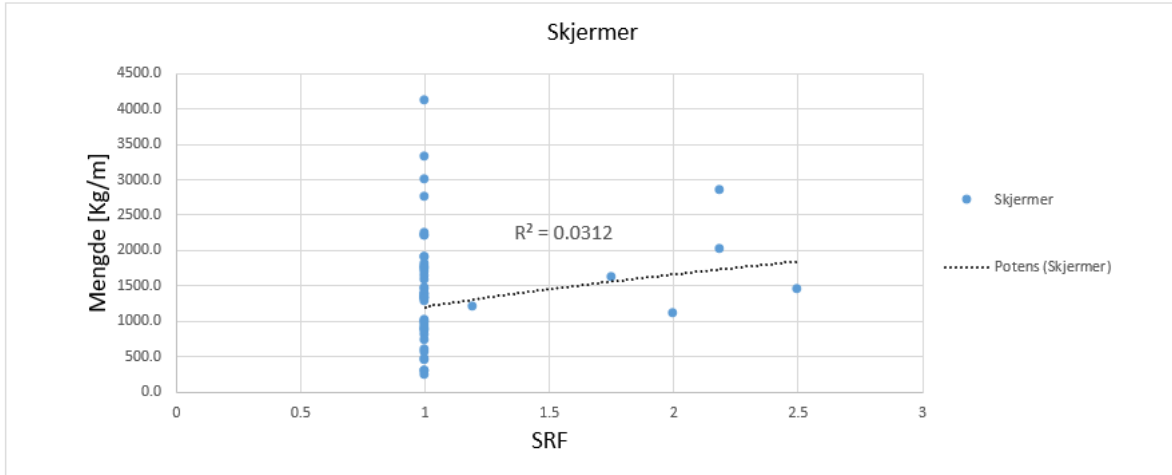
Figur 6.14: RQD og mengde injeksjonsmasse for hver injeksjonsskjerm, med trendlinje (potens).



Figur 6.15: RQD/J_n og mengde injeksjonsmasse for hver injeksjonsskjerm, med trendlinje (potens).

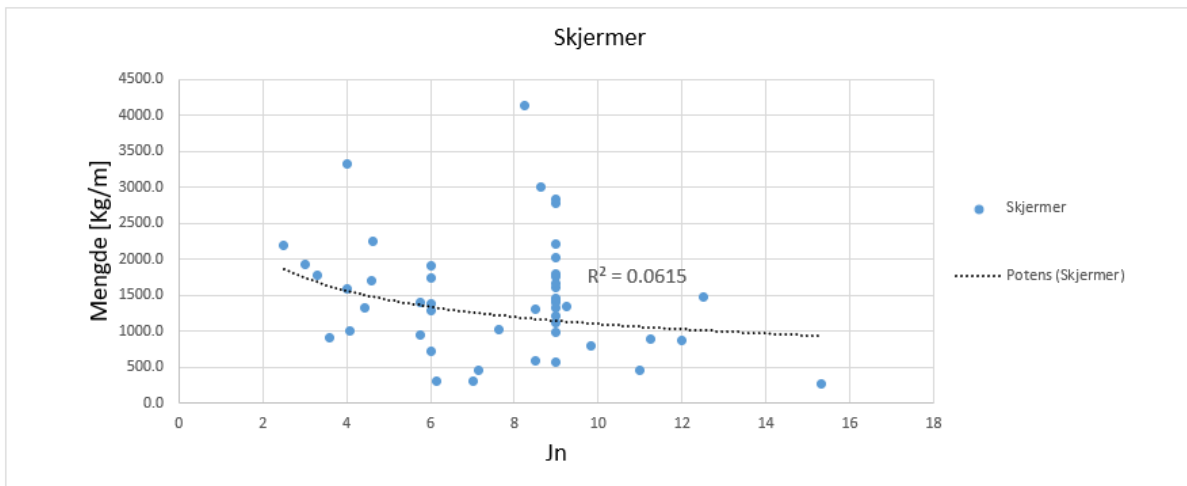


Figur 6.16: J_r/J_a og mengde injeksjonsmasse for hver injeksjonsskjerm, med trendlinje (potens).

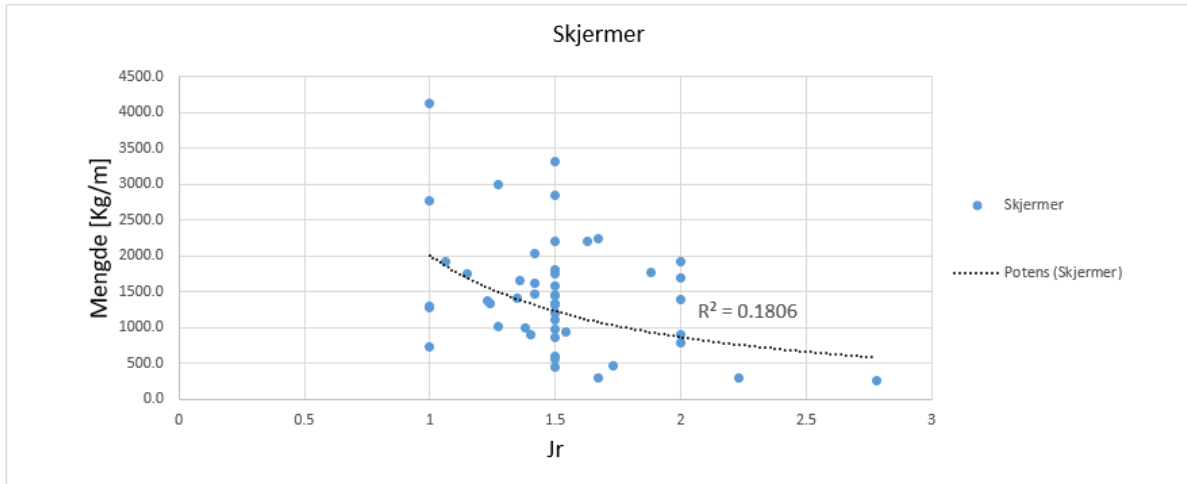


Figur 6.17: SRF og mengde injeksjonsmasse for hver injeksjonsskjem, med trendlinje (potens).

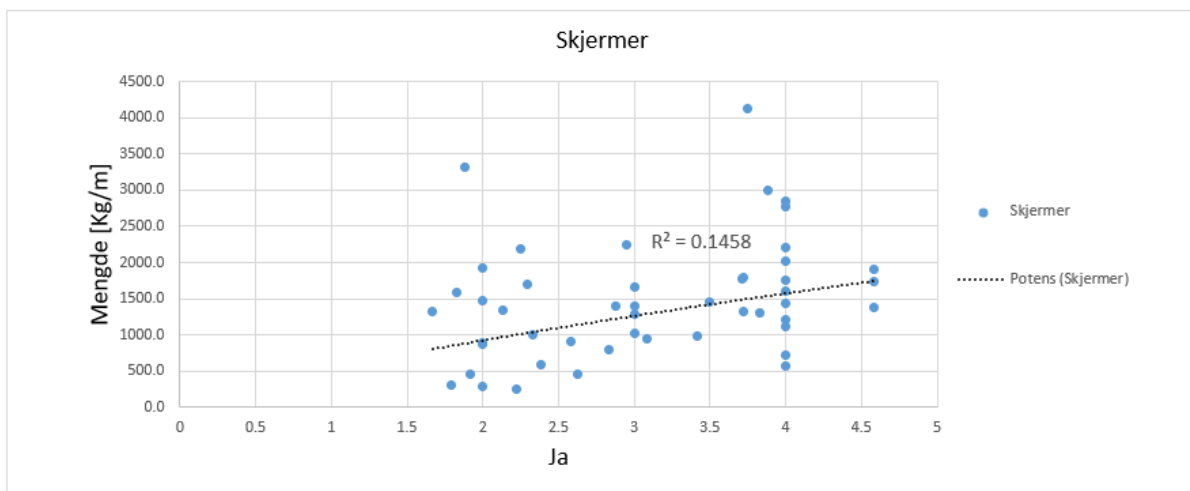
De tre andre Q-parameterne som inngår i hypotesenes parametere RQD/J_n og J_r/J_a (J_n , J_r og J_a), presenteres også i punktdiagrammer med mengde injeksjonsmasse i Figur 6.18, Figur 6.19 og Figur 6.20. I likhet med J_r/J_a har parameterne J_r og J_a moderate korrelasjoner med masseforbruk, der de henholdsvis har trendlinjer med $r^2 = 0,1806$ (negativ trend) og $r^2 = 0,1458$ (positiv trend).



Figur 6.18: J_n og mengde injeksjonsmasse for hver injeksjonsskjem, med trendlinje (potens).



Figur 6.19: J_r og mengde injeksjonsmasse for hver injeksjonsskjerm, med trendlinje (potens).



Figur 6.20: J_a og mengde injeksjonsmasse for hver injeksjonsskjerm, med trendlinje (potens).

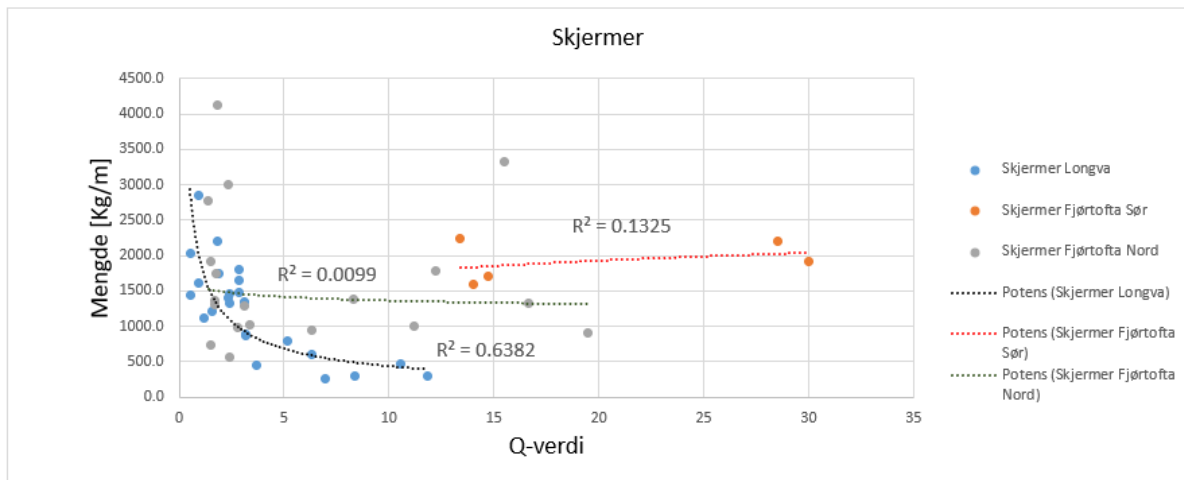
Korrelasjon for hver tunnelstuff

Som diskutert i kapittel 4.4.4 skal skjermene innenfor hver tunnelstuff også undersøkes. Punktdiagrammer for mengden injeksjonsmasse og Q-verdi eller relevante Q-parametere (RQD , RQD/J_n , J_r/J_a , SRF , J_n , J_r og J_a) for hver stuff ligger i Figur 6.21-6.28.

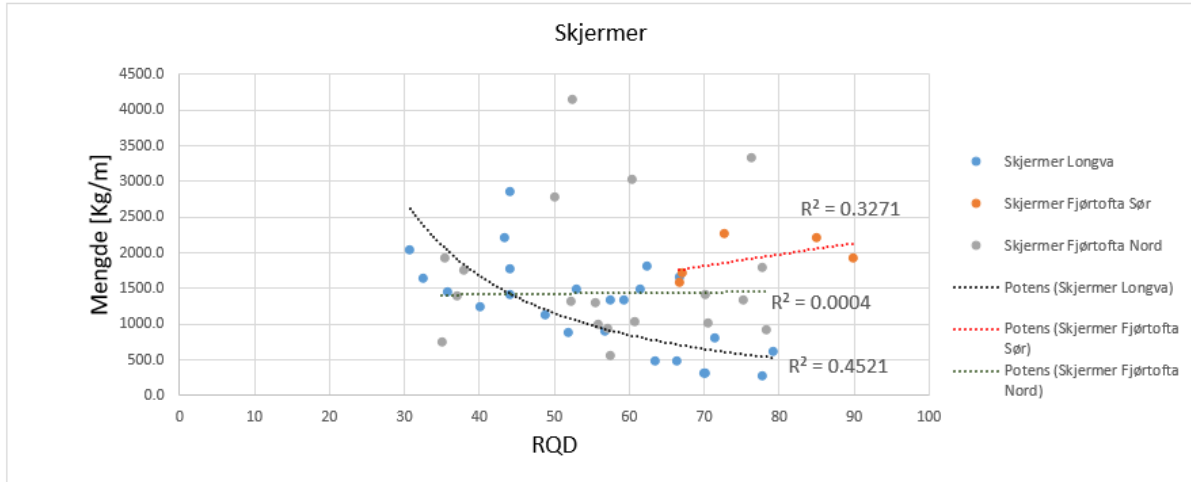
For Longva stuff er alle verdier fra Q-systemet som sees på, bortsett fra SRF og J_n , sterkt korrelert med masseforbruket. I synkende rekkefølge er de sterkt korrelerte: J_r/J_a ($r^2 = 0,7355$), Q-verdi ($r^2 = 0,6382$), J_a ($r^2 = 0,5201$), J_r ($r^2 = 0,4875$), RQD ($r^2 = 0,4521$) og RQD/J_n ($r^2 = 0,4261$). Disse følger forventede trender ut fra hypotesene, der alle bortsett fra J_a har negativ korrelasjon og J_a er positivt korrelert. SRF har en moderat positiv korrelasjon, og $SRF > 1$ observeres kun i Longva.

Tunnelstufen Fjørtofta sør har sterke korrelasjoner for følgende Q-parametere (i synkende rekkefølge): J_a ($r^2 = 0,5179$), J_r/J_a ($r^2 = 0,406$), RQD ($r^2 = 0,3271$) og RQD/ J_n ($r^2 = 0,3104$). J_a og J_r/J_a har trendlinjer i samme retning som Longva stuff, men består stort sett av større verdier. RQD og RQD/ J_n er positivt korrelert med mengde injeksjonsmasse, som er motsatt i forhold til Longva stuff og oppgavens hypoteser. I tillegg har Q-verdi en moderat positiv trend, som også står i motsetning til tidligere diskuterte trender og hypoteser.

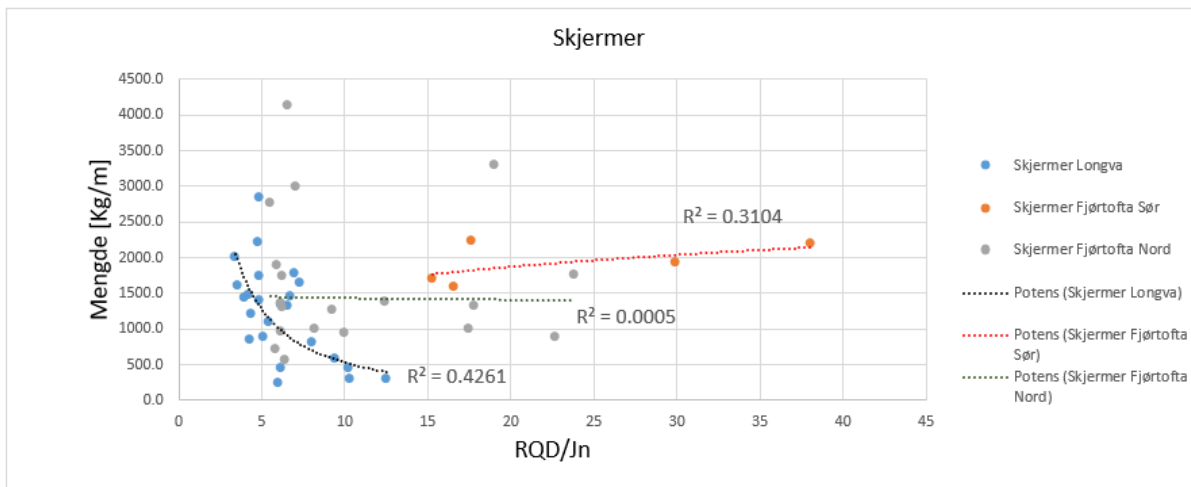
Injeksjonsskjermene i Fjørtofta nord stuff viser ikke sterke korrelasjoner for noen av parameterne som analyseres. Det finnes heller ikke en eneste moderat korrelasjon for skjermene innenfor stuffen. Ut fra visuell inspeksjon, eksempelvis av punktdiagram for Q-verdi (Figur 6.21), ser det ut som at noen av punktene som tilhører Fjørtofta nord sammenfaller med trendlinjen til Longva stuff og at resten av punktene er spredt med generelt sett høyere Q-verdier og mengde injeksjonsmasse.



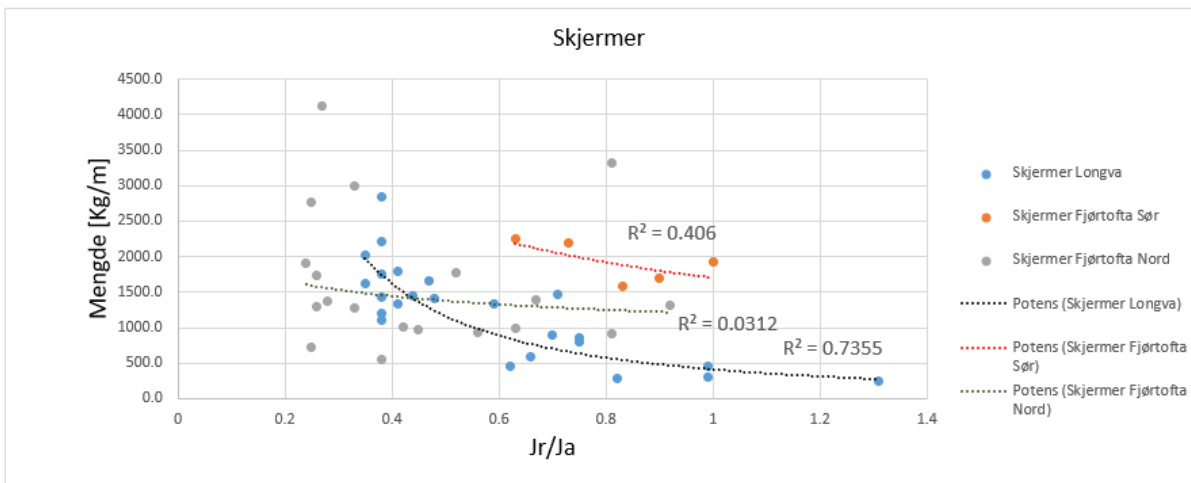
Figur 6.21: Q-verdi og mengde injeksjonsmasse for skjermene i hver tunnelstuff, med trendlinjer (potens).



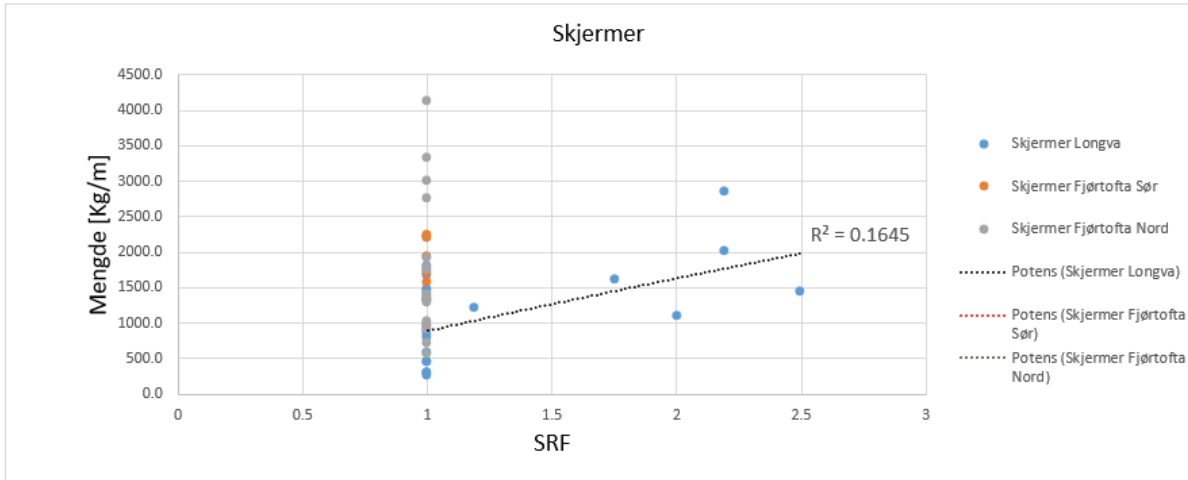
Figur 6.22: RQD og mengde injeksjonsmasse for skjerner i hver tunnelstuff, med trendlinjer (potens).



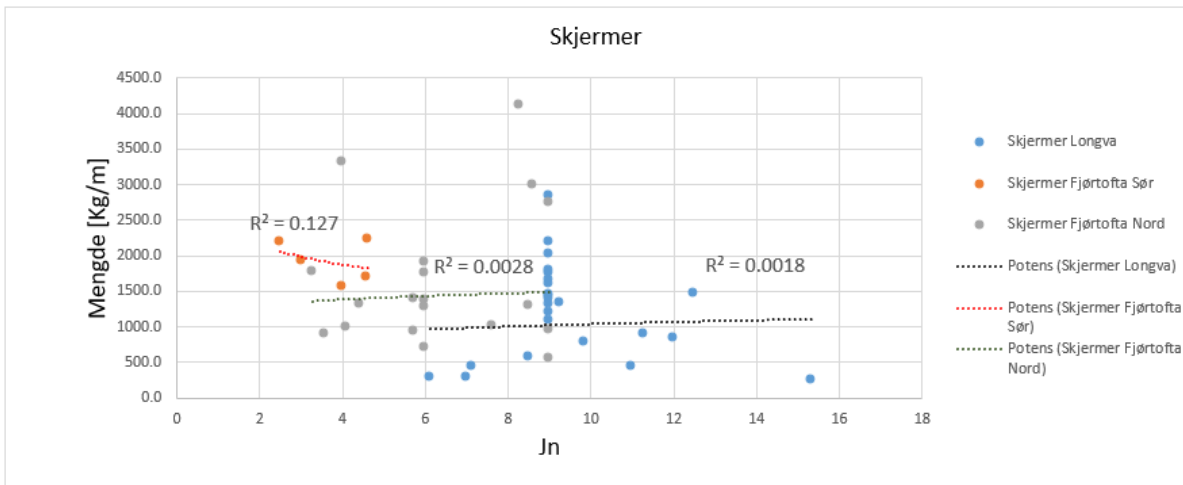
Figur 6.23: RQD/J_n og mengde injeksjonsmasse for skjerner i hver tunnelstuff, med trendlinjer (potens).



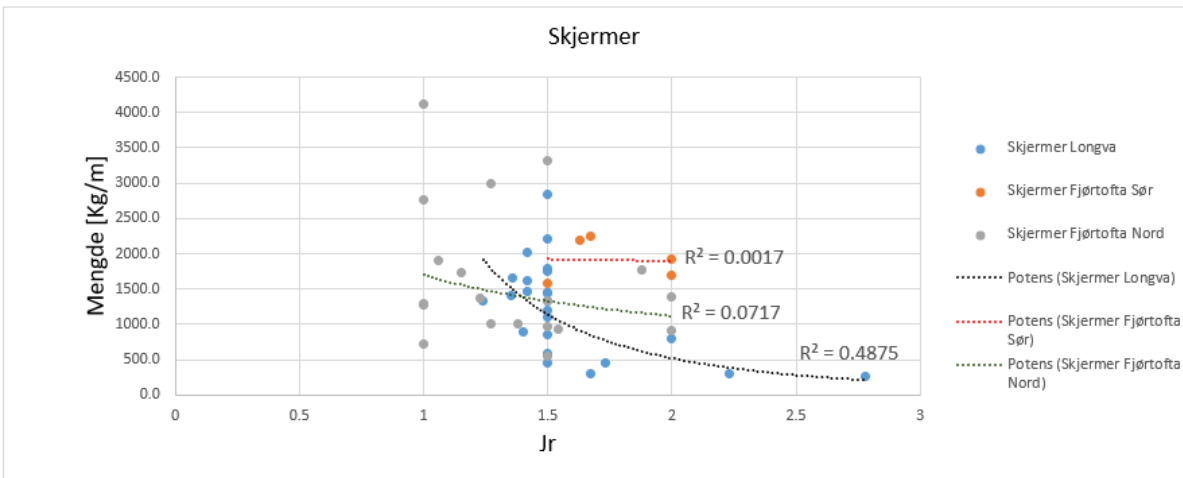
Figur 6.24: J_r/J_a og mengde injeksjonsmasse for skjerner i hver tunnelstuff, med trendlinjer (potens).



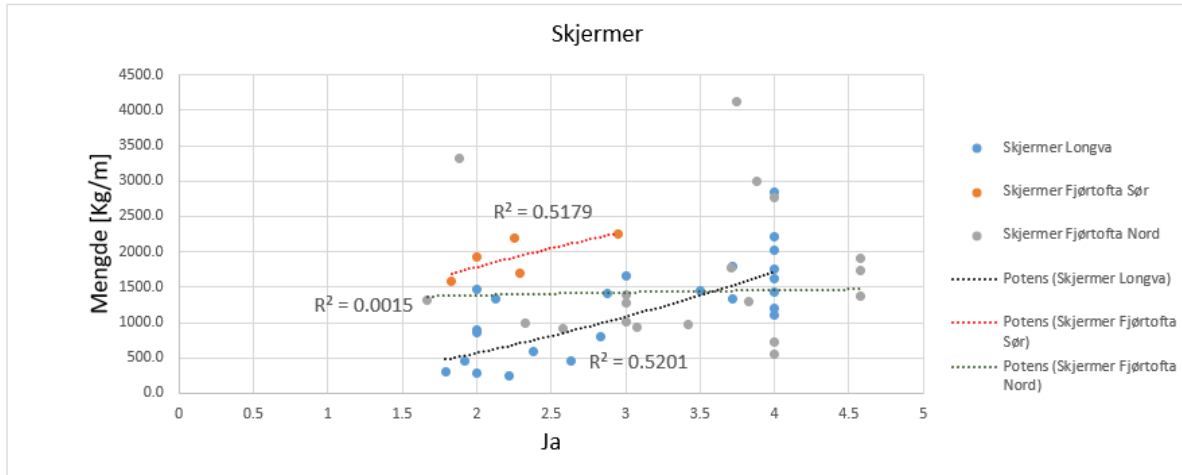
Figur 6.25: SRF og mengde injeksjonsmasse for skjermene i hver tunnelstuf, med trendlinjer (potens).



Figur 6.26: J_n og mengde injeksjonsmasse for skjermene i hver tunnelstuf, med trendlinjer (potens).



Figur 6.27: J_r og mengde injeksjonsmasse for skjermene i hver tunnelstuf, med trendlinjer (potens).

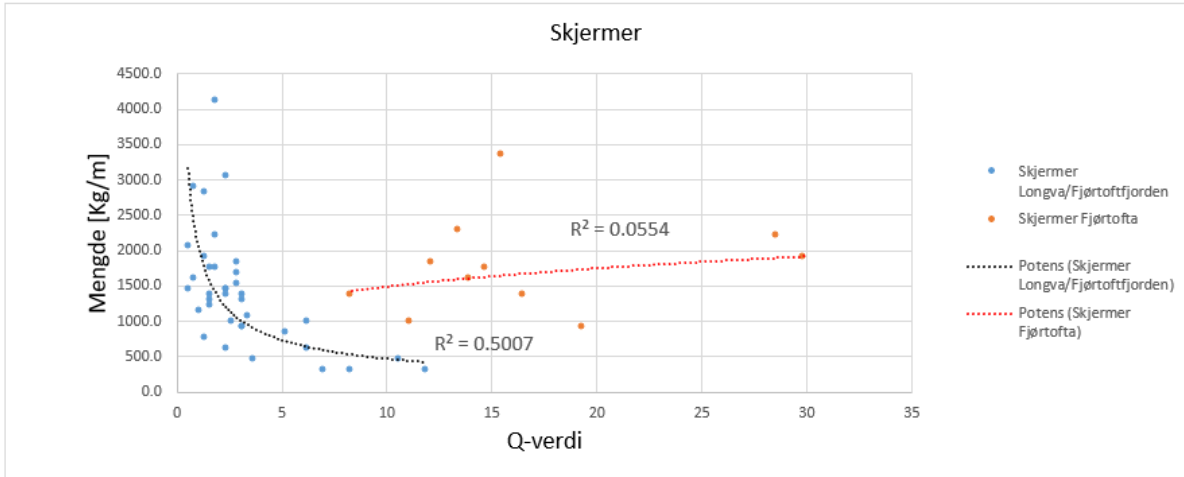


Figur 6.28: Ja og mengde injeksjonsmasse for skjermer i hver tunnelstuff, med trendlinjer (potens).

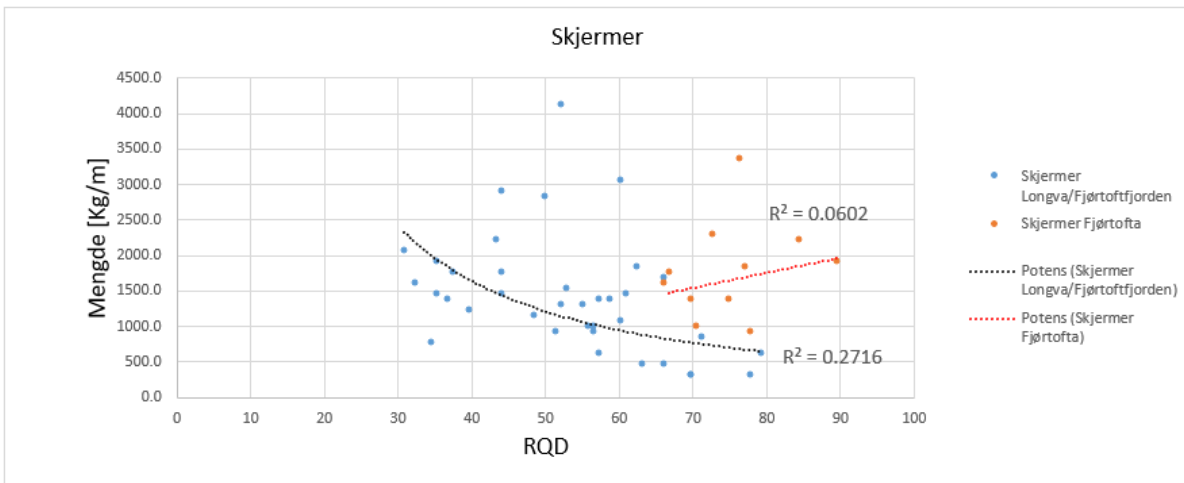
Korrelasjon for «to skjermtyper»

I punktplottet for Q-verdier i hver stuff (Figur 6.21) kan det tolkes at alle skjermene innenfor Longva stuff og noen av skjermene til Fjørtofta nord følger den samme trendlinjen. Injeksjons-skjermene som ikke følger trendlinjen er alle fem skjermene i Fjørtofta sør og de seks skjermene innenfor Fjørtofta nord med pelnummer nærmest Fjørtofta sør (pel nr.: 32079, 32115, 32396, 32700, 32715 og 32732). Skjermene som følger trendlinjen er fra Longva stuff og Fjørtoftfjorden, mens de resterende skjermene er de som ligger nærmest øya Fjørtofta.

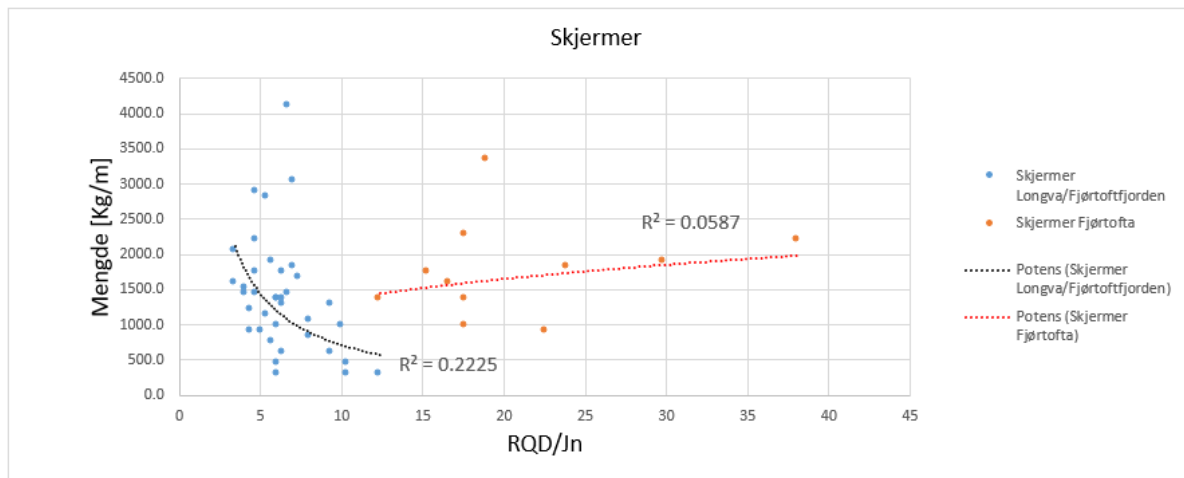
Disse to utvalgene, «Longva/Fjørtoftfjorden» og «Fjørtofta», sammenlignes i Figur 6.29-6.36. Parametere med sterke korrelasjoner for «Longva/Fjørtoftfjorden» er som følgende: J_r/J_a ($r^2 = 0,5429$), Q-verdi ($r^2 = 0,5007$), J_a ($r^2 = 0,4202$), J_r ($r^2 = 0,3971$) og RQD ($r^2 = 0,2716$). I tillegg har RQD/ J_n en moderat korrelasjon. For skjermene til «Fjørtofta» er det ingen sterke eller moderate korrelasjoner mellom Q-systemet og mengde injeksjonsmasse. Trendlinjene for disse skjermene har positive trender for Q-verdi, RQD og RQD/ J_n , i motsatt retning av trendlinjene til «Longva/Fjørtoftfjorden». Noe som skiller seg ut er at de elleve minste verdiene av J_n består av alle skjermene innenfor «Fjørtofta» (Figur 6.34).



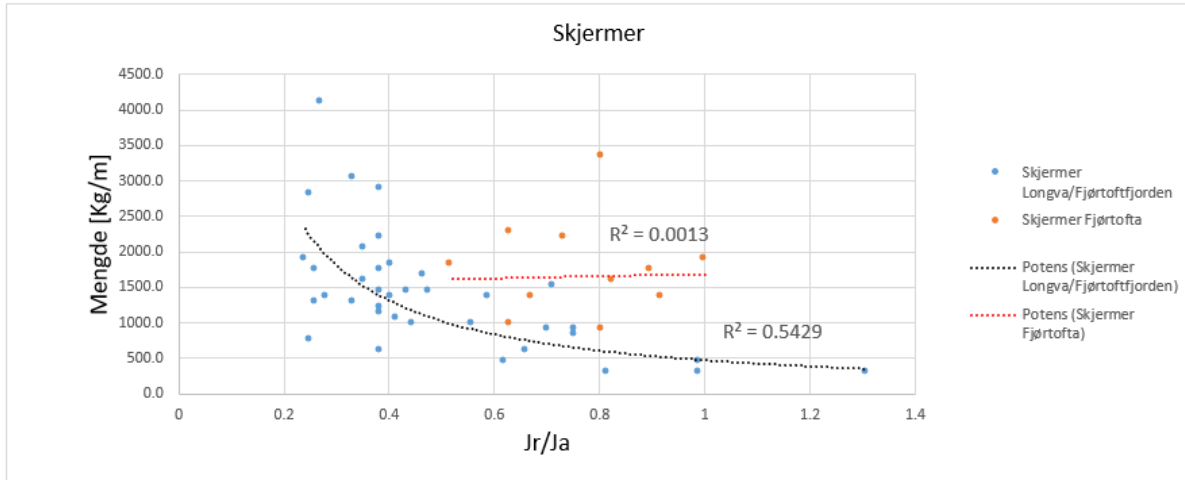
Figur 6.29: Q-verdi og mengde injeksjonsmasse for skjermer i de to «skjermtypene», med trendlinjer (potens).



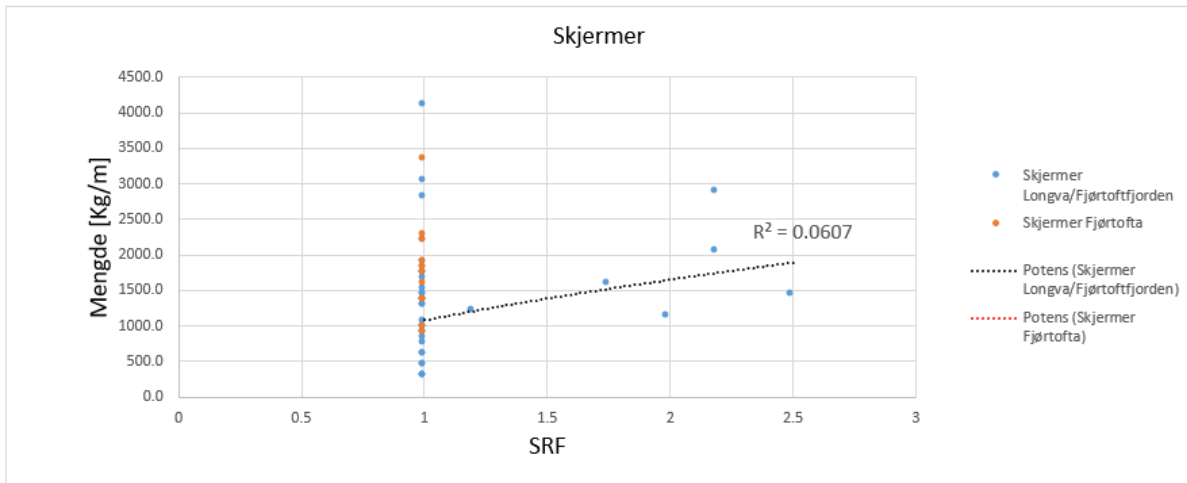
Figur 6.30: RQD og mengde injeksjonsmasse for skjermer i de to «skjermtypene», med trendlinjer (potens).



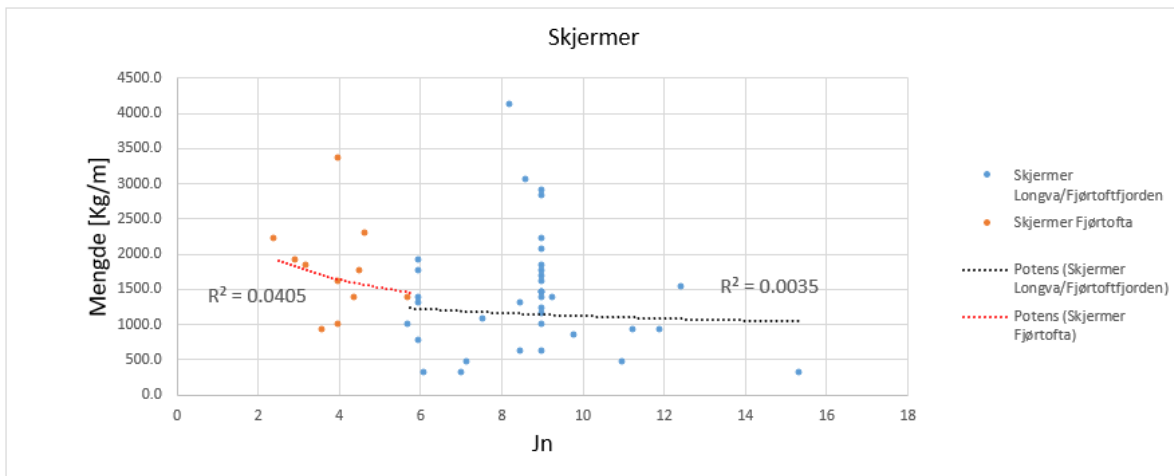
Figur 6.31: RQD/J_n og mengde injeksjonsmasse for skjermer i de to «skjermtypene», med trendlinjer (potens).



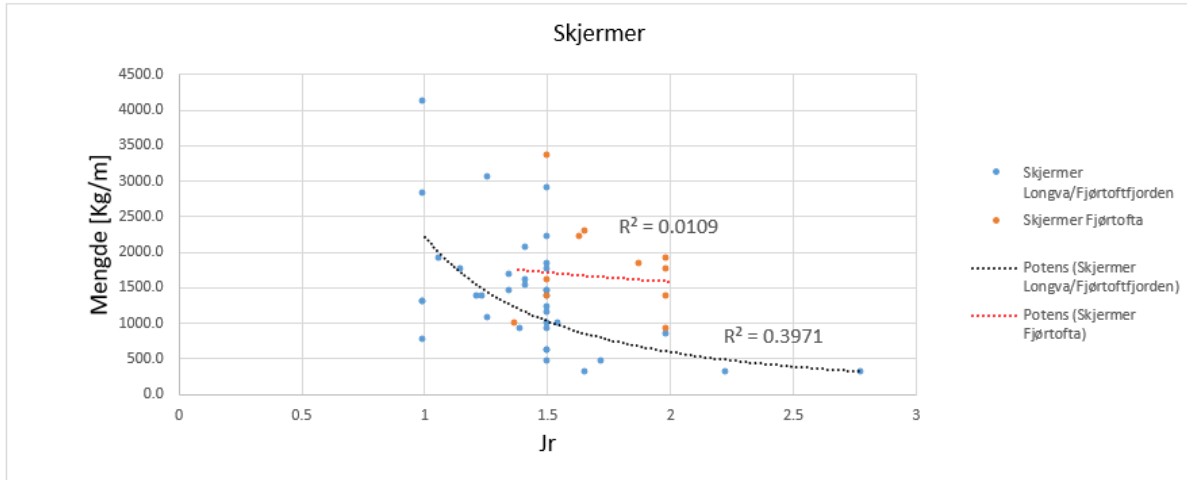
Figur 6.32: J_r/J_a og mengde injeksjonsmasse for skjermer i de to «skjermtypene», med trendlinjer (potens).



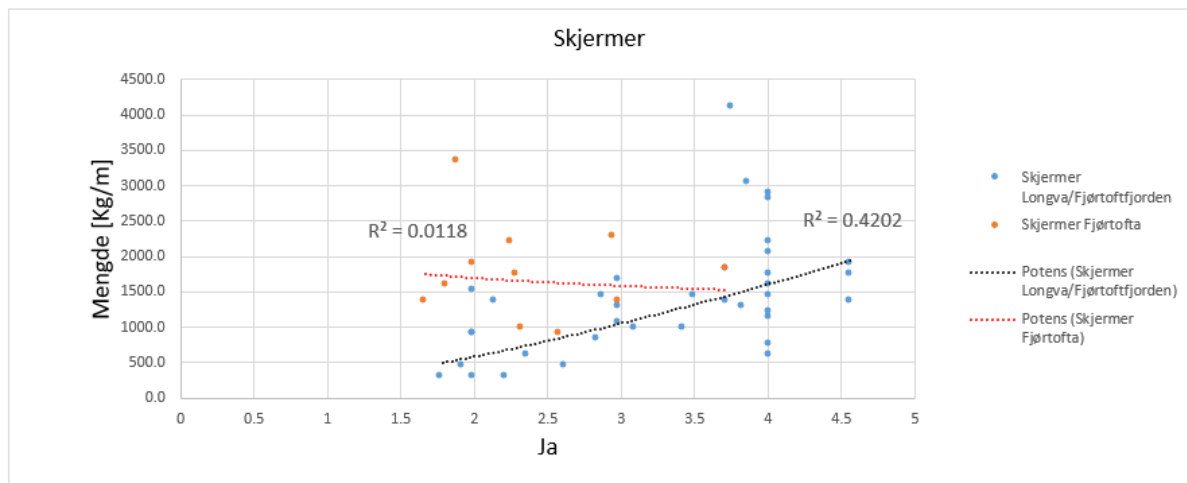
Figur 6.33: SRF og mengde injeksjonsmasse for skjermer i de to «skjermtypene», med trendlinjer (potens).



Figur 6.34: J_n og mengde injeksjonsmasse for skjermer i de to «skjermtypene», med trendlinjer (potens).



Figur 6.35: J_r og mengde injeksjonsmasse for skjermer i de to «skjermtypene», med trendlinjer (potens).



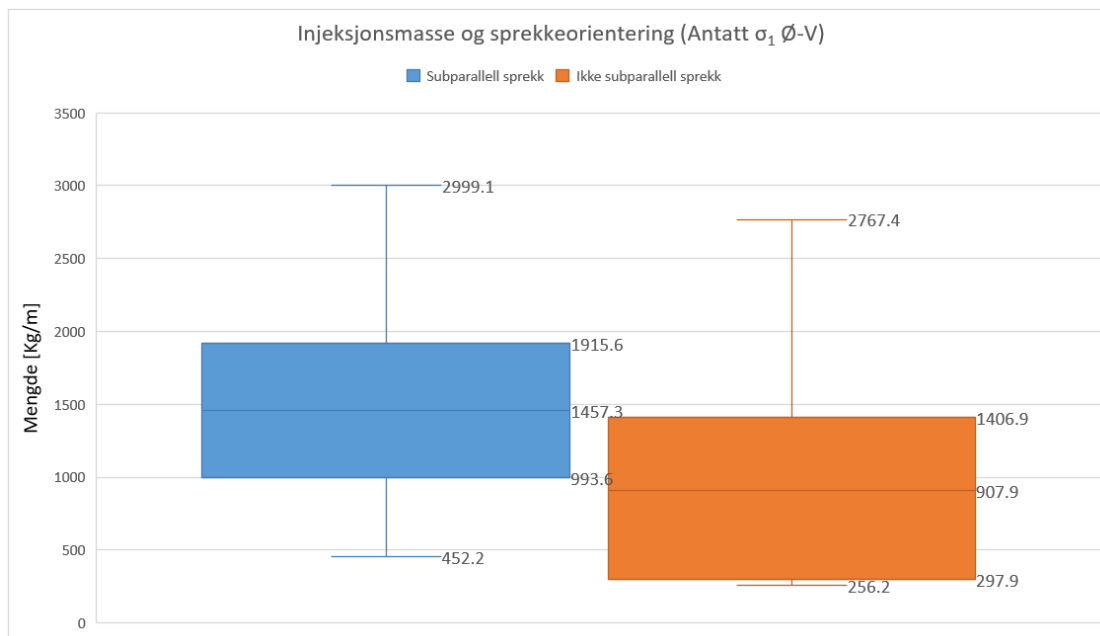
Figur 6.36: J_a og mengde injeksjonsmasse for skjermer i de to «skjermtypene», med trendlinjer (potens).

6.2.2 Diskontinuiteter og injeksjon

Korrelasjon for alle injeksjonsskjermer

En uparet T-test med to utvalg, «subparallele diskontinuiteter» og «ikke subparallele diskontinuiteter», utføres med metoden i kapittel 4.4.4 under *Korrelasjon mellom subparallele sprekkeseett og injeksjonsmasse*. Utvalgene er bestemt ut fra hvilke injeksjonsskjermer som har sprekkeseett med strøk $\text{Ø-V} \pm 30^\circ$, der data for subparallele sprekkeseett er tilgjengelig i Vedlegg E.3. Hypotesen støttes dersom tosidig p-verdi $< 0,05$ (sterk korrelasjon), mens en p-verdi mellom 0,05 og 0,1 betyr «moderat korrelasjon».

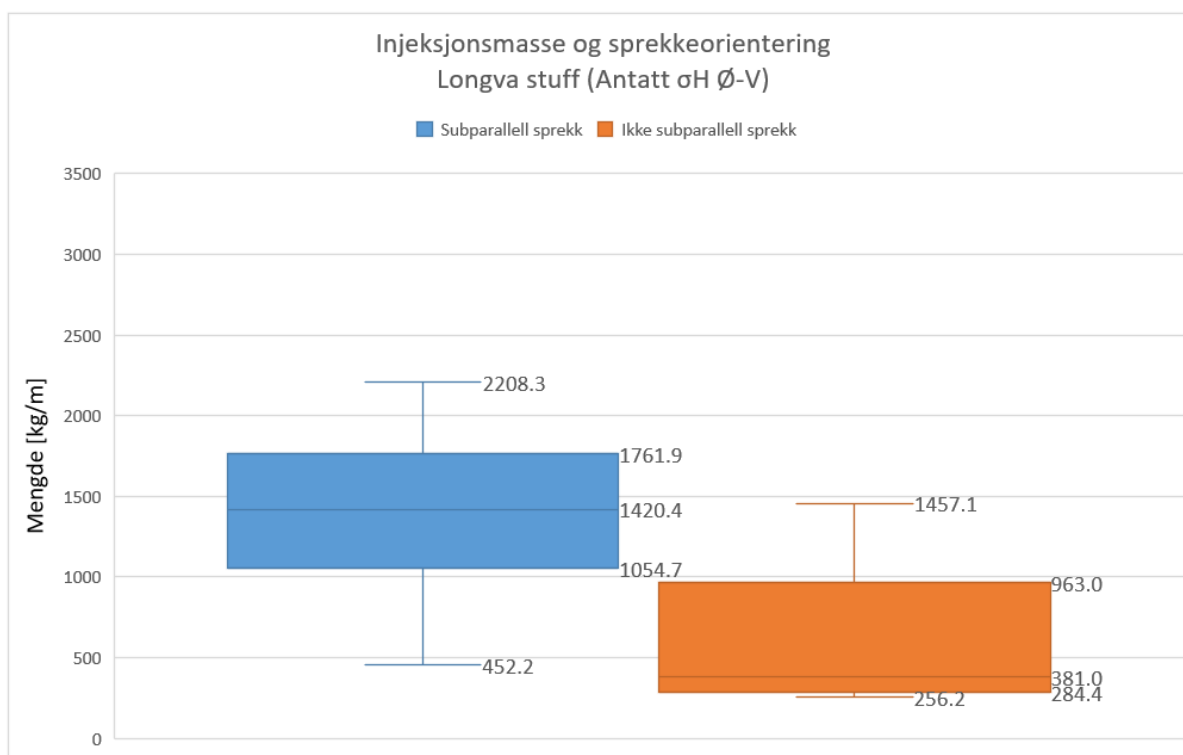
T-testen gir en p-verdi på 0,052, som faller under moderat korrelasjon. Dette vil si at hypotese nummer 2 kan ikke bekreftes ut fra testen, selv om p-verdien er svært nær kriteriet for sterk korrelasjon. Bokplott for de to utvalgene viser at medianen av mengde injeksjonsmasse i skjerner med minst ett subparallell sprekkeseett er 1457,3 kg/m i motsetning til 907,9 kg/m for skjerner uten subparallele sprekkeseett (Figur 6.37).



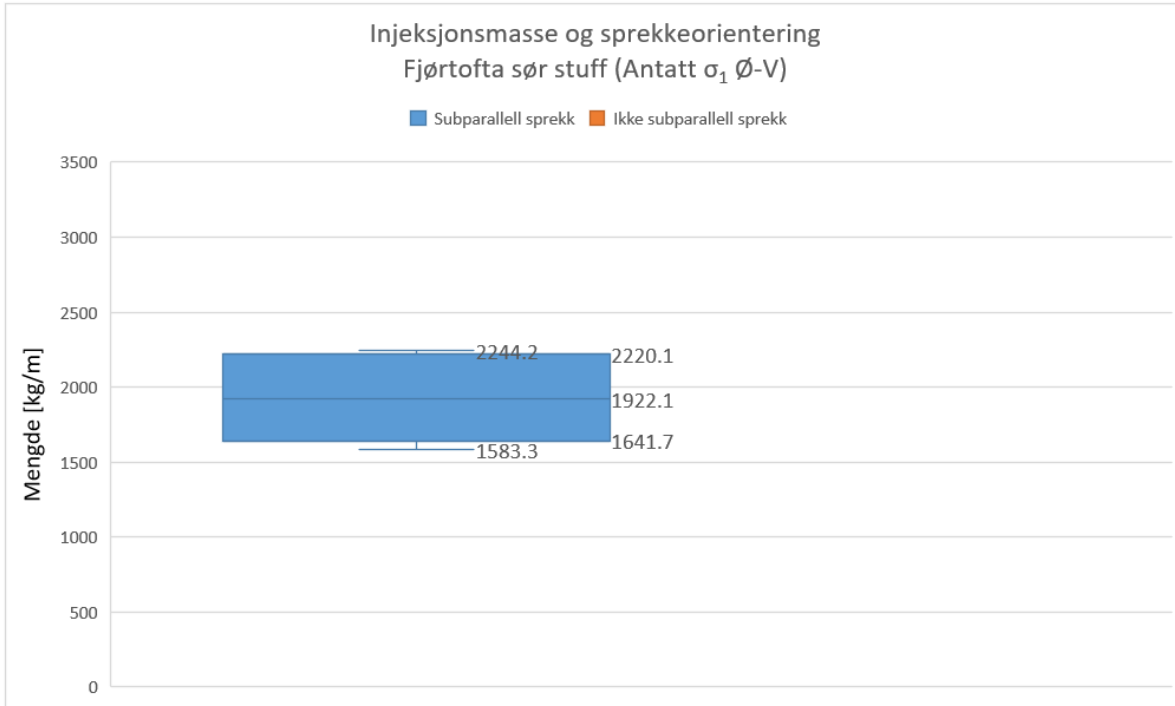
Figur 6.37: Bokplott for alle skjerner - mengde injeksjonsmasse for to utvalg.

Diskontinuiteter og injeksjon for hver tunnelstuff

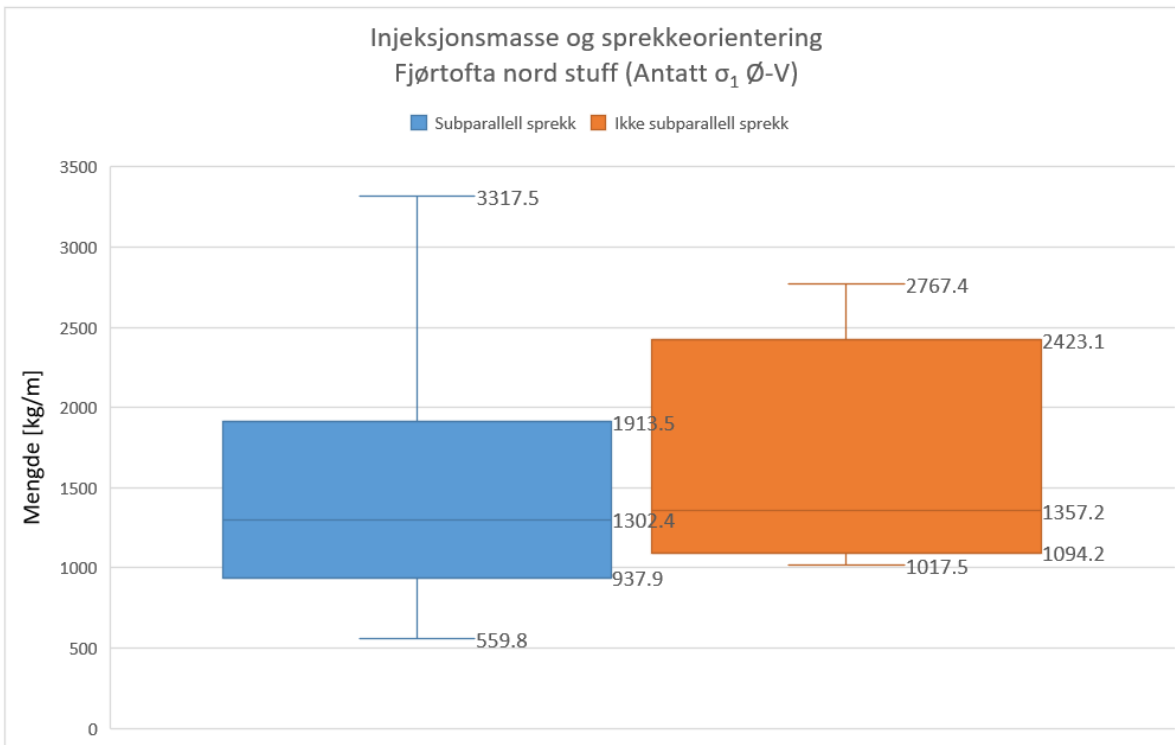
Skjermer med og uten subparallele sprekkeseett deles opp etter tunnelstuff, der forskjellene visualiseres i boksploott for Longva (Figur 6.38), Fjørtofta sør (Figur 6.39) og Fjørtofta nord (Figur 6.40). Longva stuff ser ut til å peke i samme retning som hypotesen ettersom boksen for skjermer med subparallele sprekkeseett er betydelig høyere enn boksen for de resterende skjermene. Fjørtofta sør har ingen skjermer uten subparallele sprekkeseett, og det er derfor ikke mulig å gjøre en sammenligning av to utvalg. Medianen av masseforbruket i skjermer med subparallele sprekkeseett er mindre i Fjørtofta nord stuff enn for skjermer uten subparallele sprekkeseett, henholdsvis 1302,4 kg/m og 1357,2 kg/m.



Figur 6.38: Boksploott for skjermer i Longva stuff - mengde injeksjonsmasse for to utvalg.



Figur 6.39: Boksploott for skjerner i Fjørtofta sør stuff - mengde injeksjonsmasse for kun ett utvalg er tilgjengelig.



Figur 6.40: Boksploott for skjerner i Fjørtofta nord stuff - mengde injeksjonsmasse for to utvalg.

Det ser ut som at boksploTT for Longva stuff (Figur 6.38) har en større forskjell enn boksploTT for alle injeksjonsskjermer (Figur 6.37). For denne grunn gjøres en uparet T-test med to utvalg for skjermene som tilhører Longva. Det viser seg at testen gir en tosidig p-verdi på 0,004. Det er altså helt klart en sterk korrelasjon mellom subparallelle sprekkesett og masseforbruk i skjermene som undersøkes i Longva stuff.

7 Diskusjon

7.1 Diskusjon om evaluering av partier

De tolv tunnelpartiene, oppsummert i Tabell 4.1 (kapittel 4.3), ble presentert i kapittel 5.1-5.12. Evalueringen av partiene representerer ikke hele tunnelene som undersøkes, men er informasjon som kan gi ytterligere kontekst til diskusjonen av den kvantitative analysen for injeksjonsskjermer og geologi.

7.1.1 Oppsummering av partier

Fire partier (5, 6, 7 og 10) er definert av én injeksjonsskjerm hver og har lengder på 21-24 m, to partier er avgrenset av to injeksjonsskjermer uten overlapp (8 og 9) med partilengder 60-68 m og resten av partiene (1, 2, 3, 4, 11 og 12) har 4-10 skjermene og lengder på 84-117 m.

Partiene består hovedsakelig av grunnfjellsgneiser, med innslag av meta-arkose og amfibolitt i Parti 2, noe eklogitt i Parti 8, hele Parti 9 består av amfibolitt og store deler av Parti 12 er grønnstein og amfibolitt. Bergartene faller altså stort sett under «Bergartstype B», med noen bergarter innenfor «Bergartstype C» (Klüver, 2000). MWD-tolkninger av oppsprekking ser ut til å sammenfalle godt med kartlagt RQD i parti 1, 2, 4, 6 og 12, og korrelere delvis for parti 3, 7, 9, 10 og 11. Det tolkes ingen betydelig sammenheng mellom borparametertolkning av vannforstyrrelse og innlekkasjemålinger i de fleste partiene.

I de seks partiene med overlappende injeksjonsskjermer har fire partier (2, 4, 11 og 12) en større tetthet av skjermene der Q-verdi er relativt lav, mens de to andre partiene har regelmessige overlapp på 7-8 m mellom injeksjonsskjermer. V/c-forholdet har ingen klar korrelasjon med de forskjellige geologiske variablene eller mengde injeksjonsmasse, og skjermene med mikrosegment (Parti 3 og 4) ser ut til å ha noe lavere masseforbruk enn skjermene med industrisement i lignende berg.

Det ser ut til at bergmasse med lavere Q-verdi, ofte grunnet mindre RQD og større SRF eller J_a , korrelerer med større injeksjonsmassebruk i partier 1, 2, 4, 11 og 12. Parti 3 har jevne mengder masseforbruk, og er dermed vanskelig å vurdere. I Parti 5, 6, 8, 9 og 10 er store mengder injeksjonsmasse brukt i berg med høye Q-verdier og Parti 7 har et stort masseforbruk i forhold til snittet av Q-verdier, men inneholder kartlagte salver med lav bergmassekvalitet. Starten av Parti 11 har også skjermene med stort masseforbruk og relativt store Q-verdier.

Visse sprekkesett kan knyttes til injeksjonsskjermene med størst masseforbruk innenfor enkelte partier. For partier 2, 4, 11 og 12 er Ø-V forbundet med større mengde injeksjonsmasse. Det samme gjelder NØ-SV for Parti 4 og NV-SØ for Parti 8 og 9. Sprekkesett med strøkretning ØNØ-VSV korrelerer i Parti 1 og kan grovt sett regnes til å være subparallel med strøk Ø-V og NØ-SV. Slike skjermesammenfaller med strøk N-S i Parti 11 og 12. For Parti 12 er dette tilfelle med sprekkesett NNV-SSØ, som kan betegnes som subparallel med strøk N-S og NV-SØ.

I partier med jevn bruk av injeksjonsmasse i skjermene, eller i partier med én injeksjonsskjerm, bestemmes det at det ikke er mulig å tolke hvilket sprekkesett som sammenfaller med størst masseforbruk. Det førstnevnte er tilfelle i Parti 3, med strøk NØ-SV og Ø-V, og det sistnevnte gjelder Parti 5 (ØNØ-VSV), Parti 6 (Ø-V), Parti 7 (VNV-ØSØ) og Parti 10 (Ø-V og NNØ-SSV).

7.1.2 Tunnelstuffer

Ut fra partiene som er valgt, kan generelle trender observeres i de tre tunnelstufferne. Longva stoff sine partier er lange og består av flere overlappende injeksjonsskjermer, og hvert parti i Fjørtofta sør er begrenset av én eller to skjermesammenfaller uten overlapp. Partiene i Fjørtofta nord kan deles i to kategorier, der Parti 9 og 10 ligner partiene innen Fjørtofta sør og Parti 11 og 12 kan sammenlignes med partiene i Longva stoff, både i partilengde og plassering av injeksjonsskjermer.

Det er store variasjoner i bergmassekvalitet i tunnelstrekningene tilhørende Longva stoff. Seksjoner med «dårlig» eller «svært dårlig» bergmasse, med sprekkesett som er subparallel med strøk Ø-V i stoffens fire partier, har store forbruk av injeksjonsmasse. Fjørtofta sør og de to første partiene til Fjørtofta nord (9 og 10) har for det meste «god» bergmasse med sprekkesett subparallel med enten Ø-V, NV-SØ eller NØ-SV, og mengde injeksjonsmasse er i snitt stort. De to siste partiene i Fjørtofta nord stoff, Parti 11 og 12, har stort sett større masseforbruk i bergmasse med lavere Q-verdier der sprekkesett er subparallel med retning N-S og Ø-V.

Alle partiene innenfor Fjørtofta sør og de to første partiene i Fjørtofta nord inneholder sprekkesett som er orientert subparallel med Ø-V, den antatte retningen til største hovedspenning ved Nordøyane. Dette gjelder også skjermen med størst masseforbruk i starten av Parti 11, som i likhet med disse partiene befinner seg i bergmasse med høy kvalitet. Lave spenninger ved diskontinuitetene kan føre til større sprekkeåpninger, der selv små økninger i sprekkeåpningen kan medføre store økninger i hydraulisk konduktivitet og transmissivitet.

7.1.3 Mulige feilkilder

Utvalg av partier

Utvalget av partier i kapittel 4.3 er begrenset i at det kun ble valgt fullstendig eller for det meste injiserte deler av tunnelene. Utvalget som undersøkes er altså bergmasse der det under tunnelarbeid ble bestemt at injeksjon var nødvendig. Forskjellen mellom injisert og uninisert bergmasse kan studeres om partier uten injeksjon også vurderes, og dermed gi et mer fullstendig bilde.

Det kan hende at valget av forskjellige typer partier, der noen er lange med flere overlappende skjerner og andre inneholder én eller to skjerner uten overlapp, har en påvirkning på typen bergmasse som møtes i forhold til mengden injeksjonsmasse. Fjørtofta sør sine fire partier (pel nr. 27438- 26256) og de to første partiene i Fjørtofta nord (pel nr. 32079-32420) har god bergmasse og moderat til stort forbruk av injeksjonsmasse. Disse partiene ligger flere hundre meter fra hverandre og representerer én eller to skjerner omringet av store mengder bergmasse med god kvalitet som ikke måtte injiseres.

Slike spredte injeksjonsskjermer innenfor lange strekninger med godt berg har sannsynligvis, om de tilgjengelige geologiske- og injeksjonsdata tolkes riktig, trekk som ikke fremheves i geologisk kartlegging. Et eksempel på geologiske strukturer som kan føre til mye innlekkasje er åpne sprekker, ofte dannet av strekkbrudd, som står omtrent 45° på forkastninger (Palmstrøm et al., 2003, Selmer-Olsen, 1981). Slike sprekker kan ha vært dannet langs Nordøyvegens tunneltrasé som følge av forkastningsbevegelser innenfor Møre-Trøndelag forkastningskompleks.

Data utenfor oppgavens omfang

Data som ikke er inkludert i oppgaven kunne ha vært brukt til å bedre forklare geologien og injeksjonsarbeidet innenfor de tolv partiene. Den beste mulige kilden for geologiske data ville vært målinger i uninisert bergmasse. De detaljerte målingene gjort i borehull foran stuff før injeksjon av Rastegarnia et al. (2017) omfattet Q-verdi og ulike målinger av oppsprekking, inkludert størrelsen på sprekkeåpninger. Slike målinger kunne gitt betydelig mer informasjon om sprekkenes karakter, men ble ikke gjort for Nordøyvegens tunneler. Befaring i tunnelen og nærmere undersøkelse av sprekkenes karakter kunne vært til hjelp, men regelmessig påføring av sprøytebetong gjør personlig kontroll av sprekkenes karakter umulig i ettertid. Bilder av hver salve er derimot tilgjengelige og kan analyseres. I utgravet tunnel vil det likevel observeres bergmasse som allerede er injisert.

Med informasjon om diskontinuiteters egenskaper før injeksjon, kunne årsaken til stort masseforbruk i skjerner med ellers god bergmasse blitt vurdert med større nøyaktighet. Sprekkenes karakter, inkludert sprekkåpningene, kan indikere om sprekkenes var dannet ved strekkbrudd, som videre kan tolkes til å være skapt av nærliggende forkastninger.

Flere typer injeksjonsdata undersøkes ikke i oppgaven, inkludert faktorer som regnes som lite relevante slik som antall borehull i hver skjerm, men andre faktorer som ikke sees på kan påvirke mengden injeksjonsmasse som brukes. Inntrengningen av injeksjonsmasse inn i sprekker øker om trykket er stort (Klüver og Kveen, 2004). Trykket og følgende hydraulisk jekking bidrar til å påvirke masseforbruket, ved at utvidelse av eksisterende sprekker og åpning av nye sprekker skaper et større volum med hulrom som må injiseres (Hognestad et al., 2010, Rafi og Stille, 2015b).

Mulige feiltolkninger av injeksjonsdata

Når mengden injeksjonsmasse i skjerner diskuteres er de delt opp individuelt, siden det er mest kompatibelt med den kvantitative analysen av injeksjonsskjermer. Det er derimot mulig at overlappet mellom injeksjonsskjermer har en betydelig påvirkning på mengden injeksjonsmasse som bør forventes. Når bergmasse foran tunnelstiffen er delvis injisert av en tidligere injeksjonsskjerm kan masseforbruket bli mindre enn om det var uninisert. Volumet av sprekker som må fylles er redusert, med mindre et større volum foran stoff åpnes av jekking fra den tidligere injeksjonen. Om det antas at volumet som må injiseres reduseres, kan man forvente mindre injeksjonsmassebruk i overlappende skjerner og større forbruk i skjerner uten overlapp. Om antakelsen er riktig kan dette bidra til å forklare de forholdsvis store mengdene injeksjonsmasse i Fjørtofta sør og de to første partiene i Fjørtofta nord, der skjerner uten overlapp ble injisert i bergmasse med gjennomgående god kvalitet og lite oppsprekking.

Metodene som brukes antar at mengden injeksjonsmasse i en skjerm er en funksjon av de lokale geologiske forholdene, uten å bygge inn metoder for å korrigere andre faktorer. Injeksjonsriggene er drevet av riggoperatører som kan ha fremgangsmåter med ulik trykkoppbygging og totalt masseforbruk, noe som ble vurdert til å være tilfelle i Bodøtunnelen i en masteroppgave av Pettersen (2016). Potensielle forskjeller mellom operatører er altså en faktor som øker usikkerheten av resultatene.

Mengden injeksjonsmasse i hver skjerm kan også påvirkes av vann/semment-forholdet (v/c), der tyntflytende semment med høyere v/c ofte medfører store masseforbruk (Klüver og Kveen, 2004). Dette observeres ikke i partiene som undersøkes. Tunnelenes partier med mikrosemment har injeksjonsskjermer som ser ut til å ha mindre forbruk i forhold til skjermer med industrisemment i lignende bergmasse. Større forbruk av industrisemment enn mikrosemment støttes av Strømsvik (2019b).

Mulige feil i data

Geologiske data og injeksjonsdata som presenteres i kapittel 5 tolkes til å være nøyaktige i kildene angitt i kapittel 4.1 og 4.2. Det utføres geologisk kartlegging på stuff for å dimensjonere bergsikring, ikke for å beskrive vannførende diskontinuiteter eller andre soner med kapasitet for å bli injisert med store mengder semment. For denne grunn kan det hende at visse viktige Q-parametere og beskrivelser av diskontinuiteter er tolket på en måte som medfører større usikkerhet i oppgaven. Siden Q-verdi øker etter injeksjon (Barton, 2002), vil det alltid være en viss feil i tolkninger av bergmasse som allerede er injisert.

Injeksjonsskjermene innenfor Parti 5, 6 og 7 i Fjørtofta sør og Parti 9 i Fjørtofta nord har motsigende data i sammendragsrapporter og geologisk kartlegging. Dette inkluderer ulike mengder injeksjonsmasse i skjermer og ulike plasseringer av skjermene. En grunnleggende antakelse i oppgaven er at sammendragsrapportene er nøyaktige, men det kan hende at informasjonen presentert i utbrettene er riktig i tilfeller med konflikter.

Parti 5, 6 og 9 flyttes kun 1-3 meter med lite til ingen endring i Q-verdier og ingen endring i målte diskontinuiteter. Injeksjonsskjermen i Parti 5 ville, om endret, hatt en økt mengde injeksjonsmasse på 38 232 kg fra 38 000 kg, en økning på 0,6%. Parti 7 i Fjørtofta sør ville i større grad endres ved at skjermen flyttes 30 meter, til bergmasse med høyere Q-verdi og en endring av dominerende sprekkeseff fra strøk VNV-ØSØ til strøk ØNØ-VSV. I begge tilfeller er Q-verdiene er i snitt høye, begge sprekkeseffene er subparallele med Ø-V og mengden injeksjonsmasse er henholdsvis lite endret og uendret, som vil si at ingen tolkninger i oppgaven ville vært påvirket om motsigende data ble brukt for skjermene.

7.2 Diskusjon om analyse av injeksjonsskjermer

Geologiske data og injeksjonsdata fra injeksjonsskjermene innenfor oppgavens tolv partier ble analysert i kapittel 6. Relasjonen mellom masseforbruk og geologiske data, henholdsvis Q-systemet og diskontinuiteter subparallele med største spenningsretning, presenteres og oppgavens seks hypoteser vurderes.

7.2.1 Q-systemet og injeksjon

Vurdering av hypoteser

Hypotesene om korrelasjoner mellom Q-verdi og fire parametere (RQD, RQD/J_n, J_r/J_a og SRF), og mengde injeksjonsmasse gjelder hvert injiserte pelnummer i de utvalgte partiene. Ved sterke korrelasjoner har trendlinjen mellom den geologiske parameteren og masseforbruket $r^2 > 0,25$, og korrelasjonen regnes til å være moderat ved $0,25 > r^2 > 0,09$. Hypotesene gjelder kun for Q-verdier større enn 0,1, ettersom teori og resultater fra Holmøy (2008) støtter at bergmasse med svært dårlig kvalitet har mindre hydraulisk konduktivitet.

I diagrammer med trendlinjer er korrelasjonen størst for J_r/J_a, som har moderat korrelasjon ($r^2 = 0,2072$). Denne trenden er negativ, som vil si at det brukes mindre injeksjonsmasse i skjermene med større J_r/J_a, noe som er forventet ut fra hypotese 1.4. De andre parameterne og tilhørende hypoteser korrelerer dårlig med mengde injeksjonsmasse, med r^2 fra 0,0008 (RQD/J_n) til 0,0557 (RQD). Det kan altså ikke gis sterk støtte til de fem hypotesene, men en moderat negativ trend tydes for J_r/J_a. Det nevnes bare sterke korrelasjoner videre, siden disse bidrar mest til å påvirke hypotesene.

De tre tunnelstoffene viser ulike trendlinjer for tilhørende injeksjonsskjermer. I Longva stoff har skjermene sterke korrelasjoner med mengde injeksjonsmasse for parameterne J_r/J_a ($r^2 = 0,7355$), Q-verdi ($r^2 = 0,6382$), RQD ($r^2 = 0,4521$) og RQD/J_n ($r^2 = 0,4261$). Alle trendene er negative, som er forventet fra hypotesene. Dette vil si at hypotese 1.1, 1.2, 1.3 og 1.4 støttes innenfor Longva stoff. I Fjørtofta sør stoff har J_r/J_a en sterk negativ korrelasjon ($r^2 = 0,406$), som vil si at hypotese 1.4 støttes for denne stoffen. RQD og RQD/J_n har derimot sterke positive korrelasjoner, som er motsatt retning fra hva teori tilsier. Skjermene innenfor Fjørtofta nord har ingen sterke korrelasjoner, men en stor andel av skjermene ser ut til å ligge rundt trendlinjen til Longva. Det kan altså gis støtte til hypotesene for Q-verdi, RQD og RQD/J_n innenfor Longva stoff, men parameteren som skiller seg ut er J_r/J_a, som er sterkt negativt korrelert for både Longva og Fjørtofta sør stoff.

De fem skjermene som ligger innenfor Fjørtofta sør stuff og de seks skjermene i Fjørtofta nord med pelnummer nærmest til Fjørtofta sør («Fjørtofta») skilles fra resten av injeksjonsskjermene («Longva/Fjørtoftfjorden») for å undersøke om to «skjermtyper» kan tolkes. Trendlinjene til «Longva/Fjørtoftfjorden» følger Longva stuff sine trendlinjer med sterke korrelasjoner for J_r/J_a , Q-verdi og RQD, men alle har mindre verdier for r^2 . J_r/J_a er igjen parameteren som korrelerer mest med mengde injeksjonsmasse. Skjermene innenfor «Fjørtofta» har ingen sterke korrelasjoner. Visuelle inspeksjoner støtter at disse to utvalgene mulig beskriver to typer injeksjonsskjermer som er adskilte i diagrammene.

Analysen av alle skjermer kan ikke støtte noen av hypotesene, men trender som observeres i analysen styrkes av observasjonene som er gjort ved å dele skjermene opp etter tunnelstuff og videre tolkning av to skjermtyper. Ut fra disse observasjonene ser det ut til å være en underliggende korrelasjon med masseforbruk for flere parametere i Q-systemet, som ikke er reflektert i enkelte skjermer med både høye Q-verdier og store mengder injeksjonsmasse. Sterke korrelasjoner observeres i Longva stuff sine skjermer sammen med skjermene lengst fra Longva stuff i Parti 11 og Parti 12, noe som indikerer at korrelasjoner mellom Q-systemet og injeksjon kan oppdages om årsakene til eksistensen av skjermer med stort masseforbruk og god bergmassekvalitet avklares.

Resultatene peker entydig på at bergmassens friksjonsforhold J_r/J_a har størst sammenheng med mengden injeksjonsmasse som brukes. Dette samsvarer med resultatene til Bhasin et al. (2002) der J_r/J_a fører til betraktelig økning i masseforbruk, og støttes av at større sprekkeruhet fører til mindre inntrengning av injeksjonsmasse (Barton, 2003). Det etterfølges av Q-verdi som korrelerer med masseforbruk ifølge Rastegarnia et al. (2017), RQD som ifølge Saeidi et al. (2013) bør korrelere med mengde injeksjonsmasse, RQD/J_n og til slutt SRF. Følgende faktorer kan være med på å forklare forskjellen mellom injeksjonsskjermene som korrelerer med Longva stuff sin trendlinje og resten av skjermene:

- Geologiske strukturer som ikke ble kartlagt med Q-systemet. Diskuteres i dette kapitlet.
- Mangel på korreksjon for overlapp mellom skjermer. Diskuteres i kapittel 7.2.3.
- Variasjoner i injeksjonsprosessen som ikke ble avdekket. Diskuteres i kapittel 7.2.3.

Mulige feilkilder

Om det finnes feil eller manglende informasjon som fører til at injeksjonsskjermer ikke passer trendlinjene til Longva stuff, er det relevant å vurdere i hvor stor grad dette kommer fra geologiske data i forhold til injeksjonsdata. En pekepinn på at problemene i større grad ligger i geologiske data kan observeres i trendlinjer mellom innlekkasje og Q-verdi i Figur 6.8. Trendlinjer for både Longva og Fjørtofta sør stuff representerer negative trender som forventet. Fjørtofta sør sine skjermer følger en trendlinje som er parallell med Longva stuff, og er forskjøvet mot høyere Q-verdier. Dette peker på at det finnes feil eller manglende data i kartlagt geologi for skjermene utenfor trendlinjen til Longva stuff som ikke forklares av kartlegging med Q-systemet. I tillegg faller skjermene i Fjørtofta nord delvis innenfor de andre to trendlinjene, i likhet med Fjørtofta nord sine skjermer i diagrammer for mengde injeksjonsmasse og Q-systemet. Siden injeksjonsdata ikke er brukt i diagrammet for Q-verdi mot innlekkasje, er delte trekk ikke avhengige av injeksjon.

Viktige faktorer som kan ha påvirket forskjellen mellom typer injeksjonsskjermer ble presentert i kapittel 7.1.3. Korrelasjonen mellom mengde injeksjonsmasse og Q-systemet kan i stor grad være påvirket av typen bergmasse som finnes i skjermene. Dersom det antas at all geologisk kartlegging og alle injeksjonsdata er nøyaktige, bør geologiske strukturer som fører til større masseforbruk opptre i større grad i partiene med skjermer som skiller seg ut. Disse strukturene vektlegges i så fall ikke av Q-systemet, og må identifiseres og kartlegges for å kunne dra mer nøyaktige korrelasjoner mellom flere typer bergmasse og mengden injeksjonsmasse som brukes. En mulighet for Nordøyvegen er at åpne sprekker med store sprekkeåpninger, potensielt som følge av bevegelser i nærliggende forkastninger, opptre i visse partier og fører til store økninger i mengde injeksjonsmasse til tross for høye verdier for RQD og høye Q-verdier.

De positive korrelasjonene til RQD og RQD/J_n i Fjørtofta sør går mot antakelsen at mer oppsprukket bergmasse har større forbruk av injeksjonsmasse, en antakelse som støttes av Klüver og Kveen (2004) og Saeidi et al. (2013). Geologiske strukturer som ikke fremheves av Q-systemet kan ha opptrådt i større grad i Fjørtofta sør sine skjermer med høyere verdier for RQD og RQD/J_n . En kilde for usikkerhet i trendlinjer for Fjørtofta sør er at det kun undersøkes fem injeksjonsskjermer. Om regresjoner gjøres med utvalg som inneholder et fåtall datapunkter, øker sannsynligheten for at tilfeldige variasjoner gir høye verdier for r^2 . Et ekstremt eksempel på dette er at r^2 alltid vil være lik 1 om det utføres en regresjon mellom to punkter.

Av alle Q-systemets parametere med hypoteser, er resultatene for SRF minst korrelerende med mengde injeksjonsmasse. Sterke korrelasjoner finnes ikke i noen tunnelstuffer, men en moderat positiv trend observeres i Longva stuff. Trenden er i riktig retning i forhold til hypotesen, som sier at lave spenninger fører til økt bruk av injeksjonsmasse. I likhet med en rekke andre inngangsparametere, slik som J_a , J_r og J_n , er SRF kvalitativ og fastsatt med subjektive tolkninger. Disse Q-parametere representeres med bestemte diskrete verdier i hver kartlagt salve, som fører til at datapunkter ofte samles langs visse verdier, slik som $SRF = 1$ (Figur 6.17). Parameteren SRF kan være mer interessant å undersøke i tunneler med større variasjoner i spenningsforhold, eller om bergmasse med $SRF = 1$ ekskluderes.

Skjermene som skiller seg ut ved å ha høye Q-verdier og høye forbruk av injeksjonsmasse har også de elleve laveste verdiene av J_n i utvalget av injeksjonsskjermer som er analysert (Figur 6.34). Det kan hende at bergmasse med få sprekkesett passer dårligere i modellene eller at det konsekvent har vært kartlagt for lav J_n ved disse skjermene. De lave J_n -verdiene reduserer også korrelasjonen til RQD/J_n .

Q-verdier måles i injisert bergmasse, der bergmassekvaliteten er påvist til å øke (Barton, 2002), men det går ut fra at eventuelle økninger ikke påvirker resultatene av kartleggingen betydelig. En annen antakelse som gjøres er at snittet av Q-verdier eller Q-parametere innenfor en skjerm er representativt for påvirkningen Q-systemet har på injeksjonen. Det er derimot mulig at det ville vært mer nøyaktig å vektlegge kartlagte salver innenfor skjermene på ulikt vis, om det antas at uproporsjonale mengder injeksjonsmasse brukes i ulike deler av skjermene. Det ville da antas at trendene i hypotesene er riktige, og enten kun ta salver innenfor injeksjonsskjermer med lavere Q-verdi i betraktning eller gjøre en annen form for prioritering av lave Q-verdier. Det største problemet med å vektlegge salver innenfor skjermene er at det må gjøres store antakelser om hvor injeksjonsmassen strømmer. Bruken av gjennomsnittsverdier for injeksjonsskjermer gir også en større variasjon i verdier som kan forbedre korrelasjoner, i forhold til et mindre antall salver med et fåtall diskrete verdier.

7.2.2 Subparallele diskontinuiteter og injeksjon

Vurdering av hypotese

Hypotese 2, som omhandler sammenhengen mellom diskontinuiteter subparallele med største hovedspenningsretning (antatt σ_1 er Ø-V) og mengde injeksjonsmasse, ble undersøkt for alle injeksjonsskjermer i oppgavens partier. En uparet T-test av skjermene med og uten subparallele sprekkese sett gir en p-verdi, der p-verdi $< 0,05$ betyr sterk korrelasjon og p-verdi mellom 0,05 og 0,1 tolkes som moderat korrelasjon. En bekreftelse av hypotesen vil si at det er en forskjell mellom de to utvalgene.

Hypotesen kan ikke støttes ettersom p-verdi = 0,052, som regnes til å være en moderat korrelasjon. Resultatet er nært kriteriet på p-verdi $< 0,05$, men den svakere korrelasjonen aksepteres innenfor de forhåndsdefinerte rammene. Grensen for p-verdi på 0,05 er bredt brukt i statistikk for å bestemme om resultater er signifikante, men det er for eksempel liten forskjell mellom sannsynligheter som uttrykkes av p-verdi = 0,049 (hypotese støttes) og p-verdi = 0,050 (hypotese støttes ikke). Forskjellen mellom de to utvalgene kan observeres i boksploTT (Figur 6.37), der medianen av mengde injeksjonsmasse i skjermene med subparallele sprekkese sett er større enn øvre kvartil (Q3) til skjermene uten subparallele sprekkese sett. Trenden følger antakelsen i hypotese 2.

Skjermene innenfor Longva stoff støtter hypotesen, med p-verdi = 0,004, noe som reflekteres i boksploTTet i Figur 6.38. Siden Fjørtofta sør har subparallele sprekker i alle skjermene kan det ikke dras noen korrelasjoner, og det er dårlig korrelasjon for skjermene i Fjørtofta nord ut fra visuell inspeksjon av boksploTTet i Figur 6.40.

Trenden som forventes av hypotesen om injeksjon og subparallele sprekkese sett kan tydes i resultatets moderate korrelasjon, men hypotesen støttes ikke. Det kommes fram til at sprekkese sett med strøk subparallele med Ø-V korrelerer med større mengder injeksjonsmasse i skjermene som tilhører Longva stoff. Injeksjonsskjermene som skiller seg ut i Fjørtofta nord stoff kan være påvirket av ulike faktorer, inkludert:

- Største hovedspenningsretning er ikke orientert Ø-V. Diskuteres i dette kapitlet.
- Geologiske strukturer som ikke er fremhevet i kartlegging. Diskuteres i dette kapitlet.
- Mangel på korreksjon for overlapp mellom skjermene. Diskuteres i kapittel 7.2.3.
- Variasjoner i injeksjonsprosessen som ikke ble avdekket. Diskuteres i kapittel 7.2.3.

Mulige feilkilder

Et grunnleggende valg i tolkningen av sprekkesett innenfor injeksjonsskjermer er at det sees på hvert sprekkesett som ligger innenfor skjermene. Alternativt kunne bare det mest fremtredende sprekkesettet for hver skjerm inkluderes, men det er ingen garanti for at det brukes mest injeksjonsmasse i disse sprekkesettene. Det er mulig at sprekkesett med mindre antall sprekker har egenskaper, slik som større sprekkeåpning og annet sprekkefyll, som fører til større masseforbruk.

En faktor som påvirker sprekkeåpningen er orienteringen av bergspenninger, og det vurderes i diskusjon med Li (2021) at Nordøyvegen har anisotropiske spenninger der største hovedspenningsretning (σ_1) er Ø-V. Moderate korrelasjoner for sprekkesett subparallele med Ø-V og masseforbruk viser en viss trend, men ikke nok til å støtte hypotesen, i stor grad som følge av data fra skjerner i Fjørtofta nord stuff. Om den antatte retningen for σ_1 er nøyaktig for alle tunnelstuffene er hypotesen trolig ikke gyldig, men det kan hende at antatt spenningsretning ikke gjelder for stoffen. Det er mulig at σ_1 er orientert Ø-V for Longva stuff, der p-verdi = 0,004 bekrefter hypotesen, men at Fjørtofta nord stuff har ulike spenningsforhold. Den beste metoden for å teste dette ville vært å utføre spenningsmålinger innenfor Longva stuff og Fjørtofta nord stuff.

Dersom σ_1 er orientert Ø-V for begge tunnelene som undersøkes, kan en årsak for de ulike resultatene være at Fjørtofta nord har flere «ikke-subparallele» sprekkesett med egenskaper som medvirker til masseforbruk, enn Longva stuff. Det kan eksistere åpne sprekker med større sprekkeåpninger, til tross for at de utsettes for større spenninger enn subparallele sprekker. Selv uten å være subparallele med σ_1 , vil resultatet være åpne diskontinuiteter med større sprekkeåpninger enn omkringliggende subparallele sprekker. Om åpne sprekker dannet av forkastningsbevegelser er til stede og har en stor påvirkning på bruk av injeksjonsmasse, er det mulig at disse er orientert i en annen retning ved Fjørtofta nord stuff.

Som observert av Selmer-Olsen (1981), er de fleste sprekker med stor vannføring steile, med fall større enn 60°. Det injiseres i større grad i bergmasse med større potensial for innlekkasje for å tette tunnelen, og det kan for denne grunn tenkes at det ikke bør inkluderes sprekkesett med mindre fallvinkler. Alle sprekkesett inkluderes i analysen, ettersom sammenhenger mellom fall og masseforbruk har lite direkte støtte i presentert teori. Påvirkningen av bergspenninger på diskontinuiteter vil også endres som følge av forskjeller i fall, ved at vinklene hovedspenningene treffer sprekkeplanet med endres.

7.2.3 Usikkerhet i injeksjonsdata

Alle hypotesene som undersøkes, både om Q-systemet og om orienteringen av diskontinuiteter, går ut fra at mengden injeksjonsmasse i en skjerm er nøyaktig og representativ for de geologiske forholdene i bergmassen som injiseres. Om denne antakelsen er ugyldig kan ikke hypotesene støttes med metodene brukt i oppgaven. Forskjellige trender i ulike deler av tunnelene kan komme fra geologiske faktorer som enten ikke inkluderes eller fremheves i geologisk kartlegging eller, som diskutert i videre avsnitt, feiltolkninger av injeksjonsdata.

Usikkerheten i mengden injeksjonsmasse injisert mellom start- og sluttpele til en injeksjonsskjerm, som følge av varierende overlapp med tidligere injisert bergmasse, er vurdert til å ha en påvirkning på masseforbruket i en skjerm. Innvirkningen til overlappet mellom injeksjonsskjermer beskrives i større detalj i kapittel 7.1.3.

Påvirkningen av skjermenes overlapp på mengde injeksjonsmasse vurderes til å være relevant for korrelasjonene mellom Q-systemet og masseforbruk, siden det observeres elleve injeksjonsskjermer (alle skjermene mellom pel nr. 26256 og pel nr. 32420) uten overlapp med store masseforbruk til tross for store Q-verdier. Det er mulig at hypotesen for J_r/J_a , den sterkest korrelerte Q-parameteren, ville vært bekreftet om det ble anvendt en representativ korreksjon for overlapp, eller om oppgaven kun inkluderte skjermer med like mengder overlapp. Ettersom p-verdi for forskjellen mellom skjermer med og uten subparallele sprekkesett med σ_1 er svært nær kriteriet for støtte av hypotesen, regnes det som sannsynlig at en god korreksjon for overlapp eller et utvalg med like overlapp kunne ført til en bekreftelse av hypotesen.

Mengden injeksjonsmasse i hver skjerm er påvirket av valg gjort i injeksjonsprosessen, som kan være avhengige av ulike injeksjonsstrategier eller individuelle forskjeller mellom riggoperatører. Disse inkluderer strømmingen og trykkoppbyggingen mens injeksjonen pågår, samt injeksjonsmassens sammensetning, inkludert v/c-forhold og type sement. Det vurderes i kapittel 7.1.3 at v/c-forhold ikke ser ut til å korrelere med masseforbruk, og skjermer med mikrosement ser ut til å ha lavere forbruk av injeksjonsmasse en skjermer i lik bergmasse. Siden påvirkningen av trykk og følgende jekking ikke er diskutert i oppgaven, ville det vært nyttig å gjøre lignende kvantitative analyser som også tar disse i betraktning.

8 Konklusjon

Det er innledningsvis i denne masteroppgaven presentert teori om hydrogeologi og innlekkasje i berg og teori om sementbasert forinjeksjon. Data fra to av Nordøyvegens veitunneler, fra tre tunnelstuffer (Longva, Fjørtofta sør og Fjørtofta nord), er vurdert fra to forskjellige perspektiv:

- Evaluering av geologien og injeksjonen i tolv partier med utført forinjeksjon.
- Kvantitative analyser av injeksjonsskjermer, for å undersøke korrelasjoner mellom mengde injeksjonsmasse og Q-systemet / sprekesett subparallele med største hovedspenning.

Hovedmålet til oppgaven er å etablere om det finnes sammenhenger mellom forbruket av injeksjonsmasse og de nevnte geologiske parameterne. Konklusjonene representerer best prosjekter med høytrykksinjeksjon dominert av grunnfjellsgneiser og lignende bergarter.

Oppgavens hypoteser er basert på to støttede hypoteser om innlekkasje av Holmøy (2008):

- Det er større innlekkasje i bergmasse med Q-verdier mellom 0,1 og 10, enn i bergmasse med Q-verdier under 0,1.
- Vannførende diskontinuiteter er subparallele med største hovedspenning ($\pm 30^\circ$).

Det bestemmes å undersøke om det finnes korrelasjoner mellom injeksjon og Q-systemet for Q-verdier større enn 0,1. I tillegg vurderes det at største hovedspenning er orientert Ø-V for Nordøyvegen etter diskusjon med Li (2021). Med basis i hypotesene til Holmøy (2008), sammen med støttende teori om forholdet mellom injeksjonsmasseforbruk og geologi, kommes det fram til seks hypoteser som vurderes i oppgavens analyser av 48 injeksjonsskjermer. Fem av hypotesene (hypoteser 1.1-1.5) omhandler Q-systemet for Q-verdi $> 0,1$. Hypotesene påstår at det brukes mindre injeksjonsmasse i skjermer med større Q-verdi, RQD, RQD/J_n og J_r/J_a , og at masseforbruket er mindre i skjermer med mindre SRF. Hypotese 2 sier at det brukes mer sement i injeksjonsskjermer med sprekker som er subparallele med største hovedspenning.

Ut fra forhåndsdefinerte kriterier for støtte av hypotesene kan ingen av hypotesene bekreftes, ettersom ingen sterke korrelasjoner finnes mellom injeksjonsskjermene. To parametere har moderate korrelasjoner med masseforbruk, i samme retning som hypotesene: sprekkenes friksjonsforhold (J_r/J_a), med en betydelig høyere r^2 enn de andre Q-parameterne, og sprekker subparallele med strøk Ø-V, med en p-verdi nær kriteriet for sterk korrelasjon.

Følgende observasjoner ble gjort ved evaluering av partiene:

- Injeksjonsskjermer har større overlapp i bergmasse med lave Q-verdier.
- De fleste skjermene har større masseforbruk ved lave Q-verdier.
- Enkelte skjermer, inkludert alle innenfor Parti 5-10, skiller seg ut ved å ha store forbruk av injeksjonsmasse i bergmasse med høye Q-verdier.
- **Longva stuff:** Mye injeksjonsmasse brukes i seksjoner med lav Q-verdi og sprekkeseett subparallele med Ø-V.
- **Fjørtofta sør og Fjørtofta nord (Parti 9 og 10):** Mye injeksjonsmasse brukes i bergmasse med jevnt høy Q-verdi og sprekkeseett subparallele med Ø-V, NV-SØ eller NØ-SV.
- **Fjørtofta nord (Parti 11 og 12):** Større mengder injeksjonsmasse brukes i bergmasse med lav Q-verdi og sprekkeseett subparallele med N-S og Ø-V.

Dersom hypotesene undersøkes for skjermene innenfor Longva stuff, får masseforbruk en sterk negativ korrelasjon med Q-verdi og alle undersøkte Q-parametere unntatt SRF, der en moderat positiv korrelasjon observeres. Det gis også sterk støtte til hypotese 2, hypotesen om sprekkeseett subparallele med største hovedspenning, om det kun sees på skjermer i Longva stuff.

De sterke trendene innenfor Longva stuff kan være en refleksjon av underliggende korrelasjoner mellom geologi og mengde injeksjonsmasse. Det er mulig at tolkningen av data eller analysemetodene må forbedres slik at sammenhenger kan undersøkes i større utvalg med større geologisk variasjon.

9 Videre arbeid

Til tross for at ingen hypoteser støttes, vurderes det at det er verdt å utføre lignende analyser for fremtidige prosjekter. Alternativt ville det vært interessant å se nye studier av Nordøyvegens tunneler som bygger på analysene utført i masteroppgaven. Forslagene i de følgende avsnittene kan være relevante for fremtidig arbeid relatert til Nordøyvegen eller andre prosjekter.

Berggrunnen som ble undersøkt i oppgaven er dominert av prekambriske gneiser og andre harde og folierte metamorfe bergarter. Det vurderes at det er viktig å utføre lignende studier med data fra andre bergartstyper for å et mer komplett overblikk av forholdet mellom masseforbruk og geologi. I tillegg kan partier med uinjisert bergmasse sammenlignes med injiserte partier, for å evaluere mulige forskjeller i de geologiske forholdene.

Om sammenhenger mellom Q-systemet og injeksjonsmasse undersøkes, anbefales det å se på sprekkenes friksjonsforhold (J_r/J_a) og de to parameterne som inngår i forholdet (J_r og J_a), grunnet negativ moderat korrelasjon for J_r/J_a i oppgaven.

Data fra geologisk kartlegging som brukes i analyser av masseforbruk bør ta høyde for at det finnes geologiske strukturer med karakteristikk som ikke vektlegges i kartlegging av Q-systemet og diskontinuiteter. Målinger i borehull foran stuff, før injeksjon, er en metode som undersøker geologien mer nøyaktig. Det anbefales å utføre videre studier om sammenhengen mellom strukturer som fører til økt injeksjonsmassebruk og konvensjonell geologisk kartlegging på stuff.

Det ville vært til stor hjelp om spenningsmålinger utføres i prosjekter der det utføres videre forskning på korrelasjoner mellom mengde injeksjonsmasse og orienteringen av diskontinuiteter i forhold til største hovedspenningsretning.

Påvirkningen av overlapp mellom injeksjonsskjermer på masseforbruk i individuelle skjermer bør også undersøkes. Det vurderes at man kan dra nytte av en metode som korrigerer mengden injeksjonsmasse i en skjerm med overlapp til mengden som ville forventes i uinjisert bergmasse.

Injeksjonstrykket og hydraulisk jekking er ikke undersøkt i oppgaven, selv om deres påvirkning på mengde injeksjonsmasse er observert i tidligere studier. Det kan være gunstig å ta trykk og jekking i betraktning i fremtidige studier som omhandler masseforbruk i injeksjonsskjermer.

Referanseliste

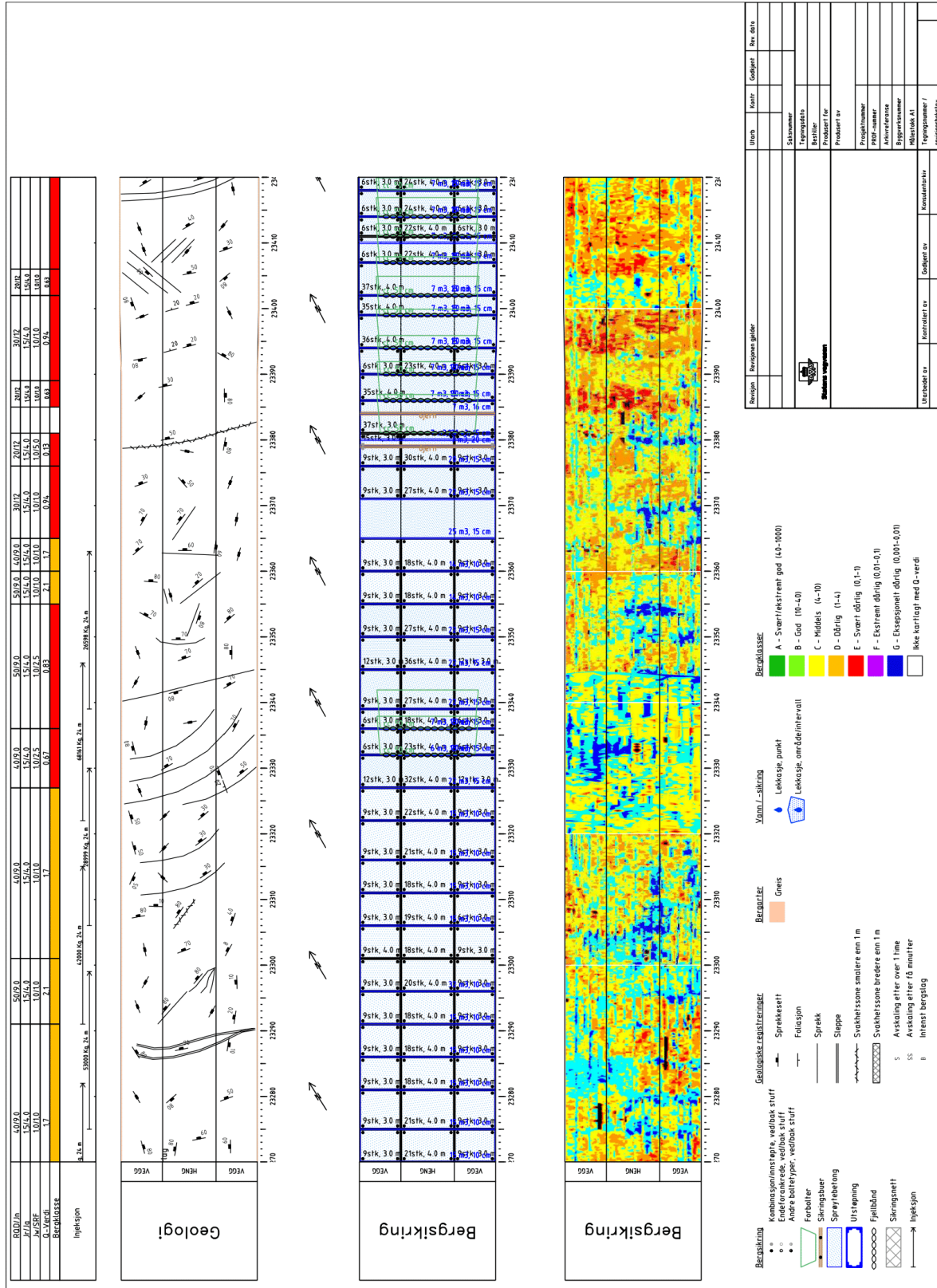
- AARSET, A., BACKER, L., FAGERMO, J. I., FROGNER, E., GRØV, E., HOGNESTAD, H. O., KVEEN, A. & LINDSTRØM, M. 2011. Rock Mass Grouting. Norsk Forening for Fjellsprengningsteknikk (NFF).
- BARTON, N. 1987. Predicting the behaviour of underground openings in jointed rock. *4th Manual Rocha Memorial Lecture*. Lisbon.
- BARTON, N. 2002. Some new Q-value correlations to assist in site characterisation and tunnel design. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 39, s. 185-216.
- BARTON, N. 2003. Teoretisk og empirisk forståelse av forinjeksjon og mulighet for redusert sikringsmengde i utvalgte tunnelstrekninger. Oslo: Vegdirektoratet.
- BEVER CONTROL AS. 2021. *Bever team. Tunnelplanlegging og rapportering* [Online]. Tilgjengelig fra: <https://beverteamonline.azurewebsites.net/> [Hentet august 2020-mai 2021].
- BHASIN, R., HAGEN, A. W., NORDGULEN, Ø. & BRAATHEN, A. 2002. Frøyatunnelen - Vurdering av injeksjon i forhold til Q-parametre. *Miljø- og samfunnstjenlige tunneler*. Statens vegvesen.
- BOHLOLI, B., MORGAN, E. K., GRØV, E., SKJØLSVOLD, O. & HOGNESTAD, H. O. 2018. Strength and filtration stability of cement grouts at room and true tunnelling temperatures. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 71, s. 193-200.
- BOHLOLI, B., SKJØLSVOLD, O., JUSTNES, H., OLSSON, R., GRØV, E. & AARSET, A. 2019. Cements for tunnel grouting – Rheology and flow properties tested at different temperatures. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 91, s. 103011.
- BRAATHEN, A. & GABRIELSEN, R. H. 2000. Bruddsoner i fjell - oppbygning og definisjoner. *Gråsteinen 7*. Norges geologiske undersøkelse.
- CESANO, D. 2001. *Water Leakage Into Underground Construction in Fractured Rocks: Geological and Hydrogeological Information as a Basis for Prediction*. Doktorgradsavhandling, Kungliga Tekniska Högskolan.
- CESANO, D., OLOFSSON, B. & BAGTZOGLU, A. C. 2000. Parameters regulating groundwater inflows into hard rock tunnels—a statistical study of the Bolmen tunnel in Southern Sweden. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 15, s. 153-165.
- DALMALM, T. 2004. Choice of grouting method for jointed hard rock based on sealing time predictions. Stockholm: Royal Institute of Technology.
- DEHLS, J. F., OLESEN, O. & RØNNING, J. S. 2012. Magnetisk og batymetrisk kartlegging av vegprosjektet Fv. 659 Nordøyvegen, Møre og Romsdal. Norges geologiske undersøkelse (NGU).
- DRAGANOVIĆ, A. & STILLE, H. 2011. Filtration and penetrability of cement-based grout: Study performed with a short slot. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 26, s. 548-559.
- EKLUND, D. & STILLE, H. 2008. Penetrability due to filtration tendency of cement-based grouts. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 23, s. 389-398.
- ESRI 2021. *ArcGIS Pro*.
- FEJERSKOV, M., LINDHOLM, C., MYRVANG, A. & BUNGUM, H. 2000. Crustal stress in and around Norway: a compilation of in situ stress observations. *Geological Society, London, Special Publications*, 167, s. 441-449.

-
- FOSSEN, H., DALLMAN, W. & ANDERSEN, T. B. 2013. Fjellkjeden går til grunne. I: RAMBERG, I. B., BRYHNI, I., NØTTVEDT, A. & RANGNES, K. (red). *Landet blir til - Norges geologi*. Trondheim: Norsk Geologisk Forening.
- FREEZE, R. A. & CHERRY, J. A. 1979. *Groundwater*, Prentice-Hall.
- GANERØD, G. V. & LUTRO, O. 2011. Berggrunnsgeologisk og strukturgeologisk kartlegging i forbindelse med prosjektet Fv. 659 Nordøyvegen, Møre og Romsdal. Norges geologiske undersøkelse (NGU).
- GEODATA AS. 2021. *GeocacheBasis* [Online]. Tilgjengelig fra: https://services.geodataonline.no/arcgis/rest/services/Geocache_UTM33_EUREF89/GeocacheBasis/MapServer [Hentet 28. februar 2021].
- GOTHÄLL, R. & STILLE, H. 2008. Rock Mass Response during High Pressure Grouting.
- GRØV, E. 2021. *Personlig korrespondanse*, SINTEF.
- GRØV, E., FUNEHAG, J. & JANSON, T. 2014. Rock mass grouting in Sweden and Norway A matter of cultural differences or factual causes? *Geotechnical News*, 32.
- GUSTAFSON, G. 2012. *Hydrogeology for rock engineers*, BeFo.
- GUSTAFSON, G., CLAESSION, J. & FRANSSON, Å. 2013. Steering Parameters for Rock Grouting. *Journal of Applied Mathematics*, 2013, s. 269594.
- HANSEN, A., GARSHOL, K., R., B. & GRØV, E. 2017. The principles of Norwegian tunneling. Norsk Forening for Fjellsprengningsteknikk.
- HENRIKSEN, H. 2008. Late Quaternary regional geodynamics and hydraulic properties of the crystalline rocks of Fennoscandia. *Journal of Geodynamics*, 45, s. 49-62.
- HOGNESTAD, H. O., FAGERMO, J. I., KVEEN, A., BACKER, L., GRØV, E., FROGNER, E. & AARSET, A. 2010. Praktisk berginjeksjon for underjordsanlegg. Norsk Forening for Fjellsprengningsteknikk (NFF).
- HOLMØY, K. H. 2008. *Significance of geological parameters for predicting water leakage in hard rock tunnels*. Doktorgradsavhandling, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet.
- HOLMØY, K. H. & NILSEN, B. 2014. Significance of Geological Parameters for Predicting Water Inflow in Hard Rock Tunnels. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 47, s. 853-868.
- HOLMØY, K. H., STRØMSVIK, H. & RISE, T. 2015. State of the art for sementbasert forinjeksjon. SINTEF Byggforsk.
- KARLSON, K. I. 2020. *Personlig korrespondanse*, Møre og Romsdal fylkeskommune.
- KARLSON, K. I. 2021. *Personlig korrespondanse*, Møre og Romsdal fylkeskommune.
- KARLSON, K. I. & GROB, C. 2018a. Fv. 659 Nordøyvegen, Fjørtoftfjordtunnelen, ingeniørgeologisk rapport for konkurransegrunnlag nr. 40090-GEOL-8. Statens vegvesen.
- KARLSON, K. I. & GROB, C. 2018b. Fv. 659 Nordøyvegen, Haramsfjordtunnelen, ingeniørgeologisk rapport for konkurransegrunnlag nr. 40090-GEOL-6. Statens vegvesen.
- KARLSON, K. I. & GROB, C. 2018c. Fv. 659 Nordøyvegen, Nogvafjordtunnelen, ingeniørgeologisk rapport for konkurransegrunnlag nr. 40090-GEOL-7. Statens vegvesen.
- KLÜVER, B. H. 2000. Berginjeksjon. *Intern rapport nr. 2151*. Vegdirektoratet.
- KLÜVER, B. H. & KVEEN, A. 2004. Berginjeksjon i praksis. *Miljø- og samfunnstjenlige tunneler*. Vegdirektoratet.
- KOBAYASHI, S., STILLE, H., GUSTAFSON, G. & STILLE, B. 2008. Real Time Grouting Control Method Development and application using Äspö HRL data. Svensk Kärnbränslehantering AB.
-

-
- LARSEN, T. & HAGEN, S. A. 2017. Hydraulisk splitting ved Romsdalsfjordprosjektet BH04 Vestnes. SINTEF Byggforsk.
- LARSEN, T. & HAGEN, S. A. 2018. Hydraulisk splitting ved Romsdalsfjordprosjektet Borehull KBH03 Tautra. SINTEF Byggforsk.
- LI, C. 2021. *Personlig korrespondanse*, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, Institutt for geovitenskap og petroleum.
- LOMBARDI, G. 2003. Grouting of Rock Masses. *Proceedings of the 3rd International Conference on Grouting and Ground Treatment*. New Orleans, Louisiana, U.S.A.
- LOMBARDI, G. & DEERE, D. 1993. Grouting Design and Control Using the GIN Principle. *International Water Power & Dam Construction*, 46, s. 15-22.
- LØSET, F. 2006. *Norges tunnelgeologi*, Oslo, Norges Geotekniske Institutt.
- LØVÅS, G. G. 2005. *Statistikk for universiteter og høyskoler*, 2. utgave. Oslo, Universitetsforlaget.
- MICROSOFT CORPORATION. u.å. *Choosing the best trendline for your data* [Online]. Tilgjengelig fra: <https://support.microsoft.com/en-us/office/1bb3c9e7-0280-45b5-9ab0-d0c93161daa8> [Hentet 9. april 2021].
- MIRZA, J., SALEH, K., LANGEVIN, M.-A., MIRZA, S., BHUTTA, M. A. R. & TAHIR, M. M. 2013. Properties of microfine cement grouts at 4°C, 10°C and 20°C. *Construction and Building Materials*, 47, s. 1145-1153.
- MØRE OG ROMSDAL FYLKESKOMMUNE. u.å. *Om prosjektet* [Online]. Tilgjengelig fra: <https://mrfylke.no/veg-og-kollektiv/vegprosjekt/fv.-659-nordoeyvegen/om-prosjektet> [Hentet 31. mars 2021].
- NASUTI, A., PASCAL, C. & EBBING, J. 2012. Onshore–offshore potential field analysis of the Møre–Trøndelag Fault Complex and adjacent structures of Mid Norway. *Tectonophysics*, 518-521, s. 17-28.
- NFF 2019. Digitalisation in Norwegian Tunnelling. Norsk Forening for Fjellsprenningsteknikk (NFF).
- NGI 2015. Bruk av Q-systemet; Bergmasseklassifisering og bergforsterking. Norges Geotekniske Institutt.
- NILSEN, B. 2014. Characteristics of Water Ingress in Norwegian Subsea Tunnels. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 47, s. 933-945.
- NILSEN, B. 2016. *Ingeniørgeologi-berg grunnkurskompendium*, Institutt for geologi og bergteknikk, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet.
- NILSEN, B. & BEITNES, A. 2018. Vedr. Fravik for mindre bergoverdekning.: Statens vegvesen Region Midt.
- NILSEN, B., LINDSTRØM, M., MATHIESEN, T. K., HOLMØY, K. H., OLSSON, R. & PALMSTRØM, A. 2011. Veileder for bruk av Eurokode 7 til bergteknisk prosjektering. Norsk Bergmekanikkgruppe.
- NORDGULEN, Ø. & ANDRESEN, A. 2013. De eldste bergartene dannes. I: RAMBERG, I. B., BRYHNI, I., NØTTVEDT, A. & RANGNES, K. (red). *Landet blir til - Norges geologi*. Trondheim: Norsk Geologisk Forening.
- OLESEN, O. & OFSTAD, F. 2015. Tunnel under Romsdalsfjorden ved Molde. Tolkning av svakhetssoner fra magnetisk data målt fra helikopter.: Norges geologiske undersøkelse.
- PALMSTRØM, A., NILSEN, B., PEDERSEN, K. B. & GRUNDT, L. 2003. Riktig omfang av undersøkelser for berganlegg. *Miljø- og samfunnstjenlige tunneler*. Vegdirektoratet.
- PETTERSEN, S. U. 2016. *Injeksjon på Bodøtunnelen - Analyse av elektronisk injeksjonsdata*. Masteroppgave, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet.


-
- RAFI, J. Y. & STILLE, H. 2014. Control of rock jacking considering spread of grout and grouting pressure. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 40, s. 1-15.
- RAFI, J. Y. & STILLE, H. 2015a. Applicability of Using GIN Method, by Considering Theoretical Approach of Grouting Design. *Geotechnical and Geological Engineering*, 33, s. 1431-1448.
- RAFI, J. Y. & STILLE, H. 2015b. Basic mechanism of elastic jacking and impact of fracture aperture change on grout spread, transmissivity and penetrability. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 49, s. 174-187.
- RASTEGARNIA, A., LASHKARIPOUR, G. R. & GHAFoori, M. 2017. Prediction of grout take using rock mass properties. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 76, s. 1643-1654.
- ROCSCIENCE INC. 2021. *Dips*.
- SAEIDI, O., STILLE, H. & TORABI, S. R. 2013. Numerical and analytical analyses of the effects of different joint and grout properties on the rock mass groutability. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 38, s. 11-25.
- SELMER-OLSEN, R. 1981. Betrakninger over store vannlekkasjer i dyptliggende tunneler. *Bergmekanikkdagen*. Oslo.
- STATENS VEGVESEN 2018. Håndbok R761 Prosesskode 1 - Standard beskrivelse for vegkontrakter. Vegdirektoratet.
- STATENS VEGVESEN 2019a. Fv 659 Nordøyvegen Oversiktstegning V220. Statens vegvesen Region midt.
- STATENS VEGVESEN 2019b. Fv 659 Nordøyvegen Oversiktstegning V320. Statens vegvesen Region midt.
- STATENS VEGVESEN 2019c. Fv. 659 Nordøyvegen, Sentralt styringsdokument/ Prosjektstyringsplan (rev. 04). Statens vegvesen Region midt.
- STATENS VEGVESEN 2020. Håndbok N500 Vegtunneler. Vegdirektoratet.
- STILLE, H. 2015. *Rock grouting : theories and applications*, Stockholm, BeFo.
- STILLE, H., GUSTAFSON, G. & HASSLER, L. 2012. Application of New Theories and Technology for Grouting of Dams and Foundations on Rock. *Geotechnical and Geological Engineering*, 30, s. 603-624.
- STRAFFI, P. 2012. *On-Screen Protractor* [Online]. Tilgjengelig fra: <http://osprotractor.sourceforge.net/Protractor.html> [Hentet 7. desember 2020].
- STRØMSVIK, H. 2019a. *Assessment of High Pressure Pre-Excavation Rock Mass Grouting in Norwegian Tunnelling*. Doktorgradsavhandling, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet.
- STRØMSVIK, H. 2019b. The significance of hydraulic jacking for grout consumption during high pressure pre-grouting in Norwegian tunnelling. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 90, s. 357-368.
- STRØMSVIK, H. 2020. *Personlig korrespondanse*, SINTEF.
- ZIMMERMAN, R. & BODVARSSON, G. 1996. Hydraulic conductivity of rock fractures. *Transport in Porous Media*, 23, s. 1-30.

Vedlegg A: Novapoint Tunnel (Geologisk kartlegging)



Vedlegg B: Sammendragsrapporter

B.1 Injeksjonsrapport

Prosjekt navn	Nordøyvegen		
Prosjekts nummer	245583		
Rapport Dato (dato og uke)	16/9 19 Uke 38		
Opprettet av	V. Mykø		
Injeksjonsrapport			
Stoff:	Longva	Antall Hull:	30
Pel:	23275	Hulldybde:	24
Ansvarlig formann:	F. Holmberg	Borrmeter:	0738
Tid/Dato:	Dato:	Klokkeslett:	
Start	11.09	06.01	
Stopp	12.09	20.51	
Total Injeksjonstid		Timer	39
Stoppetid		Timer	5.25
Injeksontid		Timer	33.75
Materialforbruk			
Proseskode:	Beskrivelse:	Mengde:	Betegnelse:
31.61	Opp- og nedrigging for injeksjon	1	stk
31.62	Pakkerplassering	47	stk
31.631	Industrisement	53000	kg
31.63911	Mikrosilika	5300	kg
31.63912	Superplastiser	795	kg
31.63913	Styrt herding		l
31.69	Økt eller redusert antall inj.linjer		Timer
31.691	Extra herdetil	4	Timer
31.634	Flaring	25	kg
			Dato/Sign: 17/9 19 Vidan Mykø

LOGAC

WORKSITE: LONGVA
SECTION: 23275
PRINTOUT DATE: 2019-09-13

Grouting Report



HOLE NO.	HOLE LENGTH [m]	STAGE NO.	RECIPE NO.	INJECTION NO.	W/C	CODE	DATE	START TIME [hh:mm:ss]	STOP TIME [hh:mm:ss]	LOGGING TIME [hh:mm:ss]	VOLUME [L]	PRESSURE [bar]	CHECKSUM
1	24.0	1	1	1	0.9	None	2019:09:11	06:02:43	07:09:16	01:06:33	0.0	0.0	OK
2	24.0	1	1	1	0.9	None	2019:09:11	12:44:32	13:19:06	00:34:34	473.5	13.2	OK
3	24.0	1	2	1	0.7	None	2019:09:11	13:19:12	14:03:47	00:44:35	490.2	23.6	OK
4	24.0	1	3	1	0.5	None	2019:09:11	14:03:55	15:04:02	01:00:07	807.4	29.8	OK
5	24.0	4	3	1	0.5	None	2019:09:11	17:02:46	17:53:31	00:50:45	757.2	13.7	OK
6	24.0	5	3	1	0.5	None	2019:09:11	21:12:04	21:43:11	00:31:07	505.0	19.5	OK
7	24.0	6	3	1	0.5	None	2019:09:12	02:02:14	02:30:31	00:28:17	529.6	23.5	OK
8	24.0	6	3	1	0.5	None	2019:09:12	06:46:48	08:01:44	02:14:56	1202.0	52.3	OK
9	24.0	1	1	1	0.9	None	2019:09:11	21:38:37	00:18:30	02:39:53	510.3	27.0	OK
10	24.0	2	2	1	0.7	None	2019:09:12	00:18:44	00:53:31	00:34:47	500.4	19.9	OK
11	24.0	3	3	1	0.5	None	2019:09:12	00:53:53	01:40:30	00:46:37	818.5	24.6	OK
12	24.0	4	3	1	0.5	None	2019:09:12	05:11:45	06:30:28	01:18:43	195.6	60.0	OK
13	24.0	1	1	1	0.9	None	2019:09:11	06:01:32	08:00:28	01:58:56	579.6	28.9	OK
14	24.0	1	2	1	0.7	None	2019:09:11	08:00:35	08:33:37	00:33:02	599.6	38.1	OK
15	24.0	1	3	1	0.5	None	2019:09:11	08:33:41	09:25:57	00:52:16	850.7	5.4	OK
16	24.0	1	3	1	0.5	None	2019:09:11	11:23:02	12:42:14	01:19:12	1124.4	21.6	OK
17	24.0	5	3	1	0.5	None	2019:09:11	16:55:19	17:01:45	00:06:26	706.0	702.6	OK
18	24.0	1	1	1	0.9	None	2019:09:11	09:26:38	10:11:18	00:44:40	660.2	0.0	OK
19	24.0	1	1	1	0.7	None	2019:09:11	10:11:33	10:39:19	00:27:46	521.8	27.8	OK
20	24.0	2	3	1	0.5	None	2019:09:11	10:39:32	11:22:36	00:43:04	799.8	30.0	OK
21	24.0	2	3	1	0.5	None	2019:09:11	15:08:04	15:16:14	00:08:10	21.6	60.9	OK
22	24.0	1	1	1	0.9	None	2019:09:11	18:53:26	19:21:13	00:27:47	510.6	13.7	OK
23	24.0	1	2	1	0.7	None	2019:09:11	19:21:24	19:36:32	00:15:08	223.9	0.0	OK
24	24.0	3	3	1	0.5	None	2019:09:12	06:33:26	08:15:01	01:41:35	1399.8	13.1	OK
25	24.0	4	3	1	0.5	None	2019:09:12	10:37:37	10:47:32	00:09:55	3.6	54.7	OK
26	24.0	1	3	1	0.9	None	2019:09:11	21:15:49	21:34:17	00:18:28	224.6	7.9	OK
27	24.0	2	3	1	0.5	None	2019:09:12	02:34:15	03:40:58	01:06:43	728.8	9.5	OK
28	24.0	2	3	1	0.5	None	2019:09:12	07:50:38	09:08:41	01:18:03	999.7	23.5	OK
Total:										LogValue			
Continued on next page													

Från hal 8
Från hal 7

LOGAC

WORKSITE: LONGVA
 SECTION: 23275
 PRINTOUT DATE: 2019-09-13

Grouting Report



HOLE NO.	HOLE LENGTH [m]	STAGE NO.	RECIPE NO.	INJECTION NO.	W/C	CODE	DATE [yyyy:mm:dd]	START TIME [hh:mm:ss]	STOP TIME [hh:mm:ss]	LOGGING TIME [hh:mm:ss]	VOLUME [L]	PRESSURE [bar]	CHECKSUM
29	15	1	1	1	0.9	None	2019:09:11	19:37:02	20:05:48	00:28:46	499.9	13.8	OK
30	15	1	2	1	0.7	None	2019:09:11	20:05:59	20:27:37	00:21:38	514.7	21.5	OK
31	15	3	3	1	0.5	None	2019:09:11	20:28:03	21:15:21	00:47:18	811.0	18.1	OK
32	15	4	3	1	0.5	None	2019:09:12	01:17:58	01:57:29	00:39:31	525.7	22.6	OK
33	15	5	3	1	0.5	None	2019:09:12	05:48:05	07:49:25	02:01:20	430.4	56.5	OK
34	16	1	1	1	0.9	None	2019:09:11	21:36:57	21:53:36	00:16:39	261.0	11.6	OK
35	16	2	3	1	0.5	None	2019:09:12	02:32:12	02:33:57	00:01:45	0.0	0.0	OK
36	16	2	1	1	0.5	None	2019:09:12	09:09:47	10:35:54	01:26:07	1031.7	14.3	OK
37	17	1	1	1	0.9	None	2019:09:12	03:44:07	04:06:11	00:22:04	39.6	2.1	OK
38	17	2	3	1	0.5	None	2019:09:12	08:17:23	09:06:15	00:48:52	977.7	18.5	OK
39	18	1	3	1	0.5	None	2019:09:12	10:49:50	11:12:44	00:22:54	41.6	33.5	OK
40	19	1	1	1	0.9	None	2019:09:12	11:12:53	11:34:15	00:21:22	24.2	0.0	OK
41	20	1	1	1	0.9	None	2019:09:12	04:06:50	05:11:09	01:04:19	131.5	40.3	OK
42	2	1	1	1	0.9	None	2019:09:11	18:58:53	19:45:56	00:47:03	503.3	16.1	OK
43	2	1	2	1	0.7	None	2019:09:11	19:46:09	20:14:47	00:28:38	504.3	19.7	OK
44	2	1	3	1	0.5	None	2019:09:11	20:14:59	21:06:02	00:51:03	807.8	24.0	OK
45	2	4	3	1	0.5	None	2019:09:12	01:06:59	01:14:58	00:07:59	3.4	63.9	OK
46	23	1	3	1	0.5	None	2019:09:12	11:43:26	14:16:59	02:33:33	1720.7	16.6	OK
47	24	1	3	1	0.5	None	2019:09:12	14:17:33	17:39:47	03:22:14	2135.6	39.5	OK
48	25	1	3	1	0.5	None	2019:09:12	16:26:44	20:51:54 ✕	04:25:10	1763.8	40.9	OK
49	26	1	3	1	0.5	None	2019:09:12	12:37:38	14:11:58	01:34:20	1432.4	23.1	OK
50	27	1	3	1	0.5	None	2019:09:12	12:37:49	16:25:57	03:48:08	1757.2	39.8	OK
51	28	1	1	1	0.9	None	2019:09:12	11:09:07	11:59:57	00:50:50	301.8	31.0	OK
52	28	2	3	1	0.5	None	2019:09:12	12:00:04	12:29:40	00:29:36	216.4	36.3	OK
53	29	2	3	1	0.5	None	2019:09:12	09:07:17	12:31:26	03:24:09	1461.2	39.9	OK
54	30	1	1	1	0.9	None	2019:09:12	02:45:43	03:35:24	00:49:41	507.3	19.2	OK
55	30	2	2	1	0.7	None	2018:09:12	03:35:43	04:07:29	00:31:46	517.3	18.2	OK
56	30	3	3	1	0.5	None	2019:09:12	04:07:53	05:07:46	00:59:53	489.4	60.0	OK
Total:													LogValue

Continued on next page

LOGAC

WORKSITE: LONGVA
SECTION: 23275
PRINTOUT DATE: 2019-09-13

Grouting Report



HOLE NO.	HOLE LENGTH [m]	STAGE NO.	RECIPE NO.	INJECTION NO.	W/C	CODE	DATE [yyyy:mm:dd]	START TIME [hh:mm:ss]	STOP TIME [hh:mm:ss]	LOGGING TIME [hh:mm:ss]	VOLUME [L]	PRESSURE [bar]	CHECKSUM
57	24.0	1	1	1	0.9	None	2019:09:11	12:32:16	12:57:14	00:24:58	548.6	4.5	OK
58	24.0	1	2	1	0.7	None	2019:09:11	12:57:27	13:11:08	00:13:41	0.0	0.0	OK
59	24.0	1	2	1	0.7	None	2019:09:11	13:11:14	13:45:21	00:34:07	517.3	27.4	OK
60	24.0	1	3	1	0.5	None	2019:09:11	13:45:30	14:34:52	00:49:22	804.1	30.5	OK
61	24.0	4	3	1	0.5	None	2019:09:11	17:06:59	17:54:50	00:47:51	705.6	20.3	OK
62	24.0	5	3	1	0.5	None	2019:09:11	21:06:52	21:36:28	00:29:36	504.1	18.5	OK
63	24.0	6	3	1	0.5	None	2019:09:12	01:41:17	02:44:35	01:03:18	763.3	61.4	OK
64	24.0	1	1	1	0.9	None	2019:09:11	12:30:28	12:32:07	00:01:39	0.0	0.0	OK
65	24.0	1	1	1	0.9	None	2019:09:12	02:35:35	03:29:53	00:54:18	494.1	26.9	OK
66	24.0	2	2	1	0.7	None	2019:09:12	03:30:12	04:10:34	00:40:22	524.5	31.4	OK
67	24.0	3	3	1	0.5	None	2019:09:12	04:10:51	05:08:35	00:57:44	885.5	28.3	OK
68	24.0	4	3	1	0.5	None	2019:09:12	08:03:12	10:58:15	01:55:03	614.0	0.0	OK
69	24.0	5	3	1	0.5	None	2019:09:12	10:58:52	11:07:39	00:08:47	10.0	51.3	OK
70	24.0	1	1	1	0.9	None	2019:09:11	09:30:15	10:19:10	00:48:55	627.8	0.0	OK
71	24.0	1	2	1	0.7	None	2019:09:11	10:19:20	10:53:09	00:33:49	499.6	24.1	OK
72	24.0	1	3	1	0.5	None	2019:09:11	10:53:14	11:29:13	00:35:59	779.8	10.4	OK
73	24.0	1	3	1	0.5	None	2019:09:11	14:35:07	15:46:43	01:11:36	1022.2	0.0	OK
74	24.0	5	3	1	0.5	None	2019:09:11	17:55:10	18:03:59	00:08:49	8.7	61.3	OK
75	24.0	1	1	1	0.9	None	2019:09:11	06:03:24	16:11:22	10:07:58	0.0	2.7	OK
76	24.0	1	1	1	0.9	None	2019:09:11	07:09:24	08:02:24	00:53:00	579.6	21.9	OK
77	24.0	1	2	1	0.7	None	2019:09:11	08:02:28	08:35:33	00:33:05	539.6	25.5	OK
78	24.0	1	3	1	0.5	None	2019:09:11	08:35:37	09:29:58	00:54:21	822.9	16.9	OK
79	24.0	1	3	1	0.5	None	2019:09:11	11:29:48	12:29:57	01:00:09	1294.4	0.0	OK
80	24.0	1	3	1	0.5	None	2019:09:11	15:47:17	15:48:32	00:01:15	1022.2	0.0	OK
81	24.0	1	3	1	0.5	None	2019:09:11	15:48:39	17:05:41	01:17:02	939.0	13.1	OK
82	24.0	6	3	1	0.5	None	2019:09:11	20:25:07	21:11:36	00:46:29	749.8	30.1	OK
83	24.0	7	3	1	0.5	None	2019:09:12	00:20:05	01:05:48	00:45:43	417.4	46.5	OK
84	24.0	1	1	1	0.9	None	2019:09:11	11:18:58	11:52:02	00:33:04	499.6	27.1	OK
Total:										LogValue			

Continued on next page

LOGAC

WORKSITE: LONGVA
SECTION: 23275
PRINTOUT DATE: 2019-09-13

Grouting Report



hal 11

HOLE NO.	HOLE LENGTH [m]	STAGE NO.	RECIPE NO.	INJECTION NO.	W/C	CODE	DATE [yyyy:mm:dd]	START TIME [hh:mm:ss]	STOP TIME [hh:mm:ss]	LOGGING TIME [hh:mm:ss]	VOLUME [L]	PRESSURE [bar]	CHECKSUM
85	24.0	1	2	1	0.7	None	2019:09:11	11:52:45	12:28:04	00:35:19	519.5	27.7	OK
86	24.0	1	3	1	0.5	None	2019:09:11	12:28:25	12:29:43	00:01:18	20.6	24.2	OK
87	24.0	1	3	1	0.5	None	2019:09:11	12:29:54	13:34:09	01:04:15	631.9	1.1	OK
88	24.0	4	3	1	0.5	None	2019:09:11	16:09:00	16:54:26	00:45:26	702.6	0.0	OK
89	24.0	5	3	1	0.5	None	2019:09:11	18:04:38	20:24:16	02:19:38	1054.3	60.7	OK
90	24.0	1	1	1	0.9	None	2019:09:11	18:20:41	18:46:55	00:26:14	134.2	24.3	OK
91	24.0	2	1	1	0.9	None	2019:09:11	23:57:34	02:30:03	02:32:29	1204.7	16.8	OK
92	24.0	3	3	1	0.5	None	2019:09:12	05:47:43	06:44:16	00:56:33	596.2	70.9	OK
93	24.0	2	1	1	0.9	None	2019:09:11	15:18:06	15:18:18	00:00:12	0.0	0.0	OK
94	24.0	2	3	1	0.5	None	2019:09:11	15:19:59	16:06:18	00:46:19	794.8	10.6	OK
95	24.0	3	3	1	0.5	None	2019:09:11	17:54:17	18:20:26	00:26:09	328.3	0.0	OK
96	24.0	4	3	1	0.5	None	2019:09:11	21:43:49	21:58:58	00:15:09	0.0	27.7	OK
97	24.0	4	3	1	0.5	None	2019:09:11	23:57:53	00:19:09	00:21:16	41.3	61.1	OK
Total:											58357.0		
Total Kg dry cement: 66276.0 - 2390 kg = 63886 kg.													

B.2 Sonderboringsrapporter

Sonderboring rev. D (p)

Page 1

Info

SKANSKA

Prosjekt nr:

245583

Prosjektnavn:

Nordøyvegen

Skjema opprettet av:

Kjell Roar Skotheimsvik

Dato:

2019-09-10

Dagskift:

Kveldskift:

Tunnel & Stuff

Tunnel

Nogva fjord tunnelen

Stuff

Stuff Longva

PeInr. på stuff

23275.50

Sonderhull

Kontrollhull

Antall hull

3

Lengde hull [m]

30.00

Sum bormeter [m]

90.00

Gjenstøping [kg]

Huller ikke gjenstøpt

Ekstra gjenstøping [kg] pga. sleppe

Sum bormeter (0-12) [m]

Sum bormeter (12-24) [m]

Sum bormeter (24-36) [m]

90.00

Ved påtreff av vann / markante svakhetsoner av betydning skal dette straks rapporteres til ansvarshavende. I feltet "kommentar" angis påtrufne markante slepper og stikk / plutselige forandringer i bergforholdene.

Hull 1

	0-3 m	3-6 m	6-9 m	9-12 m	12-15 m	15-18 m	18-21 m	21-24 m	24-27 m	27-30 m
Borsynk [m/min]	2.8	2.8	2.5	2.7	2.0	2.4	2.6	2.4	2.8	1.8

Borsynk registrert med MWD data

Ingen vannlekkasje

Vannlekkasje detektert

Innlekkasje av vann [l/min]

9.0

Farge borvann

Grått

Kommentar

Hull 2

	0-3 m	3-6 m	6-9 m	9-12 m	12-15 m	15-18 m	18-21 m	21-24 m	24-27 m	27-30 m
Borsynk [m/min]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Borsynk registrert med MWD data

Ingen vannlekkasje

Vannlekkasje detektert

Innlekkasje av vann [l/min]

Farge borvann

Kommentar

Hull 3

	0-3 m	3-6 m	6-9 m	9-12 m	12-15 m	15-18 m	18-21 m	21-24 m	24-27 m	27-30 m
Borsynk [m/min]	3.5	3.5	3.2	2.8	2.6	2.8	2.8	2.6	2.4	2.5

Borsynk registrert med MWD data

Ingen vannlekkasje

Vannlekkasje detektert

Innlekkasje av vann [l/min]

8.0

Farge borvann

Grått

Kommentar

Hull 4

Borsynk [m/min]	0-3 m	3-6 m	6-9 m	9-12 m	12-15 m	15-18 m	18-21 m	21-24 m	24-27 m	27-30 m
	3.5	3.2	3.0	3.0	2.8	2.2	2.6	2.6	2.4	2.4

Borsynk registrert med MWD data

Ingen vannlekkasje

Vannlekkasje detektert

Innlekkasje av vann [l/min]

3.0

Farge borvann

Grått

Kommentar

Hull 5

Borsynk [m/min]	0-3 m	3-6 m	6-9 m	9-12 m	12-15 m	15-18 m	18-21 m	21-24 m	24-27 m	27-30 m

Borsynk registrert med MWD data

Ingen vannlekkasje

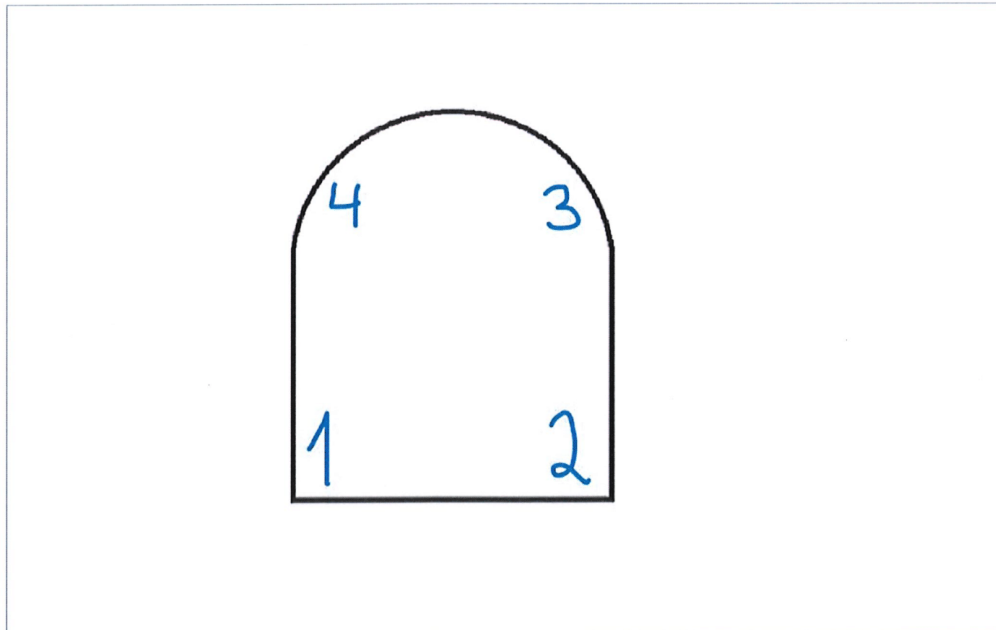
Vannlekkasje detektert

Innlekkasje av vann [l/min]

Farge borvann

Kommentar

Sonderhullplassering

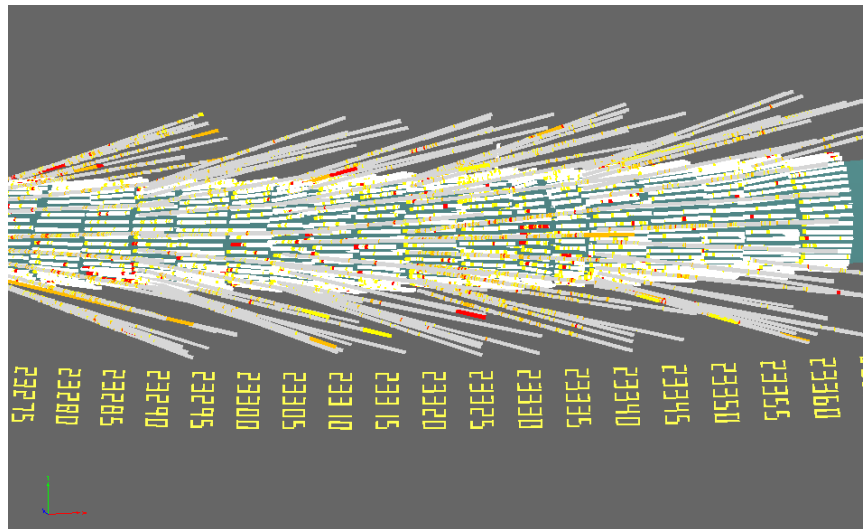


Kommentarer dette skift

Vedlegg C: Borparametertolkning (MWD)

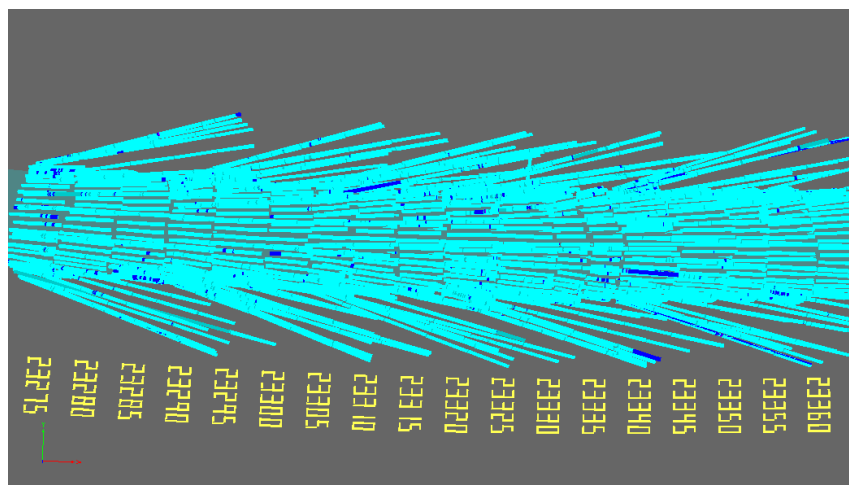
C.1 Parti 1: Pel nr. 23275-23363

Tolket oppsprekking



Tolket oppsprekking		
Beskrivelse	Verdi	Farge
Lite oppsprukket	12.500	
Noe oppsprukket	15.000	
Oppsprukket	25.000	
Meget oppsprukket	100.000	

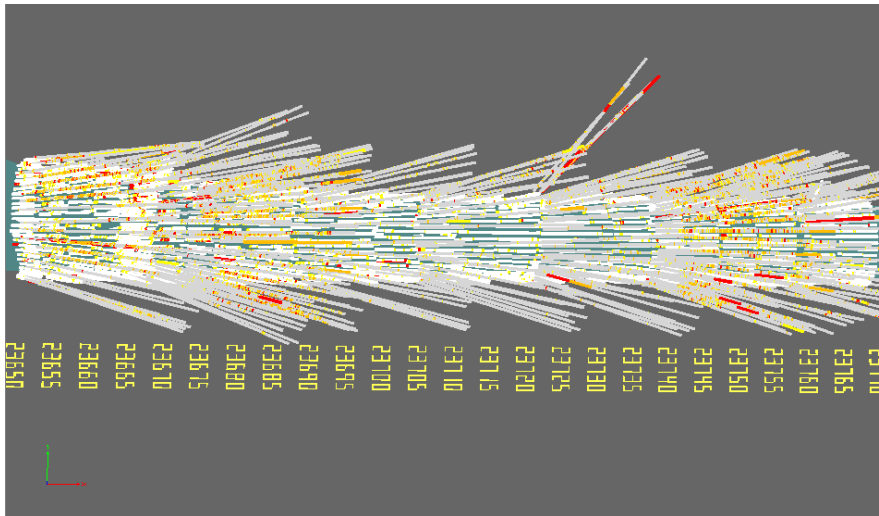
Tolket vann



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

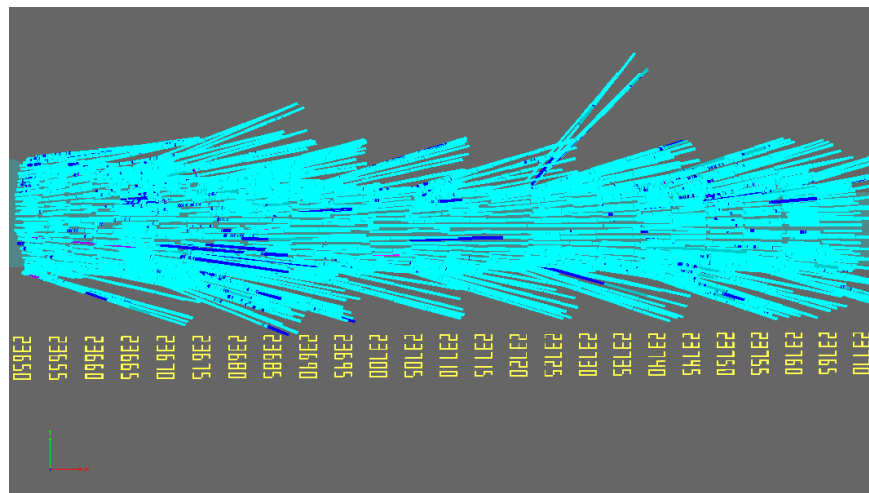
C.2 Parti 2: Pel nr. 23654-23768

Tolket oppsprekking



Tolket oppsprekking		
Beskrivelse	Verdi	Farge
Lite oppsprukket	12.500	
Noe oppsprukket	15.000	
Oppsprukket	25.000	
Meget oppsprukket	100.000	

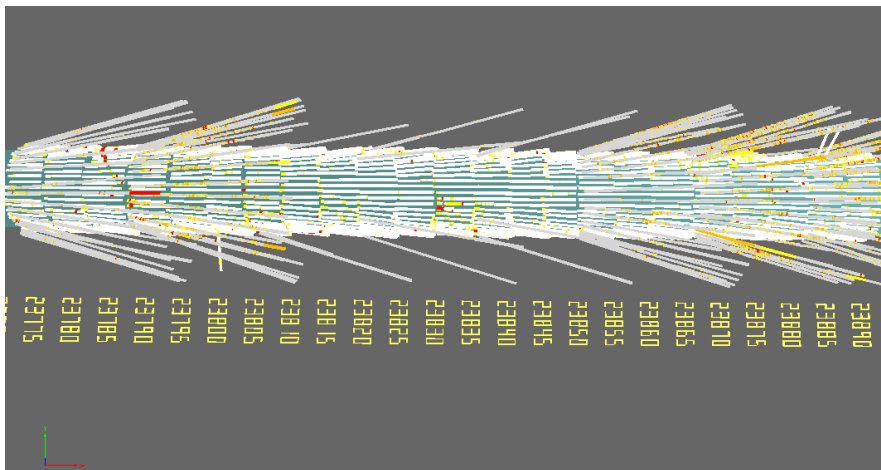
Tolket vann



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

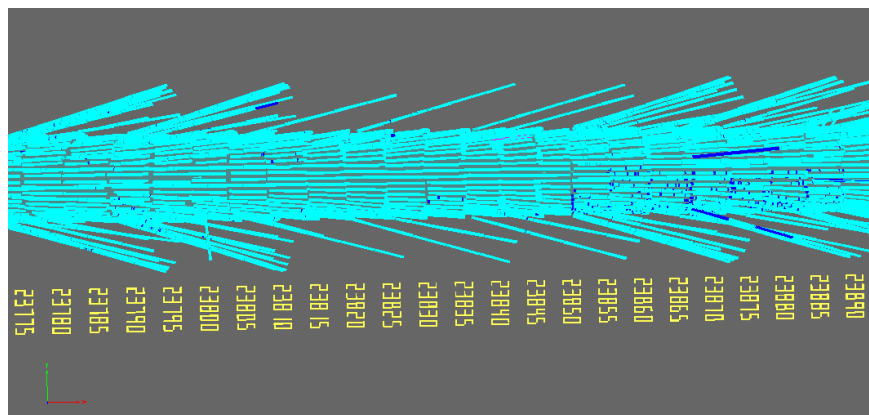
C.3 Parti 3: Pel nr. 23775-23892

Tolket oppsprekking



Tolket oppsprekking		
Beskrivelse	Verdi	Farge
Lite oppsprukket	12.500	
Noe oppsprukket	15.000	Yellow
Oppsprukket	25.000	Orange
Meget oppsprukket	100.000	Red

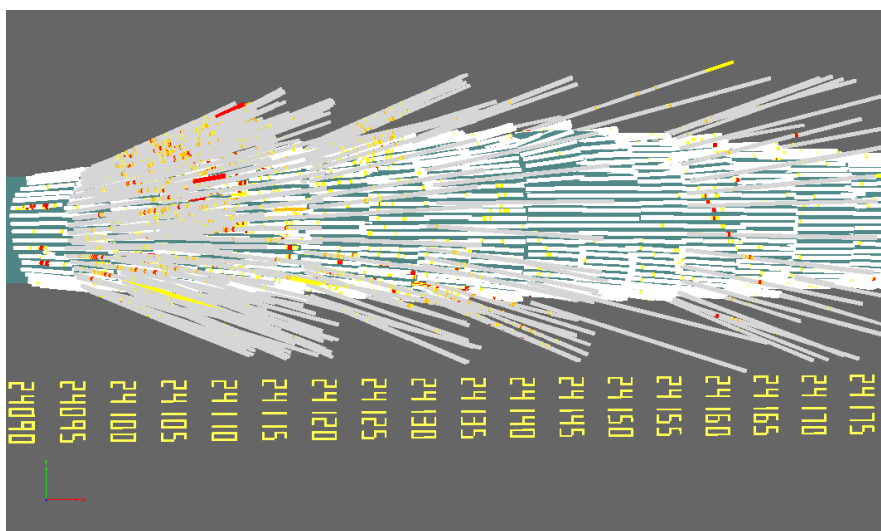
Tolket vann



Tolket vann		
Beskrivelse	Verdi	Farge
Ikke vannforstyrrelse	5.000	Cyan
Noe vannforstyrrelse	8.000	Teal
Vannforstyrrelse	25.000	Blue
Store vannforstyrrelser	100.000	Purple

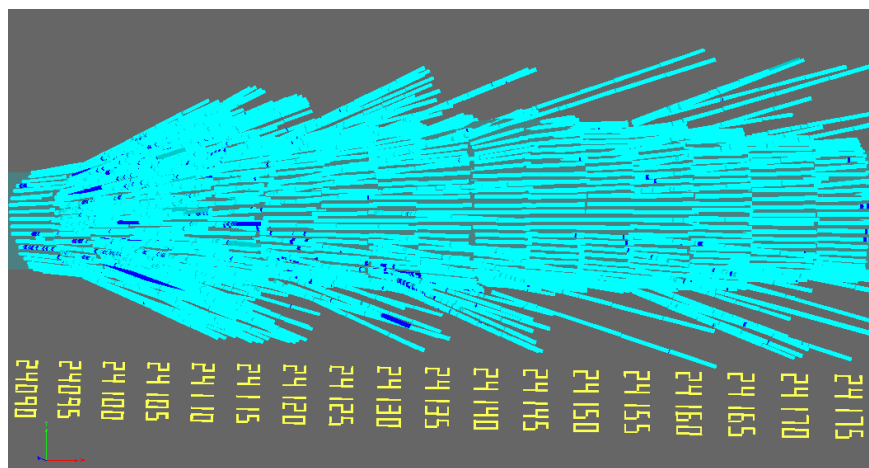
C.4 Parti 4: Pel nr. 24091-24175

Tolket oppsprekking



Tolket oppsprekking		
Beskrivelse	Verdi	Farge
Lite oppsprukket	12.500	
Noe oppsprukket	15.000	
Oppsprukket	25.000	
Meget oppsprukket	100.000	

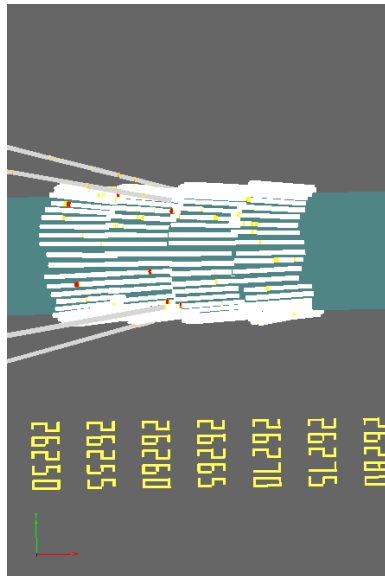
Tolket vann



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

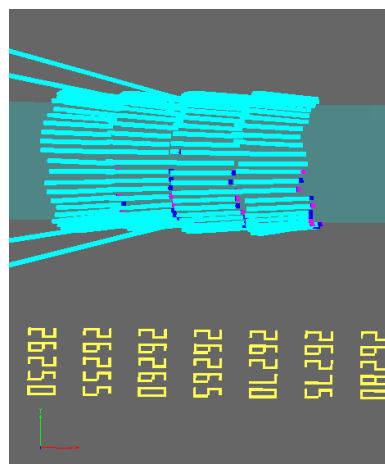
C.5 Parti 5: Pel nr. 26280-26256

Tolket oppsprekking



Tolket oppsprekking		
Beskrivelse	Verdi	Farge
Lite oppsprukket	12.500	
Noe oppsprukket	15.000	Yellow
Oppsprukket	25.000	Orange
Meget oppsprukket	100.000	Red

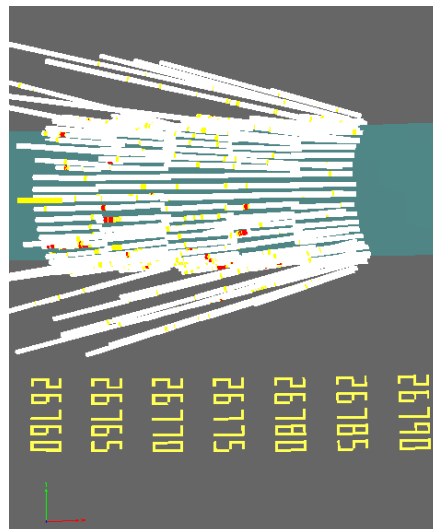
Tolket vann



Tolket vann		
Beskrivelse	Verdi	Farge
Ikke vannforstyrrelse	5.000	Cyan
Noe vannforstyrrelse	8.000	Teal
Vannforstyrrelse	25.000	Blue
Store vannforstyrrelser	100.000	Purple

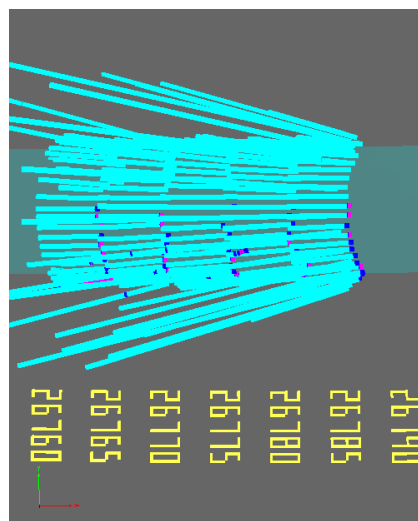
C.6 Parti 6: Pel nr. 26790-26766

Tolket oppsprekking



Tolket oppsprekking		
Beskrivelse	Verdi	Farge
Lite oppsprukket	12.500	
Noe oppsprukket	15.000	Yellow
Oppsprukket	25.000	Orange
Meget oppsprukket	100.000	Red

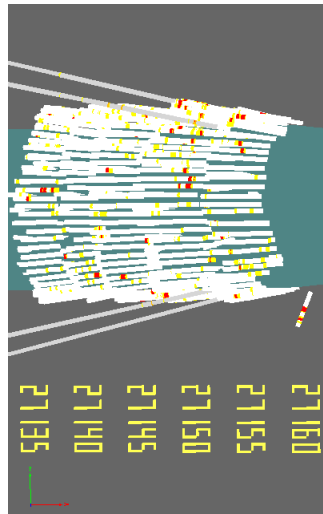
Tolket vann



Tolket vann		
Beskrivelse	Verdi	Farge
Ikke vannforstyrrelse	5.000	Cyan
Noe vannforstyrrelse	8.000	Blue
Vannforstyrrelse	25.000	Dark Blue
Store vannforstyrrelser	100.000	Purple

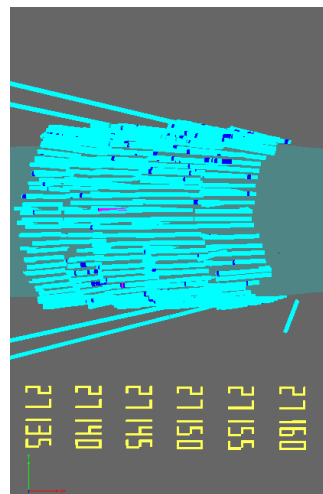
C.7 Parti 7: Pel nr. 27160-26139

Tolket oppsprekking



Tolket oppsprekking		
Beskrivelse	Verdi	Farge
Lite oppsprukket	12.500	
Noe oppsprukket	15.000	
Oppsprukket	25.000	
Meget oppsprukket	100.000	

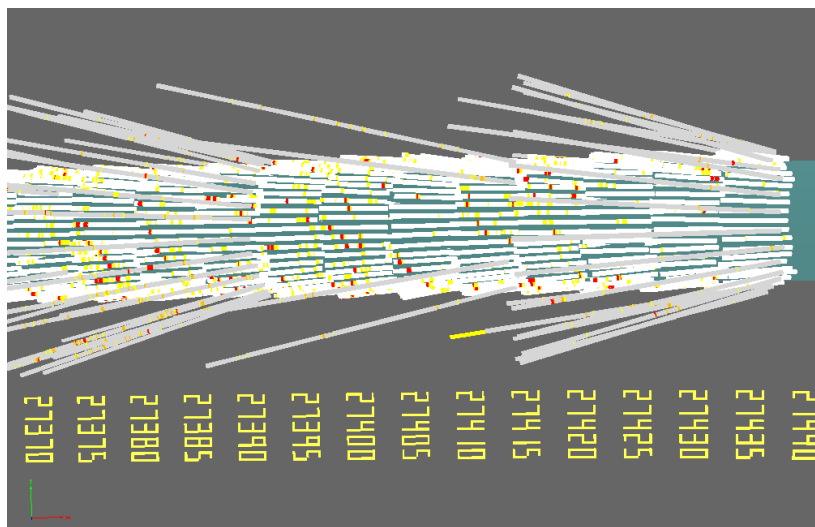
Tolket vann



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

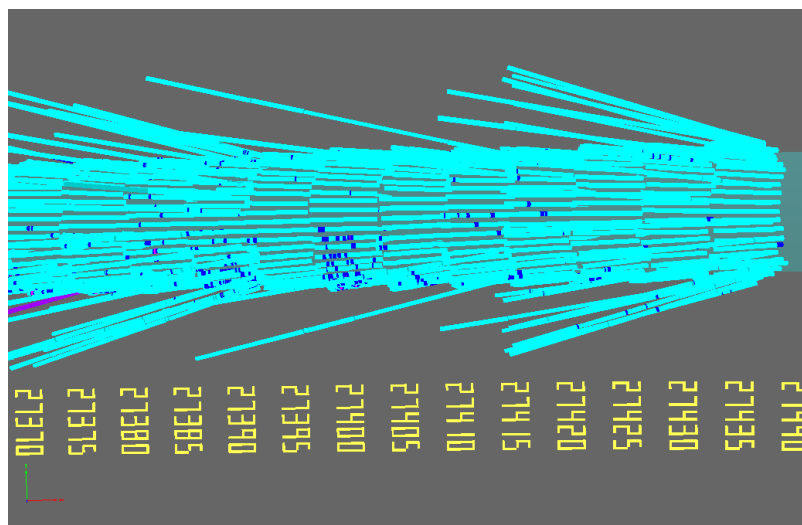
C.8 Parti 8: Pel nr. 27438-27370

Tolket oppsprekking



Tolket oppsprekking		
Beskrivelse	Verdi	Farge
Lite oppsprukket	12.500	
Noe oppsprukket	15.000	
Oppsprukket	25.000	
Meget oppsprukket	100.000	

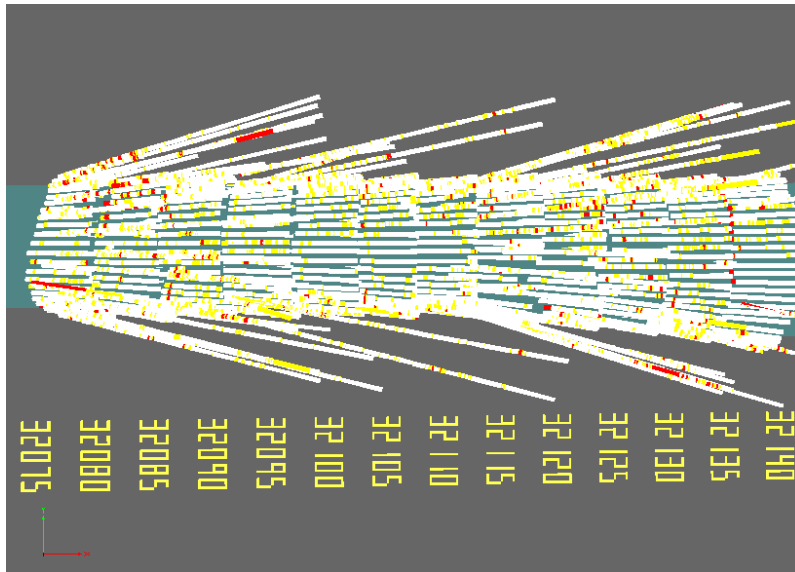
Tolket vann



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

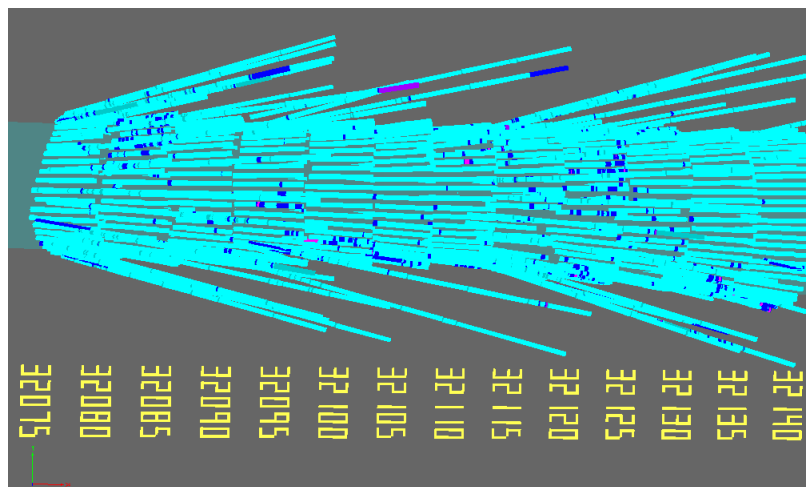
C.9 Parti 9: Pel nr. 32079-32139

Tolket oppsprekking



Tolket oppsprekking		
Beskrivelse	Verdi	Farge
Lite oppsprukket	12.500	
Noe oppsprukket	15.000	
Oppsprukket	25.000	
Meget oppsprukket	100.000	

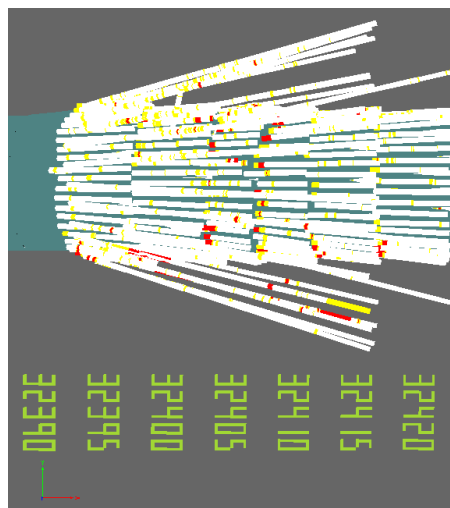
Tolket vann



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

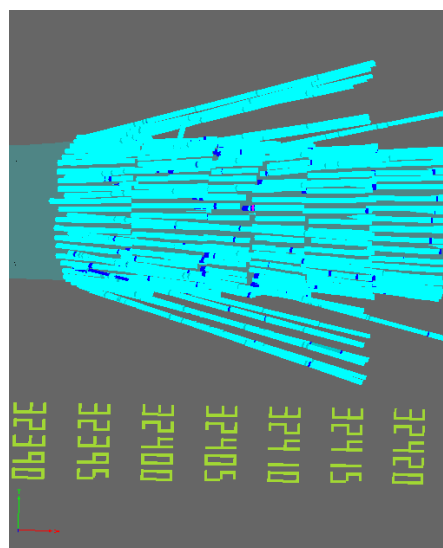
C.10 Parti 10: Pel nr. 32396-32420

Tolket oppsprekking



Tolket oppsprekking		
Beskrivelse	Verdi	Farge
Lite oppsprukket	12.500	
Noe oppsprukket	15.000	
Oppsprukket	25.000	
Meget oppsprukket	100.000	

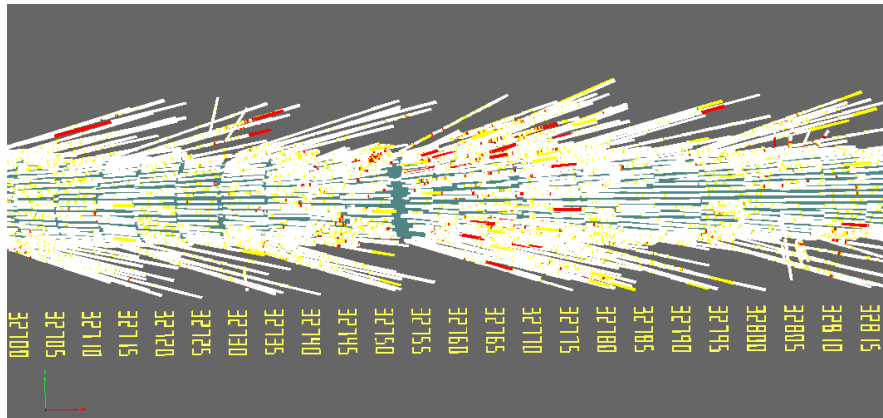
Tolket vann



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

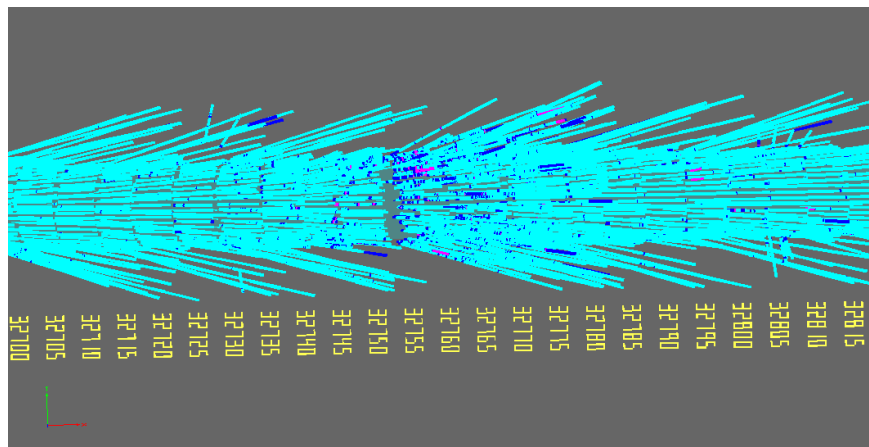
C.11 Parti 11: Pel nr. 32700-32817

Tolket oppsprekking



Tolket oppsprekking		
Beskrivelse	Verdi	Farge
Lite oppsprukket	12.500	
Noe oppsprukket	15.000	
Oppsprukket	25.000	
Meget oppsprukket	100.000	

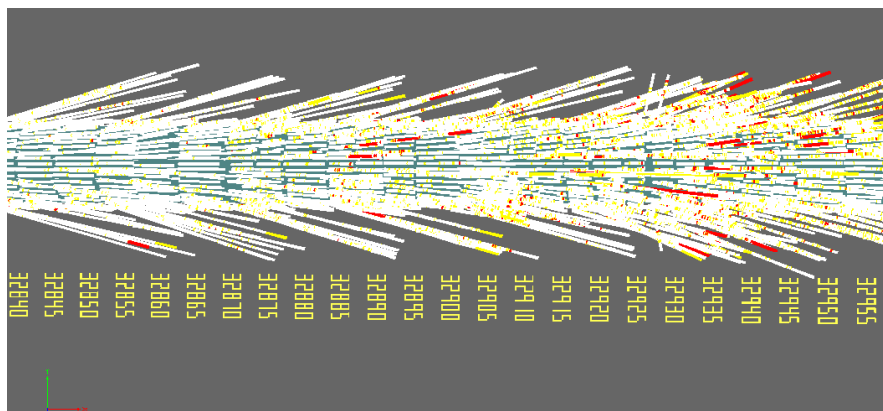
Tolket vann



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

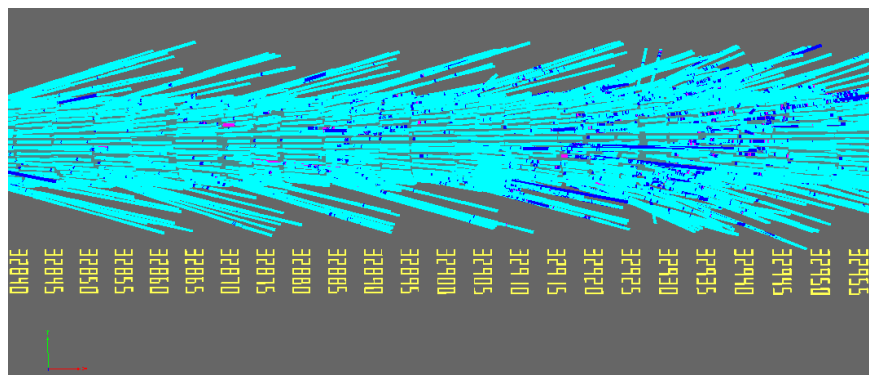
C.12 Parti 12: Pel nr. 32840-32944

Tolket oppsprekking



Tolket oppsprekking		
Beskrivelse	Verdi	Farge
Lite oppsprukket	12.500	
Noe oppsprukket	15.000	
Oppsprukket	25.000	
Meget oppsprukket	100.000	

Tolket vann



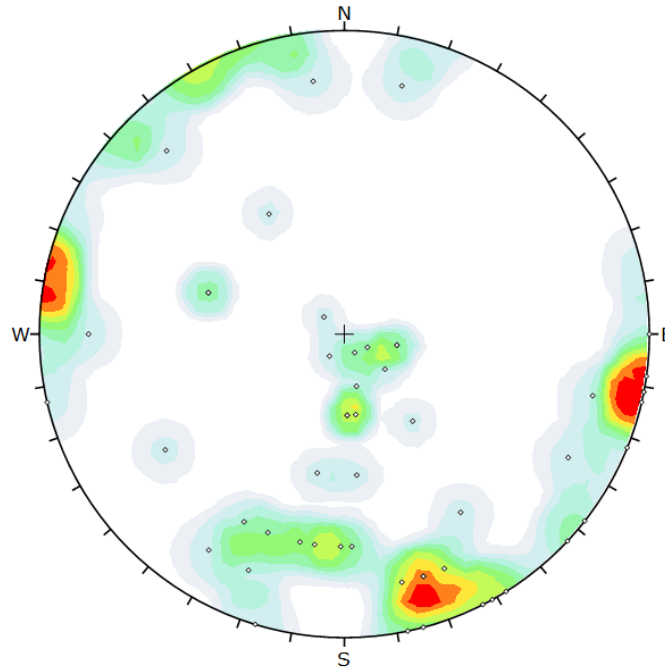
Tolket vann		
Beskrivelse	Verdi	Farge
Ikke vannforstyrrelse	5.000	
Noe vannforstyrrelse	8.000	
Vannforstyrrelse	25.000	
Store vannforstyrrelser	100.000	

Vedlegg D: Diskontinuiteter

D.1 Parti 1: Pel nr. 23275-23363

Fall	Fallretning
80	173
90	270
50	11
80	90
70	21
10	130
90	281
80	342
90	333
20	311
90	331
80	342
10	300
90	292
70	12
8	331
80	22
80	337
40	322
10	34
50	148
90	77
30	358
50	107
90	345
30	358
50	107
90	348
30	352
90	281
20	282
20	282
50	355
70	1
80	284
90	308
90	17
70	327
80	193
70	358
90	328
90	278
70	8
80	299

Polplott:



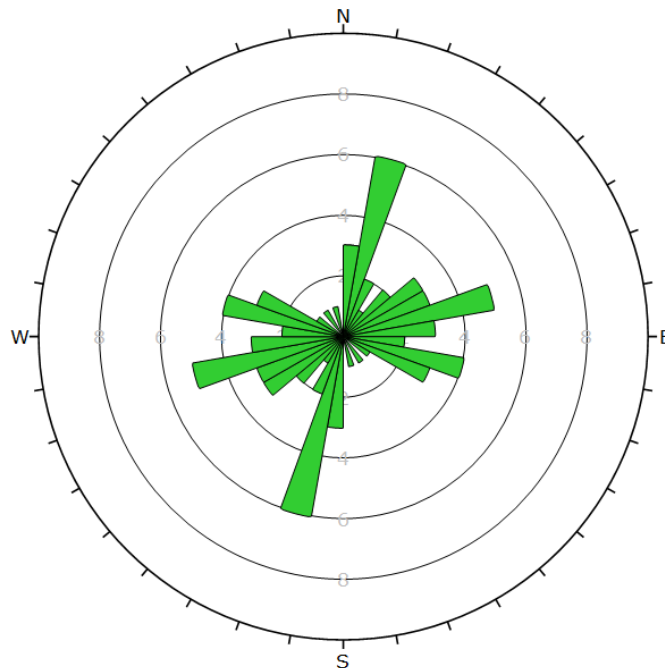
Symbol	Feature
o	Pole Vectors

Color	Density Concentrations
	0.00 - 0.90
	0.90 - 1.80
	1.80 - 2.70
	2.70 - 3.60
	3.60 - 4.50
	4.50 - 5.40
	5.40 - 6.30
	6.30 - 7.20
	7.20 - 8.10
	8.10 - 9.00

Contour Data	Pole Vectors
Maximum Density	8.92%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	52 (52 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Angle

Sprekkerose:



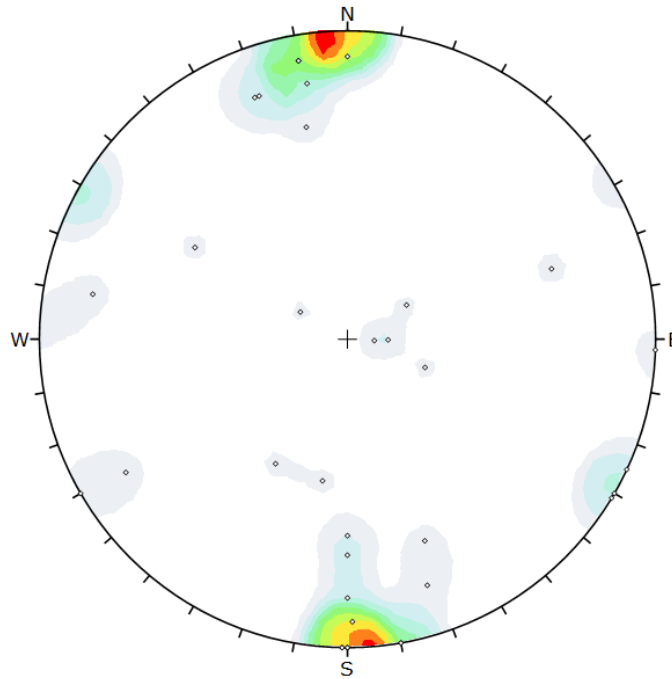
Plot Mode	Rosette
Plot Data	Apparent Strike
Face Normal Trend	0.0
Face Normal Plunge	90.0
Bin Size	10°
Outer Circle	10 planes per arc
Planes Plotted	40
Minimum Angle To Plot	45.0°
Maximum Angle To Plot	90.0°

70	28
70	57
80	136
80	347
90	283
80	32
20	347
90	313

D.2 Parti 2: Pel nr. 23654-23768

Fall	Fallretning
80	342
10	273
80	159
80	59
15	271
90	350
70	339
90	300
85	170
70	169
80	160
80	171
85	170
90	350
90	272
80	100
25	240
90	0
85	359
50	30
20	120
65	0
50	10
90	295
90	60
70	0
90	1
70	251
60	121
80	0
90	1
90	301
90	0
85	180
90	0
30	290

Polplott:



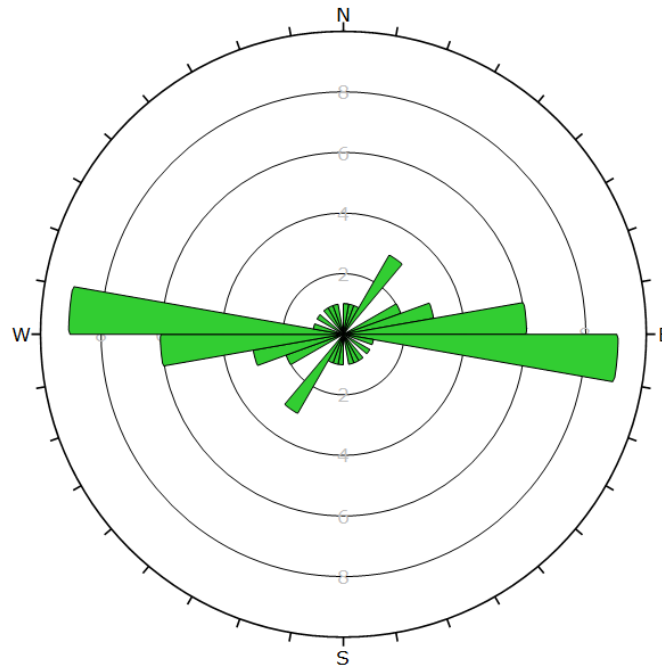
Symbol	Feature
o	Pole Vectors

Color	Density Concentrations
	0.00 - 2.00
	2.00 - 5.00
	5.20 - 7.00
	7.00 - 10.40
	10.40 - 13.00
	13.00 - 15.60
	15.60 - 18.20
	18.20 - 20.80
	20.80 - 23.40
	23.40 - 26.00

Contour Data	Pole Vectors
Maximum Density	25.33%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	36 (36 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Angle

Sprekkerose:

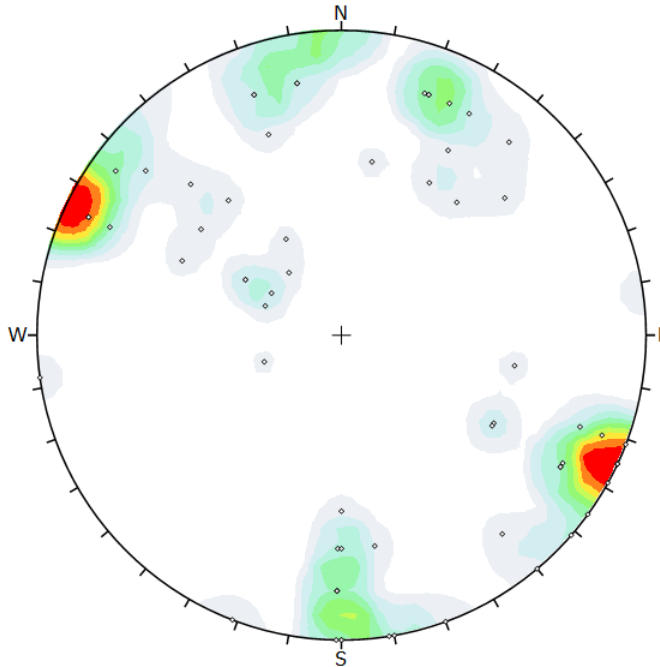


Plot Mode	Rosette
Plot Data	Apparent Strike
Face Normal Trend	0.0
Face Normal Plunge	90.0
Bin Size	10°
Outer Circle	10 planes per arc
Planes Plotted	31
Minimum Angle To Plot	45.0°
Maximum Angle To Plot	90.0°

D.3 Parti 3: Pel nr. 23775-23892

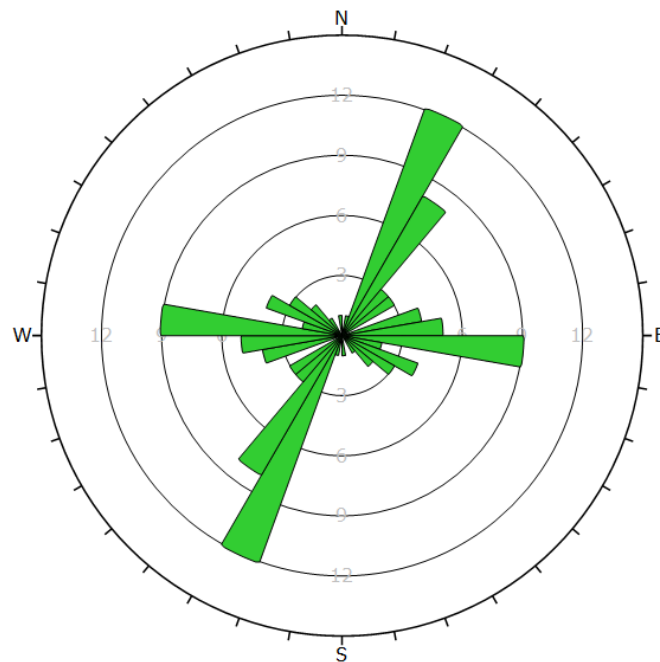
Fall	Fallretning
70	1
90	0
40	150
85	291
80	1
30	111
80	291
90	351
90	299
70	0
60	280
30	121
80	1
60	300
90	1
90	291
80	1
70	160
60	0
80	115
90	0
90	350
85	115
80	200
80	199
85	115
90	340
80	200
90	82
80	170
80	170
80	301
90	21
60	115
80	160
80	160
60	301
90	295
80	205
90	295
90	295
30	140
60	127
90	306
85	126

Polplott:



Symbol	Feature
o	Pole Vectors
Density Concentrations	
Color	0.00 - 1.40
	1.40 - 2.80
	2.80 - 4.20
	4.20 - 5.60
	5.60 - 7.00
	7.00 - 8.40
	8.40 - 9.80
	9.80 - 11.20
	11.20 - 12.60
	12.60 - 14.00
Contour Data	
Maximum Density	13.06%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%
Plot Mode	
Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	65 (65 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Angle

Sprekkerose:



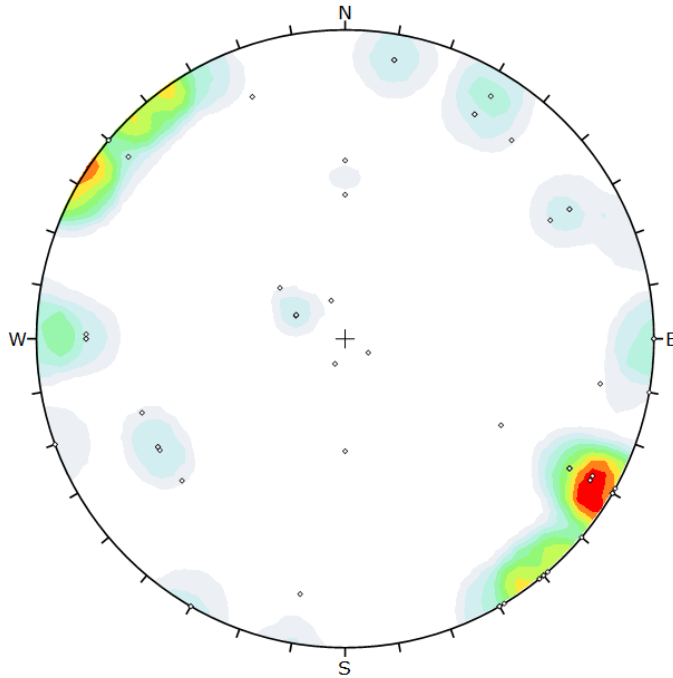
Plot Mode	Rosette
Plot Data	Apparent Strike
Face Normal Trend	0.0
Face Normal Plunge	90.0
Bin Size	10°
Outer Circle	15 planes per arc
Planes Plotted	58
Minimum Angle To Plot	45.0°
Maximum Angle To Plot	90.0°

70	210
80	300
60	221
90	311
40	120
60	210
90	295
60	190
80	130
70	230
70	135
60	140
70	351
80	321
30	71
80	221
40	120
90	320
80	210
80	301

D.4 Parti 4: Pel nr. 24091-24175

Fall	Fallretning
70	49
80	159
60	299
70	70
90	300
15	160
90	280
90	300
90	310
80	210
60	180
40	0
80	240
90	321
75	240
90	30
85	299
50	180
80	280
10	22
10	302
90	329
80	240
80	300
80	210
90	330
30	128
90	330
90	299
90	270
85	211
90	330
80	300
90	270
90	270
90	270
90	320
80	300
20	115
20	116
20	116
80	10
80	90
80	90
80	91
90	300
90	300

Polplott:

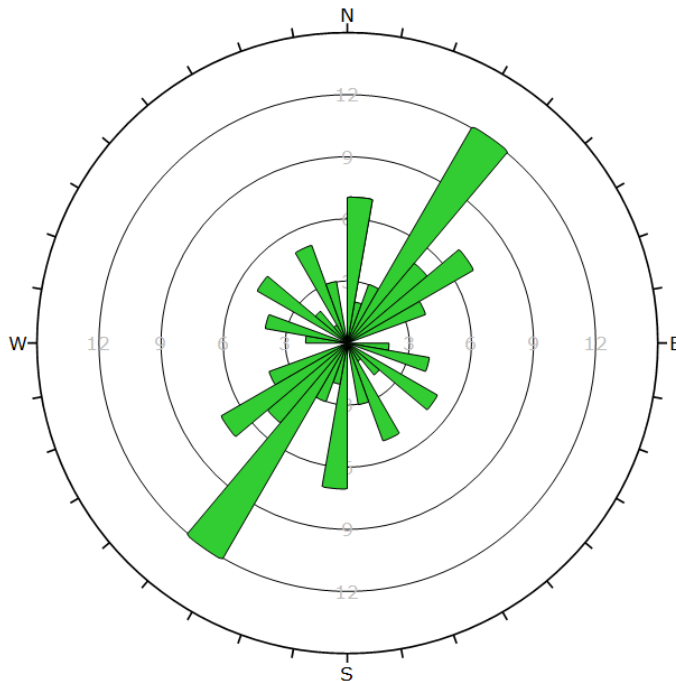


Color	Density Concentrations
	0.00 - 1.90
	1.90 - 3.80
	3.80 - 5.70
	5.70 - 7.60
	7.60 - 9.50
	9.50 - 11.40
	11.40 - 13.30
	13.30 - 15.20
	15.20 - 17.10
	17.10 - 19.00

Contour Data	Pole Vectors
Maximum Density	18.99%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	70 (70 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Angle

Sprekkerose:



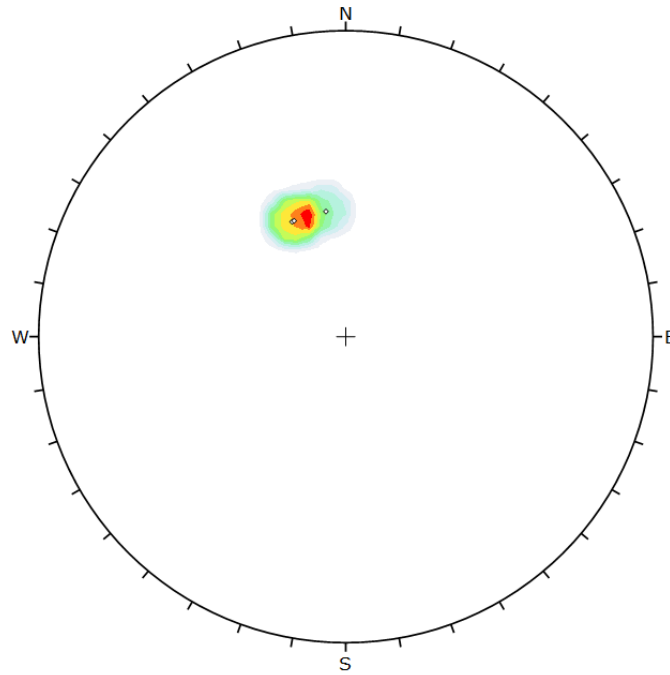
Plot Mode	Rosette
Plot Data	Apparent Strike
Face Normal Trend	0.0
Face Normal Plunge	90.0
Bin Size	10°
Outer Circle	15 planes per arc
Planes Plotted	62
Minimum Angle To Plot	45.0°
Maximum Angle To Plot	90.0°

90	319
90	321
90	320
80	300
85	190
85	190
85	190
90	320
90	320
70	60
85	130
90	130
90	130
70	59
70	60
90	70
90	70
80	220
85	300
85	300
90	300
90	30
90	300

D.5 Parti 5: Pel nr. 26280-26256

Fall	Fallretning
45	171
45	155
45	156

Polplott:



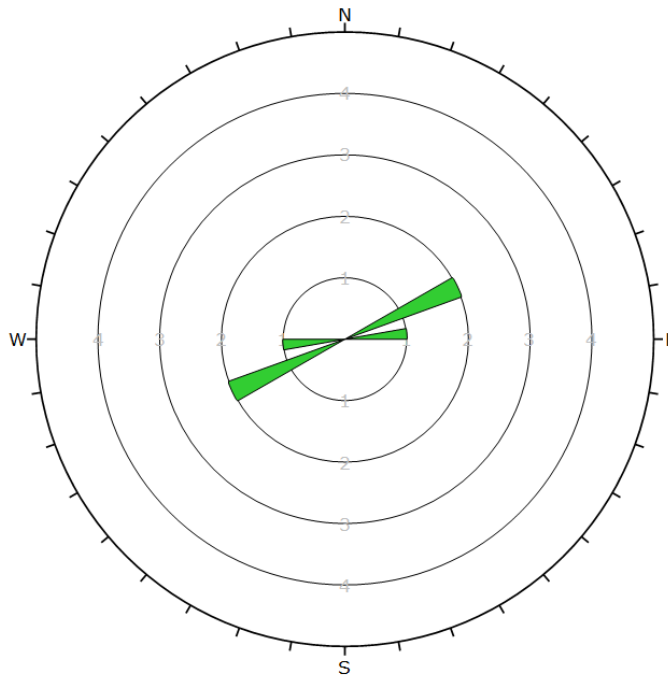
Symbol	Feature
o	Pole Vectors

Color	Density Concentrations
	0.00 - 8.50
	8.50 - 17.00
	17.00 - 25.50
	25.50 - 34.00
	34.00 - 42.50
	42.50 - 51.00
	51.00 - 59.50
	59.50 - 68.00
	68.00 - 76.50
	76.50 - 85.00

Contour Data	Pole Vectors
Maximum Density	84.98%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	3 (3 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Angle

Sprekkerose:

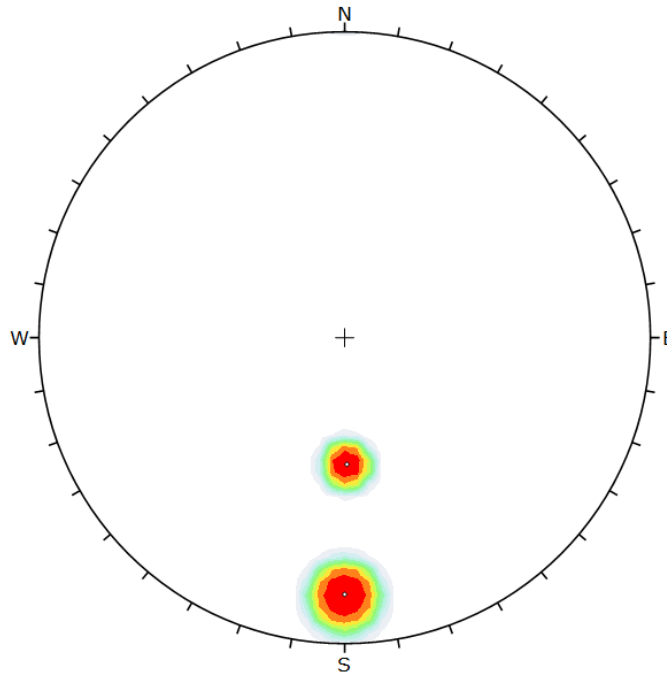


Plot Mode	Rosette
Plot Data	Apparent Strike
Face Normal Trend	0.0
Face Normal Plunge	90.0
Bin Size	10°
Outer Circle	5 planes per arc
Planes Plotted	3
Minimum Angle To Plot	45.0°
Maximum Angle To Plot	90.0°

D.6 Parti 6: Pel nr. 26790-26766

Fall	Fallretning
80	0
45	359

Polplott:



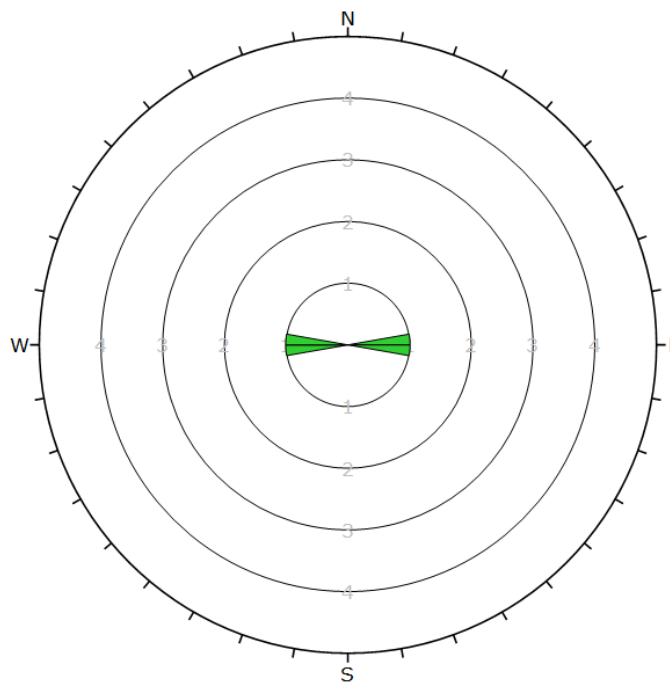
Symbol	Feature
◊	Pole Vectors

Color	Density Concentrations
	0.00 - 5.00
	5.00 - 10.00
	10.00 - 15.00
	15.00 - 20.00
	20.00 - 25.00
	25.00 - 30.00
	30.00 - 35.00
	35.00 - 40.00
	40.00 - 45.00
	45.00 - 50.00

Contour Data	Pole Vectors
Maximum Density	49.99%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	2 (2 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Angle

Sprekkerose:

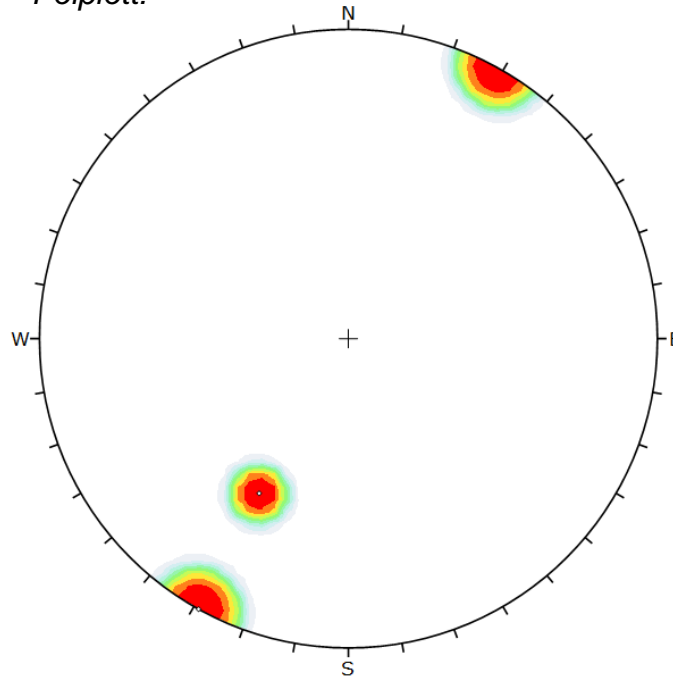


Plot Mode	Rosette
Plot Data	Apparent Strike
Face Normal Trend	0.0
Face Normal Plunge	90.0
Bin Size	10°
Outer Circle	5 planes per arc
Planes Plotted	2
Minimum Angle To Plot	45.0°
Maximum Angle To Plot	90.0°

D.7 Parti 7: Pel nr. 27160-26139

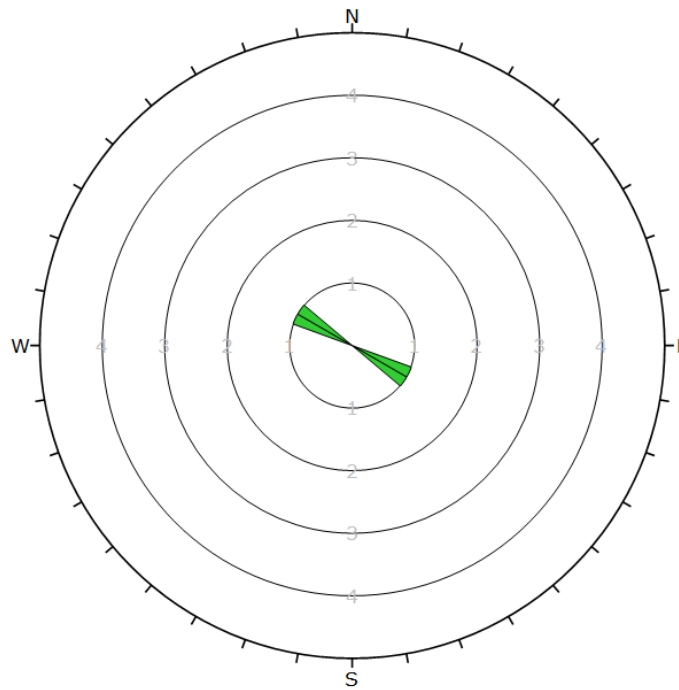
Fall	Fallretning
90	29
60	30

Polplott:



Symbol	Feature
○	Pole Vectors
Density Concentrations	
Color	Density Concentrations
	0.00 - 5.00
	5.00 - 10.00
	10.00 - 15.00
	15.00 - 20.00
	20.00 - 25.00
	25.00 - 30.00
	30.00 - 35.00
	35.00 - 40.00
	40.00 - 45.00
	45.00 - 50.00
Contour Data	
Contour Data	Pole Vectors
Maximum Density	49.90%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%
Plot Mode	
Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	2 (2 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Angle

Sprekkerose:

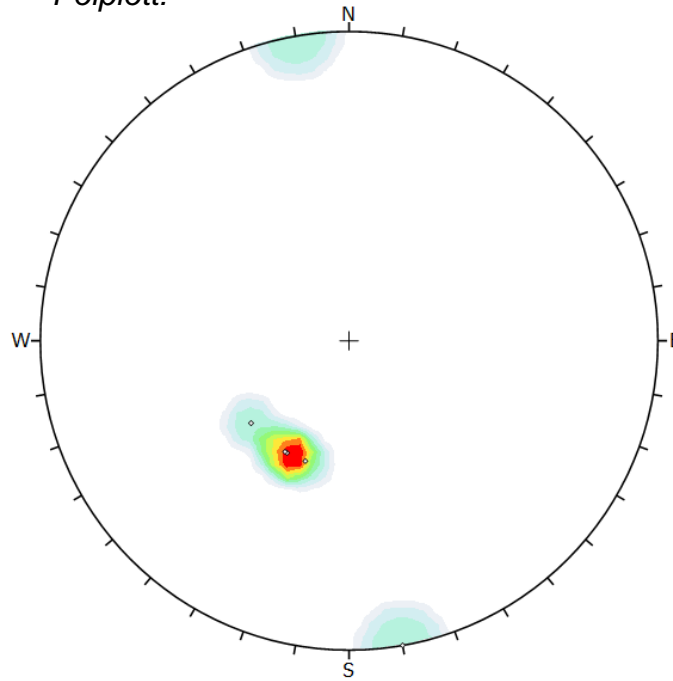


Plot Mode	Rosette
Plot Data	Apparent Strike
Face Normal Trend	0.0
Face Normal Plunge	90.0
Bin Size	10°
Outer Circle	5 planes per arc
Planes Plotted	2
Minimum Angle To Plot	45.0°
Maximum Angle To Plot	90.0°

D.8 Parti 8: Pel nr. 27438-27370

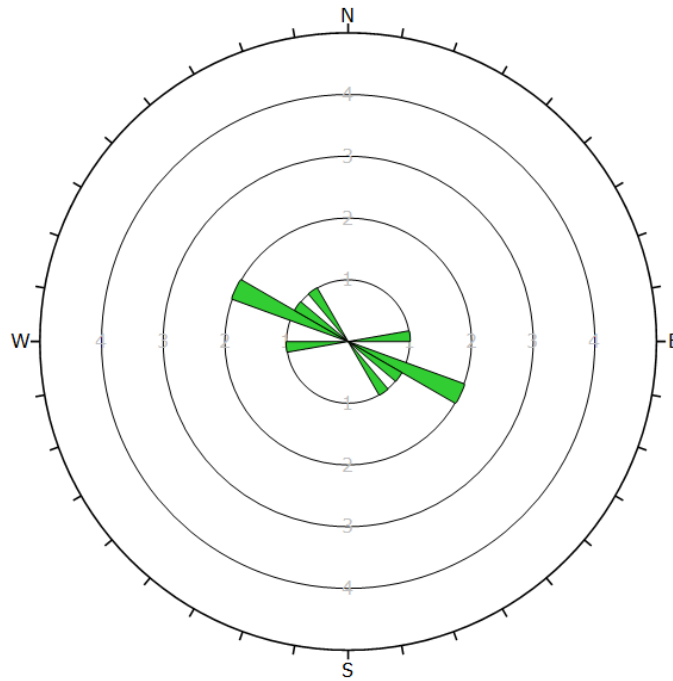
Fall	Fallretning
90	350
45	50
45	20
45	29
45	30

Polplott:



Symbol	Feature
o	Pole Vectors
Color	Density Concentrations
	0.00 - 5.60
	5.60 - 11.20
	11.20 - 16.80
	16.80 - 22.40
	22.40 - 28.00
	28.00 - 33.60
	33.60 - 39.20
	39.20 - 44.80
	44.80 - 50.40
	50.40 - 56.00
Contour Data Pole Vectors	
Maximum Density	55.92%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%
Plot Mode Pole Vectors	
Vector Count	5 (5 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Angle

Sprekkerose:

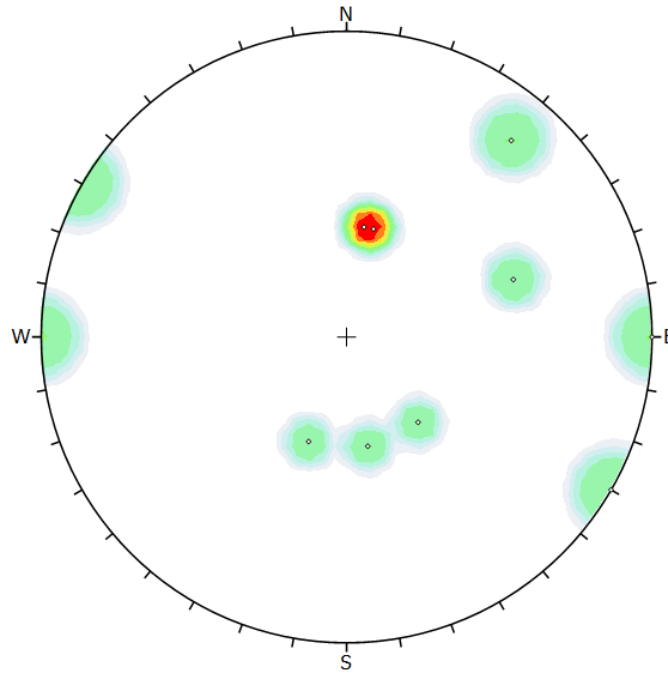


Plot Mode	Rosette
Plot Data	Apparent Strike
Face Normal Trend	0.0
Face Normal Plunge	90.0
Bin Size	10°
Outer Circle	5 planes per arc
Planes Plotted	5
Minimum Angle To Plot	45.0°
Maximum Angle To Plot	90.0°

D.9 Parti 9: Pel nr. 32079-32139

Fall	Fallretning
90	300
60	251
80	220
40	20
40	320
90	270
40	194
40	189
40	349

Polplott:



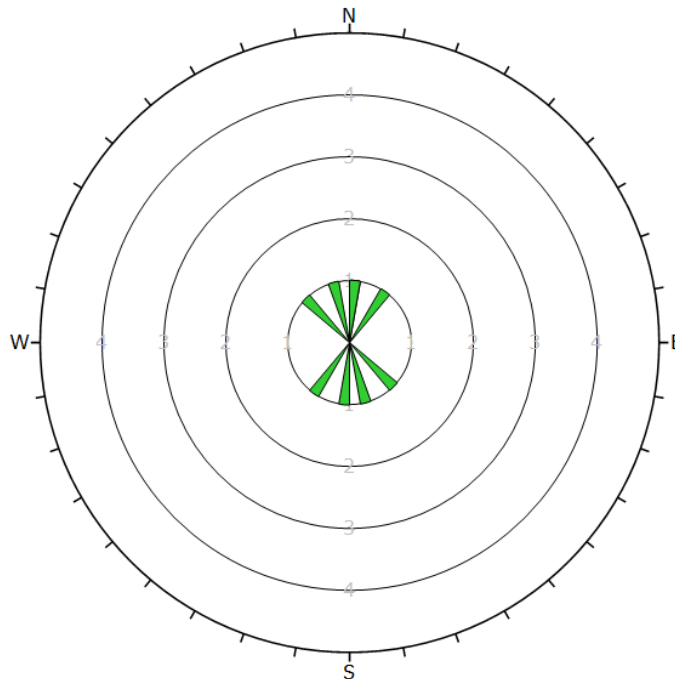
Symbol	Feature
○	Pole Vectors

Color	Density Concentrations
0.00	- 2.20
2.20	- 4.40
4.40	- 6.60
6.60	- 8.80
8.80	- 11.00
11.00	- 13.20
13.20	- 15.40
15.40	- 17.60
17.60	- 19.80
19.80	- 22.00

Contour Data	Pole Vectors
Maximum Density	21.92%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	9 (9 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Angle

Sprekkerose:

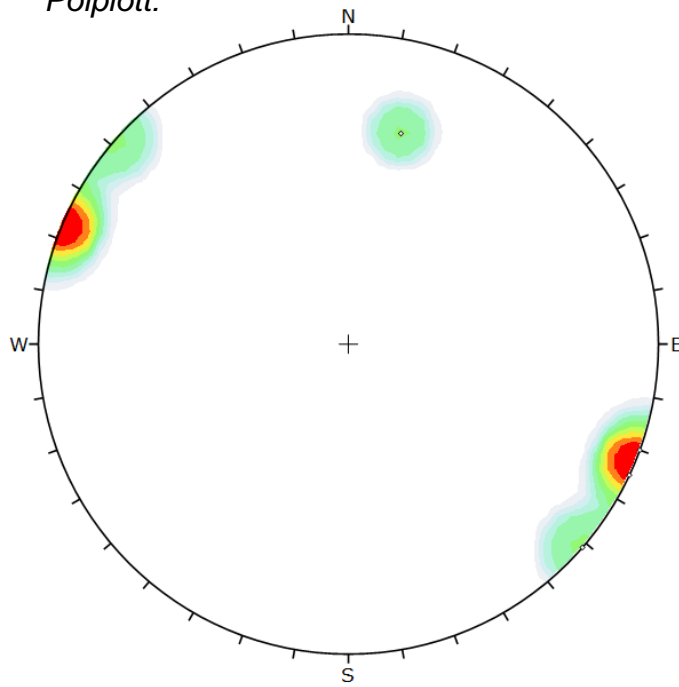


Plot Mode	Rosette
Plot Data	Apparent Strike
Face Normal Trend	0.0
Face Normal Plunge	90.0
Bin size	10°
Outer Circle	5 planes per arc
Planes Plotted	4
Minimum Angle To Plot	45.0°
Maximum Angle To Plot	90.0°

D.10 Parti 10: Pel nr. 32396-32420

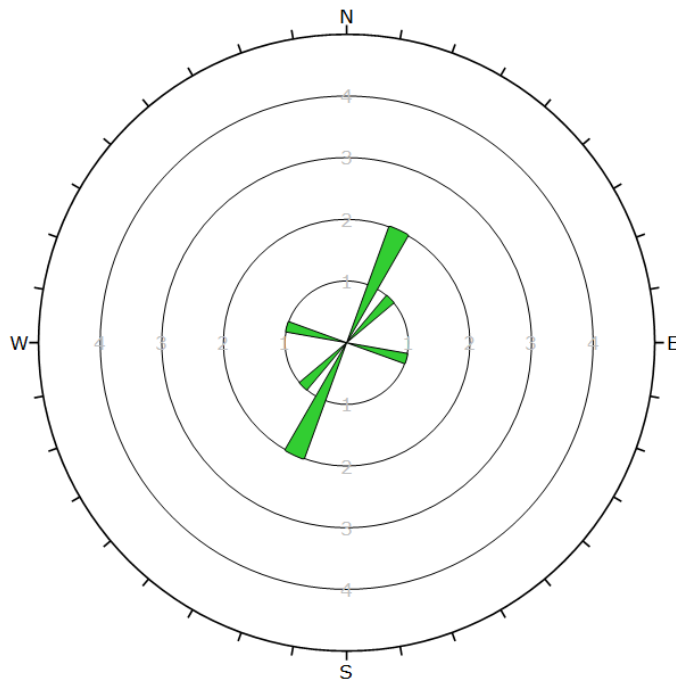
Fall	Fallretning
90	311
90	290
70	194
90	295

Polplott:



Symbol	Feature
◊	Pole Vectors
Color	Density Concentrations
	0.00 - 4.90
	4.90 - 9.80
	9.80 - 14.70
	14.70 - 19.60
	19.60 - 24.50
	24.50 - 29.40
	29.40 - 34.30
	34.30 - 39.20
	39.20 - 44.10
	44.10 - 49.00
Contour Data Pole Vectors	
Maximum Density	48.96%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%
Plot Mode Pole Vectors	
Vector Count	4 (4 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Angle

Sprekkerose:

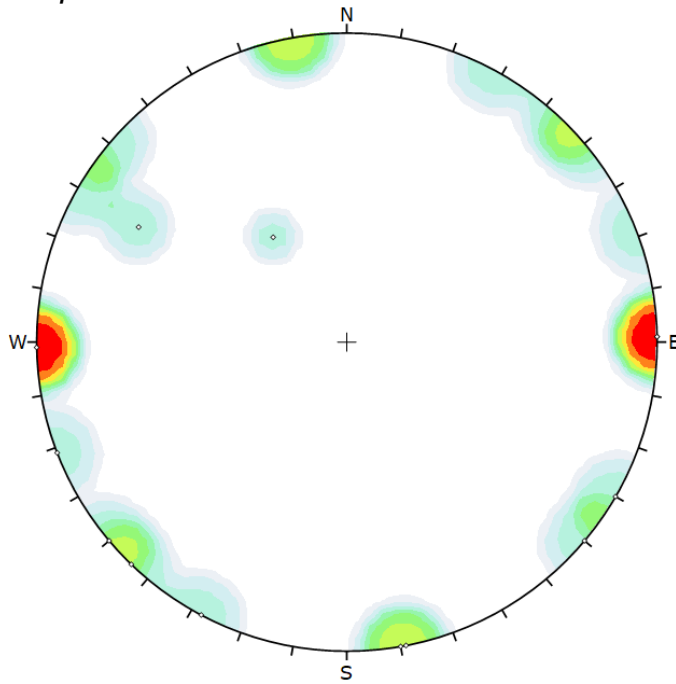


Plot Mode	Rosette
Plot Data	Apparent Strike
Face Normal Trend	0.0
Face Normal Plunge	90.0
Bin Size	10°
Outer Circle	5 planes per arc
Planes Plotted	4
Minimum Angle To Plot	45.0°
Maximum Angle To Plot	90.0°

D.11 Parti 11: Pel nr. 32700-32817

Fall	Fallretning
90	44
90	310
90	50
90	350
90	269
90	269
75	119
90	69
90	349
90	89
90	28
90	300
45	145

Polplott:



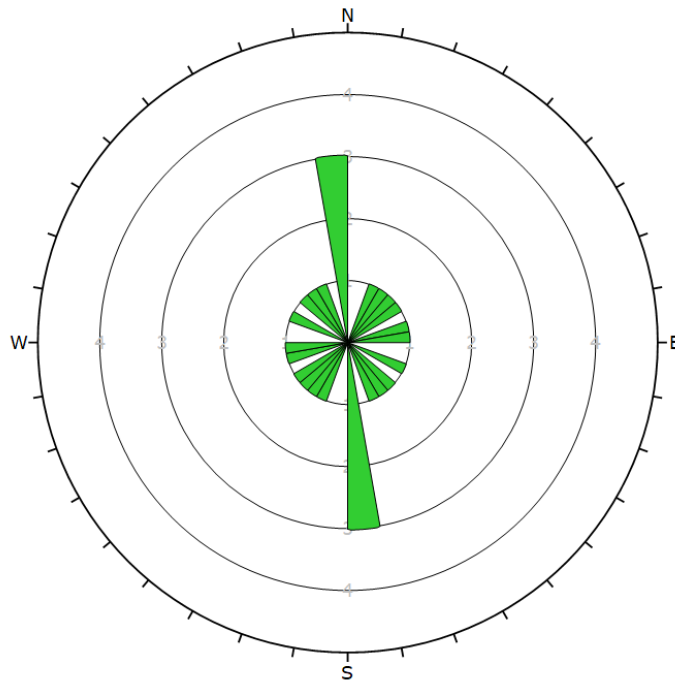
Symbol	Feature
o	Pole Vectors

Color	Density Concentrations
	0.00 - 2.30
	2.30 - 4.60
	4.60 - 8.90
	8.90 - 9.20
	9.20 - 11.50
	11.50 - 13.80
	13.80 - 16.10
	16.10 - 18.40
	18.40 - 20.70
	20.70 - 23.00

Contour Data	Pole Vectors
Maximum Density	22.95%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	13 (13 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Angle

Sprekkerose:

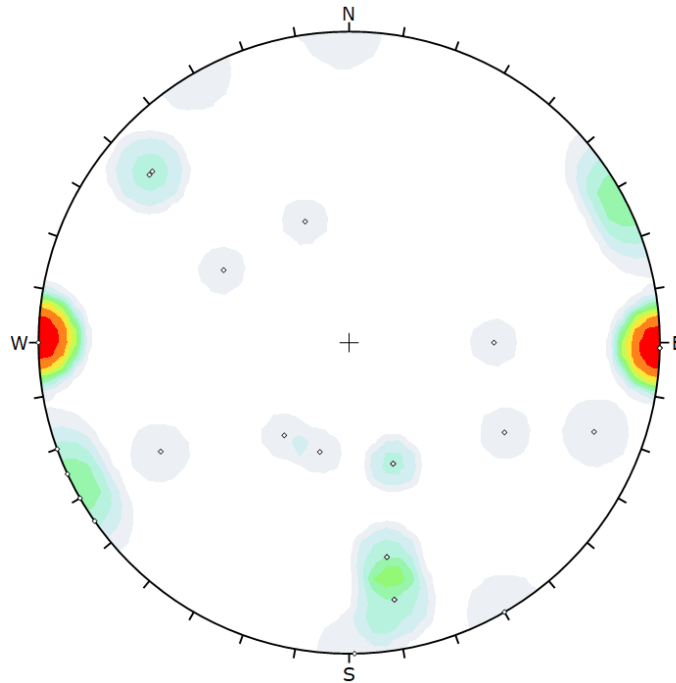


Plot Mode	Rosette
Plot Data	Apparent Strike
Face Normal Trend	0.0
Face Normal Plunge	90.0
Bin Size	10°
Outer Circle	5 planes per arc
Planes Plotted	13
Minimum Angle To Plot	45.0°
Maximum Angle To Plot	90.0°

D.12 Parti 12: Pel nr. 32840-32944

Fall	Fallretning
80	290
90	359
50	120
60	300
80	130
80	131
45	160
90	90
45	340
70	350
90	271
90	271
70	350
90	271
80	350
40	35
90	330
90	60
90	271
80	350
45	340
90	271
70	60
90	55
40	15
50	270
90	65
90	70

Polplott:



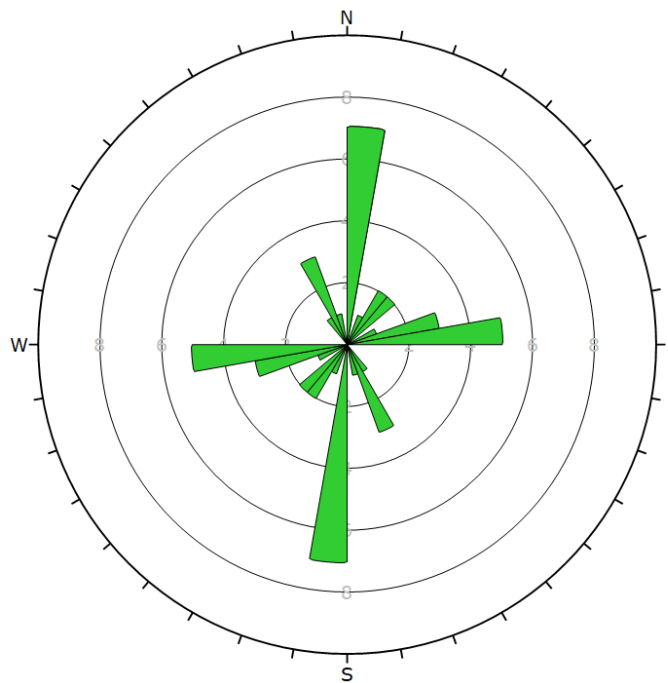
Symbol	Feature
○	Pole Vectors

Color	Density Concentrations
	0.00 - 2.20
	2.20 - 4.40
	4.40 - 6.60
	6.60 - 8.80
	8.80 - 11.00
	11.00 - 13.20
	13.20 - 15.40
	15.40 - 17.60
	17.60 - 19.80
	19.80 - 22.00

Contour Data	Pole Vectors
Maximum Density	21.33%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	28 (28 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Angle

Sprekkerose:



Plot Mode	Rosette
Plot Data	Apparent Strike
Face Normal Trend	0.0
Face Normal Plunge	90.0
Bin Size	10°
Outer Circle	10 planes per arc
Planes Plotted	28
Minimum Angle To Plot	45.0°
Maximum Angle To Plot	90.0°

Vedlegg E: Injeksjonsskjermer

E.1: Injeksjonsparametere

	Pelnr. start	Pelnr. slutt	Antall skjermer	Antall hull	Hulldybde [m]	Mengde [kg]	Mengde [kg/m skjerm]	Sement-type
Parti 1	23275	23299	1	30	24	53000	2208,3	industri
	23291	23315	1	30	24	42000	1750,0	industri
	23306	23330	1	30	24	28999	1208,3	industri
	23322	23346	1	30	24	68161	2840,0	industri
	23339	23363	1	30	24	26598	1108,3	industri
Parti 2	23654	23678	1	44	24	34543	1439,3	industri
	23670	23694	2	22+37	24	25295+23276	2023,8	industri
	23677	23701	1	50	24	38725	1613,5	industri
	23693	23717	1	35	24	33637	1401,5	industri
	23707	23731	1	35	24	32179	1340,8	industri
	23723	23747	2	39+16	24	18142+3314	894,0	industri
	23738	23762	1	40	24	20749	864,5	industri
	23744	23768	1	35	24	23975+11432	1475,3	industri+mikro
Parti 3	23775	23799	1	35	24	10852	452,2	mikro
	23792	23816	1	35	24	14281	595,0	mikro
	23852	23876	1	33	24	7181,6	299,2	mikro
	23868	23892	1	31	24	11104	462,7	mikro
Parti 4	24091	24109	1	57	18	29742	1652,3	mikro
	24100	24118	1	57	18	32359	1797,7	mikro
	24104	24122	1	59	18	23947	1330,4	mikro
	24108	24126	1	57	18	26227	1457,1	mikro
	24121	24139	1	45	18	14370	798,3	mikro
	24132	24150	1	33	18	4612	256,2	mikro
	24157	24175	1	33	18	5288	293,8	mikro
Parti 5	26280	26256	1	26	24	38000	1583,3	industri
Parti 6	26790	26766	1	22	24	52703	2196,0	industri
Parti 7	27160	27139	1	27	21	47128	2244,2	industri
Parti 8	27394	27370	1	24	24	40800	1700,0	industri
	27438	27414	1	22	24	46130,8	1922,1	industri
Parti 9	32079	32103	1	30	24	33363	1390,1	industri
	32115	32139	1	26	24	21790	907,9	industri
Parti 10	32396	32420	1	27	24	42636	1776,5	industri
Parti 11	32700	32724	1	36	24	31784	1324,3	industri
	32715	32739	1	26	24	79620	3317,5	industri
	32732	32756	1	30	24	24000	1000,0	industri
	32755	32779	1	29	24	32941	1372,5	industri
	32759	32783	1	33	24	41833	1743,0	industri
	32763	32787	1	38	24	45923	1913,5	industri
	32775	32799	1	27	24	17445	726,9	industri
	32793	32817	1	26	24	22510	937,9	industri
Parti 12	32840	32864	1	26	24	30773	1282,2	industri
	32856	32880	1	28	24	24420	1017,5	industri
	32872	32896	1	28	24	23384	974,3	industri
	32886	32910	1	26	24	13436	559,8	industri
	32904	32928	1	31	24	71979	2999,1	industri
	32918	32942	1	25	24	31258	1302,4	industri
	32921	32937	1	34	16	65999	4124,9	industri
	32929	32944	1	36	15	41511	2767,4	industri

E.2 Q-verdier og parametere

	Pelnr. Start	Pelnr. Slutt	Q-verdi (snitt)	RQD (snitt)	Jn (snitt)	Jr (snitt)	Ja (snitt)	SRF (snitt)	RQD/Jn (snitt)	Jr/Ja (snitt)
Parti 1	23275	23299	1,83	43,3	9,0	1,5	4,0	1,0	4,8	0,4
	23291	23315	1,87	44,2	9,0	1,5	4,0	1,0	4,9	0,4
	23306	23330	1,57	40,0	9,0	1,5	4,0	1,2	4,4	0,4
	23322	23346	0,95	44,2	9,0	1,5	4,0	2,2	4,9	0,4
	23339	23363	1,20	48,8	9,0	1,5	4,0	2,0	5,4	0,4
Parti 2	23654	23678	0,57	35,8	9,0	1,5	4,0	2,5	4,0	0,4
	23670	23694	0,52	30,8	9,0	1,4	4,0	2,2	3,4	0,4
	23677	23701	0,92	32,5	9,0	1,4	4,0	1,8	3,6	0,4
	23693	23717	2,37	44,2	9,0	1,4	2,9	1,0	4,9	0,5
	23707	23731	3,10	57,5	9,3	1,2	2,1	1,0	6,3	0,6
	23723	23747	3,17	56,7	11,3	1,4	2,0	1,0	5,1	0,7
	23738	23762	3,20	51,7	12,0	1,5	2,0	1,0	4,3	0,8
	23744	23768	2,88	52,9	12,5	1,4	2,0	1,0	4,2	0,7
Parti 3	23775	23799	3,70	66,3	11,0	1,5	2,6	1,0	6,3	0,6
	23792	23816	6,29	79,2	8,5	1,5	2,4	1,0	9,5	0,7
	23852	23876	11,83	69,8	6,1	1,7	1,8	1,0	12,5	1,0
	23868	23892	10,58	63,5	7,1	1,7	1,9	1,0	10,2	1,0
Parti 4	24091	24109	2,86	66,7	9,0	1,4	3,0	1,0	7,4	0,5
	24100	24118	2,83	62,5	9,0	1,5	3,7	1,0	6,9	0,4
	24104	24122	2,38	59,2	9,0	1,5	3,7	1,0	6,6	0,4
	24108	24126	2,41	61,4	9,0	1,5	3,5	1,0	6,8	0,4
	24121	24139	5,15	71,4	9,8	2,0	2,8	1,0	8,1	0,8
	24132	24150	6,94	77,8	15,3	2,8	2,2	1,0	6,1	1,3
	24157	24175	8,36	70,0	7,0	2,2	2,0	1,0	10,4	0,8
Parti 5	26280	26256	14,00	66,7	4,0	1,5	1,8	1,0	16,7	0,8
Parti 6	26790	26766	28,50	85,0	2,5	1,6	2,3	1,0	38,1	0,7
Parti 7	27160	27139	13,40	72,6	4,6	1,7	3,0	1,0	17,7	0,6
Parti 8	27394	27370	14,70	67,1	4,6	2,0	2,3	1,0	15,3	0,9
	27438	27414	30,00	90,0	3,0	2,0	2,0	1,0	30,0	1,0
Parti 9	32079	32103	8,33	70,0	5,8	2,0	3,0	1,0	12,4	0,7
	32115	32139	19,50	78,3	3,6	2,0	2,6	1,0	22,7	0,8
Parti 10	32396	32420	12,24	77,7	3,3	1,9	3,7	1,0	23,8	0,5
Parti 11	32700	32724	16,65	75,2	4,4	1,5	1,7	1,0	17,8	0,9
	32715	32739	15,50	76,3	4,0	1,5	1,9	1,0	19,1	0,8
	32732	32756	11,17	70,6	4,1	1,4	2,3	1,0	17,6	0,6
	32755	32779	1,72	37,1	6,0	1,2	4,6	1,0	6,2	0,3
	32759	32783	1,77	37,9	6,0	1,2	4,6	1,0	6,3	0,3
	32763	32787	1,50	35,4	6,0	1,1	4,6	1,0	5,9	0,2
	32775	32799	1,50	35,0	6,0	1,0	4,0	1,0	5,8	0,3
	32793	32817	6,29	57,1	5,8	1,5	3,1	1,0	10,1	0,6
Parti 12	32840	32864	3,12	55,4	6,0	1,0	3,0	1,0	9,2	0,3
	32856	32880	3,38	60,8	7,6	1,3	3,0	1,0	8,2	0,4
	32872	32896	2,80	55,8	9,0	1,5	3,4	1,0	6,2	0,5
	32886	32910	2,40	57,5	9,0	1,5	4,0	1,0	6,4	0,4
	32904	32928	2,35	60,4	8,6	1,3	3,9	1,0	7,1	0,3
	32918	32942	1,71	52,3	8,5	1,0	3,8	1,0	6,3	0,3
	32921	32937	1,85	52,5	8,3	1,0	3,8	1,0	6,6	0,3
	32929	32944	1,40	50,0	9,0	1,0	4,0	1,0	5,6	0,3

E.3 Sprekkesett som er subparallele med utvalgte strøk

	Pelnr. Start	Pelnr. Slutt	Sprekkesett strøk (N-S)	Sprekkesett strøk (NØ-SV)	Sprekkesett strøk (Ø-V)	Sprekkesett strøk (NV-SØ)
Parti 1	23275	23299	4	35	66	-
	23291	23315	-	44	66	-
	23306	23330	12	75	85	-
	23322	23346	12	-	89	105
	23339	23363	10	44	93	120
Parti 2	23654	23678	1	74	74	-
	23670	23694	-	-	76	-
	23677	23701	5	-	80	-
	23693	23717	5	-	85	-
	23707	23731	-	-	89	-
	23723	23747	25	25	109	149
	23738	23762	-	-	90	-
Parti 3	23744	23768	-	-	90	-
	23775	23799	24	24	90	-
	23792	23816	25	25	89	-
	23852	23876	-	38	-	123
Parti 4	23868	23892	-	42	-	125
	24091	24109	-	33	90	-
	24100	24118	150	34	90	150
	24104	24122	150	55	120	150
	24108	24126	-	59	-	-
	24121	24139	0	55	-	-
	24132	24150	180	50	-	-
Parti 5	24157	24175	-	35	-	-
	26280	26256	-	-	71	-
Parti 6	26790	26766	-	-	90	-
Parti 7	27160	27139	-	-	120	120
Parti 8	27394	27370	-	-	80	-
	27438	27414	-	-	116	116
Parti 9	32079	32103	30	30	-	130
	32115	32139	-	-	280	-
Parti 10	32396	32420	23	23	104	-
Parti 11	32700	32724	-	40	-	137
	32715	32739	-	-	80	140
	32732	32756	179	-	80	-
	32755	32779	168	29	79	-
	32759	32783	168	29	79	-
	32763	32787	168	29	79	-
	32775	32799	169	-	100	-
Parti 12	32793	32817	30	30	118	118
	32840	32864	30	30	89	-
	32856	32880	-	40	-	-
	32872	32896	0	-	80	-
	32886	32910	1	-	80	-
	32904	32928	1	-	80	-
	32918	32942	0	-	80	150
	32921	32937	0	-	80	150
32929	32944	154	-	-	154	

