

Injeksjon på Bodøtunnelen

Analyse av elektronisk injeksjonsdata

Sølve Utstøl Pettersen

Tekniske geofag

Innlevert: juni 2016

Hovedveileder: Eivind Grøv, IGB

Medveileder: Viggo Aronsen, Statens Vegvesen

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for geologi og bergteknikk



MASTEROPPGAVEN

Kandidatens navn: Sølve Utstøl Pettersen

Oppgavens tittel: Injeksjon på Bodøtunnelen, analyse av elektronisk injeksjonsdata

English title: An analysis of rock mass grouting results at Bodøtunnelen

Utfyllende tekst: Kandidaten skal utføre et supplerende litteratursøk med fokus på injeksjonstrykks betydning for utførelsen og kvaliteten på berginjeksjon. Høytrykksinjeksjon er ofte assosiert med risiko for hydraulisk jekking, kandidaten skal gjøre en teoretisk evaluering av dette fenomenet som grunnlag for tolkning av innsamlet data.

Det skal samles inn data fra injeksjonsarbeidene som utføres på Bodøtunnelen gjennom våren 2016, dette materialet utgjør basis for oppgaven. Slike data skal inkludere, men ikke være begrenset av følgende:

- Tunnelkartlegging, geologi bergemekaniske forhold
- Vanntapmålinger (Water pressure testing – lugeon testing)
- Observasjon av injeksjonsarbeidet
- Elektronisk injeksjonslogger
- MWD data

Forandring av trykk og strømning under injeksjonsforløpet vil studeres. Sammenhenger mellom målt data og erfaringer/observasjoner undersøkes

Ansvarlig faglærer og hovedveileder for oppgaven er prof. II Eivind Grøv, Institutt for geologi og bergteknikk.

Oppgaven skal leveres i 4 trykte eksemplarer samt pdf-versjon.

Studieretning: Teknisk geologi

Hovedprofil: Ingeniørgeologi/bergteknikk

Tidsrom: 15.01.2016-15.06.2016

Eivind Grøv
Faglærer

SKJEMAET TAS INN SOM SIDE 1 I MASTEROPPGAVEN
NTNU, 8 juni 2016

Sammendrag

I prosesskoden fra Statens vegvesen er det krav om at injeksjonsforløpet kan dokumenteres med variasjon i trykk og masseinnngang over tid. Det foreligger derfor mye informasjon om trykkutviklingen under injeksjonen som kan bidra til å øke forståelsen av injeksjonsprosessen. Data fra injeksjonsarbeidet på Bodøtunnelen er samlet og danner grunnlaget for analyse av injeksjonsforløpene og hvorvidt hydraulisk jekking har forekommet. Injeksjonsdataene er også brukt til sammenligning av geologiske data. Som teoretisk utgangspunkt for analysene er det utført et litteraturstudie med fokus på trykkets betydning for injeksjon, men som også omhandler andre forhold som er relevant for undersøkelsene.

Bodøtunnelen er en toløps vegtunnel som går under bebyggelse og stedvis lav overdekning. Tunnelen går med et lavbrekk med pumpeump på laveste punkt. For den største delen av strekningen varierer overdekningen mellom 20 og 40 meter. Bergartene i området er i hovedsak kalkglimmerskifer, men med mindre intrusjoner av pegmatittganger.

For å vurdere hvorvidt jekking har forekommet ble injeksjonsforløpet studert og reduksjon i trykk relativt til volumstrøm ble registrert som kritisk trykk. Undersøkelsene viste at hydraulisk jekking har forekommet i alle skjermene i studiet. Kritisk trykk lå i de fleste tilfeller over 35-40 bar for en overdekning på 35-40 meter.

Analysen av injeksjonsforløpene ble utført ved en visuell kategorisering ut fra når i forløpet hoveddelen av trykkoppbyggingen fant sted. Det ble delt i seks typer forløp. Disse forløpene ble sammenlignet med andre injeksjonsparametere utledet av data fra injeksjonsloggen. Når i forløpet trykkoppbyggingen startet hadde tydelig sammenheng med volum injisert og gjennomsnittlig volumstrøm. Det ble funnet en tendens til at injeksjonsskjermer med stor andel forløp med tidlig trykkoppbygging hadde dårlig tetteresultat. Operatørvhengighet ble også vurdert og det ble funnet at operatøren har betydelig innvirkning på injeksjonsarbeidet. Ulike operatører viste også ulik fordeling av tilfeller med hydraulisk jekking.

Injeksjonsparametere ble også sammenlignet med geologisk data. Generelt var det dårlig korrelasjon mellom geologisk data og injeksjonsparametere. Det ble imidlertid funnet sammenheng mellom type forløp og borsynk. Forløp med tidlig trykkoppbygging samsvarte med lav borsynk, mens forløp med trykkoppbygging sent i forløpet samsvarte med høyere borsynk. Borsynken viste også en viss korrelasjon med volum injisert.

Abstract

The general description for road tunnels built in Norway requires that both the pressure and flow measured throughout the grouting process be documented. There is, therefore, plenty of available data describing the development in pressure during the grouting and which may contribute to the understanding of the grouting progress. Data from the grouting work on the Bodø tunnel are collected as the basis for analyzing the grouting progress and evaluation of whether hydraulic jacking has occurred. The data is also compared with geological data. A literature review is carried out with focus on the impact this particular pressure has on the grouting work.

The Bodø tunnel is a road tunnel consisting of two tunnels side-by-side. The tunnels are passing areas with low overburden and are designed with a sag-curve to gain cover. At the lowest point there is a pump station to dispose inleakage of water. Most of the tunnel has an overburden between 20 and 40 meters. The rock consists mainly of a calcareous mica schist with smaller pegmatite intrusions.

To evaluate whether hydraulic jacking occurs, the grouting progress is studied and pressure reduction relative to the flow is recorded as a critical pressure. The analysis shows that hydraulic jacking has occurred in all the grouting umbrellas in the study. The critical pressure was in most cases above 35-40 bar with an overburden of 30-40 meters.

The analysis of the grouting progress is carried out by a visual categorization with respect to when in the process the pressure builds up. It is divided into six categories. These categories are compared to other grouting parameters derived from the grouting data. The categories showed clear connection to the volume grouted and the mean flow. The category representing early pressure build up is associated with areas containing the most leakage in the tunnel. Operator dependency is evaluated and is found to have significant influence on the grouting progress. Cases with hydraulic jacking are also distributed differently for the operators.

The grouting parameters are compared to geological data. In general, the correlation between the grouting and the geological parameters are weak. However, the category of grouting progress and penetration rate were found to be related. Grouting progress with early pressure build up is related to a low penetration rate, while grouting progress with late pressure build up is related to a higher penetration rate. In addition, the penetration rate showed correlation to the volume grouted.

Forord

Denne oppgaven er utført ved Institutt for geologi og bergteknikk ved NTNU, våren 2016. Oppgaven er gjennomført i samarbeid med Statens Vegvesens Region Nord. Medveileder fra Statens Vegvesen har vært Viggo Aronsen, som også er ansvarlig geolog på Bodøtunnelen. Jeg vil takke Viggo for tilrettelegging slik at jeg kunne skrive om injeksjon på Bodøtunnelen.

Under arbeidet har jeg fått sitte på Statens Vegvesens brakkerigg på anleggsområdet til Bodøtunnelen. Dette har gitt meg kort veg til befaringer på stuff og en unik mulighet til å følge injeksjonsarbeidet på nært hold. Jeg vil takke hovedveileder ved NTNU, Eivind Grøv, for råd og veiledning under arbeidet med oppgaven og for raske svar på epost og Skype møter da jeg har vært i Bodø det meste av tiden. Jeg vil også rette en takk til kontrollingeniørene på Bodøtunnelen for å dele erfaringer og kunnskap om injeksjon samt holde meg oppdatert på arbeidet i tunnelen. Takk også til operatørene som har svart på utallige spørsmål under injeksjonsarbeidet og som har gitt meg innsikt i den praktiske gjennomføringen av arbeidet. Susan, min kone, fortjener også takk for sin overbærenhet med meg i denne perioden.

Til slutt vil jeg takke min mor og far, Elisabeth og Ketil Pettersen, for korrekturlesing.

Innholdsfortegnelse

Figurliste	xiv
Tabelliste	xvi
1. Innledning	1
1.1. Bakgrunn	1
1.2. Mål og omfang.....	1
1.3. Fremgangsmåte.....	2
1.4. Disposisjon	3
1.5. Avgrensninger	3
1.6. Begrepsavklaring	4
2. Bodøtunnelen	5
2.1. Beskrivelse av anlegget	5
2.2. Regionalgeologi.....	6
2.3. Forundersøkelser	7
2.4. Injeksjonsarbeid på Bodøtunnelen.....	8
2.4.1 Injeksjonsmasse	10
3. Litteraturstudie	11
3.1. Innledning.....	11
3.2. Geologi	11
3.3. Undersøkelser før driving.....	12
3.4. Undersøkelser under driving	12
3.4.1 Vanntapsmåling	13
3.4.2 Measurement While Drilling	14
3.5. Strømning i sprekker	15
3.5.1 Strømning av vann.....	15
3.5.2 Relasjon mellom strømning av vann og injeksjonsmasse.....	16
3.6. Injeksjonsarbeider.....	17
3.6.1 Formål.....	17
3.6.2 Utførelse	17
3.6.3 Injeksjonsskjerm	18
3.7. Spredning av injeksjonsmasse	18
3.8. Sprekkeåpningens betydning for spredning	20
3.9. Trykk	21
3.10. Jekking	21
3.11. Konsekvenser av jekking	23
3.11.1 Heving av terreng.....	23
3.11.2 Fylling av sprekker som er mest åpen.....	23
3.11.3 Åpning av sprekker utenfor det injiserte området.....	23

3.11.4	Økt tids- og materialforbruk	23
3.12.	Sementbasert injeksjonsmateriale	24
3.12.1	Reologi.....	24
3.12.2	Inntrengning.....	25
3.12.3	Sementtype	25
4.	Datainnsamling og metode for analyse.....	27
4.1.	Innledning.....	27
4.2.	Datainnsamling og undersøkelser av geologi.....	28
4.2.1	Oppsprekkingsgrad	28
4.2.2	Orientering av sprekker.....	29
4.2.3	Bergoverdekning	30
4.2.4	Innlekkasjemålinger fra sonderhull.....	30
4.2.5	Fuktkartlegging	31
4.2.6	Vanntapsmålinger	32
4.2.7	MWD-data	32
4.3.	Injeksjonsdata	33
4.3.1	Data fra injeksjonsrapport.....	33
4.3.2	Data fra injeksjonslogg	34
4.4.	Analyse av jekking	36
4.5.	Analyse av injeksjonsforløp	38
4.6.	Sammenligning av geologi og injeksjon	42
4.7.	Statistisk og grafisk analyse av data	43
5.	Resultater	45
5.1.	Inndeling av kapittelet	45
5.2.	Geologi	45
5.2.1	Diskontinuiteter	45
5.2.1.1	Hydrogeologiske forhold	47
5.2.2	Sonderboring.....	48
5.2.3	Overdekning	48
5.2.4	RQD.....	49
5.2.5	MWD	50
5.3.	Oversikt over forbruk og strømning	51
5.4.	Trykkreduksjon.....	53
5.5.	Karakteristikk av injeksjonsforløp.....	55
5.6.	Geologi og injeksjon.....	63
6.	Diskusjon.....	67
6.1.	Innledning.....	67
6.2.	Hydraulisk jekking	67
6.2.1	Innfylling av injeksjonsmasse i sprekker	67
6.2.2	Kritisk trykk.....	67

6.2.3	Teoretisk vurdering av kritisk trykk.....	68
6.2.4	Sammenheng mellom kritisk trykk og overdekning	68
6.2.5	Sammenheng mellom kritisk trykk og volum injisert.....	69
6.2.6	Brå og gradvis trykkreduksjon.....	69
6.2.7	Usikkerhet.....	70
6.2.8	Oppsummering	70
6.3.	Injeksjonsforløp.....	71
6.3.1	Tetteresultat og injeksjonsforløp.....	71
6.3.2	Volum injisert og gjennomsnittlig volumstrøm	71
6.3.3	Geologi	71
6.3.4	Hydraulisk jekking vurdert i forhold til injeksjonsforløpene	73
6.3.5	Operatørvhengighet.....	74
6.3.6	Hydraulisk jekking og operatørvhengighet	75
6.3.7	Usikkerhet.....	76
6.3.8	Usikkerhet i metoden	77
6.3.9	Oppsummering	78
6.4.	Geologi	78
6.5.	Sammenheng mellom geologi og injeksjon.....	79
6.5.1	Sammenhenger med volum og gjennomsnittlig volumstrømning	79
6.5.2	Usikkerhet.....	80
6.5.3	Oppsummering.....	80
6.6.	Resultatenes betydning for videre driving av Bodøtunnelen.....	81
7.	Avsluttende kommentarer	82
8.	Forslag til videre arbeid.....	83
9.	Referanseliste	84
	Vedlegg A Andel av de ulike typene for hver skjerm.....	1
	Vedlegg B Q-verdi parameter	3
	Vedlegg C Frekvensdiagram for forbruk	4
	Vedlegg D Resultater fra vanntapsmåling	5
	Vedlegg E Kart over anlegget	6

Figurliste

Figur 2.1. Oversiktsbilde over traseen (Norkart, 2015).	5
Figur 2.2. Profil av tunnelen. Vestre påhugg er til venstre. Målestokken er 30 ganger forstørret i høyden i forhold til lengden. Tallene i rødt viser til antatt bergoverdekning i de tre sonene med lavest overdekning. Området skravert i blått er det aktuelle området i oppgaven.	6
Figur 2.3. Kartet viser fordelingen av grunnfjell og ulike dekkeserier i Norland/Midt-Norge (Ramberg et al., 2007).	6
Figur 2.4. Geologisk kart i 50 000 serien (NGU, 2015b). Bodøtunnelen er tegnet inn med blå stippet linje.	7
Figur 3.1. Ulike trykk-strømning forløp og mulige tolkninger.	13
Figur 3.2 Relasjon mellom hydraulisk og fysisk sprekkeåpning (Stille, 2015).	16
Figur 3.3: Viser vanlig injeksjonsprinsipp (Statens vegvesen, 2013).	18
Figur 3.4 Inntrengning av injeksjonsmasse i sprekker.	19
Figur 3.5: Utvidelse av sprekkeåpning større enn $b_{kritisk}$ vil ikke gi økt inntrengning (Rafi og Stille, 2015).	20
Figur 3.6: Grafen viser en oversikt over ulike praksiser i forhold til injeksjonstrykk, dybde og bergmassekvalitet (Rafi et al., 2015). Den blå linjen indikerer norsk praksis i godt fjell (Grøv et al., 2014).	21
Figur 3.7 Overtrykket (P_e) tilsvarer differansen mellom injeksjonstrykket (P_g) og normalspenning (P_i) (Rafi et al., 2014).	22
Figur 3.8: Spredning av injeksjonsmasse, med og uten jekking, som en funksjon av tid (Rafi og Stille, 2015).	24
Figur 4.1. Bildet viser en injeksjonsstav med pakker som brukes til måling av innlekkasje... 31	31
Figur 4.2 Eksempler på brå trykkreduksjon.	37
Figur 4.3 Eksempel på gradvis trykkreduksjon.	37
Figur 4.4 Eksempel på et forløp som ble karakterisert som type 1.	39
Figur 4.5 Eksempel på et forløp som ble karakterisert som type 2.	39
Figur 4.6 Eksempel på et forløp som ble karakterisert som type 3.	40
Figur 4.7 Eksempel på et forløp som ble karakterisert som type 4.	40

Figur 4.8 Eksempel på et forløp som ble karakterisert som type 5.....	41
Figur 4.9 Eksempel på et forløp som ble karakterisert som type 6.....	42
Figur 5.1 Orientering av sprekkesettene S1 og S2.....	46
Figur 5.2 Indikasjon på innlekkasje fra fuktkartleggingen.....	47
Figur 5.3 Målt innlekkasje fra sonderhull mot overdekning.....	48
Figur 5.4 Viser oversikt over målt innlekkasje (søyler) og overdekning (linje) i forhold til profil.	49
Figur 5.5 RQD verdi i forhold til profil.....	49
Figur 5.6 MWD-data for borsynk, tolket oppsprekking og tolket vann. Svart linje representerer gjennomsnittsverdien for verdiene fra de fire sonderhullene med lys farge.....	50
Figur 5.7 Volum injisert i berg per meter tunnel.....	51
Figur 5.8 Antall injeksjonshull med inngang i et gitt intervall.....	52
Figur 5.9 Frekvenskurve for volumstrøm basert på 451 hull.....	53
Figur 5.10 Volumstrøm plottet mot forbruk basert på 452 hull.....	53
Figur 5.11 Gjennomsnittstrykk for hendelser med registrert trykkreduksjon.....	54
Figur 5.12 XY plot for volumverdier over 800 liter og kritisk trykk.....	55
Figur 5.13 XY plot for alle volumverdier og kritisk trykk.....	55
Figur 5.14 Viser hvor stor andel en karakteristikk utgjør i et volumintervall.....	57
Figur 5.15 Viser hvor stor andel en type forløp utgjør for et gitt strømningsintervall.....	58
Figur 5.16 Oversikt over hvilken operatør (A, B og C) som har styrt injeksjonsarbeidet.....	59
Figur 5.17 Diagrammene viser hvordan injeksjonsforløpene er fordelt for den enkelte operatør.	60
Figur 5.18 XY-plot for injisert volum mot volumstrøm for operatørene A, B og C.....	61
Figur 5.19 Andel gradvis og plutselig trykkreduksjon for typene.....	62
Figur 5.20 Andel injeksjonsforløp med trykkreduksjon for operatørene A, B og C.....	63
Figur 5.21 XY-plot som viser borsynk mot injisert volum i berg pr. meter borehull.....	64
Figur 5.22 XY-plot som viser tolket vann mot injisert volum pr. m tunnel.....	64
Figur 5.23 Gjennomsnitt av borparametere for de ulike karakteristikkene.....	65

Figur 5.24 Overdekning plottet mot gradvis trykkreduksjon.....	66
Figur 5.25 Søylediagrammet viser andel av forløp type 1 i forhold til profil. Fargekodene under søylediagrammet viser resultater fra fuktkartleggingen.....	66

Tabelliste

Tabell 2.1 Oversikt over bestillinger fra byggherre.....	9
Tabell 2.2 Egenskaper for industrisement CEM I 42,5 R fra Norcem (Norcem, 2015)	10
Tabell 3.1 Relasjoner mellom sprekkåpning og ulike injeksjonsparametere (Stille, 2015).....	20
Tabell 3.2 Effekt av injeksjonsmassens sammensetning etter (Stille et al., 2012). Røde piler indikerer stor innvirkning.....	25
Tabell 4.1. Geologiske parametere og kilde for innsamlet data.....	28
Tabell 4.2 Parametere som representer hele tverrsnittet brukt i sammenligning mellom geologi og injeksjon.	43
Tabell 4.3 Parametere som representer enkelthull brukt i sammenligning mellom geologi og injeksjon.	43
Tabell 5.1 Resultater fra vanntapsmåling.....	47
Tabell 5.2 Gjennomsnittsverdier for trykkreduksjon.	54
Tabell 5.3 Viser aritmetisk gjennomsnitt og standardavvik for volum og volumstrømning for de ulike typene.	59
Tabell 5.4 Gjennomsnittsverdier for volum injisert og volumstrøm for operatørene.....	62
Tabell 5.5 Korrelasjonskoeffisient, R, for noen injeksjonsparametere sammenlignet med geologi.....	63

1. Innledning

1.1. Bakgrunn

Injeksjon ble satt på dagsorden etter at Puttjern og Lutvann ble tørrlagt, som følge av innlekkasje i Romeriksporten. I etterkant av denne skandalen ble forskningsprosjektet «miljø og samfunnstjenlige tunneler» igangsatt. Prosjektet var et samarbeid mellom ulike aktører i bransjen som samlet erfaringer og kunnskap om injeksjon. Det er over ti år siden sluttrapporten for prosjektet ble utgitt, men injeksjonsarbeid er fortsatt preget av prøving og feiling. I senere år har kravene til tetthet økt, samtidig som det i stadig økende grad blir drevet tunneler under sårbare naturområder og områder med bebyggelse hvor bergoverdekningen er liten. Injeksjon er tidkrevende og kostnadene er ofte i størrelsesorden 20-30 % av drivekostnadene (Strømsvik et al., 2015). Ny kunnskap er nødvendig for å kunne forbedre injeksjonsarbeidet, øke kvaliteten og optimalisere utførelsen.

I Prosesskoden (Statens vegvesen, 2007) kapittel 31.6 er det krav om at injeksjonens forløp, med variasjon i trykk og masseinnngang over tid, skal dokumenteres. Vanligvis foreligger det derfor store mengder data om injeksjonsforløpene. Slike data benyttes i liten grad aktivt i injeksjonsarbeidet, med mindre dataen vises i sanntid på riggen. Endringer og forbedringer av injeksjonsarbeidet på anlegget baseres ofte på «sluttverdier», som mengde injisert og sluttrykk. I denne oppgaven er data som beskriver utviklingen av injeksjonsforløpet basis for analyse av injeksjonsarbeidet.

1.2. Mål og omfang

Målet med oppgaven er:

- Utføre et litteraturstudie med fokus på injeksjonstrykkets betydning for utførelsen og kvaliteten på berginjeksjon.
- Evaluere hvorvidt hydraulisk jekking finner sted under injeksjonsforløpene som er observert.
- Analysere injeksjonsforløp med fokus på utvikling av trykk relativt til strømning.
- Analysere sammenhengen mellom injeksjon og geologi.

Dataen som danner basis for analysen skal samles inn fra injeksjonsarbeidet som utføres på Bodøtunnelen våren 2016.

1.3. Fremgangsmåte

Metodevalg i denne oppgaven er litteraturstudie, innsamling og analyse av elektronisk injeksjonsdata, undersøkelse av geologiske forhold og oppfølging av det injeksjonsarbeidet i tunnelen.

Det ble først utført et litteraturstudie med fokus på injeksjonstrykkets betydning for utførelsen og kvaliteten på berginjeksjon som vil være et teoretisk fundament for analysen. For å besvare de andre delene av oppgaven belyser også litteraturstudiet:

- Geologiske og hydrogeologiske faktorer med betydning for injeksjon.
- Utførelse av injeksjon, spredning av injeksjonsmasse og injeksjonsmaterialer.

Datainnsamlingen ble besluttet utført på vestgående tunnellop fordi dette løpet ikke var påvirket av injeksjon fra nabotunnel. Geologiske parametere ble samlet fra salvekartleggingsskjema, rapporter fra sonderboring, kartgrunnlag, MWD-data, vanntapsmålinger og ved befaringer i tunnelen. Etter innsamling ble dataen behandlet slik at den egnet seg til sammenligning med andre parametere og ble systematisert i datasett.

All kvantitativ injeksjonsdata stammer fra loggesystemet på injeksjonsriggen, LOGAC. Data fra injeksjonsforløpene ble brukt for å undersøke opptreden av hydraulisk jekking. For å finne dette ble det først funnet tilfeller med reduksjon i trykk relativt til volumstrømmen. Trykket og volum injisert før en trykkreduksjon fant sted ble registrert. For å undersøke om dette var jekking ble det undersøkt om trykkreduksjonen inntraff ved bestemte trykk og om det var sammenheng med volum injisert.

Å sammenligne sammensatte kurveforløp med andre parametere representert av enkle tallverdier er utfordrende. Dette ble løst ved å først karakterisere utvikling av trykkoppbygningen i seks typer forløp. Typene ble bestemt med bakgrunn i hvor tidlig i injeksjonen trykkoppbygningen startet. Disse typene utgjorde grunnlaget for videre analyse av injeksjonsforløpene.

Det ble laget datasett både for geologiske parametere og injeksjonsparametere for å undersøke om det kunne finnes målbare sammenhenger. Analysen ble utført med bruk av XY-plot, lineær regresjon og sammenstilling av grafer i forhold til profil.

I tillegg har kandidaten utført en rekke befaringer i tunnelen hvor det er undersøkt geologiske forhold, kartlagt fuktgjennomslag på sprøytebetongen, fulgt med på injeksjonsarbeidet og snakket med operatørene som utfører injeksjonen.

I valg av metodikk er det valgt å gå bredt ut. På den ene siden er dette et dristig valg med tanke på at berginjeksjon påvirkes av mange komplekse sammenhenger noe som kan gjøre det vanskelig å samle løse tråder. På den andre siden gjør nettopp det faktum at injeksjon er så sammensatt at det kan være en fordel å se prosessen i en større sammenheng. I et berganlegg under driving vil det være mange variabler som ikke er mulig å holde konstant. Det er derfor forsøkt og undersøke variabler som geologi og operatørvhengighet slik at disse kan vurderes opp mot resultatene fra analysen av elektronisk injeksjonsdata.

1.4. Disposisjon

Beskrivelse av anlegget og injeksjonsprosedyrene

Litteraturstudie

Datainnsamling og gjennomgang av hvordan undersøkelsene er utført

Resultater

Diskusjon

Konklusjon

1.5. Avgrensninger

Avgrensninger av oppgaven:

- Datagrunnlaget som danner basis for oppgaven er fra vestgående løp fra profil 1500-2230. Med dette er også de geologiske forholdene i undersøkelsen avgrenset.
- Det er kun sett på forinjeksjon
- Det er kun injisert med sementbasert injeksjonsmaterialer, type portlandsement.
- Injeksjonsarbeidet er utført på byggherres og entreprenørs premisser. Kandidaten har ikke mandat til å påvirke injeksjonsprosessen
- Det fokus på injeksjonens betydning for tetting av innlekkasjer, betydning for stabilitet i tunnelen er ikke vurdert
- Økonomisk optimalisering er ikke vurdert, men berøres indirekte ved at forbruk av tid og injeksjonsmasse er evaluert

1.6. Begrepsavklaring

Under er det forklart hva ulike begrep betegner i oppgaven. Ord i parentes representerer alternativ omtale av begrepet.

Hydraulisk jekking (jekking)

Utvidelse av sprekkeåpningen på grunn forårsaket av vann eller injeksjonsmasse under trykk.

Kritisk trykk

Trykket som initierer hydraulisk jekking.

Kritisk sprekkeåpning (b_{kritisk})

Sprekkeåpning som er så stor at trykktap kan neglisjeres.

Minste sprekkeåpning (b_{min})

Minste sprekkeåpning som kan penetreres av en gitt injeksjonsmasse

Trykkoppbygning

Økning i trykk relativt til volumstrømmen

Trykkreduksjon

Reduksjon i trykk relativt til volumstrømmen

Type forløp

Ulike forløp er karakterisert. Definert i kapittel 4.5.

Relativ injeksjonstid

Tid relativ til total injeksjonstid. Brukt for å definere ulike typer forløp

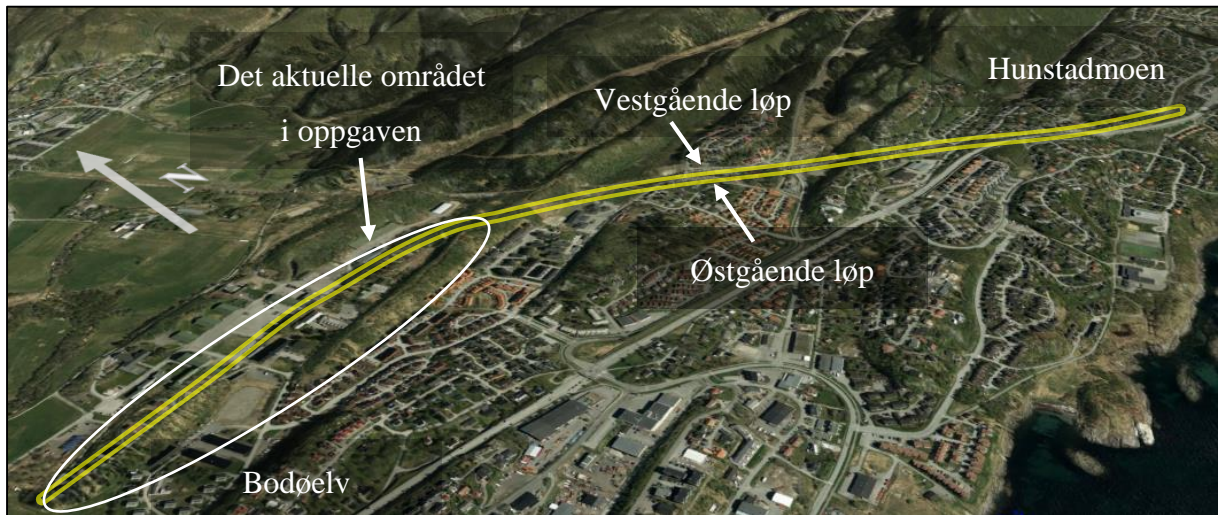
Utgang

Injeksjonsmasse som lekker ut mot en fri overflate. Eksempelvis en nabetunnel eller dagen

2. Bodøtunnelen

2.1. Beskrivelse av anlegget

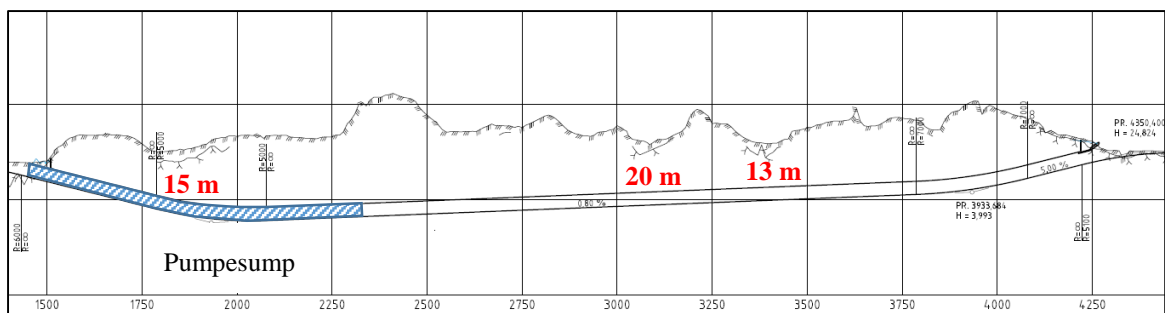
Bodøtunnelen bygges for å øke kapasiteten på Rv.80 inn mot Bodø. Drivingen startet våren 2015 og er forventet ferdig høsten 2018. Det bygges to parallelle løp med to kjørefelt i hver tunnel. Løpene benevnes vestgående og østgående løp etter kjøreretningen, se Figur 2.1.



Figur 2.1. Oversiktsbilde over traseen (Norkart, 2015).

Tunnelene drives med tverrsnitt T9,5 med utvidelser opp til T13. Det er stedvis lav overdekning, kryssing av svakhetssoner, nærhet til bebyggelse, jernbane og annen infrastruktur. Terrenget over tunneltraseen er relativt flat. Tunnelene bygges derfor med et lavbrekk for å øke overdekningen. Laveste punkt er -11 moh. Her vil det etableres en permanent pumpeump.

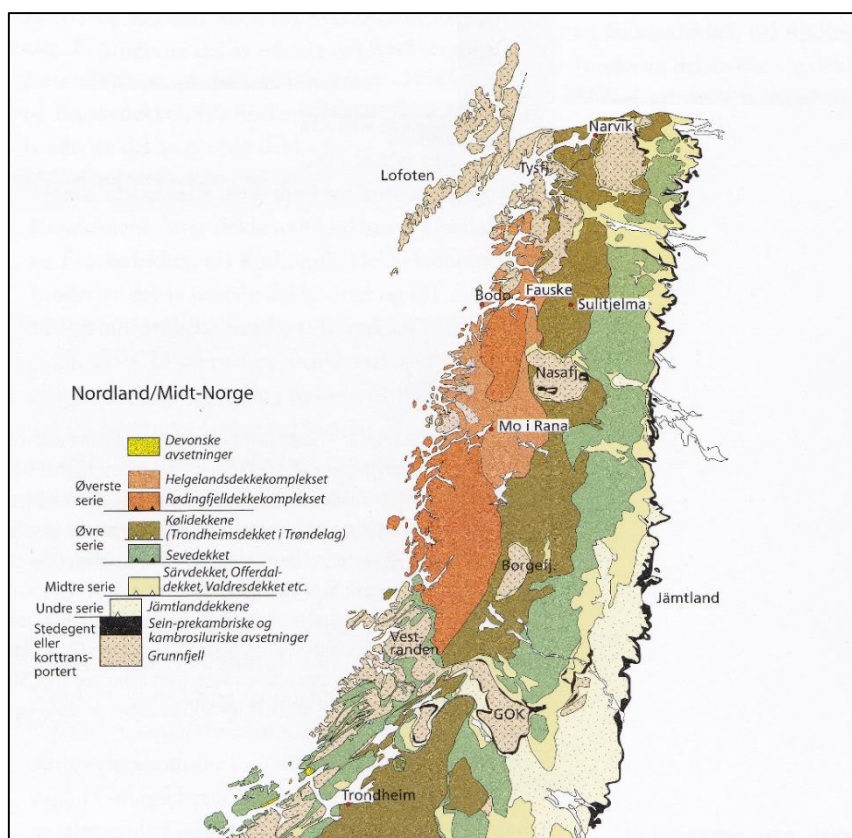
Tunnelene drives kun fra Bodøelv i vest. I kontrakten er det beskrevet at stoffene skal drives med 50 m forskyvning. Etter ønske fra entreprenør, drives de nå tilnærmet parallelt. Det drives først 5% på synk mot det laveste punktet i tunnelen. Etter dette går tunnelen med slak stigning før den stiger med 5% mot påhugget i øst, se Figur 2.2.



Figur 2.2. Profil av tunnelen. Vestre påhugg er til venstre. Målestokken er 30 ganger forstørret i høyden i forhold til lengden. Tallene i rødt viser til antatt bergoverdekning i de tre sonene med lavest overdekning. Området skravert i blått er det aktuelle området i oppgaven.

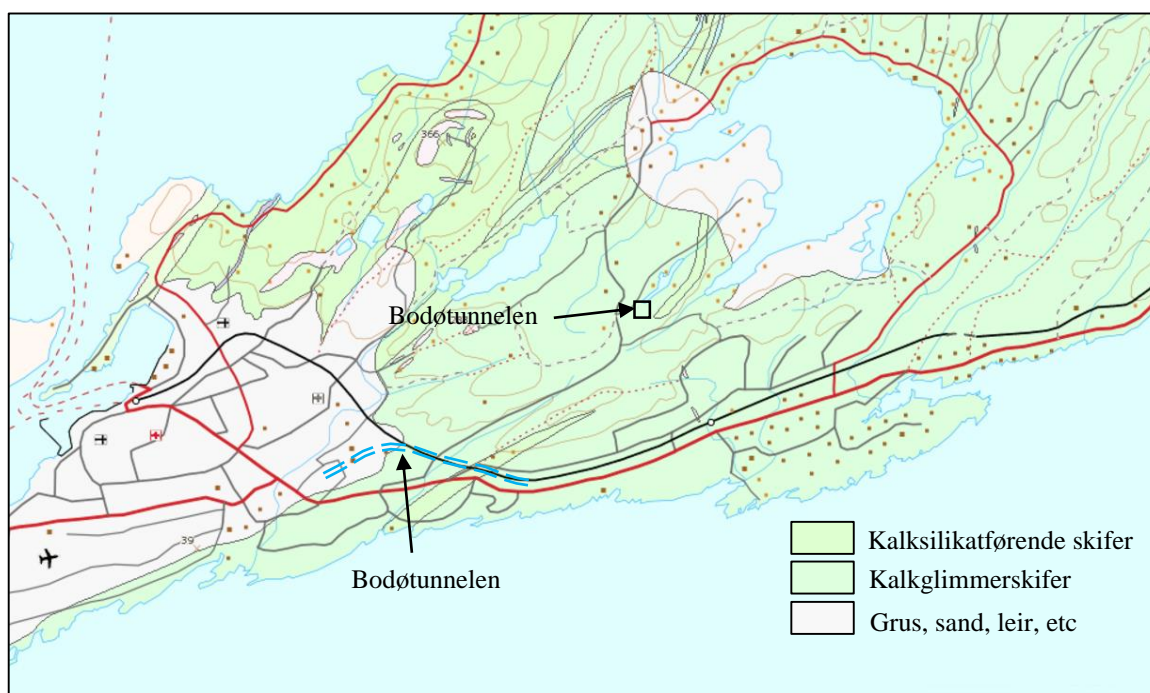
2.2. Regionalgeologi

Kysten mellom Tysfjord og Grong domineres av de øvre skyvedekkerne etter den Kaledonske fjellkjededannelsen, Figur 2.3. Gammel havbunnskorpe og øybuesystemer er basisen for dekkene i området. Det er stor variasjon i bergartenes sammensetning og metamorfosegrad. Noen aktuelle bergarter er marmor, glimmerskifer gabbro, grønnstein, konglomerat, og gneiser. Den øverste delen av dekkeserien, som Bodøhalvøya er en del av, er Helgelandskomplekset (Ramberg et al., 2007).



Figur 2.3. Kartet viser fordelingen av grunnfjell og ulike dekkeserier i Nordland/Midt-Norge (Ramberg et al., 2007).

Hovedbergartene i Helgelandskomplekset er glimmerskifer og glimmergneiser. Disse bergartene bærer preg av middelsgrad metamorfose. Bergartene i Bodø er nærmere bestemt en del av Bodø-gruppen og består i hovedsak av glimmerskifre med vekslende kalkspatinnhold av antatt kambro-silurisk alder, se Figur 2.4. Det er også kartlagt magmatiske gang- og dypbergarter som granitt og tonalitt i (NGU, 2015a).



Figur 2.4. Geologisk kart i 50 000 serien (NGU, 2015b). Bodøtunnelen er tegnet inn med blå stiplede linje.

2.3. Forundersøkelser

Det er gjort en rekke forundersøkelser i forbindelse med tunnelprosjektet, deriblant:

- Ingeniørgeologisk kartlegging
- Refraksjonsseismikk
- Totalsonderboring
- Resistivitet
- Poretrykksbrønner

På bakgrunn av undersøkelsene er det avdekket 5 potensielle svakhetssoner med NØ-SV orientering. Seismisk hastighet i sonene som ble kartlagt med refraksjonsseismikk lå mellom 2600 og 3700 m/s. Seismisk hastighet i bergmassen utenom svakhetssonene lå typisk i intervallet 4800 – 5500 m/s. Det ble utført 4 profiler med resistivitetsmålinger. Refraksjon

seismikk og resistivitet ble ikke utført i samme profiler. De så likevel ut til å gi utslag på de samme sonene. Resistivitetsmålingene indikerte i tillegg noen andre anomalier som ikke er verifisert med andre metoder. På bakgrunn av totalsonderboring er bergoverdekningen antatt å være mellom 13 og 20 m for tre av de tolkede svakhetssonene. Grunnvannstanden målt i 8 poretrykksbrønner var i gjennomsnitt på 1,8 meter under terreng våren 2012. Det laveste nivået var 3,5 meter under terrengoverflaten. Under ingeniørgeologisk kartlegging ble det funnet tre sprekkesett. Det mest utpregede var oppsprekking langs foliasjonen som har strøk mot EØ med fall både mot NV og SØ. De to andre sprekkesettene som har slak vinkel på hverandre (10-30°). Disse to sprekkesettene står relativt normalt på strøket til foliasjonen og har steilt fall mot både NØ og SV. En mer utfyllende beskrivelse av de geologiske forholdene er gitt i kapittel 5.2. med bakgrunn i kartlegging og datasamling under driving av tunnelen.

2.4. Injeksjonsarbeid på Bodøtunnelen

Injeksjon ble besluttet av følgende grunner:

- Hindre setninger og skade på bebyggelse.
- Redusere mengde vann som må pumpes ut av tunnelen.
- Redusere tapet av grunnvann som en ressurs.

Ut fra hvor sensitiv områdene er for grunnvannssenkning er det satt to ulike krav til maksimal innlekkasje. Det strengeste tetthetskravet, krav A, er 5 liter/minutt/100 meter per tunnellopp. Tetthetskrav B er 10 liter/minutt/100 meter tunnellopp. Krav B gjelder for området som er aktuelt i oppgaven. I området med krav B er det planlagt behovsprøvd injeksjon. Det vil si at avgjørelsen om injeksjon blir tatt på bakgrunn av mengde innlekkasje fra sonderhull. Starkriteriet er satt til:

- ≥ 3 l/min fra enkelthull
- Totalt ≥ 5 l/min fra samtlige hull

Sonderhullene bores systematisk med en overlapp på ca. 6 m. Sonderhullene er 27 m lang. Diameteren er 64 mm. Det ble vanligvis boret 4 sonderhull. Plassering og stikning på hullene er slik at de kan inngå i en evt. injeksjonsskjerm.

Det ble boret 35 injeksjonshull i hver skjerm, inkludert 8 hull i stoffen, fra profil 1831-2085. Etter profil 2085, ble i utgangspunktet annethvert hull i skjermen boret. Dersom det kom vann fra ett hull, ble nabohullene også boret. Antall hull er gitt i

Tabell 2.1. Stikningen var 5 m, dvs. 10,5° i forhold til tunnelen.

Sluttrykket var satt til 40 bar i profil 1831 pga. lav overdekning (15 meter). I profil 1851 var overdekningen noe større og sluttrykket ble bestilt 40 bar i hengen og 50 bar i sålen. I resten av de studerte skjermene er det bestilt 50 bar som sluttrykk. Injeksjonen starter med å pumpe injeksjonsmasse med V/C-forhold på 0,8. Dersom det ble inngang på 400 liter uten å oppnå ønsket mottrykk, ble det pumpet videre med V/C-forhold på 0,5. Hullet settes på vent dersom det ikke er oppnådd ønsket mottrykk etter 1000 liter med V/C 0,5. I tilfeller hvor det ikke ble oppnådd trykkoppbygning med totalt 1400 l injeksjonsmasse ble det ofte tilsatt ekstra sement i blandingen.

Tabell 2.1 gir oversikt over bestillingene fra byggherre.

Tabell 2.1 Oversikt over bestillinger fra byggherre.

Profil	Antall hull	Sluttrykk [bar] (heng/såle)	Beskrivelse av injeksjonsprosedyre
1831	35	40	400 l v/c 0,8 1000 l v/c 0,6 Hull settes på vent 1-2 timer Videre injisering avgjøres på stuff
1851	35	40/50	400 l v/c 0,8 1000 l v/c 0,5 Hull settes på vent 1-2 timer Videre injisering avgjøres på stuff
1871 -2085	35	50	Samme som over
2110	34	50	Samme som over
2130	31	50	Samme som over
2150	28	50	Samme som over
2175	25	50	Samme som over
2215	28	50	Samme som over
2235	28	50	Samme som over
2255	25	50	Samme som over
2275	29	50	Samme som over
2295	21	50	Samme som over

2.4.1 Injeksjonsmasse

Det er injisert med industrisement CEM I 42,5 R fra Norcem. Sementen tilfredsstiller kravene i NS-EN 197-1:2011 (Standard Norge, 2011) til Portlandsement CEM I 42,5 R. Egenskaper for industrisementen er listet i Tabell 2.2.

Tabell 2.2 Egenskaper for industrisement CEM I 42,5 R fra Norcem (Norcem, 2015)

Egenskap	Deklarerte data	Krav ifølge NS-EN 197-1:2011
Finhet (Blaine m ² /kg)	550	
Spesifikk vekt (kg/dm ³)	3,13	
Volumbestandighet (mm)	1	≤ 10
Begynnende størkning (min)	100	≥ 60
	1 døgn	33
	2 døgn	40
	7 døgn	49
	28 døgn	57
Trykkfasthet (MPa)		≥ 20
		≥ 42,5 ≤ 62,5
Sulfat (% SO ₃)	≤ 4,0	≤ 4,0
Klorid (% Cl ⁻)	≤ 0,085	≤ 0,10
Vannløselig krom (ppm Cr ₆ +)	≤ 2	≤ 2
Alkalier (% Na ₂ Oekv)	1,3	
Klinker (%)	96	95-100
Sekundære bestanddeler (%)	4	0-5

I området aktuelle for oppgaven er de to følgende reseptene benyttet:

- V/C 0,8 med 12% silika (Grout tech)
- V/C 0,5uten silika

3. Litteraturstudie

3.1. Innledning

Hensikten med litteraturstudiet er å danne et fundament for analysen og tolkning av resultater. For å gi grunnlag for analyse og tolkning av hydraulisk jekking og trykkutvikling er det valgt å fokusere på trykkets betydning for injeksjonen. Det er i tillegg tatt med teori om geologiske forhold samt noe informasjon om praktisk utførelse av injeksjon og injeksjonsmaterialer.

3.2. Geologi

Bergmassen i fastlands Norge kan karakteriseres som en sprekkeakvifer hvor hydraulisk konduktivitet i hovedsak er betinget av oppsprekkingsgrad og sprekkenes karakter. Ulike geologiske forhold kan gi karakteristiske sprekkeegenskaper som har stor innvirkning på utførelsen av injeksjonen og hydraulisk konduktivitet i bergmassen. Klüver og Kveen (2004) deler bergmassen inn i fire hovedgrupper:

1. Bergmasse med åpne sprekker uten vesentlig sprekkebelegg. Typiske bergarter er sandsteiner, kvartsitter, granitter og syenitter. Denne type bergmasse har ofte høy konduktivitet og er vanligvis lett og injisere.
2. Bergmasse med sprekkeinnfylling. Tendens til kanaldannelse er typisk for denne gruppen. Prekambriske gneiser representerer ofte denne bergartsklassen. Bergmassen er middels lett å injisere
3. Bergmasse som er tett og har plastisk karakter. Det er ofte høy grad av sprekkefylling og opptreden av små kanaler på tynne sprekker. Metamorfe sedimenter som leirskifre, fyllitter og glimmerskifre samt grønnsteiner, grønnskifre er eksempler på bergarter som kan gi disse forholdene.
4. Bergmasse som er tektonisk påvirket eller karstfenomener som har ført til svært åpne sprekker og kanaler. Store innlekkasjer er typisk.

På grunn av ujevnheter på sprekkeflatene og/eller ulik grad av innfylling er det ikke unormalt at vannet kan være ujevnt fordelt på sprekkeflaten. Undersøkelser av sprekkesystemer og lekkasjer i tunneler drevet med TBM viser at vannlekkasjer ofte konsentreres til et begrenset antall kanaliseringer. Slike kanaliseringer kan oppstå i skjæringen mellom to sprekker (Nilsen og Broch, 2012).

Sprekkens orientering kan ha betydning for innlekkasje. I følge Holmøy (2008) er vannførende sprekkesett i mange tilfeller steile og orientert parallelt med største hovedspenning. Høye spenninger parallelt med sprekkplan har ifølge Mazurek et al. (1996) en tendens til åpne sprekke. En annen mulig årsak til at sprekker med lik orientering er vannførende kan være at en tektonisk skjærbevegelse har bidratt til å avspenne bergmassen i en retning. Selmer (1981) observerte at sprekker med orientering 45° grader $\pm 15^\circ$ på en skjærsoner representerte vannførende sprekker i flere underjordsprosjekter.

3.3. Undersøkelser før driving

Refraksjonsseismikk og kjerneboring m/lugeon målinger kan gi indikasjoner på dårlig bergmasse og bergmasse med høy hydraulisk konduktivitet. Resistivitetsmålinger samt optisk televiwer og geofysikk i borehull er bruk mer de siste årene. Under forundersøkelsesstadiet er det ingen enkelt målemetode som kan gi en sikkerindikasjon på lekkasjeforhold. Grunnen til dette er at mange av metodene ikke er direkte grunnvannsrelatert, men påvirkes av andre forhold som for eksempel oppsprekking. Da mange sprekker og diskontinuiteter ikke har kontakt med et vannmagasin er de ikke vannførende og vil ikke føre til innlekkasje (Nilsen, 2014). De viktigste undersøkelsene for å gi indikasjon på potensial for vannlekkasjer er ifølge Holmøy (2008) studie av regionalgeologi og grundig ingeniørgeologisk kartlegging. Sprekker, forkastnings- og svakhetssoner har spesielt stor innvirkning.

3.4. Undersøkelser under driving

For mange prosjekter i berg utsettes en del detaljerte undersøkelser til drivingen. Undersøkelser under driving er ofte mer nøyaktige på grunn av nærheten til bergmassen som skal undersøkes. Denne tilnærmingen er også ofte mer økonomisk enn om man skulle tilegne seg samme informasjon fra dagen ved forundersøkelser. Aktuelle undersøkelser under driving er i hovedsak innlekkasjemåling og vanntapsmåling. For begge metodene settes borehullene slik at de kan benyttes til eventuell injisering etter utført undersøkelse.

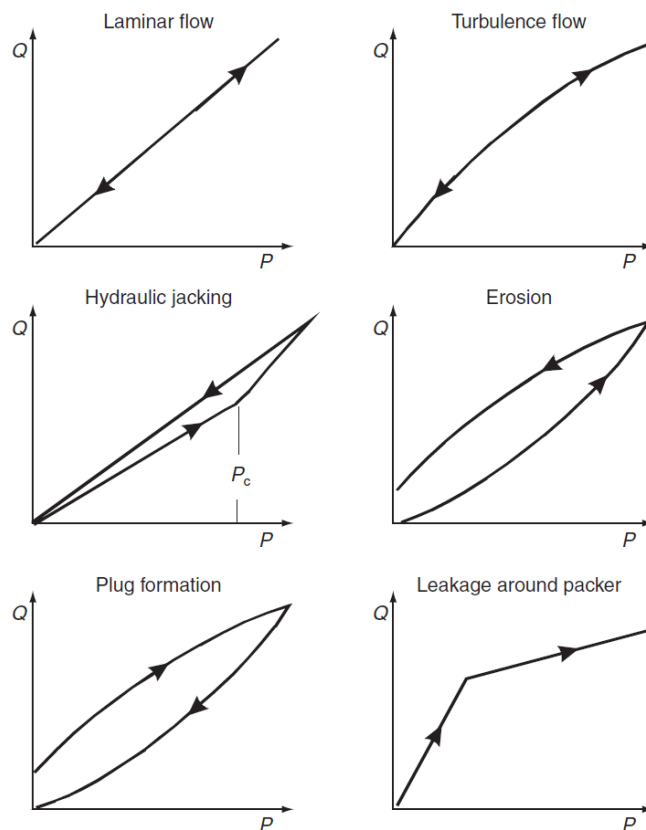
Innlekkasjemåling utføres ved innsamling av utstrømmende vann fra sonderhull. Målingen utføres effektivt ved plassering av injeksjonsstav i hullet og måling ved hjelp av bølge og stoppeklokke (Hognestad et al., 2010). Vanntapsmålinger er nærmere beskrevet i kapittel 3.4.1. Under behovsprøvd injeksjon vil det ofte settes et startkritterium ut fra disse metodene. En vesentlig forskjell mellom disse metodene er:

- Ved måling av innlekkasje måler du vann fra berggrunnen som dreneres inn borehullet.
- Ved vanntapsmåling måles bergmassens kapasitet til å ta opp vann. Sprekkene som tar imot vann kan i utgangspunktet være tørre.

Av denne grunn foreslås Nilsen (2014) måling av innlekkasje som et bedre grunnlag for startkriterium enn vanntapsmåling.

3.4.1 Vanntapsmåling

Vanntapsmåling, også kjent som lugeon test, brukes for å finne hydraulisk konduktivitet til bergmassen. I testen måles vanntapet til bergmassen under et konstant overtrykk i forhold til den opprinnelige trykkehøyde til grunnvannet. Testen kan utføres trinnvis for ulike trykk. En fem-trinns test er ifølge Palmstrøm og Stille (2010) foretrukket. Ifølge Hafezquran og Esmaelpoor (2012) er det dårlig korrelasjon mellom lugeonverdi og mengde injisert. Data fra testen kan likevel gi nyttig informasjon om bergmassens egenskaper. I Figur 3.1 er det presentert eksempler for ulike trykk-strømningsforløp og mulige tolkninger. Testen kan gi indikasjon på hydraulisk konduktivitet i sprekkene, men kan også gi indikasjoner på spenninger og sprekkarakter.



Figur 3.1. Ulike trykk-strømning forløp og mulige tolkninger (Palmstrøm og Stille, 2010).

3.4.2 Measurement While Drilling

Measurement While Drilling (MWD) er en kontinuerlig logging av data under boring uten hindring av fremdriften. Dataen fra boringen gir informasjon om forhold foran stuff og kan i mange tilfeller forutsi svake og vannførende soner. MWD vil derfor være en form for undersøkelse under driving. Dataen kan også fungere som et supplement til dokumentasjon av de geologiske forholdene.

Loggingen omfatter registrering av følgende parameter: hullposisjoner, borsynk, matetrykk, rotasjonstrykk, rotasjonshastighet, slagtrykk, vannmengde og vanntrykk. Parameterne logges som funksjon av boreddybde. Oppløsningen ligger typisk mellom 1-10 cm. De loggede parameterne prosesseres digitalt og gir de tre avledede borparameterne: Tolket hardhet, tolket oppsprekking og tolket vann (Bever Control, 2012).

I denne oppgaven er det sett på parameterne: borsynk, tolket oppsprekking og tolket vann. Grunnlaget for disse parameterne er derfor nærmere forklart.

Borsynk er den faktiske inndriften (cm/min) under boringen. Hardheten på berget og oppsprekking påvirker borsynken. Borsynken vil normalt øke i svakt berg og i noen grad økes ved oppsprukket berg (Bever Control, 2012).

Tolket oppsprekking er basert på både borsynk og rotasjonstrykket. Normalt økes rotasjonstrykket i oppsprukket og svakt berg. Borsynk og rotasjonstrykk vil normalt være stabile ved godt fjell. I oppsprukket fjell vil verdiene variere mer. En vektet verdi av variansen av borsynk og rotasjonstrykk er grunnlaget for vurderingen av tolket oppsprekking (Bever Control, 2012).

Tolket vann er basert på normalisert spylevannsmengde. Normaliseringen er korrigert for spylevannsmengde, inngående trykk og trykkfall i borstenger og skjøtestenger. Raske endringer i vannmengde bestemmes ved minste kvadraters metode. Raske endringer kan skyldes at det bores inn i en vannførende sleppe, men det kan også gi utslag når det ikke er vann, men vannstopp pga. fastboring etc. (Bever Control, 2013).

Borparameterne som blir registrert vil være påvirket av forstyrrelser generert av boresystemet i seg selv. Eksempler på dette er automatiske boremaskinstyringer som justerer matetrykk, slagtrykk etc., på grunn av varierende rotasjonstrykk. Ved filterring og normalisering av data kan store deler av forstyrrelsene separeres ut slik at verdiene som står igjen representerer bergmassen (Bever Control, 2012).

3.5. Strømning i sprekker

Berggrunnens kapasitet til å lede vann danner basis for utforming av injeksjonen. Hvordan vannet fordeler seg på sprekker vil variere. I prinsippet kan strømningen gjennom bergmassen beskrives som summen av strømmen i sprekkeene. Likevel er det ikke en enkel summering av strømningen i hver sprekk, da sprekkeene ikke er uavhengige.

3.5.1 Strømning av vann

Transmissiviteten for en sprekk, T_f , beskriver sprekkes kapasitet til å føre vann (Stille, 2015):

$$T_f = \frac{\rho g}{12\mu} b^3 \quad (3.1)$$

Hvor b er fysisk åpningen på sprekken, ρ er tettheten til vann, g er tyngdeakselerasjonen og μ er viskositeten.

Siden sprekkeåpningen vil variere vil også transmissiviteten i ulike punkt variere. Transmissiviteten bør derfor betraktes som gjennomsnittlig transmissivitet av sprekken. Dersom transmissivitet til en sprekk er funnet kan den hydrauliske åpningen beregnes med relasjonen i ligning 3.1. Den fysiske åpningen b settes da som hydraulisk åpning b_h . Transmissiviteten til bergmassen domineres ofte av få enkeltsprekker. En undersøkelse av Hernqvist et al. (2012) viser at strømningen i en 5 meters seksjon ble dominert av en sprekk. Denne sprekken representerte mellom 30% og 100% av den totale transmissiviteten.

For å finne hydraulisk konduktivitet i en bergmasse er det i prinsippet to modeller som kan benyttes. Den ene modellen baserer seg på en beskrivelse av bergmassen som et kontinuum. Den andre modellen baserer seg på bidraget fra enkeltsprekker. Dette krever at enkeltsprekker måles, noe som er utfordrende rent praktisk og svært tidkrevende. En slik tilnærming er først og fremst av akademisk interesse. Den førstnevnte modellen er langt mer anvendbar og vil presenteres her.

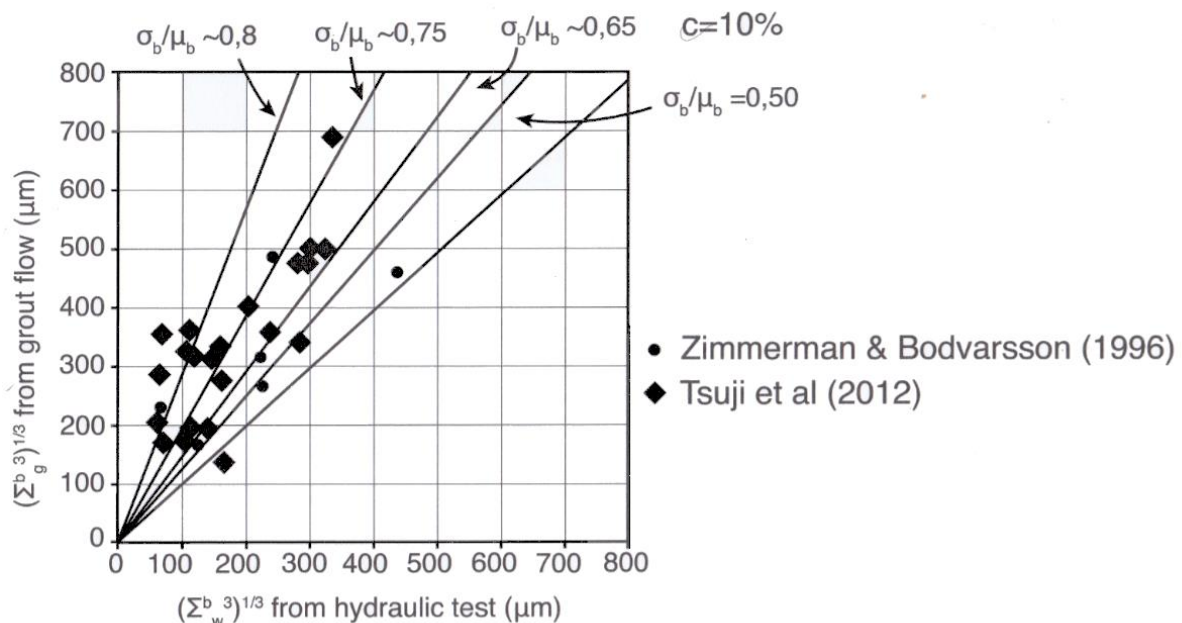
Den hydrauliske konduktiviteten testes i seksjoner av et borehull. Vann pumpes inn i hullet med et konstant overtrykk i forhold til poretrykket samtidig som vanntapet inn i bergmassen samt mottrykket logges, se kapittel 3.4.1. Ved testing av seksjoner i et borehull kan hydraulisk konduktivitet bestemmes ut fra Moyes formel:

$$K = \frac{Q}{L \cdot \Delta H} \left[\frac{1 + \ln\left(\frac{L}{D}\right)}{2\pi} \right] \quad (3.2)$$

Hvor Q er vannstrøm [m³/s], ΔH er differansen i trykkehøyde mellom grunnvannstrykket og pumpetrykket, D er diameter på borehull og L er lengden på seksjonen som er testet.

3.5.2 Relasjon mellom strømning av vann og injeksjonsmasse

I injeksjonssammenheng er det av interesse å finne forholdet mellom fysisk sprekkeåpning og hydraulisk sprekkeåpning. Den hydrauliske åpningen vil være åpningen beregnet ut fra vanntapmålinger, mens den fysiske sprekkeåpningen vil være styrende for inngangen av injeksjonsmasse. Carter et al. (2012) observerte at forholdet mellom fysisk åpning og hydraulisk åpning økte med økende hydraulisk sprekkeåpning. Stille (2015) beskriver relasjonen mellom strømning av vann og strømning av injeksjonsmasse. Figur 3.2 viser at fysisk åpning i mange tilfeller er 2 ganger høyere enn hydraulisk åpning. Dette korresponderer med et forhold på ca. 0,65 til 0,8 mellom fysisk gjennomsnittsåpning μ_b , standardavviket for fysisk gjennomsnittsåpning σ_b



Figur 3.2 Relasjon mellom hydraulisk og fysisk sprekkeåpning (Stille, 2015).

3.6. Injeksjonsarbeider

3.6.1 Formål

Ved injeksjon, med tetting som formål, ønsker man å etablere en sone med lavere konduktivitet rundt tunnellopet. Forenklet kan tettheten av sonen beskrives av to faktorer (Grøv et al., 2014):

- Tykkelsen av sonen med redusert konduktivitet
- Konduktiviteten av sonen

Tykkelsen av sonen med redusert konduktivitet beskriver utbredelsen av injeksjonsmasse i berget. Konduktiviteten av sonen er avhengig type injeksjonsmasse og hvilke sprekker i sonen som er penetrert. Sonen med nedsatt permeabilitet skal være tett nok til at krav til innlekkasje blir oppfylt.

Samtidig ønsker man at injiseringen skal gjøres mest mulig økonomisk. Viktige faktorer i denne sammenhengen er injeksjonstid, mengde injeksjonsmasse, type injeksjonsmasse og boremeter.

3.6.2 Utførelse

Det skilles mellom to ulike strategier ved forinjeksjon: systematisk og behovsprøvd injeksjon. Ved systematisk injeksjon injiseres det sammenhengende på en strekning som er bestemt på forhånd. Ved behovsprøvd injeksjon avgjøres oppstart av injeksjon med bakgrunn i vurderinger på stuff.

Før injeksjonen bores skjermen med borehullene som skal injiseres. Borehullene spyles og det plasseres pakker i alle hullene. Injeksjonsmassen blandes ved stuff. En stempelpumpe presser injeksjonsmassen via en slange til pakkerne i borehullene. Det er flere linjer slik at det kan injiseres i flere hull samtidig. Injiseringen starter i hullene i sålen og avsluttes i hengen.

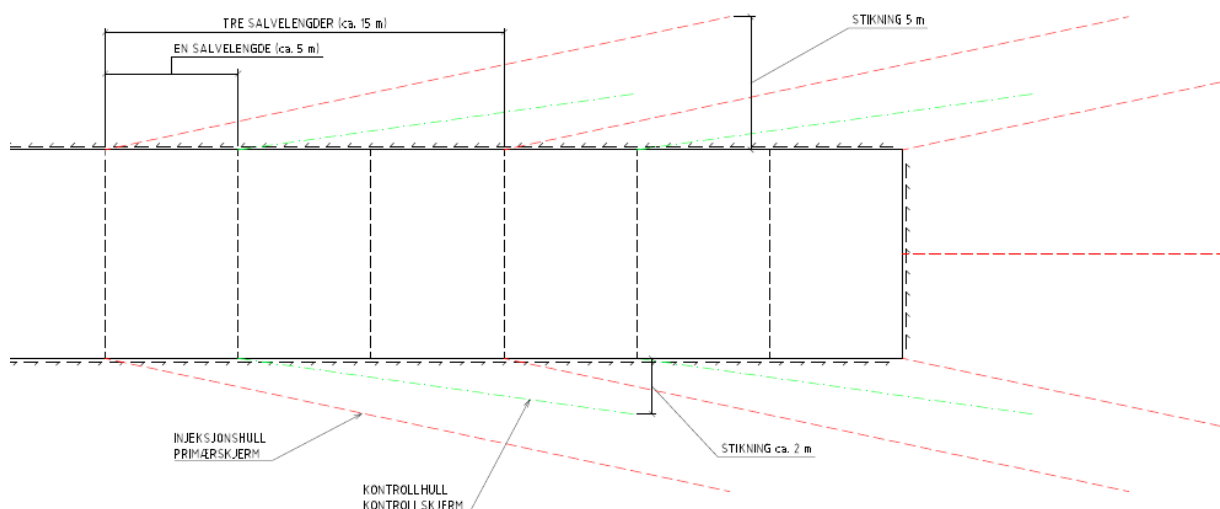
Operatøren kan styre injeksjonen ved å bestemme volumstrøm eller maksimalt trykk. Dersom injeksjonen styres etter volumstrøm vil trykket være avhengig av volumstrømmen. Trykket er forventet å stige mens volumstrømmen holdes konstant. Dersom det injeksjonen styres etter et visst trykk vil volumstrømmen være avhengig av dette trykket. Volumstrømmen er forventet å avta mens trykket holdes konstant.

I praksis kombineres ofte disse to måtene å styre injeksjonen. I starten, når det ofte er stor inngang, kan volumstrømmen styres etter blandekapasiteten på riggen slik at man ikke får unødvendige stopp under injeksjonen. Når ønsket sluttrykk oppnås styres volumstrømmen normalt ut fra dette.

3.6.3 Injeksjonsskjerm

Injeksjonsskjermen må tilpasses etter hvert som man får erfaringer underveis i prosjektet og endringer må vurderes når forholdene forandres. Det er spesielt bergets sprekkekarakteristikk som er avgjørende for utforming av boreplan. Typisk skjerm lengde er 18 til 24 m. Overlapp mellom skjermene er ofte 6 til 10 m. Hullene bores vanligvis med vinkel 5° til 10° i forhold til tunnelaksen. Borehullsdiameteren varierer fra 45 til 64 mm (Hognestad et al., 2010). Figur 3.3 viser vanlig plassering av borehull.

Ved lav overdekning bores det noen ganger ekstra hull utenfor hovedskjermen. Disse hullene injiseres først med lavt trykk med den hensikt å fylle opp åpne sprekker og hulrom. Formålet er at det skal kunne benyttes høyere trykk i hovedskjermen uten å få utgang av injeksjonsmasse i dagen (Hognestad et al., 2010). I storhaugtunnelen ble det benyttet 50 % overlapp mellom skjermene i området med strengest tetthetskrav (Pedersen og Iversen, 2000).



Figur 3.3: Viser vanlig injeksjonsprinsipp (Statens vegvesen, 2013).

3.7. Spredning av injeksjonsmasse

Spredningen av injeksjonsmasse påvirkes av mange komplekse sammenhenger som gjør det vanskelig å modellere prosessen. Materialparametere, geologiske forhold som geometri av sprekkeflater og interaksjon mellom sprekker samt utførelsen av injeksjonsarbeidet er viktige faktorer.

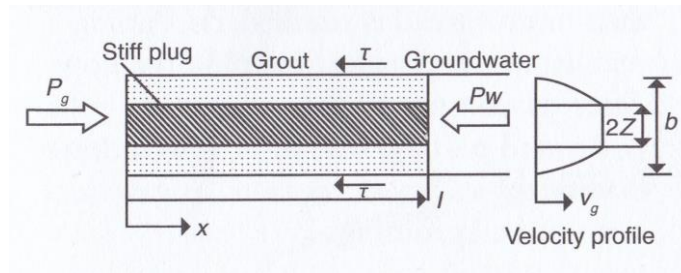
Ved modellering blir ofte injeksjonsmassen beskrevet som et Bingham material. Det vil si at materialet må utsettes for en skjærspenning større en flytspenningen (τ_0) før den flyter.

Skjærspenningen, τ , som virker på materialet under injeksjon vil også være avhengig av viskositeten, μ , se ligning 3.3 (Stille, 2015).

$$\tau = \tau_0 + \mu \cdot \frac{dv}{dy} \quad (3.3)$$

Hvor $\frac{dv}{dy}$ er hastighetsgradienten.

Skjærspenningen avtar fra sprekkeflaten mot midten av sprekken. Sentralt i sprekken hvor skjærspenningene er lavere enn flytspenningen vil injeksjonsmassen oppføre seg som et stivt legeme, se Figur 3.4. Spredningen vil stoppe når det stive legeme fyller hele sprekken. Skjærspenningen langs sprekkeflaten vil da være lik flytspenningen og øvrige spenningene i materialet er da lavere enn flytegrensen. Spredningen i plane og parallelle sprekker vil være proporsjonal med effektivt injeksjonstrykk Δp , som er differansen mellom injeksjonstrykket p_g og det motvirkende grunnvannstrykket p_w .



Figur 3.4 Inntrengning av injeksjonsmasse i sprekker.

Maksimal spredning av injeksjonsmasse kan beregnes som en statisk likevekt. I en kanal eller flate med sprekkeåpning, b , er spredningen gitt som (Gustafson og Stille, 1996)

$$l_{max} = \left(\frac{\Delta P}{2\tau_0} \right) \cdot b \quad (3.4)$$

Ifølge Hässler (1991) kan strømningshastigheten, $\frac{dl}{dt}$, i en kanal kan beregnes ut fra Navier-Stokes ligning:

$$\frac{dl}{dt} = -\frac{dP}{dx} \cdot \frac{b^2}{12\mu_g} \left[1 - 3\frac{z}{b} + 4\left(\frac{z}{b}\right)^3 \right] \quad (3.5)$$

Hvor

$$Z = \tau_0 \cdot \left| \frac{dP}{dx} \right|^{-1}, Z < \frac{b}{2} \quad (3.6)$$

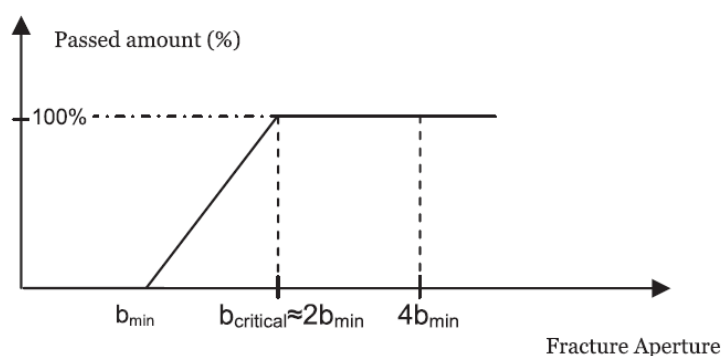
I Tabell 3.1 er det vist hvordan ulike trykk, sprekkeåpning, viskositet og flytegrense påvirker tiden det tar før injeksjonsmassen er spredd en gitt strekning og hvordan volumstrømmen når den gitte strekningen er injisert.

Tabell 3.1 Relasjoner mellom sprekkeåpning og ulike injeksjonsparametere (Stille, 2015).

Situasjon	Sprekke- -åpning	Trykk	Viskositet	Flytegrense	Tid til gitt spredning I	Volumstrøm ved spredning I
Referanse	b	P	μ	τ_0	t	Q
2x trykk	b	2P	μ	τ_0	$\approx \frac{1}{2} t$	$\approx 2Q$
$\frac{1}{2}$ viskositet	b	P	$\frac{1}{2} \mu$	τ_0	$\frac{1}{2} t$	2Q
3x flytegrense	b	P	μ	$3\tau_0$	$\approx 1,1t$	$\approx Q$
2x sprekkeåpning	2b	P	μ	τ_0	$\approx 1/5t$	$\approx 10Q$

3.8. Sprekkeåpningens betydning for spredning

Spredning og inntrengning i sprekker er avhengig av injeksjonsmassens egenskaper og sprekkeåpning og evt. innfylling i sprekken. Injeksjonsmassens begrensninger for inntrengning er beskrevet i kapittel 3.12.2. Som det fremgår av det foregående kapittelet vil tynnere sprekker gi større motstand mot spredning og ved konstant trykk vil spredningen gå saktere med økende avstand fra injeksjonshullet. Dersom sprekkeåpningen er tilstrekkelig stor vil imidlertid trykktapet i sprekken være ubetdelig. Grensen for åpning hvor man kan se bort fra trykktap benevnes som b_{kritisk} . Ifølge Eriksson og Stille (2003) vil en sprekkeåpning som tilsvarer b_{kritisk} sjeldent trenge å være mer enn dobbelt så stor som minste sprekkeåpning injeksjonsmassen kan penetrere, b_{min} . Inntrengning i tynne sprekker vil derfor være svært sensitiv for økning av sprekkeåpning. Ytterligere åpning av sprekker med åpning tilsvarende b_{kritisk} vil ifølge dette ikke påvirke penetrasjonslengden av betydning, se Figur 3.5.



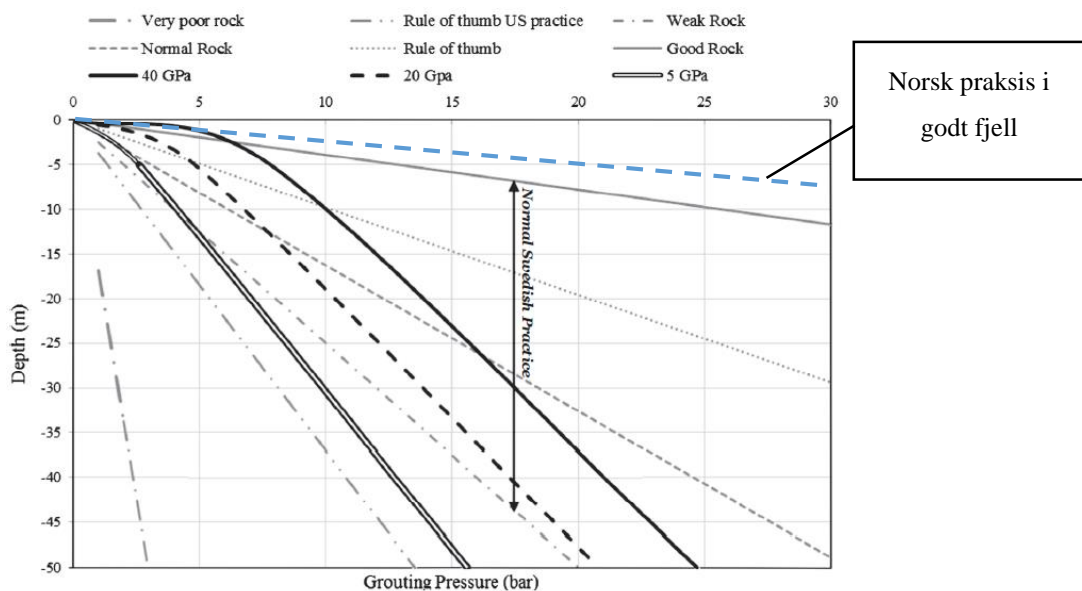
Figur 3.5: Utvidelse av sprekkeåpning større enn b_{kritisk} vil ikke gi økt inntrengning (Rafi og Stille, 2015).

3.9. Trykk

Trykk er en av nøkkelfaktorene som har direkte innvirkning på injeksjonen og som kan tilpasses forholdene. For at injeksjonsmassen skal trenge inn i sprekker må trykket, P_g være større enn grunnvannstrykket, P_w . Differansen betegnes som effektivt injeksjonstrykk:

$$P_g - P_w = P_e \quad (3.7)$$

Økning i trykk gir økning i volumstrømmen. I Tabell 3.1 fremkommer det at trykk og volumstrøm er tilnærmet proporsjonale. Høyt trykk kan føre til stor utvidelse av sprekker og kan gi ukontrollert spredning av sement og permanent deformasjon av bergmassen (Rafi og Stille, 2014). Riktig trykk vil være en balanse mellom de positive og negative virkningene. Figur 3.6 viser en oversikt over ulike praksiser i forhold til injeksjonstrykk.



Figur 3.6: Grafen viser en oversikt over ulike praksiser i forhold til injeksjonstrykk, dybde og bergmassekvalitet (Rafi et al., 2015). Den blå linjen indikerer norsk praksis i godt fjell (Grøv et al., 2014).

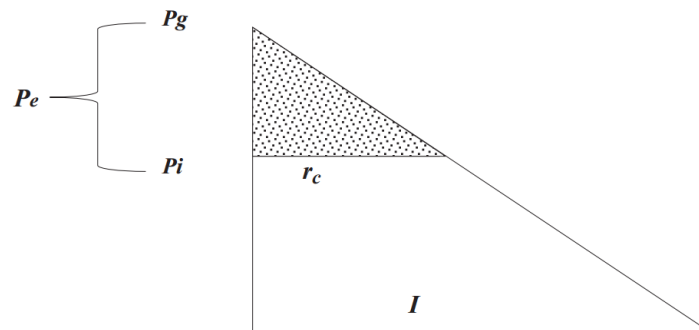
3.10. Jekking

Da injeksjonstrykket må være større enn grunnvannstrykket for å spre injeksjonsmassen ligger det i sakens natur at spenningene på sprekkeflater vil endres på grunn av endringer i effektivspenningene. Stille (2015) deler jekking inn i følgende tre kategorier:

- Injeksjonstrykk under initialspenning
- Elastisk jekking
- Ultimat jekking

Så lenge injeksjonstrykket i sprekken er mindre enn initial normalspenningen vil bergkontaktene fortsatt være under kompresjonstrykk. Injeksjonstrykk som er større enn vanntrykket vil føre til en avlastning av dette kompresjonstrykket. Ifølge Stille (2015) vil deformasjonen være i størrelsesorden 10-20 μm og i mange tilfeller neglisjerbar.

Dersom injeksjonstrykket, P_g , overskrider initial normalspenning, P_i , vil sprekken åpne seg. Bergmassen vil da belastes med et overtrykk, P_e , som tilsvarer differansen mellom P_g og P_i . Området som blir påvirket av overtrykket er avhengig av hvor langt injeksjonsmassen er spredt inn i sprekken. Fra starten av sprekken til vil det være et trykktap. Forenklet kan man si at dette trykktapet er lineært. Radiusen av det området, r_c , som belastes av vil da være som skissert i Figur 3.7:



Figur 3.7 Overtrykket (P_e) tilsvarer differansen mellom injeksjonstrykket (P_g) og normalspenning (P_i) (Rafi et al., 2014).

Så lenge deformasjonen er elastisk brukes begrepet elastisk jekking. Dette betyr imidlertid ikke at deformasjonen vil være reverserbar. En sprekke som er utvidet vil sannsynligvis forbli fylt av injeksjonsmasse. Pakkerne i enden av borehullene vil hindre de elastiske kreftene i fjellet å skyve injeksjonsmassen tilbake og den vil stivne hvor den er (Rafi et al., 2015).

Ultimat jekking er jekking som deformerer bergmassen utover den elastiske sonen. Trykket for ultimat jekking må ifølge (Stille, 2015) være tre ganger større enn vekten av overliggende berg dersom sprekken er horisontal. I sprekker som står vertikalt forventes det at trykket må være likt eller større enn trykket som kreves for ultimat jekking av horisontale sprekker. Dette skyldes høyere bæreevne på grunn av passiv last.

3.11. Konsekvenser av jekking

3.11.1 Heving av terreng

Ved lav overdekning er den minste hovedspenning ofte vertikal. Ved injisering med høye trykk og med injeksjonsmasse som dekker store areal i en horisontal sprekk kan det medføre hydraulisk løfting av bergmassen. Dette vil være å betrakte som ultimat jekking og kan gi skade på sensitiv infrastruktur. Skade av denne typen er sjelden.

3.11.2 Fylling av sprekker som er mest åpen

Bruk av høyt trykk ble av Lombardi og Deere (1993) foreslått å være positivt for penetrasjon av tynnere sprekker i bergmassen. Fransson et al. (2010) antyder derimot at høyt trykk under injisering fører til jekking av sprekker som allerede er åpne. Dette fører til at letteste vei for injeksjonsmassen blir mer utpreget. Resultatet vil da være at det trenger mindre injeksjonsmasse inn i tynne sprekker. Det er imidlertid uklart i hvor stor grad dette påvirker tetteresultatet.

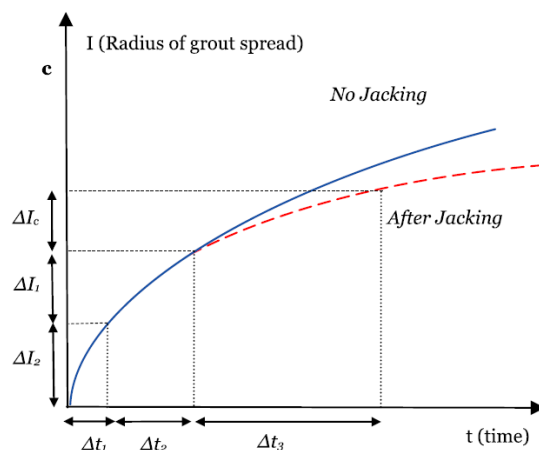
3.11.3 Åpning av sprekker utenfor det injiserte området

Når en sprekkeflate utsettes for jekking er det sannsynlig at deformasjonen ikke vil reverseres fordi sprekken er fylt med injeksjonsmasse. Tilgrensende områder som ikke er injisert på den samme sprekkeflaten vil være åpnet ytterligere. En marginal økning av sprekkeåpning kan føre til betydelig økning av hydraulisk konduktivitet, se kapittel 3.5.1. Åpning av sprekker utenfor det injiserte området kan derfor ha negativ innvirkning på tetteresultatet.

Ved injeksjon i flere omganger er det også en risiko at allerede injiserte sprekker kan gjenåpnes. Denne forstyrrelsen kan føre til at den siste injiseringen øker konduktiviteten permanent (Rafi et al., 2015).

3.11.4 Økt tids- og materialforbruk

Jekking av sprekker vil gi økt materialforbruk sammenlignet med å injisere en tilsvarende sprekkeflate uten jekking. Figur 3.8 illustrer en analytisk løsning for spredningen av injeksjonsmasse. Figuren illustrerer at hastigheten på penetrasjonen ikke nødvendigvis øker ved elastisk utvidelse av sprekken. Dette kan forklares med at inntrengingen ikke forbedres med utvidelse større enn $b_{kritisk}$ som vist i Figur 3.5. Samtidig må det pumpes mer injeksjonsmasse for å oppnå samme spredning som for en tynnere sprekk. Ifølge Rafi og Stille (2015) vil forlengelsen av injeksjonstiden på grunn av jekking i stor grad være avhengig av styrken på berget. For stivt berg vil forlengelsen være neglisjerbar, mens det i svakt berg kan være betydelig på grunn av større deformasjon.



Figur 3.8: Spredning av injeksjonsmasse, med og uten jekking, som en funksjon av tid (Rafi og Stille, 2015).

3.12. Sementbasert injeksjonsmateriale

Injeksjonsmassens reologiske egenskaper som flytespenning og viskositet har stor innvirkning på spredning i berget. Materialets egenskaper i forhold til inntrengning i sprekker er også viktig. Injeksjonsmassens egenskaper er et resultat av komplekse kjemiske reaksjoner når vann, sement og tilsetningsstoffer blandes og er avhengig av mange faktorer som kan kategoriseres som følgende (Stille, 2015):

- Type sement
- Sementtilstand
- Vann/sement forhold
- Type og mengde superplastiserende middel
- Type blander
- Blandetid
- Temperatur

3.12.1 Reologi

Injeksjonsmassens flyteeenskaper er avhengig av hvilke skjærspenninger den utsettes for. En Bingham modell kan beskrive materialets flyt, med unntak for lave skjærspenninger hvor en biviskøs modell gir en bedre tilnærming. Ved lave skjærspenninger kan injeksjonsmassen beskrives som tiksotropisk (Stille, 2015).

En Bingham modell beskriver et materiale som opptrer som et stivt legeme ved lave skjærspenninger, men som flyter ved høye skjærspenninger. Et tiksotropisk materiale har en

tidsavhengig viskositet. Det vil si at det tar en viss tid før viskositeten er i likevekt når skjærspenningen endres. Økende skjærspenning vil gi lavere viskositet.

Type sement, type superplastiserende middel og vann/ment forhold har stor betydning for flyteegenskapene. I Tabell 3.2 er relasjon mellom flyteegenskaper og injeksjonsmassens innhold vist. I tillegg er tid en viktig faktor for sementens egenskaper. Flytespenningen vil gradvis øke med tiden.

Tabell 3.2 Effekt av injeksjonsmassens sammensetning etter (Stille et al., 2012). Røde piler indikerer stor innvirkning.

Faktor	Endring	Flytspenning	Plastisk viskositet	B _{kritisk}
Vann/ment forhold	Økning	↓	↓	↓
Finhet (Blaine)	Økning	↑	↑	↷
Plastiserer	Tilsatt	↓	↓	↓
Akselerator	Tilsatt	↑	→	→

3.12.2 Inntrengning

Sementbasert injeksjonsmasse er en suspensjon av korn i vann. Under hydratiseringsprosessen har kornene en tendens til å fnokke. Dersom denne sammenhopningen eller kornene i seg selv er for store vil de forhindre inntrengning i tynne sprekker. For industrisement er det en tommelfingerregel at kornene må være en tredel av sprekkestørrelsen for å trenge inn. For mikrosegment er denne relasjonen mer kompleks på grunn av større overflateaktivitet (Stille, 2015).

Tettingen av sprekker kan skje ved at sementkorn separeres fra injeksjonsmassen og danner en filterkake som tetter igjen smale åpninger. Store korn som blokkerer for mindre korn er også en faktor som kan redusere inntrengning i smale sprekker (Strømsvik et al., 2015).

3.12.3 Sementtype

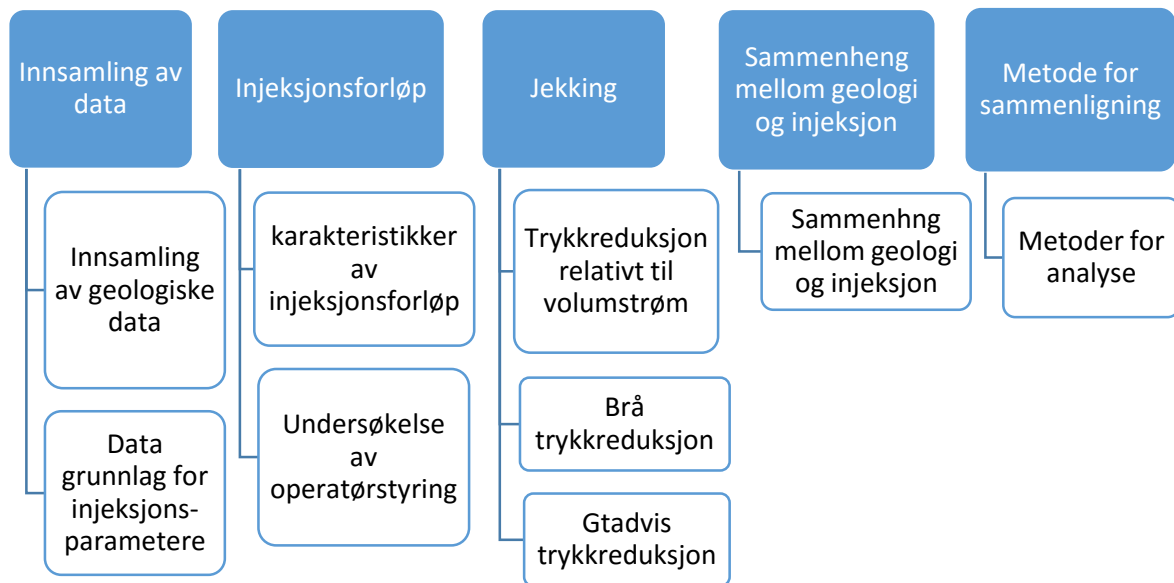
Det skilles mellom industrisement, mikrosegment og ultrafin sement med bakgrunn i kornstørrelse. Sementene har utgangspunkt i samme klinker, men de finkornede sementene er finmalt. Det er stor forskjell på de forskjellige mikrosegmentenes egenskaper, spesielt med tanke på bindetid. I finmalt sement ligger kornene tettere slik at det kreves mindre hydratiseringsgrad for at de skal binde seg sammen. Dette gjør at finmalt sement ofte oppnår raskere tidligfasthet

(Strømsvik et al., 2015). Generelt har finere sement mindre «bleeding» og trenger lettere inn i små sprekker. Mikrosementer har større spesifikk overflate enn industrisement og stiller derfor større krav til blandeprosessen for å unngå fnokking og redusert inntrengningsevne (Hognestad et al., 2010).

4. Datainnsamling og metode for analyse

4.1. Innledning

Med bakgrunn i teori og innsamlet data skal injeksjonsforløp, hydraulisk jekking og sammenhenger mellom geologi og injeksjon analyseres. Videre i dette kapittelet er det gjort rede for hvordan data er samlet inn og hvordan analysen er utført. Kapittelet er delt inn som vist under:



Det er samlet inn data som representerer geologiske forhold og injeksjonsarbeidet. Når verdiene skal analyseres må det tas hensyn til at datagrunnlaget representerer ulike skalaer. Det kan skilles mellom data som representerer:

- Enkelthull
- Hele tunnelens tverrsnitt

Mange av injeksjonsparameterne representerer enkelthull, mens mange av de geologiske parameterne representerer hele tverrsnittet. Lengden på området de ulike parameterne representerer varierer. Typiske lengder er:

- Salvelengde, ca. 5 meter.
- Lengde på injeksjonsskjerm, ca. 27 meter.
- Loggeintervall MWD-data, ca. 2 cm.

4.2. Datainnsamling og undersøkelser av geologi

Geologiske data ble samlet for å undersøke sammenhenger med injeksjon. Det er derfor samlet data som ventes å kunne settes i sammenheng med injeksjonsprosessen, slik som informasjon om oppsprekking og vannforhold. Tabell 4.1 gir en oversikt over de geologiske parameterne som er samlet.

Tabell 4.1. Geologiske parametere og kilde for innsamlet data.

Geologiske parameter	Kilde
RQD	Salvekartlegging
Orientering Sprekkesett	Salvekartlegging
Overdekning	Kartgrunnlag/forundersøkelser
Innlekkasje for injisering	Sonderboring
Innlekkasje etter injisering	Fuktkartlegging/Befaring
Hydraulisk konduktivitet	Vanntapsmåling
Borsynk	MWD
Tolket oppsprekking	MWD
Tolket vann	MWD

4.2.1 Oppsprekkingsgrad

Kontrollingeniørene kartlegger de ingeniørgeologiske forholdene etter hver salve. Det kartlegges etter Q-system beskrevet i (NGI, 2013). En av inngangsparameterne i Q-systemet er RQD (Rock Quality Designation), som beskriver oppsprekkingsgraden. Som nevnt i kapittel 3.5. er antall sprekker relevant både for strømming av vann og injeksjonsmasse. Det er på grunnlag av dette at det er valgt å ta med denne verdien.

RQD er definert som prosentandelen av en kjerne som er lengre enn 10 cm. For tunnelkartlegging hvor borekjerne sjeldent er tilgjengelig vurderes bergmassen visuelt og det anslås antall sprekker per m³. I bergrom vil man få et tredimensjonalt bilde av oppsprekkingen som gjør denne vurderingen hensiktsmessig.

Usikkerhet i målingene er først og fremst forbundet med grensetilfeller for hva som skal defineres som en sprekk. På grunn av foliasjonen i bergarten på Bodøtunnelen vil det oppstå grensetilfeller om hva som er foliasjon og hva som er en sprekk. I noen tilfeller vil mineralinnfyllingen av kalsitt gi grensetilfeller, men denne innfyllingen er stort sett i sprekker som åpenbart kan defineres som en sprekk. Sprekkes tykkelse og utholdenhet er to faktorer som kanskje er av større betydning enn antall sprekker, men som ikke er beskrevet av RQD verdien.

RQD verdien fra salvekartleggingen representerer hele tverrsnittet og 5 meters lengde. For å sammenligne med injeksjon er RQD-verdien for salver tilsvarende en injeksjon skjerm midlet. Selve Q-verdien og de andre inngangsparameterne ble ikke tatt med i undersøkelsen, til tross for at 4 av 6 parametere beskriver sprekker. Q-verdien bestemmes for å vurdere stabilitet. Verdiene til inngangsparameterne settes derfor også med hensyn til stabilitet. Leirinnfylling er for eksempel negativt for stabiliteten, mens røe sprekkeflater er positivt. I injeksjonssammenheng vil leirfylte sprekker ofte være negativt for penetrasjonen, mens røe sprekkeflater kan føre til større sprekkeåpning og kan være positivt. Ved sammenligning med injeksjon og Q-verdi vil det være uklart hvilke forhold som egentlig er avgjørende ved en evt. sammenheng.

Inngangsparameterne er som nevnt satt ut fra et stabilitetshensyn. En leirfylt sprekk med ugunstig orientering kan derfor være utslagsgivende for en høy verdi for sprekkinnfylling, selv om det bare er en enkeltsprekk og ikke representativ for de fleste sprekker. De to inngangsparameterne som ikke beskriver sprekker er en vannparameter og en spenningsparameter. Disse parameterne er heller ikke tatt med. Vannforhold er vurdert ut fra innlekkasjemåling fra sonderboring og fuktkartlegging. Spenningsforhold er vurdert ut fra overdekning.

4.2.2 Orientering av sprekker

Under salvekartlegging blir orientering av sprekker bestemt. Det er spesielt fokus på sprekkeseett og markerte sprekker med betydning for stabilitet. Tendenser til innfylling og sprekkeåpning går ofte igjen for sprekker med samme orientering. Grunnen til dette er at sprekkarakteren i et sprekkeseett ofte har samme opprinnelse. Det er også observert sammenhenger mellom orientering og innlekkasje. Årsaker til dette kan ifølge (Selmer, 1981, Holmøy og Nilsen, 2015) være åpne sprekker på grunn av tektoniske forhold og/eller på grunn av normalspenningstilstand på sprekkoplan.

Ofte vil det opptre ulike sprekkorienteringer over en distanse på 27 meter. Ved sammenligning med injeksjon er det vanskelig å vurdere hvilke sprekkeseett som påvirker resultatene. For kartleggingen av Bodøtunnelen var orienteringen mindre systematisk registrert enn verdiene som inngår i Q-systemet. Det var en del ganger registrert flere sprekkeseett (J_n) enn det var registrert orienteringer av sprekker. Det er derfor valgt å vurdere de større trendene i hvilke sprekkeseett som er fremtredende og hvor det opptre nye sprekkorienteringer. Sammenligningen vil kunne gi en indikasjon på om enkelte sprekkeseett har innvirkning på injeksjonen.

4.2.3 Bergoverdekning

Overdekningen kan ha betydning for flere interessante faktorer som spenning, vanntrykk og forvitring og er derfor valgt som en parameter i undersøkelsene.

Bergoverdekningen defineres i denne oppgaven som antall meter bergmasse over hengen av tunnelen målt vertikalt. Beregning av overdekning ble utført ut fra kartgrunnlaget i prosjektet. Profiltegningene viser terrengoverflate og antatt bergoverflate i dalsøkk hvor de mektigste løsmassedekkene er. På ryggene i terrenget er det lite løsmasser. I områder hvor det ikke er informasjon om løsmassemektigheten ble det gjort en tolkning ut fra kartgrunnlaget og nærliggende totalsonderboringer. Da løsmassedekket generelt er tynt vurderes det at feilmarginen vil være akseptabel.

Overdekningen som er registrert representerer et gjennomsnitt av overdekningen for en injeksjonsskjerm eller sonderhull.

4.2.4 Innlekkasjemålinger fra sonderhull

Innlekkasjen målt fra sonderhull gir en indikasjon på vannforholdene i berget foran stuff. Dette er interessant fordi formålet med injeksjon er å redusere innlekkasje av vann i tunnelen. Det er interessant å se om det er sammenheng mellom mengde innlekkasje og injeksjonsparametere.

Sonderhullene er boret systematisk og mengde innlekkasje fra sonderhullene måles. For hver sonderskjerm er det boret 4 sonderhull med lengde på 27 meter og med 64 mm diameter. Overlappen har vært på ca. 6 meter. Innlekkasjemålingen ble utført ved at en injeksjonsstav ble plassert i sonderhullet, se Figur 4.1. Pakkeren ble ekspandert slik at vannet rant gjennom staven. Tiden det tok for vannet å fylle et 2 liters målebeger ble målt med stoppeklokke. Verdien ble oppgitt i l/min. Innlekkasjen ble kun målt etter at hele hullengden var boret. Det er derfor ikke informasjon om hvor i den borede seksjonen det var innlekkasje. Målt innlekkasje vil representere lengden som skal injiseres.

Det er en viss usikkerhet knyttet til nøyaktigheten av målingene ved større innlekkasjer fordi målebegeret er så lite at tidtakingen er problematisk.



Figur 4.1. Bildet viser en injeksjonsstav med pakker som brukes til måling av innlekkasje

4.2.5 Fuktkartlegging

I motsetning til innlekkasjemåling fra sonderhull gir fuktkartlegging informasjon om vannforholdene etter at tunnelen er drevet. For seksjonene som er injisert kan fuktkartleggingen si noe om resultatet på injeksjonsarbeidet. For seksjonene som ikke er injisert kan kartleggingen si noe om vannforholdene i berg som ikke er påvirket av injeksjon.

Kartleggingen ble utført ved visuell gjennomgang av tunnelen. Fuktet areal ble tegnet på et kartleggingsskjema. Tunnelen er sprøytet i hele tunnallengen, så fuktgjennomslag er tydelig. Drypp og rennende vann ble registrert. Det ble også registrert om det var lekkasje langs markert sprekke, punkt eller bolt.

Resultatene fra gjennomgangen er ikke kvantitativ og det er derfor ikke utført statistisk sammenligning mot injeksjon. Områdene ble imidlertid vurdert relativt til hverandre og klassifisert i tre kategorier:

1. Minimalt med fukt.
2. Noe fuktgjennomslag,
3. En del fuktgjennomslag og noe drypp

Inndelingen gjorde mulig å gjøre en overordnet kvalitativ vurdering mot andre parametere. Orientering av sprekker med lekkasje ble også studert for en bedre overordnet forståelse av lekkasjeforholdene.

4.2.6 Vanntapsmålinger

I utgangspunktet ble det valgt å utføre vanntapsmålinger for å sammenligne resultatene fra målingen med injeksjonsparametere som jekking, injeksjonsforløp, samt bestemme bergmassens hydrauliske konduktivitet. På grunn av mye lekkasje fra stuff og til nabotunnel under testingen er det stor usikkerhet forbundet med de fleste resultatene. Det ble vurdert at omfanget av testingen for å få tilstrekkelig datagrunnlag for sammenligning med injeksjon ble for stort i forhold til de økonomiske rammene. Det ble derfor besluttet og avslutte etter testing på to stuffer. Resultatene fra disse stoffene vil derfor kun bli brukt som supplerende data om de geologiske forholdene.

Testingen ble utført med det ordinære injeksjonsutstyret. Oppsettet var som ved injeksjon. Vannet ble pumpet gjennom injeksjonstavene med pakker. Testen ble utført med utgangspunkt i beskrivelsen i Prosesskoden (Statens vegvesen, 2014). Det ble pumpet vann til ønsket mottrykk ble oppnådd. Ønsket mottrykk ble holdt til volumstrømmen var stabil i minimum i 5 minutter (forenklet fra prosesskoden). Testen ble utført trinnvis med ulike trykk opp til et gitt makstrykk slik det er anbefalt av Palmstrøm og Stille (2010). Trykket ble deretter redusert med tilsvarende trinn. For hvert trykk ble det motsvarende volumstrøm registrert. Planen var i utgangspunktet å pumpe met trykkene (bar):

- 5 – 15 – 30 – 45 – 30 – 15 – 5

I de fleste tilfellene ble ikke det ønskede makstrykket oppnådd. I disse tilfellene var det enten utgang eller så hadde ikke injeksjonsriggen tilstrekkelig pumpekapasitet til å oppnå trykk.

Vanntapet angis i lugeon (L). 1 L tilsvarer 1 liter per minutt per meter borehull ved 1 MPa overtrykk. Ved andre overtrykk er vanntapet forenklet regnet å være proporsjonalt med trykket.

4.2.7 MWD-data

MWD-data er tatt med som en geologisk parameter for å analysere sammenhengen med injeksjonsparametere. MWD-data er kort beskrevet i kapittel 3.4.2. De valgte parameterne var borsynk, tolket oppsprekking og tolket vann. Disse parameterne ble valgt fordi de kan relateres til oppsprekking og vann som er viktige faktorer i injeksjonssammenheng.

Fra den aktuelle tunnelstrekningen ble det samlet data fra 4 langhull fra hver skjerm, ett hull fra hvert hjørne. Hullene er 27 meter lange. Data fra disse hullene ble lastet ned til MS Excel (2013) fra Bever Team Online (2016). Hvert hull hadde loggepunkter for hver 2,5 cm. Data fra de første 5 meterne fra hvert hull ble kuttet bort på grunn av mulig påvirkning fra forrige skjerm

og forstyrrelser i forbindelse med oppstart i boring. Den siste 1,25 meteren ble tatt bort på grunn av forstyrrelser av dataene i slutten av borehullet.

For den gjenstående lengden av hvert borehull ble det aritmetisk gjennomsnitt ble beregnet. På grunn av store variasjoner i injeksjonsparametere i samme skjerm var det ønskelig å sammenligne injeksjonsparametere og MWD-data hull for hull. Det var utfordrende å sammenstille hullene fordi injeksjonshullene ikke er nummerert i samsvar med borplan. Injeksjonshullene nummereres også ulikt fra operatør til operatør. Dette ble løst ved å bruke bilder tatt på stoff for å sammenstille hullene manuelt. Det forelå imidlertid kun bilder fra stoff for 6 av 21 skjerner. De tre MWD-parametere ble vurdert mot mengde injisert, volumstrøm og karakteristikk av injeksjonsforløp.

MWD parameterne ble også sammenlignet med andre geologiske parametere. Gjennomsnittsverdien for de fire hullene med MWD-data ble midlet før de ble sammenlignet med de andre geologiske parametere, da de andre geologiske parametere representerer hele tverrsnittet. For denne sammenligningen er ikke borehullets plassering av betydning siden verdiene fra hullene likevel midles. Det var derfor mulig å benytte data fra alle de 21 skjermene.

4.3. Injeksjonsdata

Utgangspunktet for alle injeksjonsparametere stammer fra LOGAC (loggesystem fra Atlas Copco). Noe av dataen brukes direkte fra rapportene, mens andre data er et resultat av prosessering av rådataen. Data fra LOGAC kan i hovedsak eksporteres på to måter:

- *Injeksjonsrapport* med autogeneratede nøkkeltall
- *Injeksjonslogg* med data logget for hele injeksjonsforløpet

Det er videre beskrevet hvilke data som er samlet fra disse to kildene.

4.3.1 Data fra injeksjonsrapport

Injeksjonsrapporten inneholder nøkkeltall for en injeksjonsrunde. Rapporten kan leses i MS Excel (2013). Rapporten gir følgende informasjon om hvert hull:

- Start og stopptid
- Mengde sement av hver resept i hvert hull
- Mengde tilsetningsstoff for hver resept
- Sluttrykk

Fra injeksjonsrapportene ble det kun samlet data om volum injisert. Volum injisert er en viktig parameter og forteller hvor mye injeksjonsmasse som er trengt inn i fjellet hvis man trekker fra hullfyll.

Spredning og volum er nært knyttet. Spredningen vil for en gitt sprekk, om man ser bort fra jekking, være avhengig av hvor store mengder som injiseres. Som beskrevet i kapittel 3.7. er spredningen for et gitt injeksjonsmateriale og en gitt bergmasse også avhengig av trykk og tid. Dersom det injiseres til volumstrømmen er tilnærmet null, dvs. en kraftlikevekt, vil injisert volum kun være avhengig av trykket. Av dette er det klart at tid, volum og trykk er nøkkelparametere for beskrivelse av injeksjon. Sluttrykket ble bestemt i samråd mellom byggherre og entreprenør før injeksjonen startet og det er i analysene tatt utgangspunkt i at dette sluttrykket er benyttet. Tidsaspektet er vurdert ut fra data samlet fra injeksjonsloggen.

Grunnen til at det er valgt å bruke mengdedata fra injeksjonsrapporten er at denne dataen er mer nøyaktig enn akkumulert volumstrømning, utledet fra injeksjonsloggen. Det er registrert et gjennomsnittlig avvik på 10,2 % mellom de to mengdene. Akkumulert volumstrømning fra loggfilen viste alltid minst.

4.3.2 Data fra injeksjonslogg

Injeksjonsloggene gir informasjon om hele injeksjonsforløpet for hvert hull. Informasjonen lagres i tekstformat med loggeintervall på 10 sekunder. Data som er tilgjengelig i injeksjonsloggen er:

- Trykk
- Volumstrømning
- Tid

Injeksjonsloggene ble lastet inn i Bever Control (2012) som kan lese tekstfilene. For videre prosessering av data ble filene lastet over til MS Excel (2013). Injeksjonsloggen er kilde til følgende parametere:

- Akkumulert liter
- Gjennomsnittlig volumstrøm
- Kritisk trykk ved gradvis trykkreduksjon og mengde injisert når dette inntreffer (Kapittel 4.4.)
- Kritisk trykk ved brå trykkreduksjon (Kapittel 4.4.)
- Karakteristikk av trykkoppbygning (kapittel 4.5.)

De to første punktene beregnes ved formlene 4.2 og 4.3. Akkumulert liter divideres med effektiv pumpetid for å finne gjennomsnittlig volumstrøm (4.3).

$$\text{Eff. pumpetid} = (\text{ant. loggepunkt med } Q > 0) \times \text{tid loggeintervall} \quad (4.1)$$

$$A. \text{volum} = \sum_{i=1}^n (Q_i \times \text{tid loggeintervall}) \quad (4.2)$$

$$\text{Gjennomsnittlig volumstrøm} = \frac{A. \text{volum}}{\text{Eff. pumpetid}} \quad (4.3)$$

Effektiv pumpetid er ikke brukt i analysene alene, men er beregnet for å kunne bestemme gjennomsnittlig volumstrøm. Kun tid sier lite dersom det ikke relateres til trykk eller volumstrøm.

En feilkilde i parameteren gjennomsnittlig volumstrøm er at tiden og volumet for hullfyll er tatt med. Dette gjør at hull med lite inngang få uforholdsmessig høy verdi sammenlignet med hull med stor inngang. Det ble forsøkt og korrigere for dette med å trekke fra en gjennomsnittstid for hullfylling og trekke teoretisk hullfyll fra volum. Dette så imidlertid ikke ut til å gi bedre resultater. Dette kan skyldes at noen hull er vannfylte, noen har inngang av injeksjonsmasse fra andre hull. Volumstrømmen, og dermed tid for fullfylling, vil variere fra hull til hull.

Volumstrøm er en faktor som til en viss grad er avhengig av operatør. Inntil et visst mottrykk oppnås blir volumstrømmen ofte bestemt ut fra blandekapasiteten til injeksjonsriggen. For høy volumstrøm vil føre til at det blir fritt for injeksjonsmasse i karene før det er blandet nytt. Det er spesielt i fasen før ønsket mottrykk er oppnådd at ulik praksis gjør seg gjeldene. Etter at ønsket mottrykk oppnås må volumstrømmen tilpasses trykket, men også her kan det være noe ulik praksis for operatørene.

Gjennomsnittlig volumstrøm og akkumulert volum ble systematisert i to datasett. Ett med verdier for enkelthull og et med verdier for hele injeksjonsskjermen. Akkumulert volum ble brukt til analyse av injeksjonsforløpene. Volumverdien brukt til sammenlikning med geologi er tatt fra injeksjonsrapportene. Gjennomsnittlig volumstrømning er i tillegg brukt til sammenlikning med geologi.

Injeksjonsloggen inneholder trykk, volumstrømning og tid for hvert 10. sekund av injeksjonsforløpet. Denne informasjonen kan visualiseres grafisk og gir grunnlag for analyse av injeksjonen, se kapittel 4.4. og kapittel 4.5.

4.4. Analyse av jekking

Ved gjennomgang av injeksjonsforløpene ble tilfeller med trykkreduksjon relativt til volumstrømmingen registrert. Det er forventet at trykkutviklingen skal være slik at trykket øker i forhold til volumstrømmen. Når det motsatte skjer, dvs. trykket reduseres i forhold til volumstrømmen, kan det tyde på:

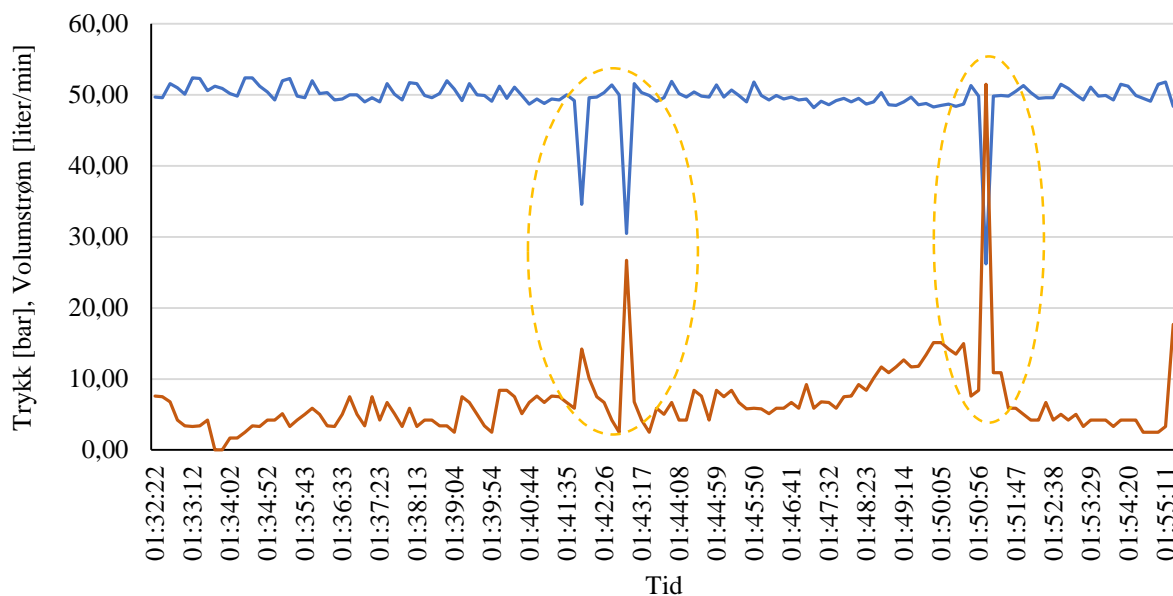
- Hydraulisk jekking på grunn av høyt injeksjonstrykk
- Det åpnes nye kanaler for injeksjonsmassen bak fronten av injeksjonsmasse

Hydraulisk jekking er nærmere forklart i kapittel 3.10. I tilfeller der trykk og volumstrøm er tilnærmet konstant kan ikke jekking utelukkes, men det kan også være en indikasjon på åpne sprekker, eller utganger. Jekking kan strengt tatt heller ikke utelukkes selv om det er trykkoppbygning fordi det ikke er kunnskap om hvor rask trykkoppbygningen skulle ha vært uten jekking.

Analyse av resultatene fra de registrerte trykkreduksjonene er sentralt i evalueringen om hydraulisk jekking har forekommet under injeksjonsforløpene. Dokumentasjon som taler for at den registrerte trykkreduksjonen representerer hydraulisk jekking taler også for at hydraulisk jekking har forekommet. Kritisk trykk er sentralt i denne analysen og gir informasjon om på hvilke trykknivåer tilfellene med trykkreduksjon inntreffer. Sammenligning med liter injisert ved initiering og kritisk trykk i forhold til overdekning er andre forhold som er studert.

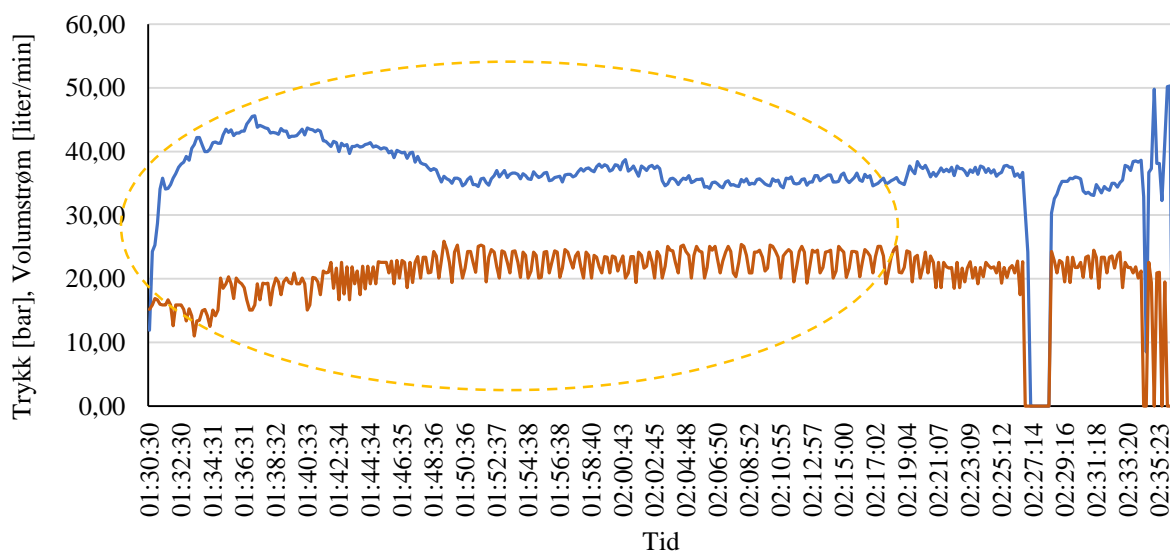
I analysen ble det skilt mellom brå og gradvis trykkreduksjon. For begge typene trykkreduksjon ble trykket like før reduksjonen registrert og betegnes som kritisk trykk. For den gradvise trykkreduksjonen ble også volum injisert når trykkreduksjonen inntraff registrert.

Den brå trykkreduksjonen blir definert som en tydelig reduksjon i trykk samtidig som det registreres en tydelig økning i volumstrøm. Vanligvis ble denne reduksjonen kun registrert for ett loggepunkt (10 sekunders intervall), men tilfeller med opptil tre loggepunkt ble registrert som brå trykkreduksjon. I Figur 4.2 er det tre eksempler på brå trykkreduksjon. Samme figur viser også tendens til gradvis jekking ved tidspunkt 01:48:23.



Figur 4.2 Eksempler på brå trykkreduksjon.

Den gradvise trykkreduksjonen blir definert som en gradvis reduksjon i trykk relativt til volumstrømmen. Selv om trykket har vært stabilt, og i enkelte tilfeller svakt stigende, har de blitt registrert når volumstrømmen har økt betydelig. Figur 4.3 viser et eksempel på gradvis trykkreduksjon.



Figur 4.3 Eksempel på gradvis trykkreduksjon.

4.5. Analyse av injeksjonsforløp

Injeksjonsforløpet ble vurdert ved visuell gjennomgang av grafer fremstilt med data fra injeksjonsloggen. Fokuset i gjennomgangen av injeksjonsforløpet var hvordan trykk og volumstrøm utviklet seg relativt til hverandre. Med trykkutvikling relativ til volumstrømmen menes det at trykket ses i sammenheng med hvordan volumstrømmen responderer på trykket. Det var kun hovedtrendene som ble vurdert.

Eksempel: Dersom trykket ligger stabilt mens volumstrømmen synker defineres dette som trykkoppbygning. I motsatt fall vil det defineres som trykkfall om trykket er stabilt og volumstrømmen øker.

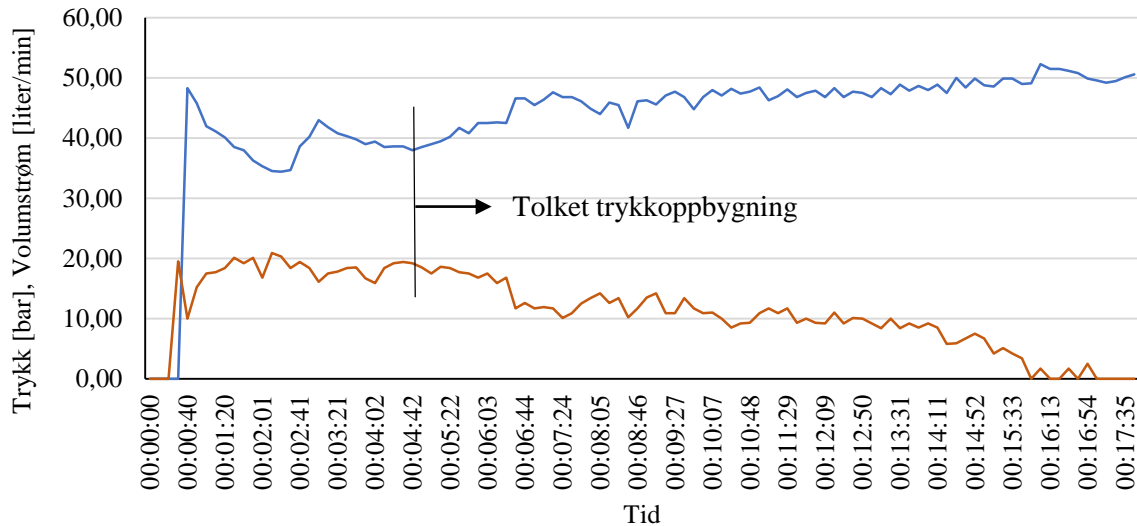
Trykkoppbygningen kan være avhengig av faktorer som:

- Sprekkeåpning
- Utholdenhet og geometri på sprekket
- Innfylling
- Materialets egenskaper
- Vannforhold (Både vanntrykk og strømmende vanns potensielle påvirkning av injeksjonsmassen)
- Hydraulisk jekking
- Operatør

For å kunne sammenligne injeksjonsforløp med andre parametere på en effektiv måte ble karakteristikken til forløpet vurdert og det ble delt inn i 6 ulike typer forløp. Disse karakteristikene spiller en sentral rolle i analysen av injeksjonsforløpene. De ulike typene trykkoppbygning ble sammenlignet med injeksjonsparameterne volum injisert, gjennomsnittlig volumstrøm og trykkreduksjon. Det er også sett på mulig påvirkning fra operatørene.

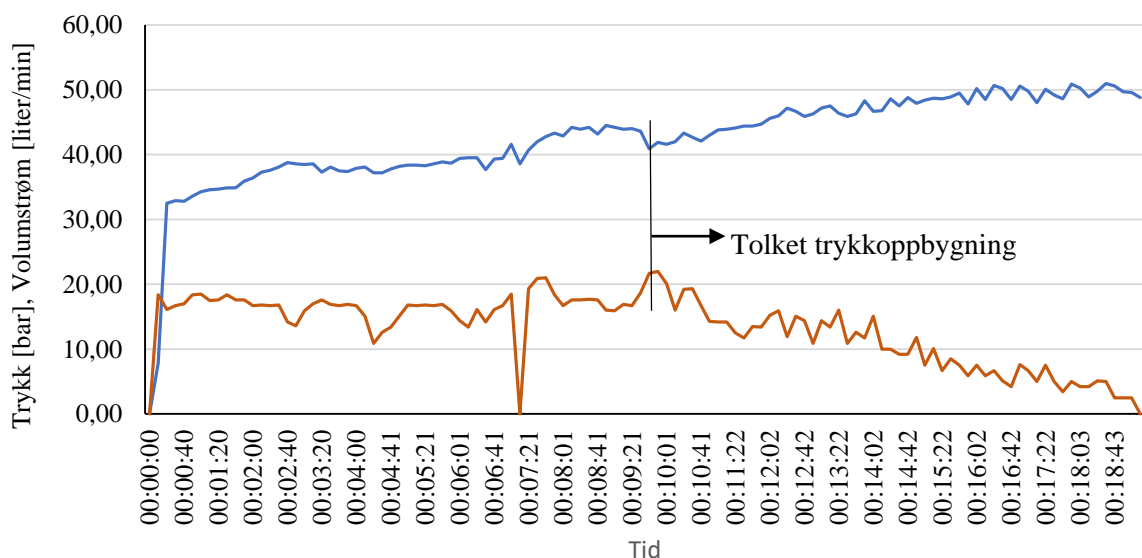
Av de 6 typene forløp som ble karakterisert var det 4 hovedtyper. De 2 øvrige typene var en form for samle kategorier hvor forløpene som ikke passet inn i hovedkategoriene ble plassert. Typene ble karakterisert etter hvor i forløpet trykkoppbygningen relativt til volumstrømmen startet. Under er definisjonen av hver av karakteristikken listet:

Type 1: Beskriver et injeksjonsforløp hvor det er en jevn trend i trykkoppbygningen som starter i første halvdel av injeksjonsforløpet. Figur 4.4 viser et eksempel på et forløp som ble karakterisert som type 1.



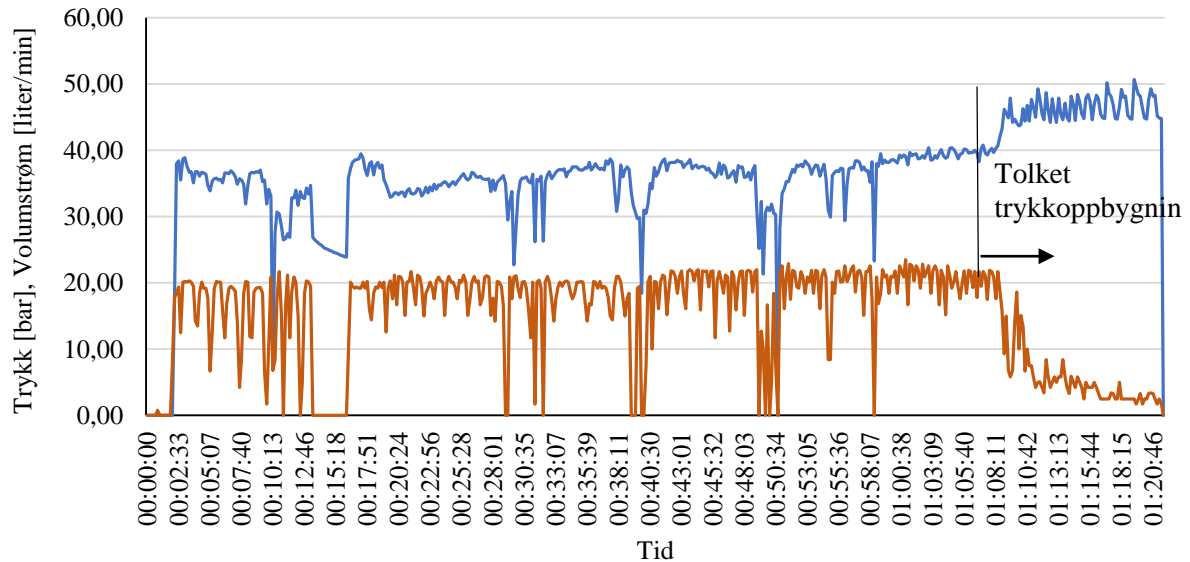
Figur 4.4 Eksempel på et forløp som ble karakterisert som type 1.

Type 2: Beskriver et injeksjonsforløp hvor trykkoppbygningen starter mellom $\frac{1}{2}$ - $\frac{3}{4}$ av injeksjonsforløpet. Figur 4.5 viser et eksempel på et forløp som ble karakterisert som type 2.



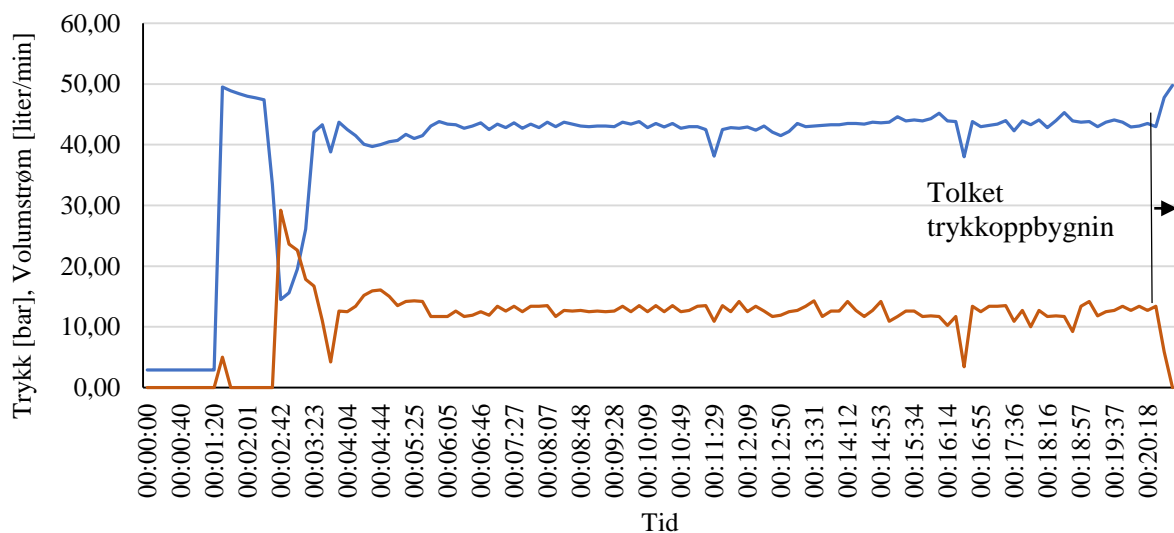
Figur 4.5 Eksempel på et forløp som ble karakterisert som type 2.

Type 3: Beskriver et injeksjonsforløp hvor trykkoppbygningen starter etter $\frac{3}{4}$ av injeksjonsforløpet. Oppbygningen er ikke av en svært brå/momentant karakter. Figur 4.6 viser et eksempel på et forløp som ble karakterisert som type 3.



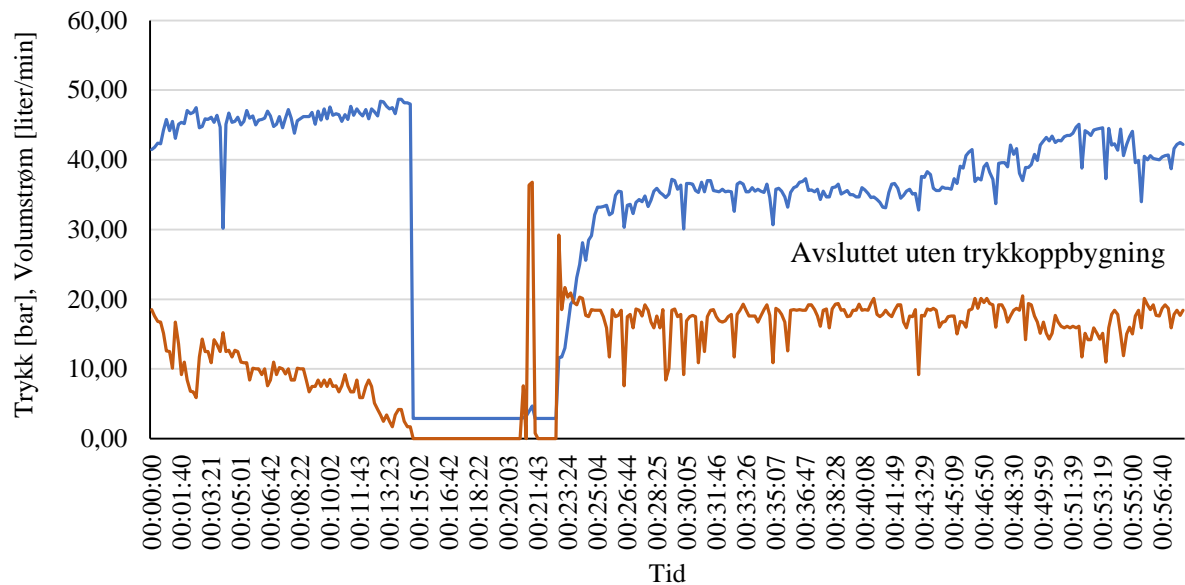
Figur 4.6 Eksempel på et forløp som ble karakterisert som type 3.

Type 4: Beskriver et injeksjonsforløp hvor trykkoppbygningen har en brå/momentant karakter, gjerne i løpet av en til to loggeintervaller. Figur 4.7 viser et eksempel på et forløp som ble karakterisert som type 4.



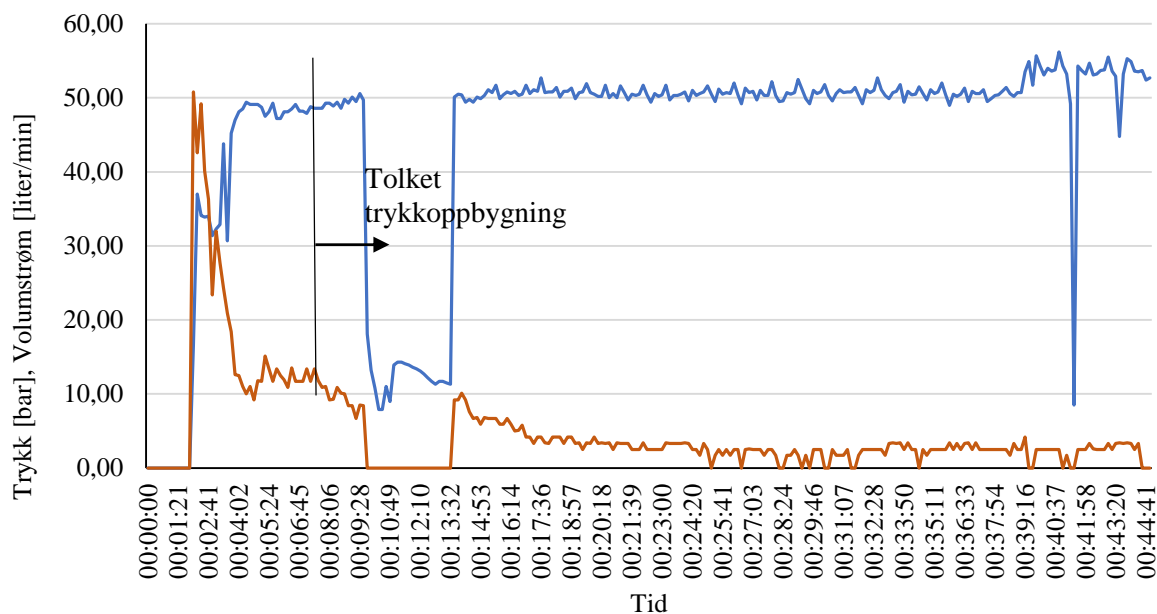
Figur 4.7 Eksempel på et forløp som ble karakterisert som type 4.

Type 5: Beskriver to forhold. Det ene er injeksjonsforløp uten tydelige trender. Ofte med mange stopp og med mange ulike forhold mellom trykk og volumstrøm i de ulike sekvensene. Det andre er injeksjonsforløp som stopper uten trykkoppbygning. Uten trykkoppbygning kan i denne sammenhengen bety at det oppnås ønsket mottrykk, men at det samtidig er stor volumstrøm. Figur 4.8 viser et eksempel på et forløp som ble karakterisert som type 5.



Figur 4.8 Eksempel på et forløp som ble karakterisert som type 5.

Type 6: Beskriver et injeksjonsforløp hvor største delen av trykkoppbygningen skjer i første ¼ av injeksjonsforløpet. Resten av forløpet preget av svært treg trykkoppbygning. Figur 4.9 viser et eksempel på et forløp som ble karakterisert som type 6.



Figur 4.9 Eksempel på et forløp som ble karakterisert som type 6.

Kommentarer til bestemmelse av karakteristikk:

- De første 80 literne, som tilsvarer teoretisk hullfyll, er ikke inkludert i vurderingen.
- Mindre avvik fra trenden i trykkoppbygning neglisjeres
- Ved større avvik fra den første trenden i trykkoppbygning må det vurderes om forløpet best blir beskrevet av en annen type eller type 5.

Type forløp ble vurdert for enkelthull. Klassifiseringen representer lengden på injeksjonshullet. Type forløp er vurdert mot andre injeksjonsparametere som også representerer enkelthull. Av de geologiske parameterne er det kun sammenlignet med MWD-data, som også representer enkelthull.

4.6. Sammenligning av geologi og injeksjon

Data som beskriver geologi og injeksjon som er samlet, systematisert og sammenlignet for å se om det kan finnes sammenhenger. Parameterne som er med i sammenligningen er oppsummert i Tabell 4.2 og Tabell 4.3.

Før sammenligningen av geologi og injeksjon er de geologiske parameterne sammenlignet med hverandre for å undersøke avhengige variabler. Dette kan i tillegg gi ytterligere informasjon om de geologiske forholdene og kan bidra til bedre forståelse av bergmassen.

For at parameterne skal være mulig å sammenligne forutsetter det at data representerer samme område i tunnelen. De fleste geologiske parameterne representerer hele tverrsnittet av tunnelen, med unntak av MWD-data som representerer enkelthull. Injeksjonsparameterne representer også data fra enkelthull. For å sammenligne data fra enkelthull med data som representerer hele tverrsnittet, ble data fra enkelthull i samme profil midlet. Disse verdiene er presentert i Tabell 4.2.

Siden MWD-data og data fra injeksjonshull representer enkelthull kan disse sammenlignes direkte. Parameterne som representer enkelthull i sammenligningen er vist i Tabell 4.3.

Tabell 4.2 Parametere som representer hele tverrsnittet brukt i sammenligning mellom geologi og injeksjon.

Geologiske parametere:	Injeksjonsparametere:
<ul style="list-style-type: none"> • RQD • Overdekning • Innlekkasje • Borsynk • Tolket oppsprekking • Tolket vann 	<ul style="list-style-type: none"> • Volum injisert • Gjennomsnittlig volumstrøm

Tabell 4.3 Parametere som representer enkelthull brukt i sammenligning mellom geologi og injeksjon.

Geologiske parametere:	Injeksjonsparametere:
<ul style="list-style-type: none"> • Borsynk • Tolket oppsprekking • Tolket vann 	<ul style="list-style-type: none"> • Volum injisert • Gjennomsnittlig volumstrøm • Type forløp

4.7. Statistisk og grafisk analyse av data

I de foregående kapitlene er det beskrevet hvilken data som er samlet og hvordan dataen er systematisert. Noen av verdiene i disse datasettene er behandlet for å formidle resultatene på en bedre måte og for å gjøre dataene egnet til sammenligning med andre parametere.

For å presentere nøkkeltall fra ett bestemt datasett er det benyttet aritmetisk gjennomsnitt, standardavvik og kvartiler. Gjennomsnittsverdien alene sier lite om fordelingen av tallverdiene.

Standardavviket, og i noen tilfeller kvartiler, er derfor brukt for å beskrive spredningen i resultatene. Standardavviket viser spredning i forhold til gjennomsnittet og er beregnet i MS Excel (2013) med funksjonen STDAVVIKPA. Funksjonen beskriver standardavvik basert på at hele populasjonen er oppgitt som argumenter. Første kvartil og tredje kvartil er brukt for å si noe om spredning uavhengig av gjennomsnittet. 1. kvartil gir verdien hvor 25% av observasjonene ligger over, mens 3. kvartil gir verdien hvor 25% av observasjonene ligger under i et ordnet tallmateriale.

For å vise spredningen i tallmaterialet visuelt er frekvensdiagram benyttet. Disse diagrammene viser antall observasjoner innenfor ulike intervaller.

Noen datasett er også presentert, enkeltvis eller sammen med andre datasett, grafisk i forhold til profilnummer. Dette viser utviklingen av data i forhold til plasseringen i tunnelen.

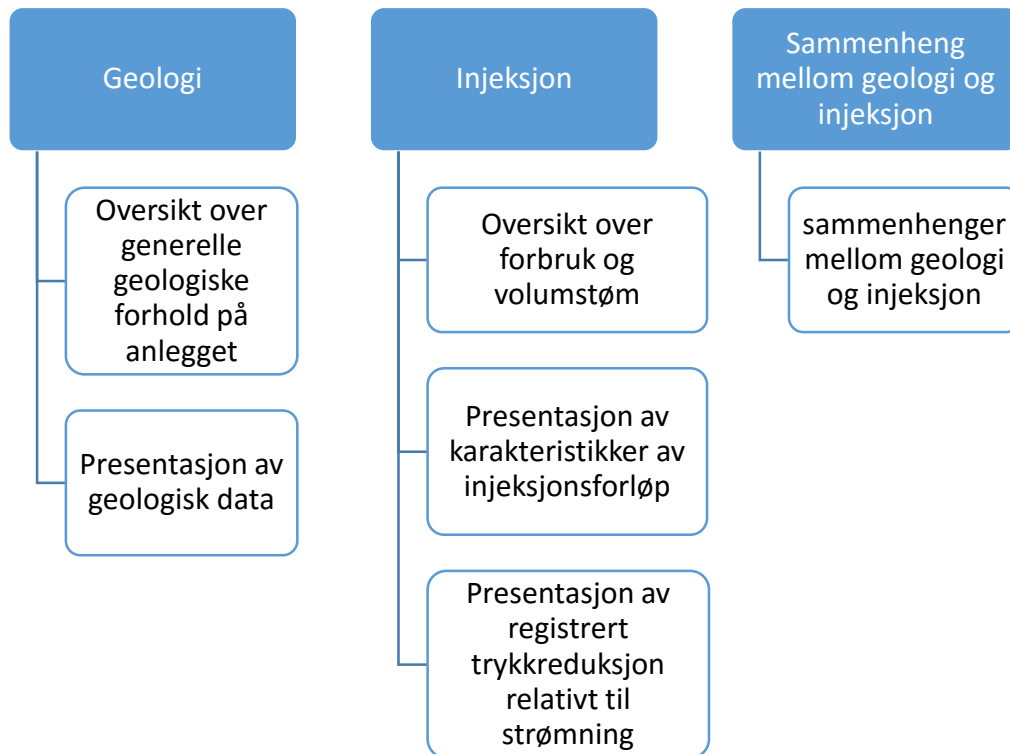
En slik fremstilling er også brukt til visuell tolkning av sammenheng mellom datasett, men XY-plot er benyttet mer. XY-plottene er både tolket visuelt og analysert med lineær regresjon. Plottene er vurdert visuelt for å undersøke om det er sammenhenger som ikke er lineære og derfor ikke vil bli oppdaget av regresjonen. Den lineære regresjonen er utført med trendlinje i XY-plottet i MS Excel (2013). Trendlinjen blir bestemt etter minste kvadraters metode. Ligningen til trendlinjen og den R-kvadrerte verdien beregnes automatisk.

Ligningen til trendlinjen forteller (litt forenklet) hvordan sammenhengen mellom X og Y er. Korrelasjonskoeffisienten, R (kvadratroten av den R-kvadrerte), forteller hvor godt punktene er knyttet til linjen.

5. Resultater

5.1. Inndeling av kapittelet

Resultatene fra datainnsamlingen og analysen er presentert i tre deler:



5.2. Geologi

Datagrunnlaget stammer fra observasjoner fra befaring, tunnelkartlegging, innlekkasjemåling fra sonderboring, fuktkartlegging, overdekning og MWD-data. Det er tatt med geologisk data fra profil 1505 til 2230 i det vestgående løpet. MWD-data er kun samlet fra profil 1830-2230.

Bergarten er i all hovedsak kalkglimmerskifer kun avbrutt av små intrusjoner. Intrusjonene antas å være av syntetisk karakter og gangene er i størrelsesorden 0,5 – 1 m bred. Kalkglimmerskiferen har relativt høyt glimmerinnhold og viser tydelig foliasjon. Det er også en tydelig lagdeling med store variasjoner i bergmekaniske egenskaper. De fleste lagene gir tydelig reaksjon på saltsyre.

5.2.1 Diskontinuiteter

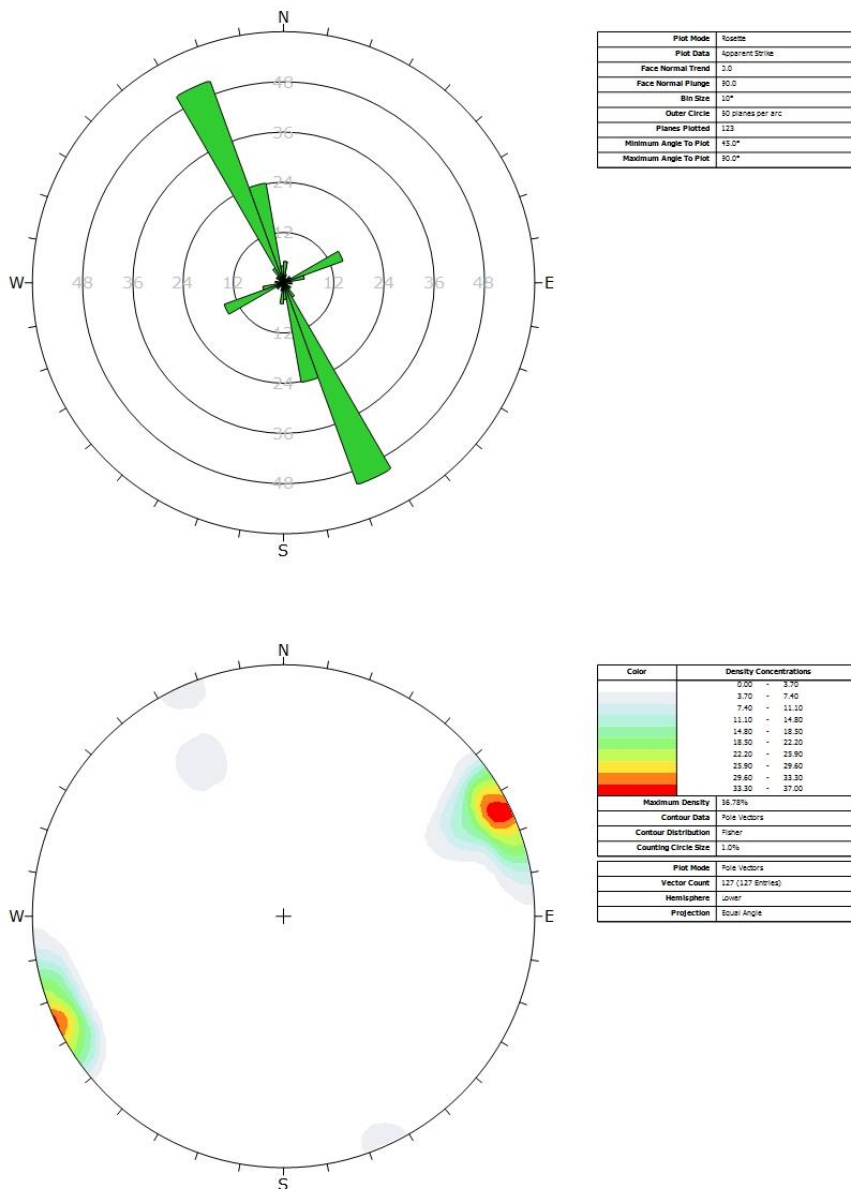
Bergmassen har 2 tydelige sprekkesett i tillegg til oppsprekking langs foliasjonsplanet. Sprekkesettene står normalt på hverandre og har steilt fall. Fallet til foliasjonen varierer etter foldningene i området, men fallet er stort sett slakt til flatt.

Foliasjonen (F1) har strøk N055-075°Ø og faller 0-20°SV og 0-25°NØ

Sprekkesett 1 (S1) har strøk N150-165°Ø og faller 80-90°SV og 75-90°NØ

Sprekkesett 2 (S2) har strøk N060-070°Ø og faller 70-90°NV og 85-90°SE.

Orienteringen til sprekkesettene S1 og S2 er vist i Figur 5.1. Oppsprekkingen langs foliasjonen er ikke tatt med i figuren.



Figur 5.1 Orientering av sprekkesettene S1 og S2.

Sprekkeflatenes ruhet varierer, men i hovedsak karakteriseres de som glatt-ru i liten skala og som plan i meter skala. Det er kalkinnfylling på en stor andel av sprekkene i både sprekkesett 1 (S1) og sprekkesett 2 (S2), men innfyllingen i S1 fremstår som mest fremtredende.

Innfyllingens beskaffenhet varierer fra sammenvokst til en noe flisete struktur uten god sammenkitting. Tykkelsen på innfyllingen er i størrelsesorden 2-3 mm.

Sprekkesettet S1 fremstår som mest gjennomsettende. S2 har også enkelte gjennomsettende sprekker, men en mindre andel enn S1. Oppsprekkingen langs foliasjonen (F1) er i varierende. F1 er i mindre grad gjennomsettende.

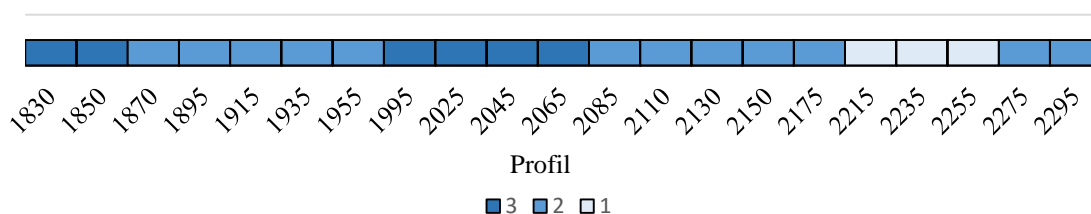
5.2.1.1 Hydrogeologiske forhold

Det ble utført vanntapsmåling på profil 2275 og 2295. På hver profil ble tre hull testet. På begge profilene var det et hull med store lekkasjer, ett hull som var tett under 50 bars trykk og et hull hvor det var resultater som kunne brukes til å beregne hydraulisk konduktivitet. Resultatene for de to hullene er vist i Tabell 5.1.

Tabell 5.1 Resultater fra vanntapsmåling

Profil	2275	2295
Lugeon, L	1,6	1
Hydraulisk konduktivitet, k [m/s]	$2,8 \times 10^{-7}$	$1,9 \times 10^{-7}$

Resultatene fra fuktkartleggingen indikerte mest vann de første 100 meterne av tunnelen. Videre var det relativt tørt fram til profil 1800. Fra 1830 til 2320 er det injisert sammenhengende med unntak av et par små områder på 5-15 m. Fuktkartleggingen fra dette området er vist i Figur 5.2. Områdene er vurdert relativt til hverandre og klassifisert i tre kategorier. 3: En del fuktgjennomslag og noe drypp, 2: Noe fuktgjennomslag, 3: minimalt med fukt.



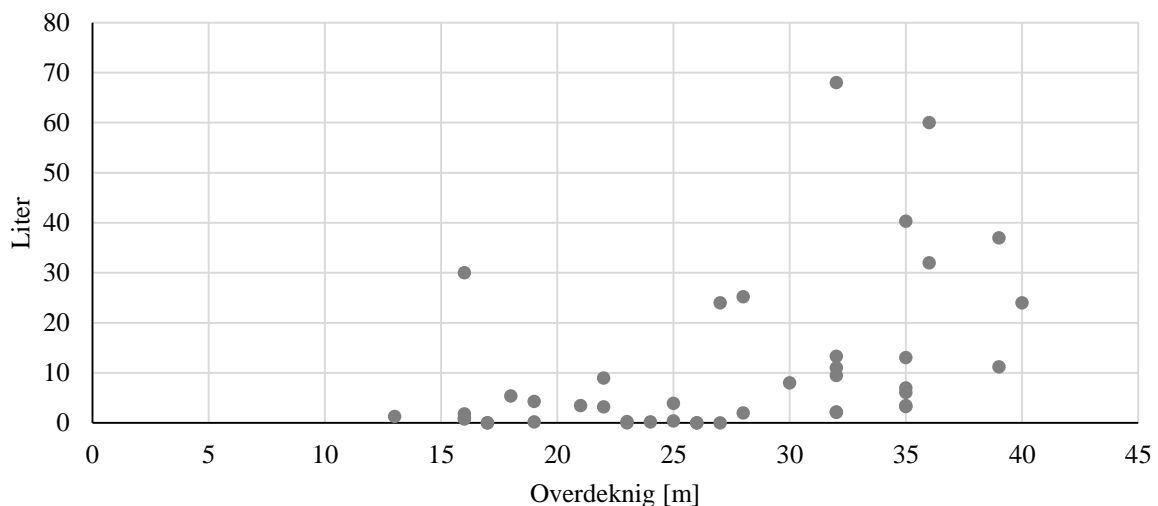
Figur 5.2 Indikasjon på innlekkasje fra fuktkartleggingen.

Det er etablert en måleteriskel ved profil 2090. Dette er etter lavbrekket, så målingen representerer området etter profil 2090. I området fra profil 2090 og videre ble det målt innlekkasje på 2,5 liter per 100 meter tunnel.

Under salvekartleggingen er orienteringen av tydelige sprekkesett registrert. Det varierer hvor fremtredende de enkelte sprekkesettene er for ulike områder i tunnelen. Sprekkesett S₂ er mer fremtredende fra profil 1830. Dette samsvarer med økt innlekkasje, men sammenhengen er dårlig dokumentert. Under fuktkartleggingen ble det observert fuktgjennomsalg fra antatte sprekker. Disse hadde orientering som samsvarer med S1 og S2. Det ble observert flest tilfeller med orientering samsvarende med S1.

5.2.2 Sonderboring

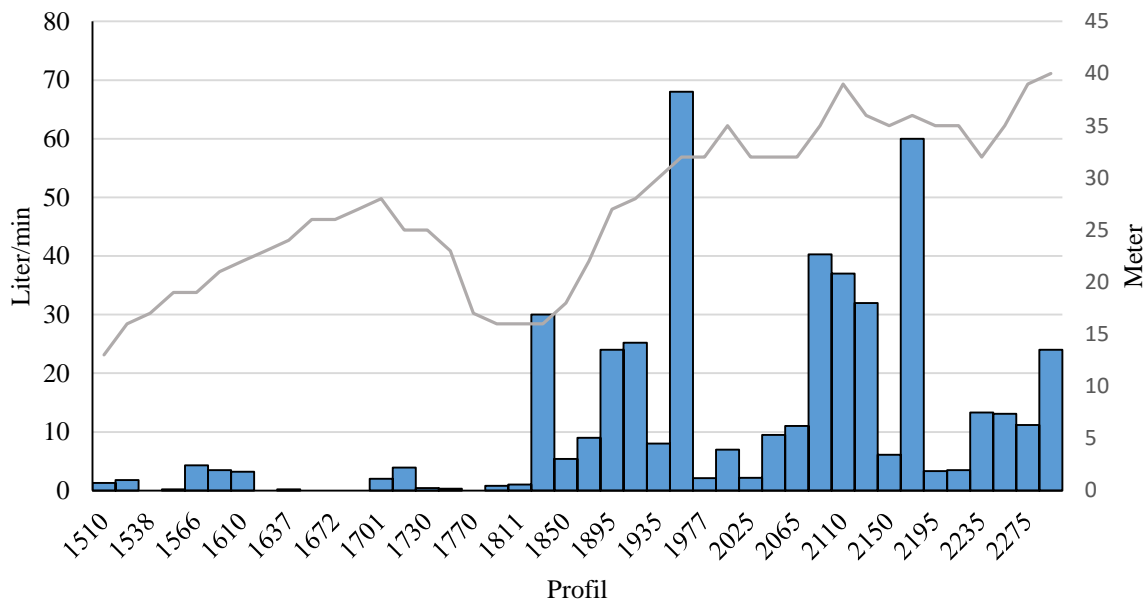
Målt innlekkasje har variert fra opp mot 70 liter totalt til helt tørre hull. Figur 5.3 viser et XY plot for innlekkasje mot overdekning. Det er ingen lineær sammenheng mellom de to parameterne, men det er påfallende mer innlekkasjene i områdene med overdekning over 30 meter. Det er verd å merke at området med innlekkasje i stor grad dreier seg om området fra profil 1830-2300. Dette fremkommer av Figur 5.4.



Figur 5.3 Målt innlekkasje fra sonderhull mot overdekning

5.2.3 Overdekning

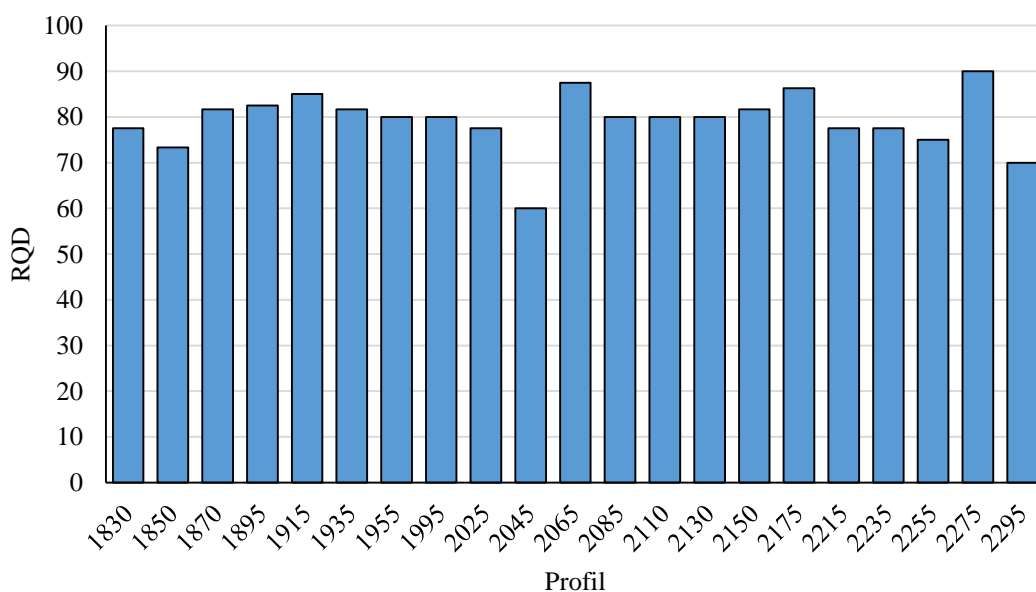
Overdekningen er vist sammen med innlekkasje i Figur 5.4. Overdekningen varierer mellom 20 og 40 meter. Rundt profil 1830 er det et søkk i terrenget. Etter søkket øker overdekningen.



Figur 5.4 Viser oversikt over målt innlekkasje (søylor) og overdekning (linje) i forhold til profil.

5.2.4 RQD

Det er utført salvekartlegging for stort sett alle salvene i tunnelen. Fordelingen av parameterne i forhold til profil er vist i Figur 5.5. Verdiene i figuren er gjennomsnittet av RQD-verdien for alle salvekartleggingene som inngår i en injeksjon/sonderskjerm. Gjennomsnittsverdiene for oppsprekingsgrad (RQD) ligger jevnt mellom 75 og 90, med unntak profil 2045 som har verdi 60. Den lavest verdien for en enkeltsalve er RQD på 50 i profil 2300. Dvs. andre salve i injeksjonsskjermen som startet i profil 2295.

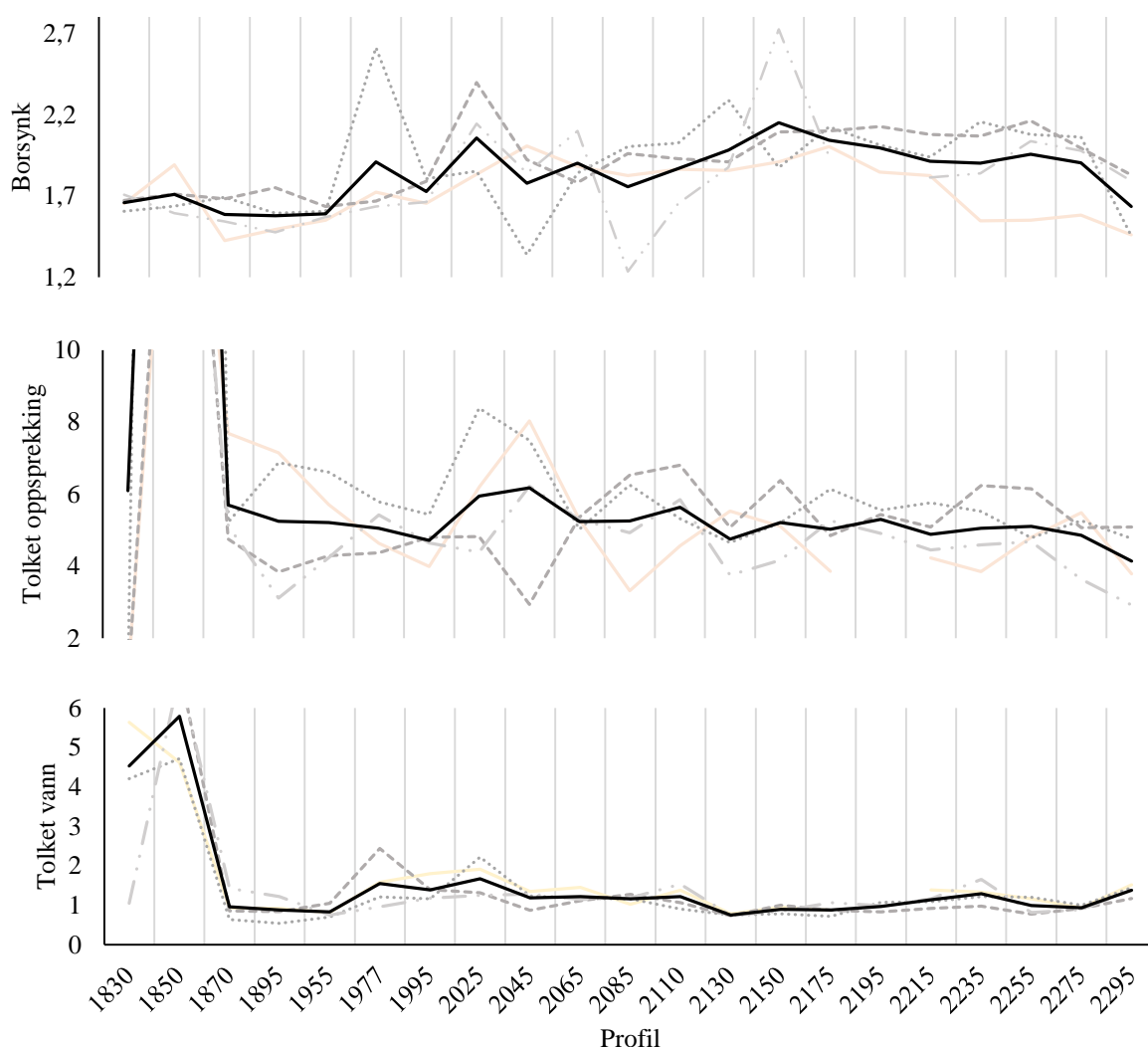


Figur 5.5 RQD verdi i forhold til profil.

5.2.5 MWD

Det er kun samlet MWD-data for området hvor det er injisert. Gjennomsnittsverdien for hullene er relativt stabile i dette området. Figur 5.6 viser oversikt over MWD-data. Hvert punkt i diagrammet tilsvarer midlet verdi for hele borehullet (27 meter). Svart sammenhengende strek indikerer middelverdien av de fire hullene.

Variasjoner mellom hullene i samme skjerm varierer mer enn gjennomsnittsverdien for de ulike profilene. Både tolket vann og tolket oppsprekking har høy gjennomsnittsverdi i profil 1850. Det er uvisst hva som er bakgrunnen for det store utslaget.

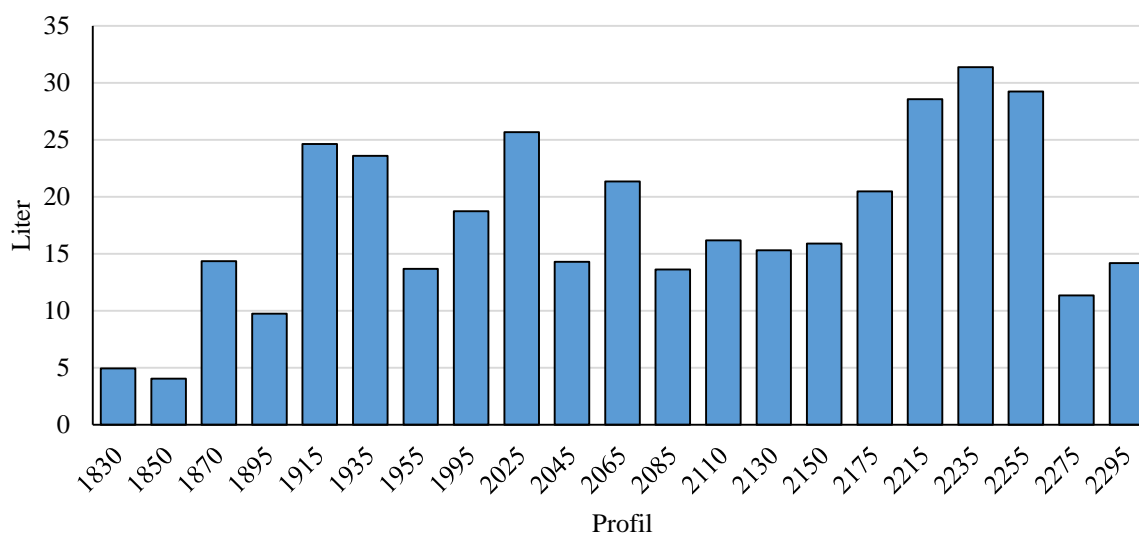


Figur 5.6 MWD-data for borsynk, tolket oppsprekking og tolket vann. Svart linje representerer gjennomsnittsverdien for verdiene fra de fire sonderhullene med lys farge.

5.3. Oversikt over forbruk og strømning

Det er samlet inn data fra 21 injeksjonsskjermer på den vestgående tunnelen. Injeksjonsparameterne på den østgående tunnelen er ikke vurdert, da det antas at denne dataen er påvirket av injeksjonen i den vestgående tunnelen. Skjermene er injisert med overlapp fra profil 1830-2320, med unntak av avbrudd i profil 1977 og profil 2195.

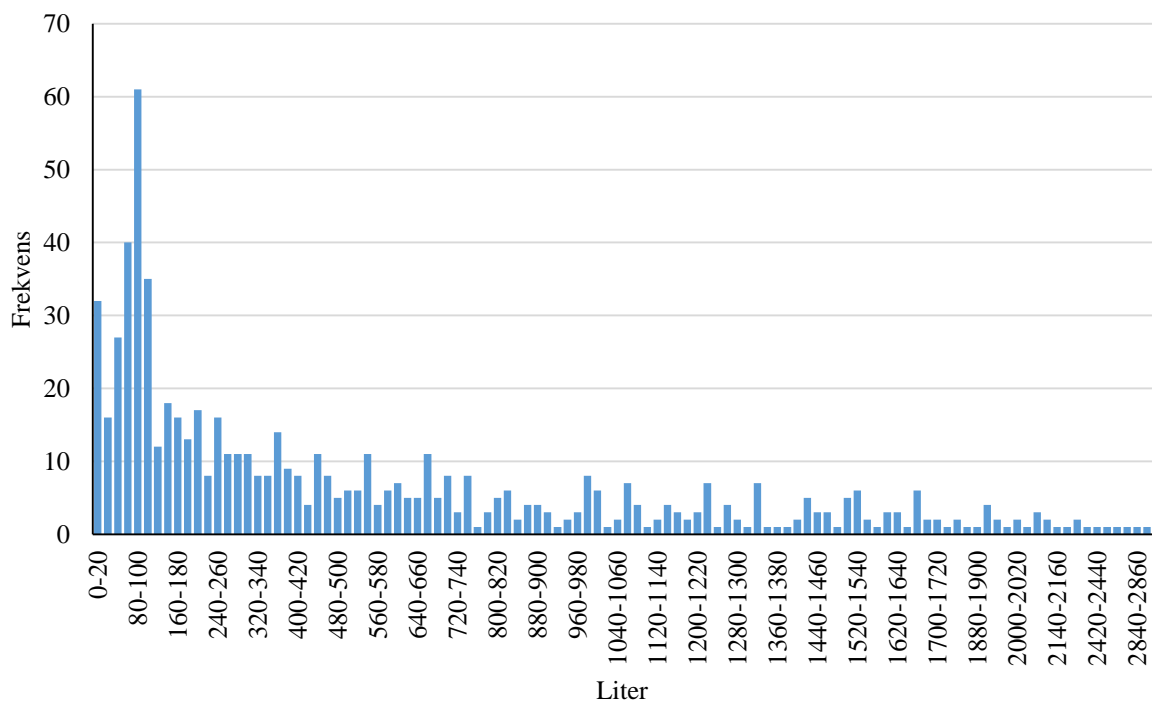
Gjennomsnittet for volum injeksjonsmasse som er trengt inn i berget er 553 liter. Volumet i profil 2025 er over seks ganger større enn volumet i profil 1850, se Figur 5.7. I mellom disse ytterpunktene er forbruket av injeksjonsmasse jevnt fordelt. Standardavviket er 223.



Figur 5.7 Volum injisert i berg per meter tunnel

Forbruk av injeksjonsmasse per injeksjonshull er vist frekvenskurven i Figur 5.8. Hullfyll er ikke trukket fra mengdene i figuren. Figuren viser en klar forskyvning mot venstre. Over 30 % av hullene er det injisert med mindre enn 120 liter. Injeksjonshullene med inngang på 670 liter eller mer utgjør 30 % i den øvre delen av tabellen.

Ved større oppløsning av frekvenskurven vises det en tydelig topp mellom 85-90 liter. Dette utgjør litt mer enn det teoretiske borehullvolumet på 82 liter. Det er også en liten topp mellom 0-20 liter, altså langt mindre en teoretisk hullfyll.

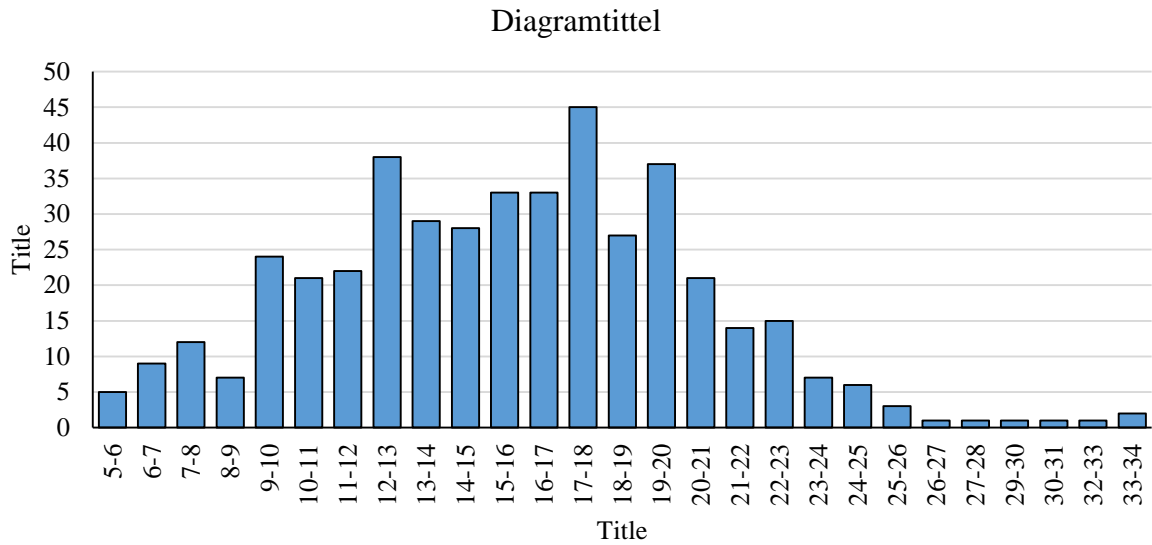


Figur 5.8 Antall injeksjonshull med inngang i et gitt intervall

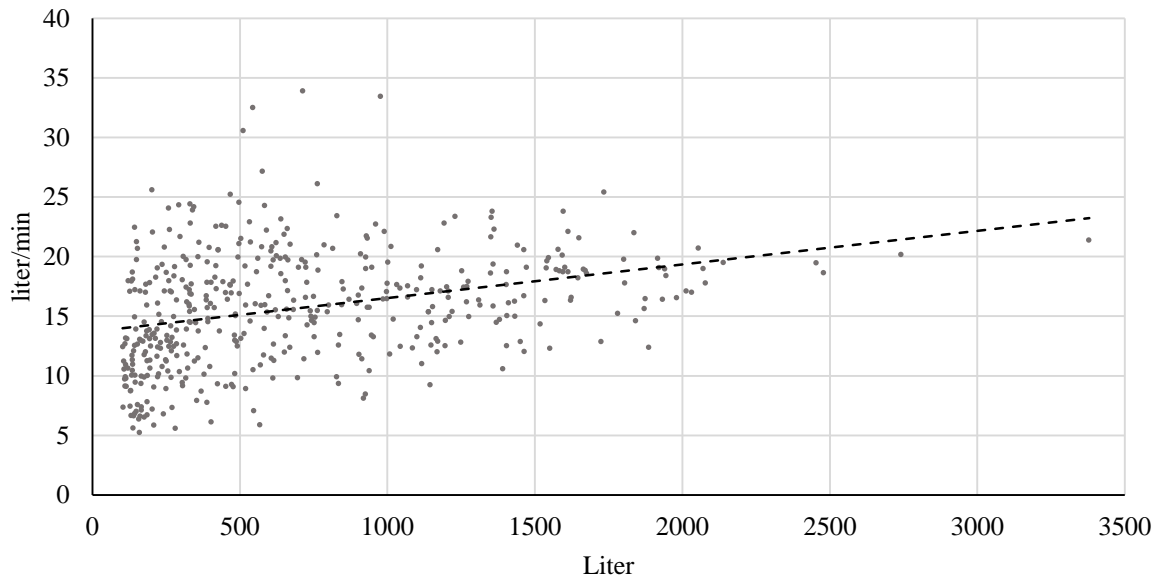
Gjennomsnittlig volumstrøm for skjermene er 16,4 l/min og standardavviket er 1,8. Laveste verdi er på 13,9 l/min for profil 2025 og høyeste verdi er 20,7 l/min for profil 2175. Øvrige verdier er jevnt fordelt mellom disse ytterpunktene.

Gjennomsnittlig volumstrøm per hull er 15,7 liter/min og standardavviket er 4,7. I Figur 5.9 er det presentert en frekvenskurve som viser volumstrøm for alle hull som har inngang større enn 120 liter. Den høyeste frekvensen ligger mellom 17 og 18 liter/minutt. Nedre kvartil er 12,8 l/min og øvre kvartil er 19,0 l/min.

Relasjon mellom injisert volum og volumstrøm er vist i Figur 5.10. Alle hull med inngang større enn 120 liter er med i plottet. Korrelasjonskoeffisienten er 0,3. Det virer å være en tendens til større volumstrømning ved stor inngang.



Figur 5.9 Frekvenskurve for volumstrøm basert på 451 hull.



Figur 5.10 Volumstrøm plottet mot forbruk basert på 452 hull.

5.4. Trykkreduksjon

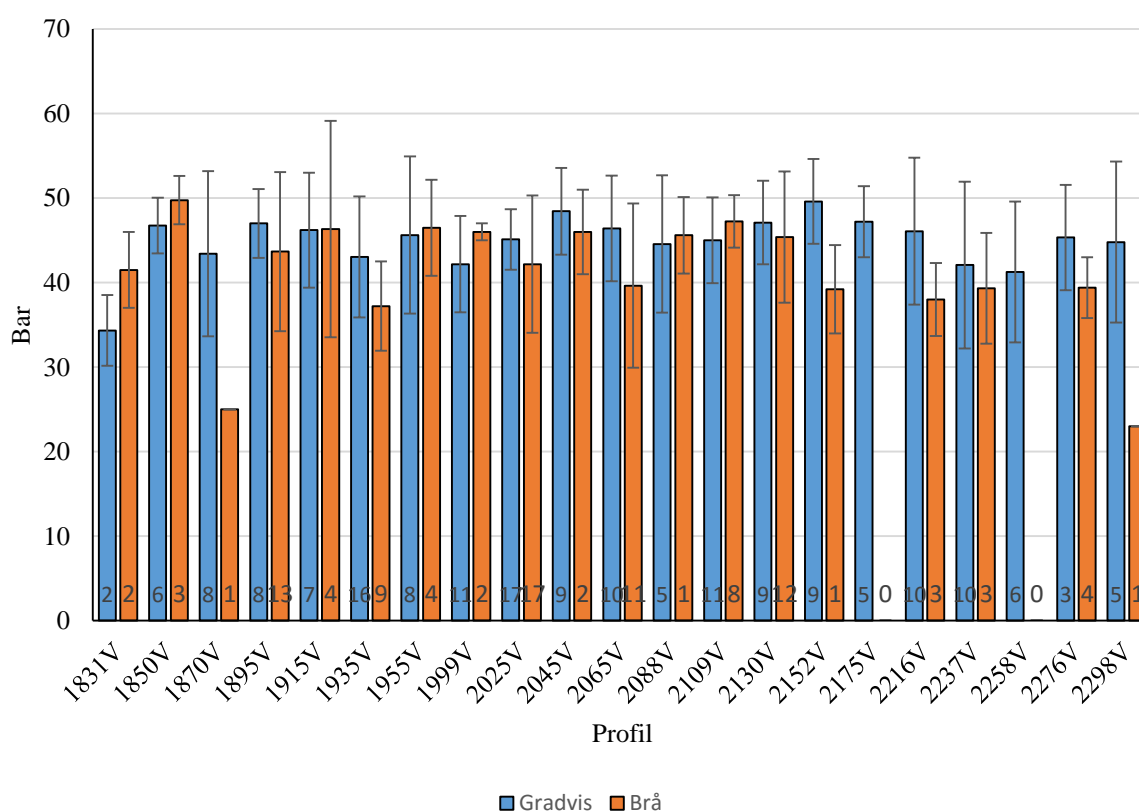
I undersøkelse av injeksjonsforløpene ble trykkreduksjoner relativ til volumstrømmen registrert. Trykkreduksjonene ble delt i to grupper, brå og gradvis, etter hvordan de opptrådte på trykk-strømningskurvene, se kapittel 4.4. Tabell 5.2 viser gjennomsnittlig kritisk trykk for gradvis og brå trykkreduksjon.

Tabell 5.2 Gjennomsnittsverdier for trykkreduksjon.

	Brå	Gradvis
Gjennomsnittlig trykk ved initiering [bar]	43,4	45,0
Standardavvik	9,8	7,3
Antall	109	207

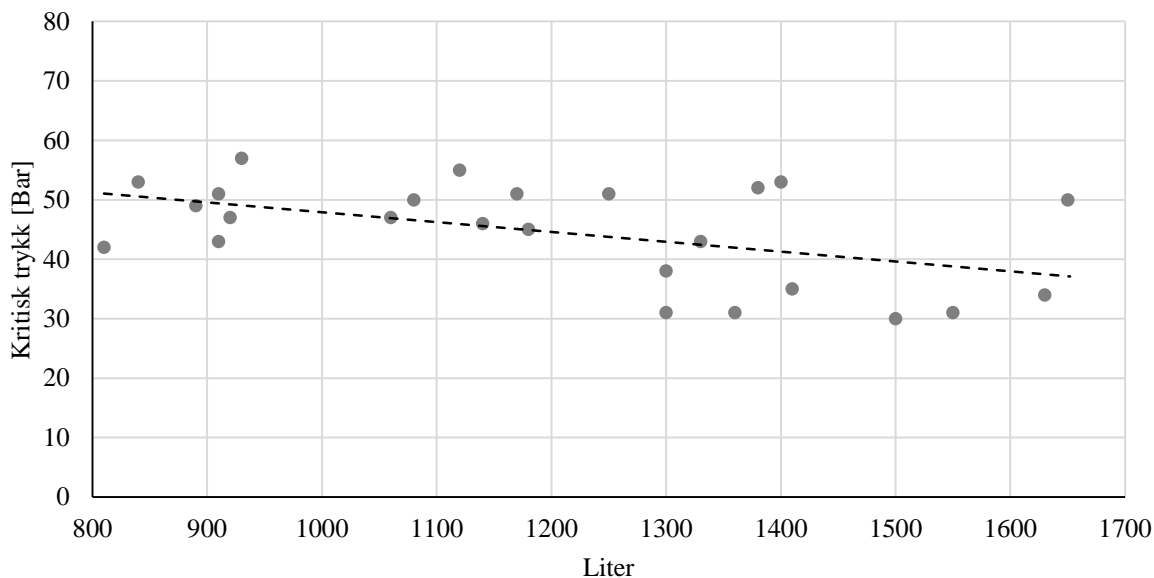
Figur 5.11 viser gjennomsnittlig kritisk trykk for de aktuelle profilene. Verdier for tre skjermer ligger under 37 bar. Felles for de tre laveste verdiene er at hver av dem kun representerer 1-2 registreringer.

Søylene med blå farge representerer gradvis reduksjon og de oransje søylene representerer brå reduksjon. Nederst på hver søyle er antall registreringer for den aktuelle injeksjonsskjermer angitt. Standardavviket er angitt øverst på søylene.

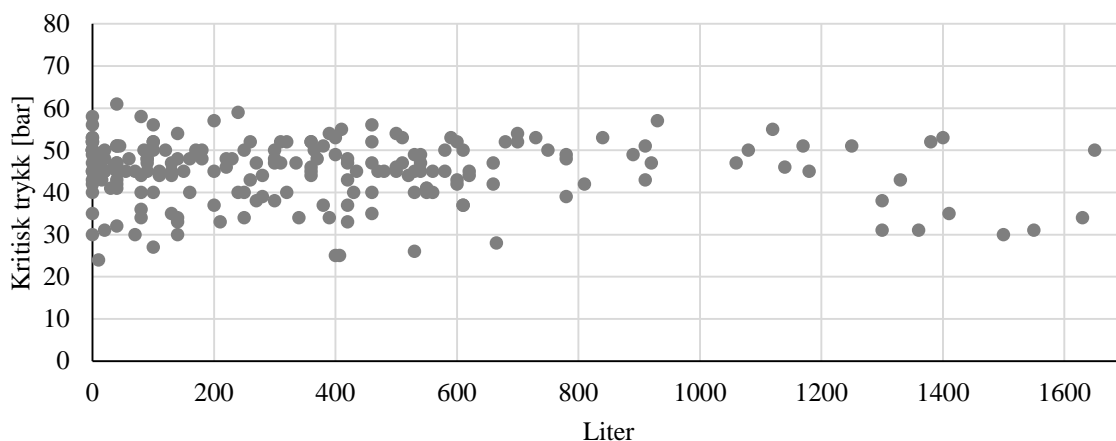


Figur 5.11 Gjennomsnittstrykk for hendelser med registrert trykkreduksjon

Volum injisert ved initiering av gradvis trykkreduksjonen ble også registrert, se Figur 5.12 og Figur 5.13. Det er ikke funnet korrelasjon mellom volum og trykk når hele datasettet, på 205 punkt, er analysert. Det ble imidlertid funnet en svak korrelasjon for volumverdier på 800 liter eller mer. Datasettene for denne analysen består av 25 punkt. Korrelasjonskoeffisienten er 0,5.



Figur 5.12 XY plot for volumverdier over 800 liter og kritisk trykk

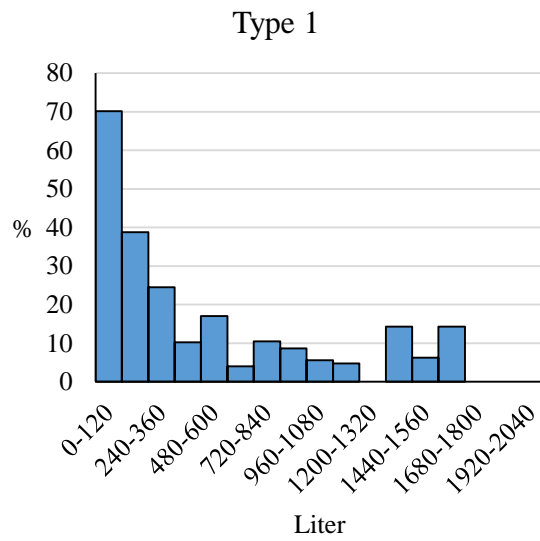


Figur 5.13 XY plot for alle volumverdier og kritisk trykk

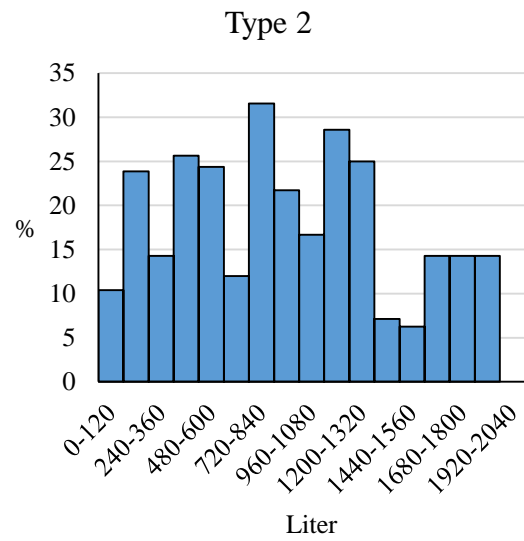
5.5. Karakteristikk av injeksjonsforløp

Injeksjonsforløpet for 444 injeksjonshull er studert. I studiet av injeksjonsforløpet var utviklingen av trykk relativ til volumstrømningen sentral, se kapittel 4.5.

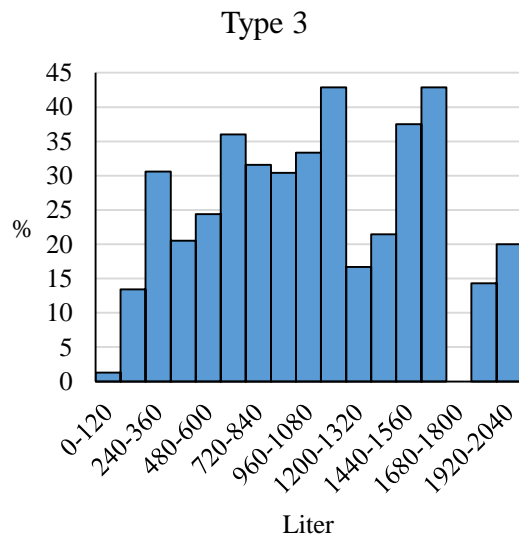
Diagrammet i Figur 5.14 viser hvor stor prosentvis andel en type forløp utgjør, for et gitt volumintervall. Volumet er beregnet som injeksjonsmasse trengt inn i berget. Dvs. at teoretisk hullfyll er trukket fra totalvolumet. Type 1, som betegner jevn trykkoppbygning, skiller seg ut som mest forskjøvet mot lavt forbruk. Type 2, 3 4 og 5 viser en tendens til gradvis mer forskyvning til større volumverdier. Type 6 betegner trykkoppbygning i starten, men deretter flatt trykk- og strømningsforløp. Denne type forløp er kun registrert for volum mindre enn 600 og er totalt registrert kun 6 ganger.



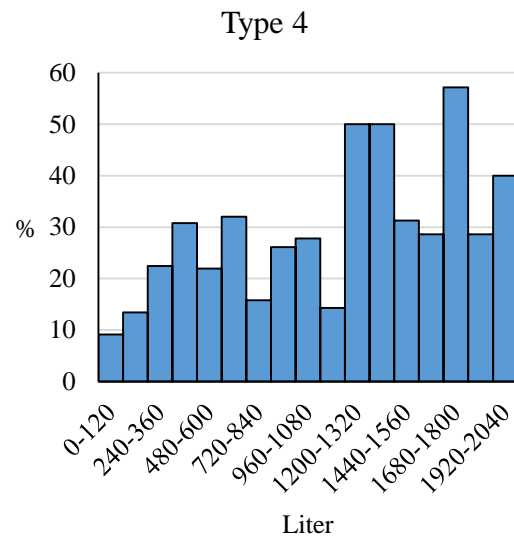
a) 114 registreringer



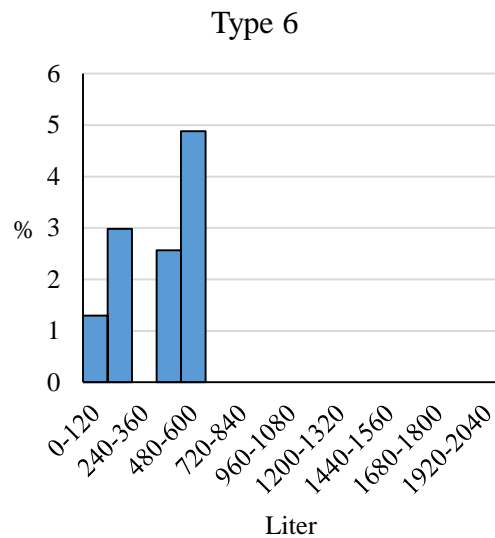
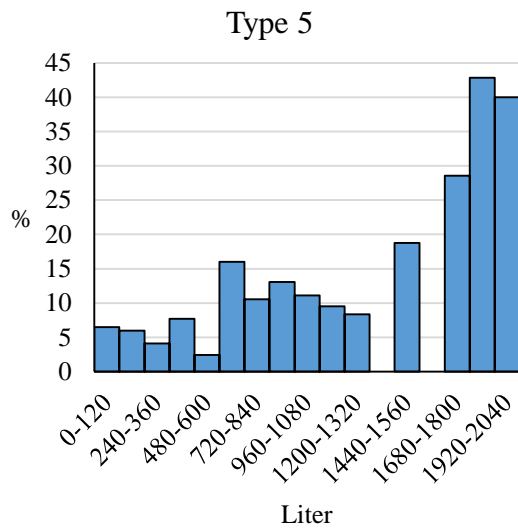
b) 82 registreringer



c) 96 registreringer



d) 101 registreringer

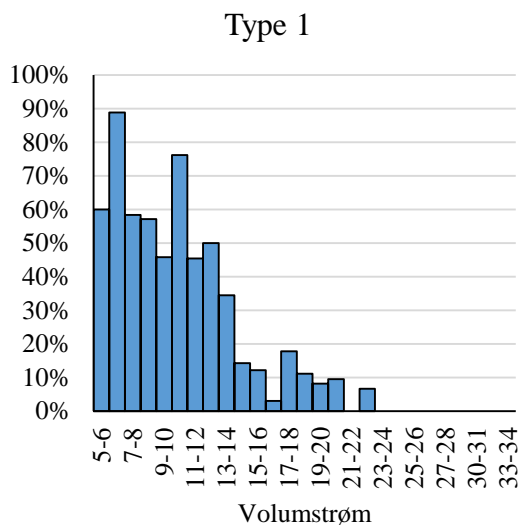


e) 39 registreringer

f) 6 registreringer

Figur 5.14 Viser hvor stor andel en karakteristikk utgjør i et volumintervall.

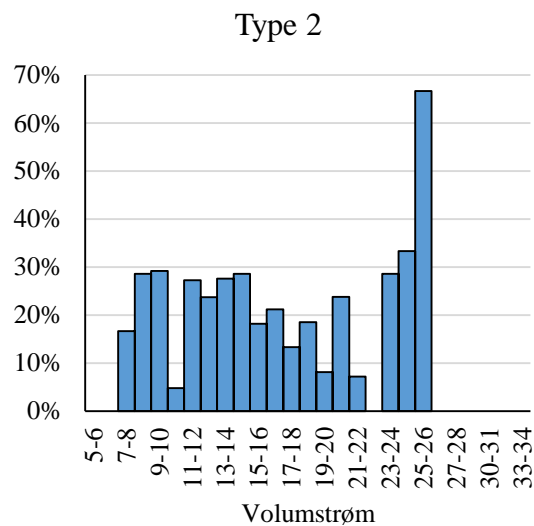
Det er også studert hvordan type forløp fordeler seg for ulike intervaller for gjennomsnittlig volumstrømning. Figur 5.15 viser hvor stor andel en gitt type forløp utgjør for et gitt strømningsintervall. I det laveste intervallet, 0-4 l/min, er det kun type 1 som er registrert. Type 1 er mest fremtredende i de lave intervallene. Type 2, 3, 4 og 5 viser en tendens til gradvis mer forskyvning til større volumstrømmer, ikke ulik fordelingen for volum.

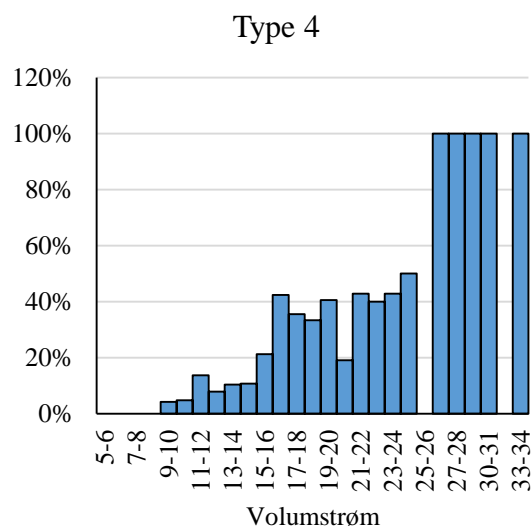
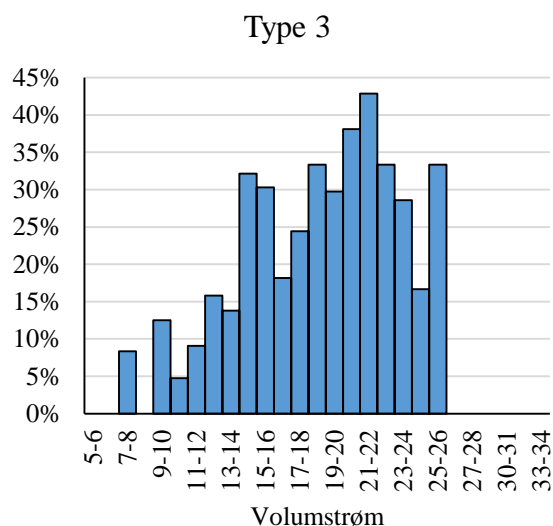


a)

114 registreringer

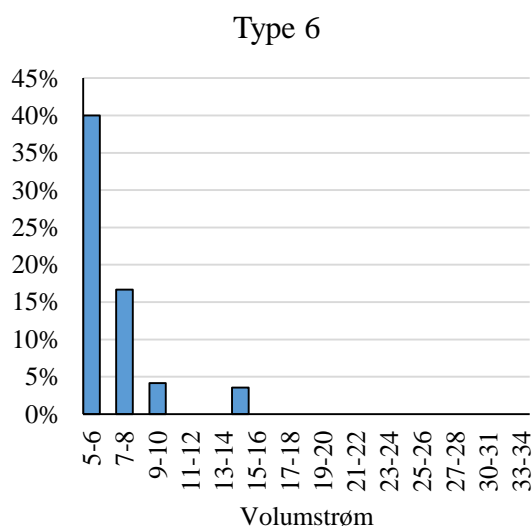
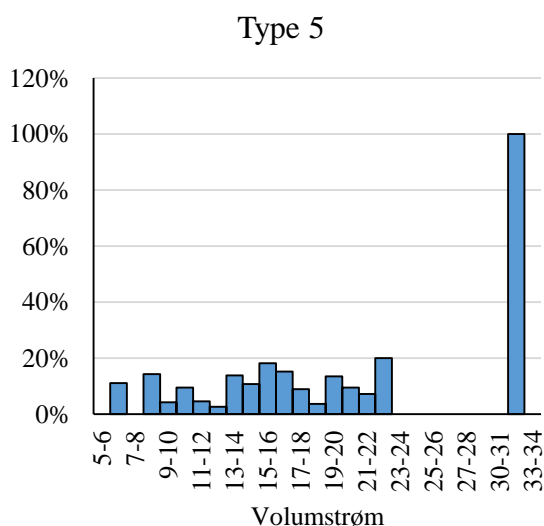
b) 82 registreringer





c) 96 registreringer

d) 103 registreringer



e) 42 registreringer

f) 6 registreringer

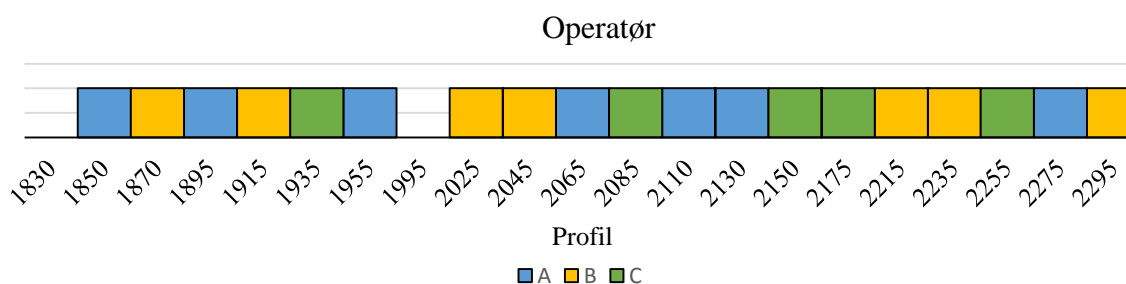
Figur 5.15 Viser hvor stor andel en type forløp utgjør for et gitt strømningsintervall.

Tabell 5.3 viser aritmetisk gjennomsnitt og standardavvik for volum og volumstrømning for de ulike karakteristikkene. Til forskjell fra Figur 5.14 og Figur 5.15 som viser prosentvis fordeling av type forløp innenfor et intervall, viser tabellen under, tall for alle verdiene for en gitt type forløp. Det fremgår av tabellen at gjennomsnittlig volum injisert og volumstrøm for hovedtypene (type 1-4), øker med et forløp som indikerer bråere trykkoppbygning. Type 5 og 6 har henholdsvis det største og minste volumet. Type 5 har den høyeste volumstrømmen og type 6 har den minste.

Tabell 5.3 Viser aritmetisk gjennomsnitt og standardavvik for volum og volumstrømning for de ulike typene.

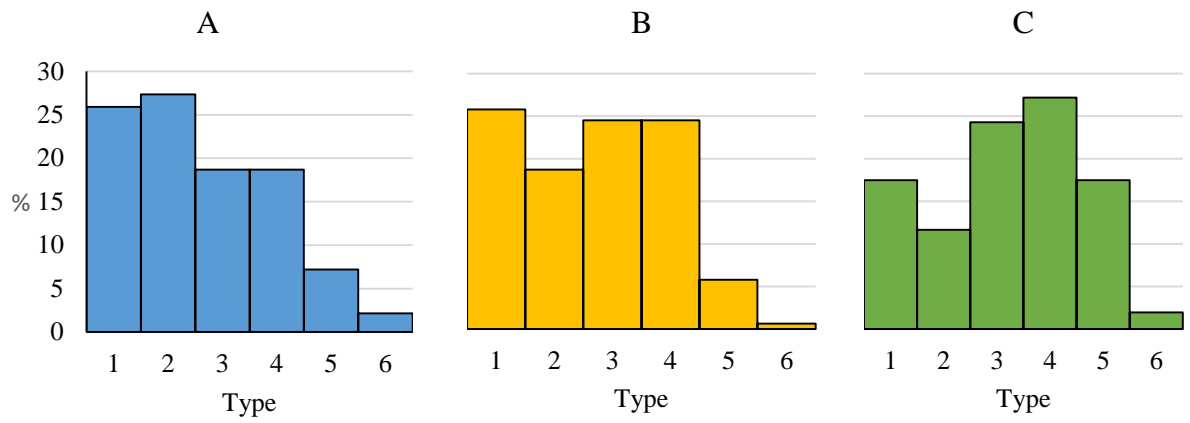
Type	1	2	3	4	5	6	Samlet
Gjennomsnittlig Volum i berg (liter)	255,0	584,8	758,5	811,1	987,2	305,4	622,4
Standaravvik	319,9	438,5	452,8	582,6	757,4	192,0	546,8
Gjennomsnittlig volumstrømning (liter/min)	12,0	15,1	17,2	18,5	16,2	8,0	12,0
Standardavvik	3,8	4,5	3,9	4,5	4,7	3,0	3,8
Antall	114	82	96	103	42	6	443

Ulike injeksjonsparametere er også sammenlignet med operatørene for å vurdere om forløpene er operatøravhengige. Figur 5.16 viser en oversikt over hvilken operatør som har styrt injeksjonsarbeidet. Det fremgår av figuren at det ikke er injisert sammenhengende i ett område, men at de ulike operatørene har injisert spredt langs den aktuelle strekningen. Det er tre operatører som har injisert på 19 av de 21 skjermene. De to andre skjermene er injisert av andre operatører og tatt bort fordi det ikke danner tilstrekkelig datagrunnlag for analysen.



Figur 5.16 Oversikt over hvilken operatør (A, B og C) som har styrt injeksjonsarbeidet.

Det er en tendens til at type forløp fordeler seg ulikt for de tre operatørene. Operatør A har en fordeling som er forskjøvet mot mer gradvis trykkoppbygning. De fire hovedtypene (1, 2, 3 og 4) er relativt jevnt fordelt for operatør B. For operatør C er typene forskjøvet mot en mer brå trykkoppbygning. Figur 5.17 viser hvordan injeksjonsforløpene er fordelt for den enkelte operatør.

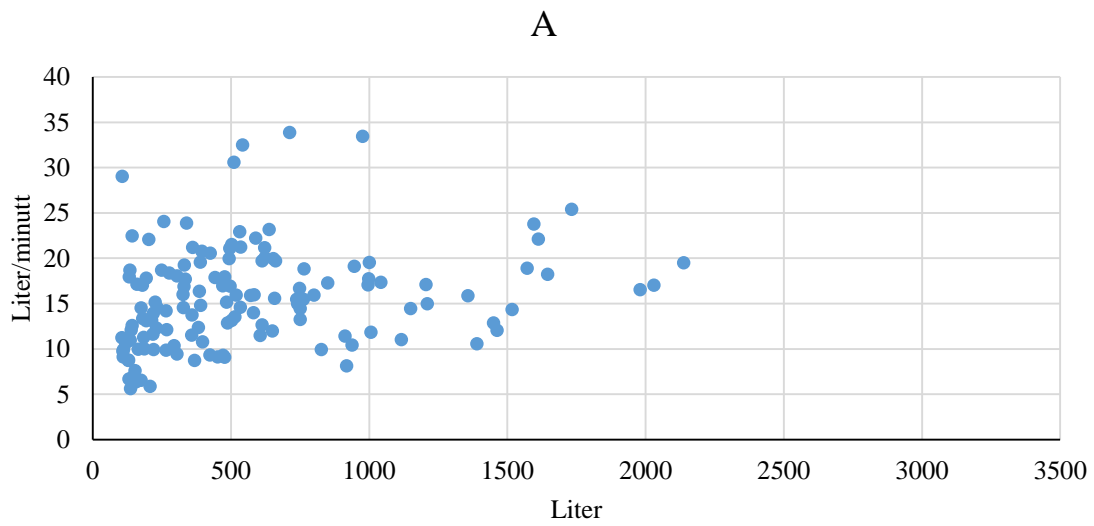


a) 139 forløp

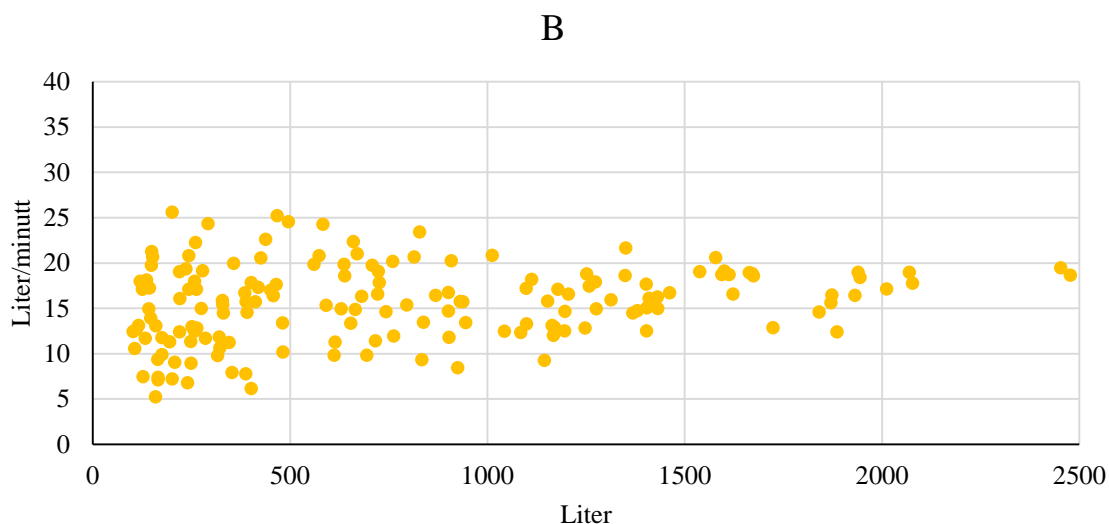
b) 155 forløp

c) 103 forløp

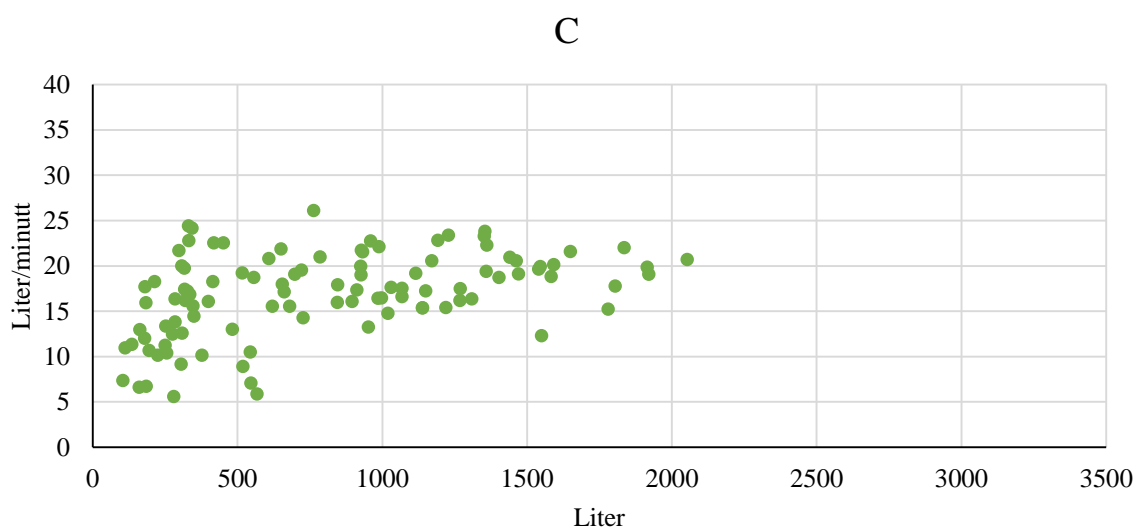
Figur 5.17 Diagrammene viser hvordan injeksjonsforløpene er fordelt for den enkelte operatør.



a) 140 forløp



b) 164 forløp



c) 106 forløp

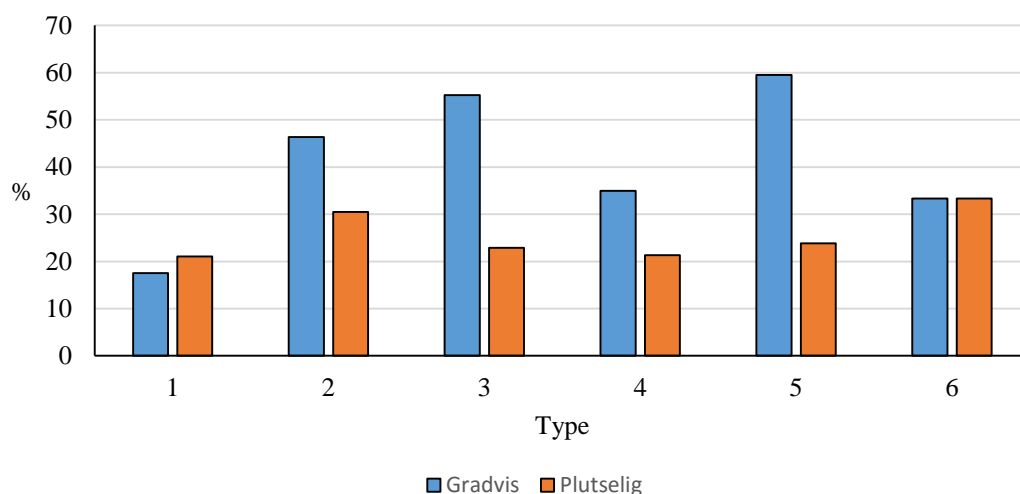
Figur 5.18 XY-plot for injisert volum mot volumstrøm for operatørene A, B og C.

Volumstrøm er en faktor som i stor grad er avhengig av operatør. Det er derfor interessant å se på variasjonen mellom de tre operatørene. I Figur 5.18 er det presentert XY-plot med volumstrøm og volum injisert. Operatør A viser klart størst spredning i volumstrøm. Det er også denne operatøren som har den laveste gjennomsnittlige volumstrømmen og lavest volum injisert, se Tabell 5.4. Gjennomsnittlig volum injisert er likt for operatør B og C, men B har betydelig større spredning. Operatør B har lavere gjennomsnittlig volumstrøm enn operatør C.

Tabell 5.4 Gjennomsnittverdier for volum injisert og volumstrøm for operatørene.

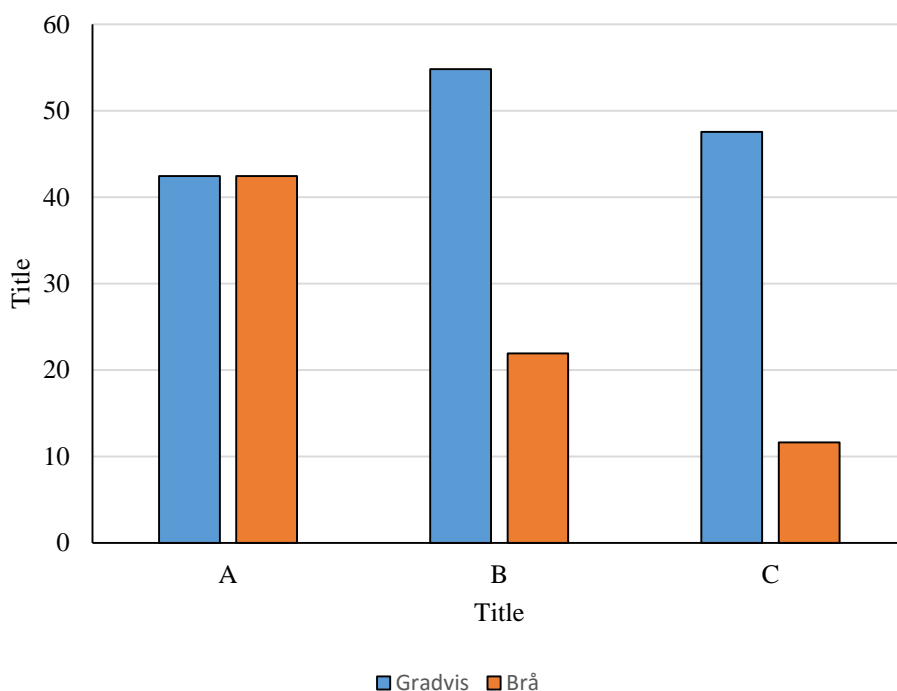
Operatør	Gjennomsnittlig volum injisert (liter)	Standardavvik	Gjennomsnittlig volumstrøm (liter/min)	Standardavvik
A	565,0	448,2	15,4	5,5
B	802,3	610,8	15,6	4,2
C	800,2	512,4	16,9	4,6
Samlet	640,5	546,3	15,9	4,8

Figur 5.19 viser hvor mange prosent av injeksjonsforløpene det har oppstått trykkreduksjon. Type 1, hadde den lavest andelen av både gradvis og brå trykkreduksjon. Andelene utgjorde henholdsvis 21 og 17 % av injeksjonsforløpene. Type 5 hadde høyeste andel av gradvis trykkreduksjon med 60 %. For brå trykkreduksjon hadde karakteristikk 6 den høyeste andelen med 33 %.



Figur 5.19 Andel gradvis og plutselig trykkreduksjon for typene

Andelen injeksjonsforløp med gradvis trykkreduksjon er relativt lik for de tre operatørene A, B og C, se Figur 5.20. Operatør A har lavest andel gradvis trykkreduksjon med 39 %, mens B og C har henholdsvis 55 og 48 %. Den brå trykkreduksjonen viser større variasjon. Operatør A har en langt større andel enn B og C.



Figur 5.20 Andel injeksjonsforløp med trykkreduksjon for operatørene A, B og C.

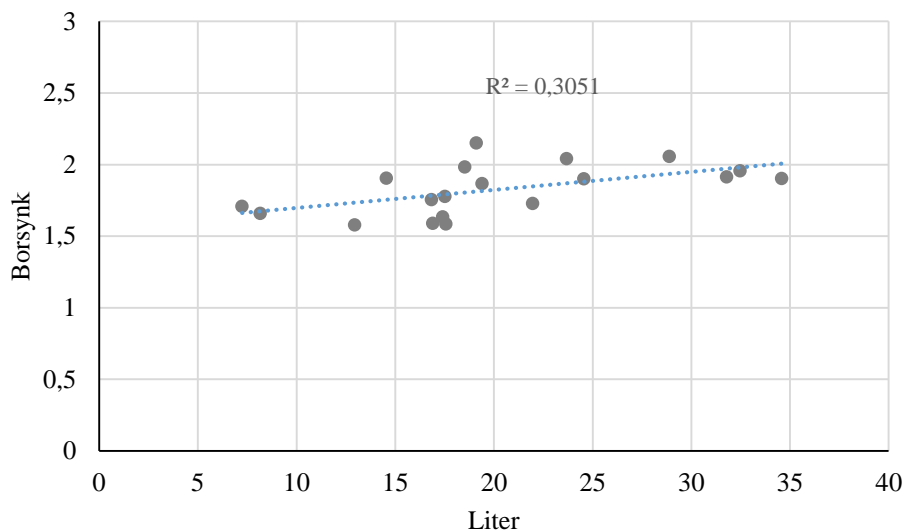
5.6. Geologi og injeksjon

Sammenheng mellom injeksjon og geologi er undersøkt. For de fleste parameterne er det ikke funnet noen sammenheng. Analysen har tatt utgangspunkt i studie av XY-plot og grafer med parametere i forhold til profil. Tabell 5.5 viser korrelasjonskoeffisient, R, for noen injeksjonsparametere sammenlignet med geologi.

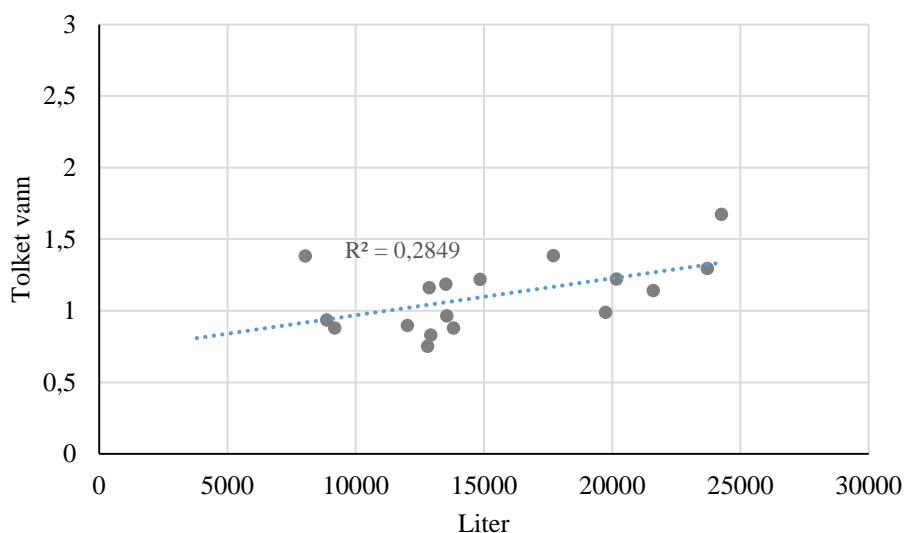
Tabell 5.5 Korrelasjonskoeffisient, R, for noen injeksjonsparametere sammenlignet med geologi

Geologisk parameter	Liter i berg pr. m tunnel	Liter i berg pr. m borehull	Gjennomsnittlig volumstrøm pr. skjerm
RQD	0,11	0,09	0,05
Overdekning	0,29	0,13	0,16
Innlekkasje	0,25	0,22	0,11
Borsynk	0,50	0,55	0,27
Tolket oppsprekking	0,02	0,20	0,02
Tolket vann	0,53	0,40	0,18

Både borsynk og tolket vann gir en viss korrelasjon mot volum injisert, se Figur 5.21 og Figur 5.22.



Figur 5.21 XY-plot som viser borsynk mot injisert volum i berg pr. meter borehull

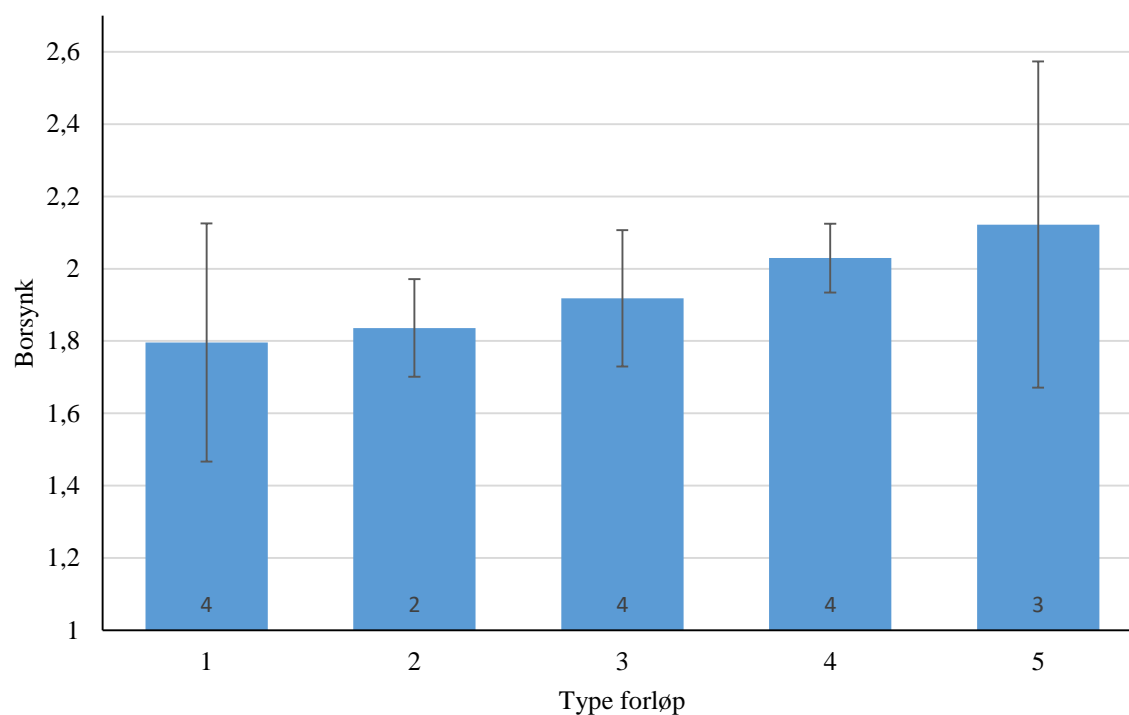


Figur 5.22 XY-plot som viser tolket vann mot injisert volum pr. m tunnel.

MWD-dataen som ligger til grunn for beregningen av korrelasjonskoeffisienten er gjennomsnittsverdien av fire sonderhull, se svart linje i Figur 5.6. MWD-data fra enkelthull sammenlignet med injeksjonsdata fra enkelthull gav noe svakere korrelasjon.

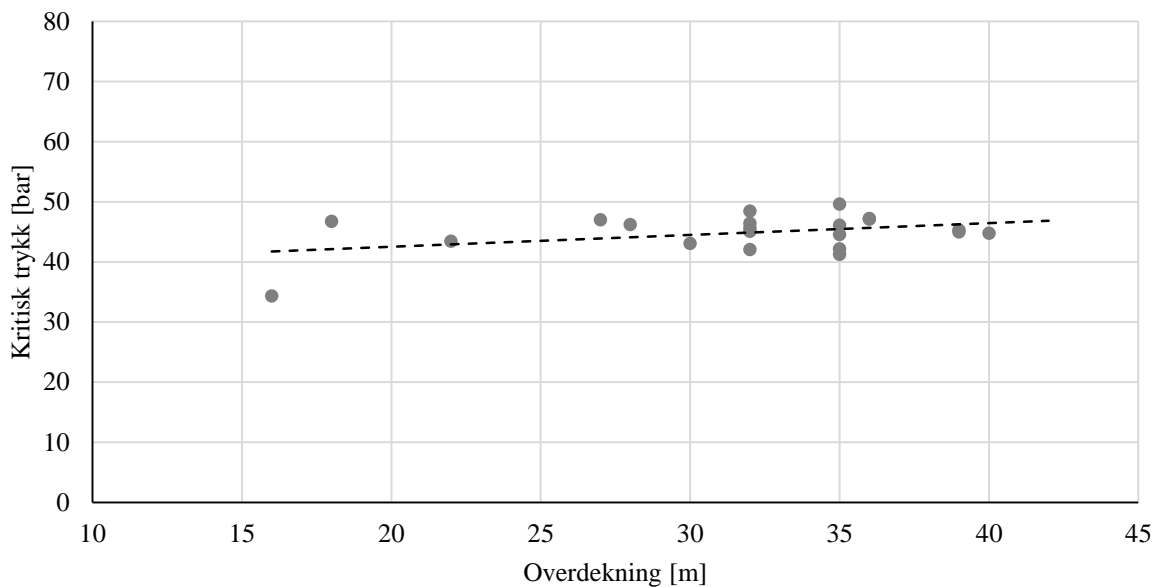
MWD-data er også sammenlignet med type injeksjonsforløp. 17 av de 24 sonderhullene med MWD-data hadde stor nok inngang til at injeksjonsforløpet ble vurdert. For disse hullene ble gjennomsnittet av de aktuelle borparameterne beregnet for hver av typene og sammenlignet mot de andre typene. Økende gjennomsnittsverdi for borsynk samsvarte med økende grad av

trykkoppbygning sent i injeksjonsforløpet, se Figur 5.23. Karakteristikk 6 var ikke representert i de 17 sonderhullene.



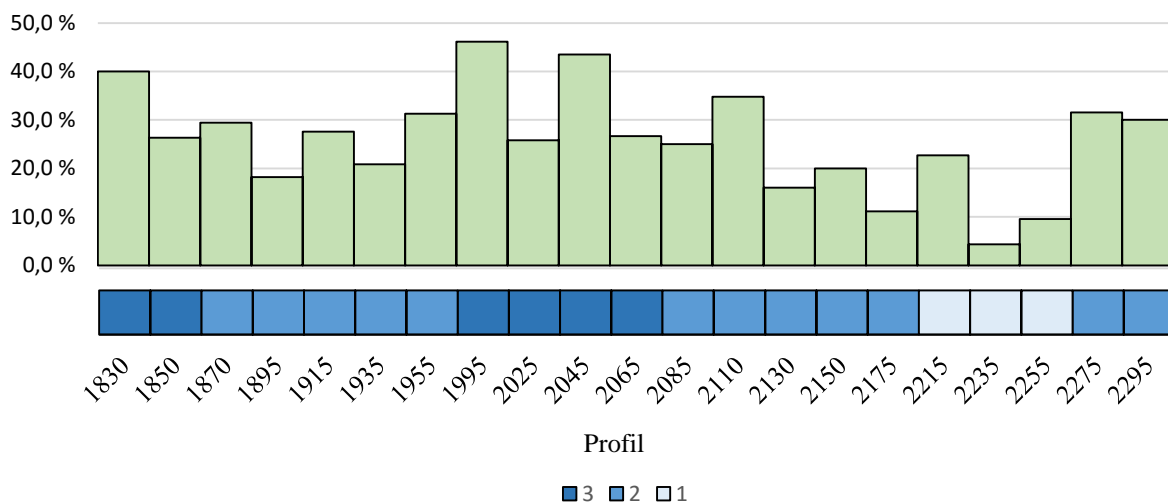
Figur 5.23 Gjennomsnitt av borparametere for de ulike karakteristikkene.

Det ble undersøkt om det var sammenheng mellom overdekning og gradvis trykkreduksjon. Korrelasjons koeffisienten er 0,4, se Figur 5.24. Stigningstallet til den lineære regresjonen er 0,2 bar/meter. Til sammenligning er den spenningen induisert av gravitasjonen ca. 0,27 bar/meter.



Figur 5.24 Overdekning plottet mot gradvis trykkreduksjon

Resultatene fra fuktkartleggingen gir en indikasjon på innlekkasje over sålen i tunnelen. Disse resultatene er delt i tre kategorier hvor 3 indikerer størst og 1 indikerer minst innlekkasje. Figur 5.25 viser en sammenstilling av andel av forløp type 1 sammen med resultatene fra fuktkartleggingen. De tre skjermene med størst andel type 1 ligger i områder med innlekkasje klasse 3. De to skjermene med lavest andel forløp type 1 ligger i området hvor det er tørrest.



Figur 5.25 Søylediagrammet viser andel av forløp type 1 i forhold til profil. Fargekodene under søylediagrammet viser resultater fra fuktkartleggingen.

6. Diskusjon

6.1. Innledning

I innledningen av oppgaven ble det presentert fire mål for arbeidet. Første punkt var å utføre et litteraturstudie med fokus på injeksjonstrykkets betydning for utførelsen og kvaliteten på berginjeksjon. Andre forhold av betydning for å vurdere punktene under ble i tillegg tatt med i studiet. Litteraturstudiet er presentert i første del av oppgaven. Med utgangspunkt i teorien som er presentert og resultater fra analysen vil de tre øvrige punktene diskuteres:

- Hvorvidt hydraulisk jekking har funnet sted.
- Resultater fra analysen av injeksjonsforløp.
- Sammenhengen mellom injeksjon og geologi.

6.2. Hydraulisk jekking

Det er undersøkt hvorvidt hydraulisk jekking finner sted under injeksjonsforløpene som er observert. For å vurdere om hydraulisk jekking har forekommet er grafer for trykk og volumstrømninger gjennomgått og tilfeller med trykkreduksjon relativt til volumstrømmen er registrert. Resultater fra denne gjennomgangen er videre sammenlignet med andre faktorer av betydning for hydraulisk jekking for å sannsynliggjøre at de registrerte trykkreduksjonene representerer hydraulisk jekking.

6.2.1 Innfylling av injeksjonsmasse i sprekker

Tykkelsen på innfylling av injeksjonsmasse i sprekker er flere steder i tunnelen målt i størrelsesorden 2-3 mm. Det er ikke observert sprekker med tilsvarende åpning andre steder i tunnelen, hverken i sonene som er injisert eller sonene som ikke er injisert. Sprekker med åpning i denne størrelsesorden vurderes som usannsynlig med den gunstige (ut fra et stabilitetsperspektiv) innspenningen som det virker å være. Innfyllingene vurderes som en tydelig indikasjon på at hydraulisk jekking har forekommet.

6.2.2 Kritisk trykk

Brå og gradvis jekking initieres i gjennomsnitt på henholdsvis 43 og 45 bar. Standardavviket er 9,8 og 7,3. At trykkreduksjonene initieres ved relativt like trykk er en indikasjon på at trykkreduksjonene skyldes forhold som er spenningsavhengig.

Gitt at trykkreduksjonene skyldes jekking kan en mulig forklaring på variasjon i kritisk trykk være ulik orientering på sprekker som er jekket. Flere steder i tunnelen er det funnet stivnet injeksjonsmasse i sprekker av ulik orientering. Sprekker med ulike orienteringer vil etter all

sannsynlighet være utsatt for ulike normalspenninger og vil derfor kreve ulike trykk før hydraulisk jekking inntreffer.

6.2.3 Teoretisk vurdering av kritisk trykk

Spenning induisert av overdekningen vil være i størrelsesorden 8 til 11 bar ved en overdekning på 30 til 40 meter. Ifølge Rafi et al. (2014) er det ved injeksjonstrykk større enn 3 ganger tyngden av bergmassen risiko for ultimat jekking ved inntrengning i horisontale sprekker. Dvs. at injeksjonstrykk på over 30 bar potensielt kan føre til ultimat jekking.

Nedre kvartil for kritisk er 39 og 41 bar for henholdsvis brå og gradvis trykkreduksjon. Dette er betydelig større enn 3 ganger tyngden av overliggende bergmasse. Potensialet for elastisk jekking vil igjen være enda mindre enn 30 bar. Det høye nivået for kritisk trykk kan skyldes at jekkingen ikke har funnet sted i horisontale sprekker. Dette støttes av observasjoner i tunnelen hvor det kun er registrert innfylling av injeksjonsmasse i steile sprekker.

Det er ofte antatt at steile sprekker har større innspenning på grunn av passiv last. Opptreden av høye spenninger er ofte vanlig i Skandinavia på grunn av tektoniske spenninger. Oppsprekkingen langs foliasjonen som er horisontal er heller ikke særlig fremtredende. Disse faktorene taler for at kritisk trykk for jekking kan være noe høyere enn det som kan antas ut fra teorien om jekking av horisontale sprekker.

Når det er sagt kan inntrenging i steile sprekker også være et tegn på at minste hovedspenning er horisontal. I så fall ville det være ventet at jekking opptrer for injeksjonstrykk betydelig lavere enn 30 bar. Det imidlertid ikke funnet noen indikasjoner på at dette er tilfellet ved gjennomgang av injeksjonsforløpene.

6.2.4 Sammenheng mellom kritisk trykk og overdekning

Som nevnt over har overdekningen innvirkning på spenningsforholdene og vil dermed kunne påvirke kritisk trykk for jekking. Det er derfor trolig at variasjonen i kritisk trykk også kan skyldes variasjon i overdekning Korrelasjonen mellom kritisk trykk for gradvis trykkreduksjon og overdekning var 0,4.

Selv om dette er en svak korrelasjon, er det nok til at det kan vurderes som en mulig sammenheng. Den svake korrelasjonen kan nok til en viss grad tilskrives liten variasjon i overdekning i området som er undersøkt. Ulik innspenning for sprekker av ulik orientering, som nevnt over, er antakelig av større betydning.

Stigningstallet til linjen, funnet ved minste kvadraters metode, var 0,2 bar/meter. Til sammenligning er spenningen induisert av gravitasjonen ca. 0,27 bar per meter. Med den svake

korrelasjonen som var i dette tilfellet er det kanskje ikke grunnlag til å trekke en parallell til sammenheng mellom spenninger induisert av gravitasjonen og kritisk trykk registrert. Resultatet peker likevel i retning at gravitasjonen har innvirkning på trykket som er registrert. Dette er en annen indikasjon på at registrert kritisk trykk er spenningsavhengig.

6.2.5 Sammenheng mellom kritisk trykk og volum injisert

Sammenheng mellom kritisk trykk for gradvis trykkreduksjon og volum injiser er også undersøkt. Ifølge teorien, se kapittel 3.10, er det ventet å være en sammenheng mellom volum og fare for hydraulisk jekking. En viktig presisering er at det ikke er volumet i seg selv, men arealet trykket virker på som er avgjørende. Et stort volum trenger ikke gi et stort areal om spredningen er konsentrert i kanaler og ikke på sprekkeflater.

Før 800 liter er det ingen tydelig sammenheng mellom kritisk trykk og volum annet enn at standardavviket for kritisk trykk reduseres noe mot større volum. Etter 800 liter er det en tendens til at kritisk trykk synker med volum injisert. Korrelasjonskoeffisienten, R , er 0,5. Dette indikerer en vag sammenheng etter 800 liter. En mulig årsak er likevel at det ved større innganger skiller seg ut enkelte sprekkesett som tar stor inngang av injeksjonsmasse. Når dette eller disse sprekkesettene skilles fra andre sprekker kan sammenheng mellom kritisk trykk og volum komme klarere frem. Sammenhengen mellom kritisk trykk og volum injisert vurderes ikke som tydelig nok til at det sier noe om hvorvidt det forekommer hydraulisk jekking.

6.2.6 Brå og gradvis trykkreduksjon

Under gjennomgangen av injeksjonsforløpene ble det skilt mellom gradvis og brå trykkreduksjon. Skille mellom disse to typene trykkreduksjon fremstår i de fleste tilfellene som tydelig. Den brå typen viser oftere store utslag i både trykk og volumstrøm. Utslagene er likevel kortvarige sammenlignet med den gradvise typen.

Gjennomsnittet for kritisk trykk er lavere og viser større standardavvik for den brå typen. Ved sammenligning de to typene trykkreduksjon skjerm for skjerm, se Figur 5.11, er imidlertid den brå type jekking større enn den gradvise typen for nesten halvparten av skjermene.

Ved sammenligning mot volumstrøm viser brå jekking en tendens til å opptre i hull med lavere gjennomsnittlig volumstrøm enn den gradvise trykkreduksjonen. Lav volumstrømning er assosiert med tynne sprekker. Dette kan tyde på at brå og gradvis jekking opptrer under ulike forhold. Lavere kritisk trykk kan indikere at trykket er fordelt på en større flate for brå jekking.

Det er samlet mindre data for brå type trykkreduksjon og det derfor dårligere grunnlag for å vurdere denne typen trykkreduksjon enn den gradvise. Dette er gjør det også vanskeligere å

vurdere forskjellen mellom brå og gradvis jekking. Fordi forskjellen mellom gradvis og brå trykkreduksjon ikke er forstått bidrar ikke skillet mellom disse trykkreduksjonene til å forklare hvorvidt hydraulisk jekking har forekommet.

6.2.7 Usikkerhet

Visuell vurdering av trykkreduksjoner i injeksjonsforløpet har vært hovedmetoden for å vurdere om hydraulisk jekking har forekommet. Et tenkt scenario hvor dette vil være en feiltolkning er dersom en kanal med noe form for innfylling settes under trykk og innfylling eroderes. Ved erosjon av innfyllingen åpnes kanalen og injeksjonsmassen får en ny passasje. Kraften som virker mot strømmingen er blitt redusert noe som kan resultere i redusert trykk i forhold til volumstrømmen. Om et slikt tilfelle oppstår kan det føre til mistolkning. Dette er en ren hypotetisk slutning som ikke er underbygd med empiri.

I tilfeller ved utganger mot en fri overflate vil motstanden som var mellom injeksjonshullet og den frie overflaten fortsatt eksistere. Et slikt tilfelle vil derfor kun resultere i en utflating av trykk og volumstrøm og vil ikke være en feilkilde. På den andre siden kan det ikke utelukkes at en kurve som viser utflating, eller svak trykkoppbygning, kan representere jekking. Dette skyldes at det ikke er kunnskap om hvordan kurvene hadde utviklet seg om de ikke var utsatt for jekking. I dette perspektivet kan metoden påstås å være en usikker med tanke på å oppdage om jekking forekommer, men en sikker metode for å bekrefte at tilfeller som oppdages er jekking.

En svakhet med fremgangsmåten er at brå trykkoppbygning er undersøkt i mindre grad enn gradvis trykkoppbygning. Bakgrunnen er en forestilling om at gradvis trykkreduksjon har større betydning for injeksjonsforløpet og større konsekvenser for injeksjonsresultatet. Konsekvensen av manglende undersøkelser er imidlertid at det er vanskeligere å vurdere eventuelle forskjeller mellom de to fenomenene.

6.2.8 Oppsummering

I den forgående diskusjonen er det påpekt flere forhold som sannsynliggjør at hydraulisk jekking har forekommet. Tykk innfylling i sprekker og klare indikasjoner på at trykkreduksjonene er spenningsavhengig er forhold som taler for jekking. I tillegg er den teoretiske tolkningen av årsak til trykkreduksjon en viktig faktor som taler for at hydraulisk jekking har forekommet.

6.3. Injeksjonsforløp

Trykkutviklingen relativt til volumstrømmen ble undersøkt for 444 injeksjonsforløp. For å gjøre det mulig å sammenligne trykkoppbygningen for et stort antall injeksjonsforløp med andre parametere ble injeksjonsforløpene karakterisert og delt inn i seks kategorier. Disse kategoriene er analysert og sammenlignet med andre parametere. Diskusjon av resultatene følger.

6.3.1 Tetteresultat og injeksjonsforløp

Resultatene fra fuktkartleggingen gir en indikasjon på innlekkasjer over sålen og kan si noe om kvaliteten på injeksjonsarbeidet. Med grunnlag i mengde fuktgjennomslag og drypp ble resultatene fra fuktkartleggingen delt i tre kategorier, se Figur 5.2. Disse tre kategoriene ble sammenlignet med andelen av de ulike typene injeksjonsforløp.

Type 1 skilte seg ut ved å være mer representert i områder med dårlig tetteresultat, se Figur 5.25. Datagrunnlaget er noe usikkert men en forklaring kan være at type 1 representerer bergmasse med tynne sprekker hvor injeksjonsmassen vanskelig trenger inn. Vann kan strømme i langt tynnere sprekker enn industrisement, så selv om injeksjonsmassen ikke trenger inn betyr det ikke at sprekken er vanntett. Dette kan tyde på at tetting av tynne sprekker er vanskeligere enn tetting av åpnere sprekker. Dette er erfart på mange anlegg og har ved flere anledninger ført til at industrisement er byttet med mikrosegment.

6.3.2 Volum injisert og gjennomsnittlig volumstrøm

Fordelingen av type forløp med hensyn til både volum injisert og volumstrømmen viser tydelige sammenhenger, se Figur 5.14 og Figur 5.15. Fra type 1 til type 5 var tendensen gradvis større forbruk og volumstrøm. Den samme tendensen går igjen for gjennomsnittlig volum injisert og gjennomsnittlig volumstrøm for hver enkel type forløp. For volum injisert var også spredningen i verdier økende fra type 1-5. Dvs. at typene med gradvis trykkoppbygning var mer samlet rundt gjennomsnittlig volum, mens typene med brå trykkoppbygning mot slutten viste større spredning i volum injisert.

Det er mange faktorer som har innvirkning på injeksjonsforløpet, men for å forklare en såpass tydelig fordeling er det grunn til å tro at det er enkeltfaktorer som har stor betydning. Viktige faktorer i denne sammenhengen kan være påvirkning av operatørstyring, geologiske faktorer som sprekkegeometri eller metoden i seg selv.

6.3.3 Geologi

Sprekkegeometri og andre geologiske forhold vil åpenbart ha stor innvirkning på injeksjonsforløpet selv om sammenhengen ikke nødvendigvis er så lett målbar.

I en enkeltsprekk er det forventet at trykket skal øke relativt til volumstrømmen avhengig av mengde injisert, dersom sprekkåpningene er mindre enn b_{kritisk} . Ved sprekkåpninger større enn b_{kritisk} vil det ta svært lang tid før trykket bygges opp. Dersom sprekker fylles opp (og ikke utvikler seg videre, eller jekkes) vil det også resultere i en trykkoppbygning uavhengig av sprekketykkelse.

Hull med gradvis trykkoppbygning kommuniserer med sprekker som er tynne nok til at de gir betydelig motstand og fører til at trykket øker ettersom injeksjonsmassen spres. Denne type forløp er betegnet som type 1 og det er naturlig at denne type forløp er assosiert med små volum injisert. I den andre enden av skalaen vil hull som ikke får trykkoppbygning kommunisere med sprekker som er for åpne til at det er friksjon av betydning. Denne type forløp vil være en av forløpene som betegnes av type 5, altså at det ikke blir trykkoppbygning. Denne typen forløp er assosiert med store volum injisert og vil ofte bli stoppet fordi mengdebegrensningene er nådd før sluttrykk.

I mellom disse to ytterpunktene er det mer vagt hvilke mekanismer som spiller inn. Det er imidlertid en tydelig fordeling med økende volum injisert og økende volumstrøm når trykkoppbygningen starter seinere i forløpet også for disse «mellom» typene. En mulig tolkning av hvordan sprekken påvirker type forløp, i et geologisk perspektiv, er presentert under.

Type 1: tynne sprekker som gir betydelig motstand mot spredning av injeksjonsmasse.

Type 2: Noe åpnere sprekker, men med begrenset utholdenhet deretter karakter 1 situasjon.

Type 3: Åpne forhold men også tynnere sprekker. Større åpenrom fylles og trykket øker raskt derfra.

Type 4: Åpne forhold, ubetydelig inntrengning i tynne sprekker etter at åpne rom er fylt.

Type 5: Betegner uregelmessige forløp og forløp hvor det ikke er trykkoppbygning. Forløp hvor det ikke er trykkoppbygning kan skyldes åpne og svært utholdende sprekker.

Type 6: tynne sprekker med stor utholdenhet, deretter mer åpne forhold.

Type 4 skiller seg ut med at trykkoppbygningen er svært brå. Dette til tross for at det ofte er relativt store volum injisert i denne kategorien og at det derfor skulle ventes at trykkoppbygningen på slutten skulle ta noe tid (i dette tilfelle er tid ikke betraktet som tid relativt til total injeksjonstid). Trykkoppbygningen for denne type forløp er til forveksling lik virkningen av å stengte kranene.

Type 6 er ikke mye omtalt i oppgaven. Dette skyldes at det i datagrunnlaget kun er 6 observasjoner og at det derfor ikke er grunnlag for si så mye om denne typen. Forløpet har en karakteristikk som skiller seg klart fra de andre typene.

Sammenligningen mellom type forløp og MWD-data er med på underbygge at type injeksjonsforløp påvirkes av sprekker. Det er spesielt borsynken som viser en sammenheng med hvor tidlig trykkoppbygningen starter. Lav borsynk er assosiert med hardt berg med liten oppsprekking og samsvarte med tidlig trykkoppbygning. Høy borsynk indikerer oppsprukket, mykt berg og samsvarte med sen trykkoppbygning eller mangel på trykkoppbygning.

6.3.4 Hydraulisk jekking vurdert i forhold til injeksjonsforløpene

Det er undersøkt hvorvidt hydraulisk jekking forekommer i injeksjonsforløpene som er studert. Som diskutert i kapittel 6.2. er det er det grunn til å tro at de registrerte trykkreduksjonene relativt til volumstrøm representerer hydraulisk jekking. Trykkreduksjonene vil derfor bli omtalt som jekking fra nå. Videre diskuteres det om hydraulisk jekking kan relateres til de ulike typene injeksjonsforløp som er registrert og hvordan jekking påvirker injeksjonsforløpene.

Den brå typen jekking viser relativt jevn fordeling på rundt 21-24 % for type 1, 3, 4 og 5. For type 2 og 6 er det en noe større andel med jekking i ca. 30 % av forløpene, se Figur 5.19. Som diskutert tidligere er det en tendens til brå type jekking ved lav volumstrøm. Dette stemmer svært godt for type 6 og også for type 2. Det er imidlertid vanskelig å forklare hvorfor type 1 har såpass få tilfeller. Dersom brå type jekking også påvirkes av volum injisert kan det være en del av forklaringen da type 1 har det laveste forbruket. Manglende forståelse av den brå typen jekking gjør det vanskelig å forklare fordelingen.

Andelen injeksjonsforløp med gradvis jekking var lavest for type 1 som hadde jekking i 18% av forløpene. Type 2 og 3 hadde jekking i henholdsvis 46% og 55% av forløpene. Type 4 var nede på 44% mens type 5 hadde høyeste med 60%, se Figur 5.19

En del av forklaring på fordelingen for gradvis jekking kan være at trykkoppbygningen er påvirket nok til at forløpet karakteriseres som en annen type. Et eksempel: et forløp av «type 1» med opptreden av gradvis jekking fører til at trykkoppbygningen kommer senere og resulterer i at forløpet kan bli karakterisert som type 2. Utsettelse av trykkoppbygningen slik at forløp med jekking blir karakterisert som en annen type forløp kan være en grunn til at type 1 har lav andel jekking. Hvorvidt denne effekten påvirker de andre typene er mer usikkert.

En annen forklaring på fordelingen kan være at volum injisert påvirker jekkingen. Det ble antydnet tidligere i diskusjonen at type forløp muligens kan indikere de geologiske forholdene i

bergmassen. I et slikt perspektiv vil det være logisk at type 1 og 2 som er assosiert med tynnere sprekker og mindre inngang har lavere andel jekking. Type 3 vil i et slikt perspektiv beskrive mer åpne sprekker og større inntrengning. Ved å følge dette resonnementet og samtidig anta at det er en sammenheng mellom volum injisert i en sprekke og jekking, kan dette bidra til en forklaring på hvorfor 3 og 5 har mer jekking. Men hvorfor har da type 4 såpass liten andel jekking? Type fire har betydelig lavere enn type 2. Som diskutert i det foregående kapittelet kan en mulig tolkning av type 4 være at de geologiske forholdene er åpne, og med få tynnere sprekker. Dersom de åpne forholdene er representert av kanaler trenger ikke arealet som trykkeses være stort. Dette vil redusere sjansen for jekking.

Som diskutert tidligere kan variasjon i jekking begrunnes både med variasjon i overdekning og orientering av sprekker. Inntrengning og derfor også sprekkegeometri er også faktorer som kan ha påvirkning på variasjonen. En av de mest grunnleggende faktorene er likevel injeksjonstrykket. I analysen er det tatt utgangspunkt i at sluttrykket beskrevet i bestillingen fra byggherre er fulgt. Det har imidlertid vist seg at det i en del tilfeller avsluttes før sluttrykket er oppnådd. Dette er selvfølgelig tilfellet når mengdebegrensningen er nådd, men kan også skje dersom det er utgang i til nabotunnel. Det kan derfor være en del forløp med stor inngang som ikke har nådd kritisk trykk og derfor heller ikke har tilfeller med jekking. Dette representerer en betydelig feilkilde for forløp med stor inngang.

Både jekking og type forløp er avhengig av trykk og volum. Som det fremgår av diskusjonen over virker de likevel ikke å være særlig avhengige av hverandre.

6.3.5 Operatørvhengighet

Operatøren kan grovt sett styre de to faktorene: trykk og volumstrøm. Maksimalt trykk er bestemt på forhånd. Altså er det operatører som bestemmer volumstrømmen frem til ønsket mottrykk er oppnådd. På grunn av begrenset blandekapasitet på riggen i som brukes i dette prosjektet er det i midlertid en etablert praksis på at det injiseres med maksimalt 23-26 liter i minuttet. Dette medfører at også første fase er relativt sammenlignbar for de tre operatørene som er undersøkt. Det viktigste unntaket er at operatør A virker å være mer oppmerksom på trykkreduksjon og vil legge seg på en lavere volumstrøm dersom han oppdager dette fenomenet. Dette kan resultere i lengre injeksjonstid. Når ønsket mottrykk er oppnådd og mottrykket holdes konstant er volumstrømmen og trykkoppbygningen avhengig av hva som skjer i fjellet. I denne fasen er injeksjonen relativt uavhengig av operatør. Også her er det et unntak når det oppdages trykkfall eller utganger. Mottrykket vil da ofte senkes og hullet settes noen ganger på vent.

De ulike typene forløp er representert oftere for enkelte operatører, se Figur 5.17. Operatør A, som har injisert flest forløp av type 1 og 2, er også den operatøren som har injisert med lavest gjennomsnittsvolum. Operatør B har relativt lik fordeling mellom forløpene av type 1 til 4 og operatør C har størst andel av type 3, 4 og 5. Operatør B og C har injisert omtrent samme gjennomsnittsvolum. Det er altså en tydelig fordeling av type forløp på operatørene.

Områdene som er injisert av den enkelte operatør er presentert i Figur 5.16. Det fremkommer av figuren at operatørene har injisert tilfeldige soner i det aktuelle området og det anses som usannsynlig at fordelingen i Figur 5.17 skyldes geologiske forhold.

Når det gjelder volumstrøm er det operatør A som har den laveste gjennomsnittsverdien, og også det største standardviket. Dette kan støtte inntrykket av at denne operatøren injiserer mest forsiktig. Stort standardavvik kan tyde på at operatøren juster volumstrømmen en del. Operatør C har klart størst gjennomsnittlig volumstrøm og det er også denne operatøren som har flest injeksjoner med trykkoppbygning sent i forløpet.

De ulike operatørene viser ulike profiler med tanke på gjennomsnittlig volumstrøm og ikke minst variasjonen i volumstrømmen. Dette tyder på at operatørene har noe ulik praksis. Fordelingen av type forløp på de ulike operatørene tyder på at type forløp til en viss grad er operatøravhengig.

6.3.6 Hydraulisk jekking og operatøravhengighet

Hydraulisk jekking er også sammenlignet med operatør for å undersøke om operatøren har innvirkning på om jekking inntreffer og på den måten også påvirker injeksjonsforløpet. Gradvis type jekking utgjør 42, 47 og 54 % av forløpene for henholdsvis operatør A, C og B.

Fordelingen samsvarer med spredning i gjennomsnittlig volumstrøm for de tre operatørene. Fra befaringer under injeksjonsarbeidet virker det å være en tendens til at operatører som er mest oppmerksom på trykkoppbygning og styrer injeksjonen ut fra dette samsvarer med standardavviket på gjennomsnittlig volumstrøm. Operatør A, som har størst spredning (standardavvik på 5,5), har lavest andel gradvis jekking. Operatør B, som har minst spredning (standardavvik på 4,6), har størst andel. Når operatører oppdager trykkfall og treg trykkoppbygning setter de noen gang hullet på vent før bestilt volum er oppnådd. Det er derfor trolig ikke spredningen i gjennomsnittlig volumstrøm i seg selv som forklarer fordeling av jekking, men at dette kan indikere mønster i hvor oppmerksom operatøren er på trykkoppbygningen og trykkfall.

Brå type jekking viser langt større sprik i fordeling på operatør. Brå type jekking utgjør 42, 22 og 12 % av forløpene for henholdsvis operatør A, B og C. Det er funnet at både operatør A og brå type jekking er assosiert med lav volumstrøm. At brå jekking ofte forekommer ved lav gjennomsnittlig volumstrøm kan være med på å forklare fordelingen.

6.3.7 Usikkerhet

Ved analyse av injeksjonsarbeid under normal drift ligger det i sakens natur at feilkildene blir mange og sammensatte.

I det aktuelle området må det trekkes frem at bergmassekvaliteten har vært svært ensartet. Bergarten har vært kalkglimmerskifer kun avbrutt av små intrusjoner. De geologiske forholdene på strekningen er beheftet med mindre variasjon enn det normalt kan ventes i de kaledonske skyvedekkene. Det har også vært bemerkelsesverdig lite endringer i injeksjonsprosedyren.

Det er mange enkeltfaktorer som kan føre til usikkerhet i analysen av type forløp. Noen av større betydning er:

- Bytte av resept
- Hull settes på vent
- Herding av injeksjonsmasse
- Antatt sluttrykk

Utdyping av punktene følger under.

Bytte av resept medfører økt sjanse for trykkoppbygning etter at det er byttet. Byttet skjer vanligvis etter 400 liter, men ettersom trykkoppbygningen vurderes relativt til total injeksjonstid kan bytte av resept inntreffe ulikt i forskjellig forløp og i korte forløp vil det ikke skiftes resept idet hele tatt. Dette er en betydelig feilkilde

Hullet settes på vent. Vanligvis skjer dette etter ca. 1000 liter dersom det ikke er oppnådd mottrykk. I andre tilfeller kan det skje dersom det er utgang mot nabetunnel eller i dagen. Det kan også skyldes at operatøren oppdager tydelige trykkreduksjoner. Når hullet settes på vent vil ikke tiden hullet står på vent bli tatt med. Injeksjonsmassen vil herde ettersom tiden går og det er ventet at trykkoppbygningen går raskere etter at hullet har stått på vent. Dette vurderes som en betydelig feilkilde.

Herding av sementen vil i stor grad være tidsavhengig. Når sementen begynner å herde vil inntrengningsevnen bli dårligere og det er større sannsynlighet for at trykket vil stige. Når herdingen er tidsavhengig og volum injisert er tidsavhengig kan det ventes at dette er en kilde

til mistolkning av trykkoppbygning. Dette medfører at forløpene, med en viss systematikk, kan ha blitt vurdert ut fra forhold som skyldes materialeegenskaper.

I analysen er det tatt utgangspunkt i at sluttrykket som er bestilt av byggherre er fulgt. Det er ikke alltid sluttrykk oppnås. Tre eksempler på det er: begrensning i mengde når før sluttrykket, injeksjonen avsluttes pga. utgang og injeksjonen avsluttes på med lavere trykk fordi det er registrert tydelige trykkreduksjoner.

6.3.8 Usikkerhet i metoden

Å sammenligne sammensatte kurveforløp med andre parametere representert av enkle tallverdier er utfordrende. At kurveforløpene representerer et så sammensatt og uryddig tema som injeksjon gjør ikke oppgaven enklere. For å analysere ulike typer trykkoppbygning opp mot andre parametere ble det gjort grove forenklinger. Hovedtrenden i trykkoppbygningen ble karakterisert i seks forløp. Trykkreduksjoner ble registrert for seg i en egen analyse. Andre detaljer ble utelatt. Med en såpass forenklet tilnærming er det nærliggende å stille spørsmål om metoden er i stand til å beskrive injeksjonsforholdet tilstrekkelig nøyaktig til at det kan ses sammenhenger med andre parametere. Resultatene fra sammenligninger med andre parametere gir en tydelig indikasjon på at metoden fanger opp forhold som har betydning for injeksjonsprosessen. Dette gjelder både sammenligning med injeksjonsparameter, diskutert i dette kapitlet, men også med sammenligningen med geologiske parametere diskutert i kapittel 6.5.

Fordelingen av type forløp med hensyn til både volum injisert og volumstrømmen viser tydelige sammenhenger. Mulige forklaringer på dette er beskrevet tidligere i kapitlet. Det kan også stilles spørsmål ved om metoden i seg selv påvirker sammenheng mellom volum injisert og type forløp og at metoden på den måten er selvoppfyllende. Det er naturlig at pumpetiden vil være sterkt relatert til mengde injisert, slik at injeksjonsforløp med stor inngang kan forventes å ha lengre pumpetid enn forløp med liten inngang. Type forløp blir bestemt ut fra når i injeksjonsforløpet trykkoppbygningen starter. Som diskutert i kapittel 6.3.3 er det grunn til å tro at geologiske faktorer spiller en nøkkelrolle i når og hvor raskt trykkoppbygningen skjer. Det vurderes derfor at metoden i seg selv ikke er bakgrunnen for sammenhengene som er funnet.

Den største svakheten med metoden er kanskje at samme type forløp kan beskrive ulike fenomen. Siden type forløp blir bestemt ut fra når i tidsforløpet (relativt til total injeksjonstid) trykkoppbygningen skjer vil en injeksjon med kort pumpetid og en injeksjon med lang pumpetid bli vurdert som samme type om trykkoppbygningen startet halvveis i løpet. I et

geologisk perspektiv vil dette bety at samme type forløp kan beskrive en formasjon som kan ta mye injeksjonsmasse uten at trykket påvirkes likt som en formasjon som tar lite injeksjonsmasse før trykkoppbygning. Dette betyr at metoden ikke nødvendigvis skiller mellom to formasjoner som kan være ulike.

Resultatene fra analysen for Bodøtunnelen viser imidlertid tydelig sammenheng med både type forløp, volum injisert og gjennomsnittlig volumstrøm. Dette tyder ikke på at tolkning av ulike geologiske forhold er karakterisert innenfor samme type forløp. Hvordan denne effekten vil utarte seg for andre prosjekter er uvisst. Dette er en feilkilde som gjør at sammenligning av resultater fra ulike anlegg kan være usikker.

I en del grensetilfeller kan fastsettelse av type forløp være preget av subjektive vurderinger. Dette kan føre til at to personer kan karakterisere type forløp ulikt. På den andre siden vil denne problematikken først og fremst være forbundet med grensetilfeller og vil antakelig ikke føre til at forløp blir flyttet mer enn én kategori fra den som er riktig.

6.3.9 Oppsummering

Til tross for grove forenklinger ved karakteristikken av injeksjonsforløpene og store usikkerheter forbundet med metoden viser resultatene fra analysen sammenhenger som kan tyde på at metoden kan benyttes for å vurdere injeksjonsforløpet mot andre parametere.

Volum injisert og gjennomsnittlig volumstrømmen viser, ikke uventet, tydelig fordelingen for de ulike typene forløp. Denne sammenhengen er forventet ut fra teoretiske betraktninger av hvordan geologiske forhold vil virke inn på både forbruk og trykkutvikling.

Mer uventet var det at operatørvhengigheten tredde så tydelig frem. Resultater fra analysen samsvarer med inntrykket av fremgangsmåten for de tre operatørene etter befaringer under injeksjonsarbeidet.

At forløp type 1 viste sammenheng med dårlig tetteresultat er interessant. Dette er en indikasjon på at bergmasse med tynne sprekker kan være vanskelig å tette med industrisement. Dette har også tidligere prosjekter erfart.

6.4. Geologi

Det er samlet geologisk data for å undersøke om det er målbare sammenhenger med injeksjon. De geologiske parameterne er også vurdert mot hverandre for å se om parameterne er avhengige og for å forstå de geologiske forholdene bedre.

De geologiske forholdene har vært relativt ensartet på strekningen som er studert. RQD-verdiene ligger jevnt mellom 75 og 90. Det virker imidlertid å være et skille etter søkket ved profil 1830, hvor injeksjonen startet. Etter denne profilen har det vært injisert sammenhengende for 21 skjærmer med unntak av to korte stopp. Før profil 1830 er det mindre vann. Figur 5.3 viser en oversikt over overdekning og innlekkasje og illustrer situasjonen. Hvilke faktorer som er årsak til endringen er uklart, men det er en tendens til at sprekkesett S2 er mer representert. Det er ikke funnet korrelasjon mellom de geologiske parameterne.

6.5. Sammenheng mellom geologi og injeksjon

For at det skal være en målbar sammenheng er det avgjørende at de geologiske parameterne representerer forhold som kan relateres til injeksjonsparameterne. Dersom det registreres korrelasjon mellom geologi og injeksjonsparametere kan det sannsynliggjøre at den geologiske parameteren representerer forhold som er av betydning. Dersom det ikke er sammenheng er det mindre trolig at den geologiske parameteren representerer forhold av stor betydning.

Det ble undersøkt om det er målbare sammenhenger mellom injeksjon og geologisk data for noen av parameterne som er samlet. De kvantitative geologiske parameterne (RQD, overdekning, innlekkasje fra sonderboring og de tre MWD parameteren) ble sammenlignet med volum injisert og gjennomsnittlig volumstrøm. I tillegg ble overdekning plottet mot gradvis trykkreduksjon og borsynk ble sammenlignet med type forløp. De to siste sammenligningene er diskutert henholdsvis i kapittel 6.2.4 og 6.3.3.

6.5.1 Sammenhenger med volum og gjennomsnittlig volumstrømning

Volum injisert er målt både som liter pr. meter tunnel og liter pr. m borehull. For begge målemetodene er teoretisk hullfyll trukket fra. Volum injisert pr. m tunnel tar ikke hensyn til hvor mange injeksjonshull som er brukt. Ved å måle liter pr. m borehull tar du hensyn til antall injeksjonshull. Hva som er mest korrekt avhenger av hvordan borehullene kommuniserer med hverandre.

Borsynken gav korrelasjonskoeffisient 0,55 og 0,50 ved sammenligning med henholdsvis liter pr. m borehull og liter pr. m tunnel. Høy borsynk assosieres med mykt fjell og oppsprekking. Dette tyder på at det kan være en målbar sammenheng mellom oppsprekking og forbruk i denne bergmassen.

Tolket vann viste også korrelasjon med volum injisert. Korrelasjonskoeffisient var 0,40 og 0,53 ved sammenligning med henholdsvis liter pr. m borehull og liter pr. m tunnel. Store og raske

variasjoner i spylemengde kan inntreffe når det bores inn i en sleppe som er vannførende. Tolket vann kan derfor gi indikasjoner på oppsprekking når sleppene er vannførende.

RQD-verdiene viste derimot ingen korrelasjon med forbruk. Grunnen til at borsynk viste korrelasjon mens RQD ikke gjorde det er uklart. RQD er verdi på oppsprekking som skiller definitivt mellom hva som er en sprekk og ikke. I det aktuelle området med vekslende lag med variasjon i mineralisering, mineralinnfylling i sprekker og foliert berg kan bestemmelse av hva som er en sprekk være usikker. Sprekker med liten betydning for spredning av injeksjonsmasse blir også vektlagt like mye som mer åpne sprekker. Sett fra et bergmekanisk perspektiv vil borsynken i større grad representere en mer differensiert verdi på svake soner og hvor oppsprukket berget er.

Sammenligning mellom innlekkasje og forbruk viser ingen korrelasjon. Innlekkasjemålingene sier hvor mange liter vann som kommer ut fra soner. Verdiene fra de fire soner er sammenlignet med volum injisert for samtlige injeksjonshull. At de fire soner ikke er representative for kan bidra til en viss usikkerhet i sammenligningen. Likevel er det nok andre faktorer som spiller en større rolle. Forbruk av injeksjonsmasse kan forenklet sies å være avhengig av hvor mange, hvor vide og hvor utholdende sprekke er. Dette er også faktorer som beskriver en bergmasse med stor hydraulisk konduktivitet, men om disse sprekke ikke har god kommunikasjon med et reservoar vil det heller ikke strømme mye vann. Innlekkasje trenger derfor ikke å ha noen god korrelasjon med forbruk.

6.5.2 Usikkerhet

Korrelasjonsanalysen av injeksjonsdata og geologiske data er avhengig av at parameterne som er samlet representerer forhold som har betydning for injeksjonsarbeidet. Det er også avgjørende at de enkelte parameterne er samlet på en måte slik at verdiene i datasettene er korrekte. Dette er omtalt i kapittelet om datainnsamling.

Representerer for eksempel RQD verdien egenskaper med bergmassen som har nok innvirkning på injeksjonsarbeidet til at variasjoner er målbar. For at det skal kunne finnes korrelasjon fordrer det også at injeksjonsdataen er relevant for sammenligningen.

Datagrunnlaget for MWD-data er tynnere enn for de andre parameterne. Resultatene fra disse analysene er derfor forbundet med større usikkerhet.

6.5.3 Oppsummering

Sammenheng mellom borsynk og karakteristikk tyder på at borsynken responderer på forhold som har betydning for injeksjonsforløpet. Borsynken synes også ha en viss sammenheng med

volum injisert. Borsynk vurderes derfor som en parameter som kan settes i sammenheng med injeksjon.

6.6. Resultatenes betydning for videre driving av Bodøtunnelen

I den foregående diskusjonen er hydraulisk jekking, injeksjonsforløp og sammenheng mellom geologi og injeksjon vurdert. Under presenteres noen refleksjoner om hvilke nytte eller potensiale for nytte, resultatene fra analysen kan ha for videre driving av Bodøtunnelen

Kunnskap om kritisk trykk kan gi bedre grunnlag for å bestemme stoppkriterier og kan føre til reduksjon i forbruk og tid. Kunnskap om kritisk trykk kan også være nyttig når drivingen nærmer seg mer bebygde områder og kan gi bedre grunnlag for å bestemme utførelse av forsiktig injeksjon. Dette kan forbygge skader på infrastruktur og er potensielt viktig informasjon for sikker injeksjon.

Økt forståelse av injeksjonsforløp kan gjøre det mulig å tolke geologiske forhold med betydning for injeksjonsarbeidet mens injeksjonen pågår. Ved fortløpende tolkning av injeksjonsforløpet kan det da tenkes at injeksjonsprosedyren kan tilpasses forholdene slik at bedre kvalitet oppnås. Eksempelvis kan det ved forhold som indikerer tette sprekker byttes til injeksjonsmasse med bedre inntrengningsevne. Det er midlertid noe begrenset datagrunnlag for at dette skal ha noen nytteverdi på Bodøtunnelen.

Den klare indikasjonen på at injeksjonsforløpet er operatørvhengig er ikke særlig nyttig i seg selv. Ut fra datagrunnlaget som foreligger er det ikke vist at de ulike operatørene oppnår forskjellig tetteresultat. Ytterligere kartlegging av tetteresultater for de ulike operatørene og studie av forskjeller i utførelse kan imidlertid gi grunnlag for endringer av retningslinjer for injeksjonsarbeidet. I så måte kan kunnskap om operatørvhengighet være en nyttig erkjennelse.

Av de geologiske parameterne viste borsynk størst korrelasjon til injeksjonsparametere. Denne parameteren viser korrelasjon med volum injisert og også type forløp. Borsynken kan derfor gi indikasjoner på hvor tids- og materialkrevende injeksjonsskjermen vil bli.

7. Avsluttende kommentarer

Det er undersøkt hvorvidt hydraulisk jekking har forekommet for injeksjonsforløpene som er analysert. Slutninger fra analysen:

- Det konkluderes med at hydraulisk jekking har forekommet for alle skjermene i studiet. Det er registrert trykkreduksjoner relativt til volumstrøm.
- Trykkreduksjonen er for de fleste tilfeller initiert for trykk over 35-40 bar ved overdekning mellom 30-40 meter. Dette trykket vurderes som kritisk trykk.

Injeksjonsforløpene er analysert med fokus på utvikling av trykk relativt til strømning. Slutninger fra analysen:

- Volum injisert og gjennomsnittlig volumstrøm viser sammenheng med hvor tidlig trykkoppbygningen starter.
- Trykkutviklingen viser betydelig grad av operatørvhengighet.

Sammenheng mellom injeksjon og geologi er undersøkt. Slutninger fra analysen:

- Tidlig trykkoppbygning (forløp type 1) er assosiert med dårlig tetteresultat.
- Borsynken (MWD-parameter) viste også sammenheng med type forløp (trykkutvikling).
- Borsynken (MWD-parameter) viste korrelasjon med volum injisert.

8. Forslag til videre arbeid

Visuell analyse av injeksjonsforløp er tidkrevende, men har på Bodøtunnelen vist seg å gi en del informasjon som kan ha nytteverdi. Med en mer effektiv analyse av injeksjonsforløpene kan det samles et stort erfaringsgrunnlag.

Utarbeide algoritmer for identifisering av kritisk trykk. Dersom man kan sortere ut en stor del av injeksjonsforløpene kan det effektivisere arbeidet. Kunnskap om kritisk trykk gir bedre grunnlag for forbedring av injeksjonsprosedyren på et anlegg.

Utarbeide algoritmer for å identifisere ulike injeksjonsforløp. Siden trykk og volumstrøm antas å være proporsjonale kan forholdet mellom disse brukes. Analysen vil da kun trenge å behandle en kurve. Med effektive algoritmer kan et stort datagrunnlag analyseres. Resultater kan sammenlignes med kvalitet på tettearbeidet. Denne sammenhengen kan potensielt gi et grunnlag for å tilpasse injeksjonsprosedyrer etter utviklingen av trykkoppbygning basert på tidligere erfaring.

9. Referanseliste

Bever Control (2012) *Bever Team 3 Brukermanual*. Tilgjengelig fra:

http://bevercontrol.com/english/support/user_guides/ (Hentet: 21.04.2016)

Bever Control (2013) *Bever Team MWD - Analyse av spylevann, varsling av vannforstyrrelse under boring*.

Bever Team Online (2016) Bever Control AS

Carter, T. G., Dershowitz, W., Shuttle, D. og Jefferies, M. (2012) 'Improved methods of design for grouting fractured rock', Grouting and deep mixing (GSP 228). New Orleans: ASCE, s.1472-1483.

Eriksson, M. og Stille, H. (2003) 'A method for measuring and evaluating the penetrability of grouts', Grouting and ground treatment (G 120) 2003. New Orleans ASCE, s.1326-1337.

Fransson, Å., Tsang, C. F., Rutqvist, J. og Gustafson, G. (2010) 'Estimation of deformation and stiffness of fractures close to tunnels using data from single-hole hydraulic testing and grouting', *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 47(6), s. 887-893.

Grøv, E., Funehag, J. og Janson, T. (2014) 'Rock mass grouting in Sweden and Norway A matter of cultural differences or factual causes?', *Geotechnical News*, 32(1), s. 41-51.

Gustafson, G. & Stille, H. (1996) 'Prediction of groutability from grout properties and hydrogeological data', *Tunnelling and Underground Space Technology*, 11(3), s. 325-332.

Hafezquran, A. og Esmaelpoor, J. (2012) 'The Study of Lugeon Test Behavior in Low Permeable Rocks and its Performance in Grouting Programs', ISRM Regional Symposium-7th Asian Rock Mechanics Symposium, International Society for Rock Mechanics.

Hernqvist, L., Butrón, C., Åsa, F., Gunnar, G. og Johan, F. (2012) 'A hard rock tunnel case study: Characterization of the water-bearing fracture system for tunnel grouting', *Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research*, 30, s. 132-144.

Hognestad, H. O., Fagermo, J. I., Kveen, A., Backer, L., Grøv, E., Frogner, E. og Aarset, A. (2010) *Håndbok nr. 6; Praktisk berginjeksjon for underjordsanlegg*. Sandvika: Norsk Forening for Fjellsprenningsteknikk (NFF).

Holmøy, K. H. (2008) *Significance of geological parameters for predicting waterleakage in hard rock tunnels*. PhD avhandling. Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU), Trondheim

- Holmøy, K. H. og Nilsen, B. (2014) 'Significance of Geological Parameters for Predicting Water Inflow in Hard Rock Tunnels', *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 47(3), s. 853-868.
- Hässler, L. (1991) *Grouting of rock : simulation and classification*. PhDavhandling. Royal Institute of Technology (KTH), Stocholm
- Klüver, B. H. og Kveen, A. (2004) *Berginjeksjon i praksis*. Publikasjon nr. 104. Oslo: Vegdirektoratet.
- Lombardi, G. og Deere, D. (1993) 'Grouting design and control using the GIN principle', *International water power og dam construction*, 45(6), s. 15-22.
- Mazurek, M., Bossart, P. og Eliasson, T. (1996) 'Classification and characterisation of water-conducting features at Äspö: results of investigations on the outcrop scale'. Report ICR, 97-01. Stocholm: SKB *International Cooperation*.
- MS Excel (2013) Microsoft Corporation
- NGI (2013) *Using the Q-system : Rock mass classification and support design*. Oslo: NGI.
- NGU (2015a) *Database for geologiske enheter, Bodøgruppen* Tilgjengelig fra: http://aps.ngu.no/pls/utf8/geoenhet_SokiDb.Vis_enhet?p_id=158238&p_spraak=N (Hentet 07.12.2015)
- NGU (2015b) *Berggrunn N50 dekning, 1:50 000* Tilgjengelig fra: <http://geo.ngu.no/kart/berggrunn/> (Hentet: 03.10.2015)
- Nilsen, B. (2014) 'Characteristics of Water Ingress in Norwegian Subsea Tunnels', *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 47(3), 933-945.
- Nilsen, B. og Broch, E. (2012) *Ingeniørgeologi-berg grunnkurskompendium*. Trondheim: Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet.
- Norcem (2015) *Produktdatablad industrisement CEM I 42,5 R* Tilgjengelig fra: <http://www.norcem.no/no/industrisement> (Hentet: 26.05.2016)
- Norkart (2015) *Norge i 3D* Tilgjengelig fra: <http://norgei3d.no/> (Hentet: 14.02.2016)
- Palmstrøm, A. og Stille, H. (2010) *Rock engineering*, London: Thomas Telford.
- Pedersen, K. B. og Iversen, E. (2000) *Erfaringer fra injeksjonsarbeider i Storhaugtunnelen*, Rapport 2126. Oslo: Vegdirektoratet.
- Rafi, J. Y. og Stille, H. (2015) '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.
- Rafi, J. Y. og Stille, H. (2014) 'Control of rock jacking considering spread of grout and grouting pressure', *Tunnelling and Underground Space Technology*, 40, s. 1-15.

Ramberg, I. B., Bryhni, I. og Nøttvedt, A. (red.) (2007) *Landet blir til, Norges geologi. 2. Utg.* Trondheim: Norsk geologisk forening (NGF).

Selmer, O. R. (1981) 'Betraktninger over store vannlekkasjer i dyptliggende tunneler', *Fjellsprengningskonferansen*. Oslo: Norsk Forening for Fjellsprengningsteknikk (NFF), s. 21.1-21.15

Standard Norge (2011) *NS-EN 197-1:2011 Sement - Del 1: Sammensetning, krav og samsvarskriterier for ordinære sementtyper*, Oslo: Standard Norge

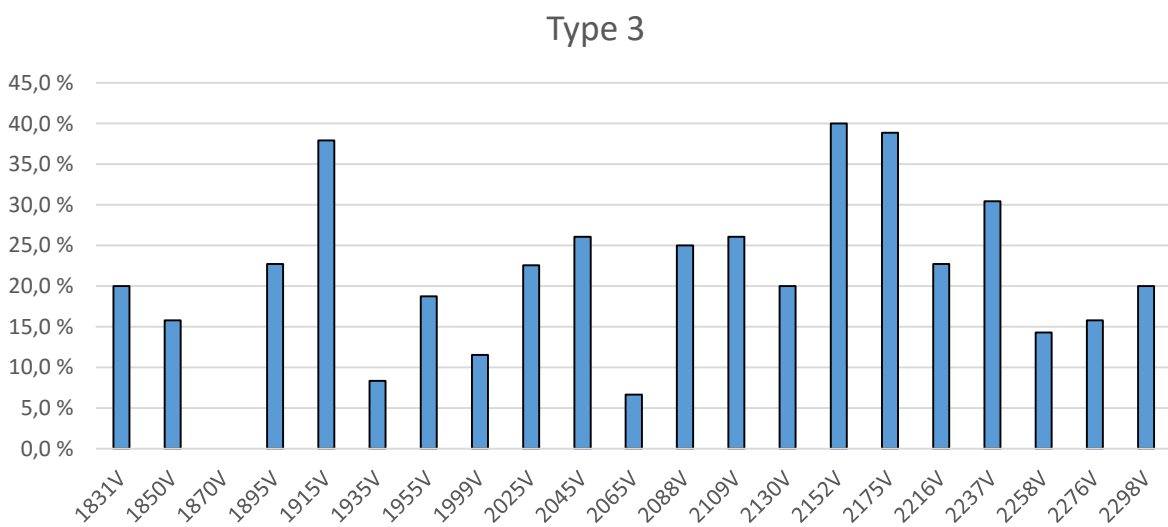
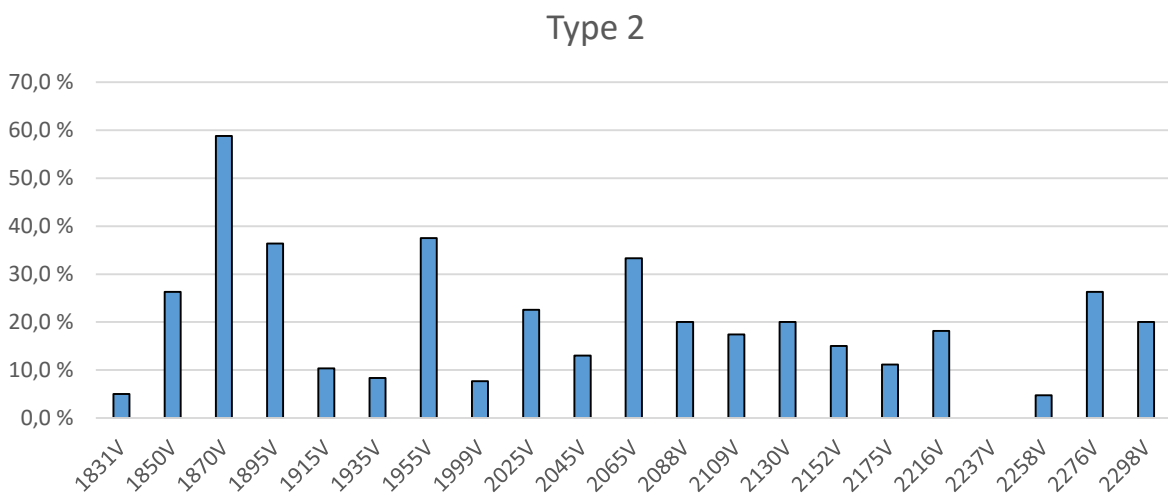
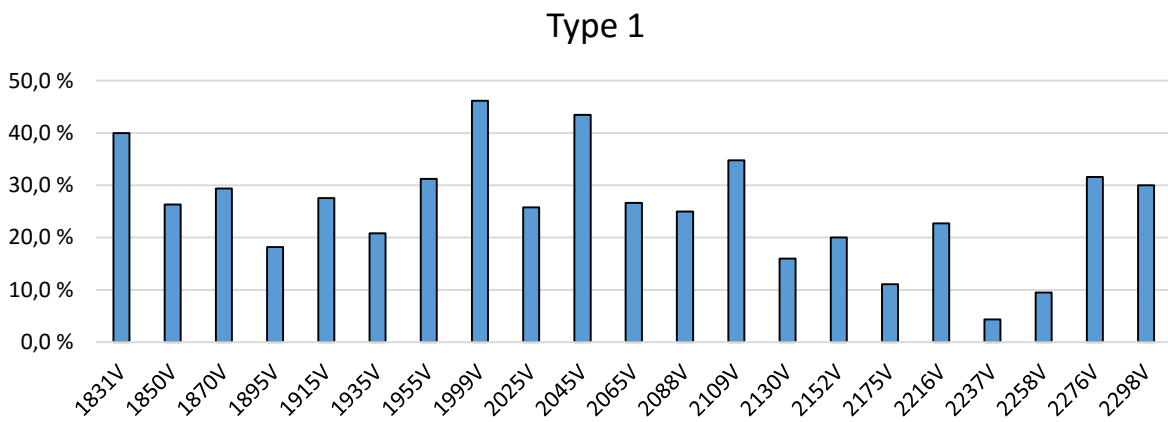
Statens vegvesen (2015) *Håndbok R761; Prosesskode 1; Standard beskrivelse for vegkontrakter*. Oslo: Statens vegvesen.

Stille, H. (2015) *Rock grouting -theories and applications*, Stockholm: BeFo.

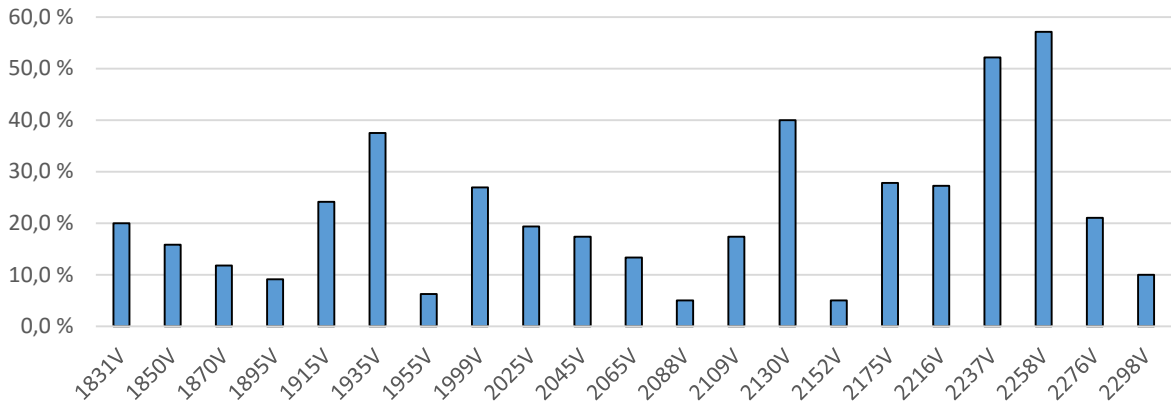
Stille, H., Gustafson, G. og Hassler, L. (2012) 'Application of New Theories and Technology for Grouting of Dams and Foundations on Rock' *Geotechnical and Geological Engineering*. 30(3), s. 603-624.

Strømsvik, H., Holmøy, K. H. og Rise, T. (2015) *State of the art for injeksjon*. Trondheim: SINTEF

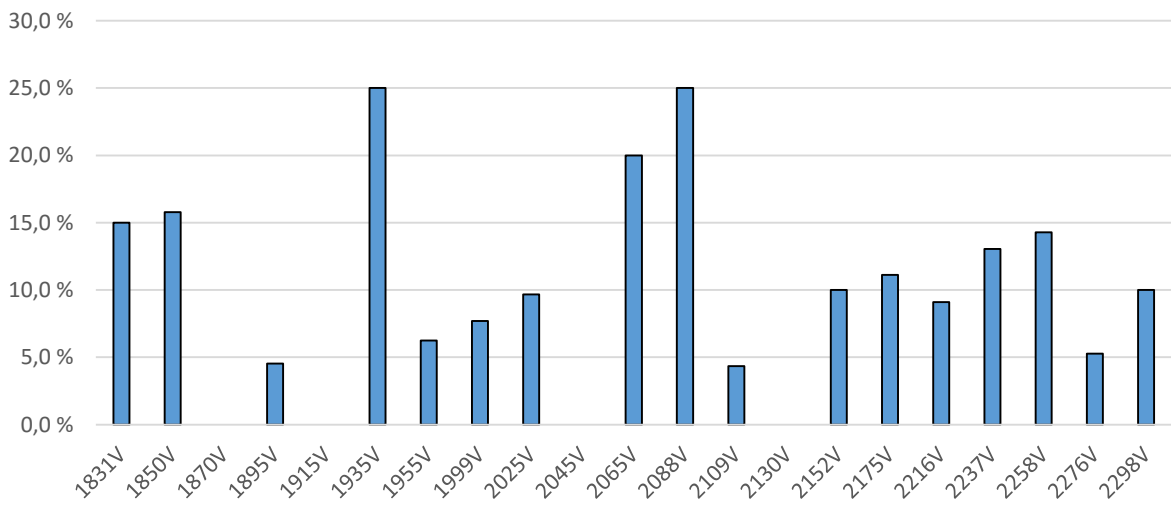
Vedlegg A Andel av de ulike typene for hver skjerm



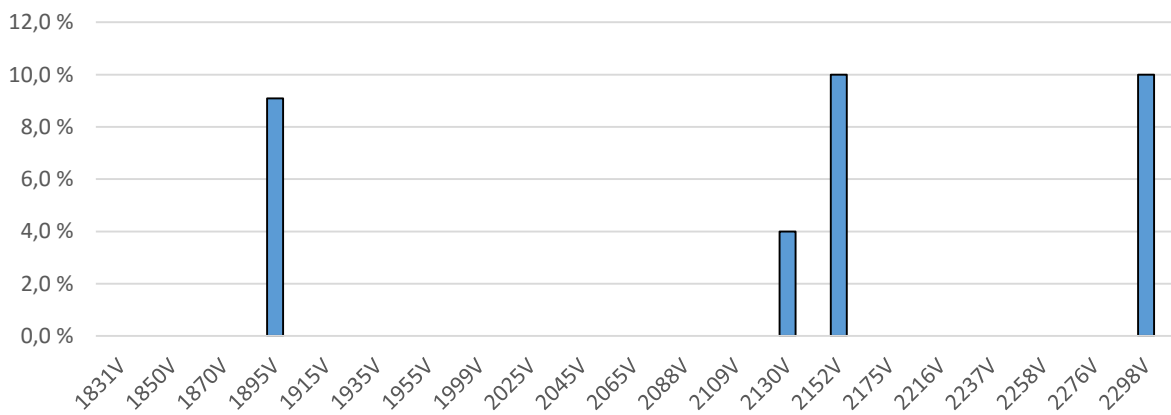
Type 4



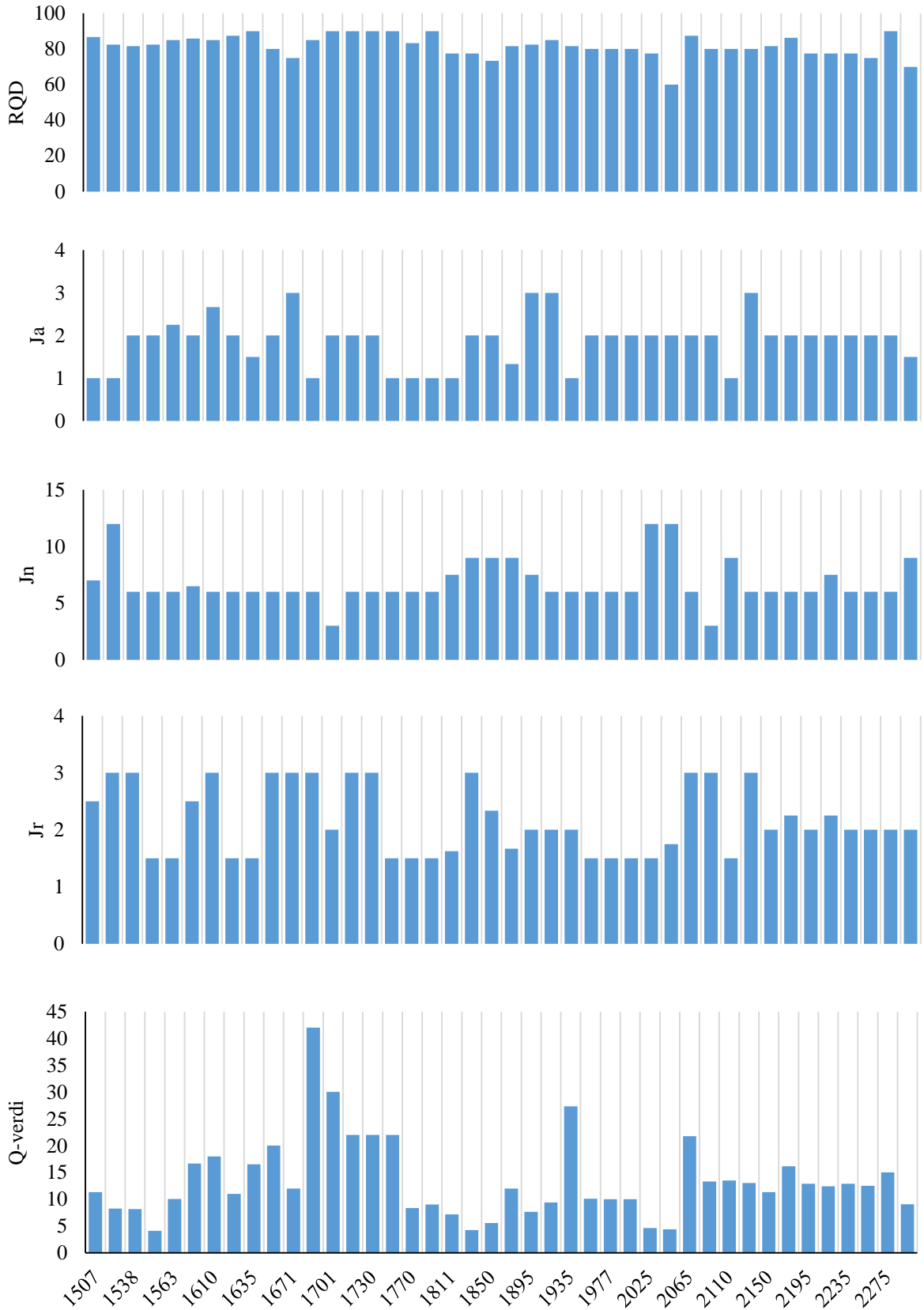
Type 5



Type 6

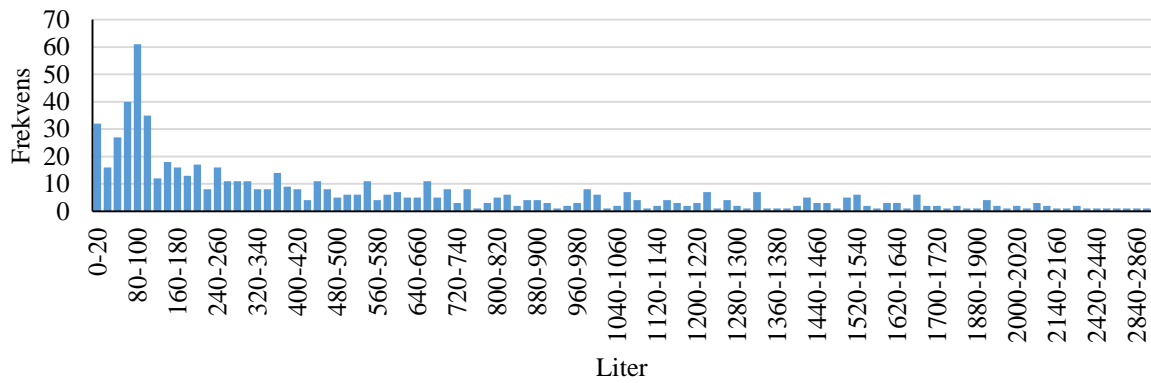


Vedlegg B Q-verdi parameter

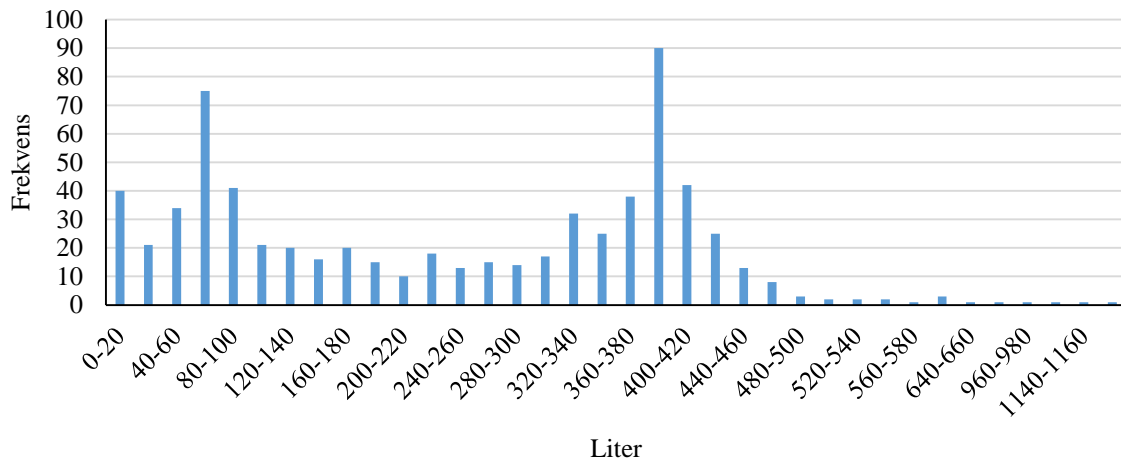


Vedlegg C Frekvensdiagram for forbruk

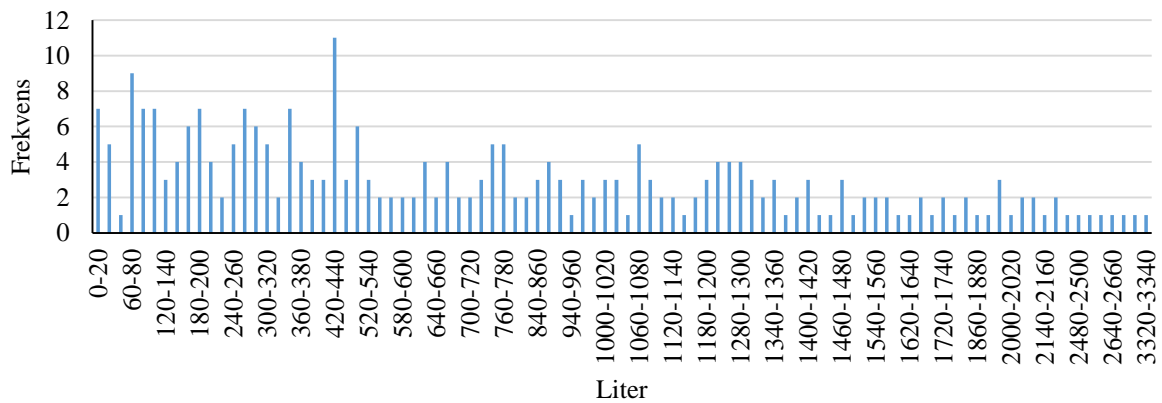
Totalt forbruk per hull



Resept 8



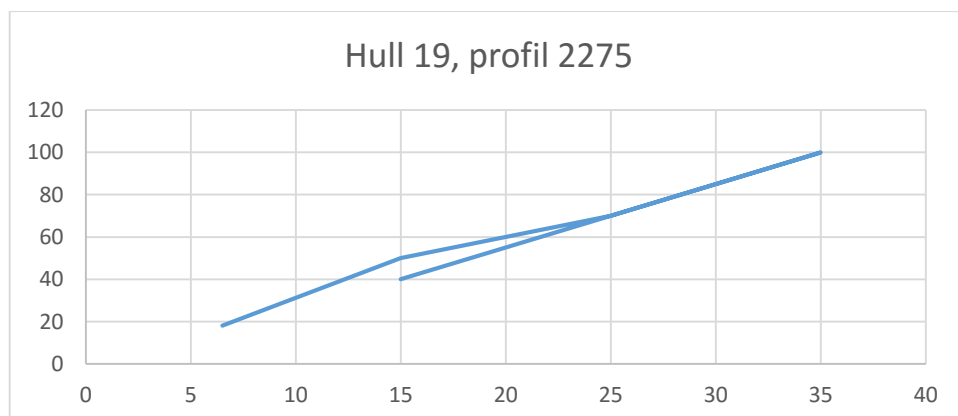
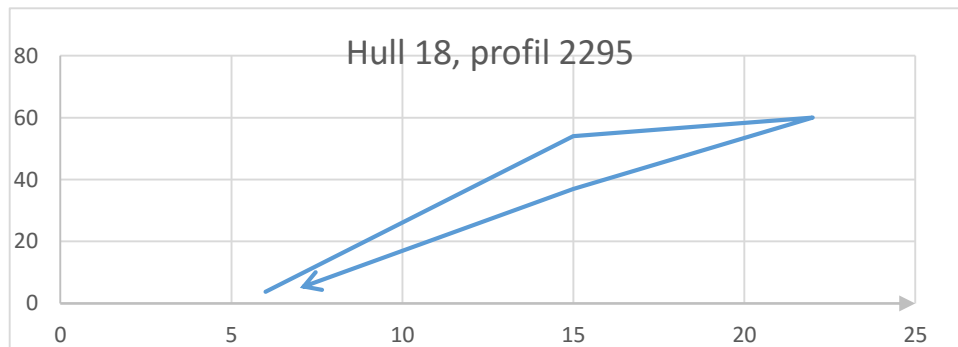
Resept6



Vedlegg D Resultater fra vanntapsmåling

Hull 18, profil 2295		Vannsøyle grunnvann antatt 30 m		
Kommentar	Trykk (bar)	Flow (l/min)	Konduktivitet (m/s)	Lugeon
11 min intervall	6	3,8	9,21162E-08	0,3
	15	54	3,27255E-07	1,2
	22	60	2,29653E-07	1,9
	15	37	2,2423E-07	1,2
	7	5	9,09042E-08	0,4
	6	0		
gjennomsnitt			1,92832E-07	1

Hull 19, profil 2275		Vannsøyle grunnvann antatt 30 m		
Kommentar	Trykk	Flow	K	
Trykk varierte mellom 6 og 7 bar	6,5	18	3,74006E-07	0,35
	15	50	3,03014E-07	1,2
	25	70	2,31392E-07	2,2
Vann ut i nabetunnel	35	100	2,2726E-07	3,2
Kort stopp, på grunn av vann	15	40	2,42411E-07	1,2
gjennomsnitt			2,75617E-07	1,63



Vedlegg E Kart over anlegget

