



Kunnskap for en bedre verden

Undersøkelse av fenomenet hydraulisk  
jekking som følge av sementbasert  
forinjeksjon i Svartåstunnelen,  
vestgående løp på E134 ved Kongsberg,  
Buskerud

**Sondre Wenaas**

Geologi

Innlevert: mai 2018

Hovedveileder: Eivind Grøv, IGP

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Institutt for geovitenskap og petroleum





## Ingeniørgeologi Masteroppgave 60p

<b>Studentens navn:</b>	<u>Sondre Wenaas</u>
<b>Studieretning:</b>	<u>Miljø- og Geoteknologi, ingeniørgeologi</u>
<b>Tittel:</b>	<u>Undersøkelse av fenomenet hydraulisk jekking som følge av sementbasert forinjeksjon i Svartåstunnelen – vestgående løp på E134 ved Kongsberg, Buskerud.</u>
<b>Faglærer:</b>	<u>Prof. II Eivind Grøv</u>
<b>Samarbeidspartner, bedrift el.l:</b>	<u>TIGHT og Statens Vegvesen, Region Sør</u>
<b>Utfyllende tekst for oppgaven:</b>	<p>For å unngå uønskede konsekvenser som følge av lekkasjen av vann inn i tunnelen så er det i Svartåstunnelen på E134 ved Kongsberg fastsatt ulike tetthetskrav. For å nå tetthetskravene er metoden forinjeksjon med sementbaserte materialer brukt for å få en tilstrekkelig tett bergmasse rundt tunnelen. Ved forinjeksjon så kan det bli brukt et høyt injeksjonstrykk, og det er da en mulighet for at fenomenet hydraulisk jekking inntreffer.</p> <p>Oppgaven utføres med en innledende litteraturstudie etterfulgt av en statistisk studie basert på logget data fra injeksjonsriggen og den ingeniørgeologiske kartleggingen.</p> <p>Litteraturstudien består av følgende deler;</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- Vannets opptreden i bergmassen.</li><li>- Ulike tettemetoder for å redusere vannlekkasje inn i en tunnel.</li><li>- Beskrivelse av metoden sementbasert forinjeksjon med hovedvekt på utførelse i norske tunneler</li><li>- Teorier om hydraulisk jekking.</li><li>- Teori om RTGC metoden.</li></ul> <p>Den statistiske studien består av følgende deler;</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- Analysere injeksjonsdata og den ingeniørgeologiske kartleggingen av Svartåstunnelen – vestgående løp med fokus på;</li><li>- Vurdere om hydraulisk jekking har forekommet i bergmassen rundt ulike injeksjonshull basert på trykk/flyt grafen supplert med QP – indeksen.</li><li>- Vurdere om det er noen sammenheng mellom hydraulisk jekking og;<ul style="list-style-type: none"><li>• Injisert volum</li><li>• Injeksjonstid</li><li>• Injeksjonstrykk</li><li>• Bergoverdekning</li></ul></li></ul>

- Bergmassens Q – verdi
- Helningen (fallet) til sprekkesettene
- Sementtype

- Vurdere om hydraulisk jekking er i favorisert i noen deler av injeksjonsskjermen, altså bergmassen rundt hullene i sålen, veggene, hengen eller stoffen.

- Bruke RTGC metoden på 2 injeksjonsforløp for å estimere spredningen til injeksjonsmassen i bergmassen, og diskutere om og hvorvidt spredningen til injeksjonsmassen kunne vært brukt som stoppkriterium.

**Innleveringsfrist:** 15. mai 2018

Grøv Eivind Digitally signed by Grøv Eivind  
DN: cn=Grøv Eivind,  
Date: 2018.05.01 10:03:18  
+0200

---

Faglærer

## Sammendrag

En reduksjon av grunnvannsnivået kan føre til setningsskader på hus og annen infrastruktur, drenering av elver og innsjøer, og skade på den omkringliggende floraen og faunaen. For å forhindre at dette skjer i forbindelse med tunneldriving blir det satt ulike tetthetskrav i tunnelen (maksimalt liter vann / min / 100 m tunnel). For å nå tetthetskravene blir det injisert en masse inn i injeksjonshull (borehull) som går i skjermmønster rundt tunnelperiferien foran stuff. Hensikten er at massen skal trenge inn i og tette de omkringliggende sprekke. Dette vil danne en sammenhengende skjerm foran stuff med redusert hydraulisk konduktivitet. Ved bruk av sementbaserte midler kalles denne metoden for sementbasert forinjeksjon. For å tvinge massen inn i sprekke blir det brukt høyt trykk, opp mot 100 bar. Som en konsekvens kan trykket til massen overstige det initielle normalstresset på sprekken. Når dette skjer utvides sprekkeåpning. Dette fenomenet kalles for hydraulisk jekking.

Svartåstunnelen, en 1,5 km lang veitunnel fra Sellikdalen til Trollerudmoen, er lokalisert om lag 2 km sør for Kongsberg sentrum, i Buskerud. Den består av to tunnellop: øst- og vestgående. Denne oppgaven fokuserer på det vestgående løpet. Sementbasert forinjeksjon med høyt trykk er brukt for å få en tilstrekkelig tett bergmasse rundt tunnelen.

Fra 20 skjermmer er det tolket at hydraulisk jekking har forekommet i de omkringliggende sprekke rundt 273 av 809 injeksjonshull. Hendelsene med hydraulisk jekking er tolket visuelt basert på trykk / flyt grafene, og QP – indeksen (trykk – flyt indeks) fra injeksjonsforløpene. I oppgaven er det vist at hydraulisk jekking fører til økt masse- og tidsforbruk. Ved en økning i 10 % jekkede hull pr. skjerm øker injisert volum med 10'000 l og injeksjonstiden øker med 5 t og 40 min. For skjermene hvor det er brukt et injeksjonstrykk fra 50 – 70 bar, er det en sammenheng mellom bergoverdekning og hydraulisk jekking. Ved en økning i bergoverdekningen på 10 m, så reduseres prosent jekkede hull pr. skjerm med 9 %. Dog bergoverdekning er ca. 10 m større for hullene i sålen, i forhold til hullene i hengen, er det større sannsynlighet for hydraulisk jekking i hullene i sålen i forhold til hullene i hengen.

Teoretisk sett kan spredningslengden til injeksjonsmassen bli brukt som stoppkriterium, og RTGC – metoden (Real Time Grouting Control) er utviklet for å estimere spredningslengden til injeksjonsmassen. Dersom spredningslengden hadde blitt brukt som stoppkriterium hadde det i kun 2 injeksjonshull blitt injisert 490 l mindre injeksjonsmasse og injeksjonstiden hadde vært redusert med 47 min. En slik besparelse ville redusert de totale kostnadene. Det er flere

feilkilder som gjør at den faktiske spredningslengden kan være kortere enn antatt. Ved en for kort spredningslengde er det mulig at bergmassen ikke blir tilstrekkelig tett. For å få en tilstrekkelig tett bergmasse vil kostnadene øke.

## Abstract

A reduction of the groundwater table can lead to subsidence damage to houses and infrastructure, drainage of rivers and lakes, and damage to the surroundings flora and fauna. To prevent this from happening due to tunnel excavation there are different density requirements in the tunnel (maximum litres water / min / 100 m tunnel). To meet the requirements mass are injected into grouting holes (boreholes) that goes in a umbrella pattern around the tunnel periphery in front of the tunnel face. This grouting mass will penetrate and seal the surroundings joints. This will create a coherent umbrella with reduced hydraulic conductivity in front of the tunnel face. If the mass is made out of cement this method is called cementitious grouting. In order to force the mass into the joints, high pressure is used, up to a 100 bar. As a consequence, the pressure in the mass can exceed the initial normal stress on the joints. When this is happening, the joint aperture can dilate. This phenomenon is called hydraulic jacking.

Svartåstunnelen, a 1,5 km long road tunnel from Sellikdalen to Trollerudmoen is located approximately 2 km south of downtown Kongsberg, in the region Buskerud. This tunnel consists of two tunnels, east- and westbound tunnel. This thesis focuses on the westbound tunnel. Cementitious grouting with high pressure is used to get a sufficient tight rockmass around the tunnel.

From 20 grouting umbrellas there are visually interpreted from the pressure / flow graph and QP – index (pressure – flow index) that hydraulic jacking has occurred in 273 out of 809 grouting holes. It is shown in this thesis that hydraulic jacking leads to increased mass- and time consumption. With an increase of 10 % jacked holes per umbrella, injected volume increase with 10'000 l, and the injection time increases with 5 h and 40 min. There is a relation between overburden and hydraulic jacking in the umbrellas where there have been used a grouting pressure between 50 – 70 bar. With an increase of the overburden of 10 m, the reduction of jacked holes pr. umbrella will be reduced with 9 %. Although the overburden is approximately 10 m higher in the grouting holes in the invert compared to the grouting holes in the top heading there is higher probability for hydraulic jacking to occur in the grouting holes in the invert compared to the grouting holes in the top heading.

Theoretically the penetration length of the grout mass can be used as a stop criterion, and the RTGC method (Real Time Grouting Control) is developed to estimate the penetration length to the grouting mass. It is show in this thesis from only 2 grouting holes that the total

consumption would have been reduced with 490 l of grouting mass, and that the grouting time had been reduced with 47 min if the penetration length had been used as a stop criterion. This would have reduced the total cost of the project. Numerous errors could have had an impact on the result, meaning that the actual penetration length could be shorter than what is estimated. With a too short penetration length there is a chance that the rockmass will not be sufficiently tight. The total cost will increase to get a sufficiently tight rockmass.



## Forord

Denne oppgaven er skrevet som avslutning på masterprogrammet Geologi realfag, retning Miljø- og geoteknologi ved institutt for geovitenskap og petroleum (IGP) ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU). Oppgaven er skrevet studieåret 2017 / 2018.

Først vil jeg rette en stor takk til hovedveileder Eivind Grøv for gode og nyttige tilbakemeldinger, og for alltid å ha god tid til veiledning.

Takk til Jone Strømsvåg ved Statens Vegvesen, Region Sør for å ha ordnet det praktiske slik at det var mulig å skrive oppgaven. Takk til medveileder Semere Solomon ved Statens Vegvesen, Region Sør for gode tilbakemeldinger, tilgang til etterspurt data og for lærerike dager i forbindelse med feltarbeidet. Takk til Statens Vegvesen, Region Øst for tilgang til kontor plass i Lillehammer høsten 2017. Takk til Statens Vegvesen for tilgang til data, muligheten til å skrive oppgaven og for økonomiske midler.

Takk til Bjørn Olsen og Mads Gjerdingen ved Implenia Norge AS for å ha besvart relevante spørsmål om studieområdet, fremdriften, injeksjonsarbeidet og for tilgang til injeksjonsdata. Takk til arbeiderene ved Implenia Norge AS for lærerikt og spennende feltarbeid.

Takk til Bahman Bohloli ved NGI for informasjon om sementenes reologiske egenskaper. Takk til Bever Control AS for tilgang til programvaren Bever Team 3. Takk til medstudent Eivind Moe for hjelp til å plote QP – indeksen. Takk til Medstudent Martin Hovda Haugsand for hjelp med RTGC metoden. Takk til Håkan Stile ved KTH Royal institute of technology in Stockholm for å besvare spørsmål om RTGC metoden.

Avslutningsvis vil jeg takke Tove Baugerød, Dagfinn Heie, Anders Wenaas og Guro Rue Johnsen for å ha korrekturlest oppgaven.

Trondheim 09.05.2018

---

Sondre Wenaas



# Innholdsfortegnelse

Sammendrag.....	v
Abstract .....	vii
Forord .....	ix
Innholdsfortegnelse .....	xi
Figurliste.....	xiii
Tabelliste .....	xvii
1 Innledning.....	1
1.1 Mål for oppgaven.....	2
1.2 Studieområdet .....	3
1.3 Begrensninger .....	4
1.4 Feltarbeid .....	5
1.5 Oppbygning av oppgaven.....	5
2 Teori .....	7
2.1 Vann i berg .....	7
2.2 Tettemetoder for å redusere vannlekkasje i en tunnel .....	14
2.3 Sementbasert forinjeksjon .....	19
2.4 Q – systemet .....	35
2.5 Fenomenet hydraulisk jekking.....	36
2.6 RTGC metoden.....	51
3 Studieområdet – Svartåstunnelen i Kongsberg .....	57
3.1 Regionalgeologi .....	59
3.2 Ingeniørgeologiske beskrivelse av Svartåstunnelen .....	60
3.3 Injeksjonsprosedyre i det vestgående løpet .....	70
4 Metode.....	75
4.1 Databehandling .....	75
4.2 Analyserte injeksjonsskjermer.....	75
4.3 Tolkning av QP – indeksen .....	78
4.4 Statistisk analyse.....	81
4.5 Notert data for å utføre analysen .....	82
4.6 Antagelser og modifisering av datasett .....	83
4.7 RTGC - metoden .....	85
5 Resultater.....	93
5.1 Prosent jekkede hull pr. skjerm .....	93

5.2	Injisert volum mot prosent jekkede hull pr. skjerm.....	94
5.3	Injeksjonstid mot prosent jekkede hull pr. skjerm.....	96
5.4	Forskjell i prosent jekkede hull. pr skjerm ved ulike sementer .....	99
5.5	Sammenheng mellom bergoverdekning og prosent jekkede hull pr. skjerm .....	99
5.6	Sammenheng mellom injeksjonstrykk og prosent jekkede hull pr. skjerm.....	100
5.7	Sammenheng mellom bergmassens Q – verdi og prosent jekkede hull pr. skjerm .	106
5.8	Seksjonerte sprekkedomener .....	112
5.9	Sammenheng mellom lokalisering av de enkelte injeksjonshullene og jekking .....	116
5.10	RTGC metoden .....	117
6	Diskusjon.....	123
6.1	Er hendelsene med hydraulisk jekking tolket riktig? .....	123
6.2	Fører hydraulisk jekking til økt injisert volum og tidsforbruk? .....	124
6.3	Forskjell i prosent jekkede hull pr. skjerm ved ulike sementer .....	125
6.4	Sammenheng mellom bergoverdekning / injeksjonstrykk, og prosent jekkede hull pr. skjerm.....	126
6.5	Sammenheng mellom bergmassens Q – verdi og prosent jekkede hull pr. skjerm .	127
6.6	Seksjonerte sprekkedomener .....	130
6.7	Sammenheng mellom lokalisering av de enkelte injeksjonshullene og jekking .....	131
6.8	Vurdere konsekvensene av hydraulisk jekking direkte på anlegget.....	132
6.9	RTGC metoden.....	132
7	Konklusjon .....	137
	Referanseliste .....	i
	Vedlegg .....	vii

## Figurliste

Figur 1.1 Inngang til det østre- og vestre tunnellopet sett fra Sellikdalen. ....	4
Figur 2.1 Hydraulisk konduktivitet for forskjellige bergarter og løsmasser .....	7
Figur 2.2 Vannstrømning i en kanal (1D) .....	8
Figur 2.3 Vannstrømning i en disk (2D) .....	8
Figur 2.4 Oversikt over de storskala, horisontale spenningene i Norge .....	11
Figur 2.5 Prinsipielt oppsett for en lugeon test .....	14
Figur 2.6 Detaljert fremstilling av sandwich strukturen med sprøytebetong og en vanntett membran .....	16
Figur 2.7 Skjematisk oversikt over forinjeksjon og etterinjeksjon i en tunnel .....	17
Figur 2.8 Injeksjonsmassen trenger inn i og tetter de omkringliggende sprekkene til injeksjonshullene .....	19
Figur 2.9 Kostnadene ved forinjeksjons øker med økt tetthetskrav. ....	20
Figur 2.10 Typisk mønster ved systematisk forinjeksjon i en tunnel med lavt tverrsnitt .....	21
Figur 2.11 Overlappende skjermmer med vinkel for å redusere lekkasje .....	22
Figur 2.12 Injeksjonsrekkefølge. Skjermen blir injisert nedenfra og opp.....	23
Figur 2.13 De store partiklene kan blokkene sprekkåpningen, og hindre de mindre sprekkene fra å trenge inn .....	25
Figur 2.14 Kornfordelingskurve for Norcem UF12, BASF Master ROC og Norcem Industrisement.....	26
Figur 2.15 Oppsett av siloene og injeksjonsriggen ved sementbasert forinjeksjon. ....	31
Figur 2.16 Injeksjonsriggen er utstyrt med 2 stk. blandere, 2 stk. agitatorer, 4 stk. injeksjonspumper og 1 stk. datamaskin. ....	31
Figur 2.17 Til injeksjon ble det brukt en pumpe hvor stampelet er Ø85 mm. Ved økt mottrykk synker kapasiteten til injeksjonspumpen. ....	33
Figur 2.18 1: Pakkeren monteres, og festes i hullet. ....	34
Figur 2.19 En 30 cm lang engangspakker. ....	34
Figur 2.20 Injeksjonsstavene er festet til hverandre for å redusere konsekvensene dersom pakkeren løsner i injeksjonshullet. ....	35
Figur 2.21 Trykket til injeksjonsmassen avtar med økt avstand fra injeksjonshullet .....	38
Figur 2.22 Horisontalspenninger før og etter utgraving i en homogen og isotropisk bergmasse .....	39
Figur 2.23 Utvidelse av sprekken når injeksjonstrykket ( $p_g$ ) blir større enn det initielle normalstresset på sprekken ( $p_c$ ). ....	41
Figur 2.24 Når injeksjonstrykket ( $p_g$ ) er større enn det initielle normalstresset ( $p_c$ ) på sprekken så utvides sprekkåpningen markant. ....	42
Figur 2.25 Ved elastisk jekking går sprekken tilbake til sin opprinnelige sprekkåpning ved avlastningen. ....	43
Figur 2.26 En utvidelse av sprekkåpningen kan være ønskelig for at all injeksjonsmassen skal trenge inn i sprekken. ....	45

Figur 2.27 Ved et gitt injisert volum reduseres spredningen til injeksjonsmassen i en sprekk med jekking (b) i forhold til en sprekk uten jekking (a).....	46
Figur 2.28 Ved jekking tar det lengre tid for injeksjonsmassen å nå en gitt radius .....	46
Figur 2.29 Reduksjon av injeksjonstrykket og økning i flyten etter en periode med gradvis trykkreduksjon indikerer at en sprekk er eksponert for hydraulisk jekking (utvidet) .....	48
Figur 2.30 Injeksjonsmassen har fått kontakt med et annet hull .....	49
Figur 2.31 Tolket injeksjonsforløp med hydraulisk jekking ved hjelp av QP – indeksen .....	50
Figur 2.32 Tolket injeksjonsforløp uten hydraulisk jekking med hjelp av QP – indeksen .....	51
Figur 2.33 Sammenligne faktiske forhold mot en indeks for å bestemme om sprekkedimensjonen er i 1D eller 2D .....	54
Figur 2.34 Injeksjonsmassens spredningslengde for en Bingham's væske avhenger blant annet av det effektive injeksjonstrykket. ....	55
Figur 3.1 Lokalisering av Svartåstunnelen med Sellikdalen i nord og Trollerudmoen i Sør... ..	58
Figur 3.2 Bergoverdekningen for vestgående tunnellopet. ....	61
Figur 3.3 Stereonet for strøk (høyre) / fall målingene sprekkene i det vestgående løpet.....	62
Figur 3.4 Inndeling av Svartåstunnelen i 5 seksjoner. ....	64
Figur 3.5 Stereonet for strøk (høyre) / fall målingene for sprekkene fra seksjon 1 .....	65
Figur 3.6 Stereonet for strøk (høyre) / fall målingene for sprekkene fra seksjon 2 .....	66
Figur 3.7 Stereonet for strøk (høyre) / fall målingene for sprekkene fra seksjon 3 .....	66
Figur 3.8 Stereonet for strøk (høyre) / fall målingene for sprekkene fra seksjon 4 .....	67
Figur 3.9 Stereonet for strøk (høyre) / fall målingene for sprekkene fra seksjon 5 .....	68
Figur 3.10 Boreplan for en skjerm med 31 injeksjonshull. ....	71
Figur 3.11 Boreplan for en skjerm med 40 injeksjonshull. ....	72
Figur 3.12 Flowchart for injeksjonsprosedyren som ble brukt i skjerm 6914. ....	74
Figur 4.1 Plasseringen til de 20 analyserte skjermene. ....	77
Figur 4.2 Normalt injeksjonsforløp uten hydraulisk jekking. ....	78
Figur 4.3 Trykkreduksjon og flytøkning før injeksjonshullet er fylt med injeksjonsmasse. ...	79
Figur 4.4 Trykkfall før en kort pause etterfulgt av rask trykkoppbygning etter pausen. ....	80
Figur 4.5 Hendelse tolket som hydraulisk jekking med plutselig trykkfall og flytøkning etter en lengre periode med gradvis trykkoppbygning. ....	80
Figur 4.6 Parametere som inngår i RTGC modellen.....	86
Figur 4.7 Endring av sementoppskrift ila. injeksjonsforløpet oppdages av programmet. ....	87
Figur 4.8 Verdien av $bg2 * w$ ved 1D strømning med RTGC metoden.....	88
Figur 4.9 Programvaren finner $bg2 * w$ og $b_{g,max}$ for 1D, og $bg3$ og $b_{g,max}$ for 2D.....	88
Figur 4.10 Spredningslengden til injeksjonsmassen i 1D og 2D. ....	89
Figur 4.11 Injeksjonsforløpet til hull 14, skjerm 6914.....	90
Figur 4.12 Injeksjonsforløpet til hull 24, skjerm 6914.....	90
Figur 5.1 Prosent jekkede hull i de 20 analyserte skjermene. ....	93
Figur 5.2 Injisert volum [L] og prosent jekkede hull pr skjerm. ....	94
Figur 5.3 Gjennomsnittlige injisert volum i de jekkede og ikke jekkede hull for skjermene fra pel 6530 – 6827. ....	95

Figur 5.4 Gjennomsnittlige injisert volum i de jekkede og ikke jekkede hull for skjermene fra pel 6851 – 7841. ....	96
Figur 5.5 Injeksjonstid [min] og prosent jekkede hull pr. skjerm. ....	97
Figur 5.6 Gjennomsnittlige injeksjonstid [min] i hullene med og uten jekking for skjermene fra pel 6530 – 6827. ....	98
Figur 5.7 Gjennomsnittlige pumpetid [min] i hullene med og uten jekking for skjermene fra pel 6851 – 7841. ....	98
Figur 5.8 Injisert volum [L] mot prosent jekkede hull pr. skjerm for de 20 analyserte skjermene. ....	99
Figur 5.9 Bergoverdekning [m] og prosent jekkede hull pr. skjerm. ....	100
Figur 5.10 Boksploott av injeksjonstrykket som er brukt i de ulike injeksjonshullene i de ulike skjermene. ....	101
Figur 5.11 Injeksjonstrykk [bar] og prosent jekkede hull pr. skjerm. ....	102
Figur 5.12 Bergoverdekning [m] mot prosent jekkede hull pr. skjerm for skjermene hvor det er brukt et injeksjonstrykk på ~55 bar. ....	103
Figur 5.13 Bergoverdekning [m] mot prosent jekkede hull pr. skjerm for skjermene hvor det er brukt et injeksjonstrykk på ..... 104	104
Figur 5.14 Bergoverdekning [m] mot prosent jekkede hull pr. skjerm ved bruk av et injeksjonstrykk på ~84 bar. ....	105
Figur 5.15 Bergoverdekning [m] mot prosent jekkede hull pr. skjerm for skjermene hvor det er brukt et injeksjonstrykk på 50 – 70 bar. ....	106
Figur 5.16 Bergmassens gjennomsnittlige Q – verdi og prosent jekkede hull pr. skjerm. ....	107
Figur 5.17 Bergmassens gjennomsnittlige Q – verdi mot prosent jekkede hull pr. skjerm for 3 skjerner hvor bergoverdekningen er ~30 m og det er brukt et injeksjonstrykk på ~55 bar. ....	108
Figur 5.18 Bergmassens gjennomsnittlige Q – verdi mot prosent jekkede hull pr. skjerm for 3 skjerner hvor bergoverdekningen er ~35 m og det er brukt et injeksjonstrykk på ~63 bar. ....	109
Figur 5.19 Bergmassens gjennomsnittlige Q – verdi mot prosent jekkede hull pr. skjerm for skjermene med en bergoverdekning mellom 30 – 40 m. ....	110
Figur 5.20 Bergmassens gjennomsnittlige RQD mot prosent jekkede hull pr. skjerm for skjermene med en bergoverdekning mellom 30 – 40 m. ....	111
Figur 5.21 Boksploott av prosent jekkede hull i de 5 forskjellige seksjonene. ....	112
Figur 5.22 Stereonet for sprekkene i bergmassen som skjerm 6705 er etablert i. ....	114
Figur 5.23 Stereonet for sprekkene i bergmassen som skjerm 6719 er etablert i. ....	114
Figur 5.24 Stereonet for sprekkene i bergmassen som skjerm 6785 er etablert i. ....	115
Figur 5.25 Stereonet for sprekkene i bergmassen som skjerm 6827 er etablert i. ....	115
Figur 5.26 Prosent jekkede hull i sålen, hengen, veggene og stoffen. ....	117
Figur 5.27 Dimensjonsanalyse av sprekkedimensjonen rundt hull 14, skjerm 6914. ....	118
Figur 5.28 Lineær regresjonslinje for modellsprekken som beskriver summen av sprekkene (bg3) ved 2D sprekkedimensjon i hull 14, skjerm 6914. ....	119

Figur 5.29 Modellsprekken ( $bg_3$ og $bg_2 * w$ ), og største sprekkeåpningen ( $bg_{maks}$ ) for 1D og 2D sprekkedimensjon. ....	119
Figur 5.30 Spredningslengden til injeksjonsmassen fra hull 14, skjerm 6914 ved 1D og 2D sprekkedimensjon. ....	120
Figur 5.31 Dimensjonsanalyse av sprekkedimensjonen rundt hull 24, skjerm 6914. ....	121
Figur 5.32 Lineær regresjonslinje for modellsprekken som beskriver summen av sprekke ( $bg_2 * w$ ) ved 1D sprekkedimensjon i hull 24, skjerm 6914. ....	122
Figur 5.33 Spredningslengden til injeksjonsmassen fra hull 24, skjerm 6914 ved 1D og 2D sprekkedimensjon. ....	122
Figur 7.1 KM 224 som ble brukt som injeksjonsprosedyre for skjerm 6914.....	xiv



## Tabelliste

Tabell 2-1 Maksimalt injeksjonstrykk i heng, vegg og såle avhengig av bergoverdekningen.	24
Tabell 2-2 Partikkelstørrelse for standard injeksjonssement, mikrosement og ultrafin sement. .....	25
Tabell 2-3 Sementene bruker lenger tid på å herde ved lave temperaturer, og kortere tid ved høyere temperaturer. ....	29
Tabell 2-4 Nødvendig injeksjonstrykk (bar) for å ha en konstant flyt på 3 l / min i forskjellige sprekker med ulik sprekkeåpning og sprekkeruheter. ....	39
Tabell 3-1 Grunnvannsnivået i de 4 grunnvannsbrønnene som er lokalisert i nærheten av tunnelen.....	69
Tabell 3-2 Karakteristikk og test resultater for Norcem Industrisement.....	71
Tabell 3-3 Lokaliseringen av de enkelte hullnummerene i skjermene med 31 og 40 injeksjonshull.....	72
Tabell 5-1 Dominerende sprekkesett i de 5 forskjellig sprekkeområdene. ....	113
Tabell 5-2 Prosent jekkede hull i heng, vegg, såle og stuff.....	116
Tabell 7-1 Oversikt over de forskjellige målingene tatt av de 20 tolkede skjermene for det vestgående løpet.....	ix
Tabell 7-2 Gjennomsnittlig injisert i volum og gjennomsnittlig injeksjonstid i hullene med og uten jekking .....	x
Tabell 7-3 Modifisert injisert volum og injeksjonstid til 24 m lange skjermene.....	xi
Tabell 7-4 Hvilke hullnummer i hver skjerm som er i såle, heng, vegg eller stuff.....	xii
Tabell 7-5 Hullene det er tolket hydraulisk jekking i.....	xiii



## 1 Innledning

Lekkasje av vann i en tunnel eller bergrom kan føre til flere utfordringer for det omkringliggende området. En reduksjon av grunnvannsnivået kan føre til setningsskader på hus og annen infrastruktur, drenering av elver og innsjøer, skade på den omkringliggende floraen, og drenering av drikkevanns- og energibrønner. Inni tunnelen kan høyt vanntrykk og lekkasje redusere stabiliteten til bergmassen og vanskeliggjøre arbeidsforholdene for arbeiderne. Totalt sett så kan vannlekkasje gjøre det vanskeligere å gjøre et godt og riktig kostnadsestimat for prosjektet (Holmøy og Nilsen, 2014; Karlsrud et al., 2001).

I Romeriksporten, en 14 km lang jernbanetunnel mellom Oslo og Lillestrøm på Gardermoenbanen, forårsaket vannlekkasje større utfordringer. På grunn av flere forhold som gjorde at lekkasjen ikke ble håndtert på en optimal måte ble Romeriksporten forsinket med flere måneder, budsjettet sprakk med 1,9 milliarder kroner etter dagens kroneverdi, 60 hus fikk vesentlige setningsskader og vannstanden sank i 2 tjern (Mydske et al., 1999; SSB, 2017).

For å få en tett nok bergmasse rundt tunnelen slik at lekkasjen blir redusert så er forinjeksjon en svært vanlig metode å bruke. Ved forinjeksjon injiseres det en masse inn i injeksjonshull (borehull) som går i et skjermmønster rundt tunnelperiferien foran stuff. Hensikten er at massen skal trenge inn i de omkringliggende sprekkene og danne en sammenhengende skjerm. Skjermen fører til redusert hydraulisk konduktivitet til bergmassen rundt tunnelperiferien foran stuff, og bergmassen blir behandlet før tunnelen drives videre (Hognestad og Holter, 2012).

For å tvinge injeksjonsmassen inn i sprekkene kan det være nødvendig å bruke høyt trykk. Det påførte trykket er definert som den drivende kraften bak forinjeksjon (Klüver, 2000). Ved bruk av høyt trykk så er det mulig at trykket til injeksjonsmassen overgår trykket som holder sprekkene sammen. Hvis dette skjer utvides den aktuelle sprekken. Dette fenomenet kalles for hydraulisk jekking. Hydraulisk jekking kan være ønskelig dersom massen har problemer med å trenge inn i sprekkene (Hognestad et al., 2010). Det er hovedsakelig sprekkene med størst sprekkeåpning som utvides, mens de mindre sprekkene blir presset sammen uten å bli lukket. Som en konsekvens av dette kan det være vanskeligere for massen å trenge inn i og tette sprekkene med mindre sprekkeåpning (Stille, 2015). I tillegg kan en utvidelse av en sprekke føre til økt masse- og tidsforbruk på grunn av at tomrommet i den aktuelle sprekken øker (Rafi og Stille, 2015).

Ved å studere trykk/flyt grafen og QP – indeksen (trykk – flyt indeks) av et injeksjonsforløp så er det mulig å vurdere om hydraulisk jekking har forekommet i de omkringliggende sprekkene rundt injeksjonshullet (Strømsvik og Grøv, 2017).

### 1.1 Mål for oppgaven

I denne oppgaven blir det sett på om, og i hvor stor grad, hydraulisk jekking har forekommet i den omkringliggende bergmassen rundt alle injeksjonshullene i flere skjærmer. Hendelsene med hydraulisk jekking blir tolket visuelt fra trykk/flyt grafene og QP – indeksen fra injeksjonsforløpene. Videre blir det sett på om:

- Fører hydraulisk jekking til økt masse- og tidsforbruk?
- Sammenheng mellom hydraulisk jekking og bergoverdekning.
- Sammenheng mellom hydraulisk jekking og injeksjonstrykk.
- Sammenheng mellom hydraulisk jekking og bergmassens Q – verdi (bergmassekvalitet).
- Sammenheng mellom hydraulisk jekking og helningen til sprekkesettene.
- Er det noen forskjell på standard injeksjonssement og mikrosement med tanke på hydraulisk jekking?
- Er det større sannsynlig at hullene i en del av skjærmen (såle, heng, vegg eller stuff) jekkes i forhold til hullene i en annen del av skjærmen?

RTGC metoden (Real Time Grouting Control) er utviklet for å ha kontroll på spredningen til injeksjonsmassen i løpet av injiseringen, og hensikten er å bruke spredningen som stoppkriterium ved å si at injeksjonen er ferdig når massen har spredt seg en viss avstand i en gitt sprekk (Stille, 2015). I denne oppgaven blir RTGC metoden brukt for å vurdere spredningen til injeksjonsmassen fra 2 injeksjonshull. I tillegg blir det vurdert om spredningen til injeksjonsmassen kunne vært brukt som stoppkriterium.

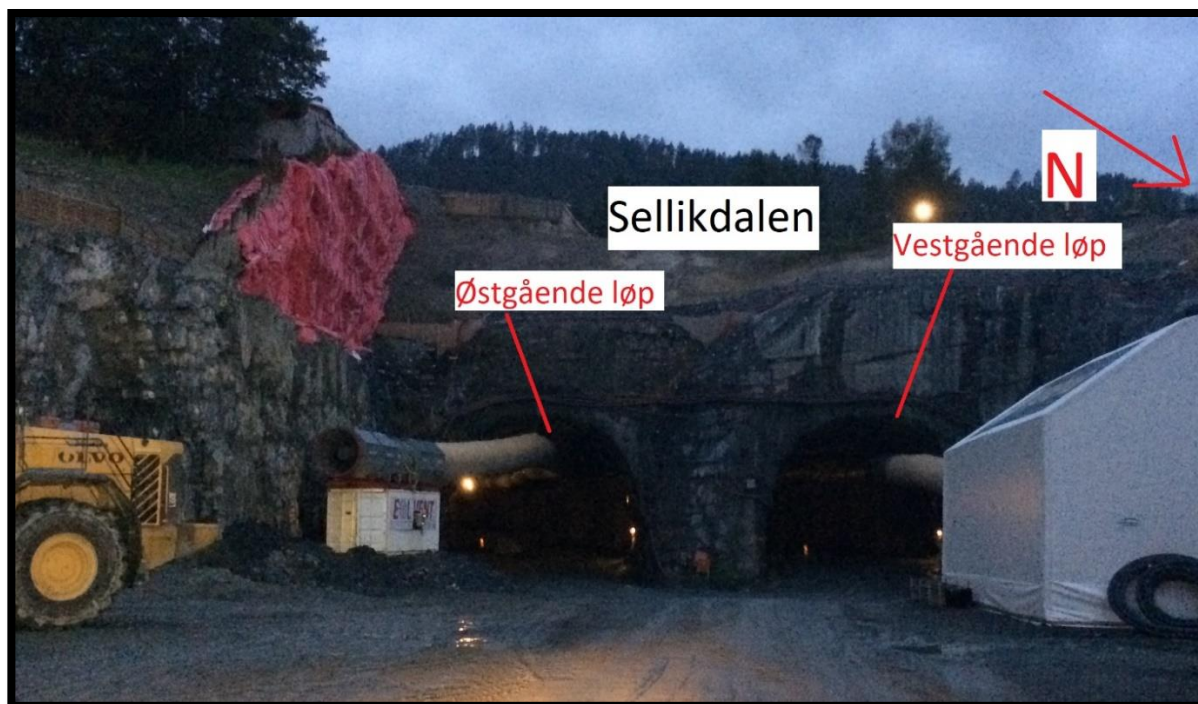
Studieområdet er Svartåstunnelen i Kongsberg, Buskerud hvor Statens Vegvesen er byggherre. Oppgaven er skrevet i samarbeid med Statens Vegvesen, Region Sør og forskningsprosjektet TIGHT (True Improvement In Grouting High pressure Technology for tunnelling).

### 1.2 Studieområdet

Sør for Kongsberg i Buskerud fra Damåsen til Saggrenda bygges det fra våren 2015 til høsten 2019 en 13,2 km lang vei. «Hensikten med prosjektet er å bygge et overordnet vegnett for gjennomgangstrafikk og for trafikk til og fra Kongsberg, etablere et bedre differensiert vegnett og bedre trafiksikkerhet» (Statens Vegvesen, 2017b). Delen av veien vil utgjøre en del av nye E134 (Statens Vegvesen, 2017b).

Veiprojektet er delt inn i 3 hovedstrekninger og 3 delprosjekter. Ved de 3 hovedstrekningene skal det blant annet bygges 3 tunneller; Moanetunnelen, Vollåstunnelen og Svartåstunnelen (Statens Vegvesen, 2016b). Svartåstunnelen som går fra Trollerudmoen til Sellikdalen er valgt som Studieområde (Figur 3.1) (Statens Vegvesen, 2016a). For å forhindre uønskede konsekvenser er det i Svartåstunnelen satt forskjellige tetthetskrav. Sementbasert forinjeksjon er brukt for å nå tetthetskravene (Statens Vegvesen, 2013; Statens Vegvesen, 2017b).

Svartåstunnelen består av 2 stk. T9,5 tunnellop; østgående- og vestgående løp (Statens Vegvesen, 2013). Lengden til hvert enkelt løp er omtrent 1500 m, og begge løpene er drevet fra Sellikdalen og fra Trollerudmoen, totalt 4 stuffer (Figur 1.1). (Statens Vegvesen, 2017c). De første 350 m fra Trollerudmoen lå stoffen i det vestgående løpet ca. 20 – 30 m foran stoffen i det østgående løpet. De siste 680 m fra Trollerudmoen lå stoffen i det østgående foran det vestgående løpet med ca. 30 m. Fra Sellikdalen veksler stoffene på å ligge først med  $\pm 1$  salve. Den 4. oktober 2017 var det gjennomslag i det østgående løpet, og den 12. oktober 2017 var det gjennomslag i det vestgående løpet (Gjerdningen og Implenia, 2018).



*Figur 1.1 Inngang til det østre- og vestre tunnellop sett fra Sellikdalen.*

### 1.3 Begrensninger

Studien tar hovedsakelig for seg hydraulisk jekking i forbindelse med sementbasert forinjeksjon, og bruk av RTGC metoden for å estimere spredningen til injeksjonsmassen. Det er ikke vurdert om hydraulisk jekking har vært positivt eller negativt for få et vellykket resultat med tanke på å redusere lekkasjen og nå tetthetskravet.

I det østgående og vestgående løpet er det etablert 100 skjermmer (Solomon, 2018). Det tar lang tid å analysere 100 skjermmer på grunn av at det er fra 30 – 40 hull pr. skjerm.

Injeksjonsforløpet med trykk/flyt grafen og QP – indeksen blir visuelt tolket fra hvert eneste injeksjonshull. Det er derfor bestemt at oppgaven skal fokusere på det vestgående løpet. Det vestgående løpet krysser flere svakhetssoner, og tunnellopet er hovedsakelig drevet igjennom amfibolittisk gneis med enkelte mindre soner med granittisk gneis (Statens Vegvesen, 2017a). For å redusere usikkerheten til dataene er det valgt å fokusere på de skjermene som er etablert i en så lik bergmasse som mulig. Det er derfor valgt å fokusere på skjermene som er etablert i den amfibolittiske gneisen som ikke krysser en svakhetsone.

### 1.4 Feltarbeid

Berginjeksjon et erfaringsbasert fag (Klüver og Kveen, 2004). Fra fredag 8. til lørdag 9. september ble det utført feltarbeid. Følgende agenda ble satt for arbeid i felt.

- Introduksjon til området og geologien.
- Være med geologen fra Statens Vegvesen for å kartlegge og beregne  $Q$  – verdien for den siste sprengte salven.
- Være med arbeiderene fra entreprenøren for å observere hvordan sementbasert forinjeksjon foregår i praksis. Skjerm 6914 i det vestgående løpet ble observert.
- Observere boring av en injeksjonsskjerm.

I forbindelse med feltarbeidet er det ikke gjort noen forsøk eller tatt noen målinger utover  $Q$  – verdien for den siste sprengte salven. Feltarbeidet var hovedsakelig ment for å gi en introduksjon til området og for å få en praktisk forståelse av sementbasert forinjeksjon.

### 1.5 Oppbygning av oppgaven

Opgaven er bygd opp på følgende måte:

- Kapittel 2 tar for den litteraturstudien med teori av vann i berg, tettemetoder for å redusere vannlekkasje i en tunnel, sementbasert forinjeksjon, hydraulisk jekking og RTGC metoden. I tillegg er grunnleggende teori om  $Q$  – systemet med i dette kapitlet.
- Kapittel 3 gir et overblikk over studieområdet med regionalgeologi, ingeniørgeologisk beskrivelse av området og injeksjonsprosedyre i det vestgående løpet.
- Kapittel 4 tar for seg hvilke og hvordan dataen er samlet inn, behandling av dataene, teori bak de brukte statistiske metodene, teori og beskrivelse av RTGC metoden, og tolkning av hydraulisk jekking fra trykk / flyt grafene og  $QP$  – indeksen.
- Kapittel 5 tar for seg resultatene av den statistiske studien.
- Kapittel 6 tar for seg diskusjon av resultatene
- Avslutningsvis er kapittel 7 satt av til konklusjonen.





## 2 Teori

### 2.1 Vann i berg

#### 2.1.1 Hydraulisk konduktivitet for bergarter

Grunnvann er enten bundet til partiklene i bakken eller strømmer fritt i hulrom og sprekker. For vannlekkasje i en tunnel er det vannet som strømmer fritt i hulrom og sprekker som er av størst betydning. Bergmassen i Norge er generelt tett og grunnvannet er derfor avhengig av diskontinuiteter for å kunne strømme i bergmassen. Men enkelte norske sandsteiner er porøse. I disse sandsteinene kan grunnvannet strømme fritt i porene (Nilsen og Brock, 2009).

Hydraulisk konduktivitet ( $k$  [m/s]) er et mål for hvor lett en væske strømmer gjennom et medium. I en tett og kompakt bergmasse uten diskontinuiteter er bergmassens hydrauliske konduktivitet lav, og grunnvannet strømmer dårlig igjennom bergmassen. Dersom bergmassen kuttet av flere diskontinuiteter er den hydrauliske konduktiviteten høyere, og det strømmer mer vann igjennom berget. Bergmassens hydrauliske konduktivitet kan derfor variere mye over et lite område, selv om bergarten er den samme (Fetter, 2001). Dette er vist i Figur 2.1 ved at den hydrauliske konduktiviteten til for eksempel granitt varierer fra  $10^{-4}$  til  $10^{-10}$  (NGU, 2016).

Jord eller bergartstyper	Hydraulisk konduktivitet (m/s)					
	$10^0$	$10^{-2}$	$10^{-4}$	$10^{-6}$	$10^{-8}$	$10^{-10}$
<b>Jordarter</b>						
Grus		-----				
Grov sand		-----				
Fin sand			-----			
Silt				-----		
Leire					-----	
Mørene (usortert)				-----		
<b>Bergarter</b>						
Sandstein		-----				
Karbonat bergarter/karst	-----					
Skifer					-----	
Porfyr				-----		
Granitt og gneis			-----			

Figur 2.1 Hydraulisk konduktivitet for forskjellige bergarter og løsmasser (NGU, 2016).

***Sprekkeåpningens påvirkning på vannlekkasje.***

Hydraulisk konduktivitet ( $k$  (m/s)) inngår i Darcy's lov som er vist i Formel 2.1.

$Q$  = strømningsmengden ( $m^3/s$ ),  $A$  = tverrsnittet ( $m^2$ ),  $v$  = strømningshastighet (m/s).

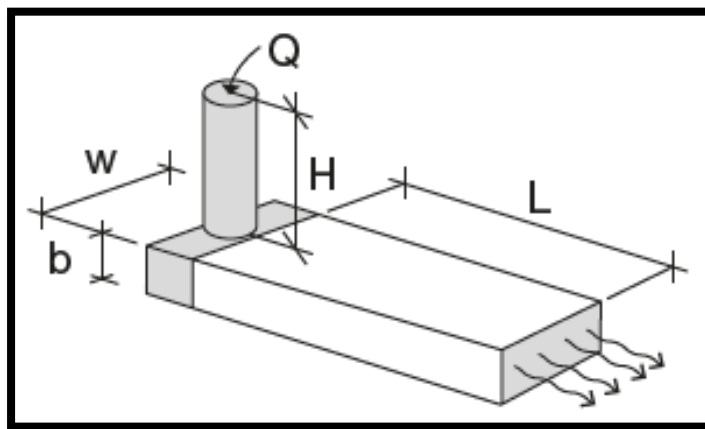
$i$  = hydrauliske gradienten ( $dh/dl$ ) (Fetter, 2001).

$$v = \frac{Q}{A} = k * i$$

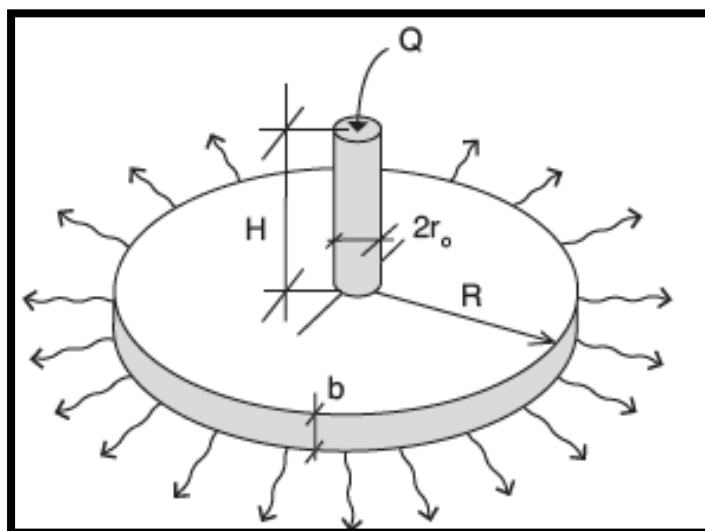
*Formel 2.1*

I en teoretisk fremstilling strømmer vannet enten i en rett sprekk (1D) (Figur 2.2).

Eller i alle retninger slik som i en disk (2D) (Figur 2.3) (Stille, 2015).



*Figur 2.2 Vannstrømning i en kanal (1D) (Stille, 2015).*



*Figur 2.3 Vannstrømning i en disk (2D) (Stille, 2015).*

Strømningshastigheten ( $v$ ) til vannet i en kanal (1D) er gitt av Formel 2.2 (Stille, 2015);

$$v = \frac{\rho g}{12\mu} * b^2 * i \quad \text{Formel 2.2}$$

Hvor  $\rho$  = vannets tetthet ( $\text{kg/m}^3$ ),  $g$  = gravitasjonsakselerasjon ( $9,81 \text{ m/s}^2$ ),  $\mu$  = vannets viskositet ( $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ),  $b$  = sprekkeåpning (m). Ved å omgjøre Formel 2.2 med hensyn til  $Q$  i Darcy's lov (Formel 2.1) er strømningsmengden ( $Q$ ) for en kanal gitt av Formel 2.3 (Stille, 2015).

$$Q = \frac{\rho g}{12\mu} * w * b^3 * i \quad \text{Formel 2.3}$$

Hvor  $w$  = sprekkevidde (m) (Figur 2.2). En dobling av sprekkeåpningen ( $b$ ) gjør at det renner 8 ganger større vannmengde gjennom kanalen (1D). Sprekkeåpningen er derfor av svært stor betydning når det kommer til vannlekkasje (Stille, 2015).

For en disk er situasjonen en annen. I motsetning til en kanal (1D) hvor trykkfordelingen er jevn er ikke dette tilfelle for en disk (2D). I en disk reduseres trykket med økt avstand fra sentrum fordi arealet øker. Strømningsmengden ( $Q$ ) for en disk (2D) er gitt av Formel 2.4 (Stille, 2015).

$$Q = \frac{2\pi H}{\ln\left(\frac{R}{r_0}\right)} * \frac{\rho g}{12\mu} * b^3 \quad \text{Formel 2.4}$$

Hvor  $R$  = influensradius (m),  $r_0$  = radius til borehull (m),  $H$  = trykkhøyde (m) (Stille, 2015).

### 2.1.2 *Geologiske forhold som påvirker bergmassens hydrauliske konduktivitet*

En bergmasses hydrauliske konduktivitet er avhengig av bergspenningene, sprekkenes karakteristikk, sammensetning og tykkelse av den overliggende massen, vulkanske gangbergarter og forkastninger med tilhørende sprekker (Holmøy, 2008).

#### ***Bergspenninger***

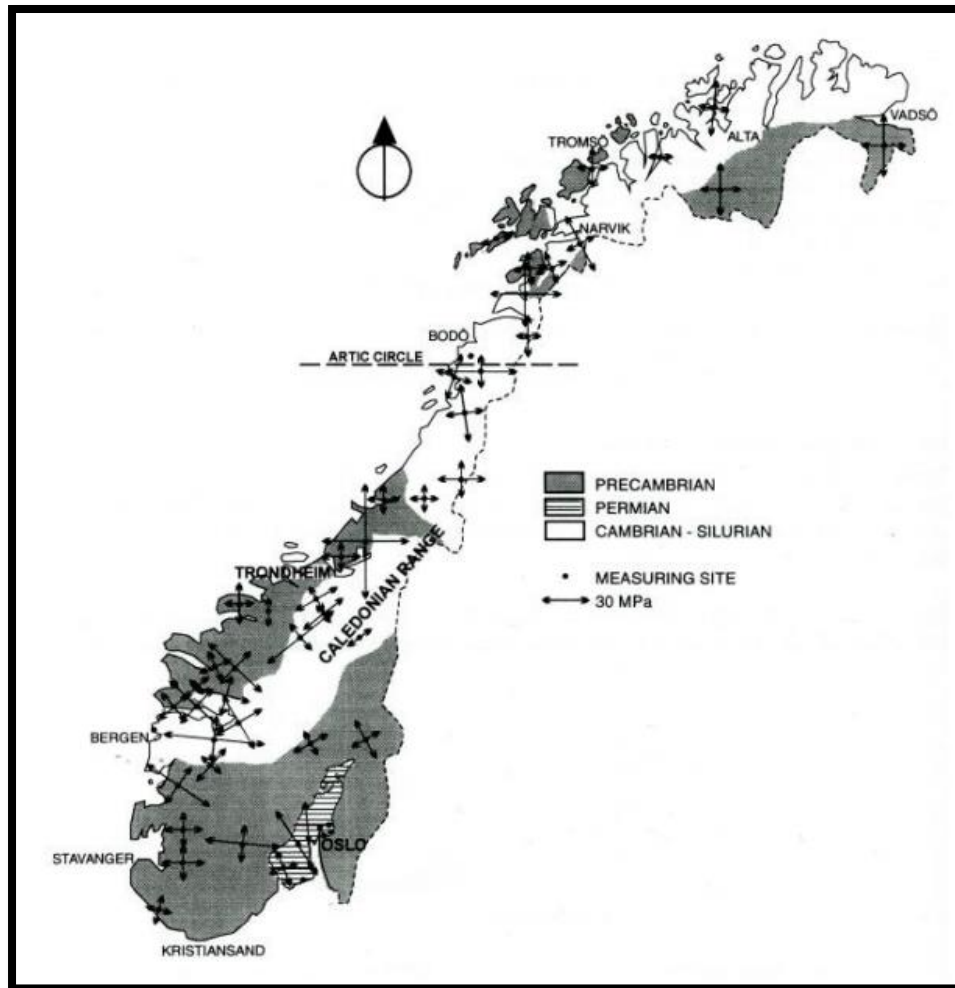
Spenningene i berggrunnen varierer fra et område til et annet og avhenger av gravitasjonsspenninger, tektoniske spenninger, residualspenninger, topografiske spenninger og induerte spenninger (fra mennesker). Gravitasjonsspenningene øker med dypet, mens de

tektoniske spenningene variere fra området til området avhengig av platetektonikk. I tillegg kan diskontinuiteter lokalt endre bergspenningene (Li, 2017).

- Åpen diskontinuitet: Største hovedspenning avbøyes parallelt med diskontinuiteten.
- Diskontinuiteten er fylt med likt materiale som omkringliggende bergmasse: Hovedspenningene forblir uendret.
- Diskontinuiteten er fylt med stivt («rigid») materiale: Største hovedspenning avbøyes til å gå normalt på diskontinuiteten.

De lokale bergspenningene er ofte en sammensetning av de nevnte faktorene. Det må derfor utføres in-situ målinger for å vite de eksakte bergspenningene i et område (Li, 2017).

Norge er generelt utsatt for høye horisontalspenninger på grunn av divergerende plategrenser i Atlanterhavet. Dette fører til at spenningene er anisotropiske, og at den største og mellomste hovedspenningen er i horisontal retning ved overflaten. Mens den minste hovedspenningen er i vertikal retning (Ramberg et al., 2013). Størrelsen til den største og mellomste hovedspenningen varierer, men en grov oversikt er gitt i Figur 2.4 (Myrvang, 2001).



Figur 2.4 Oversikt over de storskala, horisontale spenningene i Norge (Myrvang, 2001).

Høyt kompresjonsstress vinkelrett på en sprekk vil lukke den slik at den hydrauliske konduktiviteten reduseres. Med høyt kompresjonsstress reduseres også antall sprekkesett og avstanden mellom sprekkene. Siden kompresjonsspenningene øker med dypet vil den hydrauliske konduktiviteten reduseres med økt dyp (Panthi, 2006).

Sprekken åpnes ved høyt kompresjonsstress parallelt med sprekkene. Sprekker åpnes hovedsakelig  $30^\circ$  på største hovedspenning, og det er naturlig at grunnvannet strømmer i sprekker som står  $30^\circ$  på største hovedspenning (Henriksen og Braathen, 2006).

Ved negative spenningsforhold slik som post – glacial heving eller tektonisk rifting kan det dannes tensjonssprekker. Tensjonssprekker dannes hovedsakelig nær overflaten når tensjonsspenningene overgår bergmassens tensjonsstyrke. Tensjonssprekker utvides vinkelrett på, og vekk fra bruddplanet (Gudmundsson et al., 2002).

Sprekker kan også utvides dersom poretrykket er større enn den minste hovedspenningen + tensjonsstyrken til bergmassen. Denne typen sprekker kalles for hydrosprekker, og kan i motsetning til tensjonssprekker dannes på et hvilket som helst dyp i jordskorpen. Hydrosprekker spiller en stor rolle for å binde eksisterende sprekkesystemer sammen (Gudmundsson et al., 2002).

Hvor mye en bergmasse påvirkes av spenningene varierer fra en bergmasse til en annen. En bergmasse bestående av granitt vil være sprø og hard. I denne bergmassen er sprekkene godt rustet for å holde seg åpne under høye spenninger. Dersom bergmassen er mykere og mer deformerbart presses sprekkene lettere sammen under høye spenninger (Holmøy, 2008).

### ***Sprekkes karakteristikk***

Orienteringen, lengden og avstand mellom sprekkene er avgjørende for om sprekkene er koblet sammen. Kontinuerlige sprekker med varierende orientering gir større mulighet for at grunnvannet kan strømme sammenlignet med en bergmasse med mange parallelle sprekker. I tillegg er grunnvannsstrømningen ofte høyest i sprekkene med et bratt fall sammenlignet med sprekker med et slakere fall (Gudmundsson et al., 2001).

Innholdet av sedimenter i en sprekk kan ha stor betydning for grunnvannstrømningen. På grunn av leirens impermeable egenskaper kan en sprekk som er fylt med leire være tett. Hvis en sprekk derimot er fylt med andre mineraler, som for eksempel kalsitt kan grunnvannsstrømningen øke med tiden. Dette skjer fordi kalsitt løses opp i vann (Holmøy, 2008).

### ***Sammensetningen og tykkelsen av den overliggende massen.***

Hvis det eksisterer sprekker som kan føre grunnvannet fra overflaten til en tunnel så er tykkelsen til sedimentene og sementtypen av stor betydning. Grunnvann i porøse sedimenter slik som fluviale avsetninger øker mulighetene for hvor mye grunnvann som kan lekke inn i en tunnel. Om sedimentene er dårlig sortert og inneholder en stor del leire (for eksempel morene) vil sedimentene redusere hvor mye vann som renner ned i sprekkene. I tillegg til porøse sedimenter kan elver, innsjøer og hav fungere som reservoar for å øke og fylle på grunnvann (Cesano et al., 2000).

Selv om det tidligere i kapittelet skrives at den hydrauliske konduktiviteten reduseres med dypet så er det større vannlekkasje i en tunnel hvor bergoverdekning er stor. Dette forklares

med at det er et større dreneringsområde ved en stor bergoverdekning og mindre dreneringsområdet ved lav bergoverdekning (Cesano et al., 2000).

### ***Vulkanske gangbergarter***

Vulkanske gangbergarter er enten finkornet og sprø eller svært tette, mens den omkringliggende bergmassen ofte er mer oppsprukket. Dersom den vulkanske gangbergarten er tett vil den fungere som en barriere. Dette vil tillate at vanntrykket bygges opp på hver side, noe som medfører at store mengder vann fraktes i den omkringliggende bergmassen. Dersom den vulkanske gangbergarten derimot er kraftig oppsprukket vil gangbergarten selv frakte store mengder vann (Babiker og Gudmundsson, 2004). Ifølge Hognestad et al. (2010) er gangbergartene i området rundt Oslo kjent for å være vannførende.

### ***Forkastninger og tilhørende sprekker***

Ved å sammenligne en forkastningssone mot en oppsprukken bergmasse oppstår den største vannlekkasjen i forvaltningssonen. I områder rundt forkastninger er det ofte en større tetthet av sprekker. Som en konsekvens er det ofte større lekkasje i store forkastninger sammenlignet med mindre forkastninger (Holmøy, 2008).

### **2.1.3 *Sondérboring og Lugeon Test***

#### ***Sondérboring***

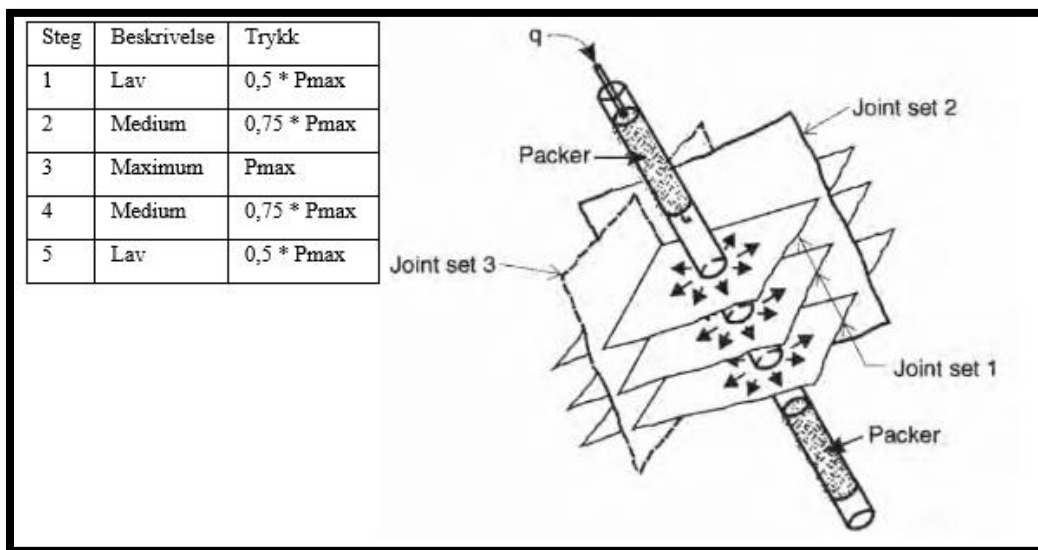
Minimum 25 m før området hvor det er satt lekkasjekrav skal det som hovedregel på Norske veitunnelen utføres systematisk sondérboring (Statens vegvesen, 2016c). Det å bore sondérhull er en rask og effektive metode som gir informasjon om bergmassen og eventuell lekkasje foran stoff. Basert på hvor mye vann som eventuelt renner ut av hullet blir det vurdert om det skal utføres forinjeksjon. En utfordring med å bore sondérhull er at vannet nesten alltid eksisterer i sprekker og svakhetssoner. Et sondérhull vil sjeldent treffe grunnvannet. Som en konsekvens er den estimerte vannlekkasjen basert på vannet som rennet ut av sondérhullet ofte lavere enn den faktiske lekkasjen som kommer til å oppstå når tunnelen drives gjennom området (Davik et al., 2002; Klüver, 2000).

#### ***Lugeon test***

Lugeon test er en in-situ test hvor hensikten er å måle hvor mye vann som forsvinner fra målelengden inn i den omkringliggende bergmassen. Testen utføres ved at en målelengde i ett

borehull avgrenses og forsegles med tette pakkere. Deretter pumpes det vann inn i det avgrensede området. For å unngå at vannet siver forbi pakkere er det viktig at den ikke er plassert i slepper og svakhetssoner (Statens Vegvesen, 2015),

Når en lengde er avgrenset pumpes det vann inn i dette området i 5 steg slik som beskrevet i tabellen i Figur 2.5. Pumpetrykket i hvert steg varierer og i hvert steg kjøres det med konstant trykk i 10 min. For å få et representativt gjennomsnitt utføres det målinger av vanntrykket i målelengden og hvor mye vann som pumpes inn en gang pr. minutt (Quiñones-Rozo, 2010).



Figur 2.5 Prinsipielt oppsett for en lugeon test (Modifisert etter Hoek og Bray (1981) og Quiñones-Rozo (2010)).

1 Lugeon er definert som 1 liter vanntap pr. meter målelengde ved bruk av vanntrykk på 10 bar (Quiñones-Rozo, 2010). Det er anslått at 1 lugeon tilsvarer en hydraulisk konduktivitet på  $2,3 * 10^{-7}$  m/s (Holmøy, 2008).

## 2.2 Tettemetoder for å redusere vannlekkasje i en tunnel

For å forhindre uønskede konsekvenser som følge av vannlekkasje i forbindelse med tunneldrivingen settes det krav om hvor mye vann som maksimalt kan lekke inn i tunnel. Kravene omtales som tetthetskrav (Klüver og Kveen, 2004). Ved å plassere alle tunneler innenfor 1 av 3 gitte tunneltyper gjelder normalt følgende tetthetskrav (Grøv et al., 2014);

- Urbane tunneler i sensitive områder: 2 – 10 liter / min / 100 m tunnel
- Skogs- og undersjøiske tunneler: 10 – 30 liter / min / 100 m tunnel
- Tunneler under store fjell uten tetthetskrav: > 30 liter / min / 100 m tunnel.



Selv om en tunnel er en urban tunnel i sensitive områder kan tetthetskravet variere langs tunneltraseen. At tetthetskravet varierer i en tunnel er naturlig på grunn av at en del av tunnelen kan være lokalisert under et skogsområde, mens en annen del av tunnelen kan være lokalisert under et boligområde som står på sedimenter. I en del av tunnelen kan tetthetskravet da være 10 l / min / 100 m mens i en annen del av tunnelen kan tetthetskravet være 4 l / min / 100 (Klüver og Kveen, 2004).

### 2.2.1 *Vannavskjerming*

For å unngå at det kommer vann inn i veibanen brukes vannavskjerming. En vannskjerm kan bestå av PE – skum (polyetylen) i forbindelse med sprøytebetong, betonghvelv eller andre konstruksjoner. Uavhengig av hvilket materiale som brukes dreneres vannet på baksiden av konstruksjonen, ned i en grøft i bunn i av tunnelen for så bli fjernet av for eksempel en pumpe (Davik et al., 2002). En ulempe ved vannavskjerming er at boltene som brukes for å feste konstruksjonen kan punktere en eksisterende injeksjonsskjerm. Dersom dette skjer kan lekkasjen øke (Mydske et al., 1999).

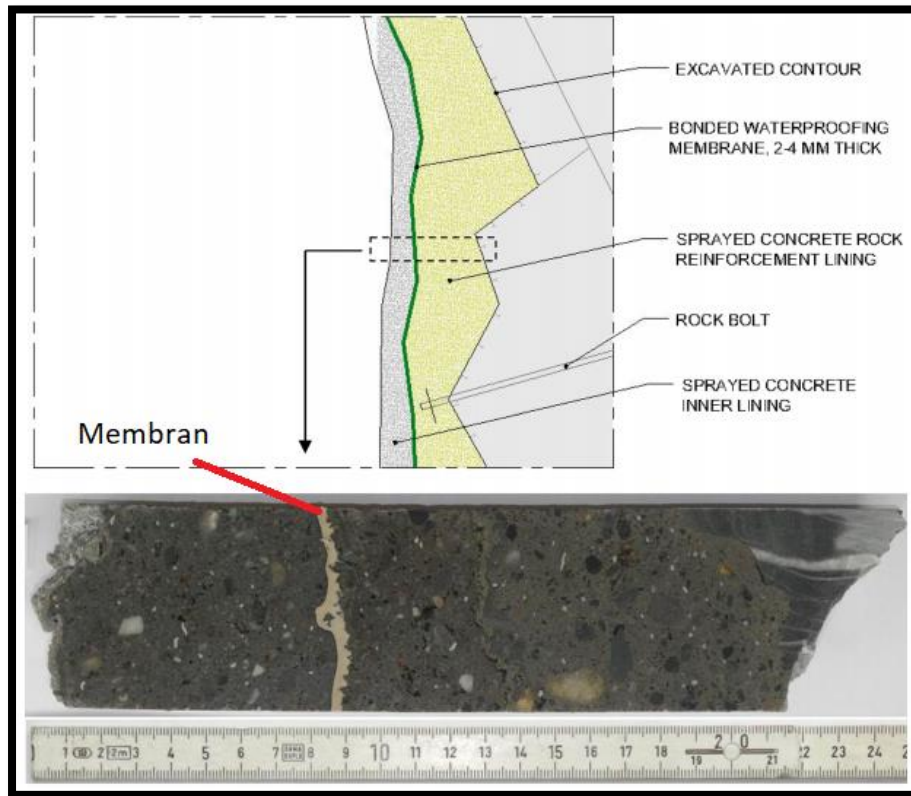
### 2.2.2 *Frysning*

Frysning blir av Sve et al. (2008) beskrevet som en midlertidig stabilisering og kan benyttes ved driving gjennom bergmasser med løsmassekarakter eller svært oppsprukkede soner. Hensikten med metoden er å fjerne varme fra grunnen slik at grunnvannet fryser (Jones og Brown, 1979). Denne metoden ble blant annet brukt under driving av Oslofjordtunnelen. Her ble en sone ved hjelp av 115 hull fryst ned til -28 °C. Deretter ble det sprengt gjennom den frosne sonen for så å montere en armert betongutstøpning. Den armerte betongutstøpningen fungerer i dag som permanent sikring (Andreassen og Statens Vegvesen, 1999).

### 2.2.3 *Membran*

Et sammensatt tunnelhvelv hvor en vanntett membran er plassert mellom to lag av sprøytebetong blir av Holter (2014) vurdert som fremtidig vannsikring for norske veitunnelprosjekter (se Figur 2.6). Ved bruk av membranen vil vannet opptre lokalt i sprekker, men vannet vil ikke være i stand til å trenge gjennom selve membranen. Membranen sørger for at vannet ikke lekker inn i tunnelen og vil derfor forhindre at

grunnvannstanden synker. For å unngå at membranen punkterer er det viktig at ingen bolter trenger gjennom denne (Holter, 2014).

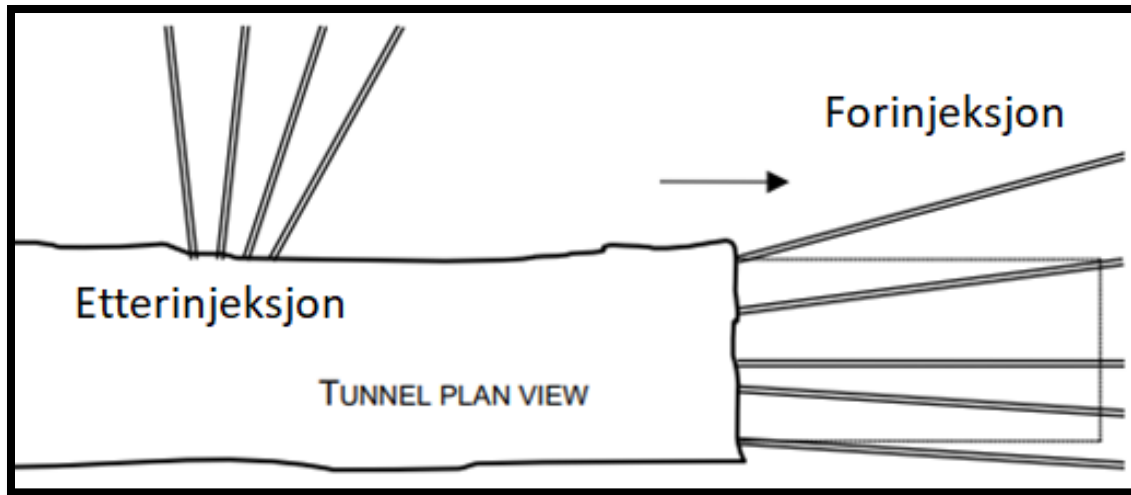


Figur 2.6 Detaljert fremstilling av sandwich strukturen med sprøytebetong og en vanntett membran (Holter, 2014).

#### 2.2.4 Injeksjon

Formålet med injeksjonsmetoden er å danne en sone med redusert hydraulisk konduktivitet i berget utenfor tunnelperiferien for å gjøre tunnelen tett nok (Grøv og Woldmo, 2012). For å lage en slik sone kan injeksjonen enten utføres foran- (forinjeksjon) eller bak stoff (etterinjeksjon), illustrert i Figur 2.7 (Hollmén, 2008). Både ved forinjeksjon og ved etterinjeksjon bores det injeksjonshull som injeksjonsmassen blir injisert i. Injeksjonsmassen vil fylle injeksjonshullene og trenge inn og tette de omkringliggende sprekke i berget (Klüver og Kveen, 2004).

Materialet i en slik injeksjonsmasse er enten kjemiske- og / eller sementbaserte (Klüver og Kveen, 2004).



Figur 2.7 Skjematisk oversikt over forinjeksjon og etterinjeksjon i en tunnel (Hollmén, 2008).

### **For- og etterinjeksjon**

Forinjeksjon gjennomgås i kapittel 2.3.

Før oppstart av etterinjeksjon bør det foreligge en detaljert plan med hensyn til retningen til de vannførende sprekke og de ulike injeksjonsmaterialenes egenskaper. Dersom det er lekkasje i et mindre område bak stuff bør injeksjonshullene krysse de vannførende sprekke 5 – 10 m utenfor tunnelperiferien. Det / de injeksjonshullene som gir størst lekkasje bør fungerer som avlastningshull. For å unngå at vannet flytter seg fra et område til et annet området etter at injeksjonen er ferdig bør injeksjonshullene bores i god avstand fra begge sidene av der hvor det er observert en lekkasje (Hognestad et al., 2010).

Når alle injeksjonshullene er boret starter injeksjonen i det hullet som ligger lengst vekk fra avlastningshullene. Deretter injiseres hullene som er lokalisert nærmere og nærmere avlastningshullene og til slutt injiseres avlastningshullet. For å unngå at injeksjonsmassen i injeksjonshullene eroderes vekk bør injeksjonsmassen i de resterende hullene herde i et døgn før det blir injisert i avlastningshullet. Dersom lekkasjen forflytter seg til nye områder etter at avlastningshullet er injisert, starter injeksjonsprosessen på nytt for det / de nye områdene med lekkasje. Etterinjeksjon kan derfor bli en tidsomfattende og kostbar prosess som bør unngås (Hognestad et al., 2010).

Ved lekkasje over større områder bak stuff bør det ved etterinjeksjon tenkes likt som ved forinjeksjon. Injeksjonsmassen skal trenge inn i sprekke slik at lekkasjen stopper fremfor å tette enkeltlekkasjer. Ved etterinjeksjon skal injeksjonshullene gå dypere inn i berget enn ved forinjeksjon, og i motsatt retning av hverandre slik at det dannes en fiskeskjerm. Når den

første fiskeskjermen er ferdig injisert så etableres det en ny fiskeskjerm omtrent 5 m bak den forrige fiskeskjermen (Hognestad et al., 2010).

Erfaringer fra norske tunneler viser at etterinjeksjon er en tidkrevende, utfordrende og kostbar prosess (ca. 20 ganger dyrere enn forinjeksjon). Tetthetskravet bør derfor nås med forinjeksjon fremfor etterinjeksjon (Grøv og Woldmo, 2012).

### ***Injeksjonsmaterialer***

Ved kjemiske injeksjonsmaterialer så er injeksjonsmassen uten partikler. Penetrasjonen av sprekker og massens spredning er derfor kun avhengig av injeksjonstrykket og væskens viskositet. Kjemiske materialer ble introdusert på midten av 1950- tallet, men det fortsatt sementbaserte materialer som dominerer. En stor del av grunnen til dette er på grunn av prisforskjellen. Kjemiske materialer er 2 – 10 ganger dyrere enn sementbaserte materialer. I tillegg har mikrosemter overtatt en del av markedet som før var dominert av kjemiske materialer (Davik et al., 2002).

Ved bruk av kjemiske materialer er det viktig å vite hvilke konsekvenser disse kan ha ettersom enkelte kjemiske materialer kan være giftige. For eksempel Rhoca - Gil som ble brukt i forbindelse med etterinjeksjon i Romeriksporten er et kjemisk materialer som i ettertid har vist seg å være kreftfremkallende (Mydske et al., 1999).

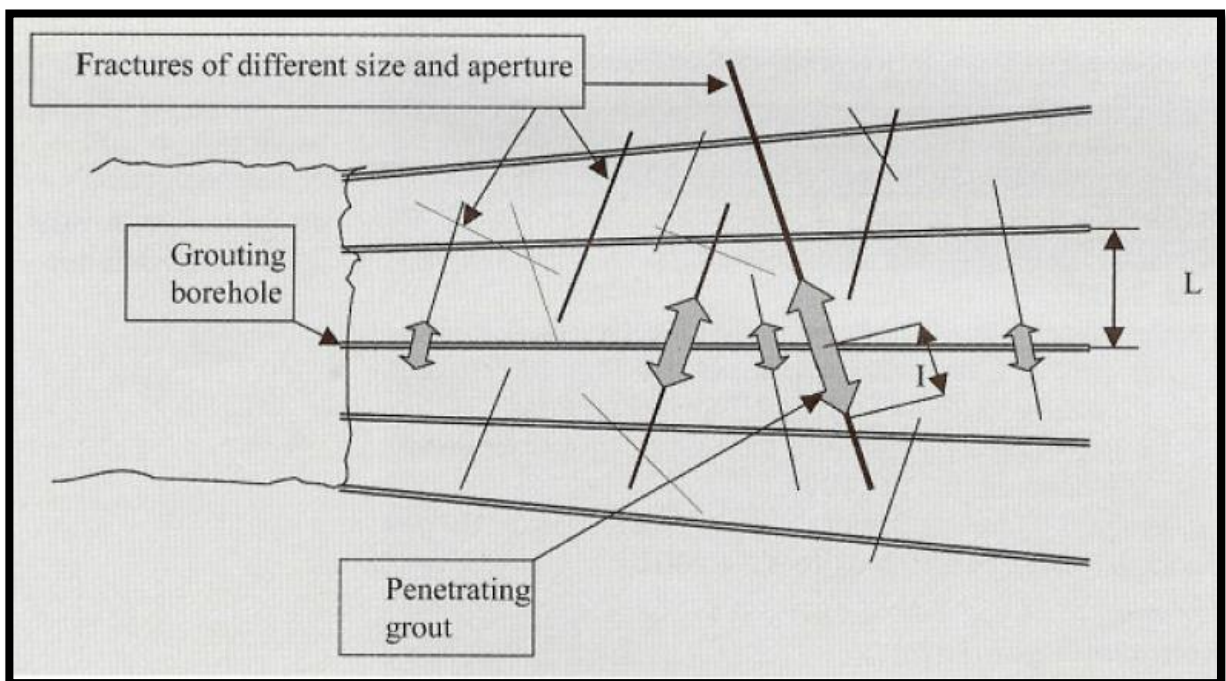
Sementbaserte injeksjonsmaterialer blir gjennomgått i kapittel 2.3.

#### ***2.2.5 Kunstig vanninfiltrasjon***

Som et tillegg til injeksjon kan det infiltreres vann direkte i grunnen for å øke grunnvannstanden og hindre setningsskader. For å få en god effekt bør den hydrauliske konduktiviteten rundt tunnelen først reduseres med injeksjon. Deretter etableres det en infiltrasjonsskjerm utenfor injeksjonsskjermen. I denne eller disse infiltrasjonsskjermene pumpes det vann med et trykk som er 0,5 – 10 bar høyere enn det opprinnelige grunnvannstrykket. Ved denne metoden blir da vannet tilbakeført i grunnen (Davik et al., 2002). En ulempe med kunstig vanninfiltrasjon er at det kreves kontinuerlig drift av anlegget med rør, pumper osv. (Mydske et al., 1999).

### 2.3 Sementbasert forinjeksjon

Ved forinjeksjon injiseres det en masse inn i injeksjonshullene som er boret i et skjermmønster rundt tunnelperiferien foran stuff. Hensikten med metoden er at injeksjonsmassen skal trenge inn i og tette de omkringliggende sprekkene til injeksjonshullene (se Figur 2.8). Som en konsekvens av at disse sprekkene tettes så blir det dannet en sammenhengende skjerm som reduserer den redusert hydrauliske konduktivitet i bergmassen foran stuff. Når tunnelen drives gjennom området med redusert hydraulisk konduktivitet så blir vannlekkasjen mindre enn hva den ville vært dersom denne skjermen ikke hadde blitt dannet (Hognestad og Holter, 2012).

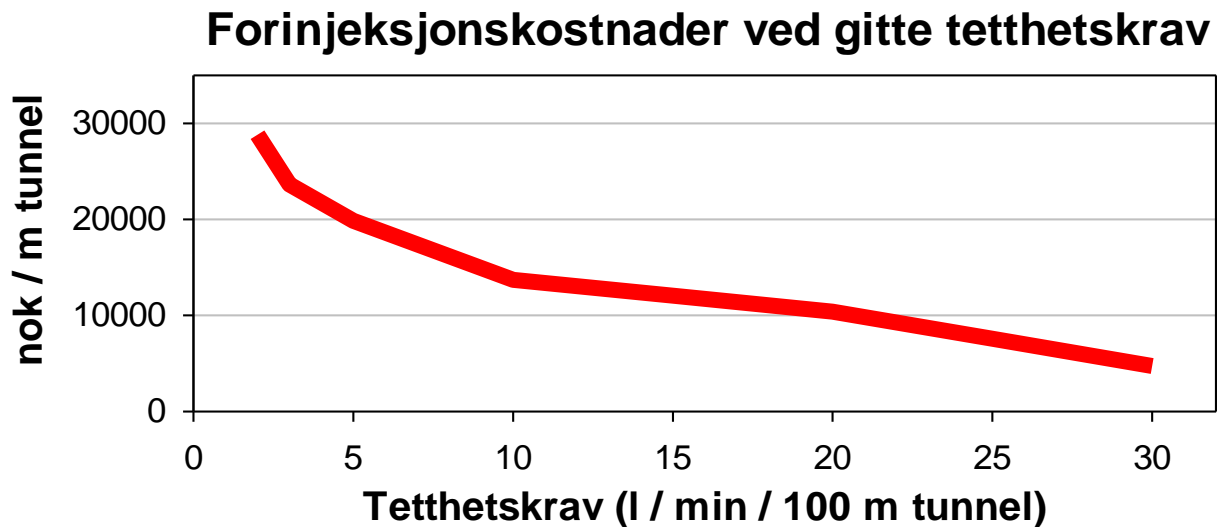


Figur 2.8 Injeksjonsmassen trenger inn i og tetter de omkringliggende sprekkene til injeksjonshullene (Gustafson og Stille, 2005).

Fordelene med forinjeksjon er at det gir en fleksibel tilnærming, benytter bergmassens impermeable egenskaper, det er kostnadseffektivt, reduserer konstruksjonstiden, gir fullstendig dokumentasjon av injeksjonsarbeidet og oppfyller kravet til streng vannkontroll i urbane tunneler (Grøv og Woldmo, 2012). I tillegg til å redusere vannlekkasje hevder Barton (2007) at  $Q$  – verdien til bergmassen øker.

### 2.3.1 *Kostnader med forinjeksjon ved ulike tetthetskrav*

Generelt utgjør forinjeksjon 20 – 30 % av den totale tunnelkostnaden på grunn av at det er en tidsomfattende prosess som krever en stor mengde sement (Holmøy et al., 2015). Ved et tetthetskrav på 10 l / min / 100 m utgjør forinjeksjon 50 – 70 % av de totale drivkostnadene pr. meter. Ved strengere tetthetskrav enn 10 l / min / 100 m øker de totale drivkostnadene pr. meter markant, se Figur 2.9 (Grøv og Woldmo, 2012).



Figur 2.9 Kostnadene ved forinjeksjons øker med økt tetthetskrav. Grafen er modifisert etter Grøv og Woldmo (2012) med en kurs fra euro til nok på 9,45 (8. nov. 2017).

På grunn av ulike kontrakter fra prosjekt til prosjekt så er det utfordrende å få en oversikt over hvor mye en time på stuff med injeksjon koster. Pr. 8. nov. 2017 var leie av mannskap og rigg på Tanumtunnelen fra 1550 – 2550 kr / time mens på Skaugumtunnelen var leieprisen 5150 kr / time. I tillegg så betalte byggherren en gitt sum pr. kg sement, pr. pakker, og pr. meter hull boret (Andersson og Geoteknisk Spiss-Teknikk AS, 2005; SSB, 2017).

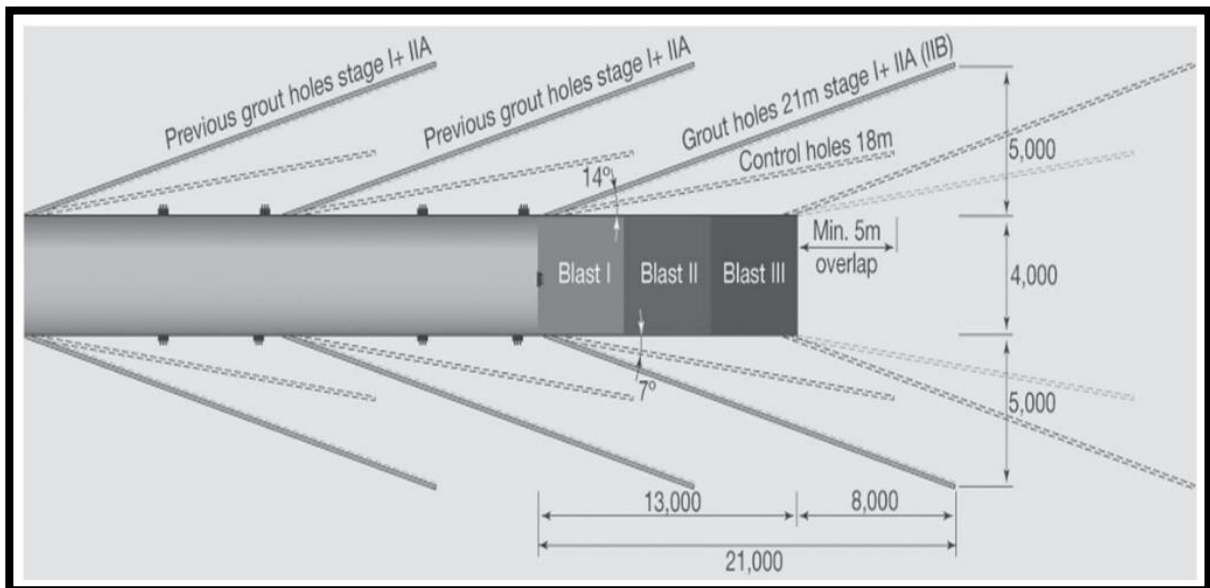
### 2.3.2 *Skjermgeometri, behovsprøvd og systematisk forinjeksjon og injeksjonstrykk*

Injeksjon dypt inn i bergmassen bør unngås. En god forståelse av den hydrogeologiske karakteristikken til bergmassen er avgjørende ved planlegging av arbeidet for å velge riktig injeksjonsmateriale, injeksjonstrykk, lengde- og antall injeksjonshull, samt injeksjonsstrategi. Det er også viktig å modifisere injeksjonsstrategien underveis basert på resultatene fra utført injeksjon og lekkasje etter injeksjon (Grøv og Woldmo, 2012).

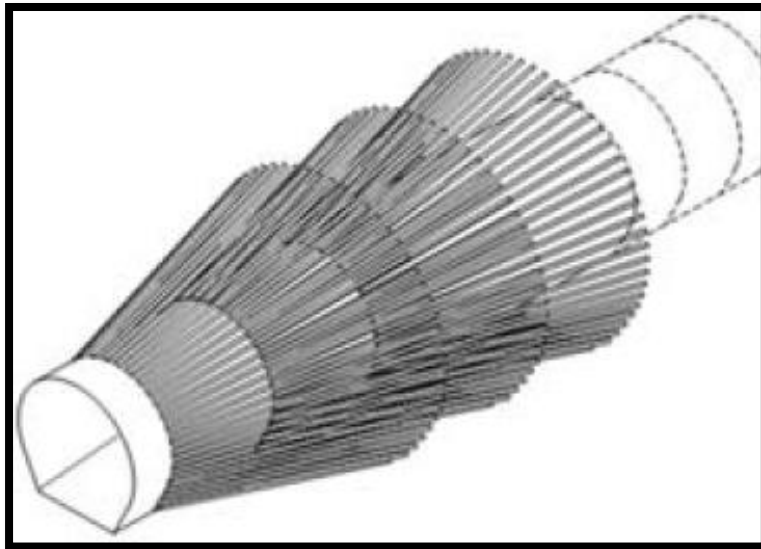
### Skjermgeometri

Den enkelte skjermen bør være fra 18 – 24 m og overlappes med 6 – 10 m av en ny skjerm (Hognestad et al., 2010). Under strenge tetthetskrav eller oppsprukket berg bør lengden til den enkelte skjermen reduseres til under 20 m. Dersom tetthetskravet er høyt og bergmassen lett lar seg injisere kan skjerm lengden økes (Pedersen et al., 2010). Med økt skjerm lengde er det mulig å få flere salver mellom hver injeksjonsrunde og fremdriften øker. Lenger skjerm og injeksjonshull gir også større borehullsavvik (Hognestad et al., 2010; Åndal et al., 2001).

For at injeksjonsmassen skal danne en sammenhengende skjerm utenfor tunnelen foran stuff blir injeksjonshullene boret med spiss vinkel på tunnelperiferien, se Figur 2.10 og Figur 2.11. Vinkelen bør være slik at injeksjonsarbeidet fokuserer på det området i berget som er 5 – 10 m utenfor tunnelkonturen (Grøv og Woldmo, 2012). En skjerm som er lokalisert nærmere enn 3 m fra konturen kan sprekke opp som følge av rystelsene forårsaket av sprengingen og / eller punkteres av bolter (Hognestad et al., 2010).



Figur 2.10 Typisk mønster ved systematisk forinjeksjon i en tunnel med lavt tverrsnitt (Grøv og Woldmo, 2012).



Figur 2.11 Overlappende skjermer med vinkel for å redusere lekkasje (Grøv, 2017).

For å få en sammenhengende skjerm blir injeksjonshullene boret i konturen i heng, vegg og såle slik som vist i Figur 2.11. Injeksjon direkte i stoff er kun nødvendig ved ugunstige sprekkesett, sleppen inn i stoffen, dårlig bergmasse eller der hvor tetthetskravet under driving er svært strengt. Ved overlappende skjermer blir lekkasjen ut av stoff håndtert av den neste skjermen (Hognestad og Holter, 2012).

Ved strengt lekkasjekrav eller vanskelig injiserbar bergmasse må det være liten avstand mellom injeksjonshullene, slik at injeksjonsmassen når alle sprekke som skal tettes (Hognestad et al., 2010). Hognestad og Holter (2012) hevder at avstanden mellom injeksjonshullene normalt bør være mellom 1 – 1,5 m. Under strenge tetthetskrav kan det være nødvendig med en avstand ned mot 0,5 m. Som en konsekvens av redusert avstand vil antall injeksjonshull i skjermen øke. For en T9,5 veitunnel vil antall injeksjonshull normalt være mellom 35 – 60 stk. For den første skjermen bør det som en tommelfingerregel startes med mange injeksjonshull, for så å eventuelt redusere antall injeksjonshull for de neste skjermene avhengig av resultatet (Pedersen et al., 2010).

### ***Systematisk- og behovsprøvd forinjeksjon***

Det skilles mellom systematisk- og behovsprøvd forinjeksjon. Ved systematisk forinjeksjon dannes det overlappende skjermer uavhengig av lekkasje, mens ved behovsprøvd forinjeksjon dannes det injeksjonsskjermer basert på resultatene fra sondérhullet(ene) (Hognestad et al., 2010). Som en tommelfingerregel bør det utføres systematisk forinjeksjon der hvor

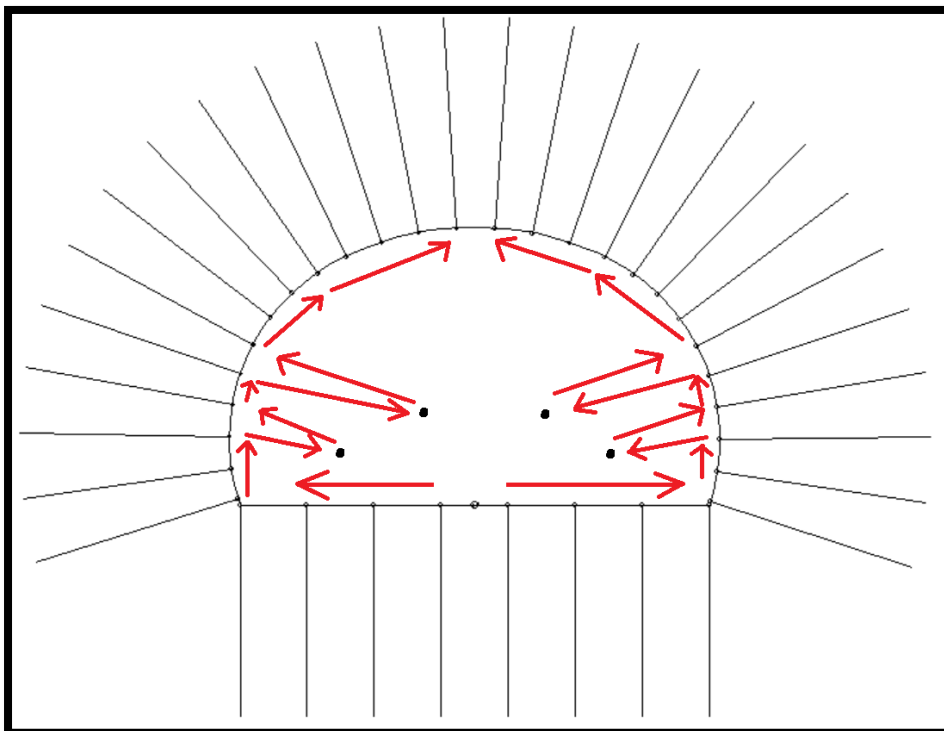


tetthetskravet er satt til 2 – 15 liter / min / 100 m. Ved tetthetskrav over 15 l / min / 100 m bør det bli brukt behovsprøvd forinjeksjon (Grøv og Woldmo, 2012).

Erfaringer tilsier at systematisk forinjeksjon gir en tettere tunnel sammenlignet med behovsprøvd forinjeksjon. Når en sprekk fylles igjen med injeksjonsmasse vil vannet finne nye veier. Ved behovsprøvd forinjeksjon kan derfor vannet flytte seg til et nytt område bak stuff som ikke er injisert slik at det kan være nødvendig med etterinjeksjon for å tette den nyoppståtte lekkasjen bak stuff (Boge et al., 2002).

### ***Injeksjonsrekkefølge***

Når en skjerm skal injiseres er det hullene i midten av sålen som blir injisert først. Når disse er ferdig så blir hullene fra midten av sålen og mot veggene injisert. Deretter blir hullene i bunn av veggen injisert før man så injiserer hullene som er høyere og høyere opp på veggen. Deretter blir hullene i bunn av hengen injisert først før skjermen lukkes ved at hullene i toppen blir injisert til slutt. En skjerm blir altså injisert nedenfra og opp. Dersom det er injeksjonshull i stuffen så blir disse injisert samtidig som hullene i veggen som ligger på samme høyde. Se Figur 2.12 for en skjematisk forklaring (Klüver og Kveen, 2004).



*Figur 2.12 Injeksjonsrekkefølge. Skjermen blir injisert nedenfra og opp. Figuren er laget av Tunnplan etter informasjon fra Klüver og Kveen (2004).*

### ***Injeksjonstrykk***

En forutsetning for at massen skal trenge inn i sprekkene er at injeksjonstrykket er større enn grunnvannstrykket (Rafi og Stille, 2013). I tillegg til å være større enn grunnvannstrykket så må injeksjonstrykket være større enn sprekkenes motstand mot å la seg bli injisert. En sprekk motstand avhenger av sprekkåpning, -ruhet, -orientering, -fylling og in-situ bergspenninger. Den drivende kraften bak injeksjon er derfor injeksjonstrykket og det bør brukes så høyt injeksjonstrykk som de lokale forholdene tillater (Klüver og Kveen, 2004). Ved en gitt bergoverdekning er det i Tabell 2-1 gitt en oversikt over det maksimale injeksjonstrykket som kan bli brukt i hullene i heng, vegg og såle (Grøv, 2017).

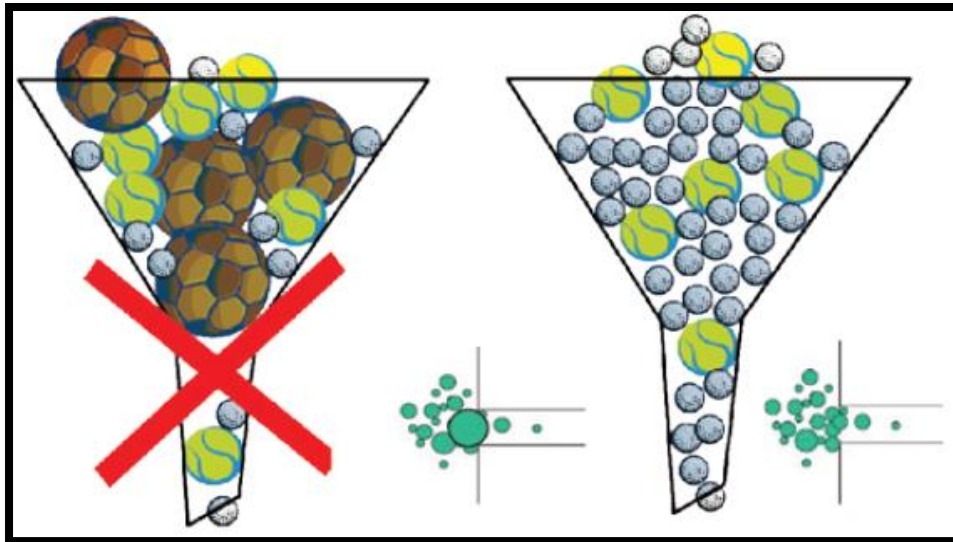
*Tabell 2-1 Maksimale injeksjonstrykk i heng, vegg og såle avhengig av bergoverdekningen. Modifisert etter Grøv (2017).*

<b>Bergoverdekning [m]</b>	<b>Maksimale injeksjonstrykk i heng og vegg [bar]</b>	<b>Maksimale injeksjonstrykk i såle [bar]</b>
0 – 5	20	30
5 – 15	40	60
> 15	100	100

### ***2.3.3 Injeksjonsmassens egenskaper og begrensninger***

#### ***Partikkelstørrelse***

En masse kan trenge inn i en sprekk der hvor sprekkåpningen er 3 ganger større enn suspensjonens største kornstørrelse ( $d_{maks}$ ) (Davik et al., 2002). Dersom massen inneholder noen store partikler, så kan disse partiklene blokkere sprekkåpning slik at massen blir forhindret fra å trenge inn i sprekkene. Som en konsekvens av dette blir ikke sprekkene fylt (Figur 2.13) (Hognestad og Holter, 2012). Hvis massen derimot inneholder noen veldig små partikler så kan disse fnokke seg og danne en stor plugg foran sprekkåpning. Distribusjonen av partikkelstørrelsene bør derfor være så bratt som mulig, med minst mulig innslag av store og små partikler (Eklund og Stille, 2008).



Figur 2.13 De store partiklene kan blokkene sprekkeåpningen, og hindre de mindre sprekkene fra å trenge inn (Hognestad og Holter, 2012).

### Sementtyper

I teorien kan alle sementtyper bli brukt i injeksjonsmassen, men i praksis må sementen være tilpasset de stedlige forholdene. I en stor del av den norske berggrunnen vil det være riktig å bruke standard injeksjonssement. Dersom berget er innspent, det er stor lekkasje, liten sprekkeåpning eller sprekkeene er delvis fylt med leire kan det være vanskelig for en injeksjonsmasse med standard injeksjonssement å trenge inn. Under slike forhold kan det være nødvendige å bruke en finere sement, for eksempel mikrosement eller ultrafin sement (Klüver og Kveen, 2004).

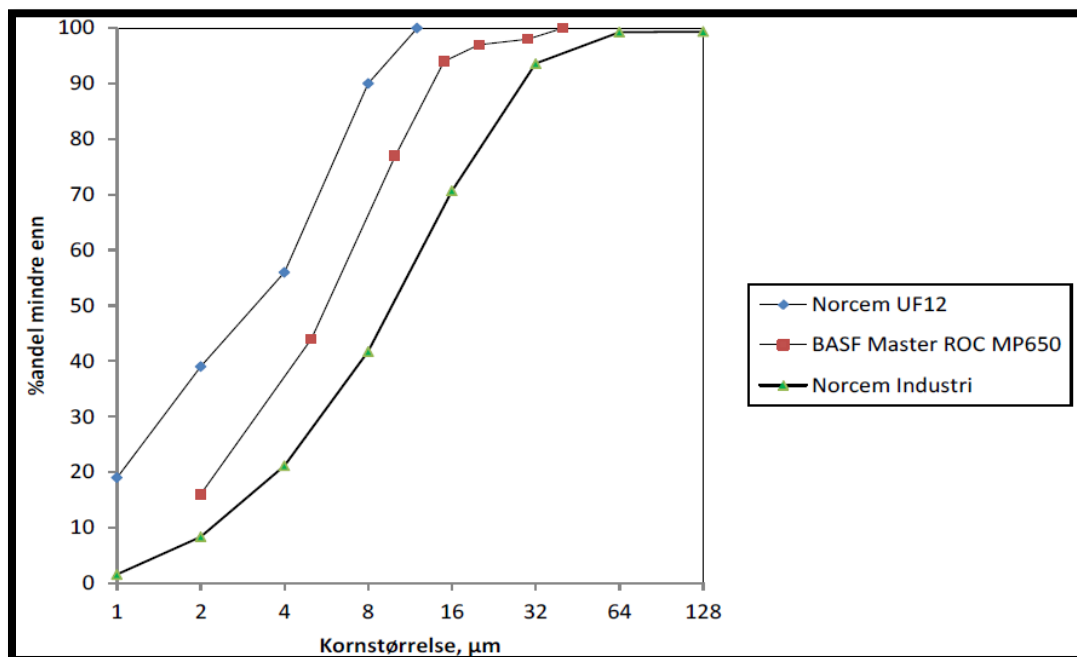
Om en sement er standard injeksjonssement, mikrosement eller ultrafin sement blir bestemt ut ifra sementens  $d_{95}$  (95 % av sementvekten er mindre enn denne størrelsen).  $D_{95}$  til de ulike sementene er gitt i Tabell 2-2. De forskjellige sementene skal normalt være portlandsement og standard injeksjonssement skal være godkjent som I 52,5R eller CEM I 42,5RR etter Norsk Standard (2003) (Statens Vegvesen, 2015).

Tabell 2-2 Partikkelstørrelse for standard injeksjonssement, mikrosement og ultrafin sement. Modifisert etter Statens Vegvesen (2015).

Sementtype	Partikkelstørrelse
Standard injeksjonssement	$d_{95} > 0,02 \text{ mm}$
Mikrosement	$d_{95} < 0,02 \text{ mm}$
Ultrafin sement	$d_{95} < 0,01 \text{ mm}$

I produktbladet til sementen blir det ofte opplyst om sementens  $d_{95}$ , men det blir sjeldent opplyst om sementens  $d_{maks}$  (maksimal kornstørrelsen) (Henn og Soule, 2010). Selv om dette er tilfelle så mener Henn og Soule (2010) at det burde bli opplyst om sementens  $d_{maks}$  siden det er den som er av praktisk betydning for inntrengingsevnen til injeksjonsmassen.

Som vist i Figur 2.14 er  $d_{maks}$  lik 0,128 mm og  $d_{95}$  er lik 0,04 for Norcem Industrisement (Aarstad et al., 2015). Med utgangspunkt i at sementen kan trenge inn i en sprekke hvor sprekkeåpningen er 3x større enn  $d_{maks}$  fra Davik et al. (2002), så kan en injeksjonsmasse bestående av Norcem Industrisement trenge inn i en sprekke hvor sprekkeåpningen er 9,6 ganger større enn  $d_{95}$ .



Figur 2.14 Kornfordelingskurve for Norcem UF12, BASF Master ROC og Norcem Industrisement (Aarstad et al., 2015).

### Standard injeksjonssement

Standard injeksjonssement har svært mange bruksområdet og den er ikke spesialtilpasset injeksjon. Til tross for at den ikke er spesialtilpasset så er standard injeksjonssement den mest brukte sementen til injeksjon. Ved bruk av standard injeksjonssement og et v/c forhold (vann/sement forhold) på 0,6 – 0,7 har suspensjonen generelt for mye blødning.

Injeksjonsmassen bør derfor ha et v/c forhold mellom 0,8 – 1,0 når injeksjonen startet, og / eller det kan tilsettes silikaslurry for å unngå blødning (Hognestad et al., 2010).

***Mikrosement***

Det eksisterer flere typer mikrosegment og herdetiden til de forskjellige kan variere mye ved at noen har kort og andre har lang herdetid. I tillegg til varierende herdetid varierer også stabiliteten til de forskjellige mikrosegmentene. Ved et v/c forhold på 1,0 har enkelte mikrosegmenter ingen blødning, mens andre mikrosegmenter kan ha mer enn 10 % fritt vann ved det samme v/c forhold. Siden mikrosegmenter har større spesifikk overflate enn standard injeksjonssegment er partiklene mer kjemisk aktive. Dette fører til at fnokking lettere forekommer og det stilles derfor strengere krav til blandingsprosessen. For å få et vellykket resultat er det svært viktig å kjenne til den enkelte sementens egenskaper (Hognestad et al., 2010).

Mikrosegment er 5 – 15 ganger dyrere enn standard injeksjonssegment (Henn og Davenport, 2005). Selv om dette er tilfelle så har flere prosjekter endt opp med å bruke mindre penger ved bruk av mikrosegment fordi injeksjonen har vist seg å være mer tidseffektiv (Aarstad et al., 2015).

***Ultrafin sement***

Ved bruk av ultrafin sement vil det oppstå de samme variasjonene som for forskjellige typer mikrosegment. Forskjellen på mikrosegment og ultrafin sement er at mikrosegment trenger inn i endra mindre sprekker, og fnokking kan være en større utfordring på grunn av en enda større spesifikk overflate (Hognestad et al., 2010).

***Injeksjonsmassens reologiske egenskaper***

Som hovedregel skal injeksjonsmassen være stabil, noe som betyr at det ikke forekommer separasjon. Ved separasjon så skilles vannet og sementen fra hverandre (Hognestad et al., 2010). En stabil injeksjonsmasse beskrives som en Bingham væske. Dette innebærer at skjærstresset ( $\tau$ ) i væsken må overstige væskens yield verdi<sup>1</sup> ( $\tau_0$ ) for at væsken skal begynne å flyte. Skjærstresset som virker på væsken avhenger også av væskens viskositet ( $\mu$ ), se Formel 2.5 (Stille, 2015).

$$\tau = \tau_0 + \mu \frac{dv}{dz} \quad \text{Formel 2.5}$$

Hvor:  $\frac{dv}{dz}$  er skjærhastigheten.

<sup>1</sup> Yield verdi, også kalt for yield point er definert som minimum påkrevd skjærstress for å få konstant deformasjon. For et fast materiale er yield verdien definert som overgangen fra elastisk til plastisk deformasjon. Yield verdien er lik yield styrken til massen eller materialet (Fossen, 2016b).

På grunn av ulike v/c forhold, sementtyper, tilsetningsstoffer og temperaturer er injeksjonsmassens yield verdi og viskositet forskjellig for to ulike masser (Stille et al., 2012). For en gitt sementtype er v/c forholdet av svært stor betydning. Ved økt v/c forhold reduseres yield verdien og viskositeten, og ved redusert v/c forhold øker injeksjonsmassen yield verdi og viskositet, se Tabell 3-2 (Skjølvold og Justnes, 2016).

### ***v/c forhold***

Sprekker og slemper som gir lekkasje vil i utgangspunktet være fylt med vann. Når injeksjonsmassen treffer dette vannet blandes massen og dens reologiske egenskaper endres. En masse med lavt v/c forhold er tyktflytende og tåler mer utvanning sammenlignet med en masse med lavere v/c forhold, men en masse med høyere v/c forhold trenger inn i mindre sprekker på grunn av at massen er mer tyntflytende (Klüver og Kveen, 2004). En masse med høyt v/c forhold vil i tillegg gi dårligere kvalitet til herdet masse, ha lengre herdetid, ha redusert yield verdien og viskositet, gi økt masseforbruk og ha dårligere trykkoppbygning i den nærliggende bergmassen. I tillegg fører en masse med høyt v/c forhold til øke muligheten for hydraulisk jekking langt vekk fra injeksjonshullet på grunn av lengre spredningslengde og større sannsynlighet for utgang av injeksjonsmasse i dagen (Hognestad et al., 2010; Klüver og Kveen, 2004; Stille, 2015).

### ***Herdetid***

Herdetiden defineres som den tiden det tar for injeksjonsmassen å nå ønsket fasthet. Under normale forhold er herdetiden for standard injeksjonssement mellom 8 – 10 timer, og for mikrosement er herdetiden ca. 2 timer (Hognestad et al., 2010).

Herdetiden avhenger i en viss grad av v/c forhold, og i stor grad av temperaturen. Ved et høyt v/c forhold er herdetiden lenger, og ved lavt v/c forhold er herdetiden kortere. Med tanke på temperatur så blir det vist i Tabell 2-3 at herdetiden øker betraktelig ved lav temperatur, og ved økt temperatur så reduseres herdetiden. Ved en temperatur ned mot 10 °C så tar herdetiden lang tid, og ved en temperatur ned mot 0 °C så tar herdetiden veldig lang tid (Klüver og Kveen, 2004).

*Tabell 2-3 Sementene bruker lenger tid på å herde ved lave temperaturer, og kortere tid ved høyere temperaturer. Modifisert etter Klüver og Kveen (2004).*

<b>Temperatur</b>	5 °C	10 °C	20 °C	35 °C
<b>Relativ reaksjonshastighet</b>	0,3	0,5	1	2

### ***Tilsetningsstoffer***

Tilsetningsstoffer er ment for å øke egenskapene og kvaliteten til injeksjonsmassen. Til disse formålene skilles det mellom stabiliserende- og superplastiserende stoffer. Ved tilsetning av disse stoffene blandes først det superplastiserende stoffet og riktig mengde vann i blanderen. Etter dette tilsettes sementen og det stabiliserende stoffet. Stabiliserende stoffer slik som silikaslurry tilsettes for å unngå separasjon, og injeksjonsmassen vil da være stabil ved et høyere v/c forhold. Superplastiserende stoffer tilsettes for å unngå fnokking ved at de løser opp de elektriske bindingene mellom kornene. Mens akselerator tilsettes for å akselerere herdetiden. Ved tilsetning av akselerator vil enkelte mikrosegment begynne å herde allerede etter 3 min, men for andre sementer fungerer akseleratoren dårligere. For å unngå at massen herder blanderen, injeksjonspumpene eller slangene så blir akseleratoren tilsatt direkte i injeksjonsstaven (Hognestad et al., 2010).

#### ***2.3.4 Avslutningskriterier***

I norske tunneler avsluttes som regel injeksjonen ved et bestemt mottrykk. Dersom injeksjonen skal avsluttes ved 80 bar så vil pumpen injisere helt til det ikke er mulig å få inn mer masse ved dette trykket. Det skal normalt brukes så høyt injeksjonstrykk som de geologiske forholdene tillater, og målet er at det skal være en jevn og kontinuerlig trykkoppbygning. Denne metoden kalles for aktiv injeksjon. Dersom det ikke er en jevn og kontinuerlig trykkoppbygning kan det være nødvendig å redusere v/c forholdet for å få en mer viskøs masse. I tillegg kan det være nødvendig å endre strømningshastighet og la injeksjonshullet hvile underveis for å oppnå mottrykk (Hognestad et al., 2010; Klüver og Kveen, 2004).

Dersom det er problematisk å oppnå mottrykk kan injeksjon i et hull avsluttes etter en gitt mengde. Denne mengden er anslått å være fra 1000 – 1500 kg sement pr. hull i en 21 meter lang injeksjonsskjerm med 30 – 40 hull. Enkelte injeksjonshull kan være utfordrende og kreve

en større mengde enn 1500 kg. Hele skjermen bør derfor ses på under ett slik at det mulig å bruke mer enn angitt mengde i enkelte hull og mindre i andre hull (Hognestad et al., 2010). En ulempe ved å bruke mengde som stoppkriteriet er at dersom injeksjonsmassen kommer inn i områder med større sprekkefrekvens vil det kreves et større forbruk for å oppnå ønsket resultat. Om dette ikke er kartlagt på forhånd kan resultatet bli at det brukes for lite injeksjonsmasse pr. hull og at bergmassen ikke blir tilstrekkelig tett (Klüver, 2000).

Selv om det er vanligst å bruke trykk og injisert volum som avslutningskriteriet så eksisterer det også andre metoder. GIN - metoden etter Lombardi og Deere (1993) og RTGC metoden etter Stille (2015). Fordelen med GIN – metoden og RTGC metoden er at de overvåker injeksjonsforløpet på stedet. Metodene er ikke direkte anvendbare til bruk i norske tunneler, men RTGC metoden bør vurderes ved videreutvikling av den norske injeksjonsmetoden (Strømsvik og Grøv, 2017).

GIN – metoden er utviklet for injeksjon i forbindelse med dammer, og er basert på et risikoestimat av jekking (Stille, 2016). GIN står for Grout Intensity Number og går i korte trekk ut på å redusere influensradiusen til injeksjonsmassen, noe som kan føre til et mer kostnadseffektivt og bedre injeksjonsresultat. Det å redusere influensradiusen utføres ved å tilpasse injeksjonstrykket og maksimalt injisert volum med bakgrunn i den lokale geologien. Ved bruk av GIN-metoden bør ikke injeksjonstrykket overskride 50 bar for å unngå uønsket oppløftning av bergmassen (Lombardi og Deere, 1993).

Teorien bak RTGC metoden gjennomgås i kapittel 2.6, og RTGC metoden blir testet ut på to injeksjonshull.

### 2.3.5 *Injeksjonsutstyr*

Injeksjonsriggen som ble brukt i Svartåstunnelen er av typen AMV 4 x Häny 100 bar (Olsen og Implenia, 2017). På denne riggen er det montert 4 injeksjonspumper, 2 blandere, 2 agitatorer og en styrekonsoll / datamaskin (Figur 2.16). På baksiden av injeksjonsriggen sto det en lastebil med to siloer med tørr sement. Vannet kom inn via en slange som gikk ut av tunnellopet (Figur 2.15) (Solomon og Ansatte hos Implenia, 2017).





Figur 2.15 Oppsett av siloene og injeksjonsriggen ved sementbasert forinjeksjon.



Figur 2.16 Injeksjonsriggen er utstyrt med 2 stk. blandere, 2 stk. agitatorer, 4 stk. injeksjonspumper og 1 stk. datamaskin.

### ***Datamaskin, programvare og logging av trykk og flyt***

«Injeksjonens forløp skal kunne presenteres og leveres grafisk for enkelthull, med variasjon i trykk og masseinnngang over tid, også i sanntid under selve injeksjonen» (Statens Vegvesen, 2015 s. 90). På datamaskinen som er montert på riggen kan trykket, flyten, v/c forhold, pumpetid, sementtype og totalt injisert volum pr. hull overvåkes i sanntid. Disse dataene blir lagret slik at det er mulig å hente ut denne informasjonen både for enkelte hull og for hele injeksjonsskjermen i ettertid (Solomon og Ansatte hos Implenia, 2017).

Trykk og flyt måles og visualiseres automatisk på datamaskinen i sanntid. For å redusere lagringsmengden blir det på forhånd satt et loggeintervall, for eksempel på 17 sekunder. Ved et loggeintervall på 17 sekunder er flyten i dette målepunktet gjennomsnittet av den mengden som har blitt injisert siden forrige målepunkt. Dersom det har blitt injisert 5 l over 17 sekunder, er flyten i målepunktet på 18 l / min (Solomon og Ansatte hos Implenia, 2017). Trykkmålingen er en punktmåling fra det aktuelle tidspunktet (Häny AG, 2018).

### ***Siloer, blandere og agitatorer***

Ved bruk av både standard injeksjonssement og mikrosement / ultrafin sement bør sementen være tilgjengelig i hver sin silo. Dette slik at det er mulig å veksle mellom sementtypene uten at det fører til langvarig stopp av injeksjonsarbeidet. Siloene bør dekket med en beskyttende duk for å unngå at sementen begynner å blande seg på grunn av vanddrypp fra taket av tunnelen (Hognestad et al., 2010).

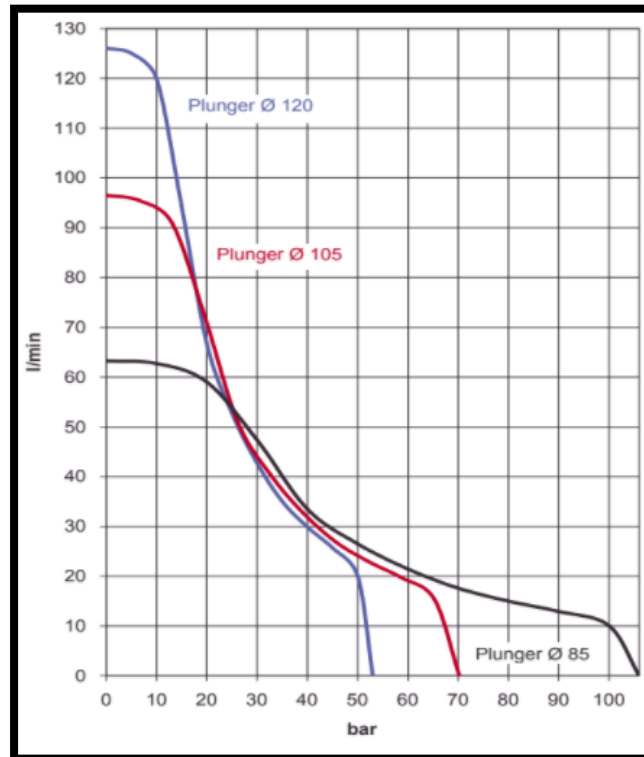
Vannet som blandes sammen med sementen må være rent slik at sementen og vannet reagerer slik det skal. Selve blanderen skal ha en høyhastighets aktivator som er i stand til å yte 1500 o/min for at det skal være mulig å skille kornene fra hverandre, og få en god mørtel etter om lag 2 minutters blandingstid. Når mørtelen er ferdig blandet flyttes den over i en agitator. Fordelen med agitatorene er at de holder partiklene i suspensjon slik er at det kan det kan blandes en ny injeksjonsmasse i aktivatoren. Massen blir injisert fra agitatorene via injeksjonspumpene (Hognestad et al., 2010).

### ***Injeksjonspumper***

Det skal minimum kunne injiseres i 3 separate injeksjonshull samtidig på samme stuff. Injeksjonspumpene må kunne pumpe 80 l/min ved et injeksjonstrykk på 25 bar og 20 l/min ved et injeksjonstrykk på 100 bar. Hvor høyt trykk pumpen må kunne pumpe varierer, men pumpen må som hovedregel være i stand til å yte maksimalt ønsket trykk, det vil si opp mot

100 bar. I tillegg må pumpene være designet for å pumpe partikler med  $d_{\text{maks}} = 5 \text{ mm}$  (Statens Vegvesen, 2015). Siden en pumpe sjeldent kan holde både høyt trykk og høy flyt vil flyten reduseres når trykket øker (Gothäll og Stille, 2009).

Stempelet i de aktuelle pumpene som ble brukt ved feltarbeidet er  $\text{Ø}85 \text{ mm}$ . En slik pumpe kan pumpe en masse hvor  $d_{\text{maks}} = 8 \text{ mm}$ . Ved et trykk på 100 bar vil pumpen kunne pumpe 10 l / min, 20 l / min ved 63 bar og 40 l / min ved 35 bar, se Figur 2.17 (Häny AG, 2018).



Figur 2.17 Til injeksjon ble det brukt en pumpe hvor stempelet er  $\text{Ø}85 \text{ mm}$ . Ved økt mottrykk synker kapasiteten til injeksjonspumpen. (Häny AG, 2018).

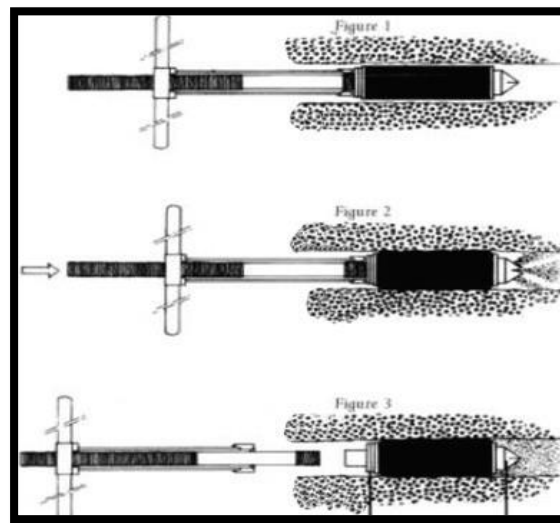
Fra arbeiderne ble det opplyst om at det normalt settes en maksimal flytgrense, for eksempel 25 l / min, og et pumpetrykk som er det samme som stoppkriteriet, for eksempel 80 bar. Pumpen vil da i praksis pumpe helt til det ikke er mulig å få inn mer masse ved bruk av et injeksjonstrykk på 80 bar (Solomon og Ansatte hos Implenia, 2017).

### **Slanger og koblinger**

Slangene og koblingene som blir brukt må tåle injeksjonstrykket som påføres. Slangene bør minimum ha en indre diameter på 1,9 cm. Ved en mindre diameter så kan motstanden bli stor slik at trykket og flyten reduseres. I tillegg kan massen separeres i slangene dersom diameteren er liten (Hognestad et al., 2010).

### *Injeksjonsstav og pakker*

Injeksjonsstaven er bindepunktet mellom slangen som leder masse fra injeksjonspumpen og pakkeren. Pakkeren er spent fast 1 – 5 m inni injeksjonshullet (Statens Vegvesen, 2015). Hvordan pakkeren er spent fast varierer, men en engangspakker blir dyttet inn i injeksjonshullet for så bli spent fast i borehullet ved at den blir utvidet slik at friksjonen øker. Når injeksjonen er ferdig låses pakkeren fast med en låseskive, injeksjonsstaven skrues av og pakkeren blir stående igjen i injeksjonshullet (Figur 2.18) (Hognestad et al., 2010). Fordelen med å bruke en engangspakker er at det kan injiseres med høyt trykk uten at den injiserte massen strømmer tilbake når pumpingen avsluttes (Tunbrigde et al., 2014).



*Figur 2.18 1: Pakkeren monteres, og festes i hullet. 2: Injeksjonsmassen injiseres. 3: Injeksjonsstaven skrues av, og pakkeren står igjen i hullet (Hognestad et al., 2010).*



*Figur 2.19 En 30 cm lang engangspakker.*

En risiko ved injeksjon er at det blir brukt et så høyt trykk slik at pakkeren og injeksjonsstaven kan løsne fra selve hullet, og bli skutt ut. (Anvik og Kalberg, 2006). For å



unngå at injeksjonsstaven og pakkeren fører til skade på personell og utstyr festes injeksjonsstavene til hverandre med kjetting (Figur 2.20) (Hognestad et al., 2010).



Figur 2.20 Injeksjonsstavene er festet til hverandre for å redusere konsekvensene dersom pakkeren løsner i injeksjonshullet.

## 2.4 Q – systemet

Q -systemet brukes for å klassifisere en bergmasse rundt en tunnel eller et bergrom, og bergmassens Q – verdi regnes ut fra Formel 2.6 (NGI, 2013).

$$Q = \frac{RQD}{J_n} * \frac{J_r}{J_a} * \frac{J_w}{SRF} \quad \text{Formel 2.6}$$

RQD = Oppsprekningsfaktor.  $J_n$  = Antall sprekkesett.  $J_r$  = Sprekkeruhetstall.  $J_a$  = Tall for sprekkefylling.  $J_w$  = Sprekkevanntall. SRF = Spenningsfaktor (Stress reduction factor) (NGI, 2013).

RQD beskriver hvor oppsprukket en bergmasse er. I en svært oppsprukket bergmasse er RQD lav og i en lite oppsprukket bergmasse er RQD høy.  $J_n$  tar for seg antall sprekkesett. Ved få sprekkesett er  $J_n$  lav og ved mange sprekkesett er  $J_n$  høy.  $J_r$  tar for seg sprekkeruhetstallet. Dersom sprekkeveggene er røe får  $J_r$  en høy verdi og dersom sprekkeveggen er glatte får  $J_r$  en

lav verdi.  $J_a$  beskriver sprekkefylling. Dersom sprekkeveggene er i kontakt og sammenvokst med for eksempel kvarts er  $J_a$  lav, men dersom sprekkeene er åpne og det er soner med for eksempel leire i sprekkeene er  $J_n$  høy.  $J_w$  tar for seg vann i sprekkeene. Ved tørt berg er  $J_w$  høy, men dersom det er stort vannsig får  $J_w$  en lav verdi. SRF tar for seg spenningsfaktoren. Ved store anisotropiske spenninger og / eller svakhetssoner som krysser berget får SRF en høy verdi, men dersom det er gunstige og isotropiske spenninger er SRF lav (NGI, 2013).

Avhengig av de 6 forskjellige parameterene får bergmassen en  $Q$  – verdi på mellom 0,001 til 400 +. En bergmasse med en lav  $Q$  – verdig er generelt en dårlig bergmasse, mens en bergmasse med en høy  $Q$  – verdi er en god bergmasse (NGI, 2013).

Barton (2007) hevder at bergmassens  $Q$  – verdi hypotetisk sett øker som følge av forinjeksjon siden  $RQD$ ,  $J_r$ , og  $J_w$  øker, mens  $J_n$  og  $J_a$  reduseres.

## 2.5 Fenomenet hydraulisk jekking

Davik et al. (2002) definerer hydraulisk jekking med: «Oppsprekking av grunnen forårsaket av at vann eller injeksjonsmasse injiseres under trykk som er høyere enn den lokale strekkfastheten og det lokale omgivende trykket» (s. 105). Som følge av hydraulisk jekking så utvides sprekkeåpningen (Davik et al., 2002).

Det er et diskutert tema om Hydraulisk jekking er ønskelig eller ikke i forbindelse med sementbasert forinjeksjon (Davik et al., 2002; Hognestad et al., 2010; Klüver og Kveen, 2004; Rafi et al., 2016; Stille, 2015). På grunn av den hydrogeologiske situasjonen med høyt vanntrykk i kombinasjon med en god bergmasse har bruk av høyt injeksjonstrykk gitt gode resultater i norske tunneler (Rafi et al., 2016).

I dette kapittelet gjennomgås de positive og negative sidene ved hydraulisk jekking. Hvordan og hvorfor hydraulisk jekking kan oppstå, og hvordan det er mulig å tolke om hydraulisk jekking har forekommet i bergmassen rundt de forskjellige injeksjonshullene.

### 2.5.1 *Tvinge injeksjonsmassen inn i sprekkeene*

I tillegg til å overgå grunnvannstrykket er det avgjørende at injeksjonstrykket overkommer sprekkes motstand mot å la seg bli injisert. Sprekkes motstand avhenger av sprekkeåpning, -ruhet, -orientering, -innfylling, vanntrykk og in-situ spenninger (Klüver og Kveen, 2004). Ved for eksempel høyt vanntrykk, innfylling av leire i sprekken og liten sprekkeåpning bør

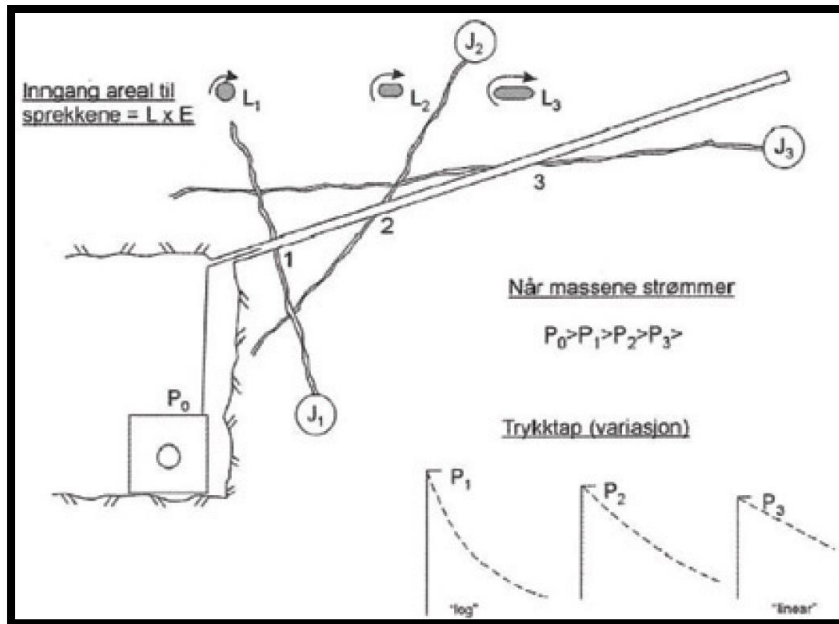
det brukes et høyt injeksjonstrykk for å tvinge injeksjonsmassen inn i sprekkene (Hognestad et al., 2010).

Injeksjonsmassen beveger seg minste motstands vei og fyller derfor sprekkene med størst sprekkeåpning først (Barton, 2002). Når disse sprekkene er fylt opp kan det være behov for å «åpne» opp fjellet ved å utvide sprekkene med mindre sprekkeåpning slik at injeksjonsmassen lettere trenger inn i disse sprekkene. Vanligvis blir ikke alt rommet i den utvidede sprekken fylt opp med injeksjonsmasse. Som følge av at alt rommet ikke blir fylt så kan hydraulisk jekking føre til at den hydrauliske konduktiviteten etter injeksjonen er lik eller høyere enn hva den opprinnelig var (Davik et al., 2002).

### ***Trykkreduksjon med økende avstand***

Når injeksjonsmassen trenger lengre inn i sprekkene oppstår det flere kontaktpunkter mellom injeksjonsmassen og sprekkeveggene. Som følge av dette øker motstanden og fronten av injeksjonsmassen stopper opp når motstanden blir større enn injeksjonstrykket. For å få presset injeksjonsmassen videre inn i den aktuelle sprekken må det brukes et høyere injeksjonstrykk (Lombardi og Deere, 1993).

I et forsøk av Tunbrigde et al. (2014) ble det funnet ut at injeksjonstrykket faller med ca. 5 % fra injeksjonspumpen til starten av injeksjonshullet. Fra injeksjonshullet og inn i sprekkene faller trykket markant med økt avstand avhengig av vinkelen mellom injeksjonshullet og sprekkene. For en sprekk som står vinkelrett ( $90^\circ$ ) på injeksjonshullet er trykkfallet størst, og etter en avstand på 1 m fra injeksjonshullet har trykket falt med 40 – 80 %. For sprekkene som går tilnærmet parallelt med injeksjonshullet er trykkreduksjonen mindre, se Figur 2.21 (Barton, 2002).



Figur 2.21 Trykket til injeksjonsmassen avtar med økt avstand fra injeksjonshullet (Barton, 2002).

### Trykkreduksjon på grunn av røe sprekkevegger

I en studie av Jeon et al. (2010) ble det sett på hvor stort injeksjonstrykket må være for å ha en konstant flyt på 3 l / min i sprekker med forskjellige sprekkeåpninger og sprekkeruheter (JRC).

I sprekke med en sprekkeåpning større enn 400  $\mu\text{m}$  så har sprekkeruheten liten påvirkning på hvilke injeksjonstrykk som må benyttes for å ha konstant flyt på 3 l / min. For sprekken hvor sprekkeåpningen er 300  $\mu\text{m}$  er det tydelig at sprekkeruheten har stor påvirkning på nødvendig injeksjonstrykk for å ha konstant flyt. I en glatt sprekke (JRC = 2) så må det brukes et injeksjonstrykk på 2,29 bar for å ha konstant flyt på 3 l / min, mens i en veldig grov sprekke (JRC = 20) så må det brukes et injeksjonstrykk på 5,01 bar, se Tabell 2-4. I de mindre og ruere sprekke så må det da brukes et høyere injeksjonstrykk for å ha konstant strømming (Jeon et al., 2010).

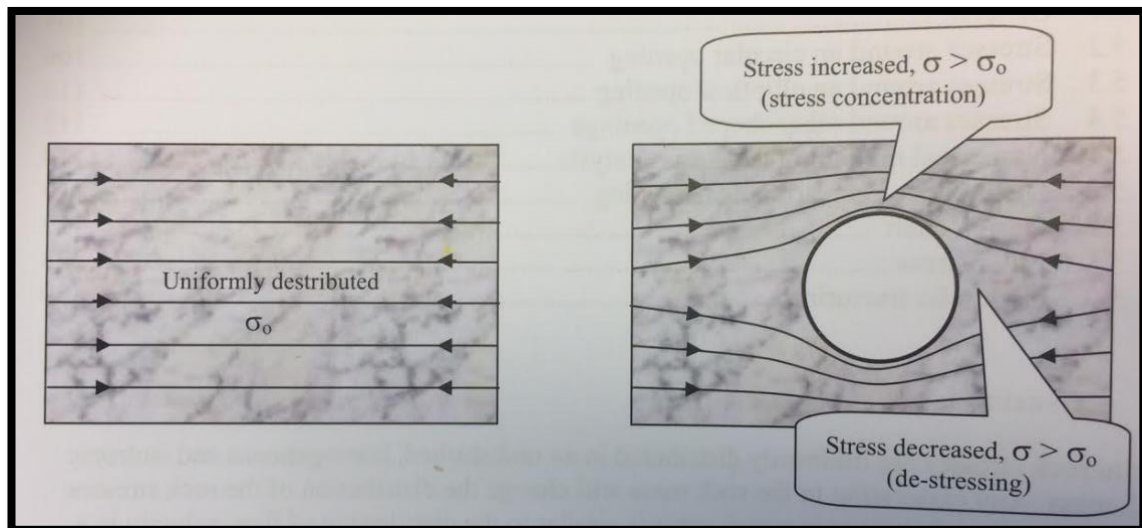


Tabell 2-4 Nødvendig injeksjonstrykk (bar) for å ha en konstant flyt på 3 l / min i forskjellige sprekker med ulik sprekkeåpning og sprekkeruheter. Modifisert etter Jeon et al. (2010).

JRC Sprekke- åpning (µm)	2 (Injek.trykk (bar))	8 (Injek.trykk (bar))	14 (Injek.trykk (bar))	20 (Injek.trykk (bar))
300	2,39	3,06	3,71	5,01
400	1,21	1,28	1,44	1,78
500	0,62	0,65	0,72	0,83
900	0,11	0,11	0,12	0,13

### Lokale spenninger rundt et injeksjonshull

Ved enhver form sprenging, utgravning eller boring endres spennings situasjonen i bergmassen som vist i Figur 2.22. I Figur 2.22 hvor det kun er horisontale spenninger øker spenningene på oversiden av det utgravde området og på sidene reduseres spenningene. Disse nye spenningene kalles for tangentialspenninger. I Figur 2.22 er den største tangentialspenningen ovenfor og nedenfor det utgravde området, mens den minste tangentialspenningen er på sidene. Etter 1 – 1,5 ganger sirkeldiameteren er tangentialspenningene tilnærmet lik in-situ spenningen (Li, 2017).



Figur 2.22 Horisontalspenninger før og etter utgravning i en homogen og isotropisk bergmasse (Li, 2017).

Den største ( $\sigma_{\theta max}$ ) og minste ( $\sigma_{\theta min}$ ) tangentialspenningen regnes ut ved bruk av Kirsh formler (Formel 2.7 og Formel 2.8), og avhenger av den største ( $\sigma_1$ ) og minste hovedspenningen ( $\sigma_3$ ) (Li, 2017).

$$\sigma_{\theta max} = 3\sigma_1 - \sigma_3 \quad \text{Formel 2.7}$$

$$\sigma_{\theta min} = 3\sigma_3 - \sigma_1 \quad \text{Formel 2.8}$$

Ved bruk av Formel 2.8 kan den minste tangentialspenningen overstige den minste hovedspenningen. Dersom det er få sprekker rundt injeksjonshullet så må injeksjonstrykket overstige den minste tangentialspenningen før massen i det hele tatt begynner å trenge inn i de omkringliggende sprekke. For at injeksjonsmassen skal trenge inn og tette de omkringliggende sprekke kan hydraulisk jekking i dette tilfelle være ønskelig (Fjar et al., 2008).

### 2.5.2 *Kontaktpunkter*

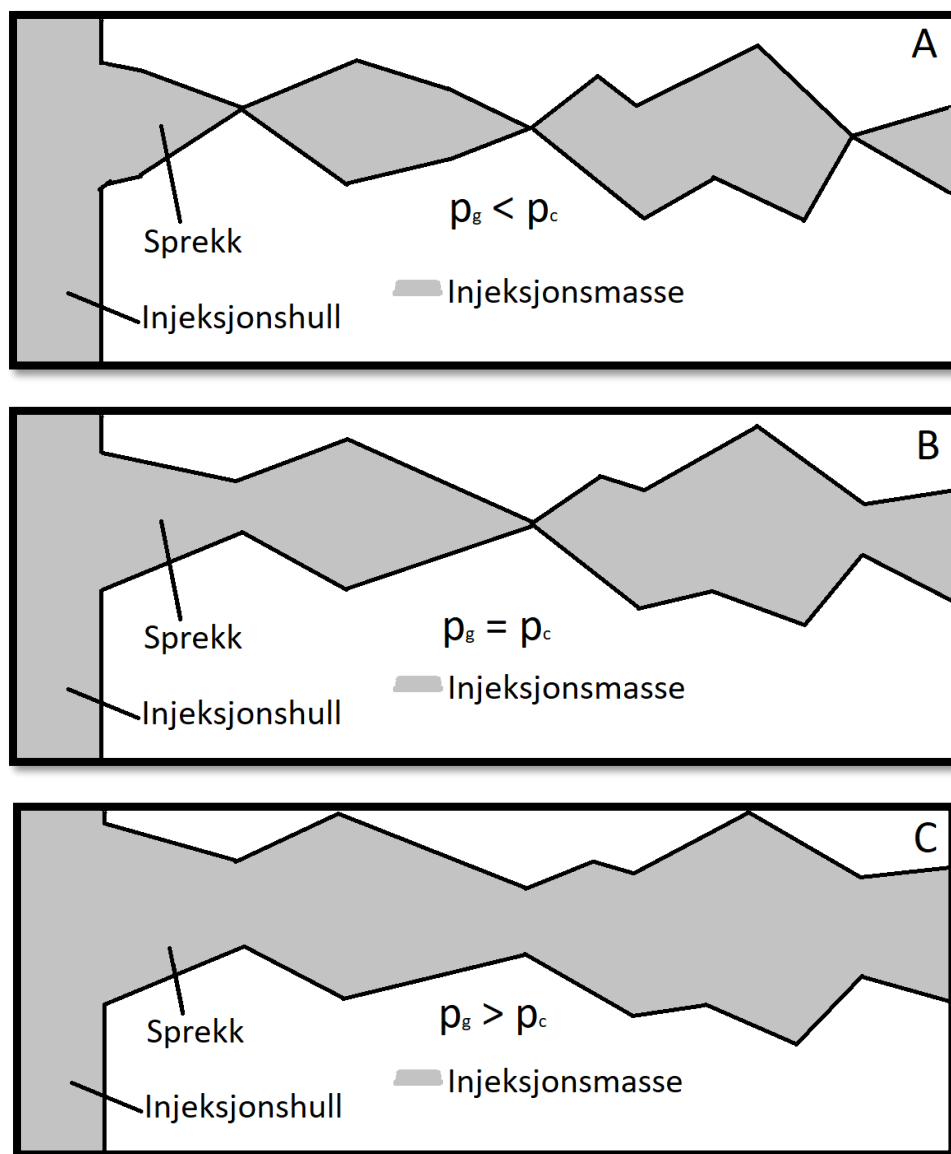
Sprekkeveggene er rye i all skala, og bergmassen er generelt utsatt for kompresjonsspenninger. Over en sprekke overføres spenningene i bergmassen via sprekkeruhetene som er i kontakt med hverandre. Disse sprekkeruhetene som er i kontakt med hverandre kalles for kontaktpunkter, og kontaktpunktene er jevnt fordelt langs hele sprekken. Mellom disse kontaktpunktene er det små hulrom, og sprekken vil derfor være delvis åpen og delvis lukket (Gothäll og Stille, 2009).

Når det blir injisert en injeksjonsmasse inn i en sprekke fyller injeksjonsmassen opp tomrommene. Som en konsekvens av dette så kan injeksjonstrykket ( $p_g$ ) i sprekken overstige det initielle normalstresset ( $p_c$ ) på sprekken. Denne prosessen blir av Gothäll og Stille (2009) listet opp med 3 regimer:

- Lavtrykksregimet.
- Det kritiske regimet.
- Det postkritiske regimet.

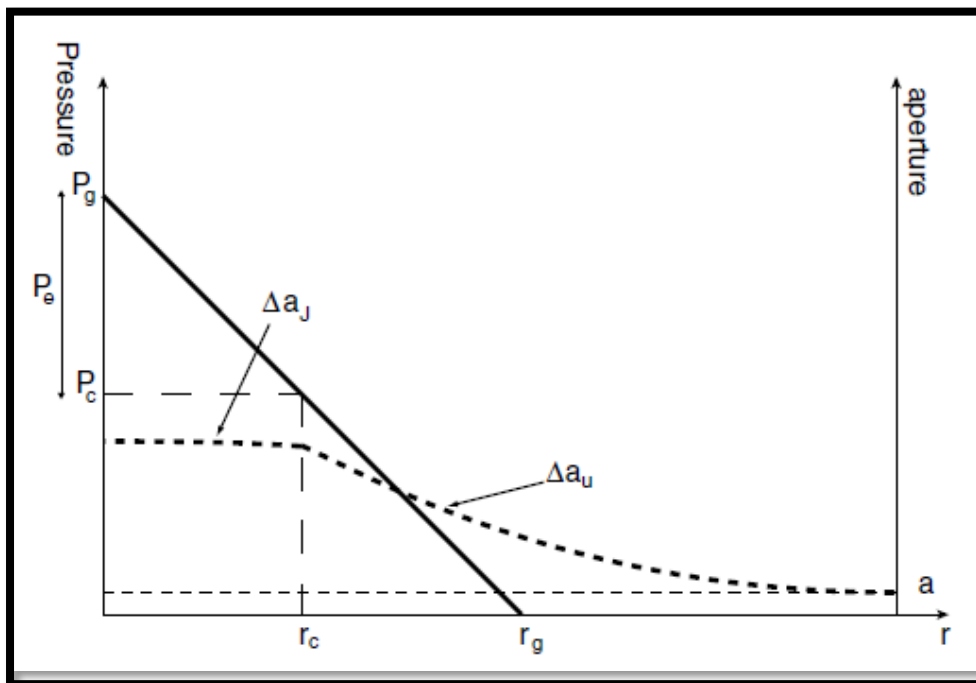
Alle de 3 regimene kan opptre samtidig i en sprekke, men da ved forskjellige områder (Gothäll og Stille, 2009).

Ved lavtrykksregimet har injeksjonsmassen fylt opp tomrommene i sprekken, men det initielle normalstresset er større enn injeksjonstrykket. Sprekken utvides lite, mellom 10 – 20  $\mu\text{m}$ , og utvidelsen blir sett på som neglisjerbar (Figur 2.23 a). Ved det kritiske regimet er injeksjonstrykket og det initielle normalstresset like store. Ved dette regimet utvides sprekken, men enkelte kontaktpunkter er fortsatt i kontakt med hverandre (Figur 2.23 b). Ved det postkritiske regimet er injeksjonstrykket større enn det initielle normalstresset. Som en konsekvens av dette utvides sprekken så mye at kontaktpunktene ikke lenger er i kontakt med hverandre (Figur 2.23 c). Desto større injeksjonstrykket er i forhold til det initielle normalstresset desto større er utvidelsen til sprekkeåpningen (Gothäll og Stille, 2009).



Figur 2.23 Utvidelse av sprekken når injeksjonstrykket ( $p_g$ ) blir større enn det initielle normalstresset på sprekken ( $p_c$ ). A: Lavtrykksregimet ( $p_g < p_c$ ). B: Kritiske regimet ( $p_g = p_c$ ). C: Postkritiske regimet ( $p_g > p_c$ ). Tegningene er basert på teori fra Gothäll og Stille (2009).

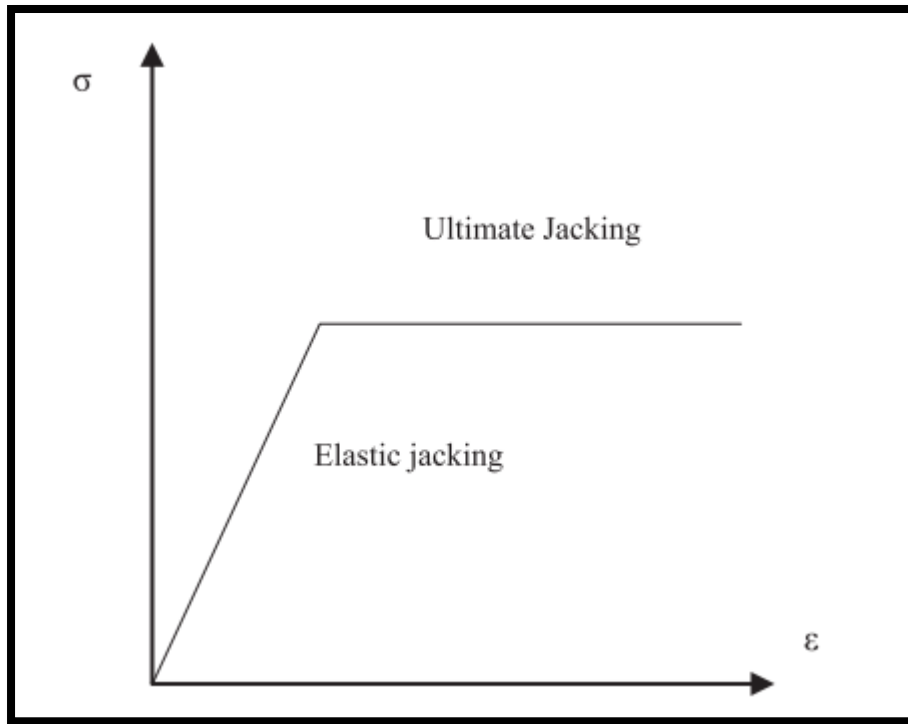
I Figur 2.24 forekommer det postkristisk regimet ( $\Delta a_J$ ) i nærheten av injeksjonshullet, og det er her utvidelsen er størst. Med økt avstand fra injeksjonshullet avtar injeksjonstrykket. Ved  $r_c$  i Figur 2.24 hvor injeksjonstrykket ( $p_g$ ) og det initielle normalstresset ( $p_c$ ) er like store så avtar utvidelsen markant med økt avstand fra injeksjonshullet. Selv om injeksjonsfronten er lokalisert ved  $r_g$  i Figur 2.24 så utvides sprekken noe utenfor dette området som ikke er fylt med injeksjonsmasse (Gothäll og Stille, 2009). Selv om utvidelsen er liten utenfor den injiserte delen av sprekken så kan en liten utvidelse av sprekkeåpningen ha stor betydning for grunnvannstrømningen. Desto større injeksjonstrykket er i forhold til det initielle normalstresset, desto større er utvidelsen og lengden til utvidelsen utenfor den injiserte delen av sprekken (Stille, 2015).



Figur 2.24 Når injeksjonstrykket ( $p_g$ ) er større enn det initielle normalstresset ( $p_c$ ) på sprekken så utvides sprekkeåpningen markant. Sprekken utvides også utenfor det injiserte området ( $r_g$ ) (Gothäll og Stille, 2009).

### 2.5.3 Elastisk- og ultimat jekking

Når en sprekke utvides skiller det mellom elastisk- og ultimat jekking. Elastisk jekking forekommer ved et lavere injeksjonstrykk enn ultimat jekking, og ved elastisk jekking er deformasjonen elastisk. Mens ved ultimat jekking som forekommer ved et høyere injeksjonstrykk så er deformasjonen permanent (se Figur 2.25) (Rafi og Stille, 2013).



Figur 2.25 Ved elastisk jekking går sprekken tilbake til sin opprinnelige sprekkåpning ved avlastningen. Ved økt stress så forekommer ultimat jekking, og deformasjonen er permanent (Rafi og Stille, 2013).

Elastisk jekking er ifølge Stille (2015) kun akseptert i nærheten av injeksjonshullet og forekommer når det effektive injeksjonstrykket (injeksjonstrykket minus vanntrykket) er lik eller større enn vekten av den overliggende bergmassen. Dette er kun tilfelle for horisontale spenninger. Selv om elastisk jekking er forårsaket av elastisk deformasjon så er utvidelsen sjeldent reversibel. Dette kommer av at pakkeren i injeksjonshullet vil holde massen på plass og trykket i sprekken opp etter at injeksjonen er avsluttet. Elastisk jekking bør derfor bli sett på som en prosess forårsaket av elastisk deformasjon fremfor at elastisk jekking er reversibelt. Ultimat jekking blir sett på som en ukontrollert oppløftning av bergmassen og forekommer når det effektive injeksjonstrykket er 3 ganger større enn vekten av den overliggende bergmassen for horisontale sprekker. Elastisk og ultimat jekking av vertikale sprekker avhenger av normalspenningen på sprekken (Stille, 2015).

#### 2.5.4 *Sprekkeorientering*

Når en horisontal sprekk jekkes så er utvidelsen i vertikal retning, og når en vertikal sprekk jekkes så er utvidelsen i horisontal retning (Stille, 2015).

På grunn av tektoniske spenninger er det generelt høye horisontalspenninger i dagen i Norge, og den minste hovedspenningen ved overflaten er generelt i vertikal retning. Men denne situasjonen endres med dypet. Med økt dyp øker den vertikale spenningen mer enn de horisontale spenningene, den vertikale spenningen vil derfor ved et gitt dyp overstige den minste horisontalspenningen slik at den minste hovedspenningen blir i horisontal retning fremfor i vertikal retning (Li, 2017).

Økning til den vertikale spenningen med dypet er gitt av Formel 2.9, og økning til den horisontale spenningen med dypet er gitt av Formel 2.10. Ved et gitt dyp er den vertikale spenningen ( $\sigma_v$ ) avhengig av  $h$  = bergoverdekning (m),  $\rho$  = tettheten til den overliggende bergmassen ( $\text{kg/m}^3$ ) og  $g$  = gravitasjonsakselerasjonen ( $9,81 \text{ m/s}^2$ ). Ved det samme dypet er den horisontale spenningen ( $\sigma_h$ ) avhengig av den vertikale spenningen og Poisson's forholdstall. Poisson's forholdstall varierer fra bergart til bergart. For mange sedimentære bergarter er Poisson's forholdstall lik 0,25. For granitter og gneisen er Poisson's forholdstall generelt lavere (Li, 2017).

$$\sigma_v = \rho * h * g \quad \text{Formel 2.9}$$

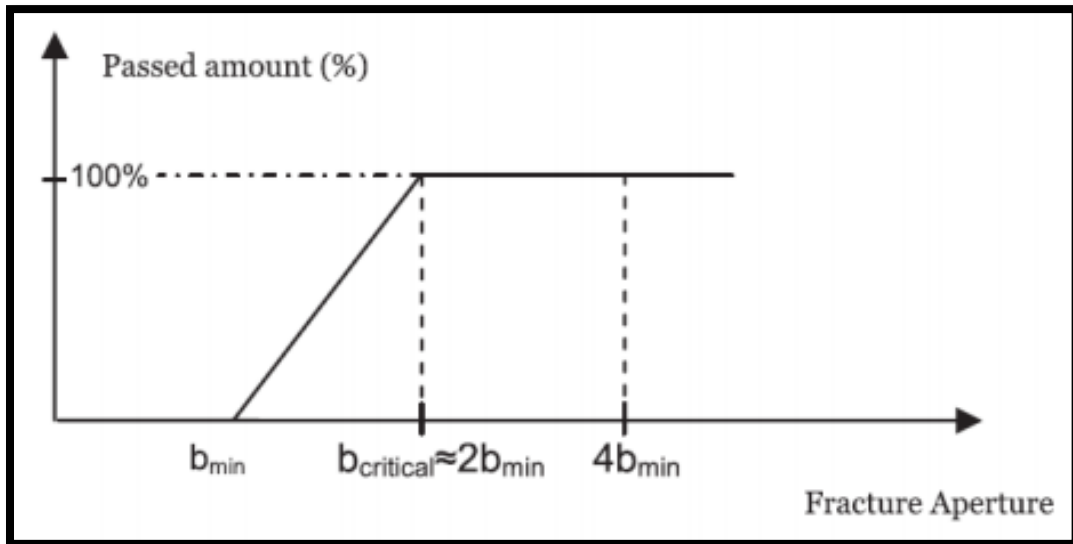
$$\sigma_h = \frac{\nu}{1 - \nu} * \sigma_v \quad \text{Formel 2.10}$$

### 2.5.5 *Konsekvenser og oppsummering av hydraulisk jekking*

Ifølge Barton (2002) er jekking ønskelig i nærheten av injeksjonshullet på grunn av at sprekkene utvides. Forinjeksjon med høyt trykk blir sett på som en kontrollert sprekkåpningsprosess og jekking fører til at det oppstår bedre kontakt mellom injeksjonshullet, kanaler og sprekkene som skal injiseres (Barton, 2002). I tillegg mener Klüver og Kveen (2004) at massen lettere trenger inn i sprekkene ved bruk av høyt trykk, og ifølge Rafi et al. (2016) kan høyt injeksjonstrykk gjøre arbeidet mer tidseffektivt på grunn av at flyten til injeksjonsmassen øker.

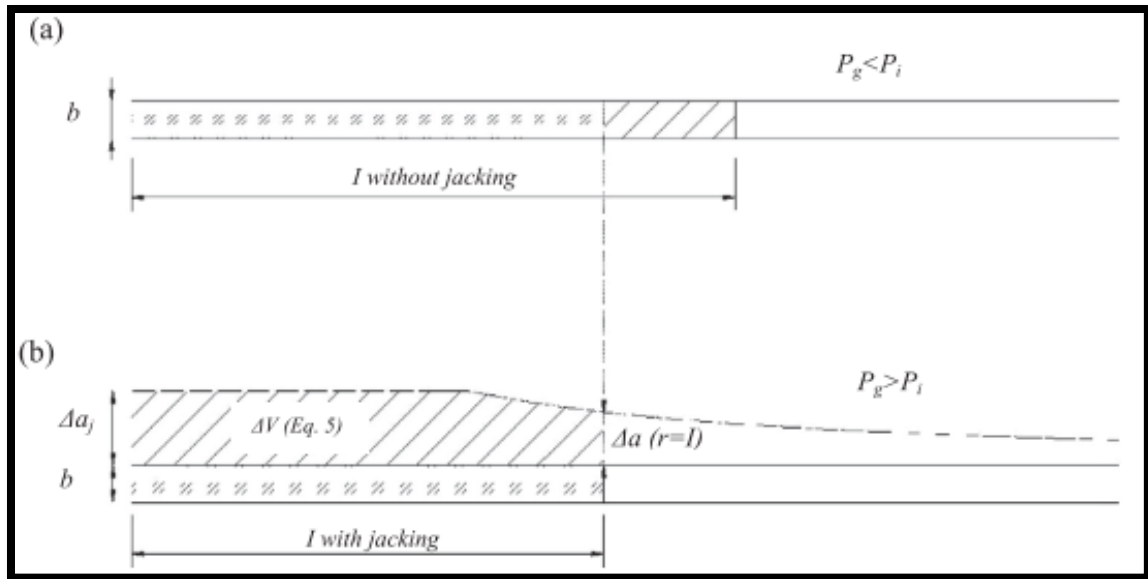
Ved jekking er det hovedsakelig sprekkene med størst sprekkåpning som utvides, mens sprekkene med mindre sprekkåpning blir presset sammen uten å bli lukket. Som en konsekvens av at de mindre sprekkåpningene blir presset sammen så kan det være utfordrende for injeksjonsmassen å trenge inn i og tette disse sprekkene (Stille, 2015).

I Figur 2.26 hvor den minste sprekkeåpningen ( $b_{\min}$ ) som injeksjonsmassen kan trenge inn i kan en utvidelse slik at sprekkeåpningen blir  $2 \times b_{\min}$  være ønskelig. Ved  $2 \times b_{\min}$  vil 100 % av injeksjonsmassen trenge inn i den aktuelle sprekken. En utvidelse utover  $2 \times b_{\min}$  er derimot lite hensiktsmessig siden det kun fører til at det må brukes mer injeksjonsmasse for å tette den aktuelle sprekken (Rafi og Stille, 2015).

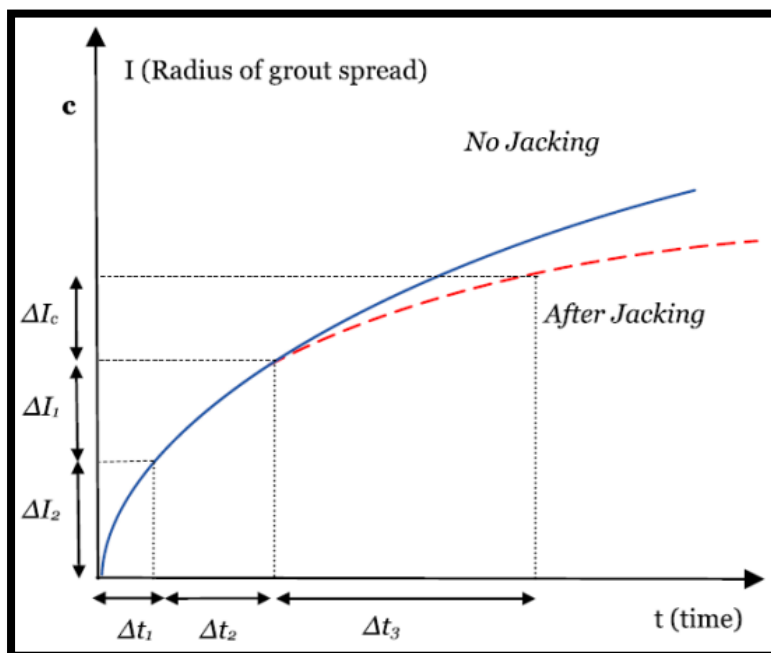


Figur 2.26 En utvidelse av sprekkeåpningen kan være ønskelig for at all injeksjonsmassen skal trenge inn i sprekken.  $b_{\min}$  er den minste sprekkeåpningen injeksjonsmassen kan trenge inn i (Rafi og Stille, 2015).

Når en sprekke utvides så blir sprekkeåpningen til aktuelle sprekken større. Som en konsekvens av en økt sprekkeåpning vil det naturlig nok gå med en større mengde masse for å tette den aktuelle sprekken ved en gitt spredningslengde (Figur 2.27). I tillegg tar lenger tid for injeksjonspumpen å injisere et større sammenlignet med et mindre volum (Figur 2.28). Som en konsekvens av dette fører hydraulisk jekking til økt tids- og masseforbruk (Rafi og Stille, 2015).



Figur 2.27 Ved et gitt injisert volum reduseres spredningen til injeksjonsmassen i en sprekk med jekking (b) i forhold til en sprekk uten jekking (a) (Rafi og Stille, 2015).



Figur 2.28 Ved jekking tar det lengre tid for injeksjonsmassen å nå en gitt radius (Rafi og Stille, 2015)

Spørsmålene ved elastisk jekking er om sprekkåpningen forblir utvidet etter at injeksjonen er avsluttet, og om utvidelsen fører til økt vannlekkasje selv om det er injisert et større volum. Dersom injeksjonsmassen i front (ved  $r_g$  i Figur 2.24) herder og forhindrer flyt videre inn i sprekke for injeksjonen er avsluttet så er det mulig at deformasjonen forblir permanent. Dette kan videre medføre at sprekkåpningen utenfor den injiserte sonen forblir åpen etter at injeksjonen er avsluttet. Det at sprekken utenfor den injiserte sonen er utvidet kan føre til økt



lekkasje (Gothäll og Stille, 2009). Dersom et av nabohullene ikke er blitt injisert så kan injeksjonsmasse fra nabohullet tette denne utvidelsen utenfor den injiserte sonen. Dersom utvidelsen skjer i skjermens siste injeksjonshull så kan ikke injeksjonsmasse fra noen av nabohullene fylle utvidelsen, og utvidelsen kan da være permanent (Rafi et al., 2016).

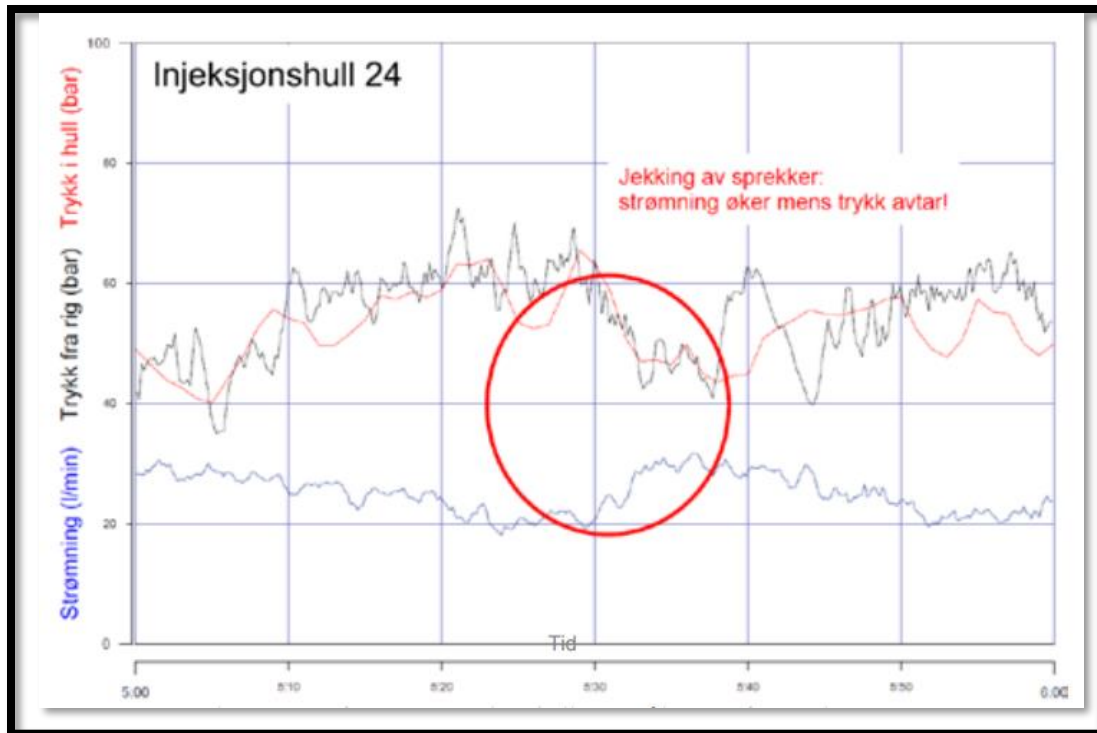
Dersom injeksjonen avsluttes før massen har herdet vil sprekken som er blitt elastisk jekket gå tilbake til sin opprinnelige sprekeåpning. Dette medfører at injeksjonsmassen kan bli presset videre innover i sprekesystemet. En slik hendelse kan øke radiusen til injeksjonsmassen og muligens øke mengde injeksjonsmasse i de injiserte sprekene. Som en konsekvens av dette kan den hydrauliske konduktiviteten til bergmassen i den injiserte sonen bli redusert. Dette gjelder kun dersom lekkasjen forekommer i de sprekene som injeksjonshullene er i kontakt med (Gothäll og Stille, 2009).

#### **2.5.6 Tolkning av hydraulisk jekking fra trykk / flyt grafen**

Hvordan hydraulisk jekking kan tolkes basert på trykk / flyt graf fra injeksjonsforløpet i et injeksjonshull er studert av Tunbrigde et al. (2014), Stille (2015) og Strømsvik og Grøv (2017). Før jekking forekommer så øker injeksjonstrykket. Etter økt injeksjonstrykk er følgende scenarioer indikasjon på hydraulisk jekking (Strømsvik og Grøv, 2017);

- Plutselig reduksjon av trykket mens flyten er stabil.
- Plutselig økning i flyten mens trykket er stabil.
- Plutselig trykkreduksjon og økning i flyten (Figur 2.29).

Ved tolkning av hydraulisk jekking er det i Figur 2.29 sett på de store svingningene. De første 30 minuttene av injeksjonsforløpet så øker injeksjonstrykket og flyten avtar. Deretter faller injeksjonstrykk fra ca. 70 til 45 bar, mens flyten øker fra ca. 20 til 30 l / min over en periode på ca. 5 minutter (rød sirkel i Figur 2.29). Denne hendelsen er av Tunbrigde et al. (2014) tolket som en hendelse med hydraulisk jekking.

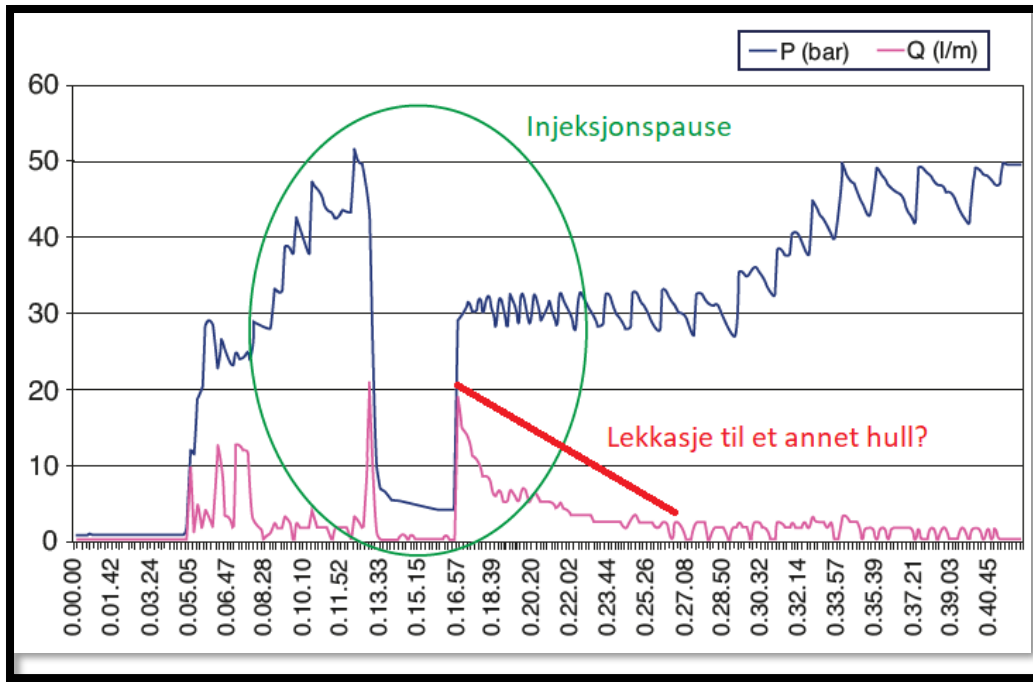


Figur 2.29 Reduksjon av injeksjonstrykket og økning i flyten etter en periode med gradvis trykkreduksjon indikerer at en sprekk er eksponert for hydraulisk jekking (utvidet) (Tunbrigde et al., 2014).

### 2.5.7 Feiltolkning av hydraulisk jekking

I begynnelsen av injeksjonsforløpet er det kun injeksjonshullet som blir fylt opp. Indikasjoner på jekking før hullet er fylt opp skal ikke tolkes som jekking. Dersom injeksjonsmassen får kontakt med et annet injeksjonshull, brønner eller utgang av dagen så kan injeksjonstrykket reduseres og / eller flyten øke. Disse hendelsene skal ikke tolkes som hydraulisk jekking (Stille, 2015).

Den røde linjen i Figur 2.30 er av Bruno (2009) tolket som en indikasjon på at injeksjonsmassen har fått kontakt med et annet hull (Stille, 2015). I dette injeksjonsforløpet øker flyten mens injeksjonstrykket reduseres (Bruno, 2009).



Figur 2.30 Injeksjonsmassen har fått kontakt med et annet hull (modifisert etter Stille (2015) basert på Bruno (2009)).

I tillegg kan det være indikasjoner på hydraulisk jekking rett etter en pause. Ved lengre pauser avhengig av suspensjonens herdetid så har injeksjonsmassen som er i hullet begynt å herde. Når injiseringen fortsetter i dette hullet så kan injeksjonstrykket raskt bygges opp på grunn av den herdede massen. Dersom injeksjonstrykket overkommer motstanden til den herdede massen så vil injeksjonstrykket falle og flyten øke. En slik hendelse skal ikke tolkes som jekking (Warner, 2004). Videre kan injeksjonstrykket falle rett etter en pause på 10 – 15 min. Dette er fordi trykket på pakkeren i løpet av denne pausen kan ha falt med 20 – 25 % fordi sementen kan ha trengt videre inn i de omkringliggende sprekkene (Anvik og Kalberg, 2006).

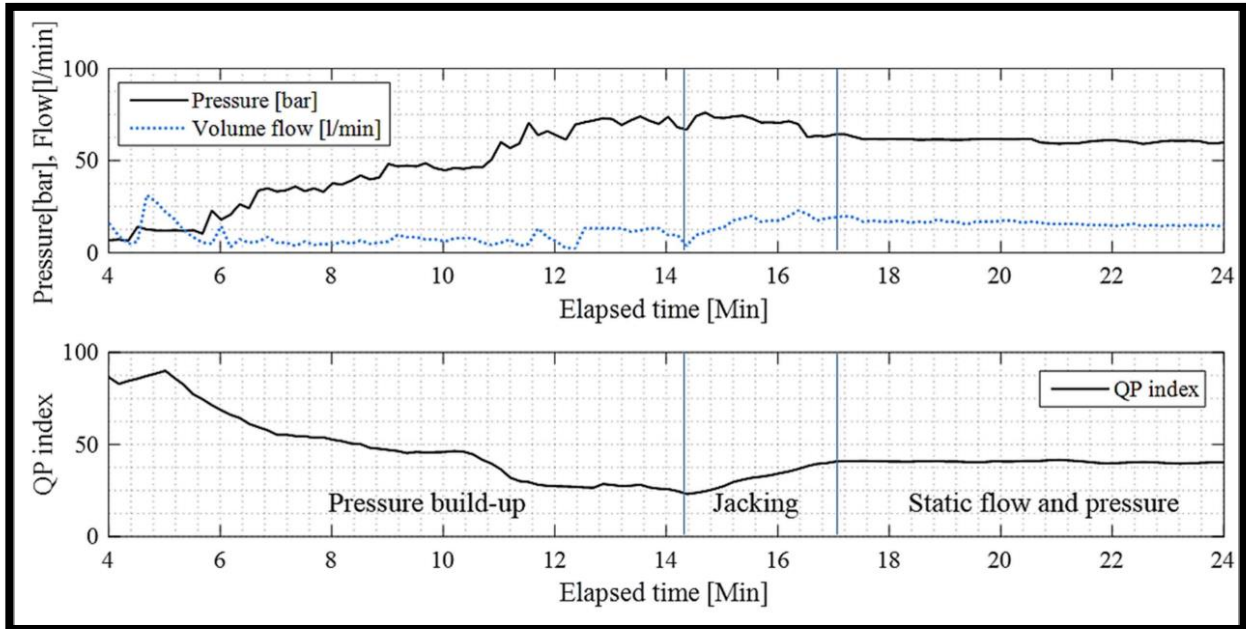
### 2.5.8 Tolkning av hydraulisk jekking med QP – indeksen

For å gi en enklere og mer forståelsesfull sammenheng mellom flyten ( $F$  [l/min]) og injeksjonstrykk ( $P$  [bar]) har Strømsvik og Grøv (2017) introdusert QP - indeksen (Formel 2.11). Med redusert flyt og / eller økt trykk så reduseres QP – indeksen, og ved økt flyt og / eller redusert trykk så øker QP – indeksen (Strømsvik og Grøv, 2017).

$$QP \text{ indeks} = (F - P + 90) * 0,9$$

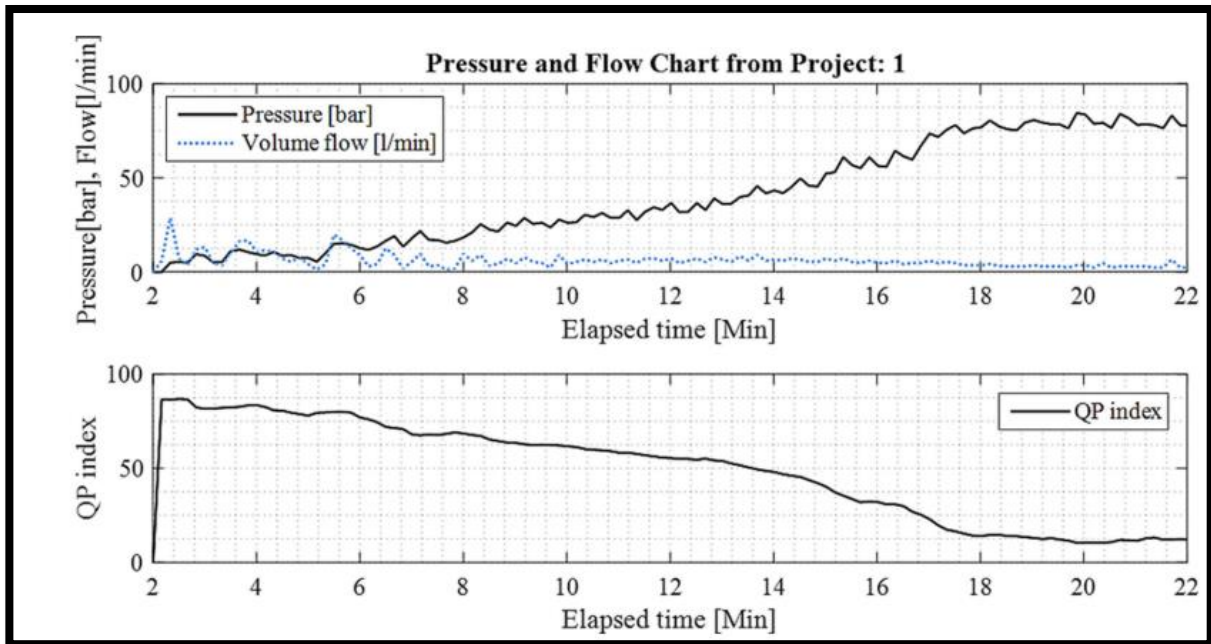
Formel 2.11

Som vist i Figur 2.31 tyder en høy og synkende QP – indeks på gradvis trykkoppbygning. Når QP – indeksen flater ut så tyder det på at injeksjonstrykket og flyten er stabil, og ved gradvis økende QP – indeks så tyder det på en hendelse med hydraulisk jekking (Strømsvik og Grøv, 2017).



Figur 2.31 Tolket injeksjonsforløp med hydraulisk jekking ved hjelp av QP – indeksen (Strømsvik og Grøv, 2017).

I et normalt injeksjonsforløp uten hydraulisk jekking med jevn trykkoppbygning og flytreduksjon reduseres QP – indeksen jevnt slik som vist i Figur 2.32 (Strømsvik og Grøv, 2017).



Figur 2.32 Tolket injeksjonsforløp uten hydraulisk jekking med hjelp av QP – indeksen (Strømsvik og Grøv, 2017).

QP indeksen er pr. dags dato i utviklingsfasen, og den er kun testet ut på logget data fra injeksjonsriggen. Selv om hydraulisk jekking er akseptert mener Strømsvik og Grøv (2017) at operatøren av injeksjonsriggen bør være klar over når hydraulisk jekking forekommer. Ved å bruke QP – indeksen i sanntid på injeksjonsriggen er det lettere for operatøren av injeksjonsriggen å vite når dette skjer fordi det kun er 1 fremfor 2 parametere å følge med på (Strømsvik og Grøv, 2017).

Etter samtale med Eivind Grøv den 20.2.2018 har QP – indeksen byttet navn fordi den lett kan forveksles med Q – systemet. På dette tidspunktet var artikkelen hvor navneendringer er foreslått inne til vurdering. For å unngå misforståelser med grafene som vist i metoden og brukt i resultatene i denne oppgaven så blir navnet QP – indeksen brukt. Det er usikkert hva det nye navnet blir.

## 2.6 RTGC metoden

RTGC står for «Real Time Grouting Control», og er et konsept utviklet for å styre og overvåke spredningen til injeksjonsmassen i løpet av injeksjonsprosessen. Metoden bygger på 30 år med teoretisk og eksperimentell forskning (Stille, 2015). Målet med RTGC er å bruke spredningen til injeksjonsmassen som stoppkriterium. Tanken bak å bruke spredningen til

injeksjonsmassen som stoppkriterium er at injeksjonen blir mer tids- og kostnadseffektiv (Nikolaev, 2015)

Ved å bruke spredningen til injeksjonsmassen som stoppkriterium er hensikten at et hull er ferdig injisert når spredningen i sprekken med minst sprekkeåpning som skal tettes er over en gitt verdi (target value), og før spredningen i sprekken med størst sprekkeåpning når en maksimal verdi (limited value) (Kobayashi et al., 2008). Target value og limited value bør oppnås uten at det forekommer uønsket jekking, eller utgang av injeksjonsmasse i dagen (Stille, 2015). Hva som er ønsket spredningslengde i de minste og største sprekkeene varierer, men som hovedregel må bergmassen mellom injeksjonshullene tettes for at det skal oppnås en tett nok sone mellom hullene. For at de minste sprekkeene mellom injeksjonshullene skal bli fylt med injeksjonsmasse må target value minimum være 50 % av avstanden mellom injeksjonshullene, men for å ha en god margin bør target value settes til 70 %. Spredningen til injeksjonsmassen i de største sprekkeene må være større enn den nødvendige tykkelsen til tunnelskjermen, men ikke så lang at det blir utgang av injeksjonsmasse i dagen eller andre uønskede steder. Hva som er nødvendig tykkelse til en tunnelskjerm varierer, men på et generelt grunnlag bør limited value være mellom 8 – 10 m (Holmberg et al., 2013; Stille, 2015).

Ved praktisk bruk deles RTGC metoden inn i fase 1 og fase 2. Hensikten med fase 1 er å finne den faktiske spredningen til injeksjonsmassen over en gitt tid. Den faktiske spredningen over en gitt tid kan man enten finne ved å injisere ett eller flere hull ferdig, for så å analysere resultatene fra disse, eller ved å injisere en liten del av injeksjonshullet, så analyseres resultatene. Basert på den faktiske spredningen til injeksjonsmassen over en gitt tid fra fase 1 så går fase 2 ut på å forutsi den videre flyten og spredningen til injeksjonsmassen. Dersom den estimerte flyten og spredningen indikerer at jekking kommer til å forekomme og / eller at target value ikke nås, eller at limited value overskrides så må injeksjonsprosedyren endres.

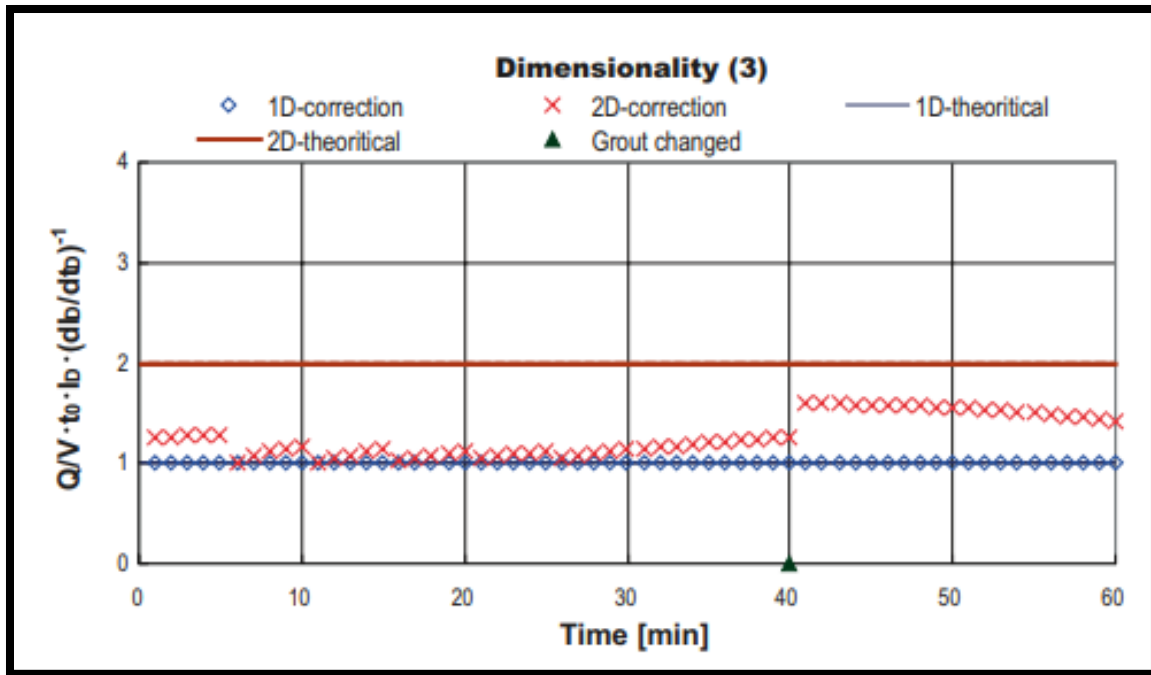
En forutsetning for å kunne bruke RTGC metoden er at trykket og flyten logges i sanntid. I tillegg må injeksjonsmassens kohesjon og viskositet, den minste sprekkeåpningen som skal injiseres, grunnvannstrykket og volumet til injeksjonshullet være kjent. Den største sprekkeåpningen trenger ikke å være kjent siden RTGC metoden kan estimere den (Stille, 2015).

I praksis utføres RTGC metoden med følgende steg (Stille, 2015).

1. Tidsjustering. Injeksjonen startet når injeksjonshullet er fylt. Injeksjonstiden blir da injeksjonstid minus tiden det tar å fylle hullet.
2. Bestemme dimensjonen til sprekke. Om det er 1D eller 2D.
3. Studere strømningsforløpet; Ved å se etter indikasjoner på avvik fra normal oppførsel, for eksempel hydraulisk jekking eller utgang av injeksjonsmasse i dagen. Se kapittel 2.5.6 for hvordan en kan se etter avvik fra normal oppførsel.
4. Anslå den største sprekkeåpningen ved normal oppførsel.
5. Estimere spredningen i den minste og største sprekkeåpningen ved normal oppførsel.
6. Vurdere om spredningen er akseptabel, eller om injeksjonsprosessen må endres.

### 2.6.1 *Bestemme sprekkedimensjonen*

Basert på data av strømmingen til injeksjonsmassen, injisert volum, injeksjonsmassens reologiske egenskaper og det effektive injeksjonstrykket for hvert målepunkt så bestemmer RTGC metoden om sprekkedimensjonen er i 1D eller 2D. Dette utføres ved å sammenligne verdien av hvert loggepunkt mot en indeks. Dersom punktene ligger rundt  $y = 1$  i Figur 2.33 så er sprekkedimensjonen i 1D, men dersom punktene ligger rundt  $y = 2$  så er sprekkedimensjonen i 2D. I enkelte tilfeller er det tydelig at sprekkedimensjonen enten er i 1D eller i 2D, slik som vist i Figur 2.33, mens i andre tilfeller varierer sprekkedimensjon i løpet av injeksjonsforløpet på grunn av bergmassens inhomogene egenskaper (Stille, 2015).



Figur 2.33 Sammenligne faktiske forhold mot en indeks for å bestemme om sprekke dimensjonen er i 1D eller 2D (Kobayashi et al., 2008).

### 2.6.2 Største sprekkeåpning

I RTGC metoden er den største sprekkeåpningen ( $b_{g, maks}$ ) gitt av modellsprekken som beskriver summen av alle sprekkenes. Modellsprekken for en sprekke dimensjon i 1D og 2D er forskjellige. Ved 1D sprekke dimensjon så er modellsprekken definert som  $\sum b_g^2$ , og for 2D så er modellsprekken definert som  $\sum b_g^3$ . Basert på modellsprekken beregner RTGC modellen den største sprekkeåpningen ( $b_{g, maks}$ ) ved å bruke en relevant modell for den sannsynlige sprekke distribusjonen. Med den sannsynlige sprekke distribusjonen så er den største sprekkeåpningen ( $b_{g, maks}$ ) for 1D gitt av Formel 2.12, og for 2D er den gitt av  $b_{g, maks}$  gitt av Formel 2.13 (Stille, 2015).

$$b_{g, maks} = k \sqrt{\sum b_g^2} \quad \text{Formel 2.12}$$

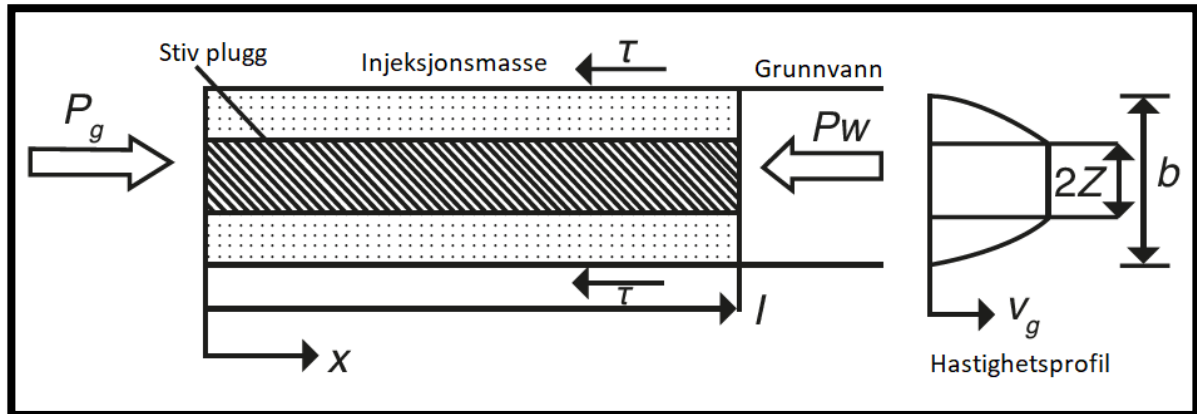
$$b_{g, maks} = k * \sqrt[3]{\sum b_g^3} \quad \text{Formel 2.13}$$

$k$  er definert som sprekkeparameteren. Dersom det kun er 1 sprekke som krysser modellen settes  $k = 1$ , men i en normalt oppsprukken bergmasse så er sprekkeparameteren normalt mellom 0,4 – 0,5 uavhengig av sprekkeåpning. For den største sprekkeåpningen er det antatt at den mest sannsynlige verdien av sprekkeparameteren er 0,8 (Stille, 2015).



### 2.6.3 Spredningslengden til injeksjonsmassen.

Spredningen til injeksjonsmassen i 1D og 2D er avhengig av det effektive injeksjonstrykket ( $\Delta P = P_g - P_w$ ). Som vist i Figur 2.34 fungerer grunnvannstrykket mot injeksjonstrykket. Økt grunnvannstrykk vil derfor redusere spredningslengden (Stille, 2015).



Figur 2.34 Injeksjonsmassens spredningslengde for en Bingham's væske avhenger blant annet av det effektive injeksjonstrykket. Modifisert etter Stille (2015).

Ved å vite sprekkeåpningen ( $b$ ), injeksjonstrykket ( $P_g$ ), grunnvannstrykket ( $P_w$ ) og yield verdien ( $\tau_0$ ) til injeksjonsmassen kan den maksimale spredningslengden ( $I_{maks}$ ) til injeksjonsmassen regnes med Formel 2.14 (Hässler, 1991).

$$I_{maks} = \left( \frac{\Delta P}{2\tau_0} \right) * b \quad \text{Formel 2.14}$$

For en masse hvor  $\tau_0 = 1 \text{ Pa}$ ,  $\Delta P = 10 \text{ bar}$ , og  $b = 200 \text{ }\mu\text{m}$ , er den maksimale spredningslengden 100 m. I teorien vil det ta uendelig lang tid å nå 100 m i denne sprekken. Det å bruke uendelig lang tid på å nå den maksimale spredningslengden er lite hensiktsmessig, men det er hensiktsmessig å vite den faktiske spredningen til injeksjonsmassen etter en gitt tid (Gustafson og Stille, 2005).

Den faktiske spredningslengden ( $I$ ) etter en gitt tid ved 1D sprekke­dimensjon er gitt av Formel 2.15 (Gustafson og Stille, 2005).

$$I = \left( \sqrt{\theta^2 + 4\theta} - \theta \right) * I_{max} \quad \text{Formel 2.15}$$

Hvor;

$$\theta_{1D} = \frac{\frac{t}{t_0}}{2\left(0,6 + \frac{t}{t_0}\right)}$$

Hvor;

$$t_0 = \frac{6\Delta P * \mu}{\tau_0^2}$$

$t$  = faktisk injeksjonstid (min),  $\Delta P$  = effektivt injeksjonstrykk (bar),  $\mu$  = injeksjonsmassens viskositet (Pa\*s) og  $\tau_0$  = injeksjonsmassens yield styrke (Pa) (Gustafson og Stille, 2005).

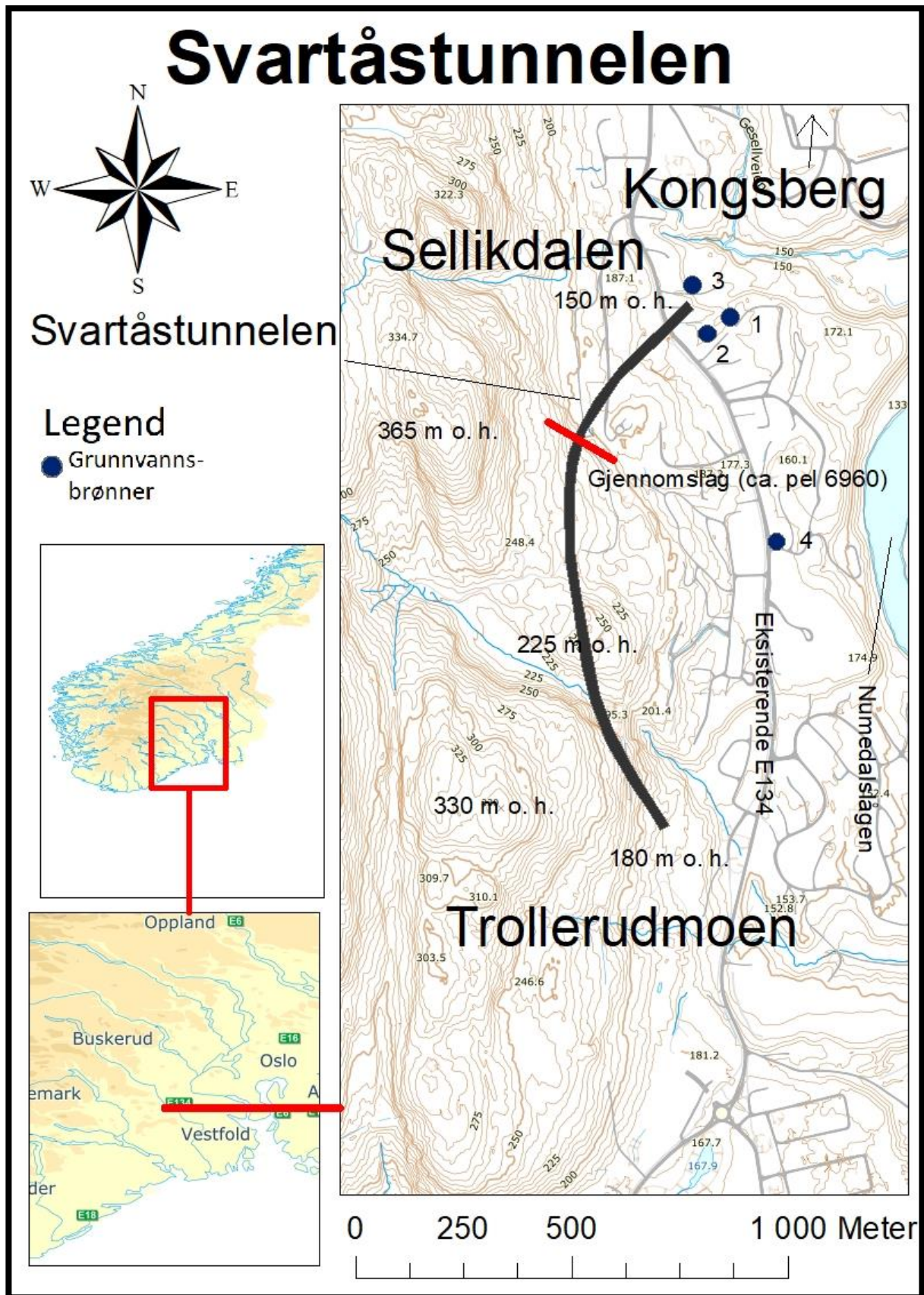
For å finne den faktiske spredningslengden til injeksjonsmassen ved 2D sprekke­dimensjon så brukes den samme fremgangsmåten som er vist i Formel 2.15, men  $\theta_{1D}$  byttes ut med  $\theta_{2D}$  fra Formel 2.16 (Gustafson og Stille, 2005).

$$\theta_{2D} = \frac{\frac{t}{t_0}}{2\left(3 + \frac{t}{t_0}\right)} \quad \text{Formel 2.16}$$

Ved å sette  $\tau_0 = 1$  Pa,  $\Delta P = 10$  bar,  $b = 200$   $\mu\text{m}$   $\mu = 100$  mPa, så er den faktiske spredningslengden til injeksjonsmassen etter 20 min, 8 m ved 1D, og 3,6 m ved 2D. (Gustafson og Stille, 2005).

### **3 Studieområdet – Svartåstunnelen i Kongsberg**

Svartåstunnelen går i slak stigning fra Sellikdalen mot Trollerudmoen, og påhugget ved Sellikdalen ligger 1 - 2 km sør for Kongsberg sentrum i Buskerud. På oversiden av tunnel, mot vest, er det to topper, hvorav toppen markert med 330 m o. h i Figur 3.1 er Svartåsen. Det vestgående løpet ligger derfor nærmest disse toppene. På nedsiden av tunnelen mot øst, renner elven Numedalslågen, og et par hundre meter nordøst for påhugget i Sellikdalen, ligger teknologiparken i Kongsberg.



Figur 3.1 Lokalisering av Svartåstunnelen med Sellikdalen i nord og Trollerudmoen i Sør. Tunnelens lokalisering er tegnet etter Norconsult AS (2015), og plasseringen til grunnvannsbrønnene etter hentet fra Norconsult (2013) og NGU (2018).

### 3.1 Regionalgeologi

Kongsbergområdet tilhører den prekambriske berggrunnen i Norge (grunnfjellet), som igjen en del av det fennoskandiske skjoldet. Det fennoskandiske skjoldet startet sin reise for 3500 mill. år siden, og ble dannet som følge av vulkanisme, orogenese, deformasjon og erosjon. I Sør – Norge ble bergartene som tilhører det fennoskandiske skjoldet dannet for 1700 – 900 mill. år siden, mens i Nord – Norge er bergartene opp til 2900 mill. år gamle. For 1700 – 1500 mill. år siden ble den Gotiske fjellkjeden dannet i Sør – Norge, etterfulgt av den Svekonorvegiske fjellkjeden for 1130 – 900 mill. år siden (Ramberg et al., 2013).

De eldste bergartene i Kongsbergområdet er glimmerskifere og gneiser som ble dannet ved deformasjon og metamorfose for 1600 mill. år siden. Videre er det kartlagt yngre gabbro fra 1500 mill. år siden og yngre granittiske gneiser fra 1400 – 1200 mill. år siden. For ca. 1000 – 1200 mill. år siden var det igjen kraftig deformasjon og metamorfose som smeltet de lokale bergartene. Disse prosessene dannet de yngre granittiske gneisene i området (Jacobsen og Heier, 1978).

Kongsbergområdet ligger rett vest for osloriften, og området ble derfor i stor grad påvirket av prosessene som fant sted i osloriften (Ramberg og Larsen, 1978). Ved dannelse av osloriften ble det dannet sprekker og forkastninger som ble fylt med kalkspatårer, kvartsårer og diabasganger av permisk alder (Nordrum og Bancroft, 2001). I dag er mange av disse sprekke og forkastningene fylt med leire og knust berg, mens berget mellom sprekke og forkastningene, generelt er stabilt og sterkt (Løset, 2006).

Når disse kalkspat- og kvartsårene krysset fahlbånd (soner med jernsulfider, dannet for ca. 1100 mill. år siden), ble det avsatt sølv. Disse sonene med sølv har gitt opphav til sølvgruvene på Kongsberg. Fra disse sølvgruvene har det blitt utvunnet totalt 1350 tonn sølv (Ramberg et al., 2013). Ifølge NGU (2017a), ligger enkelte av disse sølvgruvene kun noen km vest/nordvest for Svartåstunnelen.

## 3.2 Ingeniørgeologiske beskrivelse av Svartåstunnelen

### 3.2.1 *Bergarter og løsmasser*

#### *Bergarter*

Det vestgående løpet er hovedsakelig drevet igjennom amfibollitiske gneis med enkelte mindre soner bestående av granittisk gneis. I tillegg krysser tunnelen en 5 m bred diabasgang (Statens Vegvesen, 2017a).

Amfibolitt er en metamorf bergart som blir dannet ved metamorfose av basalt eller gabbro, og amfibolitt blir ofte funnet i lag med gneis. Granitt er en grovkornet, massiv magmatisk bergart, og en gneis er en metamorf bergart som avhengig av mineralinnhold er metamorfosert fra en magmatisk- (ofte granitt) eller en sedimentær bergart (Corner, 2008). Amfibolitt, granitt og gneis er vanlige bergarter i den norske prekambriske berggrunnen, og de er generelt sterke bergarter (Fossen, 2016a). I en bergmasse bestående av disse bergartene så foregår grunnvannstrømningen i diskontinuitetene i bergmassen (Cramer et al., 2016).

#### *Løsmasser*

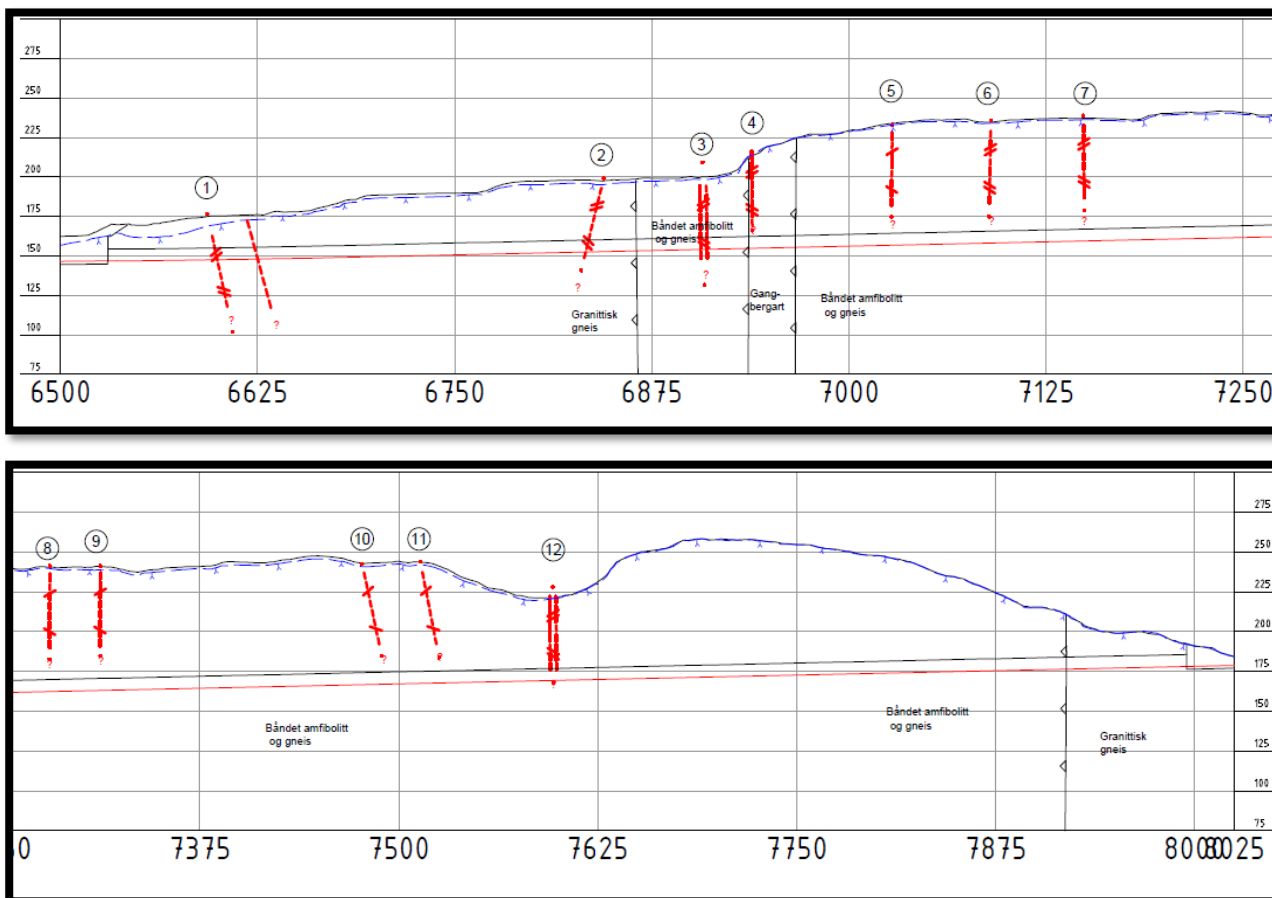
Langs Numedalslågen ved Svartåstunnelen er det et tykt dekke med breelvavsetninger, fra omtrent 133 m o. h. (Lågen) til 180 – 190 m o. h. De første 250 m av tunnelen fra påhugget i Sellikdalen og de første 80 m av tunnelen fra påhugget i Trollerudmoen, ligger innenfor området hvor det kan være slike avsetninger. Ovenfor den resterende delen av tunnelen er det i dagen et stedvis tynt dekke av sedimenter eller bart fjell (NGU, 2017b).

### 3.2.2 *Bergoverdekning*

Bergoverdekningen over det vestgående løpet er hentet fra den «Ingeniørgeologiske rapporten for konkurransegrunnlag» for prosjektet av Norconsult AS (2015).

Fra påhugget ved Sellikdalen (pel 6530) til pel 6585 er bergoverdekningen ca. 6 m. Fra pel 6585 stiger bergoverdekningen til 10 – 11 m ved pel 6610. Fra pel 6610 stiger bergoverdekningen jevnt til 20 m ved pel 6650, og videre til 30 m ved pel 6915. Fra pel 6915 øker bergoverdekningen jevnt til ca. 70 m ved pel 7450. Fra pel 7520 til pel 7600 synker bergoverdekning på grunn av et søkk som ligger ca. 30 m over tunnelen. Fra pel 7600 til pel 7700 øker bergoverdekningen fra 30 m til 70 m, før den så synker jevnt til 50 m ved pel 7840,

og videre til 15 m ved pel 7970 (Se Figur 3.2). De røde linjene i Figur 3.2 er antatte svakhetssoner som ble kartlagt før oppstart av prosjektet (Norconsult AS, 2015).



Figur 3.2 Bergoverdekningen for vestgående tunneløpet. De røde linjene er antatte svakhetssoner basert på geofysiske undersøkelser (Norconsult AS, 2015).

### 3.2.3 Diskontinuiteter

Den dominerende retning for de store forkastningene i Kongsbergsområdet er i nord – sør retning. I tillegg er det enkelte tilfeldige forkastninger i nordvest – sørøst retning og i vest – øst retning (Løset, 2006).

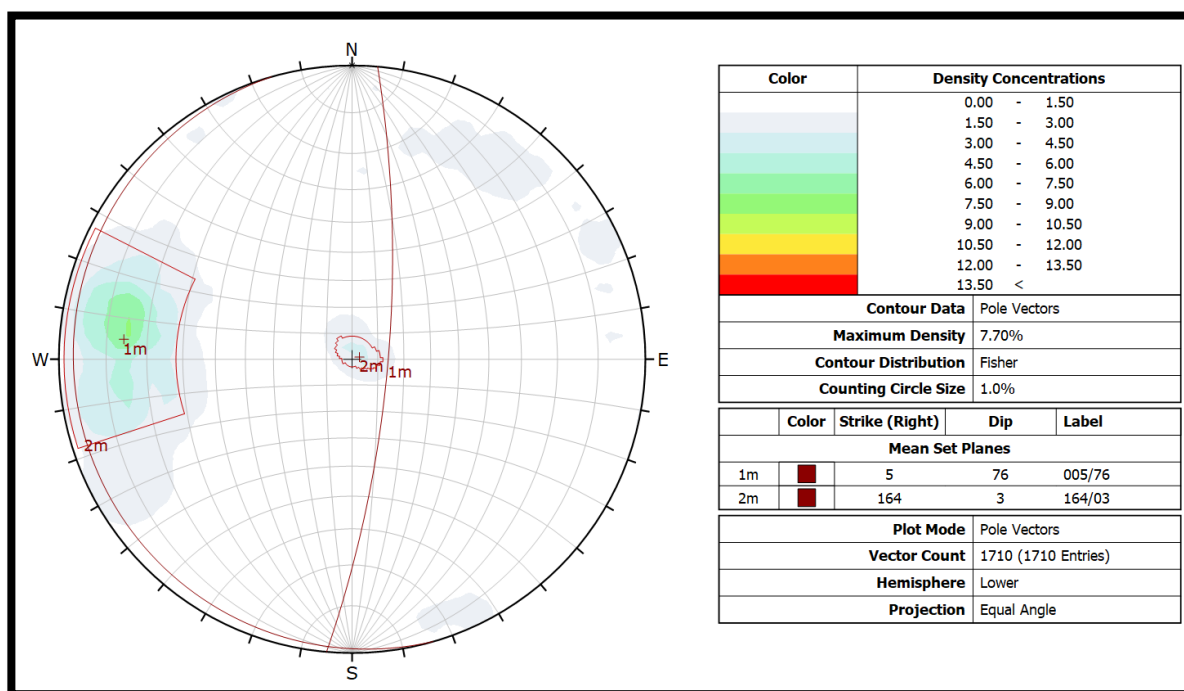
Ved en gjennomgang av den ingeniørgeologiske dokumentasjonen av Statens Vegvesen (2017a) så krysser det vestgående løpet enkelte slepper, 10 svakhetssoner som er smalere enn 1 m og 5 svakhetssoner som er bredere enn 1 m. Enkelte svakhetssonene krysser hele tunneløpene, mens andre kun krysser deler av den. Sleppene og svakhetssonene er generelt jevnt fordelt, men fra pel 6945 til pel 7400 er det ikke kartlagt noen slepper eller svakhetssoner.



### 3.2.4 Seksjonerte sprekkeomener

I det vestgående løpet er det av kontrollingeniørene hos Statens Vegvesen kartlagt 1710 strøk (høyre) / fall målinger (Vedlegg I). For å plote og visualisere sprekkemålingene er programvaren Dips av Rocscience brukt. Ved plotting av polene til sprekkemålingene i Dips blir en klynge hvor den maksimale sprekkekonsentrasjonen er større enn 6 % sett på som signifikant sprekkekonsentrasjon. Mens en sprekkekonsentrasjon mellom 4 – 6 % er en marginal signifikant sprekkekonsentrasjon (Rocscience, 2018). For de punktene hvor sprekkekonsentrasjonen er større enn 4 % blir plottet som et sprekkesett.

Fra stereonetet i Figur 3.3 er det to markante sprekkesett. Strøket og fallet til det mest dominerende sprekkesettet er 005/76, fallet er altså sub-vertikalt. For det mindre dominerende sprekkesettet er strøket og fallet 164/03. I dette sprekkesettet er fallet omtrent horisontalt. I tillegg til de to sprekkesettene er det enkelte mindre sprekkekonsentrasjoner. Felles for disse mindre sprekkekonsentrasjonene er at fallet er sub-vertikalt.

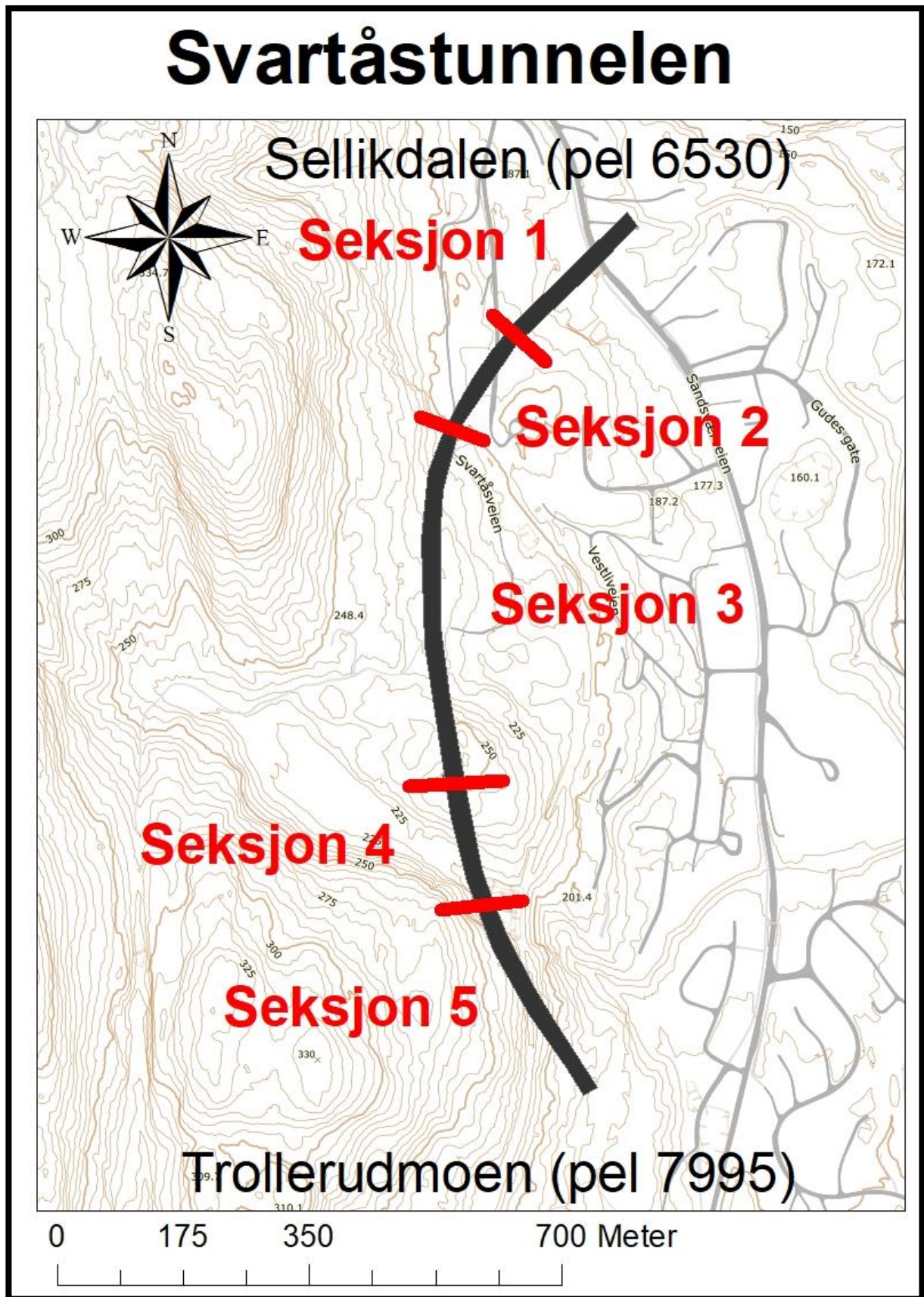


Figur 3.3 Stereonet for strøk (høyre) / fall målingene sprekke i det vestgående løpet.

Disse sprekkesettene er trolig ikke gjeldende for hele tunnelen. For å kunne se om det er noen sammenheng mellom de dominerende sprekkesettene og hydraulisk jekking blir tunnelen på bakgrunn av bergoverdekningen inndelt i 5 ulike tunnelseksjoner. Se inndelingen nedenfor og i Figur 3.4.



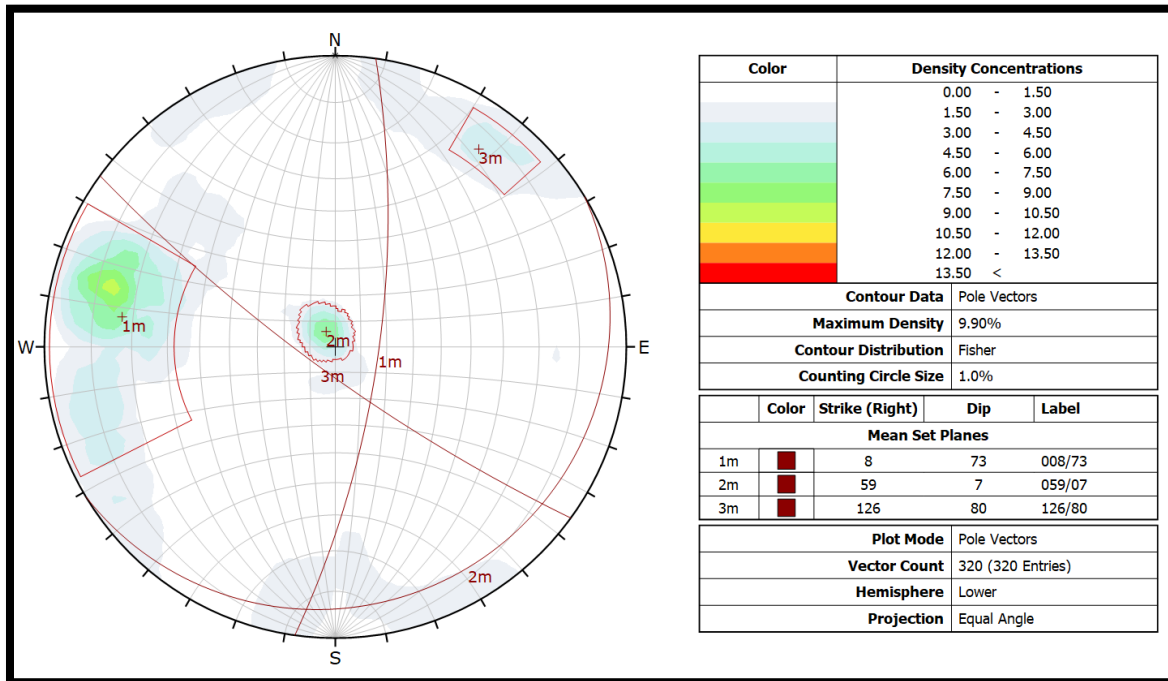
- Seksjon 1. Pel 6530 (påhugget ved Sellikdalen) – 6762
- Seksjon 2. Pel 6762 - 6914
- Seksjon 3. Pel 6914 – 7520
- Seksjon 4. Pel 7520 – 7640
- Seksjon 5. Pel 7640 – 7995 (påhugget ved Trollerudmoen)



Figur 3.4 Inndeling av Svartåstunnelen i 5 seksjoner.

**Seksjon 1. Pel 6530 (påhugget ved Sellikdalen) – 6762**

Fra pel 6530 til pel 6762 er det er det 3 dominerende sprekkese sett basert på 320 strøk/fall målinger. Strøket og fallet til det mest dominerende sprekkese tte er 008/73. For de mindre dominerende sprekkese tte er strøket og fallet til det ene 059/07, mens strøket og fallet til andre mindre dominerende sprekkese tte er 126/80. I tillegg til disse 3 sprekkese tte, er det enkelte tilfeldige sprekkese konsentrasjoner med et sub - vertikalt fall (Figur 3.5).

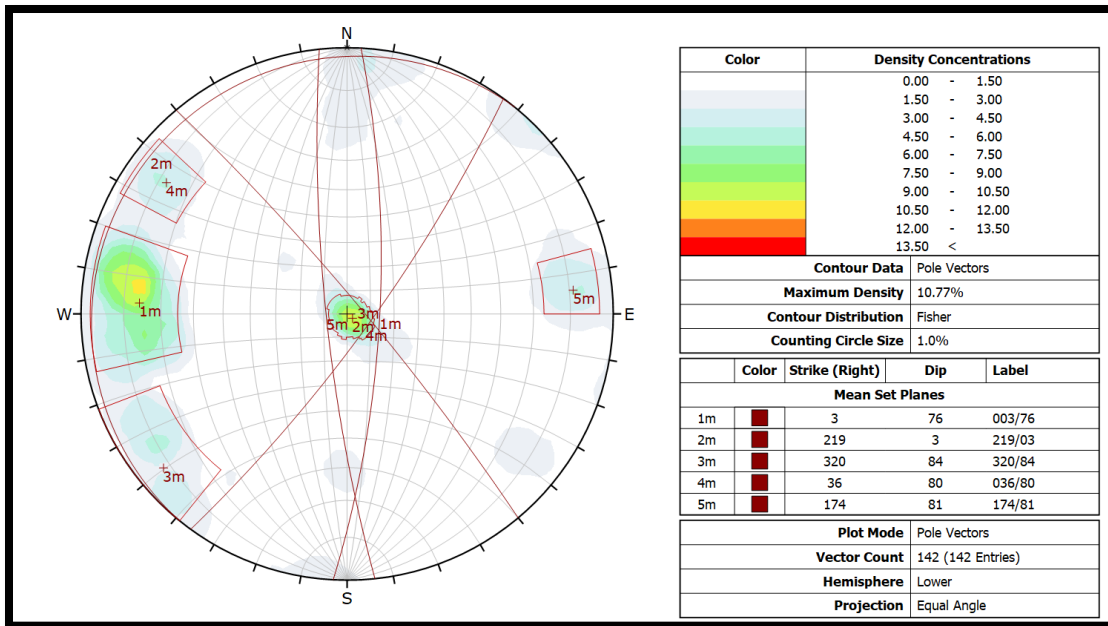


Figur 3.5 Stereonet for strøk (høyre) / fall målingene for sprekke fra seksjon 1 (pel; 6530 – 6762).

**Seksjon 2. Pel 6762 – 6914**

Fra pel 6762 til pel 6914 er det kartlagt 5 sprekkese sett basert på 142 sprekke målinger. Strøket og fallet til de 2 mest dominerende sprekkese tte er 003/76 og 219/03. Fallet til disse sprekkese tte er da sub – vertikalt og horisontalt (Figur 3.6).

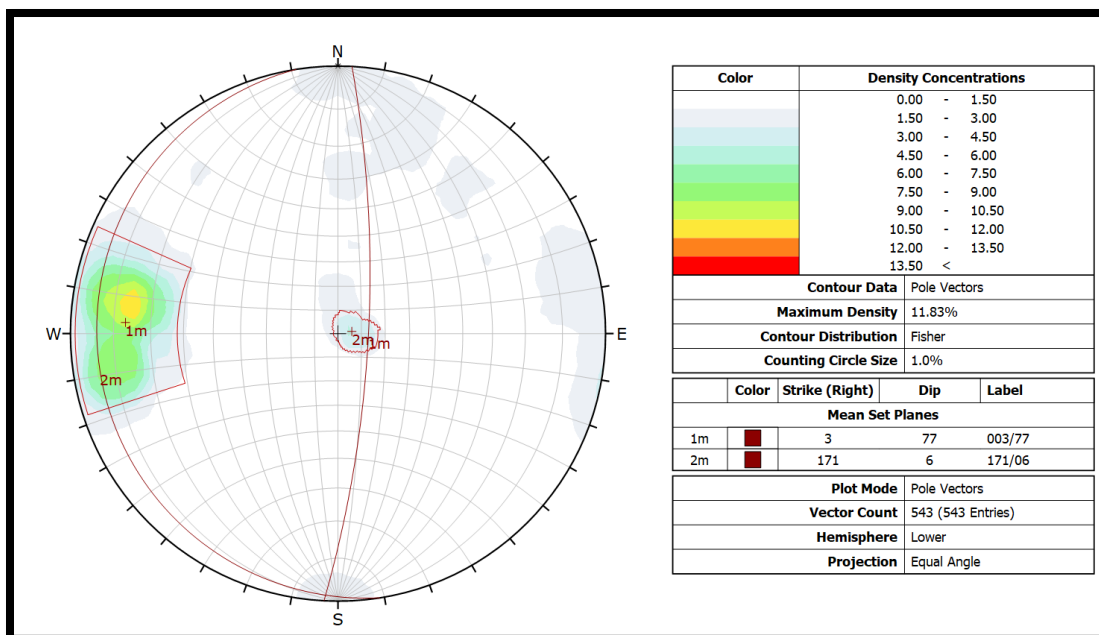
Strøket og fallet til de 3 mindre dominerende sprekkese tte er 320/84, 036/80 og 174/81. I tillegg er det enkelte mindre sprekkese konsentrasjoner hvor fellesnevneren at sprekke har et sub – vertikalt fall (Figur 3.6).



Figur 3.6 Stereonet for strøk (høyre) / fall målingene for sprekke fra seksjon 2 (pel; 6762 – 6914).

### Seksjon 3. Pel 6914 – pel 7520

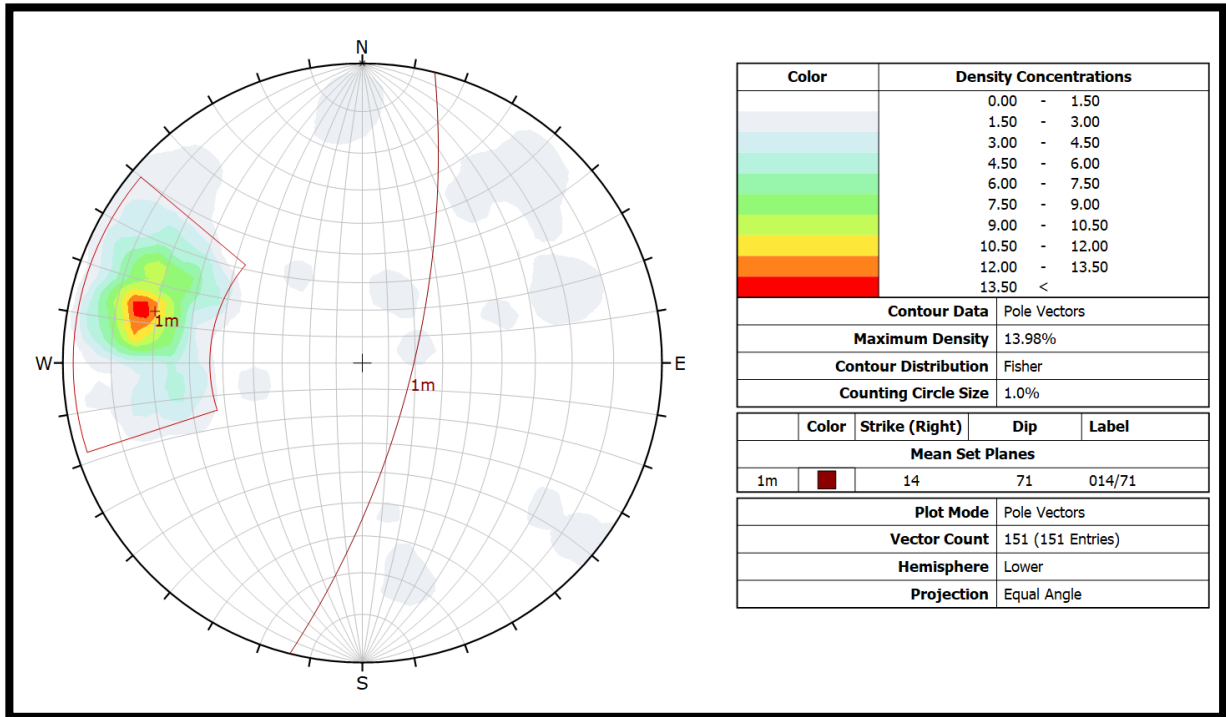
Basert på 543 sprekke målinger det et dominerende og et mindre dominerende sprekkesett fra pel 6914 til 7520. Strøket og fallet til det dominerende sprekkesettet er 003/77. For det mindre dominerende sprekkesettet så er søket og fallet 171/06. I tillegg er det flere tilfeldige sprekker med generelt et sub – vertikalt fall (Figur 3.7).



Figur 3.7 Stereonet for strøk (høyre) / fall målingene for sprekke fra seksjon 3 (pel; 6914 – 7520).

**Seksjon 4. Pel 7520 – pel 7640**

Basert på 151 sprekkemålinger det fra pel 7520 til 7640 et dominerende sprekkesett med et strøk og fall på 014/71. I tillegg til dette dominerende sprekkesettet er det flere tilfeldige sprekker, og fallet til disse tilfeldige sprekke variere fra sub – vertikalt til sub – horisontalt (Figur 3.8).

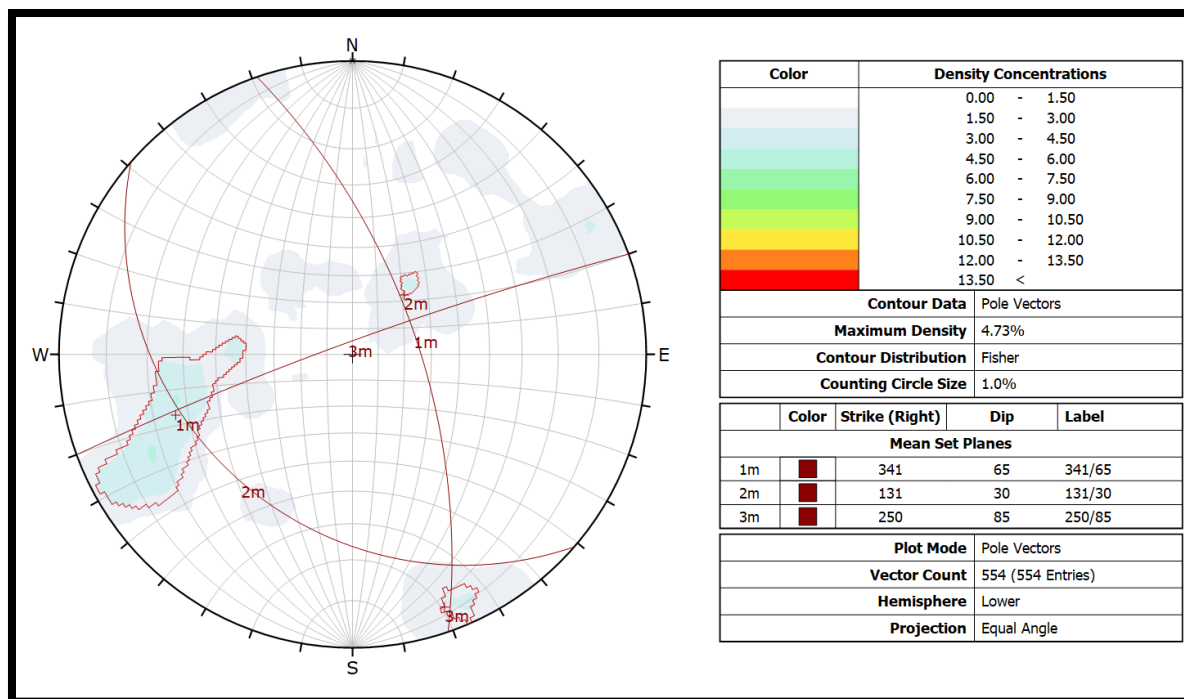


Figur 3.8 Stereonet for strøk (høyre) / fall målingene for sprekke fra seksjon 4 pel: 7520 – 7640).

**Seksjon 5. Pel 7640 – 7995 (påhugget ved Trollerudmoen)**

Fra pel 7640 til 7995 (påhugget ved Trollerudmoen) er det tatt 554 sprekkemålinger, og det er 3 mindre dominerende sprekkesett med et strøk og fall på 341/65, 131/30 og 250/85. I tillegg til disse 3 mindre dominerende sprekkesettene, er det mange tilfeldige sprekker med alt fra vertikalt til horisontalt fall (Figur 3.9).





Figur 3.9 Stereonet for strøk (høyre) / fall målingene for sprekke fra seksjon 5 (7640 – 7995).

Strøket og fallet til det mest dominerende sprekkesettet i de 5 ulike tunnelseksjonene er hovedsakelig nord – sør med et sub – vertikalt fall mot øst. Selv om dette er tilfelle så er det enkelte forskjeller ved at i noen seksjoner så er det et dominerende sprekkesett med et horisontalt fall, og i andre sprekkesett så er det flere tilfeldige sprekker.

### 3.2.5 Lokale bergspenninger

I området rundt eller i Svartåstunnelen er det ikke tatt bergspenningsmålinger, men fra den ingeniørgeologiske beskrivelsen av Norconsult AS (2015) er det i følge Løset (2006) ingen store spenningsproblemer i området. Dette blir videre bekreftet fra den ingeniørgeologiske dokumentasjonen fra Statens Vegvesen (2017a) ved at det ikke er registrert noen hendelser med avskalling eller bergslag i det vestgående løpet.

Siden det ikke er tatt bergspenningsmålinger, er det usikkert hvilken retning største og minste hovedspenning er i. Til tross for dette, er Norge ved overflaten generelt utsatt for høye horisontalspenninger, mens den minste hovedspenningen er i vertikal retning. Fra Figur 2.4 i kapittel 2.1.2 ser det ut som om den største horisontalspenninger i Kongsbergområdet er i øst – vest retning, og at den minste horisontalspenningen er i nord – sør retning. Til tross for dette så enkelte antatte svakhetssoner i nord – sør retning, og varierende topografi som kan endre

retningen til hovedspenningene (se Figur 3.1). På den andre siden så er bergoverdekningen til Svartåstunnelen generelt lav (maks 70 – 80 m) (se, Figur 3.2), og det antas derfor at den minste hovedspenningen er i vertikal retning i berget som tunnelen er drevet igjennom.

### 3.2.6 Grunnvannsnivå

I nærheten av Svartåstunnelen er det registrert grunnvannsnivå i 4 brønner, se Figur 3.1 for plassering av brønnene. Brønn 1, 2 og 3 er lokalisert på nedsiden av påhugget ved Sellikdalen, og brønn 4 er lokalisert ca. 300 m vest for den midte delen av tunnelen. Grunnvannsnivået i de forskjellige brønnene noen år før oppstart er gitt i Tabell 3-1 (Norconsult, 2013).

*Tabell 3-1 Grunnvannsnivået i de 4 grunnvannsbrønnene som er lokalisert i nærheten av tunnelen. Modifisert etter (Norconsult, 2013).*

<b>Brønn</b>	<b>Løsmassemektighet over berget (m)</b>	<b>Kote grunnvann</b>	<b>Grunnvannsnivå under terrenget (m)</b>
1	7,3	154,4 – 155,5	1,7 – 2,8
2	5,5	155,0 – 156,4	5,2 – 6,6
3	11,7	< 151,4	> 11,7
4	11		3

I nærheten av Svartåstunnelen er det kun registrert grunnvannsnivå i disse 4 brønnene. Det er derfor usikkert hvor dypt under terrenget grunnvannsnivået er for tunnelen. Til tross for dette så er grunnvannsnivået fra disse brønnene generelt høyt ved å se bort fra brønn 3. I tillegg er det noen bratte, mindre fjellsider, mot vest som da vil føre området ovenfor Svartåstunnelen med grunnvann, spesielt i nedbørsperioder. Det antas derfor at grunnvannsnivået over tunnelen er forholdsvis høyt, fra 5 – 10 m under terrenget.

Ved bruk av RTGC metoden er grunnvannstrykket av betydning, og en av parameterne som må bestemmes. Siden RTGC metoden i resultatene blir prøvd ut på 2 av injeksjonshullene i skjerm 6914 så er det interessant å vurdere hvor dypt under terrenget grunnvannsnivået var når denne skjermen ble injisert.

Skjerm 6914 ble injisert fra kvelden 8. til morgenen 9. september 2017 (se kapittel 1.4). 72 timer før kvelden den 8. september kom det 23,5 mm nedbør som regn, hvordan 17,3 mm kom de siste 48 timene, og 3,5 mm kom de siste 24 timene (Meteorologisk institutt, 2018). På grunn av at det kom noe nedbør i forkant, og fordi det noen mindre bratte fjellsider som øker nedbørsfeltet over området så antas det ved bruk av RTGC metoden at grunnvannsnivået var

forholdsvis høyt, omkring 5 m under terrenget i området ovenfor skjerm 6914 den 8. september 2017.

### **3.3 Injeksjonsprosedyre i det vestgående løpet**

#### **3.3.1 Sementtype og v/c forhold**

I det vestgående løpet er det brukt ulike injeksjonsprosedyrer for de forskjellige skjermene. I enkelte skjermene er det kun brukt standard injeksjonssement, i andre skjermene er kun brukt mikrosement, og i noen skjermene er brukt både standard injeksjonssement og mikrosement. I skjermene hvor det kun er brukt standard injeksjonssement, er v/c forholdet i starten av injeksjonen i de enkelte hullene 0,8. Dersom mottrykket som er satt i injeksjonsprosedyren ikke blir oppnådd i løpet av et gitt injisert volum, reduseres v/c forholdet enten til 0,6 eller 0,5. Hvor stort volum som må injiseres i de enkelte hullene før v/c forholdet reduseres, variere fra skjerm til skjerm (se Vedlegg I og Vedlegg II).

I skjermene hvor det er brukt både standard injeksjonssement og mikrosement, blir det i de fleste hullene først injisert med standard injeksjonssement med et v/c forhold på 0,8, som videre senkes til 0,6 eller 0,5 etter et gitt injisert volum. Dersom mottrykket ikke er oppnådd etter gitt injisert volum, byttes det til mikrosement med v/c forhold på 1,0 eller 0,9, som videre reduseres til 0,8 eller 0,6 etter et gitt injisert volum. Hvor stort volum som må være injisert før v/c forholdet og sementtypen endres variere fra skjerm til skjerm. Generelt i disse skjermene, begynner injeksjonen i de enkelte hullene med standard injeksjonssement, før det eventuelt byttes til mikrosement. I enkelte hull er det dog registrert at det kun er blitt injisert med en injeksjonsmasse bestående av mikrosement (se Vedlegg I og Vedlegg II). Det er usikkert hvorfor det kun er blitt injisert med mikrosement i enkelte av hullene i disse skjermene.

I skjermene hvor det kun er brukt mikrosement, startes injeksjonen med et v/c forhold på 0,9, som videre reduseres til 0,6 etter et gitt injisert volum (se Vedlegg I og Vedlegg II).

#### ***Sementer***

Ved injeksjon i Svartåstunnelen ble Norcem Industrisement brukt som standard injeksjonssement, og Norcem Micro mf20 degerhamn som mikrosement (Gjerdingen og Implenia, 2018).



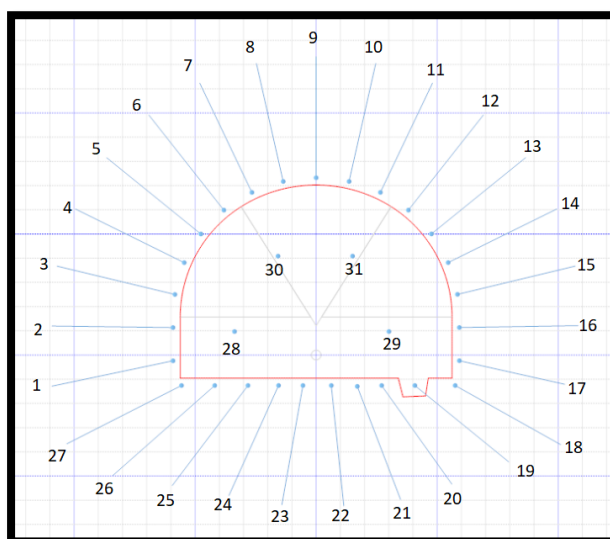
Ved bruk av RTGC metoden er det nødvendig å vite viskositeten og yield verdien til injeksjonsmassen ved forskjellige v/c forhold. I skjerm 6914 er det kun brukt standard injeksjonssement. I en studie av Skjølvold og Justnes (2016) er viskositeten og yield verdien ved forskjellige v/c forhold for Norcem Industrisement gitt i Tabell 3-2 (Bohloli, 2018). Resultatene er tatt 15 min etter at vannet ble tilsatt med en temperatur på 20 °C (Skjølvold og Justnes, 2016).

*Tabell 3-2 Karakteristikk og test resultater for Norcem Industrisement. Modifisert etter Skjølvold og Justnes (2016).*

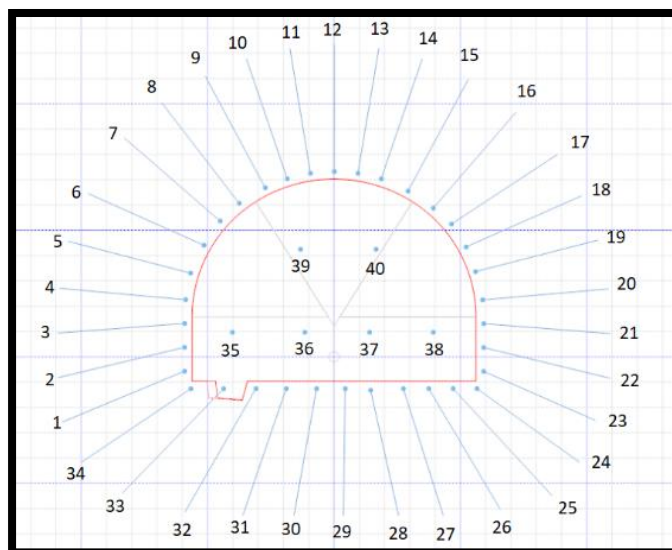
<b>v/c</b>	<b>Bingham viskositet, mPa*s</b>	<b>Yield verdi, Pa</b>
<b>1,2</b>	19,7	0,0
<b>1,0</b>	31,3	1,6
<b>0,8</b>	56,9	4,9
<b>0,6</b>	139	23,2

### 3.3.2 Skjerm lengde og antall injeksjonshull

Lengden til de forskjellige skjermene er enten 24 m eller 29 m, og ut ifra mottatte borplaner så består hver skjerm av enten 31 eller 40 injeksjonshull som er boret i både heng, vegg såle og stoff. I den loggede dataen er hvert injeksjonshull i den gitte skjermen nummerert. Denne nummereringen skal samsvare med nummereringen som er vist i Figur 3.10 og Figur 3.11 (Olsen og Implenia, 2017; Statens Vegvesen, 2017a).



*Figur 3.10 Boreplan for en skjerm med 31 injeksjonshull. Modifisert etter Olsen og Implenia (2017)*



Figur 3.11 Boreplan for en skjerm med 40 injeksjonshull. Modifisert etter Olsen og Implenia (2017).

Ved å studere boreplanene i Figur 3.10 og Figur 3.11 er vederlaget i denne oppgaven satt til å være der hvor tunnelen går fra vertikal til buet. Det er derfor relativt få hull i veggene i forhold til heng og sålen. Hvilke hullnummer som er lokalisert i vegg, heng, såle og stuff for skjermene med 31 og 40 injeksjonshull er gitt i Tabell 3-3.

Tabell 3-3 Lokaliseringen av de enkelte hullnummerene i skjermene med 31 og 40 injeksjonshull.

Ant. Injeksjonshull	Vegg	Heng	Såle	Stuff
31	1 – 3 og 15 – 17	4 – 14	18 – 27	28 – 31
40	1 – 4 og 20 – 23	5 – 19	24 – 34	35 – 40

### 3.3.3 Injeksjonstrykk

Injeksjonstrykket varierer fra skjerm til skjerm ved at det i noen skjermene er brukt et injeksjonstrykk ned mot ~40 bar, og i andre skjermene er det brukt et injeksjonstrykk opp mot ~85 bar. I de fleste skjermene er brukt mellom disse 40 og 85 bar (se Vedlegg I og Vedlegg II).

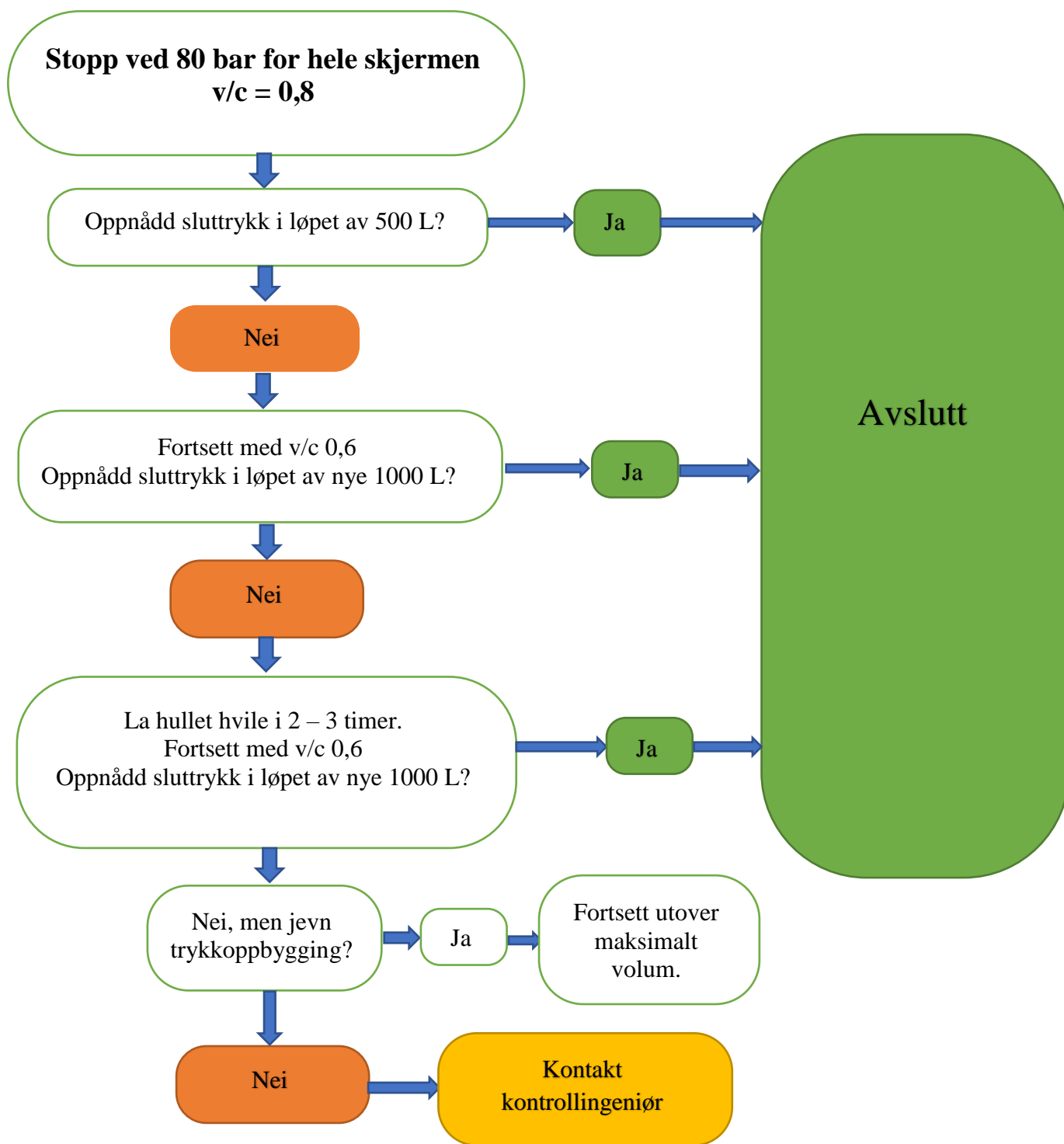
### 3.3.4 *Eksempel på skjermgeometri og injeksjonsprosedyre fra skjerm 6914*

Skjerm 6914 består av 40 injeksjonshull med en lengde på 29 m som er boret i heng, vegg såle og stuff med en vinkel på  $10,5^\circ$  vekk fra tunnelperiferien ved bruk av  $\varnothing 64$  mm bor (Solomon og Ansatte hos Implenia, 2017).

Til injeksjon ble det brukt 30 cm lange engangspakkeren, og bakenden ble dyttet 2,7 m inn i injeksjonshullet (Solomon og Ansatte hos Implenia, 2017). For å fylle ett injeksjonshull med en diameter på 64 mm som er kortet ned fra 29 m til 26 m, går det med et volum på 83,6 L. Ved å anta at det er brukt samme bordiameter og bakenden ble dyttet 2,7 m inn i de 24 m lange injeksjonshullene, går det med et volum på 63,5 L for å fylle ett 21 m langt injeksjonshull.

KM 224 ble brukt som injeksjonsprosedyre ved injisering i skjerm 6914. Fra KM 224 er ett hull ferdig injisert når det er oppnådd et mottrykk på 80 bar. I hvert hull så starter injeksjonen med ett injeksjonsmasse bestående av standard injeksjonssement med et v/c forhold på 0,8. Dersom mottrykket ikke er oppnådd etter ett gitt injisert volum så reduseres v/c forholdet til 0,6. Se flowchart i Figur 3.12 injeksjonsprosedyren som er basert informasjon fra KM 224 (se Vedlegg VII) (Solomon og Ansatte hos Implenia, 2017).

Fra sementoppskrifter som ble brukt i skjerm 6914 så tilsvarer 500 kg med Norcem Industrisement + 25 kg slurry, et volum på 543 L ved et v/c forhold på 0,8, og ved et v/c forhold på 0,6 så tilsvarer 500 kg med Norcem Industrisement + 25 kg slurry et volum på 463,9 L (se Vedlegg I).



Figur 3.12 Flowchart for injeksjonsprosedyren som ble brukt i skjerm 6914. Modifisert etter injeksjonsprosedyren i Vedlegg

## 4 Metode

### 4.1 Databehandling

I hvert injeksjonshull er trykket (bar) og flyten (l/min) til injeksjonsmassen logget ca. hvert 17. sekund av automatiske loggere. I tillegg er det logget brukt:

- Sementtype.
- v/c forholdet til injeksjonsmassen.
- Eventuelle tilsetningsstoffer.
- Injisert volum i de forskjellige hullene med hvilket v/c forhold.
- Totalt injisert volum for hele skjermen.
- Injeksjonstid pr. hull.
- Total injeksjonstid for hele skjermen.

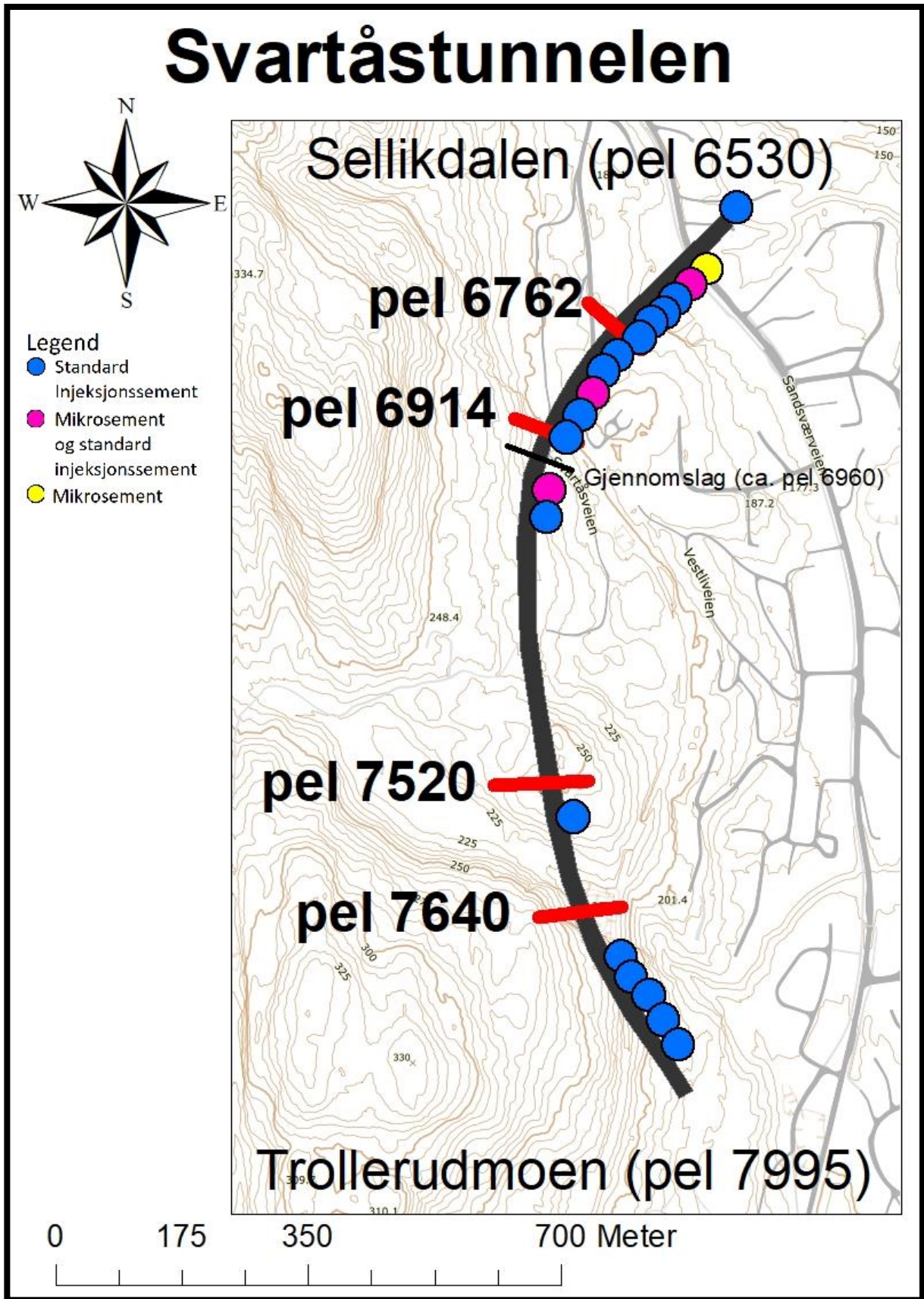
De loggede dataene ble mottatt på mail fra entreprenøren som rådata i XML format (Olsen og Implenia, 2017). For å hente ut rådataene i Excel format ble XML filene lastet opp i programvaren Bever Team 3 av Bever Control AS (2018). Excel filen av injeksjonsforløpet («InjectionFlowReport1» i Vedlegg I) for hver skjerm ble lastet opp i et Python Script i programvaren Spyder for å plote trykk/flyt graf med QP - indeksen. Scriptet er skrevet av medstudent Eivind Moe. Dette er ikke vedlagt i datafilene. Ved å kjøre scriptet blir trykk og flyt utviklingen i hvert injeksjonshull plottet på samme graf og deler y - akse, og forløpt injeksjonstid plottes på x - akse. QP – indeksen plottes på en egen graf med en egen y - akse, men den deler x - akse med trykk/flyt grafen (se Figur 4.2).

Rådata i XML format og Excel filene er vedlagt (se Vedlegg I).

### 4.2 Analyserte injeksjonsskjermer

Som utgangspunkt er det ønskelig at de analyserte skjermene er etablert i en kompakt bergmasse, det vil si at skjermen ikke krysser noen svakhetssoner, og at de analyserte skjermene er etablert i den samme bergarten. Den ingeniørgeologiske dokumentasjonen av Statens Vegvesen (2017a) er brukt for å vurdere hvilke skjermer som passer til de to kriteriene. I enkelte av skjermene som passer til kriteriene er det ikke mulig å hente ut Excel filene fra XML – filene.

Skjermene som passer til kriteriene, og som det var mulig å hente ut Excel filene fra er: Skjerm; 6530, 6654, 6671, 6687, 6705, 6719, 6762, 6785, 6808, 6827, 6851, 6914, 6983, 7028, 7588, 7721, 7768, 7797, 7812, 7841. Se Figur 4.1 for hvor de forskjellige skjermene er etablert. I 16 av skjermene er det kun brukt standard injeksjonssement, i 3 av skjermene er det både brukt standard injeksjonssement og mikrosement, og i 1 av skjermene er det kun brukt mikrosement.



Figur 4.1 Plasseringen til de 20 analyserte skjermene.

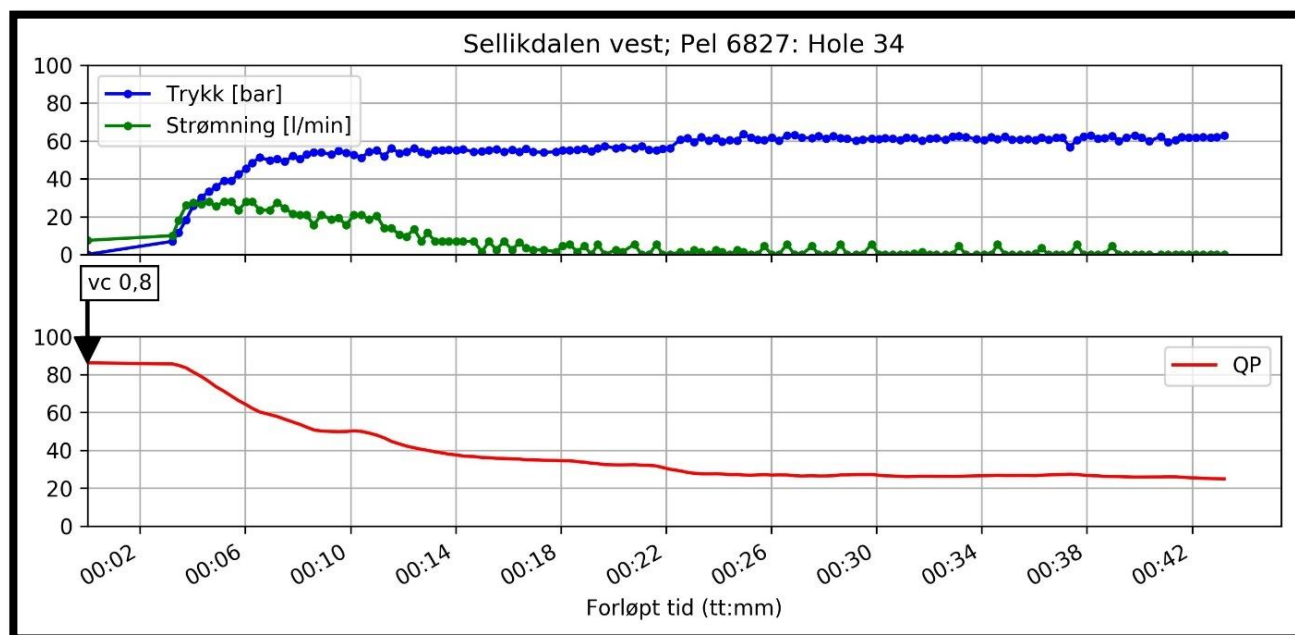


### 4.3 Tolkning av QP – indeksen

For at en hendelse skal tolkes som hydraulisk jekking må det være trykkoppbygning i forkant, etterfulgt av trykkreduksjon og/eller flytøkning. I de loggede dataene kan det være mindre justering av trykket ved at det synker med noen få bar for så å øke igjen. Disse mindre justeringene tolkes ikke som hydraulisk jekking, og det er ønskelig å se etter de større endringene av trykket og flyten over tid. For å få frem de større endringene, og for å minimere de små justeringene er QP – indeksen plottet med et flytende gjennomsnitt på 5. Med et flytende gjennomsnitt på 5 er hvert punkt gjennomsnittet av de 2 foregående punktene, selve punktet og de 2 neste punktene. Det ble testet med et flytende gjennomsnitt på 7, med det resultat at QP – indeksen jevnet ut mer for mye, og det ble i enkelte tilfeller vanskelig å oppdage en hendelse med hydraulisk jekking.

#### 4.3.1 Normalt injeksjonsforløp uten hydraulisk jekking

I injeksjonsforløpet fra hull 34 i skjerm 6827 synker flyten over tid og det er en gradvis trykkoppbygning (Figur 4.2). QP – indeksen synker derfor jevnt, og det er ikke tolket noen hendelser med hydraulisk jekking i bergmassen rundt hull 34. Dette injeksjonsforløpet er et klassisk eksempel på et normalt injeksjonsforløp med gradvis trykkoppbygning og flytreduksjon uten hydraulisk jekking.

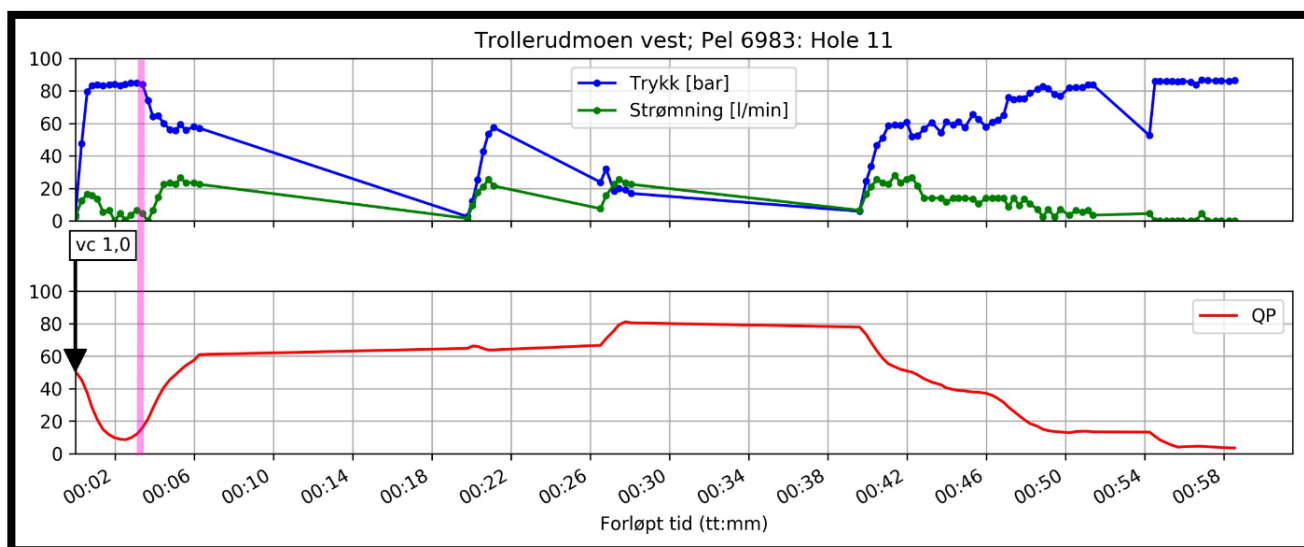


Figur 4.2 Normalt injeksjonsforløp uten hydraulisk jekking. Skjerm 6827, hull 34.



### 4.3.2 Indikasjon på hydraulisk jekking før hullet er fylt opp

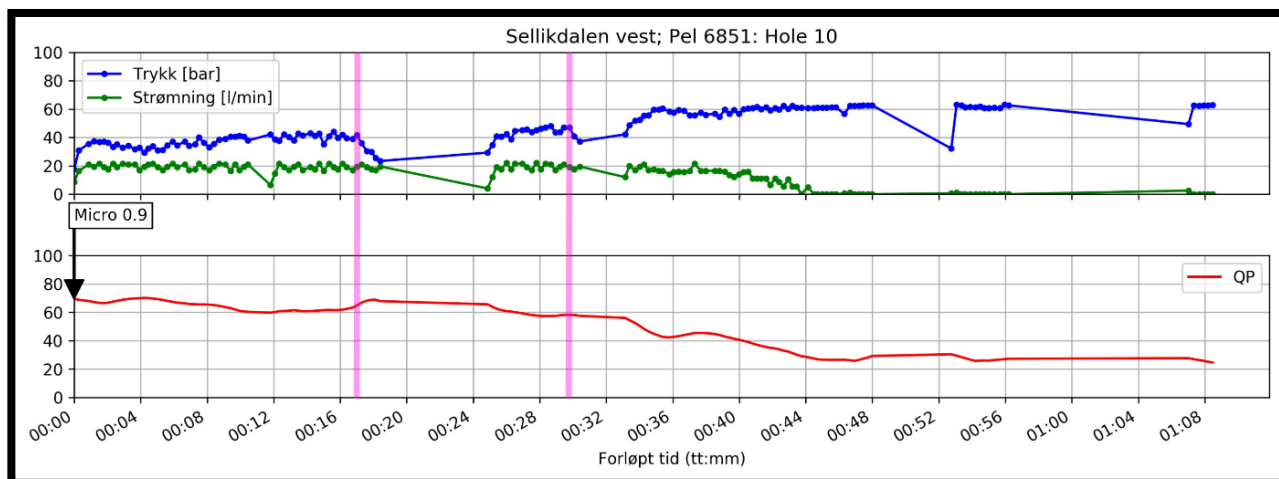
I hull 11, skjerm 6983 øker injeksjonstrykk raskt til 80 bar i løpet av de første 20 sekundene. (Figur 4.3). Dette høye trykket blir opprettholdt i ca. 4 min før trykket brått faller til 60 bar, og strømmingen øker fra 1 til ca. 20 l/min. Når denne hendelsen med trykkfall og flytøkning inntreffer er det kun injisert 23 L i injeksjonshullet. 23 L er langt under volumet som går med for å fylle injeksjonshullet. Denne hendelsen med trykkfall og flytøkning er derfor ikke tolket som hydraulisk jekking.



Figur 4.3 Trykkreduksjon og flytøkning før injeksjonshullet er fylt med injeksjonsmasse. Skjerm 6983, hull 11.

### 4.3.3 Trykkfall før en kort pause

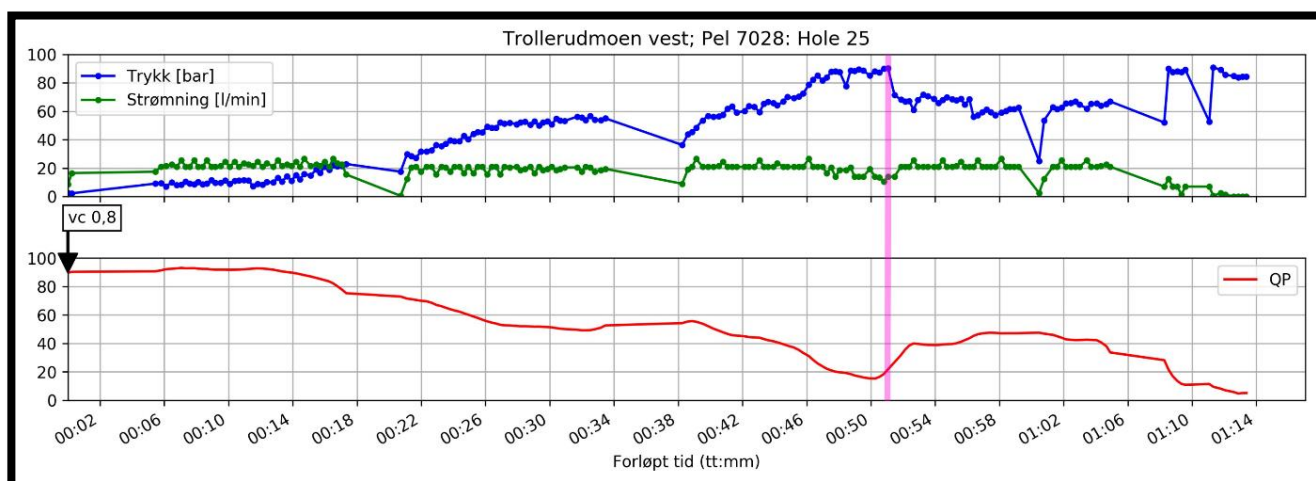
I flere injeksjonshull er det registrert et trykkfall og stabil flyt i forkant av en kort pause. Etter pausen øker injeksjonstrykket raskt tilbake til det nivået det var på før trykket falt. Denne hendelsen inntreffer ved to anledninger i skjerm 6851, hull 10. Etter 17- og 29 min (se røde linjer i Figur 4.4). Trykkfallet skyldes mest sannsynlig måten injeksjonen er utført på, og ikke at det er en hendelse med jekking.



Figur 4.4 Trykkfall før en kort pause etterfulgt av rask trykkoppbygning etter pausen. Hendelsen er ikke tolket som hydraulisk jekking. Skjerm 6851, hull 10.

#### 4.3.4 Hendelse med hydraulisk jekking

I hull 7028, hull 25 er det tolket en hendelse med hydraulisk jekking (rosa linje i Figur 4.5). Injeksjonsforløpet de første 50 minuttene er preget av gradvis trykkoppbygning mot 90 bar, og stabil til synkende flyt. Plutselig faller injeksjonstrykket fra 90 til 60 bar, og flyten øker. Denne hendelsen er tolket som hydraulisk jekking. Etter denne hendelsen tar det nye 20 min før injeksjonstrykket er tilbake på 90 bar.



Figur 4.5 Hendelse tolket som hydraulisk jekking med plutselig trykkfall og flytøkning etter en lengre periode med gradvis trykkoppbygning. Skjerm 7028, hull 25.

#### 4.4 Statistisk analyse

Desto flere datapunkter som er med i analysen desto sterkere er den statistiske modellen. Ved et lite datasett er modellen svak, og resultatene er usikre (Løvås, 2013).

Korrelasjonsanalyse brukes for å analysere om det er en lineær sammenheng mellom to variabler, og regresjonsanalyse brukes for å finne ut hvordan denne sammenhengen er. Ved regresjonsanalyse skilles det mellom lineær og ikke-lineær regresjon. Ved lineær regresjon er det en lineær sammenheng, og ved ikke – lineær regresjon er det en ikke lineær sammenheng. Dersom  $y$  øker eksponentielt når økning av  $x$  er konstant er det en ikke – lineær regresjon. Regresjonsanalyse gir ikke svar på årsakssammenheng, altså om  $y$  øker / synker som følge av at  $x$  øker / synker, eller om  $x$  øker / synker som følge av  $y$  øker / synker (Løvås, 2013).

Korrelasjon er definert som kovariansen delt på variablenes standardavvik og er beskrevet med korrelasjonskoeffisienten ( $r$ ), hvor  $r$  ligger mellom  $-1$  og  $1$ . Både  $-1$  og  $1$  er definert som ekstremverdier og betyr at alle  $x$  og  $y$  verdiene ligger på en rett linje. Når  $r = -1$  er den rette linjen negativ, altså at  $y$  synker med økende  $x$ , og når  $r = 1$  er den rette linjen positiv. Dersom korrelasjonen er  $0$  eller i nærheten av  $0$  er det ingen lineær sammenheng mellom  $x$  og  $y$ , men det kan fortsatt være en logaritmisk, eksponentiell eller logistisk sammenheng (ikke – lineær sammenheng). Dersom sammenhengen er lineær så kan Pearsons korrelasjonstest brukes for å bestemme om den lineære sammenhengen er signifikant eller ikke.

Signifikantnivået settes normalt til  $0,05$ . Dersom det er en signifikant sammenheng ved et signifikantnivå på  $0,05$  så er det  $95\%$  sannsynlig for at hypotesen er sann (Løvås, 2013).

For variabler hvor sammenhengen er lineær er regresjonslinjen også lineær, og skrives som  $y = \alpha + \beta x$ .  $\alpha$  forteller hvor linjen krysser  $y$ -aksen og  $\beta$  er linjens stigningstall. Hvor godt regresjonslinjen passer til datapunktene blir bestemt ut ifra bestemmelseskoeffisienten ( $r^2$ ).  $r^2$  er definert som forklarende variasjoner delt på totale variasjoner, og  $r^2$  er alltid mellom  $0$  og  $1$ . Når  $r^2 = 1$  kan  $100\%$  av endringer i for eksempel  $x$  forklares med at  $y$  endres, men dersom  $r^2 = 0$  kan  $0\%$  av endringen i  $x$  forklares med at  $y$  endres (Løvås, 2013).

Korrelasjonskoeffisienten ( $r$ ), Pearsons korrelasjonstest og bestemmelseskoeffisienten ( $r^2$ ) kan regnes manuelt og / eller ved hjelp av diverse programvarer (Løvås, 2013). I denne studien er programvaren Sigmaplot 13 av Sigmaplot Software Inc (2018) brukt som hjelpemiddel i den statistiske studien.

## 4.5 Notert data for å utføre analysen

Fra de undersøkte skjermene blir det notert:

- Brukt sementtype.
- v/c forhold til sementen.
- Skjermlengden (dvs. hullengden).
- Injisert volum [l] pr. hull og for hele skjermen.
- Injeksjonstid pr. hull og for hele skjermen.
- Antall injeksjonshull i skjermen.
- Lokalisering (heng, vegg, såle og stuff) til de forskjellige injeksjonshullene (ut ifra hullnummerene).
- Antall injeksjonshull i skjermen det er tolket jekking i.
- Hvilken injeksjonshull, dvs. hullnummerene det er tolket jekking i.
- Prosent av skjermens injeksjonshull det er tolket jekking i.
- Bergoverdekningen til den enkelte skjermen.
- Den gjennomsnittlige Q – verdien til bergmassen som skjermen er etablert i.
- Injeksjonstrykk.

Injeksjonstrykket i en skjerm er et gjennomsnitt av det maksimale trykket som det ble pumpet med i de ulike hullene i den aktuelle skjermen. Det maksimale pumpetrykket blir videre i oppgaven omtalt som injeksjonstrykk(et).

Sementtype, v/c forhold, injisert volum, injeksjonstrykk, injeksjonstid, og antall injeksjonshull er hentet fra rådataene. Injeksjonshullenes lokalisering er hentet fra borplanene i Figur 3.10, Figur 3.11 og de interne rapportene av injeksjonsboringen. De interne rapportene av injeksjonsboringen er mottatt på mail av Semere Solomon, og de er vedlagt i Vedlegg I. Skjermlengden er lest av manuelt fra den ingeniørgeologiske dokumentasjonen av Statens Vegvesen (2017a).

Trykk/flyt grafen med QP – indeksen for alle injeksjonshullene fra de analyserte skjermene er vedlagt. I injeksjonshullene hvor det er tolket en hendelse med hydraulisk jekking er denne hendelsen markert med en rosa linje, slik som vist i Figur 4.5. Disse grafene er også vedlagt (se Vedlegg I).

Notert data som injisert volum, pumpetid, skjermlengde, Q – verdi, injeksjonstrykk, v/c forhold, antall injeksjonshull, sementtype, antall injeksjonshull, antall injeksjonshull med

jekking og prosent jekkede hull pr. skjerm er notert i Vedlegg II. Hvilke injeksjonshull fra de forskjellige skjermene det er tolket jekking i er notert i Vedlegg VI.

#### **4.6 Antagelser og modifisering av datasett**

En forutsetning for å gjøre en god analyse er at variablene i datasettet bygger på de samme forutsetningene (Løvås, 2013).

Fra teorien er det kjent at sementtype og v/c forhold spiller en stor rolle for sementens reologiske egenskaper, og for om massen trenger inn i en sprekk eller ikke. Ved ulik sementtype og v/c forhold så da injeksjonsmassen oppføre seg svært ulikt i bergmassen, og påvirke resultatene selv om de geologiske forholdene er like.

I de studerte skjermene er det brukt forskjellige injeksjonsmasser, i 16 skjermene er det kun standard injeksjonssement, i 3 skjermene er det brukt både standard injeksjonssement og mikrosement, og i 1 skjerm er det kun brukt mikrosement. I skjermene hvor det kun er brukt standard injeksjonssement starter injeksjonen alltid med et v/c forhold på 0,8, for så å bli redusert til 0,6 eller 0,5 etter et gitt injisert volum. I skjermene hvor er brukt både industri- og mikrosement starter injeksjonen i de forskjellige hullene med ulik sementtype og ulik v/c forhold. For at analysen skal bygge på de samme variablene er det hovedsakelig skjermene hvor det kun er brukt standard injeksjonssement som er med i analysen.

I skjermene hvor det kun er brukt standard injeksjonssement blir det normalt injisert et stort volum før v/c forholdet eventuelt endres. Siden det er forskjellige injeksjonsprosedyrer fra skjerm til skjerm for når v/c forholde, og fordi det hadde gitt et svært lite datasett så er det ikke tatt hensyn til om v/c forholdet endres til 0,6 eller 0,5. Det er heller ikke tatt hensyn til etter hvor stort injisert volum v/c forholdet endres. De reologiske egenskapene til de 16 skjermene hvor det er brukt standard injeksjonssement antas å være like.

Antall injeksjonshull varierer fra skjerm til skjerm, og lengden til de analyserte skjermene varierer. Det vil naturlig nok gå med et større volum og injeksjonen tar trolig lengre tid ved flere injeksjonshull og lengre skjermene. For å kompensere for at lengden og antall hull varierer så er skjermene standardisert. Det injiserte volumet i selve injeksjonshullene er subtrahert fra det totale injiserte volumet. Dette nye injiserte volumet er så modifisert til en 24 m lang injeksjonsskjerm. For en 29 m lang skjerm så blir regnestykket;  $\llcorner((\text{injisert volum} - \text{volum til alle hullene}) / 29 \text{ m}) * 24 \text{ m}$ .

Tiden det tar å fylle et injeksjonshull er noe mer usikkert siden flyten i starten av injeksjonsforløpet variere fra hull til hull. Basert på helhetsinntrykket fra de analyserte skjermene er flyten i starten av injeksjonsforløpet når injeksjonshullet blir fylt opp grovt anslått til å være 20 l / min. Tiden det tar å fylle alle hullene blir subtrahert fra den totale pumptiden. Deretter modifiseres den nye injeksjonstiden til en 24 m lang skjerm. Se Vedlegg IV for modifisert injisert volum [L] og modifisert injeksjonstid.

Hvor mye injeksjonsmasse som er brukt i en skjerm blir ofte oppgitt i kg. Årsaken til dette er at det i oppgjør mellom byggherre og entreprenør ofte tas utgangspunkt i injisert kg sement i en skjerm og ikke injisert liter i en skjerm (Solomon, 2018). I denne studien er det valgt å fokusere på injisert volum [L], og ikke injisert kg. Argumentasjonen er at det blir enklere og mer korrekt å modifisere skjermen til hverandre ettersom det er kjent hvor stort volum som må til for å fylle ett injeksjonshull. Og fordi injeksjonsprosedyrene er trolig forskjellig fra skjerm til skjerm for når v/c forholdet endres. I tillegg så er det faktiske volum til sementen som fyller opp sprekken, og gjør at sprekken eventuelt jekkes. Fra Vedlegg I tilsvarende 10'000 l injeksjonsmasse med standard injeksjonssement (Norcem industrisement) med et v/c forhold på 0,8 omtrent 9000 kg tørr sement.

Kartleggingen av Q – verdien er gjort etter siste sprengte salve, altså omtrent hver 5. meter. I de fleste skjermene endres Q – verdien noe. Ved undersøkelse av om det er noen sammenheng mellom bergmassens Q – verdi og jekking så tas det utgangspunkt i den gjennomsnittlige Q – verdien til bergmassen som den aktuelle skjermen er etablert i. Informasjon om bergmassens Q – verdi er hentet fra den ingeniørgeologiske dokumentasjonen av Statens Vegvesen (2017a).

I enkelte skjerner endres bergoverdekningen på grunn av topografiske forhold. Det tas utgangspunkt i den laveste bergoverdekning over den aktuelle skjermen siden det er antatt at lav bergoverdekning øker sannsynligheten for jekking. Bergoverdekningen er hentet fra skissert bergoverdekning over tunnellopet fra Norconsult AS (2015).

### 4.6.1 *Lokalisering av injeksjonshullene*

I de fleste skjermene er det enten 31 eller 40 injeksjonshull (se Figur 3.10 og Figur 3.11 for lokalisering), men i enkelte skjerner er det ikke 31 eller 40 injeksjonshull. For å bestemme lokaliseringen av injeksjonshullene i disse skjermene er de intern rapportene av

injeksjonsboringen brukt. Dersom det er uklart fra rapportene av sondérboring hvor de ulike injeksjonshullene er, er ikke skjermen med i analysen av lokaliseringen av injeksjonshullene.

Det er mulig å bestemme lokaliseringen av de forskjellige injeksjonshullene fra 12 av de 16 skjermene hvor det er brukt standard injeksjonssement. Disse 12 skjermene er: Skjerm: 6530, 6687, 6719, 6785, 6808, 6827, 6914, 7028, 7588, 7721, 7797 og 7841. Hvilket hullnummer som er lokalisert hvor i skjermen i de 12 skjermene er notert i Vedlegg VI.

I enkelte skjerner er det brukt ulikt injeksjonstrykk i hullene som er boret i sålen og hengen. For at injeksjonshullene i en skjerm skal bygge på de samme premissene, er det ønskelig at det er brukt likt injeksjonstrykk i skjermens injeksjonshull. Dersom det er brukt ulikt injeksjonstrykk i de forskjellige hullene i en skjerm, blir den aktuelle skjermen tatt vekk fra analysen.

## **4.7 RTGC - metoden**

På grunn av at injeksjonsarbeid er ferdig i Svartåstunnelen kan ikke RTGC metoden bli brukt for å modifisere injeksjonsprosedyren, men RTGC metoden kan bli brukt for å analysere spredningslengden til injeksjonsmassen i den største sprekken ( $b_{g,max}$ ). Til dette formålet er programvaren RTGCImplementationV03 brukt. Programmet er skrevet av medstudent Martin Hovda Haugsand i forbindelse med en sommerjobb i 2017 hos Bever Control AS. Teorien bak programmet bygger hovedsakelig på Stille (2015), Nikolaev (2015) og Kobayashi et al. (2008) (Haugsand, 2018a). Programmet er vedlagt (Vedlegg I).

### **4.7.1 Programforklaring**

For å analysere spredningen med programvaren må parameterne i Figur 4.6 bestemmes. I menyen er 1D crackwidth = bredden på modellsprekken og ground water pressure = grunnvannstrykk. Viskositet, yield strength (yield verdi) og hardening rate er sementparametere. Hardening rate = sementens herdetid, og settes til 0 i tilfellene hvor det ikke er ønskelig at den regnes med. Overburden = overdekning av bergmasse, og rockmass unit weight = bergmassens egenvekt. Overburden og rockmass unit weight brukes ved å beregne faren for oppløftning av bergmassen (ultimat jekking). Fracture stress, poissons ratio og E – modulus (youngs modulus) blir brukt for å beregne den begrensede spredningen som

følge av elastisk jekking, disse 3 parameterne er ikke implementert i programvaren (Haugsand, 2018a).

Please set the desired RTGC input data. Just press OK if you accept the default values

Viscosity [Pas]	0,00560	Time:	2016:06:
Yield Strength [Pa]	0,296	Current recipe No:	5
1D crack widht [m]	10,00	New recipe No:	<Value>
Overburden [m]	40,0	<input type="button" value="OK"/>	
Ground water pressure [Bar]	3,00		
rockmass unit weight [KN/m3]	27,0		
E modulus [GPa]	10,0		
Poisson ratio	0,300		
Hardening rate [ $e^{(\text{<num>*t)}$ ]	0,00004		
Fracture stress [MPa]	1,00		

Figur 4.6 Parametere som inngår i RTGC modellen. E – modulus, Poissons ratio og Fracture stress er ikke implementert i programvaren (Haugsand, 2018a).

Ved 1D er  $w$  den gjennomsnittlige bredden til sprekkene, se kapittel 2.1.1. Det er forsket lite på hvor stor  $w$  faktisk er, men den blir ofte satt til å være 10. Dette er en forholdsvis bred sprekk, men en sprekk er ofte i kontakt med andre sprekker. Ved en liten avstand fra injeksjonshullet er da mulig at injeksjonsmassen trenger inn i flere sprekker, og at den totale vidden til disse sprekkene er 10 m (Stille, 2015).

Dersom sementoppskriften endres underveis oppdages dette av programvaren. Det dukker da opp et nytt vindu hvor sementens nye viskositet og yield strenght skriver inn (Figur 4.7) (Haugsand, 2018a).



RecipeChange detected, please give new parameters for the new grout

Viscosity [Pas]	0,00560	ld 50% to valu	Time:	2016:06:2
Yield Strength	0,296	<input type="button" value="OK"/>	Current recipe No:	5
			New recipe No:	8

Figur 4.7 Endring av sementoppskrift ilt. injeksjonsforløpet oppdages av programmet. Sementens nye viskositet og yield strenght skrives inn (Haugsand, 2018a).

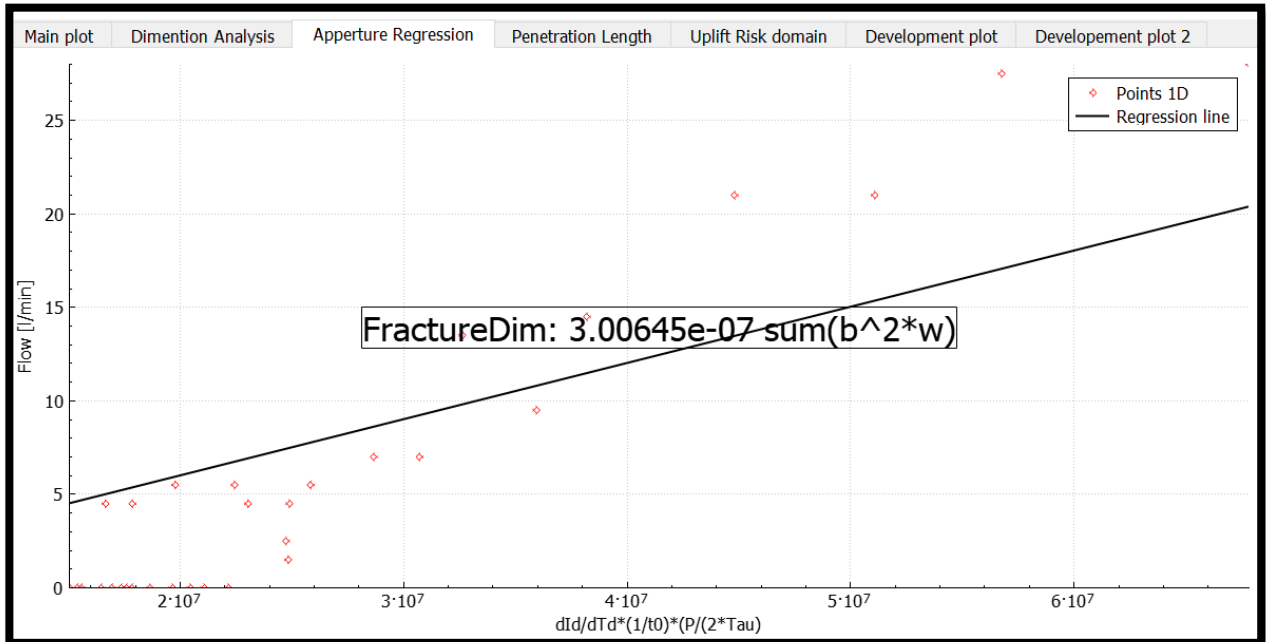
For å bestemme dimensjonen til sprekken plotter programmet en lik graf som vist i Figur 2.33. Dersom gjennomsnittet til alle punktene er  $\leq 1,5$  bestemmer programvaren at sprekke dimensjonen er i 2D. Ved et gjennomsnitt under 1,5 bestemmer programvaren at sprekke dimensjonen er i 1D (Haugsand, 2018b).

Ved estimering av den største sprekkeåpningen ( $b_{g, maks}$ ) med utgangspunkt i 1D så plotter programmet hva verdien av til modellsprekken ( $\sum b_g^2 * w$ ) er for hvert målepunkt i en graf (se Figur 4.8). Deretter plotter programmet en lineær regresjonslinje som passer til alle punktene. Stigningstallet til den lineære regresjonslinjen er den gjeldende verdien av modellsprekken ( $\sum b_g^2 * w$ ) som blir brukt i den videre analysen. Ved 2D plotter programmet hva verdiene er av  $\sum b_g^3$  er. Fra modellsprekken avhengig av om sprekke dimensjonen er i 1D eller 2D regner programvaren ut den største sprekkeåpningen for 1D med Formel 2.12 og 2D med Formel 2.13 ved å bruke en relevant modell for den sannsynlige sprekke distribusjonen. For å regne ut  $b_{g, maks}$  er sprekkeparameteren ( $k$ ) lik 1,0. Det er ikke mulig å endre sprekkeparameteren (Haugsand, 2018b). Siden  $k = 1,0$  blir den største sprekkeåpningen større enn dersom sprekkeparameteren hadde vært satt til å være 0,8. Spredningen til injeksjonsmassen er lengre i en sprekke med større sprekkeåpning sammenlignet med en sprekke med mindre sprekkeåpning (Stille, 2015).

Fra Figur 4.8 kommer det frem hvor bra den lineære regresjonslinjen passer til målepunktene. Alle punktene som ligger over den lineære regresjonslinjen passen til en større modellsprekk og alle punktene som ligger under passer til en mindre modellsprekk (Haugsand, 2018b).

I eksempelet som er vist i Figur 4.8 har programvaren bestemt at sprekke dimensjonen er i 1D, og at modellsprekken for 1D ( $\sum b_g^2 * w$ ) =  $3,00645 * 10^{-7}$ . Ved å sette  $w = 10$  m og  $k = 1,0$  så

er  $b_{g,max}$  for 1D lik 0,00017339 [m], eller 173,39  $\mu\text{m}$ . Selv om sprekke­dimensjonen ikke er i 2D så regner programvaren modellsprekken og  $b_{g,max}$  for 2D sprekke­dimensjon (Figur 4.9) (Haugsand, 2018b).



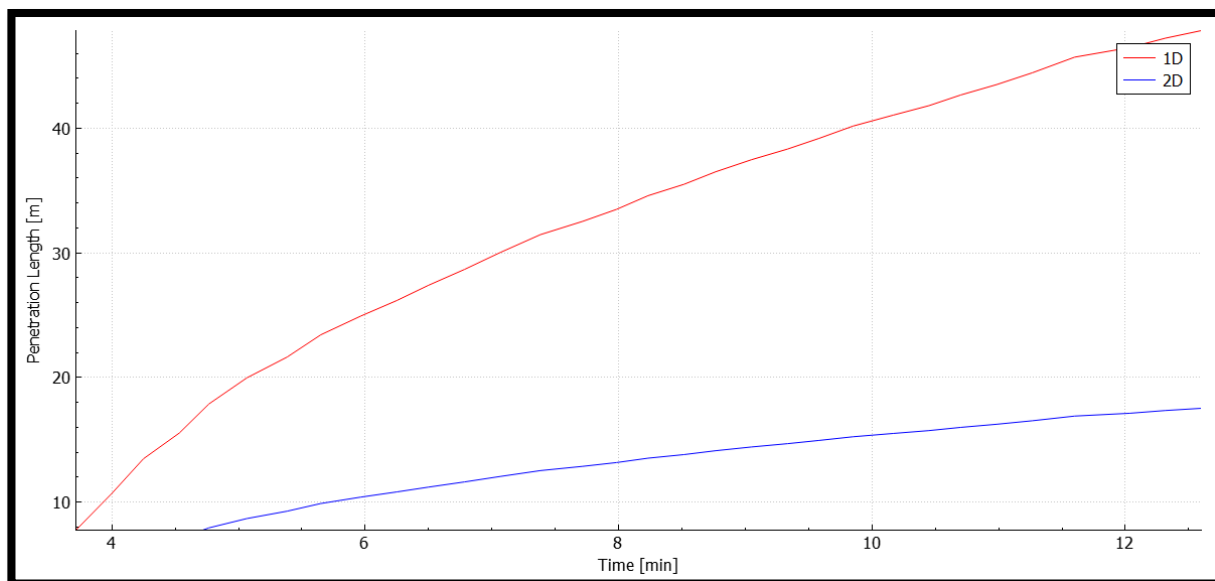
Figur 4.8 Verdien av  $\sum b_g^2 * w$  ved 1D strø­mning med RTGC metoden. Skjerm 6914, hull 7.

```

-----Fracture Aperture Analysis-----
Fracture dim Regressions (y = a + b*x):
  1D: a = 0 b = 3.0064e-07
  2D: a = 0 b = 3.135e-13
This equates to model fracture apertures:
  1D: 0.00017339 [m]
  2D: 6.7932e-05 [m]
    
```

Figur 4.9 Programvaren finner  $\sum b_g^2 * w$  og  $b_{g,max}$  for 1D, og  $\sum b_g^3$  og  $b_{g,max}$  for 2D.

Basert på  $b_{g,max}$  for 1D og 2D så estimere programmet sprednings­lengden til injeksjons­massen både for 1D og 2D sprekke­dimensjon (Haugsand, 2018b). I eksempelet som er vist i Figur 4.10 så er sprednings­lengden til injeksjons­massen i den største sprekken over 40 m etter 12,5 min når sprekke­dimensjonen er i 1D. Det er tydelig at sprednings­lengden til injeksjons­massen i den største sprekken er markant lenger i en sprekke (1D) i forhold til i en disk (2D).



Figur 4.10 Spredningslengden til injeksjonsmassen i 1D og 2D. Skjerm 6914, hull 7.

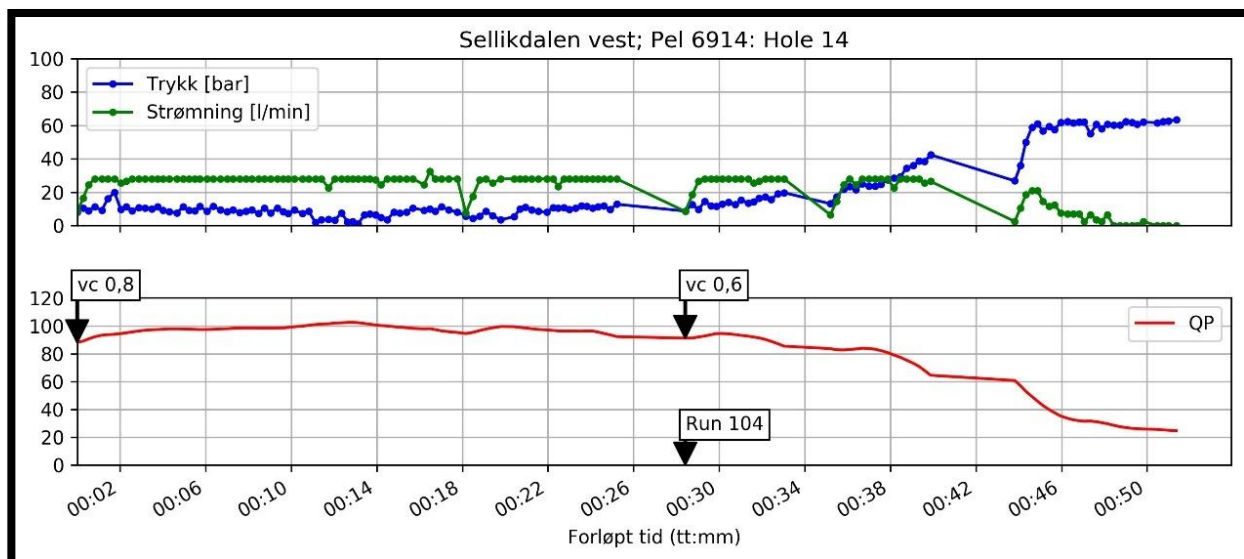
#### 4.7.2 Spesielle hensyn

Dersom en sprekk jekkes utvides sprekkeåpning (Stille, 2015). Siden parameterne Fracture stress, poissons ratio og E - modulus ikke er implementert i programvaren vil ikke modellen ta hensyn til at sprekkeåpningen utvides (Haugsand, 2018a). Ved jekking vil derfor spredningslengden kunne bli feil. Det kan derfor ikke være noen hendelser med hydraulisk jekking i de undersøkte injeksjonsforløpene.

#### 4.7.3 Analysert injeksjonsforløp og valg av parametere

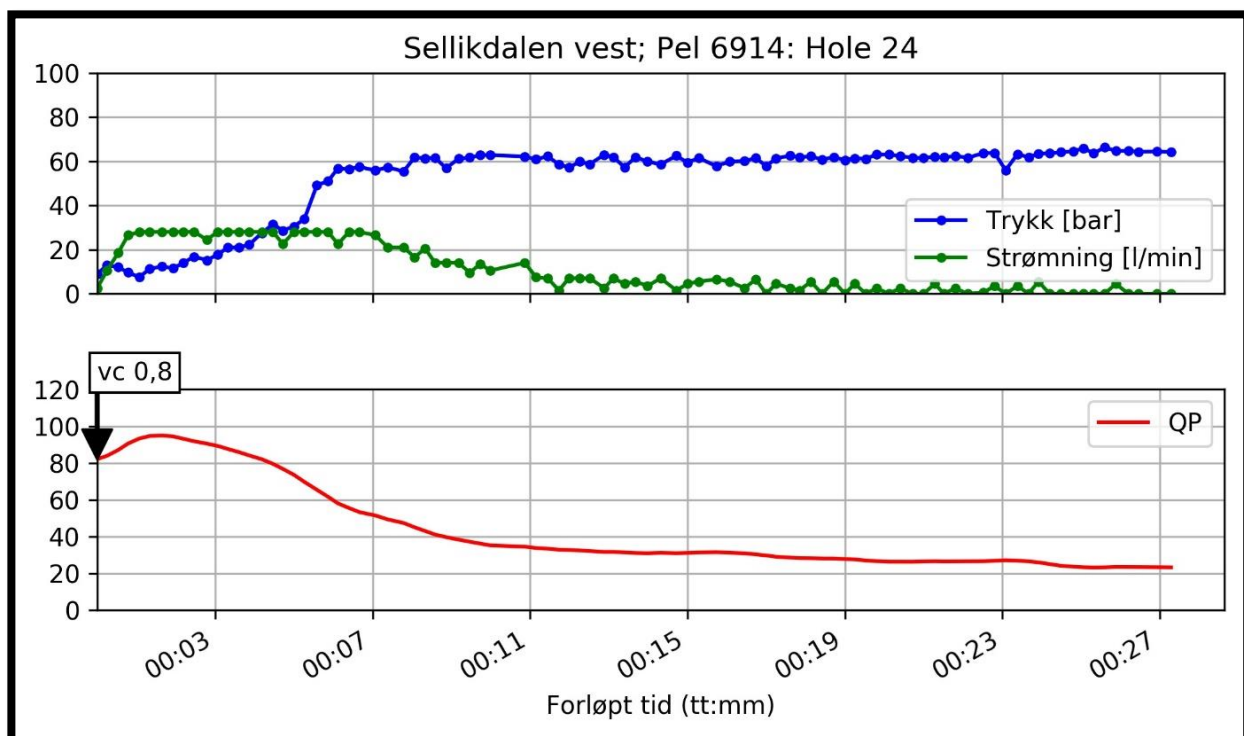
Fra skjerm 6914 undersøkes spredningen til injeksjonsmassen fra 2 injeksjonshull med RTGC metoden. Ett hull hvor det er injisert et stort volum, og ett hull hvor det er injisert et lite volum. I de disse hullene skal det ikke være noen hendelser med hydraulisk jekking.

I injeksjonshull 14, skjerm 6914 er det ingen hendelser med hydraulisk jekking (Figur 4.11). I dette hullet er det injisert et volum på 1035 L ved bruk av Norcem Industrisement med ett v/c forhold på 0,8 og 0,6 (Vedlegg I). Det er 3 korte pauser på ca. 5 min er. Gitt at det ikke er tilsatt akselerator, har disse 3 pausene trolig minimal effekt på herdeprosessen.



Figur 4.11 Injeksjonsforløpet til hull 14, skjerm 6914.

Injeksjonshull 24, skjerm 6914 er det ingen hendelser med hydraulisk jekking (Figur 4.12). I injeksjonshullet er det injisert et volum på 294 l med Norcem Industrisement med et v/c forhold på 0,8 (Vedlegg I).



Figur 4.12 Injeksjonsforløpet til hull 24, skjerm 6914.

For Norcem Industrisement med ett v/c forhold på 0,8 så er viskositeten = 0,0569 Pa\*s, og yield styrke = 4,9 Pa. For den samme sementen med ett v/c forhold på 0,6 er

viskositeten = 0,139 Pa\*s, og yield styrke = 23,2 Pa (Tabell 3-2). Hardening rate setter til 0 for begge hullene.

Bergoverdekningen fra til hengen av tunnelen til skjerm 6914 er 38,4 m. Fra kapittel 3.2.6 er det antatt at grunnvannsnivået over skjerm 6914 den 9. september var 6 m under overflaten. Over hull 14 som er lokalisert i toppen av hengen så er det en vannsøyle på 32,4 m, og vanntrykket er 324000 Pa, eller 3,24 bar. For hull 24 som er lokalisert i sålen er det lagt til 5 ekstra metere. Bergoverdekningen er da 43,4 m, vannsøylen over hullet er 37,4, og vanntrykket er da 374000 Pa, eller 3,74 bar.

Siden hulllengden ikke er kjent i rådataene (XML filene) bruker programmet en hulllengden på 30 m med en diameter på 64 mm (Haugsand, 2018b). I realiteten kreves det et volum på 83,6 l for å fylle ett injeksjonshull i skjerm 6914, men programmet forutsetter at det kreves et volum på 96,5 l. Den estimerte spredningen blir derfor noe lavere, men i det store og hele så er feilkilden trolig neglisjerbar siden det kun er 12,9 L forskjell.



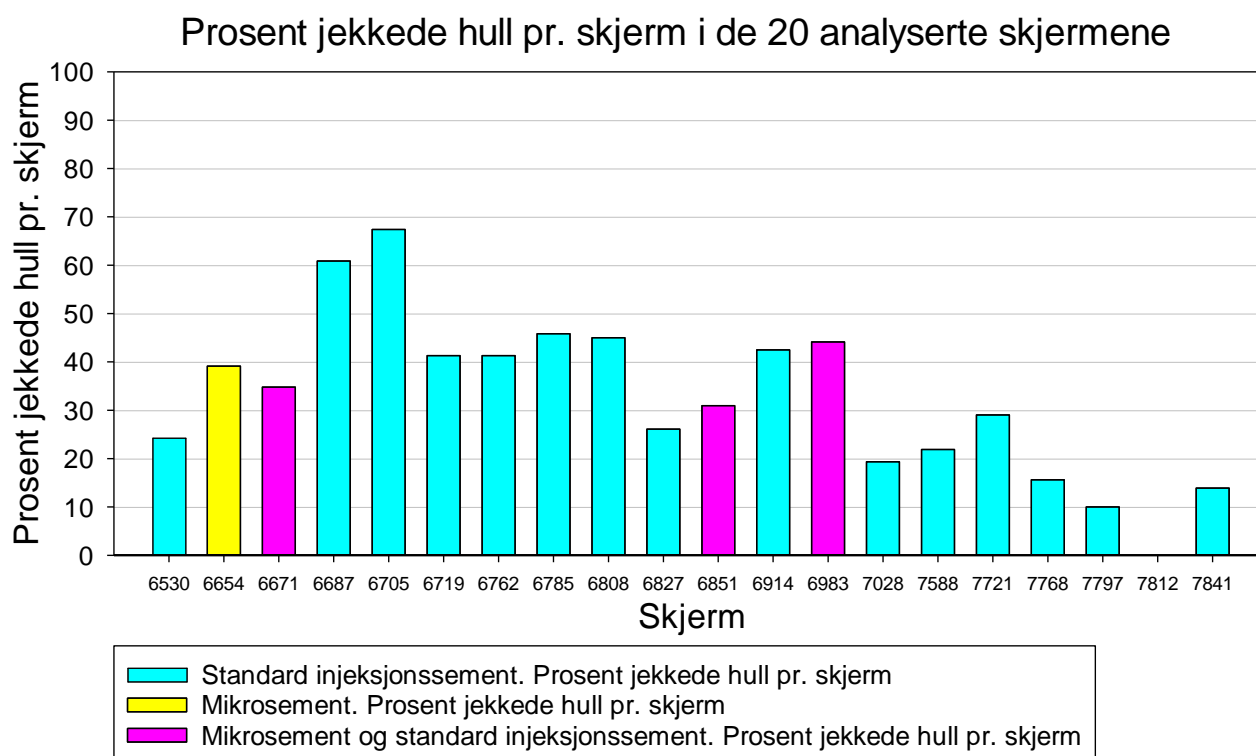
## 5 Resultater

### 5.1 Prosent jekkede hull pr. skjerm

I de 20 analyserte skjermene har hydraulisk jekking forekommet i 273 av 809 injeksjonshull, altså i 33,8 % av hullene. Hvor mange prosent av hullene som er jekket i skjerm varierer. I skjerm 6705 har jekking forekommet i 67,4 % av skjermenes hull, mens i skjerm 7812 har jekking forekommet i 0 % av skjermens hull, se Figur 5.1.

I 16 av de analyserte skjermene er det kun brukt standard injeksjonssement, i 3 skjermene er det både brukt standard injeksjonssement og mikrosement, og i 1 skjerm er det kun brukt mikrosement (Figur 5.1). Generelt sett fra Figur 5.1 er det ingen indikasjon på at skjermene hvor det er brukt mikrosement skiller seg fra skjermene hvor det er brukt standard injeksjonssement.

Fra Figur 5.1 er det enkelte seksjoner som skiller seg ut. For skjermene som er lokalisert fra pel 6687 til 6983 er det generelt sett jekking i mange prosent av skjermenes hull, og for skjermene som er lokalisert fra pel 7028 til 7841 er det generelt sett jekking i få prosent av skjermenes hull.



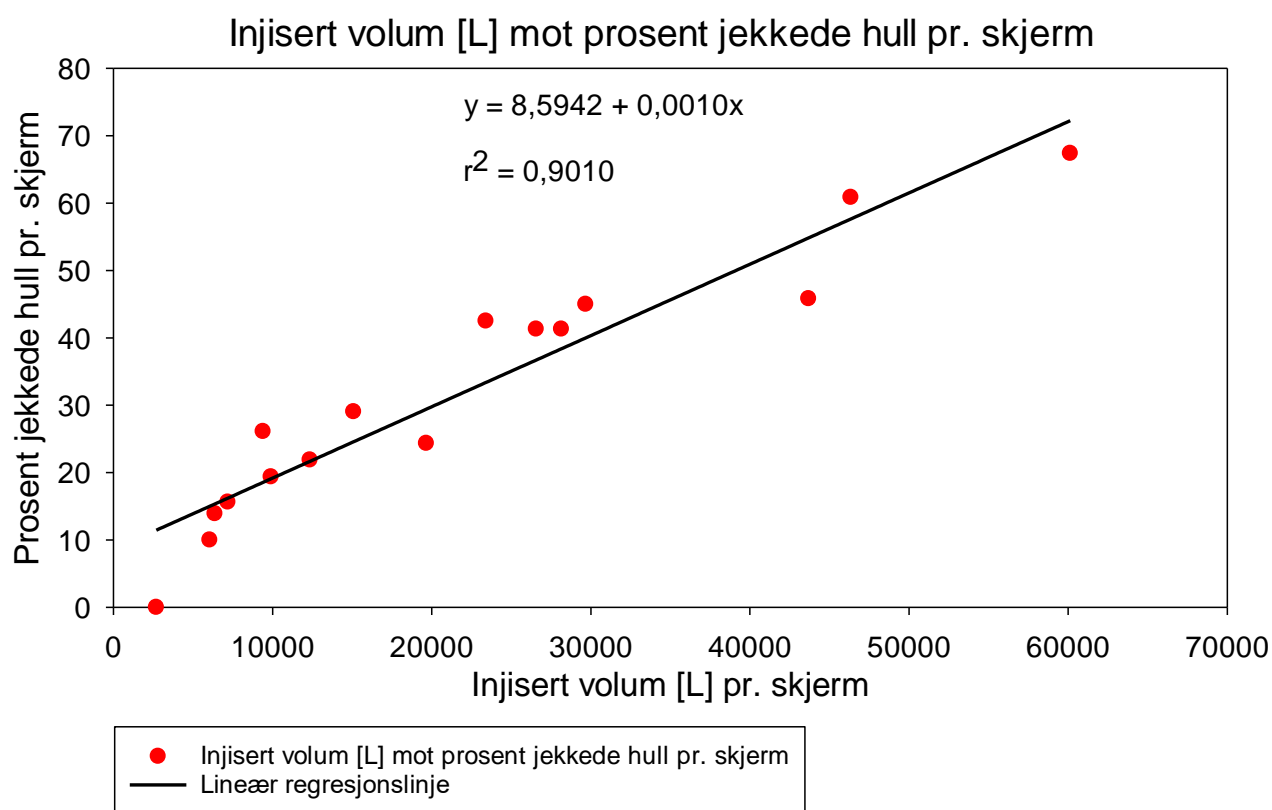
Figur 5.1 Prosent jekkede hull i de 20 analyserte skjermene.

## 5.2 Injisert volum mot prosent jekkede hull pr. skjerm

Resultatet er basert på de 16 skjermene hvor det kun er brukt standard injeksjonssement. Enkelte skjermer er 29 m lange. Injisert volum i disse skjermene er modifisert til 24 m lange skjermer.

Med Pearssons korrelasjonstest er det en signifikant lineær sammenheng mellom injisert volum og prosent jekkede hull pr. skjerm, og  $r^2$  for den lineære regresjonslinjen er 0,90. Den lineære regresjonslinjen passer derfor svært godt til datapunktene (Figur 5.2)

Som vist i Figur 5.2 er det injisert et større volum i skjermene med mange prosent jekkede hull sammenlignet med skjermene med få prosent jekkede hull. Ved å bruke formelen for den lineære regresjonslinjen så øker injisert volum med 10'000 l ved en økning på 10 % jekkede hull i en skjerm.



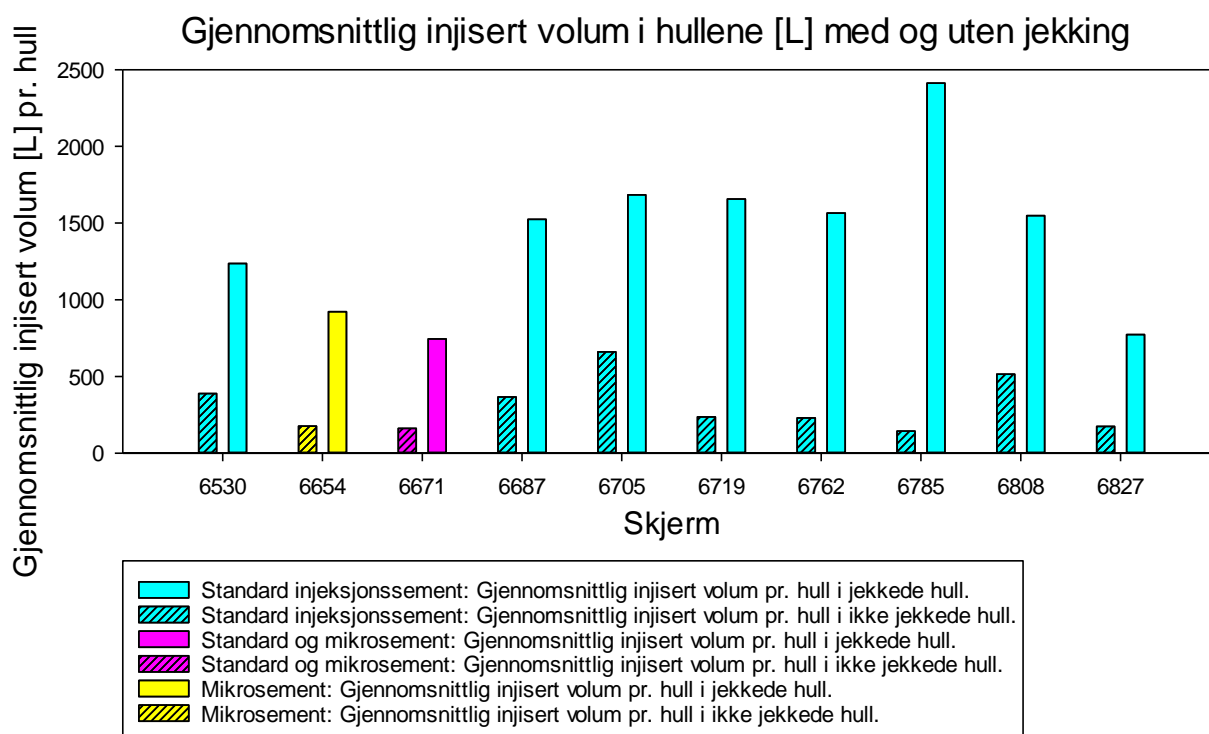
Figur 5.2 Injisert volum [L] og prosent jekkede hull pr skjerm.



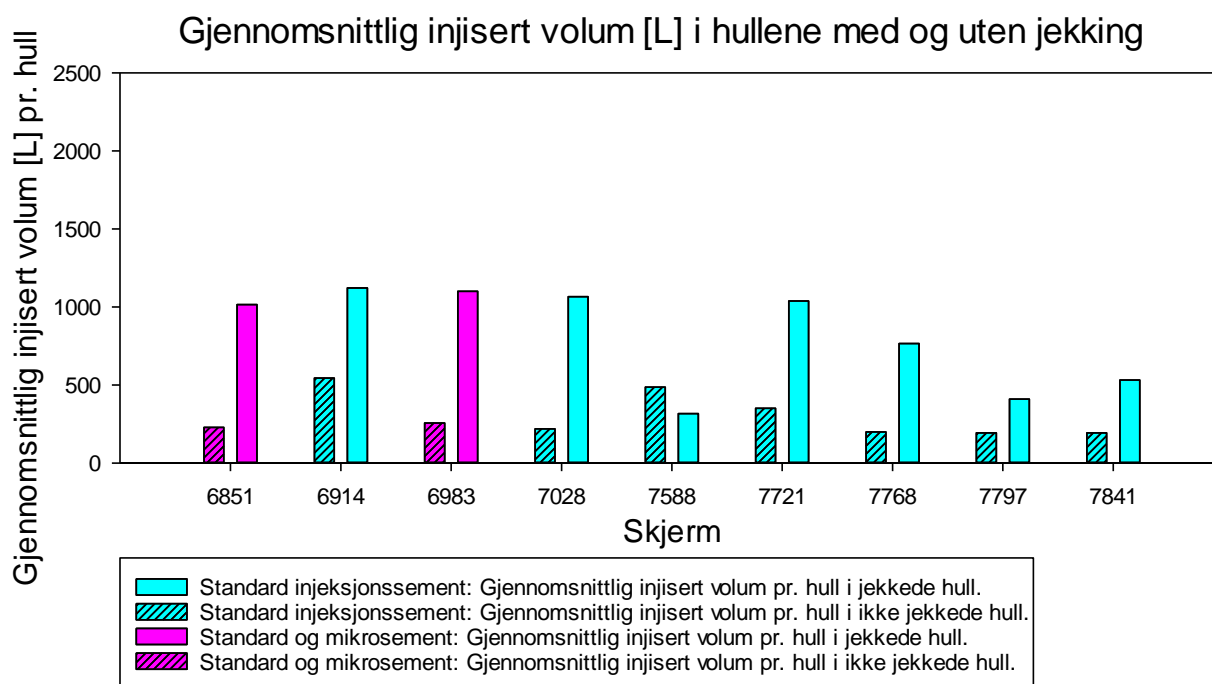
### 5.2.1 Gjennomsnittlig injisert volum i hullene med og ut jekking

Skjerm 7812 er ikke med på grunn av at det ikke er tolket jekking i noen av skjermens hull.

I 18 av 19 skjerner er det injisert et større gjennomsnittlig volum i hullene med jekking i forhold til hullene uten jekking (Figur 5.3 og Figur 5.4). I enkelte av skjermene er det injisert et markant større gjennomsnittlig volum i hullene med jekking, for eksempel skjerm 6785. I denne skjermen er det injisert gjennomsnittlig 2400 l i hullene med jekking og 200 l i hullene uten jekking (Figur 5.3). I skjerm 7588 hvor det gjennomsnittlig er injisert størst volum i hullene uten jekking er forskjellen liten med et gjennomsnittlig på 550 l i hullene uten jekking og 400 l i hullene med jekking (Figur 5.4).



Figur 5.3 Gjennomsnittlige injisert volum i de jekkede og ikke jekkede hull for skjermene fra pel 6530 – 6827.



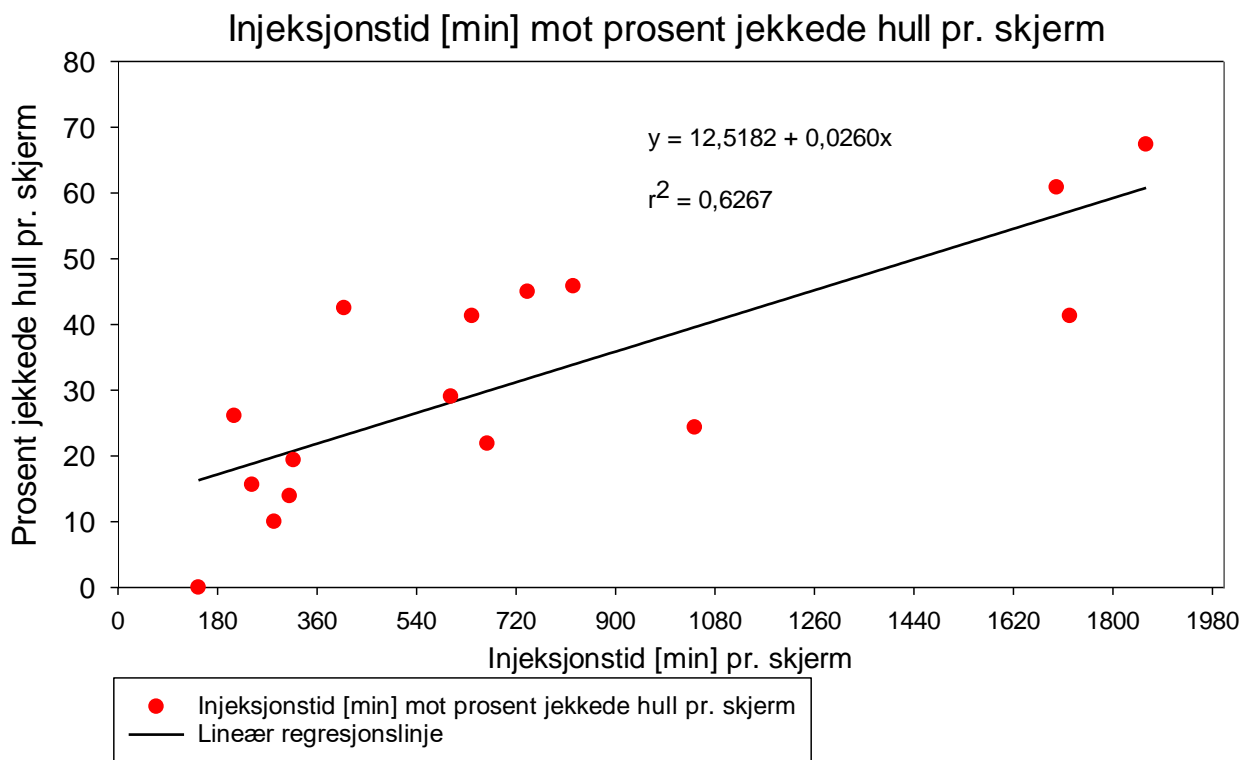
*Figur 5.4 Gjennomsnittlige injisert volum i de jekkede og ikke jekkede hull for skjermene fra pel 6851 – 7841.*

### 5.3 Injeksjonstid mot prosent jekkede hull pr. skjerm

Resultatene er basert på de 16 skjermene hvor det kun er brukt standard injeksjonssement. De 29 m lange skjermene er modifisert til 24 m lange skjermer.

Med Pearssons korrelasjonstest er det en signifikant lineær sammenheng mellom injeksjonstid og prosent jekkede hull pr. skjerm, og  $r^2$  for den lineære regresjonslinjen er 0,63 (Figur 5.5). Den lineære regresjonslinjen passer derfor greit til datapunktene.

I skjermene med mange prosent jekkede hull er injeksjonstiden lenger sammenlignet med skjermene med færre prosent jekkede hull. Formelen for den lineære regresjonslinjen viser at injeksjonstiden øker med 5 t og 40 min ved en økning på 10 % jekkede hull i en skjerm (Figur 5.5).

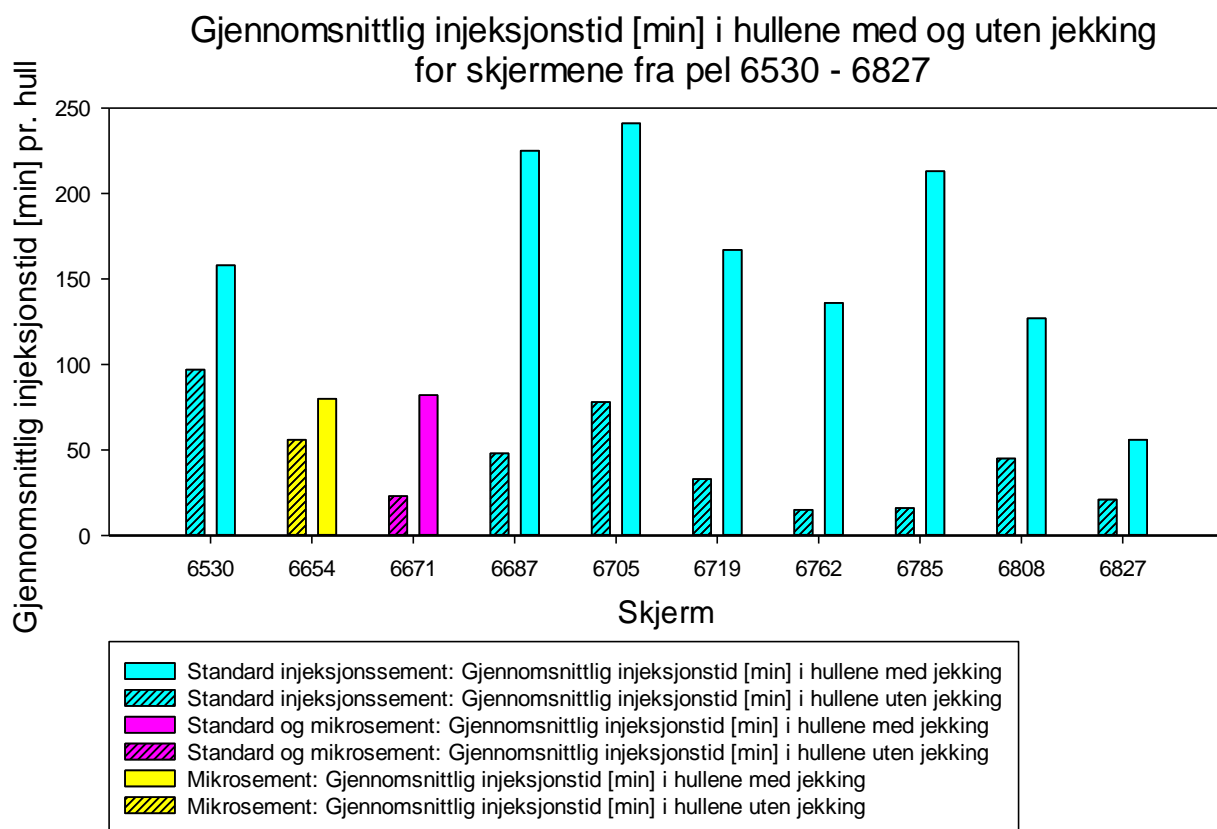


Figur 5.5 Injeksjonstid [min] og prosent jekkede hull pr. skjerm.

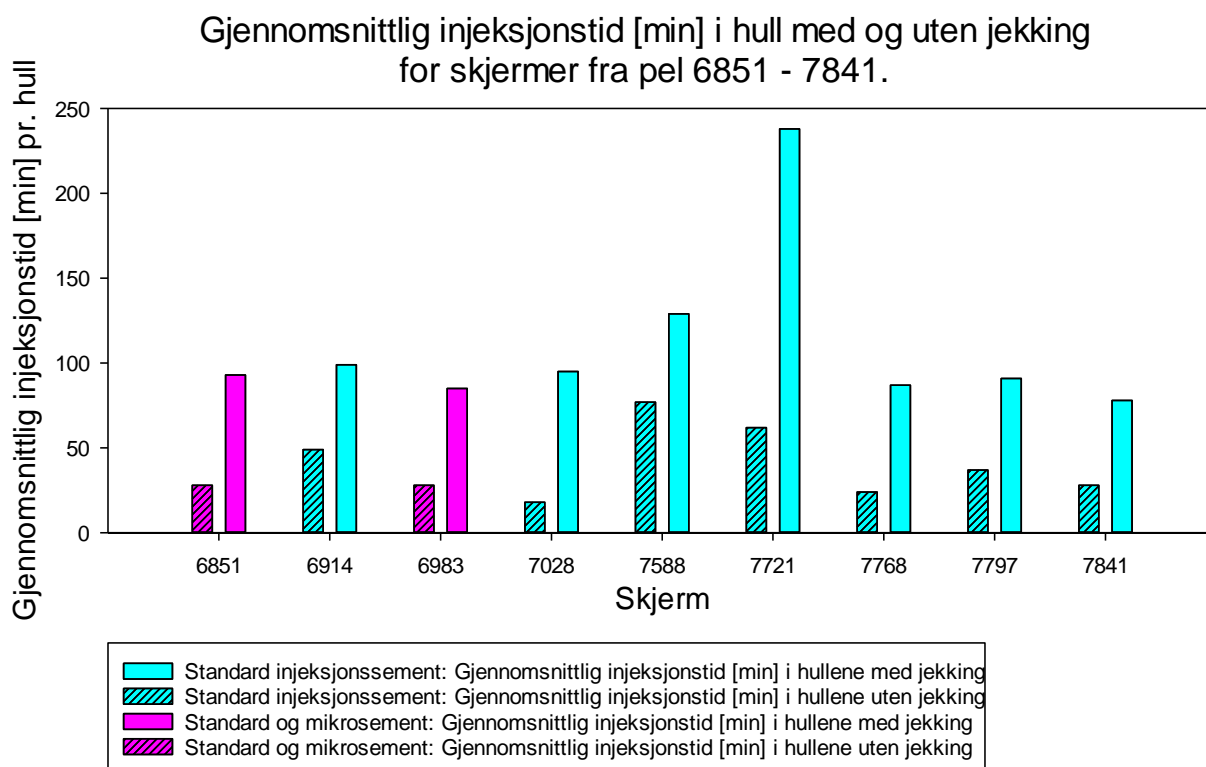
### 5.3.1 Gjennomsnittlig injeksjonstid i hullene med og ut jekking

Skjerm 7812 er ikke med på grunn av at det ikke er tolket jekking i noen av skjermens hull.

I 19 av 19 skjermer er den gjennomsnittlige injeksjonstiden lenger i hullene med jekking i forhold til hullene uten jekking (Figur 5.6 og Figur 5.7). Hvor stor denne forskjellen er variere. I skjerm 6785 er den gjennomsnittlige injeksjonstiden 200 min i hullene med jekking og 20 min i hullene uten jekking (Figur 5.6), mens i skjerm 6914 er den gjennomsnittlige injeksjonstiden 100 min i hullene med jekking og 50 min i hullene uten jekking (Figur 5.7).



Figur 5.6 Gjennomsnittlige injeksjonstid [min] i hullene med og uten jekking for skjermene fra pel 6530 – 6827.

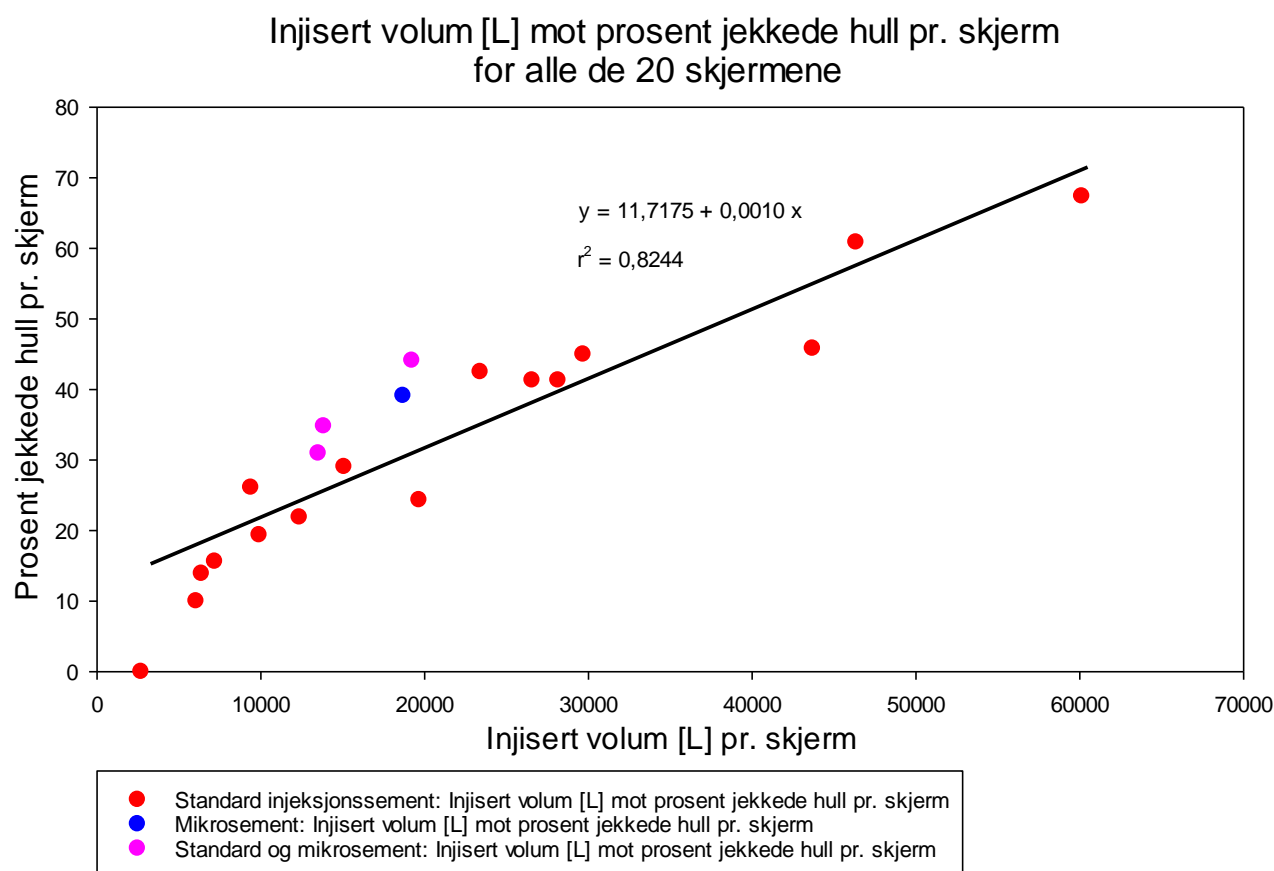


Figur 5.7 Gjennomsnittlige pumpetid [min] i hullene med og uten jekking for skjermene fra pel 6851 – 7841.

## 5.4 Forskjell i prosent jekkede hull. pr skjerm ved ulike sementer

De 29 m lange skjermene er modifisert til 24 m lange skjermene.

Punktene for de 4 skjermene hvor det helt eller delvis er brukt mikrosement ligger over den lineære regresjonslinjen (Figur 5.8). I skjermene hvor det er brukt mikrosement er det da injisert et mindre volum ved en gitt prosent jekkede hull sammenlignet med skjermene hvor det kun er brukt standard injeksjonssement. Dette kan tyde på at det er forskjell på standard injeksjonssement og mikrosement med tanke på jekking.



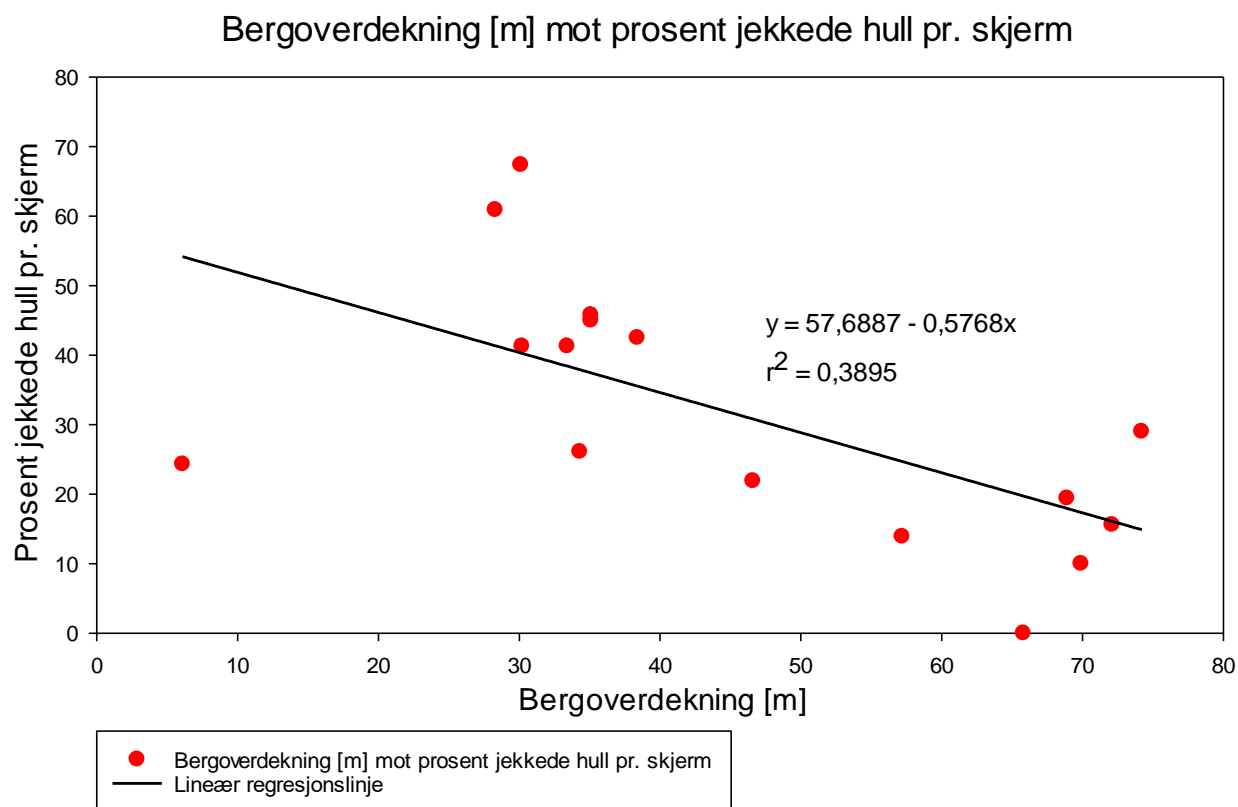
Figur 5.8 Injisert volum [L] mot prosent jekkede hull pr. skjerm for de 20 analyserte skjermene.

## 5.5 Sammenheng mellom bergoverdekning og prosent jekkede hull pr. skjerm

Resultatet er basert på de 16 skjermene hvor det kun er brukt standard injeksjonssement.

Med Pearssons korrelasjonstest er det ingen signifikant lineær sammenheng mellom bergoverdekning og prosent jekkede hull pr. skjerm, og  $r^2$  for den lineære regresjonslinjen er

0,3895 (Figur 5.9). Selv om den lineære regresjonslinjen passer noe dårlig til punktene så er det en tydelig trend at det er færre prosent jekkede hull i skjermene med stor bergoverdekning, og flere prosent jekkede hull i skjermene med lav bergoverdekning. Enkelte skjermer skiller seg noe ut fra denne trenden.

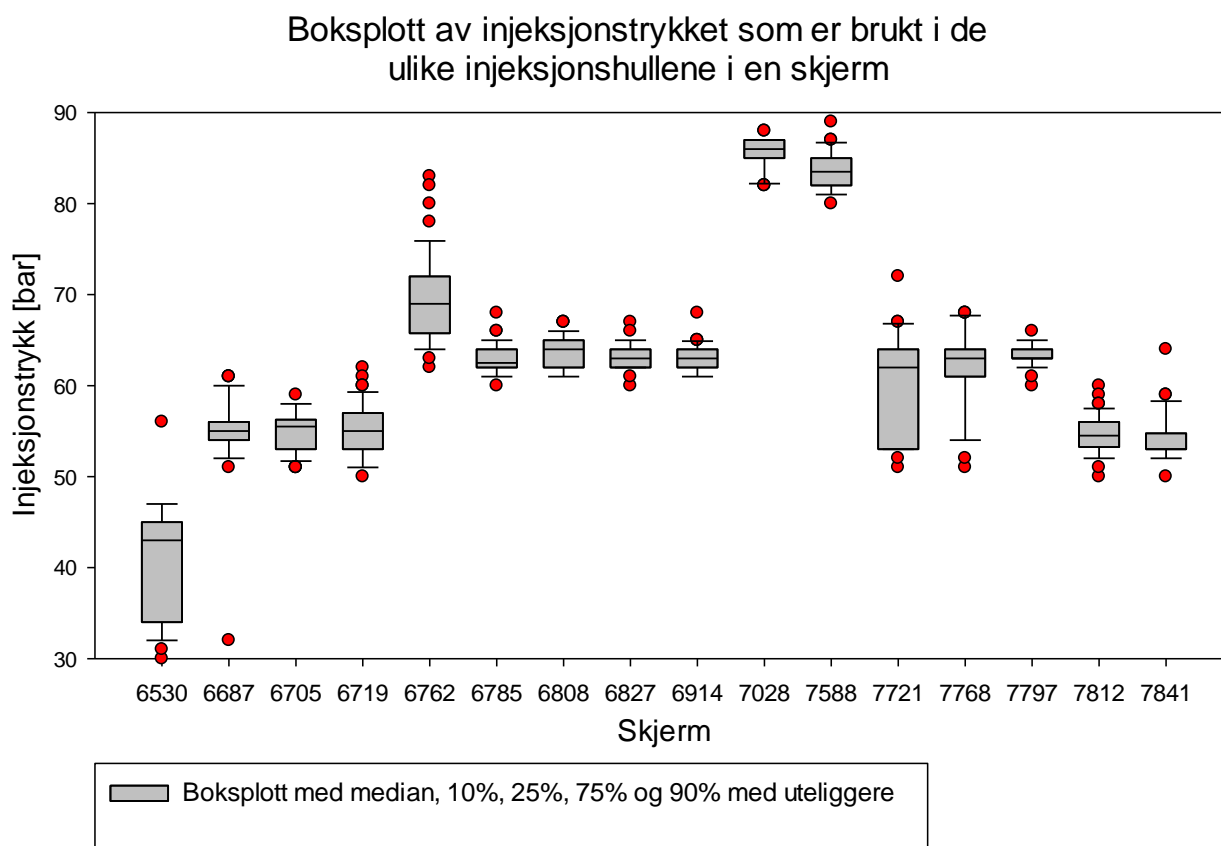


Figur 5.9 Bergoverdekning [m] og prosent jekkede hull pr. skjerm.

## 5.6 Sammenheng mellom injeksjonstrykk og prosent jekkede hull pr. skjerm

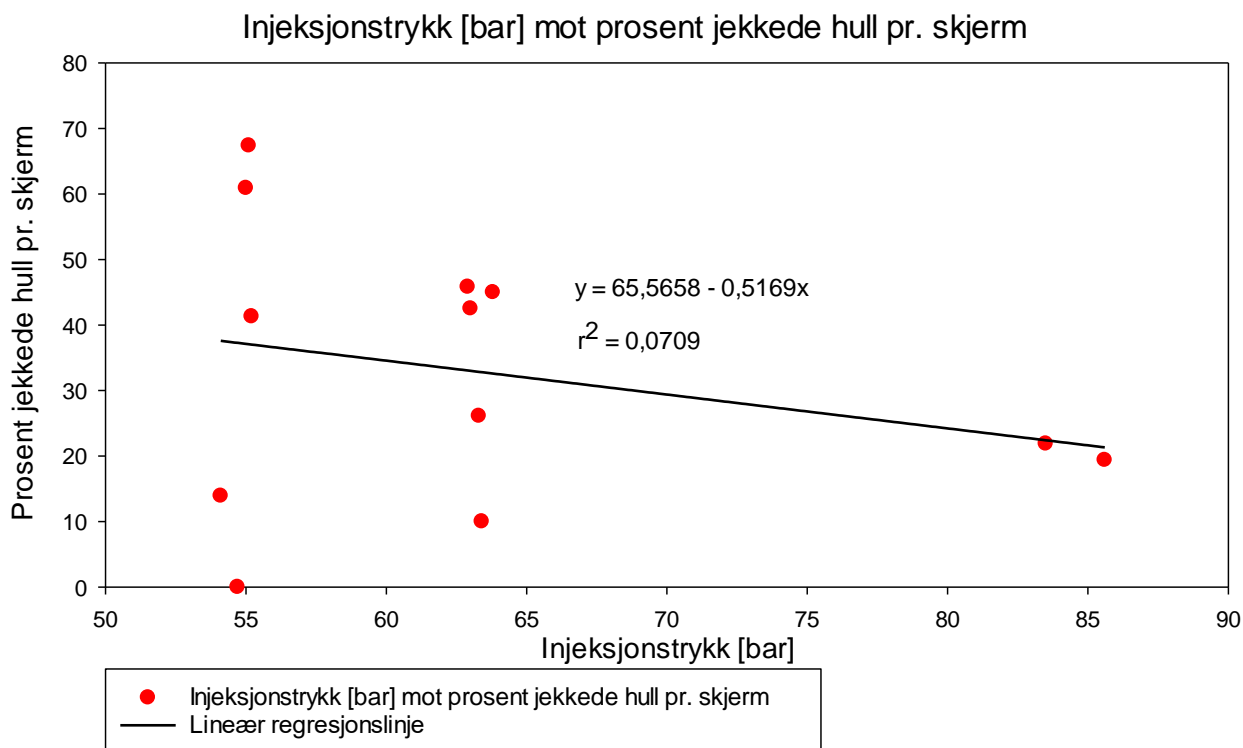
Resultatet er basert på de 16 skjermene hvor det kun er brukt standard injeksjonssement.

Det er sett på hvilket injeksjonstrykk som er brukt i de ulike injeksjonshullene i de forskjellige skjermene før det blir sett på om det er en sammenheng mellom injeksjonstrykk og prosent jekkede hull pr. skjerm (Figur 5.10). I de fleste skjermene er det brukt omtrent det samme injeksjonstrykk i alle av skjermens hull, men det er enkelte skjermer som skiller seg ut. Disse skjermene er 6530, 6762, 7721 og 7768. Det gjennomsnittlige injeksjonstrykket i disse 4 skjermene representerer ikke injeksjonstrykket som er brukt i de ulike injeksjonshullene. Disse skjermene er derfor tatt bort fra den videre analysen.



Figur 5.10 Boksplott av injeksjonstrykket som er brukt i de ulike injeksjonshullene i de ulike skjermene.

Med Pearssons korrelasjonstest er det ingen signifikant lineær sammenheng mellom injeksjonstrykk og prosent jekkede hull pr. skjerm. Siden  $r^2 = 0,07$  er det tydelig fra både den lineære regresjonslinjen i og fra de enkelte punktene i Figur 5.11 at det ikke er noen trend.



Figur 5.11 Injeksjonstrykk [bar] og prosent jekkede hull pr. skjerm.

### 5.6.1 Deldiskusjon av injeksjonstrykk og bergoverdekning mot prosent jekkede hull pr. skjerm

At det ikke er noen sammenheng mellom injeksjonstrykk og prosent jekkede hull pr. skjerm er overraskende, men resultatet gir mening siden bergoverdekningen til de studerte skjermene er svært ulikt. Den samme logikken forklarer årsaken til hvorfor det er dårlig sammenheng mellom bergoverdekning og prosent jekkede hull pr. skjerm ved at det er brukt ulikt injeksjonstrykk i de analyserte skjermene. For å standardisere dataene er det derfor sett på om det er en sammenheng mellom bergoverdekning og prosent jekkede hull pr skjerm i de skjermene hvor det er brukt likt injeksjonstrykk.

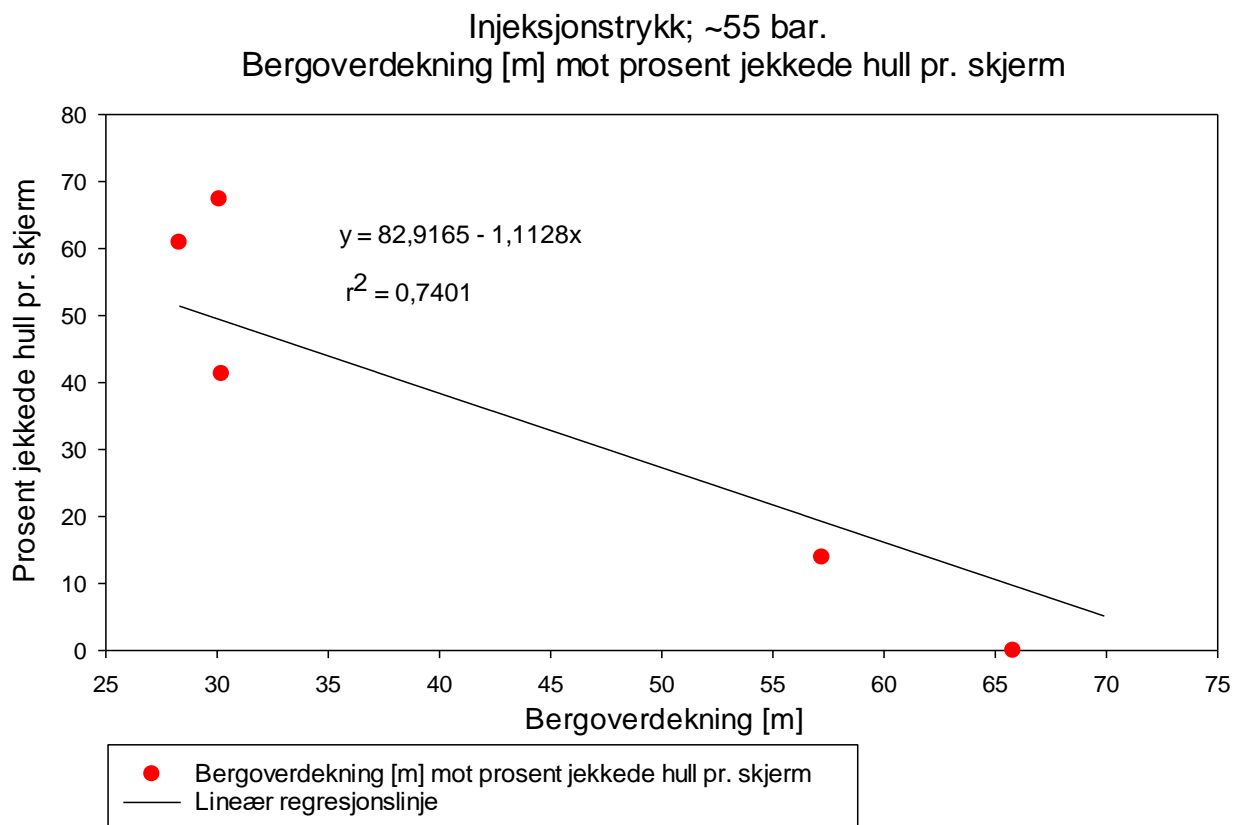
I skjerm 6687, 6705, 6719, 7812 og 7841 er det brukt et injeksjonstrykk på ~55 bar. I skjerm 6785, 6808, 6827, 6914 og 7797 er det brukt et injeksjonstrykk på ~63 bar. I skjerm 7028 og 7588 er det brukt et injeksjonstrykk på ~84 bar.

Datasettet er svært tynt og resultatene er usikre ved denne inndeling.



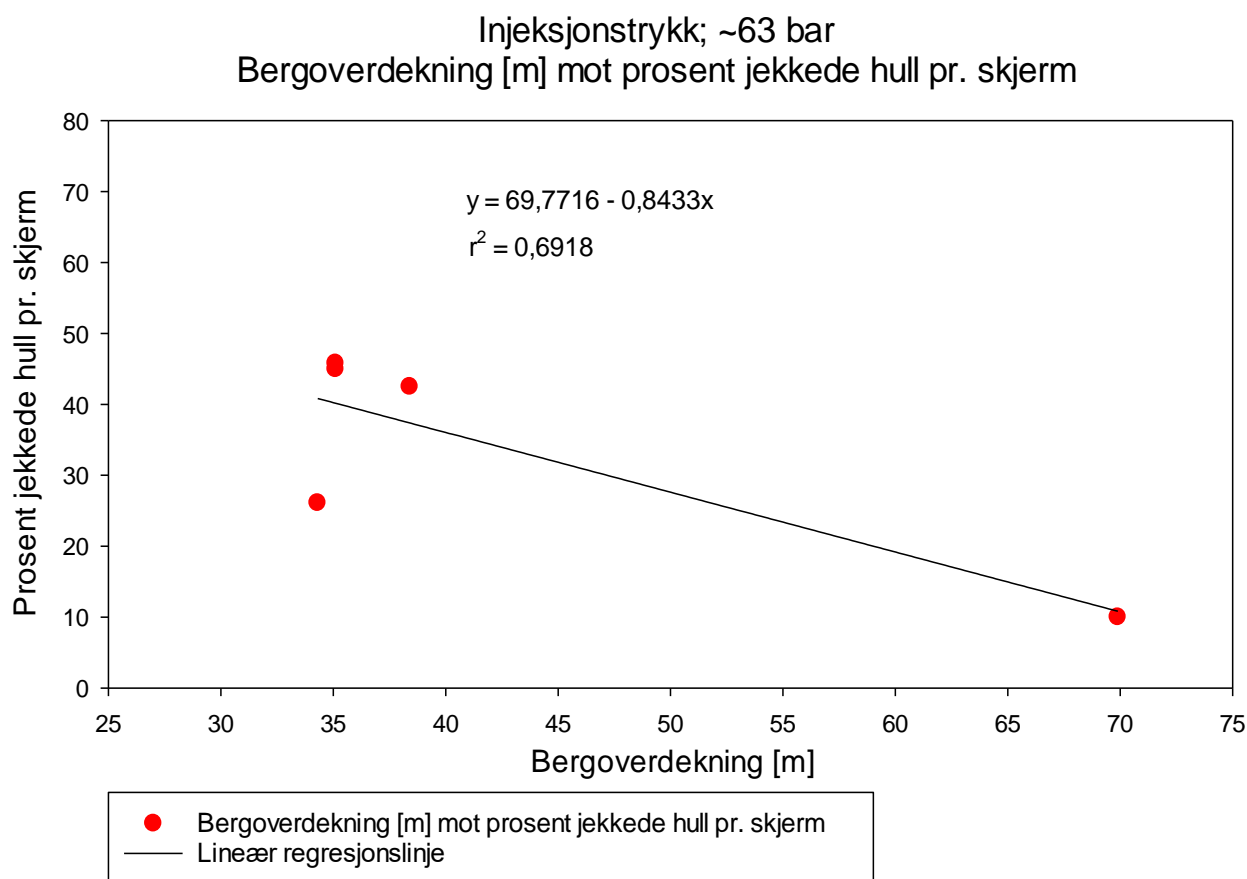
### 5.6.2 Bergoverdekning seksjonert etter injeksjonstrykk

I skjermene hvor det er brukt et injeksjonstrykk på ~55 bar er det med Pearssons korrelasjonstest en signifikant lineær sammenheng mellom bergoverdekning og prosent jekkede hull, og  $r^2$  for den lineære regresjonslinjen er 0,74 (Figur 5.12). Fra den lineære regresjonslinjen er det tydelig at det er flere prosent jekkede hull i skjermene med lav bergoverdekning, og færre prosent jekkede hull ved stor bergoverdekning.



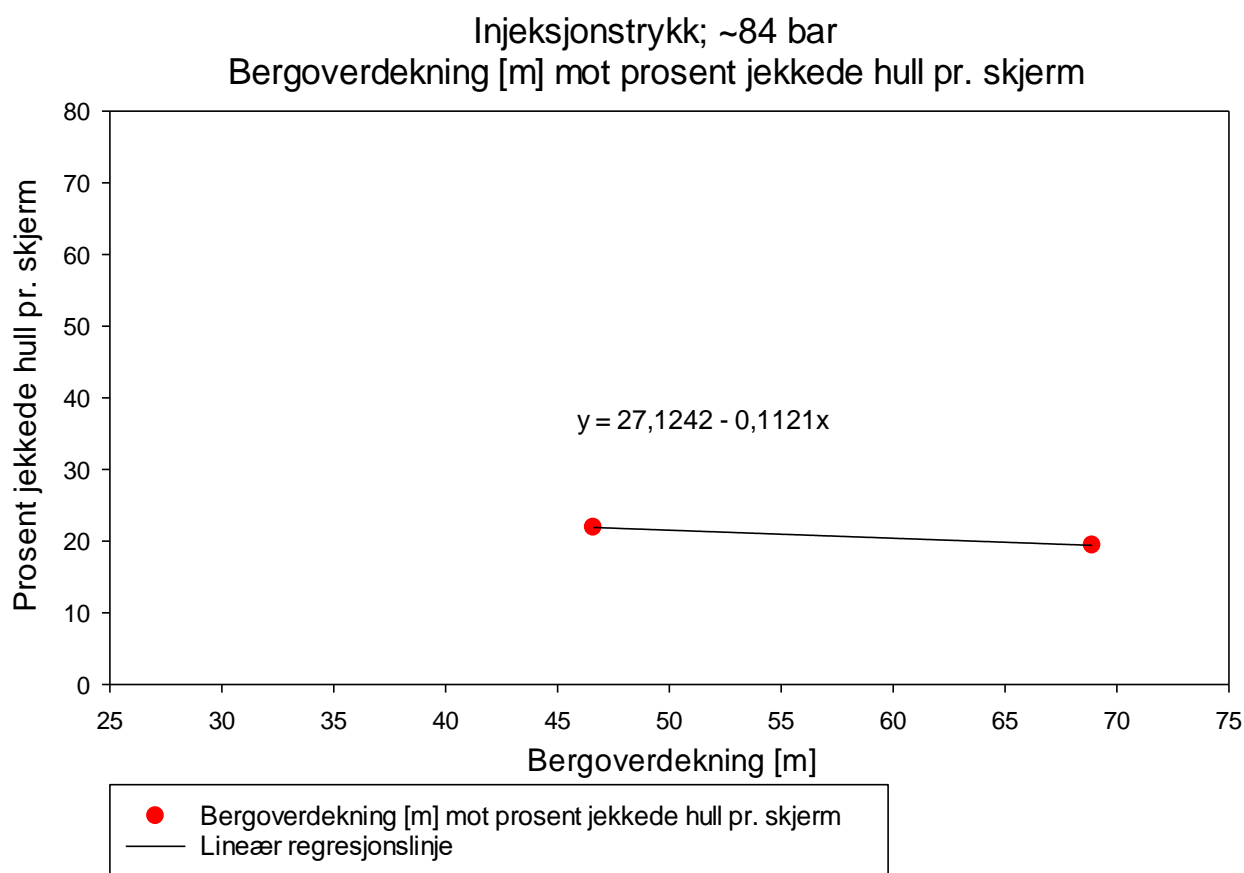
Figur 5.12 Bergoverdekning [m] mot prosent jekkede hull pr. skjerm for skjermene hvor det er brukt et injeksjonstrykk på ~55 bar.

I skjermene hvor det er brukt et injeksjonstrykk på ~63 bar er det med Pearssons korrelasjonstest ingen signifikant lineær sammenheng, men  $r^2$  for den lineære regresjonslinjen er 0,69 (Figur 5.13). Fra den lineære regresjonslinjen er det en tydelig trend med flere prosent jekkede hull i skjermene med lav bergoverdekning, og færre prosent jekkede hull i skjermen med stor bergoverdekning.



*Figur 5.13 Bergoverdekning [m] mot prosent jekkede hull pr. skjerm for skjermene hvor det er brukt et injeksjonstrykk på ~63 bar.*

Det er kun 2 skjermene hvor det brukt et injeksjonstrykk på ~84 bar, og resultatet er svært usikkert. Fra disse to skjermene er den svak tendens med færre prosent jekkede hull i skjermen ved lavest bergoverdekning, og flere prosent jekkede hull i skjermen med høyest bergoverdekning. (Figur 5.14). En eventuell sammenheng mellom bergoverdekning og prosent jekkede hull pr. skjerm kommer lite tydelig frem fra disse to skjermene.



*Figur 5.14 Bergoverdekning [m] mot prosent jekkede hull pr. skjerm ved bruk av et injeksjonstrykk på ~84 bar.*

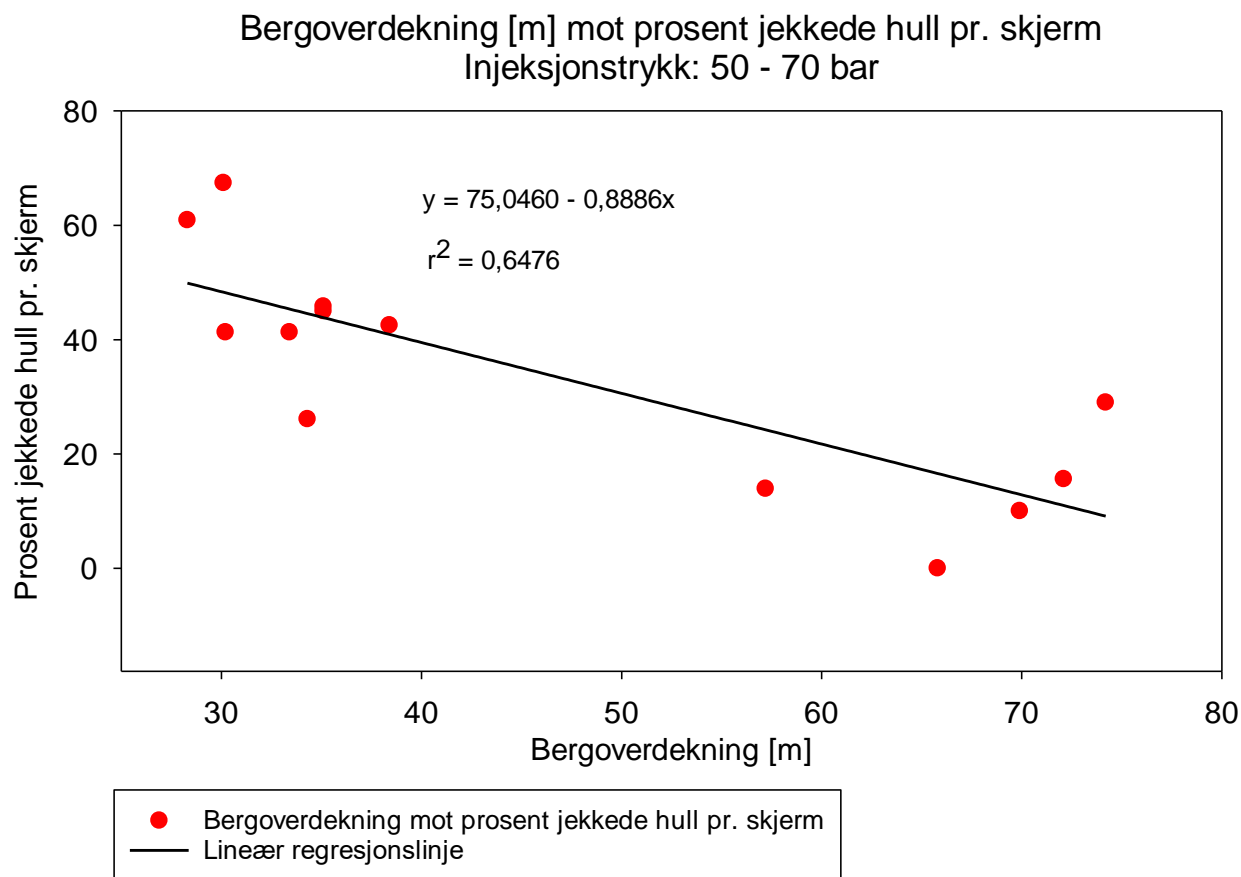
### 5.6.3 Deldiskusjon av bergoverdekning seksjonert etter injeksjonstrykk

Selv om resultatene er entydige og viser at det er færre prosent jekkede hull pr. skjerm ved økt bergoverdekning er resultatene svært usikre på grunn av mangelfulle datasett. Ved å kun se på  $r^2$  for den lineære regresjonslinjen for bergoverdekning og injeksjonstrykket er det tydelig at bergoverdekningen er av større betydning enn injeksjonstrykket med tanke på jekking (Figur 5.9 og Figur 5.11). For å redusere noe av usikkerheten med at det brukt ulikt injeksjonstrykk, og for å øke størrelsen på datasettet blir skjermene hvor det er brukt et gjennomsnittlig injeksjonstrykk mellom 50 – 70 bar sammenlignet for å få frem sammenhengen mellom bergoverdekning og jekking.

#### ***Bergoverdekning mot prosent jekkede hull pr. skjerm. Injeksjonstrykk 50 – 70 bar***

Det er kun skjermene hvor det er brukt standard injeksjonssement, og det gjennomsnittlige injeksjonstrykket er mellom 50 – 70 bar som er med i analysen.

Det er ingen signifikant lineær sammenheng mellom bergoverdekning og prosent jekkede hull pr. skjerm for skjermene hvor det er brukt et injeksjonstrykk på 50 – 70 bar, men  $r^2$  for den lineære regresjonslinjen er 0,65 (Figur 5.15). Ut ifra den lineære regresjonslinjen i Figur 5.15 er det tydelig at det med økt bergoverdekning er færre prosent jekkede hull pr. skjerm.

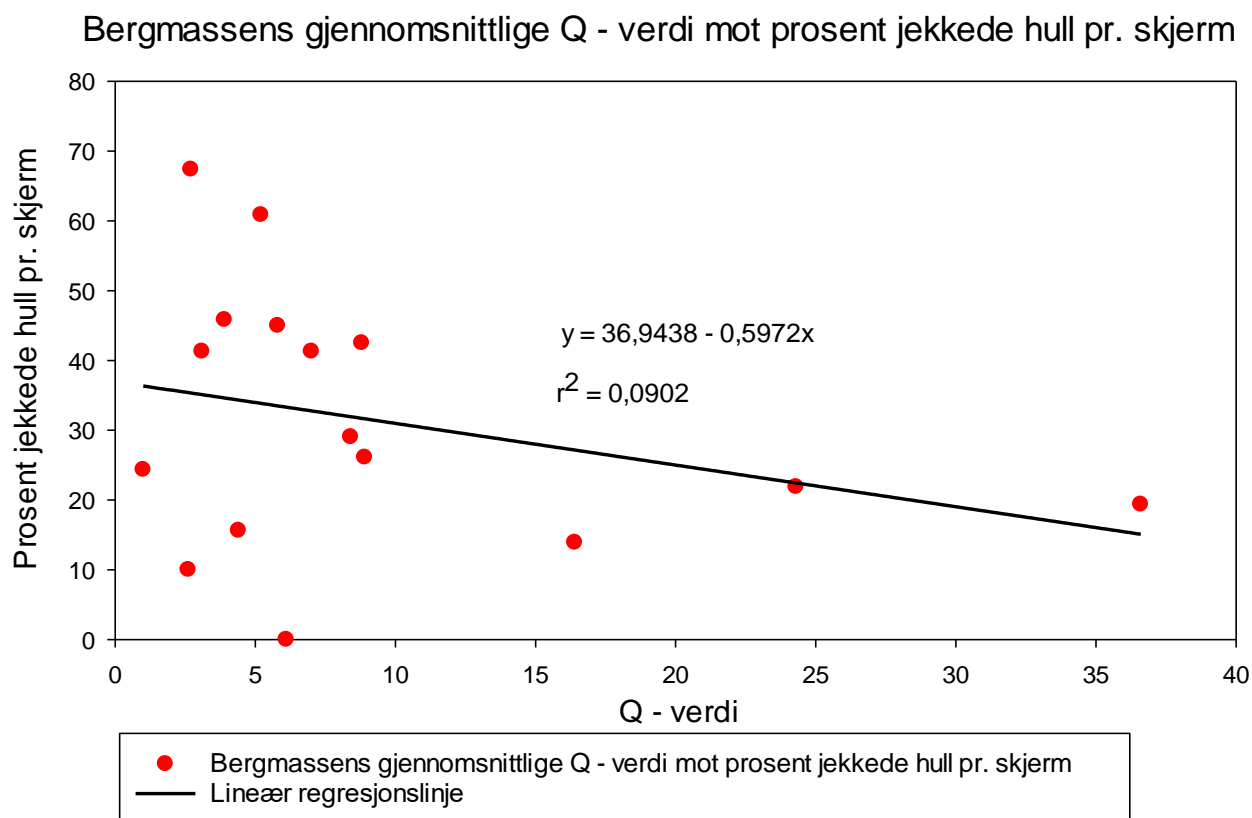


Figur 5.15 Bergoverdekning [m] mot prosent jekkede hull pr. skjerm for skjermene hvor det er brukt et injeksjonstrykk på 50 – 70 bar.

## 5.7 Sammenheng mellom bergmassens Q – verdi og prosent jekkede hull pr. skjerm

Resultatet er basert på de 16 skjermene hvor det kun er brukt standard injeksjonssement.

Med Pearssons korrelasjonstest er det ingen signifikant lineær sammenheng mellom bergmassens Q – verdi og prosent jekkede hull pr. skjerm (se Figur 5.16). At det er ikke er noen lineær sammenheng kommer tydelig frem fra den lineære regresjonslinjen ved at  $r^2 = 0,0902$ . Det er heller ikke mulig å plote en representativ ikke – lineær regresjonslinjen, og det er tydelig fra Figur 5.16 at det ikke er noen sammenheng mellom bergmassens Q – verdi og prosent jekkede hull pr. skjerm.



Figur 5.16 Bergmassens gjennomsnittlige Q – verdi og prosent jekkede hull pr. skjerm.

### 5.7.1 Deldiskusjon: Betydning av bergmassens Q – verdi med tanke på jekking.

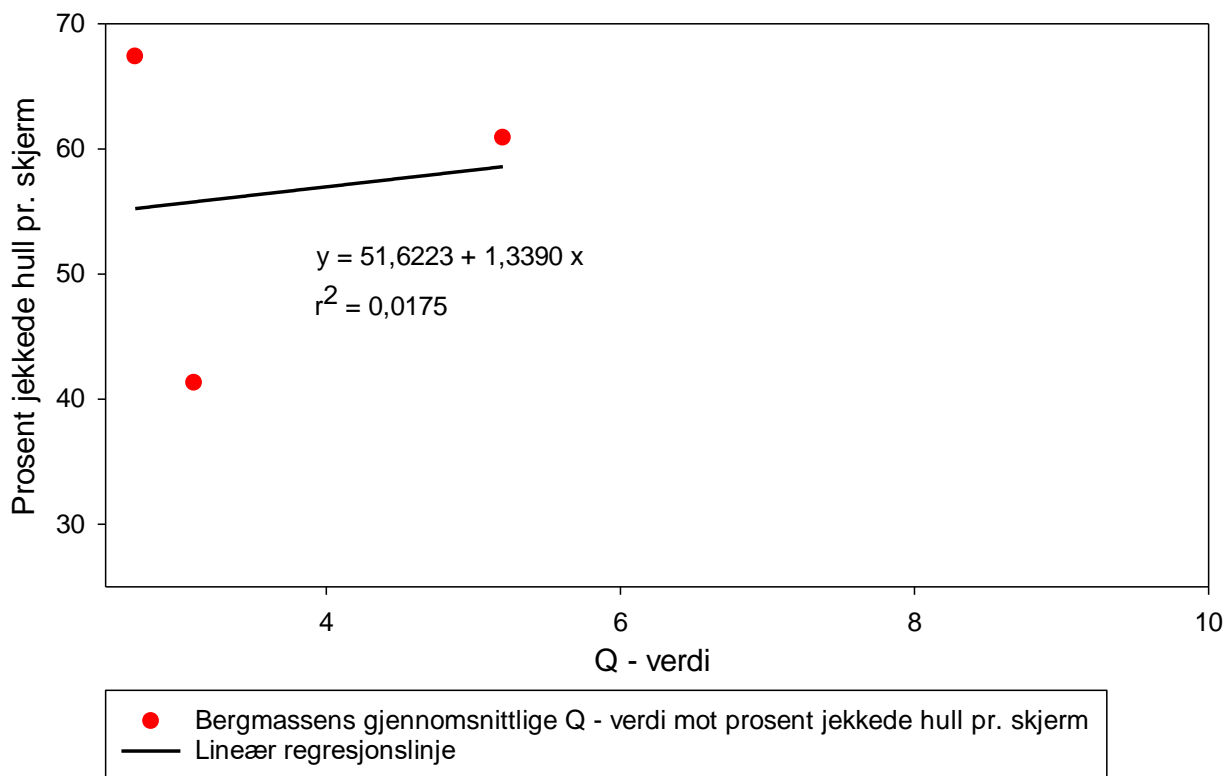
At det ikke er noen sammenheng mellom bergmassens Q – verdi og prosent jekkede hull pr. skjerm gir mening siden injeksjonstrykket og bergoverdekning i de studerte skjermene er svært ulikt. For å ta bort denne usikkerheten er skjermene hvor det er brukt et likt injeksjonstrykk og bergoverdekningen er omtrent den samme, sammenlignet.

Det er kun 2 x 3 skjermene som tilfredsstill kriteriene (Figur 5.12 og Figur 5.13). Datasettet er svært tynt ved denne inndeling, og resultatene er usikre.

#### *Skjermene med likt injeksjonstrykk og lik bergoverdekning.*

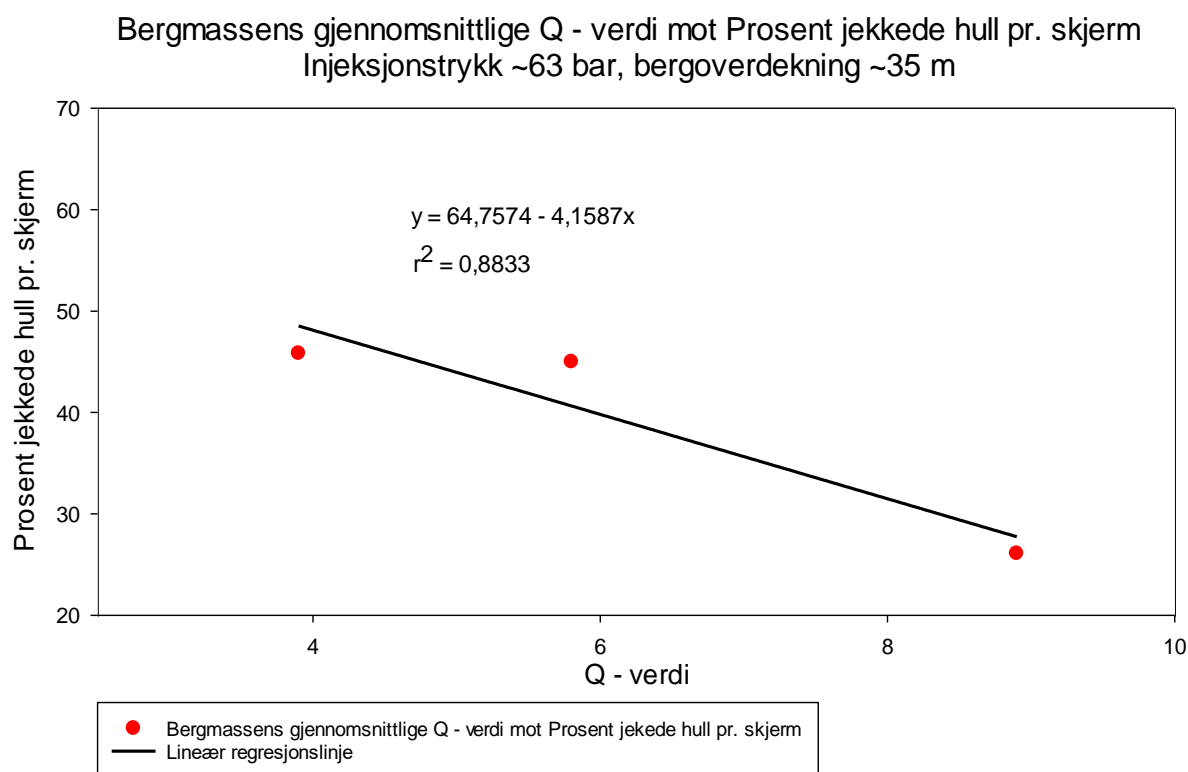
For 3 skjermene hvor det er brukt et injeksjonstrykk 55 bar og bergoverdekning er 30 m er det med Pearssons korrelasjonstest ingen signifikant lineær sammenheng, og det tydelig fra Figur 5.17 at det ikke er noen sammenheng mellom bergmassens Q – verdi og prosent jekkede hull pr. skjerm.

Bergmassens gjennomsnittlige Q - verdi mot prosent jekkede hull pr. skjerm  
Injeksjonstrykk ~55 bar, bergoverdekning ~30 m.



Figur 5.17 Bergmassens gjennomsnittlige Q – verdi mot prosent jekkede hull pr. skjerm for 3 skjermer hvor bergoverdekningen er ~30 m og det er brukt et injeksjonstrykk på ~55 bar.

I 3 skjermer hvor det er brukt et injeksjonstrykk på 63 bar og bergoverdekningen er 35 m er den med Pearssons korrelasjonstest en signifikant lineær sammenheng mellom bergmassens Q – verdi og prosent jekkede hull pr. skjerm, og  $r^2$  for den lineære regresjonslinjen er 0,88 (Figur 5.18). Den lineære regresjonslinjen viser at det er flere prosent jekkede hull i skjermene som er etablert i en bergmasse med lav Q – verdi, og færre prosent jekkede hull for skjermene som er etablert i en bergmasse med høy Q – verdi (Figur 5.18).



Figur 5.18 Bergmassens gjennomsnittlige  $Q$  – verdi mot prosent jekkede hull pr. skjerm for 3 skjermene hvor bergoverdekningen er ~35 m og det er brukt et injeksjonstrykk på ~63 bar.

### 5.7.2 Deldiskusjon $Q$ – verdi seksjonert etter injeksjonstrykk og bergoverdekning

I skjermene hvor det er brukt et injeksjonstrykk på 55 bar og bergoverdekningen er 30 m er det ingen sammenheng mellom bergmassens  $Q$  – verdi og prosent jekkede hull, men i skjermene hvor det er brukt et injeksjonstrykk på 63 bar og bergoverdekningen er 35 m er det en signifikant lineær sammenheng. En stor svakhet ved resultatene er at datasettene i hvert tilfelle kun består av 3 skjermene. Analysen er derfor svak, og resultatene er usikre.

Alle skjermene hvor bergoverdekning er mellom 30 – 40 m uavhengig av hvilket injeksjonstrykk som er brukt er sammenlignet for å øke størrelsen på datasettet.

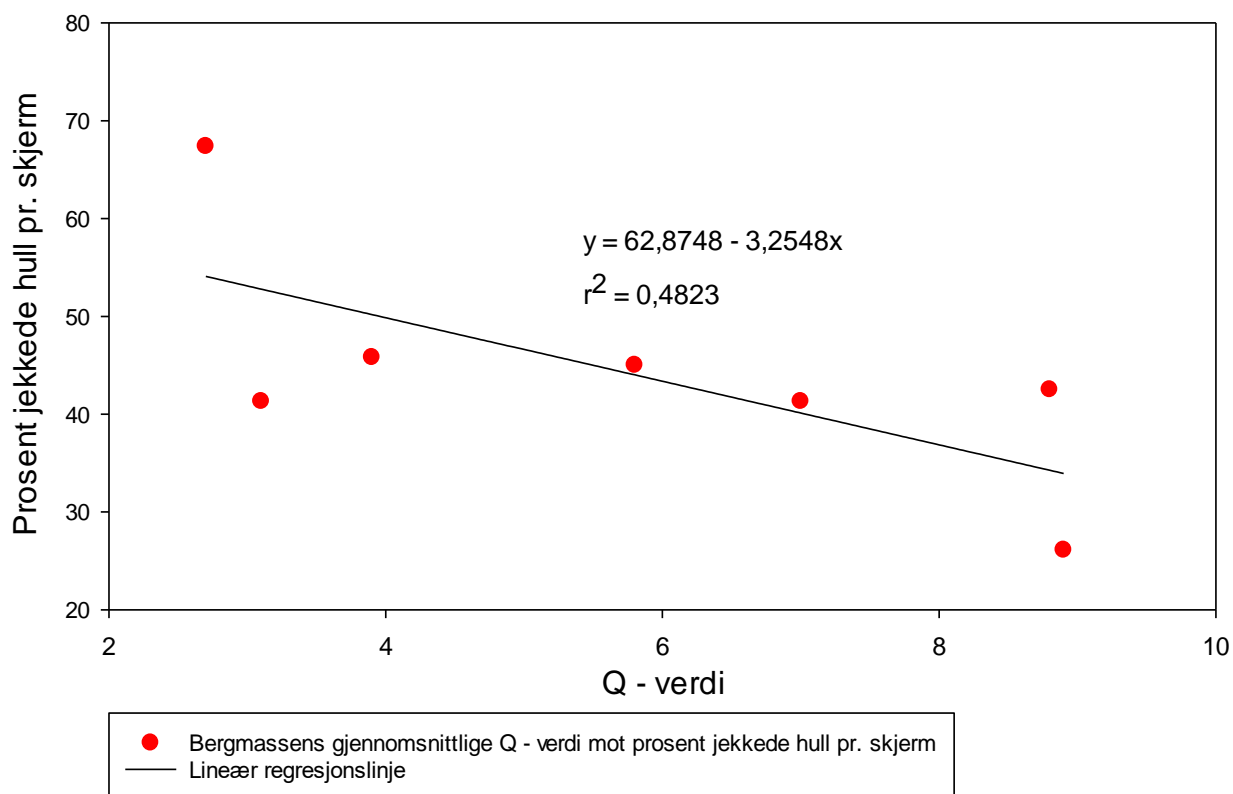
Det er flere parametere som inngår i bergmassens  $Q$  – verdi. Noen av parameterne kan ha større betydning med tanke på jekking enn andre parameterne, for eksempel bergmassens RQD. I en oppsprukken bergmasse (lav RQD) er spenningsfeltet mer inhomogent, og det initiale normalstresset kan da være noe redusert i forhold til i en mindre oppsprukken bergmasse. Det blir derfor sett på om det er en sammenheng mellom bergmassens RQD verdi og prosent jekkede hull pr. skjerm for skjermene hvor bergoverdekningen er mellom 30 - 40 m. RQD verdien er den gjennomsnittlige RQD verdien til bergmassen som en skjerm er etablert i.

*Q – verdi mot prosent jekkede hull. Bergoverdekning 30 – 40 m*

Det er kun skjermene hvor det kun er brukt standard injeksjonssement som er med i analysen. I disse skjermene er det brukt et injeksjonstrykk på 55 og 63 bar.

Med Pearssons korrelasjonstets er det ingen signifikant lineær sammenheng og  $r^2$  for den lineære regresjonslinjen er 0,48 (Figur 5.19). Selv om den lineære regresjonslinjen passer noe dårlig til datapunktene indikerer den at det er færre prosent jekkede hull i en skjerm med høy Q – verdi, og flere prosent jekkede hull i en skjerm med lav Q – verdi. Det er hovedsakelig to skjermene som bidrar til denne indikasjonen, skjermen med en Q – verdi på 3 og prosent jekkede hull på 70 %, og skjermen med Q – verdi på 9 og prosent jekkede hull på 25 % (Figur 5.19). For de resterende 5 skjermene er det ingen sammenheng mellom bergmassens Q – verdi og prosent jekkede hull pr. skjerm.

Bergmassens gjennomsnittlige Q - verdi mot prosent jekkede hull pr. skjerm  
Bergoverdekning: 30 - 40 m



*Figur 5.19 Bergmassens gjennomsnittlige Q – verdi mot prosent jekkede hull pr. skjerm for skjermene med en bergoverdekning mellom 30 – 40 m.*

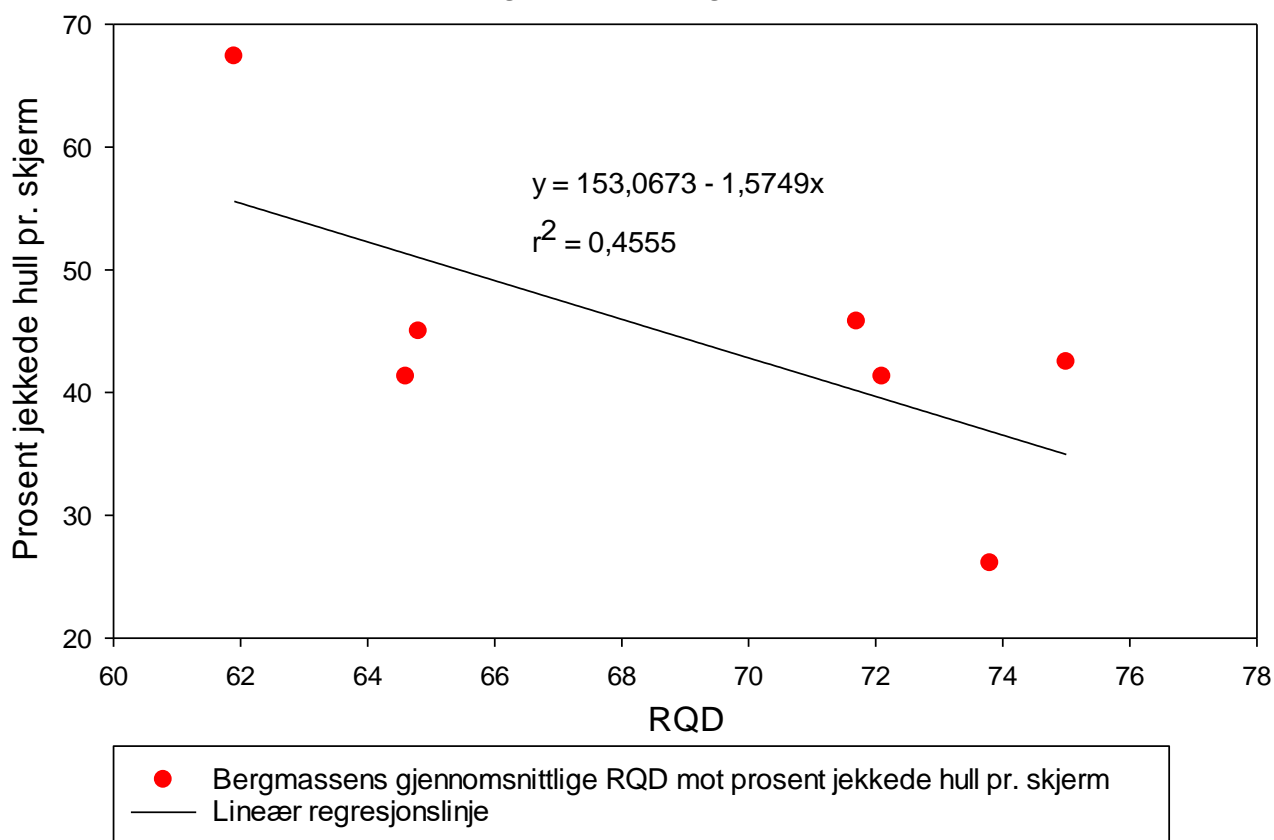


*RQD mot prosent jekkede hull. Bergoverdekning 30 – 40 m*

Det er kun skjermene hvor det kun er brukt standard injeksjonssement, og som har en bergoverdekning mellom 30 – 40 m som er med i analysen. I disse skjermene er det brukt et injeksjonstrykk på 55 eller 63 bar, og bergmassens  $SRF = 1,0$ , og  $J_w = 1,0$ .

Det er ingen signifikant lineær sammenheng mellom bergmassens RQD og prosent jekkede hull pr. skjerm. Det forsøkt å plote en lineær regresjonslinje, og  $r^2$  for den er 0,4555 (Figur 5.20). Selv om den lineære regresjonslinjen passer noe dårlig til datapunktene viser den at det er færre prosent jekkede hull i skjermene som etablert i en bergmasse med høy RQD, og flere prosent jekkede hull i skjermene som etablert i en bergmasse med lav RQD. Selv om den lineære regresjonslinjen viser denne trenden er det hovedsakelig 2 skjermene som bidrar til dette, skjermen med  $RQD = 62$  og prosent jekkede hull er 70%, og skjermen med  $RQD = 74$  og prosent jekkede hull er 25 % (Figur 5.20). For de resterende 5 skjermene er det ingen sammenheng mellom bergmassens RQD og prosent jekkede hull pr. skjerm.

**Bergmassens gjennomsnittlige RQD mot prosent jekkede hull pr. skjerm**  
**Bergoverdekning: 30 - 40 m**

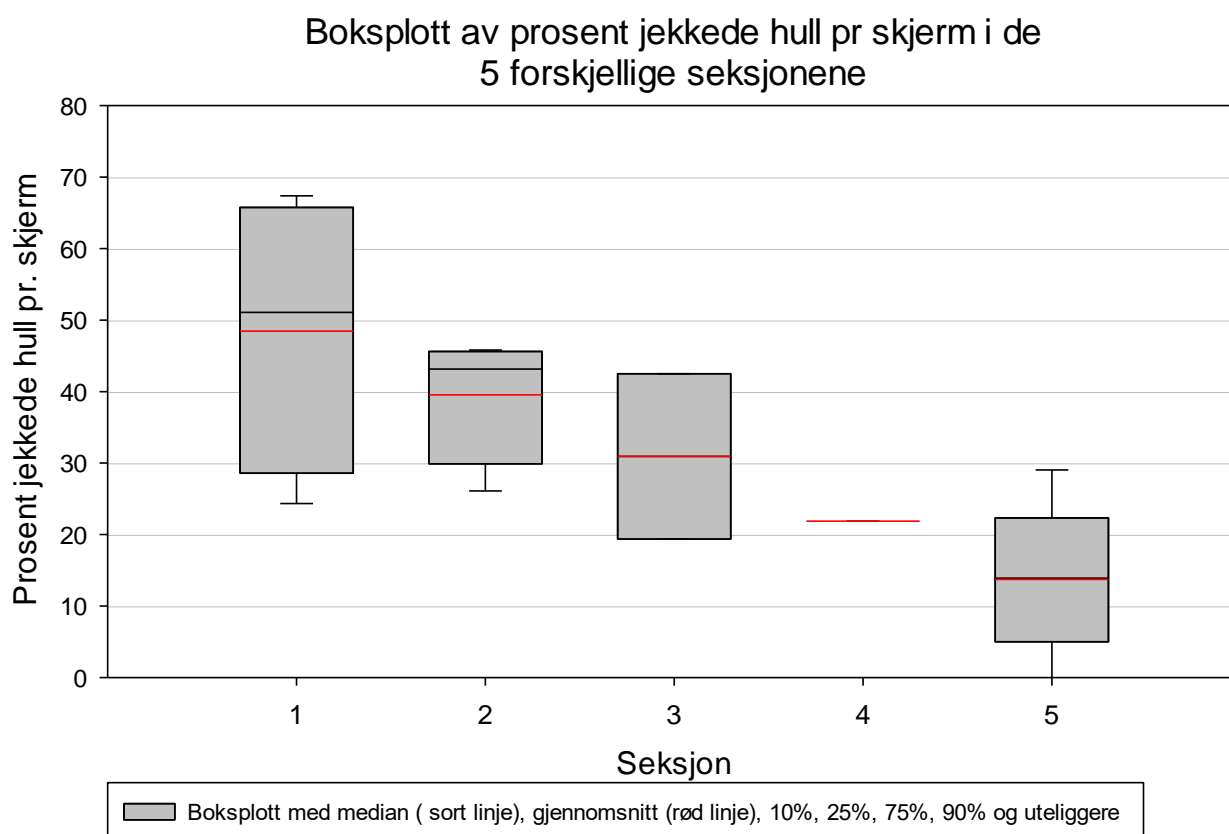


*Figur 5.20 Bergmassens gjennomsnittlige RQD mot prosent jekkede hull pr. skjerm for skjermene med en bergoverdekning mellom 30 – 40 m.*

## 5.8 Seksjonerte sprekkedomener

Det er kun skjermene hvor det er brukt standard injeksjonssement som er med i analysen.

Gjennomsnittet av prosent jekkede hull er høyest for skjermene som er lokalisert i seksjon 1, etterfulgt av seksjon 2, 3, 4, og til slutt seksjon 5 (Figur 5.21). Det som skiller seksjon 1, 2 og 3 fra seksjon 4 og 5 er at fallet til et av dominerende sprekkesettene er ~horisontalt er i seksjon 1, 2 og 3. Et slikt dominerende sprekkesett med et ~horisontalt fall eksisterer ikke i seksjon 4 og 5 (se Tabell 5-1). Det horisontale sprekkesettet ser derfor ut til å være av stor betydning med tanke på jekking ved at det er flere prosent jekkede hull i en skjerm som er etablert i en bergmasse med et horisontalt sprekkesett, og færre prosent jekkede hull i skjerm som er etablert i en bergmasse uten horisontalt sprekkesett.



*Figur 5.21 Boksplott av prosent jekkede hull i de 5 forskjellige seksjonene.*

Tabell 5-1 Dominerende sprekkesett i de 5 forskjellig sprekkedomene.

Seksjon \ Sprekkesett	1	2	3	4	5
<b>1 (strøk høyre/fall)</b> <b>Sprekkekons.</b>	008/73 9,0-10,5%	003/76 10,5-12,0%	003/77 10,5-12,0%	014 / 71 13,5-15,0	341/65 4,5-6,0%
<b>2 (strøk høyre/fall)</b> <b>Sprekkekons.</b>	059/07 6,0-7,5%	219/03 10,5-12,0%	171/06 3,0-4,5%		131/30 3,0-4,5%
<b>3 (strøk høyre/fall)</b> <b>Sprekkekons.</b>	126/80 3,0-4,5%	320/84 4,5-6,0%			250/85 3,0-4,5%
<b>4 (strøk høyre /fall)</b> <b>Sprekkekons.</b>		036/80 4,5-6,0%			
<b>5 (strøk høyre /fall)</b> <b>Sprekkekons.</b>		174/81 4,5-6,0%			

### 5.8.1 Deldiskusjon Seksjonerte sprekkedomer og % jekkede hull pr. skjerm

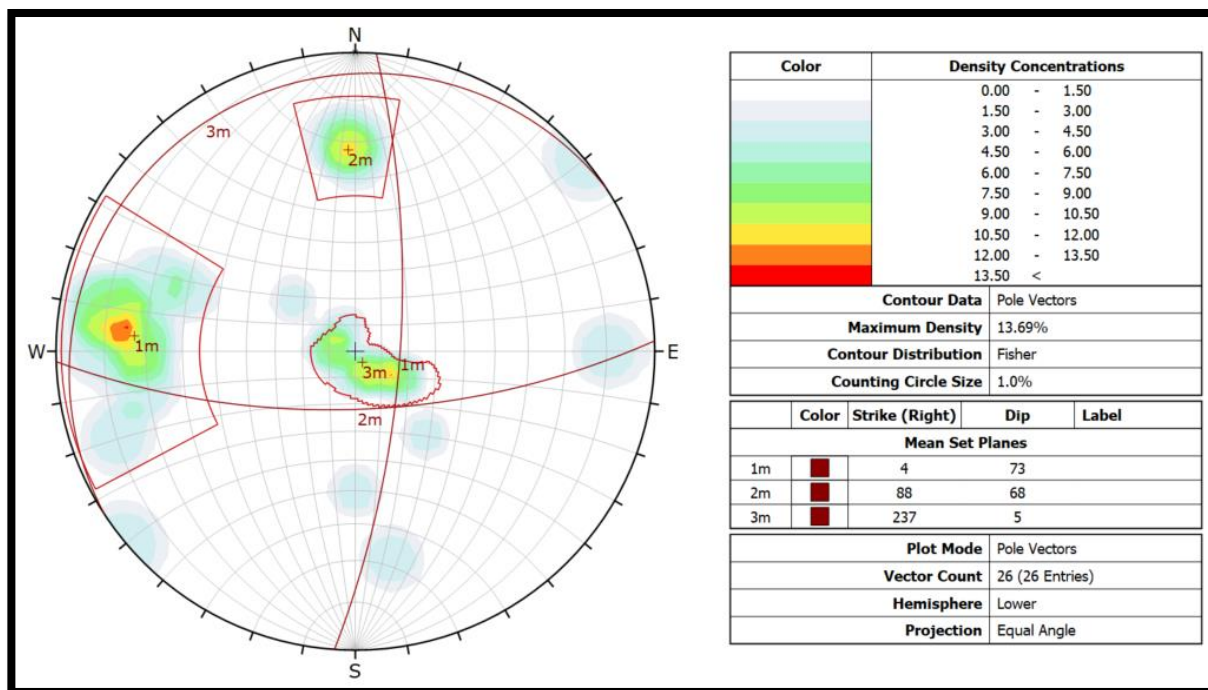
I de studerte skjermene er det brukt ulikt injeksjonstrykk, og bergoverdekningen til de forskjellige seksjonene er svært ulikt. Bergoverdekning er generelt lavest i seksjon 1, etterfulgt av seksjon 2, 4, 3 og 5. Det er derfor naturlig at det er flere prosent jekkede hull for skjermene som er lokalisert i seksjon 1, og færre prosent jekkede hull i skjermene som er lokalisert i seksjon 5.

For å undersøke om fallet til sprekkene er av noen betydning blir skjermene hvor et blitt brukt likt injeksjonstrykk og bergoverdekningen er samme sammenlignet. I skjerm 6705 og 6719 hvor det brukt likt injeksjonstrykk og bergoverdekningen er den samme er det stor forskjell i prosent jekkede hull med I skjerm 67,4 % i skjerm 6705 og 41,3 % i skjerm 6719. Det samme gjelder for skjerm 6785 og 6827. Selv om injeksjonstrykket og bergoverdekningen er den samme er 45,8 % av hullene i skjerm 6785 jekket, og 26,1 % av hullene i skjerm 6827.

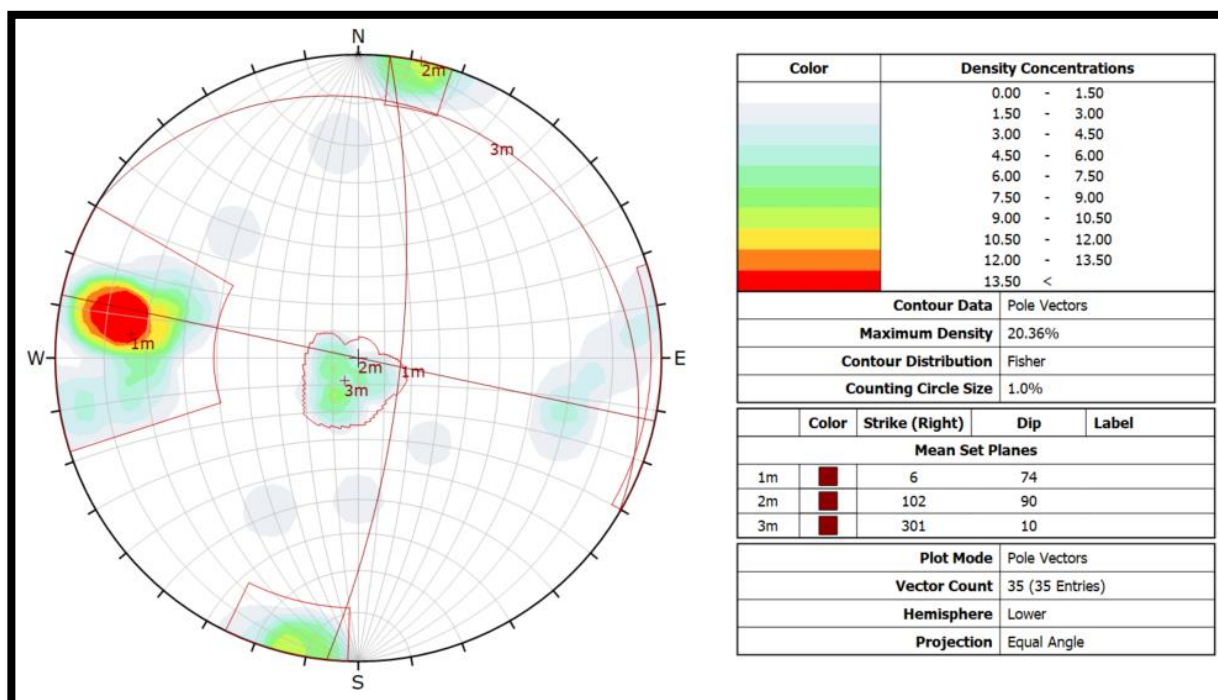
### **Dominerende sprekker i skjerm 6705 og 6719**

De dominerende sprekkene som skjerm 6705 (Figur 5.22) og 6719 (Figur 5.23) er etablert i er omtrent de samme. Ved begge skjermene er strøket og fallet til de mest dominerende sprekkene ~004/74, og i begge skjermene er det noen mindre dominerende sprekker med et horisontalt fall. I tillegg er det noen tilfeldige sprekker i begge skjermene.

Helningen til sprekkene kan ikke forklare hvorfor det er så stor forskjell i prosent jekkede hull pr. skjerm.



Figur 5.22 Stereonet for sprekkene i bergmassen som skjerm 6705 er etablert i.



Figur 5.23 Stereonet for sprekkene i bergmassen som skjerm 6719 er etablert i.

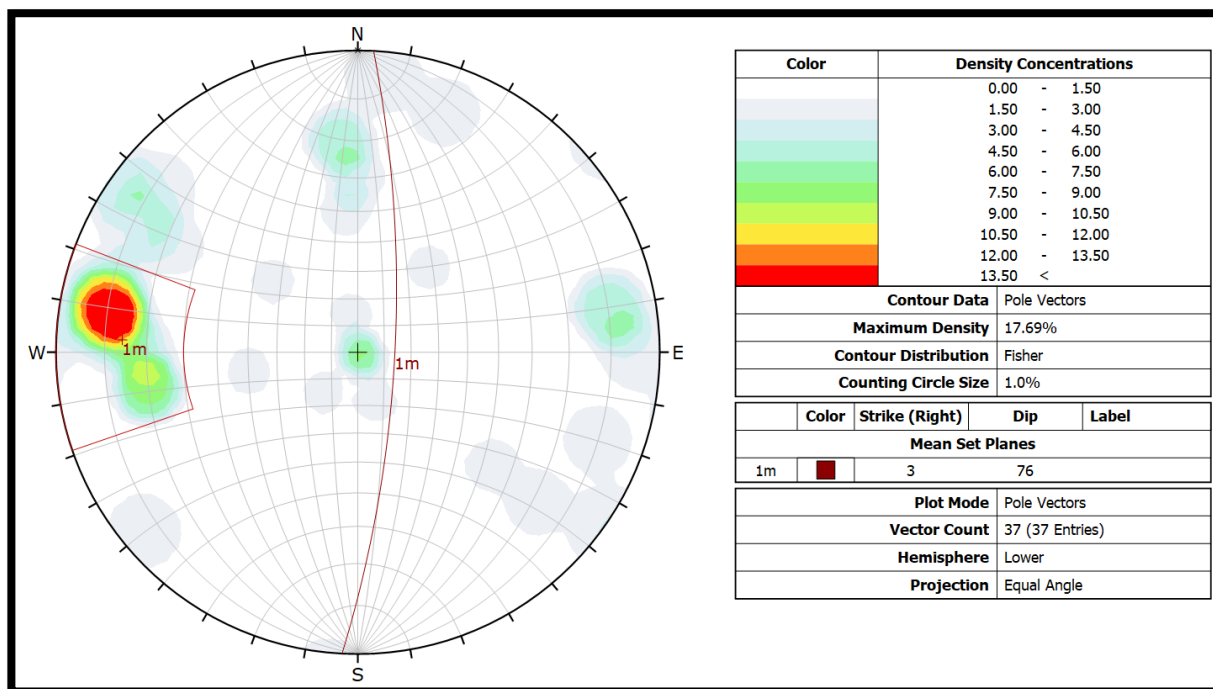
### Dominerende sprekker i skjerm 6785 og 6827

De dominerende sprekkene som skjerm 6785 (Figur 5.24) og skjerm 6827 (Figur 5.25) er etablert i er svært like. I begge skjermene er strøket og fallet til de mest dominerende

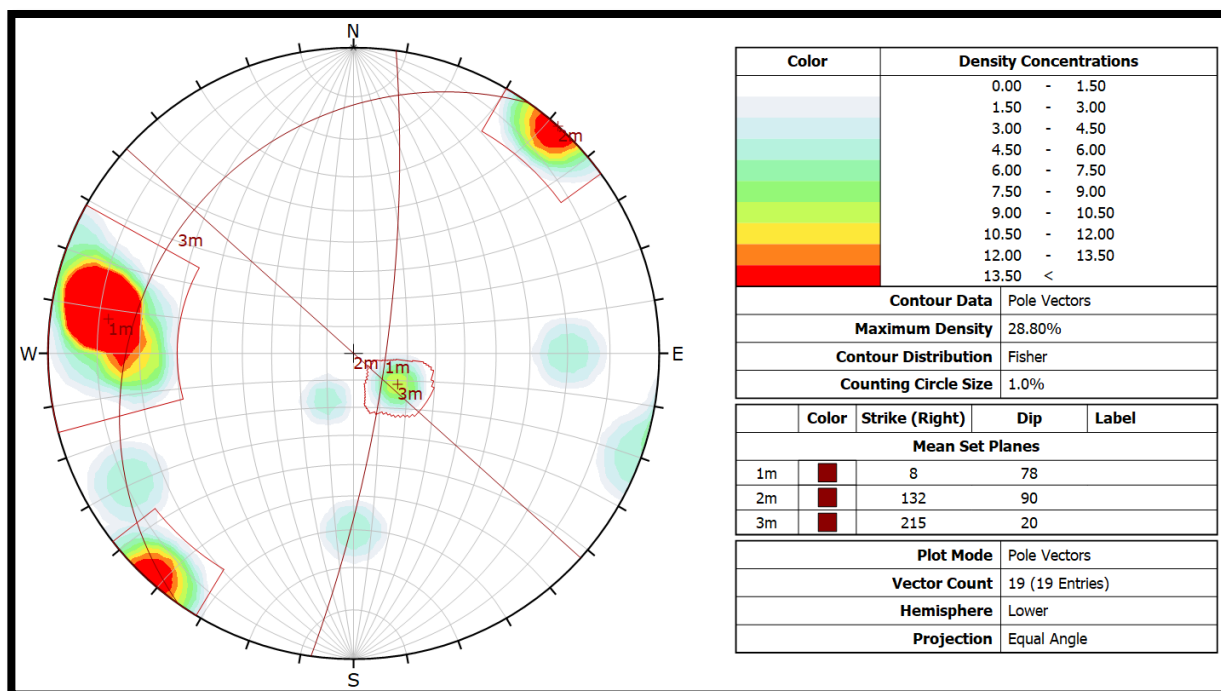
## Resultater

sprekkene ~005/77, og i begge skjermene er det noen mindre dominerende sprekker med et horisontalt fall. I tillegg er det i begge skjermene noen tilfeldige sprekker.

Helningen til sprekkene kan derfor ikke forklare hvorfor det er så stor forskjell i prosent jekkede hull pr. skjerm.



Figur 5.24 Stereonet for sprekkene i bergmassen som skjerm 6785 er etablert i.



Figur 5.25 Stereonet for sprekkene i bergmassen som skjerm 6827 er etablert i.

## 5.9 Sammenheng mellom lokalisering av de enkelte injeksjonshullene og jekking

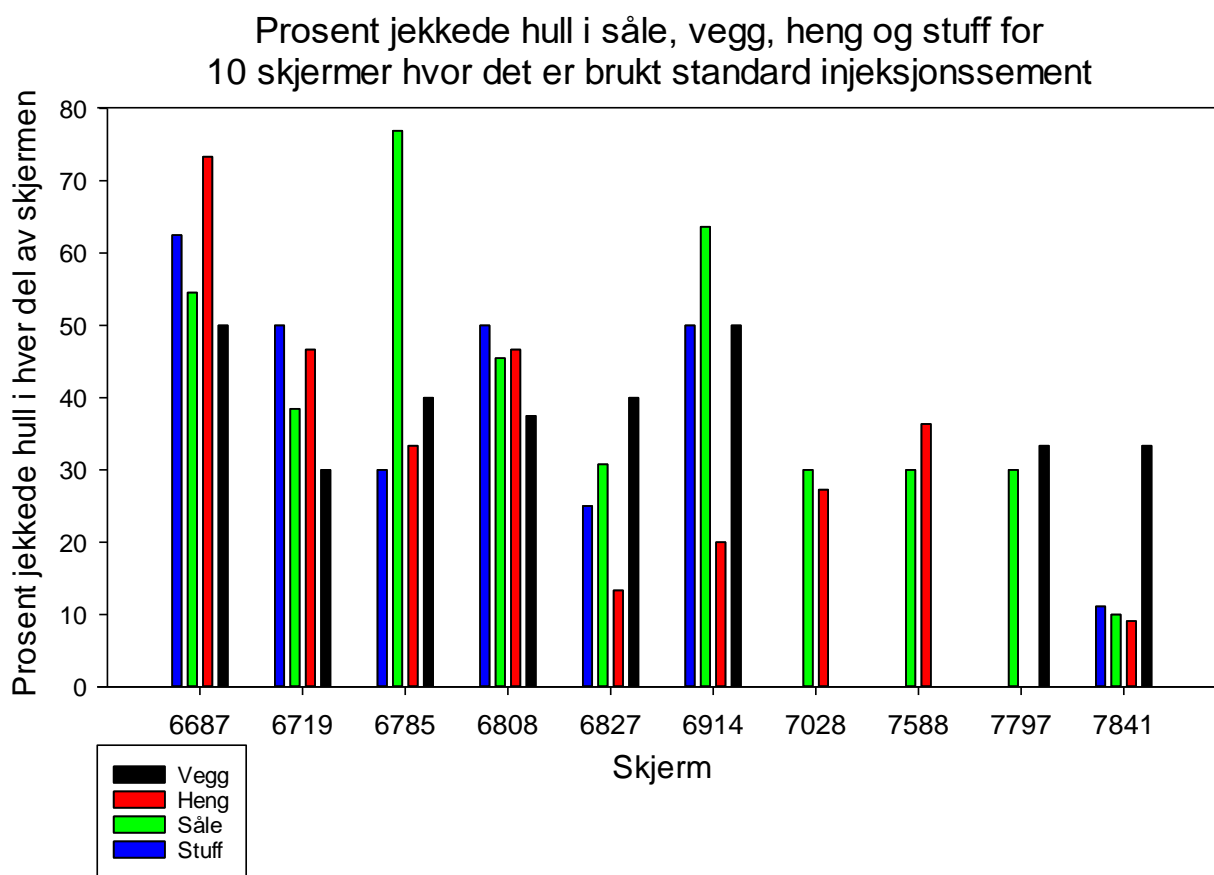
Det er kun de 12 skjermene hvor det er brukt standard injeksjonssement og som det har vært mulig å bestemme lokaliseringen til de enkelte hullene som er med i analysen. I 2 av disse 12 skjermene er det brukt et ulikt injeksjonstrykk i de forskjellige hullene (Figur 5.10). Disse 2 skjermene (6530 og 7721. se Figur 5.10) er tatt bort analysen ettersom ulikt injeksjonstrykk i de forskjellige hullene i en skjerm kan påvirke resultatet.

I de analyserte skjermene er det gjennomsnittlig flere prosent jekkede hull i sålen, etterfulgt av hullene i veggene, stuffen, og til slutt hullene i hengen (Tabell 5-2). På bakgrunn av resultatet er det større sannsynlig at jekking forekommer i et hull som er boret i sålen, og minst sannsynlig at jekking forekommer i et hull som er boret i hengen.

*Tabell 5-2 Prosent jekkede hull i heng, vegg, såle og stoff.*

Lokasjon	Heng	Vegg	Såle	Stuff
<b>Antall jekket</b>	43	28	47	21
<b>Antall hull</b>	134	82	112	68
<b>% jekket</b>	32,0 %	34,2 %	42,0 %	30,9 %

Gjennomsnittet som er vist i Tabell 5-2 er ikke representativ for alle de 10 skjermene (Figur 5.26). Dette kommer tydelig frem ved å sammenligne prosent jekkede hull i sålen mot prosent jekkede hull i hengen. I 6 av skjermene er det flest prosent jekkede hull i sålen, og i 4 skjermene er det flest prosent jekkede hull i hengen (Figur 5.26).



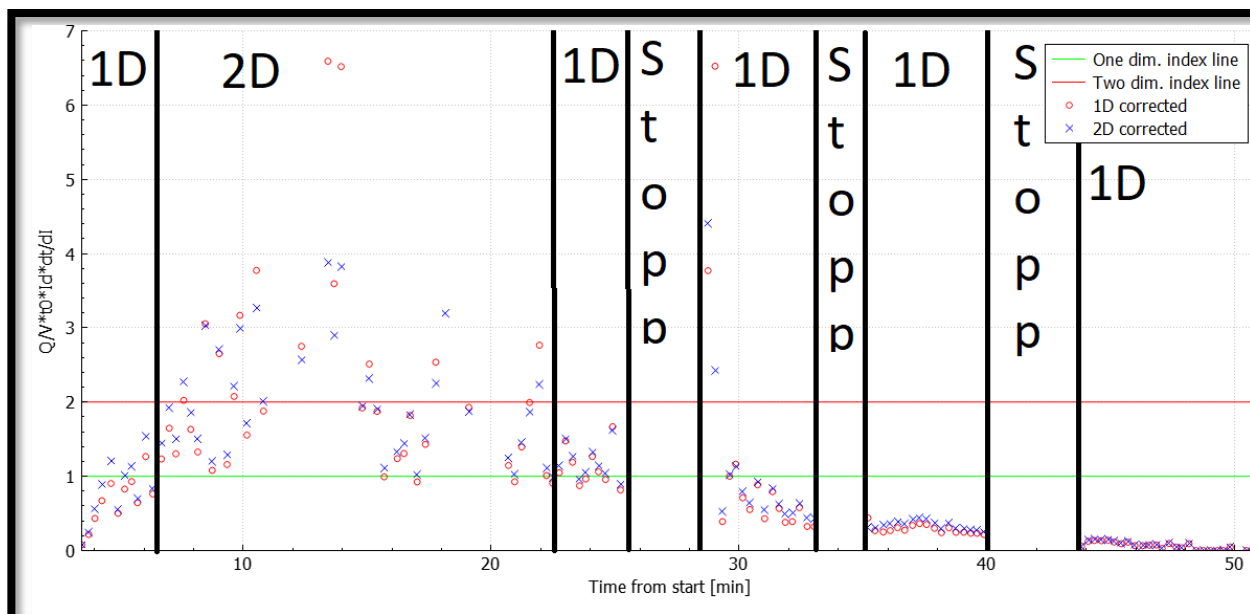
Figur 5.26 Prosent jekkede hull i sålen, hengen, veggene og stuffen.

## 5.10 RTGC metoden

### 5.10.1 Hull 14, skjerm 6914

#### *Dimensjonsanalyse*

Gjennomsnittet av alle punktene ligger over 1,5, og den gjennomsnittlige flyten passer derfor til 2D sprekkedimensjon. Ved å se nærmere på Figur 5.27 er det tydelig at sprekkedimensjonen variere i løpet av injeksjonsforløpet. I starten av injeksjonsforløpet er sprekkedimensjonen hovedsakelig i 2D, men etter 22 min går flyten over til 1D. Spredningen til injeksjonsmassen i den største sprekken ( $b_{g,max}$ ) er trolig et sted mellom 1D og 2D siden sprekkedimensjonen går fra 2D til 1D.



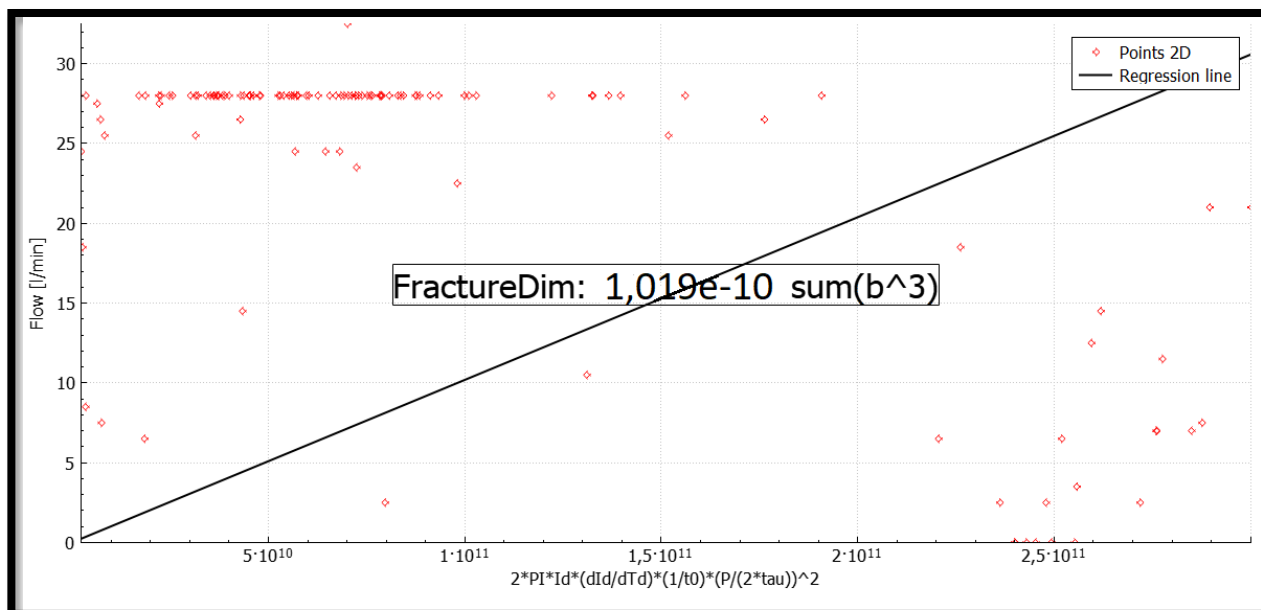
Figur 5.27 Dimensjonsanalyse av sprekke dimensjonen rundt hull 14, skjerm 6914.

### Største sprekkeåpning

Ved 2D sprekke dimensjon er modellsprekken ( $\sum b_g^3$ ) lik  $1,019 \cdot 10^{-10}$  m (Figur 5.28). Med denne modellsprekken er den største sprekkeåpningen ( $b_{g,maks}$ ) lik 0,00046708 m, eller 476,1  $\mu\text{m}$  (Figur 5.29).

Det er tydelig fra Figur 5.28 at de fleste punktene passer dårlig til modellsprekken som er gitt av den lineære regresjonslinjen. Alle punktene som ligger over passer til en større modellsprekk, og derfor en større  $b_{g,maks}$ , mens alle punktene som ligger under passer til en mindre modellsprekken, og derfor en mindre  $b_{g,maks}$ .





Figur 5.28 Lineær regresjonslinje for modellsprekken som beskriver summen av sprekkenene ( $\sum b_g^3$ ) ved 2D sprekke dimensjon i hull 14, skjerm 6914.

Store delen av flyten og sprekke dimensjonen er i 1D selv om programmet har bestemt at flyten og sprekke dimensjonen er i 2D. Modellsprekken som passer til 1D sprekke dimensjon ( $\sum b_g^2 * w$ ) er  $7,618 * 10^{-10}$  m. Med en sprekkevidde (w) på 10 m er  $b_{g,max}$  0,00087281 m, eller 872,8  $\mu$ m (Figur 5.29). Det er usikkert hvor godt modellsprekken for 1D passer til de enkelte punktene. Dette kommer av at programmet kun plotter punktene til den sprekke dimensjonen som passer best.

```

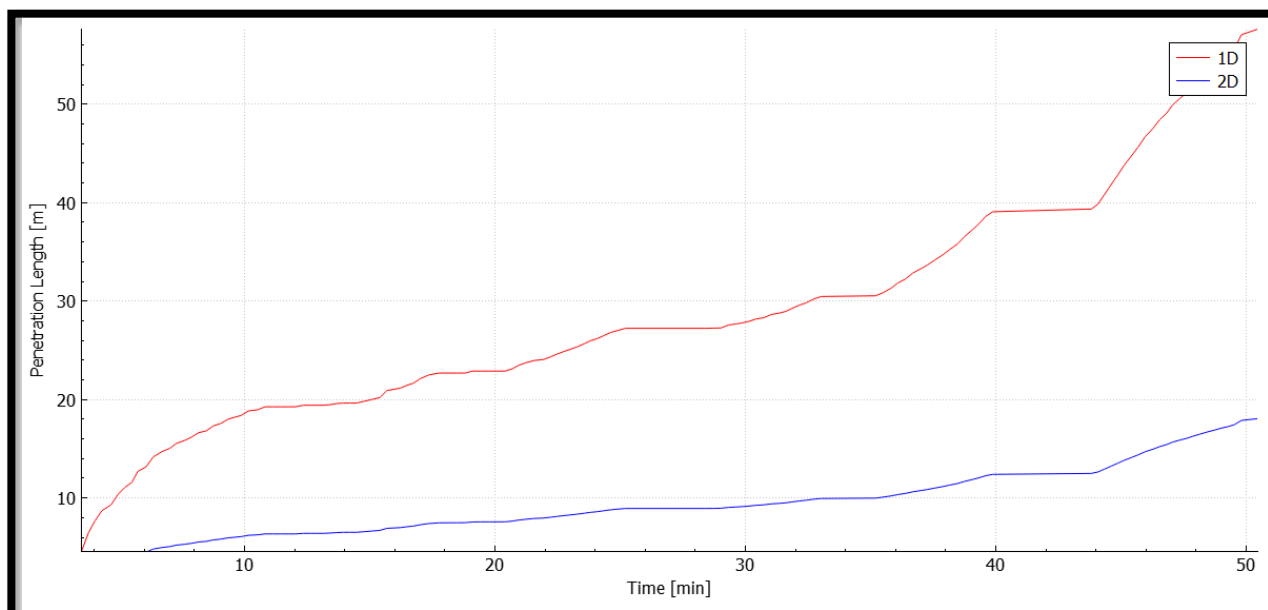
-----Fracture Aperture Analysis-----
Fracture dim Regressions (y = a + b*x:
  1D: a = 0 b = 7.618e-06
  2D: a = 0 b = 1.019e-10
This equates to model fracture apertures:
  1D: 0.00087281 [m]
  2D: 0.00046708 [m]
    
```

Figur 5.29 Modellsprekken ( $\sum b_g^3$  og  $\sum b_g^2 * w$ ), og største sprekkeåpningen ( $b_{g,max}$ ) for 1D og 2D sprekke dimensjon.

### Spredningslengde

Med bakgrunn i sprekke dimensjonsanalysen (Figur 5.27) tas det utgangspunkt i at strømmingen går fra 2D til 1D etter 22 min. Spredningen til injeksjonsmassen er 6 m ved 2 D strømming ( $b_{g,max} = 476,1 \mu$ m) de første 22 minuttene (Figur 5.30). For de resterende 33

minuttene er spredningen til injeksjonsmassen ved 1D omtrent 32 m ( $b_{g, maks} = 872,8 \mu\text{m}$ ) (Figur 5.30). Den totale spredningen til injeksjonsmassen er da 38 m etter 50 min (Figur 5.30).

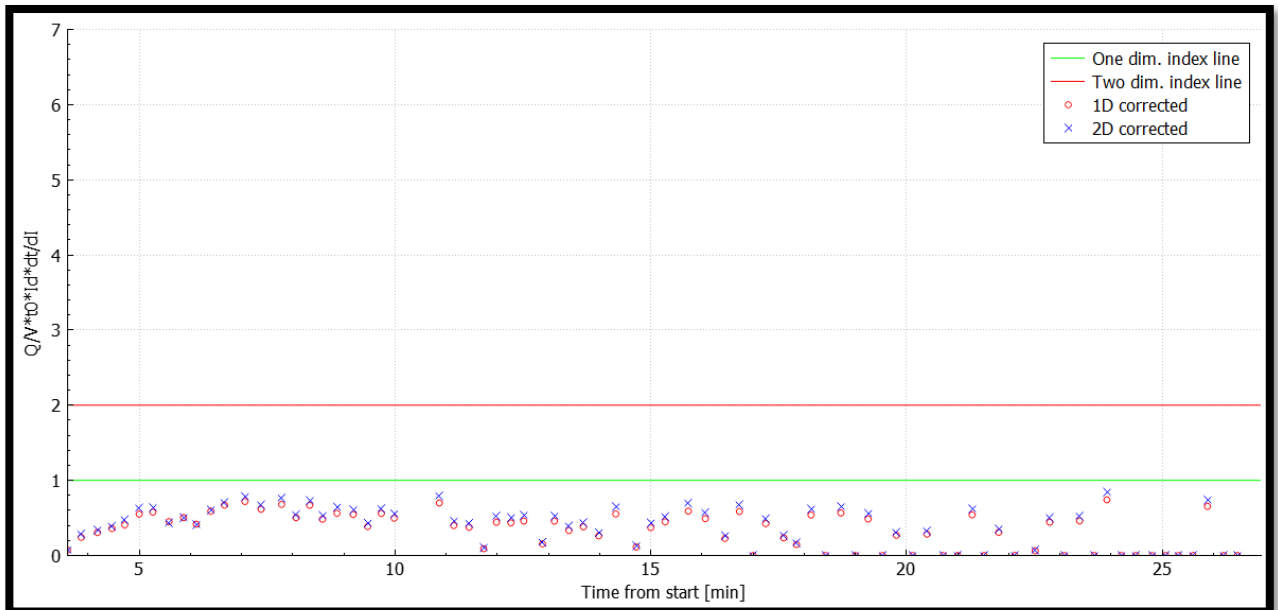


Figur 5.30 Spredningslengden til injeksjonsmassen fra hull 14, skjerm 6914 ved 1D og 2D sprekkedimensjon.

#### 5.10.2 Hull 24, skjerm 6914

##### *Dimensjonsanalyse*

Det er tydelig fra Figur 5.31 at flyten i hull 24, skjerm 6914 passer til 1D sprekkedimensjon ved at alle punktene ligger under indekslinje 1. Sprekkedimensjonen endres ikke i løpet av injeksjonsforløpet.



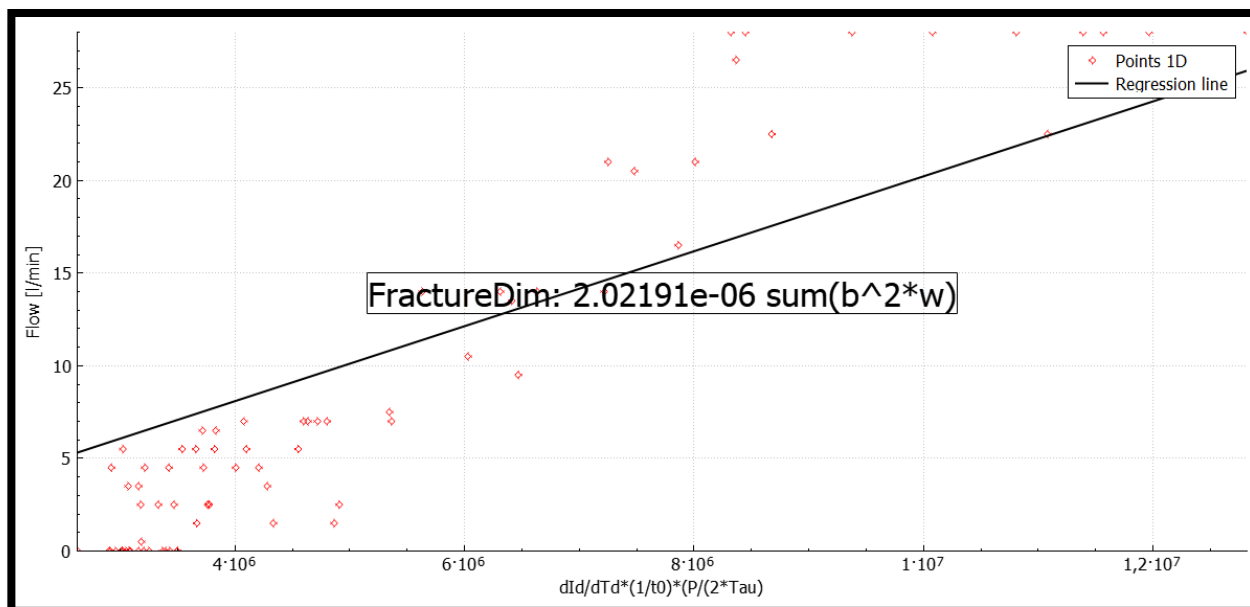
Figur 5.31 Dimensjonsanalyse av sprekkevidden rundt hull 24, skjerm 6914.

### Største sprekkeåpning

Ved 1D sprekkevidde er modellsprekken ( $\sum b_g^2 * w$ ) lik  $2,02191 * 10^{-6}$  m (Figur 5.32).

Med en sprekkevidde ( $w$ ) på 10 m er  $b_{g,max} = 0,00044966$  m, eller 449,66  $\mu$ m (Formel 2.12).

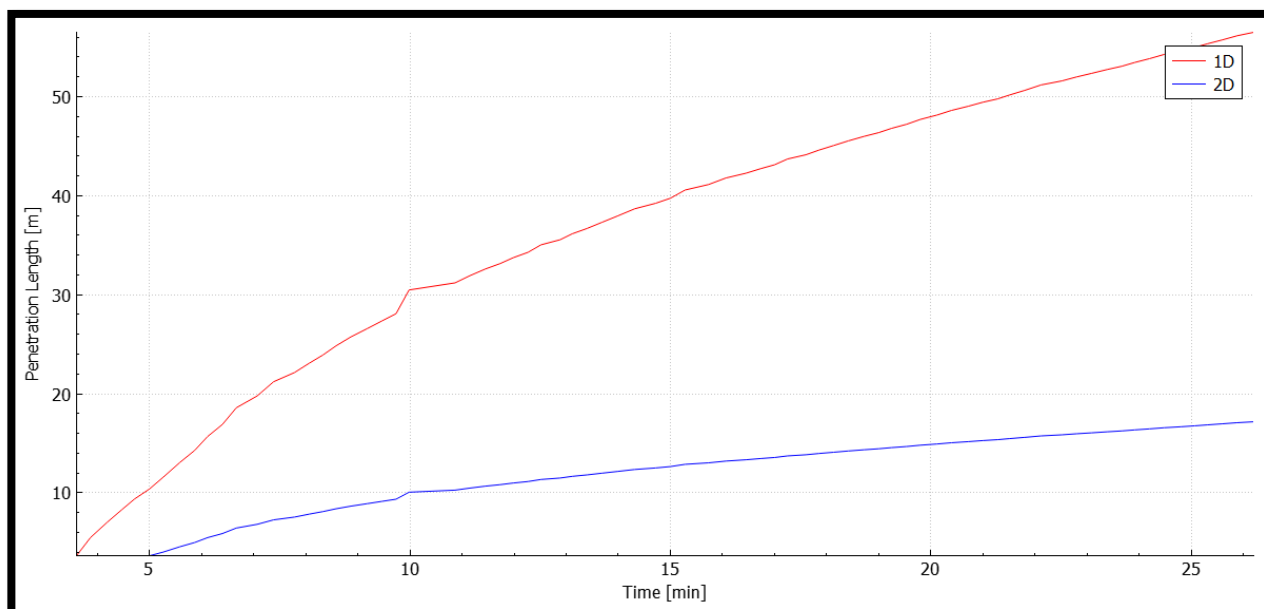
Med bakgrunn i den lineære regresjonslinjen i Figur 5.32 passer modellsprekken ( $\sum b_g^2 * w$ ) greit til de enkelte punktene. Selv om den lineære regresjonslinjen passer greit til punktene så passer punktene som ligger under til en mindre modellsprekk og derfor mindre  $b_{g,max}$ , og punktene som ligger over passer til en større modellsprekk og derfor en større  $b_{g,max}$ .



Figur 5.32 Lineær regresjonslinje for modellsprekken som beskriver summen av sprekkene ( $\sum b_g^2 * w$ ) ved 1D sprekkedimensjon i hull 24, skjerm 6914.

### Spredningslengde

Ved 1D sprekkedimensjon er spredningen til injeksjonsmassen i den største sprekken (449,66  $\mu\text{m}$ ) 58 m etter 27 minutter (Figur 5.33).



Figur 5.33 Spredningslengden til injeksjonsmassen fra hull 24, skjerm 6914 ved 1D og 2D sprekkedimensjon.

## 6 Diskusjon

### 6.1 Er hendelsene med hydraulisk jekking tolket riktig?

Siden hendelsene med hydraulisk jekking er tolket visuelt er det en mulighet for at enkelte av injeksjonsforløpene ville blitt tolket annerledes av en annen. QP – indeksen har vist seg å være til god hjelp for å oppdage en hendelse med jekking. Hovedsakelig fordi det er en fremfor to parametere å følge med på.

Operatøren av injeksjonsriggen har stor påvirkning på injeksjonsforløpet. I enkelte injeksjonsforløp er det et trykkfall i forkant av en kort pause, etterfulgt av at trykket øker tilbake til det opprinnelige nivået det var på før trykket falt etter pausen (se, Figur 4.5). En slik hendelse med trykkfall kommer trolig av måten injeksjonen er utført på fremfor at det er en hendelse med hydraulisk jekking. I enkelte hull tar det tar lang tid (5 min+) før trykket går tilbake til det opprinnelige nivået etter pausen. Slike hendelser er tolket som jekking dersom begge punktene er innfridd.

- Det har vært en markant trykkoppbygning kort tid før pausen.
- Pausen er kort (5 – 10 min).

Med bakgrunn i teorien er følgende scenarier med trykkfall og/eller flytøkning ikke tolket som hydraulisk jekking.

- Før injeksjonshullet er fylt opp.
- Rett etter en pause.
  - Injeksjonsmassen kan ha herdet noe, og det er den som gir etter fremfor bergmassen.
  - Injeksjonsmassen kan ha trengt videre inn i sprekkeene ilt. pausen. Ved disse tilfellene kan trykket fallet og flyten øke selv om det ikke er en hendelse med hydraulisk jekking.

12 av 20 skjermene er etablert fra stoffen som ble drevet fra Sellikdalen, og 8 av 12 skjermene fra Trollerudmoen. Stoffene fra Sellikdalen er drevet omtrent side om side, og injeksjonen i det øst- og vestgående løpet har vekslet på å bli injisert i jomfruelig berg. De siste 680 m fra Trollerudmoen lå det østgående foran det vestgående løpet. Skjermene fra pel 6960 til 7640 er derfor ikke injisert i jomfruelig berg. I ikke jomfruelig berg kan spenningssituasjonen i

bergmassen være endret, og injeksjonsmassen fra det østgående kan ha tettet enkelte sprekker som ville blitt tettet ved injeksjon i det vestgående løpet. Det er usikkert om det har noen betydning for om en skjerm er injisert i jomfruelig fjell eller ikke, men det mulig at resultatet hadde blitt annerledes dersom det vestgående hadde vært foran det østgående løpet hele veien.

Tolkningen av de ulike injeksjonsforløpene er en mulig feilkilde i alle resultatene. I den videre diskusjonen tas det utgangspunkt i at alle de 809 injeksjonsforløpene er riktig tolket med tanke på at det er minst en hendelse med hydraulisk jekking i injeksjonsforløpene det er tolket jekking i, og ingen jekking i injeksjonsforløpene det ikke er tolket jekking i.

## **6.2 Fører hydraulisk jekking til økt injisert volum og tidsforbruk?**

### **6.2.1 *Injisert volum mot prosent jekkede hull pr. skjerm***

Det er en signifikant lineær sammenheng mellom injisert volum og prosent jekkede hull, og  $r^2$  for den lineære regresjonslinjen er 0,90 (Figur 5.2). Den lineære regresjonslinjen passer derfor svært godt til datapunktene. I skjermene hvor det er injisert et stort volum er det tolket jekking i mange prosent av skjermens hull, og i skjermene hvor det er injisert et lavt er det tolket jekking i få prosent av skjermens hull. Ved en økning i 10 % jekkede hull pr. skjerm øker injisert volum med 10'000 l. I en skjerm med 30 hull utgjør 10 % av hullene kun 3 hull. Relativt få hull kan derfor stå for en stor del av det totale injiserte volumet.

At det er en sammenheng mellom jekking og injisert volum kommer også godt frem i de enkelte skjermene. I 18 av 19 skjermene er det gjennomsnittlig pr. hull injisert et større volum i hullene med jekking sammenlignet med hullene uten jekking, og i enkelte skjermene er forskjellen veldig stor (Figur 5.3 og Figur 5.4). I skjerm 7588 hvor det gjennomsnittlig er injisert et større volum i hullene uten jekking er forskjellen liten med gjennomsnittlig 550 l i hullene uten jekking og 400 l i hullene med jekking. I denne skjermen er det kun 20 % jekkede hull av totalt 32 injeksjonshull. Det kan derfor være ett eller to hull som avviker fra gjennomsnittet slik at det er gjennomsnittlig injisert et større volum i hullene uten jekking.

Resultatene gir ikke svar på om hydraulisk jekking fører til økt injisert volum eller om økt injisert volum fører til hydraulisk jekking. Med bakgrunn i teorien gir det mening at hydraulisk jekking fører til økt injisert volum fordi en sprekk utvides når den jekkes. Når en sprekk utvides kreves det naturligvis et større volum for å tette denne sprekk, samtidig som

spredningslengden øker. I tillegg blir berget mer oppsprukket ved jekking. I en oppsprukken bergmasse kan det være bedre kontakt mellom injeksjonshullet og sprekkene. Dersom injeksjonshullet kommer i kontakt med flere sprekker vil det naturligvis gå med et større volum for å tette disse «nye» sprekkene.

### **6.2.2 Injeksjonstid mot prosent jekkede hull pr. skjerm**

Det er en signifikant lineær sammenheng mellom injeksjonstid og hydraulisk jekking, og  $r^2$  for den lineære regresjonslinjen er 0,63 (Figur 5.5). Den lineære regresjonslinjen passer derfor greit til punktene, og resultatet viser at i skjermene med mange prosent jekkede hull er injeksjonstiden lengre sammenlignet med skjermene med få prosent jekkede hull. Ved en økning i 10 % jekkede hull øker injeksjonstiden med 5 t og 40 min. I en skjerm med 30 hull utgjør 10 % av hullene kun 3 hull.

At det er en sammenheng mellom jekking og injeksjonstid kommer tydelig frem i de enkelte skjermene. I 19 av 19 skjermene er den gjennomsnittlige injeksjonstiden lenger i hullene med jekking sammenlignet med hullene uten jekking (Figur 5.6 og Figur 5.7). I enkelte av skjermene er forskjellen stor, og i andre skjermene er forskjellen liten. Jekking kan derfor ha større betydning for injeksjonstiden i enkelte skjermene i forhold til i andre skjermene. På bakgrunn av dette er hver skjerm på mange måter unik.

Ved å sette injeksjonstid i sammenheng med injisert volum er det logisk at hydraulisk jekking fører til økt injeksjonstid. Hovedsakelig fordi det tar lengre tid for pumpene å injisere et større volum sammenlignet med et mindre volum. Selv om denne forklaringen gir mening passer den lineære regresjonslinjen noe dårligere til punktene sammenlignet med den lineære regresjonslinjen til injisert volum mot prosent jekkede hull pr. skjerm. Denne forskjellen kan forklares med at injeksjonsprosedyren er ulik fra skjerm til skjerm, pumpene pumper ulikt volum avhengig av injeksjonstrykket, forskjellige arbeidslag, problemer og/eller utfordringer med utstyret osv. Som en konsekvens av de nevnte faktorene kan injeksjonstiden være ulik for 2 skjermene selv om det er injisert likt volum.

### **6.3 Forskjell i prosent jekkede hull pr. skjerm ved ulike sementer**

Det bør generelt gå med et større volum i skjermene hvor det er brukt mikrosement sammenlignet med skjermene hvor det er brukt standard injeksjonssement. Dette kommer av

at mikrosegmenten trenger inn i mindre sprekker. Resultatet viser det motsatte. Ved en gitt prosent jekkede hull er det injisert et mindre volum i skjermene hvor det er brukt mikrosegment sammenlignet med skjermene hvor det kun er brukt standard injeksjonssegment (Figur 5.8). Resultat gir mening siden en masse bestående av mikrosegment i tillegg til å jekke sprekken som ville blitt jekket av standard injeksjonssegment også jekker flere mindre sprekker. Dersom utvidelsen er relativ i forhold til den opprinnelige sprekkåpning vil jekking av en mindre sprekk føre til en mindre utvidelse, og kortere økt spredningslengde, sammenlignet med jekking av en større sprekk.

Selv om de 4 skjermene hvor det er brukt mikrosegment viser den samme trenden er det flere feilkilder og svakheter ved resultatet.

- De reologiske egenskapene til injeksjonsmassene bestående standard injeksjonssegment og mikrosegment er forskjellige.
- Datasettet er svært tynt, og resultatene er usikre.
- Det er 1 skjerm hvor det kun er brukt mikrosegment. I de resterende 3 skjermene er det brukt både mikro- og standard injeksjonssegment.
- Flere av skjermene hvor det kun brukt standard injeksjonssegment ligger over den lineære regresjonslinjen. Disse skjermene viser den samme trenden som skjermene hvor det er brukt mikrosegment.

Selv om det er en trend kan det med bakgrunn i feilkildene ikke konkluderes med at det er noen forskjell mellom sementtypene med tanke på jekking.

#### **6.4 Sammenheng mellom bergoverdekning / injeksjonstrykk, og prosent jekkede hull pr. skjerm**

Det er ingen statistisk sammenheng mellom bergoverdekning og prosent jekkede hull pr. skjerm, men  $r^2$  for den lineære regresjonslinjen er 0,39 (Figur 5.9). Selv om den lineære regresjonslinjen passer noe dårlig til punktene viser den at det er færre prosent jekkede hull i skjermene med høy bergoverdekning, og flere prosent jekkede hull i skjermene med lav bergoverdekning. At det ikke er noen statistisk sammenheng gir mening siden det er brukt ulikt injeksjonstrykk i de forskjellige skjermene, fra 40 -85 bar.

Det er ingen statistisk sammenheng mellom injeksjonstrykk og prosent jekkede hull pr. skjerm, og  $r^2$  for den lineære regresjonslinjen er 0,07 (Figur 5.11). At det ikke er noen



sammenheng gir mening fordi bergoverdekningen til de forskjellige skjermene er svært ulik, fra 6 – 75 m. Ved å kun se på  $r^2$  for den lineære regresjonslinjen for bergoverdekning og injeksjonstrykk er det tydelig at bergoverdekning er av større betydning enn injeksjonstrykket med tanke på jekking (Figur 5.9 og Figur 5.11).

Bergoverdekning mot prosent jekkede hull pr. skjerm ble sammenlignet i skjermene hvor det er brukt likt injeksjonstrykk for å eliminere feilkilden med ulikt injeksjonstrykk. Resultatene er entydige ved å se bort fra de to skjermene hvor det er brukt et injeksjonstrykk på ~84 bar (Figur 5.14). Med økt bergoverdekning er det færre prosent jekkede hull pr. skjerm (Figur 5.12 og Figur 5.13). En stor svakhet ved disse resultatene er at de baserer seg på kun 5 skjerner i hvert tilfelle. For å øke størrelsen på datasettet ble det valgt å se på skjermene hvor det er brukt et injeksjonstrykk mellom 50 – 70 bar. Resultatet fra disse 13 skjermene viser at det ved økt bergoverdekning er færre prosent jekkede hull pr. skjerm.  $r^2$  for den lineære regresjonslinjen er 0,65, og det negative stigningstallet er 0.89 (Figur 5.15). Den lineære regresjonslinjen passer derfor greit til punktene selv om det er brukt ulikt injeksjonstrykk i skjermene. Med det negative stigningstallet reduseres prosent jekkede hull pr. skjerm med 9 % ved en økning i bergoverdekning på 10 m.

Resultatene gir mening siden bergspenningene øker med dypet. Med økte bergspenninger øker det initielle normalstresset på sprekken(e), og det må da brukes et markant høyere injeksjonstrykk for å jekke sprekken. Ved redusert bergoverdekning avtar in-situ bergoverspenningene og det initielle normalstresset på sprekken. Da kreves det et lavere injeksjonstrykk for å jekke sprekken.

## **6.5 Sammenheng mellom bergmassens Q – verdi og prosent jekkede hull pr. skjerm**

En bergmasse med lav Q – verdi er generelt mer oppsprukket, sprekkeveggene er glattere, det er ugunstige spenningsforholdet, sprekken er mer åpne og fylt mer svake miner slik som leive, og vanntrykket er høyere sammenlignet med en bergmasse med høyere Q – verdi. Totalt sett er kvaliteten til en bergmasse med lav Q – verdi dårlig.

For de 16 skjermene hvor det kun er brukt standard injeksjonssement er det ingen sammenheng mellom bergmassens Q – verdi og prosent jekkede hull pr. skjerm (Figur 5.16). Resultatet gir mening på grunn av at injeksjonstrykket og bergoverdekningen i de undersøkte

skjermene er svært ulikt. For å eliminere betydning av injeksjonstrykket og bergoverdekning ble skjermene hvor injeksjonstrykket og bergoverdekningen er den samme, sammenlignet.

Resultatet for disse skjermene ga sprikende resultater. For skjermene hvor det er brukt et injeksjonstrykk på 55 bar og bergoverdekningen er 30 m er det ingen sammenheng (Figur 5.17), men for skjermene hvor det er brukt et injeksjonstrykk på 63 bar og bergoverdekningen er 35 er det en signifikant lineær sammenheng hvor  $r^2 = 0,88$  (Figur 5.18). Disse skjermene viser at det er flere prosent jekkede hull i en skjerm som etablert i bergmasse med lav Q – verdi, og vise versa. Med bakgrunn i resultatene for skjermene hvor det er brukt likt injeksjonstrykk og bergoverdekningen er den sammen (Figur 5.17 og Figur 5.18) kan det ikke konkluderes med at det noen sammenheng. For det første er resultatene sprikende, og for det andre består datasettet i hvert tilfelle av kun 3 skjerner. Totalt sett fører det til at resultatene er usikre. For å øke størrelsen på datasettene ble skjermene hvor bergoverdekningen er mellom 30 – 40 m sammenlignet.

I disse skjermene er det er det brukt et injeksjonstrykk på 55 og 63 bar. For 2 av skjermene er det tydelig at bergmassens Q – verdi er av stor betydning ved at det er færre prosent jekkede hull i skjermen med høy Q – verdi, og flere prosent jekkede hull i skjermen med lav Q – verdi. For de 5 resterende skjermene variere bergmassens Q – verdi 3 til 9, og prosent jekkede hull pr. skjerm er ~45 %. For disse 5 skjermene er bergmassens Q – verdi av liten betydning med tanke på jekking (Figur 5.19).. Resultatene er derfor lite entydige, og det er ingen sammenheng mellom bergmassens Q – verdi og prosent jekkede hull pr. skjerm.

Det fins flere mulige forklaringer på hvorfor det ikke er noen sammenheng;

- Bergmassens Q – verdi er gjennomsnittet av Q – verdien langs hele skjerm lengden. Det er en mulighet for at jekking er favorisert i den delen av skjermen med lavest Q – verdi. I så fall ville det vært mer riktig å bruke den laveste Q – verdien til bergmassen som en skjerm er etablert i fremfor gjennomsnittet.
- Bergmassens Q – verdi etter siste sprengte salve er kartlagt fra bakken i tunnelen visuelt i løpet av 5 – 10 min, og verdien til de enkelte parameterne er tatt basert på erfaring. Det er derfor stor usikkerhet om bergmassen ville fått akkurat den samme Q – verdien fra to forskjellige geologer.
- Det er ikke mulig å få et stort datasett hvor hovedsakelig bergoverdekningen er den samme.

- Bergmassens Q – verdi er basert på 6 parametere. Enkelte parametere kan ha liten påvirkning på bergmassens Q – verdi og stor påvirkning på jekking, eller vise versa.

Siden bergmassens Q – verdi er basert på 6 parameterne ble det valgt å se på RQD verdien til bergmassen. I en oppsprukken bergmasse er det potensielt flere sprekker som kan jekkes, og bergmassen kan lokalt være mer avspent. Som en konsekvens av kan det initielle normalstresset på sprekken bli redusert. Dersom det stemmer bør det være flere prosent jekkede hull i en skjerm som etablert i en bergmasse med lav RQD verdi, færre prosent jekkede hull ved høyere RQD verdi.

Ved å sammenligne 7 skjerner hvor bergoverdekningen er fra 30 – 40 m, og det er brukt et injeksjonstrykk på 55 og 63 bar er resultatene lite entydige. For 2 av skjermene er det flere prosent jekkede hull i en skjerm som etablert i en bergmasse med lav RQD, og færre prosent jekkede hull i en skjerm som er etablert i en bergmasse med høy RQD. For de resterende 5 skjermene variere RQD verdien fra 65 til 75, mens prosent jekkede hull pr. skjerm er ~45 % (Figur 5.20). Det er derfor ingen sammenheng mellom RQD verdien til bergmassen og prosent jekkede hull pr skjerm.

Det fins flere mulige forklaringer på hvorfor det ikke er noen sammenheng mellom RQD og jekking;

- Bergmassens RQD - verdi er gjennomsnittet av RQD - verdien langs hele skjerm lengden. Det er en mulighet for at jekking er favorisert i den delen av skjermen med lavest RQD. I så fall ville det vært mer riktig å bruke den laveste RQDen til bergmassen som en skjerm er etablert i fremfor gjennomsnittet.
- Bergmassens RQD - verdi etter siste sprengte salve er kartlagt fra bakken i tunnelen visuelt i løpet av 1. minutt basert på erfaring. Det er usikkert om bergmassens hadde fått akkurat den samme RQD – verdien fra to forskjellige geologier.
- Det er ikke mulig å få et stort datasett hvor hovedsakelig bergoverdekningen er den samme.

## 6.6 Seksjonerte sprekkedomener

I seksjon 1, 2 og 3 er fallet til ett av de dominerende sprekkesettene ~horisontalt. I seksjon 4 og 5 er det ingen dominerende sprekkesett med et ~horisontalt fall. Siden det gjennomsnittlig er flest prosent jekkede hull pr. skjerm i seksjon 1, etterfulgt av seksjon 2, 3, 4 og til slutt 5 tyder det på at det ~horisontale sprekkesettet er av svært stor betydning (Figur 5.21 og Tabell 5-1). Teoretisk sett gir resultatene mening siden det kreves et lavere injeksjonstrykk for å jekke en horisontal sprekk i forhold til en vertikal sprekk, gitt at minste hovedspenning er i vertikal retning.

Selv om resultatene gir mening er det flere feilkilder. Det er blant annet brukt ulikt injeksjonstrykk i de analyserte skjermene, og bergoverdekningen er ulik fra seksjon til seksjon. Bergoverdekningen er generelt lavest i seksjon 1, etterfulgt av seksjon 2, 4, 3 og 5. Gitt at injeksjonstrykket er likt i alle skjermene gir det mening kun basert på bergoverdekningen at det er flest prosent jekkede hull i skjermene som er lokalisert i seksjon 1, og færrest prosent jekkede hull i skjermene som er lokalisert i seksjon 5. For å eliminere betydningen av bergoverdekningen og injeksjonstrykket ble skjermene hvor disse parameterne er like sammenlignet.

Denne sammenligningen ingen resultatet. Selv om det er stor forskjell i prosent jekkede hull pr. skjerm i de analyserte skjermene er de dominerende sprekkene omtrent de samme. Sprekkene i de forskjellige skjermene kan derfor ikke gi et svar på hvorfor det er stor forskjell i prosent jekkede hull pr. skjerm, omtrent 20 % forskjell (Figur 5.22, Figur 5.23, Figur 5.24 og Figur 5.25).

Med bakgrunn i resultatene har det ikke vært mulig å bevise at fallet til sprekkene er av noen betydning. Det kan være flere grunner:

- Det er usikkert hvilke sprekker injeksjonsmassen faktisk trenger inn.
- Det er mange tilfeldige sprekker som ikke er en del av de dominerende sprekkesettene / sprekkene. De tilfeldige sprekkene kan ha en stor betydning.
- Det er ikke sett på strøket til sprekkene med hensyn på tunnelorienteringen. Fra teorien er trykkfallet større i sprekkene som står med større vinkel på injeksjonshullet sammenlignet med en sprekk som står med en mindre vinkel. Strøket til sprekken i forhold til injeksjonshullet kan derfor være av betydning med tanke på hva det faktiske trykket til injeksjonsmassen er inni selve sprekken.

## 6.7 Sammenheng mellom lokalisering av de enkelte injeksjonshullene og jekking

Enden av injeksjonshullet er lokalisert omtrent 5 m ut fra tunnelperiferien og den vertikale avstand fra sålen til hengen er ca. 5 m. Forskjellen i bergoverdekning fra den innerste delen av hullet som i sålen til den ytterste delen av hullet i hengen er da omtrent 10 m. Som en konsekvens av at bergoverdekningen er ca. 10 m høyere for hullene i sålen i forhold til hullene i hengen bør det være markant flere prosent jekkede hull i hengen i forhold til sålen. Med bakgrunn diskusjon av bergoverdekning mot prosent jekkede hull pr. skjerm bør denne forskjellen være hele 9 % (Figur 5.15).

Denne antagelsen stemmer ikke. Fra de 10 skjermene hvor det er brukt standard injeksjonssement og det er brukt likt injeksjonstrykk i alle skjermens hull er det gjennomsnittlig jekking i 32 % av hullene som er boret i hengen, og 42 % av hullene som er båret i sålen (Tabell 5-2). Det er derfor flere prosent jekkede hull i sålen sammenlignet med hullene i hengen. Dette gjennomsnittlig er ikke gjeldende for alle skjermene. I 4 av 10 skjermene det flest prosent jekkede hull i hengen i forhold til sålen, og i 6 av 10 skjermene er det flest prosent jekkede hull i sålen i forhold til hengen (Figur 5.26). At gjennomsnittet ikke gjelder for alle skjermene viser at hver injeksjonsskjerm er unik, og at det kan være store forskjeller fra en injeksjonsskjerm til en annen selv om de tilsynelatende ser like ut.

Noe av årsaken til at det gjennomsnittlig er flere prosent jekkede hull i sålen i forhold til hengen kan være injeksjonsrekkefølgen. I alle skjermene er hullene i sålen injisert først, etterfulgt av hullene i veggene og stoffen, og til slutt hullene i hengen (se Figur 2.12 i kapittel 2.3.2). Ved god kommunikasjon mellom injeksjonshullene og sprekkene, og lang spredningslengde kan noe av injeksjonsmassen fra de nedre hullene ha trengt inn og tett et eller flere av injeksjonshullene i hengen. Når det på et senere tidspunkt skal injiseres i hullene i hengen kan disse hullene allerede være fylt, og denne massen kan ha herdet. Som en mulig konsekvens kan det herdete massen hindre injeksjonsmassen i å trenge inn i det aktuelle injeksjonshullet.

## 6.8 Vurdere konsekvensene av hydraulisk jekking direkte på anlegget

I enkelte skjermer er det tolket jekking i få prosent av skjermens hull (0 % i skjerm 7812), mens i andre skjermer er det tolket jekking i mange prosent av skjermens hull (67,4 % i skjerm 6705) (Figur 5.1). At det er så stor forskjell i prosent jekkede hull pr. skjerm fra skjerm til skjerm tyder på at det i svært liten grad har blitt vurdert på anlegget om hydraulisk jekking er positivt eller negativt for å få et vellykket resultat med å nå tetthetskravene.

Det å vurdere om hydraulisk jekking har vært positivt eller negativt for å nå tetthetskravet(ene) kan gjøres forløpende på anlegget. For eksempel ved å plote og tolke trykk/flyt grafer med QP – indeksen av injeksjonsforløpene i de ulike skjermene, og sammenligne tolkningen mot resultatet fra injeksjonsarbeidet. Denne vurderingen kan med fordel både bli gjort på de skjermene hvor det har vært lett å nå tetthetskravet, og på de skjermene hvor det har vært vanskelig å nå tetthetskravet. Dersom jekking har vært positivt for å få et vellykket resultat burde injeksjonsprosedyrene legges opp slik at jekking forekommer i stor grad. Dersom jekking har negativt for å få et vellykket resultat burde injeksjonsprosedyren legges opp slik at jekking forekommer i minst mulig grad.

Uavhengig av om hydraulisk jekking har vært / er negativt eller positivt for å få et vellykket resultat så burde injeksjonsforløpene bli analysert direkte på anlegget. Å analysere injeksjonsforløpene gir et større innblikk i hva som faktisk har skjedd, og om det har vært ønskelig / hensiktsmessig for å få et vellykket resultat.

## 6.9 RTGC metoden

I diskusjonen er det ikke tatt stilling til, eller vurdert når / om target value blir er / blir nådd. Target value er derfor ikke med i diskusjonen.

At sprekkedimensjonen endres fra 2D til 1D etter en gitt tid i hull 14 er naturlig på grunn av bergets inhomogene egenskaper (Figur 5.27). At berget generelt er inhomogent kommer også tydelig frem ved estimeringen av modellsprekken ved at alle punktene enten ligger godt over enn under den lineære regresjonslinjen (Figur 5.28). Modellsprekken passer derfor dårlig til de enkelte punktene og kan være lite representativ for de enkelte sprekke / faktiske forholdet.

I teorien hevdes det at en sprekkeparameter (k) på 0,8 er den mest realistiske sprekkeparameteren for den største sprekkeåpningen. I programvaren som er brukt er

sprekkeparameteren satt til 1,0. Det er ikke mulig å endre denne. Dersom sprekkparameteren hadde vært satt til en lavere verdi hadde den største sprekkåpningen ( $b_{g,max}$ ) blitt mindre. I en sprekk med en mindre sprekkåpning er spredningslengden etter en gitt tid kortere sammenlignet med en større sprekk. En stor svakhet ved estimering av den største sprekkåpningen er at den avhenger av modellsprekken som generelt passer dårlig til de enkelte punktene, og av sprekkparameteren. Selv om det hadde vært mulig å endre sprekkparameteren i programvaren er det usikkert hva den skulle vært satt til. Hovedsakelig fordi dimensjonsanalysen viser at berget rundt hull 14 er inhomogent. I tillegg er det vist i resultatet fra lokaliseringen av de enkelte injeksjonshullene mtp. jekking i Figur 5.26 at de lokale forholdene kan variere fra skjerm til skjerm. Det er derfor usikkert om en sprekkparameter på 0,8 faktisk er den mest realistiske sprekkparameteren for den største sprekken i bergmassen rundt alle injeksjonshullene i alle skjermene.

Spredningen til injeksjonsmassen avhenger i stor grad av hvordan sprekkedimensjonsanalysen blir tolket selv om den største sprekkåpningen er korrekt. Spredningsplottet viser at spredningen til injeksjonsmassen i den største sprekken ved 2D strømning er 18 m (Figur 5.30). Selv om så er tilfelle viser den sprekkedimensjonsanalysen at sprekkedimensjonen går fra 2D til 1D etter 22 min. Den totale spredningslengden til injeksjonsmassen blir da 38 m. Spredningen er derfor sterkt avhengig av hvordan sprekkedimensjonsgrafene blir tolket.

I tillegg til sprekkparameteren er sprekkvidden ( $w$ ) en potensiell feilkilde ved 1D sprekkedimensjon. Rundt hull 24 er det tydelig at sprekkedimensjon kun er i 1D og den estimerte modellsprekken for 1D sprekkedimensjon passer greit til de enkelte punktene. Ved å anta at modellsprekken er korrekt er den største sprekkåpningen ( $b_{g,max}$ ) sterkt avhengig av sprekkvidden ( $w$ ). I hull 24 er det antatt at sprekkvidden er 10 m. Dersom sprekkvidden hadde vært satt til 20 m hadde den største sprekkåpningen ved en modellsprekk ( $\sum b_g^2 * w$ ) på  $2,02191 \cdot 10^{-6}$  (m) vært 318  $\mu\text{m}$  fremfor 450  $\mu\text{m}$  (Figur 5.29). Den største sprekkåpningen blir mindre ved økt sprekkvidde, og større ved en mindre sprekkvidde. De samme argumentene for valg av sprekkparameteren gjelder også for valg av sprekkvidden. For det første er berget generelt inhomogent. For det andre er det usikkert på om en sprekkvidde på 10 m faktisk er gjeldende for berget rundt alle injeksjonshullene i alle skjermene.

Ved å anta at den største sprekkåpningen er korrekt burde injeksjonen både i hull 14 og 24 vært avsluttet på et tidligere dersom spredningen til injeksjonsmassen hadde vært brukt som stoppkriterium. I hull 14 er spredningen til injeksjonsmassen 38 m etter 50 min, og i hull 24 er

spredningslengden 58 m etter 27 m. At spredningslengden er lenger i hull 24 sammenlignet med hull 14 selv om injeksjonstiden er kortere i hull 24 gir mening på grunn av at sprekke­dimensjonen rundt hull 24 kun er i 1D.

Hva som er nødvendig tykkelse til en skjerm variere, men på et generelt grunnlag bør limited value være mellom 8 – 10 m. Dersom spredningen hadde vært brukt som stoppkriterium skulle injeksjonen i hull 14 vært avsluttet etter ca. 25 min og etter hull 24 etter 5 min. Etter 25 min i hull 25 var det injisert et volum på ca. 700 l og mottrykket var på ca. 12 bar. Etter 5 min i hull 24 var det injisert et volum på ca. 140 l og mottrykket var på ca. 30,5 bar (Vedlegg I). Dersom injeksjonen hadde blitt avsluttet ved en spredningslengde på 10 m i den største sprekken hadde det i disse to hullene blitt injisert 490 l mindre og injeksjonstiden hadde vært kortet ned med 47 min. Dette ville spart prosjektet for flere tusen kroner.

Det å spare prosjektet for flere tusen kroner fra bare 2 injeksjonshull er kun positivt. Spørsmålet går derfor på om det er realistisk å stole på spredningslengden i den største sprekken. Som tidligere nevnt er den største sprekkeåpning sterkt avhengig av sprekkeparameteren og sprekkevidden, og i teorien blir det gitt en omtrentlig verdi av hva disse parameterne er for den største sprekkeåpning. Et problem ved å bruke disse omtrentlige verdiene er at bergmassen generelt er inhomogen.

Ved feil valg av sprekkeparameteren og sprekkevidden blir den største sprekkeåpningen og spredningslengden feil. Realistisk sett er det en mulighet for at sprekkeåpningen blir mindre enn antatt og at spredningslengden ikke blir nådd. Et slikt utfall kan gi et lite vellykket resultat. For å få et vellykket resultat kan det være nødvendig å enten etablere en ny skjerm utenfor den første skjermen eller etterinjisere. Et slikt utfall vil øke de totale kostnadene betraktelig.

Selv om sprekkeparameteren og sprekkevidden er korrekt er det usikkert hvordan RTGC metoden helt praktisk ville fungert i skjerm 6914. Som vist i resultatene er sprekke­dimensjonen rundt hull 14 og 24 svært ulike. Dersom hull 24 hadde blitt injisert først for å kartlegge hvordan berget er ville injeksjonsprosedyren blitt modifisert til 1D sprekke­dimensjon. Siden sprekke­dimensjonen rundt hull 14 ikke er i 1D de første 22 minuttene av injeksjonsforløpet ville det blitt injisert for lite i hull 14, og spredningslengden ville ikke blitt nådd. Dersom hull 14 hadde blitt injisert først hadde det motsatte skjedd. For den første delen av injeksjonsforløpet i hull 14 er sprekke­dimensjon i 2D. Dersom det hadde



blitt brukt en sprekkedimensjon i 2D ved injisering av hull 24 hadde det blitt injisert et for stort volum.

RTGC metoden er en interessant og spennende metode som bygger på teoretisk og eksperimentell forskning de siste 30 årene, men det er flere faktorer som gjør at sprekkedimensjonen og den største sprekkeåpningen kan være feil. Ved feil sprekkeåpning kan det bli injisert et for lite volum. Dersom injeksjonsprosedyren blir modifisert på bakgrunn av resultatet fra ett injeksjonshull kan det i de resterende injeksjonshullene også bli injisert et for lite volum. En konsekvens av at det blir injisert et for lite volum er at bergmassen ikke blir tett nok.



## 7 Konklusjon

Fra 20 skjerm er det tolket at hydraulisk jekking har forekommet i de omkringliggende sprekkene rundt 273 av 809 injeksjonshull. Hendelsene med hydraulisk jekking er tolket visuelt basert på trykk / flyt grafene og QP – indeksen fra injeksjonsforløpene. Resultatene avhenger i stor grad av hvordan de enkelte injeksjonsforløpene er tolket. 273 av 809 hull tilsvarer et gjennomsnitt på 33,7 % jekkede hull pr. skjerm. Det er enkelte skjerm som drar gjennomsnittet opp slik som skjerm 6705, med 67,4 % jekkede hull, og enkelte skjerm drar gjennomsnittet ned slik som skjerm 7812, med 0 % jekkede hull. At det er så stor forskjell fra skjerm til skjerm, tyder på at det i liten grad har vært vurdert om hydraulisk jekking har vært ønskelig, eller ikke for å få et vellykket resultat.

I oppgaven er det vist at:

- Hydraulisk jekking fører til økt injisert volum og injeksjonstid. Ved en økning i 10 % jekkede hull pr. skjerm, øker injisert volum med 10'000 l, og injeksjonstiden øker med 5 t og 40 min.
- Det er ingen sammenheng mellom injeksjonstrykk og prosent jekkede hull pr. skjerm. Resultatet er overraskende, men gir logisk sett mening siden bergoverdekningen variere fra 6 – 75 m for de analyserte skjermene.
- For skjermene hvor det er brukt et injeksjonstrykk fra 50 – 70 bar, er det færre prosent jekkede hull pr. skjerm ved høy bergoverdekning, og flere prosent jekkede hull pr. skjerm ved lav bergoverdekning. Ved en økning i bergoverdekningen på 10 m reduseres prosent jekkede hull pr. skjerm med 9 %.
- Det er større sannsynlighet for at hydraulisk jekking oppstår i et injeksjonshull i sålen sammenlignet med et injeksjonshull i hengen. Resultatet er overraskende siden bergoverdekningen er større for hullene i sålen i forhold til hengen. En mulig forklaring er injeksjonsrekkefølgen. Hullene i sålen blir injisert først, og hullene i hengen blir injisert til slutt. Resultatet er ikke gjeldende for alle skjermene. I enkelte skjerm er det flere prosent jekkede hull i hengen, og færre i hengen. Det er derfor stor variasjon fra skjerm til skjerm, og hver skjerm er på mange måter unik.
- Ved en gitt prosent jekkede hull, er det injisert et mindre volum i en skjerm hvor det helt eller delvis er brukt mikrosegment sammenlignet med en skjerm hvor det kun er brukt standard injeksjonssegment. Resultatet er usikkert på grunn av et lite datasett og flere feilkilder.

- Det er ingen sammenheng mellom helningen (fallet) til de dominerende sprekkesettene og hydraulisk jekking.
- Det er ingen sammenheng mellom hydraulisk jekking og bergmassens gjennomsnittlige  $Q$  – verdi.
- Det er ingen sammenheng mellom hydraulisk jekking og bergmassens gjennomsnittlige RQD verdi.
- Teoretisk sett kan spredningslengden til injeksjonsmassen bli brukt som stoppkriterium, og RTGC metoden kan bli brukt for å estimere spredningslengden. Ved å bruke spredningslengden som stoppkriterium, og sette limited value til 8 – 10 m ville det i 2 injeksjonshull blitt injisert 490 l mindre injeksjonsmasse og injeksjonstiden ville blitt redusert med 47 min. Det er derfor vist at RTGC metoden kan redusere kostnadene. I praksis er det flere feilkilder som gjør at den faktiske spredningslengden kan være kortere enn antatt, som feil valg av sprekkeparameteren ( $k$ ) og sprekkevidden ( $w$ ). Som en konsekvens av for kort spredningslengde, kan det hende at den omkringliggende bergmassen ikke blir tilstrekkelig tett, og de totale kostandene kan øke.

## Referanseliste

- Aarstad, K., Skjølvold, O. & Justnes, H. 2015. *TIGHT-Sement til injisering*. Trondheim.
- Andersson, H. & Geoteknisk Spiss-Teknikk AS. 2005. *Injeksjon - erfaringer fra Jong - Askertunnelene*. 2424. Oslo: Statens Vegvesen.
- Andreassen, F. & Statens Vegvesen. 1999. Oslofjordtunnelen - Erfaringer fra frysing og driving gjennom frysesonen Presentert på: *Fjellsprengningsteknikk, Bergmekanikk, Geoteknikk*. Oslo.
- Anvik, H. K. & Kalberg, B. A. 2006. *Granskingsrapport; Dødsulykke, Nyhamna 28.6.2005* 20L19. ptil.no: Petroleumstilsynet.
- Babiker, M. & Gudmundsson, A. 2004. The effects of dykes and faults on groundwater flow in an arid land: the Red Sea Hills, Sudan. *Journal of Hydrology*, 297(1), s. 256-273.
- Barton, N. 2002. *Teoretisk og empirisk forståelse av forinjisering og mulighet for redusert sikringsmengde i utvalgte tunnelstrekninger*. Miljø- og samfunnstjenlige tunneler. Intern rapport 2323. Statens Vegvesen.
- Barton, N. 2007. *Rock quality, seismic velocity, attenuation and anisotropy*. Press, C. (red.). London: Taylor & Francis.
- Bever Control AS. 2018. *Bever Team 3* [Online]. Tilgjengelig fra: <http://bevercontrol.com/norsk/hjem/> [Hentet ut 18.4].
- Boge, K., Åndal, T., Aasen, O. & Kjølberg, R. 2002. *Sluttrapport for injeksjonsarbeidene ved T-baneringen*. Intern rapport. nr 2289. Statens Vegvesen.
- Bohlooli, B. 2018. E-mail kontakt. I: Wenaas, S. (red.).
- Bruno, A. 2009. *Grouting operation monitoring and analysis of the "Real Time Grouting Control" method*. Master Thesis, Kungliga Tekniska högskolan and Politecnico di Torino.
- Cesano, D., Olofsson, B. & Bagtzoglou, A. 2000. Parameters regulating groundwater inflows into hard rock tunnels—a statistical study of the Bolmen tunnel in southern Sweden. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 15(2), s. 153-165.
- Corner, G. 2008. *Bergarter* [Online]. Universitetet i Tromsø. Tilgjengelig fra: <http://geologiskolen.uit.no/generellGeologiskolen/materiale/bergarter/amfibolitt.html> [Hentet ut 24.11].
- Cramer, J., Baranwal, V., Bronner, M., Dagestad, A., Erichsen, E., Keiding, M., Larsen, E., Schiellerup, H. & Solli, A. 2016. *Vurdering av geologiske forhold ved potensielle lokaliteter til depono for uorganisk farlig avfall*. Trondheim: NGU.
- Davik, K. I., Kveen, A., Aasen, O., Åndal, T., Kjølberg, R. & Heimli, P. 2002. *Berginjeksjon*. Serie: Håndbok. Norsk Forening for Fjellsprengningsteknikk, Utviklingskomiteen.
- Eklund, D. & Stille, H. 2008. Penetrability due to filtration tendency of cement-based grouts. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 23(4), s. 389-398. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2007.06.011>.
- Fetter, C. W. 2001. *Applied hydrogeology*. Prentice hall.
- Fjar, E., Holt, R. M., Raaen, A., Risnes, R. & Horsrud, P. 2008. *Petroleum related rock mechanics*. Elsevier.
- Fossen, H. 2016a. *Grunnfjell* [Online]. Store Norske Leksikon. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/grunnfjell> [Hentet ut 4.1].

- Fossen, H. 2016b. *Structural geology*. Cambridge University, United Kingdom: Cambridge University Press.
- Gjerdingen, M. & Implenia 2018. Email kontakt med prosjektingeniør fra Implenia på prosjektet. I: Wenaas, S. (red.).
- Gothäll, R. & Stille, H. 2009. Fracture dilation during grouting. *Tunnelling and underground space technology*, 24(2), s. 126-135.
- Grøv, E. Rock Mass Grouting (in tunneling). TGB4190 Engineering Geology of Rocks AC, 2017 NTNU, Trondheim. SINTEF, s. 38.
- Grøv, E., Funehag, J. & Janson, T. 2014. Rock mass grouting in Sweden and Norway A matter of cultural differences or factual causes? *Geotechnical News*, 32(1), s. 41-51.
- Grøv, E. & Woldmo, O. 2012. Modern pre-grouting technology in Norway. *Grouting and Deep Mixing 2012*. s. 805-815.
- Gudmundsson, A., Berg, S. S., Lyslo, K. B. & Skurtveit, E. 2001. Fracture networks and fluid transport in active fault zones. *Journal of Structural Geology*, 23(2), s. 343-353.
- Gudmundsson, A., Løtveit, I. F. & Gjesdal, O. 2002. Fracture-generated permeability and groundwater yield in Norway.
- Gustafson, G. & Stille, H. 2005. Stop criteria for cement grouting. *Felsbau: Zeitschrift für Geomechanik und Ingenieurgeologie im Bauwesen und Bergbau*, 25(3), s. 62-68.
- Haugsand, M. H. 2018a. RTGC programforklaring. NTNU.
- Haugsand, M. H. 2018b. Samtale om programvaren "RTGCImplementationV03". I: Wenaas, S. (red.).
- Henn, R. W. & Davenport, J. C. 2005. Ultrafine cement: a critical component of a grouting program. *T & T international*, 37(4), s. 27-29.
- Henn, R. W. & Soule, N. C. 2010. Ultrafine cement in pressure grouting. American Society of Civil Engineers.
- Henriksen, H. & Braathen, A. 2006. Effects of fracture lineaments and in-situ rock stresses on groundwater flow in hard rocks: a case study from Sunnfjord, western Norway. *Hydrogeology journal*, 14(4), s. 444-461.
- Hoek, E. & Bray, J. D. 1981. *Rock slope engineering*. London: Taylor and Francis.
- Hognestad, H. & Holter, K. 2012. Modern pre-excavation grouting for underground structures in rock. *Grouting and Deep Mixing 2012*. s. 890-902.
- Hognestad, H. O., Fagermo, J. I., Kveen, A., Backer, L., Grøv, E., Frogner, E. & Aarset, A. 2010. *Praktisk berginjeksjon for underjordsanlegg*. Norsk forening for fjellspregningsteknikk, Utviklingskomiteen.
- Hollmén, K. 2008. *R20 Programme: The development of Grouting Technique - Stop Criteria and Field Tests*. Finland.
- Holmberg, M., Tsuji, M., Stille, B., Yaghoobi Rafi, J. & Stille, H. Evaluation of pre-grouting with the RTGC method and results from the City Line project. 7th Nordic Grouting Symposium, Gothenburg, Sweden, 2013. Rock Engineering Research Foundation, s. 135-145.
- Holmøy, H. K. 2008. *Significance of geological parameters for predicting waterleakage in hard rock tunnels*. Doktoravhandling ved NTNU, -. (red.). Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, Fakultet for ingeniørvitenskap og teknologi, Institutt for geologi og bergteknikk.

- Holmøy, K. H. & 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. doi: 10.1007/s00603-013-0384-9.
- Holmøy, K. H., Strømsvik, H. & Rise, T. 2015. *State of the art for sementbasert forinjeksjon*. Trondheim: SINTEF Byggeforsk.
- Holter, K. G. 2014. Loads on Sprayed Waterproof Tunnel Linings in Jointed Hard Rock: A Study Based on Norwegian Cases. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 47(3), s. 1003-1020. doi: 10.1007/s00603-013-0498-0.
- Häny AG. 2018. Data Sheet; ZMP 710V.
- Hässler, L. 1991. *Grouting of rock: Simulation and classification*. PhD Thesis, Royal Institute of Technology.
- Jacobsen, S. B. & Heier, K. S. 1978. Rb-Sr isotope systematics in metamorphic rocks, Kongsberg sector, south Norway. *Lithos*, 11(4), s. 257-276.
- Jeon, K.-H., Song, J.-W., Song, J.-J., Ryu, D.-W., Kim, H.-M. & Park, E.-S. Numerical analysis of grout flow and injection pressure affected by JRC and aperture size. 44th US Rock Mechanics Symposium and the 5th US/Canada Rock Mechanics Symposium, June 27, 2010 - June 30, 2010, 2010 Salt Lake City, UT, United states. Omnipress, s. American Rock Mechanics Association.
- Jones, J. S. & Brown, R. E. 1979. Design of tunnel support systems using ground freezing. *Engineering Geology*, 13(1), s. 375-395. doi: [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(79\)90044-9](https://doi.org/10.1016/0013-7952(79)90044-9).
- Karlsruud, K., Kvelde, V., Snillsberg, P., Søvik, A. K., Erikstad, L., Bendiksen, E., Tuttle, K. & Worsely, R. T. 2001. *Konsekvenser av tunnellekkasjer for det ytre miljø*. Vegvesen.no: Statens Vegvesen.
- Klüver, B. H. 2000. *Berginjeksjon. Intern rapport nr. 2151*. Oslo: Vegdirektoratet, Teknologivdelingen.
- Klüver, B. H. & Kveen, A. 2004. *Mjø og samfunnstjenlige tunneler, Berginjeksjon i praksis*. 104. utg. Serie: Publikasjon nr. 104. Vegdirektoratet, Teknologivdelingen, Oslo: Statens Vegvesen.
- Kobayashi, S., Stille, H., Gustafson, G. & Stille, B. 2008. *Real time grouting control method. Development and application using Äspö HRL data*. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- Li, C. C. 2017. *Rock Mechanics, TGB 4210*. NTNU, Trondheim: Norwegian University of Science and Technology.
- Lombardi, G. & Deere, D. 1993. Grouting design and control using the GIN principle. *International water power & dam construction*, 45(6), s. 15-22.
- Løset, F. 2006. *Norges tunnelgeologi*. Oslo: Norges geotekniske institutt.
- Løvås, G. G. 2013. *Statistikk for universiteter og høyskoler*. 3. utg. Oslo: niversitetsforlaget AS.
- Meteorologisk institutt. 2018. *Været som var (detaljert). Kongsberg (Buskerud)* [Online]. Tilgjengelig fra: [https://www.yr.no/sted/Norge/Buskerud/Kongsberg/Kongsberg/detaljert\\_statistikk.html](https://www.yr.no/sted/Norge/Buskerud/Kongsberg/Kongsberg/detaljert_statistikk.html) [Hentet ut 12.4].
- Mydske, P. K., Alfheim, S. L., Strøm, S., Ven, B. & Whist, E. 1999. *Gardermoprosjektet : evaluering av planlegging og gjennomføring* Oslo : Statens forvaltningstjeneste: Statens trykning. Tilgjengelig fra: <https://www.nb.no/statsmaktene/nb/d1f1c0d67edab1e437925ecf00eed437?lang=no#1>.

- Myrvang, A. 2001. Bergmekanikk. *Trondheim, Norway: Institutt for Geology og Bergteknikk, NTNU.*
- NGI. 2013. *Bruk av Q - systemet.* Oslo: NGI. s. 54.
- NGU. 2016. *Hva er grunnvann?* [Online]. Norges Geologiske Undersøkelser. Tilgjengelig fra: [http://www.grunnvanninorge.no/grunnvann\\_hva\\_er.php](http://www.grunnvanninorge.no/grunnvann_hva_er.php) [Hentet ut 7.12].
- NGU. 2017a. *Berggrunns. Nasjonal berggrunnsdatabase* [Online]. Norges geologiske undersøkelse. Tilgjengelig fra: <http://geo.ngu.no/kart/berggrunn/> [Hentet ut 23.11].
- NGU. 2017b. *Løsmasser; Nasjonal løsmassedatabase* [Online]. Norges geologiske undersøkelse. Tilgjengelig fra: <http://geo.ngu.no/kart/losmasse/> [Hentet ut 29.11].
- NGU. 2018. *Granada; Nasjonal Grunnvannsdatabse* [Online]. NGU,,. Tilgjengelig fra: <http://geo.ngu.no/kart/granada/> [Hentet ut 1.2].
- Nikolaev, S. 2015. *Evaluation of high pressures in grouting using RTGC – a case study.* Master of Science, KTH Royal Institute of Technology.
- Nilsen, B. & Brock, E. 2009. *Ingeniørgeologi-Berg. Grunnkurskompendium.* Trondheim: NTNU.
- Norconsult. 2013. *Overvåkningsprogram, Byggeplansfasen E134 Damåsen - Trollerudmoen.* 00-A00-120.
- Norconsult AS. 2015. *Ingeniørgeologisk rapport for konkurransegrunnlag. E134 Damåsen - Trollerudmoen. Entreprise 15. Sellikdalen - Trollerudmoen.* 00-A00-082. Statens Vegvesen, Region Sør.
- Nordrum, F. S. & Bancroft, P. 2001. En kort geologisk oversikt over Kongsberg ertsdistrikt. *Norsk Bergverksmuseum Skrift*, 18, s. 42-45.
- Norsk Standard 2003. NS 3086. Sement med spesielle egenskaper [www.standard.no](http://www.standard.no): Norsk Standard.
- Olsen, B. & Implenia 2017. E - mail kontakt med prosjektingeniør hos Implenia. I: Wenaas, S. (red.).
- Panthi, K. K. 2006. Analysis of engineering geological uncertainties related to tunnelling in Himalayan rock mass conditions.
- Pedersen, K. B., Kompen, R. & Kveen, A. 2010. *Arbeider foran stuff og stabilitetssikring i vegtunneler.* Teknologirapport. 2538. Oslo: Vegdirektoratet Teknologidivisjonen.
- Quiñones-Rozo, C. Lugeon test interpretation, revisited. Collaborative Management of Integrated Watersheds, 30rd Annual USSD (United States Society on Dams) Conference. US Society on Dams, Denver, 2010. s. 405-414.
- Rafi, J. Y., Johansson, F. & Stille, H. Choice of pumping pressure in pre-grouting in scandinavian tunneling projects. ITA-AITES World Tunnel Congress 2016, WTC 2016, 2016. s. 124-134.
- Rafi, J. Y. & Stille, H. 2013. Control of rock jacking considering spread of grout and grouting pressure. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 40, s. 1-15. doi: 10.1016/j.tust.2013.09.005.
- Rafi, J. Y. & 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.
- Ramberg, I. B., Bryhni, I., Nøttvedt, A., Rangnes, K. & Norsk Geologisk Forening. 2013. *Landet blir til : Norges geologi.* 2. utg. utg. Trondheim: Norsk geologisk forening.
- Ramberg, I. B. & Larsen, B. T. 1978. Tectonomagmatic evolution. *The Oslo Paleorift. A review and guide to excursions*, 337, s. 55-73.



- Rocscience. 2018. *Dips Tutorials. Toppling, Planar Sliding, Wedge Sliding* [Online]. Rocscience,, Tilgjengelig fra: [https://www.rocscience.com/help/dips/webhelp/pdf\\_files/tutorials/Tutorial\\_04\\_Toppling\\_Planar\\_and\\_Wedge\\_Sliding.pdf](https://www.rocscience.com/help/dips/webhelp/pdf_files/tutorials/Tutorial_04_Toppling_Planar_and_Wedge_Sliding.pdf) [Hentet ut 9.3].
- Sigmaplot Software Inc. 2018. *Homepage* [Online]. Tilgjengelig fra: <http://sigmaplot.co.uk/> [Hentet ut 15.2].
- Skjølsvold, O. & Justnes, H. 2016. Characterization of cement types used for rock injection.
- Solomon, S. 2018. Spørsmål om prosjektet. E-mail kontakt. I: Wenaas, S. (red.).
- Solomon, S. & Ansatte hos Implenia 2017. Befaring I Svartåstunnelen i Kongsberg. I: Wenaas, S. (red.).
- SSB. 2017. *Konsumprisindeksen* [Online]. Statistisk Sentralbyrå. Tilgjengelig fra: <https://www.ssb.no/kpi> [Hentet ut 22.11].
- Statens Vegvesen. 2013. *Vegprosjektet E134 Damåsen-Saggrenda. 2.* [www.vegvesen.no](http://www.vegvesen.no): Statens Vegvesen,,.
- Statens Vegvesen. 2015. *Håndbok R761, Prosesskode 1, Standard beskrivelsestekster for vegkontrakter. Hovedprosess 1 - 7.* [www.vegvesen.no](http://www.vegvesen.no): Vegdirektoratet.
- Statens Vegvesen. 2016a. *E134 Myntbrua–Trollerudmoen; Delstrekning 2* [Online]. Statens Vegvesen,,. Tilgjengelig fra: <https://www.vegvesen.no/Europaveg/Damasen/Om+prosjektet/e134-myntbruatrollerudmoen/delstrekning-2-myntbruatrollerudmoen> [Hentet ut 27.10].
- Statens Vegvesen. 2016b. *Om prosjektet* [Online]. [www.vegvesen.no](http://www.vegvesen.no): Statens Vegvesen,,. Tilgjengelig fra: <https://www.vegvesen.no/Europaveg/Damasen/Om+prosjektet> [Hentet ut 27.10].
- Statens vegvesen. 2016c. *Vegtunneler*. Serie: Håndbok N500. Statens Vegvesen, Vegdirektoratet.
- Statens Vegvesen. 2017a. *E134 Damårsen - Saggrenda; E10/E15 Myntbrua - Trollerudmoen; Ingeniørgeologiske dokumentasjon; Geologisk Kartlegging og sikringsomfang; Svartåstunnelen - vestgående løp*. Statens Vegvesen.
- Statens Vegvesen. 2017b. *Fakta* [Online]. [www.vegvesen.no](http://www.vegvesen.no): Statens Vegvesen,,. Tilgjengelig fra: <https://www.vegvesen.no/Europaveg/Damasen/Fakta> [Hentet ut 27.10].
- Statens Vegvesen. 2017c. *Framdrift* [Online]. [www.vegvesen.no](http://www.vegvesen.no): Statens Vegvesen,,. Tilgjengelig fra: <https://www.vegvesen.no/Europaveg/Damasen/framdrift> [Hentet ut 27.10].
- Stille, B. 2016. Grouting theory and grouting practice.
- Stille, H. 2015. *Rock grouting: theories and applications*. Befo, Rock Engineering Research Foundation.
- Stille, H., Gustafson, G. & Hassler, L. 2012. Application of new theories and technology for grouting of dams and foundations on rock. *Geotechnical and Geological Engineering*, 30(3), s. 603-624.
- Strømsvik, H. & Grøv, E. 2017. Interpretation of Pressure and Flow during Pre-Grouting in Hard Rock Tunneling. *Grouting 2017*. s. 285-294.
- Sve, R., Elsøy, J., Sagen, T., Backer, L., Holter, K. G., Bollingmo, P., Boge, K., Pedersen, K. B. & Aarset, A. 2008. *Tung bergsikring i undergrunnsanlegg*. Norsk Forening For Fjellsprengningsteknikk - NFF.
- Tunbrigde, L., Aarset, A. & Tønnessen, E. 2014. FoU prosjekt med måling av injeksjonstrykk in situ. Presentert på: *Fjellsprengningsdagen*. Oslo.

- Warner, J. 2004. *Practical handbook of grouting: soil, rock, and structures*. London: Hoboken, New Jersey.
- Åndal, T., Andersson, H. & Aasen, O. 2001. *Injeksjon. Erfaringer fra utvalgte tunnelprosjekter*. Miljø og samfunnstjenlige tunneler. Intern rapport. 2233. Oslo.

## Vedlegg

- Vedlegg I – Filene som ligger i den vedlagte datamappen.
- Vedlegg II – Notert data for å utføre analysen.
- Vedlegg III – Gjennomsnittlig injisert volum og injeksjonstid i jekkede og ikke jekkede hull.
- Vedlegg IV – Modifisert injisert volum og injeksjonstid til 24 m lange skjermer.
- Vedlegg V – Hvilke hullnummer som er såle, heng, vegg og stuff.
- Vedlegg VI – Hullnummerene det er tolket hydraulisk jekking i fra hver skjerm.
- Vedlegg VII – Injeksjonsprosedyren for skjerm 6914.

## Vedlegg I

I den vedlagte datamappen så ligger følgende filer:

- Rådata i XML format for de 20 analyserte skjermene
- Rådata i Excel format for de 20 analyserte skjermene.
- Trykk/flyt graf med QP – indeksen for alle de 809 analyserte injeksjonsforløpene.
- Markerte hendelser med hydraulisk jekking. Alle de 273 hendelsene med hydraulisk jekking er markert med en rosa linje på trykk/flyt grafen og QP – indeksen.
- Ingeniørgeologisk dokumentasjon for det vestgående løpet – Svartåstunnelen.
- Strøk/fall målinger for de kartlagte sprekke i det vestgående løpet – Svartåstunnelen.
- RTGC programmet av Martin Hovda Haugsand.
- Interne rapporter av injeksjonsboringen.

## Vedlegg II

Tabell 7-1 Oversikt over de forskjellige målingene tatt av de 20 tolkede skjermene for det vestgående løpet.

Skjer m	Masse	Q - verdi	RQD	Injisert volum [L]	Injeksjonstid [HH:mm:ss]	Antall hull	Jekkede hull	% jekkede hull	Snitt injeksjonstrykk [bar]	v/c	Lengde [m]	Bergover dekning[ m]
6530	Industri	1,0		22005	19:21:07	37	9	24,3	40,9	0,8 og 0,5	24	6,1
6654	Mikro	3,6		21606	11:57:45	46	18	39,1	54,2	M: 0,9 og 0,6	24	22,5
6671	Industri og mikro	12,1		16747	10:45:30	46	16	34,8	60,2	I:0,8 og 0,6 M:0,9 og 0,6	24	27,6
6687	Industri	5,2		49261	30:44:10	46	28	60,9	55	0,8, 0,6 og 0,5	24	28,3
6705	Industri	2,7	61,9	63050	33:25:56	46	31	67,4	55,1	0,8 og 0,6	24	30,1
6719	Industri	3,1	64,6	37848	37:53:14	46	19	41,3	55,2	0,8 og 0,6	29	30,2
6762	Industri	7,0	72,1	35939	16:05:56	46	19	41,3	69,5	0,8 og 0,6	29	33,4
6785	Industri	3,9	71,7	56806	19:55:51	48	22	45,8	62,9	0,8 og 0,6	29	35,1
6808	Industri	5,8	64,8	39198	17:42:12	40	18	45,0	63,8	0,8 og 0,6	29	35,1
6827	Industri	8,9	73,8	15193	07:26:20	46	12	26,1	63,3	0,8 og 0,6	29	34,3
6851	Industri og mikro	10,4		19829	10:43:22	42	13	31,0	62,6	I: 0,8 og 0,61 M: 0,9 og 0,6	29	35,5
6914	Industri	8,8	75,0	31617	11:01:32	40	17	42,5	63,0	0,8 og 0,6	29	38,4
6983	Industri og mikro	12,4		21384	09:25:46	34	15	44,1	84,4	I: 0,8 og 0,6 M: 1,0 og 0,8	24	56,5
7028	Industri	36,6		11869	06:55:53	31	6	19,4	85,6	0,8 og 0,6	24	68,9
7588	Industri	24,3		14378	12:49:32	32	7	21,9	83,5	0,8 og 0,6	24	46,6
7721	Industri	8,4		17051	11:40:39	31	9	29,0	59,8	0,8 og 0,5	24	74,2
7768	Industri	4,4		9212	05:44:03	32	5	15,6	62,0	0,8 og 0,5	24	72,1
7797	Industri	2,6		8586	06:49:24	40	4	10,0	63,4	0,8 og 0,5	24	69,9
7812	Industri	6,1		5480	04:45:04	44	0	0,0	54,7	0,8 og 0,5	24	65,8
7841	Industri	16,4		8659	07:04:35	36	5	13,9	54,1	0,8 og 0,5	24	57,2

## Vedlegg III

Tabell 7-2 Gjennomsnittlig injisert i volum og gjennomsnittlig injeksjonstid i hullene med og uten jekking

Skjerm	Masse	Gje.snitt injisert volum [L] jekkede hull	Gje.snitt injisert volum [L] ikke jekkede hull	Gje.snitt injeksjonstid [min] jekkede hull	Gje.snitt injeksjonstid [min] ikke jekkede hull
6530	Industri	1236	389	158	97
6654	Mikro	922	176	80	56
6671	Industri og mikro	744	161	82	23
6687	Industri	1524	366	225	48
6705	Industri	1684	661	241	78
6719	Industri	1657	236	167	33
6762	Industri	1566	229	136	15
6785	Industri	2413	143	213	16
6808	Industri	1549	515	127	45
6827	Industri	772	174	56	21
6851	Industri og mikro	1016	228	93	28
6914	Industri	1122	545	99	49
6983	Industri og mikro	1101	256	85	28
7028	Industri	1067	219	95	18
7588	Industri	316	487	129	77
7721	Industri	1038	350	238	62
7768	Industri	767	199	87	24
7797	Industri	410	193	91	37
7812	Industri	-	-	-	-
7841	Industri	532	193	78	28

## Vedlegg IV

Tabell 7-3 Modifisert injisert volum og injeksjonstid til 24 m lange skjermmer.

Skjerm	Lengde [m]	Mod. Injisert vol [L]	Mod. injeksjonstid [tt:mm:ss]
6530	24	19656	17:23:38
6654	24	18685	9:31:42
6671	24	13826	8:19:27
6687	24	46340	28:18:07
6705	24	60129	30:59:53
6719	29	28140	28:42:10
6762	29	26560	10:40:16
6785	29	43691	13:43:37
6808	29	29672	12:20:41
6827	29	9391	3:30:15
6851	29	13504	6:27:09
6914	29	23398	6:49:06
6983	24	19225	7:37:49
7028	24	9901	5:17:28
7588	24	12346	11:07:56
7721	24	15083	10:02:14
7768	24	7180	4:02:27
7797	24	6046	4:42:24
7812	24	2686	2:25:22
7841	24	6373	5:10:17

## Vedlegg V

Tabell 7-4 Hvilke hullnummer i hver skjerm som er i såle, heng, vegg eller stuff.

Skjerm	Hullnummer i hvilken lokasjon (f.o.m. – t.o.m.)			
	Heng	Vegg	Såle	Stuff
6530	5 - 18	1 – 4 og 19 - 22	23 – 32	33 - 37
6687	7 - 21	1 – 6 og 22 - 27	28 – 38	39 - 46
6719	6 - 20	1 – 5 og 21 - 25	26 - 38	39 - 46
6785	6 - 20	1 – 5 og 21 - 25	26 - 38	39 - 48
6808	5 - 19	1 – 4 og 20 - 23	24 - 34	35 - 40
6827	6 - 20	1 – 5 og 21 - 25	26 - 38	39 - 46
6914	5 - 19	1 – 4 og 20 - 23	24 - 34	35 - 40
7028	4 - 14	1 – 3 og 15 - 17	18 - 27	28 - 31
7588	4 - 14	1 – 3 og 15 - 17	18 - 27	28 - 32
7721	4 - 14	1 – 3 og 15 - 17	18 - 27	28 - 31
7797	6 - 20	1 – 5 og 21 - 25	26 - 31	32 - 40
7841	4 - 14	1 – 3 og 15 - 17	19 - 28	29 - 37




## Vedlegg VI

Tabell 7-5 Hullene det er tolket hydraulisk jekking i.

Skjerm	Tolket jekking i hull
6530	10, 12, 13, 15, 17, 25, 30, 32, 34
6654	8, 9, 10, 11, 13, 14, 26, 27, 30, 33, 34, 36, 38, 39, 42, 43, 54, 46
6671	8, 9, 12, 17, 18, 20, 24, 28, 29, 31, 32, 35, 40, 42, 43, 47
6687	1, 4, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 15, 16, 18, 19, 20, 21, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 33, 34, 40, 41, 43, 44, 45
6705	2, 5, 6, 8, 9, 10, 13, 14, 15, 16, 17, 22, 23, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 40, 42, 43, 44, 45, 46
6719	1, 3, 4, 7, 8, 10, 11, 15, 16, 19, 26, 31, 32, 33, 34, 41, 43, 44, 46
6762	1, 2, 15, 16, 17, 24, 25, 26, 28, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39
6785	1, 15, 16, 17, 18, 19, 21, 22, 25, 26, 27, 28, 31, 32, 33, 34, 36, 37, 38, 40, 44, 45,
6808	1, 2, 5, 7, 8, 9, 15, 18, 19, 20, 27, 28, 29, 30, 33, 35, 37, 38
6827	1, 17, 18, 21, 22, 24, 29, 30, 31, 32, 44, 45
6851	1, 6, 7, 8, 14, 15, 20, 24, 26, 28, 33, 34, 35
6914	1, 5, 10, 15, 21, 22, 23, 25, 26, 27, 30, 31, 32, 33, 35, 37, 39
6983	1, 9, 10, 13, 15, 17, 19, 22, 23, 24, 26, 27, 28, 29, 30
7028	4, 5, 13, 19, 22, 25
7588	9, 11, 13, 14, 19, 23, 25
7721	3, 7, 8, 9, 11, 17, 18, 27, 31
7768	1, 2, 24, 25, 27
7797	1, 2, 33, 35
7812	Ingen
7841	3, 5, 17, 27, 29

## Vedlegg VII

 Statens vegvesen			
Statens vegvesen <u>Region</u> Sør	Prosjekt-/delprosjekt: 16/46336	Fasenr: [redacted]	Arkivref: [redacted]

<b>Skjema for tunnelkommunikasjon</b>	<b>Nr.: 224</b>
Prosjekt: E134 Damåsen-Saggrenda	Byggherre: Statens vegvesen
Kontrakt: E10/E15	Entreprenør: Implenia

**Melding til entreprenør:**  
**Denne KM erstatter KM 203 og beskriver injeksjonsprosedyre ved bruk av industrisement.**

**Injeksjonsprosedyre Sellikdalen begge løp**

Stopptrykk hele skjermen: 80 bar.

Det skal benyttes standard injeksjonssement.

1. V/C=0,8, 500l i hvert hull.
2. Ved jevn trykkoppbygging kan det fortsettes med inntil 500l v/c = 0,8.
3. Dersom stopptrykk ikke er nådd fortsett med V/C=0,6. Maks 1500L i hvert hull.
4. Dersom stopptrykk ikke er nådd så settes dette hullet på hvile i ca 2 – 3 timer.
5. Fortsett med V/C = 0,6 inntil trykk er oppnådd.
6. Dersom det pumpes mer enn 1000L i pkt 5 skal kontrollingeniør kontaktes.

Ved jevn trykkoppbygging kan det pumpes utover mengdene som er påpekt.

Prosedyre kan justeres ved behov i samråd med SVV. Ved spesielle hendelser eller endringer skal SVV kontaktes.

Det er lav overdekning og brønner i området. ENT må gå jevnlig runder i terrenget for å påse at det ikke er utganger.

<b>Levert av byggherre</b>		<b>Mottatt av entreprenør</b>	
Dato: 14.09.2017	Navn: Geir Brevik	Dato: [redacted]	Navn: [redacted]

Kommentarer:  
 K-meldinger kan også benyttes som bilag for overlevering for eksempel tegninger, stillingsdata.  
 Emnefeltet bør deles inn i ulike kategorier for ønsket å systematisere meldingene.  
 Original til entreprenør for underskrift, kopi til byggherren.

Figur 7.1 KM 224 som ble brukt som injeksjonsprosedyre for skjerm 6914 (Solomon, 2018).