

Hydraulisk jekking ved høytrykksinjeksjon av berg

Stine Merete Hvoslef Moe

Geologi

Innlevert: mai 2016

Hovedveileder: Eivind Grøv, IGB

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for geologi og bergteknikk



MASTEROPPGAVEN

Kandidatens navn: Stine Merete Hvoslef Moe

Oppgavetittel: Hydraulisk jekking ved høytrykksinjeksjon av berg

English title: Rock Mass jacking by High Pressure cement grouting

Utfyllende tekst: Oppgaven skal behandle hydraulisk jekking av bergmassen som følge av injeksjon med bruk av høyt trykk. Høyt trykk benyttes for å gi god inngang av injeksjonsmasse som sikrer at innlekkasjen av vann i en tunnel holdes under tillatt nivå der dette er påkrevet. Oppgaven skal utføres med et innledende litteraturstudie og deretter et statistisk studie av data logget ved injeksjon på to ulike tunnelprosjekter i ulike geologiske forhold.

Litteraturstudiet skal bestå av følgende deler:

- Beskrive vannets opptreden og bevegelse i bergmassen
- Beskrive og forstå sementinjeksjon med høyt trykk som metode for å oppnå en tilstrekkelig tett bergmasse
- Beskrive og forstå ulike teorier om hydraulisk jekking av bergmassen

Det statistiske studiet skal:

- Analysere og tolke data fra to injeksjonsjobber der man har innsamlet omfattende statistisk materiale fra gjennomføringen av injeksjonsarbeidene
- Søke å finne relasjoner mellom faktorene som er logget under injeksjon og tilfeller der tilsynelatende jekking av bergmassen er tolket basert på trykk/tid-grafer

Oppgaven er vinklet mot berginjeksjon i typisk norske bergarter ved tunneldriving med boring og sprengning og forinjeksjon for å oppnå en tilstrekkelig tett konstruksjon.

Oppgaven leveres på norsk.

Ansvarlig faglærer og hovedveileder for oppgaven er prof. II Eivind Grøv, Institutt for geologi og bergteknikk. Oppgaven utføres som en del av bransjeprojektet TIGHT.

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

Studieretning: Teknisk geologi

Hovedprofil: Ingeniørgeologi/bergteknikk

Tidsrom: 15.08.2015 – 15.05.2016

Eivind Grøv
Faglærer

SKJEMAET TAS INN SOM SIDE 1 I MASTEROPPGAVEN
NTNU, 2 mai 2016

FORORD

Denne masteroppgaven er skrevet som avsluttende arbeid på det 2-årige studieprogrammet geologi realfag ved Norges teknisk-naturvitenskaplige universitet (NTNU). Oppstarten til oppgaven var noe kronglete, da det var vanskelig å finne et tunnelprosjekt som kunne benyttes som testområde av in situ loggerutstyr. Da et passende prosjekt ble funnet, viste det seg at forholdene ikke var egnet til studie av injeksjon, ettersom tunnelstussen var tørr før injeksjon. Med gode innspill fra veileder Eivind Grøv ble det likevel etter hvert utviklet en god plan for oppgaven.

Jeg vil først takke Jernbaneverket og Bever Control AS for tilgang på injeksjonsdata fra to ulike jernbaneprosjekter, samt Elisabeth Grasbakken og Hanne Wiig Sagen i Jernbaneverket for bakgrunnsmateriale fra de to prosjektene. Jeg vil også takke Bjørnar Gammelsæter i Jernbaneverket for hyggelig besøk og omvisning på anlegget på Åsland, og mulighet til å teste trykkloggere på en stoff i en adkomst tunnel. Besøket var en svært lærerik og nyttig erfaring.

Videre vil jeg takke Lloyd Warren Tunbridge fra NGI for mulighet til å benytte hans oppsett for å teste in situ trykk i borhull under injeksjon, og Jan Gundersen på verkstedet hos NGI for god hjelp og anledning til å klargjøre utstyret til nye feltforsøk på svært kort varsel.

Takk også til Therese Scheldt og Arne Marius Raaen i Statoil for hyggelig og nyttig møte hos Statoil på Rotvoll, der de begge kom med gode innspill i forbindelse med beregning av bergspenninger og jekketrykk. Takk til Trond Larsen i SINTEF for innspill og diskusjon om 3D bergspenningsmålinger. Takk til Professor Håkan Stille fra Kungliga Tekniska högskolan i Stockholm for svar på henvendelse angående RTGC-metoden og beregning av relativt jekketrykk.

Jeg vil også takke Magnus Tandberg og Claudia Querbach i Bever Control AS for hyggelig besøk på deres kontorer i Tranby med introduksjon til bruk av Bever Team, samt god hjelp ved tekniske utfordringer.

Til slutt vil jeg rette en stor takk til min veileder Eivind Grøv for deling av nettverk, gode innspill og stor frihet til utforming av oppgaven. Jeg vil også gi en stor takk til doktorgradsstudent på TIGHT, Helene Strømsvik for stort engasjement, mange gode innspill, diskusjoner og gjennomlesing av oppgaven.

Trondheim 12.05.2016
Stine Merete Moe

SAMMENDRAG

Innlekkasje av vann er en stadig utfordring ved driving av tunnel og bergrom, da konstruksjonene normalt er plassert under grunnvannsspeilet. Vannets opptreden og bevegelse i bergmassen, avhenger av bergmassens hydrauliske konduktivitet samt ulike geologiske parametere som sprekkekarakter, spenningssituasjon, forkastninger og sammensetningen av overliggende masser. I tillegg til å redusere inndriften, kan innlekkasje av vann føre til dårlig arbeidsmiljø på tunnelstuff og senkning av grunnvannsspeilet i området over og rundt underjordsanlegget. Avhengig av hvor sensitivt området over tunnelen/bergrommet er, blir det i forkant av driving satt et krav til maksimal innlekkasje i konstruksjonen. For å overholde dette kravet finnes det flere ulike metoder, blant annet full utstøpning med membran, sprøytet membran eller for- og etterinjeksjon. I Norge er forinjeksjon med sement og bruk av høyt trykk den vanligste metoden for å oppnå en tilstrekkelig tett bergmasse rundt tunnelen/bergrommet.

Sementbasert forinjeksjon med høyt trykk fører i mange tilfeller til hydraulisk jekking av eksisterende sprekker i bergmassen som injiseres. Injeksjonsprosessen fra to ulike jernbaneprosjekter, samt instrumentering av en tunnelstuff med in situ-måling av injeksjonstrykket i borhull, er analysert i denne masteroppgaven. Det er forsøkt å finne relasjoner mellom faktorene som er logget på injeksjonsriggen under injeksjon ved tilfeller der tilsynelatende jekking av bergmassen er tolket, basert på trykk/tid-grafer i to seksjoner fra de studerte jernbanetunnelene.

Fordelt på 19 injeksjonsskjermer er det i denne masteroppgaven studert 775 injeksjonshull. Av disse er det tolket tilsynelatende jekking i 24,8 % av hullene. Hull der tilsynelatende jekking er tolket, har generelt et lengre tidsforbruk til injeksjon og mer masse injisert enn hull uten jekking. Hendelsene med tilsynelatende jekking er dessuten tolket relativt tidlig i injeksjonsprosessen. I tre av de studerte skjermene var sementinngangen totalt i hver skjerm over 80 tonn sement. I de samme skjermene er det tolket tilsynelatende jekking i over 40 % av hullene. Det er en større andel hull med jekking enn i noen av de andre 16 studerte injeksjonsskjermene.

Teoretiske beregninger basert på formler som er utviklet for å estimere trykket som er forventet å føre til jekking i en bergmasse, er utført med to ulike formler. Formelen presentert av Gothäll og Stille (2009) ga resultater i overenstemmelse med tolkningen av tilfeller med tilsynelatende jekking basert på trykk/tid-grafene i studien, og beregningsmetoden er derfor bekreftet i denne studien.

ABSTRACT

Water leakage is a constant challenge in tunnels and rock caverns, as the structures are generally located below the groundwater table. The behavior and movement of the groundwater in the rock mass depend on the rock masses' hydraulic conductivity and various geological parameters, such as joint character, stress situation, faults and composition of the overburden. In addition to causing problems and delays related to the work at the tunnel face, lowering of the groundwater table can have environmental consequences in the catchment area of the underground construction. Based on environmental sensitivity analyses, a groundwater leakage restriction along the tunnel path is defined in advance of excavation. There are several different methods of controlling the groundwater inflow to a tunnel/cavern, among these, concrete lining with membrane, sprayed membrane or pre- and post-grouting. In Norway, high pressure cement pre-grouting is the most common method to obtain the required tightness of the tunnel/cavern.

In many cases, high-pressure grouting results in hydraulic jacking of the fractures in the rock mass which is being grouted. This thesis analyses the grouting process from two different railway projects, and instrumentation of a single tunnel face with in situ measurement of the grouting pressure in a borehole. Attempts are made to find correlations between factors logged during grouting and incidents of apparent jacking of the rock mass, based on interpretation of the pressure/time-graphs in sections of the studied tunnels.

The basis for the analysis consists of 775 injection holes which are distributed among 19 grouting rounds. Of these, apparent jacking is interpreted in 24.8 % of the injection holes. The holes where apparent jacking is interpreted, generally require a longer period of time for grouting and a larger amount of injected mass compared to holes without jacking. Furthermore, the events of apparent jacking are often interpreted relatively early during the grouting process. In three of the studied grouting rounds, the total injected volume in each round is larger than 80 tons of cement. In the same three rounds, apparent jacking is interpreted in more than 40 % of the holes, which is a greater percentage of jacked holes compared to any other of the 16 studied grouting rounds.

To calculate the pressure expected to cause hydraulic jacking of the rock mass, calculations were carried out by two different formulas. The formula presented by Gothäll and Stille (2009) gave results consistent with the interpretation of events of apparent jacking based on pressure/time-graphs in the study. The calculation method is therefore confirmed in this study.

INNHALDSFORTEGNELSE

FORORD.....	III
SAMMENDRAG.....	V
ABSTRACT.....	VII
FIGURLISTE.....	XIII
TABELLISTE.....	XVII
1 INNLEDNING.....	1
1.1 Bakgrunn.....	1
1.2 Formål med oppgaven.....	2
1.3 Omfang og avgrensning.....	2
2 VANN I BERG.....	5
2.1 Hydraulisk konduktivitet.....	6
2.2 Geologiske parametere.....	8
2.3 Estimering av vanninntrenging.....	12
3 TETTEMETODER.....	17
3.1 PE-skum.....	17
3.2 Full utstøping med membran.....	17
3.3 Sprøytet membran.....	18
3.4 Injeksjon.....	19
4 SEMENTBASERT FORINJEKSJON.....	23
4.1 Tettekrav og stoppkriterier.....	23
4.2 Injeksjonsmassens sammensetning og egenskaper.....	28
4.3 Injeksjonsprosedyre.....	36
5 SPENNINGER I BERGMASSEN.....	45
5.1 Beregne spenningene i en bergmasse.....	45
5.2 Aktiv målemetode.....	47
5.3 Passiv målemetode.....	49
6 HYDRAULISK JEKING AV BERGMASSEN, ULIKE TEORIER.....	53
6.1 Influensradius.....	53
6.2 Spenningene rundt borhullet.....	55
6.3 Avlastning av kontaktasperiter.....	56
6.4 Teoretisk beskrivelse av jekking fra petroleumsindustrien.....	59
6.5 Jekking – positivt eller bare negativt?.....	62

6.6	Oppsummering og teori benyttet i studien	62
7	STUDIEOMRÅDE.....	65
7.1	Follobanen	65
7.2	Vestfoldbanen.....	73
8	MÅLING AV IN SITU INJEKSJONSTRYKK.....	79
8.1	Utstyr for måling av trykk inne i borhull	79
8.2	Test av utstyret i felt.....	83
8.3	Resultater fra utførte tester	84
8.4	Diskusjon.....	85
8.5	Konklusjon	86
9	INNSAMLING AV DATA TIL STUDIEN	87
9.1	Valg av prosjekt og seksjoner	87
9.2	Benyttet data.....	87
9.3	Vurdering av trykk/tid-grafer	88
9.4	Tolkning av data ved jekking	94
9.5	Visualisere data	94
9.6	Effektivt injeksjonstrykk	95
9.7	Sortering	96
9.8	Analysere data	96
10	RESULTATER	99
10.1	Jekking	99
10.2	V/c-forhold	100
10.3	Trykk	102
10.4	Volum.....	105
10.5	Tid	108
10.6	Sammenstilling av relevante faktorer.....	110
10.7	Beregninger med effektiv spenning	117
10.8	Utrekning av p_n	119
10.9	Teoretisk maksimaltrykk ved jekking	121
10.10	Null-funn.....	121
11	DISKUSJON	123
11.1	Bergspenningsmålinger	123
11.2	Jekking	124
11.3	V/c-forhold	124
11.4	Trykk	125
11.5	Volum.....	127

11.6	Tid	129
11.7	Hypotese 3.....	131
11.8	Hypotese 5 og 6.....	131
11.9	Utregning av p_n	132
11.10	Teoretisk maksimaltrykk ved jekking.....	133
11.11	Null-funn.....	134
11.12	Injeksjonsprosedyre og stoppkriterier	135
11.13	Konsekvens av jekking	136
11.14	Bergmassens innvirkning på injeksjon	137
11.15	Feilkilder/tilfeldige faktorer	137
12	OPPSUMMERING OG KONKLUSJON	139
13	VIDERE ARBEID	141
	REFERANSER	143
	VEDLEGG.....	151
	Vedlegg A: Tester av injeksjonsmassen	
	Vedlegg B: Rådata fra instrumentert skjerm på Follobanen (zip-fil)	
	Vedlegg C: Rådata fra begge prosjektene som er benyttet til statistiske analyser (zip-fil)	
	Vedlegg D: Kondensert data fra Follobanen og Vestfoldbanen	
	Vedlegg E: Alle plott som er laget i forbindelse med analyser av data (zip-fil)	
	Vedlegg F: Grunnvannsmålinger og resultater fra bergspenningsmålinger med utregnet største og minste tangentialspenning	
	Vedlegg G: Teoretiske beregninger av forventet jekketrykk og sammenlikning av effektivt jekketrykk funnet basert på tolkning av trykk/tid-grafer	
	Vedlegg H: Grafer for null-funn	

FIGURLISTE

Figur 2-1: Prinsippskisse av vannets bevegelse gjennom en oppsprukket bergmasse.....	5
Figur 2-2: Hydraulisk konduktivitet til ulike bergarter	7
Figur 2-3: Endring i permeabilitet som funksjon av overdekningen	10
Figur 2-4: Prinsippskisse for Lugeon-test med to pakkere.....	13
Figur 2-5: Sonderboring	15
Figur 3-1: Oppbygging av lagene ved bruk av full utstøpning med membran	18
Figur 3-2: Øverst - Prinsippskisse for sandwich-strukturen med sprøytet membran.....	19
Figur 4-1: Strømningsvei for injeksjonsmassen	25
Figur 4-2: Forslag til ulike stoppkriterier basert på GIN-metoden	25
Figur 4-3: Estimert penetrasjonslengde for strømning av injeksjonsmasse i 2D.....	27
Figur 4-4: Kornfordelingskurver for tre sementtyper	29
Figur 4-5: Maksimal kornstørrelse i injeksjonsmassen.....	30
Figur 4-6: Tiden det tar for å oppnå enaksiell trykkfasthet på 450 kPa	31
Figur 4-7: Filterkakedannelse.....	32
Figur 4-8: Ulik tendens til vannutskillelse	32
Figur 4-9: Reologiske lover for Bingham og Newton væsker	34
Figur 4-10: Strømningshastighet i en sprekk med ru sprekkvegg	35
Figur 4-11: Prinsippet for systematisk forinjeksjon	37
Figur 4-12: Boring av injeksjonsskjerm.....	38
Figur 4-13: Vanlig injeksjonsrekkefølge i Norge	39
Figur 4-14: Sementpartiklene re orienteres når trykket faller	41
Figur 4-15: "Bridging"	41
Figur 4-16: Prinsipp for plassering av pakker	42
Figur 5-1: Hovedspenningenes retninger og relativ størrelser i en dalside.....	46
Figur 5-2: Idealisert forløp av hydraulisk jekking test med tre sykluser.....	48
Figur 5-3: Virkelig splittekurve ved hydraulisk jekking	48
Figur 5-4: 76 mm borhull og konsentrisk borhull med diameter 36 mm	50
Figur 5-5: Installering av målecellen	50
Figur 5-6: Overboring av målecellen	50
Figur 5-7: Andre avlesning etter at kjernen er tatt ut av borhullet	50
Figur 6-1: Trykkfallsforløpet ved radiell strømning	54
Figur 6-2: Trykkfallet er avhengig av skjæringsvinkelen	54

Figur 6-3: Fordeling av tangentialspenning rundt sirkulær åpning.....	56
Figur 6-4: Deformasjon av en sprekk med 18 bar normalspenning i betong.....	59
Figur 6-5: Vertikale sprekker dannet symmetrisk fra et vertikalt borhull.....	59
Figur 6-6: Idealisert forløp av trykket i borhullet under hydraulisk jekking	60
Figur 6-7: Realistisk trykkforløp ved hydraulisk jekking i vertikalt borhull	61
Figur 6-8: Endring i strømming når injeksjonstrykket økes fra 1 til 2 MPa	63
Figur 7-1: Beliggenheten til de to tunnelprosjektene	65
Figur 7-2: Tverrsnitt av adkomsttunnel nord med geologi	66
Figur 7-3: Kartutsnitt med beliggenheten til instrumentert skjerm.....	67
Figur 7-4: Stereografisk projeksjon i nedre halvkule av registrerte sprekker	68
Figur 7-5: Plassering av målesteder der 3D bergspenningsmåling er utført	69
Figur 7-6: Stereografisk plott av orienteringen til hovedspenningene	70
Figur 7-7: Plassering av installerte piezometere	71
Figur 7-8: Injeksjonsprosedyre for adkomsttunnel nord	72
Figur 7-9: Tverrprofil av tunnelen på Vestfoldbanen med geologi.....	73
Figur 7-10: Sprekkerose for sprekker kartlagt i basalt i B1-formasjonen.....	74
Figur 7-11: Plassering av 3D bergspenningsmålinger	75
Figur 7-12: Stereografisk plott av orienteringen til hovedspenningene	76
Figur 7-13: Plassering av fjellbrønnene for overvåking av grunnvannet.....	77
Figur 7-14: Prosedyre for injeksjon på Vestfoldbanen	78
Figur 8-1: Trykksensor med datalogger som ble brukt til å registrere trykket	79
Figur 8-2: Skisse for måling av in situ trykk i borhull med "flat-jack"	80
Figur 8-3: «Flat-jackene» med boret og gjenget hull	80
Figur 8-4: Stålkapselen som trykksensoren ligger inne i	81
Figur 8-5: Ferdig montert og vannfylt måleoppsett	82
Figur 8-6: Trykktesting av utstyret i «borhull» med vannpumpe	82
Figur 8-7: Felttegning av instrumentert tunnelstuff	83
Figur 8-8: Trykkmålinger fra både trykksensor inne i borhullet og injeksjonsriggen	85
Figur 9-1: Utjevning av trykk- og strømningsgraf med glidende gjennomsnitt.....	90
Figur 9-2: Normalt injeksjonsforløp	91
Figur 9-3: Jekking av borhull vist på trykkgrafen.....	92
Figur 9-4: Svært høyt injeksjonstrykk tidlig i injeksjonsprosessen	93
Figur 9-5: Sortering av data basert på ulike kriterier	96
Figur 10-1: Prosentandel hull med jekking i de studerte skjermene på Follobanen	100

Figur 10-2: Prosentandel hull med jekking i de studerte skjermene på Vestfoldbanen	100
Figur 10-3: Prosent av hullene med tilsynelatende jekking med $v/c = 0,9$ og $0,5$	101
Figur 10-4: Prosent av hullene med tilsynelatende jekking med $v/c = 0,8$ og $0,5$	102
Figur 10-5: Gjennomsnitt av maksimaltrykk i hvert hull med og uten jekking	102
Figur 10-6: Gjennomsnitt av maksimaltrykk i hvert hull med og uten jekking	103
Figur 10-7: Gjennomsnittstrykk ved jekking med standardavvik	104
Figur 10-8: Gjennomsnittstrykk ved jekking med standardavvik	104
Figur 10-9: Gjennomsnittlig sementinnngang i hull med og uten jekking	105
Figur 10-10: Gjennomsnittlig sementinnngang i hull med og uten jekking	105
Figur 10-11: Gjennomsnittlig akkumulert volum ved jekking med standardavvik	106
Figur 10-12: Gjennomsnittlig akkumulert volum ved jekking med standardavvik	107
Figur 10-13: Gjennomsnittlig tidsforbruk per hull med og uten jekking	108
Figur 10-14: Gjennomsnittlig tidsforbruk per hull med og uten jekking	109
Figur 10-15: Kategorisering basert på akkumulert tid når jekking initieres	109
Figur 10-16: Totalt injisert volum per skjerm og relativt antall hull med jekking	111
Figur 10-17: Totalt injisert volum per skjerm og relativt antall hull med jekking	112
Figur 10-18: Spredningsplott med akkumulert tid og volum	114
Figur 10-19: Spredningsplott med akkumulert tid og volum	115
Figur 10-20: Spredningsplott for akkumulert tid og volum ved jekking på Follobanen	116
Figur 10-21: Spredningsplott for akkumulert tid og volum ved jekking på Vestfoldbanen	117

TABELLISTE

Tabell 2-1: Forekomstmåter av vann i berg	6
Tabell 2-2: Fremgangsmåte ved utførelse av Lugeontest i fem steg.....	13
Tabell 2-3: Typiske Lugeon-verdier med omtrentlig konduktivitet og oppsprekkingsgrad ..	14
Tabell 3-1: Viktige mekaniske parametere for sprøytetmembranmetoden	19
Tabell 4-1: Forslag til maksimal tillatt innlekkasje for tunneler med tverrsnitt 8,5 meter.....	23
Tabell 4-2: Ulike typer sement med tilhørende kornstørrelse	29
Tabell 4-3: Relativ reaksjonshastighet med omtrentlige verdier.....	31
Tabell 4-4: Ulike pozzolaner og deres effekt på injeksjonsmassen	32
Tabell 4-5: Forventet forbruk av injeksjonsmasse avhengig av bergklasse	36
Tabell 7-1: Gjennomsnittlige bergmekaniske egenskaper for begge målestedene	69
Tabell 7-2: Beregnet spenninger, størrelse og retning, ved begge målesteder.....	70
Tabell 7-3: Logget data fra piezometere i borhull rundt Åsland.....	71
Tabell 7-4: Gjennomsnittlige målte bergmekaniske egenskaper	75
Tabell 7-5: Beregnet spenninger, størrelse og retning	76
Tabell 7-6: Resultater fra boring av fjellbrønner	77
Tabell 10-1: Nøkkeldata for utført studie	99
Tabell 10-2: Hypotesene som er undersøkt og hvilke som er bekreftet og ikke	110
Tabell 10-3: Beregning av vannsøyle og vanntrykk	118
Tabell 10-4: Beregning av vannsøyle og vanntrykk	118
Tabell 10-5: Nøkkeltall for utregning av p_n med $v/c = 0,9$ på Follobanen.....	119
Tabell 10-6: Nøkkeltall for utregning av p_n med $v/c = 0,5$ på Follobanen	119
Tabell 10-7: Nøkkeltall for utregning av p_n med $v/c = 0,8$ på Vestfoldbanen	120
Tabell 10-8: Nøkkeltall for utregning av p_n med $v/c = 0,5$ på Vestfoldbanen	120
Tabell 10-9: Verdier til utregning og beregnet teoretisk jekketrykk.....	121

1 INNLEDNING

1.1 BAKGRUNN

Vanninntrenging i underjordsanlegg er en av de største utfordringene ved driving og driftig av tunneler og bergrom. Konstruksjonene er normalt plassert under grunnvannsnivå, og vanninntrenging kan føre til redusert inndrift samt dårlige arbeidsforhold på tunnelstuff. Videre kan innlekkasje føre til senkning av grunnvannsspeilet i området over og rundt anlegget, som igjen kan medføre tørrlegging av brønner, setningsskader og drenering av innsjøer og tjern på overflaten. Siden stadig flere underjordsprosjekter gjennomføres i urbane områder med sensitive omgivelser, blir kravet til tetthet og opprettholdelse av grunnvannsstanden stadig strengere. Pålitelige metoder for å håndtere grunnvannsinntrengingen i konstruksjonen er derfor viktig.

Det finnes i dag ulike metoder for å tilfredsstille kravet til tetthet ved driving av underjordsanlegg. I norske underjordsprosjekter er forinjeksjon med sement og bruk av høyt injeksjonstrykk den vanligste metoden. Metoden er utviklet gjennom empiri samt positive og negative erfaringer. Forinjeksjon er både tid- og kostnadskrevende. Det er derfor nødvendig med ny kunnskap som kan redusere materialforbruket samt øke forståelsen av det som skjer i bergmassen under injeksjon.

Desember 2014 startet kompetanseprosjektet for næringslivet *True Improvement in Grouting High pressure Technology for tunneling* (TIGHT) opp med ledelse fra SINTEF Byggforsk. Prosjektet har en ramme på fire år og samarbeidspartnere fra alle delene av underjordsbransjen er involvert i prosjektet. Formålet til TIGHT er å øke kompetansen og forståelsen for berginjeksjon ved bruk av høyt trykk.

Ved oppstart av masteroppgaven var det tenkt at injeksjonen skulle studeres hovedsakelig med instrumentering av injeksjonshull med trykkloggere. Det ble i lang tid jobbet med å finne egnet prosjekt som kunne instrumenteres. Loggerne ble klargjort hos Norges geotekniske institutt (NGI) og anlegget til Follobanen ble besøkt en ukes tid i desember 2015. Grunnet tørr bergmasse ble datagrunnlaget fra dette feltarbeidet for lite til å gjøre en grundig analyse av injeksjonen. Det ble derfor besluttet å bruke data som tidligere var logget under injeksjon på samme prosjekt i tillegg til et annet prosjekt på Vestfoldbanen. Dataene ble brukt til analyser og statistiske undersøkelser.

1.2 FORMÅL MED OPPGAVEN

Hensikten med denne oppgaven er å undersøke om det finnes sammenhenger, og i tilfelle hvilke sammenhenger for når det kan forventes hydraulisk jekking av bergmassen i forbindelse med injeksjon som tetteteknikk i tunnel. Faktorer som er studert er injeksjonstrykk, type injeksjonsmasse, volum og tid brukt til injeksjon.

Studien er utført gjennom:

- En innledende litteraturstudie av vannets tilstedeværelse i berg og metoder for å hindre vanninntrenging i underjordsanlegg med hovedvekt på høytrykks forinjeksjon. Utførelse, utstyr og ulike injeksjonsmasser er beskrevet.
- En litteraturstudie av dagens rådende teorier om hydraulisk jekking av bergmassen under injeksjon fra ulike fagmiljøer
- Måling av in situ injeksjonstrykk i borhull under injeksjon og bruke resultatene til tolkning av injeksjonens påvirkning på bergmassen
- Studere trykk/tid-grafer fra to fullførte tunnelprosjekter der systematisk forinjeksjon er utført med høyt trykk og tolke hendelser med tilsynelatende jekking av bergmassen
- Analysere og vurdere om det finnes noen sammenhenger mellom loggede faktorer under injeksjon og om disse eventuelt kan brukes til å forutsi når jekking vil initieres

1.3 OMFANG OG AVGRENSNING

Masteroppgaven er gjennomført over 2 semestre og omfatter 60 studiepoeng. Den er basert hovedsakelig på teori og noe feltarbeid ved instrumentering av to borhull på en tunnelstubb.

Oppgaven er delt inn i følgende deler:

- A. Litteraturstudie av vannets tilstedeværelse og bevegelse i bergmassen, Kapittel 2.
- B. Litteraturstudie av de vanligste tettemetodene som benyttes for å hindre vanninntrenging i tunnel og bergrom i dag med hovedvekt på forinjeksjon med sement, Kapittel 3 og Kapittel 4.
- C. Presentasjon av metoder for å estimere og måle spenningene i bergmassen, Kapittel 5.
- D. Beskrivelse av rådende teorier om hydraulisk jekking av bergmassen basert på teorier fra ulike fagmiljøer, Kapittel 6.
- E. Beskrivelse av utført feltarbeid og presentasjon av innsamlet data fra dette, Kapittel 8.

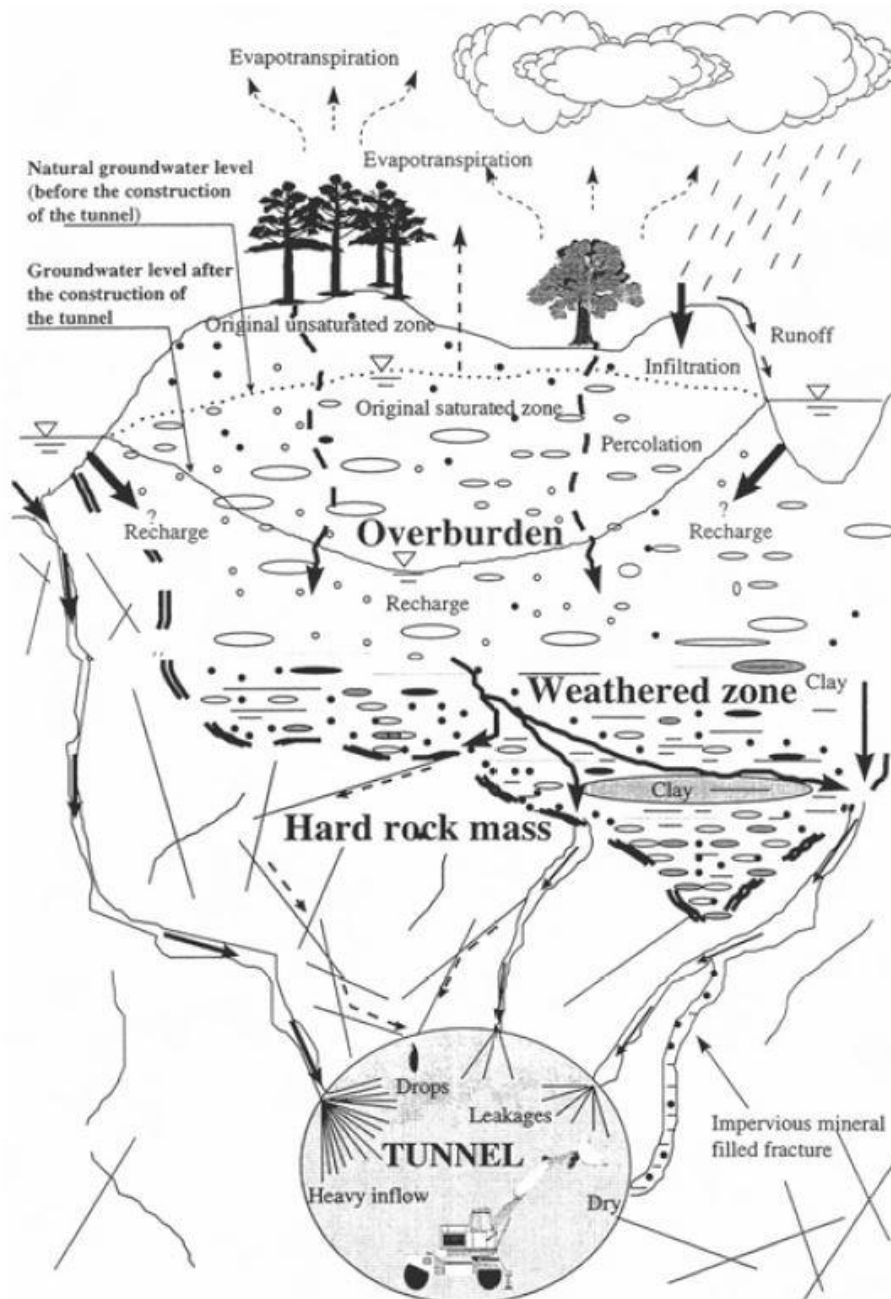
- F. Presentasjon av studerte prosjekter og metoder som er benyttet for analyser av data logget under injeksjon på de to prosjektene, Kapittel 7 og Kapittel 9.
- G. Vurdering av sammenhengene mellom faktorene logget under injeksjon og tilfeller der tilsynelatende jekking av bergmassen er tolket basert på trykk/tid-grafer, Kapittel 10.

Dataene som er benyttet til analysene i denne masteroppgaven er hentet fra to jernbaneprosjekter, en adkomsttunnel til Follobanen og en del av Vestfoldbanen ved Holmestrand. Systematisk forinjeksjon med bruk av høyt trykk er benyttet i begge prosjekter, men med ulik type sement. På Follobanen er mikroement benyttet, mens på Vestfoldbanen er det brukt industrisement i de studerte injeksjonsskjermene.

For å begrense antall variabler i studien er det valgt å kun se på høytrykksinjeksjon som er utført med enten mikro- eller industrisement uten andre tilsetningsstoffer. Videre er det valgt å kun inkludere injeksjonsmasser med to ulike vann/ement-forhold (v/c-forhold) fra hvert av tunnelprosjektene. Injeksjonsskjermer der det var benyttet sement med flere v/c-forhold, ble kun v/c-forholdene som er valgt ut for studien vurdert.

2 VANN I BERG

Figur 2-1 viser hvordan grunnvannet strømmer i en oppsprukket bergmasse og kan føre til lekkasjer i tunnel og bergrom. Vannets bevegelse gjennom bergmassen er avhengig av geologiske og hydrogeologiske parametere samt sammensetningen av overdekningen (Holmøy, 2008).



Figur 2-1: Prinsippisk skisse av vannets bevegelse gjennom en oppsprukket bergmasse (Holmøy, 2008).

Grunnvann opptrer ikke bare som fritt vann i sprekker, men kan være bundet i bergmassen på ulike måter. Avhengig av forekomstmåte vil vannet ha forskjellig betydning for drivingen av

underjordsanlegg. Nilsen og Broch (2012) presenterer en liste over hvordan vann kan forekomme i en bergmasse, og hvilken betydning dette har for driving av underjordsanlegg. Listen er gjengitt i Tabell 2-1.

Tabell 2-1: Forekomstmåter av vann i berg og dets betydning for driving av underjordsanlegg (Nilsen og Broch, 2012).

Forekomstmåte	Betydning for driving av anlegg
Kjemisk bundet i mineraler	Ingen betydning
Hygroskopisk eller absorbert i mineraler	Fuktavskalling eller adsorpsjonsvelling i svakt permeable, meget finkornig sedimentære bergarter (eks. leirskifer)
Mineraloverflatebundet	Kan ha betydning ved svakt permeable, meget finkornede sedimenter
Kapillært bundet	Kan oppstå store vannmengder ved noen spesielle tilfeller (eks. unge sandsteiner)
Fritt i sprekker og åpninger	Stor betydning

Som vist i tabellen er det sprekker og diskontinuiteter som har størst betydning for hvordan grunnvannet beveger seg i en bergmasse (Fetter, 2001). Det er dette fritt bevegelige vannet som kan ha betydning for drift og bruk av underjordsanlegg (Nilsen og Broch, 2012).

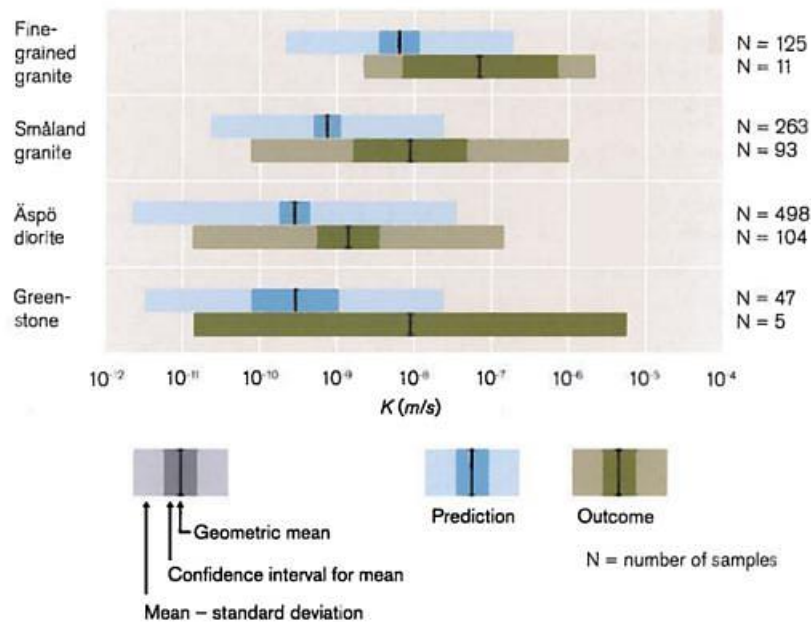
2.1 HYDRAULISK KONDUKTIVITET

Strømningsmønsteret til en væske gjennom et porøst medium er forklart med parameteren hydraulisk konduktivitet (k). Den hydrauliske konduktiviteten skiller seg fra permeabiliteten til et medium ved at den i tillegg til mediets porøsitet, tar hensyn til væskens strømningssegenskaper (Bear, 1972).

Det er en vanlig antakelse at hydraulisk konduktivitet avhenger av bergarten som betraktes. Årsaken til antakelsen er at de mekaniske egenskapene til bergarten avhenger av mineralene bergarten består av. Mørke, basiske bergarter har normalt høyere tensilstyrke og lavere E-modul enn lyse, sure bergarter. De lyse, sprø bergartene sprekker derfor lettere opp, spesielt i kontakt med basiske bergarter, ettersom spenningene vil konsentreres i de sprø, sure delene av bergmassen. I tillegg dekomponeres mørke bergarter lettere enn lyse. Det gjør at sprekker i mørke, basiske bergarter ofte fylles av knust og forvitret materiale som senker konduktiviteten til bergmassen (Gustafson, 2012).

Figur 2-2 viser sammenlikning mellom beregnet og faktisk hydraulisk konduktivitet for ulike bergarter i en adkomsttunnel til Äspö Hard Rock Laboratory. De målte dataene er delt på lengden til testseksjonen (14 meter) for å få en gjennomsnittlig hydraulisk konduktivitet. Som

vist i figuren stemmer teorien om at lyse, sure bergarter har høyere hydraulisk konduktivitet. Av de målte bergmassene er det finkornet granitt som har høyest og grønnstein som har lavest hydraulisk konduktivitet. Granitt er den bergarten med størst innhold av SiO_2 , mens grønnstein er den mørkeste bergarten med lavest innhold av SiO_2 , og er dermed den mest basiske bergarten i studien (Gustafson, 2012).



Figur 2-2: Hydraulisk konduktivitet til ulike bergarter i en adkomsttunnel til Äspö Hard Rock Laboratory (Gustafson, 2012).

2.1.1 Absolutt permeabilitet

Absolutt permeabilitet (K) er en materialkonstant. Det betyr at den kun avhenger av mediets egenskaper (Hubbert, 1940). For bergmasser vil dette være egenskaper som oppsprekingsgrad, effektiv porøsitet, porestørrelse, poreform, sprekkeåpning, leirbelegg på sprekker, tekstur, kornfordeling og så videre (Nilsen og Broch, 2012).

Den effektive porøsiteten er definert som volumet av porer som er væskefylt i prosentandel av totalt volum som kan være væskefylt. I norske bergarter er den effektive porøsiteten normalt svært lav, 1 % eller mindre. I yngre sedimentære bergarter (sandstein fra Perm og Jura) kan porøsiteten være vesentlig større, opp mot 30 % (Nilsen og Thidemann, 1993).

2.1.2 Sprekkekonduktivitet

Konduktiviteten mellom enkeltsprekker har svært stor betydning for vannets bevegelse gjennom en bergmasse. En forenklet matematisk fremstilling av strømning gjennom parallelle glatte sprekker viser at ved å doble åpningen til en sprekke, vil den hydrauliske konduktiviteten øke med en faktor på åtte. Dette forholdet kalles «the local cubic law» (Gustafson, 2012).

Formler for å beregne hydraulisk- og sprekkekonduktivitet er basert på laminær strømning. Det gjør at beregningene kun gir et forenklet bilde av virkeligheten. Forskning utført av Qian et al. (2005) viser at vannstrømning gjennom en bergmasse ikke kan forklares matematisk ettersom vannstrømning gjennom en bergmasse sjelden er laminær og homogen. Strømningen er i stor grad avhengig av sprekkesystemet i bergmassen og vil ha en høyere hastighet enn ved strømning gjennom løsmasser, fordi strømning i løsmasser hovedsakelig bestemmes av poresystemet. Resultatene i studien var heller ikke i overenstemmelse med «the local cubic law». På tross av disse begrensningene, er matematiske beregninger fortsatt et nyttig verktøy for å estimere vanngjennomstrømning i sprekkesystemer (Nilsen og Thidemann, 1993).

2.2 GEOLOGISKE PARAMETERER

Som tidligere nevnt er vanngjennomstrømning i bergmasser hovedsakelig avhengig av sprekker og diskontinuiteter i bergmassen og deres permeabilitet. Holmøy (2008) presenterte fem geologiske faktorer som påvirker den hydrauliske konduktiviteten i en bergmasse:

- Sprekkekarakter (orientering, utstrekning, ruhet og hyppighet)
- Spenningssituasjon
- Forkastninger og tilhørende sprekker
- Eruptive ganger
- Topografi og overliggende masser

I de etterfølgende avsnittene vil disse fem parameterne bli diskutert i mer detalj, inkludert hvordan de påvirker vanninntrenging i tunneler og bergrom.

2.2.1 Sprekkekarakter

I harde, kompetente bergarter, som granitt og kvartsitt, vil sprekker ofte ha større åpning over lengre avstander enn i mykere, mindre kompetente bergarter som leirskifer. Sprekker i mindre kompetente bergarter vil dessuten lettere kunne lukkes eller fylles med erosjonsmateriale, noe som vil senke de vannførende egenskapene. Vannføringen er derfor ofte større i harde bergarter. Sprekkefylling av leire og harde mineraler vil i mange tilfeller kunne tette sprekken helt og stoppe vanngjennomtrengningen. Annen sprekkefylling, for eksempel kalsitt, vil kunne løses opp av vannet over tid og gjøre en i utgangspunktet tett sprekke vannførende. Den tektoniske historien til bergmassen ha også stor innvirkning og den hydrauliske konduktiviteten kan variere mye selv innenfor samme bergart (Løset, 2006).

Sprekkens lengde, orientering og antall sprekkesett i en bergmasse er andre faktorer som er viktige for de vannførende egenskapene til bergmassen. Generelt vil flere sprekkesett gi høyere vannføring. Dette forutsetter at settene ikke er parallelle, men har ulik orientering og dermed danner en sammenhengende kanalstruktur (Løset, 2006). Videre har erfaring og analytiske modeller vist at steile sprekker leder større mengder vann enn mer horisontale sprekker (Cesano, Olofsson og Bagtzoglou, 2000; Gudmundsson et al., 2001).

Overflateforholdene på sprekkene har også stor betydning for hvordan vannføringen foregår langs sprekkene. Dersom det er to flater med høy ruhet som står mot hverandre kan det dannes mange små kanaler mellom asperitene på flatene hvor vann kan strømme fritt. Dersom trykkfastheten til de to platene som står mot hverandre er stor nok, kan små skjærbevegelser langs sprekkplanet føre til en utvidelse av sprekken, og dermed enda høyere vannføring (Olsson og Barton, 2001). Dette er svært komplekse mekanismer og ifølge Grasselli, Wirth og Zimmerman (2003) er ikke forholdet mellom geometrien til åpninger, kontaktflater, påført spenning og hydraulisk konduktivitet fullstendig forstått enda.

2.2.2 Spenningssituasjon

En bergmasse med høy oppsprekingsgrad vil permeabiliteten være avhengig av spenningstilstanden (Davik et al., 2002). Kompressive spenninger normalt på sprekkflater vil kunne føre til lukking av sprekken og en reduksjon i den hydrauliske konduktiviteten. Dersom største hovedspenning derimot er parallell med sprekkåpningen, vil dette kunne føre til en utvidelse av sprekken og høyere hydraulisk konduktivitet (Holmøy, 2008).

I en bergmasse er det hovedsakelig tre ulike typer spenninger som kan opptre (Amadei og Stephansson, 1997):

- Gravitasjonsspenninger, forårsaket av vekten av overdekning
- Tektoniske spenninger, kan i jordskorpen opptre som aktive spenninger eller restspenninger. Aktive tektoniske spenninger kan utløses gjennom jordskjelv eller langsomme bevegelser som ved hevingen av den skandinaviske halvøy. Tektoniske restspenninger ligner residualspenninger, men tektonisk aktivitet er involvert i dannelsen av spenningene, som folding, forkastning, oppsprekking og boudinage.
- Residualspenninger, spenninger som er i materialet fra dets tidligere historie. Forårsaket av for eksempel volumforandring på grunn av temperatur, hurtig avlastning, metamorfose eller endring i poretrykket.

Gravitasjonsspenningene øker med økende dyp. Vertikalspenning er gitt ved formelen:

$$\sigma_v = \rho \cdot g \cdot h \quad (2-1)$$

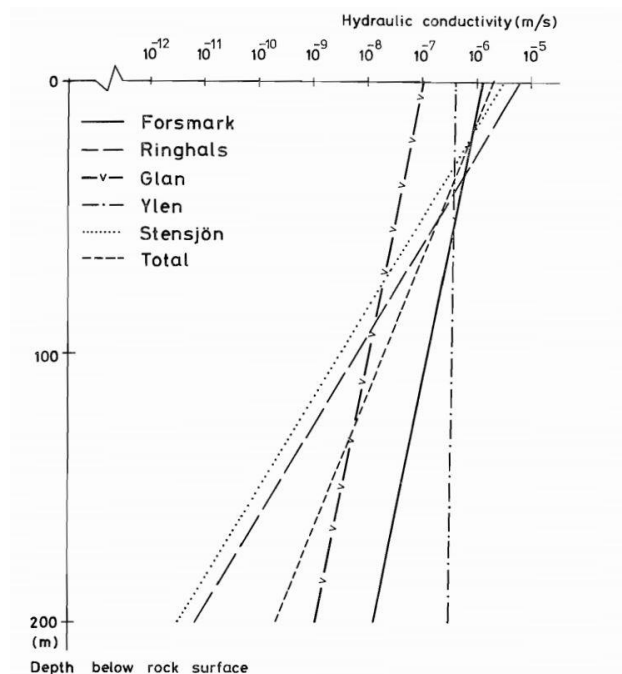
Der: σ_v = vertikal spenning (MPa)

ρ = tetthet av overliggende masse (kg/m^3)

g = gravitasjonsakselerasjon (m/s^2)

h = dybden under terrengoverflaten (m)

Som resultat av de økte vertikalspenningene vil sprekker lukke seg i dypet og ifølge Carlsson og Olsson (1977) redusere den hydrauliske konduktiviteten. Carlsson og Olsson (1977) presenterer en figur som viser hvordan permeabiliteten endres i dypet for svenske prekambriske bergarter, Figur 2-3.



Figur 2-3: Endring i permeabilitet som funksjon av overdekningen, målt i ulike svenske prekambriske bergarter (Carlsson og Olsson, 1977).

Mer om spenninger i bergmassen og direkte målemetoder for å finne spenningene er presentert i Kapittel 5.

2.2.3 Forkastninger og nærliggende sprekker

Store innlekkasjer av vann i tunneler og bergrom skjer ofte i forbindelse med forkastningssoner. I noen tilfeller kan forkastningen være fylt med knust bergartsmateriale som helt eller delvis tetter forkastningen. I andre tilfeller kan forkastningen være åpen og føre store mengder vann

(Løset, 2006). Barton, Zoback og Moos (1995) fant at vannføringen er størst langs forkastninger som er aktive med den nåværende in situ spenningssituasjonen.

Det er gjort flere studier på vanninntrenging i forbindelse med forkastninger. Et av disse er utført av Selmer-Olsen (1981) som studerte 11 dyptliggende vannkrafttunneler (> 100 m) i Sør-Norge. Selmer-Olsen fokuserte sitt arbeid på sprekker med stor vannføring og konkluderte med følgende punkter:

- 85 % av de studerte sprekke hadde et fall på mer enn 70°
- Vinkelen mellom sprekker med høy vannføring og hovedforkastning var $45^\circ \pm 15^\circ$
- Normalt var det kun ett sprekkesett som ga stor vannlekkasje
- Sammenhengende sprekker og forkastninger/knusningssoner ga store vannlekkasjer
- Målt vanntrykk korresponderte med overliggende grunnvannsnivå i et åpent system
- De høyeste vannlekkasjene ble målt i sterke og stive bergarter
- Høyest vannlekkasje var i kanaler i sprekker med kalkspatfylling

Disse punktene er senere blitt bekreftet gjennom mange tunnelprosjekter og er i dag «allmennkunnskap» (Holmøy, 2008).

2.2.4 Vertikale eruptivganger

Eruptivganger er mest aktuelt i Oslo-området i Norge. En eruptivgang dannes ved at magma trenger opp gjennom bergmassen i sprekker og størkner som gangbergarter. Når magmamassen størkner kan det skje en reduksjon i volumet. Det vil da dannes åpne sprekker mellom gangbergarten og sidebergarten. I tillegg er ofte eruptivganger sterkt oppsprukket, noe som øker vannføringen. De eruptivgangene er typisk orientert normalt på minste hovedspenning i Norge (Løset, 2006).

2.2.5 Overliggende masser og topografi

Cesano, Olofsson og Bagtzoglou (2000) utførte et statistisk studie i Bolmen tunnelen i Sør-Sverige hvor de så på parametere som påvirket vanninntrenging i tunneler. I studien ble det vist hvordan store og små innlekkasjer i underjordsanlegg er avhengige av ulike faktorer. Små vannlekkasjer er normalt knyttet til vann lagret i sprekker og åpninger i bergmassen, mens større lekkasjer avhenger av vann fra overliggende masser og sprekke i bergmassen fungerer kun som drenerende kanaler.

Topografisk lave områder, som dalbunner og andre depresjoner, har høyere oppsprekking enn omkringliggende topper. Tunneler som krysser under topografisk lave områder vil derfor ha større sannsynlighet for vanninntrenging. Sammensetningen av overliggende løsmasser,

kornstørrelse og tykkelse vil også kunne påvirke innlekkasjen. Finkornede masser med leir vil ha lavere permeabilitet og gir ofte kun mindre vanninntrenging. Grovkornede masser, som sand og grus, har høyere permeabilitet og kan dermed gi større vanninntrenging (Cesano, Olofsson og Bagtzoglou, 2000).

2.3 ESTIMERING AV VANNINNTRENGING

Vanninntrenging i tunneler og bergrom har i mange tilfeller ført til store forsinkelser og kostnadsoverskridelser under driving. Det er derfor vanlig å utføre tiltak for å til enhver tid ha kontroll på hvilke forhold som kan forventes i videre drift. I Norge er det vanlig å basere slike tiltak på erfaring fra liknende områder med samme bergart, oppsprekkingsgrad, forkastninger og svakhetssoner. I tillegg brukes erfaringer fra omkringliggende anlegg (Holmøy, 2008).

Under forundersøkelsene er det viktig å kartlegge det uforstyrrede grunnvannsnivået for å dokumentere om det skjer noen endring som følge av tunneldriften. Dette gjøres ved å installere brønner som måler grunnvannsstanden i området over og rundt der tunnelen eller bergrommet skal drives. Disse brønnene bør være installert i tilstrekkelig god tid slik at årstidsvariasjon og svingninger på grunn av nedbør og klima blir registrert. I tillegg er det ønskelig å kartlegge hvor mye innlekkasje som kan forventes. Ved større prosjekter gjøres dette med kjerneboringer som brukes til å kartlegge bergmassekvaliteten. I kjerneborhullene bør det også utføres vanntapsmålinger. Videre kartlegges oppsprekkingsgraden og sprekkefyllinger (Davik et al., 2002).

Under driving kartlegges vannforholdene fortløpende. Dette gjøres med vanntapsmåling på eller bak tunnelstuff. Denne kartleggingen er viktig for å se om antakelsene fra forundersøkelsene stemmer og eventuelt tilpasse videre driving etter de faktiske forholdene (Davik et al., 2002). Brønnene som installeres i forundersøkelsene må fortsatt følges opp under driving for å sikre at grunnvannsnivået holdes innenfor akseptnivået som er bestemt (Grepstad, 2002).

Etter utført driving og tettingsarbeid, kontrolleres det om arbeidet er tilfredsstillende i forhold til de kravene som ble bestemt før drivingen begynte. Dette gjøres med Lugeon-test eller innlekkasje i borhull eller seksjoner av tunnelen. I områder som er svært ømfintlige for setning kan det være krav om poretrykks- og setningsmålinger (Davik et al., 2002).

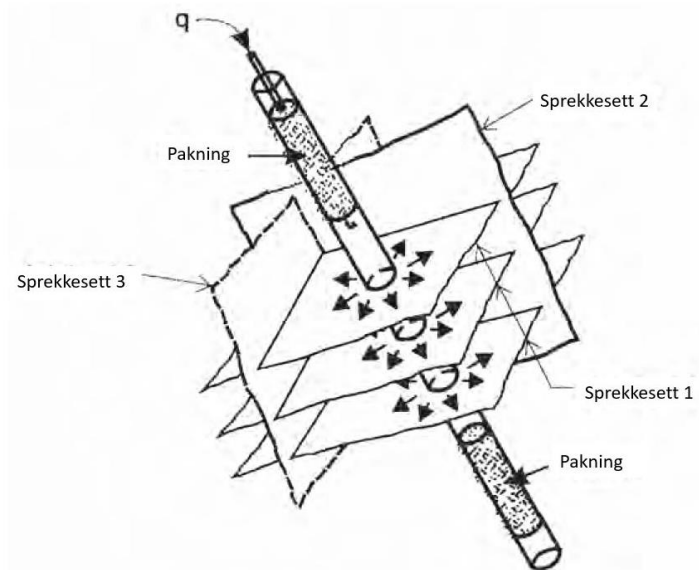
2.3.1 Lugeon-test

Lugeon-test er den mest benyttede metoden i Norge for å måle vanntap ved driving av tunnel og bergrom. Lugeon-verdien er definert som den vannmengden, målt i liter, som kan presses inn i et borhull per minutt per løpemeter med et overtrykk på 10 bar (Hognestad et al., 2010). Enheten for Lugeon er vanntap i liter per minutt per meter borhull (l/min/m). Metoden ble presentert av professor Maurice Lugeon i 1933, og verdien for permeabilitet i en bergmasse har derfor blitt oppkalt etter han (Holmøy, 2008).

Prinsippet for Lugeon-testing er å isolere deler av hullet med pakker. Avhengig av metode behøves en eller to pakkere. Vann blir pumpet inn i den isolerte delen gjennom en slange i den ytterste pakkere. Før testen begynner bestemmes det et maksimalt testtrykk (P_{\max}) for å sikre at minste in situ hovedspenning i bergmassen ikke overskrides i løpet av testen og hindre at hydraulisk jekking oppstår. Testen foregår i fem steg med opp- og nedbygging av trykk mellom null og maksimal trykk (Tabell 2-2). For hvert steg holdes trykket konstant i 10 minutter mens det pumpes inn vann. Vanntrykk og strømningshastighet måles hvert minutt (Geotechdata, 2015). Figur 2-4 viser prinsippet for Lugeon-testing med to pakkere og god kommunikasjon mellom sprekkesettene.

Tabell 2-2: Fremgangsmåte ved utførelse av Lugeontest i fem steg (Geotechdata, 2015).

Steg	Trykk
1	$0,5 \cdot P_{\max}$
2	$0,75 \cdot P_{\max}$
3	P_{\max}
4	$0,75 \cdot P_{\max}$
5	$0,5 \cdot P_{\max}$



Figur 2-4: Prinsippskisse for Lugeon-test med to pakkere (Hoek og Bray, 1981).

Ved å finne gjennomsnittlig vanntrykk og strømningshastighet i hvert av de fem stegene, kan den gjennomsnittlige konduktiviteten for bergmassen bestemmes. Ved homogene og isotrope forhold er 1 Lugeon = $1,3 \cdot 10^{-3}$ m/s (Geotechdata, 2015).

Lugeon-verdien til en bergmasse er sterkt påvirket av oppsprekking og diskontinuiteter. Verdien representere derfor både konduktiviteten og oppsprekkingen til bergmassen. Typiske Lugeon-verdier og tilhørende bergmasse kvalitet er foreslått av Geotechdata (2015) gitt i Tabell 2-3.

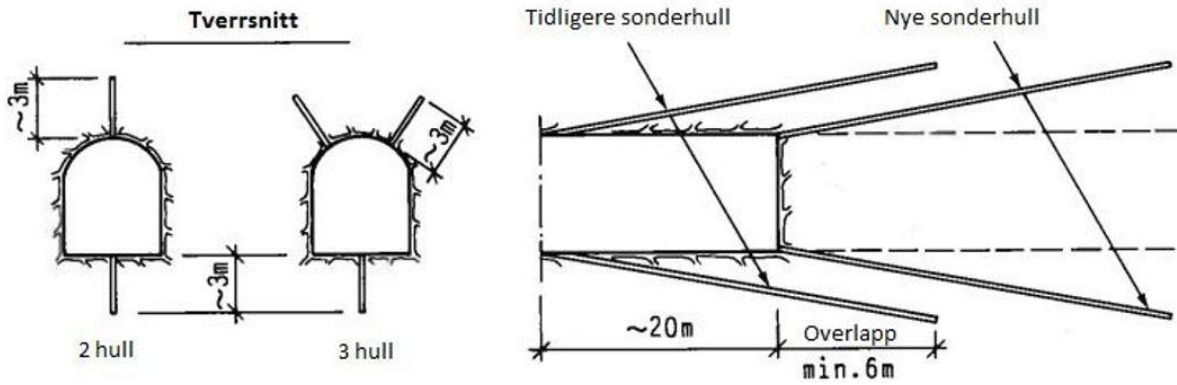
Tabell 2-3: Typiske Lugeon-verdier med omtrentlig konduktivitet og oppsprekkingsgrad (Geotechdata, 2015).

Lugeon-verdi	Konduktivitet klassifisering	Oppsprekkingsgrad
< 1	Veldig lav	Veldig tett
1 – 5	Lav	Tett
5 – 15	Moderat	Få delvis åpne sprekker
15 – 50	Medium	Noen åpne sprekker
50 – 100	Høy	Mange åpne sprekker
> 100	Veldig høy	Åpne, sammenhengende sprekker eller hulrom

En svakhet med Lugeon-testen er at den forutsetter en isotrop bergmasse, noe som sjelden er tilfellet. Målelengden er normalt mellom 5 og 10 meter. Dersom den målte lengden består av et lite, svært vannførende område og resten av målelengden er relativt tett vil vanntapet i den lille vannførende sonen fordeles på hele den målte lengden. Dette vil gi inntrykk av at bergmassen er moderat eller lite vannførende. I norske prosjekter er det derfor vanlig å bruke utregningslengde på 3 til 5 meter, selv om den målte lengden er større. Det er usikkert hvilken beregningsmetode som gir mest korrekt Lugeon-verdi, men i moderat til lite oppsprukket grunnfjellsgneis gir beregningslengde på 3-5 meter de mest presise verdiene (Hognestad et al., 2010).

2.3.2 Måling av vanninnstrømning fra sonderhull

Sonderhull bores for å undersøke bergmassekvalitet og vannforhold foran tunnelstuff i driveretningen. Informasjon fra sonderboring gjør det mulig å planlegge videre driving og tetningstiltak. Hullene bores foran tunnelstuff med jevne mellomrom, slik at det blir overlapp mellom dem (Figur 2-5). En enkel, rask og billig metode å undersøke vannforholdene foran tunnelstuff er med vanntapsmåling fra sonderhullene. I praksis gjøres dette ved å føre vannet som kommer ut av sonderhullet ned i en bøtte og bruke en stoppeklokke til å ta tiden det tar å fylle bøtten (10 liter). Ved svært store vanninntrengninger kan det være vanskelig å vite nøyaktig hvor fort bøtten blir fylt, men metoden vil uansett kunne gi en indikasjon på hvilke forhold som kan forventes (Hognestad et al., 2010).



Figur 2-5: Sonderboring (Nilsen og Thidemann, 1993).

Svakhetene til metoden er mange av de samme som ved Lugeon-testing, altså at resultatet i stor grad avhenger av hvilke kanaler og slepper borhullet krysser (Nilsen og Thidemann, 1993).

3 TETTEMETODER

Det finnes i dag flere ulike metoder og materialer for å kontrollere vanninntrengingen i tunneler og bergrom. Noen av disse er utviklet for å sikre en impermeabel sone rundt konstruksjonen, mens andre sikrer at konstruksjonen er tett langs periferien.

Metodene som sikrer en tett konstruksjon langs periferien blir hovedsakelig installert for å sikre drift og vedlikehold av installasjoner i underjordsanlegget. De vanligste metodene for dette er polyetylen-skummatter (PE-skummatter), full betongutstøpning med membran og sprøytet membran. Injeksjon i form av kjemisk-, for- og etterinjeksjon er metoder for å sikre en impermeabel sone rundt tunnel eller bergrom.

I dette kapitlet er metodene for å oppnå en tett konstruksjon beskrevet. Forinjeksjon med sement er kun beskrevet kort i dette kapitlet. En grundigere beskrivelse av metoden er gitt i Kapittel 4.

3.1 PE-SKUM

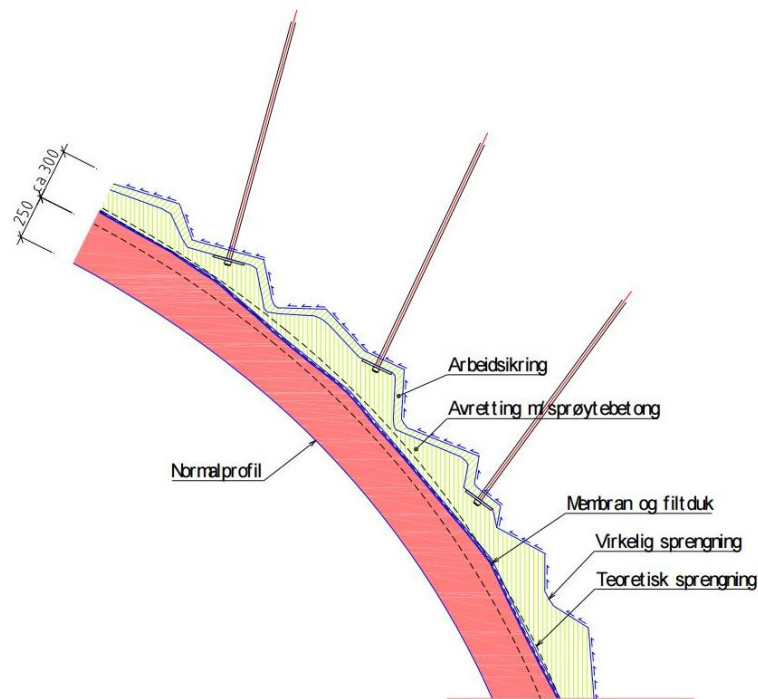
PE-skummatter er en metode som ble benyttet til vannsikring av norske tunneler i perioden fra 1987 til 1998. I løpet av disse årene ble det installert omlag 200 000 m² PE-skummatter per år (SINTEF, u.å.). I senere tid har det vist seg at disse mattene er svært brannfarlige og miljøskadelige. Metoden er derfor ikke lenger i bruk i like stor grad. Ved bruk av PE-skummatter i dag må spesifikke retningslinjer følges (SVV, 2004).

3.2 FULL UTSTØPING MED MEMBRAN

For høytrafikkerte vegtunneler (ÅDT > 4000) foreslås det nå en ny vann- og frostsikring med bruk av uarmert betongstøp og membran. Dette er en løsning som allerede har vært i bruk i Sveits i over 30 år (Knudsmoen, 2015).

Metoden består av en bergsikring innerst med bolter og fiberarmert sprøytebetong. Utenpå dette påføres det et avrettingslag med sprøytebetong uten fiber. Avrettingen skal danne et jevnt profil der montering av tettende membran og filterduk kan utføres uten å skade membranen eller duken. Innerst mot tunnelen støpes det et uarmert betongstøp som holder membranen på plass samtidig som den utgjør en del av den permanente bergsikringen (Figur 3-1). For økt brannbestandighet kan betongen tilsettes polypropylen-fiber (PP-fiber) (Norconsult AS, 2012).

Uarmert betongstøp er en gunstig løsning både av hensyn til kostnad og tid. Løsningen er billigere og raskere, i tillegg til at det er mindre fare for at membranen blir skadet under installasjon enn med armert betongstøp (Norconsult AS, 2012).



Figur 3-1: Oppbygging av lagene ved bruk av full utstøpning med membran som vannsikring i tunnel (Norconsult AS, 2012).

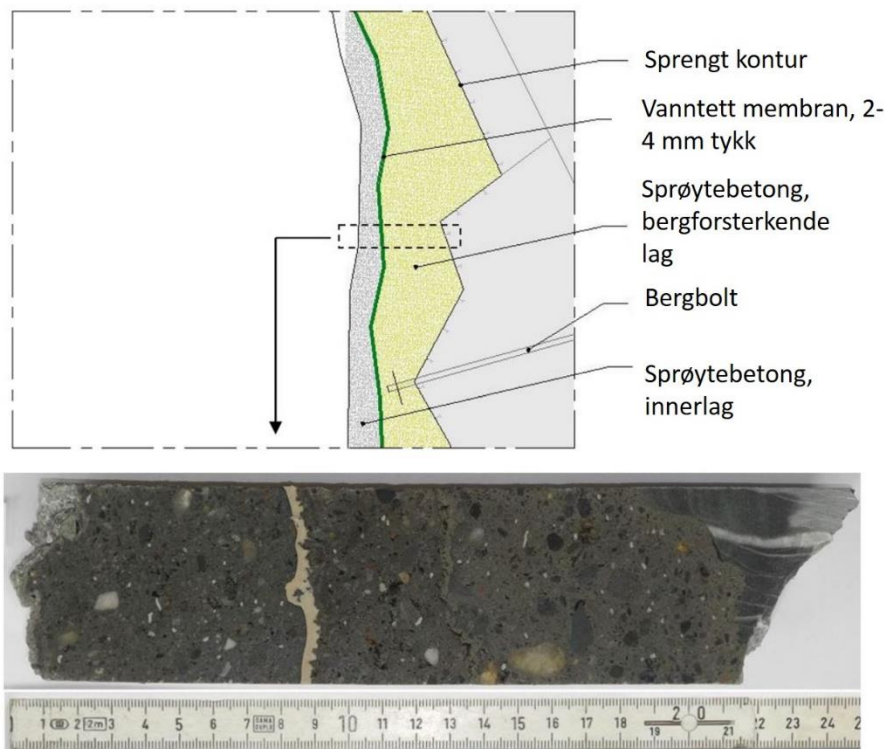
Levetiden for en slik konstruksjon vil være i overkant av 80 år, men er svært avhengig av betongkvaliteten som benyttes i betongstøpet. God betong kvalitet vil gi lengre levetid, mens dårlig betongkvalitet kan føre til at utbedringer er nødvendig tidligere. Vedlikeholdskostnaden vil være lav ettersom inspeksjon bak vann- og frostsikringen ikke er aktuelt (Norconsult AS, 2012).

3.3 SPRØYTET MEMBRAN

Polymerbasert membran i kombinasjon med sprøytebetong er en metode som har blitt utviklet og etablert i løpet av det siste 10-året. Metoden er hovedsakelig utviklet og benyttet i Sentral-Europa, men metoden er også testet i norske tunneler med suksess (Holter, 2014).

Den tekniske løsningen er en sprøytebar membran som innkapsles i sprøytebetong i en sandwichstruktur (Figur 3-2). I praksis blir det først sprøytet et lag med sprøytebetong (enten fiberarmert eller ikke avhengig av prosjekt) som jevner ut sprengt kontur. Deretter sprøytes det på minimum 2 millimeter med membran som utgjør den vanntettende delen. Membranen dekkes til slutt med

et nytt lag sprøytebetong (enten fiberarmert eller ikke). Til sammen utgjør disse tre lagene både en tettende og en stabiliserende struktur i tunnelen (Holter, Bridge og Tappy, 2010).



Figur 3-2: Øverst - Prinsippskisse for sandwich-strukturen med sprøytet membran. Nederst - Seksjon med sprøytet betong og membran mellom betonglagene (Holter, 2014)

Membranen bindes til sprøytebetongen på begge sider med både mekanisk og kjemisk binding. Grunnet den gode bindingen i overgangen mellom sprøytebetong og membran er konstruksjonen impermeabel og det vil ikke kunne migrere vann langs membranen. Tabell 3-1 gir noen viktige mekaniske parametere for metoden (Holter, Bridge og Tappy, 2010).

Tabell 3-1: Viktige mekaniske parametere for sprøytetmembranmetoden (Holter, 2014).

Parameter	Minimums krav	Typiske verdier
Tykkelse membran (mm)	2	3 – 5
Tensilstyrke mellom membran og sprøytebetong (MPa)	0,5	0,5 – 1,2
Skjærstyrke mellom membran og sprøytebetong (MPa)	0,5	1 – 4
Strekk av membran ved oppsprekking (%)	100	

3.4 INJEKSJON

Berginjeksjon er den mest benyttede metoden for å kontrollere innlekkasje av vann i norske tunneler i dag. Metoden går ut på å injisere masse gjennom borhull for å tette sprekker og

hulrom i bergmassen, og på den måten skape en impermeabel sone rundt tunnelen (Grøv og Woldmo, 2012).

Injeksjon deles normalt i to typer, avhengig av massene som injiseres, sementbasert injeksjon og ikke-sementbasert injeksjon. I Norge er sementbasert injeksjon det vanligste. Ikke-sementbasert injeksjon er mest brukt i forbindelse med etterinjeksjon og andre spesielle tilfeller (Hognestad et al., 2010).

3.4.1 Kjemisk injeksjon

Kjemisk injeksjonsmiddel kom på markedet først i midten av 1950-årene, etter at standard partikulære injeksjonsmidler hadde vært i bruk siden begynnelsen av 1900-tallet. Siden 1950 har det kommet flere ulike varianter av kjemiske injeksjonsmidler. De fleste har blitt fjernet relativt raskt grunnet ulike svakheter som dårlig langtidsbestandighet, skadelige egenskaper for brukere og/eller miljø eller for høy pris (Lombardi, 1996; Karol, 2003).

Hovedfordelen med kjemiske injeksjonsmidler sammenliknet med tradisjonell sementinjeksjon er evnen til å trenge inn i bergmassen og tette selv svært små sprekker. Injeksjonsmassen oppfører seg som en Newtonsk væske noe som betyr at inntrengningen og utbredelsen i bergmassen kun avhenger av viskositeten til massen og injeksjonstrykket (Warner, 2004).

Vanligste anvendelsesområde for kjemiske injeksjonsmidler er ifølge Karol (2003) og Warner (2004) ved:

- Svært strenge tetthetskrav
- Store lekkasjer og umiddelbar tetting er nødvendig
- Behov for å begrense spredning av injeksjonsmateriale grunnet miljø og/eller økonomi
- Kritisk tidsaspekt ved injeksjonen
- Behov for forsterkning av bergmassen i tillegg til vanntetting
- Etterinjeksjon, der kjemiske injeksjonsmidler har vist seg mest effektive

Det finnes i dag flere typer kjemiske injeksjonsmidler med forskjellige egenskaper. Blant disse er injeksjonsmidlene basert på polyuretan de mest brukte. Bruksområdet for polyuretan er allsidig, og injeksjonsmassen kan inneha mange ulike egenskaper både i flytende og herdet tilstand. Noen midler leveres som en-komponentløsning som kun blandes med vann. Andre leveres med to eller flere komponenter som må blandes før injisering. Ved fler-komponentløsning fullføres reaksjonen mellom stoffene i kontakt med vann inne i bergmassen. De forskjellige løsningene vil reagere og danne geler, skum eller faste stoffer. Injeksjonsmidlene som reagerer med vann inne i bergmassen kan deles i to hovedgrupper,

hydrofobiske og hydrofile injeksjonsmidler. De hydrofobiske reagerer med en mindre mengde vann inne i bergmassen og danner et endelig sluttprodukt. Etter den initiale reaksjonen vil ikke injeksjonsmassen ta til seg noe mer vann. Hydrofile injeksjonsmasser reagerer også i kontakt med vann, men i motsetning til de hydrofobiske injeksjonsmassene kan disse ta opp vann også etter den initiale reaksjonen. Denne injeksjonsmassen vil fortsette å øke i volum og spres inn i vannfylte sprekker (Warner, 2004).

Prisen for kjemiske injeksjonsmidler per volumenhet er 2-10 ganger dyrere enn sement (Karlsruud, 2001; Davik et al., 2002). Det kan likevel være lønnsomt å benytte kjemiske injeksjonsmidler. Dersom det brukes på rett måte, vil totalt forbrukt volum normalt være mye lavere ved bruk av kjemiske injeksjonsmidler sammenliknet med sementbaserte (Davik et al., 2002).

3.4.2 Sementbasert injeksjon

Sementinjeksjonen kan utføres både foran, forinjeksjon, eller bak tunnelstuff, etterinjeksjon. I det følgende vil etterinjeksjon bli beskrevet i korte trekk. Forinjeksjon med sement blir presentert i Kapittel 4.

Etterinjeksjon

Etterinjeksjon brukes normalt for å tette lokale lekkasjer bak tunnelstuff, ofte i forbindelse med forkastningssoner, soner med dårlig bergmassekvalitet eller i områder som er skadet som følge av sprengningsarbeider. Ettersom tettingsarbeidet kun gjøres lokalt er lengden på injeksjonshullene og avstanden mellom dem er mindre enn ved forinjeksjon (Tolppanen og Syrjänen, 2003).

Kostnaden ved etterinjeksjon er 3-10 ganger høyere enn forinjeksjon ettersom metoden er svært vanskelig og tidkrevende å utføre. Etterinjeksjon bør derfor kun være et supplement til forinjeksjon dersom det oppstår lekkasjer bak tunnelstuff, eller ønsket tetting ikke er oppnådd (Tolppanen og Syrjänen, 2003).

4 SEMENTBASERT FORINJEKSJON

Sementbasert forinjeksjon er den vanligste metoden for å oppfylle tetthetskravene som er satt til underjordsanlegg i Norge. I dette kapitlet vil ulike tetthetskrav og stoppkriterier bli presentert. Videre vil faktorer som har betydning for injeksjonsmassen og dens egenskaper bli beskrevet før normal injeksjonsprosedyre og utstyr som brukes til injeksjon blir kort forklart.

Stoppkriterier og injeksjonsprosedyre er noe ulikt i forskjellige land. I Norge er injeksjon hovedsakelig basert på empirisk kunnskap, mens det for eksempel i Sverige er utført langt flere teoretiske studier rundt berginjeksjon. Kunnskap fra både empirisk- og teoretiskbaserte stoppkriterier blir derfor presentert.

4.1 TETTEKRAV OG STOPPKRITERIER

Ved driving av tunneler og bergrom blir det satt krav til maksimal innlekkasje før driving begynner. Kravet baseres på en rekke faktorer, blant annet anleggets formål, plassering, overdekning og størrelse. I tillegg vurderes konsekvensene av lekkasje, både med tanke på økonomiske, miljømessige og sikkerhetsmessige forhold. De permanente og midlertidige funksjonskravene til anlegget blir også vurdert. På bakgrunn av vurderingene blir det satt et maksimalt innlekkasjekrav som normalt oppgis i liter per minutt per 100 meter tunnel/bergrom (l/min/100 m) (Hognestad et al., 2010).

Klüver og Kveen (2004) utformet et forslag til inndeling av tetthetskrav for tunneler med tverrsnitt 8,5 meter avhengig av hvor stenge kravene er, presentert i Tabell 4-1.

Tabell 4-1: Forslag til maksimal tillatt innlekkasje for tunneler med tverrsnitt 8,5 meter avhengig av tetthetskrav (Klüver og Kveen, 2004).

Tetthetskrav	Maks innlekkasje
Ekstremt strengt	< 1-3 l/min/100 m
Strengt	< 3-7 l/min/100 m
Middels strengt	< 7-15 l/min/100 m
Moderate krav	> 15 l/min/100 m

Avhengig av tetthetskravet, settes det et kriterium som bestemmer når injeksjonen skal avsluttes. Det vanligste stoppkriteriet ved forinjeksjon i Norge er at injeksjonen avsluttes når et forhåndsbestemt mottrykk er oppnådd. Enkelte ganger kan det være vanskelig å oppnå mottrykk. I slike tilfeller kan maksimal mengde sement per pakkerplassering eller kilogram (kg) per bormeter benyttes som stoppkriterie. I Mellom-Europa er «Grouting intensity

number» (GIN-metoden) mer vanlig som stoppkriteriet (Hognestad et al., 2010). «Real time grouting control» (RTGC) er et fjerde stoppkriterie som er utviklet for å bestemme når ønsket penetrasjonslengde er oppnådd, denne blir presentert Kapittel 4.1.4.

4.1.1 Trykk

Injeksjonstrykk er en svært viktig faktor for å oppnå vellykket injeksjonsarbeid, ettersom trykket er den drivende kraften som får injeksjonsmassen til å trenge inn i sprekker og åpninger i bergmassen. Injeksjonstrykket må være tilstrekkelig til å overvinne stedlig vanntrykk, samt motstand mot masseinntrengning i bergmassen på grunn av sprekkeåpning, ruhet, sprekkefyll og spenninger (Klüver og Kveen, 2004). Avhengig av overdekning, in situ spenninger og bergmassekvalitet kan maksimalt injeksjonstrykk variere fra noen få bar og opp til 100 bar (Hognestad et al., 2010).

På begynnelsen av 2000-tallet ble det i Norge introdusert en injeksjonsmetoden som kalles «aktiv injeksjon». Denne metoden går ut på å ha en kontinuerlig trykkoppbygging under injeksjon og et sluttrykk som er så høyt som bergmassen på stedet tillater, opptil 100 bar. Trykkoppbyggingen skjer i hvert injeksjonshull. Ved å variere v/c-forholdet i injeksjonsmassen er det mulig å oppnå en kontinuerlig trykkoppbygging. Metoden ga gode resultater ved flere kompliserte tunnelanlegg der det var nødvendig med full kontroll på grunnvannet (Klüver og Kveen, 2004). På tross av de gode resultatene er ikke metoden spesielt utbredt i dag. I enkelte tilfeller har injeksjon med høyt trykk fra start gitt bedre inntrenging i fine sprekker (Hognestad et al., 2010).

4.1.2 Maksimalt sementforbruk

Maksimalt sementforbruk bør tilpasses bergmassens egenskaper. En bergmasse med grove/åpne sprekker bør ha høyere maksimalt forbruk enn en bergmasse med fine/tynne sprekker. Maksimalt forbruk av sement, i en skjerm med 21 meter lange injeksjonshull og 30-40 hull per skjerm, er normalt 1000-1500 kg sement per hull (Hognestad et al., 2010).

4.1.3 GIN-metoden

GIN-metoden ble presentert av Lombardi og Deere i 1993. Metoden er basert på teoretiske beregninger og er utviklet for injeksjon av damfundament. Senere har metoden blitt populær i store deler av Europa, også ved injeksjon i tunnel (Rafi og Stille, 2015a). Målet med metoden er å kunne utføre injeksjon mer effektivt og økonomisk. Dette oppnås ved å minimere risikoen for hydraulisk jekking og etterstrebe en uniform spredning av injeksjonsmassen. Hydraulisk jekking betyr i denne sammenhengen faren for hydraulisk løfting av overliggende bergmasse.

Kraften injeksjonsmassen påfører bergmassen avhenger av arealet injeksjonsmassen påvirker og gjennomsnittlig trykk i massen (Brantberger, Stille og Eriksson, 2000).

GIN-verdien er definert som produktet av oppnådd trykk (bar) og injeksjonsinnngang (liter/meter), ved slutten av injeksjon i et borhull (Brantberger, Stille og Eriksson, 2000).

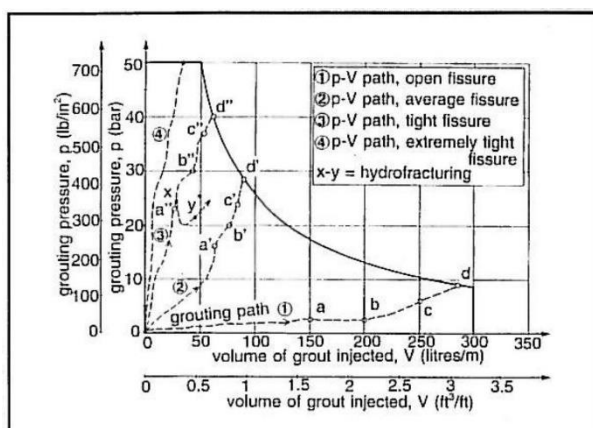
$$GIN = p_f \cdot V_f \quad (4-1)$$

Der: p_f = oppnådd trykk (bar)

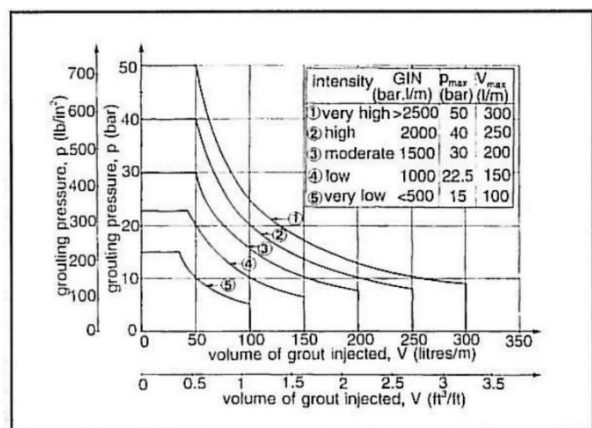
V_f = totalt medgått injeksjonsmasse per bormeter (l/m)

Ved å begrense produktet av trykk og injisert volum kan energien som går inn i sprekken i bergmassen kontrolleres og på den måten kan hydraulisk jekking som følge av injeksjon unngås (Rafi og Stille, 2015a). Injeksjonsarbeidet tilpasses de stedlige forholdene, borhullmønsteret, tetthetskrav og injeksjonsmetode, i tillegg til geologi og hydrogeologi i området. Ved å ta disse hensynene oppnås det en spredning av injeksjonsmassen som ikke er større enn tiltenkt, og unødvendig store forbruk av injeksjonsmasser unngås (Hognestad et al., 2010).

Ved bruk av GIN-metoden skal v/c-forholdet holdes konstant gjennom hele injeksjonsprosessen. Massen må være tilsatt superplastiserende stoffer for å tilfredsstille ønskede funksjonskrav. Videre forutsettes jevn lav-medium strømningshastighet på injeksjonsmassen inn i bergmassen. Over tid vil dette føre til en trykkoppbygging. Injeksjonsprosessen overvåkes ved at trykk, strømning, injisert volum og inntrengning plottes kontinuerlig mot forbrukt tid. Injeksjonsprosessen avsluttes når grafen for trykk mot totalt volum (l/m) krysser kurven som på forhånd er bestemt for maksimal injeksjonsintensitet (Figur 4-1 og Figur 4-2) (Brantberger, Stille og Eriksson, 2000).



Figur 4-1: Strømningsvei for injeksjonsmassen ved ulike sprekkeåpninger (Brantberger, Stille og Eriksson, 2000).



Figur 4-2: Forslag til ulike stoppkriterier basert på GIN-metoden (Brantberger, Stille og Eriksson, 2000).

Vanskelighet med bestemmelse av penetrasjonslengden til injeksjonsmassen og forholdene i sprekke under og etter injeksjon, er de vanligste problemene ved bruk av GIN-metoden. Metoden har vært mislykket ved flere prosjekter grunnet manglende forståelse og feilaktige tolkninger (Rafi og Stille, 2015a).

GIN-metoden kan være et godt verktøy i mange sammenhenger, men den bør brukes med forsiktighet når det injiseres i områder med lav overdekning eller kravet til tetthet er svært strengt. I disse omstendighetene gjør kompleksiteten i metoden at god forståelse for alle faktorer er nødvendig (Rafi og Stille, 2015a).

4.1.4 RTGC

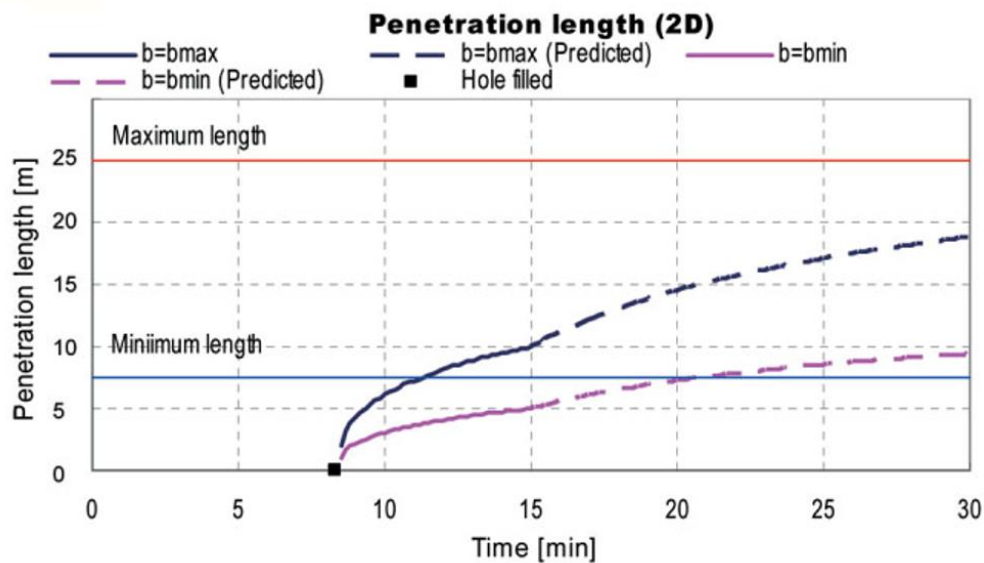
Injeksjonsrigger som logger injeksjonsdataen i sanntid gjør det mulig å evaluere injeksjonen parallelt med at den utføres. Ved Kungliga Tekniska högskolan i Stockholm er det i løpet av de siste 30 årene blitt forsket på og utviklet et stoppkriterie for bruk i tunneler som benytter informasjonen logget med injeksjonsriggeren. Metoden er hovedsakelig teoretisk basert, og er enda ikke tatt i bruk som et aktivt stoppkriterie på tunnelprosjekter. Metoden har fått navnet «Real time grouting control method» (RTGC). Parametere som må logges for å kunne benytte RTGC er strømming av injeksjonsmasse og injeksjonstrykk. Målet med metoden er å verifisere at forhåndsbestemte krav oppfylles under injeksjon. Et slikt krav er at injeksjonsmassens penetrasjon i de minste sprekke er lengre enn en minimumsverdi uten at spredningen av massene er større enn en maksimumslengden for spredning (Stille, 2015).

Informasjon som må være tilgjengelig for å kunne utføre analyse av injeksjonsprosessen er ifølge Stille (2015):

- Injeksjonstrykk og strømming over tid
- Viskositet og flyteevnen til injeksjonsmassen
- Sprekkeåpningen til minste sprekke som skal tettes
- Grunnvannstrykket
- Volumet injeksjonsmasse for å fylle borhullet

Denne informasjonen kan brukes for å finne strømningsmønsteret til injeksjonsmassen og oppnådd spredning av massen i løpet av tiden injeksjonen er observert. Sprekkeåpning av største sprekke i bergmassen kan også beregnes. Dette gjør det mulig å bestemme grenseverdier for minimum og maksimum spredning av injeksjonsmassen (Stille, 2015). Figur 4-3 viser penetrasjonslengden til en injeksjonsmasse med strømningsmønster i 2D i minste og største

sprekkeåpning som skal tettes. Figuren viser at minimums penetrasjonslengde i minste sprekkåpning vil være oppnådd før maksimumslengden i største sprekkåpning er nådd.



Figur 4-3: Estimert penetrasjonslengde for strømning av injeksjonsmasse i 2D etter borhullet er fylt opp (Stille, 2015).

Stille (2015) presenterer seks steg som gir fremgangsmåten til analysen:

1. Tidskorleksjon, tiden som går med til å fylle borhullet skal ikke tas med i beregningene, det skal heller ikke tid som brukes for å endre injeksjonstrykket
2. Bestemme strømningsmønsteret for hvordan injeksjonsmassen spres i bergmassen. Kan enten være i 1D, injeksjonsmassen strømmer i kanaler, eller i 2D, massen strømmer som en disk ut fra borhullet. Dimensjoneringen bestemmes basert på målt strømning, volum og korrigert tid.
3. Studie av injeksjonsforløpet, ved å se etter avvik fra normal spredning av injeksjonsmassen. Dette gjøres ved å studere grafen for strømning av injeksjonsmasse i borhullet over tid. Avvik kan forekomme som følge av at injeksjonsmassen har nådd en fri flate (utgang i dagen eller annet borhull), jekking av bergmassen, eller at bergmassen er tett og det ikke er mulig å presse inn mer injeksjonsmasse.
4. Bestemme største sprekkåpning i bergmassen. Det gjøres ved først å beregne forbrukt tid og volum og se det i sammenheng med det antatte strømningsmønsteret. Deretter kan største sprekkåpning som er injisert estimeres. For borhull med strømningsmønster i 1D må først sprekkbredden beregnes, før åpningen på sprekkekanalene kan estimeres (Stille, Gustafson og Hassler, 2012).

5. Estimere spredning av injeksjonsmasse i minste og største sprekkeåpning ved normale forhold (ingen jekking). Beregningene for spredning i minste sprekkeåpning baseres på dimensjoneringen av strømming og estimert størst sprekkeåpning.
6. Vurdere om spredningen er tilstrekkelig eller om injeksjonsprosedyren bør endres for å oppnå bedre resultater.

Utfordringene ved metoden er at den baseres på flere antagelser om sprekkeåpning og strømningsmønsteret til injeksjonsmassen. Inngangsparameterne er også svært vanskelig å bestemme med sikkerhet. Forsøk på flere ulike prosjekter har imidlertid gitt tilfredsstillende resultater (Stille, Gustafson og Hassler, 2012).

4.2 INJEKSJONSMASSENS SAMMENSETNING OG EGENSKAPER

Det finnes en rekke ulike sementtyper til bruk i sementinjeksjon. Hovedforskjellen på de ulike typene er hvor finmalt sementen er. Dette gir sementene ulike egenskaper og bruksområder. Hognestad et al. (2010) definerer tre hovedfunksjonskrav for injeksjonsmasser, disse er:

- Massen skal være stabil
- Massen skal flyte lett
- Massen skal størkne raskt etter injeksjon

For at en sementbasert injeksjonsmasse skal kunne tilfredsstillende alle tre funksjonskravene må massen tilsettes ulike tilsetningsstoffer (Hognestad, 2012).

4.2.1 Sementtyper

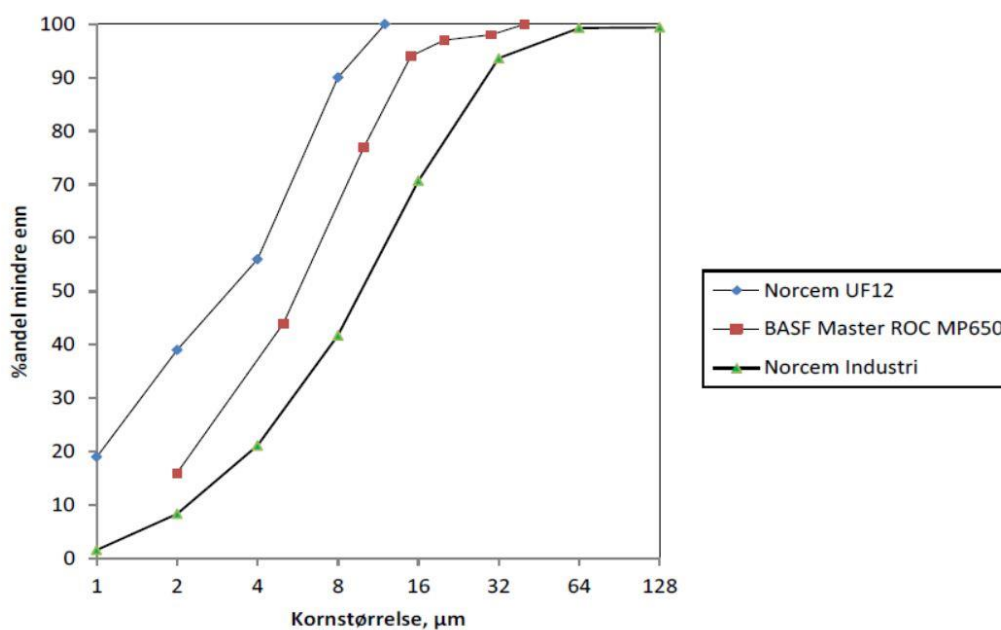
I utgangspunktet kan alle typer sement benyttes til injeksjon. Sementen vurderes og velges på bakgrunn av mineralogisk sammensetning, oppmalingsgrad, kornfordeling, tendens til vannutskillelse (forklares i Kapittel 4.2.4), herdetid og tidligfasthet (Holmøy, Strømsvik og Rise, 2015). Sementene med grovest korn vil ha dårligere inntrengningsevne i fine sprekker. Grovmalt sement bør derfor kun benyttes til fylling av store sprekker og hulrom i bergmassen (Hognestad et al., 2010).

Injeksjonssement produseres av samme type materiale som vanlig sement. Forskjellen er at injeksjonssementen i større grad finmales. Sement som brukes til injeksjon i dag kan deles i tre grupper; industrisement, mikroement og ultrafin sement (Tabell 4-2). d_{95} -verdien for en sement betyr at 95 % av sementkornene er mindre enn denne størrelsen (Holmøy, Strømsvik og Rise, 2015).

Tabell 4-2: Ulike typer sement med tilhørende kornstørrelse (Hognestad et al., 2010).

Sementtype	Kornstørrelse
Industrisement	$d_{95} > 20 \mu\text{m}$
Mikrosegment	$d_{95} < 20 \mu\text{m}$
Ultrafin sement	$d_{95} < 10 \mu\text{m}$

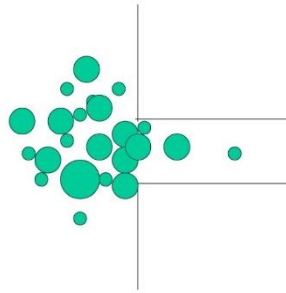
Mikrosegment består i større grad av fine korn og vil derfor ha bedre inntrengningsevne og binde mer vann enn industrisement (Tolppanen og Syrjänen, 2003). Figur 4-4 viser tre kornfordelingskurver for sementtyper som benyttes til injeksjon i Norge (Aarstad, Skjølsvold og Justnes, 2015).



Figur 4-4: Kornfordelingskurver for tre sementtyper som brukes til injeksjon i Norge (Aarstad et al., 2015).

Den store spesifikke overflaten til mikro- og ultrafin sement gjør at disse sementene er mye mer temperaturavhengig enn industrisement. Det stilles derfor høyere krav til blandeprosessen for å unngå fnokking/filterkakedannelse av sementen (Hognestad et al., 2010). Dette forklares grundigere i Kapittel 4.2.4.

Innhold av kun et «overkorn» i en injeksjonsmasse kan blokkere inntrenging av mindre korn og føre til dannelse av filterkake. Det er derfor en fordel å ha en smal kornfordelingskurve og liten d_{95} . En tommelfingerregel er at maksimal kornstørrelse ikke skal være større enn $\frac{1}{3}$ av minste sprekkeåpning som skal injiseres (Figur 4-5) (Tolppanen og Syrjänen, 2003).



Figur 4-5: Maksimal kornstørrelse i injeksjonsmassen bør ikke overskride $\frac{1}{3}$ av sprekkeåpningen som skal injiseres (Tolppanen og Syrjänen, 2003).

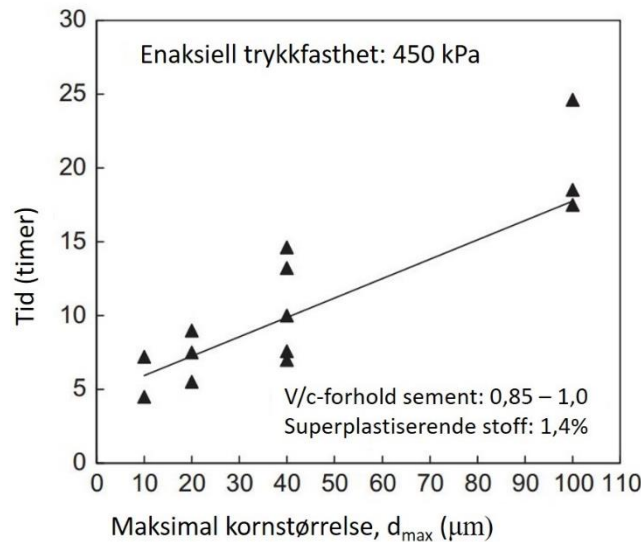
Pantazopoulos et al. (2012) utførte en studie der tre ulike sementtyper med opprinnelig maksimal kornstørrelse på 100 mikrometer (μm) ble malt ned til 40, 20 og 10 μm . Studien konkluderte med at nedmalingen hadde en negativ effekt på viskositeten til injeksjonsmassen, som økte med 500 %. På den andre siden var det en positiv effekt på bindetid, tidlig styrke og tendens til vannutskillelse til injeksjonsmassene.

4.2.2 Vann/ment-forhold

Injeksjonsmassens inntrengningsevne avhenger sterkt av massens v/c-forhold. Høyt v/c-forhold gir økt flytegenskaper og god inntrenging, men det gir også en rekke negative effekter: Kvaliteten til herdet masse blir dårligere, herdeprosessen tar lengre tid, redusert tettingeffekt, høyt masseforbruk og fare for hydraulisk jekking (Klüver og Kveen, 2004). Mirza et al. (2013) utførte en studie med både mikroement og industrisement. Deres studie viste at industrisement er ustabil ved betydelig lavere v/c-forhold enn mikroement. Avbindingstiden er også svært avhengig av v/c-forholdet og varierer proporsjonalt med økende v/c-forhold. For lang avbindingstid kan føre til utvasking av injeksjonsmasse før den har størknet. Avbindingstiden som er oppgitt av produsent er normalt målt ved 20°C. Ettersom bergmassen normalt er kaldere enn dette ($\sim 8^\circ\text{C}$ i Norge) blir det tregere avbinding og fasthetsutvikling. Vanlig v/c-forhold ved injeksjon i Norge er mellom 1,0 og 0,5 (Hognestad et al., 2010).

4.2.3 Bindetid og tidligfasthet

Finmalt sement oppnår raskere ønsket tidligfasthet enn mer grovkornet sementer. Årsaken er at det i de finmalte sementene er kortere avstand mellom sementkornene og det er derfor mindre hydratisering som skal til for at kornene binder seg sammen. Figur 4-6 viser hvor lang tid det tar å oppnå en gitt tidligfasthet som funksjon av sementens kornstørrelse (Pantazopoulos et al., 2012).



Figur 4-6: Tiden det tar for å oppnå enaksiell trykkfasthet på 450 kPa med økende kornstørrelse (Pantazopoulos et al., 2012).

Ved bruk av sement med konstant kornstørrelse er herdetiden hovedsakelig avhengig av temperaturen i bergmassen. Bergmasser med lav temperatur gir lengre herdetid (Tabell 4-3). Ved temperaturer under 10°C vil herdeprosessen gå tregt og ned mot 0°C går prosessen svært tregt (Holm og Heimli, 2001).

Tabell 4-3: Relativ reaksjonshastighet med omtrentlige verdier ved ulike temperaturer (Klüver og Kveen, 2004).

5°C	10°C	20°C	35°C
0,3	0,5	1	2

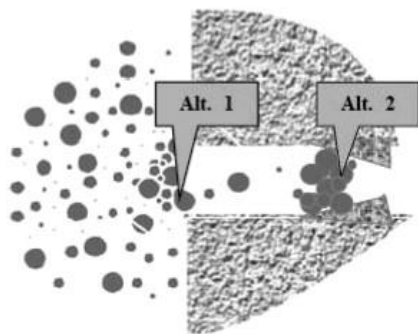
For å gjøre herdetiden kortere for alle typer sement er det mulig å tilsette akselerator. I varme klima kan imidlertid finmalte sementer herde for rask, men ved å tilsette gips mot slutten av blandetiden kan dette unngås. Eventuelt kan sementen tilsettes retarder under blanding, noe som forsinker hydratiseringsprosessen (Klüver og Kveen, 2004).

4.2.4 Filterkakedannelse og tendens til vannutskillelse

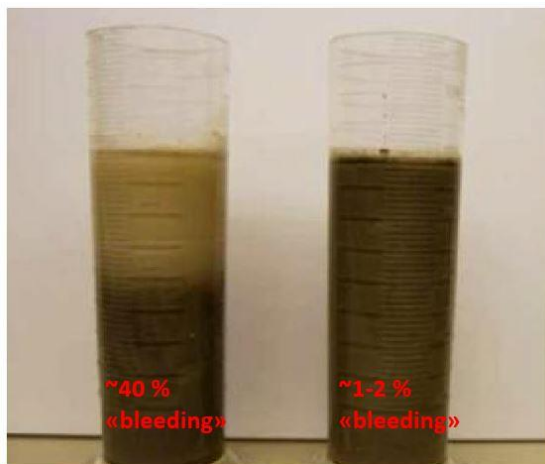
Avhengig av injeksjonsmassens egenskaper kan det forekomme ulike uønskede effekter som filterkakedannelse og sementens tendens til vannutskillelse (Holmøy, Strømsvik og Rise, 2015).

Ved inngangen til sprekker langs borhullet eller andre steder det skjer en innsnevring i hullet/sprekken kan sementkorn i vann/sement-suspensjonen bindes til hverandre og separeres fra massen, dette kalles *filterkakedannelse* (Figur 4-7) (Holmøy, Strømsvik og Rise, 2015).

Hvis sementen og vannet separeres slik at sementen synker til bunn og vannet blir liggende over, kalles det *tendens til vannutskillelse* (Figur 4-8). Dersom dette oppstår i en sprekk kan det dannes vannførende kanaler som senere vil være svært vanskelig å tette. En vann/sement-suspensjon som skal brukes til injeksjon defineres som stabil dersom det er mindre enn 0,5 % vannutskillelse (Holmøy, Strømsvik og Rise, 2015).



Figur 4-7: Filterkakedannelse ved inngangen til sprekk og ved innsnevring av sprekken (Eklund og Stille, 2008).



Figur 4-8: Ulik tendens til vannutskillelse. ~40 % til venstre og ~1-2 % til høyre (Figur modifisert etter Hognestad et al., 2010).

4.2.5 Tilsetningsstoffer

For at en injeksjonsmasse skal tilfredsstille alle funksjonskrav som settes til massen, er det som nevnt i innledningen til delkapittelet, nødvendig å tilsette injeksjonsmassen ulike tilsetningsstoffer. Noen av de vanligste tilsetningsstoffene er presentert under.

Pozzolaner

For å gjøre sement og injeksjonsmasse billigere og mer miljøvennlig er det i dag vanlig å erstatte deler av sementen med slagg, mikrosilika og/eller flygeaske. Samlebetegnelse for disse tilsetningsmaterialene er pozzolaner (Holmøy, Strømsvik og Rise, 2015). Effekten av de ulike materialene avhenger av mengden som blir tilsatt, men er lik for både betong og injeksjonsmasse (Tabell 4-4).

Tabell 4-4: Ulike pozzolaner og deres effekt på injeksjonsmassen (Holmøy, Strømsvik og Rise, 2015).

Slagg	Økt bindetid, langsommere hydratisering, tregere fasthetsutvikling (Lang, 2002)
Flygeaske	Økt bindetid, reduserer tendensen til vannutskillelse (Luke, 2002)
Mikrosilika	Økt kohesjon, redusert tendens til vannutskillelse, økt styrke (Justnes, 2002)

Stabiliserende stoffer

Stabiliserende stoffer tilsettes injeksjonsmassen for å hindre tendensen til vannutskillelse. Silikaslurry er i dag det mest vanlig tilsetningsstoffet for å øke stabiliteten til industrisement i Norge. Det er vanlig å tilsette mellom 5 % og 10 % slurry av sementvekten (Hognestad, 2012).

Kjemiske tilsetningsstoffer

Det finnes flere ulike kjemiske tilsetningsstoffer som kan endre egenskapene til injeksjonsmassen. Akselerator kan tilsettes injeksjonsmassen for å fremskynde tidligfasthet (størkningsakselerator) og/eller tidlig styrke (herdeakselerator) (Hognestad et al., 2010). Retarderende tilsetning er ikke vanlig ved injeksjon, men det kan tilsettes dersom det er ønskelig med forsinket størkning. I varmt klima kan retarderende stoff tilsettes i blanderen for å hindre at massen begynner å binde seg (Tolppanen og Syrjänen, 2003).

Ved bruk av sement med mindre kornfraksjoner blir overflatefriksjonen mellom kornene større og partiklene blir elektrisk ladet og tiltrekkes hverandre. Dette fører til at det dannes agglomerater/klumper i massen. Superplastiserende tilsetningsstoff vil kunne fungere dispergerende mellom sementkornene og gir injeksjonsmassen bedre flyteegenskaper (Hognestad et al., 2010).

Virkingen av ulike kjemiske tilsetningsstoffer avhenger av typen sement som benyttes og hvilke mineraler den består av. Bruk av silikaslurry, flygeaske og mikrosilika vil også påvirke hvordan sementen reagerer på tilsetningen av kjemiske stoffer (Chandra, 2002; Tolppanen og Syrjänen, 2003; Hognestad et al., 2010).

4.2.6 Reologi

Reologiske egenskaper beskriver en masses flyteegenskaper. I en stabil sementsuspensjon uten tendens til vannutskillelse vil flyteegenskapene tilnærmet følge Bingham's væskelov. Dersom suspensjonen er ustabil og vann og sement skiller seg, vil massen ha en uforutsigbar oppførsel. Flyteegenskapene til massen vil da veksle mellom å følge Newtons og Bingham's væskelov (Hognestad et al., 2010).

Bingham's væskelov (Lombardi, 1985):

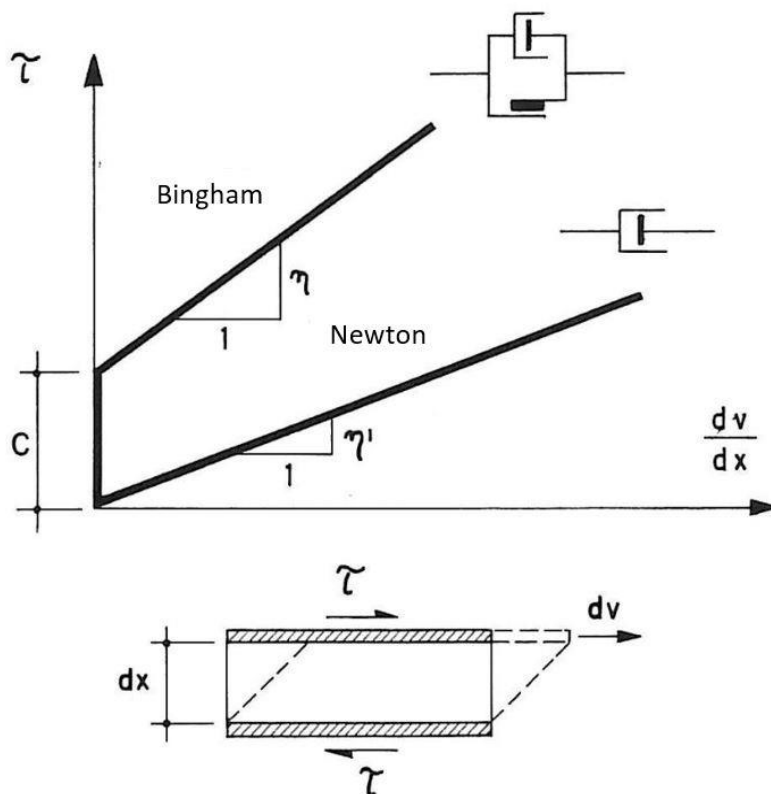
$$\tau = c + \eta \frac{dv}{dx} \quad (4-2)$$

Newton's væskelov (Lombardi, 1985):

$$\tau = \eta \frac{dv}{dx} \quad (4-3)$$

Der: $\tau =$ skjærstyrke (Pa)
 $dv/dx =$ skjærhastighet (sek^{-1})
 $\eta =$ viskositet (Pa sek)
 $c =$ kohesjon (Pa)

Figur 4-9 viser både Newtons og Bingham's væskelov.



Figur 4-9: Reologiske lover for Bingham og Newton væsker (Lombardi, 1985).

Basert på Bingham's lov er det tydelig at sementsuspensjonens flyteevne er avhengig av både kohesjon og viskositet. Det er innvirkningen av kohesjon som skiller en Bingham væske fra en Newtonsk væske (Lombardi, 1985).

Bingham's og Newton's væskelov er teoretiske funksjoner og forutsetter laminær strømning. I virkeligheten er strømningsmønsteret til injeksjonsmassen avhengig av hastigheten. Ved høy strømningshastighet går strømmingen fra å være laminær til å bli turbulent (Hognestad et al., 2010).

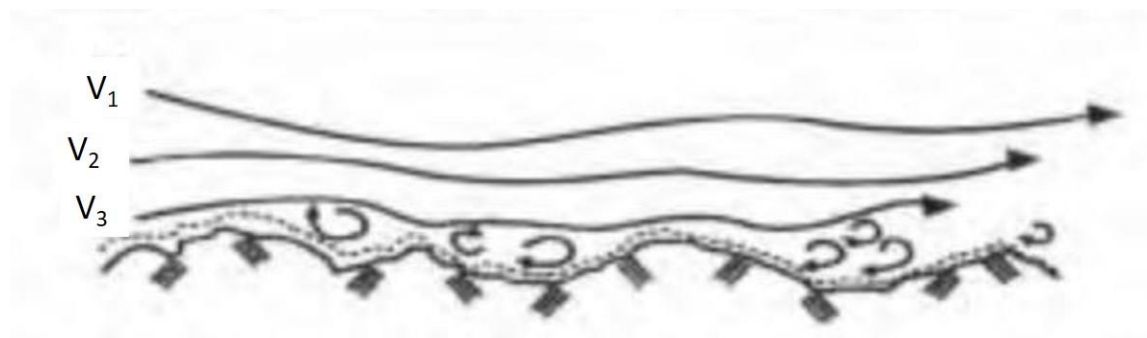
Inntrengningsevnen til en injeksjonsmasse er ifølge Schwarz og Krizek (2000) sterkest påvirket av kornstørrelse, viskositet og flytskjærspenningen i injeksjonsmassen. Disse egenskapene er påvirket av hydratisering og den kjemiske reaksjonen som skjer i massen når sementen kommer i kontakt med vann. Studie utført av Schwarz og Krizek (2000) viste at det i løpet av de første

60 minuttene etter blanding skjer store endringer i injeksjonsmassen. Det ble registrert opptil 300 % økning i viskositet og flytskjærspenning i massen før avbinding. Ved å tilsette dispergerende middel eller retarderende tilsetningsstoff vil effekten kunne reduseres.

Bruk av injeksjonsmasse med økende finhet, øker tilsynelatende viskositeten og flytmotstanden i massen. Det oppstår på grunn av det økende reaktive overflatearealet som fører til en raskere hydratisering av massen (Pantazopoulos et al., 2012; Mirza et al., 2013).

4.2.7 Injeksjonsmassens strømming i bergmassen

Inntrengningsevnen til injeksjonsmassen vil utover egenskapene til massen avhenge av sprekkåpning, sprekkenes ruhet og sprekketryll (Hognestad et al., 2010). Injeksjonsmassen vil følge minste motstandsvei, og i en åpen sprekk vil strømningshastigheten være påvirket av avstanden til sprekkvegg og kontaktpunkter. Langs veggen i en ru sprekk er hastigheten til store korn tilnærmet lik null (V_3), mens hastigheten lengst fra veggen (V_1) er høyest, som vist i Figur 4-10 (Barton, 2003).



Figur 4-10: Strømningshastighet i en sprekk med ru sprekkvegg (Barton, 2003).

4.2.8 Valg av injeksjonsmasse

Materialkostnadene for mikrosement sammenliknet med industrisement er normalt 5-15 ganger så høye (Kjølberg et al., 2002; Henn og Davenport, 2005). Henn og Davenport (2005) mener likevel at noen prosjekter har hatt en kostnadsreduksjon, totalt for hele injeksjonsarbeidet ved bruk av mikrosement. Hovedårsaken er at det ved bruk av mikrosement må være høyere v/c-forholdet (mer vann per kg sement), hvilket reduserer forbruket av sement. Injeksjonstiden går dessuten ned på grunn av forbedret og mer effektiv injeksjon.

Kjølberg et al. (2002) så på injeksjonsarbeidene på T-baneprosjektet i Oslo og konkluderer med det motsatte av Henn og Davenport (2005). På dette prosjektet har forbruket av injeksjonsmasse vært høyere for mikrosement enn industrisement. Det førte til vesentlig høyere materialkostnader og lengre injeksjonstid. Det ble heller ikke funnet noen forskjell i oppnådd tetthet ved bruk av de ulike injeksjonsmassene.

4.2.9 Forbruk av injeksjonsmasse

Bergmassens egenskaper vil være avgjørende for valg av injeksjonsmasse og stoppkriterie. Forbruket av injeksjonsmasse vil også ha en sterk sammenheng med bergmassen som injiseres (Klüver, 2000).

Klüver (2000) presenterer en inndeling av ulike bergmasser basert på oppsprekkingsgrad og tilstedeværelsen av sprekkefylling. Vanlig norske bergmasser ble delt inn i fire klasser, og forventet forbruk av injeksjonsmasse ble sammenstilt med hver klasse. Inndelingen er vist i Tabell 4-5.

Tabell 4-5: Forventet forbruk av injeksjonsmasse avhengig av bergklasse (Klüver, 2000).

Bergklasse	Sprekkeforhold	Forventet forbruk av injeksjonsmasse
A	Åpne sprekker, uten vesentlig sprekkebelegg	Høyt masseforbruk
B	Sprekker med sprekkefylling, tendens til kanaldannelse	Middels masseforbruk
C	Små sprekker og kanaler, høy grad av sprekkefylling,	Lavt masseforbruk
D	Tektonisk påvirkning eller karstfenomen, ekstremt åpen oppsprekking eller åpne rom	Meget stort masseforbruk

Forbruket av injeksjonsmasse til forinjeksjon i vegtunneler med tverrsnitt på 8,5 meter er erfaringsmessig normalt mellom 340 og 1750 kg per løpemeter tunnel. Det tilsvarer henholdsvis 200 kg og 1000 kg sement per løpemeter tunnel der forinjeksjon er utført, forutsatt v/c-forhold på 0,75 og egenvekt på sementen lik 1,75 kg/m³ (Klüver og Kveen, 2004).

Før injeksjonsmassen kan presses inn i sprekker i bergmassen må borhullet det injiseres gjennom fylles med injeksjonsmasse. Ved vurdering av forbruk av injeksjonsmasse er det derfor viktig å være klar over volumet som går med til å fylle alle injeksjonshullene i en injeksjonsskjerm. Forutsatt borhulldiameter 51 millimeter (mm) vil forbruket per løpemeter borhull være 3,7 kg injeksjonsmasse eller 2,1 kg sement (v/c = 0,75) (Klüver og Kveen, 2004).

4.3 INJEKSJONSPROSEDYRE

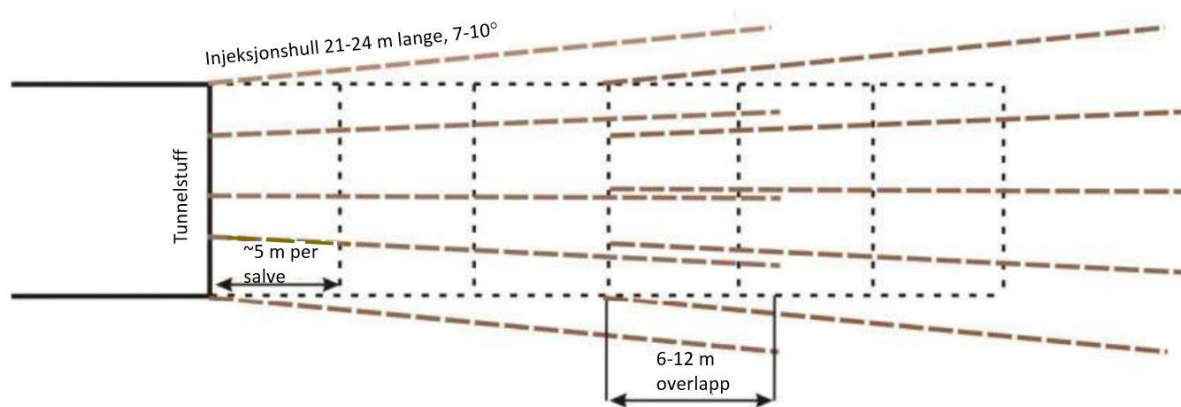
Berginjeksjon er i Norge hovedsakelig et praktisk fag, basert på empirisk kunnskap. Kvaliteten og kostnaden for utført injeksjonsarbeid vil derfor i stor grad avhenge av erfaringen og kunnskapen til de som utfører injeksjonen. Følgende kapittel vil presentere dagens praksis for forinjeksjon i bergmasser i Norge.

4.3.1 Systematisk- eller behovsprøvd injeksjon?

Det skilles mellom to typer injeksjonsstrategi:

- Systematisk injeksjon
- Behovsprøvd injeksjon

Systematisk injeksjon utføres ved å injisere injeksjonsskjermer med jevne mellomrom i et intervall slik at det blir overlapp mellom skjermene, minimum 6-8 meter (Pedersen, Komoen og Kveen, 2010). Figur 4-11 viser prinsippet for systematisk forinjeksjon. Denne metoden gjør at det blir en kontinuerlig sone som hindrer vanninntrengning langs hele tunnallengden. I områder der det er strenge krav til tetthet har flere forsøk vist at systematisk forinjeksjon gir best resultat (Kjølberg et al., 2002).



Figur 4-11: Prinsippet for systematisk forinjeksjon ved driving av tunnel med lite tverrsnitt (Panthi, 2014).

Behovsprøvd injeksjon betyr at det injiseres kun i de områdene det er behov for det. Nødvendigheten for injeksjon blir fortløpende vurdert basert på vanntapmålinger og sonderboringer foran tunnelstuf. Ved bruk av behovsprøvd injeksjon kan vannlekkasjer forflyttes som følge av en injeksjonsskjerm. Vann som fortrenses av den injiserte massen kan forflyttes bakover og gi vannlekkasjer i soner som ikke er injisert bak tunnelstuf. I tillegg kan vannet som bryter inn i tunnelen være under høyt trykk som følge av utført injeksjon (Hognestad et al., 2010).

Prosjektene som er studert i denne studien er begge utført med systematisk injeksjon. Det fokuseres videre på og det er prosedyren for denne typen injeksjon.

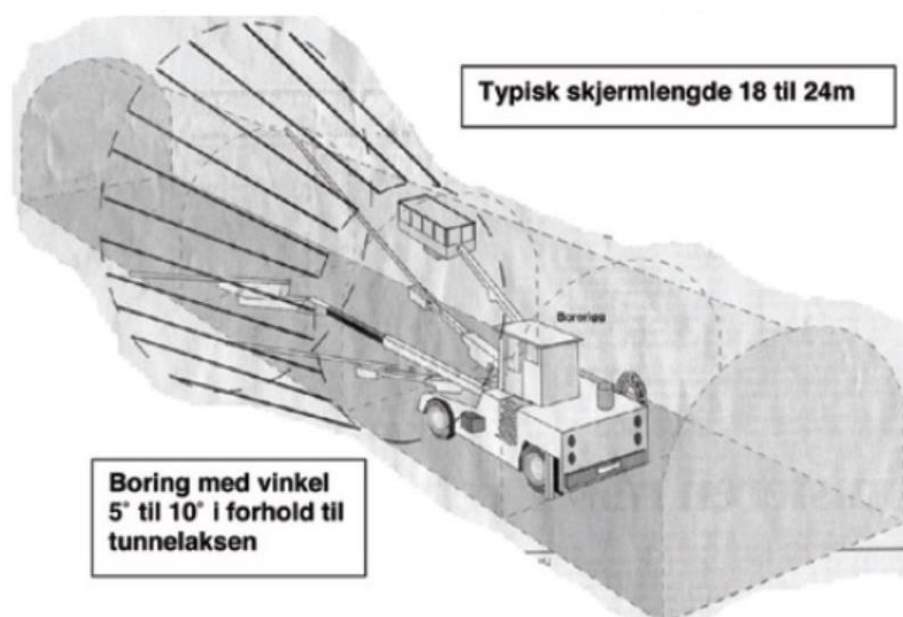
4.3.2 Injeksjonsskjermen

Utforming av injeksjonsskjermen avhenger hovedsakelig av kravet som er satt til tetthet i det aktuelle området. I tillegg vil størrelsen på tunnelen og geologien i området ha betydning. Parameterne som kan varieres i en injeksjonsskjerm er antall, lengden og avstanden mellom borhullene i injeksjonsskjermen (Tolppanen og Syrjänen, 2003).

Senter til senter avstanden mellom hullene er normalt mellom 1 og 3 meter for hullene rundt profilet (Tolppanen og Syrjänen, 2003). I tillegg er det vanlig med injeksjonshull i tunnelstuff. For en vegtunnel med tverrsnitt 9,5 meter er det vanlig 35-60 borhull i en injeksjonsskjerm (Pedersen, Komoen og Kveen, 2010). Kommunikasjon mellom injeksjonshullene og sprekkene i bergmassen er avgjørende for å oppnå et vellykket resultat etter injeksjon (Klüver, 2000).

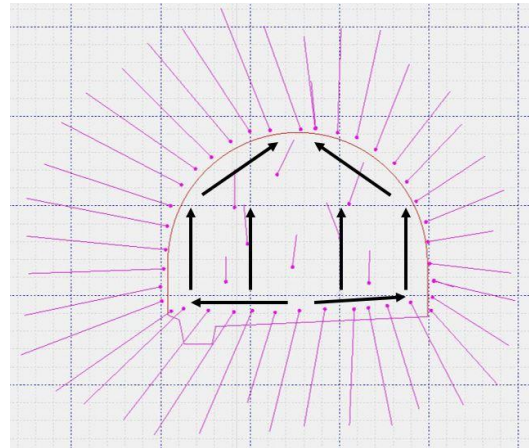
Borhullsdiameteren varierer mellom 45 og 64 millimeter, og lengden på borhullene fra 18 til 24 meter. Kortest borhullslengde benyttes i dårlig berg, ved liten overdekning og i tungt injiserbar bergmasse (Klüver og Kveen, 2004). Lengder over 24 meter er ikke anbefalt grunnet faren for store borhullsavvik (Hognestad et al., 2010).

Injeksjonshullene bores med en vinkel på tunnelaksen for å skape en impermeabel sone rundt tunnelen. Figur 4-12 viser boring av injeksjonsskjerm og vinkling av hullene, normalt 5-10° utover fra tunnelaksen. Vinkling av injeksjonshullene gir skjermen tykkelse (Hognestad et al., 2010). Tykkelsen bør være større enn lengden på bergboltene som skal benyttes for å unngå punktering av skjermen (Tolppanen og Syrjänen, 2003).



Figur 4-12: Boring av injeksjonsskjerm (Hognestad et al., 2010).

Erfaringsmessig er det en fordel å begynne injeksjonen i sålehullene. Deretter injiseres profilhullene sammen med hullene i tunnelstuff suksessivt, og til slutt hullene i hengen (Figur 4-13). Årsaken til denne rekkefølgen er for å utnytte at injeksjonsmassen er tyngre enn vann. Ved å begynne nederst vil gravitasjonskraften utnyttes til å presse vannet opp og frem. Dersom det er forbindelse mellom to eller flere borhull, eller det er enkelte hull med ekstremt stor innlekkasje, skal disse hullene injiseres først uavhengig av plassering på tunnelstuff. I tilfeller der det er forbindelse mellom flere borhull og injeksjon i det ene hullet fører til at masse strømmer ut av et annet hull, må ventilen på pakken stenges i de koblede hullene før injeksjon fortsettes i det påbegynte hullet (Hognestad et al., 2010).



Figur 4-13: Vanlig injeksjonsrekkefølge i Norge.

4.3.3 Utstyr til injeksjon

Injeksjonsutstyr av god kvalitet og tilpasset forholdene som skal injiseres er essensielt for å oppnå et vellykket resultat. Komponenter og utstyr som benyttes til injeksjon vil bli kort presentert nedenfor sammen med deres bruksområder.

Borerigg

Boring av injeksjonshull utføres normalt med tunnelriggen i norske tunneler. Størrelsen og antall bomber på tunnelriggen variere avhengig av type og produsent. De vanligste typene er to- og treboms rigger. Disse egner seg godt til boring av injeksjonshull på 18-24 meter. Før injeksjonen begynner må borhullene spyles rene for borkaks for å sikre at åpningen til kryssende sprekker ikke blir tettet av borkaks som hindrer injeksjonsmassen å trenger inn (Hognestad et al., 2010).

Moderne borerigger er utstyrt med automatisk borparametertolkning (measuring while drilling, MWD) som logger matetrykk, rotasjonstrykk, inndrift, borproblemer, tap av spylevann og vanninnbrudd. Logget data blir kalibrert og tolket i programvare som for eksempel BeverControl. Tolkningen kan gi god informasjon om variasjoner i hardhet, oppsprekkingsgrad og vannforhold. Informasjonen gir mulighet for å tilpasse injeksjonen til de stedlige forholdene, og dermed oppnå et bedre injeksjonsresultat (Hognestad et al., 2010).

Injeksjonsrigg

Moderne injeksjonsrigger er bygget for å være en sikker og god arbeidsplass. Rigger er ofte mobil og montert på en lastebil eller tilhenger, avhengig av størrelsen. Utstyret som inngår i injeksjonsriggen er siloer, blandere, lys mot både tunnelstuff og blandere, injeksjonspumper, automatisk loggesystem og en arbeidsplattform. Prosjekter der det benyttes ulike typer sement er det en fordel om injeksjonsriggen er utstyrt med to siloer for å få en mest mulig optimal injeksjonsprosess (Hognestad et al., 2010). Videre bør det være integrert en veiningsenhet for oppmåling av sement og et nøyaktig målesystemer for vann og tilslagsmateriale for å sikre korrekt v/c-forhold (Garshol, 2016).

Automatisk logging

Injeksjonsriggen bør ha et automatisk loggesystem som logger alle parameter i injeksjonsrapporteringen. Typisk data som logges er (Henn og Soule, 2010):

- Injisert volum av ulike resepter per hull
- Injeksjonstrykk
- Strømningshastighet
- Start- og stopptid for ulike resepter

Ved logging i sanntid kan denne informasjonen benyttes til å sikre kvaliteten på injeksjonsprosessen.

Uavhengig av valg av loggesystem er det viktig å til enhver tid ha god visuell kontroll på injeksjonsprosessen. De viktigste parameterne å ha kontroll på for å unngå uønskede hendelser, er strømningshastighet og injeksjonstrykk. Strømningshastighet kan enten registreres direkte fra et måleinstrument eller beregnes basert på volum injeksjonsmasse i blanderen eller mellomblanderen. Injeksjonstrykk kan leses av på en trykkmåler, som normalt er plassert på pumpen (Hegebarth, 2013).

Blander

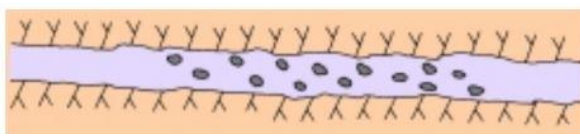
Vann, sement og tilsetningsstoffer blandes sammen i blanderen. Viktigste faktorer for å oppnå en god injeksjonsmasse er blandetiden og rotasjonshastigheten til blanderen (Tolppanen og Syrjänen, 2003). Ved bruk av sementsuspensjoner bør blanderen være høyhastighets aktivator som klarer å skille sementpartiklene fra hverandre og tilføre tilstrekkelig fuktighet. En høyhastighets aktivator har over 1500 rotasjoner per minutt og normal blandetid er omtrent 2 minutter. I tillegg til blanderen bør det være en mellomblander (agitator) som holder injeksjonsmassen i suspensjon og sikrer kontinuerlig injeksjon (Hognestad et al., 2010).

Injeksjonspumper

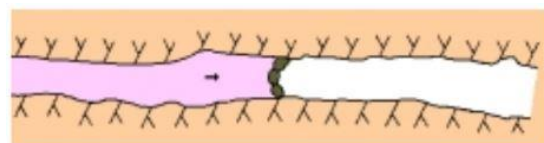
Det finnes en rekke ulike pumper på markedet til bruk ved injeksjon. Noen er laget for pumping av store volum, andre for høye trykk og noen for begge deler. Valg av pumpe som er tilpasset trykket og volumet som skal benyttes under driving er derfor viktig (Hegebarth, 2013). Noen av typene som finnes er lufttrykk-tank, stempelpumper (hydrauliske eller luftdrevne), membranpumper og eksenterskrupumper. Den mest brukte pumpetyperen i dag er hydraulisk stempelpumpe. Pumpen er normalt installert til å virke på en enkelt injeksjonslinje som gir mulighet til å styre injeksjonstrykket og strømmingen uten at ventiler eller mekaniske måleinstrumenter kommer i kontakt med injeksjonsmassen (Garshol, 2016).

Nøyaktig trykkkontroll er nødvendig for å unngå å overstige maksimumstrykket som er satt basert på sårbarheten til omkringliggende masser. Trykktopper som overgår forhåndsbestemt maksimum kan føre til uønsket jekking av bergmassen og skader på nærliggende konstruksjoner. Med moderne injeksjonsrigger er det normalt ikke noe problem å overholde maksimumstrykket.

Ved enkeltvirkende stempelpumper er det i midlertid pulserende injeksjonstrykk som følge av at stempelet trekker seg tilbake. Effekten av pulserende trykk er det noe uenighet om. Noen mener effekten er positiv, mens andre mener jevnt trykk og strømming er fordelaktig (Garshol, 2016). Praktisk erfaring har vist at korte trykkfall hjelper til å presse massen lengre inn i fine sprekker. Det korte trykkfallet gir sementpartiklene tid til å re orientere og innrette seg etter den begrensede plassen i åpningene (Figur 4-14). Jevnt trykk kan føre til *bridging* og initiere trykkfiltrering (Figur 4-15) (Mueller, 2002).



Figur 4-14: Sementpartiklene re orienteres når trykket faller og øker inntrengingen i fine sprekker (Mueller, 2002).



Figur 4-15: "Bridging" - sementpartiklene hindrer injeksjonsmasse å trenge videre inn i fine sprekker (Mueller, 2002)

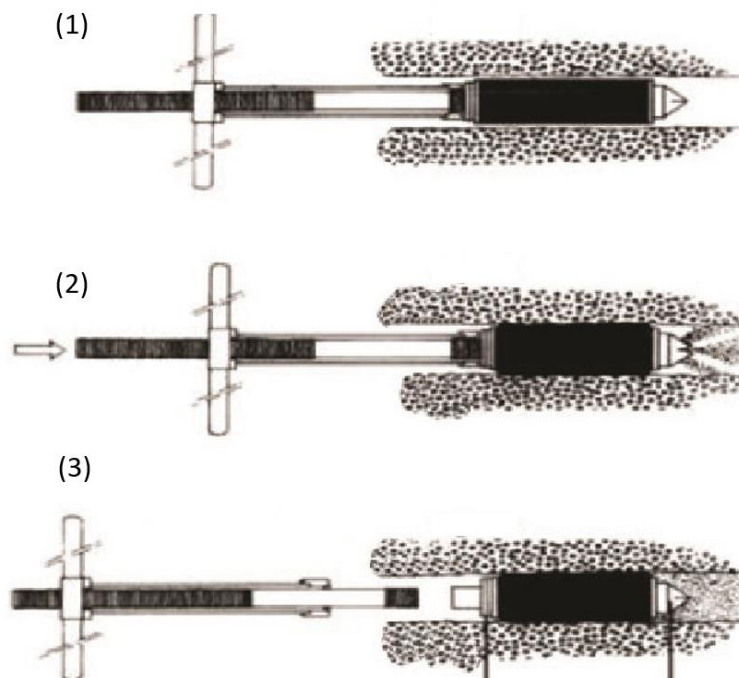
For å kunne utføre høytrykksinjeksjon i berg på en sikker og god måte er det avgjørende å bruke injeksjonspumpe av høy kvalitet. Pumpen bør ha kapasitet som er rikelig i forhold til det maksimale trykket som skal benyttes under injeksjonen. Hognestad et al. (2010) presiserer at en kapasitet på 100 liter per minutt ved 80 % av maksimalt pumpetrykk er ønskelig.

Pakker

Pakkere benyttes for å sikre at den injiserte massen forblir i bergmassen og ikke kommer ut av injeksjonshullene på tunnelstuff. Det finnes pakkere for en- eller flergangsbruk og de kan være enten mekaniske eller hydrauliske. Ulike pakkere er tilpasset ulike trykksoner. Det er derfor svært viktig at pakker velges basert på trykket som skal benyttes ettersom pakkene er ulikt utformet (Hognestad et al., 2010).

Pakkeren er en gummihylse som kan ekspandere, enten med mekanisk kraft eller med hydraulikk. Når pakkeren er plassert i borhullet spennes den opp og holdes på plass av friksjonen mellom gummien og bergmassen. Inne i gummielementet er det et rør som i bakkant kan kobles på injeksjonsstaven. Foran er det en enveisventil som gjør at injeksjonsmassen kan pumpes inn gjennom pakkeren, men ikke komme ut av borhullet (Hegebarth, 2013).

Injeksjonsstaven brukes for å plassere pakkeren i borhullet. Normalt plasseres den 1,5 til 2,5 meter inn i borhullet avhengig av bergmassekvaliteten på tunnelstuff. Alle pakkene må plasseres før injeksjonen kan begynne for å unngå at borhullene smøres av injeksjonsmasse som kan gjøre det vanskelig å få pakkeren til å sitte. Figur 4-16 viser prinsippet for plassering og bruk av engangspakker i borhull (1), injeksjonen gjennom pakkeren (2) og hvordan pakkeren sitter igjen i hullet etter endt injeksjon (3). Som ekstra sikkerhet for de som jobber på tunnelstuff festes pakkerstavene sammen med kjetting. Kjettingen festes deretter i bolter mellom pakkerstavene (Hognestad et al., 2010).



Figur 4-16: Prinsipp for plassering av pakker (Hognestad et al., 2010).

Engangspakker er den mest brukte typen pakker ved berginjeksjon i Norge. Pakkeren spennes opp med injeksjonsstaven og har en låseskive i bakkant som gjør at pakkeren sitter igjen i hullet etter endt injeksjon. Flergangspakkere brukes hovedsakelig til vanntapsmålinger eller til spesielle injeksjonsoppgaver. Flergangspakkere spennes normalt opp hydraulisk ved bruk av vanntrykk. Etter bruk kan pakkeren avlastes og tas ut av borhullet for senere bruk (Hognestad et al., 2010).

I områder med svært stor vannføring og høyt trykk kan det være vanskelig å installere pakkerne. Tuppen på pakkerne kan da fjernes slik at vannet kan strømme ut gjennom pakkeren og injeksjonsstaven på tunnelstuff. I slike tilfeller bør det bores ekstra hull som kan lede bort noe av vannet og avlaste injeksjonshullet (Hognestad et al., 2010).

5 SPENNINGER I BERGMASSEN

In situ spenninger er viktig for å kunne forstå og forklare de geologiske prosessene. Forkastninger, folder, skjærsoner, intrusjoner og innsynkninger er eksempler på strukturer som kan fortelle noe om spenningsbildet i bergmassen (Amadei og Stephansson, 1997).

In situ spenningsene i en bergmasse er sjelden uniforme. De vil, som mange andre geologiske egenskaper, kunne variere fra punkt til punkt og ha ulik verdi avhengig av volumet det måles i. Fordelingen av spenningsene avhenger sterkt av strukturer i bergmassen som foliasjon, diskontinuiteter, heterogenitet, folder og forkastninger. I tillegg påvirkes spenningsene av belastning som har blitt påført bergmassen gjennom hele dens geologiske historie (Amadei og Stephansson, 1997).

For å kunne få et så nøyaktig bilde av spennings situasjonen som mulig, er det utviklet både aktive og passive metoder for å måle bergspenningsene. De passive metodene måler spenningsene indirekte basert på deformasjon eller tøyningmåling. Spenningsen blir deretter estimert basert på målt deformasjon og bergmassens elastiske egenskaper. Ved aktiv metode for måling av in situ bergspenninger påfører målecellen aktivt et trykk mot bergmassen for å motvirke deformasjon (Myrvang, 2001).

I de etterfølgende avsnittene vil beregning av spenningsene basert på geologi og topografi bli presentert. I tillegg blir en aktiv og en passiv målemetode forklart.

5.1 BEREGNE SPENNINGENE I EN BERGMASSE

Å beregne eksakte verdier for spenninger i en bergmasse og deres orientering er svært vanskelig, og i praktisk sammenheng umulig på grunn av de mange faktorene som virker inn. Bergmassen er dessuten sjelden homogen noe som fører til at in situ spenningsene varierer i rommet. I tillegg endres spenningsene over tid som følge av tektoniske hendelser, erosjon og glasiasjon. Beregninger kan derfor kun utføres som beste estimat basert på tilgjengelig informasjon (Amadei og Stephansson, 1997).

Beregning av bergspenningsen tar ofte utgangspunkt i to komponenter. En vertikal (σ_v), som følge av vekten av overliggende masser (se Kapittel 2.2) og en uniform horisontal komponent, $\sigma_h = \sigma_H$, som har verdi lik K multiplisert med σ_v (Formel 5-1). Videre forutsettes det at både σ_v og σ_h er hovedspenningsene (Amadei og Stephansson, 1997). Verdien K vil mange steder i Norge

være større enn 1 og til dels mye større enn 1. Altså er største hovedspenning stort sett horisontal i Norge (Myrvang, 2001).

Beregning av horisontal hovedspenning:

$$\sigma_H = \sigma_v \cdot K \quad (5-1)$$

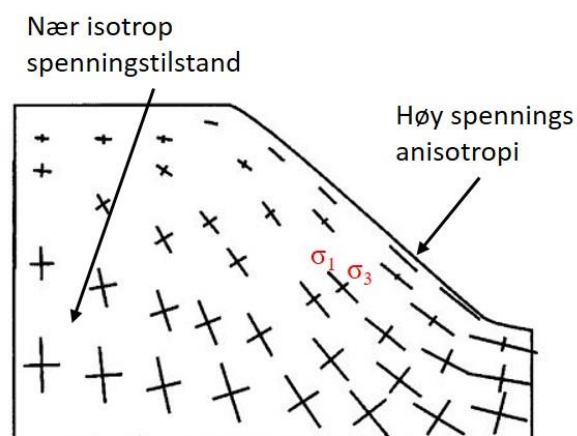
Der: σ_H = horisontal spenningskomponent (MPa)

σ_v = vertikal spenningskomponent (MPa)

K = uniform horisontal spenningskomponent

Hovedspenning er definert som spenningskomponenten som står normalt på et plan der skjærspenningen er lik null. I et hvert punkt i bergmassen er det tre hovedspenninger som står normalt på hverandre, største hovedspenning (σ_1), midlere hovedspenning (σ_2) og minste hovedspenning (σ_3) (Harrison og Hudson, 2000).

I dal- eller fjordsider er orienteringen og delvis størrelsen av største og minste hovedspenning bestemt av de topografiske forholdene. Nær overflaten er største hovedspenning (σ_1) parallell med dalsiden og minste hovedspenning (σ_3) står normalt på dalsiden. Når spenningene betraktes lengre inn i bergmassivet, dreies σ_3 og blir mer horisontal samtidig som den øker noe i verdi. σ_1 dreies også noe og blir mer vertikal (Nilsen og Thidemann, 1993). Figur 5-1 viser hovedspenningenes retninger og relative størrelser i en dalside. Under dalbunner vil det alltid være høye horisontale spenningskonsentrasjoner, særlig dersom det er geologisk betingede spenninger på tvers av dalen (Myrvang, 2001).



Figur 5-1: Hovedspenningenes retninger og relativ størrelser i en dalside. Modellen er påført tektoniske horisontalspenninger (Figur modifisert etter Nilsen og Broch, 2012).

5.2 AKTIV MÅLEMETODE

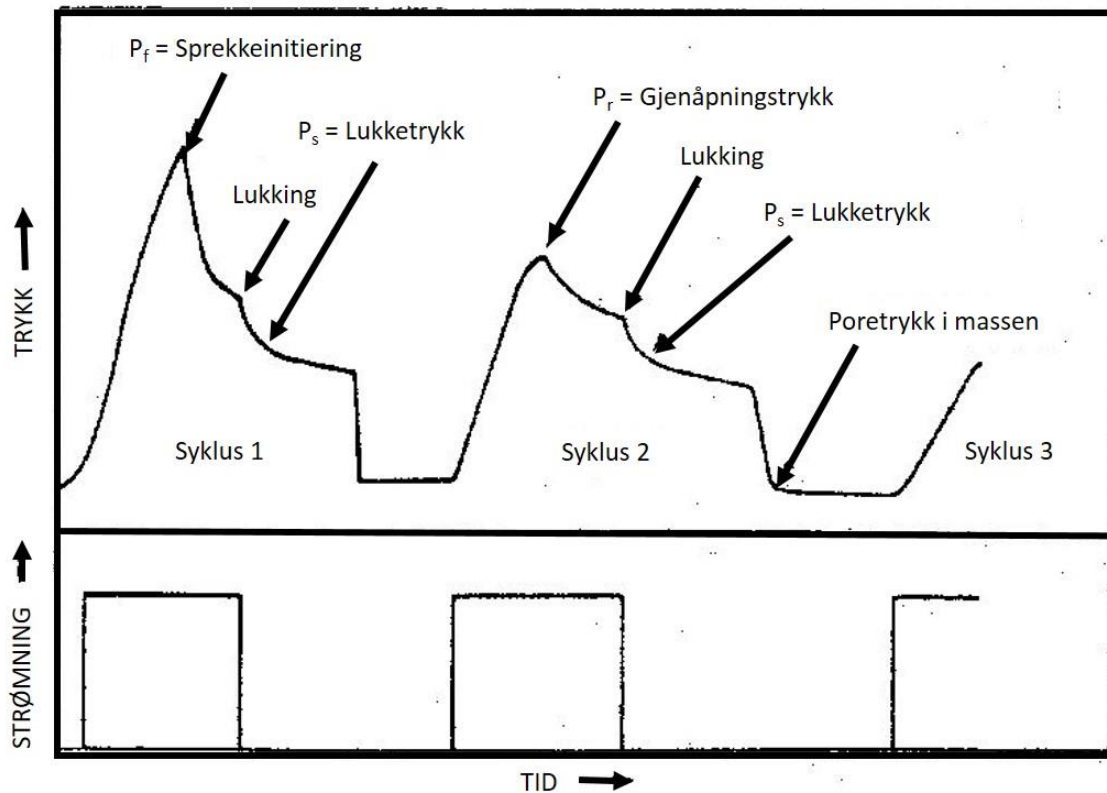
Hydraulisk splitting er en aktiv målemetode som benyttes for å måle in situ spenninger i bergmassen. Målingene utføres gjennom et borhull som bores vertikalt fra dagen inn i bergmassen eller i vegg/heng i et eksisterende bergrom. Målingene gir størrelse og retning på minste og største spenning i planet vinkelrett på borhullet testen utføres gjennom (ISRM, 1987).

Borhullet blir delt inn i seksjoner med en pakke i hver ende av seksjonen. Minimumsavstand mellom pakkerne er anbefalt å være fem ganger diameter til borhullet, normalt 0,9-1 meter. Det er viktig at pakkerne plasseres i områder med intakt berg for å unngå lekkasje ut av testseksjonen (ISRM, 1987).

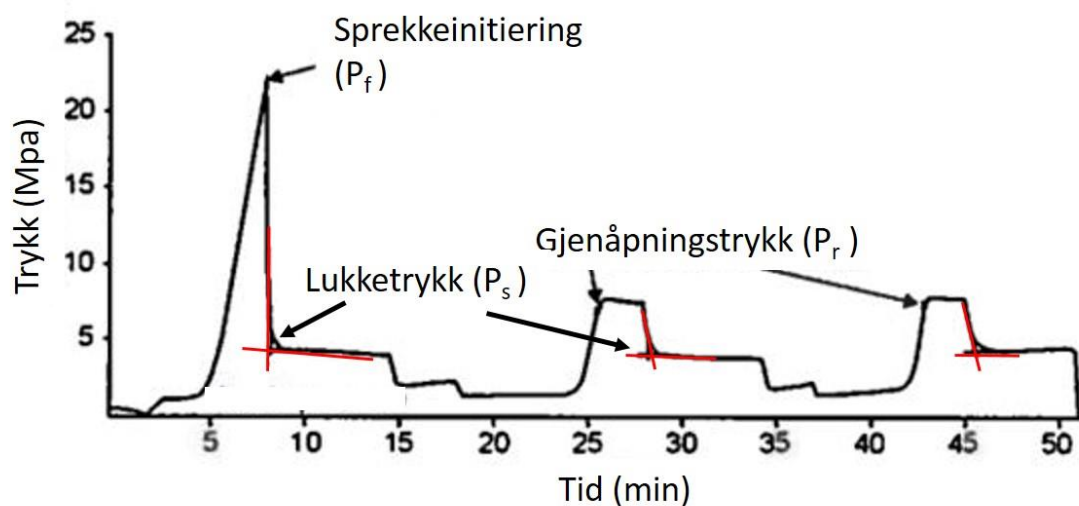
Pakkerne består av gummibelger som blåses opp med enten vann- eller lufttrykk. Trykket i pakkerne registreres med trykkmålere. Mellom pakkerne er det et perforert stålrør som gjør at vann kan pumpes inn i seksjonen gjennom høytrykksrør eller -slinger som er koblet til høytrykkspumpe med trykk- og strømningsmåler. Rørene/slangene brukes også til å plassere utstyret inne i borhullet. Det blir benyttet vanntrykk for å teste de ulike seksjonene. Det er viktig at trykket i pakkerne til enhver tid er høyere enn vanntrykket inne i testseksjonen for å sikre at det ikke blir lekkasje ut av seksjonen (ISRM, 1987).

Trykket inne i testseksjonen økes inntil det skjer en eventuell splitting. Trykket ved splitting kalles p_f . Etter første splitting er initiert fortsettes pumpingen inntil sprekken har spredt seg anslagsvis 2-3 hulldiameter inn i bergmassen. Deretter stenges systemet med en ventil og lukketrykket, p_s registres. Verdien for p_s tilsvarer minste hovedspenning i bergmassen. I tillegg til å registre trykk/tid-forløpet registreres også strømming/tid-forløpet (ISRM, 1987).

Figur 5-2 viser et idealisert forløp av testen med trykk- og volumforløp i tre sykluser. For å finne p_s er det vanlig å legge inn tangenter på kurven i Figur 5-2, og definere p_s som krysningen mellom de to tangentene, vist i Figur 5-3 (Myrvang, 2001).



Figur 5-2: Idealisert forløp av hydraulisk jekking test med tre sykluser (Figur modifisert etter ISRM, 1987)



Figur 5-3: Virkelig splittekurve ved hydraulisk jekking. Tangenter er tegnet inn på kurven for å finne lukketrykket (Figur modifisert etter Myrvang, 2001).

Det er vanlig å utføre 3 til 4 sykluser i samme seksjon. Mellom syklusene senkes trykket helt og pumpingen begynner på nytt. Hvis det i første syklus forekom en splitting, vil det i de påfølgende syklusene skje en gjenåpning av sprekken ved et lavere trykk, p_r . Differansen

mellom p_f og p_r , er tilnærmet lik bergartens tensilestyrke. Lukketrykket i alle syklusene vil være den samme, og med flere sykluser vil denne derfor bli enklere å finne (Myrvang, 2001).

For å finne retningen til største hovedspenning føres en avtrykkspakker ned i borhullet etter at splitterutstyret er fjernet. Avtrykkspakkeren har en myk overflate i gummiblanding og er koblet til et orienteringsinstrument som gjør at pakkerens orientering er kjent. Når pakkeren er plassert i korrekt dyp blåses den opp, og den myke gummioverflaten presses mot hullveggen og lager et avtrykk der sprekker er synlig. Ved å kjenne orienteringen til pakkeren og de hydrauliske sprekkeene, kan retningen til største hovedspenning bestemmes (ISRM, 1987). Alternativt kan det benyttes optisk eller akustisk televiwer. Ved bruk av televiwer må et orienteringsinstrument være tilkoblet for å finne nøyaktig orientering (Myrvang, 2001).

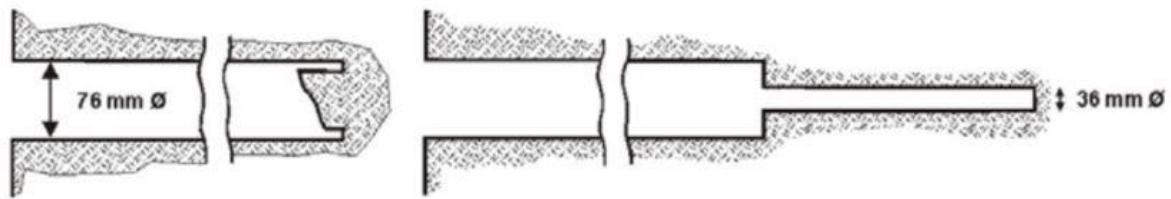
Hydraulisk splitting er hovedsakelig egnet for målinger på dyp >50 meter og som er utilgjengelige med andre målemetoder. En forutsetning i metoden er at borhullet målingene utføres gjennom er parallelt med en av hovedspenningsretningene. Ved å benytte et vertikalt borhull anses dette kriteriet som oppfylt og denne spenningen blir beregnet basert på overdekning. Dersom borhullet avviker mer enn $\pm 15^\circ$ fra en hovedspenningsretning blir målingene ansett som usikre. Metoden er mest nøyaktig når materialet den blir benyttet i er sprøtt, homogent, elastisk, isotropt og ikke-porøst (ISRM, 1987).

Beregning av største hovedspenning er ikke tatt med her, men det henvises til ISRM (1987) for beskrivelse av metoden.

5.3 PASSIV MÅLEMETODE

Tredimensjonal (3D) bergspenningsmåling er en passiv målemetode der tøyning måles in situ og sees i sammenheng med spenning og tøyning målt i laboratoriet. Bestemmelse av spenninger i tre dimensjoner gjøres normalt med 7-10 uavhengige målinger i sub-horisontale borhull. Spenningene beregnes ved bruk av et dataprogram, for eksempel DISO (Determination og In-situ Stress by Overcoring) som er utviklet av SINTEF (SINTEF, 2005). Prinsippet for utførelse av 3D bergspenningsmåling er forklart stegvis med tekst og figurer under.

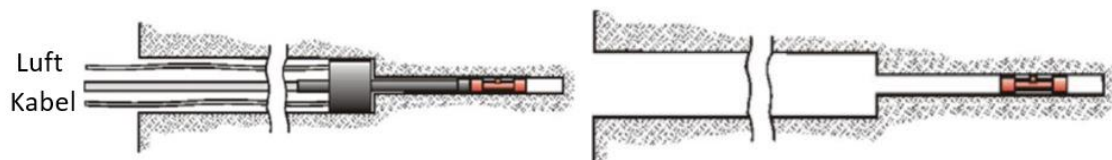
Et kjerneborhull med 76 mm som ytre diameter bores til ønsket dyp. Hullbunnen flates ut med en spesiell borkrone og et hull med diameter på 36 mm bores konsentrisk videre inn omtrent 30 centimeter som vist i Figur 5-4 (SINTEF, 2005).



Figur 5-4: 76 mm borhull og konsentrisk borhull med diameter 36 mm (SINTEF, 2005).

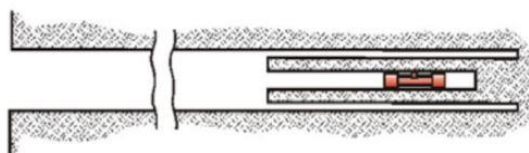
Målecellen installeres med et spesielt installasjonsverktøy som inneholder et orienteringsinstrument. Til målecellen er det koblet en kabel som går ut til avlesningsinstrumentet og en tynn slange som fører trykkluft. For å oppnå tilfredsstillende liming mellom målecellen og hullveggen, må hullveggen være tørr og uten sprekker (SINTEF, 2005).

I hver målecelle er det tre strekkapposetter som limes til hullveggen i ulike vinkler. I hver av rosettene er det tre strekkapper som måler tøyning. De tre rosettene er støpt inn i en plastplugg som har samme ytre diameter som den indre diameteren i det lille borhullet. Når målecellen er orientert og på plass i hullet brukes trykkluft til å blåse opp cellen og presse rosettene mot hullveggen. Når limet har herdet (ca. 20-30 minutter), utføres nullavlesingen av de 9 (3x3) strekkappene. Deretter fjernes installasjonsverktøyet og cellen er klar for overboring (Myrvang, 2001). Figur 5-5 viser innsetting av målecellen.



Figur 5-5: Installering av målecellen (SINTEF, 2005).

Det lille borhullet der målecellen er installert overbores av 76 mm kjerneborutstyr (Figur 5-6). Overboringen avlaster kjernen og tøyning på hullveggene registreres av strekkappene. Kjernen tas ut og en ny avlesning utføres umiddelbart etter kjernen er ute av hullet, mens målecellen fortsatt sitter inne i kjernen, vist i Figur 5-7 (SINTEF, 2005).



Figur 5-6: Overboring av målecellen (SINTEF, 2005).



Figur 5-7: Andre avlesning etter at kjernen er tatt ut av borhullet (SINTEF, 2005).

Basert på de to avlesningene får en 9 tøyningskomponenter, 6 av disse er nødvendig for å kunne beregne den tredimensjonale spenningstilstanden (Myrvang, 2001).

E-modul og Poissons forhold for bergarten må bestemmes for å kunne beregne spenningene. Ved å bore omtrent 20 centimeter forbi det lille hullet når målecellen tas ut, kan den intakte kjernebiten brukes til å bestemme E-modul og Poissons forhold i laboratoriet (SINTEF, 2005).

Beregning av in situ spenningene ved 3D bergspenningsmåling er basert på en rekke antakelser. Antakelsene ved metoden er oppsummert av Amadei og Stephansson (1997) og gjengitt her:

1. Spenningene som blir utløst under overboring er like spenningene som var i bergmassen da denne var i pre-overboring miljø.
2. Diameteren på overboringen har ingen effekt på spenningsmålingene.
3. Bergmassens respons på overboring er elastisk, og det er ingen forskjell på de elastiske egenskapene til bergmassen ved av- og pålasting.
4. Bergmassen er kontinuerlig og homogen.
5. Borhullet målingene utføres fra er sirkulært og har glatt/jevn overflate.
6. Bergmassen deformeres med jevn deformasjon eller jevn spenning.
7. In situ spenningsfelt er tredimensjonalt.

6 HYDRAULISK JEKING AV BERGMASSEN, ULIKE TEORIER

Hydraulisk jekking i en bergmasse forekommer når det påførte trykket overgår det trykket av minste hovedspenning i bergmassen pluss den tensilestyrken til bergmassen. Resultatet blir tensilt brudd. Hydraulisk jekking kan skje både naturlig i en bergmasse, eller det kan initieres gjennom menneskelige prosesser (Fjær et al., 2008).

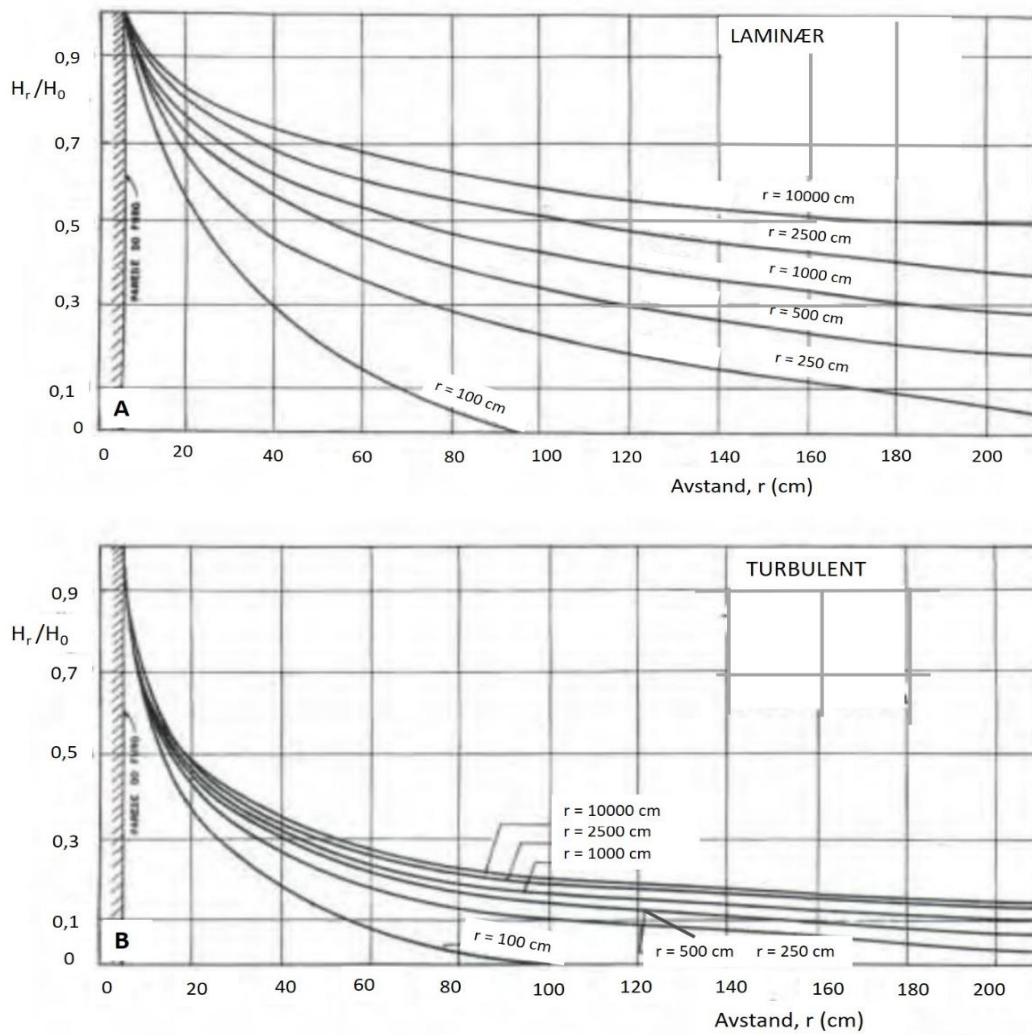
Ved injeksjon bores en injeksjonsskjerm inn i bergmassen i driveretningen. Borhullene krysser nettverket av sprekker i bergmassen. Når injeksjonsmasse pumpes inn i hullene blir massen presset inn i sprekkeveggene og fyller disse. For å få pumpet inn injeksjonsmasse må injeksjonstrykket være høyere enn det stedlige vanntrykket (Stille, 2015). Trykket påført sprekkeveggene nærme borhullet vil være omtrent det samme trykket som injeksjonsmassen pumpes inn med. Trykket vil imidlertid synke svært raskt utover i sprekkeveggene fra borhullet (Gustafson og Stille, 2005).

I dette kapitlet er ulike teorier om hydraulisk jekking presentert. Det finnes ikke én rådende teori og det blir derfor presentert flere med ulike synspunkt her. Selv om teoriene i utgangspunktet er ulike, bygger de på mange av de samme elementene og det er mulig å se flere likhetstrekk mellom dem.

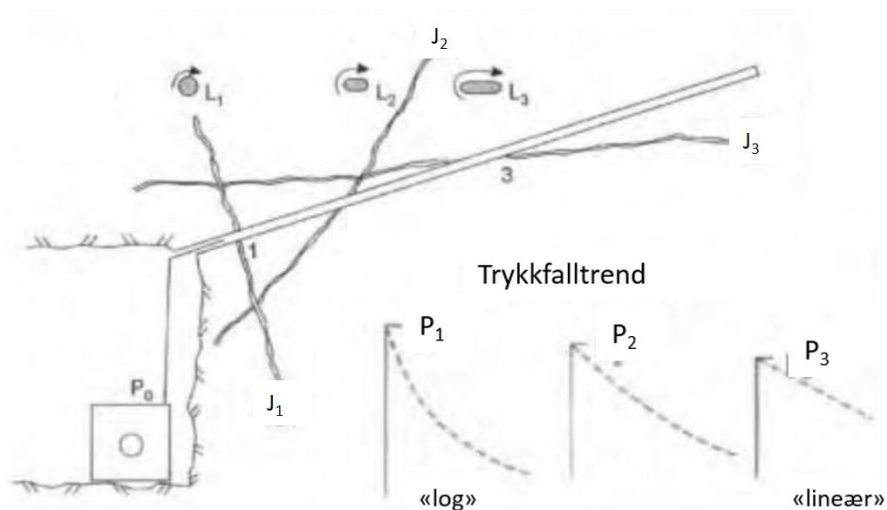
6.1 INFLUENSRADIUS

Det er vanskelig å bestemme influensradien til injeksjonen. Trykket faller raskt når avstanden fra borhullet som injiseres øker. Figur 6-1 viser laminær (A) og turbulent (B) strømming, med antatt radiell strømming ved 90° mellom borhull og sprekkevinkel.

Forholdet mellom H_r (trykk ved radius r) og H_0 (trykket fra injeksjonspumpen) (H_r/H_0) beskriver trykkfallet til radius (r). Det er rimelig å anta 40 til 80 % trykkfall 1 meter radius fra injeksjonshullet ved radiell strømming. I tilfeller der sprekkeveggene danner en spissere vinkel med borhullet vil spredningen av injeksjonsmasse være mer elliptisk, og trykkfallet blir nærmere lineært, vist i Figur 6-2 (Barton, 2003).



Figur 6-1: Trykkfallsforløpet ved radiell strømning med laminær (A) og turbulent (B) strømning ved ulike influensradier (Barton, 2003).



Figur 6-2: Trykkfallet er avhengig av skjæringsvinkelen mellom borhullet som injiseres og sprekkenes masse trenger inn i. I figuren er det antatt laminærstrømning og konstant (ikke deformert) sprekkeåpning (Barton, 2003).

Siden injeksjonsmassen følger minste motstands vei og fyller de største sprekken først vil normalt sprekken som i utgangspunktet lekker vann inn i injeksjonshullet være de første til å fylles med injeksjonsmasse. Ved å øke trykket oppnås «den ønskede effekten» av lokal hydraulisk jekking som gir innstrømning i sprekker som i utgangspunktet hadde sprekkefylling eller for liten åpning for at injeksjonsmassen kunne trenge inn. For å unngå uønsket hydraulisk jekking er det derfor viktig med nøye oppfølging av injeksjonsprosessen (Barton, 2003).

6.2 SPENNINGENE RUNDT BORHULLET

Kirsch introduserte i 1898 to formler som kan brukes for å beregne variasjonen i tangentialspenninger i et homogent og isotropt elastisk materiale. Av formlene kommer det frem at største tangentialspenning oppstår der tunneloverflaten er parallell med retningen til største hovedspenning og minste tangentialspenning oppstår der tunneloverflaten er parallell med retningen til minste hovedspenning. Ved tilstrekkelig spenningsanisotropi kan minste tangentialspenning bli negativ. Kirsch's formler for beregning av største og minste tangentialspenning er gitt ved:

$$\sigma_{t \max} = 3\sigma_1 - \sigma_3 \quad (6-1)$$

$$\sigma_{t \min} = 3\sigma_3 - \sigma_1 \quad (6-2)$$

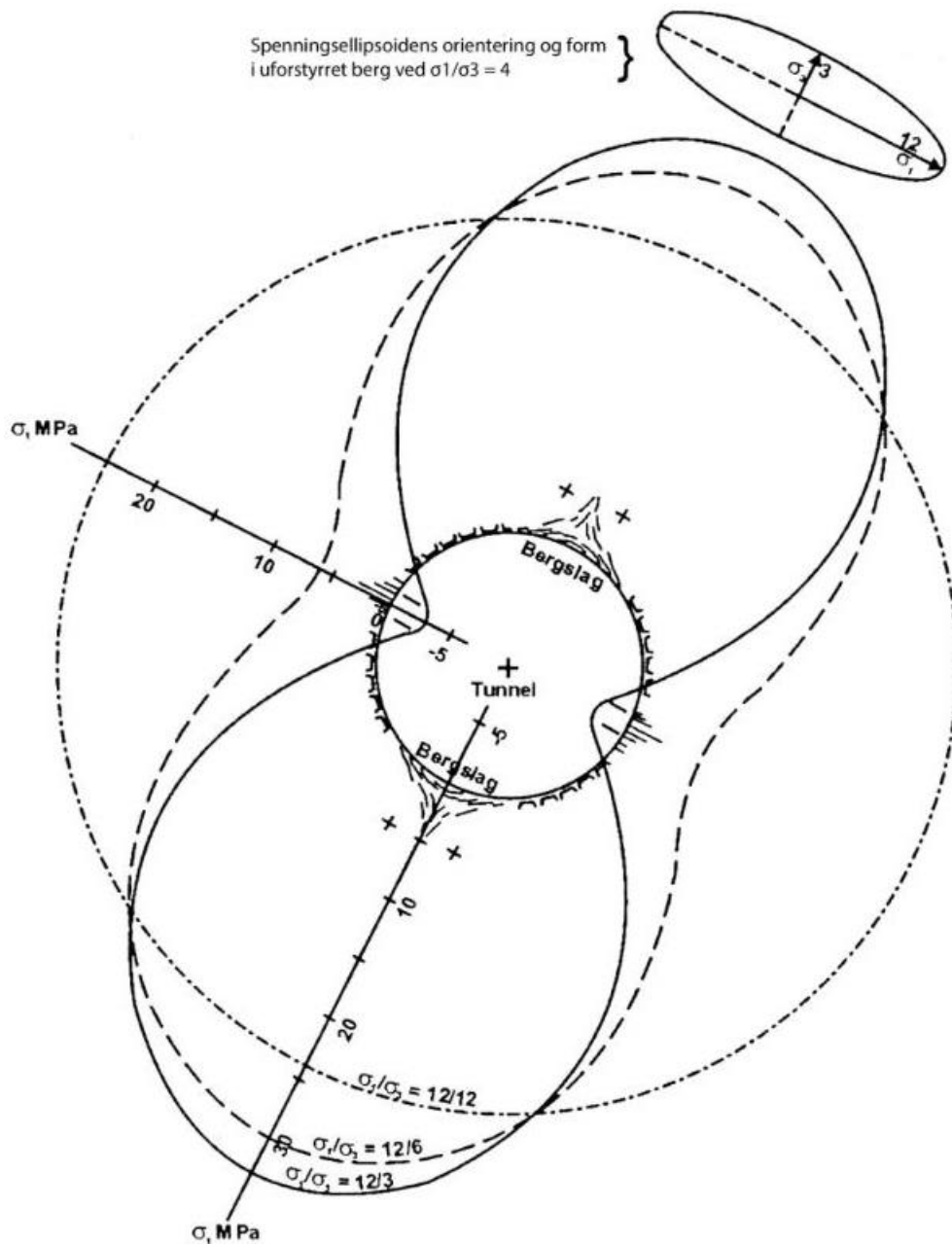
Der: $\sigma_{t \max}$ = største tangentialspenning (MPa)

$\sigma_{t \min}$ = minste tangentialspenning (MPa)

σ_1 = største hovedspenning (MPa)

σ_3 = minste hovedspenning (MPa)

I et injeksjonshull er det den minste tangentialspenningen som er av interesse ettersom økende trykk i borhullet fører til at tangentialspenningen reduseres tilsvarende. Når injeksjonstrykket blir større enn minste tangentialspenning kan derfor hydraulisk jekking av bergmassen initieres (Fjær et al., 2008). Figur 6-3 viser en grafisk fremstilling av resultatet av beregninger av tangentialspenningen ved bruk av Kirsch's formel rundt en sirkulær åpning. Forholdet mellom største og minste hovedspenning (σ_1/σ_3) varierer mellom 1, 2 og 4 i de tre inntegnede tilfellene. I figuren forutsettes det et isotropt og homogent medium uten indre friksjon (Selmer-Olsen, 1966).



Figur 6-3: Fordeling av tangentialspenning rundt sirkulær åpning med ulike forhold mellom største og minste hovedspenning (Selmer-Olsen, 1966).

6.3 AVLASTING AV KONTAKTASPERITER

Tidlig i injeksjonsprosessen er injeksjonstrykket lavt mens injeksjonsmassen fyller tilgjengelig hulrom i borhullet. Etter hvert fylles sprekkeene nærme borhullet opp, og injeksjonsmassen må transporteres større distanser inne i sprekkeene. Motstanden fra injeksjonsmassens viskositet øker og strømmingen synker (Gothäll og Stille, 2009).

Når injeksjonsmassen har fylt opp tilgjengelig hulrom mellom asperitene på sprekkeplanene, øker trykket i injeksjonsmassen og deler av normalspenningen på sprekkeplanet overføres til

injeksjonsmassen. Dette fører til reduserte spenninger rundt kontaktasperiene og gir et mer homogent spenningsprofil i sprekken. Det er viktig å være klar over at de totale spenningene i bergmassen ikke vil endres med mindre alle kontaktasperitene i regionen har blitt fullstendig avlastet (Gothäll og Stille, 2009).

Gothäll og Stille (2009) deler avlastingen av kontaktasperitene inn i tre regimer:

1. **Lavt trykk regime:** Spenningen er hovedsakelig «båret» av kontaktasperitene. Utvidelse av sprekken skjer i samme skala som den elastiske avlastingen av asperitene. Denne er relativt liten og ikke av praktisk betydning for injeksjonsprosessen.
2. **Det kritiske regime:** Trykket fra injeksjonsmassen og spenningene i asperitene er omtrent like hverandre og disse er lik normalspenningen. Deformasjonen av bergmassen er omtrent konstant og utvidelsen av sprekken er fortsatt liten sammenliknet med sprekkeåpningen. Stor økning i sprekkeåpning forventes å skje i overgangen mellom andre og tredje regime.
3. **Post-kritisk regime:** Asperitene er ikke lengre i kontakt og injeksjonstrykket er høyere enn normalspenningene. Dette fører til økt belastning på bergmassen. Skjærstyrken langs sprekkeplanet reduseres til null, og dersom sprekkeutsettes for skjærspenninger vil disse enten re-distribueres til en annen del av sprekken eller det skjer et skjærbrudd.

Det er kun den delen av injeksjonstrykket som overgår de initiale spenningene i bergmassen som påfører bergmassen last og kan føre til hydraulisk jekking. Dersom overskuddstrykket er lite og penetrasjonslengden til injeksjonsmassen kort vil kun en liten del av bergmassen nær borhullet som injiseres bli påvirket. Dette kommer av det raske trykkfallet ut fra det injiserte hullet (Stille, Gustafson og Hassler, 2012).

Hydraulisk jekking vil hovedsakelig forekomme i sprekke med størst sprekkeåpning. Det kan antas at de mindre sprekke lukkes som følge av jekking av større sprekker. Deformasjonen som skjer under hydraulisk jekking er sterkt avhengig av bergmassens elastiske- og deformasjonsegenskaper. Det meste av deformasjonen som skjer under jekking er antatt å være elastisk. Hvis trykket økes ytterligere etter jekking er initiert vil deformasjonen øke, og til slutt vil det skje en endelig jekking («ultimate jacking») (Stille, Gustafson og Hassler, 2012).

Brantberger, Stille og Eriksson (2000) foreslår en formel for å beregne maksimumstrykket som ville føre til endelig jekking av fortrinnsvis horisontale sprekker. Denne formelen er basert på spredningen av injeksjonsmassen. Stille, Gustafson og Hassler (2012) presenterer en forenklet

formel basert på Brantberger, Stille og Eriksson (2000) sin. I denne formelen er relativt injeksjonstrykk (p_n) gitt ved:

$$p_n = \frac{\Delta p_g \cdot k_2}{3\rho gh} \quad (6-3)$$

Der: Δp_g = effektivt injeksjonstrykk (injeksjonstrykk minus vanntrykk) (bar)

k_2 = parameter som beskriver den åpne delen av sprekken, settes normalt til 1

ρ = tetthet til overliggende masser (kg/m^3)

g = gravitasjonsakselerasjon (m/s^2)

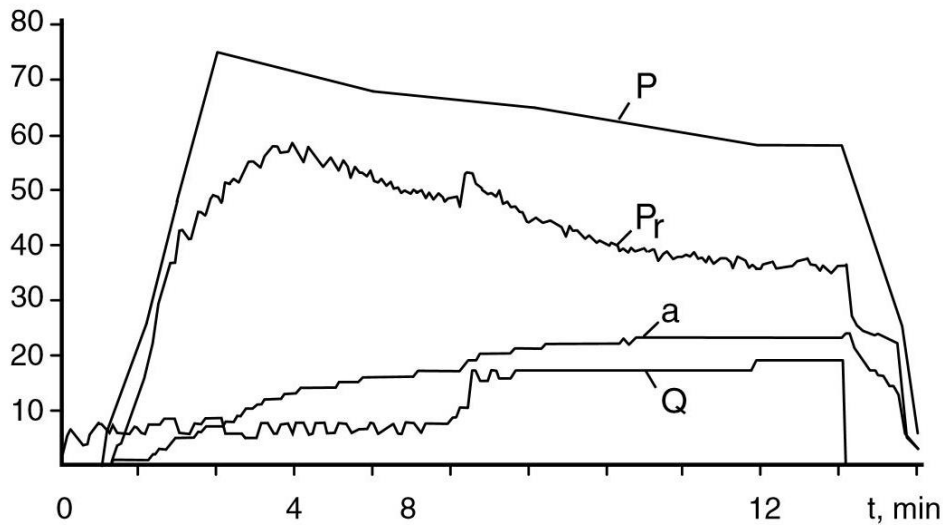
h = tykkelsen av overliggende masser (m)

Antatt σ_3

Formelen gir at endelig jekking skjer ved trykk som er tre ganger så stor som minste hovedspenning i bergmassen ($p_n = 1$) (Stille, 2015). Stille, Gustafson og Hassler (2012) regnet ut akseptabelt injeksjonstrykk for unngå jekking over 10 μm , verdien av tilhørende p_n ble også funnet. I sterke bergarter ble det funnet at ved $p_n > 0,63$ vil utvidelsen av sprekken overstige 10 μm , mens for svake bergarter var verdien $p_n = 0,35$. I sterke bergarter vil altså utvidelsen av en sprekke være så liten at den ikke er av praktisk betydning når utregnet $p_n < 0,63$.

Penetrasjonslengden til injeksjonsmassen er av stor betydning for hvor mye trykk bergmassen utsettes for. Når penetrasjonslengden øker, vil også trykket på bergmassen øke selv om pumpetrykket holdes konstant. Årsaken er at trykket da fungerer over et større areal som fører til større utvidelse av sprekken som jekkes. Figur 6-4 viser hvordan pumpetrykket (P) og trykket inne i en sprekke (P_r) synker, samtidig som sprekkeåpningen (a) og strømmingen (Q) øker. Figuren er laget basert på tester i betong med en sprekke med 18 bar normalspenning. Utvidelse av sprekker kan bre seg betydelige avstander fra borhullet, også utenfor den sonen som er injisert (Gothäll og Stille, 2009).

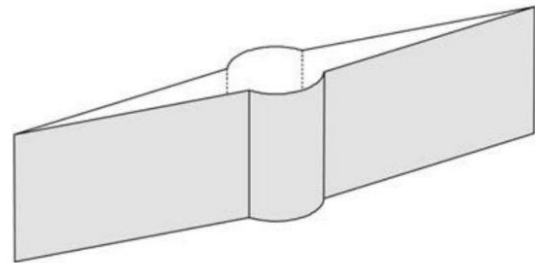
Figur 6-4 viser at sprekkeåpningen øker noe når injeksjonsvæsken når trykksensoren som er plassert 5 centimeter inn i sprekken. Like etter overstiger væsketrykket på dette punktet normalspenningen og sprekkeåpningen begynner å øke. Etter dette punktet er det ikke lenger noen spenningsfordeling over sprekken, og deformasjonen avhenger kun av stivheten til testriggeren.



Figur 6-4: Deformasjon av en sprekk med 18 bar normalspenning i betong. P er pumpetrykk (bar), P_r er trykket 5 cm inn i en sprekk (bar), a er sprekkeåpningen (mm/100) og Q er strømning ($\text{cm}^3/\text{s}/10$) (Gothäll og Stille, 2009).

6.4 TEORETISK BESKRIVELSE AV JEKING FRA PETROLEUMSINDUSTRIEN

I petroleumsindustrien oppstår hydraulisk jekking ved å øke væsketrykket i et borhull til det punktet der minste hovedspenning langs borhullet blir tensil. Videre økning av trykket fører til jekking av bergmassen og en sprekk vil forplante seg i retningen av minste hovedspenning. Ut fra borhullet dannes det to symmetriske sprekker normalt på minste hovedspenning, vist i Figur 6-5. En hydraulisk jekket sprekk vil, dersom den ikke er fylt med materiale lukkes etter at trykket blir fjernet (Fjær et al., 2008).



Figur 6-5: Vertikale sprekker dannet symmetrisk fra et vertikalt borhull (Fjær et al., 2008).

Dersom det før injisering i borhullet finnes sprekker i bergmassen som borhullet er i kontakt med, vil trykket som skal til for å gjenåpne disse sprekkene kunne forklares som:

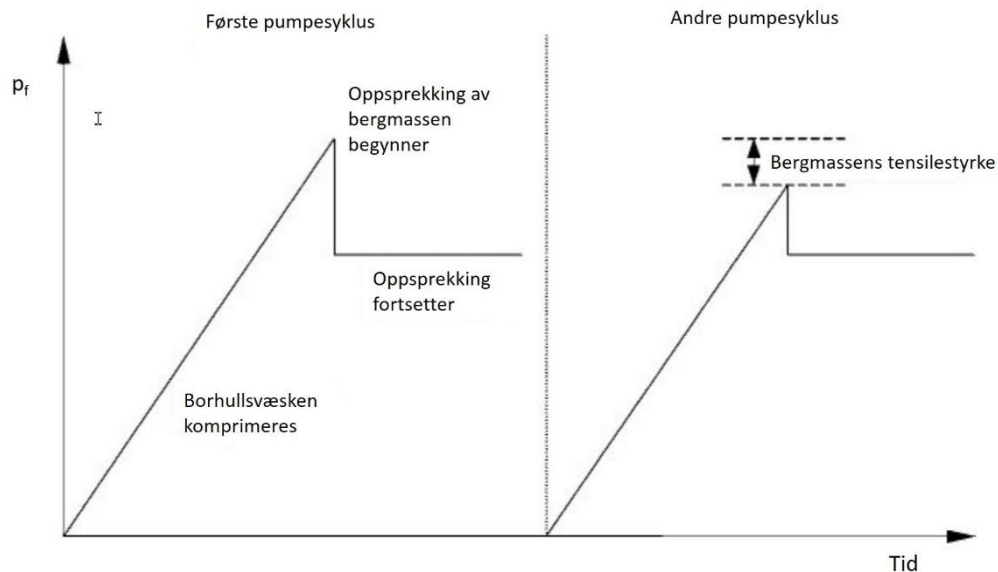
$$\sigma - p_f < 0 \quad (6-4)$$

Der: σ = spenningene rundt borhullet (MPa)

p_f = poretrykket (MPa)

Bruddtilstand kan enten nås ved å øke trykket inne i borhullet eller ved å redusere spenningene rundt borhullet (Fjær et al., 2008).

Ved å studere trykk/tid-grafen for et injeksjonsforløp kan tidspunktet og trykket der hydraulisk jekking finner sted identifiseres. I et idealisert tilfelle der største hovedspenning er vertikal, de to horisontal spenningene er like stor og bergmassen er isotrop, homogen og lineær elastisk, vil grafen kunne se ut som i Figur 6-6.

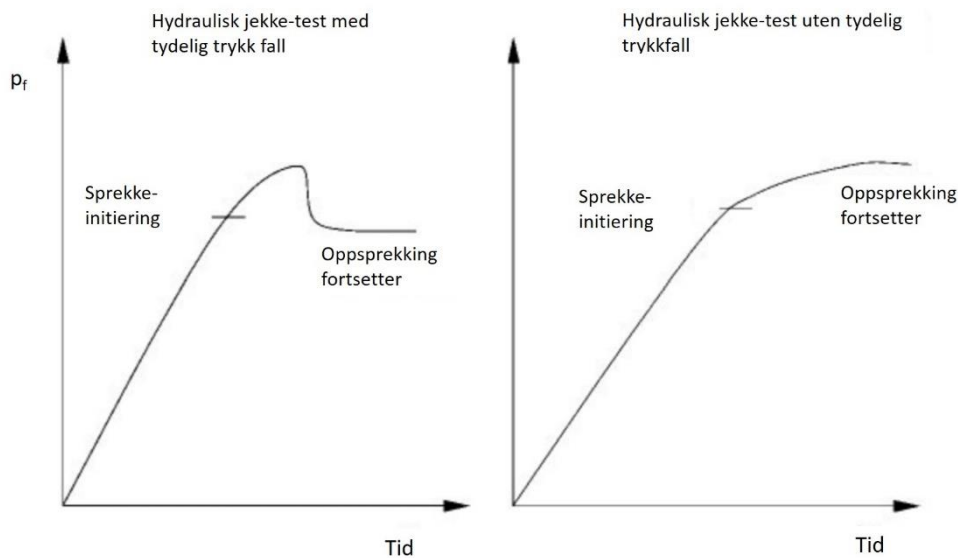


Figur 6-6: Idealisert forløp av trykket i borhullet under hydraulisk jekking. To pumpesykluser er presentert (Fjær et al., 2008).

Den første lineære delen av grafen representerer elastisk deformasjon av bergmassen og kompresjon av injeksjonsvæsken. Toppunktet på grafen angir trykket som initierer oppsprekking av bergmassen. Dette trykket vil tilsvare størrelsen på minste hovedspenning pluss bergmassens tensilestyrke. Når dette trykket er nådd faller trykket i borhullet svært raskt. Trykkfallet indikerer en situasjon der åpningen av sprekken skjer raskere enn injeksjonsmassen pumpes inn. Videre injisering vil til slutt føre til en stabil utvidelse av den åpne sprekken (Fjær et al., 2008).

Den andre kurven i Figur 6-6 viser forløpet dersom samme borhull ble trykksatt i en ny syklus. Ettersom det ble dannet en sprekke i første syklus vil eneste motstand mot gjenåpning av denne sprekken være spenningssituasjonen rundt borhullet. Forskjellen i trykket som gir toppunktet på de to grafene vil derfor i et ideelt tilfelle være bergmassens tensilestyrke. I realiteten vil ikke det skje siden tilstedeværelsen av den nye sprekken kan gjøre den effektive spenningskonsentrasjonen lavere enn i første syklus (Fjær et al., 2008).

Figur 6-7 viser to mer realistiske forløp av trykk/tid-grafen ved hydraulisk jekking. Grafen til venstre har et tydelig trykkfall etter oppsprekking, mens grafen til høyre kun flater ut etter sprekkeinitiering. I noen tilfeller er det lett å indentifisere punktet der sprekkeinitiering begynner (til venstre i Figur 6-7), mens i andre tilfeller kan dette være svært vanskelig (til høyre i Figur 6-7). Årsaken til forskjellene er ikke fullstendig forstått, men noen sannsynlige årsaker kan være dannelse av filterkake i injeksjonsmassen, spenningsavhengige elastiske egenskaper, effekten av temperatur eller lekkasje fra pakkeren (Fjær et al., 2008).



Figur 6-7: Realistisk trykkforløp ved hydraulisk jekking i vertikalt borhull. Eksempelen til venstre har tydelig trykkfall etter oppsprekking. Til høyre er ikke dette tilfellet der grafen kun flater ut etter sprekkeinitiering (Fjær et al., 2008).

Bergmasser som injiseres er normalt oppsprukket før injeksjonen begynner. Dette gjør indentifisering av når hydrauliske jekking av de eksisterende sprekke begynner enda vanskeligere. Studie utført av Morita, Black og Fuh (1996) viste at sprekker initiert fra borhullsveggen kunne vokse betydelig (flere cm) før sprekken ble ustabil, og mulig å observere på trykkgrafen. Årsaken er at det kan dannes en filterkake i åpningen til sprekken fra borhullet som beskytter sprekken fra trykket i borhullet. Et visst overtrykk i borhullet er derfor nødvendig for å initiere ustabil jekking av sprekken (Fjær et al., 2008).

I en bergmasse med anisotrop spenningsfelt som inneholder sprekker før injiseringen begynner kan hydraulisk jekking initieres ved trykk som er lavere enn minste hovedspenning. I slike tilfeller vil trykket som kreves for at sprekken skal utvikle seg etter første initiering være høyere enn initieringstrykket. Fjær et al. (2008) presenterer to formler som kan brukes for å regne ut dette trykket ($p_{w,max}^{Oppsprek}$):

$$p_{w,max}^{Oppsprek} = \frac{3\sigma_3 - \sigma_1}{2} \quad (6-5)$$

$$p_{w,max}^{Oppsprek} = \sigma_3 + \frac{\sigma_3 - \sigma_1}{2} \quad (6-6)$$

Formlene er basert på idealiserte tilfeller. I virkelig injeksjon er hydraulisk jekking av sprekker avhengig av spenningssituasjonen, borhullets orientering og helning, bergmassens egenskaper (tensilstyrke, permeabilitet osv.), injeksjonsmassen og injeksjonsprosessen. Samlet kompliserer disse faktorene betraktningen så mye at formlene ikke vil være representative for virkelige injeksjonsprosjekter i tunnel (Fjær et al., 2008).

6.5 JEKING – POSITIVT ELLER BARE NEGATIVT?

Rafi og Stille (2015b) utførte en studie der de sammenliknet de positive og negative effektene av hydraulisk jekking ved injeksjon i en bergmasse. De definerte økt spredning av injeksjonsmasse som eneste positive effekt ved hydraulisk jekking. Av negative effekter er økt tidsforbruk til injeksjon og redusert tetningseffektivitet nevnt. Studien konkluderer med at bruk av høyt injeksjonstrykk kan ha negativ effekt på injeksjonsprosessen totalt sett, og at denne effekten er betydelig særlig i oppsprukket, svake bergmasser med liten overdekning. Videre konkluderes det at uønsket deformasjon av sprekker og deres negative konsekvenser kan unngås ved å definere et passende stoppkriterie for de lokale forholdene i forkant av injeksjonen.

Hognestad et al. (2010) påpeker at i sprekker med sprekkefylling og/eller i områder der det er vanskelig å få inn injeksjonsmasse i de vannførende kanalene, kan jekking gi en positiv effekt. Elastisk jekking kan dessuten være positivt dersom målet kun er å tette de største sprekke i bergmassen (Stille, Gustafson og Hassler, 2012).

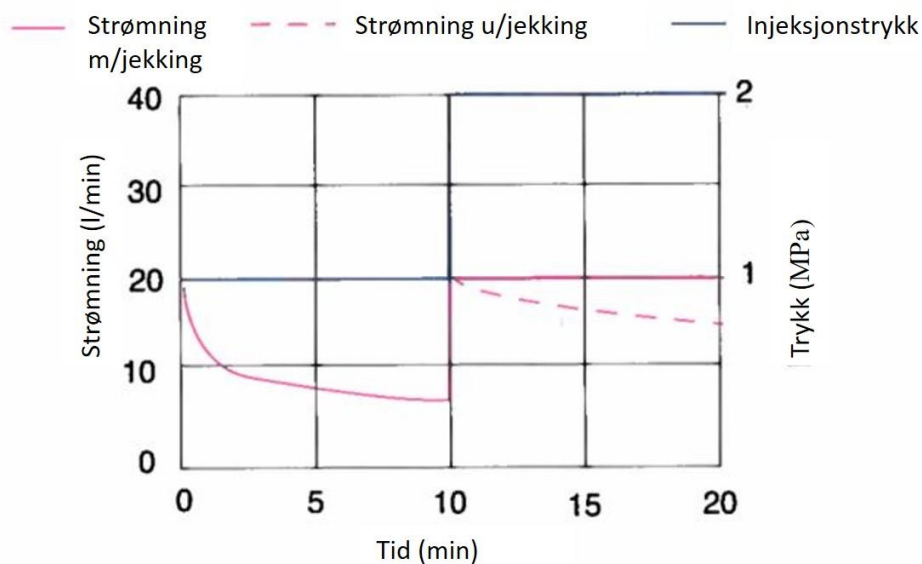
6.6 OPPSUMMERING OG TEORI BENYTTET I STUDIEN

Fra borhullet strømmer injeksjonsmassen inn i sprekker og hulrom som har forbindelse med hullet som injiseres. Når trykket i injeksjonsmassen øker, vil det kunne overskride bergspenningene og føre til jekking av bergmassen. Dette vil føre til utvidelse av eksisterende sprekker (Stille, 2015).

Jekking av bergmassen kan observeres på trykk/tid-grafen ved å følge trykkoppbyggingen under injeksjonen. Trykket vil til å begynne med bygges gradvis opp før det stabiliseres på et

nivå. Hvis trykket plutselig faller eller strømningshastigheten øker brått, tyder det på at injeksjonsmassen har «funnet» nye kanaler eller hulrom (Hognestad et al., 2010).

Stille (2015) presiserer at å beskrive strømming og spredning av injeksjonsmasse i sprekker med varierende aperture som funksjon av injeksjonstrykket er en kompleks, samvirkende prosess som ennå ikke er forstått analytisk. Det er funnet at strømmingen til injeksjonsmassen ofte er konstant når elastisk jekking forekommer. Strømming i sprekker med konstant aperture vil synke over tid. Figur 6-8 viser hvordan strømmingen endres når injeksjonstrykket økes fra 1 til 2 MPa (fra 10 til 20 bar). I sprekker der jekking forekommer vil strømmingen være konstant etter trykkøkningen, mens i sprekker uten jekking vil strømmingen synke over tid.



Figur 6-8: Endring i strømming når injeksjonstrykket økes fra 1 til 2 MPa. Der jekking ikke forekommer vil strømmingen synke, mens ved jekking vil strømmingen være konstant (Stille, 2015).

For å identifisere tilfeller av jekking i de studerte borhullene er noe kunnskap fra hver av de presenterte teoriene benyttet. Grafene som viser idealisert hydraulisk jekking både fra ISRM-standard og petroleumsindustrien har gitt grunnlag for hvordan en «perfekt jekke-graf» kan se ut. De mer virkelighetsnære grafene som viser hvordan jekking vil fremtre i en ikke-isotrop bergmasse med oppsprekking er brukt for å underbygge tolking av jekking på trykk/tid-grafene fra injeksjonsprosessene der dette ikke kommer like tydelig frem som i de idealiserte tilfellene. Kunnskap om hvordan injeksjon påvirker bergmassen og hva som faktisk skjer ved jekking har vært nyttig for å bedre kunne forstå grafene og hva som burde tolkes som jekking og ikke.

7 STUDIEOMRÅDE

I denne studien er det benyttet injeksjonsdata fra to jernbaneprosjekter. Det ene prosjektet er en adkomsttunnel til Follobanen ved Åsland like sør for Oslo. Her er en lengre injisert seksjon og en enkelt injeksjonsskjerm til test av utstyr analysert. Det andre prosjektet er jernbanetunnelen mellom Holm og Nykirke, som er en del av Vestfoldbanen. Figur 7-1 viser hvor de to prosjektene er lokalisert.



Figur 7-1: Beliggenheten til de to tunnelprosjektene som er benyttet i denne studien (Kartverket, 2016).

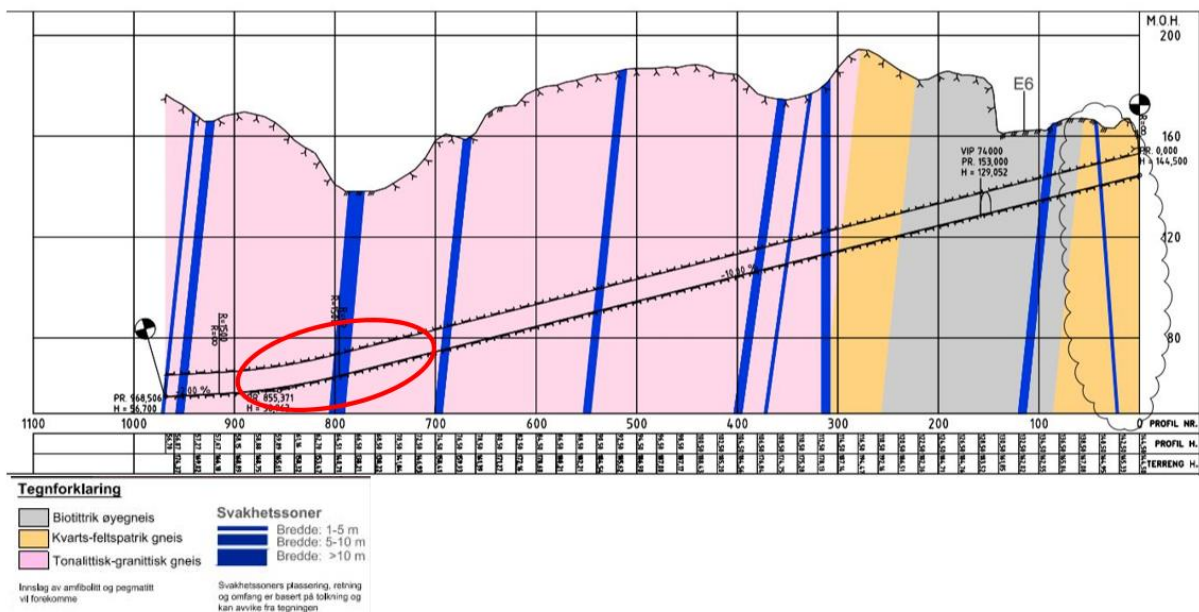
7.1 FOLLOBANEN

Follobaneprosjektet strekker seg fra Oslo S til Ski og er totalt 22 km langt. På stekningen skal det drives landets hittil lengste jernbanetunnel på 20 km. 18,5 km av tunnelen er planlagt boret med fire tunnelboremaskiner (TBM).

7.1.1 Studert seksjon

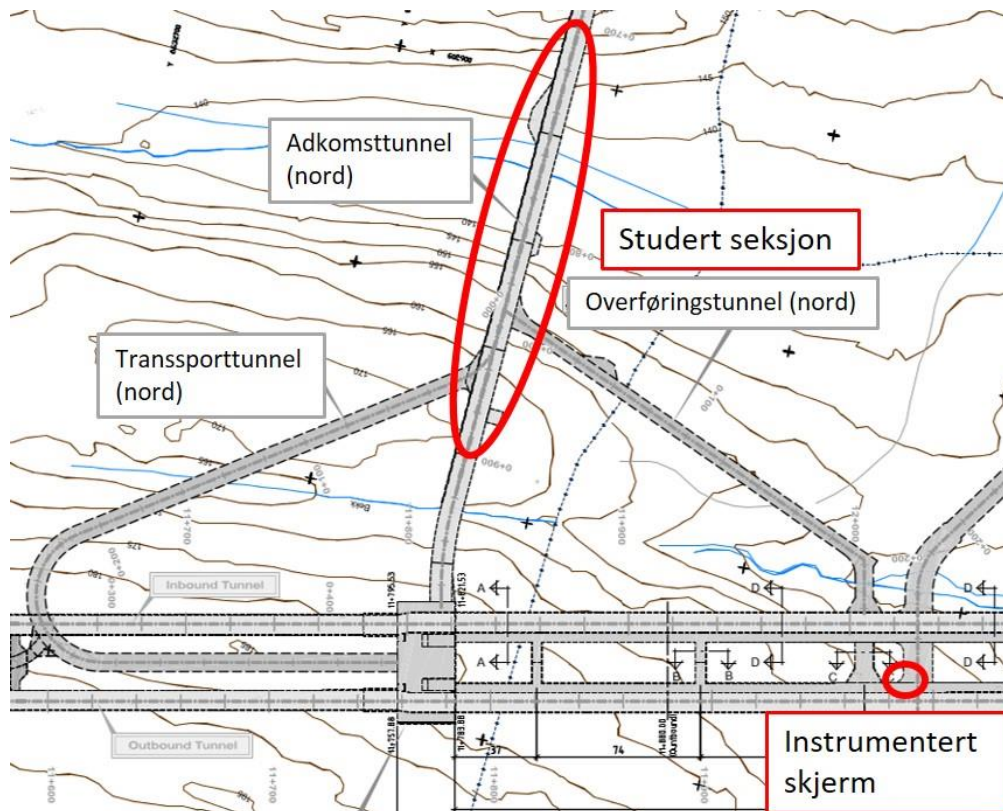
Områdene som er undersøkt består av en seksjon med flere injeksjonsskjermer og en enkelt injeksjonsskjerm. Begge områdene ligger i en adkomsttunnel til Follobanen. Tunnelen går ned fra gamle Åsland pukkverk, like sør for Oslo, er ca. 1000 meter lang og har et tverrsnitt på 76 m² (Jernbaneverket, 2014).

Det er laget et eget endimensjonalt koordinatsystem for adkomsttunnelene som er drevet fra Åsland. Dette måler den prosjekterte horisontale lengden fra åpningen på tunnelen. Adkomsttunnel nord, som er studert her, går fra pel 0 meter på overflaten, til pel 968,5 meter i enden av tunnelen. Seksjonen som er studert er fra pel 736 meter til pel 890 meter (Figur 7-2). Overdekningen på denne seksjonen varierer mellom ca. 65 meter i den ytterste delen, ca. 80 meter på midten, under depresjonen i terrenget, og ca. 100 meter på slutten av seksjonen.



Figur 7-2: Tverrsnitt av adkomsttunnel nord med geologi og svakhetssoner markert. Den studerte seksjonen er markert med rød sirkel (Jernbaneverket, 2014).

Enkeltskjermen som ble benyttet til testing av utstyr er lokalisert i innerste del av overføringstunnelen fra adkomsttunnel sør. Figur 7-3 viser beliggenheten til den instrumenterte skjermen. Plasseringen til den studerte seksjonen er også merket av i figuren.



Figur 7-3: Kartutsnitt med beliggenheten til instrumentert skjerm og studert seksjon (Figur modifisert etter Acciona Ghella, 2015).

7.1.2 Bergmasse

Bergartene i området består hovedsakelig av prekambriske gneiser med en dominerende foliasjonsretning. Basert på kartlegging utført av Norges geologiske undersøkelse (NGU) i 2007 kan gneisene deles i tre hovedgrupper basert på hvilke mineraler bergartene hovedsakelig består av. Grad av deformasjon, folding og foliasjon i bergartene varierer.

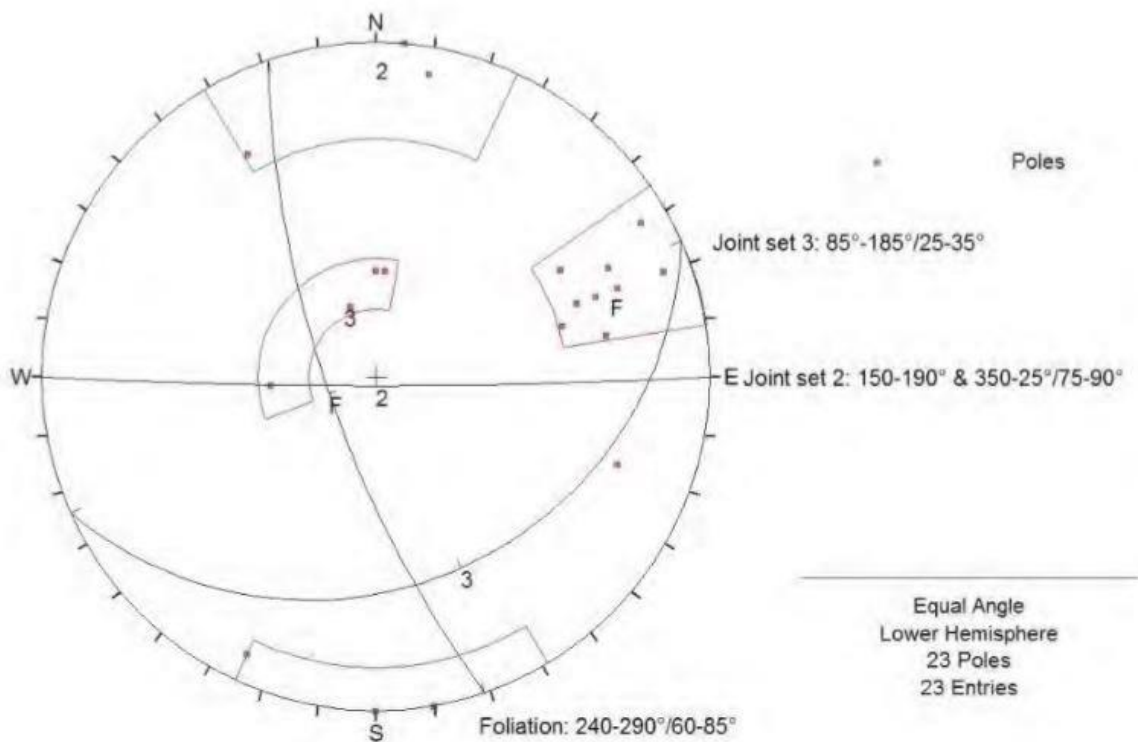
Hovedgruppene av gneiser er (Jernbaneverket, 2014):

- Tonalittisk- granittisk gneis
- Kvarts-feltpatrik gneis
- Biotittrik øyegneis

Mørk amfibolitt ble påvist i ulik mengde i alle bergartene. Normalt opptrer amfibolitten som deformerte linser eller bånd med tykkelse opptil noen få meter. Det er også seksjoner på 20-30 meter med amfibolitt. I overgangsområdet til sidebergarten er amfibolitten omdannet til biotittskifer med sterk foliasjon. Pegmatittintrusjoner med høyt kvartsinnhold kan også opptre i området (Jernbaneverket, 2014).

Tre sprekkeseett er indentifisert i området, vist i Figur 7-4 (Jernbaneverket, 2014).

- Sprekkeseett I, hovedsprekkeseettet, har strøk NNW-SSØ og faller 60-85°V, dette sprekkeseetter følger foliasjonen.
- Sprekkeseett II har strøk Ø-V og svært bratt fall (vertikalt, 75-90°) som varierer mellom nord og sør.
- Sprekkeseett III er horisontalt og har stor variasjon i orientering. Hovedsakelig ble det målt til å ha strøk Ø-V og fall 25-35°S.

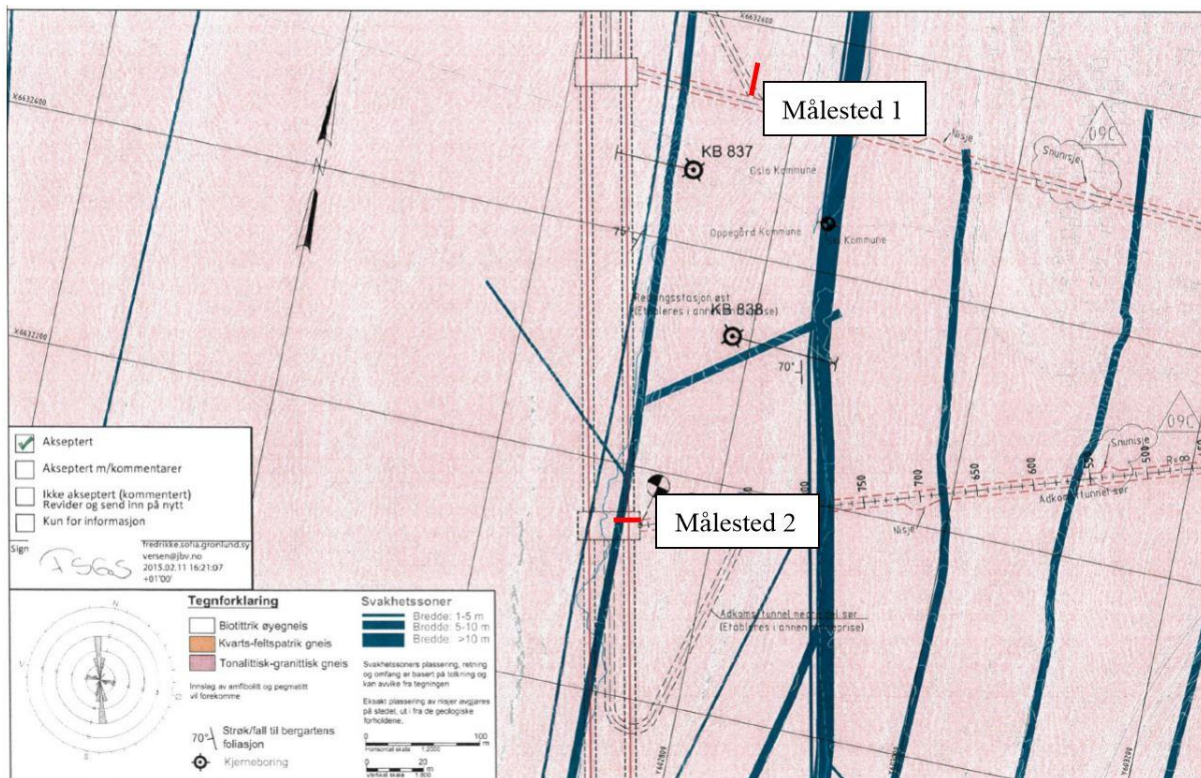


Figur 7-4: Stereografisk projeksjon i nedre halvkuke av registrerte sprekker. Linjene representerer sprekkeseettene. Sprekkeseettene er beskrevet med fallretning og fallvinkel (Jernbaneverket, 2014).

Svakhetssoner kan normalt sees som lineasjoner eller depresjoner i terrenget. Svakhetssoner i området tunnelen er drevet i, antas å være orientert N-S eller NV-SØ. Disse retningene sammenfaller med isbevegelsen under siste istid. Basert på kjerneboring er svakhetssonene antatt å bestå av oppsprukket til knust berg med leirbelagte sprekker. Leiren i sprekken har ulike svelleegenskaper (Jernbaneverket, 2014).

7.1.3 Bergspenningsmåling

SINTEF Byggforsk har utført 3D bergspenningsmålinger i forbindelse med monteringshallene for TB Mene. Målingene er utført på to steder, i adkomsttunnel nord og adkomsttunnel sør (Figur 7-5). Målingene ble utført for å kartlegge in situ spenningsstilstand i området (Larsen og Følke, 2015).



Figur 7-5: Plassering av målesteder der 3D bergspenningsmåling er utført, Målested 1 er i adkomsttunnel nord, og Målested 2 i adkomsttunnel sør (Larsen og Følke, 2015).

På hvert av målestedene er det utført 8 enkeltmålinger i hulldyp mellom 12 og 17 meter i kjerneboret hull. Kjernene fra overboringen er testet i laboratorium for å bestemme bergartens E-modul, Poissons forhold, trykkfasthet, bruddvinkel, lydshastighet og densitet. Resultatene fra bergspenningsmålingene er presentert i Tabell 7-1 (Larsen og Følke, 2015).

Tabell 7-1: Gjennomsnittlige bergmekaniske egenskaper for begge målestedene (Larsen og Følke, 2015).

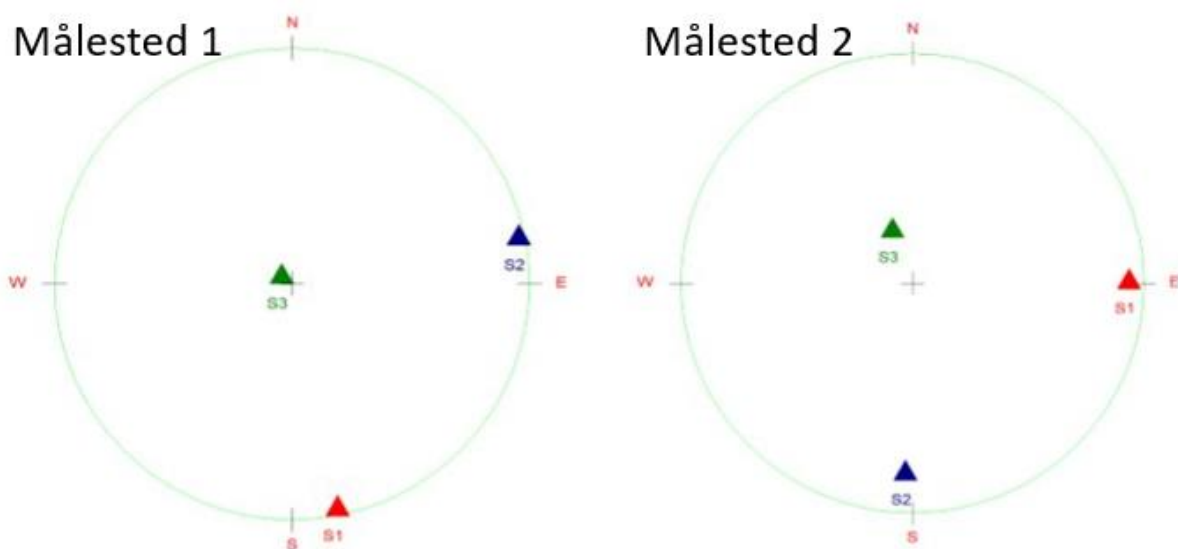
Målested	E-modul (GPa)	Poissons forhold, ν	Trykkfasthet (MPa)	Bruddvinkel (°)	Lydshastighet (m/s)	Densitet (kg/m ³)
Hull 1, nord	64,3	0,18	191,5	16	5629	2637
Hull 2, sør	57,7	0,15	174,8	16	5055	2621

Det ble utført 8 målinger på hvert av de to målestedene. Ved Målested 1 var 5 av målingene vellykket og ved Målested 2 var 6 målinger vellykket. De vellykkede målingene der god liming av målecellen ble oppnådd er benyttet for å beregne bergspenningene i områdene, presentert i Tabell 7-2 (Larsen og Følke, 2015).

Tabell 7-2: Beregnet spenninger, størrelse og retning, ved begge målesteder (Larsen og Følke, 2015).

		σ_1	σ_2	σ_3
Målested 1, nord	Størrelse (MPa)	24,3±2,3	14,6±1,7	11,8±1,6
	Orientering	N169°Ø, fall 3°	N078°Ø, fall 3°	N304°Ø, fall 86°
Målested 2, sør	Størrelse (MPa)	24,5±2,4	15,7±3,1	10,3±1,1
	Orientering	N090°Ø, fall 7°	N184°Ø, fall 18°	N339°Ø, fall 70°

De horisontale spenningene som ble målt ved begge målestedene er langt høyere enn den teoretiske beregningen. Det indikerer geologisk betinget spenninger i området. I dette tilfellet er det sannsynlig at det er residualspenninger i bergmassen. Orienteringen av største hovedspenning (σ_1) dreier seg 90° mellom de to målestedene (Larsen og Følke, 2015). Ved Målested 1 (adkomsttunnel nord) er den orientering N-S, mens ved Målested 2 (adkomsttunnel sør) er orienteringen Ø-V (Figur 7-6).



Figur 7-6: Stereografisk plott av orienteringen til hovedspenningene i nedre halvkule projeksjon for begge målestedene (Larsen og Følke, 2015).

7.1.4 Grunnvannstand

I anleggsområdet på Åsland er det fem private fjellbrønner. Av disse er det antatt at tre er innenfor influenssonen fra tunnelene. Brønnene er 100 meter og 120 meter dype og grunnvannsnivået er 0,5 meter under terrengnivå (mut). I tillegg til fjellbrønnene er det installert flere piezometere langs Follobanetraseen. I området rundt Åsland er det instrumentert totalt fem

borhull, dessverre ble piezometeret i det ene borhullet ødelagt. De fire operative piezometerens lokasjon er vis i Figur 7-7 (Jernbaneverket, 2014).



Figur 7-7: Plassering av installerte piezometere over adkomsttunnelene på Åsland (Jernbaneverket, 2014).

Tabell 7-3 oppsummerer dataene logget av piezometerene installert rundt Åsland. Hullet uten logget data er ikke tatt med i tabellen.

Tabell 7-3: Logget data fra piezometere i borhull rundt Åsland (Norconsult AS, 2010).

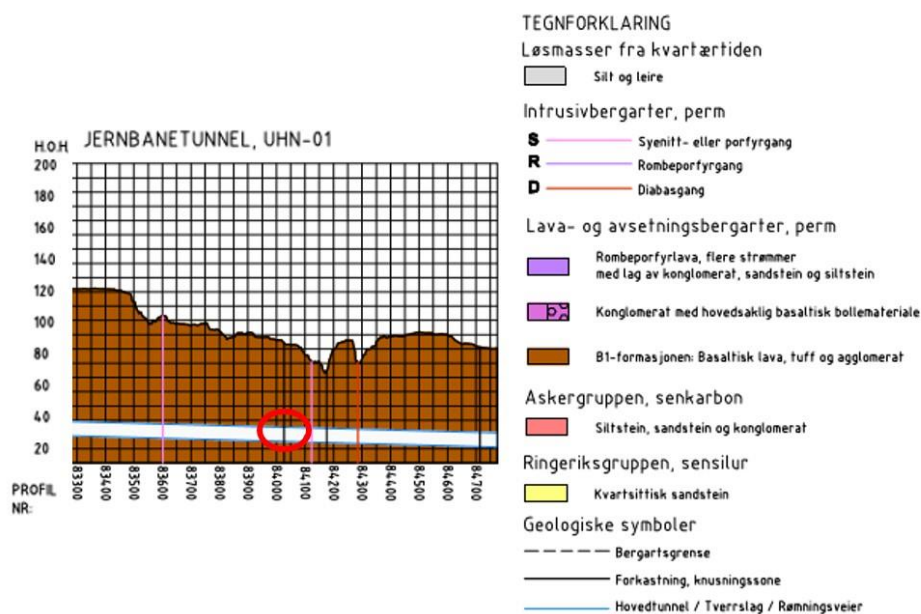
Parameter	Enhet	Fjellbrønn			
		6005	6737	7003	7113
Installasjons tid		08.12.2011	07.02.2012	24.08.2012	19.11.2013
Terrenghøyde	moh	217,3	171,3	136,4	136,4
Dypt til berg	m	2		2,5	
Hull-lengde	m	190		20	
Måledyp I	m	8		18	
Måledyp II	m	35			
Dyp til grunnvann, mellom	m	1,3 til 5,2	1,3 til 1,5	0,5 til +0,3	
Snitt dyp til grunnvann	mut	2,4	1,1	0,1	0,3
Terrengkote grunnvannet står	moh	214,9	170,2	136,3	136,1

7.2 VESTFOLDBANEN

Jernbaneprosjektet Holm-Nykirke er en del av utbedringen av Vestfoldbanen. Strekningen mellom Holm og Nykirke forbi Holmestrand er 14,1 km, hvorav 12,3 km går i tunnel. Det er bygget dobbeltspor jernbanetunnel på strekningen med tverrsnitt på 130 m² (Jernbaneverket, 2012b).

7.2.1 Studert seksjon

Det er laget et lokalt endimensjonalt koordinatsystem for prosjektet som er basert på avstanden til en stasjon lengre nord gitt i meter. Koordinatsystemet benyttes for å spesifisere hvilken del av tunnelen det refereres til. Den nordligste inngangen til tunnelen ligger på koordinat pel 78290 meter og den sørlige på pel 90590 meter. Seksjonen av tunnelen som er studert her, er mellom pel 83943 meter og pel 84094 meter, vist i Figur 7-9. Overdekningen på strekningen varierer mellom 65 meter og 75 meter. Høyest overdekning er midt i seksjonen.



Figur 7-9: Tverrprofil av tunnelen på Vestfoldbanen med geologi. Det studerte området er merket med rød sirkel (Figur modifisert etter Norconsult AS, 2010).

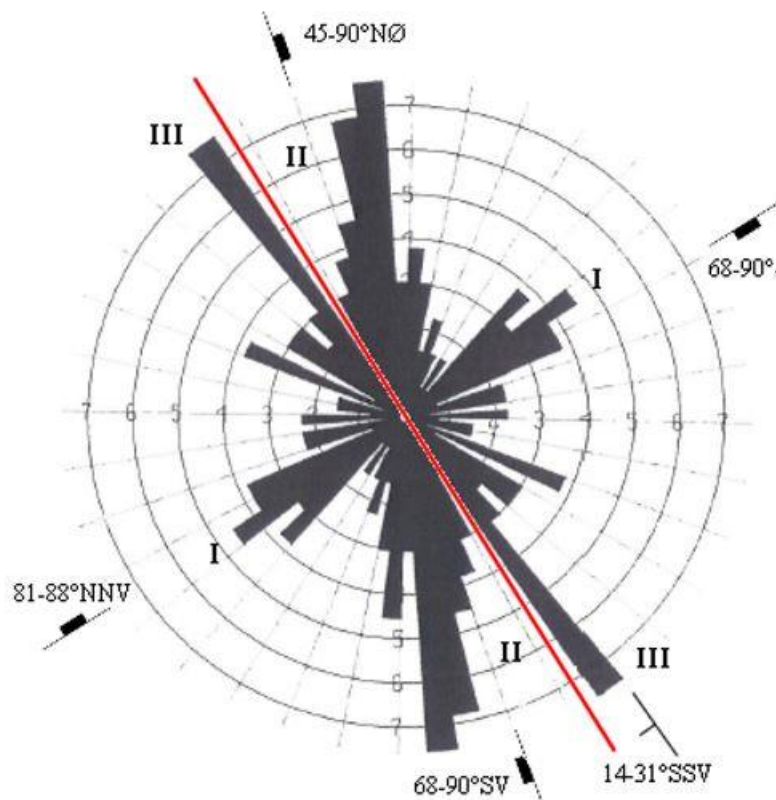
7.2.2 Bergmasse

Seksjonen som er studert består av det som kalles B1-formasjonen. Denne formasjonen består av flere basaltiske lavastrømmer med mellomliggende sedimentære bergarter som silt- og sandstein, tuff, agglomerat og lavakonglomerat. Basalten opptrer i flere typer med ulik tekstur. Den er slaggaktig og mer oppsprukket i toppen av lavastrømmen, og har mer blærom i andre deler. Det er helt eller delvis kalkspatfylling både i de oppsprukke sonene og i blærommene. Det er kartlagt flere eruptive ganger i tunneltrasseen. Eruptivgangene følger normalt

hovedsprekkeretningen og er mer oppsprukket enn sidebergartene. Mellom gang- og sidebergarter er det kalkspatfylte slepper eller tynne leirlag (Norconsult AS, 2010).

Det er tre sprekkeseett i bergarten, vist i sprekkerosen i Figur 7-10.

- Sprekkeseett I har strøk normalt på tunneltrasseen. Settet har strøkretning mellom $N024^{\circ}Ø-N096^{\circ}Ø$ og fall mellom $81-88^{\circ}NNV$ og $68-90^{\circ}SSØ$.
- Sprekkeseett II har strøk omtrent parallelt med tunnelstrassen, strøket er mellom $N120^{\circ}Ø-N160^{\circ}Ø$ og fall mellom $45-90^{\circ}NØ$ og $68-90^{\circ}SV$.
- Sprekkeseett III er subhorisontalt og samsvarer med lagdelingen i området. Settet har strøk mellom $N113^{\circ}Ø-N178^{\circ}Ø$ og fall mellom $14-31^{\circ}SVS$.



Figur 7-10: Sprekkerose for sprekker kartlagt i basalt i B1-formasjonen mellom km 82 775 og 84 200. Tunneltrasseens orientering på delstrekningen er markert med rød strek. De vanligste strøkretningene for sprekkeseettene er markert og fallvinkel angitt (Norconsult AS, 2010).

7.2.3 Bergspenningsmåling

Det er utført 3D bergspenningsmålinger med tilhørende bergmekaniske laborietester ved R7 i stasjonshallen på Holmestrand (Figur 7-11). Borhullet målingene ble utført i var nær horisontalt og det var en overdekning på omlag 50 meter med basaltisk lavabergarter og agglomerat. Plassering for bergspenningsmålingene er i forbindelse med et tverrslag til

stasjonshallen som skal bygges ved Holmestrand (Larsen, 2012). Stasjonshallen er omlag 4 km lengre sør langs Vestfoldbanen enn det studerte området.



Figur 7-11: Plassering av 3D bergspenningsmålinger ved stoff R7, merket med rød pil. Stasjonshallen er lenger sør langs Vestfoldbanen sammenliknet med det studerte området (Figur modifisert etter Storvik, 2014).

Det ble utført 7 enkeltmålinger i hulldyb mellom 13 og 18 meter i kjerneboret hull. Kjernene fra overboring ble testet i laboratorium for å bestemme bergartens E-modul, Poissons forhold, trykkfasthet, bruddvinkel, lydshastighet og densitet. Resultatene fra disse målingene er presentert i Tabell 7-4 (Larsen, 2012).

Tabell 7-4: Gjennomsnittlige målte bergmekaniske egenskaper (Larsen, 2012).

Målested	E-modul (GPa)	Poissons forhold, ν	Trykkfasthet (MPa)	Bruddvinkel (°)	Lydshastighet (m/s)	Densitet (kg/m ³)
Hull 1	59	0,16	116	23	5526	3047

Av de 7 utførte målingene var det kun 2 som var vellykket. Det er mindre enn det som er ønskelig, men laboratorietester av de vellykkede prøvene viser at god liming ble oppnådd. Målingene ble benyttet for å beregne bergspenningene i områdene, presentert i Tabell 7-5 (Larsen, 2012). Orienteringen av hovedspenningene er vist som grafisk plott i nedre halvkuleprojeksjon i Figur 7-12.

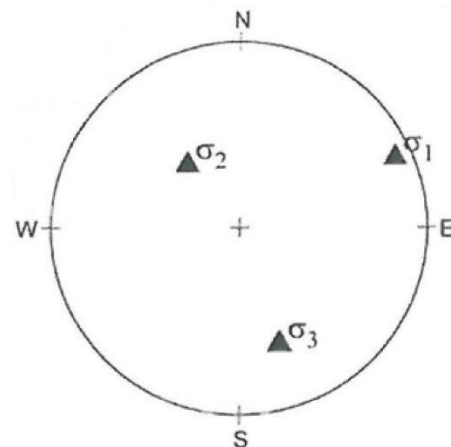
Tabell 7-5: Beregnet spenninger, størrelse og retning (Larsen, 2012).

		σ_1	σ_2	σ_3
Målested 1	Størrelse (MPa)	14±1,8	9,5±0,7	5,2±2,5
	Orientering	N064°Ø, fall horisontal	N322°Ø, fall 52°NV	N161°Ø, fall 36°SØ

De målte spenningene er langt høyere enn det som kunne forventes basert på teoretiske beregninger. Det indikerer at det eksisterer vesentlige geologisk betingede spenninger i området. Det er tidligere utført bergspenningmålinger i samme området. Målingene som er presentert her ble utført i 2012 og gir en noe høyere største horisontale hovedspenning, 14 MPa mot 11,3 MPa målt i 2010. Orienteringen er tilnærmet sammenfallende med henholdsvis N064°Ø og N056°Ø, hvilket bekrefter målingene som er utført. Målt vertikalspenning er mye høyere enn teoretisk beregnet vertikalspenning basert på overdekning. Mulig forklaring på dette kan være at det er en lokal spenningskonsentrasjon på grunn av bergmassegeometrien i målestedet som har et «skarpt hjørne». En annen forklaring kan være at det er frigjort innelåste størkningspenninger fra dannelsen av basalten. Siste forklaring er tidligere brukt i forbindelse med liknende resultater i størkningsbergarter (Larsen, 2012).

7.2.4 Grunnvannstand

Fire observasjonsbrønner ble boret i forkant av drivingen av tunnelen for å overvåke grunnvannsnivået, både før og under driving. Plassering av brønnene i forhold til tunneltraseen er vist i Figur 7-13. Informasjon fra brønnene 78,6 og 85,5 er ikke benyttet i denne studien ettersom disse brønnene er plassert langt fra den studerte seksjonen.



Figur 7-12: Stereografisk plott av orienteringen til hovedspenningene i nedre halvkuleprojeksjon (Larsen, 2012).



Figur 7-13: Plassering av fjellbrønnene for overvåking av grunnvannet i forhold til tunneltraseen (Elvebakk, 2010).

Resultatene fra boringen er presentert i Tabell 7-6 (Norconsult AS, 2010).

Tabell 7-6: Resultater fra boring av fjellbrønner (Norconsult AS, 2010).

Parameter	Enhet	Fjellbrønn		
		FB 79,8	FB 81,3	FB 82,9
Terrenghøyde	moh	71,1	153,6	102,4
Dyp til berg	m	4,7	5,2	9,8
Hull-lengde	m	60	135	132
Snitt dyp til grunnvann	mut	7,2	83,4	112,5
Terrengekote grunnvannet står på	moh	63,9	70,2	-10,1

7.2.5 Injeksjonsprosedyre

Området over den studerte seksjonen består av bebygde område, marin leire i tynt dekke og stedvis fjellblotninger. Av hensyn til ytre miljø, boring og måling av observasjonsbrønner, ble det bestemt at det skulle utføres systematisk forinjeksjon i hele den studerte seksjonen. Maksimum tillatt innlekkasje var 10 liter per minutt per 100 meter tunnel. Det skulle være en salve overlapp mellom injeksjonsskjermene (~5 m) (Norconsult AS, 2010). Injeksjonen ble

utført gjennom 47-59 borhull, med en lengde på 24 meter. Maksimum injeksjonstrykk var satt til 70 bar. I begynnelsen av injeksjonen ble det benyttet minimum 400 liter masse med $v/c = 0,8$, dersom 70 bar ikke var oppnådd skulle inntil 6000 liter masse med $v/c = 0,5$ benyttes. Ved mye vann skulle $v/c = 0,5$ benyttes fra begynnelsen (Jernbaneverket, 2012a). For å sjekke om ønsket tetthet var oppnådd ble det boret 12 til 18 kontrollhull. Før videre driving skulle kontrollhullene være tørre (Norconsult AS, 2010).

Eksempel på bestilling på en injeksjonsskjerm på Vestfoldbanen er vist i Figur 7-14. Det ble benyttet CEMIL industrisement fra MAPEI til alle injeksjonsskjermene i den studerte seksjonen.

Sak: Bestilling av skjerm 60B stuff mot Holmestrand, pel 83026
Byggherren bestiller med dette, injeksjon av skjerm 60B (øvre del av stuff) etter følgende prinsipp:

- Det benyttes industrisement med tilhørende tilsetningsstoffer som beskrevet i kapittel E i kontrakten.
- Byggherren bestiller den fjerde injeksjonslinja etter prosess 31.65 og 31.66
- Grout Tech (mikrosilika) skal benyttes i 0,8 blandingen med 10 % og i 0,5 blandingen med 5 %, dersom det oppstår problemer med store utganger kan idet i samråd med kontrollingeniøren på skift vurderes å redusere Grout Tech tilsetningen ytterligere.
- Mengde $v/c = 0,8$ vurderes på hvert enkelt hull, min. 400 l. Dersom det er mye vann i hullet kan det benyttes $v/c = 0,5$ fra starten.

$v/c = 0,8$	$v/c = 0,5$
400L	Se over

- Hvis ikke ønsket trykk er oppnådd ved disse mengder skal byggherren (v/kontrollingeniør på skift) kontaktes for å avtale videre injeksjonsopplegg.
- Hullengde 24m
- Sluttrykk 70 bar i vegg, såle og i heng. I spesialtilfeller kan dette også justeres ned i samråd med kontrollingeniør.
- Skjermen bores med en stikning på 6m.

Figur 7-14: Prosedyre for injeksjon på Vestfoldbanen (Jernbaneverket, 2012a).

8 MÅLING AV IN SITU INJEKSJONSTRYKK

For å måle trykket inne i borhullet ved injeksjon har NGI utviklet et trykkmålingsoppsett som gjør det mulig å gjenbruke kostbart utstyr som trykksensoren med datalogger. Oppsettet er dessuten enkelt og raskt å installere og hindrer derfor ikke den vanlige tunneldriften. NGI har tidligere benyttet dette utstyret til målinger på tre injeksjonsrunder i to av adkomsttunnelene ved Åsland. Ved disse tre rundene var det maks 6 hull som ble logget samtidig. Det ble klart at metoden for logging av trykk inne i hull fungerte godt, og at det var ønskelig med flere loggere som ville gjøre det mulig å installere trykksensorer i flere hull i samme injeksjonsskjerm (Tunbridge, Aasrset og Tønnessen, 2014). I denne studien er derfor utstyret for logging av trykk inne i borhullene videreutviklet og forberedt til nye forsøk.

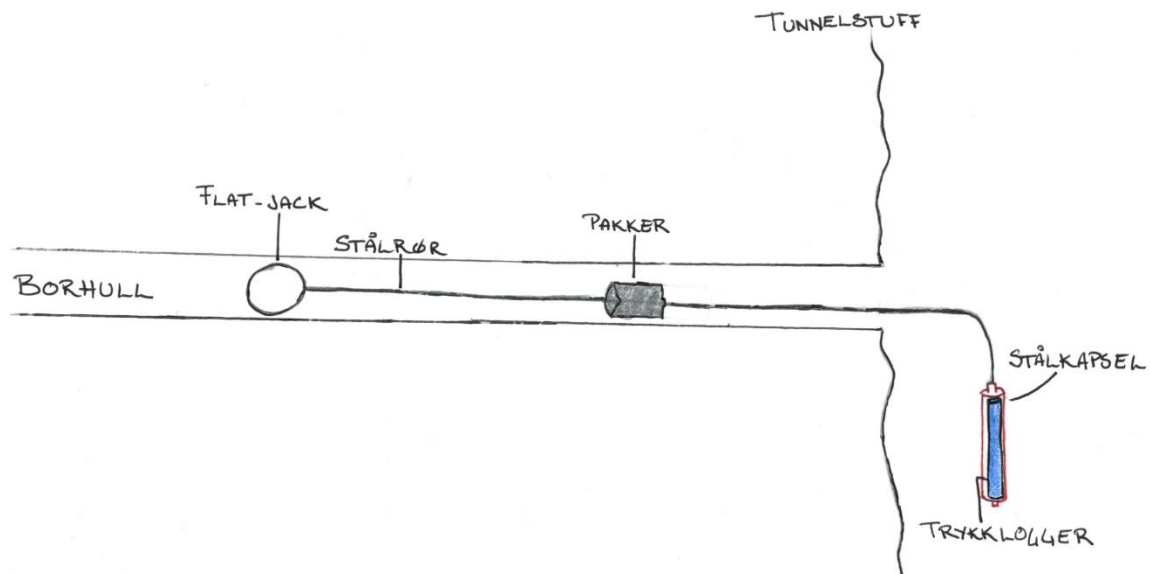
8.1 UTSTYR FOR MÅLING AV TRYKK INNE I BORHULL

Oppsettet for logging av trykk inne i injeksjonshullet består av en «flat-jack», en liten vannfylt ballong, som overfører trykket fra inne i borhullet og ut til en trykksensor på utsiden av pakkeren hullet. Fra «flat-jacken» går det et $\frac{1}{4}$ tommer stålrør gjennom en sliss i pakkeren og til en stålkapsel som trykksensoren ligger i. Ved å plassere trykksensoren inne i stålkapselen er dette en del av et lukket system om kan ta opp og registrere trykket inne i borhullet. I tillegg er trykksensoren beskyttet mot slag og mørtel og kan kobles fra «flat-jacken» etter injeksjonen er avsluttet. Trykksensoren kan dermed brukes flere ganger. Trykksensoren som benyttes tilsvarer de som brukes for måling av vanddybder i borhull, opptil 70 bar (Figur 8-1).



Figur 8-1: Trykksensor med datalogger som ble brukt til å registrere trykket som ble tatt opp av «flat-jack» i borhullet (Tunbridge, Aasrset og Tønnessen, 2014).

Figur 8-2 viser en enkel skisse for oppsettet som er benyttet for måling av in situ injeksjonstrykk i borhull.



Figur 8-2: Skisse for måling av in situ trykk i borhull med "flat-jack" (Tegning: Stine Merete Moe).

For å kunne fylle systemet med vann og sikre at det ikke er noen luftbobler, må det lages et hull gjennom godset i «flat-jackene» (Figur 8-3). I hullet lages det gjenger og overflaten på utsiden av «flat-jacken» slipes til en flate. For å sikre at det blir helt tett legges det en kobberpakning mellom skruen og «flat-jacken» som deformeres når skruen dras til.

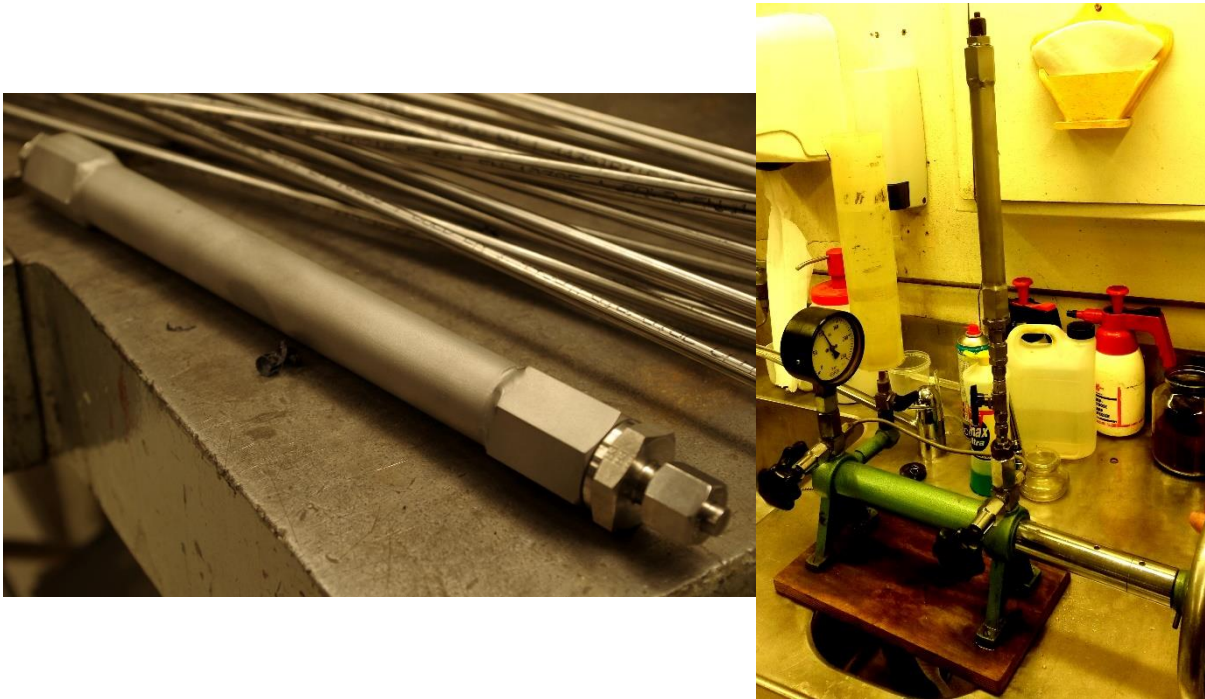


Figur 8-3: «Flat-jackene» med boret og gjenget hull (Foto: Helene Strømsvik).

Fra «flat-jacken» er det et ca. 4 meter langt $\frac{1}{4}$ tommer stålrør ut til trykksensoren. Dette er tilstrekkelig lengde til å plassere pakkeren ca. 1 meter fra «flat-jack», og at pakkeren kan plasseres et par meter inn i borhullet, slik at stålkapselen til trykksensoren kan henge ut på utsiden av borhullet.

Stålkapselen som beskytter trykksensoren ble noe modifisert i forhold til de tre tidligere undersøkelsene utført av NGI. Stålrør med stor nok indre diameter til at trykksensoren passet

oppi ble kuttet til riktig lengde. På hver ende ble det sveiset på muttere som var gjenget i enden og som stakk ut fra røret. I disse endene ble det senere skudd på en «hatt» som gjør det mulig å fylle vann i systemet, for så å sette på en pakning og tette systemet helt. I den andre enden er stålkapselen koblet til røret fra «flat-jacken». Når stålkapselen var ferdig sveiset ble det trykktestet opp til 100 bar. Under trykktesting ble sveisene nøye undersøkt for lekkasje. Stålkapselen ble også sandblåst for å forhindre rust. Figur 8-4 viser ferdig montert og sandblåst stålkapsel i tillegg til instrumentet som ble benyttet til trykktesting.



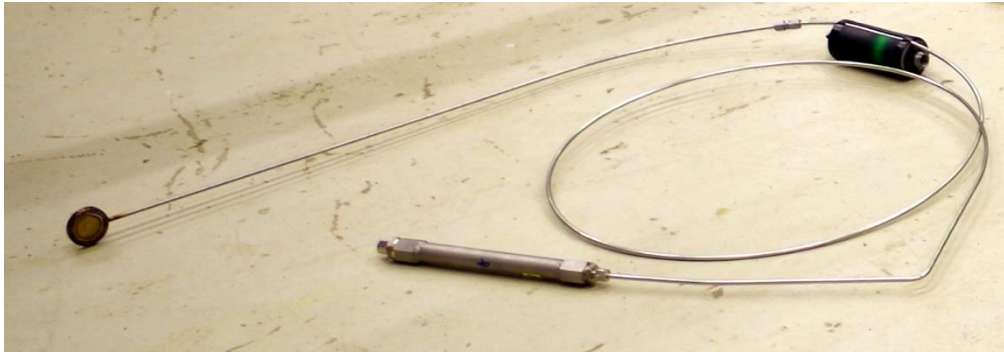
Figur 8-4: Stålkapselen som trykksensoren ligger inne i til venstre, og trykktesting opp til 100 bar av samme stålkapsel til høyre (Foto til venstre: Helene Strømsvik; Foto til høyre: Stine Merete Moe).

Før trykksensoren plasseres i stålkapsellet kobles den til PC for å gjøre tilpasninger i innstillingene til loggeren. Loggeintervall og hvilken periode det skal logges for kan justeres og tilpasses prosjektet utstyret skal brukes på.

For å unngå forsinkelser og ikke hindre fremdriften i tunnelen, blir pakkere som brukes til injeksjon i det spesifikke prosjektet hentet fra entreprenør på forhånd. Pakkerne blir tatt med til verksted og det lages en sliss i dem for å kunne føre stålrøret gjennom pakkere. Pakkerne monteres på måleoppsettet på verksted før det tas med ut i tunnel.

Når hele oppsettet er ferdig montert fylles det med vann. Det er viktig at det ikke er noe luft i systemet ettersom dette vil føre til at målingene blir feil. Ved fylling brukes derfor kaldt vann som har gått gjennom en avluffer som fjerner luftbobler fra springvannet. Under fylling er åpningen på «flat-jacken» åpen, og vannslangen er koblet på enden av trykksensorstålkapselen.

Vann strømmer fritt gjennom systemet mens det vrir og vendes i alle retninger. Når all luft er ute av systemet tettes «flat-jacken» før stålkapselen kobles fra vannslangen og tettes. Målet med vannfyllingen er å få et system som måler 1 standardatmosfære trykk før det utsettes for injeksjonstrykket. Figur 8-5 viser ferdig montert og vannfylt system. Rørene er kveilet opp for å gjøre det enklere å frakte de til testlokasjon.



Figur 8-5: Ferdig montert og vannfylt måleoppsett med «flat-jack», $\frac{1}{4}$ tommer rør, pakker med slisse, trykksensor og datalogger inne i stålkapselen (Foto: Helene Strømsvik).

For å forsikre at måleoppsettet er tett og ikke har noen luftbobler utføres det en enkel trykktest på verkstedet etter vannfylling (Figur 8-6). Oppsettet kobles til en pakker som er koblet til en vannpumpe. «Flat-jack» og pakkeren føres ned i et stålrør med påsveiset bunnplate. «Borhullet» er vannfylt før pakker og «flat-jack» presses ned. Pakkeren spennes opp i borhullet for å kunne skape trykk på «flat-jack». Vann pumpes inn gjennom pakkeren og ned i «borhullet» med en vannpumpe. Vannpumpen er koblet til et manometer som gjør det mulig å følge med på trykket inne i «borhullet». Under testing ble trykket forsøkt holdt konstant på 20 bar i omlag 3 til 4 minutter. Dette gjorde det mulig å undersøke om måleoppsettet hadde lekkasjer når det ble satt under trykk, samtidig som vi fikk muligheten til å undersøke at trykket som måles av loggeren er det samme som det faktiske trykket «flat-jacken» blir utsatt for.

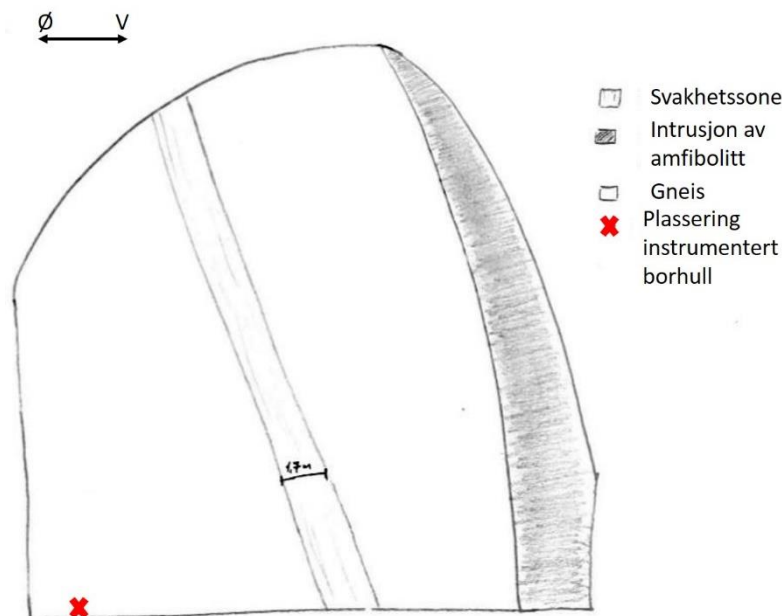


Figur 8-6: Trykktesting av utstyret i «borhull» med vannpumpe (Foto: Stine Merete Moe).

8.2 TEST AV UTSTYRET I FELT

I midten av desember 2015 ble det modifiserte utstyret testet på en tunnelstufv på Follobanen. Tunnelstufven var tørr og det ble ikke observert vann under sonderboring eller boring av injeksjonshull. Det ble derfor bestemt at kun to loggere skulle installeres som en øving til senere tester med flere loggere.

Tunnelstufven som ble instrumentert hadde en tydelig 1,7 meter bred svakhetszone (Figur 8-7). Fall på sonen ble målt på tunnelstufv og regnet om til reelt fall på $83,5^\circ$. Fallretning er bestemt basert på sonens orientering på tunnelstufv og oppsprekking i sprøytebetongen som kunne følges fra der sonen går inn under sprøytebetongen, over hengen og ned i veggen på andre siden. Estimert fallretningen er 282° (strøk N012Ø). Sprekkefyllingen i svakhetssonen består av grov sand til fin silt/leire.



Figur 8-7: Felttegning av instrumentert tunnelstufv sett mot sør (Tegning: Stine Merete Moe).

Bergmassen på stufv bestod hovedsakelig av gneis. Området rundt det som er tegnet som omrisset av tunnelstufv i Figur 8-7 var sikret og lagt på sprøytebetong. Utstrekningen til amfibolitt intrusjonen var derfor ikke mulig å anslå nøyaktig.

Etter injeksjonshullene var boret ble borhullene som skulle instrumenteres med loggere filmet med borhullskamera. Kameraet var festet til en glassfibersang bestående av segmenter på 2 meter som ble koblet sammen med tilstrekkelig lengde for å kunne filme hele borhullet. Under innføring av kameraet ble det gjort et lite opphold for hver ny stang som ble dyttet inn i

borhullet. Dette gjorde det mulig å vite omtrent hvor i hullet en var til enhver tid når filmen senere skulle tolkes.

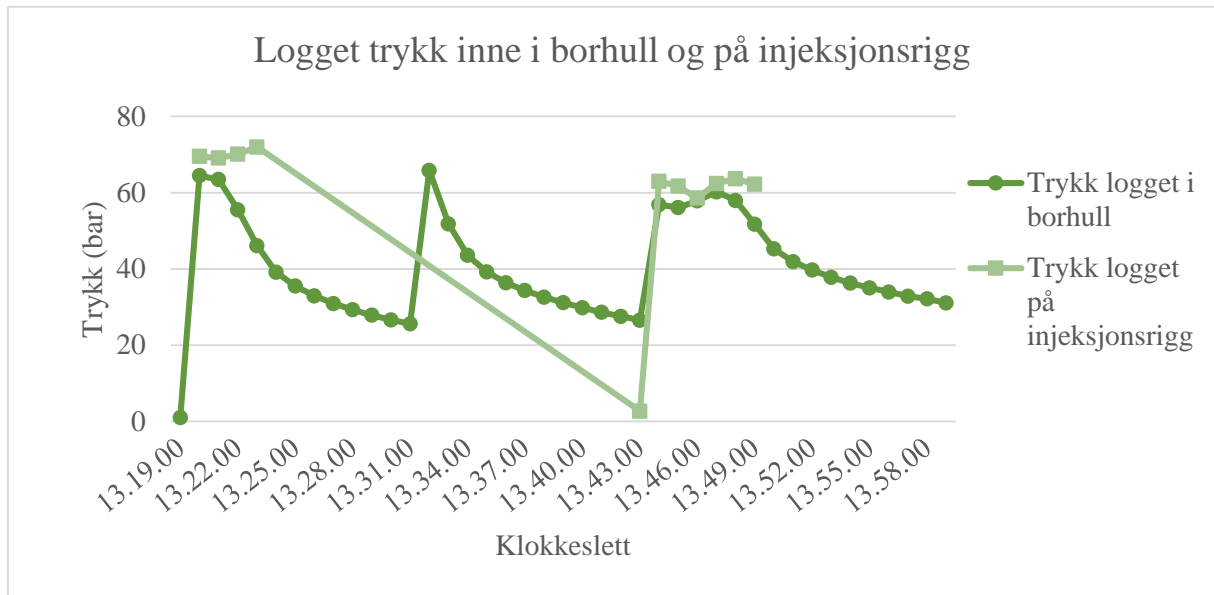
Loggerne og pakkerne ble installert i borhullene samtidig som resten av pakkerne ble installert i de andre hullene. Loggerne var satt til å logge hvert minutt og logging begynte rett etter utstyret var montert på verkstedet. Logging av trykk inne i borhullet begynte derfor med en gang loggerne var installert. Koblingen mellom «flat-jack» og logger ble heller ikke kuttet før injeksjonsrunden var fullført. Dette gjorde det mulig å følge med på eventuelle trykkendringer som følge av samvirke mellom injeksjonshull og trykkutviklingen i de instrumenterte hullene etter injeksjon var fullført i disse.

Det var planlagt å utføre flere tester av injeksjonsmassen som ble brukt til injeksjonen der loggerne var installert. Testene som var planlagt er test av tendensen til vannutskillelse, marsh-cone test, kontroll av v/c-tall og størkningstid. Metodene er beskrevet i Vedlegg A. Grunnet mye forsinkelser var det ikke mulig å utføre disse testene.

8.3 RESULTATER FRA UTFØRTE TESTER

Filmen fra borhullskameraet viste seg dessverre å ikke kunne benyttes til studier av oppsprekking og sprekkefylling i injeksjonshullet. Årsaken til dette var at innføringen av kameraet hadde gått for fort i tillegg til at hullet var delvis fylt med grumsete vann. Den høye hastigheten på innføringen gjorde at filmen ble uklar og det ble vanskelig å oppdage sprekker. De små oppholdene for hver andre meter fungerte imidlertid fint. Vannet som lå i borhullet gjorde at det ikke var mulig å se borhullsveggene etter at kameraet hadde gått ned i vannet.

Trykket som ble logget inne i hullet av «flat-jacken» ble analysert sammen med trykket som var blitt logget på injeksjonsriggen for de to instrumenterte hullene. Dessverre var den ene installerte loggeren ikke blitt helt tett etter vannfylling, og resultater fra denne kunne derfor ikke brukes. Målingene fra den fungerende loggeren viser omtrent samme trykk som trykket som ble målt på injeksjonsriggen, hvilket bekrefter resultatene fra tidligere studier utført av Tunbridge, Aarsset og Tønnessen (2014). Figur 8-8 viser trykk/tid-grafen fra både trykksensoren inne i borhullet og fra injeksjonsriggen. Trykk/tid-grafen fra loggeren ligner trykk/tid-graf fra hydraulisk splitting test. Grafen fra injeksjonsriggen viser noe tegn til jekking. Dessverre var målingene fra riggen noe mangelfulle, og det mangler data fra flere minutter av injeksjonen.



Figur 8-8: Trykkmålinger fra både trykksensor inne i borhullet og injeksjonsriggen plottet for samme tidsintervall. Målingene fra injeksjonsriggen mangler noe data og grafen er kun interpolert mellom målingene.

8.4 DISKUSJON

Resultatene fra utviklingen av utstyr og besøk på anlegget på Follobanen ble ikke helt som ønsket. Forholdene var gode for driving av tunnel, med lite vann og god bergmasse. Dette ble bekreftet av både kartlegging på tunnelstuff og analyser av injeksjonen. På tross av dette var ikke arbeidet forgjeves og det kan hentes mye lærdom ut av testen.

Analyser av logget data og tolkning av hva som kan tolkes som jekking av bergmassen ble testet og til dels bekreftet ved sammenlikning av trykk/tid-grafene ved jekking logget inne i borhullet og på injeksjonsriggen. Det faktum at grafene fra injeksjonspumpen og trykksensoren inne i borhullet viser liknende tendenser og antydning til jekking i samme tidspunkt forsterker teorien om at det er mulig å benytte data fra injeksjonsriggen til å identifisere jekking av bergmassen.

Volumet injisert i skjermen viser svært liten masseinngang og hovedsakelig fylling av injeksjonshullene. Mottrykk ble også oppnådd relativt raskt. Likevel var det svært stor inngang i hull 43 og 44 i skjermen, med henholdsvis 706 kg og 2267 kg sement i hvert av hullene. Gjennomsnittlig masseinngang i de resterende hullene i skjermen er 63,2 kg sement. Basert på data logget med injeksjonsriggen ble det identifisert jekking i totalt 2 av 45 hull i den studerte skjermen.

Videre var det nyttig å prøve borhullskameraet og få et forhold til hvilken hastighet kameraet bør føres inn i borhullet med for å kunne bruke filmen som tiltenkt. Borhullet som filmes bør

være tørt eller kun inneholde rent vann slik at bergmassen kan kartlegges også når kameraet er under vann. Tørt hull kan oppnås ved å installere loggerne/filme hull som er boret med en viss stikning oppover slik at eventuelt vann renner ut av hullet. Loggeintervallet på trykksensorene var ved denne testen satt til en gang per minutt. Ettersom injeksjonsriggen logger hvert 10. sekund vil det være ønskelig med et tettere loggeintervall også på trykksensoren.

8.5 KONKLUSJON

Konklusjon av utført test på en injeksjonsskjerm er at det er mulig å logge trykket inne i borhull med «flat-jack» og trykksensor på utsiden av hullet. Det ble bekreftet at jekking kan tolkes basert på trykk/tid-grafen logget med injeksjonsriggen basert på de kriteriene som er satt for tolkning av jekking i denne studien. Bruk av borhullskamera for å filme hullene og kartlegge bergmassen bør også være mulig i tørre hull med en lavere innføringshastighet på kameraet.

9 INNSAMLING AV DATA TIL STUDIEN

I denne studien er 10 injeksjonsskjermer fra prosjektet på Follobanen og 9 skjermmer fra Vestfoldbanen studert og brukt som grunnlag for analyser. Antall hull i hver skjerm varierer noe, men normalt er det mellom 40 og 50 hull. Datagrunnlaget for studien er dermed basert på omtrent 800 injeksjonshull.

9.1 VALG AV PROSJEKT OG SEKSJONER

Ved valg av prosjekter til denne studien var det ønskelig at de involverte partene (byggherre, entreprenør og utstysleverandør) er en del av TIGHT. Det var vanskelig å finne aktuelle prosjekter som oppfylte dette ønsket. Det viktigste var derfor at byggherren var med på TIGHT ettersom det er byggherren som eier dataene etter prosjektet er avsluttet. Videre ble geologi, overdekning og plassering i forhold til utførte bergspenningsmålinger vurdert før en strekning på omtrent 150 meter ble valgt ut fra de to prosjektene.

Geologisk var det ønskelig med «normal» bergmasse for norske forhold, med harde metamorfe bergarter. Det var ikke ønskelig med for mye oppsprekking, og svakhetssoner skulle om mulig unngås. Sprekker parallelt med tunnelaksen var heller ikke ønskelig, ettersom slike sprekker ofte kan føre til stort forbruk av injeksjonsmasse. Overdekningen på de studerte seksjonene burde heller ikke være for liten, for å være sikre at sannsynligheten for utgang av injeksjonsmasse i dagen er liten.

9.2 BENYTTET DATA

Injeksjonsdata som strømningshastighet, injeksjonstrykk, injeksjonstid og injisert volum logges fra injeksjonsriggen ved hjelp av automatiske loggesystem som BeverTeam og Logac. Injeksjonsriggen som ble brukt på Follobanen i den studerte sonen var levert av AtlasCopco og dataene fra dette prosjektet ble logget med Logac. På Vestfoldbanen var det brukt AMV rigg med BeverTeam. Injeksjonsdataene logges omtrent hvert 10. sekund gjennom hele injeksjonsprosessen for hvert enkelt injeksjonshull. I tillegg blir det registrert hvilken type injeksjonsmasse som er blitt benyttet, blandingsforholdet mellom vann og sement samt andre tilsetningsstoffer i injeksjonsmassen.

Injeksjonsdata fra Vestfoldbanen ble eksportert fra BeverTeam og importert i Microsoft Excel 2013 for sortering og analyser. Data fra Follobanen ble oversendt fra Jernbaneverket som

tekstfiler. Disse ble også importert i Microsoft Office Excel 2013 for sortering og analyser. Årsaken til at analysene av data fra Vestfoldbanen ikke ble utført med BeverTeam sin analyse er for å få en mer fleksibel analyse da programmet begrenser bruken. I tillegg var det ønskelig å kunne utføre de samme undersøkelsene på begge prosjektene og ha kontroll på hvilke sorteringer dataene hadde vært gjennom.

Før sammenlikning av de to prosjektene kunne utføres ble enhetene for logget data sammenstilt. Volumet av forbrukt masse var eneste parameter som hadde ulik enhet på de to prosjektene. Dataene fra Follobanen ble derfor regnet om fra liter forbrukt injeksjonsmasse til kilogram sement basert på type sement som var benyttet og v/c-forholdet som var logget.

9.3 VURDERING AV TRYKK/TID-GRAFER

For hvert hull ble det laget en graf der trykk og strømning (liter/minutt) ble plottet over tid. Grafene ble vurdert manuelt for å identifisere hendelser med tilsynelatende jekking. Strømningen ble holdt relativt konstant gjennom injeksjonsforløpet på begge prosjektene. Det ble derfor hovedsakelig fokusert på trykkgrafene, og grafen for strømning ble benyttet som støtte for observasjoner av trykket. Graf for volum ble også benyttet i enkelte tilfeller for å identifisere når det var byttet injeksjonsmasse eller det var en pause i injeksjonen.

Basert på teorier fra litteraturen (Kapittel 5) og diskusjoner med doktorgradsstudent, Helene Strømsvik og veileder ble det definert noen kriterier som måtte oppfylles for at en hendelse skulle defineres som tilsynelatende jekking.

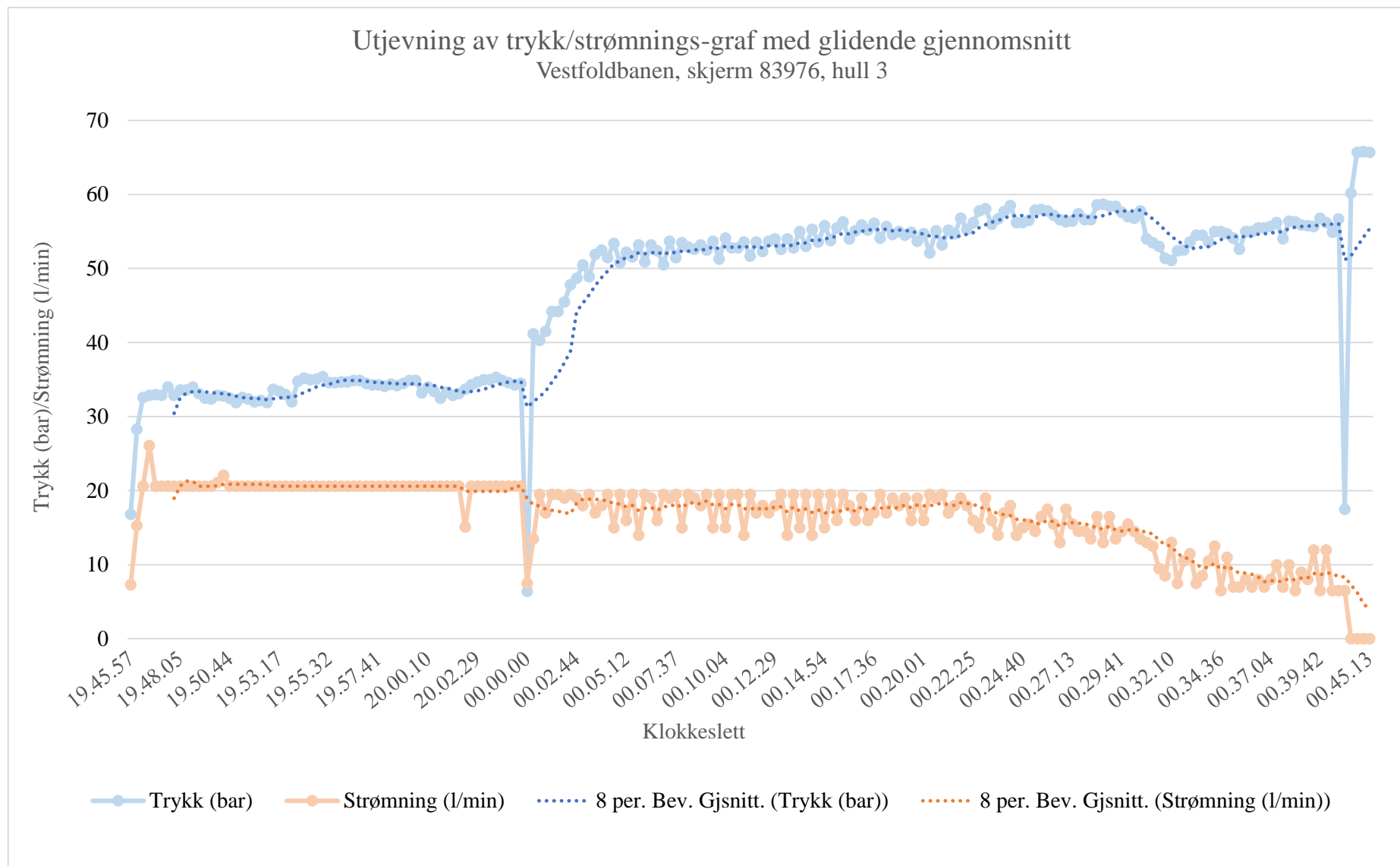
Det ble fokusert på «de store linjene», som betyr at dersom det kun var en måling som viste trykktap (mindre enn 20 sekunder med trykktap) ble det ikke tolket som tilsynelatende jekking. Støy fra injeksjonspumpen ble jevnet ut ved å benytte «glidende gjennomsnitt» med åtte verdier til plotting av grafene. Glidende gjennomsnitt betyr at gjennomsnittet av åtte verdier blir regnet sammen og plottet i et punkt (Figur 9-1). Strømningen ble definert som konstant dersom ikke annet kom tydelig frem av grafen.

Figur 9-2 viser et ideelt injeksjonsforløp. Det vil si et jevnt økende trykk og jevnt fallende strømning gjennom hele injeksjonen. Et kriterium for at det skulle tolkes som tilsynelatende jekking var at det skulle være en trykkoppbygging i forkant av hendelsen. Trykket skulle altså først stige før det deretter falt. Gjennom hele denne syklusen skulle strømningen være konstant. Figur 9-3 viser jekking av borhull. Tilfellet som vises i figuren har dessuten reduksjon i

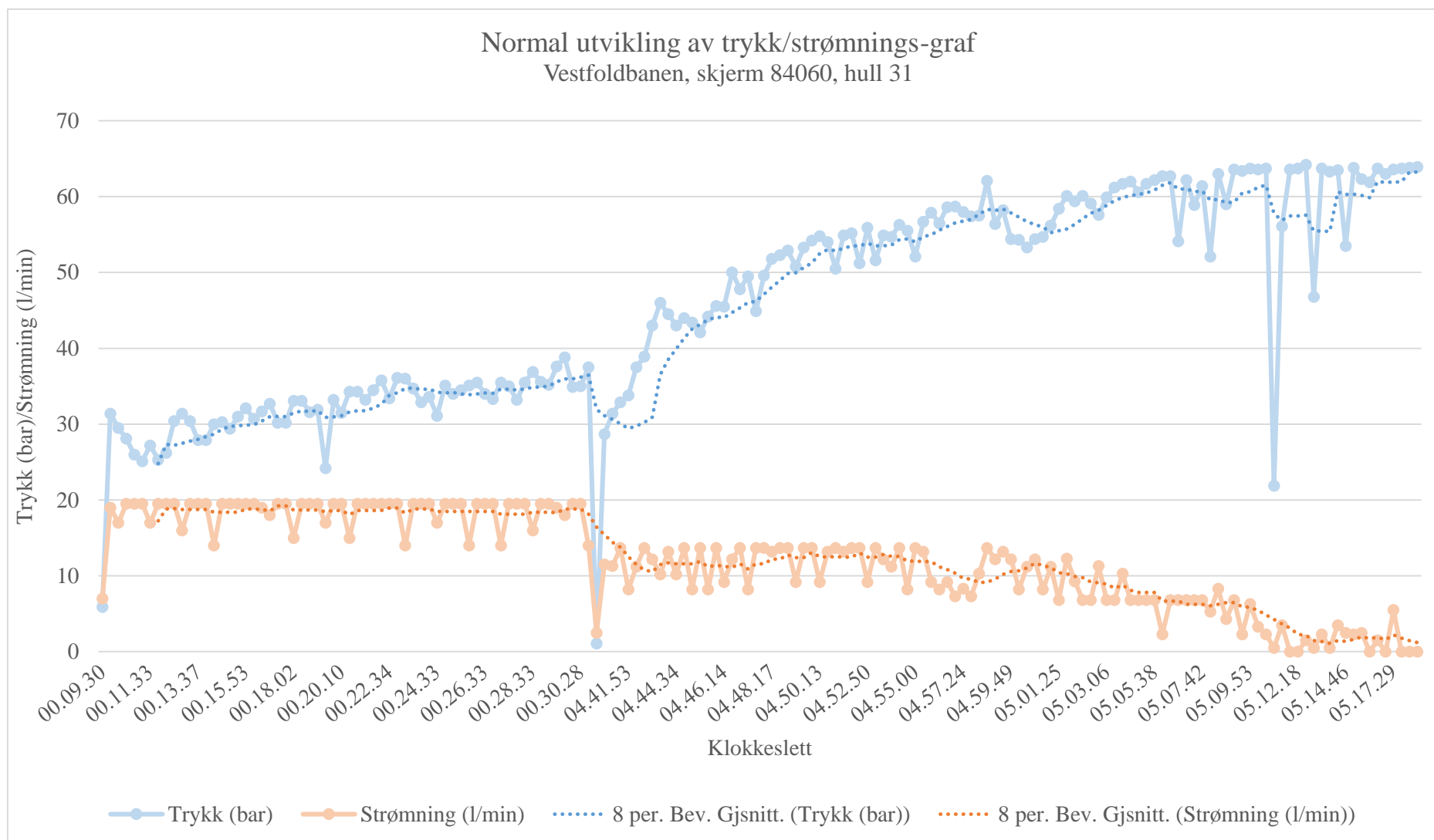
strømning samtidig som trykket stiger, og økning i strømning når trykket brått faller som følge av jekkingen.

Tilfeller der trykket helt i begynnelsen av injeksjonsprosessen var svært høyt (opp mot 100 bar) for så å falle, ble ikke tolket som tilsynelatende jekking dersom injisert volume på det tidspunktet trykkfallet begynte var mindre enn det som skal til for å fylle borhullet (Figur 9-4) (~87 liter som er 145 kg sement ved blanding $v/c = 0,8$ og 3 kg/dm^3 egenvekt sement).

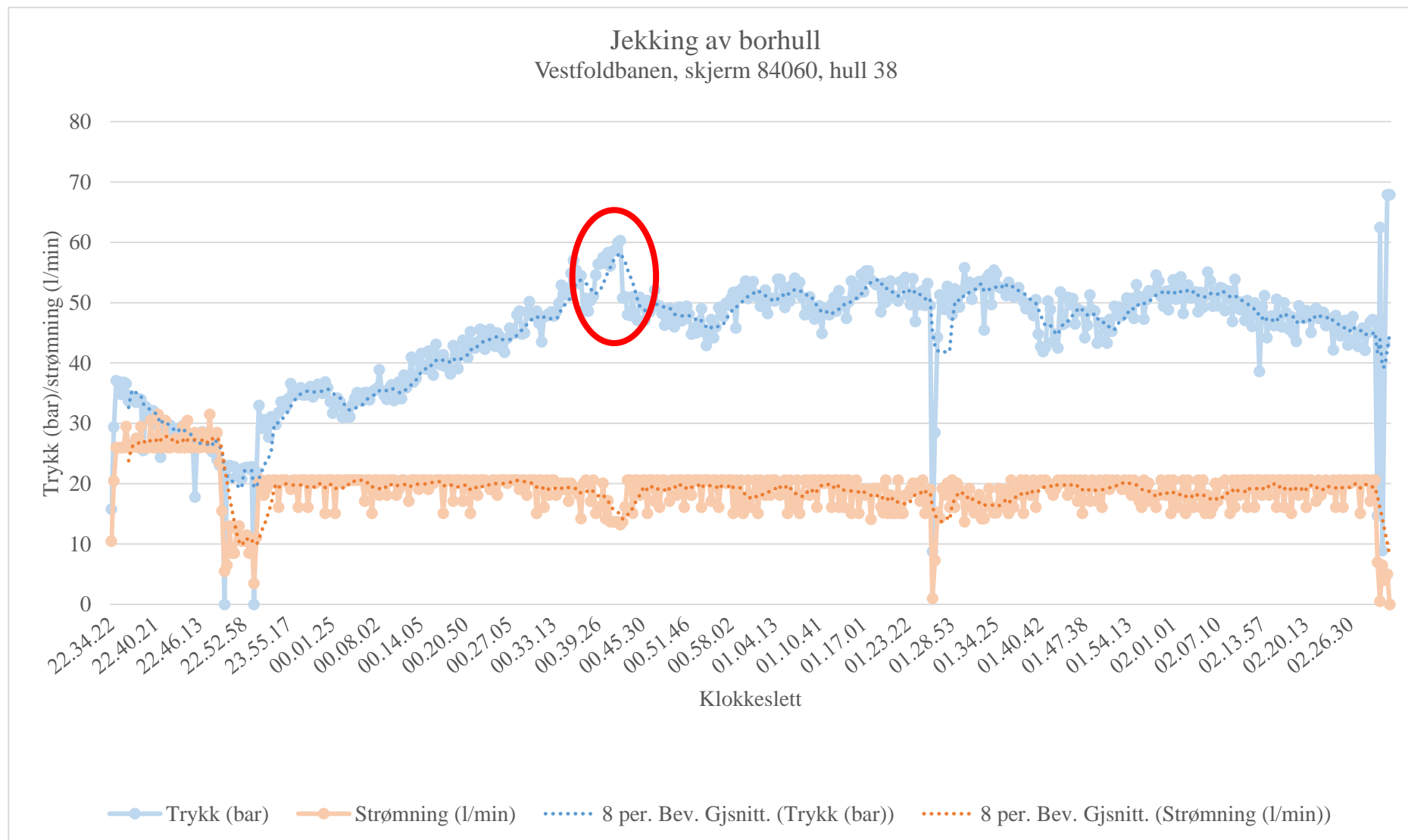
Tiden på x-aksen er hvert loggetidspunkt, og er derfor ikke lineær. Tiden mellom de loggede punktene avhenger av hvordan injeksjonen er utført. Dersom et hull er hvilt vil det for eksempel bli et lengre opphold mellom loggetidspunktene. Loggeintervallet er satt til 20 sekunder på Vestfoldbanen og 10 sekunder på Follobanen. Dataene er derfor hovedsakelig logget i dette intervallet.



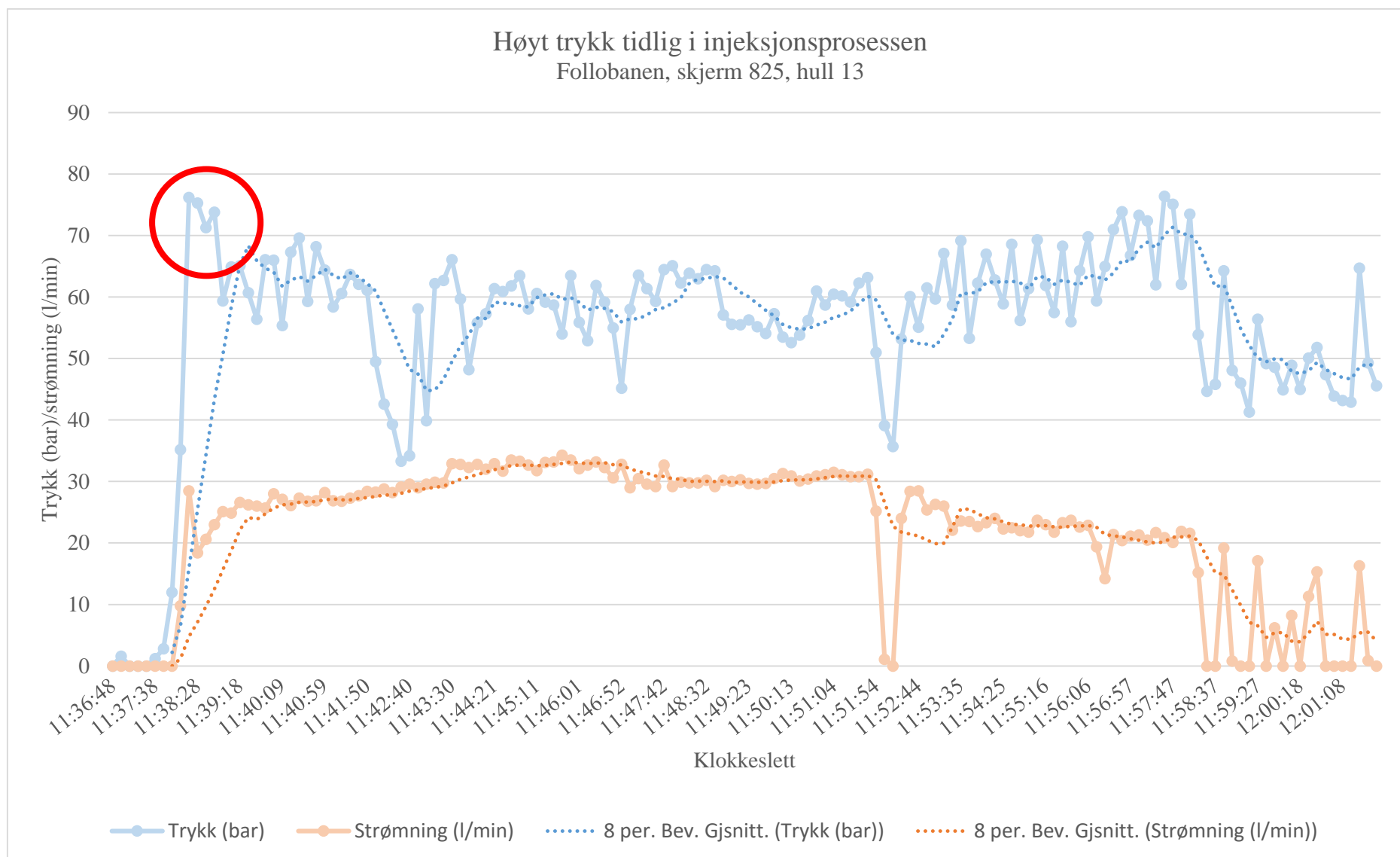
Figur 9-1: Utjevning av trykk- og strømningsgraf med glidende gjennomsnitt. De to store fallene i grafene indikerer hviling av hullet.



Figur 9-2: Normalt injeksjonsforløp. Trykket stiger jevnt gjennom hele injeksjonen, mens strømmingen synker. De store trykkfallene er på grunn av hviling av hullet.



Figur 9-3: Jekking av borhull vist på trykkgrafen, markert med rød ring. Det er først en trykkoppbygging, før trykket faller brått. I dette tilfellet synker også strømmingen samtidig som trykket stiger, og stiger når trykket synker.



Figur 9-4: Svært høyt injeksjonstrykk tidlig i injeksjonsprosessen, før injisert volum er tilstrekkelig til å fylle borhullet, markert med rød ring. Dette er ikke tolket som jekking, selv om trykket faller brått etter en oppbygging.

Det er kun identifisert en hendelse tilsynelatende jekking per borhull i denne studien. Årsaken er at senere hendelser med jekking vil være mer usikre, og det er umulig å bestemme om det er samme sprekk som jekkes på nytt eller ikke.

Ved tolkning av trykk/tid-graf for å finne tilfeller av jekking er det svært mange feilkilder, og en kan aldri være sikker på hva som faktisk skjer i bergmassen under injeksjon. Tolkningene kan derfor aldri være 100 % sikre. Feilkilder i forbindelse med studien diskuteres i Kapittel 11.15. Videre i teksten vil disse tilfellene likevel bli omtalt som tilfeller av jekking.

9.4 TOLKNING AV DATA VED JEKING

I de tilfellene det ble identifisert jekking ble dette notert i en tabell med data fra den aktuelle skjermen med hensyn på hull og tidspunkt for jekking. Når alle hullene i en skjerm var gjennomgått, ble maksimalverdi for trykk per hull og injeksjonsmasse funnet. Videre ble total volum per hull og injeksjonsmasse summert. Tidsdifferansen mellom loggetidspunktene ble også funnet for å kunne regne ut akkumulert tid per hull. Verdiene er benyttet til analyse av observasjonene på begge prosjektene. Rådata og utregninger fra hver enkelt skjerm er gitt i Vedlegg C.

9.5 VISUALISERE DATA

Microsoft Excel 2013 er benyttet for systematisering av data og utarbeiding av diagrammer. Det er benyttet stolpe-, kombinasjons- og spredningsdiagram for å visualisere dataene og funnene i studien. Kondensert data fra de to studerte seksjonene er presentert i Vedlegg D. Dataene i vedlegget er gjennomsnittsverdier for ulike parametere i hver av de studerte skjermene. Det er hovedsakelig denne dataen som er benyttet til å lage grafer i studien. Alle diagrammer og plott som er benyttet for å analysere dataene i studien er presentert i Vedlegg E.

Stolpediagram er hovedsakelig benyttet der det er sett på én og én faktor, mens kombinasjons- og spredningsdiagram er benyttet for å sammenstille flere faktorer. Beste tilpasset trendlinje med R-kvadrat (R^2) er lagt til i kombinasjons- og spredningsdiagrammene for å undersøke sammenhengen mellom plottede faktorer. R-kvadrat angir hvor godt trendlinjen følger dataene, altså hvor god sammenheng det er mellom de studerte faktorene. Verdien til R-kvadrat varierer mellom 0 og 1, der 1 er perfekt tilpasset (fullstendig sammenheng) og 0 er ikke tilpasset (ingen sammenheng). Ved bruk av spredningsdiagram forteller R-kvadrat hvor mange prosent av variasjonen som forklares med det lineære forholdet som er tegnet inn. Det er ikke definert en

verdi R-kvadrat bør være større enn for å kunne si at det er en sammenheng mellom sammenstilte faktorer, men R-kvadrat nærmere 1 vil forklare flere prosent av variasjonen enn en lavere R-kvadrat (Winston, 2011).

9.6 EFFEKTIVT INJEKSJONSTRYKK

Både på Follobanen og Vestfoldbanen er det installert fjellbrønner som gir informasjon om grunnvannsnivået relativt nær de studerte seksjonene. Informasjon fra brønnene er benyttet for å anslå vanntrykket som fungerer mot injeksjonstrykket, og dermed kunne beregne det effektive trykket bergmassen utsettes for.

Vanntrykket er regnet ut basert på overdekningen over hver enkel skjerm og på hvilket nivå grunnvannsspeilet antas å være på det aktuelle stedet. Ved å kjenne disse to faktorene, kan vannsøylen regnes ut, og vanntrykket i megapascal (MPa) finnes ved formelen:

$$\text{Vanntrykk} = \rho gh \quad (9-1)$$

Der: ρ = vannets tetthet (1 000 kg/m³)
 g = gravitasjonsakselerasjon (9,81 m/s²)
 h = vannsøylen (m)

Det effektive trykket som virker på bergmassen kan deretter regnes ut ved å subtrahere vanntrykket fra injeksjonstrykket, Formel 9-2:

$$\sigma' = \rho_{injeksjon} - \rho_{vann} \quad (9-2)$$

Der: σ' = effektivt injeksjonstrykk
 $\rho_{injeksjon}$ = injeksjonstrykk
 ρ_{vann} = stedlig vanntrykk

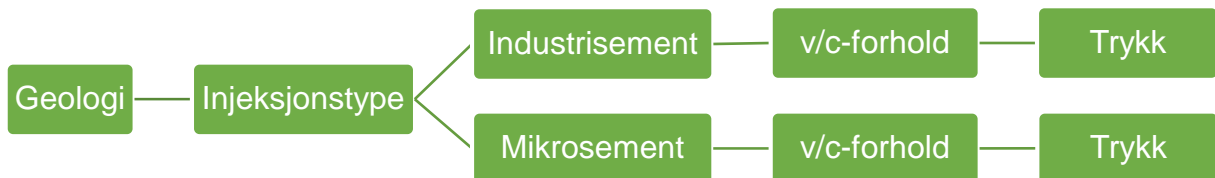
Grunnvannstrykket er beregnet for hver enkelt injeksjonsskjerm basert på vannsøylen som kan antas å stå over hengen på tunnelen. Det er antatt at vannet er i et åpent system, kun påvirket av gravitasjonen. Siden overdekningen er beregnet fra overflaten og ned til hengen på tunnelen vil vanntrykket kunne være noe høyere i sålehullene enn det som er beregnet her.

Informasjon fra de installerte grunnvannsbrønnene for hvert av de studerte prosjektene, samt bergmekaniske egenskaper for bergarten som ble testet i forbindelse med måling av spenningstilstanden i områdene tunnelen er drevet er presentert i Vedlegg F. Utrekning basert på teoretiske formler for å estimere trykket der jekking av bergmassen er forventet å forekomme

er gitt i Vedlegg G. Det er også gjort en sammenlikning med det effektive trykket der jekking er tolket basert på trykk/tid-grafene og grunnvannsmålingene, presentert i samme vedlegg.

9.7 SORTERING

Før studien ble påbegynt ble det definert noen sorteringskriterier som måtte være oppfylt for å kunne sammenlikne data fra ulike prosjekter og injeksjonsskjermer. Den overordnede sorteringen er basert på geologien injeksjonen var utført i. Neste kriterium var typen injeksjonsmasse som ble benyttet, industrisement eller mikrosegment. Videre skulle v/c-forhold og injeksjonstrykket tas hensyn til. Sorteringskriteriene er oppsummert i Figur 9-5.



Figur 9-5: Sortering av data basert på ulike kriterier.

Ved injeksjon på Follobanen ble det benyttet flere ulike v/c-forhold, samt benyttet akselerator i injeksjonsmassen i enkelte skjermer. For å redusere antall variabler og usikkerheter i studien ble det valgt å kun se på injeksjonshull der v/c-forholdet var enten 0,9 eller 0,5. Injeksjonshullene der det ble benyttet akselerator ble også ekskludert fra studien. På Vestfoldbanen ble det kun benyttet v/c-forhold 0,8 og 0,5 og det er heller ikke notert at det er tilsatt noen tilsetningsstoffer i injeksjonsmassen i noen av skjermene. Alle dataene fra valgte seksjon på Vestfoldbanen er derfor benyttet i studien.

9.8 ANALYSERE DATA

Trykk, volum og tid til injeksjon er logget med injeksjonsrigger. Disse faktorene er først analysert ved sammenlikning mellom hull med og uten jekking, deretter er hullene med jekking analysert for seg. For å forsøke å finne forklaring på når og hvorfor jekking oppstår er flere av faktorene sett i sammenheng med hverandre etter at faktorene er analysert enkeltvis.

Som et grunnlag for å sammenstille flere faktorer er det utformet hypoteser om hvordan faktorene påvirker hverandre. I tillegg til de variablene som er logget med injeksjonsrigger er

overdekningen over tunnelen sett i sammenheng med tilfellene av registrert jekking. Hypotesene som ble formulert er presentert under.

Det er forventet at:

1. Jo høyere maksimaltrykk som er oppnådd i hver skjerm, jo flere tilfeller med jekking vil være registrert
2. Ved kategorisering av alle hull i samme prosjekt basert på trykk når jekking initieres, vil kategoriene med høyest trykk ha flest tilfeller med registrert jekking
3. Skjermer med høyt masseforbruk har en større andel hull som er jekket
4. Større volum injisert før jekking krever lavere trykk for at jekking initieres
5. Lengre injeksjonstid fører til et større volum injisert
6. Jo lengre tid med injeksjon før jekking, jo større volumet er injisert når jekking initieres
7. Det finnes en sammenheng mellom overdekning, effektivt trykk ved jekking og prosentandel hull som er jekket

10 RESULTATER

I dette kapittelet er resultater fra studien presentert. Det er utført en rekke ulike sorteringer for å finne sammenhenger for når det kan forventes jekking i bergmassen.

Totalt 355 hull fordelt på 9 skjermene er studert fra prosjektet på Follobanen. Av disse er det registrert jekking i 55 av hullene. På Vestfoldbanen er 10 skjermene og 420 hull studert, det er registrert 137 tilfeller med jekking. Samlet for begge prosjektene gir dette 19 studerte skjermene med totalt 775 hull og 192 tilfeller jekking. Det er kun en av de studerte skjermene der det ikke er registrert jekking i noen av injeksjonshullene. Tabell 10-1 oppsummerer nøkkeldata for utført studie.

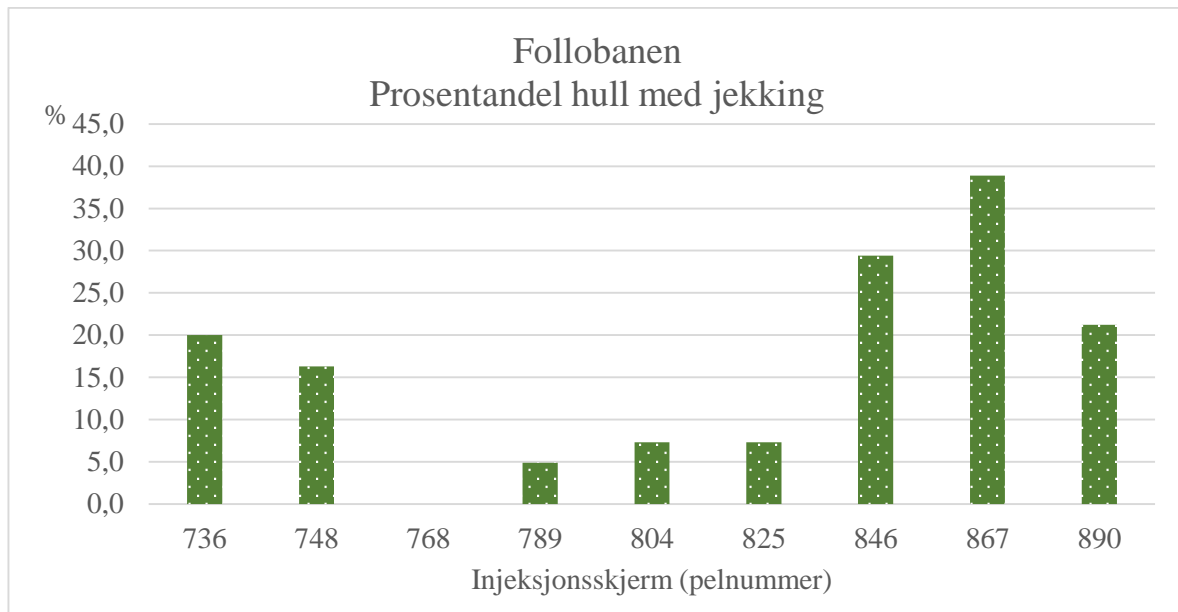
Tabell 10-1: Nøkkeldata for utført studie.

	Lengde studert seksjon (m)	Antall skjermene studert	Antall hull studert	Antall tilfeller med jekking
Follobanen	154	9	355	55
Vestfoldbanen	151	10	420	137
SUM	305	19	775	192

I alle figurer i de påfølgende delkapitlene er injeksjonsskjermene plottet i den rekkefølgen de opptrer i de studerte seksjonene dersom annet ikke er oppgitt. Skjermene er nummerert med det pelnummeret det er injisert fra, og dette nummeret er benyttet videre for å identifisere hver enkelt injeksjonsskjem.

10.1 JEKking

Antall tilfeller med jekking og prosentandelen hull med jekking er høyere på Vestfoldbanen enn på Follobanen. Gjennomsnittlig er det jekking i 16 % av hullene på Follobanen og 31 % på Vestfoldbanen. I to av skjermene på Vestfoldbanen er det registrert jekking i nær 50 % av hullene. Figur 10-1 viser prosentandelen av hullene på Follobanen med registrert jekking. En av skjermene har ingen registrerte tilfeller av jekking, skjerm 768, det er derfor ingen stolpe ved denne skjermen. Figur 10-2 viser prosentandelen av hullene i hver av de studerte injeksjonsskjermene på Vestfoldbanen der det er registrert jekking.



Figur 10-1: Prosentandel hull med jekking i de studerte skjermene på Follobanen. Skjerm 768 har ingen registrert tilfeller med jekking og derfor ingen stolpe i figuren



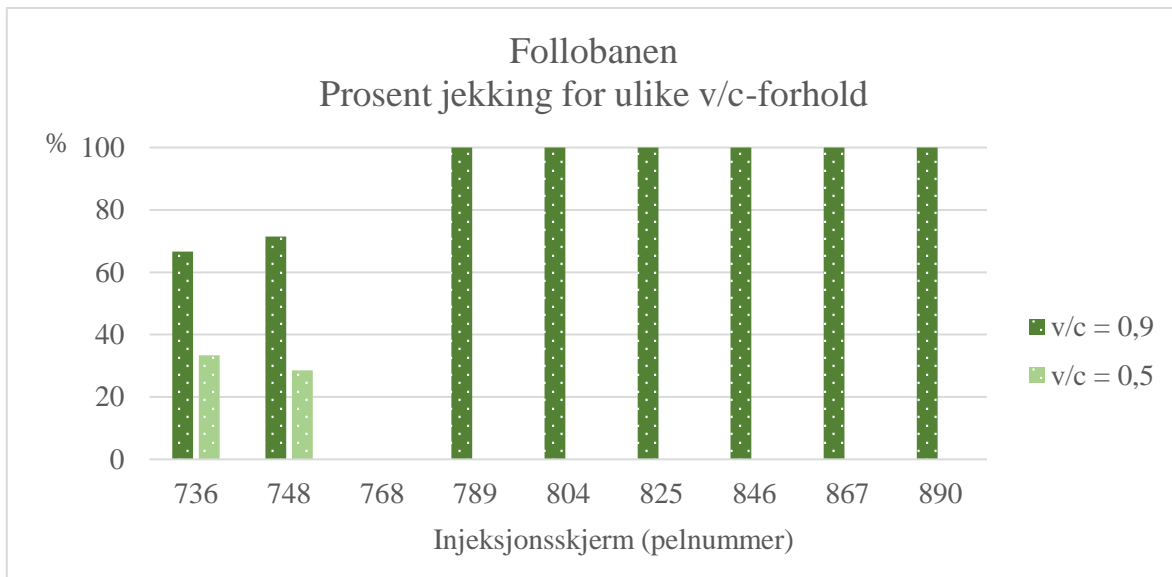
Figur 10-2: Prosentandel hull med jekking i de studerte skjermene på Vestfoldbanen.

10.2 V/C-FORHOLD

10.2.1 Follobanen

På Follobanen ble det, som tidligere nevnt, benyttet flere ulike v/c-forhold, men det er kun $v/c = 0,9$ og $0,5$ som er tatt med i studien. Siden injeksjonsprosessen begynner med $v/c = 0,9$ og $v/c = 0,5$ kun er benyttet i tre av de studerte skjermene, er data fra injeksjonsmasse med $v/c = 0,9$ hovedsakelig analysert. Ettersom datagrunnlaget for analyser stort sett er basert på

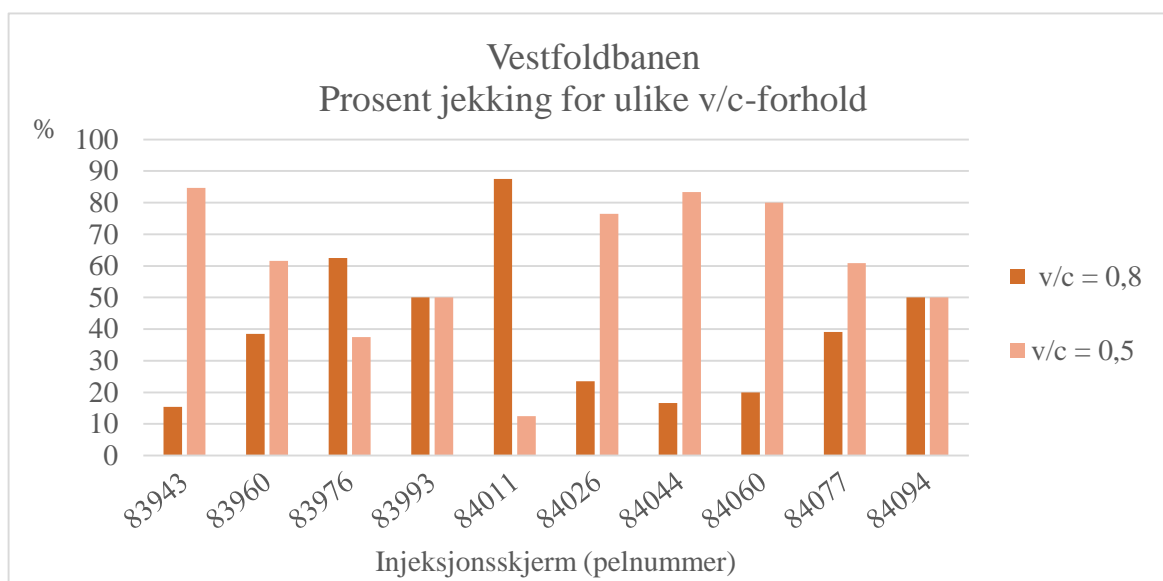
$v/c = 0,9$ er det også ved bruk av denne massen majoriteten av jekking forekommer. Av de tre skjermene hvor $v/c = 0,5$ er benyttet, er det kun registrert jekking i to av skjermene. Prosentandelen med jekking ved $v/c = 0,5$ i de to skjermene er henholdsvis 33 % og 28 %. Hovedandelen jekking har altså forkommet ved bruk av $v/c = 0,9$ også i disse skjermene. Figur 10-3 viser prosentfordeling av jekking mellom de to benyttede injeksjonsmassene. Skjem 768 har ingen søyle, da det ikke er registrert noen tilfeller av jekking.



Figur 10-3: Prosent av hullene med tilsynelatende jekking med $v/c = 0,9$ og $0,5$ for de studerte skjermene på Follobanen.

10.2.2 Vestfoldbanen

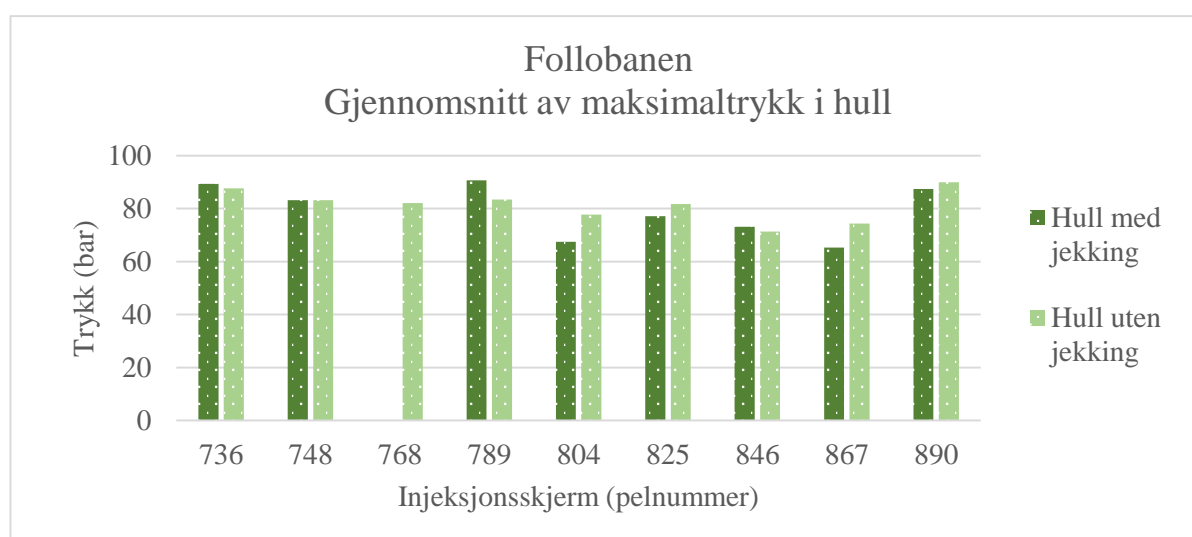
På Vestfoldbanen er flest tilfeller av jekking registrert ved bruk av $v/c = 0,5$. Dette er en gjennomgående trend for alle de studerte skjermene på prosjektet. Ved to av skjermene er fordelingen av jekking 50/50 mellom de to injeksjonsmassene, og ved to skjermer er flest tilfeller av jekking registrert ved $v/c = 0,8$. Prosentfordelingen av tilfeller med jekking mellom de to injeksjonsmassene som er benyttet vises i Figur 10-4.



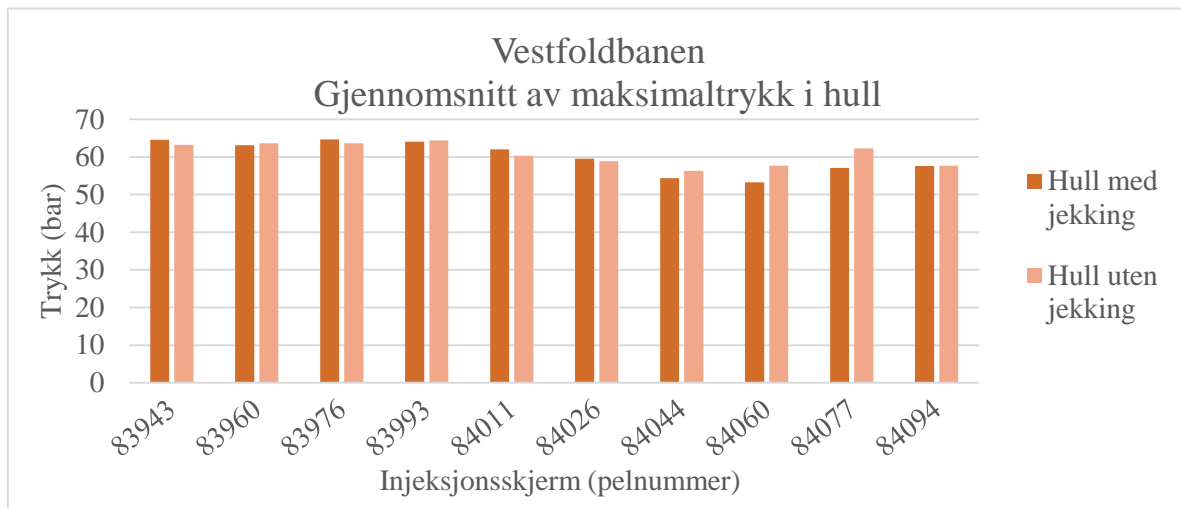
Figur 10-4: Prosent av hullene med tilsynelatende jekking med v/c = 0,8 og 0,5 for de studerte skjermene på Vestfoldbanen.

10.3 TRYKK

Injeksjonstrykket som er benyttet på de to prosjektene er ulike. Generelt er det brukt høyere trykk på Follobanen. Gjennomsnittstrykket på Follobanen er 80 bar, mens på Vestfoldbanen er det 60 bar. Trykket som fører til jekking er også ulikt for de to prosjektene. Gjennomsnittlig 79 bar og 60 bar for henholdsvis Follobanen og Vestfoldbanen. Figur 10-5 og Figur 10-6 viser at det er svært liten forskjell i maksimalt oppnådd trykk mellom hull med og uten jekking på begge prosjektene. I totalt 7 av 19 skjerner er dessuten maksimalt oppnådd trykk i hull uten jekking noe høyere enn i hull med jekking.



Figur 10-5: Gjennomsnitt av maksimaltrykk i hvert hull med og uten jekking i hver av de studerte skjermene på Follobanen.

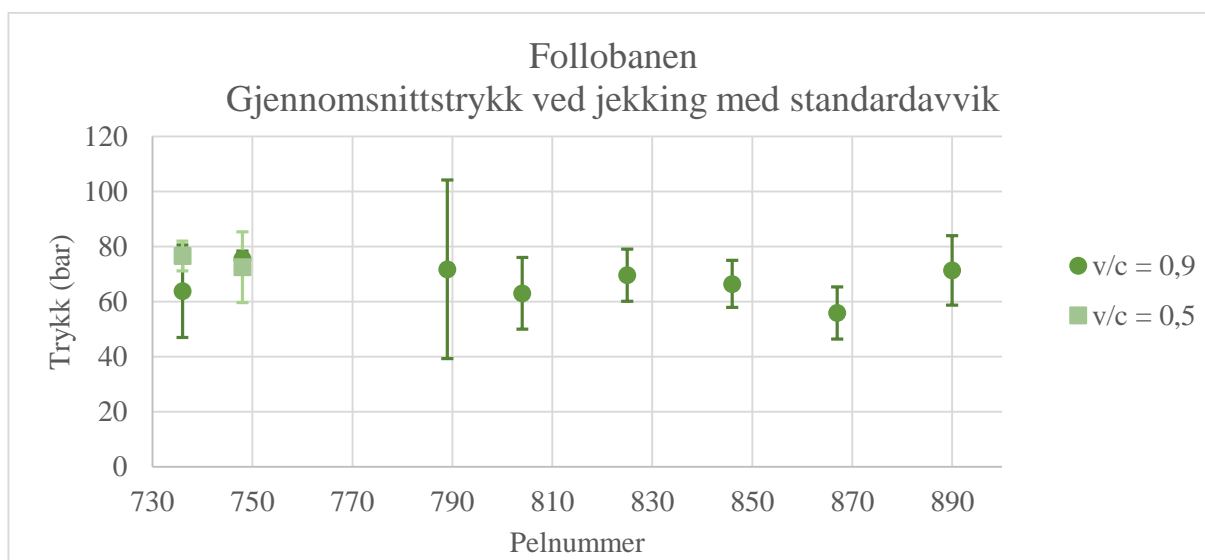


Figur 10-6: Gjennomsnitt av maksimaltrykk i hvert hull med og uten jekking i hver av de studerte skjermene på Vestfoldbanen.

10.3.1 Follobanen

Figur 10-7 viser gjennomsnittstrykket med standardavvik som har ført til jekking av hullene i injeksjonsskjermene på Follobanen. Trykket varierer stort sett mellom 60 og 70 bar. Det er ikke registrert noen tilfeller av jekking i skjerm 768. Injeksjonsmasse med $v/c = 0,5$ er kun benyttet på skjerm 736 og 748. Punkter for $v/c = 0,5$ vises derfor kun for disse skjermene. Imidlertid er trykket ved jekking relativt likt for de to injeksjonsmassene. Med $v/c = 0,9$ er trykket i skjerm 736 og 748 henholdsvis 64 og 73 bar. I de samme skjermene er trykket 77 og 73 bar ved $v/c = 0,5$.

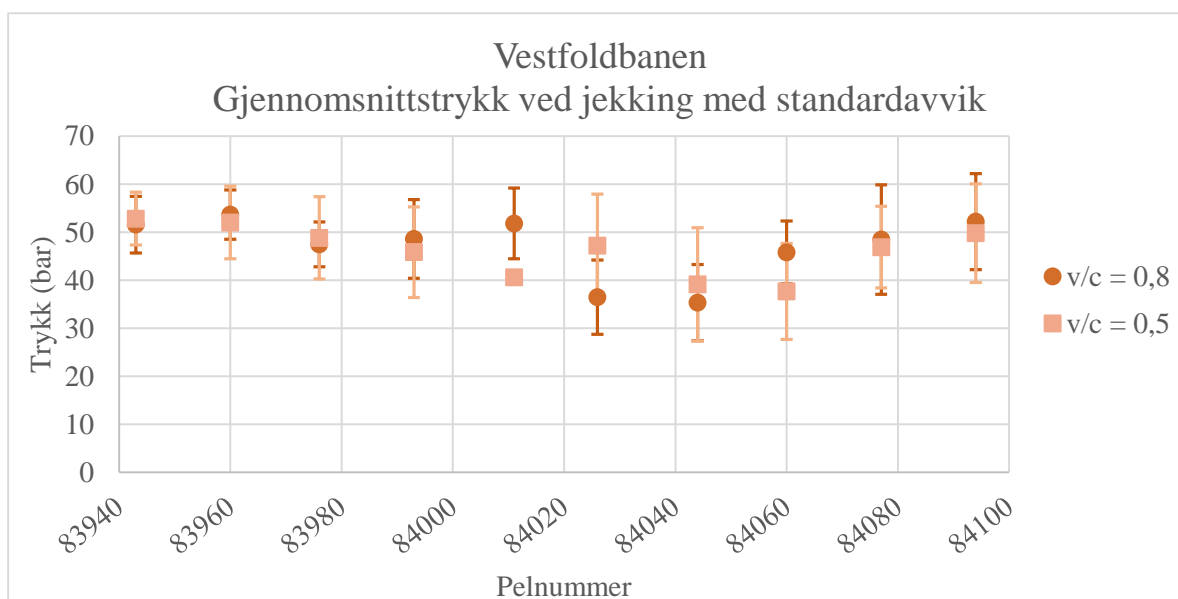
Standardavviket varierer fra skjerm til skjerm. Størst avvik er registrert for skjerm 789 ved $v/c = 0,9$ med et standardavvik på ± 32 . Standardavviket på de andre skjermene med $v/c = 0,9$ varierer stort sett mellom ± 9 til ± 13 . Ved jekking med v/c -forhold 0,5 er standardavviket noe lavere. På skjerm 736 er standardavviket ± 5 , mens på skjerm 748 er det ± 13 .



Figur 10-7: Gjenomsnittstrykk ved jekking med standardavvik ved bruk av de ulike injeksjonsmassene på Follobanen.

10.3.2 Vestfoldbanen

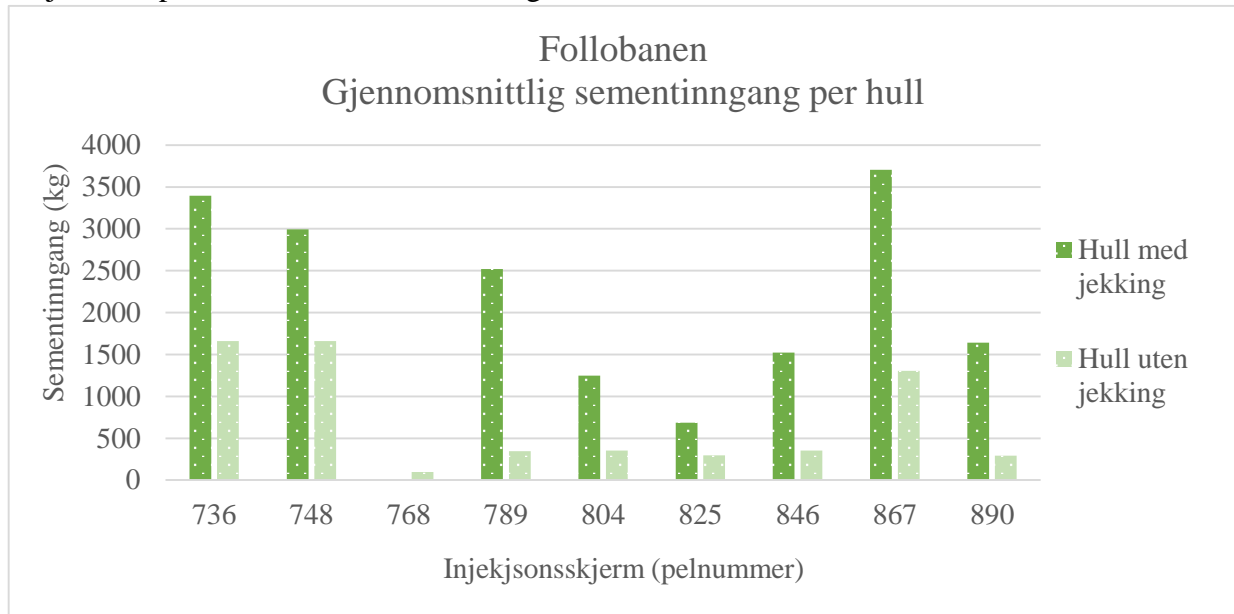
Figur 10-8 viser gjenomsnittstrykket ved jekking med standardavvik for de to benyttede v/c-forholdene på Vestfoldbanen. Jekking er hovedsakelig observert ved trykk mellom 40 og 50 bar for begge v/c-forholdene. To skjermer, 84026 og 84044, har noe lavere trykk ved jekking med v/c = 0,8. Skjerm 84044 har lavere trykk også ved v/c = 0,5, det samme har skjerm 84060. Gjenomsnittstrykket i de nevnte tilfellene er noe under 40 bar (35- 38 bar). Sett bort fra disse avvikene, er korrelasjonen mellom trykket ved jekking med de to ulike injeksjonsmassene relativt bra (R-kvadrat = 0,6).



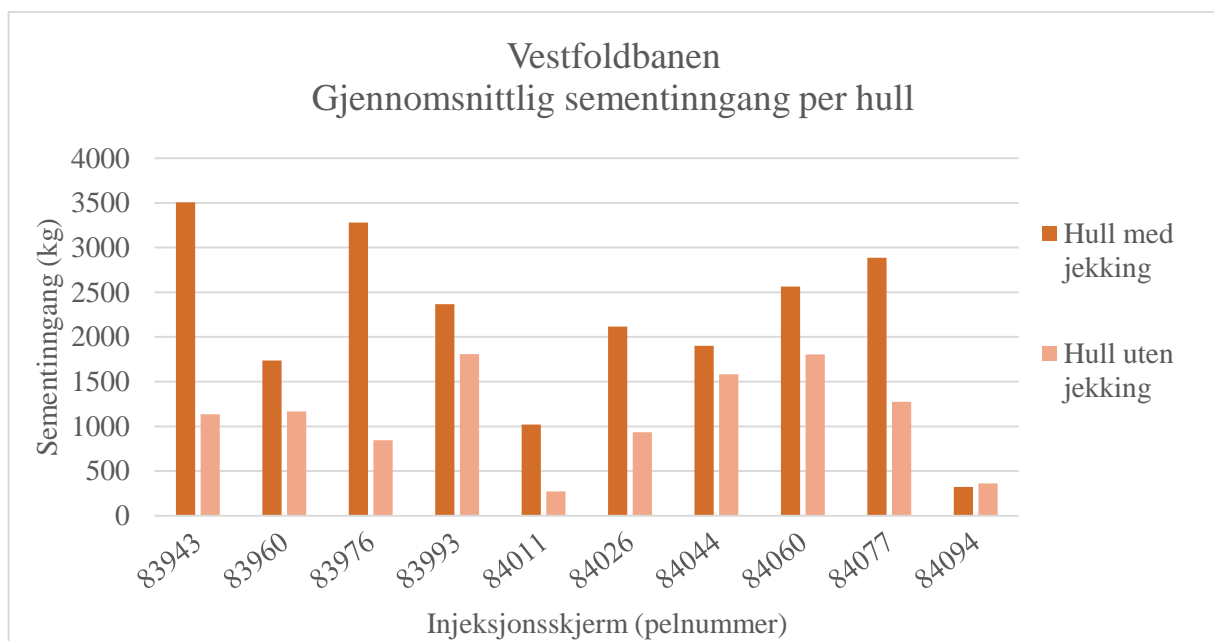
Figur 10-8: Gjenomsnittstrykk ved jekking med standardavvik ved bruk av de ulike injeksjonsmassene på Vestfoldbanen.

10.4 VOLUM

Forbruket av sement varierer mye fra injeksjonsskjerm til injeksjonsskjerm. På både Follobanen og Vestfoldbanen er sementinngangen i hullene der jekking forekommer, generelt høyere enn hullene uten jekking. I tilnærmet alle skjermene på Follobanen, og i flere skjermene på Vestfoldbanen, er inngangen over dobbelt så høy i hullene der det er jekking. Figur 10-9 og Figur 10-10 viser gjennomsnittlig total sementinngang per borhull med og uten jekking i skjermene på henholdsvis Follobanen og Vestfoldbanen.



Figur 10-9: Gjennomsnittlig sementinngang i hull med og uten jekking i de studerte skjermene på Follobanen.



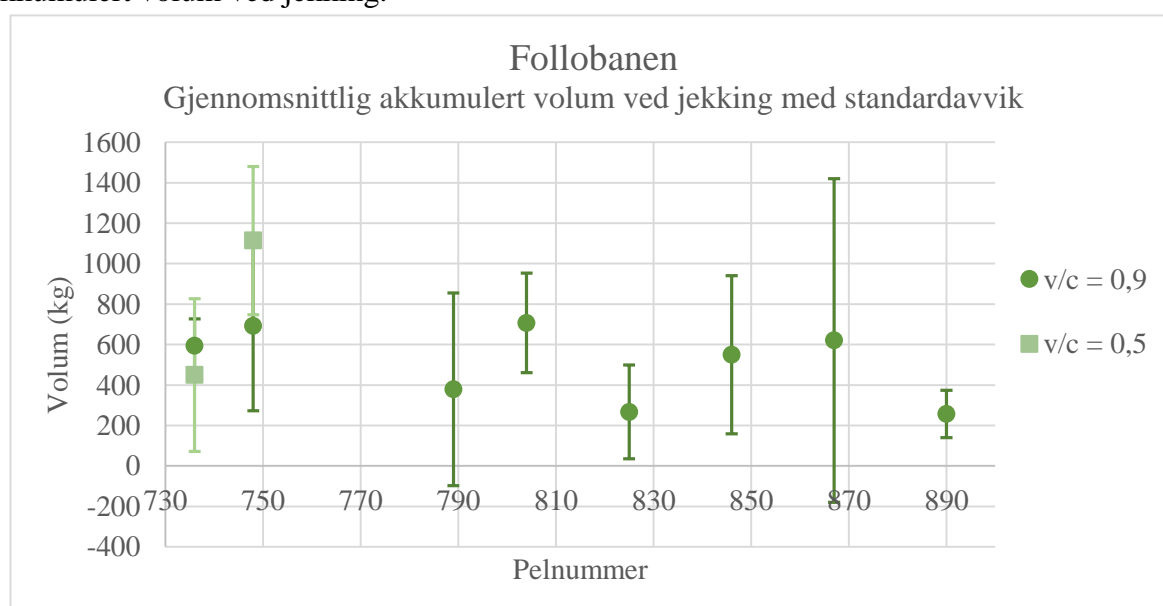
Figur 10-10: Gjennomsnittlig sementinngang i hull med og uten jekking i de studerte skjermene på Vestfoldbanen.

Det er god korrelasjon mellom total masseinngang i hull med og uten jekking på begge prosjektene. Det betyr at dersom masseinngangen i hull med jekking i en skjerm er høy, er masseinngangen også høy i hull uten jekking i samme skjerm, og tilsvarende ved lav masseinngang. På Follobanen er R-kvadrat = 0,8, hvilket indikerer god sammenheng. Vestfoldbanen har noe dårligere sammenheng, R-kvadrat = 0,5, men det tyder likevel på at det er en sammenheng. Dette indikerer at bergmassen som injiseres har betydning for hvor mye sement som går med til injeksjon.

Volumet som er injisert når jekking forekommer er svært varierende. Injisert volum ved jekking med de to injeksjonsmassene varierer dessuten mye. Generelt er volumet høyere ved jekking med bruk av injeksjonsmasse $v/c = 0,5$ på begge de studerte prosjektene. Årsaken til det er trolig at injeksjonen vanligvis begynner med masse med $v/c = 0,8$ før det går over til å injisere masse med $v/c = 0,5$.

10.4.1 Follobanen

I prosjektet på Follobanen er jekking fortrinnsvis registrert ved volum mellom ca. 300 og 700 kg sement ved $v/c = 0,9$ (Figur 10-11). I skjerm 736 og 748 er det registrert jekking ved henholdsvis omtrent 450 kg og 1100 kg sement med $v/c = 0,5$. Skjerm 748 har også det høyeste akkumulerte volumet ved jekking med $v/c = 0,9$ sammen med skjerm 804, omtrent 700 kg sement. Skjerm 736 har høyere akkumulert volum ved jekking med $v/c = 0,9$ enn med $v/c = 0,5$. Både skjerm 736 og skjerm 867 har omtrent 600 kg forbrukt masse når jekking inntreffer. Skjerm 846 har 550 kg forbrukt masse ved jekking, og tre skjermer, 789, 825 og 890, har under 400 kg akkumulert volum ved jekking.

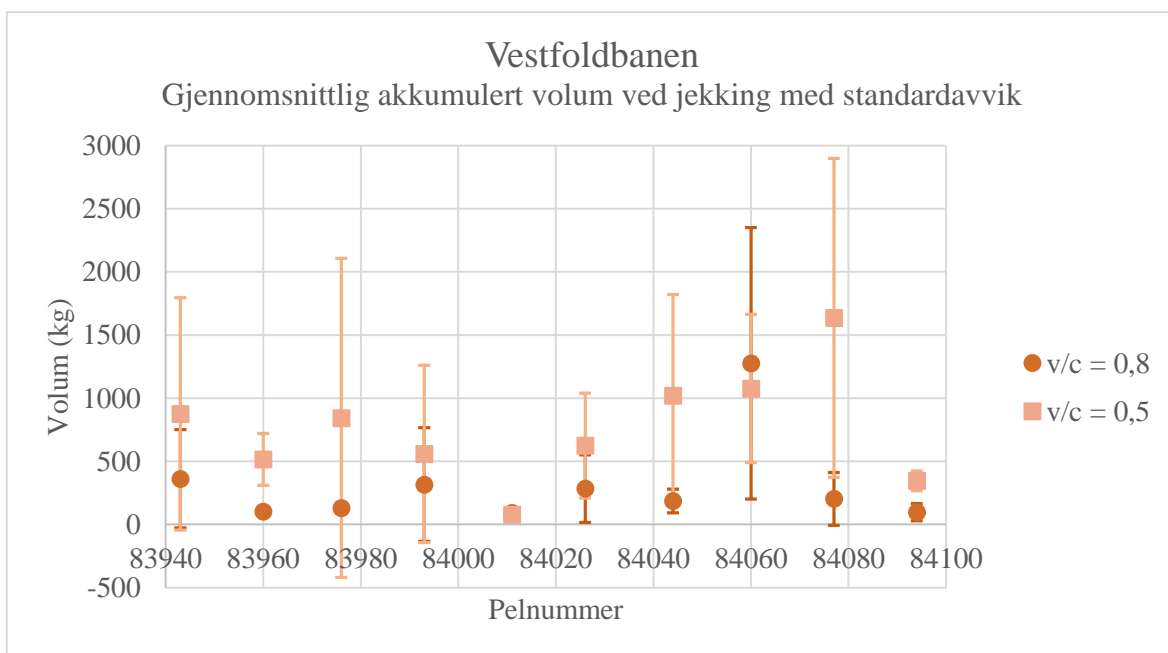


Figur 10-11: Gjennomsnittlig akkumulert volum ved jekking med standardavvik for de to injeksjonsmassene på Follobanen.

Standardavviket for alle skjermene, uavhengig av benyttet injeksjonsmasse varierer mellom ± 100 kg og ± 400 kg. Skjerm 867 skiller seg ut med et standardavvik på ± 800 kg.

10.4.2 Vestfoldbanen

Injeksjonen på Vestfoldbanen har generelt lavere masseforbruk enn Follobanen. Figur 10-12 viser gjennomsnittlig akkumulert volum og standardavvik ved jekking med de to injeksjonsmassene. Jekking skjer i seks av skjermene med volum mindre enn 200 kg ved bruk av $v/c = 0,8$. Totalt ni av skjermene har gjennomsnittlig akkumulert volum under 400 kg ved jekking med $v/c = 0,8$ og kun en skjerm (84060) har over 1000 kg forbrukt sement ved jekking med $v/c = 0,8$. Totalt volum ved jekking er høyere ved bruk av masse med $v/c = 0,5$.



Figur 10-12: Gjennomsnittlig akkumulert volum ved jekking med standardavvik for de to injeksjonsmassene på Vestfoldbanen.

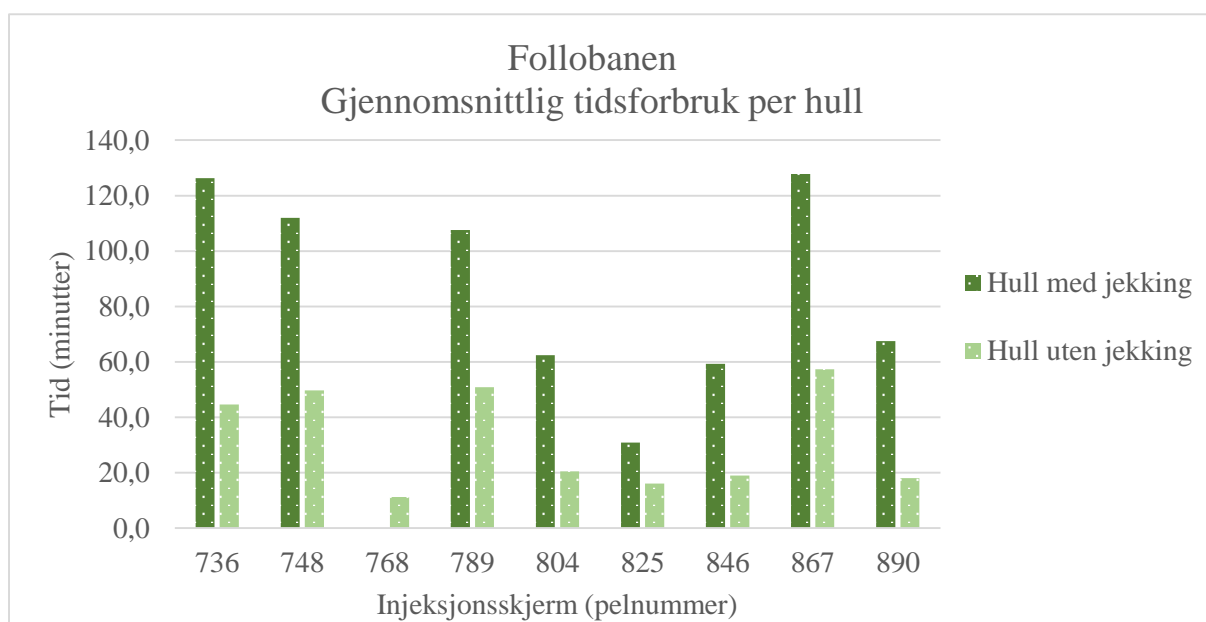
En skjerm, 84011, har under 100 kg (77 kg) forbrukt masse ved jekking med $v/c = 0,5$. Denne skjermen har også lavt masseforbruk ved jekking med $v/c = 0,8$ (92 kg). Skjerm 84094 har gjennomsnittlig forbrukt masse på omtrent 260 kg ved jekking med $v/c = 0,5$. Tre skjermene har forbrukt mellom 400 kg og 600 kg masse med $v/c = 0,5$ når jekking inntreffer. Fire skjermene har mellom 800 kg og 1000 kg, og en skjerm, 84077, har nesten 1300 kg forbrukt masse ved jekking med $v/c = 0,5$.

Standardavviket er i de fleste skjermene større med $v/c = 0,5$. Unntaket er skjerm 84060 der standardavviket er dobbelt så stort med $v/c = 0,8$ som med $v/c = 0,5$. Med $v/c = 0,8$ varierer standardavviket mellom ± 20 kg til ± 250 kg i syv av skjermene, de tre andre skjermene har høyere standardavvik. To av skjermene (83943 og 83993) har standardavvik på omlag ± 400 kg

og siste skjermen (84060) har standardavvik over ± 1000 kg med $v/c = 0,8$. Med $v/c = 0,5$ varierer standardavviket stort sett fra ± 100 kg til ± 800 . Tre skjerner (83943, 83976 og 84077) har standardavvik på rundt ± 1000 kg med $v/c = 0,5$.

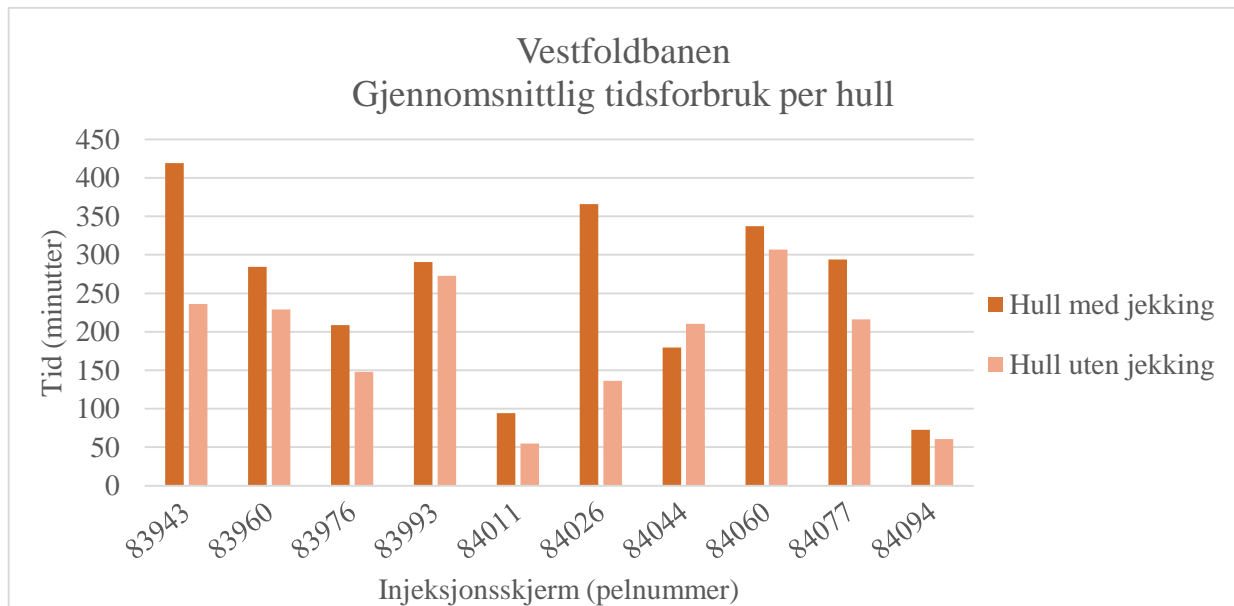
10.5 TID

Tidsforbruket til injeksjon er høyere i hullene med jekking enn i hullene uten jekking. Unntaket er en skjerm på Vestfoldbanen (84044) der injeksjonstiden i gjennomsnitt er lengre i hullene uten jekking. Det er god korrelasjon mellom antall minutter som er gått med til injeksjon med og uten jekking på begge prosjektene. Korrelasjonskoeffisienten på Follobanen er 0,9 og på Vestfoldbanen er den 0,7. Figur 10-13 og Figur 10-14 viser gjennomsnittlig tidsforbruk per hull i hver injeksjonsskjerm med og uten jekking på de to studerte prosjektene.



Figur 10-13: Gjennomsnittlig tidsforbruk per hull med og uten jekking i injeksjonsskjermene på Follobanen.

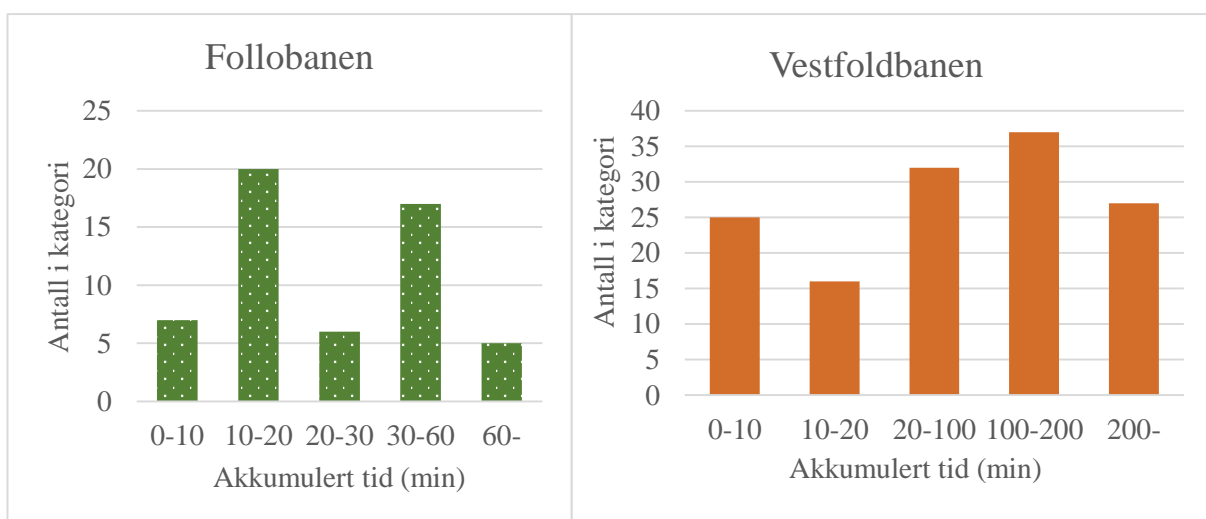
Tidsforbruket til injeksjon er kortere på Follobanen enn på Vestfoldbanen. Gjennomsnittlig, både med og uten jekking, tar det 55 minutter å injisere et hull på Follobanen mot 206 minutter på Vestfoldbanen. Differansen i tidsforbruk mellom hull med og uten jekking er også mindre for injeksjonen på Follobanen. I snitt tar det 52 minutter lengre tid å injisere hull med jekking på Follobanen. På Vestfoldbanen er differansen 70 minutter mellom hull med og uten jekking. Skjerm 84044 på Vestfoldbanen er den eneste skjermen i studien der det i gjennomsnitt tar lengre tid å injisere hull uten jekking enn hull med jekking i samme skjerm. Differansen er omlag 30 minutter.



Figur 10-14: Gjennomsnittlig tidsforbruk per hull med og uten jekking i injeksjonsskjermene på Vestfoldbanen.

Som vist i Figur 10-15 skjer hovedandelen jekking i løpet av de 10 til 20 første minuttene med injeksjon, dette er felles for begge prosjektene. Follobanen har dessuten en stor andel av jekking i tiden mellom 30 og 60 minutter. Etter 60 minutter med injeksjon er det registrert færre tilfeller med jekking (5) på Follobanen.

Injeksjonsprosessen på Vestfoldbanen har, som tidligere nevnt, et lengre tidsforløp. 27 av de totalt 137 tilfellene med jekking på Vestfoldbanen skjer etter 3 timer og 20 minutter (200 min) med injeksjon. Fordelingen mellom 20 - 100 min og 100 - 200 min er relativt lik, med totalt 69 tilfeller jekking i tiden mellom 20 minuttet og 200 minutter.



Figur 10-15: Kategorisering basert på akkumulert tid når jekking initieres på begge prosjektene.

10.6 SAMMENSTILLING AV RELEVANTE FAKTORER

Hypotesene om mulig sammenhengen mellom de presenterte faktorene er undersøkt. Tabell 10-2 gir oversikt over hvilke hypoteser som ble bekreftet og hvilke faktorer som ikke viste noen tydelig sammenheng.

Hypotesene som er bekreftet, hypotese nummer 3, 5, og 6, er presentert i dette avsnittet med tilhørende figurer. Hypotesene som ikke ble bekreftet, hypotese nummer 1, 2, 4 og 7, er kort kommentert i Kapittel 10.10.

Tabell 10-2: Hypotesene som er undersøkt og hvilke som er bekreftet og ikke.

Hypotese	Bekreftet	Ikke bekreftet
1 Jo høyere maksimaltrykk som er oppnådd i hver skjerm, jo flere tilfeller med jekking vil være registrert		X
2 Ved kategorisering av alle hull i samme prosjekt basert på trykk når jekking initieres, vil kategoriene med høyest trykk ha flest tilfeller med registrert jekking		X
3 Skjermer med høyt masseforbruk har en større andel hull som er jekket	X	
4 Større volum injisert før jekking krever lavere trykk for at jekking initieres		X
5 Lengre injeksjonstid fører til et større volum injisert	X	
6 Jo lengre tid med injeksjon før jekking, jo større volum er injisert når jekking initieres	X	
7 Det finnes en sammenheng mellom overdekning, effektivt trykk ved jekking og prosentandel hull som er jekket		X

I de foregående avsnittene har injeksjonsskjermene fra de to prosjektene blitt presentert i den rekkefølgen de opptrer i de studerte seksjonene. For å kunne kombinere flere faktorer og finne eventuelle sammenhenger er det utført ulike sorteringer basert på verdier for faktorene. Prosjektene er fortsatt studert hver for seg.

10.6.1 Hypotese 3: *Skjermer med høyt masseforbruk har en større andel hull som er jekket*

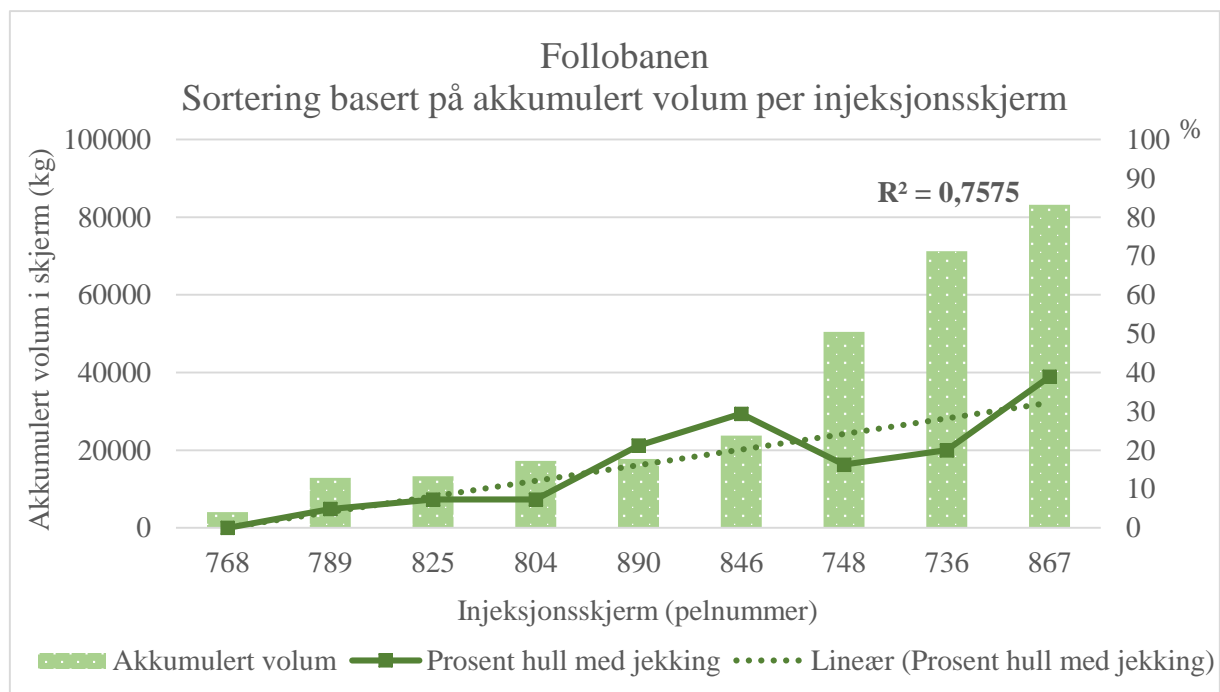
Figur 10-16 og Figur 10-17 viser total sementinngang per injeksjonsskjem sortert i stigende rekkefølge for henholdsvis Follobanen og Vestfoldbanen. I de samme figurene er prosentandelen hull med jekking og trendlinjen til denne faktoren vist.

Trendlinjen i begge figurene viser en tydelig trend mellom totalt injisert volum og prosentandel hull som jekkes i samme skjerm. R-kvadratet for begge prosjektene er over 0,7, hvilket betyr at

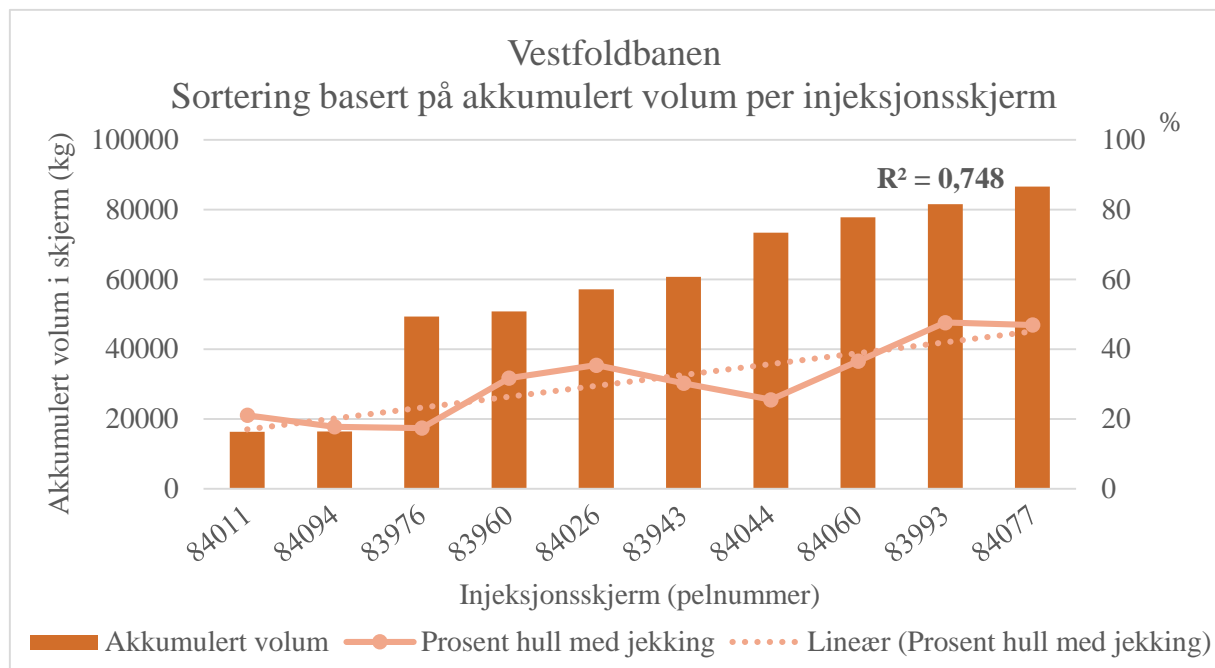
samvariasjon mellom faktorene er god. Hypotese nummer 3 om at større masseforbruk per skjerm gir høyere andel hull med jekking er derfor bekreftet.

Skjermen med minst sementinngang på Follobanen (skjerm 768) har ingen registrerte tilfeller med jekking, mens skjermen med høyest inngang (skjerm 867) har jekking i 39 % av hullene. Sementinngangen i skjerm 867 er over 20 ganger så stor som i skjerm 768.

Differansen mellom skjermene på Vestfoldbanen er mindre enn differansen på Follobanen. Skjerm 84011, som har minst sementinngang, har omtrent $\frac{1}{5}$ av sementinngangen i skjerm 84077 som har størst sementinngang. Forskjellen i prosentandelen hull som er jekket er også mindre på dette prosjektet. Minste andel hull med jekking er 17 % i skjerm 83976, mens mest jekking er registrert i skjerm 83993, der det er registrert jekking i 48 % av hullene.



Figur 10-16: Totalt injisert volum per skjerm og relativt antall hull med jekking på Follobanen.



Figur 10-17: Totalt injisert volum per skjerm og relativt antall hull med jekking på Vestfoldbanen.

10.6.2 Hypotese 5: Lengre injeksjonstid fører til et større volum injisert

Follobanen

Figur 10-18 viser grafisk fremstilling av totalt tid og volum medgått til injeksjon for alle studerte hull på Follobanen i et spredningsplott. Det er differensiert mellom hull med og uten jekking og trendlinje med tilhørende R-kvadrat er tatt med i plottet for begge kategoriene.

Sammenhengen mellom tidsforbruk til injeksjon og totalt injisert volum i hvert hull er veldig tydelig for hull både med og uten jekking på Follobanen. Over 85 % av variasjonen i injisert volum kan forklares med tiden som er gått med til injeksjon uavhengig om hullet er jekket eller ikke. Hullene uten jekking har dessuten tydelig et lavere forbruk av både tid og volum sammenliknet med hull med jekking. De aller fleste hullene, både med og uten jekking, er likevel ferdig injisert i løpet av litt over 1 time og 20 minutter (5000 sekunder). Volumet injisert i hullene er dessuten stort sett under 2000 kg sement.

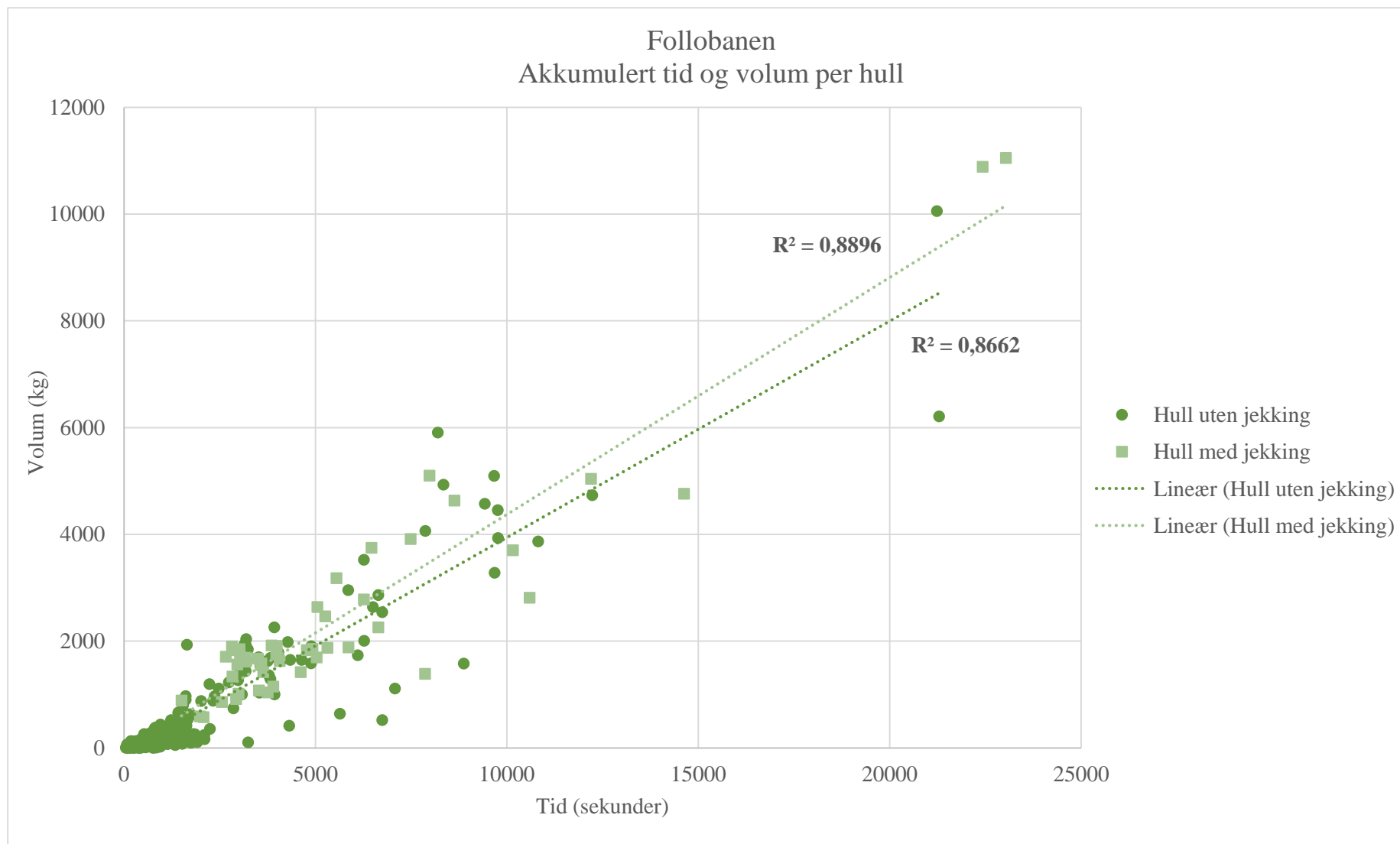
Vestfoldbanen

Totalt forbruk av tid og total injisert volum til injeksjon for alle studerte hull på Vestfoldbanen er presentert i et spredningsplott i Figur 10-19. Trendlinje med R-kvadrat for de to datasettene er tatt med i plottet.

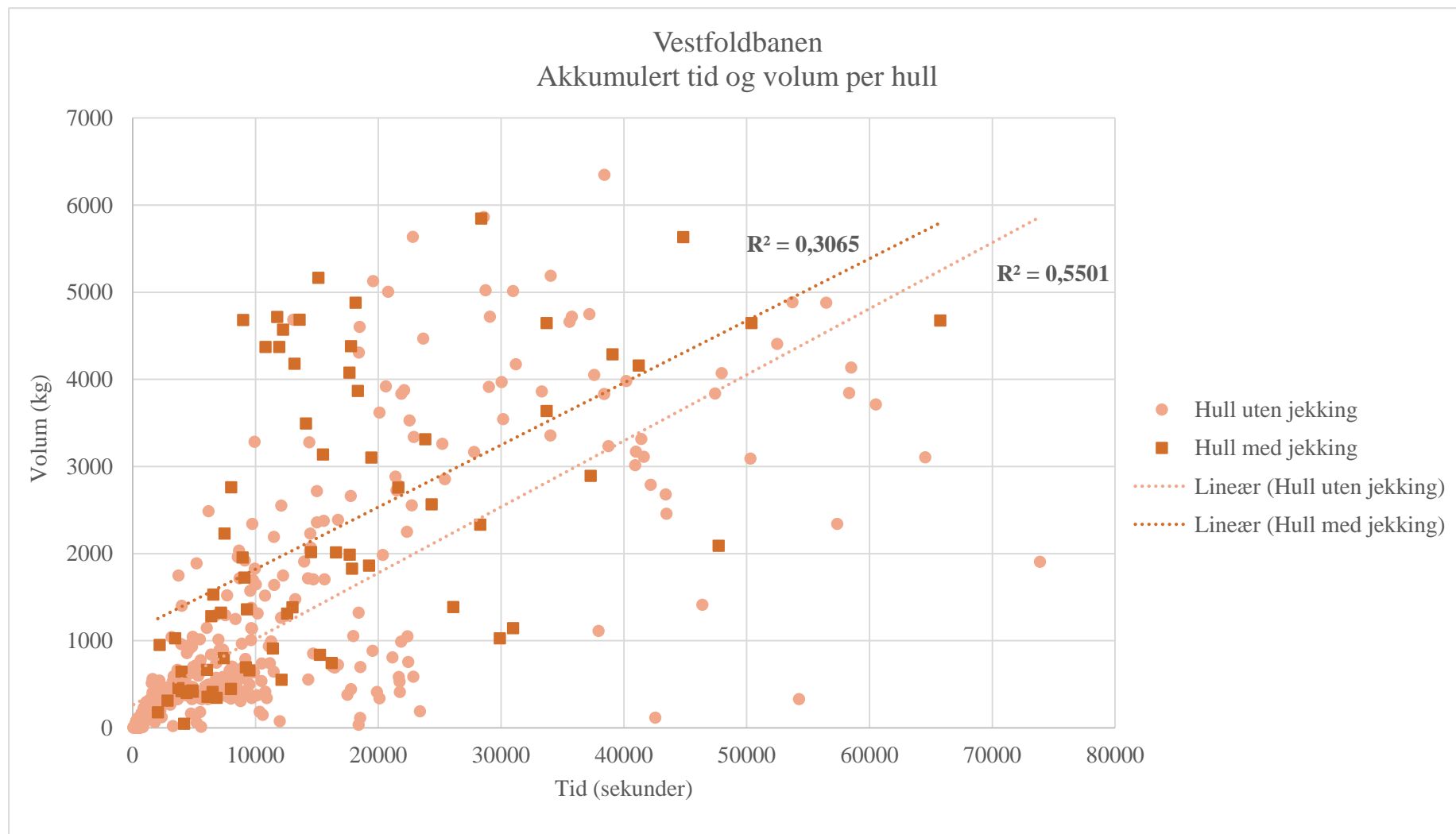
Spredningsplottet med alle hullene på Vestfoldbanen viser en mye større spredning i både forbrukt tid og volum til injeksjon enn plottet for Follobanen. Trendlinjen viser heller ikke en

like tydelig sammenheng. Kun 36 % av variasjonen i injisert volum i hull med jekking kan forklares med tiden som er brukt til injeksjon. Volum injisert i hull uten jekking har noe bedre sammenheng med tiden som er brukt. For disse hullene kan 55 % av variasjonen forklares med tiden som er gått med til injeksjon.

Plottet viser videre at hovedandelen hull uten jekking er ferdig injisert innen 2 timer og 45 minutter (10000 sekunder), og har lavere masseforbruk enn 1000 kg sement. Spredningen til hullene med jekking er svært stor, men masseforbruket er generelt høyere i hull med jekking enn i hull uten jekking.



Figur 10-18: Spredningsplott med akkumulert tid og volum for alle hull på Follobanen. Trendlinje for hull med og uten jekking er tegnet inn med tilhørende R-kvadrat.

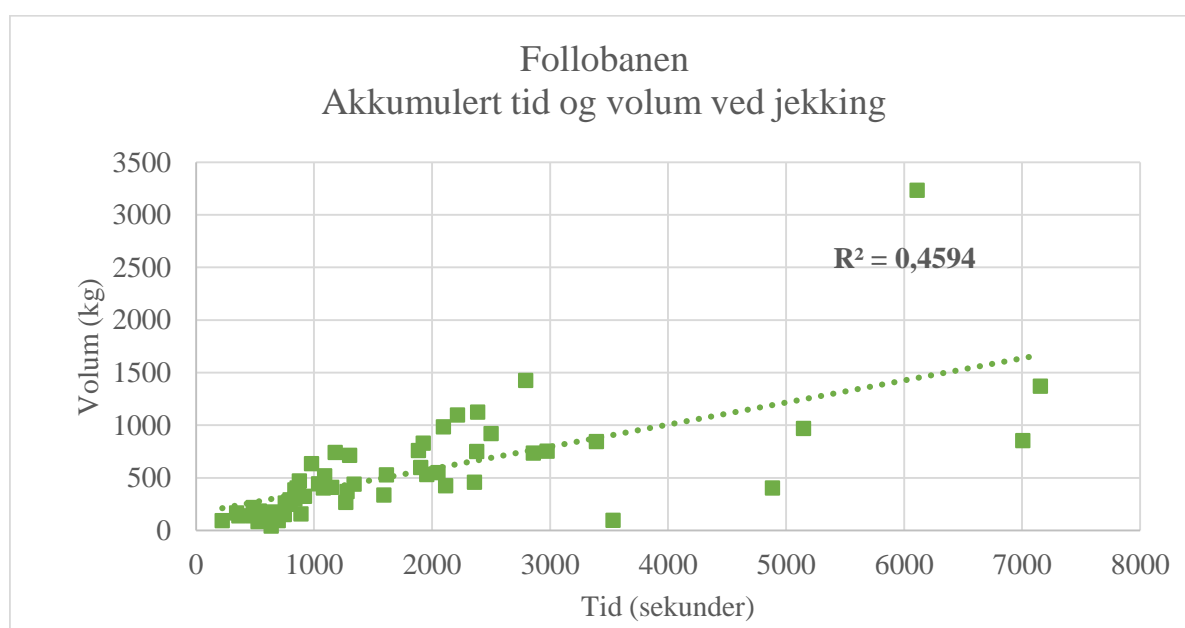


Figur 10-19: Spredningsplott med akkumulert tid og volum for alle hull på Vestfoldbanen. Trendlinje for hull med og uten jekking er tegnet inn med tilhørende R-kvadrat.

10.6.3 Hypotese 6: Jo lengre tid med injeksjon før jekking, jo større volum er injisert når jekking initieres

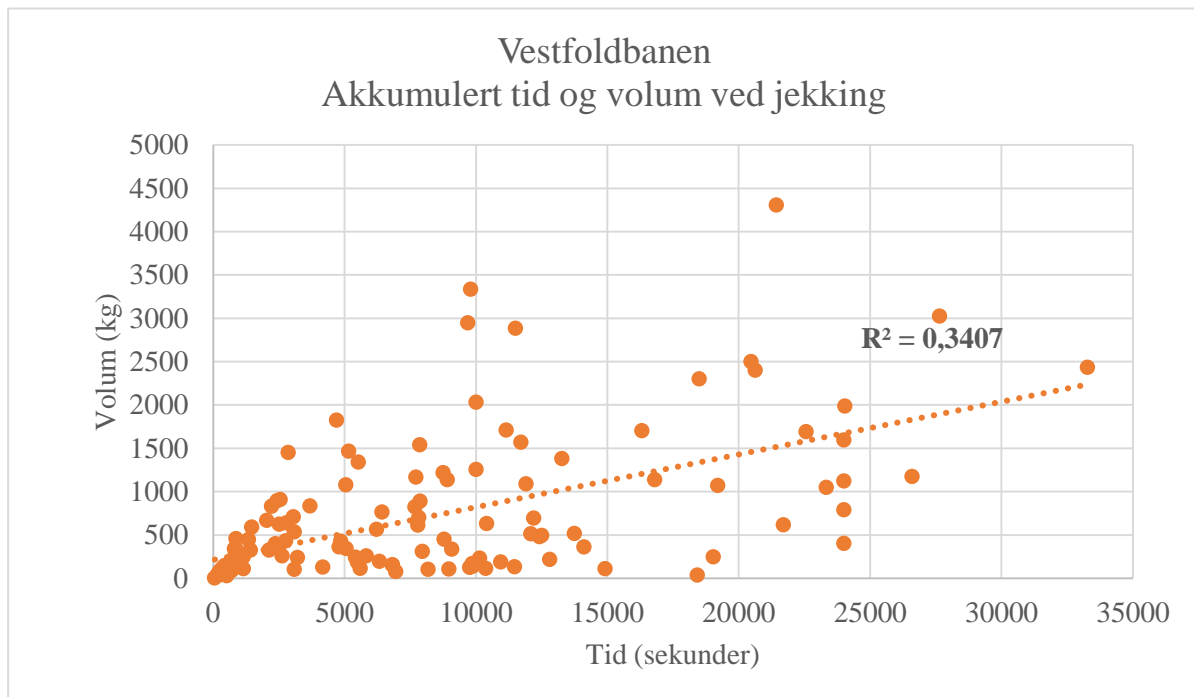
Spredningsplott med akkumulert tid og volum når jekking inntreffer er vist i Figur 10-20 og Figur 10-21 for henholdsvis Follobanen og Vestfoldbanen. Beste tilpasset lineære trendlinje med R-kvadrat er tegnet inn i begge figurene.

Trendlinjen er bedre tilpasset for dataene fra Follobanen med R-kvadrat = 0,46. Det betyr at 46 % av variasjonen i akkumulert volum ved jekking kan forklares med tiden som er gått med når jekking inntreffer. Plottet viser dessuten at hovedandelen jekking skjer de første 50 minuttene (3000 sekunder) av injeksjonen og ved et volum under 1000 kg sement.



Figur 10-20: Spredningsplott for akkumulert tid og volum ved jekking på Follobanen.

Spredningen i dataene fra Vestfoldbanen er tydelig større enn på Follobanen. Trendlinjen plottet til dataene er derfor dårligere tilpasset. R-kvadratet viser at 34 % av variasjonen i akkumulert volum kan forklares av medgått tid ved jekking. De fleste tilfellene av jekking skjer innen 1 time og 23 minuttene (4980 sekunder) med injeksjon og ved et volum under 1000 kg sement.



Figur 10-21: Spredningsplott for akkumulert tid og volum ved jekking på Vestfoldbanen.

10.7 BEREGNINGER MED EFFEKTIV SPENNING

For å finne den effektive spenningen bergmassen faktisk utsettes for under injeksjon, må vanntrykket på stedet være kjent og trekkes fra injeksjonstrykket som benyttes, Formel 9-2. Grunnen til dette er at vanntrykket virker mot injeksjonstrykket og må overvinnes for at injeksjonsmassen skal kunne trenge inn i vannfylte sprekker.

I forbindelse med begge de studerte prosjektene er det satt ned målebrønner for å overvåke grunnvannet. Data fra de aktuelle brønnene er benyttet i studien for å finne mest mulig korrekt vanntrykk over de studerte seksjonene. Vanntrykket er regnet ut med Formel 9-1 og den effektive spenningen ved jekking er funnet ved Formel 9-2.

10.7.1 Follobanen

Målebrønnene som er satt ned i forbindelse med Follobanen måler vanddybden til mellom 0,1 meter og 5,2 meter under overflaten. Gjennomsnittsdybden i brønnene er omlag 1 meter under terreng, og det er denne høyden som er benyttet i videre beregninger.

Tabell 10-3 gir nøkkeltall for beregning av vanntrykket for alle injeksjonsskjermene på Follobanen. Vanntrykket varierer mellom omtrent 6 bar og opp til tilnærmet 10 bar.

Tabell 10-3: Beregning av vannsøyle og vanntrykk for alle injeksjonsskjermene på Follobaneprosjektet.

Injeksjonsskjem	Overdekning (m)	Vanddyb under terreng (mut)	Vannsøyle (m)	Vanntrykk (bar)
736	65,9	1,0	64,9	6,4
748	63,5	1,0	62,5	6,1
768	65,9	1,0	64,9	6,4
789	70,5	1,0	69,5	6,8
804	82,3	1,0	81,3	8,0
825	89,3	1,0	88,3	8,7
846	96,4	1,0	95,4	9,4
867	101,1	1,0	100,1	9,8
890	101,1	1,0	100,1	9,8

10.7.2 Vestfoldbanen

Dybden til grunnvannet i brønnene som er installert i forbindelse med Vestfoldbanen varierer svært mye. En brønn måler grunnvannsnivå på 7 meter, en annen på 83 meter og siste brønn måler 113 meter under overflaten. Brønnene er plassert relativt nær den studerte seksjonen, og terrenghøyden der brønnene er satt ned varierer. Basert på terrenghøyde der brønnene er plassert og overdekningen over tunnelen er vanddybden under terreng satt til 45 meter for videre beregninger for alle injeksjonsskjermene.

Tabell 10-4 oppsummerer nøkkeltall for beregning av vanntrykk for de studerte skjermene på Vestfoldbanen. Vanntrykket er relativt lavt for alle skjermene på prosjektet og varierer mellom 1,9 bar til 2,9 bar.

Tabell 10-4: Beregning av vannsøyle og vanntrykk for alle injeksjonsskjermene på Vestfoldbaneprosjektet

Injeksjonsskjem	Overdekning (m)	Vanddyb under terreng (mut)	Vannsøyle (m)	Vanntrykk (bar)
83943	64,0	45,0	19,0	1,9
83960	64,0	45,0	19,0	1,9
83976	64,0	45,0	19,0	1,9
83993	64,0	45,0	19,0	1,9
84011	75,0	45,0	30,0	2,9
84026	75,0	45,0	30,0	2,9
84044	70,0	45,0	25,0	2,5
84060	70,0	45,0	25,0	2,5
84077	70,0	45,0	25,0	2,5
84094	70,0	45,0	25,0	2,5

10.8 UTREGNING AV P_N

p_n er det relative injeksjonstrykket som virker på bergmassen. Basert på formelen for utregning av p_n (Formel 6-3) vil endelig jekking skje når injeksjonstrykket blir tre ganger så høyt som vekten av overdekningen, som i formelen tilsvarende σ_3 ($p_n = 1$). I denne studien er p_n regnet ut basert på målt σ_3 med 3D bergspenningsmålinger og ved beregning av vekten av overdekningen. Det er gjort utregning for hver enkelt skjerm, der gjennomsnittstrykket ved jekking og estimert vanntrykk i den aktuelle skjermen er benyttet for å finne effektiv spenning.

10.8.1 Follobanen

Tabell 10-5 og Tabell 10-6 oppsummerer nøkkeltall som er benyttet i forbindelse med beregning av p_n for injeksjonsskjermene på Follobanen med v/c -forhold på henholdsvis 0,9 og 0,5.

Tabell 10-5: Nøkkeltall for utregning av p_n med $v/c = 0,9$ på Follobanen.

Injeksjonsskjerm	Δp (bar)	σ_3 (MPa)	p_n	p_n hvis $\sigma_3 = \rho gh$
736	57,4	11,8	0,16	1,12
748	69,5	11,8	0,20	1,41
768	-	11,8	-	-
789	64,9	11,8	0,18	1,19
804	55,1	11,8	0,16	0,86
825	61,0	11,8	0,17	0,88
846	57,1	11,8	0,16	0,76
867	46,1	11,8	0,13	0,59
890	61,6	11,8	0,17	0,78

Tabell 10-6: Nøkkeltall for utregning av p_n med $v/c = 0,5$ på Follobanen.

Injeksjonsskjerm	Δp (bar)	σ_3 (MPa)	p_n	p_n hvis $\sigma_3 = \rho gh$
736	70,2	11,8	0,20	1,37
748	66,4	11,8	0,19	1,35

Beregningen som er gjort med den målte σ_3 indikerer at det ikke skulle forventes jekking i noen av skjermene uavhengig av injeksjonsmasse. Når vekten av overdekningen benyttes til utregningen, blir resultat et helt annet. Da viser tallene endelig jekking i begge skjermene med $v/c = 0,5$ og tre av skjermene med $v/c = 0,9$. Fra injeksjonsskjermen på pel 804 og ut resten av den studerte seksjonen er p_n mindre enn 1 ved bruk av injeksjonsmasse med $v/c = 0,9$. Utvidelse av sprekken kan likevel forventes å være mindre enn 10 μm i alle skjermene ($p_n > 0,63$), unntatt skjerm 867. Skjerm 867 har den laveste beregnede p_n på data fra Follobanen med en verdi på 0,59, som ifølge teorien ikke skal føre til jekking.

10.8.2 Vestfoldbanen

Nøkkeltall for beregning av p_n for de studerte skjermene på Vestfoldbanen er oppsummert i Tabell 10-7 med $v/c = 0,8$ og Tabell 10-8 med $v/c = 0,5$.

Tabell 10-7: Nøkkeltall for utregning av p_n med $v/c = 0,8$ på Vestfoldbanen.

Injeksjonsskjerm	Δp (bar)	σ_3 (MPa)	p_n	p_n hvis $\sigma_3 = \rho gh$
83943	49,7	5,2	0,32	0,87
83960	51,8	5,2	0,33	0,90
83976	45,6	5,2	0,29	0,79
83993	46,7	5,2	0,30	0,81
84011	48,9	5,2	0,31	0,73
84026	33,5	5,2	0,21	0,50
84044	32,8	5,2	0,21	0,52
84060	43,3	5,2	0,28	0,69
84077	46,0	5,2	0,29	0,73
84094	49,7	5,2	0,32	0,79

Tabell 10-8: Nøkkeltall for utregning av p_n med $v/c = 0,5$ på Vestfoldbanen.

Injeksjonsskjerm	Δp (bar)	σ_3 (MPa)	p_n	p_n hvis $\sigma_3 = \rho gh$
83943	50,9	5,2	0,33	0,89
83960	50,1	5,2	0,32	0,87
83976	46,9	5,2	0,30	0,82
83993	44,0	5,2	0,28	0,77
84011	37,7	5,2	0,24	0,56
84026	44,3	5,2	0,28	0,66
84044	36,7	5,2	0,24	0,58
84060	35,2	5,2	0,23	0,56
84077	44,4	5,2	0,28	0,71
84094	47,3	5,2	0,30	0,75

Beregningene ved bruk av den målte σ_3 gir relativt likt resultat som beregningene fra Follobanen, altså at det ikke skulle forventes noe endelig jekking ved det trykket som er benyttet i noen av skjermene med noen av v/c -forholdene. Beregningene med bruk av overdekningen som minste hovedspenning gir også et liknende resultat, jekking i enkelte skjermene. Skjermene 84026 og 84044 får utregnet p_n ved jekking mindre enn 0,63 for beregninger basert på både målt σ_3 og overdekningen med begge v/c -forhold. Skjerm 84011 får dessuten p_n mindre enn 0,63 ved beregning basert på overdekning med $v/c = 0,5$. Basert på beregningene forventes det altså ikke jekking med det trykket som er benyttet i disse skjermene. Med $v/c = 0,8$ blir imidlertid p_n lik 0,73 for skjerm 84011, hvilket indikerer en utvidelse av sprekken på mer enn 10 μm .

Årsaker til funnene som er gjort ved bruk av teoretiske beregninger vil bli diskutert i Kapittel 11.9.

10.9 TEORETISK MAKSIMALTRYKK VED JEKING

Maksimaltrykk en bergmasse med sprekker i et anisotrop spenningsfelt kan utsettes for før hydraulisk jekking av sprekke initiertes, kan regnes ut ved Formel 6-5.

Tabell 10-9 viser verdier for minste og største hovedspenning på begge prosjekter sammen med utregnet jekketrykk og gjennomsnittlig effektivt trykk ved jekking.

Tabell 10-9: Verdier til utregning og beregnet teoretisk jekketrykk på begge studerte prosjekt samt gjennomsnittlig trykk ved jekking.

	Follobanen	Vestfoldbanen
σ_1 (MPa)	24,3	14,1
σ_3 (MPa)	11,8	5,2
Teoretisk jekketrykk ($p_{w \max}^{\text{oppsprek}}$) (bar)	55,5	7,5
Gjennomsnittlig effektivt trykk ved jekking (bar)	59±7	45±7

Som det fremgår av tabellen, er det teoretiske jekketrykket 55,5 bar på Follobanen og 7,5 bar på Vestfoldbanen når de målte bergspenningene benyttes til utregning. Begge de estimerte jekketrykkene er lavere enn registrert gjennomsnittlig effektivt trykk ved jekking i studien. Mulige årsaker til funnene vil bli diskutert i Kapittel 11.10.

10.10 NULL-FUNN

Hypotesene som ikke ble bekreftet i studien er kort presentert i dette avsnittet. Grafisk fremstilling av sammenstillingene er vist i Vedlegg H.

10.10.1 Hypotese 1: *Jo høyere maksimaltrykk som er oppnådd i hver skjerm, jo flere tilfeller med jekking vil være registrert*

Gjennomsnittlig maksimaltrykk som er oppnådd i hver skjerm og relativ andel hull med jekking, viser ingen sammenheng for noen av prosjektene, og hypotese nummer 1 ble derfor ikke bekreftet.

Skjermene ble sortert etter gjennomsnittlig oppnådd maksimaltrykk. Tilhørende relativ andel hull med jekking ble plottet sammen med maksimaltrykket. Trendlinje for andelen hull med jekking ble også tegnet inn. Sammenhengen mellom faktorene er noe bedre for datasettet fra

Follobanen, R-kvadrat = 0,2. På Vestfoldbanen er R-kvadrat så lav som 0,02. Det indikerer at det ikke er noen sammenheng mellom faktorene på noen av prosjektene

10.10.2 Hypotese 2: *Ved kategorisering basert på trykk når jekking initieres, vil kategoriene med høyest trykk ha flest tilfeller med registrert jekking*

For å teste hypotese 2 ble det utført kategorisering basert på trykk ved jekking. Det ble bestemt ulike trykkintervall der alle hendelsene med jekking ble kategorisert. Trykkintervallene som ble brukt til sortering, var noe ulik for de to prosjektene. På Follobanen var kategoriene 0-50 bar, 50-60 bar, 60-70 bar og > 80 bar. På Vestfoldbanen var kategoriene 0-40 bar, 40-50 bar, 50-60 bar og > 60 bar. Samvariasjonen mellom faktorene er svært liten med R-kvadrat på 0,005 og 0,25 for henholdsvis Follobanen og Vestfoldbanen. Hypotesen ble derfor ikke bekreftet.

10.10.3 Hypotese 4: *Større volum injisert før jekking krever lavere trykk for at jekking initieres*

Hypotese 4 ble ikke bekreftet. Samvariasjon mellom faktorene var ikke tydelig på noen av prosjektene. R-kvadrat for Follobanen og Vestfoldbanen ble henholdsvis 0,1 og 0,3. Likevel er begge trendlinjene negative, som indikerer at jo høyere akkumulert volum ved jekking, jo lavere trykk skal til for at jekking initieres. Dette er i samsvar med teori presentert av Gothäll og Stille (2009), men det er altså ikke en tydelig nok samvariasjon til å kunne bekrefte teorien basert på analyserte data i denne studien.

10.10.4 Hypotese 7: *Det finnes en sammenheng mellom overdekning, effektivt trykk ved jekking og prosentandel hull som er jekket*

Hypotese 7, forventet sammenheng mellom overdekningen, gjennomsnittlig effektivt trykk ved jekking og relativ andel hull i hver skjerm med jekking, er ikke bekreftet på noen av prosjektene.

Begge prosjektene viser en tendens til at det effektive trykket ved jekking synker med økende overdekning, men R-kvadratet er lavt på begge prosjekter (Follobanen: $R^2 = 0,4$ og Vestfoldbanen: $R^2 = 0,2$). Andelen hull med jekking har liten sammenheng med overdekningen og det effektive trykket ved jekking på begge prosjektene.

11 DISKUSJON

Jekking av bergmassen som følge av sementinjeksjon med høyt trykk, er en lite studert problemstilling i Norge. I dette kapittelet er funnene fra utført studie diskutert, og mulige forklaringer på funnene er foreslått. I tillegg er resultatene fra utførte bergspenningsmålinger fra de to studerte tunnelene og målingenes relevans for de studerte seksjonene i hver tunnel kommentert.

11.1 BERGSPENNINGSMÅLINGER

3D bergspenningsmålinger er den mest benyttede og utviklede metoden for å måle bergspenninger. Usikkerhetene ved metoden er likevel betydelige. Ved begge de studerte prosjektene er det utført 3D bergspenningsmålinger som viser at det finnes vesentlige geologisk betingede spenninger i områdene.

På Follobanen er målingene utført på to ulike steder med et par hundre meters mellomrom. Mellom de to målestedene endrer største hovedspenning retning nesten 90°. Størrelsene på hovedspenningene er imidlertid relativt konstant. Retningsendringen viser tydelig at spenningene i området er svært lokale og kan endres betydelig over korte avstander. Årsaken til endring i retning kan være mange. Området tunnelen er drevet i, består av flere svakhetssoner og intrusjoner som kan føre til endring i spenningsbildet over korte avstander. I slike områder er det dessuten utfordrende å estimere størrelse og retning på spenningene basert på teoretisk kunnskap.

Den ene bergspenningsmålingen på Follobanen er utført like ved den studerte seksjonen på prosjektet. Dataene fra denne målingen er derfor mest sannsynlig gjeldende for injeksjonsskjermene nærmest målestedet. Siden seksjonen strekker seg over ca. 150 meter, kan målingene likevel ikke anses som sikre for hele seksjonen.

På Vestfoldbanen er bergspenningsmålingene utført flere kilometer (~4 km) fra den studerte seksjonen, men i liknende bergmasse og overdekning. Hvor representative målingene er for spenningene rundt den studerte seksjonen, er umulig å fastslå. Det er likevel sannsynlig at spenningene rundt den studerte seksjonen er påvirket av den geologiske historien til bergmassen og ikke kan estimeres direkte ut i fra overdekning.

Bergspenningsmålingene fra begge prosjektene er benyttet til teoretiske beregninger på tross av usikkerhetene. Bergspenninger basert på overdekning er regnet ut og benyttet i de samme

teoretiske beregningene. Resultatene fra beregningene er diskutert med hensyn på hva som er forventet basert på teori for formelen som er brukt til beregning, og hvilket resultat beregningen gir ved bruk av de to spenningsestimaterne.

11.2 JEKING

Som vist i Figur 10-1 og Figur 10-2, er det i gjennomsnitt registrert jekking i 16 % av hullene på Follobanen og i 31 % av hullene på Vestfoldbanen. I begge prosjekter er det benyttet sementbasert forinjeksjon ved bruk av høyt trykk som metode for å oppnå kravet til tetthet. I tillegg til variasjon i geologi, utførelse og benyttet injeksjonsmateriale mellom prosjektene, er det også variasjon i geologi og utførelse innad i samme prosjekt mellom de ulike injeksjonsskjermene. På Follobanen er det en skjerm der jekking ikke er registrert i noen av hullene, mens på Vestfoldbanen er det registrert jekking i nesten 50 % av hullene i to av skjermene.

Variasjonen i andelen hull med jekking mellom hver skjerm ser ikke ut til å følge noen spesiell trend eller mønster. På Vestfoldbanen er for eksempel de to skjermene med mest jekking ikke lokalisert etter hverandre. Heller ikke på Follobanen ser det ut som det er noe mønster i prosentandelen hull med jekking per skjerm.

Årsakene til variasjon i andel jekket hull kan være mange. De faktorene som er logget med injeksjonsriggen er analysert og vil bli diskutert i de etterfølgende avsnittene. I tillegg til disse loggede faktorene er det også noen tilfeldige faktorer som vil ha påvirkning. De tilfeldige faktorene vil bli diskutert i et eget avsnitt helt til slutt i kapittelet.

11.3 V/C-FORHOLD

V/c-forholdet til injeksjonsmassen er endret i løpet av injeksjonsprosessen på begge prosjektene. Injeksjonen begynner med det høyeste v/c-forholdet, og reduseres dersom ønsket mottrykk ikke er oppnådd når en viss mengde injeksjonsmasse er injisert.

På Follobanen er det registrert mest jekking med $v/c = 0,9$. Dette kommer både av at det er denne injeksjonsmassen som er mest benyttet, men også i skjermene der $v/c = 0,5$ ble benyttet er hovedandelen jekking registrert ved bruk av $v/c = 0,9$. Mulig årsak kan være at trykket blir kjørt svært raskt opp til nesten 80 bar etter injeksjonsstart. Siden trykkøkningen skjer tidlig i

injeksjonsprosessen, er det kun pumpet inn et lite volum når jekking initieres og jekking skjer da ved bruk av masse med $v/c = 0,9$, som er den injeksjonsmassen injeksjonen begynner med.

V/c -forholdet ved jekking på Vestfoldbanen er i de fleste tilfellene ved bruk av $v/c = 0,5$. I to av skjermene er det mest jekking med $v/c = 0,8$ og i en skjerm er fordelingen helt lik mellom de to injeksjonsmassene. Når injeksjonsmasse med $v/c = 0,5$ brukes, er det normalt pumpet inn et større volum enn ved bruk av $v/c = 0,8$, i tillegg er injeksjonstrykket som benyttes ofte høyere. Årsaken til dette er at injeksjonsprosedyren beskriver bruk av $v/c = 0,8$ inntil et visst volum er injisert, og dersom ønsket mottrykk ikke er oppnådd, byttes det til $v/c = 0,5$. Injeksjonen fortsetter med denne masse til ønsket trykk er oppnådd. Hovedvekten av jekking er derfor forventet å forekomme ved bruk av $v/c = 0,5$.

11.4 TRYKK

Trykk er studert i to ulike sammenhenger. Først vil maksimalt trykk oppnådd i hull med og uten jekking bli diskutert. Deretter diskuteres variasjonen i trykk når jekking initieres i de ulike injeksjonsskjermene.

11.4.1 Maksimalt oppnådd trykk i hullene

Maksimalt oppnådd trykk i løpet av injeksjonsprosessen er rundt 80 bar i alle injeksjonsskjermene på Follobanen og omlag 60 bar på Vestfoldbanen, vist i Figur 10-5 og Figur 10-6. Ønsket sluttrykk i bestillingen av injeksjon fra byggherren er satt til 70 bar på begge prosjektene. I bestillingene er det i tillegg beskrevet at injeksjonen skal tilpasses de stedlige forholdene. Injeksjonsprosessen og sluttrykket kan dessuten endres i samråd med kontrollingeniøren på begge prosjektene. Nivået for sluttrykk i noen eller alle skjermene kan derfor være endret i forhold til det som står i injeksjonsprosedyren på både Follobanen og Vestfoldbanen.

Differansen mellom gjennomsnittlig maksimalt oppnådd trykk i hull med og uten jekking er liten på begge de studerte prosjektene. I 7 av 19 skjermene er dessuten det gjennomsnittlige maksimalt oppnådde trykket høyere i hull uten jekking enn i hull med jekking. Spenningene rundt borhullet som injiseres vil være avgjørende for hvilket trykk som skal til for at jekking oppstår. I skjermene der gjennomsnittlig maksimalt oppnådd trykk er høyere i hull uten jekking kan årsaken være at spenningene rundt en del av injeksjonshullene er høyere enn rundt andre hull. Plasseringen av hullene på tunnelstuff kan for eksempel være en grunn til ulikt spenningsbilde. Hull som er plassert lavt på stuff vil eksempelvis ha større overdekning enn

hullene som er plassert i hengen. Det kan også være geologiske forhold som endrer spenningene innen korte avstander rundt tunnelstuff. En svakhetssone kan blant annet avlaste bergmassen i nærheten og føre til lave spenninger i området nær svakhetssonen. En annen årsak til høyere oppnådd maksimaltrykk i hull uten jekking, kan være at det i et hull som er jekket, vil være vanskelig å øke trykket ytterligere etter jekking. Grunnen til det er at økt sprekkeåpning fører til stor inngang av masse i hullet.

Skjermene der høyere trykk er registrert i hull uten jekking er på begge prosjektene ofte i påfølgende skjerm. På Vestfoldbanen ligger de tre skjermene der fenomenet forekommer etter hverandre. På Follobanen er det en skjerm som bryter opp mellom to og to skjerm med høyere oppnådd trykk i hull uten jekking enn med jekking. Denne trenden i begge prosjekter støtter teorien om at det kan være geologiske forhold langs tunnelen som endrer spenningsbildet avhengig av hvor på tunnelstuff hullene er plassert. Ettersom injeksjonshullenes plassering ikke er kjent i denne studien er dette kun en antakelse som vil trenge et større datagrunnlag for å kunne verifiseres.

11.4.2 Injeksjonstrykk ved jekking

Trykket registrert når jekking inntreffer er relativt likt i alle injeksjonsskjermene på samme prosjekt. Differansen mellom trykk ved jekking med de ulike injeksjonsmassene er heller ikke stor innad i samme skjerm. Disse observasjonene øker tilliten til resultatene og at det faktisk har forekommet jekking der det er tolket basert på trykk/tid-grafene. Videre viser de tilnærmet like trykkene ved jekking uavhengig av v/c -forhold at reologien og egenskapene til injeksjonsmassen ikke har stor påvirkning på trykket som fører til jekking.

Trykket ved jekking varierer hovedsakelig mellom 60 og 70 bar på Follobanen (Figur 10-7). Standardavviket for gjennomsnittstrykket i hver skjerm med de ulike v/c -forholdene er i stor grad innen akseptable avvik. Skjerm 789 er eneste skjerm på prosjektet som har standardavvik på nesten 50 % av gjennomsnittsverdien. På Vestfoldbanen varierer trykket ved jekking mellom 45 bar og 55 bar (Figur 10-8). Standardavviket er relativt lavt i alle injeksjonsskjermene og med begge v/c -forholdene.

Standardavviket forteller hvor stor spredning det er i det analyserte datasettet. Det er derfor ønskelig med et så lite standardavvik som mulig ved analyse av trykk ved jekking. Et lite standardavvik betyr at jekking skjer ved relativt jevnt trykk i alle hullene i samme skjerm. Et jevnt jekketrykk viser at kreftene som skal overvinnes for at jekking av bergmassen skal initieres, er i samme størrelsesorden i hele injeksjonsskjermen.

Spenningsene som ble målt på Vestfoldbanen er i samsvar med det trykket jekking er tolket å forekomme ved. Minste hovedspenning der målingene ble utført er 5,2 MPa (52 bar). Et jekketrykk rundt 50 bar er derfor enkelt å forklare, dersom det antas at bergmassen er oppsprukket og ikke har noen tensilstyrke. For å initiere jekking vil da kun minste hovedspenning måtte overvinnes. På Follobanen er målte minste hovedspenning vesentlig høyere, $\sigma_3 = 11,8$ MPa (118 bar), enn trykket som er registrert ved jekking (~65 bar). Forklaringen om at minste hovedspenning er eneste faktor som påvirker trykket som fører til initiering av jekking i en bergmasse, virker derfor lite sannsynlig.

Som diskutert i avsnitt 11.1 er det, for begge prosjekter, et spørsmål om hvorvidt resultatene fra bergspenningsmålingene er representative for in situ spenningsene i områdene der injeksjonen er utført, ettersom spenningsene kan endre seg over svært korte avstander. Bergspenningsmålingene kan likevel gi en indikasjon på forholdene i området, og bør derfor vurderes.

11.5 VOLUM

Total sementinngang er høyere i hull der jekking er registrert på begge prosjektene (Figur 10-9 og Figur 10-10). I flertallet av de studerte skjermene er sementinngangen over dobbelt så høy i hull med jekking enn i hull uten jekking i samme skjerm. Høyere sementforbruk ved jekking er å forvente, ettersom eksisterende åpninger utvides og dermed kan romme et større volum. I tillegg er det vanlig å anta at spredningen av injeksjonsmassen øker ved jekking. Et større volum vil derfor være nødvendig for å oppnå ønsket mottrykk i massen.

11.5.1 Volum før jekking initieres

Akkumulert volum når jekking initieres varierer mellom de ulike injeksjonsmassene. Generelt er volumet høyere ved jekking med injeksjonsmasse med $v/c = 0,5$. Basert på injeksjonsprosedyren er det forventet siden det først injiseres ved bruk av masse med $v/c = 0,8/0,9$, og deretter benyttes masse med $v/c = 0,5$ dersom ønsket trykk ikke er oppnådd når et forhåndsbestemt volum med v/c -forhold 0,8/0,9 er injisert.

Gjennomsnittlig injisert volum når jekking initieres varierer dessuten noe mellom skjermene både på Follobanen og Vestfoldbanen. Basert på standardavvik er likevel variasjonen innad i en skjerm større enn variasjonen mellom skjermene. Noen av skjermene har like stort eller større standardavvik som den gjennomsnittlige sementinngangen ved jekking (Figur 10-11 og

Figur 10-12). Det indikerer svært stor spredning i datasettet og at gjennomsnittsverdien alene ikke kan brukes til å tolke dataene.

Noe av variasjonen i injisert volum ved jekking antas å være forårsaket av bergmassen som injiseres. Dette gjelder både variasjonen mellom prosjektene, mellom skjermene på samme prosjekt, og den store variasjonen mellom hull i samme skjerm. Samvirke mellom flere borhull i samme injeksjonsskjerm vil for eksempel gi svært stor variasjon i sementinngang i de samvirkende hullene, avhengig av injeksjonsrekkefølgen. Hullet som injiseres først vil kunne få svært stor inngang ettersom massene spres mellom flere borhull. Senere injiserte hull, vil som følge av samvirket med tidligere injisert hull, bare kunne oppta et lite volum og jekking vil kunne initieres tidligere i injeksjonsprosessen.

Videre kan trykkoppbyggingen under injeksjon påvirke når og hvordan jekking initieres. En rask trykkoppbygging kan føre til jekking tidlig i injeksjonsprosessen, og i ekstreme tilfeller før borhullet er fylt med injeksjonsmasse. Vann og borkaks som ligger i hullet må fortrenses før injeksjonsmassen kan trenge inn i bergmassen. I ekstreme tilfeller kan derfor volumet av vannet og borkaksen føre til jekking av bergmassen, og dermed initiere jekking før borhullet er fylt med injeksjonsmasse.

Ved å vurdere gjennomsnittlig sementinngang per hull og akkumulert volum ved jekking opp mot hverandre, kan det antydes en sammenheng mellom faktorene på begge prosjektene. Denne sammenhengen er tydeligere på Vestfoldbanen enn på Follobanen. Trenden antyder at jo høyere akkumulert volum ved jekking, jo høyere gjennomsnittlig sementinngang per injeksjonshull. Det virker sannsynlig at sammenhengen kan fortelle noe om hvordan bergmasse som injiseres påvirker masseinngangen i injeksjonsskjermene. Dårlig berg vil trolig være mottakelig for et høyere volum, på grunn av større volum med sprekker og hulrom enn en tettere bergmasse. Det forutsetter at sprekkeene ikke er fylt med erosjonsmateriale som hindrer inntrenging av injeksjonsmassen. Oppsprukket berg uten hard sprekkefylling vil derfor kunne oppta mer masse før jekking initieres. Dersom denne antakelsen anses å være troverdig, antyder det en tettere/bedre bergmasse i den studerte seksjonen på Vestfoldbanen enn i seksjonen fra Follobanen.

11.6 TID

11.6.1 Totalt tid til injeksjon

Tiden som går med til injeksjon er i 18 av 19 studerte skjermene lengre i hull med registrert jekking enn i hull uten jekking. Injeksjonstiden i skjerm 84044 på Vestfoldbanen, er lengre i hull uten jekking er (Figur 10-13 og Figur 10-14). Denne skjermen har gjennomsnittlig 30 minutter lengre injeksjonstid i hull uten jekking enn i hull med jekking. Omlag 25 % av hullene i skjermen er jekket og sementinngangen i hullene med jekking er gjennomsnittlig ca. 400 kg mer enn i hull uten jekking i skjermen. Maksimalt oppnådd trykk er tilnærmet likt i alle hullene, både med og uten jekking.

Årsakene til lengre injeksjonstid i hull uten jekking kan være mange. Bergmassen som er injisert kan være svært oppsprukket eller omslutningstrykket kan være lite. Begge disse forholdene gjør at det kan pumpes inn store mengder masse uten at trykket øker. I tillegg kan det være tekniske årsaker på riggen som gjør at det tar lang tid å oppnå ønsket sluttrykk. En annen mulig forklaring kan være at disse hullene har vært hvilt mer eller at injeksjonsprosessen av andre årsaker har tatt lengre tid. Gjennomsnittlig differanse mellom loggetidspunktene i skjerm 84044 er for hull uten jekking 23,7 sekunder og i hull med jekking 21 sekunder. Denne observasjonen kan antyde at hullene uten jekking i skjermen er hvilt mer enn hullene med jekking, og det virker som en sannsynlig forklaring på lengre injeksjonstid i hull uten jekking i akkurat denne skjermen.

I de 18 resterende skjermene er differansen mellom tidsforbruk i hull med og uten jekking større på Vestfoldbanen enn på Follobanen. Tidsforbruket er dessuten gjennomsnittlig lengre i injeksjonshullene på Vestfoldbanen enn på Follobanen. Det er på tross av lavere injisert volum på Vestfoldbanen. Trykket som er benyttet til injeksjon er lavere på Vestfoldbanen og kan være en del av forklaringen på lengre injeksjonstid. Videre er injeksjonsdataene på Vestfoldbanen normalt logget hvert 20. sekund. I perioder der det ikke injiseres, blir det heller ikke logget data og tidsdifferansen mellom loggetidspunktene blir lengre enn 20 sekunder. Gjennomsnittlig differanse mellom loggetidene på Vestfoldbanen er 47 sekunder. På Follobanen er loggeintervallet på injeksjonsriggen satt til hvert 10. sekund, og gjennomsnittlig tidsdifferanse er 12 sekunder. Hovedårsaken til lengre injeksjonstid på Vestfoldbanen er derfor trolig at det er mye mer hviling av hullene enn på Follobanen. Større differanse mellom forbrukt tid til injeksjon mellom hull med og uten jekking på Vestfoldbanen, kan også antakelig forklares med mer hviling av hull med jekking. Det er en rimelig antagelse at hull med jekking er hvilt mer enn hull uten jekking. Årsaken til at hull hviles er at det er vanskelig

å oppnå ønsket trykkoppbygging i hullet. Å la injisert masse i hullet delvis størkne før injeksjonen fortsetter, har i praksis vist at trykket etter hviling lettere lar seg bygge opp.

11.6.2 Tid før jekking initieres

De fleste tilfellene med jekking på Follobanen skjer i løpet av de første 20 minuttene med injeksjon (Figur 10-15). Mellom 20 og 30 minutter er det få tilfeller av jekking, mens mellom 30 og 60 minutter er det igjen flere tilfeller. På Vestfoldbanen tar det lengre tid før jekking initieres. Her er de fleste tilfellene av jekking registrert mellom 20 og 200 minutter med injeksjon (Figur 10-15). Det at jekking på Follobanen initieres raskt etter injeksjonen begynner, støtter teorien om at trykket økes svært hurtig etter injeksjonsstart, som tidligere er nevnt som mulig forklaring på jekking med $v/c = 0,9$ (Kapittel 11.3). Lengre tid før jekking initieres på Vestfoldbanen kan ha sammenheng med hviling av hullene, altså at hullene hviler før injeksjon fortsetter og jekking initieres. En annen årsak kan være at injeksjonstrykket er lavere på Vestfoldbanen og at det derfor tar lengre tid å injisere tilstrekkelig volum som kan føre til jekking.

Jekking skjer, relativt sett, tidlig i injeksjonsprosessen på begge prosjektene. Hovedandelen av tid som går med til injeksjon er altså tid etter at jekking er initiert. Det åpenbare spørsmålet blir derfor om injeksjonstiden kunne vært kortet betraktelig ned dersom jekking hadde vært unngått. Eller om injeksjonen kunne vært avsluttet etter at jekking var initiert dersom det var en metode for å tolke initiering av jekking på stoff.

11.6.3 Feilkilder ved logging av tid

Tid er i injeksjonssammenheng svært relativt. Tiden som går med til injeksjon vil avhenge både av de geologiske forholdene som injiseres, men også av arbeidslaget som utfører injeksjonen og utstyret som blir brukt. Ettersom det per i dag ikke finnes én måte å utføre injeksjon på, er det i stor grad opp til hver enkelt operatør hvordan injeksjonen utføres for å oppnå kriteriene satt av byggherre. Pumpekapasitet, blandekapasitet og menneskelige faktorer er alle forhold som spiller inn i valg av injeksjonsprosedyre. Noen arbeidslag velger å utføre injeksjonen på en bestemt måte for å utnytte utstyrets kapasitet best mulig, eller fordi det er mest hensiktsmessig i forhold til deres arbeidssituasjon.

11.7 HYPOTESE 3: *Skjermene med høyt masseforbruk har en større andel hull som er jekket*

Hypotesen om akkumulert volum per injeksjonsskjem og relativ andel hull med jekking er bekreftet, og sammenstilling av faktorene viser at det er en sammenheng mellom dem (Figur 10-16 og Figur 10-17). Tre av de totalt 19 skjermene som er studert, har over 80 tonn injisert sement per skjerm. I skjermene er det også registrert jekking i over 40 % av hullene. Ingen av de andre skjermene har så stort totalt injisert volum eller så høy andel hull med jekking.

I sammenstillingen som er gjort, er volumet injisert i hver skjerm satt som forklaringsvariabel og andelen hull med jekking er responsvariabel. Variablene kunne like gjerne vært byttet om, men sammenhengen mellom de to faktorene var da mindre tydelig. Derav, basert på dataene i denne studien, fører store injiserte volum til større andel hull med jekking.

Det faktum at et høyt masseforbruk fører til at en stor andel av hullene jekkes, er i samsvar med teori om jekking presentert av Gothäll og Stille (2009) (Kapittel 6.3). De presenterer en teori om at større injisert volum i et hull fører til at større areal av bergmassen påvirkes av injeksjonstrykket, og at bergmassen derfor vil jekkes ved lavere trykk. Hypotese nummer 4: «Større volum injisert før jekking krever lavere trykk for at jekking initieres» indikerer også noe av den samme trenden, men faktorene viste ikke tydelig nok sammenheng til å bekrefte hypotesen. Funnene er diskutert i avsnitt 11.11.

11.8 HYPOTESE 5 OG 6

Det ble formulert to hypoteser angående akkumulert tid og volum. Begge disse ble bekreftet og resultatene er diskutert i dette avsnittet. Først er totalt forbrukt tid og volum til injeksjon for alle hull diskutert. Deretter er hullene med jekking studert og diskutert alene med fokus på forbruk av tid og volum før jekking ble initiert.

11.8.1 Hypotese 5: *Lengre injeksjonstid fører til et større volum injisert*

Injeksjonen på Vestfoldbanen har, som tidligere diskutert, generelt lengre tidsforbruk og lavere injisert volum enn på Follobanen. Den grafiske fremstillingen med spredningsplott for akkumulert tid og volum viser dessuten at det er mye større variasjon mellom hullene på Vestfoldbanen (Figur 10-18 og Figur 10-19).

Hullene som plotter under trendlinjen i spredningsplottene kan antas å være tungt injiserbare ettersom disse hullene har lavere masseinnngang i løpet av lengre tid enn gjennomsnittet.

Hullene som plotter over trendlinjen kan antas å være lett injiserbare da disse får injisert et større volum i løpet av kortere tid enn gjennomsnittet. Basert på disse antakelsene viser spredningsplottene at noen av hullene med jekking på Follobanen er lett injiserbare, og at noen av hullene uten jekking på Vestfoldbanen er tungt injiserbare. Antydningen basert på injisert volum når jekking initieres blir dermed bekreftet, det kan antas at bergmassen på Vestfoldbanen er tettere enn bergmassen på Follobanen.

11.8.2 Hypotese 6: *Jo lengre tid med injeksjon før jekking, jo større volum er injisert når jekking initieres*

Grafisk fremstilling av akkumulert tid og volum når jekking initieres med spredningsplott viser sammenheng mellom faktorene på begge prosjektene (Figur 10-20 og Figur 10-21). Sammenhengen er tydeligere på Follobanen enn på Vestfoldbanen.

Dataene fra Vestfoldbanen har mye større spredning enn dataene fra Follobanen, og sammenhengen blir derfor mindre tydelig. Hovedandelen av tilfellene med jekking er registrert tidlig i injeksjonen på begge prosjekter, men på Vestfoldbanen er det også mange hull som enten har lang injeksjonstid før jekking initieres, eller det injiseres store volum før jekking er registrert.

Variasjon i forbruk av tid og volum før jekking initieres kan være forårsaket av ulik geologi eller injeksjonsprosedyre. Som tidligere beskrevet vil en oppsprukket bergmasse trenge et større volum før jekking enn en tettere bergmasse. I tillegg kan injeksjonsprosedyren ha en påvirkning. Dersom denne endres underveis i prosjektet kan det føre til at jekking registreres ved ulik akkumulert tid eller volum i de studerte skjermene. Rask økning i trykk kan for eksempel føre til jekking tidlig i prosessen, mens en sakte trykkoppbygging kan føre til at et større volum er injisert før jekking initieres.

11.9 UTREGNING AV P_N

Utregning av det relative injeksjonstrykket (p_n) som virker på bergmassen, er en metode som er utviklet for å kunne vite hvilket injeksjonstrykk som kan forventes å føre til endelig jekking av bergmassen. Formelen som er utviklet, bruker overdekningen som minste hovedspenning. Utregning i denne studien er utført på to ulike måter. Den første ved bruk av målte minste hovedspenning og den andre ved bruk av lasten fra overdekningen. Resultatene er relativt ulike ved bruk av de to metodene for beregning av bergspenninger.

Beregningen av relativt injeksjonstrykk ser ut til å fungere best med bruk av vekten av overdekningen som minste hovedspenning. Ved disse beregningene er tilfellene med registrert jekking basert på trykk/tid-grafene i overenstemmelse med beregningene, og det kan forventes jekking i de fleste tilfellene der dette er registrert. I kun fem tilfeller totalt av alle studerte skjærmer på begge prosjekter og med alle v/c -forhold, er resultatet av utregningene at jekking ikke er forventet å forekomme med det effektive injeksjonstrykket som er observert.

Ved teoretiske beregninger er det en rekke feilkilder som påvirker resultatet. Beregningsmetoden som er benyttet til utregning av relativt injeksjonstrykk er for eksempel utviklet basert på andre forhold enn de som faktisk opptrer i de studerte seksjonene. I tillegg er metoden utviklet for andre injeksjonstrykk. Estimerer ut i fra geologi og bergspenningsmålinger i områdene som er undersøkt, gir derfor stor usikkerhet i variablene som benyttes. Ved beregning med målte minste hovedspenning, gir usikkerhetene fra de utførte bergspenningsmålingene også grunnlag for feilkilder, som diskutert i Kapittel 11.1.

11.10 TEORETISK MAKSIMALTRYKK VED JEKING

Teoretisk beregning av jekketrykket basert på målte største og minste hovedspenning for hvert av prosjektene, gir varierende resultater. Beregningen basert på data fra Follobanen gir maksimaltrykk før jekking initieres i bergmassen på 55,5 bar. Det er et sannsynlig resultat, og stemmer relativt godt med trykket som er registrert ved jekking basert på trykk/tid-grafene fra prosjektet. Utregningene fra Vestfoldbanen gir derimot et jekketrykk på 7,5 bar. På dette prosjektet er jekking gjennomsnittlig observert ved 45 bar effektivt trykk. Resultatet fra beregningen virker derfor ikke sannsynlig for Vestfoldbanen.

Formelen for beregning av jekketrykk er basert på svært teoretiske tilnærminger og forutsetter en idealisert bergmasse og injeksjonsforløp. Beregninger basert på felldata og injeksjon som er utført i et borhull med flere kryssende sprekker og som ikke er parallelt med en av hovedspenningene, vil derfor ikke gi et brukbart resultat (Raaen og Scheldt, 2016). Det faktum at beregningsmetoden ser ut til å stemme relativt godt med observasjonene og dataene fra Follobanen, kan derfor anses å være tilfeldig.

11.11 NULL-FUNN

Hypotesene som ble formulert, men ikke bekreftet er diskutert i dette avsnittet.

11.11.1 Hypotese 1: *Jo høyere maksimaltrykk som er oppnådd i hver skjerm, jo flere tilfeller med jekking vil være registrert*

Hypotese 1 ble ikke bekreftet. Det ble altså ikke funnet noen sammenheng mellom gjennomsnittlig oppnådd maksimaltrykk i skjermen og prosentandelen hull med jekking. En mulig forklaring kan være at trykket som fører til jekking varierer mye mellom injeksjonsskjermene. Maksimalt oppnådd trykk trenger derfor ikke ha sammenheng med antall tilfeller av jekking. Videre er det ikke satt noen kriterium for hvor lenge maksimaltrykket skulle opprettholdes for å bli registrert. Trykket som er registrert som maksimaltrykk i hullene, kan derfor ofte være svært momentane målinger som ikke har så stor innvirkning på injeksjonen som antatt i hypotesen. Dersom det ble satt et kriterium at maksimaltrykket skulle være over for eksempel tre måletidspunkt for å bli registrert, hadde formodentlig sammenhengen mellom oppnådd maksimaltrykk og prosentandel hull med jekking vært tydeligere.

11.11.2 Hypotese 2: *Ved kategorisering basert på trykk når jekking initieres, vil kategoriene med høyest trykk ha flest tilfeller med registrert jekking*

Kategorisering basert på trykk når jekking initieres og antall tilfeller av jekking i hver kategori viste ingen sammenheng i noen av prosjektene. Hypotese 2 ble derfor ikke bekreftet. Injeksjonsprosedyren vil ha en innvirkning på hvilket trykk som fører til jekking. Som tidligere diskutert, kan et større volum injisert før jekking initieres, føre til at trykket som initierer jekking, senkes. Trykk som eneste forklarende faktor for initiering av jekking er derfor lite sannsynlig. Trykket må også vurderes i sammenheng med det stedlige vanntrykket for å finne effektivt injeksjonstrykk. Det effektive injeksjonstrykket må videre vurderes opp mot spenningene som omslutter tunnelen som injiseres.

11.11.3 Hypotese 4: *Større volum injisert før jekking krever lavere trykk for at jekking initieres*

Hypotese 4 ble ikke bekreftet, men de analyserte dataene indikerer likevel en svak trend. Differansen mellom laveste og høyeste gjennomsnittlige trykk ved jekking er mindre for skjermene på Vestfoldbanen enn på Follobanen. Det er trolig årsaken til en tydeligere sammenheng mellom akkumulert volum og trykk ved jekking på Vestfoldbanen.

Trenden som svakt indikeres i begge prosjektene i forhold til akkumulert volum og trykk når jekking av bergmassen initieres, er i overensstemmelse med teori presentert av Gothäll og Stille (2009). De viser til at jo større areal av bergmassen injeksjonsmassen påvirker, jo lavere trykk trengs for at jekking skal initieres. Det er sannsynlig at jo mer masse som er injisert, jo større areal i bergmassen er påvirket, forutsatt spredning av injeksjonsmassen i flere sprekker og ikke fylling av et stort hulrom. På de studerte prosjektene kan imidlertid kun 10 % (Follobanen) og 30 % (Vestfoldbanen) av variasjonene i trykk ved jekking forklares med volumet som er injisert når jekking initieres. Volumet injisert ved jekking forklarer altså kun en liten del av variasjonene i trykk som fører til jekking. Det er likevel et svært viktig funn, ettersom det indikerer at presentert teori er representativ i praksis.

11.11.4 Hypotese 7: *Det finnes en sammenheng mellom overdekning, effektivt trykk ved jekking og prosentandel hull som er jekket*

Det ble ikke funnet noen sammenhengen mellom relativ andel hull med jekking, effektivt trykk ved jekking og overdekningen over hengen på tunnelen der injeksjonen er utført. De trendene som kan antydes, er svake og ikke i overensstemmelse mellom de to prosjektene.

Det er nærliggende å anta at det skulle vært noen sammenhenger mellom de tre studerte faktorene. Årsaken til at det ikke er funnet noen sammenheng i denne studien kan være at datagrunnlaget for en slik sammenlikning er for lite og at feilkildene til faktorene er for store til at de kan sammenstilles.

11.12 INJEKSJONSPROSEDYRE OG STOPPKRITERIER

I Kapittel 4.1 ble det presentert flere ulike stoppkriterier. Noen av disse er utviklet gjennom teoretisk tilnærming og felt- og labforsøk (RTGC og GIN), mens andre er basert på empiri (maksimalt trykk og mengde). Stoppkriteriet som er benyttet på begge de undersøkte prosjektene i denne studien, er basert på oppnådd trykk i injeksjonsmassen.

Injeksjonstrykk på 70 bar er satt som stoppkriteriet i injeksjonsprosedyren på begge de studerte prosjektene. På Follobanen er gjennomsnittlig maksimalt oppnådd trykk i hullene 10 bar høyere enn dette, mens på Vestfoldbanen er det 10 bar lavere. På begge prosjektene er det i tillegg bestemt et gitt volum der v/c-forholdet i injeksjonsmassen skal reduseres. På tross av lavere trykk og overholdelse av injeksjonsprosedyren, er det tolket jekking i flere prosent av de studerte hullene på Vestfoldbanen enn på Follobanen.

De teoretiske stoppkriteriene som er presentert er lite brukt i praksis på tunnelprosjekter. Det er derfor vanskelig å vite om bruk av et av disse stoppkriteriene ville ført til mindre jekking og samme oppnådde tetthet i de undersøkte tunnelene. Videre viser de utførte teoretiske beregningene (Formel 6-3) at jekking er forventet i de aller fleste tilfellene der det er tolket basert på trykk/tid-grafene. Det er derfor nærliggende å anta at trykket som ble benyttet til injeksjon burde vært noe lavere dersom jekking skulle vært unngått i de studerte prosjektene.

«Aktiv injeksjon» som er presentert i avsnitt 4.1.1, er en injeksjonsmetode som baseres på å ha en jevn trykkoppbygging gjennom hele injeksjonsprosessen. Særlig i seksjonen som er studert på Follobanen er det flere tilfeller der injeksjonstrykket er opp mot 80 bar svært tidlig i injeksjonen. Etter den tidlige trykktoppen faller ofte trykket raskt, før det igjen begynner å bygges opp. En slik måte å injisere på ser ut til å føre til jekking av sprekker svært tidlig, og i enkelte tilfeller før borhullet er fylt med injeksjonsmasse. Ettersom jekking fører til utvidelse av eksisterende sprekker, øker også forbruket av injeksjonsmasse for å oppnå tilstrekkelig tett bergmasse. En jevnere trykkoppbygging, som beskrevet i metoden for aktiv injeksjon, kunne derfor vært fordelaktig for å unngå jekking tidlig i injeksjonsprosessen.

11.13 KONSEKVENNS AV JEKING

Siden det ikke finnes én rådende teori om jekking eller hva som er konsekvensen av jekking i en bergmasse, er det vanskelig å anslå om jekking burde være unngått i alle tilfeller eller om det i enkelte tilfeller kan ha en positiv effekt på injeksjonen. Dersom det tillates at jekking forekommer under injeksjon, vil injeksjonen kunne utføres med et høyere trykk enn i tilfeller der jekking skal unngås. Bruk av høyere injeksjonstrykk gjør at injeksjonsmassen kan presses inn i bergmassen raskere og gjøre injeksjonsprosessen kortere. Videre kan jekking føre til at injeksjonsmasse blir presset inn i sprekker som i utgangspunktet hadde for liten sprekkeåpning eller var fylt med sprekkefylling som hindret injeksjonsmassen i å trenge inn.

I denne studien har analysene vist at det i hull med jekking, tar lengre tid å oppnå ønsket mottrykk og det brukes mer masse, enn i hull uten jekking. En viktig konsekvens av jekking er derfor at injeksjonen kan bli mer kostbar. Samtidig som jekking fører til at injeksjonen tar lengre tid, vil et lavere injeksjonstrykk også føre til lengre injeksjonstid, ettersom det da tar lengre tid å oppnå samme spredning av injeksjonsmassen, særlig i de minste sprekkeene.

11.14 BERGMASSENS INNVIRKNING PÅ INJEKSJON

I denne studien er det vist at både tid og forbrukt volum har en god samvariasjon i hull med og uten jekking. Det indikerer at bergmassen som injiseres har stor betydning for injeksjonsforløpet og for hvor mye tid og masse som går med til injeksjon. En bergmasse med mye sprekker uten sprekkefylling vil kreve mer injeksjonsmasse før ønsket tetthet er oppnådd enn en tettere og mindre oppsprukket bergmasse.

Spenningsene i bergmassen vil dessuten ha stor innvirkning på hvor lett og ved hvilke trykk jekking av bergmassen initieres ved bruk av høytrykksinjeksjon. Ved liten overdekning er det en selvfølge at injeksjonstrykket bør begrenses, men i områder med trykkavlastning vil det trolig også være fornuftig å begrense trykket ved høytrykksinjeksjon. Det vil kunne forhindre unødvendig spredning av injeksjonsmassene og dermed en unødvendig lang injeksjonsprosess.

11.15 FEILKILDER/TILFELDIGE FAKTORER

Studier av injeksjon har svært mange feilkilder. Dataene som er benyttet i denne studien er automatisk logget på injeksjonsriggen, og det er derfor antatt at trykk, tid og volum som er logget, er korrekt. Samtidig avhenger disse faktorene av at operatøren som har utført injeksjonen har registrert bytte av injeksjonshull korrekt og at injeksjonsmassen som faktisk er benyttet, er notert i loggen.

Videre er det usikkerheter ved metoden som er benyttet for å tolke jekking basert på trykk/tid-grafene. Kriteriene som er valgt for tolking av jekking, er basert på flere ulike kilder og kunnskap om injeksjon og geologi. Kriteriene kan likevel ikke være sikre, ettersom det per i dag ikke er mulig å undersøke hva som faktisk skjer i bergmassen når den injiseres.

De tilfeldige faktorene er alle faktorer som det ikke er mulig å ha 100 % kontroll på i en studie som denne. Blant disse er geologien den viktigste, og den som har størst betydning for resultatet av injeksjonen. I tillegg er den menneskelige faktoren viktig. Som tidligere nevnt vil denne påvirke dataene som blir logget, men den vil også ha betydning for tolkingen av trykk/tid-grafene, sorteringen og analysene som er utført.

12 OPPSUMMERING OG KONKLUSJON

I denne masteroppgaven ble det innledningsvis utført en litteraturstudie for å øke kunnskapen og forståelsen av vannets opptreden i bergmassen og av ulike metoder som sikrer at innlekkasjen av vann i underjordsanlegg holdes under tillatt nivå der dette er påkrevd. Forinjeksjon med sement og høyt trykk ble grundig presentert med ulike typer injeksjonsmasser, tilsetningsstoffer, utstyr og metode for utføring av forinjeksjonen. Videre ble rådende teorier om hydraulisk jekking av bergmassen undersøkt og presentert. Senere ble det utført en statistisk studie basert på totalt 19 injeksjonsskjermer fra to ulike jernbaneprosjekter. Tilfeller av tilsynelatende jekking ble tolket basert på trykk/tid-grafer fra hvert enkelt injeksjonshull i de 19 skjermene. Statistisk materiale fra gjennomføringen av injeksjonsarbeidene ble benyttet til å forsøke å finne relasjoner mellom faktorene som var logget under injeksjon, og tilfellene der hydraulisk jekking var tolket. Injeksjonshull med og uten tilsynelatende jekking ble sammenliknet for hvert av prosjektene. I tillegg ble det utformet og testet syv hypoteser om sammenhengen mellom de loggede faktorene i hull med hydraulisk jekking.

Basert på den statistiske studien mellom hull med og uten hydraulisk jekking ble det funnet at:

- Jekking forekommer i gjennomsnitt i 24,8 % av injeksjonshullene på de to prosjektene, men andelen hull med jekking varierer mye mellom hver skjerm
- Maksimaltrykket som oppnås i et hull, forteller lite om hvorvidt jekking har forekommet eller ikke
- Hull med jekking har større forbruk av injeksjonsmasse
- Injeksjonen tar lengre tid i hull der jekking er registrert

Basert på statistisk studie av hull der det er tolket at jekking forekommer, viser sammenstilling av de loggede faktorene at:

- Trykket som fører til jekking er relativt likt, uavhengig av v/c-forhold innad i hver enkelt injeksjonsskjerm
- Injeksjonsprosedyren og utførelsen av injeksjon har stor betydning for når i prosessen og med hvilket v/c-forhold bergmassen jekkes
- Variasjonen i volum injisert når jekking initieres er større innad i en injeksjonsskjerm enn mellom skjermene på samme prosjekt

- På Follobanen initieres de fleste tilfellene med jekking i løpet av de først 20 minuttene med injeksjon. På Vestfoldbanen er variasjonen større, men flest tilfeller av jekking er registrert mellom 20 og 200 minutter med injeksjon
- Ved stor sementinnngang i en skjerm er det forventet stor andel hull med jekking, hypotese 3. Tre av de 19 studerte skjermene hadde over 80 tonn total sementinnngang, og i samtlige av disse skjermene var mer enn 40 % av hullene jekket

Mellom følgende faktorer ble det ikke funnet noen sammenheng:

- Gjennomsnittlig maksimalt oppnådd trykk i hver skjerm og andelen hull med jekking i skjermen, hypotese 1
- Trykk ved jekking kategorisert i ulike kategorier og antall tilfeller i hver kategori, hypotese 2
- Akkumulert volum ved jekking og trykket som fører til jekking, hypotese 4
- Overdekning, effektivt trykk ved jekking og andelen hull med jekking, hypotese 7

Hypotese 4 ga en svak trend som antydte at jo større volum som var injisert før jekking, jo lavere var trykket som førte til initiering av hydraulisk jekking.

I tillegg til den statistiske analysen, ble det utført to ulike utregninger basert på formler som er utviklet for å beregne hvilket trykk som er forventet å føre til hydraulisk jekking av bergmassen.

Beregninger basert på teoretiske formler, Formel 6-3 presentert av Gothäll og Stille (2009) og Formel 6-5 presentert av Fjær et al. (2008), viste at utregning av:

- Relativt injeksjonstrykk (p_n) (Formel 6-3) ga trykk som førte til jekking som var i overensstemmelse med funnene gjort ved tolkning av trykk/tid-grafer på begge de studerte prosjektene. → Metoden ble bekreftet
- Teoretisk jekketrykk (Formel 6-5) viste ingen sammenheng med funnene gjort ved tolkning av trykk/tid-grafer for noen av prosjektene. Det var som forventet, ettersom formelen er svært teoretisk. → Metoden ble ikke bekreftet

13 VIDERE ARBEID

Videre arbeid er nødvendig for å øke forståelsen for injeksjonsprosessen. Denne studien har sett på hydraulisk jekking av bergmassen som følge av sementinjeksjon med høyt trykk. Dataene som er logget under injeksjonsarbeidet er benyttet for å forsøke å øke forståelsen av hva som fører til jekking av bergmassen.

I senere arbeid bør datagrunnlaget som benyttes til studier inkludere:

- Større mengder data enn det som er benyttet her (flere injeksjonsskjermer/flere injeksjonsprosjekter). Det vil gi mulighet for sikrere statistiske analyser og sammenlikning av ulike geologiske forhold.
- Hullenes plassering på stoff, da det vil gi anledning til å undersøke om det er noen sammenheng mellom hullenes plassering og tilfeller med hydraulisk jekking.
- Vanntapsmålinger som er utført før injeksjonen begynner for å kunne ha en indikasjon på det stedlige vanntrykket og bergmassens konduktivitet.
- Hydraulisk splittetest i injeksjonshull for å vite hvilket injeksjonstrykk som er forventet å føre til jekking av bergmassen.
- Tilstedeværelse på stoff når det injiseres for å ha anledning til å notere eventuelle spesielle hendelser som har innvirkning på injeksjonen som det ikke er mulig å oppdage i injeksjonsloggen.
- Tilstedeværelse på stoff også under boring av skjermen for å ha mulighet til å måle hullene og kontrollere retning og innbyrdes avstand mellom hullene, både innerst og ytterst.
- Utvikling av metode for å undersøke hvordan injeksjonsmassen er spredt i bergmassen etter injeksjon.

Som kommenter i avsnitt 11.6.2 er tilfellene med jekking tolket relativt tidlig i injeksjonsprosessen. Det ville derfor vært interessant å undersøke om injeksjonen kunne vært avsluttet like etter jekking er initiert. Et slikt forsøk burde inkludert tester for oppnådd tetthet like etter jekking, for å undersøke om denne er tilstrekkelig i forhold til kravet som er satt for anlegget.

I tillegg vil in situ måling av injeksjonstrykk i borhull utføres med alle de 15 ferdig produserte loggerne instrumentert i borhull. Et slikt forsøk vil gi mulighet til å studere samvirke mellom borhullene og hvordan trykket i et borhull endres gjennom injeksjonen av hele skjermen. Økt forståelse for hvordan injeksjonsmassen sprer seg i sprekker og kanaler i bergmassen er også

viktig for å kunne forstå injeksjonsprosessen bedre og sikre at tilstrekkelig spredning er oppnådd før injeksjonen avsluttes.

REFERANSER

- Aarstad, K., Skjølsvold, O. og Justnes, H. (2015). TIGHT - Sement til injisering. *State of the art*. Trondheim: SINTEF Byggforsk. 14 s.
- Acciona Ghella. (2015). *Follobanen. Tunnel Rescue Area General arrangement Plan view*, 18.06.2015: Jernbaneverket.
- Amadei, B. og Stephansson, O. (1997). *Rock Stress and its Measurement*. London: Chapman & Hall. 490 s.
- Barton, C.A., Zoback, M.D. og Moos, D. (1995). Fluid Flow Along Potentially Active Faults in Crystalline Rock. *Geology*, 23 (8): 683-686.
- Barton, N. (2003). Teoretisk og empirisk forståelse av forinjeksjon og mulighet for redusert sikringsmengde i utvalgte tunnelstrekninger. *Intern rapport nr. 2323*. Oslo: Vegdirektoratet, Teknologiavdelingen. 131 s.
- BASF. (2015). *MasterRoc MP 650*. Technical Data Sheet. Cleveland, USA: BASF.
- Bear, J. (1972). *Dynamics of Fluids in Porous Media*. Environmental Science Series. New York, USA: American Elsevier Publishing Company. 800 s.
- Brantberger, M., Stille, H. og Eriksson, M. (2000). Controlling Grout Spreading in Tunnel Grouting - Analyses and Developments of the GIN-method. *Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research*, 15 (4): 343-352.
- Carlsson, A. og Olsson, T. (1977). Hydraulic Properties of Swedish Crystalline Rocks. *Bulletin of the Geological Institutions of the University of Uppsala, N.S.*, 7: 71-84.
- CEMENTA. (2013). *Microfine 20 CEM II/A-V 52,5 N*. Stockholm: CEMENTA AB.
- Cesano, D., Olofsson, B. og Bagtzoglou, A.C. (2000). Parameters Regulating Groundwater Inflows into Hard Rock Tunnels - A Statistical Study of the Bolmen Tunnel in Southern Sweden. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 15 (2): 153-165.
- Chandra, S. (2002). Properties of Concrete with Mineral and Chemical Admixtures. I: Bensted, J. & Barnes, P. (red.) *Structure and Performance of Cements*, s. 140-185: Spon Press.
- Davik, K.I., Kveen, A., Aasen, O., Åndal, T., Kjølberg, R. og Heimli, P. (2002). *Berginjeksjon*. Håndbok nr. 1. Oslo: Norsk Forening for Fjellsprengningsteknikk. 109 s.

- Eklund, D. og Stille, H. (2008). Penetrability due to Filtration Tendency of Cement-Based Grouts. *Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research*, 23 (4): 389-398.
- Elvebakk, H. (2010). Geofysisk logging av 4 borehull langs planlagt jernbanetunnel Holm-Holmestrand-Nykirke. *NGU Rapport 2010.032*. Trondheim: Norges geologiske undersøkelse. 42 s.
- Fetter, C.W. (2001). *Applied Hydrogeology*. 4. utg. New Jersey, USA: Prentice-Hall. 615 s.
- Fjær, E., Holt, R.M., Horsrud, P., Raaen, A.M. og Risnes, R. (2008). *Petroleum Related Rock Mechanics*. 2. utg. Amsterdam: Elsevier. 514 s.
- Garshol, K.F. (2016). *Pre-Excavation Grouting in Hard Rock Tunneling*. 5. utg. Mannheim: BASF. 210 s.
- Geotechdata. (2015). *Lugeon test*. Tilgjengelig fra:
http://www.geotechdata.info/geotest/Lugeon_test.html (lest 10.11.2015).
- Gothäll, R. og Stille, H. (2009). Fracture Dilation During Grouting. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 24 (2): 126-135.
- Grasselli, G., Wirth, J. og Zimmerman, R.W. (2003). *Surface Parameters For Quantifying the Hydro-mechanical Anisotropy of Rock Discontinuities*. 10th Congress of the ISRM, Technology roadmap for rock mechanics, South Africa, s. 415-422. South Africa: International Society for Rock Mechanics.
- Grepstad, G.K. (2002). The Water Balance — Definition and Monitoring. I: *Publication No. 12*, s. 21-26. Oslo: Norsk forening for fjellsprenningsteknikk.
- Grøv, E. og Woldmo, O. (2012, February 15-18). *Modern Pre-Grouting Technology in Norway*. Proceedings of the Fourth International Conference on Grouting and Deepmixing, Louisiana, USA, s. 805-815: American Society of Civil Engineers.
- Gudmundsson, A., Berg, S.S., Lyslo, K.B. og Skurtveit, E. (2001). Fracture Networks and Fluid Transport in Active Fault Zones. *Journal of Structural Geology*, 23 (2): 343-353.
- Gustafson, G. og Stille, H. (2005). Stop Criteria for Cement Grouting. *Flesbau*, 23 (3): 62-68.
- Gustafson, G. (2012). *Hydrogeology for Rock Engineers*. Stockholm: Stiftelsen bergteknisk forskning. 171 s.
- Harrison, J.P. og Hudson, J.A. (2000). *Engineering Rock Mechanics: An Introduction to the Principles*. Engineering Rock Mechanics. Burlington: Elsevier Science. 457 s.

-
- Hegebarth, D.C. (2013). *Grouting Equipment Manual: Selection, Operation, Maintenance and Repair*. Colorado, USA: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration.
- Henn, R.W. og Davenport, J.C. (2005). Ultrafine Cement: A Critical Component of a Grouting Program. *Tunnel & Tunneling International*, 37 (4): 27-29.
- Henn, R.W. og Soule, N.C. (2010). *Ultrafine Cement in Pressure Grouting*. Virginia, USA: American Society of Civil Engineers. 81 s.
- Hoek, E. og Bray, J.W. (1981). *Rock Slope Engineering*. 3. utg. London: E & FN Spon. 356 s.
- Hognestad, H.O., Fagermo, J.I., Kveen, A., Backer, L., Grøv, E., Frogner, E. og Aarset, A. (2010). *Praktisk berginjeksjon for underjordsanlegg*. Håndbok nr. 6. Oslo: Norsk forening for fjellsprengningsteknikk. 98 s.
- Hognestad, H.O. (2012). *Muligheter/begrensninger - ulike materialer*. I: BASF (red.): Statens vegvesen. Tilgjengelig fra: <http://www.vegvesen.no/attachment/389262/binary/666901> (lest 06.11.2015).
- Holm, J.V. og Heimli, P. (2001). Laboratorieprøving av injeksjonssementer ved T-baneringen. *Rapport nr. 6: Miljø- og samfunnstjenlige tunneler*. Oslo: Vegdirektoratet, Vegtekniskavdeling. 7 s.
- Holmøy, K.H. (2008). *Significance of Geological Parameters for Predicting Water Leakage in Hard Rock Tunnels*. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology, Faculty of Engineering Science and Technology, Department of Geology and Mineral Resources Engineering.
- Holmøy, K.H., Strømsvik, H. og Rise, T. (2015). Sementbasert forinjeksjon. *State of the art*. Trondheim: SINTEF Byggforsk. 25 s.
- Holter, K.G., Bridge, R. og Tappy, O. (2010). *Design and Construction of Permanent Waterproof Tunnel Linings Based on Sprayed Concrete and Spray-Applied Double-Bonded Membrane* Proceedings of the 11th International Conference Underground Constructions, Prague, s. 121-126.
- 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): 1003-1020.
- Hubbert, M.K. (1940). The Theory of Ground-Water Motion. *The Journal of Geology*, 48 (8): 785-944.
- ISRM. (1987). Suggested Methods for Rock Stress Determination. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 24 (1): 55-63.

- Jernbaneverket. (2012a). *Bestilling av skjerm 78A stuff mot Holm, pel 80845*. Upublisert manuskript.
- Jernbaneverket. (2012b). *Holm-Nykirke*: Jernbaneverket. Tilgjengelig fra: <http://brage.bibsys.no/xmlui/bitstream/id/294628/Holm%20-%20Nykirke%202012.pdf> (lest 05.03.2016).
- Jernbaneverket. (2014). The Follo Line, Åsland Rig Area Substructures ACCESS TUNNELS ÅSLAND ENGINEERING GEOLOGY. Oslo: Jernbaneverket Utbygging. 40 s.
- Jernbaneverket. (2015). *Flödesschema injeksjon, adkomsttunnel nord*. Upublisert manuskript.
- Justnes, H. (2002). Condensed Silica Sume as a Cement Extender. I: Bensted, J. & Barnes, P. (red.) *Structure and Preformance of Cements*, s. 399-408. London: Spon Press.
- Karlsrud, K. (2001). Control of Water Leakage when Tunneling Under Urban Areas in the Oslo Region. I: *Publication No. 12*, s. 27-33. Oslo: Norsk forening for fjellsprengningsteknikk.
- Karol, R.H. (2003). *Chemical Grouting and Soil Stabilization, Revised and Expanded*. 3. utg. New Jersey, USA: Taylor and Francis. 584 s.
- Kartverket. (2016). *Norgeskart*: Kartverket. Tilgjengelig fra: http://www.norgeskart.no/?_ga=1.253735118.679839923.1456821108#7/274685/6628079 (lest 01.03.2016).
- Kjølberg, R., Åndal, T., Aasen, O., Lindstrøm, M. og Boge, K. (2002). Sluttrapport for injeksjonsarbeidene ved T-baneringen. *Rapport nr. 16: Miljø- og samfunnstjenelige tunneler*. Oslo: Vegdirektoratet, Vegtekniskavdeling. 28 s.
- Klüver, B.H. (2000). Delprosjekt C: Tetteteknikk BERGINJEKSJON. *Miljø og samfunnstjenelige tunneler, Intern rapport nr. 2151*. Oslo: Vegdirektoratet, Vegteknisk avdeling. 21 s.
- Klüver, B.H. og Kveen, A. (2004). Berginjeksjon i praksis. *Miljø og samfunnstjenelige tunneler, Publikasjon nr. 104*. Oslo: Vegdirektoratet, Teknologivdelingen. 63 s.
- Knudsmoen, M. (2015, 22-23 september). *Kontaktstøp med membran som vann- og frostsikring*. Teknologidagene, Trondheim: Statens vegvesen.
- Lang, E. (2002). Blastfurnance Cements. I: Bensted, J. & Barnes, P. (red.) *Structure and Performance of Cements*, s. 310-325. London: Spon Press.
- Larsen, T. (2012). 3-dimensjonal og 2-dimensjonal bergspenningsmålinger ved Holmestrand. Trondheim: SINTEF. 15 s.

-
- Larsen, T. og Følke, K. (2015). 3-dimensjonale bergspenningsmålinger, Åsland tunnelen, Follobanen. Trondheim: SINTEF. 15 s.
- Lombardi, G. (1985). Some Theoretical Considerations on Cement Rock Grouting. Switzerland: Lombardi Engineering LTD. 11 s.
- Lombardi, G. (1996). Selecting the Grouting Intensity. *The International Journal on Hydropower & Dams* 3(4): 62-66.
- Luke, K. (2002). Pulverized Fuel Ash as a Cement Extender. I: Bensted, J. & Barnes, P. (red.) *Structure and Performance of Cements*, s. 353-371. London: Spon Press.
- Løset, F. (2006). *Norges tunnelgeologi*. Oslo: Norges geotekniske institutt. 173 s.
- Mirza, J., Saleh, K., Langevin, M.-A., Mirza, S., Bhutta, M.A.R. og Tahir, M.M. (2013). Properties of Microfine Cement Grouts at 4°C, 10°C and 20°C. *Construction and Building Materials*, 47: 1145-1153.
- Morita, N., Black, A.D. og Fuh, G.F. (1996). Borehole Breakdown Pressure with Drilling Fluids - I. Empirical Results. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 33 (1): 39-51.
- Mueller, R. (2002). *Contemporary Grouting Equipment*. CUC course Waterproofing of Tunnels, Switzerland.
- Myrvang, A. (2001). *Bergmekanikk*. Trondheim: Norges teknisk- naturvitenskaplige universitet, Institutt for geologi og bergteknikk. 145 s.
- Nilsen, B. og Thidemann, A. (1993). *Rock Engineering*. Hydropower development, b. 9. Trondheim: Norwegian Institute of Technology, Division of Hydraulic Engineering. 156 s.
- Nilsen, B. og Broch, E. (2012). *Ingeniørgeologi-berg Grunnkurskompendium*. Trondheim: Norges teknisk- naturvitenskaplige universitet, Institutt for geologi og bergteknikk. 291 s.
- Norconsult AS. (2010). Parsell 5.2 Holm - Holmestrand UHN-01 Sjøskogen Ingeniørgeologisk - Hydrogeologisk rapport. I: Jernbaneverket (red.): Jernbaneverket Utbygging. 24 s.
- Norconsult AS. (2012). Etatsprogrammet moderne vegtunneler, Strategi for bygging av nye vegtunneler, Grunnlagsdokument. *Statens vegvesens rapporter nr. 130*. Oslo: Vegdirektoratet, Trafikksikkerhet, Miljø- og teknologiavdeling. 24 s.

- Olsson, R. og Barton, N. (2001). An Improved Model for Hydromechanical Coupling During Shearing of Rock Joints. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 38 (3): 317-329.
- Pantazopoulos, I., Christodoulou, D., Droudakis, A.I., Atmatzidis, D., Antiohos, S., Chaniotakis, E. og Pantazopoulos, I.A. (2012). Development of Microfine Cement Grouts by Pulverizing Ordinary Cements. *Cement & Concrete Composites*, 34 (5): 593-603.
- Panthi, K.K. (2014, May 2014). *Analysis on the Pre-Injection Grout Consumption at Strindheim Road Tunnel Project, Trondheim, Norway*. Eurock 2014 Rock Engineering and Rock Mechanics: Structures in and on Rock Masses, s. 1133-1137.
- Pedersen, K.B., Komoen, R. og Kveen, A. (2010). Arbeider foran stuff og stabilitetssikring i vegtunneler. *Rapport nr. 2538*. Oslo: Vegdirektoratet, Teknologivdelingen. 38 s.
- Qian, J., Zhan, H., Zhao, W. og Sun, F. (2005). Experimental Study of Turbulent Unconfined Groundwater Flow in a Single Fracture. *Journal of Hydrology*, 311 (1): 134-142.
- Raaen, A.M. og Scheldt, T. (2016). *Møte hos Statoil Rotvoll* (18. mars).
- Rafi, J.Y. og Stille, H. (2015a). Applicability of Using GIN Method, by Considering Theoretical Approach of Grouting Design. *Geotechnical and Geological Engineering*, 33 (6): 1431-1448.
- Rafi, J.Y. og Stille, H. (2015b). Basic Mechanism of Elastic Jacking and Impact of Fracture Aperture Change on Grout Spread, Transmissivity and Penetrability. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 49: 174-187.
- Schwarz, L.G. og Krizek, R.J. (2000). Evolving Morphology of Early Age Microfine Cement Grout. *Geotechnical Special Publication*, 292 (104): 181-199.
- Selmer-Olsen, R. (1966). *Forelesningskompendium for grunnkurset i faget Alminnelig geologi og ingeniørgeologi*. 2. utg. Alminnelig geologi og ingeniørgeologi. Trondheim: Tapir. 437 s.
- Selmer-Olsen, R. (1981). *Betraktninger over store vannlekkasjer i dyptliggende tunneler*. Fjellsprengningskonferansen, Oslo, s. 21.1-21.15: Norsk forening for fjellsprengningsteknikk.
- SINTEF. (2005). IN-SITU ROCK STRESS MEASUREMENTS, Brief Description of Methods applied by SINTEF. Trondheim: SINTEF. 10 s.

- SINTEF. (u.å.). *Rehabilitering av tunneler*. Nytt fra SINTEF Byggforsk: SINTEF Byggforsk. Tilgjengelig fra: <http://www.sintef.no/globalassets/upload/byggforsk/fagartikler/byggeindustrien/15-09-rehabilitering-av-tunneler.pdf> (lest 28.10.2015).
- Stille, H., Gustafson, G. og Hassler, L. (2012). Application of New Theories and Technology for Grouting of Dams and Foundations on Rock. *Geotechnical and Geological Engineering*, 30 (3): 603-624.
- Stille, H. (2015). *Rock Grouting - Theories and Applications*. Stockholm: Stiftelsen bergteknisk forskning. 139 s.
- Storvik, A.M. (2014). *Vestfoldbanen, Holm-Nykirke, Fakta*: Jernbaneverket. Tilgjengelig fra: <http://www.jernbaneverket.no/Prosjekter/prosjekter/Dette-er-Vestfoldbanen/Holm-Nykirke-/Fakta/> (lest 30.03.2016).
- SVV. (2004). Typegodkjente metoder for vann og frostsikring av vegtunneler og retningslinjer for brannsikring av PE-skum. *NA-rundskriv 04/20*. Oslo: Statens vegvesen. 5 s.
- Tolppanen, P. og Syrjänen, P. (2003). *Hard Rock Tunnel Grouting Practice in Finland, Sweden and Norway - Literature Study*: Finnish Tunnelling Association. 82 s.
- Tunbridge, L., Aasrset, A. og Tønnessen, E. (2014). *FOU prosjekt med måling av injeksjonstrykk in situ*. Bergmekanikkdagen, Oslo, s. 31.1-31.13: Norsk jord og fjellteknisk forbund.
- Warner, J. (2004). *Practical Handbook of Grouting: Soil, Rock and Structures*. New Jersey, USA: Wiley. 700 s.
- Winston, W.L. (2011). *Microsoft® Excel® 2010 : Data Analysis and Business Modeling*. 3. utg. Microsoft® Excel® 2010: Data Analysis and Business Modeling. California, USA: Microsoft Press. 720 s.

VEDLEGG

INNHOLD

Vedlegg A: Tester av injeksjonsmassen.....	i
Vedlegg B: Rådata fra instrumentert skjerm på Follobanen (zip-fil)	iv
Vedlegg C: Rådata fra begge prosjektene som er benyttet til statistiske analyser (zip-fil).....	v
Vedlegg D: Kondensert data fra Follobanen og Vestfoldbanen.....	vi
Vedlegg E: Alle plott som er laget i forbindelse med analyser av data (zip-fil).....	x
Vedlegg F: Grunnvannsmålinger og resultater fra bergspenningsmålinger med utregnet største og minste tangentialspenning	xi
Vedlegg G: Teoretiske beregninger av forventet jekketrykk og sammenlikning av effektivt jekketrykk funnet basert på tolkning av trykk/tid-grafer.....	xiii
Vedlegg H: Grafer for null-funn.....	xvi

Vedlegg A: TESTER AV INJEKSJONSMASSEN

Fersk betong er en forutsetning for å oppnå ønsket resultat ved injeksjon. Dersom det benyttes gammel betong eller betongen ikke er oppbevart korrekt vil det ofte gi et dårlig injeksjonsresultat (Hognestad et al., 2010). Det er ulike metoder som kan benyttes for å undersøke om betongen som skal brukes holder ønsket standard, disse vil bli beskrevet kortfattet under.

Ved testing i felt tas det masse direkte fra blanderen på injeksjonsriggen, og i laboratorium kan det brukes en miksmaster for å oppnå god blanding.

Test av tendens til vannutskillelse

Kontroll av tendens til vannutskillelse utføres for å undersøke hvor mye vann som skilles ut av sementmassen over tid. For å utføre testen trengs det en transparent målesylinder og godt blandet injeksjonsmasse. Det er anbefalt å bruke et v/c-forhold = 1 til denne testen (Hognestad et al., 2010).

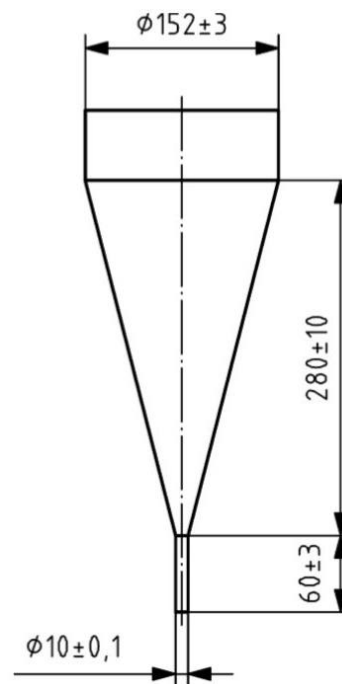
Målesylinderen som er fylt opp med injeksjonsmasse plasseres på et plant underlag. Ikke på injeksjonsriggen da vibrasjoner fra denne vil kunne forstyrre og ødelegge testen. Etter to timer leses det av hvor mye fritt vann som ligger oppå sementen i toppen av sylinderen, mye utskilt vann tyder på gammel sement (Hognestad et al., 2010).

Marsh-cone test

Hensikten med å utføre en marsh-cone test er for å undersøke flyteevnen til injeksjonsmassen. Testen utføres ved å måle tiden det tar for et gitt volum av injeksjonsmasse (1 liter) å passere gjennom en trakt med bestemte mål (Standard Norge, 2007).

Nødvendig utstyr for å utføre testen er en trakt med målene som vist i Figur 1. Trakten må være glatt i et ikke-absorberende materiale og ha et volum på $1,7 \pm 0,17$ liter ekskludert den sylindriske delen på toppen og i bunn. I tillegg trengs en stoppeklokken med nøyaktighet på 0,1 sekund samt en målesylinder som rommer minst 1 liter med diameter omtrent 60 millimeter (Standard Norge, 2007).

Trakten plasseres vertikalt med minste åpning nederst og målesylinderen under. Før injeksjonsmassen helles opp i trakten, skal innsiden av trakten være ren og fuktet. Når det er klart for å begynne testen skal trakten tettes i bunn, enten med en lukkemekanisme eller på annen måte (eks. finger). Den kjegleformet delen av trakten fylles deretter med injeksjonsmasse sakte slik at det ikke kommer luftbobler inn i massen. Dernest åpnes trakten og stoppeklokken startes samtidig. Tiden det tar for 1 liter injeksjonsmasse å fylle sylinderen måles. Det er viktig at det ikke er noen vibrasjon i hverken trakten eller målesylinderen under testing da dette vil påvirke resultatet (Standard Norge, 2007).



Figur 1: Standard trakt for bruk i Marsh-cone test. Alle målene er i millimeter (Standard Norge, 2007).

Kontroll av v/c-tallet

V/c-tallet til en injeksjonsmasse forteller om forholdet mellom innhold av vann og sement i blandingen. Innholdet av vann er med på å bestemme flere viktige egenskaper til injeksjonsmassen, og både for mye og for lite vann vil kunne ødelegge resultatene av injeksjonen. For mye vann vil kunne føre til separasjon i massen og at herdetiden blir for lang. For lite vann vil gjøre massen tykt flytende og hindre inntrenging i mindre sprekker (Hognestad et al., 2010).

En enkel måte å kontrollere v/c-forholdet i en ferdig blandet masse er ved å veie 1000 milliliter (1 liter) masse i et måleglass med kjent vekt og deretter regne ut mengden sement i blandingen. Dette gjøres ved å nullstille en digitalvekt med målesylinderen oppå, og deretter fylle opp målesylindringen med 1000 milliliter masse og lese av vekten. Forholdet regnes ut ved å subtrahere vekten av 1000 milliliter vann (1000 gram) fra den målte vekten. Den utregnede vekten er gir innholdet av sement i blandingen i gram og forholdet mellom vann og sement kan nå finnes ved å dividere vekten av vann på vekten av sement (Hognestad et al., 2010).

Størkningstid

Størkningstiden til injeksjonsmassen er viktig å kjenne for å vite når videre drift kan tilta etter injeksjon. En svært enkel test, som kan utføres på tunnelsuff uten spesialutstyr, er

«veltet-begerglass»-testen. Testen går ut på å fylle en plastkopp med injeksjonsmateriale, merke koppen og sette den på et sted den står sikkert uten store vibrasjoner. Ideelt skal koppen settes en plass der forholdene er mest mulig lik forholdene inne i fjellet med tanke på temperatur og vibrasjoner. Det er derfor foreslått å plassere koppen direkte på tunnelsålen. Når injeksjonsmassen har størknet tilstrekkelig til at koppen kan snus opp-ned uten at massen renner ut, har injeksjonsmassen inne i bergmassen størknet tilstrekkelig til at videre drift kan tilta (Hognestad et al., 2010).

REFERANSER

- Hognestad, H.O., Fagermo, J.I., Kveen, A., Backer, L., Grøv, E., Frogner, E. og Aarset, A. (2010). *Praktisk berginjeksjon for underjordsanlegg*. Håndbok nr. 6. Oslo: Norsk forening for fjellsprenningsteknikk. 98 s.
- Standard Norge. (2007). *NS-EN 445: 2007 Injeksjonsmasse til kabelkanaler for spennarmering Prøvingsmetoder*. Brussel: European Committee for Standardization.

Vedlegg B: Rådata fra instrumentert skjerm på Follobanen (zip-fil)

Excel-arket «Logget data fra felt» inneholder logget data fra både injeksjonsriggen og loggeren som var installert i borhullet. I fanen «Kilde» er rådataen som ble logget med injeksjonsriggen. I «Pivot» er det laget trykk/tid-grafer fra alle injeksjonshullene i skjermen. I *sliceren* som er satt inn er det mulig å velge hvilket hull som skal vises. I fanene «Logger 11» og «Logger 3» er dataene som ble logget med loggerne som var installert i borhullene. Logger 11 viste seg å ikke være tilstrekkelig tett etter vannfylling, og data fra denne loggeren er derfor ikke benyttet.

I excel-arket «Jekking av borhull» er data fra både logger 3 og injeksjonsriggen fra tidspunktet der det ble tolket hydraulisk jekking presentert. Fra injeksjonsriggen er det kun det tidsintervallet der jekkingen er registrert som er tatt med.

Vedlegg C: Rådata fra begge prosjektene som er benyttet til statistiske analyser
(zip-fil)

I dette vedlegget er alle dataene som er logget under injeksjon på injeksjonsriggen for begge prosjektene. Det er en mappe per prosjekt, en for Follobanen og en for Vestfoldbanen. I hver mappe er det en Excel-fil per injeksjonsskjerm. I Excel-filene er rådataene som er importert til Microsoft Excel er i fanen «Kilde», trykk/tid-grafene er i fanen «Pivot» med mulighet for å velge hvert enkelt hull i innsatt *slicer*. I fanen «Verdier» er det funnet og regnet ut ulike verdier som er benyttet i analysene og sorteringer. I «Slicer» er alle hullene med tolket jekking og tilhørende data presentert, og fanen «Filter» er brukt for å finne gjennomsnittlig akkumulert tid per hull i skjermen. Informasjonen fra denne fanen er kopiert over til Excel-arket «Akkumulert tid og volum_Alle».

I tillegg er det et Excel-ark som heter «Akkumulert tid og volum_Alle». I dette arket er akkumulert tid og volum for alle hullene på prosjektet lagt inn for å kunne lage spredningsplott med alle hullene på samme prosjekt.

Vedlegg D: Kondensert data fra Follobanen og Vestfoldbanen

FOLLOBANEN

FOLLOBANEN	736	748	768	789	804	825	846	867	890	Gjennomsnitt
Antall jekking V/C 0,9	6	5	0	2	3	3	10	14	7	5,6
Snitt trykk jekking 0,9	64	76	-	72	63	70	66	56	71	67,2
Snitt max trykk jekking 0,9	84	85	-	89	67	77	73	65	87	78,5
Snitt max trykk 0,9	83	84	82	83	77	81	72	71	87	80,0
Snitt vol v/jekking 0,9	376	439		240	448	169	349	393	163	322,0
Snitt KG ved jekking 0,9	594	693	0	379	707	267	550	620	257	451,9
Snitt tot vol jekking 0,9	1016	889	-	1095	791	434	965	2347	1038	1071,9
Snitt tot vol KG jekking 0,9	1603	1403		1728	1249	686	1524	3706	1640	1692,5
Snitt vol 0,9	453	737	62	486	266	205	442	1387	331	485,5
Snitt KG 0,9	716	1164	98	767	420	324	698	2190	522	766,5
Snitt akk tid v/jekk 0,9	1675	2298		968	1984	823	1596	1538	744	1453,1
Antall jekking V/C 0,5	3	2		0						1,7
Snitt trykk jekking 0,5	77	73								74,6
Snitt max trykk jekking 0,5	97	83								90,2
Snitt max trykk 0,5	91	81		91						87,9
Snitt vol v/jekking 0,5	225	557								390,9
Snitt KG ved jekking 0,5	449	1114								781,8
Snitt tot vol jekking 0,5	1812	1238								1524,8
Snitt tot vol KG jekking 0,5	3624	2476								3049,7
Snitt vol 0,5	1027	818		1351						1065,2
Snitt KG 0,5	2053	1635		2702						2130,3
Snitt akk tid v/jekk 0,5	3936	7079,5								5507,8

Vedlegg D

Tot vol skjerm	68714	31767	2558	8020	10912	8415	15038	52696	11242	23262,3
Tot vol skjerm KG	63016	50159	4038	12663	17229	13286	23744	83204	17751	31676,7
Snitt vol jekking KG (begge)	522	903		379	707	267	550	620	257	525,7
Snitt trykk jekking (begge)	70	74		72	63	70	66	56	71	67,8
Snitt akk tid (begge)	2805	4689		968	1984	823	1596	1538	744	1893,3
Snitt vol hull	1527	739	62	196	266	205	442	1464	341	582,4
Snitt KG hull	1400	1166	98	309	420	324	698	2311	538	807,3
Antall jekke-events	9	7	0	2	3	3	10	14	7	6,1
Antall "NEI"	36	36	41	39	38	38	24	22	26	33,3
Antall hull	45	43	41	41	41	41	34	36	33	39,4
% hull m/jekking	20,0	16,3	0,0	4,9	7,3	7,3	29,4	38,9	21,2	16,1
% jekking 0,9	66,7	71,4		100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	92,3
% jekking 0,5	33,3	28,6								31,0
Snitt tid m/jekking (min)	126,3	111,9	0,0	107,6	62,4	30,9	59,3	127,8	67,5	77,1
Snitt tid u/jekking (min)	44,6	49,7	11,3	50,8	20,5	16,0	18,9	57,3	18,0	31,9
Snitt vol m/jekking (kg)	3395,0	2995,6		2520,6	1249,1	685,9	1524,1	3706,2	1639,7	2214,5
Snitt vol u/jekking (kg)	1661,5	1659,6	98,5	346,6	354,8	295,5	354,3	1304,9	293,1	707,6
Snitt trykk m/jekking	89,4	83,2		90,7	67,4	77,1	73,2	65,3	87,4	79,2
Snitt trykk u/jekking	87,6	83,2	82,2	83,5	77,7	81,7	71,3	74,3	89,9	81,3

VESTFOLDBANEN

VESTFOLDBANEN	83943	83960	83976	83993	84011	84026	84044	84060	84077	84094	Gjennomsnitt
Antall jekking V/C 0,8	2	5	5	10	7	4	2	3	9	4	5,1
Snitt trykk jekking	52	54	47	49	52	36	35	46	48	52	47,1
Snitt max trykk jekking	58	54	57	59	55	37	38	53	49	51	51,0
Snitt max trykk 0,8	49	49	54	55	52	36	37	38	48	47	46,4
Snitt vol v/jekking 0,8	362	102	129	316	92	284	186	1275	203	98	304,6
Snitt tot vol jekking 0,8	1547	345	942	968	477	499	588	2193	992	260	881,1
Snitt tot vol 0,8	380	302	351	510	276	399	323	483	541	245	381,0
Snitt akk tid v/jekking 0,8	1557	1050	621	1640	1014	977	746	10323	1457	413	1979,9
Antall jekking V/C 0,5	11	8	3	10	1	13	10	12	14	4	8,6
Snitt trykk jekking	53	52	49	46	41	47	39	38	47	50	46,1
Snitt max trykk jekking	63	64	62	65	51	59	52	54	55	63	58,8
Snitt max trykk 0,5	63	63	63	64	58	59	54	57	59	57	59,9
Snitt vol v/jekking 0,5	846	516	843	560	77	623	1021	986	1297	263	703,1
Snitt tot vol jekking 0,5	3127	3012	3691	3244	186	1998	3597	3070	3166	686	2577,7
Snitt tot vol 0,5	1439	1037	1017	1878	265	1163	1539	1703	1540	216	1179,6
Snitt akk tid v/jekking 0,5	9279	9621,0	11487,7	11127,9	6952,0	7399,6	16004,9	15544,8	9752,0	3833,0	
Tot vol pr skjerm	60686	50773	49333	81518	16328	57102	73358	77742	86593	16399	56983
Snitt max trykk i skjerm	56	56	59	59	55	48	46	47	59	52	53,7
Snitt trykk jekk begge	52	53	48	47	46	42	37	42	48	51	46,6
Snitt akk tid begge	5418	5336	6055	6384	3983	4188	8376	12934	5605	2123	6040,0
Snitt vol jekking (begge)	771	357	397	438	90	543	882	1044	869	180	557,1
Snitt vol hull	1411	1238	1072	1941	430	1190	1561	1896	1767	364	1287,1
Antall jekke-events	13	13	8	20	8	17	12	15	23	8	13,7

Vedlegg D

Antall "NEI"	30	28	38	22	30	31	35	26	26	37	30,3
Antall hull	43	41	46	42	38	48	47	41	49	45	44,0
% hull m/jekking	30,2	31,7	17,4	47,6	21,1	35,4	25,5	36,6	46,9	17,8	31,0
% jekking 0,8	15,4	38,5	62,5	50,0	87,5	23,5	16,7	20,0	39,1	50,0	40,3
% jekking 0,5	84,6	61,5	37,5	50,0	12,5	76,5	83,3	80,0	60,9	50,0	59,7
Snitt tid m/jekking (min)	418,9	284,3	208,7	290,5	94,1	365,9	179,4	337,1	293,9	72,7	254,5
Snitt tid u/jekking (min)	236,1	228,9	148,0	272,5	54,6	136,2	210,3	306,7	216,0	60,7	187,0
Snitt vol m/jekking	3504,4	1735,8	3280,2	2365,4	1018,7	2115,8	1901,5	2562,4	2887,7	321,0	2169,3
Snitt vol u/jekking	1135,9	1166,1	844,1	1808,3	270,5	932,7	1580,8	1803,6	1272,9	359,9	1117,5
Snitt trykk m/jekking	64,6	63,1	64,6	64,1	62,0	59,5	54,4	53,3	57,1	57,6	60,0
Snitt trykk u/jekking	63,2	63,6	63,6	64,4	60,3	58,9	56,3	57,7	62,2	57,7	60,8

Vedlegg E: Alle plott som er laget i forbindelse med analyser av data (zip-fil)

Excel-ark med alle diagrammer og plott som er laget i forbindelse med analyse av dataene i studien. Det er et Excel-ark per prosjekt, og i hvert a arkene er det flere faner, fanene heter det samme og inneholder de samme diagrammene for hvert av prosjektene.

Fanen «Kondensert data» inneholder gjennomsnittsverdier for ulike parametere for hver av de studerte injeksjonsskjermene. «Alle verdier» inneholder all data som er logget og regnet ut ved alle tilfellene med jekking i prosjektet. Hver av de andre fanene har navn basert på hvilke sorteringer og plott som er laget i hver fane. Det er mange av diagrammene som er laget som ikke er tatt med i oppgaven ettersom de ikke viser noen sammenheng, eller det ble ansett som overflødig/uinteressant å ha de med.

I Excel-arket med data fra Vestfoldbanen er det en fane som heter «Vestfoldbanen og Follobanen» denne fanen inneholder den kondenserte dataen fra begge prosjektene og ulike plott der de to prosjektene er sammenliknet.

Vedlegg F: Grunnvannsmålinger, data fra installerte brønner på begge prosjektene og resultater fra bergspenningsmålinger med utregnet største og minste tangentialspenning

FOLLOBANEN

Parameter	Enhet	Fjellbrønn	Fjellbrønn	Fjellbrønn	Fjellbrønn	Fjellbrønn
		6005	6737	6738	7003	7113
Terrenghøyde	moh	217,3	171,3	ØDELAGT	136,4	136,4
Dypt il berg	m	2			2,5	
Hull-lengde	m	190			20	
Måledyp I	m	8			18	
Måledyp II	m	35				
Dyp til grunnvann mellom	m	1,3 til 5,2	1,3 til 1,5		0,5 til +0,3	
Snitt dyp til grunnvann	mut	2,4	1,1		0,1	0,3
Terrengkote grunnvannet står på	moh	214,9	170,2		136,3	136,1

Bergmekaniske egenskaper	Verdi
E-modul (Gpa)	61
Poissons forhold, ν	0,2
Trykkfasthet (Mpa)	183,2
Bruddvinkel	16
Densitet (kg/m³)	2629

Spenning	Verdi	Usikkerhet
σ_1 (MPa)	23,4	$\pm 2,3$
σ_2 (Mpa)	14,6	$\pm 1,7$
σ_3 (Mpa)	11,8	$\pm 1,6$
σ_t, max	58,4	
σ_t, min	12	

VESTFOLDBANEN

Parameter	Enhet	Fjellbrønn	Fjellbrønn	Fjellbrønn	Fjellbrønn
		FB 79,8	FB 81,3	FB 82,9	FB 85,5
Innstillings tid		40135	40144	40144	40515
Terrenghøyde	moh	71	154	102	48
Dyp til berg	m	5	5	10	5
Hull-lengde	m	60	135	132	44
Måledyp I	m				
Måledyp II	m				
Dyp til grunnvann mellom	m				
Snitt dyp til grunnvann	mut	7	83	113	0
Terrengkote grunnvannet står på	moh	64	70	-10	48

Bergmekaniske egenskaper	Verdi
E-modul (Gpa)	59
Poissons forhold, ν	0,16
Trykkfasthet (Mpa)	116
Bruddvinkel	23
Densitet (kg/m³)	3047

Spenning	Verdi	Usikkerhet
σ_1 (Mpa)	14	$\pm 2,1$
σ_2 (Mpa)	9,5	$\pm 0,7$
σ_3 (Mpa)	5	$\pm 2,6$
σ_t, max	37	
σ_t, min	1	

Vedlegg G: Teoretiske beregninger av forventet jekketrykk og sammenlikning med effektivt jekketrykk funnet basert på tolkning av trykk/tid-grafer

FOLLOBANEN

FOLLOBANEN	736	748	768	789	804	825	846	867	890
Overdekning	65,90	63,50	65,90	70,50	82,30	89,30	96,40	101,10	101,10
Vanddyp under terreng	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Vannetstetthet	1000,00	1000,00	1000,00	1000,00	1000,00	1000,00	1000,00	1000,00	1000,00
g	9,81	9,81	9,81	9,81	9,81	9,81	9,81	9,81	9,81
Vannsøyle	64,90	62,50	64,90	69,50	81,30	88,30	95,40	100,10	100,10
Vanntrykk (bar)	6,37	6,13	6,37	6,82	7,98	8,66	9,36	9,82	9,82
Snitt trykk jekking 0,9	63,82	75,60	-	71,75	63,07	69,63	66,46	55,91	71,37
Effektivt trykk	57,45	69,47		64,93	55,09	60,97	57,10	46,09	61,55
Sigma3	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00
pn	0,16	0,20		0,18	0,16	0,17	0,16	0,13	0,17
pn hvis sigma3=overdekning	1,10	1,38	0,00	1,16	0,84	0,86	0,75	0,57	0,77
Snitt trykk jekking 0,5	76,60	72,55							
Effektivt trykk	70,23	66,42							
Sigma3	118,00	118,00							
pn	0,20	0,19							
pn hvis sigma3=overdekning	1,34	1,32	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

VESTFOLDBANEN

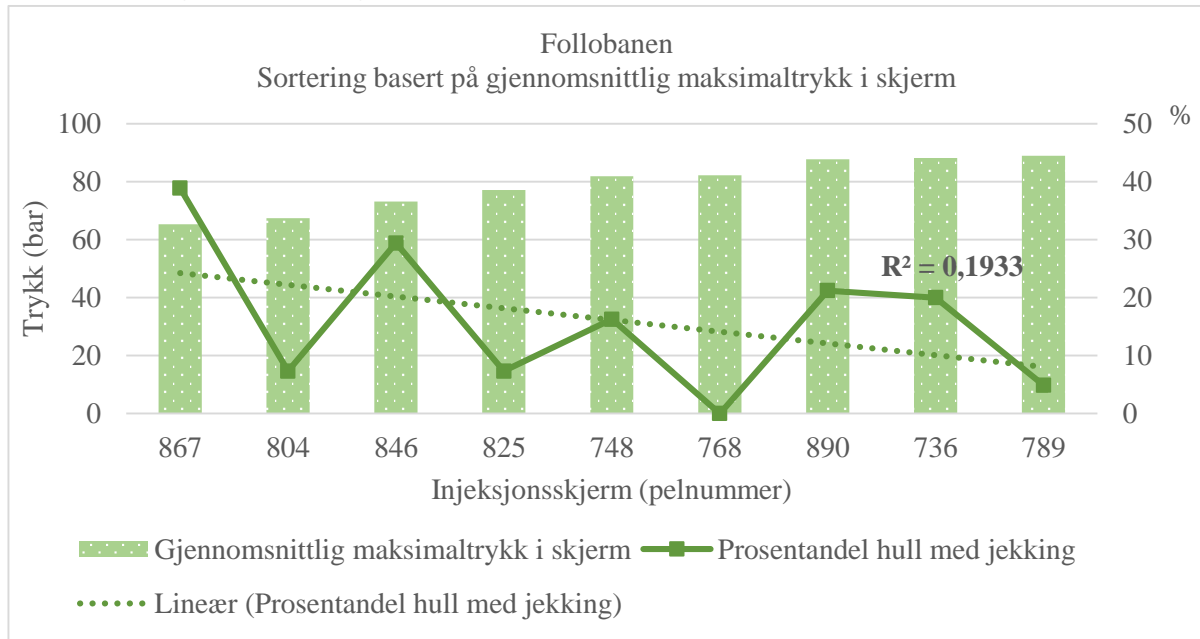
VESTFOLDBANEN	83943	83960	83976	83993	84011	84026	84044	84060	84077	84094
Overdekning	64,00	64,00	64,00	64,00	75,00	75,00	70,00	70,00	70,00	70,00
Vann dyp under terreng	45,00	45,00	45,00	45,00	45,00	45,00	45,00	45,00	45,00	45,00
Vannetstetthet	1000,00	1000,00	1000,00	1000,00	1000,00	1000,00	1000,00	1000,00	1000,00	1000,00
g	9,81	9,81	9,81	9,81	9,81	9,81	9,81	9,81	9,81	9,81
Vann søyle	19,00	19,00	19,00	19,00	30,00	30,00	25,00	25,00	25,00	25,00
Vanntrykk (bar)	1,86	1,86	1,86	1,86	2,94	2,94	2,45	2,45	2,45	2,45
Snitt trykk jekking	51,55	53,66	47,46	48,60	51,80	36,45	35,30	45,77	48,46	52,15
Effektivt trykk	49,69	51,80	45,60	46,74	48,86	33,51	32,85	43,31	46,00	49,70
Sigma3	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00
pn	0,33	0,35	0,30	0,31	0,33	0,22	0,22	0,29	0,31	0,33
pn hvis sigma3=overdekning	0,98	1,02	0,90	0,92	0,82	0,56	0,59	0,78	0,83	0,89
Antall jekking V/C 0,8	2,00	5,00	5,00	10,00	7,00	4,00	2,00	3,00	9,00	4,00
Snitt trykk jekking	51,55	53,66	47,46	48,60	51,80	36,45	35,30	45,77	48,46	52,15
Snitt max trykk jekking	57,53	54,33	56,66	59,11	55,03	37,14	37,93	53,40	48,65	50,61
Snitt max trykk 0,8	48,90	49,02	54,01	54,57	51,92	35,97	36,89	37,76	48,26	47,04
Snitt tot vol jekking 0,8	1546,50	345,40	941,60	968,30	477,29	499,00	587,50	2193,33	992,22	260,00
Snitt tot vol 0,8	379,52	302,24	350,51	510,17	276,43	399,08	323,41	483,03	540,84	244,62
pn	0,34	0,36	0,32	0,32	0,35	0,24	0,24	0,31	0,32	0,35
pn hvis sigma3=overdekning	1,01	1,06	0,93	0,96	0,87	0,61	0,63	0,82	0,87	0,94
Antall jekking V/C 0,5	11,00	8,00	3,00	10,00	1,00	13,00	10,00	12,00	14,00	4,00
Snitt trykk jekking	52,80	52,00	48,80	45,82	40,60	47,22	39,13	37,65	46,88	49,80
Snitt max trykk jekking	63,48	63,96	61,94	64,57	50,70	59,21	51,57	53,90	55,50	62,70
Snitt max trykk 0,5	62,94	63,46	63,45	64,30	58,39	59,16	54,37	56,91	58,88	56,99

Vedlegg G

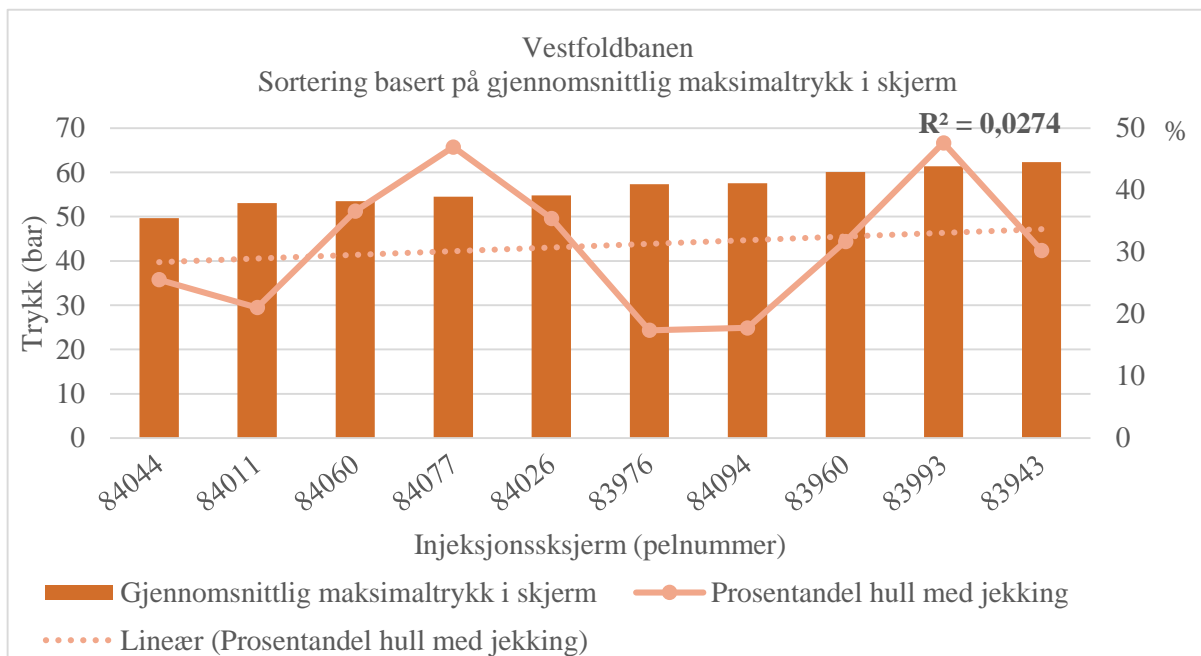
Snitt tot vol jekking 0,5	3126,55	3011,88	3691,33	3244,30	186,00	1998,23	3596,90	3070,42	3165,86	686,00
Snitt tot vol 0,5	1438,85	1037,32	1016,97	1877,84	265,22	1162,51	1538,97	1703,31	1539,69	215,64
pn	0,35	0,35	0,33	0,31	0,27	0,31	0,26	0,25	0,31	0,33
pn hvis sigma3=overdekning	1,04	1,02	0,96	0,90	0,68	0,79	0,70	0,68	0,84	0,90

Vedlegg H: Grafer for null-funn

Hypotese 1: Jo høyere maksimaltrykk som er oppnådd i hver skjerm, jo flere tilfeller med jekking vil være registrert

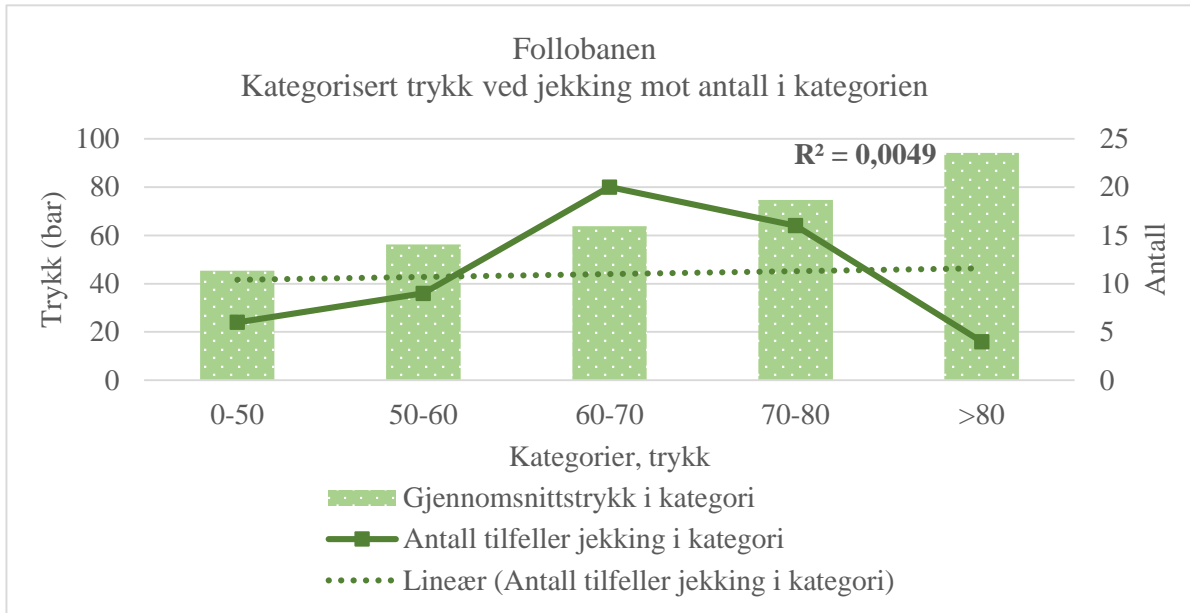


Figur 1: Sammenstilling av gjennomsnittlig maksimalt oppnådd trykk i hver skjerm og relativ andel hull med jekking viser ingen korrelasjon for dataene på Follobanen. Trendlinje og R-kvadrat for relativ andel hull med jekking er også tegnet inn i diagrammet.

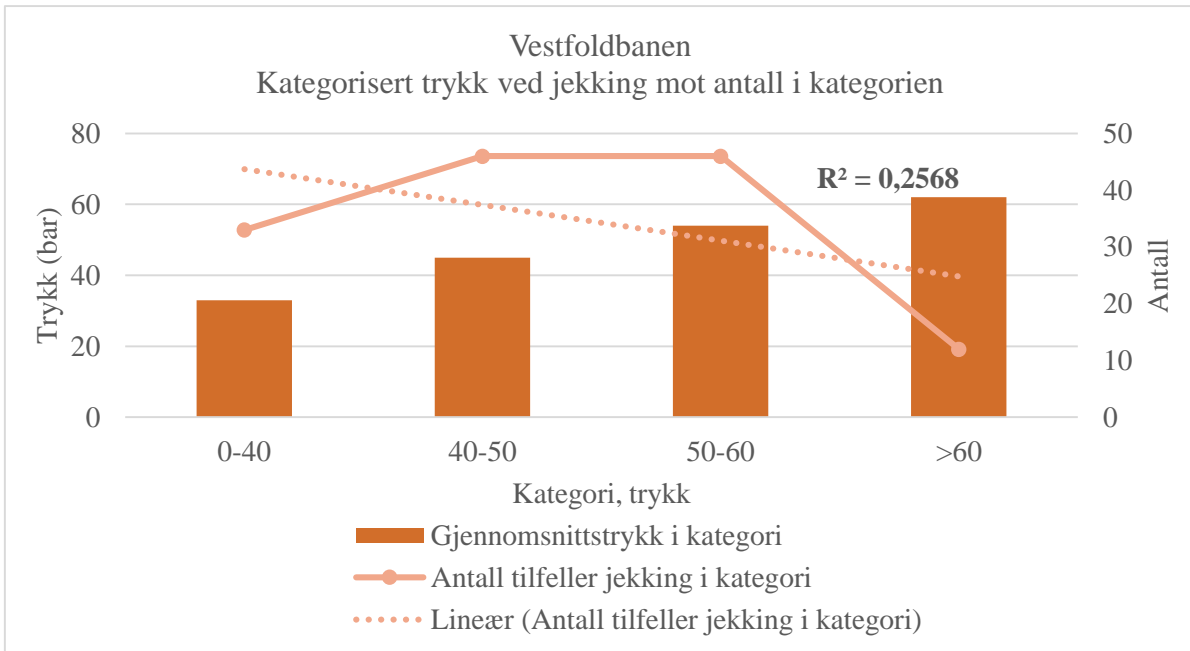


Figur 2: Sammenstilling av gjennomsnittlig maksimalt oppnådd trykk i hver skjerm og relativ andel hull med jekking viser ingen korrelasjon for dataene på Vestfoldbanen. Trendlinje og R-kvadrat for relativ andel hull med jekking er også tegnet inn i diagrammet

Hypotese 2: Ved kategorisering basert på trykk når jekking initieres, vil kategoriene med høyest trykk ha flest tilfeller med registrert jekking

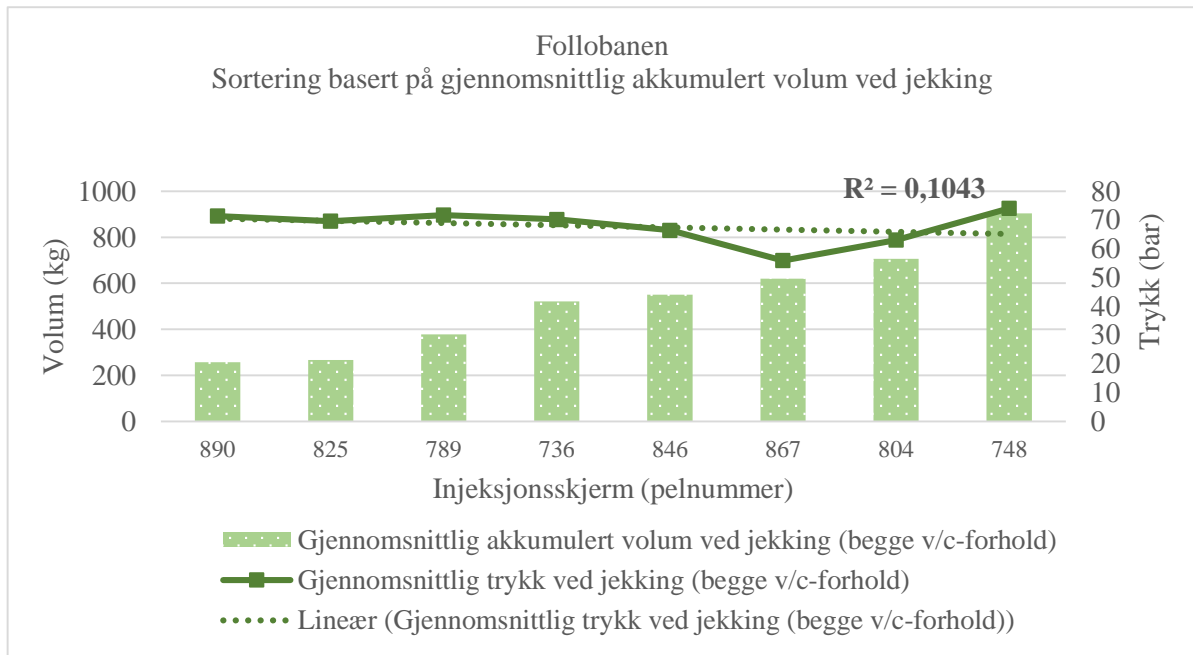


Figur 3: Tilfellene av registrert jekking på Follobanen kategorisert basert på trykk ved jekking. Antall hendelser i hver kategori er plottet med tilhørende trendlinje og R-kvadrat.

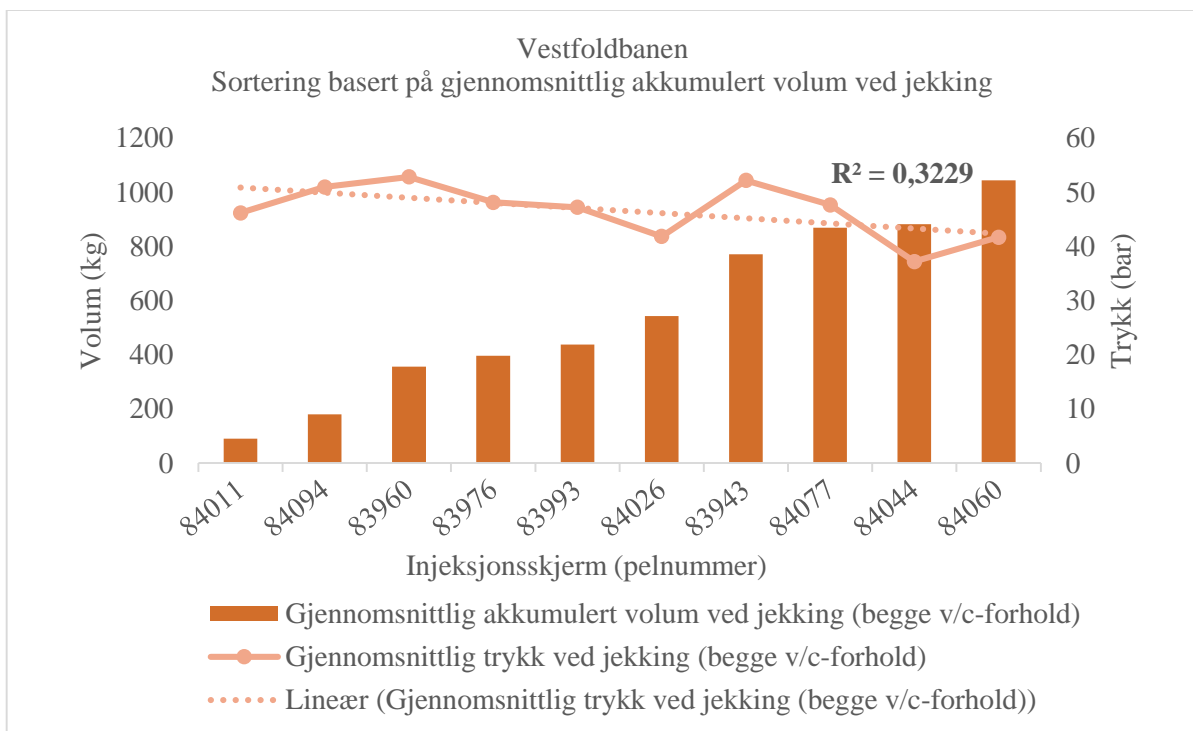


Figur4: Tilfellene av registrert jekking på Vestfoldbanen kategorisert basert på trykk ved jekking. Antall hendelser i hver kategori er plottet med tilhørende trendlinje og R-kvadrat.

Hypotese 4: Større volum injisert før jekking krever lavere trykk for at jekking initieres

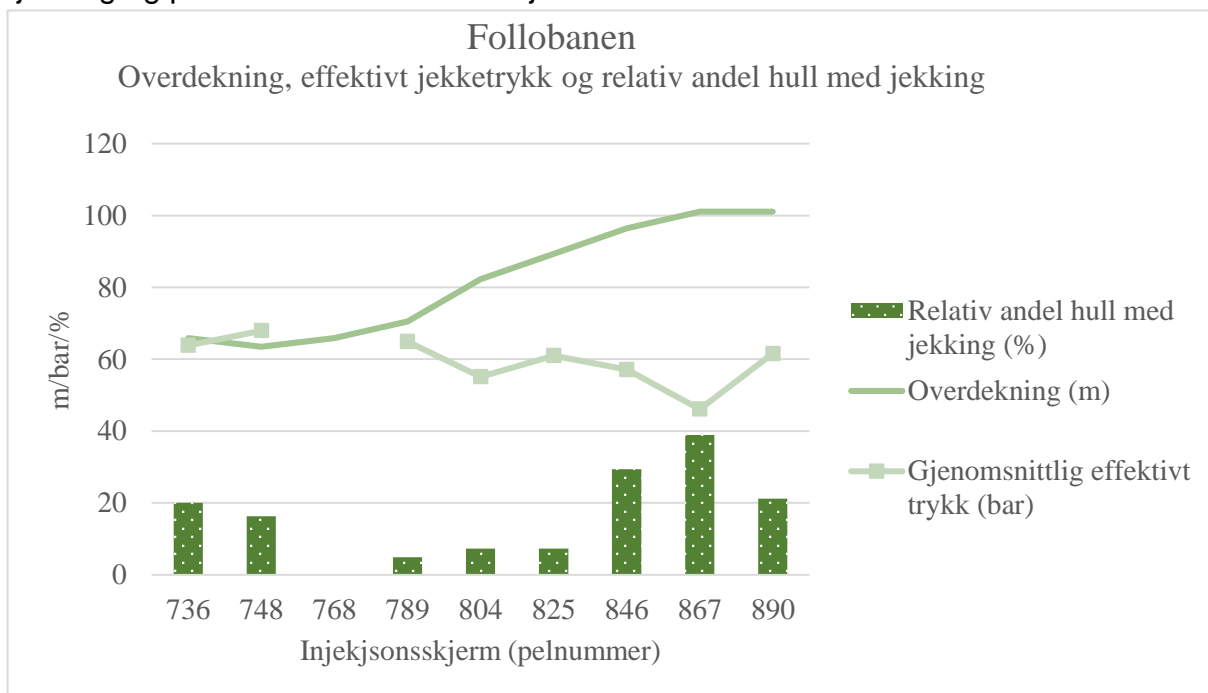


Figur 5: Sammenstilling av akkumulert volum ved jekking og trykket som fører til jekking for de studerte skjermene på Follobanen. Sortering basert på akkumulert volum er foretatt og tilhørende gjennomsnittlig trykk ved jekking er plottet sammen med trendlinje. Trendlinjen indikerer et svakt negativt forhold mellom de to faktorene.

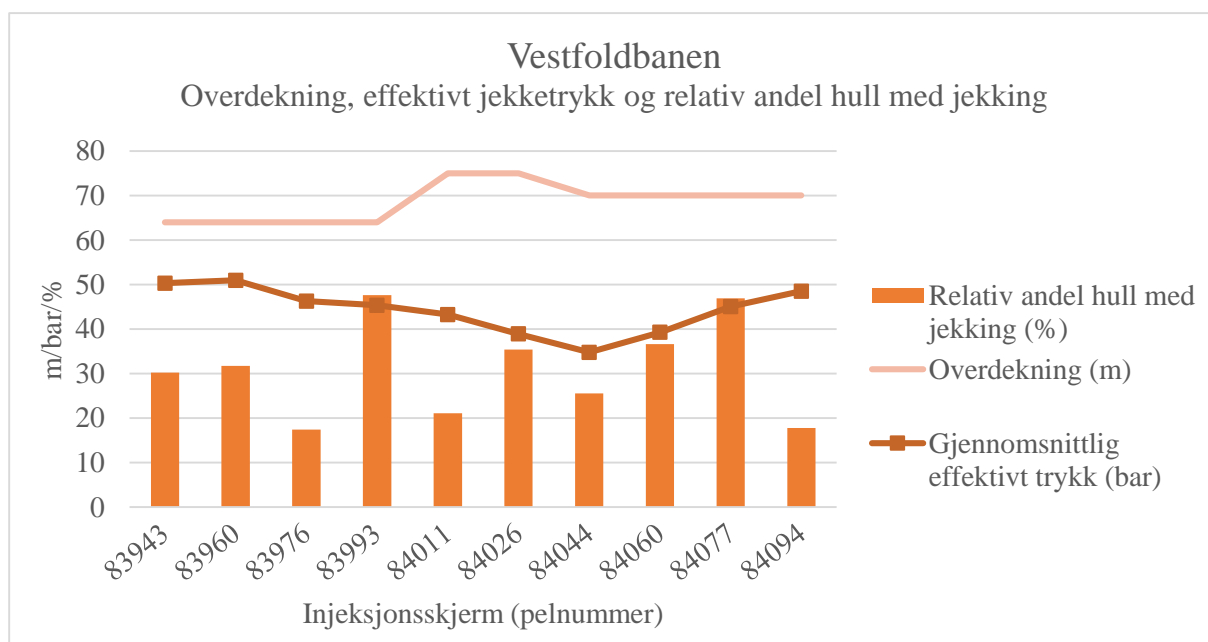


Figur 6: Sammenstilling av akkumulert volum ved jekking og trykket som fører til jekking for de studerte skjermene på Vestfoldbanen. Sortering basert på akkumulert volum er foretatt og tilhørende gjennomsnittlig trykk ved jekking er plottet sammen med trendlinje. Trendlinjen indikerer et negativt forhold mellom de to faktorene.

Hypotese 7: Det finnes en sammenheng mellom overdekning, effektivt trykk ved jekking og prosentandel hull som er jekket



Figur 7: Samspill mellom overdekningen, effektivt trykk ved jekking og relativ andel hull med jekking på Follobanen.



Figur 8: Samspill mellom overdekningen, effektivt trykk ved jekking og relativ andel hull med jekking på Vestfoldbanen.