

# Modellbasert berginjeksjon

Utforskning, vurdering og bruk av modeller  
for berginjeksjon

**Martin Hovda Haugsand**

Tekniske geofag

Innlevert: juni 2018

Hovedveileder: Eivind Grøv, IGP

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Institutt for geovitenskap og petroleum



---

# Oppgavetekst

**Oppgavens arbeidstittel:** Modellbasert berginjeksjon - Utforskning, vurdering og bruk av modeller for berginjeksjon.

**Tematisk beskrivelse:** Oppgaven gjennomføres som en del av forskningsprosjektet TIGHT. Målet med oppgaven er å vurdere de teoretiske modellene som finnes for berginjeksjon f.eks. *Real Time Grouting Control (RTGC)*. Dette planlegges gjort med hjelp av data fra virkelige injeksjonstilfeller og/eller forsøk i felten.

Kandidaten har gjennom prosjektoppgaven sin og sommerjobb ved Bever Control jobbet med behandling av data fra injeksjonsarbeider og gjennom dette spesielt fokusert på *RTGC*-metoden. Foreliggende oppgave blir således en naturlig oppfølging av det tidligere arbeidet og vil benytte feltforsøk for å teste ut dette teoretiske grunnlaget og teser som er kommet frem gjennom dette.

Følgende feltforsøk planlegges:

- Enkle forsøk på sementkvalitet. En bleedingtest og en filtertest etter modell fra Bahman i TIGHT prosjektet. Det er ønskelig å utføre en flytetest for å avgjøre viskositeten (for bruk i *RTGC*).
- Trykktest under injeksjon.
- Vanninntrengning. Samle inn de data som er tilgjengelige fra anlegget om vanninntrengning i bergrommet.

Oppgaven krever at man får til et tett samarbeid med en entrepenør som utfører injeksjonsarbeider. Kandidaten skal sammenligne data fra de praktiske injeksjonsarbeidene med det teoretiske grunnlaget fra *RTGC* og resultatene fra det praktiske arbeidet brukes til å forsøksvis kalibrere *RTGC*. Det er også behov for å kunne utføre en slik sammenligning på de situasjoner der jekking har oppstår. På den måten kan man finne ut hvordan sammenhengen mellom strømming og trykk i et vanlig injiseringsregime opptrer mot det i et jekker regime, samt overgangen mellom to slike situasjoner.

---

# Sammendrag

Denne oppgaven beskriver teorien til injeksjonsmodellene *Grout Intensity Number* og *Real Time Grouting Control*. Det er utført et forsøk for å teste *Real Time Grouting Controls* evne til å beskrive injeksjon. Forsøket fant sammenhengen mellom trykk og strømning, som så ble sammenlignet med teoretiske verdier fra modellen. Funnene fra forsøket er at *Real Time Grouting Control* ikke estimerer sammenhengen mellom trykk og strømning korrekt for den utførte injeksjonen. Avviket mellom forsøksverdiene og modellen forklares med teori om jekking av berget. Operatørerfaring fra forsøksanlegget tilsa at faren for å jekke øker med injeksjonsstrømningen. Denne påstanden utforskes og det presenteres et forslag om at injeksjonssement kan oppføre seg som et elasisk materiale. Trykkdata på forbundede hull fra TIGHTs arbeidspakke 7 er benyttet til å underbygge teorien. Dataene viser at trykket ikke er lineært fordelt mot injeksjonsfronten i alle tilfeller. Dette synes ved at trykket i forbundede hull er avhengig av strømning og jekking.

---

# Abstract

This thesis describes the theory behind the injection models *Grout Intensity Number* and *Real Time Grouting Control Method*. From an experiment conducted the relation between pressure and flow were found to not fit with what expected from *Real Time Grouting Control*. This is explained through jacking of the rock mass. Operator experience told during the experiment suggested that the risk of jacking increases with increased flow rate. This is explored and explained through describing fresh concrete as an elastic material. Data from the research programme TIGHT is used to show that connection between injection holes can be opened and closed due to jacking. The data also suggests it is a connection between the flow of grout and the pressure distribution in the gout, thus supporting the operators claim.

# Innhold

<b>1</b>	<b>Innledning</b>	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>Injeksjonshistorie</b>	<b>15</b>
<b>3</b>	<b>Sementforståelse</b>	<b>20</b>
3.1	Portland sement . . . . .	20
3.2	Vanninnholdets betydning for sementen . . . . .	21
3.3	Superplastiserende stoffer . . . . .	23
3.4	Akselerator . . . . .	24
3.5	Sementens reologiske egenskaper . . . . .	24
3.6	Tidlig styrke og injiserbarhet . . . . .	26
3.7	Testing og valg av sement i Norge . . . . .	27
3.8	Sementparametere brukt i injeksjonsmodeller . . . . .	28
<b>4</b>	<b>Estimering av vanninntrengning</b>	<b>29</b>
<b>5</b>	<b><i>Grout Intensity Number</i></b>	<b>30</b>
5.1	Prinsippet bak <i>GIN</i> . . . . .	30
5.2	<i>GIN</i> mot norsk injeksjonspraksis . . . . .	32
<b>6</b>	<b><i>Real Time Grouting Control</i></b>	<b>33</b>
6.1	Teorien bak <i>Real Time Grouting Control</i> . . . . .	33

---

6.2	Approksimasjoner for å oppnå en analytisk løsning . . . . .	36
6.3	Bestemmelse av penetrasjon . . . . .	37
6.4	Tidsavhengige variabler . . . . .	39
6.5	Endring av sementresept . . . . .	39
6.6	Avgjørelse av dimensjonalitet . . . . .	40
6.7	Jekking . . . . .	42
6.7.1	Ultimat jekking . . . . .	42
6.7.2	Elastisk jekking . . . . .	44
6.7.3	Forventet strømningsendring under jekking . . . . .	46
<b>7</b>	<b>Implementering og visning av <i>RTGC</i></b>	<b>47</b>
7.1	Prosedyren til <i>RTGC</i> . . . . .	47
7.2	Dimensjonsavgjørelse . . . . .	48
7.3	Estimering av sprekkestørrelse . . . . .	51
7.4	Beskrivelse og tolkning . . . . .	52
<b>8</b>	<b>Injeksjonsforsøk</b>	<b>55</b>
8.1	Forsøksoppsett og idé . . . . .	55
8.2	Forsøksutførelse . . . . .	57
8.3	Stedlig geologi . . . . .	59
8.3.1	Oppsprekking og styrkebetragtninger . . . . .	60
8.4	Beskrivelse av geologien på stuff . . . . .	61
8.5	Resultater . . . . .	64
8.5.1	Hull 33 . . . . .	65
8.5.2	Hull 28 . . . . .	67
8.5.3	Hull 29 . . . . .	70
8.5.4	Hull 30 . . . . .	71

8.5.5	Hull 7 . . . . .	73
8.5.6	Hull 13 . . . . .	74
<b>9</b>	<b>Forsøksobservasjoner og diskusjon</b>	<b>77</b>
9.1	Observasjon 1 . . . . .	77
9.2	Observasjon 2 . . . . .	78
9.3	Forklaring på brytepunktstrykket . . . . .	78
9.4	Trykkrespons ved stans i strømning . . . . .	80
<b>10</b>	<b>Erfaringsbasert modell</b>	<b>83</b>
10.1	Forståelse utfra injeksjonsprosedyren . . . . .	83
10.2	Erfaring fra operatørene . . . . .	84
10.3	Diskusjon av erfaringspåstandene . . . . .	85
<b>11</b>	<b>Trykkfordeling under injeksjon</b>	<b>87</b>
11.1	Jekkeeksempel . . . . .	87
11.2	Sementmassens egenskaper . . . . .	89
11.3	Modellering av oppløftningskraft med sement i ro og i flyt . . . . .	90
11.3.1	Utregninger med modell . . . . .	91
11.4	Tolkning av data fra arbeidspakke 7 . . . . .	93
11.4.1	Eksempel på hullforbindelse . . . . .	94
11.4.2	Eksempel på tap av hullforbindelse . . . . .	95
11.4.3	Eksempel på ingen trykkøkning i forbundet hull . . . . .	96
11.4.4	Eksempel på tap av forbindelse som følge av jekking . . . . .	97
11.4.5	Eksempel på trykktap som følge av strømningsstans . . . . .	98
11.4.6	Diskusjon av hullforbindelsene . . . . .	98
<b>12</b>	<b>Konklusjon</b>	<b>99</b>



12.1 Forslag til videre arbeid . . . . .	100
<b>Bibliografi</b>	<b>100</b>

# Tabeller

3.1	Bestandeler av Portland sement. Modifisert fra <i>Holmøy m.fl.</i> [15] . . . . .	20
3.2	Sementegenskaper for de testede sementene. Modifisert fra <i>Boholi m.fl.</i> [6] . . . .	22
3.3	Reologiske parametere for sement A. Modifisert fra <i>Skjølvold m.fl.</i> [33] . . . .	25
3.4	Reologiske parametere for sement C. Modifisert fra <i>Skjølvold m.fl.</i> [33] . . . .	25
8.1	Parametere satt i <i>RTGC</i> i forsøket . . . . .	64

# Figurer

2.1	Greatheads injeksjonspumpe. Fra <i>Rudolph</i> [11]. . . . .	16
2.2	Forinjeksjon med injeksjonstropeter. Fra <i>Rudolph</i> [11]. . . . .	18
3.1	Varmeavgivelse for en sement under herding. Fra <i>Aitcin m.fl.</i> [3]. . . . .	21
3.2	Enaksiell kompressiv styrke for tre forskjellige sementer med forskjellig w/c. Fra <i>Boholi m.fl.</i> [6]. . . . .	22
3.3	Prosentandel av tre forskjellige sementer med forskjellig w/c som gikk igjennom filter på 75 mikrometer. Fra <i>Boholi m.fl.</i> [6]. . . . .	23
3.4	Beskrivelse av et binghamfluid. Fra <i>Yahia m.fl.</i> [35]. . . . .	24
3.5	Tidlig kompressiv styrke for mikrofin injeksjonssement med 1,4% SP. Fra <i>Shucai m.fl.</i> [18]. . . . .	26
3.6	Lydhastighet gjennom en herdet injisert sement i løsmasse. Modifisert fra <i>Fernando m.fl.</i> [16]. . . . .	27
3.7	Bleedingtest. Fra <i>Skjølvold m.fl.</i> [33]. . . . .	27
5.1	Injeksjonsspredning og trykk i et todelt sprekkesystem. Modifisert fra <i>Perkins m.fl.</i> [25]. . . . .	31
5.2	Standardiserte GIN kurver. Fra <i>Perkins m.fl.</i> [25]. . . . .	32
6.1	Kraftbalanse mellom injeksjonspumpen, injeksjonsmassen og grunnvannet. Fra <i>Kobayashi m.fl.</i> [17] . . . . .	34
6.2	Strømningsdimensjonaliteter i <i>RTGC</i> . Egen tegning. . . . .	34
6.3	Relativ penetrasjon $I_D$ som funksjon av relativ injeksjonstid $t_D$ . Fra <i>Kobayashi m.fl.</i> [17] . . . . .	35

---

6.4	Teoretisk strømning med et konstant trykk for todimensjonal strømning. Fra <i>Kobayashi m.fl.</i> [17]	37
6.5	Sammenhengen mellom trykkendring og penetrasjon. Fra <i>Kobayashi m.fl.</i> [17]	38
6.6	Reseptbytte ved å behandle hele injeksjonen som om den var med sement B fra begynnelsen. Fra <i>Kobayashi m.fl.</i> [17]	40
6.7	Reseptbytte med å starte injeksjonen på nytt. Fra <i>Kobayashi m.fl.</i> [17]	40
6.8	Indeks for et endimensjonalt tilfelle. Fra <i>Kobayashi m.fl.</i> [17]	41
6.9	Indeks for et todimensjonalt tilfelle. Fra <i>Kobayashi m.fl.</i> [17]	41
6.10	Idealisert geometri for en bergmasse som skal løftes i et todimensjonalt strømningstilfelle. Fra <i>Kobayashi m.fl.</i> [17]	42
6.11	Idealisert geometri for en bergmasse som skal løftes i et endimensjonalt strømningstilfelle. Fra <i>Kobayashi m.fl.</i> [17]	44
6.12	Overtrykk og lineært trykkfrall fra injeksjonshull mot injeksjonsfronten. Fra <i>Rafi m.fl.</i> [30]	45
6.13	Illustrasjon over jekkefare mot normalisert injeksjonstrykk. Fra <i>Rafi et.al.</i> [30]	46
6.14	Illustrasjon over sammenhegen mellom trykk og strømning under jekking. Fra <i>Rafi m.fl.</i> [30]	46
7.1	Inn og utdata av <i>RTGC</i> . Egen illustrasjon.	47
7.2	Flytskjema for <i>RTGC</i> . Egen illustrasjon.	48
7.3	Presentasjon av datamodellen i programmet.	48
7.4	Flytskjema for å regne ut relativ penetrasjon. Egen illustrasjon.	49
7.5	Presentasjon for hvordan $\frac{dI_D}{dt_D}$ regnes ut. Egen illustrasjon.	49
7.6	Dimensjonsanalyse fra et virkelig injeksjonstilfelle. Data fra Svegatjørn–Rådal.	50
7.7	Lineærregresjon av sprekkestørrelse. Regnet for et endimensjonalt tilfelle. Same data som i figur 7.6	52
7.8	Regresjonsinformasjon fra programmet.	52
7.9	Penetrasjonsplott fra programmet	53
7.10	Fare for oppløft, 1D. $K$ representerer $k$ i ligning 6.29, 6.33	53
7.11	Fare for oppløft, 2D. $K$ representerer $k$ i ligning 6.29, 6.33	54

---

7.12	Strømningsplott . . . . .	54
8.1	Skissert systematisk injisering. . . . .	56
8.2	Bergen, Norge. Kart fra <i>NGU</i> [23]. . . . .	57
8.3	Utført systematisk injisering. . . . .	58
8.4	Kart over tunelltraséen. Forsøkslokaltetene er merket av med pelnummer og rigg som er brukt. Kart modifisert fra Vegvesenet [7]. . . . .	59
8.5	Oversikt over geolgien i Bergen. Fra <i>Putnis m.fl.</i> [27] . . . . .	60
8.6	Bilde av tunellstuppen. Øvre venstre hjørne er redigert for å fjerne blits. Eget foto. . . . .	62
8.7	Oversikt over geolgien i Bergen. Fra vedlegg til konkurransegrunnlaget [5] . . . . .	63
8.8	Injeksjonsserie for hull 33. Hvor i hullet forsøket er utført er merket iht. figur 8.3. . . . .	65
8.9	Teoretisk og logget trykk mot strømning med konstant tid. Hull 33, region 1 i figur 8.8. . . . .	65
8.10	Teoretisk og logget strømning mot tid med konstant trykk. Hull 33, region 2 i figur 8.8.. . . . .	66
8.11	Injeksjonsserie for hull 28. Forsøksregionene er markert iht. figur 8.3. . . . .	67
8.12	Teoretisk og logget trykk mot strømning med konstant tid. Hull 28, region 1.1 i figur 8.11. . . . .	67
8.13	Teoretisk og logget trykk mot strømning med konstant tid. Hull 28, region 1.2 i figur 8.11. . . . .	68
8.14	Teoretisk og logget strømning mot tid med konstant trykk. Hull 28, region 2.2 i figur 8.11. . . . .	68
8.15	Teoretisk og logget trykk mot strømning med konstant tid. Hull 28, region 1.3 i figur 8.11. . . . .	69
8.16	Injeksjonsserie for hull 29. Forsøksregionene er markert iht. figur 8.3. . . . .	70
8.17	Teoretisk og logget trykk mot strømning med konstant tid. Hull 29, region 1 i figur 8.16. . . . .	70
8.18	Injeksjonsserie for hull 30. Forsøksregionene er markert iht. figur 8.3. . . . .	71
8.19	Teoretisk og logget trykk mot strømning med konstant tid. Hull 30, region 1 i figur 8.18. . . . .	71
8.20	Teoretisk og logget strømning mot tid med konstant trykk. Hull 30. . . . .	72

---

8.21	Injeksjonsserie for hull 7. Forsøksregionene er markert iht. figur 8.3. . . . . .	73
8.22	Logget trykk mot strømning. Hull 7, region 1 i figur 8.18. . . . . .	73
8.23	Injeksjonsserie for hull 13. Forsøksregionene er markert iht. figur 8.3. . . . . .	74
8.24	Teoretisk og logget trykk mot strømning med konstant tid. Hull 13, region 1.1 i figur 8.23. . . . . .	74
8.25	Teoretisk og logget trykk mot strømning, konstant tid. Hull 13, region 1.2 i figur 8.23. . . . . .	75
8.26	Teoretisk og logget trykk mot strømning med konstant tid. Hull 13, region 1.3 i figur 8.23. . . . . .	75
8.27	Teoretisk og logget trykk mot strømning med konstant tid. Hull 13, region 1.4 i figur 8.23. . . . . .	76
9.1	Skissert observert sammenheng mellom trykk og strømning i forsøket. . . . . .	77
9.2	Skissert observert sammenheng mellom trykk og strømning i forsøket når injeksjon ikke kom igang igjen. . . . . .	78
9.3	Illustrasjon over lineært trykkfall fra senter av et injeksjonshull. $P_e$ har en fargegradient. Trykk under jekketrykket er blått. Laget i Matlab. . . . . .	79
9.4	Elastisk dilatasjon av en sprekk. Laget i Matlab. . . . . .	80
9.5	Tolkning av <i>shut-in</i> trykk ved en strømningsstans i hull 13. . . . . .	81
9.6	Tolkning av <i>shut-in</i> -trykk ved en strømningsstans på hull 38 m/ mulig tolkning av grunnvannstrykk. . . . . .	82
9.7	Tolkning av <i>shut-in</i> -trykk ved en strømningsstans på hull 39. . . . . .	82
10.1	Trykkfordeling med radiell flyt (Binghamveske) fra <i>TIGHT WP4</i> [21] . . . . .	85
11.1	Eksempel på flere tolkede brå jekkinger. Data fra <i>TIGHT</i> . . . . . .	88
11.2	Eksempel på tolket gradvis jekking. Data fra <i>TIGHT</i> . . . . . .	88
11.3	Spenningsfordeling i sementmassen . . . . . .	89
11.4	Sirkelutsnitt. . . . . .	90
11.5	Hastighetsprofil for radiellstrømning. Figur laget i Matlab. . . . . .	91
11.6	Injeksjonstrykk mot sprekkeflaten ved 5 og 20 l/min strømning. . . . . .	92

---

11.7 Skisse over datainnsamling. Egen tegning. . . . .	93
11.8 Eksempel på hullforbindelse. Data fra TIGHT. . . . .	94
11.9 Tap av forbindelse. Data fra TIGHT. . . . .	95
11.10 Ingen trykkøkning i forbundet hull. Data fra TIGHT. . . . .	96
11.11 Tap av forbindelse. Data fra TIGHT. . . . .	97
11.12 Trykktap ved strømningsstans. . . . .	98

# 1 Innledning

Injeksjon i berg ble beskrevet som “black magic” av *International Society for Rock Mechanics Commission on Rock Grouting* i 1996 [34]. Praksisen i Norge er erfaringsbasert. Etter Romeriksporten har praksisen vært å injisere med høyt trykk. Forskningsprosjektet *True Improvement in Grouting High pressure Technology for tunnelling* (TIGHT) ledet av SINTEF har de siste årene forsket på injeksjon for bedre å kunne forstå og forbedre dagens praksis. Denne oppgaven er en del av TIGHT og benytter data fra prosjektet.

Injeksjon er en betydelig kostnad i dagens tunellbygging og store verdier kan bli spart om prosessen kan forbedres. Oppgaven forsøker å bruke teori og injeksjonsmodeller for å beskrive og forklare injeksjon og hendelser under injeksjon. Siden injeksjon beror mye på erfaring begynner oppgaven med en beskrivelse av injeksjonens historie. Dette er ment å gi leseren et overblikk og innblikk i erfaringene og ideene som har ledet til dagens injeksjonspraksis. Grunnleggende sementforståelse presenteres før modellen *Grout Intensity Number (GIN)* beskrives kort. Den svenskutviklede injeksjonsmodellen *Real Time Grouting Control (RTGC)* beskrives i detalj i kapittel 6. Dette gjøres for at leseren bedre skal forstå trykkforsøket som er utført. Resultatene fra forsøket og påstander fra operatørene blir utforsket og mulige forklaringer presentert. Denne oppgaven beror i stor grad på innsamlede data og databehandling utført av programmer laget av forfatteren i C++/Qt, Python, Matlab og Javascript.



## 2 Injeksjonshistorie

Injeksjon som metode for stabilisering og tetning av grunnen er benyttet i over 200 år. Et godt injeksjonsresultat er fortsatt avhengig av erfaring og lokale tilpassninger. Erfaring er en stilltende form for kunnskap som vanskelig lar seg systematisere og overføre, men noe kan erverves gjennom historier om hva som har fungert og feilet. Dette kapitlet er et forsøk på å gi leseren noe erfaring gjennom injeksjonens utviklingshistorie. *Rudolph Glossop* har beskrevet i to artikler [10, 11] utviklingshistorien til injeksjon fra 1800 til 1950. Dette kapitlet er en sammenfattet gjenfortelling av disse to artiklene.

Oppfinneren av injeksjon var franskmannen *Charles Bérigny*. I 1802 var han engasjert for å reparere en sluse i Dieppe hvor slusefundamentet var skadet av erosjon. *Bérigny* innså at det var umulig å unngå skadelig grunnvannsstrømning med vanlige metoder. Han forsøkte derfor å injisere gruslaget i slusen med leire for å demme opp for vannet. Han forsøkte først å gravitasjonsmate inn leiren, men resultatet var dårlig. *Bérigny* oppfant derfor en *pompe à percussion* som tillot ham å presse leiren inn under trykk. Langs hele slusen ble det boret hull med en meters mellomrom. Injeksjonen begynte i en ende og leire ble presset inn inntil det kom ut i hullet ved siden av. Da ble injeksjonshullet plagget med en treplugg før injeksjonen fortsatte på neste hull. Etter noen år ble nye lekkasjer oppdaget, det ble da etterinjisert ved behov.

I 1818 ble injeksjon benyttet for å tette en tørrdøkk ved Rochefort. *Bérigny* gjentok hvor viktig det var å ikke avslutte injeksjonen før massen kom til syne i nabohullet for å oppnå et godt resultat. Under arbeid med en sluse ved Froissy, utgravd i kalkstein, ble injeksjon forsøkt etter at tidligere forsøk på å tette slusen hadde mislyktes. Under dette arbeidet kom det også fram at de uinjiserte hullene måtte være åpne under injeksjonsarbeidet. Forklaringen var at tette hull hindret vann å unnslippe som igjen hindret injeksjonsmassen å ta vannets plass.

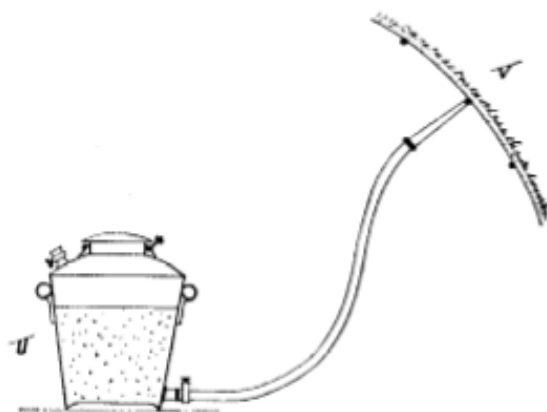
I 1837 ble det publisert en artikkel som i detalj beskrev en injeksjonsprosess for å reparere murverk i en sluse. I dette arbeidet ble det benyttet kalk blandet med pozzolan som injeksjonsmiddel. Nok vann ble tilsatt for å gjøre massen pumpbar. Erfaringen fra arbeidet var at det

måtte injiseres fra der hvor lekkasjen sprang ut. Da ville injeksjonsmassen bli presset bakover og fylle de kanaler som ledet til lekkasjepunktet.

I 1841 publiserte *Collin* en artikkel om bruken av injeksjon for å reparere hydrauliske konstruksjoner. I artikkelen beskrives motstanden under injeksjon som todelt. Den første delen består av motstanden som følge av friksjon i pumpe, ledninger, porene som skal injiseres og den interne friksjonen gitt av massens viskositet. Den andre delen består av porevannets inkompressibilitet og evne til å flyte vekk for å gi plass til injeksjonsmassen.

Mellom 1856 og 1858 ble det utført en studie i England av *W.R. Kinipple*. En av erfaringene hans var at i store sprekker kunne injeksjonsmassen bli vasket vekk før den rakk å herde. Løsningen var å bruke en tykkere injeksjonsmasse av leire og presse den inn med høyere trykk. Arbeidet til *Kinipple* var av stor betydning og han klarte å tette store lekkasjer ved en dokk i Greenock.

I 1869, under arbeidet med den første støpejernsskjoldete subwaytunnelen under Themsen i London ble en håndsprøyte brukt til å fylle tomrommet bak støpejernsskjoldet med kalkmasse. Sammen med jernskjoldet gjorde injeksjonsapparatet det mulig å bygge tunneller i Londons leirer. Pumpen og tunelljernskjoldet er vist i figur 2.1.



Figur 2.1: Greatheads injeksjonspumpe. Fra *Rudolph* [11].

I 1876 ble injeksjon for første gang brukt av *Thomas Hawksley* til å tette sprekker i fjell under en jorddam. I dag er det vanlig prosedyre å injisere fjellet under dammer, men Hawksleys daminnovasjon ble tregt adoptert av andre ingeniører i hans samtid.

Mellom 1899 og 1904 ble injeksjon for alvor tatt i bruk i gruveindustrien. Synkeganger i Frankrike, Belgia og Tyskland ble behandlet. Sementen ble blandet på overflaten og ført ned i grunnen med rør. Gravitasjonskraften alene var nok til å presse injeksjonsmassen inn i berget. En

håndpumpe ble brukt for ekstra kraft i de tilfellene massen satte seg for tidlig. Suksessen til metoden dro i gang interessen for injeksjon som behandling av oppsprukket berg. Under arbeidet ble det observert at injeksjon i en synkegang også kunne redusere lekkasjen til nærliggende synkeganger.

I 1904 ble injeksjon benyttet i en synkegang av selskapet *Compagnie de Béthune*. Under utgraving av synkegangen ble framdriften stoppet og kontrollhull boret. Injeksjon ble satt igang når vanntapet ble regnet som for stort. Før injiseringen ble sprekkene spylt med vann. De benyttet sement med forskjellig farge i hvert hull slik at spredningen kunne observeres når de drev seg videre. I noen tilfeller ble det observert at sementen herdet bra og i andre tilfeller herdet den dårlig. De dårligste resultatene kom fra de minste sprekkene, spesielt de horisontale. Det ble trodd at dette skyldtes leirpartikler som blandet seg med sementen og hindret herding. Løsningene foreslått var å bruke høyere trykk under injeksjonen, vaske sprekkene bedre eller suge ut vann for å fjerne leiren. For å gjøre prosessen med injeksjon raskere ble det forsøkt å bruke sement som borevæske for å injisere og bore samtidig. Dette ble forkastet.

Bruken og utviklingen av konsepter og metoder innen injeksjon fortsatte. Det ble foreslått at hele vannførende strata måtte injiseres på en gang. Det var fryktet at injeksjonen fra et borhull kunne negativt influere etterfølgende injiseringer. Men det ble funnet ut at injeksjon kunne utføres suksessivt fra topp mot bunn eller fra bunn mot topp. I dag er det praksis å injisere sålen først og så jobbe seg oppover. Hastigheten til injeksjonsmassen ble beskrevet som invers proporsjonal til avstanden fra injeksjonshullet og at penetrasjonslengden og hastigheten var bestemt av injeksjonstrykket, massens viskositet og sprekkstørrelsen. Grunnen i et injeksjonsperspektiv ble beskrevet i tre kategorier. Oppsprukket berg som kan behandles ved å injisere fra lekkasjepunktet. Grov sand og grus som kan behandles og fin sand som ikke kan behandles. Fin sand var ikke injiserbar fordi sementen filtrerte seg rett utfra injeksjonshullet. Det ble poengtert at vide sprekker burde injiseres med tykkere masse og lavere trykk mens små sprekker behøvde tynnere masse og høyere trykk. Det ble vektlagt at når injeksjon hadde startet burde den ikke avsluttes før stans i flyt var oppnådd. All annen stans skulle kun skyldes rensing av pumpen. *Scalier* beskrev en injeksjon i en kullgruve hvor kullet var overdekt av oppsprukket kalkstein. En trykkmåler var installert på injeksjonspumpen og *Scalier* observerte at i første fase fløt massen fritt inn i berget mens trykket gradvis bygget seg opp. I andre fase ble trykkoppbygningen avbrutt av trykkfall når overdekningen løftet seg og injeksjonsmassen fløt mellom strataene. Den siste fasen var når injeksjonsmassen fløt ut i dagen. *Scalier* påpekte at mye injeksjonsmasse gikk tapt på grunn av dette og at disse effektene måtte kontrolleres.

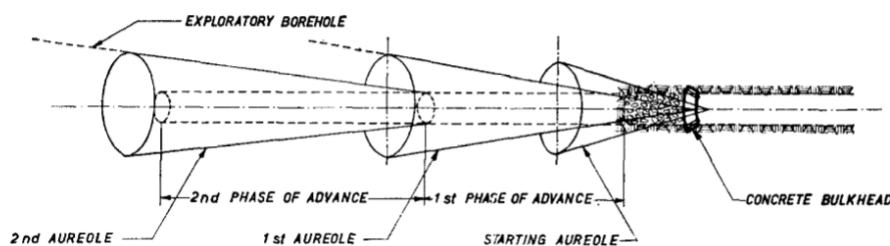
I 1907 etablerte Belgeren *Albert Francois* en prosedyre for injeksjon i synkeganger. Prosedyren fulgte nye prinsipper om å bore injeksjonshullene fra bunnen av synkegangen og ikke fra

overflaten. Vannførende sprekker ble injisert etterhvert som de ble påtruffet. I tillegg var hver etappe av drifvingen begrenset til 40 meter. For hver etappe ble injeksjonshull boret og berget nedenfor injisert før ny inndrift. Dette er grunnleggende samme prinsipp som brukes i dagens injeksjon. *Francois* påpekte at det var nødvendig å treffe og tette alle sprekker i nærheten av synkegangen. For å oppnå dette mente han at flere mindre hull var mer effektivt enn få større hull. Det var viktig å plassere og sikte hullene slik at de traff alle sprekker. I de mindre hullene brukte *Francois* et høyt trykk fra 50-200 atm.

I 1911 ble *Francois* engasjert for å injisere to synkeganger i en gruve ved Thorne hvor fremdriften hadde stanset på 150 meters dyp. Arbeidet gav ikke gode resultater men han kom tilbake i 1919 etter å ha gjort undersøkelser med injeksjon av fine sprekker i porøs sandstein. *Francois* hadde utviklet en metode han kalte *silikasjon*. Løsninger med aluminiumsulfat og vann tilsatt glass ble injisert. Dette reagerte med hverandre og dannet en silikagel i sprekken. Det ble funnet at etter dette kunne mye større volum av sementen injiseres enn før, selv med lavere trykk. Metoden har senere blitt benyttet i dype gruveganger i Sør-Afrika hvor utfordringen er et høyt grunnvannstrykk.

Injeksjon som metode for damkonstruksjon tok etter dette fart i Amerika. Men det ble innsett at sement som injeksjonsmasse var utilstrekkelig for store sprekker eller områder med stor grunnvannsstrømning. I 1919 ble det, med suksess, injisert med asfalt.

I 1950-60 årene ble forinjeksjon utviklet av franske tunnellingeniører som en metode for å stabilisere svakhetssoner bestående av breksjer. Figur 2.2 viser hvordan en injeksjonsskjerm ble konstruert for å framfor stuff behandle bergmassen for videre inndrift.



Figur 2.2: Forinjeksjon med injeksjonstropmeter. Fra *Rudolph*[11].

Innad i svakhetssonen kunne det være løsmassefraksjoner fra grus til leir noe som kunne gjøre injeksjonen vanskelig. Det samme gjelder for behandling av sandstein hvis porøsitet kan gi en sterk filtreringseffekt. I 1922 poengterte *Durnerin* i en artikkel at for å injisere porøse sandsteiner eller alluviske avsetninger måtte injeksjonsvæsken ha meget lav viskositet for at porene skulle bli fylt. Han foreslo å bruke et kjemisk injeksjonsmiddel som enten resulterte i en silika-

gel eller et jernoksid. Den første metoden for å behandle alluviale avsetninger ned til sandfraksjon ble utviklet av *H.J. Joosten* i 1925. Den omfattet å først injisere natriumsilikat for deretter å injisere en saltmettet løsning. Dette førte til dannelsen av en silikagel som kunne sementere sanden og øke styrken til løsmassen betraktelig. *Joostenprosessen* ble adoptert og har blitt brukt i både Tyskland og England for tunneldrift i sandige omgivelser. *Joosten* påpekte at prosessen måtte gjennomføres med liten avstand mellom hullene og hvert strata måtte behandles for seg. Hvis ikke ville all injiseringen forekomme der hvor porøsiteten var størst. For å løse dette problemet ble *tube à manchette* utviklet. Dette er et rør perforert med hull langs hele lengden. Innad i røret er det to flyttbare pakkere som definerte sonen som skulle bli injisert. Injeksjonen startet i bunnen av hullet og pakkerne ble gradvis flyttet utover. Dette muliggjorde stor kontroll over injeksjonen og tillot å bruke forskjellig type injeksjonsmasse for ulike segmenter av injeksjonshullet.

I Svergie ble injeksjon benyttet i de fleste damkonstruksjoner mellom 1900 - 1970. Metoden og utviklingen har fortsatt for urbane vegtuneller [13]. I Norsk injeksjonspraksis var det et vannskille i praksis før og etter byggingen av Romeriksporten. Byggingen av togtunellen medførte et redusert vannivå i Puttjern og Lutvann noe som førte til politisk fokus på lekkasje i tunellprosjekter. Den norske praksisen har siden vært høye injeksjonstrykk, portlandsement som injeksjonsmasse, et stort antall injeksjonshull og injeksjonstropeter. Alt empirisk basert [12].

## 3 Sementforståelse

Portlandsement er standard injeksjonsmasse i Norge. For å kunne modellere injeksjon må sementens egenskaper forstås. Dette kapittelet tar sikte på å gi en innføring i sementens viktigste egenskaper. Verdiene for strømningsegenskapene (reologien) presentert blir senere brukt i oppgaven ifm *Real Time Grouting Control*. Ellers er verdiene ment å gi en forståelse for sementoppførsel og effekter som kan inntreffe under injeksjon.

### 3.1 Portland sement

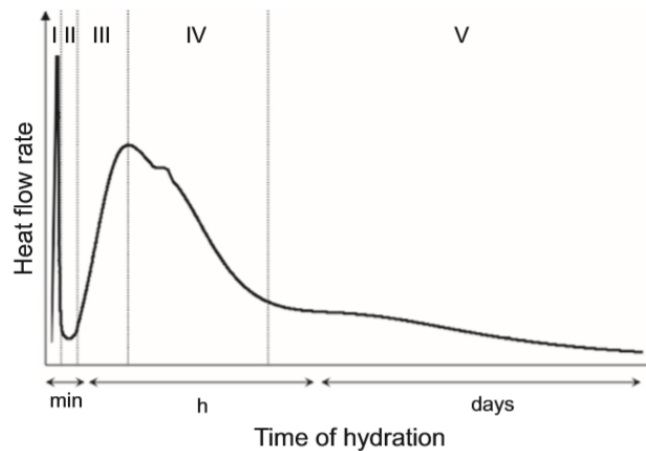
Vanlig Portland klinker har en generell sammensetning som vist i tabell 3.1.

Bestandel %	Kjemisk formel	Keramisk navn
55 - 65 %	$3CaO \cdot SiO_2$	$C_3S$
15 - 25 %	$2CaO \cdot SiO_2$	$C_2S$
8 - 14 %	$3CaO \cdot Al_2O_3$	$C_3A$
8 - 14 %	$4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$	$C_4AF$

Tabell 3.1: Bestandeler av Portland sement. Modifisert fra *Holmøy m.fl.* [15]

Hver for seg utgjør de fire bestandelene gitt i tabell 3.1 hovedsaklig sin egen fase i herdingen av sementen [3]. De fire fasene kan bli skilt fra hverandre utfra varmeutviklingen vist i figur 3.1. Den første frigjøringen av varme kommer fra løsningen av ioniske forbindelser og den initielle hydratiseringen av  $C_3S$  og  $C_3A$  [3]. Fase II er en ventende fase med begrenset kjemisk aktivitet. I fase III og IV fortsetter hydratiseringen av  $C_3S$  og  $C_3A$  [3]. Mesteparten av  $C_2S$  og  $C_4AF$  hydratiseres i fase V [3]. Når  $C_2S$  og  $C_3S$  reager med vann blir de omformet til tilhydratisert kalksilikat og hydratisert kalk ( $Ca(OH)_2$ ). Den kjemiske sammensetningen kan variere mye, derfor blir den vagt omtalt med keramisk formel C-S-H. Det er C-S-H forbindelsene som gir sementen mesteparten av sin styrke [3]. Den krystalliserte formen til hydratisert kalk kalles for

portlanditt og blir hovedsaklig utskilt fra  $C_3S$ . Av  $C_3A$  blir det dannet hydratisert kalkaluminium. Der gips er tilgjengelig dannes det ettringitt av  $C_3A$  [3].



Figur 3.1: Varmeavgivelse for en sement under herding. Fra Aitcin *m.fl.* [3].

Hydratiseringen av Portlandsement resulterer i store mengder (20-30%) portlanditt. Ved høyere w/c ratio har krystallene mulighet til å vokse fritt og det kan dannes store krystaller. Mekanisk tilfører portlanditt lite styrke til sementen. Det er også fare for at kalk kan diffundere ut med god tilgang på vann [3]. En måte å nyttiggjøre seg av portlanditt på er å transformere det til en sekundær form for C-S-H gjennom reaksjon med silika fra f.eks flyveaske eller slag [3].

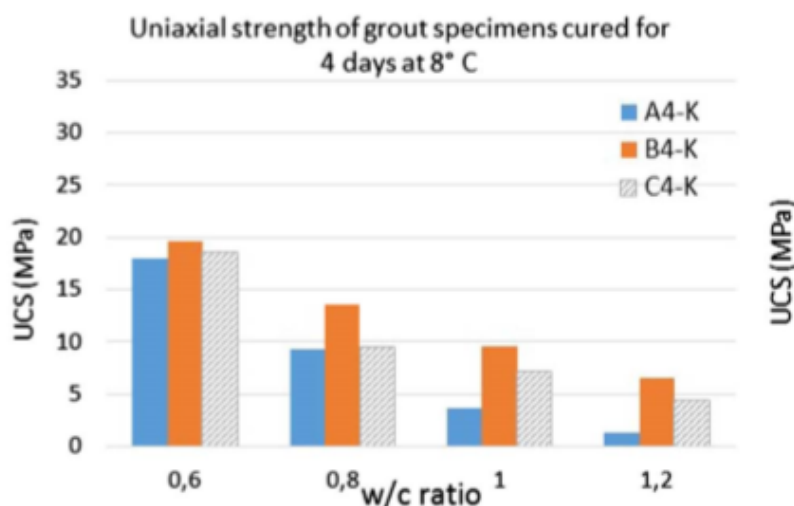
## 3.2 Vanninnholdets betydning for sementen

Forholdet mellom vann og sement, herfra “w/c” (water/cement), og mellom vann og bindemateriale, herfra “w/b” (water/binder, inkluderer sement) har mye å si for sementens egenskaper både i fersk og herdet form. Bindemateriale er tilslag til sementen som selv ikke hydratiseres. Det er vist at w/c ratioen er relatert til avstanden mellom sementpartikkene i sementblandingen [1]. Dette betyr at for et lavt w/c tall ( $< 0.4$ ) ligger sementpartikkene så tett at de raskt vil få kontakt med hverandre under herding. Dette gir den herdte sementen høy kompressivstyrke og lav porøsitet [1]. For sementer med høyere w/c ratio er det større avstand mellom kornene og hydratiseringen foregår friere. Dette resulterer i større krystaller, høyere porøsitet og lavere styrke. For å øke styrken til en herdet sement er det ikke kun nødvendig å redusere w/c ratioen. Noe av sementpartikkene kan erstattes med andre partikler som f.eks pozzolan og flyveaske [4]. Da økes w/c ratioen mens w/b ratioen holdes uendret. Dette vil redusere styrken til den ferske sementen, men sluttresultatet kan bli like sterkt [1]. Dette er en måte å redusere  $CO_2$  forbruket til sementen.

I TIGHTs arbeidspakke 3 ble det utført forskjellige tester med injeksjonssementer brukt i Norge [6]. Blant testene som ble utført var filtrasjonstest og enaksiellkompresjonstyrketest. Egenskapene til de tre forskjellige sementene er gitt i tabell 3.2. Resultatene for enaksiellkompresjonstyrketesten for tre forskjellige sementer er vist i figur 3.2

Sement	Tetthet $g/cm^3$	Blaineverdi $m^2/kg$	Spesifikk overflate BET $m^2/kg$	D95 $m^{-6}$
Sement A	3.17	729	1880	17
Sement B	3.16	541	1580	18
Sement C	3.10	706	1930	25

Tabell 3.2: Sementegenskaper for de testede sementene. Modifisert fra *Boholi m.fl.*[6]

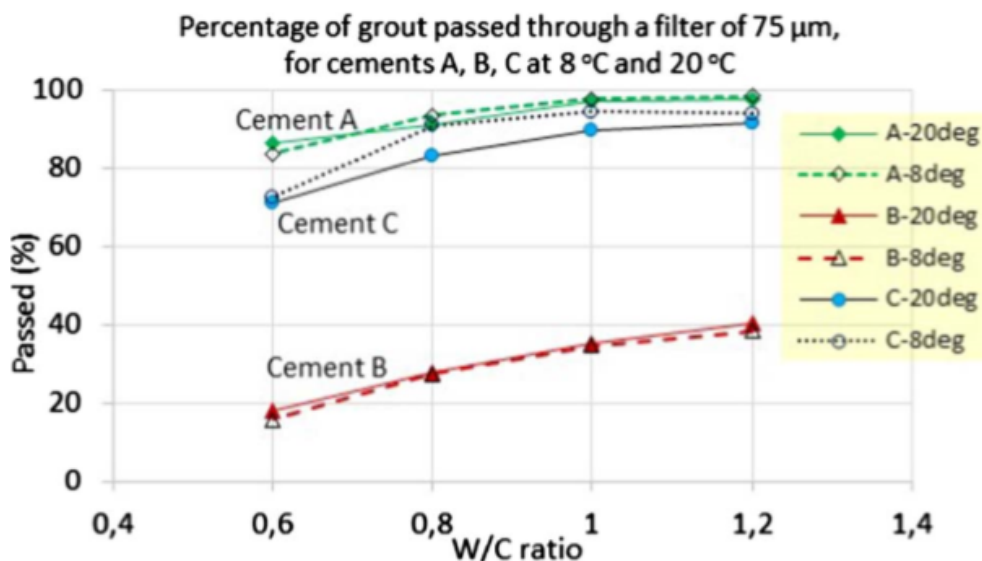


Figur 3.2: Enaksiell kompressiv styrke for tre forskjellige sementer med forskjellig w/c. Fra *Boholi m.fl.*[6].

Figur 3.2 viser hvordan styrken til sementene reduseres med økende w/c ratio etter fire dagers herding med en temperatur på  $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Lavere temperatur har en retarderende effekt på herdetiden til sementen [2]. Temperaturvalget i forsøket er ment å tilnærme forholdene slik de er in-situ i bergmassen [6] under injeksjon. Det ble testet på prøver som hadde herdet like lenge med en temperatur på  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Disse prøvene utviste større styrke enn de vist i figur 3.2. Likt for begge temperaturene er at kompressivstyrken til sementene minket med økende w/c.

I filtrasjonstesten ble fersk sement av forskjellig type med forskjellig w/c ratio forsøkt presset gjennom et filter med maskevidde på  $75\text{ }\mu\text{m}$ . Resultatene er vist i figur 3.3





Figur 3.3: Prosentandel av tre forskjellige sementer med forskjellig w/c som gikk igjennom filter på 75 mikrometer. Fra *Boholi m.fl.* [6].

Fra figur 3.3 er det klart at mer gikk gjennom filteret med økende w/c. Det er også betydelig forskjell mellom sement B og A, C. En sements filtrasjonsstabilitet er sterkt styrt av kornstørrelsen, graderingen til kornene og w/c [6]. Det er derfor kunstig at sement B i filtertesten har lavest andel som går gjennom filteret selv om sementkornene har en finere gradering enn sement C. Dette attribueres til flokkulering av kornene i sement Bs tilfelle [6]. Flokkasjonen har dannet enheter av partikler som ikke evner å trenge gjennom filteret. En tommelfingerregel innen injeksjon er at inntrengning i sprekker skjer om sprekkestørrelsen er tre ganger større enn sementens største kornstørrelse [15].

### 3.3 Superplastiserende stoffer

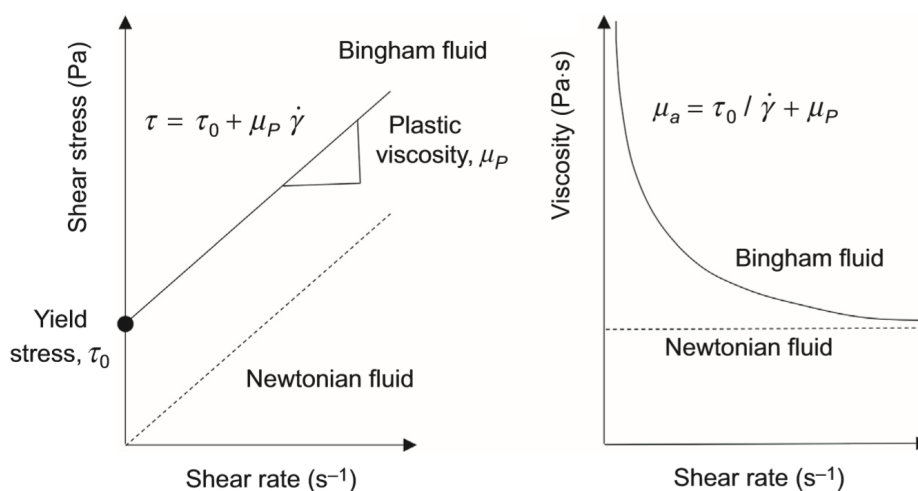
For å hindre flokkasjon og bedre de reologiske egenskapene tilsettes injeksjonssementen superplastiserende stoffer. Disse stoffene fungerer ved å redusere de attraktive kreftene mellom sementpartikkellene [9]. Effekten til superplastiserende stoffer kan sammenlignes med å øke w/c ratioen [24]. Skjærstyrken reduseres, slump høyden senkes og utflytningen øker i en bordtest. Bruk av superplastiserende stoffer kan øke faren for bleeding ved at de interpartikkellære kreftene reduseres så mye at vann og sement kan skille seg.

### 3.4 Akselerator

Akselerator tilsettes sementen under injeksjon hvis man f.eks har utgang av sement på stuff. Akseleratorens mål er å øke hydratiseringshastigheten til  $C_3S$  som er hovedsaklig ansvarlig for dannelsen av C-S-H [26]. Dette kan oppnås med å øke temperaturen eller benytte lavere w/c ratio. Under injeksjon og i sprøytebetong benyttes det kjemiske stoffer. Akselerator kan benyttes sammen med superplastiserende stoffer. I Norge er det vanlig å tilsette samme akselerator som tilsettes sprøytebetong. For sprøytebetong brukes det silikater eller aluminiumssalter [26]. Silikater er billigere, men har dårligere effekt. Aluminiumssalt deles inn i to grupper, med eller uten alkalier. Typen med alkalier har god effekt, men er sterkt skadelig i kontakt med hud og øyne. Alkalibasert aluminiumssalt er derfor regnet som for farlig å jobbe med [26]. Derfor blir alkalifrie alternativer brukt. Akselerator blir tilsatt etter injeksjonspumpen for å ikke risikere at rigguttstyret blir ødelagt av den raskt herdene sementen [14].

### 3.5 Sementens reologiske egenskaper

Fra et injeksjonsperspektiv er det viktig at injeksjonssementen har et godt herderesultat slik at de vannførende sprekkene tettes. Like viktig er det at sementen når ut i alle sprekkene man ønsker å tette. Dette er styrt av de reologiske egenskapene til sementen. Sement beskrives som et binghamfluid. Dette betyr at sementen har en initiell skjærstyrke som må overvinnes før massen begynner å flyte. Hvordan skjærraten relateres til skjærtrykket er vist i figur 3.4.



Figur 3.4: Beskrivelse av et binghamfluid. Fra *Yahia m.fl.*[35].

Når sementmassen blir påført krefter under skjærstyrken oppfører sementen seg som et elastisk materiale [35]. Når skjærkraften er overvunnet oppfører sementen seg som en væske. Under strømming kan bleeding forekomme som følge av at skjærkreftene fører til en utskillelse av vann [35]. Med bruk av nok superplastiserende stoffer kan de attraktive kreftene mellom sementkornene reduseres så mye at sementen kan regnes som nesten en ren Newtonisk væske. Tilstening av flyveaske har en reduserende effekt på både skjærstyrke og viskositet, men det varierer med egenskapene til flyveasken. Sement kan utvise tiksotropiske egenskaper, dvs at kornene organiserer seg i en mer ordnet struktur når sementen er i ro.

I TIGHTs arbeidspakke 3 ble det utført tester på tre forskjellige sementers skjærstyrke og viskositet med forskjellig w/c ratio [33]. Måten viskositeten og skjærstyrken ble målt på var å ha sementen mellom to plater som roterer mot hverandre med økende hastighet. Viskositeten ( $\mu$ ) ble funnet fra stigningskurven til flytemotstanden og skjærstyrken ( $\tau$ ) estimeres som krysningspunktet mellom kurven til viskositeten og ordinalen. Egenskapene til sementene er de samme som i tabell 3.2. Resultatene fra den reologiske testen vises i tabell 3.3 for sement A og tabell 3.4 for sement C.

	$\mu$ mPa·s	$\tau_{dyn}$ Pa	$r^2$	$\mu$ mPa·s	$\tau_{dyn}$ Pa	$r^2$	$\mu$ mPa·s	$\tau_{dyn}$ Pa	$r^2$	$\mu$ mPa·s	$\tau_{dyn}$ Pa	
w/c	1.2			1.0			0.8			0.6		
Sykel 1	31.4 @18 min	0.4	0.997	38.9 @16min	1.4	0.992	75,1 @14min	3.7	0.995	183 @13min	17.0	0.994
Sykel 2	27,0 @34min	0.8	1,00	44,7 @32min	2.4	1.00	90 @32min	6.3	0.995	Størknet		
Sykel 3	Størknet			Størknet			Størknet			Størknet		
Sykel 4	Størknet			Størknet			Størknet			Størknet		

Tabell 3.3: Reologiske parametere for sement A. Modifisert fra *Skjølsvold m.fl.* [33]

	$\mu$ mPa·s	$\tau_{dyn}$ Pa	$r^2$	$\mu$ mPa·s	$\tau_{dyn}$ Pa	$r^2$	$\mu$ mPa·s	$\tau_{dyn}$ Pa	$r^2$	$\mu$ mPa·s	$\tau_{dyn}$ Pa	
w/c	1,2			1,0			0,8			0,6		
Sykel 1	27,41 @17 min	1,2	0,997	44,4 @12min	2,9	0,994	72,2 @16min	7,3	0,996	293 @12min	24,9	0,999
Sykel 2	30,5 @33 min	1,3	0,997	46,2 @28min	3,3	0,993	72,3 @32min	8,4	0,991	283 @30min	29,1	0,996
Sykel 3	32,6 @49 min	1,3	0,997	48,2 @44min	3,6	0,993	82,2 @48min	7,3	0,993	313 @47min	29,6	0,998
Sykel 4	33,6 @65 min	1,3	0,997	50,6 @60min	3,8	0,993	86,4 @65min	7,3	0,991	334 @65min	30,8	0,998

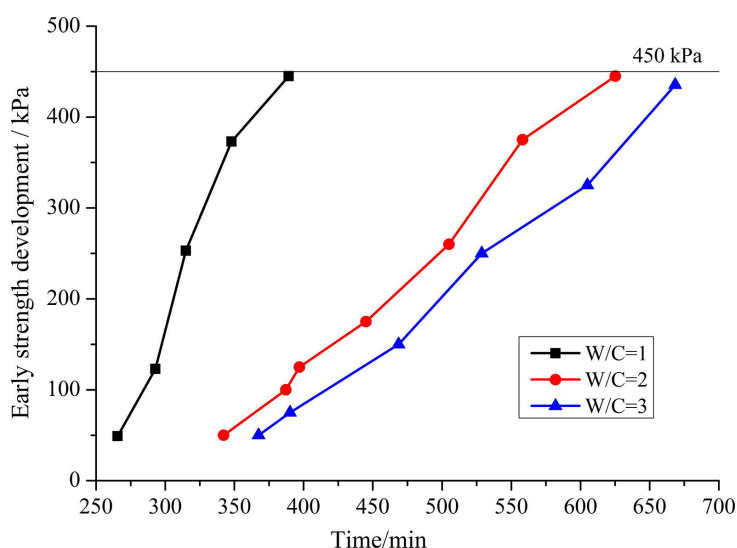
Tabell 3.4: Reologiske parametere for sement C. Modifisert fra *Skjølsvold m.fl.* [33]

Fra tabell 3.3 sees det at sement A størknet raskt. Dette blir forklart som en “falsk-størkning” [33]. Dette kan skyldes at sementens mest reaktive bestanddel,  $C_3A$  reagerer raskt med vann og danner  $C_4AH_{19}$  eller  $C_4AH_{13}$ . Denne effekten kan hindres om sementen er tilsatt nok sulfater,

f.eks gips [20]. Sammenlignes resultatene for sement A med C er det betydelige forskjeller. For sement Cs tilfelle ser det ikke ut til at hverken viskositeten eller skjærstyrken til sementen øker mye mellom syklene. Det gjør de for sement A.

### 3.6 Tidlig styrke og injiserbarhet

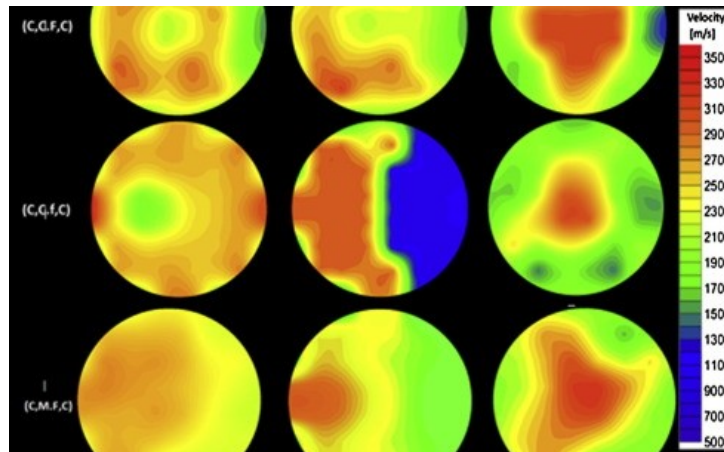
*Shucaï m.fl.* [18] har utført tester lik de i TIGHTs arbeidspakke 3. I tillegg er det utført en test på tidlig kompressibel styrke med et håndholdt penetrasjonsmeter. Et penetrasjonsmeter er et feltverktøy for løsmasser brukt til å teste hvor mye trykk som skal til for en gitt inntrengning. Apparatet gir et estimat på uhindret kompressivstyrke. Forsøket ble utført med en mikrofin sement tilsatt 1,4% superplastiserende stoff. Resultatet fra forsøket er vist i figur 3.5 og viser at sementen oppnår betydelig styrke etter få timer.



Figur 3.5: Tidlig kompressiv styrke for mikrofin injeksjonssement med 1,4% SP. Fra *Shucaï m.fl.* [18].

*Fernando mfl.* [16] har testet sementers injiserbarhet. Testen ble utført ved å presse sement gjennom et løsmassefilter. Strømningen er målt mot trykkgradienten og injeksjonslengden. Det herdede resultatet ble også undersøkt. En test i løsmasse er ikke direkte komperabel til strømning i berg, men resultatet fra forsøket er illustrerende for egenskapene til sement i flyt. Forsøket fant at størrelsen til porene i løsmassen og kornstørrelsen til sementen er den viktigste faktoren for injiserbarheten. Figur 3.6 viser lydastigheter for seksjoner av et herdet resultat av injeksjon i løsmasse. For seksjonen i senter av figuren er det stor forskjell i lydastigheten. Dette indikerer at kun den ene siden har blitt injisert. Den uninjiserte siden av prøven hadde en finere fraksjon enn den injiserte. Under injeksjon i bergsprekker forventer man at det kan oppstå en “fingren-

de” effekt hvor injeksjonsmassen beveger seg i kanaler hvor motstanden er minst og dermed ikke fyller hele sprekken. Figur 3.6 er et eksempel på at en slik effekt kan finne sted. Dette samsvarer med erfaring fra injeksjonshistoriekapittelet hvor leir og finfraksjon ble identifisert som hinder mot et godt injeksjonsresultat.



Figur 3.6: Lydhastighet gjennom en herdet injisert sement i løsmasse. Modifisert fra *Fernando mfl.* [16].

### 3.7 Testing og valg av sement i Norge

I norsk praksis er det vanlig å utføre en bleedingtest av injeksjonssementen. Dette er en enkel test å utføre ved å la sementen herde i en målesylinder og måle vannutskillelsen. En slik test er vist figur 3.7. På anlegget kan det også utføres en herdetest hvor injeksjonssement herder i et lite kar. Når sementen i dette karet har oppnådd tilstrekkelig fasthet kan boring og sprengning gjenopptas. Valg av sement er bestemt i injeksjonsinstruksen gitt av byggherre.



Figur 3.7: Bleedingtest. Fra *Skjølvold m.fl.*[33].

### **3.8 Sementparametere brukt i injeksjonsmodeller**

Injeksjonsmodeller har et stort fokus på å bestemme sementens reologiske egenskaper. Teoretiske modeller som RTGC [17] og EGFP [22] benytter sementens viskositet og skjærstyrke i sine utregninger. Nøyaktig bestemmelse av disse verdiene er derfor avgjørende for modellenes anvendbarhet. Dette kan være en av grunnene til at modellene ikke blir benyttet mer av industrien i praktisk injeksjonsarbeid. Testene utført i TIGHT og annen litteratur viser at sement er en vanskelig masse å indentifisere reologisk og at anisotropien og finfraksjon i en sprekk kan ha stor betydning. Summen gjør berginjeksjon vanskelig å modellere.

## 4 Estimering av vanninntrengning

Det finnes flere regnemodeller for beregning av vannstrømning i berg. En måte er å se på berget som en homogen masse med en viss hydraulisk konduktivitet. Dette kan brukes til å estimere et snitt av vanninntrengning inn i et bergrom eller tunell. En annen metode er å se på vannflyt i enkeltsprekker. Felles for de fleste slike modeller er at bergsprekken modelleres som en åpning mellom to parallelle flater. En slik modell har kjente analytiske løsninger for strømmingen. For en stabil og laminær strømning mellom to parallelle flater er følgende uttrykk utledet med grunnlag i Darcy's ligning [8].

$$q = \frac{g \cdot e^3}{12\mu} \cdot i \quad (4.1)$$

Hvor  $q$  er sprekke-transmissivitet ( $m^2/s$ ),  $e$  er sprekkåpning,  $g$  er tyngdeaksellerasjonen,  $\mu$  er sprekkeåpningen og  $i$  den effektive hydrauliske konduktiviteten. Fra ligning 4.1 er det klart at sprekkåpningen er den viktigste faktoren for strømmingen. En dobling i sprekkåpningen vil resultere i en åttedobling av vannstrømmingen. Det viktigste for et godt injeksjonsresultat er derfor å tette de største sprekkeene. Estimering av vanninntrengningen i en sprekk etter en injeksjon kan estimeres med å regne ut ligning 4.1 på nytt med sprekkåpningen,  $e$ , satt lik den minste sprekken man estimerer å ikke ha injisert [17]. En tommelfingerregel er at minste injiserbare sprekk er tre ganger størrelsen til største kornstørrelse til sementen [14].

## **5 Grout Intensity Number**

Vellykket injeksjon av sement under trykk er avhengig av flere faktorer. I tillegg til egenskapene til sementen er egenskapene til bergsprekken viktig [25]. Bergsprekkgeometrien, sprekkeruhet, hydraulisksestørrelse, sprekketetthet og utstrekning er foreslått som faktorer for å klassifisere en bergarts egnethet til å bli injisert [31]. Grout Intensity Number, herfra *GIN*, er en metode som blir brukt under injeksjon for å unngå heving og jekking av berget. Metoden er spesielt benyttet for injeksjon av damfundamenter og er anvendelig for injeksjon av løsmasser [19]. Det er mulig å modellere massespredningen i både løsmasser og berg for både enkle og komplekse strømnings situasjoner. Grunnet uvissheten om hvordan spredningen foregår i hvert tilfelle er enklere åpne plane sprekker med konstant sprekkestørrelse brukt [25]. *GIN*-metoden bygger på en slik forenklet modell som gir et arbeidsprinsipp for injeksjon uten jekking eller hydraulisk splitting.

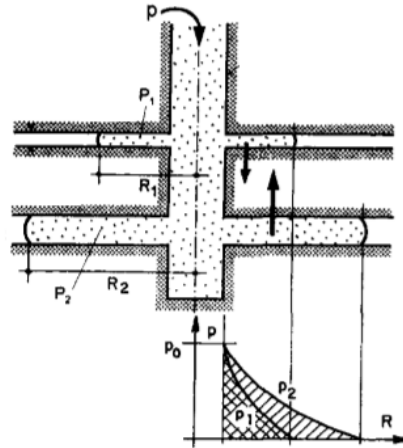
### **5.1 Prinsippet bak *GIN***

Enhver åpning av en sprekk er spesiell [25]. Stor inntrengning vil opptre i noen sprekker mens andre sprekker vil ha liten eller ingen inntrengning. For at jekking eller oppløftning skal forekomme er prinsippet i *GIN* at trykket i injeksjonsprekken må være tilstrekkelig stort og virke over en tilstrekkelig overflate til å enten løfte eller hydraulisk splitte berget. Hvordan trykket fordeler seg i bergsprekken er illustrert i figur 5.1. Figuren viser et tosprekksystem med ulike sprekkestørrelser og inntrengning. I figuren har den mindre sprekk med tilnærmet halv sprekkestørrelse av den store gitt halvparten så stor penetrasjon. Dette er analogt med formlene til *Real Time Grouting Control* [28]. Sammenhengen kommer fra at den maksimale penetrasjonen er lineært gitt av skjærstyrken til sementen og sprekkestørrelse [17, 25], se formel 5.1.

$$I = \frac{p \cdot a}{2 \cdot \tau} \quad (5.1)$$



Hvor  $I$  er penetrasjonen,  $p$  er trykk,  $a$  er sprekkestørrelsen og  $\tau$  er skjærstyrken til sementen. Fordelingen av trykket i sprekken i figur 5.1 har en svak kurve, men er tilnærmet lineær fra injeksjonshullet til det omliggende trykket, i figuren satt til 0.

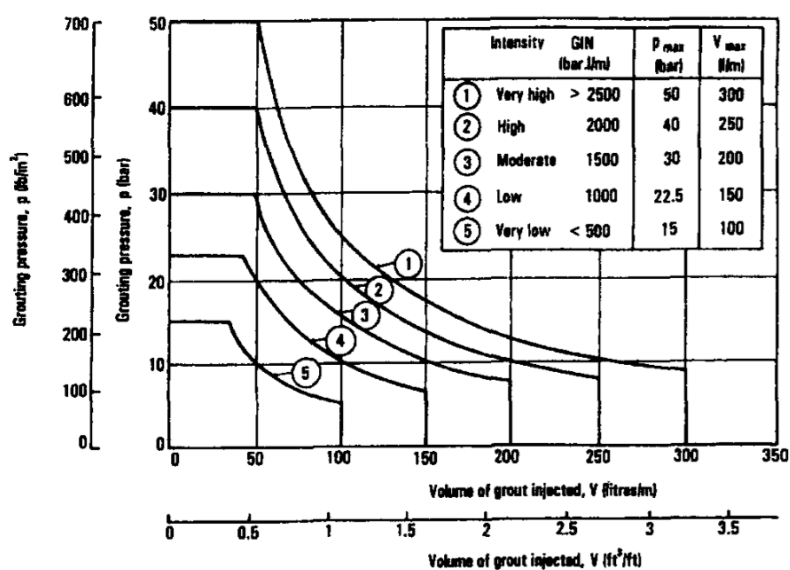


Figur 5.1: Injeksjonsspredning og trykk i et todelt sprekkesystem. Modifisert fra Perkins m.fl. [25].

For å hindre oppløfting av berget omtales intensiteten til injeksjonen som trykket ganget med injeksjonsmassespredningen. Siden det ikke er mulig med å vite hvor langt inn i berget det er injisert benyttes injisert volum som et mål på spredningen med antagelsen om at høyere volum er lik større spredning.

$$GIN = p * V \quad (5.2)$$

Hvor  $p$  er trykk og  $V$  er injisert volum. For å hindre oppløftning og hydraulisk splitting bestemmes en intensitet som er trygg som så holdes konstant under injeksjonen. Dette resulterer i en injeksjonstrykkbegrensning basert på injisert volum som illustrert i figur 5.2. Figuren viser *GIN*-kurver for forskjellige *GIN*-nummer. Injeksjonstrykket styres slik at det aldri når over trykket satt av *GIN*-kurven for et gitt injisert volum.



Figur 5.2: Standardiserte GIN kurver. Fra Perkins m.fl.[25].

## 5.2 GIN mot norsk injeksjonspraksis

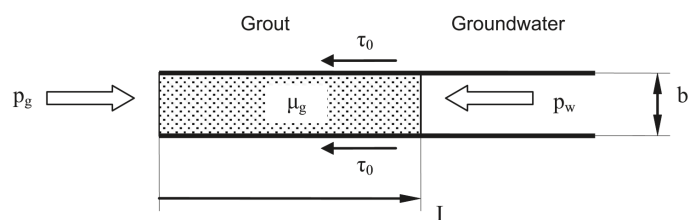
Denne måten å injisere på er hovedsaklig brukt for injisering av damfundamenter. Dette kan være en grunn til at metoden er diametralt forskjellig fra norsk injeksjonspraksis hvor injeksjon avsluttes med et høyt trykk uavhengig av masseinngangen. Under injeksjon i løsmasser eller meget dårlig berg må det tas hensyn til at volumet til den injiserte sementen kan føre til at bakken eller berget heves fordi det injiseres mer enn bergets sprekkevolum eller løsmassens porevolum. *GIN* tar hensyn til dette ved å ha volumkrav om når injeksjonen skal avsluttes. *GIN* strider mot prinsippet fra historiekapittelet om at det skal injiseres til berget avviser mer masse.

## 6 *Real Time Grouting Control*

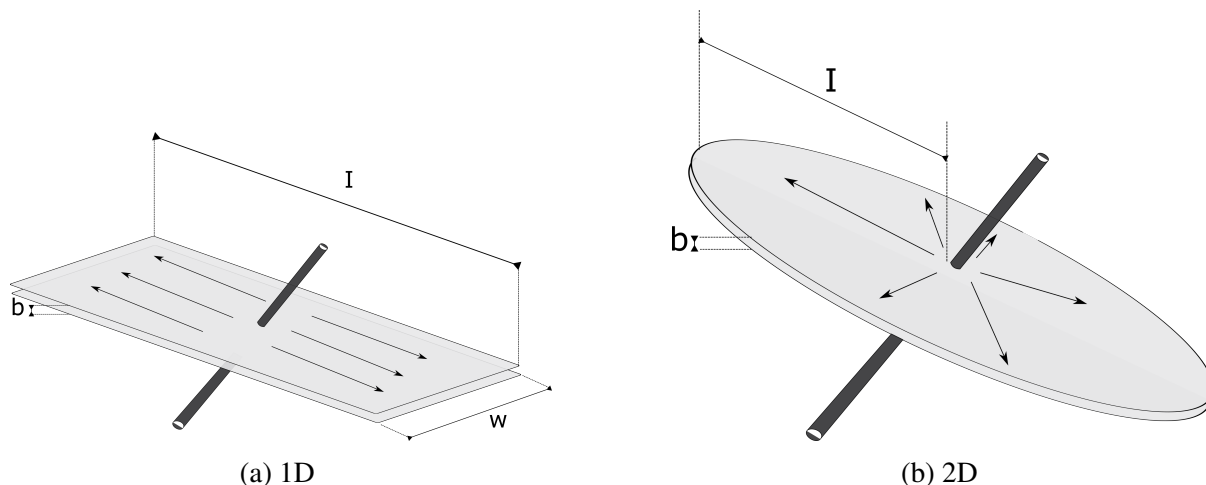
Utfordringen med *GIN* er å estimere injeksjonsspredningen for å kunne bestemme et godt *GIN*-nummer. *Real Time Grouting Control*, herfra *RTGC*, er et svenskutviklet system som modellerer injeksjonsmassespredning for endimensjonal og todimensjonal strømning. I sommerjobb for *Bever Control AS* utviklet forfatteren et dataprogram i C++/Qt som kan lese injeksjonsfiler fra *AMV*-rigger med *Bever Controls* programvare og *Atlas Copco*-rigger som logger i csv-format. Dette kapittelet er hovedsaklig en omskrivning av metoden til *RTGC* som beskrevet av *Kobayashi m.fl.* [17]. Grunnen til den nøyaktige omskrivningen er å gi leseren et grunnlag for å forstå metoden, programmet og forsøket som er utført for å teste *RTGC*. Spredningen av injeksjonsmasse i berget beskrives som styrt av mange kompliserte prosesser. *RTGC* benytter en analytisk løsning på spredningen basert på trykk, tid og sementegenskaper. Målet med metoden er å sette stoppkriterier med bakgrunn i penetrasjonslengde heller enn stopptrykk, strømning eller injisert volum. Utenom elastisk jekking er all teori beskrevet i dette kapittelet implementert i C++/Qt programmet. For en fullstendig gjennomgang av alle korreksjoner og utledninger vises det til originalartikkelen av *Kobayashi m.fl.* [17].

### 6.1 *Teorien bak Real Time Grouting Control*

I *RTGC* skilles det mellom en- og todimensjonal strømning. Disse to strømningstypene er illustrert i figur 6.2. *RTGC* beskriver sement som et binghamfluid med skjærstyrke  $\tau_0$  og viskositet  $\mu_g$ . Figur 6.1 viser kraftbalansen brukt i *RTGC* på kreftene som virker på injeksjonsmassen under injeksjon.



Figur 6.1: Kraftbalanse mellom injeksjonspumpen, injeksjonsmassen og grunnvannet. Fra Kobayashi m.fl. [17]



Figur 6.2: Strømningsdimensjonaliteter i RTGC. Egen tegning.

Ut fra kraftbalansen vist i figur 6.1 følger følgende ligning for maksimal spredning av injeksjonsmassen:

$$I_{max} = \left( \frac{\Delta p}{2\tau_0} \right) \cdot b \quad (6.1)$$

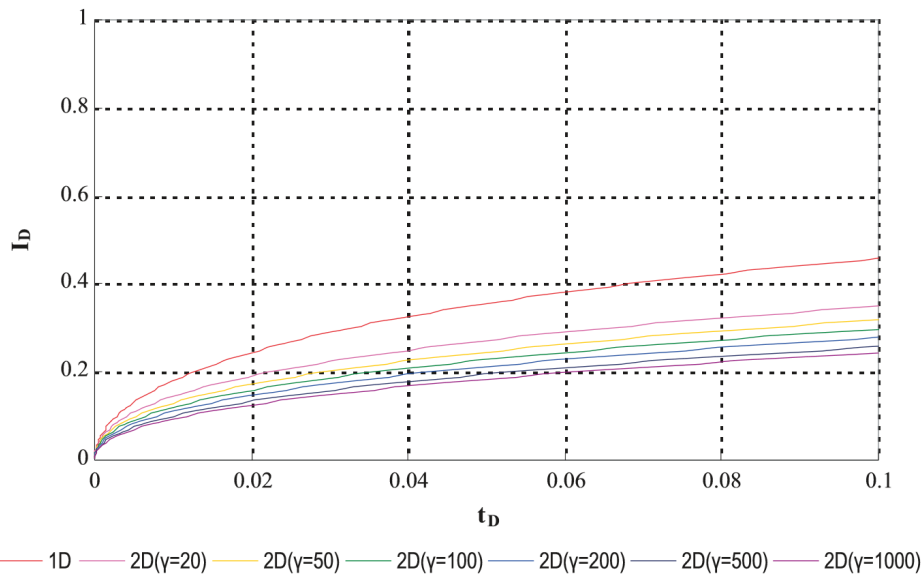
Hvor  $\Delta p$  er injeksjonsovertrykket,  $\tau_0$  skjærstyrken og  $b$  er sprekkestørrelsen. I RTGCs analytiske løsning for penetrasjon blir karakteristisk injeksjonstid  $t_0$ , relativ injeksjonstid  $t_D$  og relativ penetrasjon  $I_D$  innført og definert som vist i ligningene under [17].

$$t_0 = \frac{6\Delta p \cdot \mu_g}{\tau_0^2} \quad (6.2)$$

$$t_D = \frac{t}{t_0} \quad (6.3)$$

$$I_D = \frac{I}{I_{max}} \quad (6.4)$$

Sammenhengen mellom den relative penetrasjonen  $I_D$  og den relative tiden  $t_D$  er korrelert som vist i figur 6.3. Denne korrelasjonen er hovedelementet i *RTGC* ved at den beskriver spredningen for et gitt trykk og sementegenskaper. Resten av *RTGC* er korreksjoner for forskjellige hendelser under injeksjonsforløpet. Fra figur 6.3 kan det merkes at spredningen skjer raskest ved lav  $t_D$  og at det er en betydelig forskjell mellom en- og todimensjonalstrømning. De forskjellige  $y$ -verdiene for den todimensjonale strømningen er et uttrykk for forholdet mellom  $I_{max}$  og hullradiusen [17]. Dette påvirker spredningen i det todimensjonale tilfellet, men kurvene blir slått sammen i metoden for å oppnå en entydig approksimasjon.



Figur 6.3: Relativ penetrasjon  $I_D$  som funksjon av relativ injeksjonstid  $t_D$ . Fra *Kobayashi m.fl.* [17]

Formlene for injisert volum og injeksjonsstrømning oppgis som:

1D:

For endimensjonal strømning, modellert som en kanal med bredde  $w$  og sprekkeåpning  $b$ , beregnes injisert volum og strømning slik:

$$V = I \cdot w \cdot b = I_D \cdot I_{max} \cdot w \cdot b = I_D \cdot \left( \frac{\Delta p}{2\tau_0} \right) \cdot w \cdot b^2 \quad (6.5)$$

For det totale volumet summeres alle sprekker sammen:

$$V_{tot} = I_D \cdot \left( \frac{\Delta p}{2\tau_0} \right) \sum w \cdot b^2 = I_D \cdot V_{max,1D} \quad (6.6)$$

Strømningen defineres slik:

$$Q = \frac{dV_{tot}}{dt} = \frac{dI_D}{dt_D} \cdot \frac{1}{t_0} \cdot \left( \frac{\Delta p}{2\tau_0} \right) \sum w \cdot b^2 = \frac{dI_D}{dt_D} \cdot \frac{V_{max,1D}}{t_0} \quad (6.7)$$

2D:

For todimensjonal strømning, modellert som strømning radielt i en sirkulær disk med sprekkeåpning  $b$ , beregnes injisert volum og strømning slik:

$$V = \pi \cdot I^2 \cdot b = \pi \cdot (I_D \cdot I_{max})^2 \cdot b = \pi \cdot I_D^2 \cdot \left( \frac{\Delta p}{2\tau_0} \right)^2 \cdot b^3 \quad (6.8)$$

For det totale volumet summeres alle sprekker sammen:

$$V_{tot} = \pi \cdot I_D^2 \cdot \left( \frac{\Delta p}{2\tau_0} \right)^2 \cdot \sum b^3 = I_D^2 \cdot V_{max,2D} \quad (6.9)$$

Strømningen defineres slik:

$$Q = \frac{dV_{tot}}{dt} = 2\pi \cdot I_D \cdot \frac{dI_D}{dt_D} \cdot \frac{1}{t_0} \cdot \left( \frac{\Delta p}{2\tau_0} \right)^2 \sum b^3 = I_D \cdot \frac{dI_D}{dt_D} \cdot \frac{V_{max,2D}}{t_0} \quad (6.10)$$

Ligningene 6.5 - 6.10 har noen nyttige forhold.  $I_D$ , den relative penetrasjonen, er også et mål på det relative volumet en sprekke er fylt med:  $V_{rel,1D} = I_{D,1D}$  og  $V_{rel,2D} = I_{D,2D}^2$ . Ligningene for strømning (formel 6.7 og 6.10) kan omorganiseres til å løses med hensyn til  $\sum b^2 \cdot w$  for endimensjonal strømning og  $\sum b^3$  for todimensjonal strømning. Dette blir benyttet for å estimere sprekkestørrelsen.

## 6.2 Approksimasjoner for å oppnå en analytisk løsning

For å beregne penetrasjonen er sammenhengen mellom den relative tiden  $t_D$  og den relative penetrasjonen  $I_D$ , se figur 6.3, approksimert. Approksimasjonene er gitt som:

1D:

$$I_{D,1D} = \sqrt{\theta^2 + 4\theta} - \theta \quad (6.11)$$

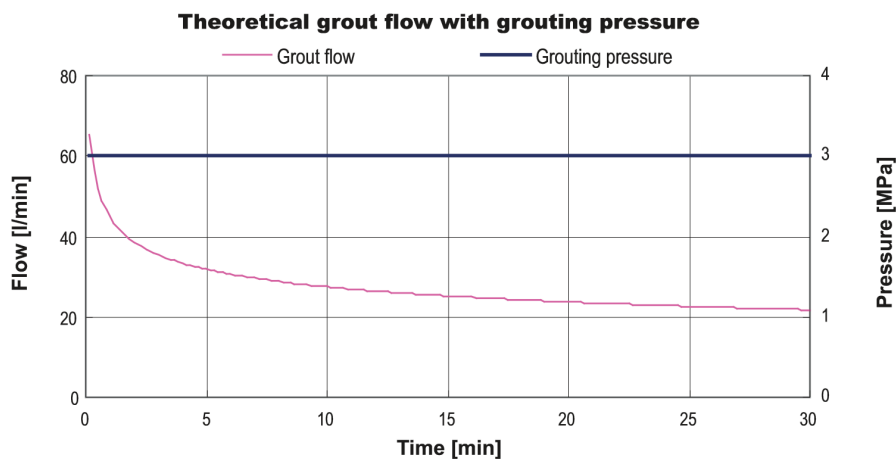
$$\theta_{1D} = \frac{t_D}{2(0.6 + t_D)} \quad (6.12)$$

2D:

$$\begin{aligned} I_{D_{2D}} &= 0.7032 \cdot \exp(0.9072 \cdot \log(t_D)) & t_D < 0.2413 \\ I_{D_{2D}} &= 0.3643 \cdot \log(t_D) + 0.6266 & 0.2413 < t_D < 2.7546 \\ I_{D_{2D}} &= 1 - 0.4522 \cdot \exp(-1.7098 \cdot \log(t_D)) & t_D > 2.7546 \end{aligned} \quad (6.13)$$

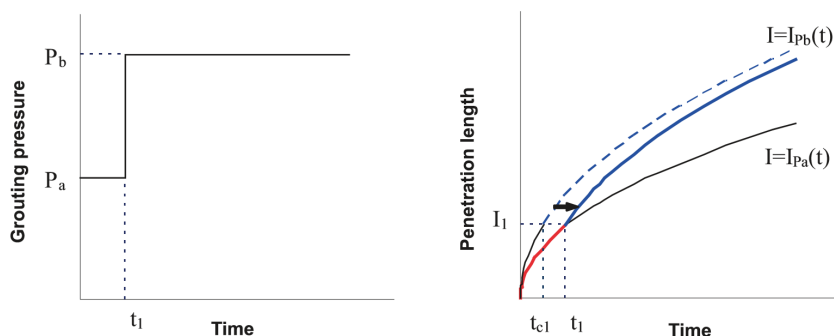
### 6.3 Bestemmelse av penetrasjon

Penetrasjonen beregnes fra strømningsdimensjonaliteten, trykk, tid og sementegenskapene. For et konstant trykk vil strømmingen gradvis avta etterhvert som penetrasjonen øker. Dette prinsippet er vist i figur 6.4.



Figur 6.4: Teoretisk strømming med et konstant trykk for todimensjonal strømming. Fra Kobayashi m.fl. [17]

Under en virkelig injeksjonsprosess vil trykket variere. Derfor gjøres det korreksjoner hver gang trykket endres. Hvordan penetrasjonen påvirkes av et skifte til høyere trykk er vist i figur 6.5.



Figur 6.5: Sammenhengen mellom trykkendring og penetrasjon. Fra Kobayashi *m.fl.* [17]

Det korrigeres for trykkendringen ved å regne ut hvor injeksjonsprosessen (dvs.  $t_D$ ) ville ha vært om det nye trykket ( $P_b$ ) hadde vært konstant fra starten. Fra ligning 6.4 og 6.1 utledes følgende formel [17]:

$$I = I_D \cdot I_{max} = I_D \cdot \frac{\Delta p \cdot b}{2\tau_0} \quad (6.14)$$

Den virkelige penetrasjonen  $I$  er lik i skillet mellom  $P_a$  og  $P_b$ . Dermed kan  $I_{D,b}$  finnes fra  $I_{D,a}$  og trykkendringen slik:

$$I_{D,b} = I_{D,a} \cdot \frac{P_a}{P_b} \quad (6.15)$$

Formel 6.15 viser at endringen til den relative penetrasjonen alene er avhengig av trykkendringen. Fra den nye relative penetrasjonen kan  $t_D$  finnes. Sammenhengen mellom  $t_D$  og  $I_D$  er gitt i approksimasjonene 6.11, 6.12 og 6.13. Disse formlene kan omarrangeres slik at de gir et uttrykk for  $t_D$  gitt av  $I_D$ . Dette er vist i formel 6.16 - 6.18. Fra den nye karakteristiske tiden  $t_0$  og  $t_D$  finnes den korrigerede tiden  $t_{c1}$ , ligning 6.19. Denne tiden representerer den virkelige tiden det ville tatt å injisere så langt man har kommet kun med det nye trykket  $P_b$ .

1D:

$$\theta = \frac{I_D^2}{4 - 2I_D} \quad (6.16)$$

$$t_{D \ 1D} = \frac{1.2\theta_D}{1 - 2\theta_D} \quad (6.17)$$



2D:

$$\begin{aligned}
 t_{D_{2D}} &= 10^{\frac{\ln\left(\frac{1-I_D}{0.7032}\right)}{0.9072}} & I_D < 0.4016 \\
 t_{D_{2D}} &= 10^{(I_D-0.6266)/0.0.3643} & 0.4016 < I_D < 0.7869 \\
 t_{D_{2D}} &= 10^{\frac{\ln\left(\frac{1-I_D}{0.4522}\right)}{-1.7098}} & I_D > 0.7869
 \end{aligned} \tag{6.18}$$

$$t_{c1} = t_{P_b} = t_{D_{P_b}} \cdot \frac{6P_b \cdot \mu_g}{\tau_0^2} \tag{6.19}$$

## 6.4 Tidsavhengige variabler

Injeksjonsmassen beskrives med skjærstyrken og viskositeten. I metoden kan disse verdiene være konstante eller tidsavhengige. Om skjærstyrken  $\tau_{0a}$  og viskositeten  $\mu_{g_a}$  regnes tidsavhengig, kan penetrasjonen korrigeres på samme vis som for endringer i trykket. På samme form som ligning 6.14 er sammenhengen mellom tidsavhengige variable gitt i ligning 6.20.

$$I_{D,b} = I_{D,a} \cdot \frac{\tau_b}{\tau_a} \tag{6.20}$$

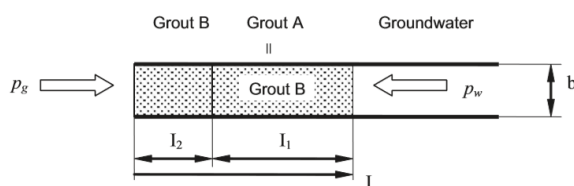
I ligning 6.20 er endringen i penetrasjon som følge av tidsavhengige variabler kun avhengig av endringen til skjærstyrken. Ligning 6.20 og 6.15 kan derfor slås sammen til å danne en ligning som tar hensyn både til tidsavhengige endringer i injeksjonsmassen og injeksjonstrykket. Dette er vist i ligning 6.21.

$$I_{D,b} = I_{D,a} \cdot \frac{P_a}{P_b} \cdot \frac{\tau_b}{\tau_a} \tag{6.21}$$

## 6.5 Endring av sementresept

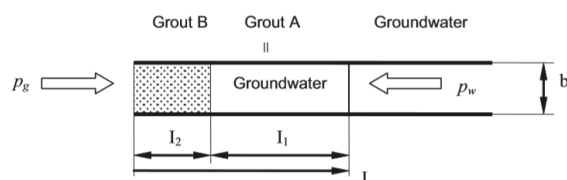
Endring av sementresept kan utføres på to forskjellige måter. Enten regnes all sement injisert før resepskiftet som lik den nye resepten og injeksjonen fortsetter som om man hadde injisert

med den nye resepten hele tiden, se figur 6.6.



Figur 6.6: Reseptbytte ved å behandle hele injeksjonen som om den var med sement B fra begynnelsen. Fra Kobayashi m.fl. [17]

Den andre måten er å regne all tidligere injisert masse som grunnvann og i praksis starte injeksjonen på nytt, og legge til lengden man har injisert med den forrige resepten, se figur 6.7.



Figur 6.7: Reseptbytte med å starte injeksjonen på nytt. Fra Kobayashi m.fl [17]

Begge metodene representerer ytterpunkter for hvordan et sementreseptskifte kan modelleres i RTGC. Derfor foreslås det av Kobayashi m.fl [17] at det benyttes en mellommetode. Programmeringsmessig er det enklest å starte injeksjonen der man ville ha vært om man benyttet den nye resepten hele tiden.

## 6.6 Avgjørelse av dimensjonalitet

RTGC skiller mellom endimensjonal og todimensjonal strømning med utregning av en indeks. Kobayashi m.fl. fremstiller flere typer indekser, men denne oppgaven tar kun for seg en. Indeksen fungerer ved å sammenligne forholdet mellom logget strømning og volum mot den teoretiske strømningen og volum regnet endimensjonalt eller todimensjonalt. Prinsippet vises i ligning 6.22.

$$\frac{Q_{\logget}}{V_{\logget}} \cdot \frac{V_{beregnet}}{Q_{beregnet}} = 1 \quad (6.22)$$

På grunn av forskjellene i formlene for en- og todimensjonal strømning vil konstantleddet som kommer ut være ulikt. Dette gjør det mulig å skille mellom strømningsdimensjonene i samme

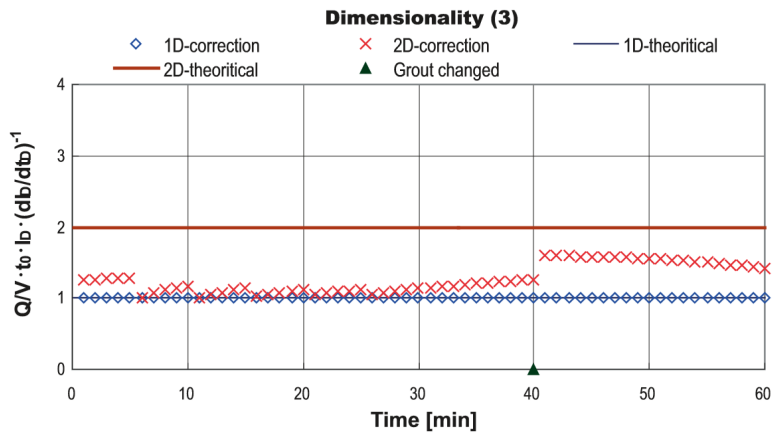
plott. For en endimensjonal strømning beregnes indeksen slik fra ligning 6.6 og 6.7:

$$\frac{Q_{logget}}{V_{logget}} \cdot t_0 \cdot I_D \cdot \left( \frac{dI_D}{dt_D} \right)^{-1} = 1 \quad (6.23)$$

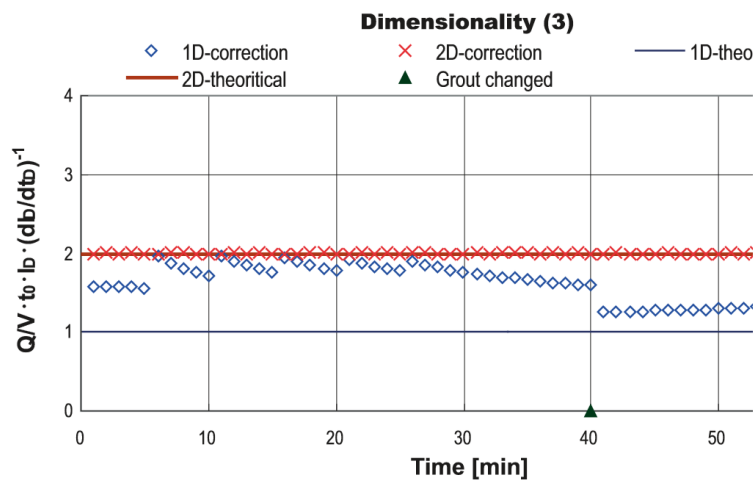
Den todimensjonale indeksen beregnes ut fra ligning 6.9 og 6.10 slik:

$$\frac{Q_{logget}}{V_{logget}} \cdot t_0 \cdot I_D \cdot \left( \frac{dI_D}{dt_D} \right)^{-1} = 2 \quad (6.24)$$

Ligning 6.23 og 6.24 plottes mot deres teoretiske løsninger og dermed kan dimensjonaliteten til strømningen avgjøres. Dette er illustrert i figur 6.8 og 6.9



Figur 6.8: Indeks for et endimensjonalt tilfelle. Fra *Kobayashi m.fl.*[17]



Figur 6.9: Indeks for et todimensjonalt tilfelle. Fra *Kobayashi m.fl.* [17]

## 6.7 Jekking

På grunn av penetrasjonsestimatet i *RTGC* er det mulig å modellere faren for jekking av berget. Det presenteres her to forskjellige modeller for jekking, elastisk og ultimat.

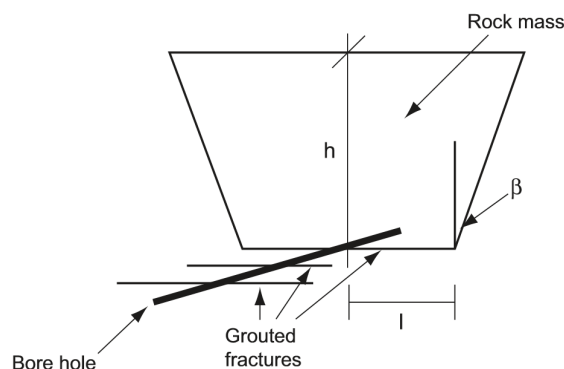
### 6.7.1 Ultimat jekking

Prinsippet i denne jekke modellen er at kreftene som virker på berget fra injeksjonsmassen må overstige den overliggende vekten til den geometri av berget som skal løftes, se figur 6.10. Av *Rafi m.fl.* [30] blir dette beskrevet som ultimat jekking. For en sirkulær disk uttrykkes den nødvendige kraften som [17]:

$$F_{berg} = k_1 \cdot \rho \cdot g \cdot h \cdot I^2 \cdot \pi \quad (6.25)$$

Hvor  $k_1$  er en faktor for å bestemme geometrien til berget som oppløftes,  $\rho$  er egenvekten til berget,  $I$  er spredningen og  $g$  er gravitasjonskraften.  $k_1$  avhenger av  $\beta$  som vist i figur 6.10 og vil med en  $\beta$  lik  $45^\circ$  være lik [17]:

$$k_1 = 1 + \frac{h}{I} \cdot \frac{1}{3} \left( \frac{h}{I} \right)^2 \quad (6.26)$$



Figur 6.10: Idealisert geometri for en bergmasse som skal løftes i et todimensjonalt strømningstilfelle. Fra *Kobayashi m.fl.* [17]

Den oppløftende kraften som virker fra injeksjonsmassen mot berget blir beskrevet med en antakelse om et lineært trykkfall slik [17]:

$$F_{oppløft} = \frac{k_2 \cdot \pi \cdot I^2 \cdot P}{3} \quad (6.27)$$

Hvor  $F_{oppløft}$  er oppløftingskraften og  $k_2$  er en faktor som tar hensyn til at en sprekk ikke er helt åpen for inntrengning. Dette blir kalt for en “fingering” effekt.  $P$  er trykket og  $I$  er penetrasjonen. For å hindre oppløftning må følgende kraftbalanse tilfredstilles:

$$F_{oppløft} < F_{berg} \quad (6.28)$$

Ligningene 6.25 til 6.28 kan skrives om til å gi et uttrykk for trykket som skal til for å ikke løfte berget:

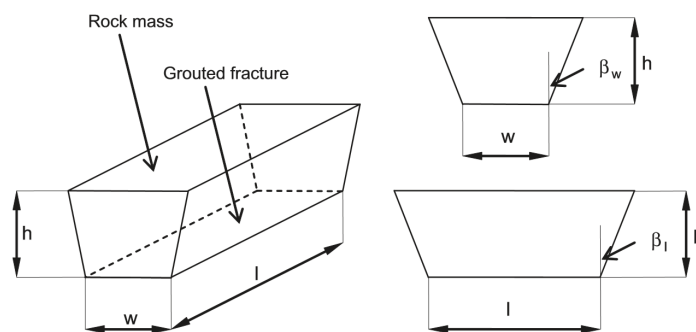
$$P < \frac{3 \cdot \rho \cdot g \cdot h}{k_2} \cdot \left( 1 + \frac{h}{I} + \frac{1}{3} \left( \frac{h}{I} \right)^2 \right) \quad (6.29)$$

Ligningene over gjelder for et todimensjonalt tilfelle. Det endimensjonale tilfellet har samme utledningsgang. Formlene for oppløftning i et endimensjonalt tilfelle er gitt av ligningene 6.30 til 6.33 og illustrert i figur 6.11 [17]. Til forskjell fra todimensjonal strømming må sprekkvidden  $w$  settes statisk i *RTGC*. Dette betyr at den estimerte sprekkstørrelsen og dermed også faren for oppløftning kan manipuleres etter hvordan  $w$  settes.

$$F_{berg} = k_1 \cdot \rho \cdot g \cdot h \cdot I \cdot w \quad (6.30)$$

Med en  $\beta$  lik  $45^\circ$  og en  $\beta_w$  lik  $90^\circ$  gir dette en  $k_1$  lik, se figur 6.11:

$$k_1 = 1 + \frac{h}{I} \quad (6.31)$$



Figur 6.11: Idealisert geometri for en bergmasse som skal løftes i et endimensjonalt strømningstilfelle. Fra Kobayashi *m.fl.* [17]

Oppløftet beskrives med en antakelse om et lineært trykkfall slik [17]:

$$F_{oppløft} = \frac{k_2 \cdot \rho \cdot g \cdot h}{2} \cdot \left(1 + \frac{h}{l}\right) \quad (6.32)$$

Ligningene fra 6.30 til 6.32 kan brukes til å uttrykke trykket som skal til for å ikke løfte berget slik:

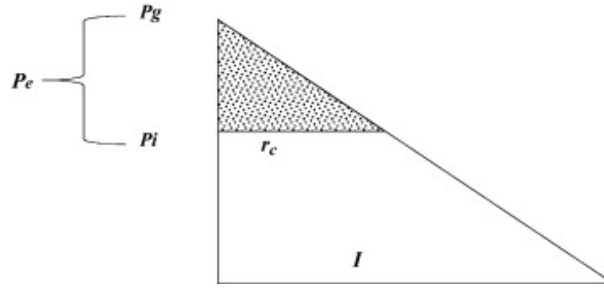
$$P < \frac{3 \cdot \rho \cdot g \cdot h}{k_2} \cdot \left(1 + \frac{h}{l}\right) \quad (6.33)$$

## 6.7.2 Elastisk jekking

Rafi *m.fl.* (2014) [30] beskriver elastisk jekking som komprimering av bergmassen som følge av at trykket i injeksjonsprekken overstiger de opprinnelige spenningene i berget. Med et antatt lineært trykkfall fra injeksjonshullet ut mot injeksjonsfronten er trykket som bidrar til elastisk jekking illustrert i figur 6.12 som  $P_e$ .

Effekten av elastisk jekking foreslås av Rafi *m.fl.* (2014) [30] til å kunne bidra til bedre injeksjonsmasseinntrengning. Men det kan også føre til at mindre sprekker midlertidig lukkes for så å åpnes igjen etter avsluttet injeksjon. Dette kan etterlate åpninger i berget som ikke er fylt med injeksjonsmasse. Forholdet mellom trykket hvor ultimat og elastisk jekking inntreffer er gitt i ligning 6.34.

$$P_{ingen\ jekking} < P_{elastisk} < P_{ultimat} \quad (6.34)$$



Figur 6.12: Overtrykk og lineært trykkfrall fra injeksjonshull mot injeksjonsfronten. Fra Rafi m.fl. [30]

Rafi et.al (2014) [30] benytter ordet “acceptable” om elastisk jekking som ikke utvider sprekken mer enn ønskelig. Det påpekes i artikkelen at jekking ikke er noe som må unngås i alle tilfeller, men at det bør kontrolleres. Herfra blir det benyttet et normalisert trykk i formlene. Normaliseringen av trykket er gitt fra bergoverdekningen og vist i ligning 6.35.

$$P_{normalisert} = \frac{P_{injeksjon}}{3\rho gh} \quad (6.35)$$

Hvor  $P$  er trykk,  $\rho$  er egenvekten til bergmassen,  $g$  er gravitasjonakselerasjonen og  $h$  overdekning. Med det normaliserte trykket beskrives det akseptable injeksjonstrykket som i ligning 6.36 [30].

$$P_{akseptabel} = \frac{k}{3I} + \frac{1}{3} \quad (6.36)$$

Hvor

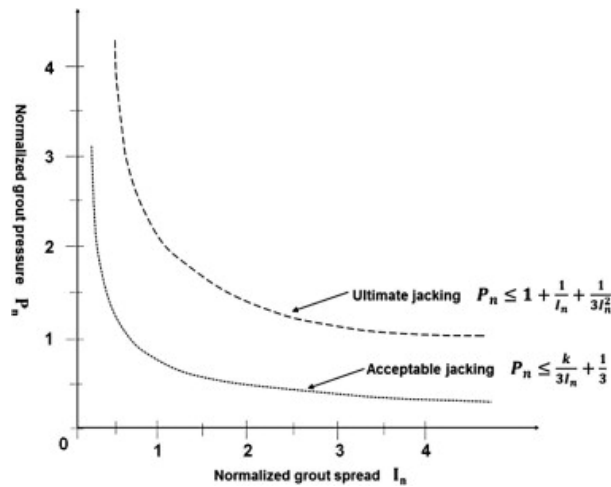
$$k = \frac{3}{4} \cdot \frac{E}{1 - \nu^2} \cdot \frac{\delta_{aks}}{\rho gh^2} \cdot \frac{P_g}{P_e} \quad (6.37)$$

I ligning 6.37 er  $E$  bergmassens E-modul,  $\nu$  er poissontall,  $\delta_{aks}$  er akseptabel sprekkeutvidelse,  $P_g$  er injeksjonstrykket og  $P_e$  er andelen av trykket som er over in-situ trykket som virker på sprekkeplanet. Den gjennomsnittlige sprekkeutvidelsen over området som blir elastisk jekket estimeres som [30].

$$\Delta a = \frac{4}{3} \frac{P_e r_c}{E} (1 - \nu^2) \quad (6.38)$$

Hvor  $r_c$  er området hvor trykket  $P_e$  finnes. Med et normalisert trykk er faren for både akseptabel

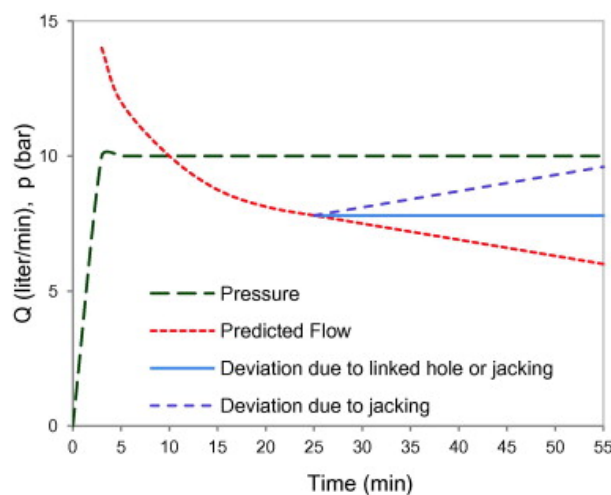
og ultimat jekking vist i figur 6.13. Kurveformen til både ultimat og elastisk jekking er lik *GIN*-kurvene.



Figur 6.13: Illustrasjon over jekkefare mot normalisert injeksjonstrykk. Fra Rafi *et.al.* [30]

### 6.7.3 Forventet strømningsendring under jekking

Jekking av berget kan bli indentifisert ut fra strømning og trykk under injeksjonen. Om trykket holdes konstant forventes det at strømningen gradvis skal avta. Om strømningen er konstant, øker uten trykkøkning eller øker med trykkfall tolkes dette som jekking [30]. Dette er illustrert i figur 6.14. Det er med denne forståelsen jekking blir tolket ut fra injeksjonslogger i denne oppgaven.



Figur 6.14: Illustrasjon over sammenhengen mellom trykk og strømning under jekking. Fra Rafi *m.fl.* [30]

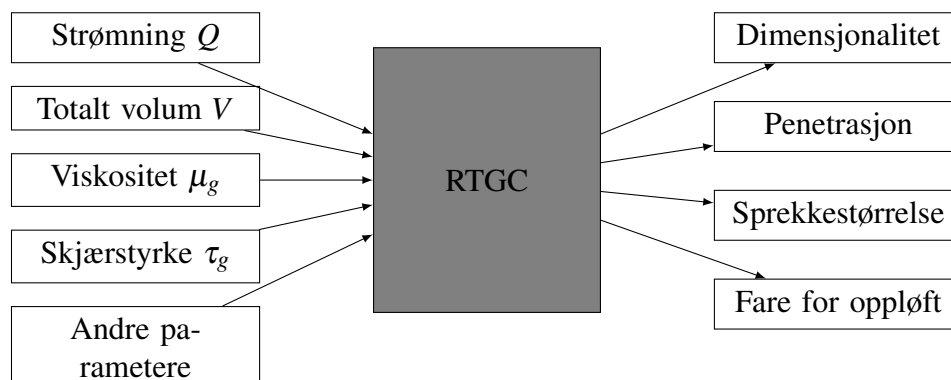


## 7 Implementering og visning av *RTGC*

C++/Qt-programmet utviklet for *Bever Control* er en vidreutvikling av *RTGC*-programmet forfatteren lagde i Python i prosjektoppgaven. Ideen bak å utvikle en omfattende implementasjon av *RTGC* med et grafisk grensesnitt var at programmet ville være lett å distribuere, bruke og teste av andre. Det var ønsket at dette ville vekke interesse for *RTGC*. Utenom interesse fra andre masterstudenter har responsen vært lav. Dette kapittelet tar sikte på å gi leseren en forståelse for hvordan programmet har blitt implementert og kan være til hjelp for andre som ønsker å lage egne implementasjoner av *RTGC*.

### 7.1 Prosedyren til *RTGC*

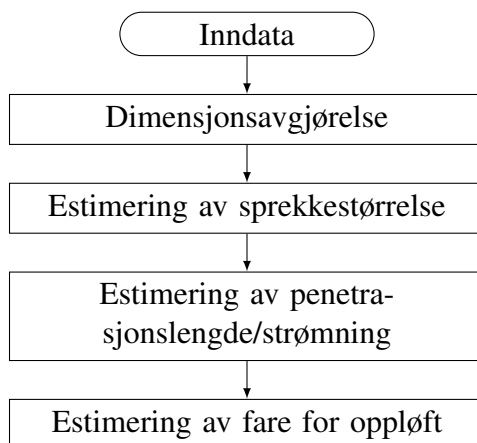
I *RTGC* er målet å kunne sette stoppkriterier på bakgrunn av spredningen til injeksjonsmassen. Dette gjøres ved å benytte data om trykk, tid og strømming sammen med sementegenskapene som vist i kapittel 6. Figur 7.1 viser hva *RTGC* tar inn av data og hva metoden gir ut.



Figur 7.1: Inn og utdata av *RTGC*. Egen illustrasjon.

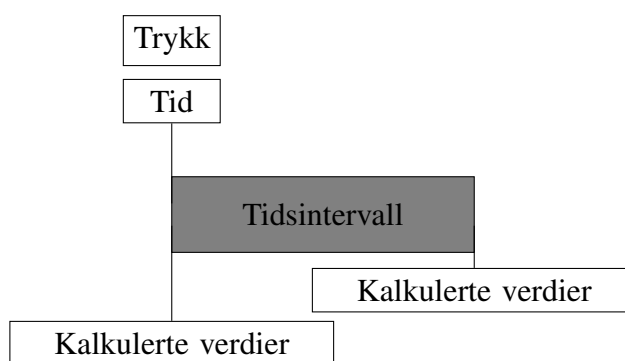
Penetrasjonsestimatet blir i *RTGC* bestemt av strømningsdimensjonaliteten og sprekkestørrelsen. Derfor må dimensjonaliteten og sprekkestørrelsen regnes ut først i programmet. Etter dette kan

strømning, penetrasjonen og faren for oppløftning bestemmes. Et flytskjema over utregningsgangen er vist i figur 7.2.



Figur 7.2: Flytskjema for *RTGC*. Egen illustrasjon.

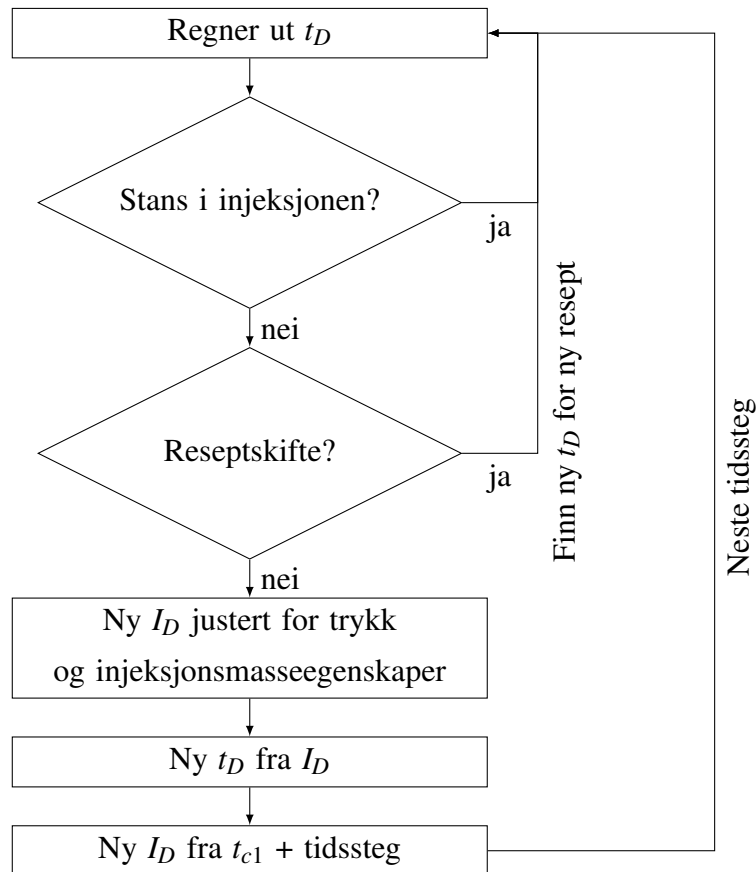
Datamodellmessig har hvert loggpunkt blitt behandlet til å gjelde fram til neste loggpunkt. Et alternativ er at hvert loggpunkt er midtstill i tidsintervallet. Dette ville sannsynligvis ikke utgjort en stor forskjell. En presentasjon av datamodellen er vist i figur 7.3.



Figur 7.3: Presentasjon av datamodellen i programmet.

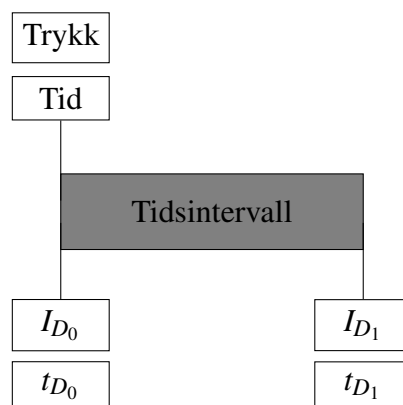
## 7.2 Dimensjonsavgjørelse

Under dimensjonsavgjørelsen foregår mesteparten av utregningene i *RTGC*. Tid og trykk hentes fra injeksjonsforløpet og fra disse verdiene regnes den relative penetrasjonen og den relative tiden ut for hvert tidssteg. Et flytskjema over beregningsgangen er vist i figur 7.4.



Figur 7.4: Flytskjema for å regne ut relativ penetrasjon. Egen illustrasjon.

For utregningen av dimensjonalitetsindeksen og senere strømmingen må  $\frac{dI_D}{dt_D}$  beregnes. I formlene for strømningsberegning er trykket holdt konstant. Det betyr at formlene gjelder for et intervall med konstant trykk. Den interne datamodellen for relativ penetrasjon og relativ tid vil dermed se ut som vist i figur 7.5.



Figur 7.5: Presentasjon for hvordan  $\frac{dI_D}{dt_D}$  regnes ut. Egen illustrasjon.

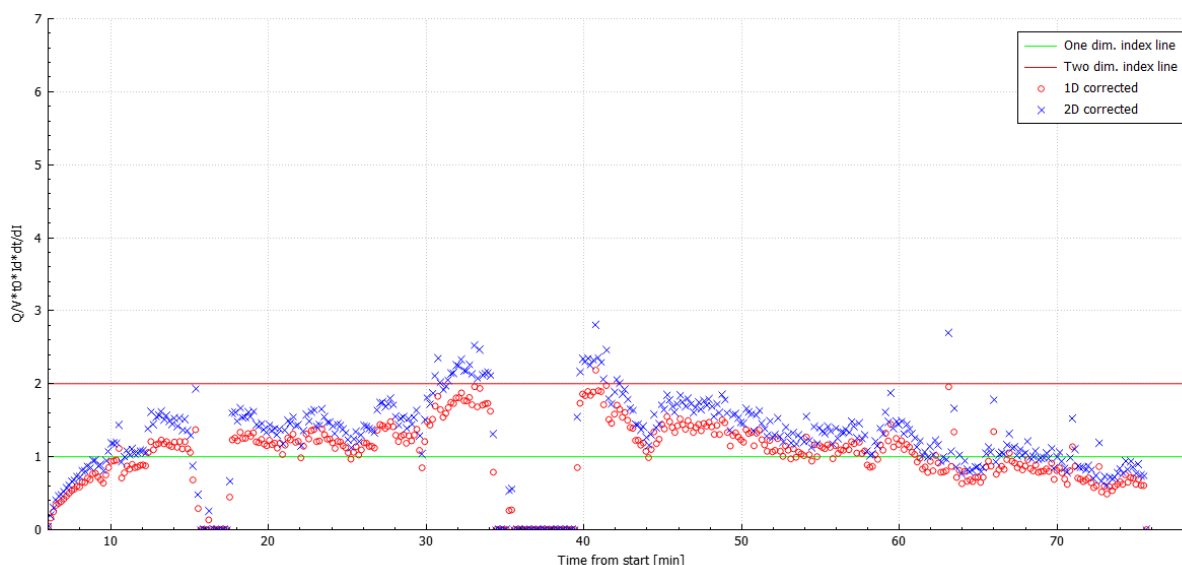
Hvor

$$\frac{dI_D}{dt_D}$$

Kan beregnes slik:

$$\frac{dI_D}{dt_D} = \frac{I_{D_1} - I_{D_0}}{t_{D_1} - t_{D_0}}$$

Dimensjonalitetsindeksen kan så plottes slik at brukeren har en mulighet til se hvordan programmet estimerer strømningsdimensjonaliteten. Et slikt plott fra C++/Qt-programmet er vist i figur 7.6.



Figur 7.6: Dimensjonsanalyse fra et virkelig injeksjonstilfelle. Data fra Sveгатjörn–Rådal.

I figur 7.6 kan man se hvordan korreksjonene både for todimensjonal og endimensjonal strømming beveger seg rundt de teoretiske verdiene for hva som forventes av en- eller todimensjonal strømming. Plottet viser at *RTGC* hovedsakelig regner injeksjonsstrømmen i berget som endimensjonal for tileffet vist. Rundt minutt 30 til 40 er strømmingen mer todimensjonal (radiell). En annen måte å tolke dimensjonsplottet på er at alle verdier mellom 1 og 2 indikerer et forventet injeksjonsforløp. For tydelige jekkinger med stor inngang av masse og eventuelt trykkfall kan verdiene til indeksen gå langt over 2. Dette plottet kan derfor også brukes til å indentifisere hendelser i injeksjonen som avviker stort fra det forventede.

## 7.3 Estimering av sprekkestørrelse

Sprekkestørrelsen regnes ut for den enkelte strømningsdimensjonalitet for injeksjonsforløpets helhet. *RTGC* foreslår måter å regne ut penetrasjon i skiftende strømningsregimer på, men det er ikke klart hvordan dette skal implementeres. I implementasjonen til C++/Qt-programmet regnes derfor hele injeksjonen som enten endimensjonal eller todimensjonal når sprekkestørrelsen estimeres. Den relative penetrasjonen  $I_D$ , relative tiden  $t_D$  og den karikaristiske tiden  $t_0$  er kjent for alle tidssteg etter dimensjonsutregningen og trenger ikke regnes ut på nytt. I ligningene for teoretisk strømning (likn. 6.7 og 6.10) er nå sprekkestørrelsen eneste gjenstående ukjente. Ved å plote den loggede strømmingen mot:

$$\frac{dI_D}{dt_D} \cdot \frac{1}{t_0} \cdot \left( \frac{\Delta p}{2\tau_0} \right) \quad \text{for 1D}$$

og

$$2\pi \cdot I_D \cdot \frac{dI_D}{dt_D} \cdot \frac{1}{t_0} \cdot \left( \frac{\Delta p}{2\tau_0} \right)^2 \quad \text{for 2D}$$

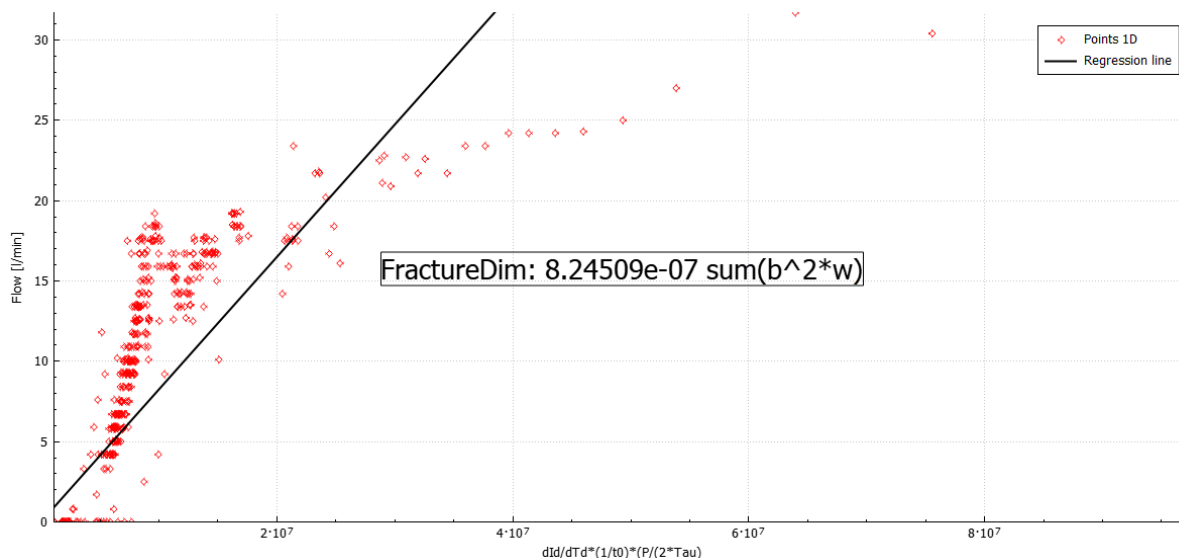
Kan sprekkestørrelsen  $\Sigma b^3$  og  $\Sigma b^2 \cdot w$  estimeres med linær regresjon bundet i origo. Se ligning 7.1.

$$y = \alpha \cdot x \quad (7.1)$$

I implementasjonen er det benyttet en minste kvadrats metode for å finne  $\alpha$ . Formelen for å finne  $\alpha$  er gitt i ligning 7.2 [32].

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i}{\sum_{i=1}^n x_i^2} \quad (7.2)$$

Ligning 7.2 er enkel å implementere, men valg av minste kvadrats metode har konsekvenser. Utliggere vektet tyngre enn punkter som ligger nærmere regresjonslinjen. Dette gir særlig utslag hvor det er logget et høyt trykk med liten eller ingen strømning med konsekvens at regresjonen dras mot 0 og sprekkeestimatet blir for lavt. Dette kan ses i figur 7.7 hvor plottet viser programmets utregning av regresjonen.



Figur 7.7: Lineærregresjon av sprekkestørrelse. Regnet for et endimensjonalt tilfelle. Samme data som i figur 7.6

I figur 7.7 kan regresjonslinjen og sprekkevidden for  $\sum b^2 \cdot w$  sees. Merk at *RTGC* ikke har noen mulighet til å estimere den endimensjonale sprekkevidden  $w$ .  $w$  er derfor satt statistisk til 10 m i hele denne oppgaven. Programmet gjør en regresjon for både endimensjonal og todimensjonal strømning, men viser kun plott av en. All regresjonsinfo vises i en egen informasjonsboks, se figur 7.8

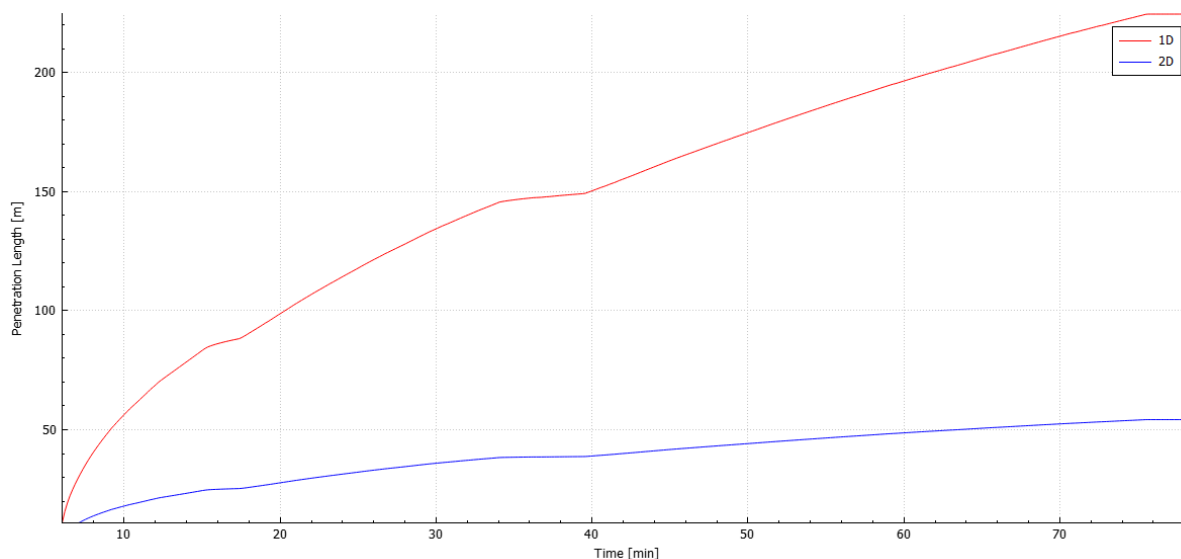
```

Chosen mainDimentation: 1 with value: 1.107
-----Fracture Aperture Analysis-----
Fracture dim Regressions (y = a + b*x:
    1D: a = 0    b = 8.2451e-07
    2D: a = 0    b = 7.0954e-13
This equates to model fracture apertures:
    1D: 0.00028714 [m]
    2D: 8.9192e-05 [m]
    
```

Figur 7.8: Regresjonsinformasjon fra programmet.

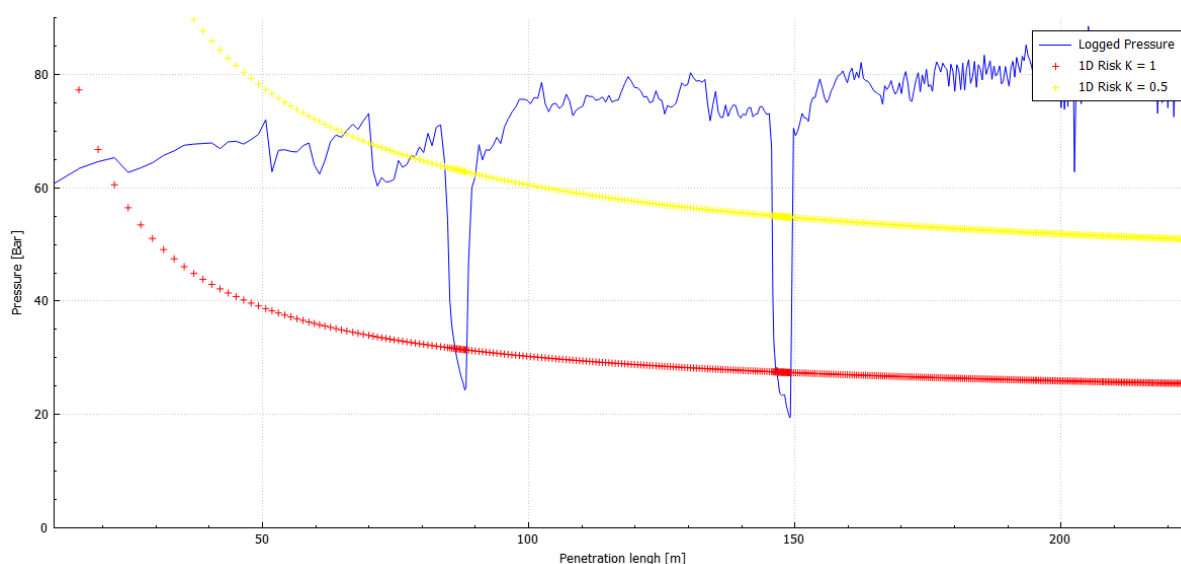
## 7.4 Beskrivelse og tolkning

Figur 7.9 viser et penetrasjonsplott for injeksjonen med sprekkestørrelsen som funnet over. Det er en betydelig forskjell mellom penetrasjonsestimatet for endimensjonal og todimensjonal strømning. Dette skyldes at den endimensjonale strømmingen korrelerer linært ( $V = a \cdot w \cdot I$ ) med injisert volum. For todimensjonal strømning er penetrasjonlengden kvadratisk ( $V = \pi \cdot I^2 \cdot a$ ) hvor  $a$  er sprekkestørrelsen,  $I$  er penetrasjonen og  $w$  er sprekkebredden for det endimensjonale



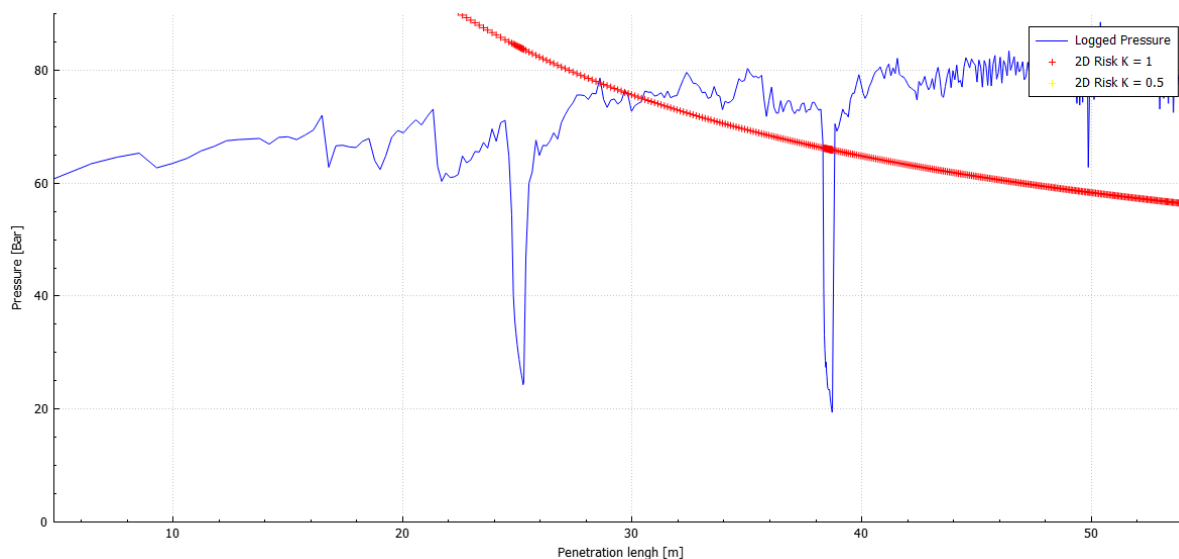
Figur 7.9: Penetrasjonsplott fra programmet

tilfellet. Det høye penetrasjonsestimater kan virke for stort. Modellsprekken som *RTGC* estimerer er en sum av alle sprekker i berget. Det kan derfor argumenteres at om den virkelige situasjonen er flere sprekker som fylles endimensjonalt så vil den faktiske penetrasjonen i hver sprekk være en brøkdel av det estimerte. At *RTGC* ikke kan gi noen indikasjon på dette svekker tilliten til estimatet. Det høye penetrasjonsestimater påvirker også faren for oppløftning i stor grad. Dette er vist i figur 7.10 hvor overdekningen er satt til 40 meter med en bergartsegenvekt på  $30\text{ KN/m}^3$ .



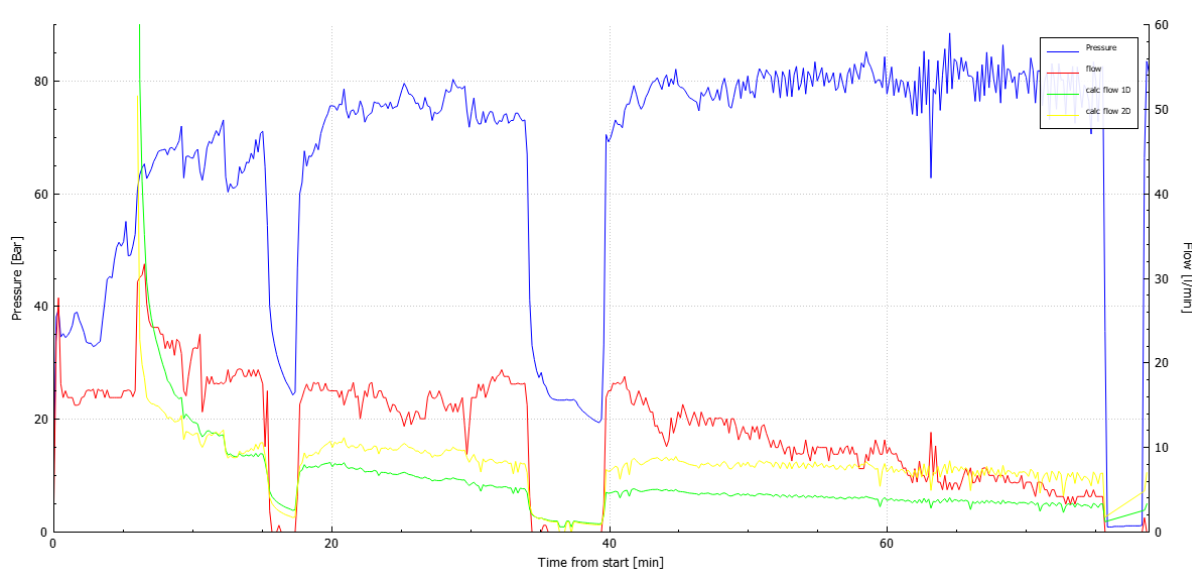
Figur 7.10: Fare for oppløft, 1D. K representerer  $k$  i ligning 6.29, 6.33

I figur 7.10 er nesten hele injeksjonen innenfor området for fare for jekking. For todimensjonal spredning er oppløftningsplottet som vist i figur 7.11.



Figur 7.11: Fare for oppløft, 2D. K representerer  $k$  i ligning 6.29, 6.33

Forskjellen i estimatet for faren for oppløftning er stor, men begge tilfeller estimerer *RTGC* at jekking skal kunne forekomme. Programmet gir også en estimert strømming for både en- og todimensjonal strømming. Dette er vist i figur 7.12. I plottet sees den kalkulerete strømmingen fra injeksjonstrykket gitt av *RTGC*. Sprekkestørrelsen som er brukt er den samme som ble beregnet i regresjonsanalysen. Likt for begge strømningsdimensjonalitetene er at de estimeres for lav strømming. Dette kan skyldes regresjonsmetoden. Det kan være at sprekkeregresjonen heller burde ha vært implementert som et snitt eller median av sprekkeverdiene.



Figur 7.12: Strømningsplott



## 8 Injeksjonsforsøk

Det finnes ingen direkte metoder for å måle hvor langt injeksjonsmassen trenger inn i berget. Under injeksjon kan det hende at injeksjonsmasse går ut i dagen eller har utgang andre synlige steder, men anvendelig data på dette finnes ikke. Under injeksjon i bergtuneller blir det ført logg over hullforbindelser og utgang på stuff, men dette kan heller ikke brukes til å verifisere om penetrasjonsestimatene stemmer. Dette forsøket fokuserer derfor ikke på penetrasjonsverifisering, men på strømningsestimatene til *RTGC*. I samarbeid med *Veidekke* og *Statens Vegvesen* er det utført et injeksjonsforsøk på tunellprosjektet E39 Svevatjørn–Rådal. Dette kapittelet tar for seg forsøksidéen, prosedyren og resultatene fra forsøket.

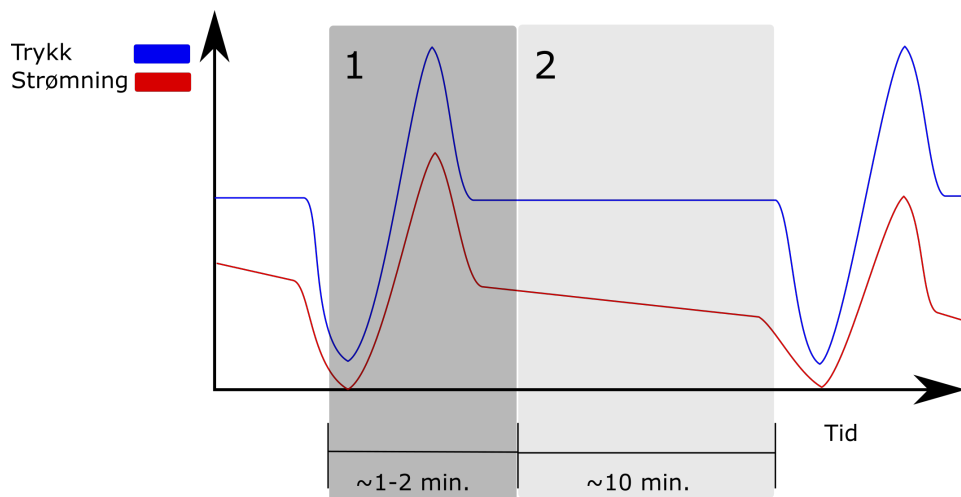
### 8.1 Forsøksoppsett og idé

Siden det ikke er mulig å måle spredningen til injeksjonsmassen er det forsøkt å se på om *RTGC* klarer å estimere korrekt andre effekter under injeksjon. Med inspeksjon av de kalkulerte strømningsgrafene fra *RTGC*-programmet og formelverkforståelsen sees det at strømmingen følger bevegelsene til injeksjonstrykket, men mer dempet og minkende etter hvor lang tid det har blitt injisert. Forsøksidéen for å teste *RTGC* er å utføre injeksjon på en systematisk måte for å kunne se på enkeltvariablene i metoden. For å få forsøksstilgang var det også viktig at forsøket ikke hindret vanlig injeksjonsarbeid i særlig grad.

I *RTGC* er strømmingen gitt av trykk, tid, strømningsdimensjonaliteten og sementparameterne. Om sementparameterene og dimensjon holdes konstant er det kun tid og trykk som er variablene i metoden. Dette illustreres i ligning 8.1.

$$f(p,t) = Q \tag{8.1}$$

Hvor  $p$  er trykk,  $t$  er tid og  $Q$  er strømning. Ved å injisere på en systematisk måte er det mulig å isolere både tid og trykk for å se om de grunnleggende sammenhengene i *RTGC* stemmer. Forsøksprosedyren er illustrert i figur 8.1.



Figur 8.1: Skissert systematisk injisering.

Figur 8.1 viser skissert hvordan forsøket skal utføres. Den blå grafen representerer trykket mens den røde representerer strømningen som forventes. Forsøksideen kommer frem i region 1 og 2. I region 1 senkes trykket til stans i strømning. Deretter økes trykket før det reduseres til det opprinnelige trykket. Dette vil teste den virkelige sammenhengen mellom trykk og strømning. På grunn av den korte tiden antas endringen i penetrasjon og tid som tilstrekkelig liten til å kunne ignoreres. Beskrevet som en funksjon kan forholdet mellom trykk og strømning uttrykkes som ligning 8.2.

$$f(p, \Delta t = 0) = Q \quad (8.2)$$

I tillegg til å utføre prosedyren i region 1 systematisk skal den også utføres rett etter en eventuell jekking. Dette vil avsløre sammenhengen mellom trykk og strømning både over og under jekkestrykket samt skillet mellom disse to regimene. Dette vil teste om det som antas om strømning under jekking stemmer, se figur 6.14. Sammenhengene funnet i forsøket kan også bidra til bedre identifisering av jekking og muligens predikasjon. I region 2 holdes trykket konstant og man kan måle responsen til strømningen utfra tid med konstant trykk, se ligning 8.3.

$$f(\Delta p = 0, t) = Q \quad (8.3)$$

Sammenhengene funnet i forsøket, ligning 8.2 og 8.3, vil så bli sammenlignet med sammen-

hengene produsert av *RTGC* for å vurdere om det er overenstemmelse mellom modellen og virkelige verdier.

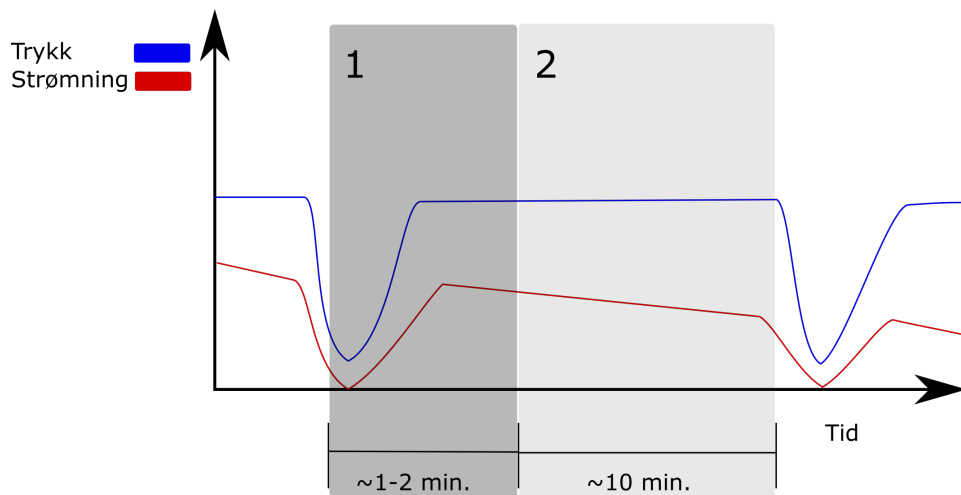
## 8.2 Forsøksutførelse

Injeksjonsforsøket ble utført på tunellprosjektet E39 Sveгатjörn–Rådal rett sør for Bergen, se figur 8.2. Forsøket ble utført med to forskjellige injeksjonsrigger. En fra *Atlas Copco* og en fra *AMV*. Loggefrekvensen til *AMV*-riggeren var for lav og uregelmessig til å gi anvendbare data. Forsøket var velykket med *Atlas Copco*-riggeren med en loggefrekvens på  $0.1\text{ Hz}$  (vært tiende sekund). Etersom forsøket, spesielt for testing av sammenhengen mellom trykk og strømning (region 1), er avhengig av nøyktige og hyppige data var loggefrekvensen på grensen til å felle forsøket. Operatørene var klar over dette og ved å bruke nok tid på region 1 kunne nok datapunkter samles. Før forsøket ble det holdt en forsøkspresentasjon hvor forsøket ble forklart for entrepenør (*Veidekke*) og byggherre (*Statens Vegvesen*). Forsøket ble godkjent av byggherre, men injeksjonsoperatørene hadde noen innvendinger. I region 1 av forsøket (testing av trykk-strømning) var det foreslått å øke trykket til maskinkapasiteten av enten strømning eller trykk ble nådd før trykket skulle bli senket. Prosedyren til region 1 skulle også utføres umiddelbart etter en eventuell jekking. Dette ble avslått som farlig av injeksjonsoperatørene. Prosedyren til region 1 ble derfor endret til kun å gå tilbake til det opprinnelige trykket. Se figur 8.3.



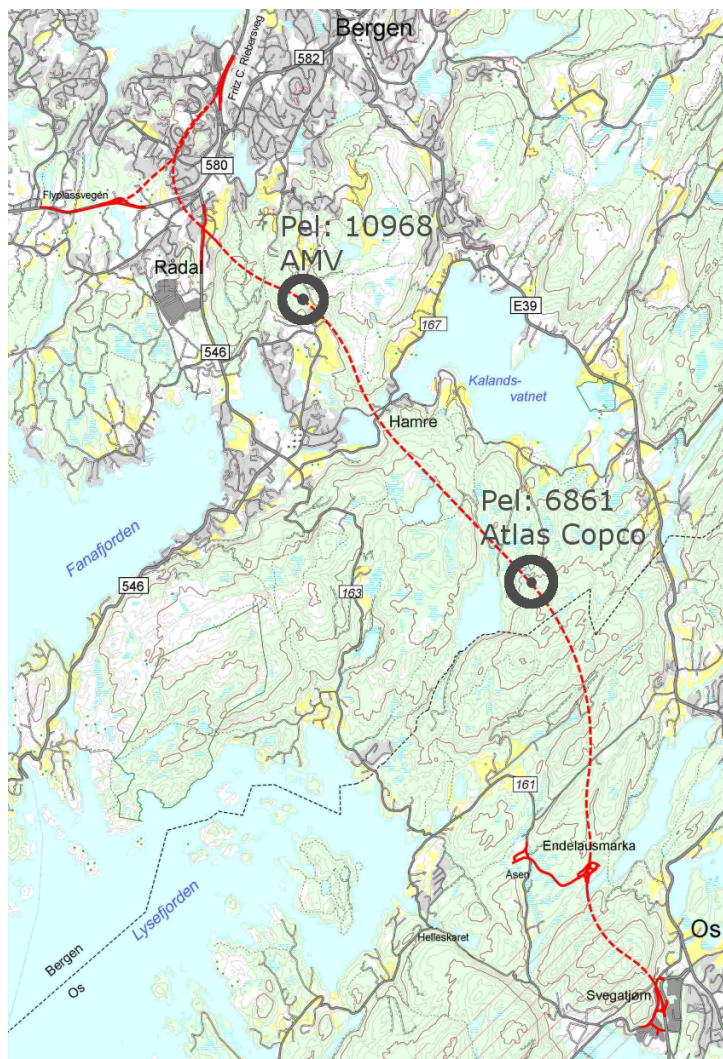
Figur 8.2: Bergen, Norge. Kart fra *NGU*[23].

Det var store forskjeller i egenskapene til injeksjonsriggerne. Riggeren til *AMV* var i stor grad datastyrt. Trykkbegrensning på maskinen måtte stilles inn gjennom et menysystem på en trykkskjerm. Under injeksjonen kunne operatøren styre strømningen med to forskjellige knapper, men maskinen var treg i responsen. Maskinen hadde hatt problemer med trykkslag når stempelpumpen endret slagretning noe operatørene mente var farlig. Dette hadde blitt fikset ved å gjøre stempelvingene roligere. Under injeksjon med *AMV*-riggeren var det mulig å i sanntid å se hvordan trykket endret seg i takt med stempelbevegelsen. Dette synes nødvendigvis ikke i injeksjonsloggene. Trykkoscilleringen i løpet av et stempelslag kunne variere med nesten 10 bar. I noen injeksjonslogger kan dette kjennes igjen ved at trykkgrafene har en markant sagtannform. *AMV*-riggeren brukte også lang tid på stans og start, kanskje som et resultat av endringene gjort



Figur 8.3: Utført systematisk injisering.

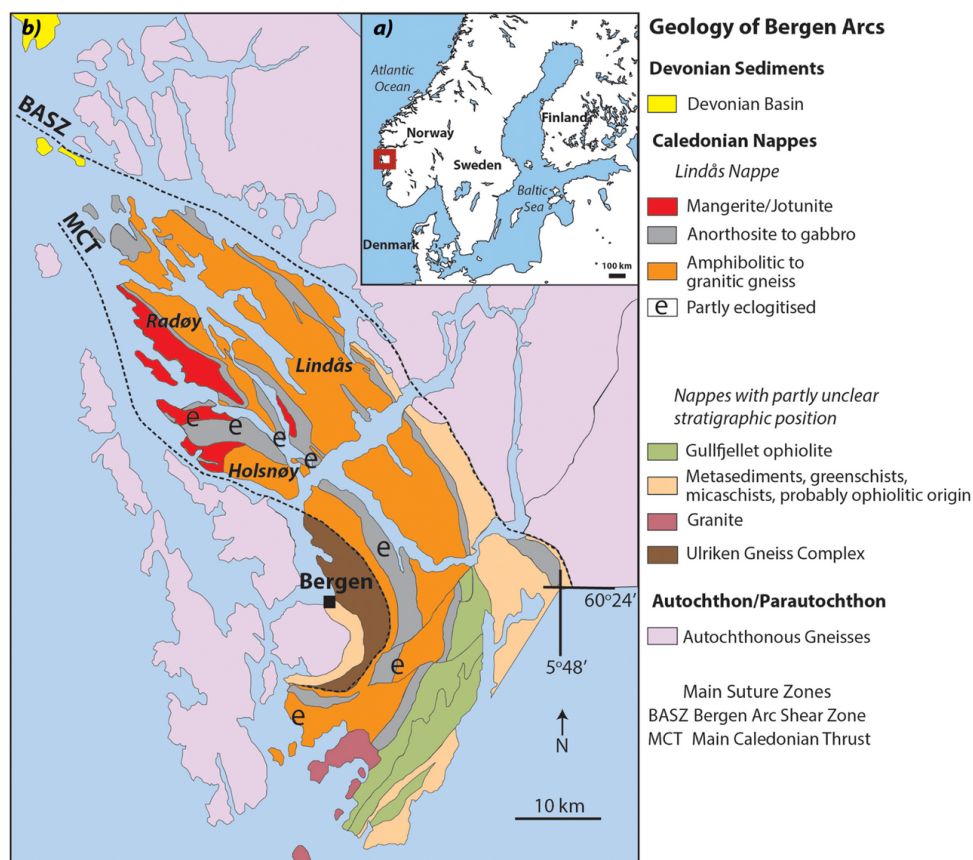
for å fjerne trykkslagene. *Atlas Copco*-riggen hadde to fysiske kontroller for å styre trykk og strømning. Dette gjorde maskinen bedre egnet til å utføre forsøket, men loggerintervallet på 10 sekunder er på grensen for et vellykket forsøk. Kontrollene var også vanskelige med en fin grense mellom ingen og betydelig strømning. Denne riggen hadde også et problem med en pumpe hvor den ene slagretningen hadde flere bars mindre trykk enn i den andre retningen. Dette skyldes trolig en slitt kulepakning. Figur 8.4 viser hvor i tunelltraséen forsøket ble utført og med hvilken maskin.



Figur 8.4: Kart over tunelltraséen. Forsøkslokalitetene er merket av med pelnummer og rigg som er brukt. Kart modifisert fra Vegvesenet [7].

### 8.3 Stedlig geologi

Tunelltraséen går igjennom flere deler av Bergensbuene. Bergensbuene består av metamorfe bergarter som utviser paragenese fra grønnskifer, ganulitt til eklogitt facies [27]. Bergensbuene ble dannet under den Kaledonske fjellkjededannelsen da platene Laurentia og Baltica kolliderte. Grunnleggende utforming av bergensbuene sees i figur 8.5.



Figur 8.5: Oversikt over geolgien i Bergen. Fra *Putnis m.fl.*[27]

Sammenlignes kartet over tunelltraséen med kartet over geologien synes det at tunelltraséen krysser flere deler av bergensbuene. I sør går tunnelen gjennom Gullfjellet ofiolittkompleks. Dette er tidligere havbunnskorpe som ble presset opp under fjellkjededannelsen [5]. Ofiolittkomplekset var opprinnelig basaltiske lavbergarter med intrusjoner av mørk amfibolitt og lys trondhemitt. I dag er komplekset omvandlet til foldede skifrige bergarter bestående av gabbro, grønnstein/grønnskifer, amfibolitt og hornblendeskifer [5]. Nord for Gullfjellet ofiolittkompleks møter tunnelen gabbro og amfibolittisk gneis i Lindåsdekket. Dette dekket består hovedsaklig av et kompleks av anortositt, mangeritt, granitt og øyegneis med båndede mafiske granulitter med lokale kvartsrike lag [27]. I dekket er det innslag av kvartsrike skifrede metasedimenter i Ulvengruppen [5]. Tunnelen krysser og områder med anortositt og gabbro. Tunnelens nordlige utløp er i Ulriken gneiskompleks.

### 8.3.1 Oppsprekking og styrkebetragtninger

Både langs og kryssende tunelløpet finnes det flere lokale og regionale svakhetssoner. I den nordlige delen, fra pel  $\approx 10400$  er det en stor regional svakhetsone som går parallellt med

tunelltraséen i nordlig retning. Under driving av tunellen ble denne funnet til å gå i selve tunelltraséen. Parallele sprekker i tunellretningen er en stabilitetsutfordring som ble løst med å benytte sprøytebetongbuer og bolting. De regionale svakhetssonene følger hovedsaklig større terrengformasjoner som forsynkninger, søkk og dalfører. Mindre lokale svakhetssoner følger hovedsaklig mindre terrengformasjoner og bergartsgrenser. Fra konkurranserapporten[5] for prosjektet er oppsprekkingsgraden og sprekkeretningene oppgitt som:

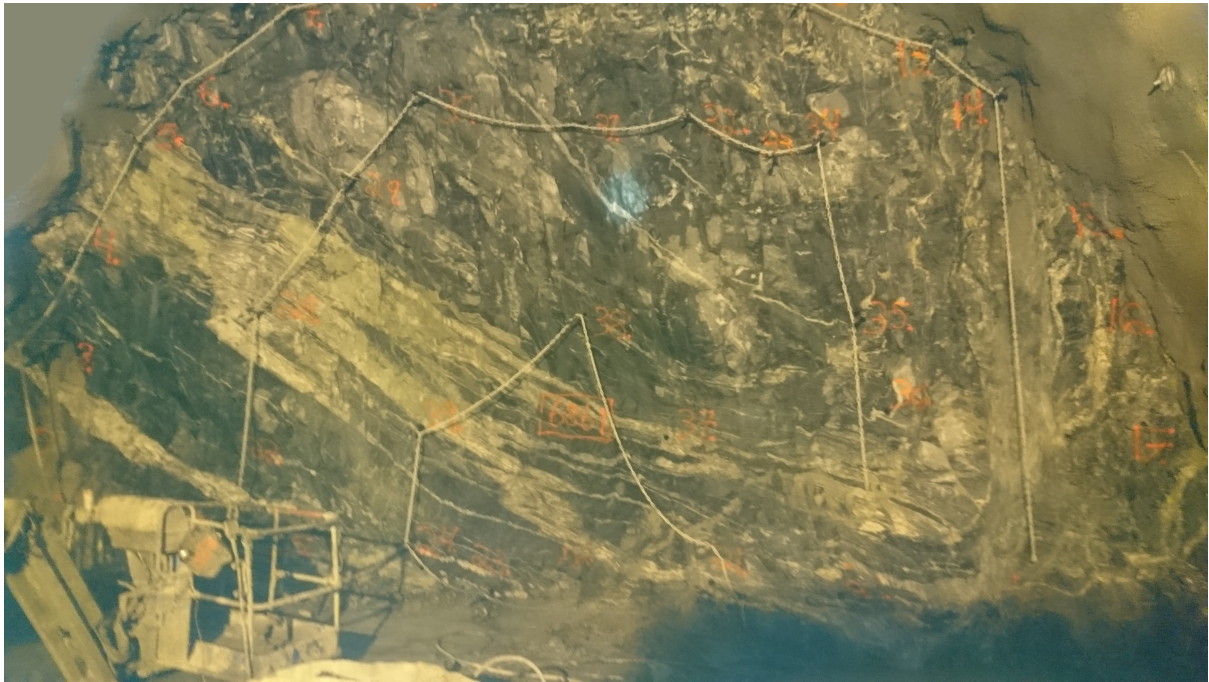
**Sydlig del:** Foliasjon og dominerende sprekkesystem med strøk SV-NØ. Fallretning hovedsaklig sydøstlig med fallvinkel på  $60^\circ$  til  $90^\circ$ . Sekundært sprekkesystem med strøk SØ-NV med tilnærmet vertikalt fall. Fra pel 6000 endrer sprekkemønsteret seg gradvis.

**Nordlig del:** Mer uregelmessig sammenlignet med den sydlige delen. Dominerende sprekkesystem N-S med steile fallvinkler. Et annet sprekkesystem følger foliasjonen med generelt strøk Ø-V og fallvinkler fra  $30^\circ$  til  $60^\circ$  mot syd. Et tredje system forekommer med strøk SØ-NV med varierende steile fallvinkler.

## 8.4 Beskrivelse av geologien på stoff

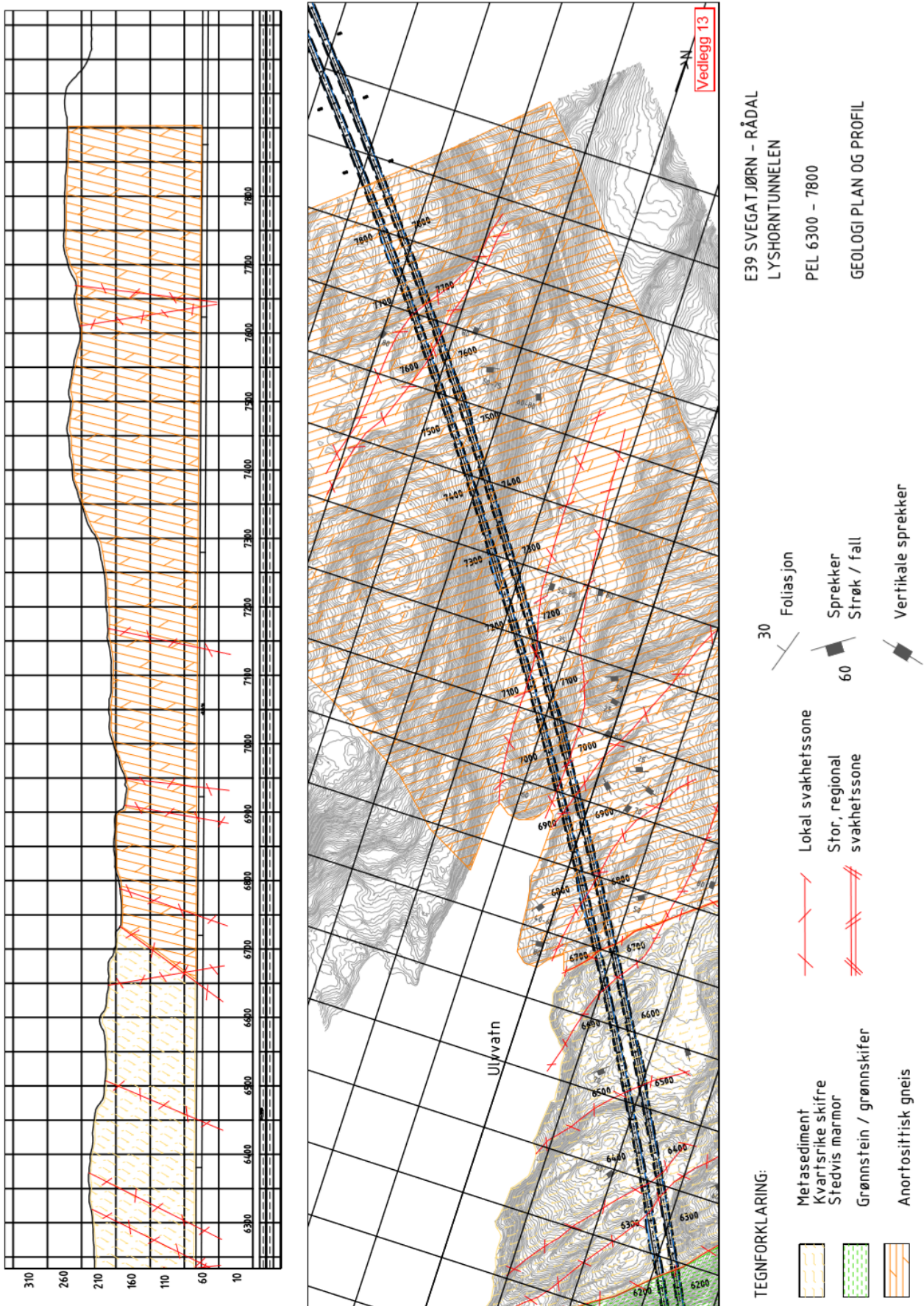
Injeksjonsforsøket ble utført på to forskjellige lokaliteter i tunellen. En på pel 10968 liggende i Ulrikken gneiskompleks med *AMV*-riggen og på pel 6861 liggende i Lindåsdekket med *Atlas Copco*-riggen. På grunn av forskjeller i injeksjonsriggene var forsøket kun vellykket med *Atlas Copco*-riggen. Data kun fra denne stoffen er derfor brukt og beskrevet. Ingeniørgeologisk kart over området og tunelltraséen ved pel 6861 er gitt i figur 8.7. Ved pel 6861 er bergarten oppgitt som anortosittisk gneis i det ingeniørgeologiske kartet. Dette samsvarer med den stedlige geologien beskrevet tidligere. Det drives mot sør og rundt pel 7000 hadde det vært store utfordringer med innlekkasje. På pel 6861, hvor forsøket fant sted, var det bedre forhold. I figur 8.6 er injeksjonstuffen vist. Berget blottstilt i stoffen er tydelig foliert med markante lysere lag. Bergarten ble på stedet identifisert som gneis. De lysere lagene ble identifisert som hovedsaklig grovkornet kvarts med noe alkalifeltspat. Dette stemmer godt med den stedlige geologien. På høyre side var det en steil, rent utsprengt flate som skilte seg fra den øvrige stoffoverflaten. Strøketretningen var tilnærmet N-S med et nærmest loddrett fall svakt mot øst. Dette stemmer overens med sprekkesett tilhørende den nordlige delen av tunellen. Fra kartet på figur 8.7 er det markert et tilsvarende strøk/fall i nærheten ( $\approx$  N-S m/  $70^\circ$  fall mot øst). Den observerte flaten kan derfor tolkes som del av et sprekkkeplan og ikke en tilfeldighet av sprengningen. Andre

tydlige egenskaper ble ikke observert. På bildet av stoffen synes sikringen gjort for å hindre at injeksjonstavene skal kunne skyte ut.



Figur 8.6: Bilde av tunellstiffen. Øvre venstre hjørne er redigert for å fjerne blits. Eget foto.





Figur 8.7: Oversikt over geologien i Bergen. Fra vedlegg til konkurransegrunnlaget [5]

## 8.5 Resultater

Resultatene i forsøket er fremstilt ved å bruke C++/Qt-programmet for å finne *RTGC*-parametere for sprekkestørrelse og penetrasjonslengde for hvor i injeksjonen forsøket fant sted. Deretter er en forenklet utgave av *RTGC* implementert i Python brukt til å plote den loggede strømmingen mot verdiene til *RTGC* for konstant trykk og konstant tid. I Pythonprogrammet brukes verdier fra C++/Qt-programmet, men verdiene har blitt justert noe for å kompensere for under/overestimering. Siden hensikten med forsøket er å teste de grunnleggende sammenhengene i *RTGC* vil dette potensielt være i *RTGC*s favør. Tolkningen av resultatet er visuelt etter hvor god sammenfallelse det er mellom grafene til *RTGC* og de loggede verdier fra forsøket.

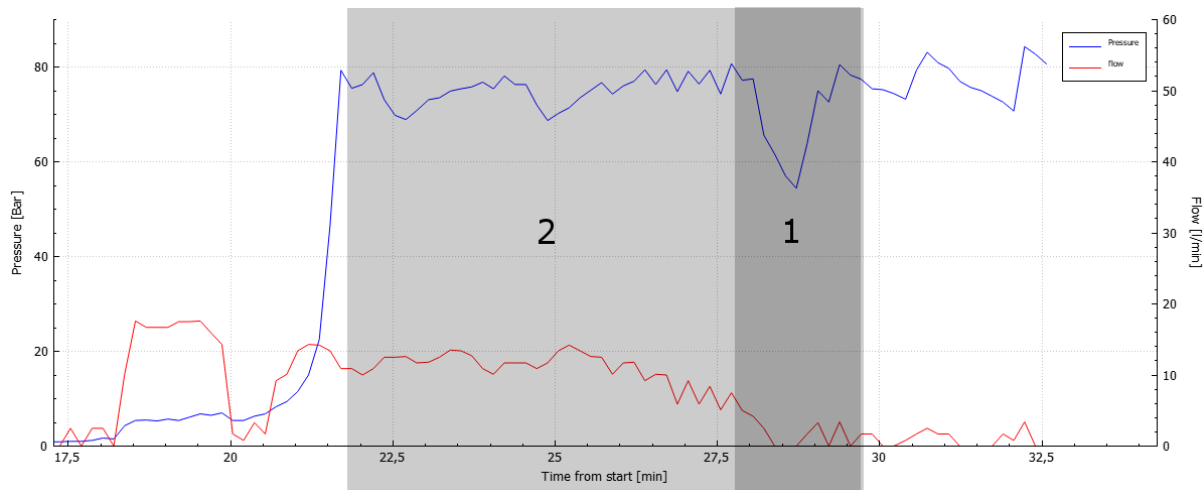
Det ble benyttet w/c ratio på 1.0 i alle forsøkshullene. De faktiske reologiske egenskapene til sementen som ble brukt er ikke kjent. Verdiene for sement C i kapittel 3 er derfor benyttet. Verdiene er gjengitt i tabell 8.1 sammen med overdekningen og sprekkebredden for 1D. Andre parametere synes i resultatgrafene. Grunnvannstrykket er satt 1 bar lavere enn et hydrostatisk trykk fra en uavbrutt vannsøyle med høyden til overdekningen.

	$\mu$ <i>mPa · s</i>	$\tau_{dyn}$ <i>Pa</i>	$r^2$	Overdekning <i>m</i>	Sprekkevide 1D <i>m</i>	Grunnvannstrykk <i>bar</i>
w/c		1.0		100	10	9
	44,4	2,9	0.994			

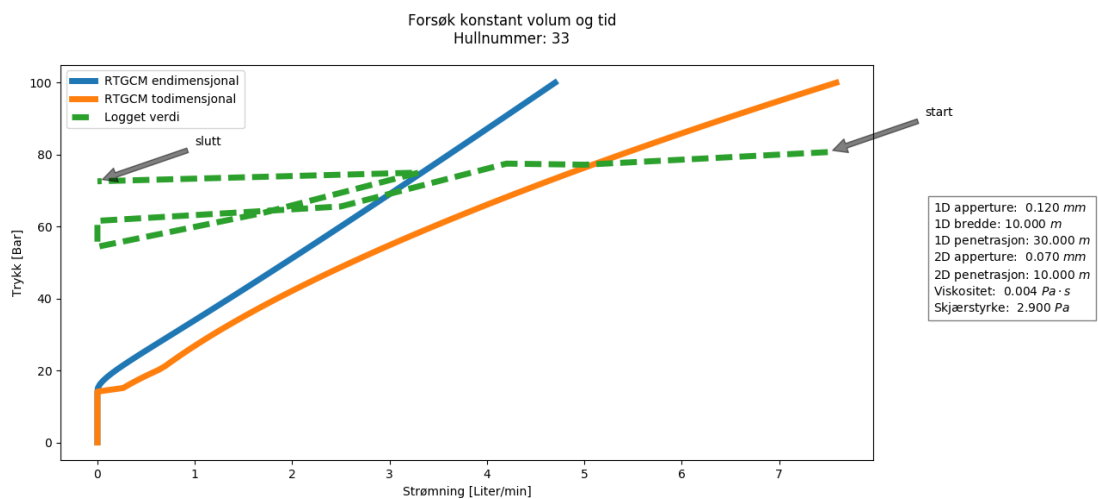
Tabell 8.1: Parametere satt i *RTGC* i forsøket

I oversiktsplottene produsert av C++/Qt-programmet er legenden vanskelig å se. Blå kurve representerer trykket og tilhører venstre y-akse. Rød kurve representerer strømmingen og tilhører høyre y-akse.

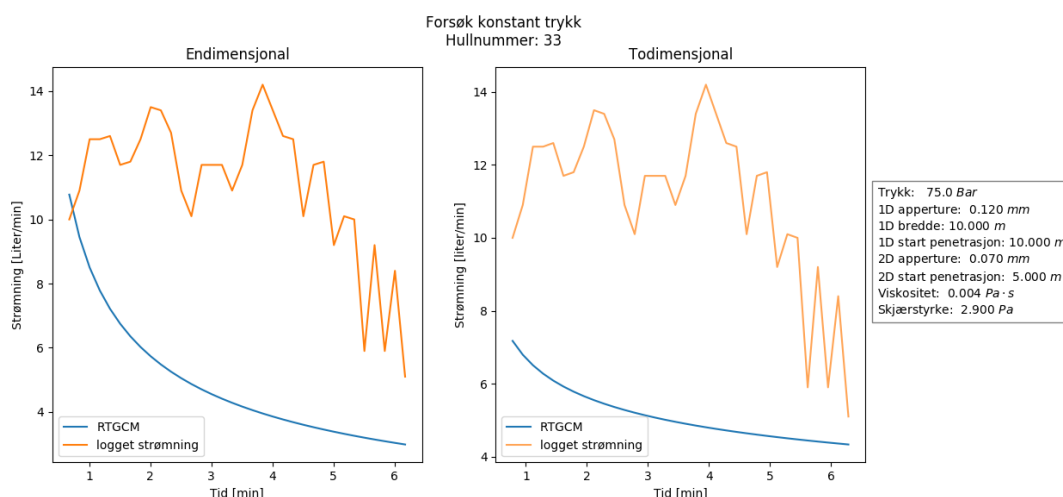
### 8.5.1 Hull 33



Figur 8.8: Injeksjonsserie for hull 33. Hvor i hullet forsøket er utført er merket iht. figur 8.3.



Figur 8.9: Teoretisk og logget trykk mot strømning med konstant tid. Hull 33, region 1 i figur 8.8.

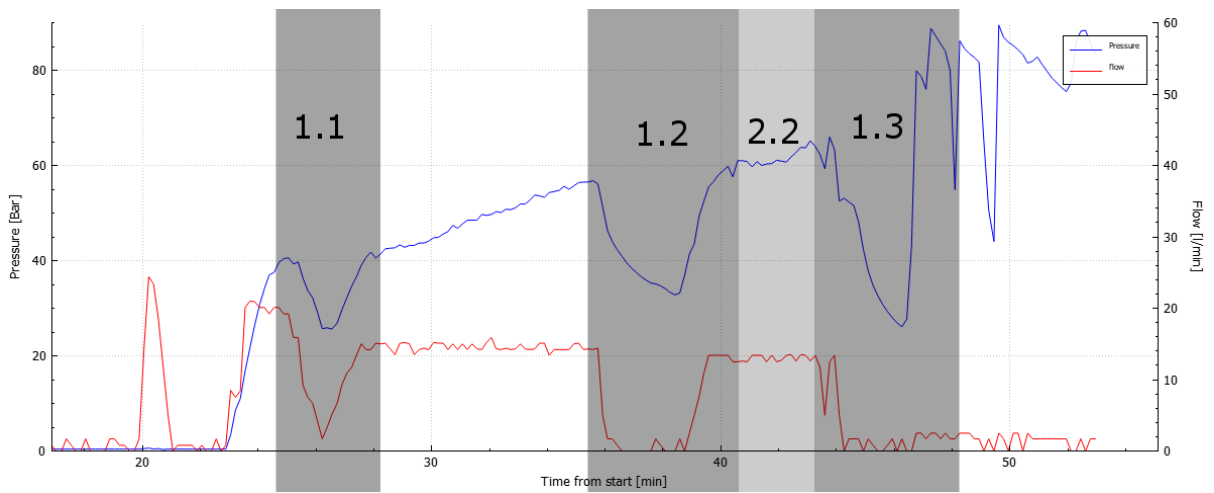


Figur 8.10: Teoretisk og logget strømning mot tid med konstant trykk. Hull 33, region 2 i figur 8.8..

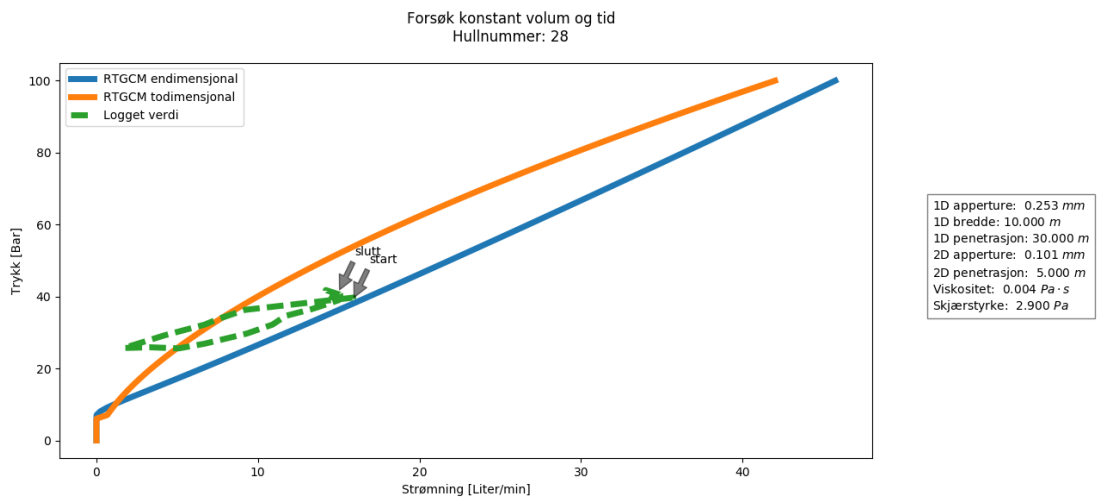
### Beskrivelse hull 33

Fra grafene til hull 33 (figur 8.8-8.10) er det dårlig korrelasjon mellom *RTGC* og de loggede verdiene. Figur 8.9 viser at *RTGC* forventer at det skal være strømning helt ned til  $\approx 15$  bars trykk. Dette stemmer ikke med de loggede verdiene hvor strømning stopper ved  $\approx 55$  bars trykk. Når trykket økes igjen kommer strømmingen kun midlertidig tilbake før den går tilbake til null. Figur 8.10 viser teoretiske verdier for strømmingen for et konstant trykk på 75 bar. Ingen av plottene har særlig god sammenfall mellom de verdiene fra *RTGC* og de loggede, selv om begge viser et fall i strømning. Mulig feilkilde er at trykket i loggserien varierer for mye til å kunne regnes som konstant.

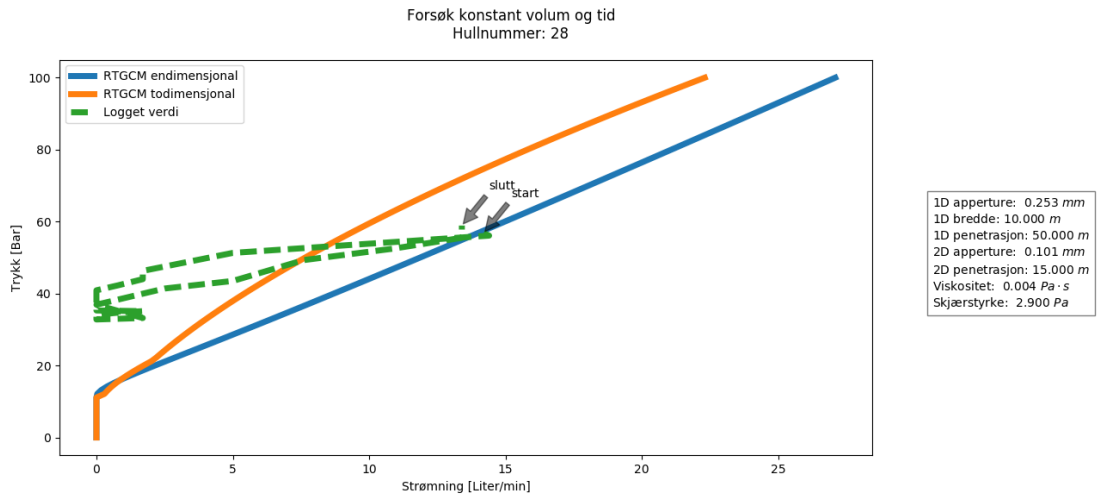
### 8.5.2 Hull 28



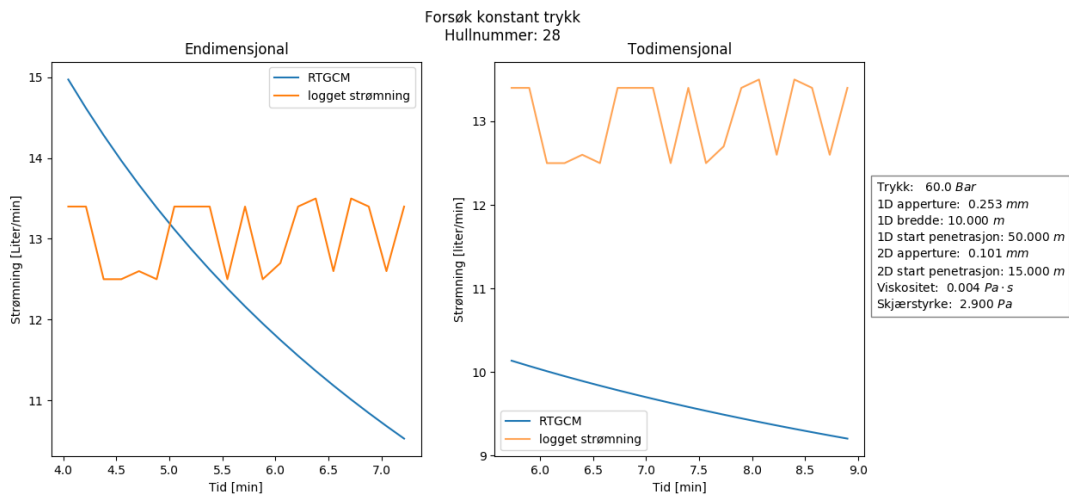
Figur 8.11: Injeksjonsserie for hull 28. Forsøksregionene er markert iht. figur 8.3.



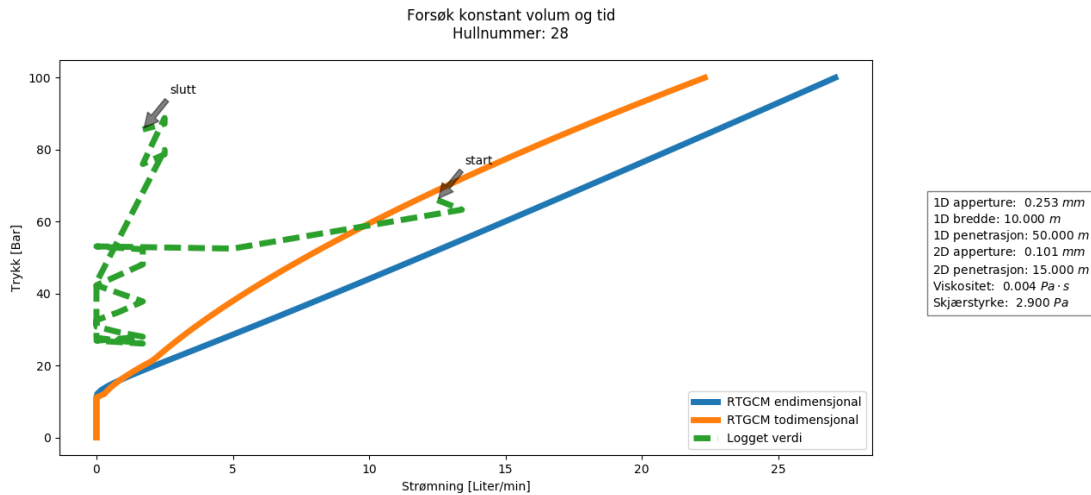
Figur 8.12: Teoretisk og logget trykk mot strømning med konstant tid. Hull 28, region 1.1 i figur 8.11.



Figur 8.13: Teoretisk og logget trykk mot strømning med konstant tid. Hull 28, region 1.2 i figur 8.11.



Figur 8.14: Teoretisk og logget strømning mot tid med konstant trykk. Hull 28, region 2.2 i figur 8.11.

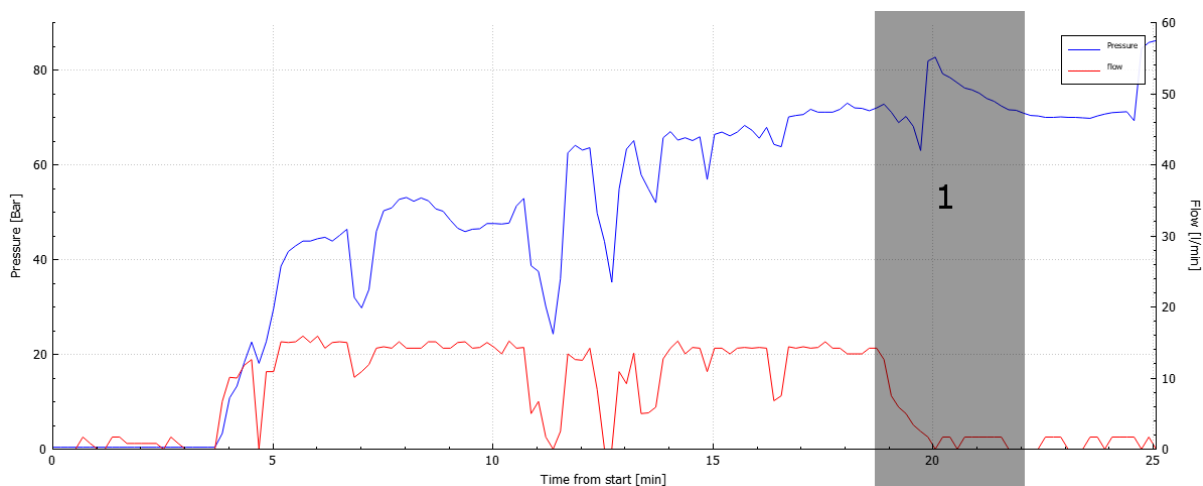


Figur 8.15: Teoretisk og logget trykk mot strømning med konstant tid. Hull 28, region 1.3 i figur 8.11.

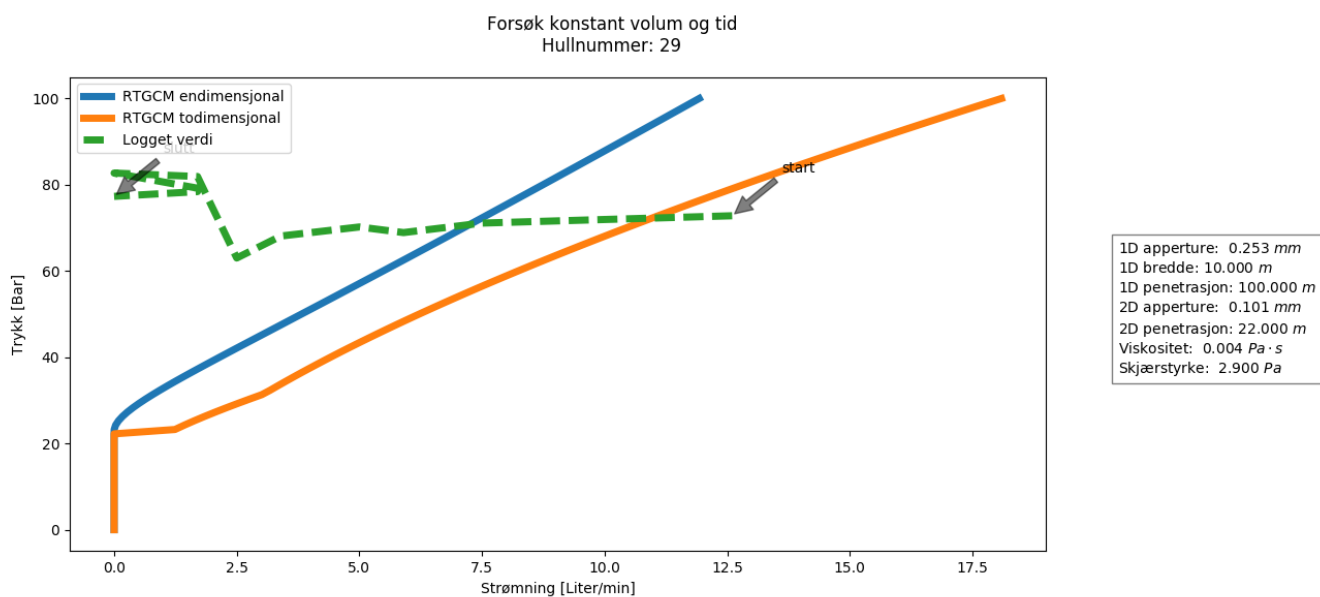
### Beskrivelse hull 28

For sammenhengen mellom trykk og strømning viser plottene til region 1.1 (figur 8.12) og 1.2 (figur 8.13) at *RTGC* estimerer ganske ganske bra. Men *RTGC* estimerer at strømningen gradvis skal minke ned til ingen strømning ved  $\approx 15$  bars trykk. De loggede resultatene viser at strømningen stopper ved et høyere trykk i begge tilfellene. Sammenhengen med tid i figur 8.14 viser en dårlig sammenheng i begge dimensjonstilfeller. Gradienten til det todimensjonale tilfellet stemmer ganske bra, men er 3 liter/min lavere enn den loggede verdien. Trykk-strømningssammenhengen for region 1.3 (figur 8.15) er interessant for etter stans i strømningen kommer ikke strømningen i gang igjen selv om trykket økes til nesten 90 bar. Dette er forskjellig fra region 1.1 og 1.2.

### 8.5.3 Hull 29



Figur 8.16: Injeksjonsserie for hull 29. Forsøksregionene er markert iht. figur 8.3.



Figur 8.17: Teoretisk og logget trykk mot strømming med konstant tid. Hull 29, region 1 i figur 8.16.

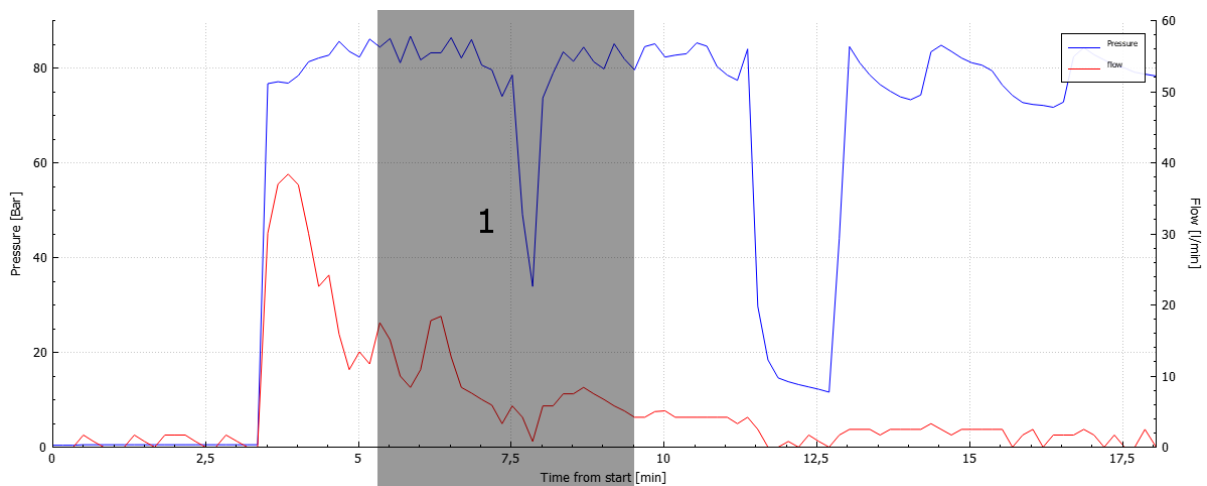
#### Beskrivelse hull 29

Det ble kun utført et forsøk av region 1 i hull 29. Figur 8.17 viser samme effekt som hull 28 i figur 8.15. Etter at trykket er senket til null strømming kommer ikke injeksjonen igang igjen. Forskjellen mellom 12 liter/min og 0 liter/min er kun 10 bar (73 - 63).

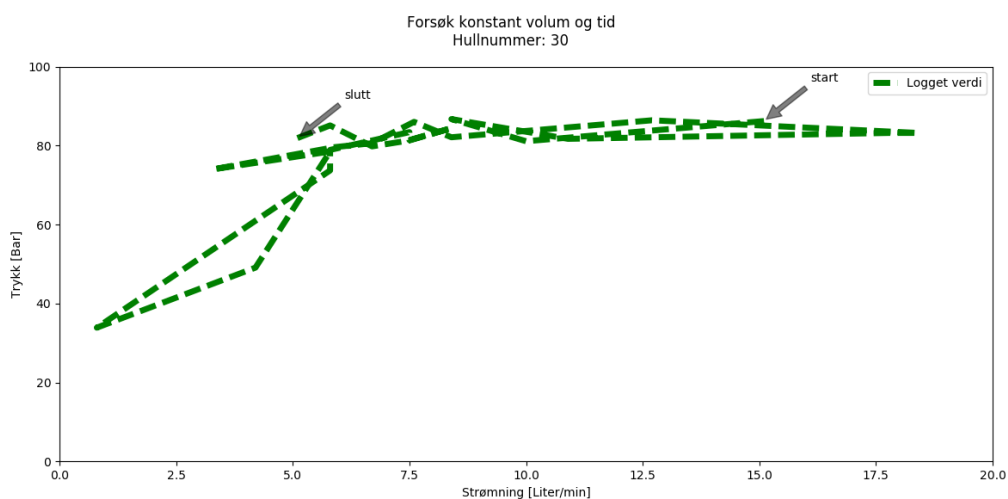


### 8.5.4 Hull 30

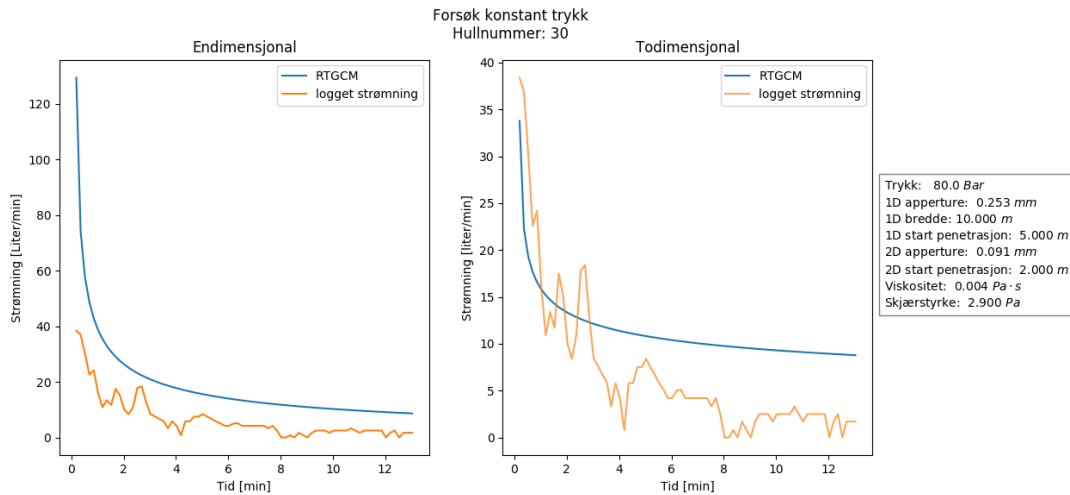
Hull 30, se figur 8.18, viser et injeksjonshull som allerede er fylt fra et annet hull. Dette sees ved at hullet umiddelbart har et høyt mottrykk. Et vanlig hullfyllingssenario ses i hull 33 (figur 8.8, min. 18-22). Av den grunn er det ikke mulig å bruke *RTGC* på vanlig måte siden metoden antar en startpenetrasjon fra injeksjonshullet. Det er derfor kun vist sammenhengen mellom trykk og strømning uten data fra *RTGC* i figur 8.19. Sammenhengen mellom strømning og trykk er lik kurven som forventes med et konstant trykk og hele injeksjonen har nærmest konstant trykk på 80 bar. Sammenhengen mellom strømning-tid er plottet med en startpenetrasjon nærme hullet se figur 8.20.



Figur 8.18: Injeksjonsserie for hull 30. Forsøksregionene er markert iht. figur 8.3.



Figur 8.19: Teoretisk og logget trykk mot strømning med konstant tid. Hull 30, region 1 i figur 8.18.

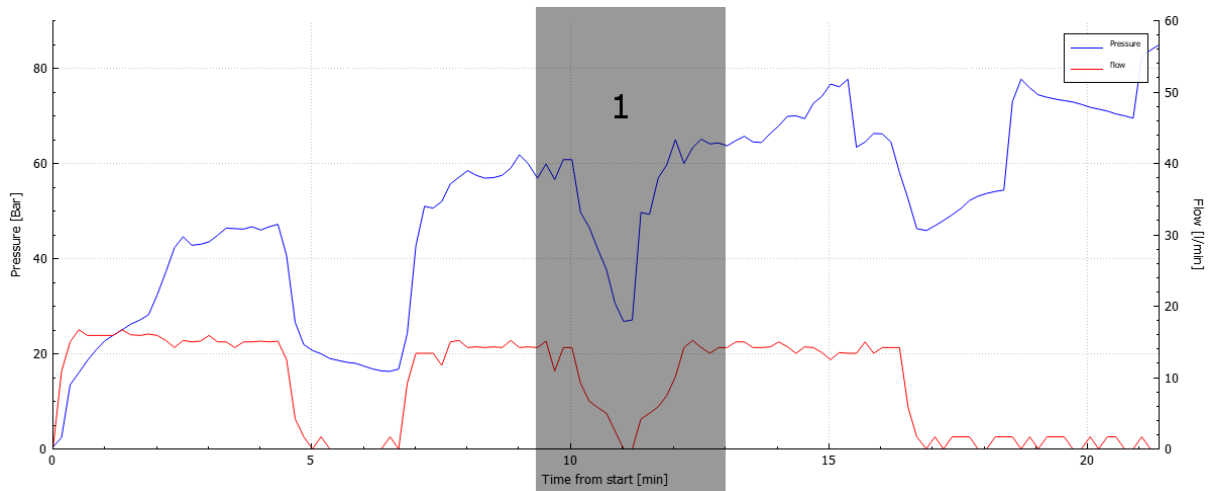


Figur 8.20: Teoretisk og logget strømning mot tid med konstant trykk. Hull 30.

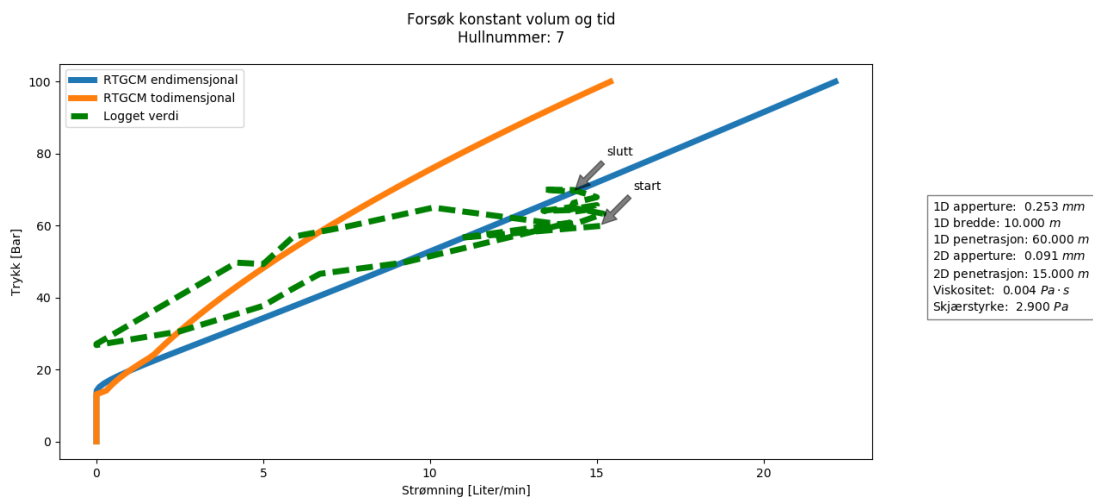
### Beskrivelse hull 30

I liket med tidligere hull viser hull 30 at stans i strømning inntreffer ved et høyt trykk. Dette kan skyldes at hullet var fylt eller at hullet ikke har forbindelse til noen utgang. Sammenhengen mellom tid og strømning, se figur 8.20, stemmer bedre overens med *RTGC*-kurven fra et startpunkt nærme injeksjonshullet.

### 8.5.5 Hull 7



Figur 8.21: Injeksjonsserie for hull 7. Forsøksregionene er markert iht. figur 8.3.



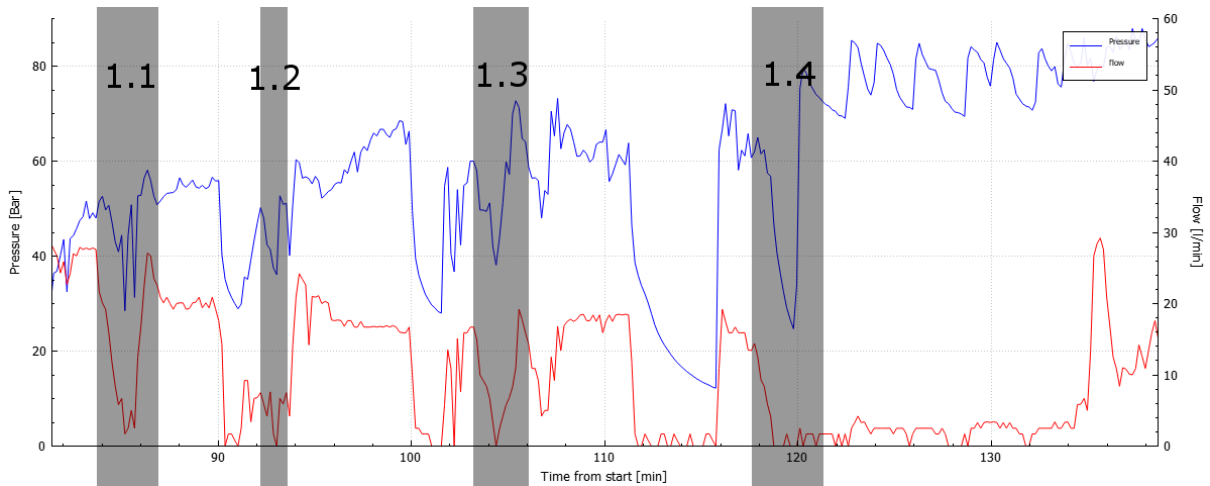
Figur 8.22: Logget trykk mot strømning. Hull 7, region 1 i figur 8.18.

### Beskrivelse hull 7

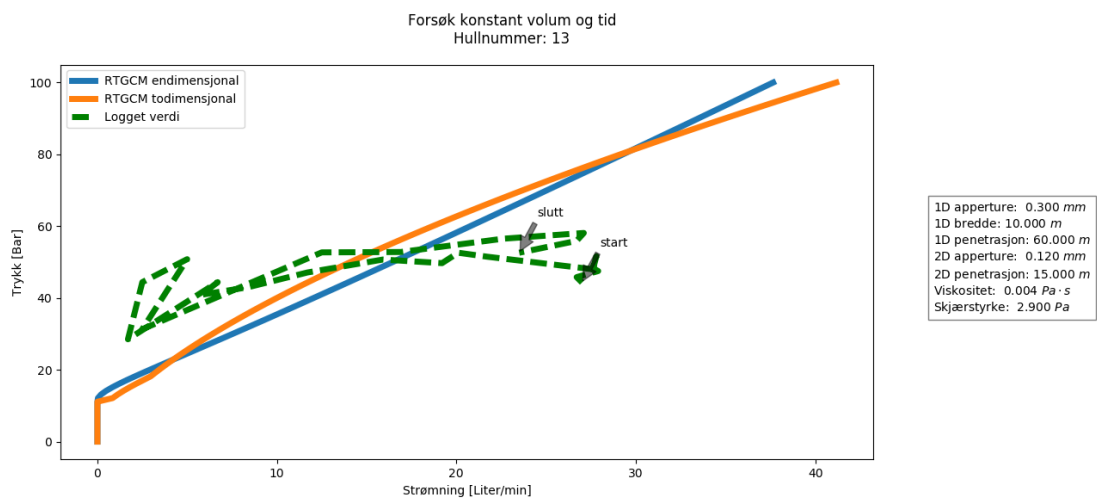
Det ble kun utført et forsøk i dette injeksjonshullet. Sammenhengen mellom trykk og strømning i figur 8.22 vider god sammenfallelse mellom *RTGC* og de loggede verdiene. Kurven for gjenstarten av strømmingen ligger høyere enn den nedadgående kurven. Dette betyr at det kreves høyere trykk for å sette injeksjonen i gang igjen.

### 8.5.6 Hull 13

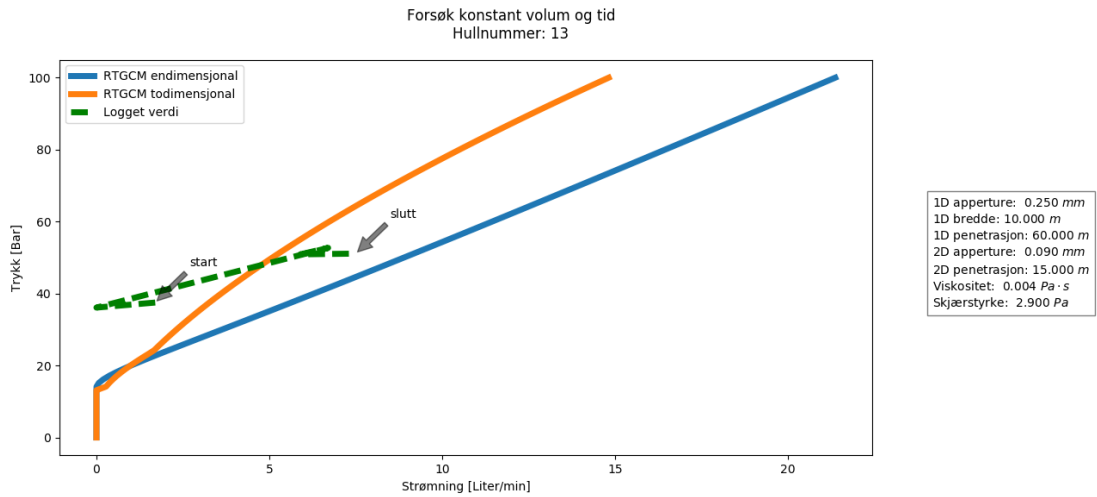
Hull 13 er del av en lang injeksjonsserie. Figur 8.23 viser et utsnitt av injeksjonen hvor forsøkene ble utført. Det ble kun utført forsøk tilhørende region 1.



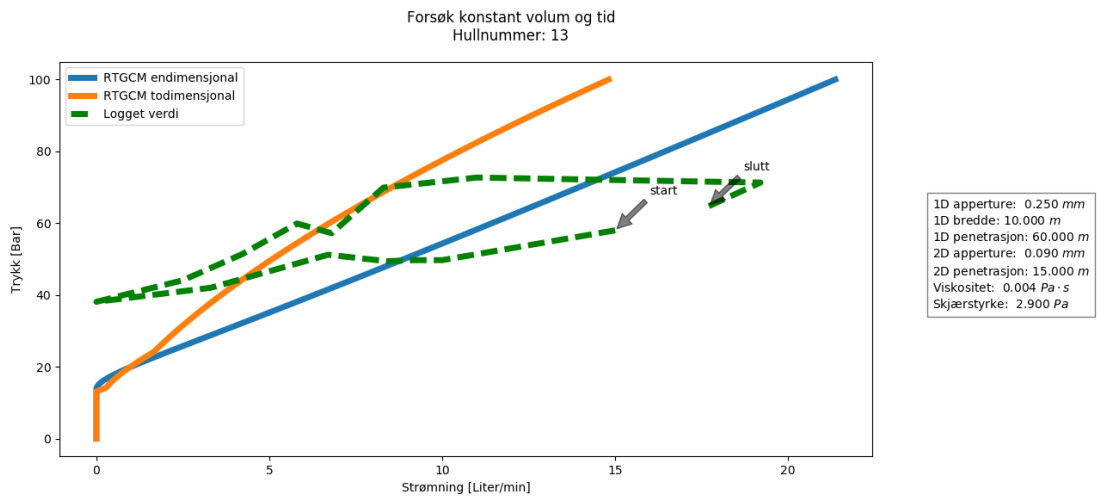
Figur 8.23: Injeksjonsserie for hull 13. Forsøksregionene er markert iht. figur 8.3.



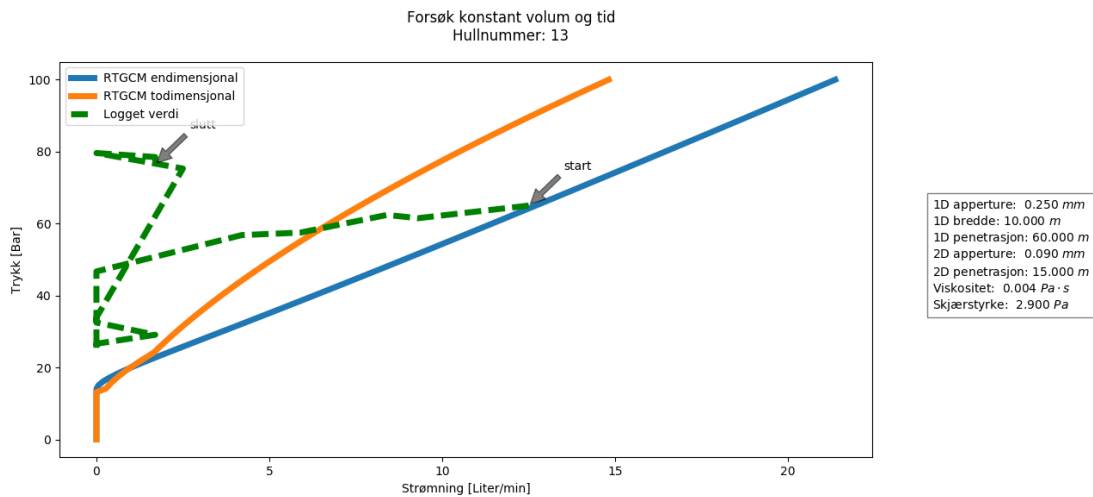
Figur 8.24: Teoretisk og logget trykk mot strømning med konstant tid. Hull 13, region 1.1 i figur 8.23.



Figur 8.25: Teoretisk og logget trykk mot strømning, konstant tid. Hull 13, region 1.2 i figur 8.23.



Figur 8.26: Teoretisk og logget trykk mot strømning med konstant tid. Hull 13, region 1.3 i figur 8.23.



Figur 8.27: Teoretisk og logget trykk mot strømning med konstant tid. Hull 13, region 1.4 i figur 8.23.

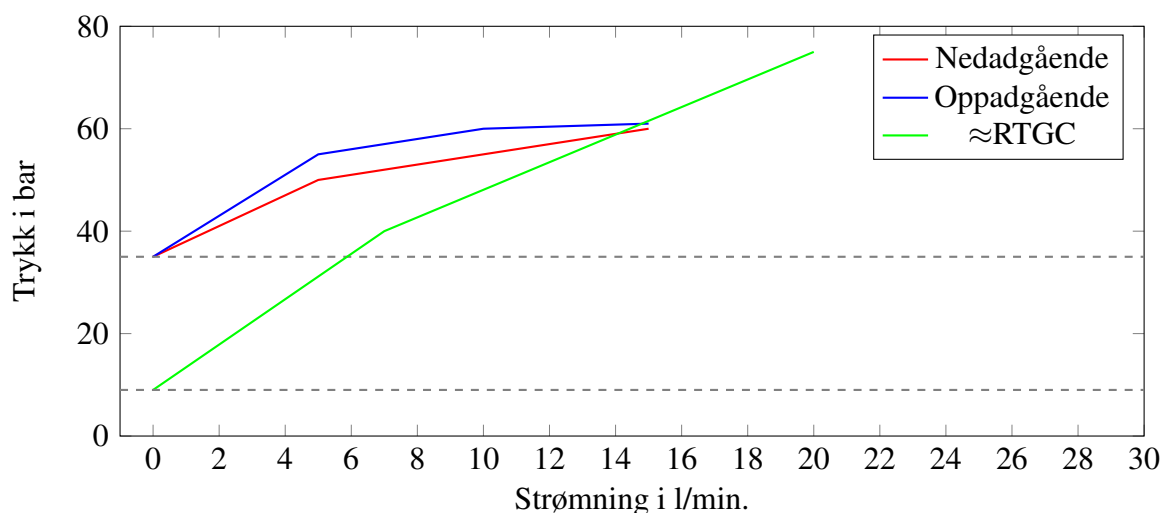
### Beskrivelse hull 13

Region 1.1 viser god sammenfallelse med verdiene fra *RTGC*. Resultatene av forsøkene i region 1.1 til 1.3 (figur 8.24 til 8.26) viser at strømningen stopper på et trykk høyere enn hva *RTGC* estimerer. Fra 1.4 (figur 8.27) viser at strømningen ikke kom i gang igjen selv med et trykk på 80 bar.

## 9 Forsøksobservasjoner og diskusjon

Resultatene fra injeksjonsforsøket viser hvordan strømmingen er avhengig av trykket under injeksjonen. På grunn av de få forsøkene med strømning mot tid diskuteres ikke dette. Fra forsøket er det trukket ut to observasjoner som diskuteres videre.

### 9.1 Observasjon 1

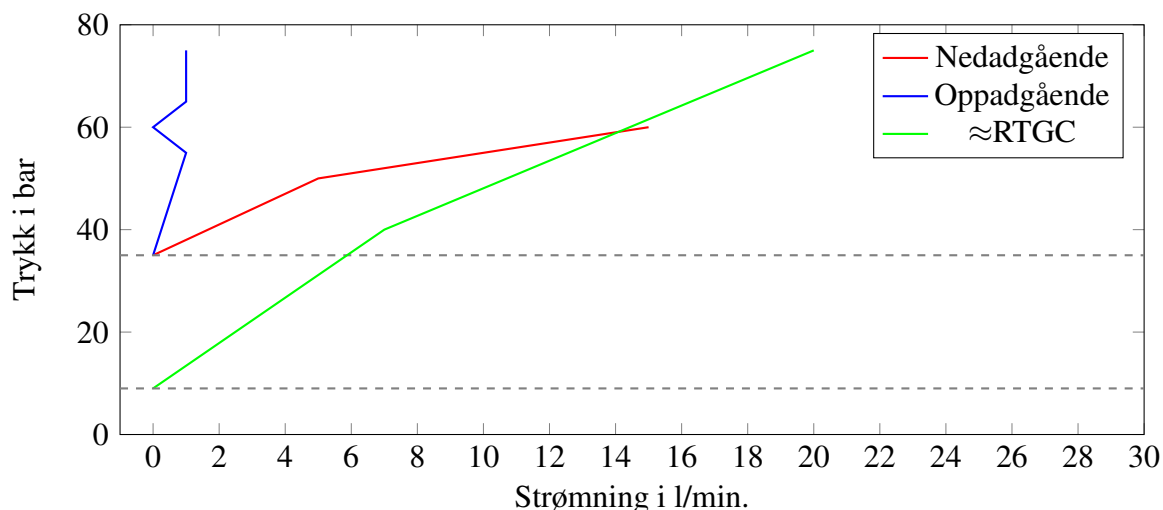


Figur 9.1: Skissert observert sammenheng mellom trykk og strømning i forsøket.

Figur 9.1 viser hvordan sammenhengen mellom trykk og strømning observert fra forsøket kan skisseres. Det krevdes mer trykk for å oppnå samme strømning etter stans i injeksjonen. Trykket hvor det sluttet å strømme var høyere enn det *RTGC* estimerte. Dette er markert i grafen med de gråstiplede linjene. Sammenhengen mellom trykk og strømning under injeksjonen var ikke kontinuerlig avtagende mot grunnvannstrykket slik *RTGC* estimerer. Det virker som om det eksisterer et brytepunktstrykk hvor strømning ikke lenger finner sted.

## 9.2 Observasjon 2

Et annet fenomen i forsøket var at strømmingen ikke kom i gang igjen etter at strømmingen var stanset. Dette er illustrert i figur 9.2.



Figur 9.2: Skissert observert sammenheng mellom trykk og strømning i forsøket når injeksjon ikke kom igang igjen.

Når strømmingen ikke kom i gang igjen var trykket hvor strømmingen stanset høyere enn det forventede fra *RTGC*. Likt som for observasjon 1 er dette illustrert med de gråstiplede linjene i figur 9.2. Forsøket fant sted i en foldet anortosittisk gneis med kun ett identifisert steilt sprekkeplan på stoff. For å forklare brytepunktstrykket funnet i forsøket foreslås det at i denne bergarten, i dette forsøket, er strømmingen avhengig av utvidelse av sprekken for å finne sted.

## 9.3 Forklaring på brytepunktstrykket

*Rafi m.fl.* [29] oppgir at den elastiske utvidelsen av sprekken som funksjon av avstanden til injeksjonshullet kan beskrives som:

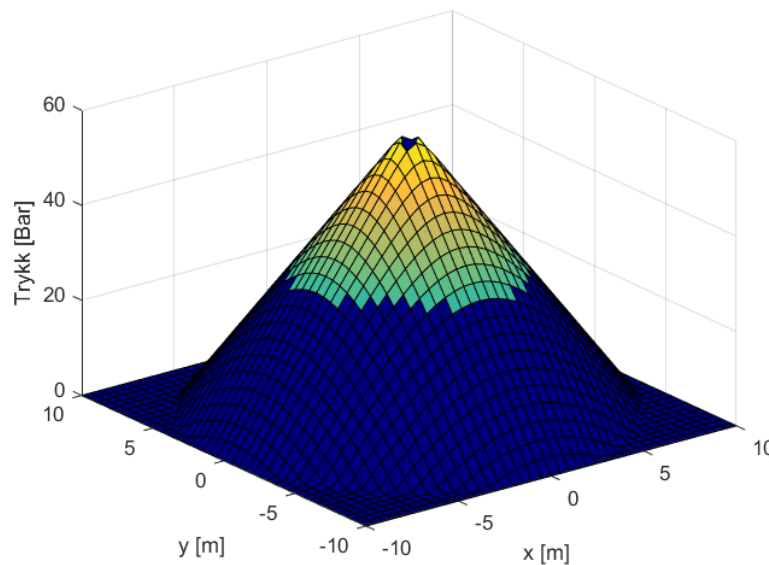
$$\Delta a(r) = \frac{4}{3} \cdot \frac{P_e}{E} \cdot \frac{r_c^2(1-\nu^2)}{r} \quad (9.1)$$

Hvor  $r$  er radius fra injeksjonshullet,  $P_e$  er trykk over de in-situ bergspenningene,  $\nu$  er poissonstall og  $E$  er E-modul for berget. Siden elastisk jekking ikke forekommer før trykket fra injeksjonsmassen i sprekken overstiger de in-situ spenningene som virker mot sprekkeplanet



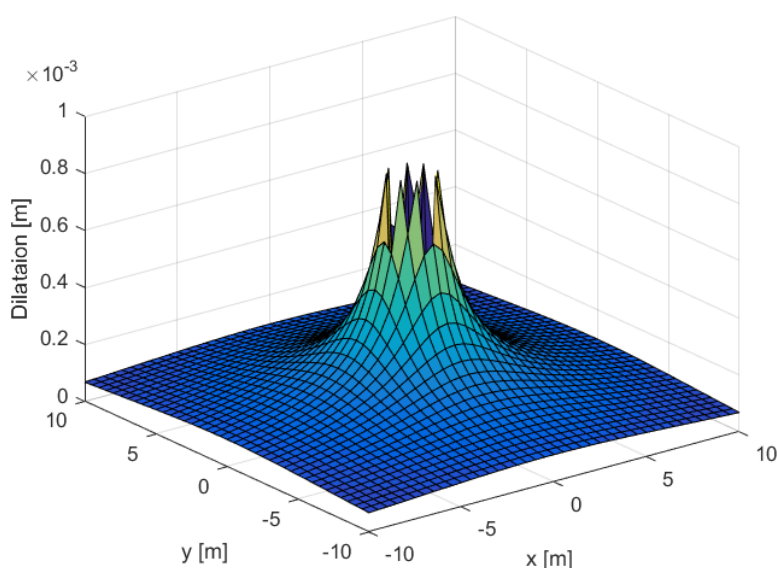
er dette en plausibel forklaring på brytepunktstrykket funnet i forsøket. De eksakte spenningsforholdene hvor forsøket ble utført er ikke kjent. En overdekning på 100 meter og egenvekt til berget på  $30 \text{ kN/m}^3$  resulterer i et vertikalt trykk på 30 bar fra egenvekten alene. Med poisson-tall på 0,2 resulterer dette i et horisontalt trykk på 7,5 bar.

Vestlandet er kjent for å ha høye tektoniske horisontale spenninger orientert normalt og parallelt med den Kaledonske fjellkjeden. For et sprekkeplan orientert vilkårlig i berget vil bergtrykket vinkelrett på planet minst være i intervallet  $\langle 7,5 \text{ } 30 \rangle$  bar og sannsynligvis høyere på grunn av et betydelig bidrag fra de tektoniske spenningene. Om strømmingen er avhengig av elastisk sprekkeutvidelse kan brytepunktstrykket og nedre grense for  $P_e$  antas å være det samme trykk. Med en antagelse om et lineært trykkfall i bergsprekken fra injeksjonshullet mot en injeksjonsfront 10 meter fra hullet, et injeksjonstrykk på 60 bar og brytepunktstrykk på 30 bar, kan  $P_e$  og flaten  $P_e$  virker over, regnes ut. Dette er vist i figur 9.3.



Figur 9.3: Illustrasjon over lineært trykkfall fra senter av et injeksjonshull.  $P_e$  har en fargegradient. Trykk under jekketrykket er blått. Laget i Matlab.

Bruk av formel 9.1 med bergartsdeformasjonsmodul på 100 GPa,  $P_e$  på 30 bar og et injeksjonstrykk på 60 bar blir den utregnede dilatasjonen av sprekken som vist i figur 9.4.

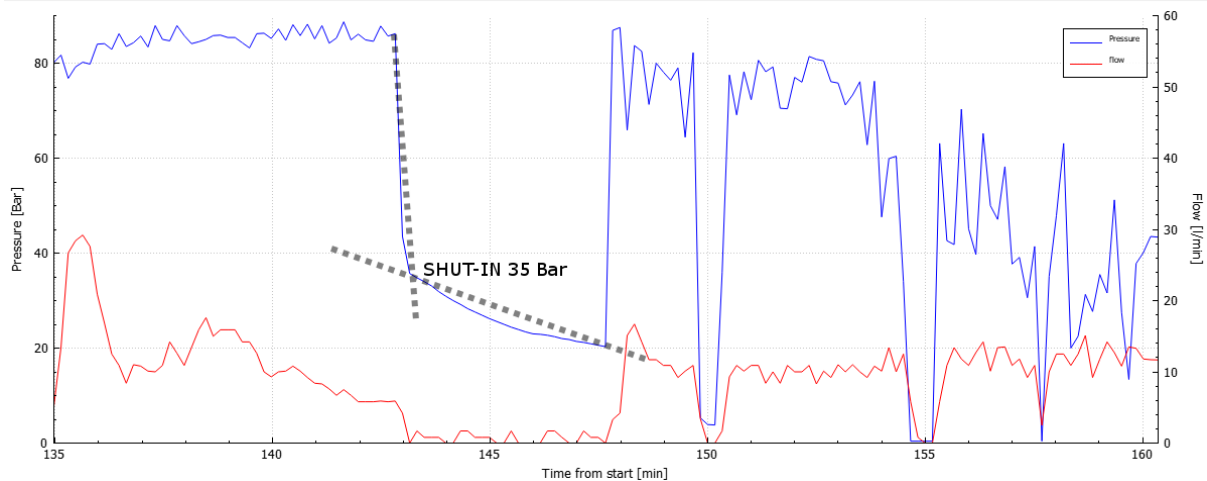


Figur 9.4: Elastisk dilatasjon av en sprekk. Laget i Matlab.

Figur 9.4 viser en betydelig deformasjon av sprekk. Sprekkestørrelsesverdier fra *RTGC* i forsøket var i intervallet  $\langle 0,05 \ 0,3 \rangle$  mm. En elastisk utvidelse med betingelsene over når opp til 0,8 mm. Dette ville ført til en betydelig lettere strømning inn i sprekk. Siden sprekkutvidelse som følge av elastisk jekking ikke estimeres av *RTGC* kan ikke denne effekten forklares med de antagelsene som *RTGC*-programmet legger til grunn. Det observerte brytepunktstrykket tolkes derfor til å være et mulig eksempel på elastisk utvidelse av bergsprekk. Andre forklaringer på brytepunktstrykket kan være at det er egenskaper med injeksjonsmassen som ikke er tilstede i *RTGC*. Krittikk av forklaringen er at den ikke forklarer hvorfor strømning ikke gjenopptas i alle tilfeller. Ifølge ligningene og antagelsene skal sprekkutvidelsen finne sted såfremt det er nok trykk i hullet. Dette er vist fra forsøket at ikke er tilfelle. En mulig forklaring er at antagelsen om trykkfordeling ikke stemmer. Dette er diskutert senere i oppgaven.

## 9.4 Trykkrespons ved stans i strømning

Et fenomen under injeksjon er responskurven til trykket når strømningen stanses. Disse kurvene blir her tolket på samme måte som responsen fra en hydraulisk splittetest. Hull 13, hvor det også ble utført flere trykkforsøk, har en del brå stopp i strømningen som viser tydlige responskurver. Om samme tolkning som for en hydraulisk splittetest benyttes kan *shut-in*-trykket finnes som vist i figur 9.5.

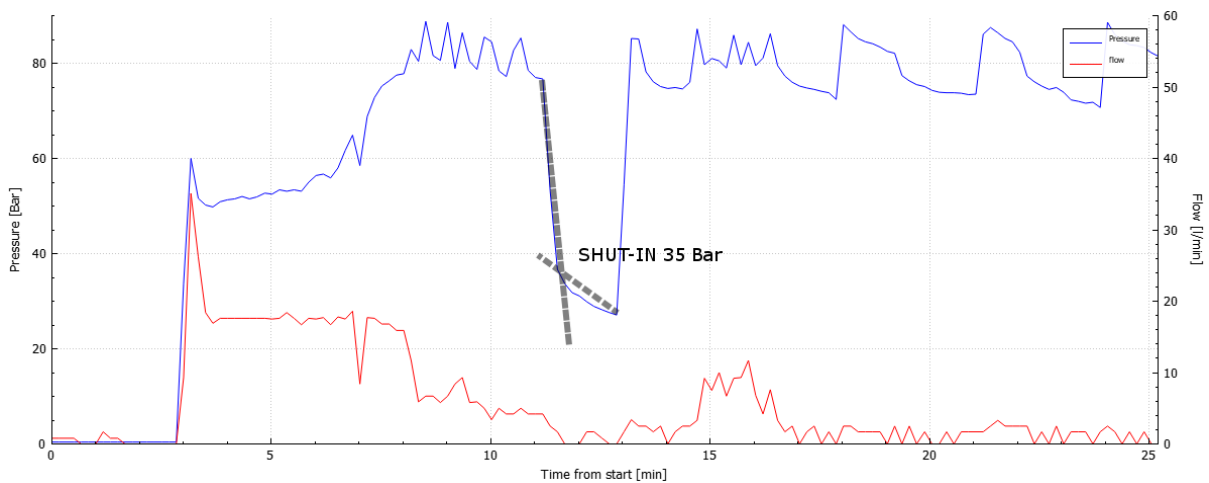


Figur 9.5: Tolkning av *shut-in* trykk ved en strømningstans i hull 13.

Figur 9.5 viser hvordan *shut-in*-trykket kan tolkes fra en stans i injeksjonen. Først faller trykket raskt før det når et punkt hvor det gradvis minker. Trykket i dette punktet er *shut-in*-trykket i en hydraulisk splittetest. *Shut-in*-trykket i en hydraulisk splittetest tilskrives å være minste hovedspenning. Siden orienteringen til sprekken som injiseres ikke er kjent er det ikke sikkert at *shut-in*-trykket funnet er minste hovedspenning. Et indisium på dette er at *shut-in* trykket kan ha forskjellige verdier i samme injeksjonsskjerm. Mellom hull 38 og 39 kan *shut-in*-trykket tolkes til både 20 og 35 bar. Dette kan skyldes at det injiseres i forskjellige sprekkesett selv om hull 38 og 39 er nabohull plassert midt i stoffen. *Shut-in*-trykket til hull 39 (figur 9.7) er tilnærmet det samme som i hull 13 (figur 9.5). Mens hull 38 (figur 9.6) viser et lavere *shut-in*-trykk. Det kan argumenteres at det ikke har forekommet noen utvidelse av sprekken i hull 38. Dette betyr at *shut-in* trykket tolket i hull 38 ikke er et *shut-in*-trykk, men kommer fra en annen effekt. Interessant for alle *shut-in*-tolkningene er at effekten ikke er tilstede i alle injeksjonstansene. Dette kan skyldes at operatørene har sluppet ut trykket ved stans. *Shut-in*-trykkene i hull 13 og 39 er tilnærmet samme trykk som brytepunktstrykket funnet i forsøket for hull 13 ( $\approx 35 \text{ bar}$ ). Dette er et indisium på at det forekom jekking av berget og at forklaringen på brytepunktstrykket for strømning kommer fra sprekkeutvidelse. Om dette stemmer kan bergtrykket mot sprekkeplanet og brytepunktstrykket identifiseres under injeksjon. Dette kan brukes til å bedre tolke hva som skjer under injeksjon, identifisere jekking og til å si noe om bergforholdene framfor stoff.



Figur 9.6: Tolkning av *shut-in*-trykk ved en strømningsstans på hull 38 m/ mulig tolkning av grunnvannstrykk.



Figur 9.7: Tolkning av *shut-in*-trykk ved en strømningsstans på hull 39.

## 10 Erfaringsbasert modell

Erfaring er en type stilltiende kunnskap som er vanskelig å kodifisere og overføre. Dette kapitlet beskriver erfaringsmodellen som benyttes i Norge gjennom en injeksjonsinstruks og fra erfaringer hørt av operatørene under forsøket.

### 10.1 Forståelse utfra injeksjonsprosedyren

Injeksjon er mye brukt i Norge og injeksjonsinstruksen er derfor en god kilde på injeksjonsforståelsen. Under følger et noe omskrevet utdrag av injeksjonsinstruksen til mikrosegment som ble benyttet på anlegget til forsøket:

- Hovedprinsippet er å starte med tynn blanding og å aktivt bruke w/c-forholdet til å få en gradvis trykkoppbygging til det nærmest ikke går inn mer masse på 80 bar.
- Alle resepter skal ha SP.
- Starter normalt med w/c = 0,8.
- Skifte over til w/c = 0,6 dersom det etter 300 liter er liten eller ingen trykkoppbygging.
- Dersom det går inn enda 700 liter med fortsatt lite trykkoppbygging:
  - Hullet kan hvile litt, men obs: sementen setter seg raskt.
  - Styrt herding med akselerator, nyttig om utgang på stuff.
- Mengdene over er veiledene og kan justeres i samråd med kontrollingeniør.
- Strømningen kan være forholdsvis høy når inngangen er lett og trykket lite, men skal etterhvert ned i 10-20 liter i minuttet når mottrykket stiger. Ved slutten av injeksjonen skal strømningen være mindre enn 5 liter i minuttet, men mye er opp til erfaren operatør.

- Stoppkriteriet er stående trykk på 80 bar.
- Injeksjonen starter i sålen og avsluttes i heng.
- Kontrollingeniør skal kontaktes om det går inn mer enn 1500 liter inn i et hull.
- Det er viktig med kontroll på hullkontakter. Ved hullkontakt skal injeksjonen fortsette på hullet som ble kontaktet.
- Ny salveboring kan tidligst skje en time etter endt injeksjon.

Fra injeksjonsintruksen kan noen konsepter skilles ut. Det skal injiseres til berget avviser inn- gang av mer masse. Dette er samme prinsipp som beskrevet i historiekapittelet. Om mottrykk ikke oppnås skal det injiseres med tykkere masse. Mangel på mottrykk kan skyldes at sprekken er stor eller at massen vaskes vekk av grunnvannstrømning, som samsvarer med erfaringen beskrevet i historiekapittelet.

## 10.2 Erfaring fra operatørene

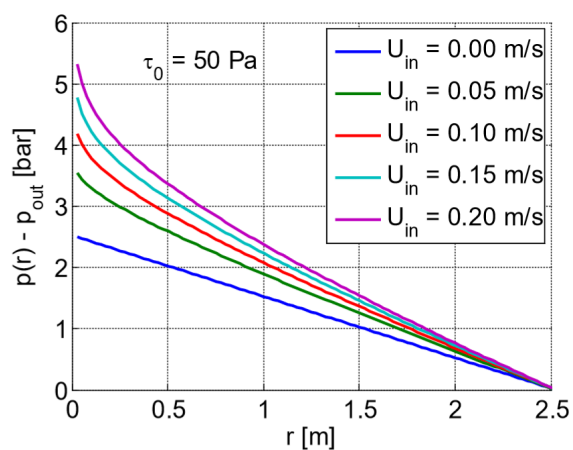
Injeksjon er en komplisert operasjon hvor arbeidet i stor grad omhandler å ta vare på sikkerhet, materialer og utstyr. For å unngå maskinhavari må riggen vaskes underveis i injeksjonen. Dette hindrer at sement størkner i pumper, kar og slanger. Etter injeksjon må hele maskinen plukkes fra hverandre, vaskes og settes sammen igjen. Injeksjonsstaver og pakkere skal installeres og skiftes ved behov. Injeksjonen skal logges, trykket og strømmingen styres og injeksjonen skal ikke avbrytes. Et erfarent injeksjonslag evner å gjøre alt dette. Utenom erfaring rundt den praktiske utførelsen av injeksjon oppsummerte operatørene gjennom noen påstander sin forståelse av injeksjon. Disse påstandene er listet under:

1. Etter stopp kan det være vanskelig å starte igjen.
2. Med høyere strømning opptrer jekking oftere.
3. Mindre sprekker injiseres mot slutten når det brukes høyt trykk.
4. Jekking kan føre til bedre spredning av injeksjonsmassen.
5. Heller tynnere masse enn høyt trykk, det fører til bedre inntrengning.
6. Mindre masse går inn i berg som tenderer til løsmasse, eller sprekker fylt av leire.

### 10.3 Diskusjon av erfaringspåstandene

Resultatene fra forsøket stemmer godt overens med påstand 1. Påstand 2 er ny idé. I akademia fokuseres det på modelleringen av injeksjonsmassens vei i berget og hvordan strømmingen avhenger av trykk, sementens genskaper og bergreaksjoner. I disse modelleringene er trykkfordelingen antatt og vist numerisk til å være lineært fordelt fra injeksjonshullet til injeksjonsfronten. I TIGHT arbeidspakke 4 (WP4) ble det utført numeriske analyser av injeksjonsstrømmingen i berget. Hvordan trykket ble funnet til å være fordelt i bergsprekken er vist i figur 10.1.

Bingham:



Figur 10.1: Trykkfordeling med radiell flyt (Binghamveske) fra *TIGHT WP4* [21]

Figur 10.1 viser hvordan trykket som funksjon av avstanden fra injeksjonshullet. Det er plottet mot nødvendig trykk for de forskjellige strømningshastighetene. Hver linje i plottet kan approksimeres lineært selv om ulineariteten øker med strømningshastigheten. Resultatet vist i figur 10.1 støtter opp om antagelsen om at et lineært trykkfall fra injeksjonshullet til injeksjonsfronten ikke er en dårlig approksimasjon. Dette taler mot påstanden om at strømming har noe å si for faren for jekking. Om trykkfordelingen er fordelt slik vist i figur 10.1, og formlene for jekking er korrekte, skal jekking alene være bestemt av trykket og spredningen av injeksjonsmassen. Men både injeksjonsintruksen og operatørerfaringen tilsier at ved høyere trykk skal det benyttes lavere strømming. Operatørefaringen tilskriver dette til faren for å jekke. Enten må trykkfordelingen i bergsprekken under injeksjon eller formlene for jekking være uriktige for at påstand 2 skal stemme. Dette diskuteres i neste kapittel.

Påstanden om at de minste sprekkene injiseres mot slutten kan forklares med at det er nok trykk til å presse massen inn der den tidligere har funnet en lettere vei. Påstanden om at jekking kan føre til bedre spredning kan bestrides med at jekking fører til et økt sprekkevolum

som fører til mindre spredning. Men jekking kan også føre til kontakt med andre sprekker eller områder i sprekken som ellers ikke ville blitt nådd. Påstanden om tynnere masse fører til bedre inntrengning er vanskelig å vurdere. Tynnere masse fører til dårligere herderesultat, men sementpartikkelene holdes lenger og lettere i suspensjon noe som kan forbedre inntrengningen. Påstanden om at leir og finfraksjon kan føre til mindre masseinntrengning er vist og bekreftet i sementkapitlet.

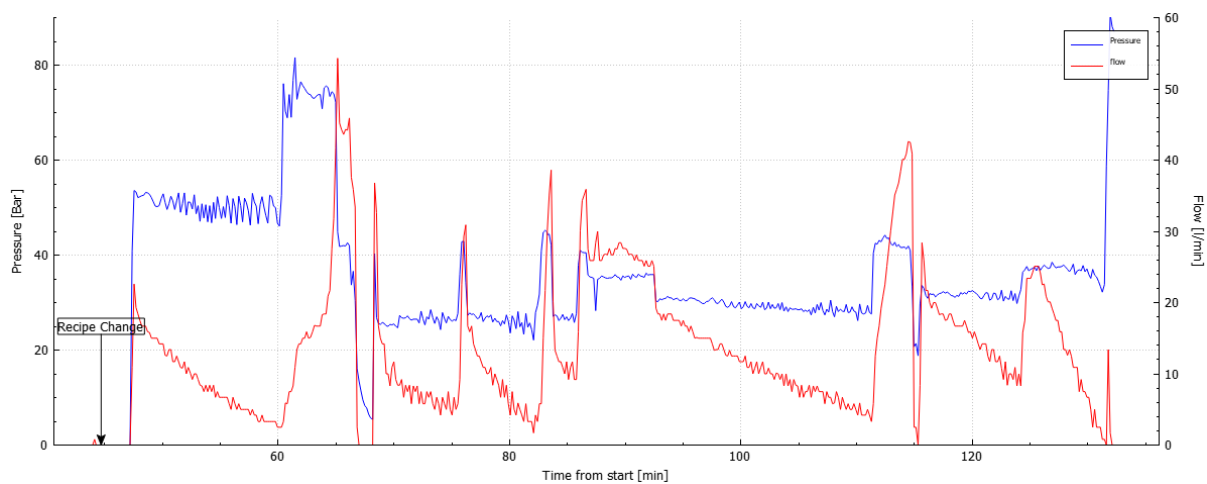


# 11 Trykkfordeling under injeksjon

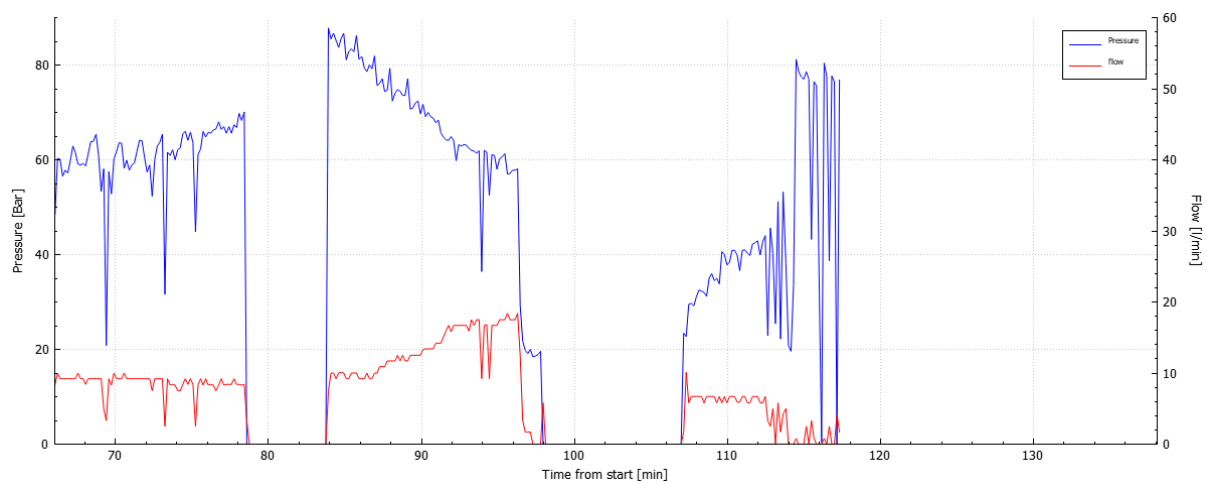
Idéen om at strømning har en innvirking på jekking er ikke utforsket. Om jekkemodellene er korrekte må antagelsen om lineært trykkfall fra injeksjonshullet til injeksjonsfronten være uriktig for at påstanden skal være sann. Dette kapitlet utforsker denne idéen og foreslår en mulig forklaring.

## 11.1 Jekkeeksempel

Både elastisk og ultimat jekking beror på at det er tilstrekkelig med kraft fra trykket skapt av injeksjonen til enten å komprimere eller løfte berget. Ut fra injeksjonsloggene kan jekking tolkes visuelt når strømning og trykk ikke opptrer som forventet. Figur 11.1 og 11.2 viser to injeksjonsserier fra TIGHTs arbeidspakke 7. I denne arbeidspakken ble det samlet inn injeksjonsdata fra et tunellprosjekt nærme Kongsberg og injeksjonene under viser to forskjellige typer tolket jekking. Ut fra injeksjonsplottene tolkes jekking som enten en brå økning i strømning med eller uten trykkfall. Eller lenger tid uten trykkoppbygning eller trykksenkning med konstant strømning. Etter en brå jekking er det vanlig at operatøren senker kapasiteten på pumpen. Dette kan gjøre det vanskelig å skille mellom hva som er bergets reaksjon og hva som er operatørstyrt. Interessant i begge jekkeeksemplene er at selv om det tydelig jekkes slutter injeksjonene med 80 bars trykk uten strømning. Om jekking har forekommet en gang er kriteriene for jekking nådd. I modellene for jekking presentert i denne oppgaven er det ingenting som tilsier at det ikke skal jekkes igjen på samme trykk. Dette sees i figur 11.1 hvor det jekkes flere ganger på omtrent samme trykk. Likevel oppnås det et stående trykk på 80 bar i slutten av injeksjonen etter en rask strømningstans. Figur 11.2 viser en gradvis jekking med økende strømning og trykkfall. Også denne injeksjonen avsluttes med 80 bars stående trykk etter en kort stans i injeksjonen.



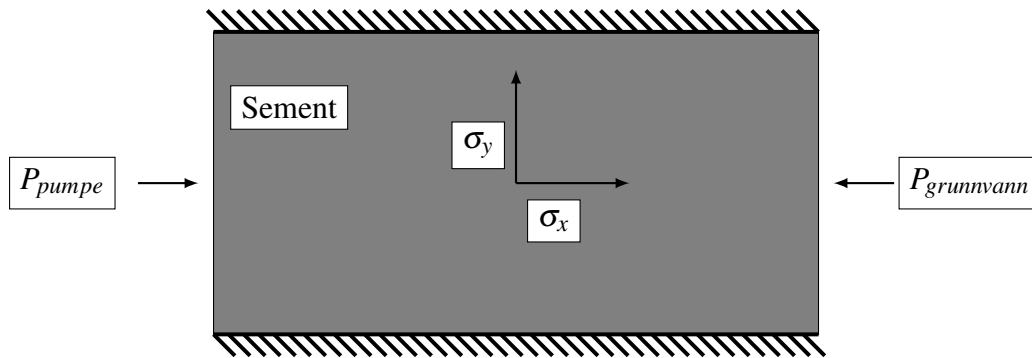
Figur 11.1: Eksempel på flere tolkede brå jekkinger. Data fra TIGHT.



Figur 11.2: Eksempel på tolket gradvis jekking. Data fra TIGHT.

## 11.2 Sementmassens egenskaper

Når injeksjon modelleres numerisk gjøres det ofte med en versjon av kraftbalansen vist i *RTGC*-kapittelet. Deretter brukes det forskjellige approksimasjoner for å estimere skjærstyrken og viskositeten til binghamvæsken for forskjellige forhold. Dette resulterer i en modell som gir en trykkfordeling i injeksjonshullet som vist i figur 10.1. Fra disse modellene er ikke det lineære trykkfallet benyttet i jekkemodellene en dårlig approksimasjon. Felles for utregningene er at de forsøker å approksimere sement i flyt og ikke i ro. *Yahia m.fl* [35] beskriver sement som et elastisk materiale når skjærstyrken ikke er brutt. Om sementen oppfører seg som et elastisk materiale kan det antas at sement i denne tilstanden har samme egenskaper som andre elastiske materialer. Det betyr at trykket ikke nødvendigvis er isotropisk fordelt men er spenninger med retninger. Dette er illustrert i figur 11.3 med en skisse av sement i en bergsprekk.



Figur 11.3: Spenningsfordeling i sementmassen

Om trykket i sementmassen behandles isotropisk i et punkt gir det at  $\sigma_x = \sigma_y$ . For en sementmasse i flyt antas dette å stemme. Om massen er i ro, eller har gjenverende skjærstyrke i seg, kan massen oppføre seg som et elastisk materiale [35]. Har massen et poissontall,  $\nu$ , under 0.5, dvs at massen evner volumetrisk deformasjon under trykk, kan spenningene finnes fra hverandre. Om det kun tillates deformasjon i x-retning, altså at  $\epsilon_z = \epsilon_y = 0$ , og spenningene i y og z planet holdes like,  $\sigma_z = \sigma_y$ , kan spenningsfordelingen i sementmassen beskrives som i ligning 11.1.

$$\sigma_y = \frac{\nu}{1 - \nu} \sigma_x \quad (11.1)$$

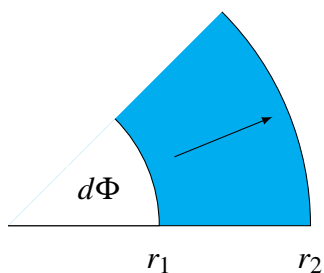
Ligning 11.1 viser at kraften som trykker på bergsprekkflaten er en fraksjon av trykket som trykker på massen fra injeksjonspumpen. En herdet sement kan ha poissontall ned til 0.2. Det er derfor rimelig å anta at verdien til en fersk sementmasse er et sted mellom det for en væske

og herdet sement. Om dette stemmer kan det være en forklaring på hvordan jekking henger sammen med strømming uten å motsi de numeriske analysene og gjeldene teori.

### 11.3 Modellering av oppløftningskraft med sement i ro og i flyt

For å se om det er en merkbar effekt av at spenningene mot berget endres av om massen flyter eller er i ro er det laget en enkel modell. Modellen består av en bergsprekk, modellert som et plan, allerede fylt med sement ut til en gitt radius fra injeksjonshullet. Over denne flaten antas det et lineært trykkfall fra injeksjonshullet til injeksjonsfronten. Hastighetsprofil regnes ut med grunnlag i massebevaring. Der hvor massen regnes å være nok i ro reduseres trykket mot bergsprekken med en faktor gitt av ligning 11.1.

For å regne ut hastighetsprofilet til strømmingen i sprekken behøves injeksjonshulldiameteren og injeksjonstrykket. Det antas ren radiell flyt se figur 11.4.



Figur 11.4: Sirkelutsnitt.

Tverrsnittarealet kan fra figur 11.4 uttrykkes som:

$$A_n = d\Phi \cdot r_n \cdot h \quad (11.2)$$

Hvor  $h$  er sprekkestørrelsen. Med massebevaring (antar inkompressibilitet) blir fluksen gjennom tverrsnittarealet lik:

$$v_1 \cdot A_1 = v_2 \cdot A_2 \quad (11.3)$$

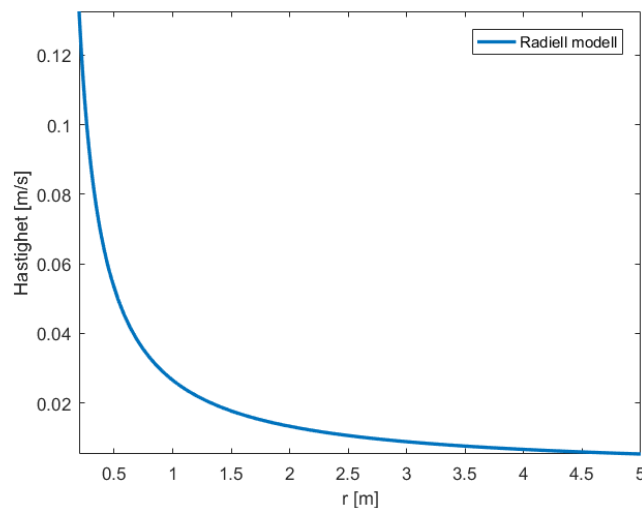
Fra ligning 11.2 og 11.3 utledes følgende forhold:

$$v(r_2) = v(r_1) \cdot \frac{r_1}{r_2} \quad (11.4)$$

Ligning 11.4 generaliseres til:

$$v(r) = v_0 \cdot \frac{r_0}{r} \quad (11.5)$$

Hvor  $v_0$  er strømningshastigheten ut fra injeksjonshullet,  $r_0$  er radiusen til injeksjonshullet og  $r$  er en vilkårlig avstand fra hullet. Denne utledningen viser at i en slik modell er strømmingen invers proporsjonal med avstanden til injeksjonshullet, noe som også ble nevnt i historiekapittelet. Modellen er programmert inn i Matlab for videre analyse. En hullradius på 32 mm, strømning på 20 l/min, og sprekkestørrelse på 2 mm vil resultere i en hastighetsprofil som vist i figur 11.5.

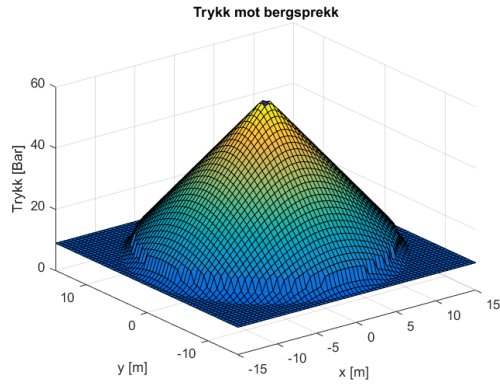


Figur 11.5: Hastighetsprofil for radiellstrømning. Figur laget i Matlab.

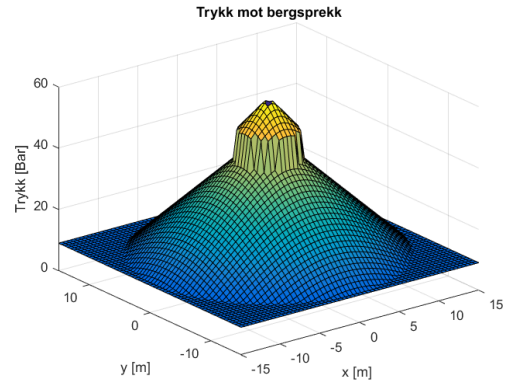
### 11.3.1 Utregninger med modell

Ved å bruke hastighetsprofilen gitt av ligning 11.5 kan det settes en hastighet for når sementmassen regnes som nok i ro til å oppføre seg elastisk. For utregningene vist i figur 11.6 er denne grensen satt til 2 mm/s. Modellen antar at sprekken er fylt med injeksjonsmasse radielt ut til 15 meter. Over denne avstanden antas det et lineært trykkfall. Injeksjonstrykket er satt til 60 bar med et grunnvannstrykk på 9 bar for å nærme seg forholdene observert i injeksjonsforsøket. Poisson-tall,  $\nu$ , er satt til 0,45. Det resulterende trykket mot bergsprekken kan sees i figur 11.6. Figuren viser hvordan kraften mot bergsprekken fordeler seg med en strømning på 5 og 20

$l/min$ . Forskjellen til gjennomsnittstrykket mellom strømningshastighetene er 15,2%. Dette er en betydelig reduksjon i oppløftningskraft med konservativt satte parametere. I figuren sees tydelig skillet hvor massen regnes elastisk.



(a)  $flow = 20l/min$ , snittrykk 25,7 bar

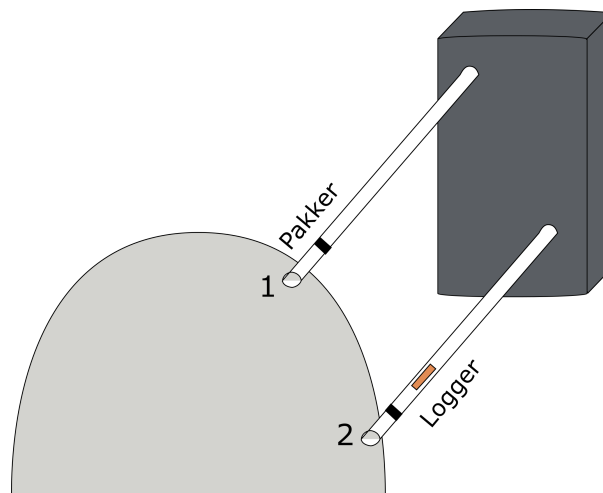


(b)  $flow = 5l/min$ , snittrykk 21,8 bar

Figur 11.6: Injeksjonstrykk mot sprekkeflaten ved 5 og 20 l/min strømming.

## 11.4 Tolkning av data fra arbeidspakke 7

I TIGHT arbeidspakke 7 ble det samlet inn trykkdata fra innsiden av injeksjonspakkeren (inne i selve injeksjonshullet). Målet med forsøket var å se om det er forskjeller mellom trykket på riggen og i injeksjonshullet men kan også brukes til å se på hullforbindelser. Figur 11.7 viser et eksempel med to injeksjonshull, 1 og 2, hvor det i hull nummer 2 befinner seg en logger. Om det injiseres på hull nummer 1, med forbindelse til hull nummer 2, vil eventuell trykkøkning registreres av loggeren. Det er ikke mulig å vite hvor forbindelsen er. Derfor er dette representert med en sort boks. Om forbindelsen er like ved pakkerene er avstanden liten. Om forbindelsen er mellom endene av hullet eller gjennom samme eller forbundede sprekkesett er injeksjonsavstanden mellom hullene større.

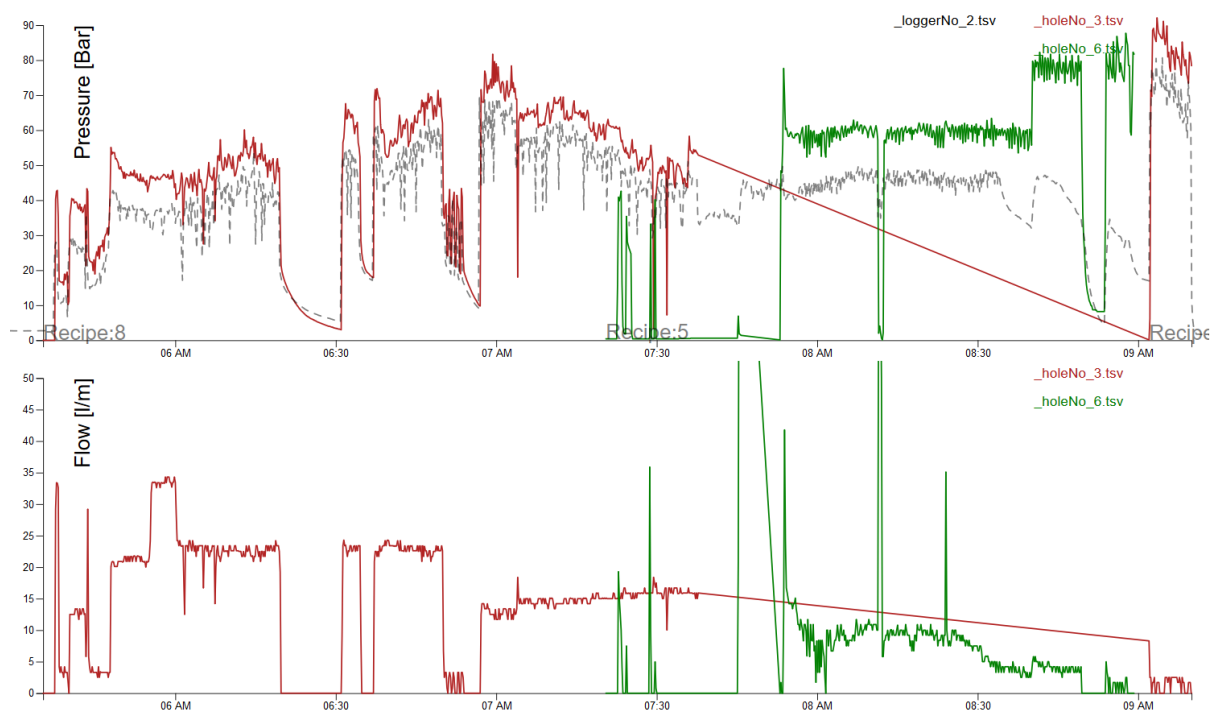


Figur 11.7: Skisse over datainnsamling. Egen tegning.

I et eget utviklet plottprogram i Python og D3.js kan injeksjonslogger fra riggene og data fra trykkloggerene legges over hverandre. Dette gjør det mulig å søke igjennom dataene og identifisere hullforbindelser. Under følger trykkforbindelser, tolkninger og hendelser funnet med programmet.

### 11.4.1 Eksempel på hullforbindelse

Figur 11.8 viser et plott hvor injeksjonsdata fra riggen er farget og data fra trykkloggeren er gråstiplet. Loggeren ligger i hull nummer 3 (rød). I plottet sees det at trykket inne i hullet og på riggen følger hverandre godt. Ved tid 07:40 stanses injeksjonen på hull 3. Deretter følger trykket i hull 3 injeksjonstrykket til hull 6 (grønn). Det tolkes derfor at det er forbindelse mellom hull 6 og 3. En interessant observasjon ved tid 08:30 er at trykket i hull 3 begynner å falle selv om det fortsatt injiseres på hull 6. Ved trykkøkningen til hull 6 ved 08:45 følger trykket i hull 3 etter, men fortsetter å falle. På slutten av plottet er det en stor trykkøkning som følge av at hull 3 injiseres igjen. Trykkfallet i hull 3 oppstod selv om det var forbindelse til hull 6 kan forklares med at sementmassen begynte å utvikle elastiske egenskaper. Noe som førte til en reduksjon i trykket som kom fra hull 6.

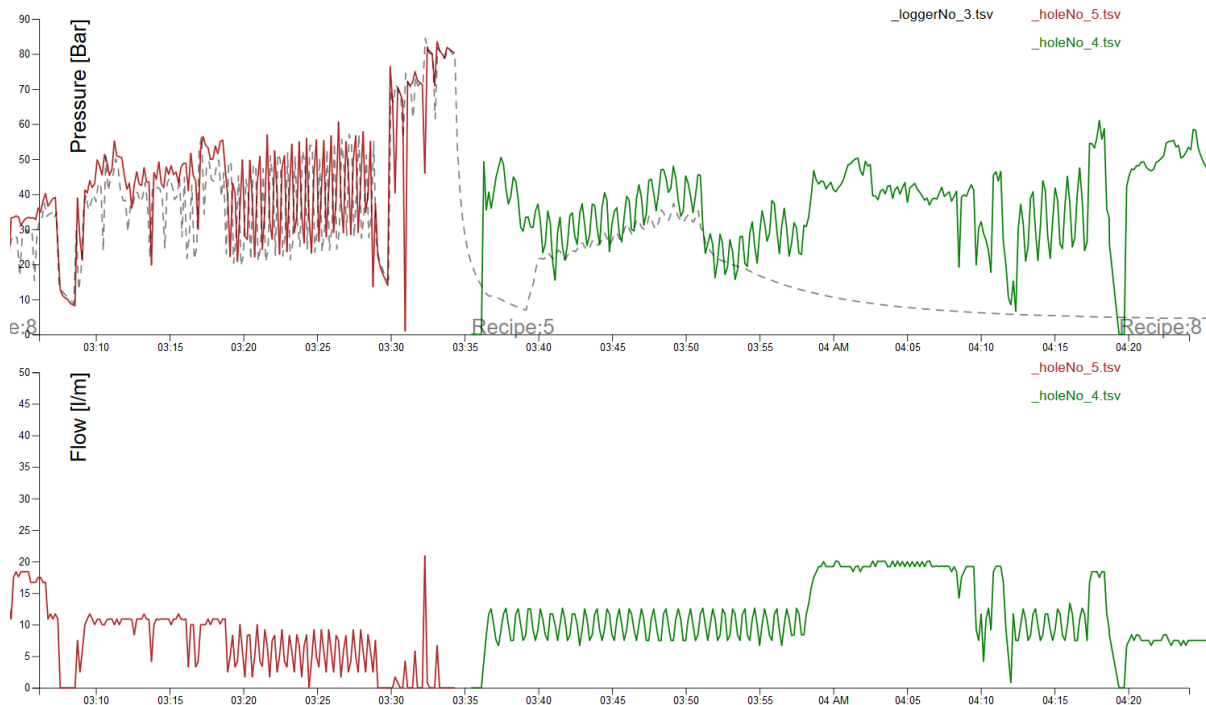


Figur 11.8: Eksempel på hullforbindelse. Data fra TIGHT.



## 11.4.2 Eksempel på tap av hullforbindelse

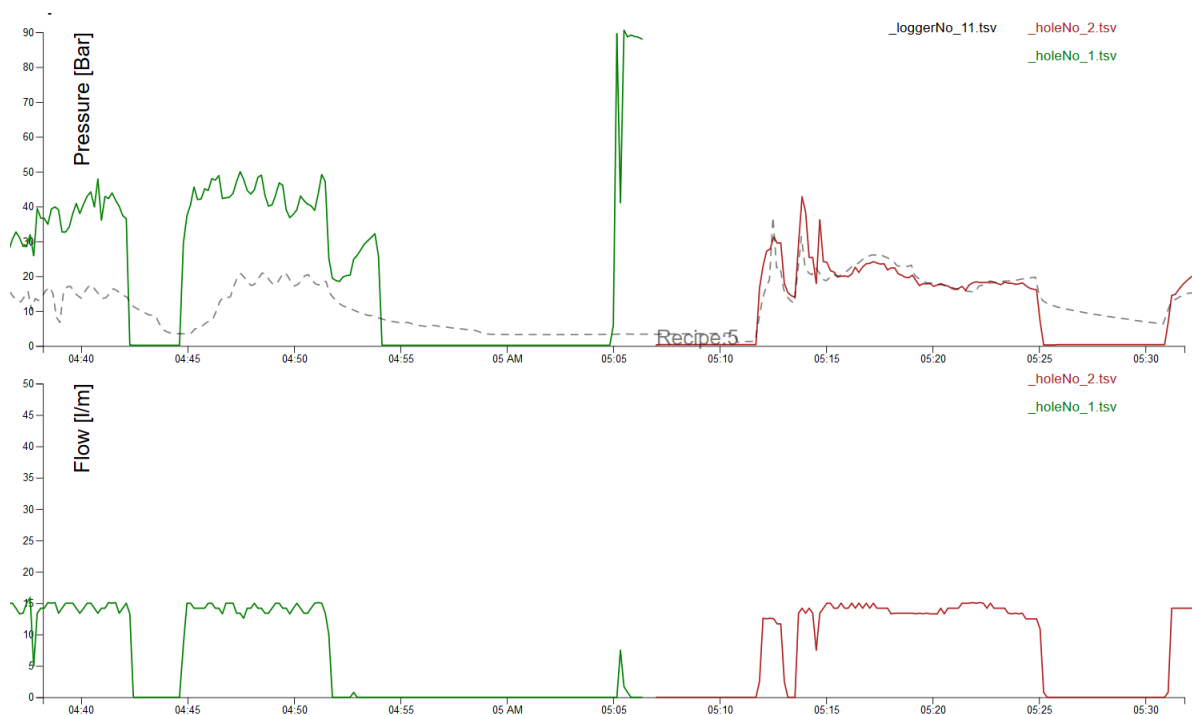
Figur 11.9 viser et tilfelle med hullforbindelse. Trykkloggeren ligger tilsynelatende i hull 5 (rød) for det er godt samsvar mellom trykket på riggen og i hullet. Hull 4 (grønn) har forbindelse til hull 5, dette sees ved at trykket i hullet følger trykket til injeksjonen på hull 5. Men samsvarigheten stemmer bare for tiden 03:40 til 03:50. Etter 03:50 mister trykket fra hull 4 forbindelsen til hull 5. Hull 4 har konstant strømning i hele dette partiet. For en injeksjon uten jekkehendelser forventes det da en jevn trykkoppbygning. Trykkfallet ved tid 03:38 kan derfor tolkes som en jekking. Ved tid 03:50 tolkes en ny jekking. Forbindelsen mellom hull 4 og 5 ser ut til å ligge mellom to jekkehendelser. Dette kan tolkes til at den første jekkingen opprettet forbindelsen og den andre jekkingen avsluttet den. Det er motstridene at en jekking skulle stenge en forbindelse åpnet av en jekking like før. Om trykket følger strømmingen kan forbindelsestapet forklares med at den andre jekkingen førte til en ny strømningsvei som resulterte i at trykket ikke lenger nådde hull 5.



Figur 11.9: Tap av forbindelse. Data fra TIGHT.

### 11.4.3 Eksempel på ingen trykkøkning i forbundet hull

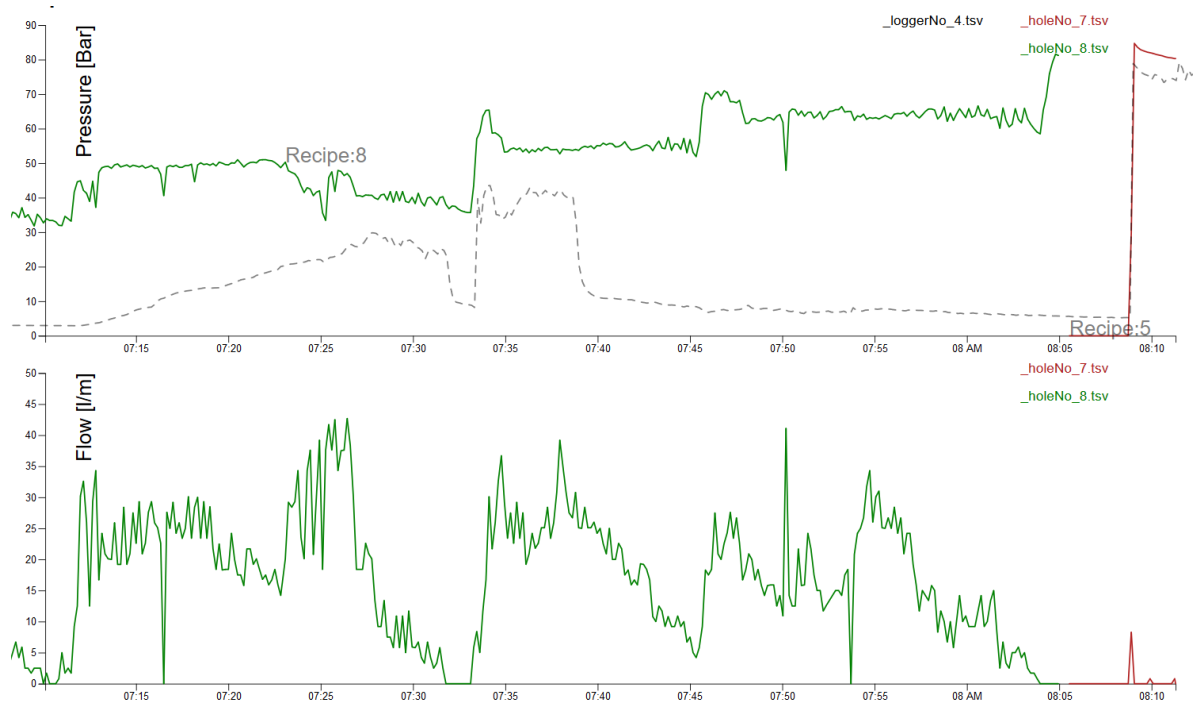
Figur 11.10 viser en situasjon hvor trykkloggeren ligger i hull 2 (rød). Før hull 2 ble hull 1 (grønn) injisert. Trykket logget i hull 2 følger trykket til hull 1 gjennom hele injeksjonen av hull 1, bare noe dempet. Det tolkes derfor forbindelse mellom hull 1 og 2. Injeksjonen i hull 1 har tidligere hatt flere korte stopp som vist ved tid 04:44, uten at dette har avbrutt forbindelsen mellom hullene. Etter stansen ved 04:52 virker det som om forbindelsen mellom hullene opphører. Ved tid 05:05 økes trykket til 80 bar med lav strømming i hull 1 uten at det har noe utslag på trykkmåleren i hull 2. Trykket fra hull 1 nådde ikke loggeren i hull 2 selv om det tidligere var forbindelse. Dette støtter påstanden om at trykket følger strømmingen.



Figur 11.10: Ingen trykkøkning i forbundet hull. Data fra TIGHT.

### 11.4.4 Eksempel på tap av forbindelse som følge av jekking

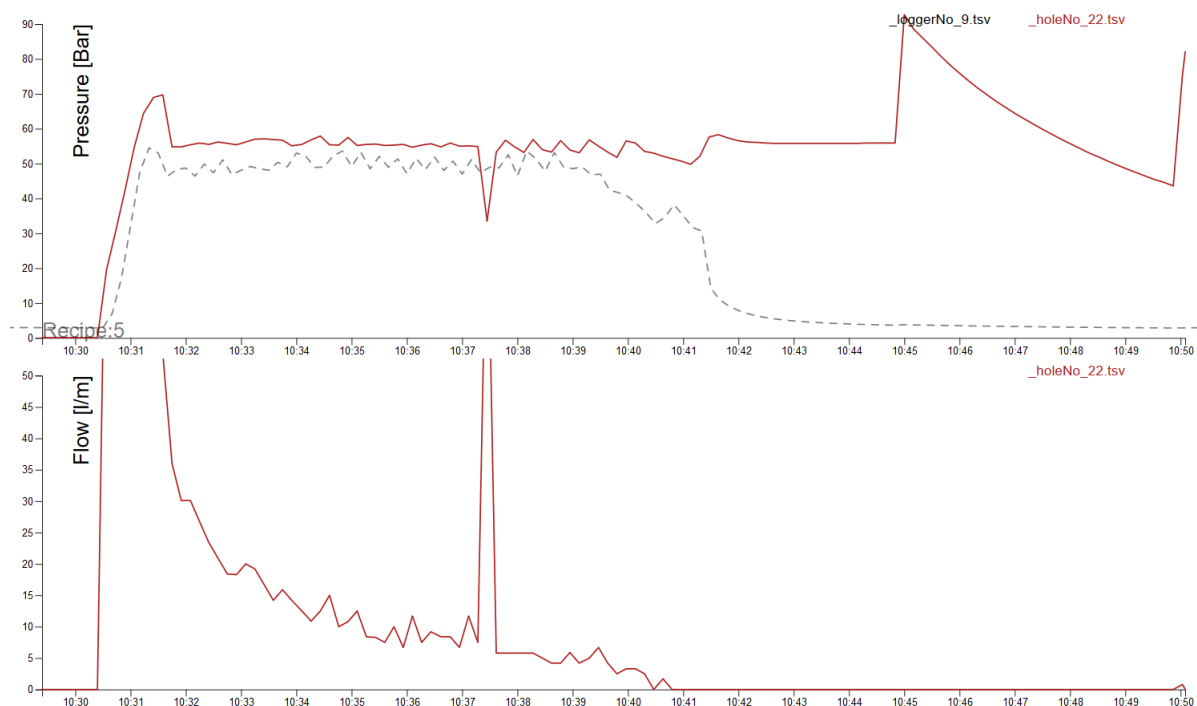
Figur 11.11 viser et eksempel med mulig hullfylling. Loggeren ligger i hull 7 (rød) men har trykkoppbygning under injeksjon av hull 8 (grønn). Mellom minutt 07:30 og 07:35 er det et markant trykkfall i hull 7 mens trykket i hull 8 er konstant, men uten strømning. Trykket økes i hull 8 med en betydelig økning i strømmingen. Trykket i hull 7 følger etter men ved tid 07:40 forsvinner igjen trykket i hullet, dette skjer i sammenheng med en tolket jekking i hull 8. Dette er et indisium på at jekking kan lukke forbindelser. Ved tid 08:08 injiseres hull 7 uten at særlig masse går inn. Dette skyldes at hull 7 allerede var fylt.



Figur 11.11: Tap av forbindelse. Data fra TIGHT.

### 11.4.5 Eksempel på trykktap som følge av strømningsstans

Figur 11.12 viser et plott hvor trykket i loggeren følger trykket til injeksjonen på hull 22 (rød). I det strømmingen blir liten begynner trykket til loggeren i hull 22 å falle. Ved strømningsstans faller trykket i loggeren raskt til nærmest null selv om trykket på riggen for hull 22 holdes oppe og senere økes. Dette er et indisium på at trykket målt av loggeren var avhengig av strømmingen til hull 22.



Figur 11.12: Trykktap ved strømningsstans.

### 11.4.6 Diskusjon av hullforbindelsene

Dataene fra TIGHTs arbeidspakke 7, tolket på denne måten, er et indisium på at trykket følger strømmingen til injeksjonsmassen. Med trykkloggerdataene fra TIGHT er det vist at forbindelse mellom injeksjonshull kan opprettes og avsluttes og at dette er observert i sammenheng med tolket jekking. Om trykket bortfaller i tidligere forbundet injeksjonsmasse kan det argumenteres at jekking fører til dårligere spredning. Dette kan skyldes at under jekking vil den hydrauliske konduktiviteten i de største kanalene i sprekken bli så stor at all strømming forekommer i de utvidede kanalene. Det er også vist at selv om det er forbindelse er det ikke trykkøkning etter stans og start uten strømming i det forbundede hullet. Dataene og tolkningene presentert er et indisium på at lineært trykkfall over hele injeksjonsflaten ikke er tilfelle og at hullforbindelser kan gå tapt som følge av jekking.

## 12 Konklusjon

I denne oppgaven er det forsøkt å indetifisere sammenhenger og hendelser under injeksjon. Effektene og sammenhengene funnet er forsøkt forklart med tilgjengelig teori og forståelse. Injeksjon er fremdeles ikke fullstendig forstått og denne oppgaven viser med virkelige data at forhold i ett hull ikke er likt det i et annet. Ingen av forklaringene i denne oppgaven utelukker hverandre eller gjeldene teori med de antagelser som er gjort. Erfaringer og konklusjoner rundt de forskjellige tema diskutert i denne oppgaven er gitt under.

**RTGC** Hensikten til injeksjonsforsøket var å se om *RTGC* evnet å estimere sammenhengen trykk-strømning og strømning-tid. Det ble samlet inn for lite data til å vurdere strømning-tid. Sammenhengen mellom trykk-strømning i *RTGC* og den funnet i forsøket var i riktig størrelsesorden, men *RTGC* estimerte ikke at strømmingen skulle stanse på det brytepunktstrykket som ble funnet. På grunn av dette konkluderes det med at *RTGC*, for injeksjonen utført i forsøket, ikke korrekt evnet å beskrive injeksjonen.

**Elastisk jekking** For å forklare brytepunktstrykket funnet hvor strømning stanset foreslås det at dette skyldes at injeksjonen var avhengig av utvidelse av sprekken for at strømning skulle skje. Det ble utført beregninger med formler for elastisk jekking av berget fra injeksjonstrykket med plausible bergartsparametere og spenninger. Fra beregningene og tolkningene er dette er en plausibel forklaring på fenomenet.

**Trykkfordeling over injeksjonsflaten** Påstanden om at strømning påvirker faren for å jekke er forsøkt forklart med at sementmassens evne til å overføre trykk er avhengig av strømning. Det trekkes fram at sement kan ha egenskaper som en væske i flyt og som et elastisk materiale i ro. Med data fra TIGHT er det vist at trykkforbindelsen mellom hull kan både oppstå og forsvinne. Det er vist at om strømmingen stanses og ikke kommer i gang igjen påvirkes ikke trykket i hull med kjent forbindelse selv med et høyt trykk i hullet som ble stanset. Dette er et indisium på at trykket fordelt i injeksjonsmassen er avhengig av at massen er i flyt. Når dette intreffer virker tilfeldig ved at flere stopp og

start kan forekomme før strømmingen ved et tilfelle ikke kommer i gang igjen. Dette indikerer at sementen evner å endre karakter fra væske til elastisk materiale over kort tid. Dette kan forklare hvorfor det ikke jekkes når det nås et trykk høyere enn trykk det ble jekket på tidligere i injeksjonen.

### **12.1 Forslag til videre arbeid**

Idéen om at fersk sement kan oppføre seg som et elastisk materiale og at skillet mellom væske og elastisk karakter kan intrefte raskt er ny innen injeksjon. En mulig måte å avsløre om dette er en reell effekt kan være å utføre ødometerforsøk på fersk sement. Om det fra denne testen utvises elastiske egenskaper kan det tale for at forklaringene presentert i denne oppgaven stemmer. Det kan også utforskes mer rundt trykkresponskurver og brytepunktstrykk sett i sammenheng med jekking og bergspenninger.

## Bibliografi

- [1] P.-C. Aïtcin. “1 - The importance of the water–cement and water–binder ratios”. I: *Science and Technology of Concrete Admixtures*. Red. av Aïtcin Pierre-Claude og Flatt Robert J. Woodhead Publishing, 2016, s. 3 –13. ISBN: 978-0-08-100693-1. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100693-1.00001-1>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081006931000011>.
- [2] P.-C. Aïtcin. “18 - Retarders”. I: *Science and Technology of Concrete Admixtures*. Red. av Aïtcin Pierre-Claude og Flatt Robert J. Woodhead Publishing, 2016, s. 395 –404. ISBN: 978-0-08-100693-1. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100693-1.00018-7>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081006931000187>.
- [3] P.-C. Aïtcin. “3 - Portland cement”. I: *Science and Technology of Concrete Admixtures*. Red. av Aïtcin Pierre-Claude og Flatt Robert J. Woodhead Publishing, 2016, s. 27 –51. ISBN: 978-0-08-100693-1. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100693-1.00003-5>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081006931000035>.
- [4] P.-C. Aïtcin. “4 - Supplementary cementitious materials and blended cements”. I: *Science and Technology of Concrete Admixtures*. Red. av Aïtcin Pierre-Claude og Flatt Robert J. Woodhead Publishing, 2016, s. 53 –73. ISBN: 978-0-08-100693-1. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100693-1.00004-7>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081006931000047>.
- [5] Geir Bertelsen. *Geologi: E39 Sveгатjørn - Rådal. K10 Sveгатjørn - Fanavegen. Rapport for konkurransegrunnlag*. Tekn. rapp. Nr. 2010020778-15Oppdrag. Statens vegvesen ressursavdelingen, 2014.
- [6] Bahman Bohloli mfl. “Strength and filtration stability of cement grouts at room and true tunnelling temperatures”. I: *Tunnelling and Underground Space Technology* 71 (2018), s. 193 –200. ISSN: 0886-7798. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2017.08.017>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0886779817302377>.
- [7] *E39 Sveгатjørn–Rådal*. 2018. URL: <https://www.vegvesen.no/vegprosjekter/e39sveгатjornradal> (sjekket 23.05.2018).
- [8] Bjørn Nilsen og Einar Broch. “INGENIØRGEOLOGI-BERG GRUNNKURSKOMPENDIUM”. I: Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, 2012.

- [9] G. Gelardi og R.J. Flatt. “11 - Working mechanisms of water reducers and superplasticizers”. I: *Science and Technology of Concrete Admixtures*. Red. av Aïtcin Pierre-Claude og Flatt Robert J. Woodhead Publishing, 2016, s. 257 –278. ISBN: 978-0-08-100693-1. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100693-1.00011-4>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081006931000114>.
- [10] Rudolph Glossop. “The Invention and Development of Injection Processes Part I: 1902–1850”. I: *Géotechnique* 10.3 (1960), s. 91–100. DOI: 10.1680/geot.1960.10.3.91. eprint: <https://doi.org/10.1680/geot.1960.10.3.91>. URL: <https://doi.org/10.1680/geot.1960.10.3.91>.
- [11] Rudolph Glossop. “The Invention and Development of Injection Processes Part II: 1850–1960”. I: *Géotechnique* 11.4 (1961), s. 255–279. DOI: 10.1680/geot.1961.11.4.255. eprint: <https://doi.org/10.1680/geot.1961.11.4.255>. URL: <https://doi.org/10.1680/geot.1961.11.4.255>.
- [12] Eivind Grøv. *Injeksjon under jorda*. 2014. URL: <https://www.sintef.no/siste-nytt/injeksjonsarbeider-i-underjordsanlegg/> (sjekket 29.05.2018).
- [13] Eivind Grøv, Johan Funehag og Janson Thomas. “Rock mass grouting in Seden and Noway, A matter of cultural differences or factual causes”. Utgitt v/ NTNUs kurs i Ingeniørgeologi VK.
- [14] H. O. 2012 Hognestad. *Muligheter / Begrensninger- Ulike materialer*. 2012. URL: [https://www.vegvesen.no/\\_attachment/389262/binary/666901](https://www.vegvesen.no/_attachment/389262/binary/666901) (sjekket 12.05.2018).
- [15] Kristin H. Holmøy, Helene Strømsvik og Torun Ris. *State of the art for sementbasert forinjeksjon*. Tekn. rapp. SBF 2015 A0318 - Åpen. SINTEF Byggforsk, 2015.
- [16] Fernando Jorne og Fernando M.A. Henriques. “Evaluation of the grout injectability and types of resistance to grout flow”. I: *Construction and Building Materials* 122 (2016), s. 171 –183. ISSN: 0950-0618. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.032>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095006181630962X>.
- [17] Shinji Kobayashi mfl. “Real Time Grouting Control Method Development and application using Äspö HRL data”. I: *Svensk Kärnbränslehantering AB Rapport R-08-133* (2008). ISSN: 1402-3091. URL: <https://www.skb.se/publikation/1905870/>.
- [18] Shucaï Li mfl. “Investigation on fundamental properties of microfine cement and cement-slag grouts”. I: *Construction and Building Materials* 153 (2017), s. 965 –974. ISSN: 0950-0618. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.188>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061817310826>.
- [19] Giovanni Lombardi. “Grouting of Rock Masses”. I: *Grouting and Ground Treatment*. DOI: 10.1061/40663(2003)6. eprint: <https://ascelibrary.org/doi/pdf/10.1061/40663%282003%296>. URL: <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/40663%282003%296>.
- [20] D. Marchon og R.J. Flatt. “8 - Mechanisms of cement hydration”. I: *Science and Technology of Concrete Admixtures*. Red. av Aïtcin Pierre-Claude og Flatt Robert J. Woodhead Publishing, 2016, s. 129 –145. ISBN: 978-0-08-100693-1. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100693-1.00008-4>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081006931000084>.



- [21] Sjur Mo og Paal Skjetne. “NUMERICAL SIMULATIONS OF GROUT FLOW IN SIMPLIFIED GEOMETRIES”. I: *8th Nordic Grouting Symposium*. 2016.
- [22] S. Mohajerani mfl. “Grout penetration in fractured rock mass using a new developed explicit algorithm”. I: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 80 (2015), s. 412–417. ISSN: 1365-1609. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmmms.2015.06.013>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1365160915300691>.
- [23] *NGU karttjeneste*. 2018. URL: <http://geo.ngu.no/kart/berggrunn/> (sjekket 23.05.2018).
- [24] P.-C. Nkinamubanzi, S. Mantellato og R.J. Flatt. “16 - Superplasticizers in practice”. I: *Science and Technology of Concrete Admixtures*. Red. av Aïtcin Pierre-Claude og Flatt Robert J. Woodhead Publishing, 2016, s. 353–377. ISBN: 978-0-08-100693-1. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100693-1.00016-3>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081006931000163>.
- [25] Steven W. Perkins og Joe Harris. “Using the Grouting Intensity Number (GIN) to Assess Compaction Grouting Performance”. I: *Grouting and Ground Treatment*. DOI: 10.1061/40663(2003)8. eprint: <https://ascelibrary.org/doi/pdf/10.1061/40663%282003%298>. URL: <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/40663%282003%298>.
- [26] “19 - Accelerators”. I: *Science and Technology of Concrete Admixtures*. Red. av Aïtcin Pierre-Claude og Flatt Robert J. Woodhead Publishing, 2016, s. 405–413. ISBN: 978-0-08-100693-1. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100693-1.00019-9>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081006931000199>.
- [27] Andrew Putnis, Bjørn Jamtveit og Håkon Austrheim. “Metamorphic Processes and Seismicity: the Bergen Arcs as a Natural Laboratory”. I: *Journal of Petrology* 58.10 (2017), s. 1871–1898. DOI: 10.1093/petrology/egx076. eprint: /oup/backfile/content\_public/journal/petrology/58/10/10.1093\_petrology\_egx076/1/egx076.pdf. URL: <http://dx.doi.org/10.1093/petrology/egx076>.
- [28] Jalaaladdin Yaghoobi Rafi og Håkan Stille. “Applicability of Using GIN Method, by Considering Theoretical Approach of Grouting Design”. I: *Geotechnical and Geological Engineering* 33.6 (2015), s. 1431–1448. ISSN: 1573-1529. DOI: 10.1007/s10706-015-9910-8. URL: <https://doi.org/10.1007/s10706-015-9910-8>.
- [29] Jalaaladdin Yaghoobi Rafi og Håkan Stille. “Basic mechanism of elastic jacking and impact of fracture aperture change on grout spread, transmissivity and penetrability”. I: *Tunnelling and Underground Space Technology* 49 (2015), s. 174–187. ISSN: 0886-7798. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2015.04.002>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0886779815000589>.
- [30] Jalaaladdin Yaghoobi Rafi og Håkan Stille. “Control of rock jacking considering spread of grout and grouting pressure”. I: *Tunnelling and Underground Space Technology* 40 (2014), s. 1–15. ISSN: 0886-7798. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2013.09.005>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0886779813001351>.

- [31] Omid Saeidi, Amir Azadmehr og Seyed Rahman Torabi. “Development of a Rock Groutability Index Based on the Rock Engineering Systems (RES): A Case Study”. I: *Indian Geotechnical Journal* 44.1 (2014), s. 49–58. DOI: 10.1007/s40098-013-0068-0. URL: <https://doi.org/10.1007/s40098-013-0068-0>.
- [32] *Simple linear regression*. 2018. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Simple\\_linear\\_regression](https://en.wikipedia.org/wiki/Simple_linear_regression) (sjekket 22.05.2018).
- [33] Ola Skjølsvold og Harald Justnes. *TIGHT - Prøving av injiseringssementer*. Tekn. rapp. SBF 2015 A0413 - Åpen. SINTEF Byggforsk, 2016.
- [34] R. Widmann. “International society for rock mechanics commission on rock grouting”. I: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* 33.8 (1996), s. 803–847. ISSN: 0148-9062. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0148-9062\(96\)00015-0](https://doi.org/10.1016/S0148-9062(96)00015-0). URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0148906296000150>.
- [35] A. Yahia, S. Mantellato og R.J. Flatt. “7 - Concrete rheology: A basis for understanding chemical admixtures”. I: *Science and Technology of Concrete Admixtures*. Red. av Aïtcin Pierre-Claude og Flatt Robert J. Woodhead Publishing, 2016, s. 97–127. ISBN: 978-0-08-100693-1. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100693-1.00007-2>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081006931000072>.