

# Sementbasert berginjeksjon Sluttrapport fra prosjektet TIGHT



SINTEF Viten

Eivind Grøv, Helene Strømsvik og Martin Hovda Haugsand

# **Sementbasert berginjeksjon Sluttrapport fra prosjektet TIGHT**

SINTEF akademisk forlag

SINTEF Viten 2

Eivind Grøv, Helene Strømsvik og Martin Hovda Haugsand

**Sementbasert berginjeksjon. Sluttrapport fra prosjektet TIGHT**

Emneord: tunnel, berg, vanntetting, injeksjon

ISSN 2464-2371

ISBN 978-82-536-1659-9 (pdf)

Foto forside: AMV

Fotoer og illustrasjoner: Prosjektet TIGHT der det ikke er angitt annen kilde

© Copyright SINTEF akademisk forlag 2020

Materialet i denne publikasjonen er omfattet av åndsverklovens bestemmelser. Uten særskilt avtale med SINTEF akademisk forlag er enhver eksemplarframstilling og tilgjengeliggjøring bare tillatt i den utstrekning det er hjemlet i lov eller tillatt gjennom avtale med Kopinor, interesseorgan for rettighetshavere til åndsverk. Utnyttelse i strid med lov eller avtale kan medføre erstatningsansvar og inndragning, og kan straffes med bøter eller fengsel.

SINTEF akademisk forlag

SINTEF Community

Børrestuveien 3

Postboks 124 Blindern

0314 OSLO

Tlf.: 400 05 100

[www.sintef.no/community](http://www.sintef.no/community)

[www.sintefbok.no](http://www.sintefbok.no)

# FORORD

---

Foreliggende rapport er utarbeidet av SINTEF Community på vegne av forskningsprosjektet TIGHT (True Improvement in Grouting High pressure Technology for tunneling). Den er basert på artikler, rapporter og presentasjoner utarbeidet av de enkelte arbeidsgruppene gjennom prosjektperioden, samt ett ph.d.-arbeid ved NTNU finansiert av TIGHT. Seks MSc-oppgaver er også skrevet i forbindelse med prosjektet.

Det fins et stort antall artikler og rapporter utarbeidet for TIGHT, med detaljerte beskrivelser av utført forskning. Denne litteraturen er presentert innledningsvis i rapporten. I TIGHT har vi hatt som ambisjon at resultatene fra arbeidet skal komme bransjen til gode. Derfor har det vært viktig for prosjektet å publisere og dele kunnskap i så stor grad som mulig – både nasjonalt og internasjonalt.

Vi som har hatt gleden av å gjennomføre prosjektet, håper at denne rapporten samt det underbyggende materialet kan være til nytte og glede for tunnelbransjen, og at resultatene fra TIGHT kan bidra med mer håndfast kunnskap og kompetanse til arbeidsoppgaven berginjeksjon. Det er i alles interesse at utførelse av injeksjon er fakta- og kunnskapsbasert og i mindre grad basert på synsing og tro. Berginjeksjon i Norge er i stor grad basert på empiriske erfaringer opparbeidet gjennom mange år. Dette erfaringsgrunnlaget er en solid basis for utførelsen av berginjeksjon, men prosjektet har sett et behov for å tilføre en ny dimensjon i form av vitenskapelig basert kompetanse som kan bidra til optimalisering av injeksjonsarbeidene.

Forskningsprosjektet TIGHT har vart i 4 år. Det er relativt lang tid for et forskningsprosjekt, men for kort tid til å løse alle mulige aspekter ved berginjeksjon. Ved prosjektets avslutning må vi derfor erkjenne at det fortsatt gjenstår en god del forskning før vi kan si at berginjeksjon er godt nok vitenskapelig dokumentert. Foreliggende rapport kan gi den enkelte leser nye impulser og ny viten, og forhåpentligvis vil den medvirke til teknologiutvikling hos de selskapene som har deltatt i TIGHT. Vårt håp er at TIGHT skal bidra til en forutsigbar og mer tids- og kostnadseffektiv arbeidsoperasjon, samtidig som den gir tunneler som er tette nok for formålet.

Berginjeksjon er en usedvanlig komplisert arbeidsoppgave på et tunnelanlegg: Den kombinerer forståelse av to helt ulike materialer, bergmasse og injeksjonsmasse, den krever utnyttelse av moderne teknologi og den skal kunne evaluere nytten av å anvende ulike tilsetningsstoffer for å sikre bestemte egenskaper. I tillegg kommer faktorer som HMS og kontrakt.

En rekke firmaer og personer har uselvsk delt sin kunnskap og kompetanse med bransjen gjennom å delta i TIGHT. Uten disse menneskene, ingen TIGHT, og heller ingen kunnskapsdeling. På vegne av TIGHT og bransjen den representerer: Takk!

Med dette ønskes alle leserne velkommen til berginjeksjonens verden – god lesning!

Trondheim 27. januar 2020



Eivind Grøv

Prosjektleder TIGHT



# Innholdsfortegnelse

FORORD .....	3
1 Om prosjektet TIGHT .....	8
1.1 Organisering .....	9
1.2 Publikasjoner .....	12
1.3 Forsknings- og industripartnere .....	15
1.4 Bidragsytere .....	16
2 Arbeidspakke 2 – State of the art .....	17
2.1 Innledning.....	17
2.2 Hvordan avdekke behov for berginjeksjon?.....	17
2.3 Utstyr .....	18
2.4 Materialer for sementinjeksjon.....	18
2.5 Pozzolaner .....	19
2.6 Vann/semment-tall.....	19
2.7 Flyteegenskaper .....	19
2.8 Kontroll av innlekkasjen .....	19
2.9 Stoppkriterier for berginjeksjon .....	19
2.10 Forståelse av hva som skjer i berget .....	20
2.11 Oppsummering.....	21
3 Arbeidspakke 3 – Laboratorietesting av injeksjonssement .....	22
3.1 Forsøksoppsett.....	23
3.2 Blandinger .....	23
3.2.1 Blandinger med tilsetningsstoffer.....	24
3.3 Konsistens.....	25
3.3.1 Testresultater med tilsetningsstoffer .....	26
3.4 Flyteegenskaper .....	27
3.4.1 Reologi sement A ved 20 °C.....	27
3.4.2 Reologi sement B ved 20 °C .....	28
3.4.3 Reologi sement C ved 20 °C .....	29
3.5 Stabilitet og avbinding.....	30
3.5.1 Stabilitet med tilsetningsstoffer .....	31
3.6 Kalorimetri.....	31
3.6.1 Kalorimetri og temperaturutvikling for sement A, B og C med tilsetningsstoffer .....	34

3.7	UCS – Enaksiell trykkstyrke.....	38
3.8	Filtrasjonsstabilitet .....	39
3.8.1	Filtrasjonsstabilitet med tilsetningsstoffer .....	40
3.9	Permeabilitet.....	43
3.10	Diskusjon og konklusjoner fra arbeidspakke 3 .....	43
4	Arbeidspakke 4 – <i>Strømning og trykkfordeling i berget under injeksjon</i> .....	45
4.1	Sementegenskaper.....	45
4.2	Typiske hastigheter .....	45
4.3	Forenklede modeller .....	46
4.3.1	2D-modell.....	46
4.4	CFD-simulering .....	50
4.5	Énfasetester.....	50
4.6	3D-simulering .....	51
4.7	Aksesymmetrisk 3D-modell.....	53
4.8	Tofasestrømning, injeksjonsmasse som fortrenger vann .....	55
4.8.1	Aksesymmetrisk – Newtonsk.....	55
4.8.2	3D aksesymmetrisk, ikke-newtonsk.....	56
4.9	Oppsummering arbeidspakke 4 .....	57
5	Arbeidspakke 5 – <i>Injeksjon koblet sammen med bergmekanikk</i> .....	58
5.1	Introduksjon .....	58
5.2	Grunnleggende likninger .....	59
5.3	Reduksjon av antall dimensjoner for ikke-blandbar væske .....	61
5.4	Injeksjonsmasse: Bingham-væske .....	62
5.5	Validering av ikke-newtonsk strømning .....	63
5.6	Hydraulisk jekking.....	64
5.7	Numerisk simulering.....	66
5.8	Oppsummering av arbeidspakke 5 .....	70
6	Arbeidspakke 6 – <i>Skalert laboratoriemodell for injeksjon</i> .....	71
6.1	Tidligere forsøk med injeksjonsmodell .....	71
6.2	Injeksjonsmodellen til TIGHT.....	72
6.3	Testing av injeksjonsmasse .....	74
6.4	Oppsummering av arbeidspakke 6.....	75
7	Arbeidspakke 7 – <i>Fullskala testing under injeksjon</i> .....	77
7.1	Utstyr .....	77
7.2	Feltarbeid .....	78
7.3	Resultater .....	79

7.4	Diskusjon .....	81
7.5	Konklusjoner.....	84
8	Arbeidspakke 8 – <i>Monitoring</i> .....	85
8.1	Forsøksoppsett .....	85
8.2	Syntetiske data .....	85
8.3	Feltforsøk.....	87
8.4	Konklusjon .....	88
9	Ph.d. ....	89
9.1	Introduksjon .....	89
9.2	Sammendrag av utført forskning .....	89
9.3	Utvikling av metode for å tolke hydraulisk jekking i injeksjonslogger .....	89
9.4	Studie av sementforbruk i relasjon til type injeksjonsmasse og hydraulisk jekking .....	91
9.4.1	Resultater og diskusjon av dataanalyse fra injeksjonsprosessen .....	91
9.5	Feltstudie av forinjisert tunnel .....	95
9.6	Resultater i sammenheng med dagens utførelse av injeksjon .....	96
10	Sammendrag av masteroppgaver .....	98
10.1	Hydraulisk jekking ved høytrykksinjeksjon av berg.....	98
10.2	Injeksjon på Bodø-tunnelen – Analyse av elektronisk injeksjonsdata .....	99
10.3	Analyse av pumpedata som verktøy for oppfølging av injeksjonsarbeider .....	99
10.4	Undersøkelse av fenomenet hydraulisk jekking som følge av sementbasert forinjeksjon i Svartås-tunnelen, vestgående løp på E134 ved Kongsberg, Buskerud .....	100
10.5	Modellbasert berginjeksjon – Utforskning, vurdering og bruk av modeller for berginjeksjon .....	101
10.6	Analyse av injeksjonstestdata, Lyshorn-tunnelen, E 39, Svegatjørn-Rådal.....	101
11	Sammendrag av utført arbeid i TIGHT .....	103
12	Sluttord .....	105
13	Oversikt over personer involvert i TIGHT.....	106
14	Referanser .....	108



# 1 OM PROSJEKTET TIGHT

---

Ved tunnelbygging i urbane strøk eller andre steder med strenge krav til vannkontroll er berginjeksjon første linje av forsvar. Med en empirisk tilnærming har Norge vært en global pådriver for utvikling og bruk av berginjeksjon. Dette er basert på årlig produksjon for norsk tunnelindustri som har ligget på ca. 4 mill. fm<sup>3</sup> i utdrevet bergmasse i gjennomsnitt de siste 40 årene. 2017 var et historisk år med 7,8 mill. fm<sup>3</sup> utdrevet bergmasse. Fordi transportsystemer i byer i større grad flyttes under bakkenivå, vil mange av de framtidige tunnelprosjektene bygges i urbane strøk. Det vil derfor være et stort behov for injeksjon og kompetanse knyttet til dette i overskuelig fremtid.

Sementbasert berginjeksjon er en vanlig metode for å redusere innlekkasjer av vann i tunneler og bergrom. Injeksjonen utføres ved å pumpe injeksjonsmasse inn i sprekker i berget der massen herdner. I prosjekter med høye krav til å opprettholde grunnvannsstanden kan 20 til 30 % av drivekostnadene knyttes til injeksjonsrelatert arbeid. Uønsket innlekkasje av vann i tunnel er en vesentlig og vanlig årsak til forsinkelser og kostnadsoverskridelser i tunnelprosjekter. Derfor er det nødvendig med økt kunnskap slik at injeksjonspraksisen kan optimaliseres. Optimalisert injeksjon kan redusere både kostnader, material- og tidsbruk. Videre er produksjon av sement en av de største kildene til menneskeskapte CO<sub>2</sub>-utslipp. For å kunne redusere unødvendig forbruk av sement er det viktig å øke forståelsen av injeksjonsprosessen.

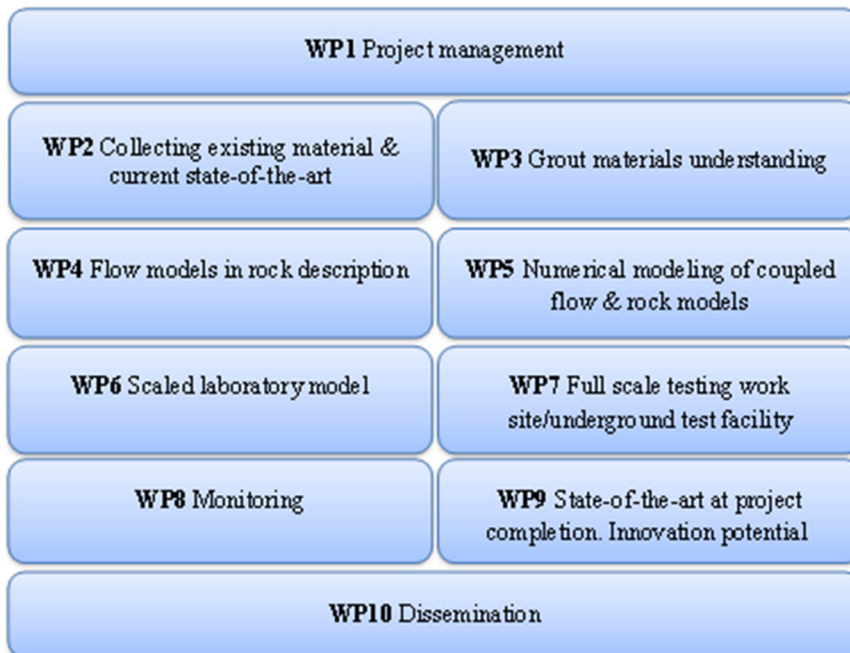
Injeksjonspraksisen i Norge er erfaringsbasert og har utviklet seg over mange år til å omfatte injeksjonsskjermer med mange hull og høyt injeksjonstrykk. Norge er kjent i industrien for det høye trykket, spesielt sammenliknet med svensk og amerikansk praksis. Sammenliknet med norsk praksis, er den svenske injeksjonspraksisen i større grad basert på teoretiske prinsipper. I Finland er injeksjon også empirisk fundert, men praksisen baserer seg i større grad på målinger. Den norske begrunnelsen for det høye trykket er raskere injeksjon og bedre injeksjon av de mindre sprekke.

I prosjekter hvor man benytter injeksjon bør arbeidsprosessen betraktes som en integrert del av tunneldriften. Injeksjon i tunnel er en del av det ferdige produktet og ikke kun en framdriftshemmende oppgave framtvunget av krav relatert til innlekkasje av vann. At omfattende injeksjonsarbeider vil være en del av tunneldrivingen i framtiden, kan tas for gitt.

TIGHT har vært et KPN (Kompetanseprosjekt for Næringslivet) under programmet som Norges Forskningsråd har gitt navnet BIA (Brukerstyrt Innovasjonsarena). Under skrivingen av søknaden til TIGHT tok SINTEF kontakt med internasjonale miljøer nettopp for å kunne balansere norsk praksis med praksis i andre tunnelmiljøer og for å utveksle erfaringer. SINTEF valgte BeFo, som er en felles organisasjon for tunnelnæringen i Sverige, samt forskningsinstitusjonen KIGAM i Korea og Nanyang Technological University i Singapore (NTU). Alle tre ble med i prosjektet under den forutsetning at deres arbeid og bidrag i TIGHT skulle finansieres av dem selv og ikke gjennom TIGHT.

## 1.1 ORGANISERING

TIGHT har vært organisert i forskjellige arbeidspakker. Hver av arbeidspakkene har jobbet med ulike temaer som spenner fra testing av injeksjonsmasse, fullskala feltforsøk og numeriske simuleringer til geofysiske målinger, se Figur 1. I tillegg til arbeidspakkene ble det utført en ph.d. og skrevet seks masteroppgaver i tilknytning TIGHT.



**Figur 1: Prosjektets inndeling i arbeidspakker (WP)**

### **Arbeidspakke 1: Prosjektstyring**

Overordnet prosjektstyring for utførelsen av forskningsprosjektet.

### **Arbeidspakke 2: State of the art**

SINTEF utarbeidet i 2015 rapporten *State of the art for sementbasert forinjeksjon*. Rapporten beskriver injeksjonspraksisen ved prosjektets oppstart.

### **Arbeidspakke 3: Forståelse av injeksjonsmassen**

NGI og SINTEF har delt på arbeidet om å utføre laboratorietester på vanlig brukte injeksjonssementer i Norge.

### **Arbeidspakke 4: Strømning og trykkfordeling i berget under injeksjon**

SINTEF har utført numerisk analyse av strømmingen til injeksjonsmassen i berget.

**Arbeidspakke 5: Injeksjon koblet sammen med bergmekanikk**

NGI har utviklet en numerisk modell for injeksjonsmodellering basert på virkelige injeksjonsdata.

**Arbeidspakke 6: Skalert laboratoriemodell for injeksjon**

NTNU har arbeidet med å lage en skalert laboratoriemodell for injeksjon.

**Arbeidspakke 7: Fullskala testing under injeksjon**

NGI har samlet inn data fra praktisk injeksjon i felt, der injeksjonshull ble instrumentert med trykkmålere som utførte kontinuerlig måling av trykk under hele injeksjonsforløpet. Det ble også utført tester med injeksjon av vann og benyttet borhullskamera. Under dette arbeidet ble hydraulisk jekking under injeksjonsforløpet grundig dokumentert.

**Arbeidspakke 8: Monitoring**

NGI har utført undersøkelser med GPR (EM) i berget etter injeksjon. Arbeidet har vist at det er mulig å identifisere vannførende og injiserte sprekker med GPR.

**Arbeidspakke 9: Sluttseminar**

I juni 2018 arrangerte prosjektet et sluttseminar som var åpent for hele bransjen.

**Arbeidspakke 10: Kunnskapsformidling**

SINTEF har utarbeidet en sluttrapport fra prosjektet (foreliggende rapport).

**Ph.d.: Assessment of High Pressure Pre-Excavation Rock Mass Grouting in Norwegian Tunnelling**

Ph.d.-graden ble utført av Helene Strømsvik i 2015–2019. Hun disputerte 14. oktober 2019.

Formålet med ph.d.-arbeidet var å opparbeide en økt forståelse for berginjeksjon utført ved bruk av høyt injeksjonstrykk, samt å vurdere om dagens praksis er optimal med tanke på reduksjon av innlekkasje, samtidig som økonomi og miljøaspekter er ivaretatt. Hovedfokus for arbeidet har vært tolkning av datalogger fra injeksjonsrigger, definering av hydraulisk jekking under injeksjon og konsekvenser av hydraulisk jekking.

**MSc-oppgaver:**

*Hydraulisk jekking ved høytrykksinjeksjon av berg*, av Stine Merete Hvoslef Moe (2016)

*Injeksjon på Bodøtunnelen – Analyse av elektronisk injeksjonsdata*, av Sølve Utstøl Pettersen (2016)

*Analyse av pumpedata som verktøy for oppfølging av injeksjonsarbeider, av Eivind Sundset Moe (2018)*

*Undersøkelse av fenomenet hydraulisk jekking som følge av sementbasert forinjeksjon i Svartåstunnelen, vestgående løp på E134 ved Kongsberg, Buskerud, av Sondre Wenaas (2018)*

*Modellbasert berginjeksjon – Utforskning, vurdering og bruk av modeller for berginjeksjon, av Martin Hovda Haugsand (2018)*

*Analyse av injeksjonstestdata, Lyshorntunnelen, E 39, Svegatjørn-Rådal, av Ida Skjæraasen (2019)*

## 1.2 PUBLIKASJONER

I det følgende har vi listet opp tidsskrifts- og konferanseartikler samt rapporter fra de ulike arbeidspakkene. Listen er ikke komplett og er kun ment som en oversikt.

### Arbeidspakke 1

Grøv, E. (2016). Tight – a research project on modern rock mass grouting techniques. *8<sup>th</sup> Nordic Grouting Symposium, Oslo, Norway, 26.-27. September 2016.*

Grøv, E. (2017). TIGHT: Et forskningsprosjekt om moderne teknikker innen berginjeksjon. I K. Kvalheim Dunham, Ø. Dammyr, M. Rømoen & S. Engen (Red.), *Fjellsprengningsteknikk, Bergmekanikk, Geoteknikk 2017* (s. 13.1-13.27). Oslo: Norsk Forening for Fjellsprengningsteknikk, Norsk Bergmekanikkgruppe og Norsk Geoteknisk Forening.

### Arbeidspakke 2

Holmøy, K.H., Strømsvik, H. & Rise, T. (2015). *State of the art for sementbasert forinjeksjon*. SINTEF rapport SBF 2015 A0318. Trondheim: SINTEF Byggforsk.

### Arbeidspakke 3

Skjølsvold, O. & Justnes, H. (2016). Characterization of cement types used for rock injection. *8<sup>th</sup> Nordic Grouting Symposium, Oslo, Norway, 26.-27. September 2016.*

Bohloli, B., Omolo, L.O., Soldal, M., Wilkinson H.D. & Morgan E.K. (2016). Mechanical and flow properties of cement grouts. *8th Nordic Grouting Symposium, Oslo, Norway, 26-27 September 2016.*

Justnes, H. & Skjølsvold, O. (2017). Characterization of cements for injection. I M.T. Hasholt (Red.), *Proceedings of the XXIII Nordic Concrete Research Symposium, Aalborg, Denmark, 21-23 August 2017* (s. 201-204). Oslo: The Nordic Concrete Federation.

Bohloli, B., Morgan, E.K., Grøv, E., Skjølsvold, O. & Hognestad, H.O. (2018). Strength and filtration stability of cement grouts at room and true tunnelling temperatures. *Tunnelling and Underground Space Technology, 71*, 193-200.

Bohloli, B., Skjølsvold, O., Justnes, H., Olsson, R., Grøv, E. & Aarset, A. (2019). Cement grouts for tunnelling – rheology and flow properties tested at different temperatures. *Tunnelling and Underground Space Technology, 91*, 1-10.

### Arbeidspakke 4

Skjetne, P. & Mo, S. (2016). Numerical simulations of grout flow in simplified geometries. *8th Nordic Grouting Symposium, Oslo, Norway, 26.-27. September 2016.*

### **Arbeidspakke 5**

Bjørnarå, T. I., Bohloli, B. & Tunbridge, L. (2016). Grout flow and pressure response in rock mass, with hydromechanical modelling. *8th Nordic Grouting Symposium, Oslo, Norway, 26-27 September 2016*.

Bjørnarå, T.I., Tunbridge, L. & Bohloli, B. (2017). Hydromechanical modelling of rock mass grouting. *American Rock Mechanics Association, 51st U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, 25-28 June, San Francisco, California, USA*.

### **Arbeidspakke 6**

Vistnes, G. & Nilsen, B. (2018). TIGHT WP6-Model design and initial testing. NTNU, Department of Geoscience and Petroleum.

Vistnes, G., Strømsvik, H., Nilsen, B. (2017). TIGHT WP6-State of the art and planned laboratory testing apparatus. NTNU, Department of Geoscience and Petroleum.

### **Arbeidspakke 7**

Tunbridge, L., Aarset, A., Tønnesen, E. (2016a). Measurement of grout injection pressure in situ. WTC 2016.

Tunbridge, L., Aarset, A., Tønnesen, E., Strømsvik, H. & Moe, S. (2016b). Measurement of grout injection pressure in-situ and interpretation of in-situ stresses. Bergmekanikkdagen 2016 og 8th Nordic Grouting Symposium 2016.

Tunbridge, L., Strømsvik, H. & Aarset, A. (2017). Results of in situ pressure measurements during pre-excavation grouting in rock tunnels. WTC 2017 Bergen.

### **Arbeidspakke 8**

Bazin, S. (2018). *Grout monitoring: Imaging of grout distribution with crosshole GPR*. Trondheim: Norwegian Geotechnical institute.

Bazin, S., Kvistedal, Y., Anshütz, H., Tunbridge, L., Jankowski, P., Fannian, K., Strømsvik, H. & Grøv, E. (2018). Case study of crosshole GPR tomography for grouting distribution in rock fractures. *Conference Proceedings, EAGE-HAGI 1st Asia Pacific meeting on Near Surface Geoscience & Engineering 9-13 April 2018, Yogyakarta, Indonesia*.

### **Arbeidspakke 10**

Grøv, E., Strømsvik, H. & Haugsand, M.H. (2020). *Sementbasert berginjeksjon. Sluttrapport fra prosjektet TIGHT (foreliggende rapport)*. Viten 2. Oslo: SINTEF akademisk forlag.

### **Ph.d.-kandidat**

Strømsvik, H. (2016). Investigation of parameters for on-site monitoring of pre-grouting in hard rock. *8th Nordic Grouting Symposium, Oslo, Norway, 26.-27. September 2016*.

Strømsvik, H. & Grøv, E. (2017). Interpretation of pressure and flow during pre-grouting in hard rock tunneling. *Grouting 2017, Honolulu, USA*.

- Strømsvik, H., Morud, J.C. & Grøv, E. (2018). Development of an algorithm to detect hydraulic jacking in high pressure rock mass grouting and introduction of the PF index. *Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research*, 81, 16-25. doi:10.1016/j.tust.2018.06.027.
- Strømsvik, H. (2019a). The significance of hydraulic jacking for grout consumption during high pressure pre-grouting in Norwegian tunnelling. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 90, 357-368. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2019.05.014>.
- Strømsvik, H. (2019b). *Assessment of High Pressure Pre-Excavation Rock Mass Grouting in Norwegian Tunnelling* (Doktorgradsavhandling). NTNU, Trondheim.

### **MSc-publikasjoner**

- Moe, S.M.H. (2016). *Hydraulisk jekking ved høytrykksinjeksjon av berg* (Masteravhandling). NTNU, Trondheim.
- Pettersen, S.U. (2016). *Injeksjon på Bodøtunnelen – Analyse av elektronisk injeksjonsdata* (Mastergradsavhandling). NTNU, Trondheim.
- Moe, S., Pettersen, S.U. & Wetlesen, T. (2016). Real time monitoring and documentation of grouting process in tunnelling and underground work. *8<sup>th</sup> Nordic Grouting Symposium, Oslo, Norway, 26.-27. September 2016*.
- Moe, E.S. (2018). *Analyse av pumpedata som verktøy for oppfølging av injeksjonsarbeider* (Mastergradsavhandling). NTNU, Trondheim.
- Wenaas, S. (2018). *Undersøkelse av fenomenet hydraulisk jekking som følge av sementbasert forinjeksjon i Svartåstunnelen, vestgående løp på E134 ved Kongsberg, Buskerud* (Mastergradsavhandling). NTNU, Trondheim.
- Haugsand, M.H. (2018). *Modellbasert berginjeksjon – Utforskning, vurdering og bruk av modeller for berginjeksjon* (Mastergradsavhandling). NTNU, Trondheim.
- Skjæraasen, I. (2019). *Analyse av injeksjonstestdata, Lyshorntunnelen, E 39, Svegatjørn-Rådal* (Mastergradsavhandling). NTNU, Trondheim.

## 1.3 FORSKNINGS- OG INDUSTRIPARTNERE

Følgende bedrifter, institusjoner og organisasjoner har deltatt i og bidratt til at TIGHT har blitt gjennomført:



### Deltakende bedriftspartnere

Andersen Mekaniske Verksted AS

BASF Norge AS

Bever Control AS

GeoVita AS

Leonard Nilsen & Sønner AS

Mapei AS

Normet Norway AS

Veidekke ASA

Injeksjon & Tunnel-Support AS (ITS)

### Forsknings- og undervisningsinstitusjoner

NGI – Norges Geotekniske Institutt

NTNU – Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet

SINTEF

### Offentlige organisasjoner

Norges Forskningsråd

Statens Vegvesen

Bane NOR



## **Utenlandske partnere**

BeFo – Stiftelsen Bergteknisk Forskning Sverige

KIGAM – Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

NTU – Nanyang Technological University Singapore

## **1.4 BIDRAGSYTERE**

Denne sluttrapporten er produsert som en del av forskningsprosjektet “True Improvement in Grouting High pressure Technology for tunneling (TIGHT)”. Prosjektet er finansiert av Norges Forskningsråd (prosjektnr. 236676/O30) samt industripartnerne BASF, Mapei, Geovita, LNS, ITS, Normet, Bever Control, AMV og Veidekke, i samarbeid med Statens vegvesen og Bane NOR. Forskningspartnere som er med i TIGHT, er NGI, NTNU og SINTEF, mens KIGAM i Korea, Nanyang universitet i Singapore og BeFo i Sverige er assosierte deltakere.

Det rettes en stor takk til alle deltakerne for faglige og økonomiske bidrag. Vi håper at foreliggende rapport blir et viktig bidrag til å utvikle en god og ressurseffektiv berginjeksjon for framtidige tunnelprosjekter i Norge. Videre håper vi at alle deltakere har fått en merverdi ved å delta i forskningsprosjektet i form av økt innsikt i faget berginjeksjon, og at den enkelte deltaker og hvert firma har ervervet kunnskap, inspirasjon og grunnlag for å utvikle ny teknologi og nye muligheter for bedret konkurransevne.

## 2 ARBEIDSPAKKE 2 – STATE OF THE ART

State of the art-rapporten i TIGHT beskriver injeksjonspraksisen ved prosjektets begynnelse. Rapporten er utarbeidet av Kristin H. Holmøy, Helene Strømsvik og Torun Rise (2015).

### 2.1 INNLEDNING

I de senere år har strengere krav til lekkasje i tunneler ført til økt bruk av systematisk forinjeksjon. Berginjeksjon anses som en både tid- og kostnadskrevende prosess. Mellom 20 og 30 % av drivekostnadene til en tunnel kan bestå av injeksjonsarbeider. Utenom forskningsprosjektet "Miljø- og samfunnstjenlige tunneler" (2000–2003) er det utført lite forskning på injeksjon i Norge. Generelt er norsk injeksjonspraksis i dag tuftet på empiri og praksis. I Sverige er det drevet forskning på berginjeksjon siden 1980-tallet. Sverige er derfor ledende på forskning og utvikling, og deres injeksjonspraksis er i større grad akademisk forankret.

### 2.2 HVORDAN AVDEKKE BEHOV FOR BERGINJEKSJON?

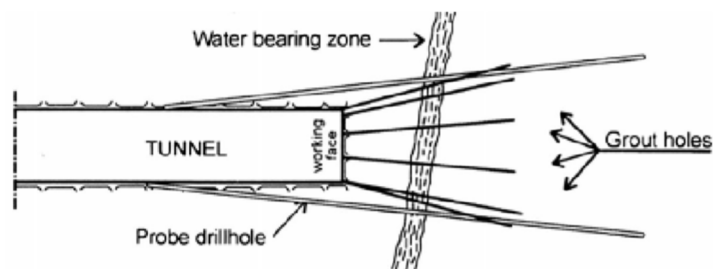
Behovet for berginjeksjon bestemmes av funksjons- og miljøkravene sett sammen med geologien, og grundige geologiske og hydrogeologiske undersøkelser er en nødvendighet for å avgjøre behovet. Undersøkellesmetoder som seismikk, kjerneboringer, lugeon-målinger, resistivitetmålinger, OTV og andre geofysiske metoder kan danne grunnlaget for en god geologisk forståelse av bergmassen. Vannforholdene i berget er derimot vanskeligere å bestemme. Det fins ingen enkel metode som gir en sikker indikasjon på vannstrømningen i berget. Bergets oppsprekking kan variere mye over korte avstander og gode data er vanskelig å skaffe. Mangelen på god geologisk informasjon er en av faktorene som gjør berginjeksjon utfordrende.

Innlekkasje i tunnel beskrives i liter/minutt/100 meter tunnel. Kravene til innlekkasje varierer med funksjons- og miljøkravene til tunnelen. For typiske lekkasjekrav i Norge, se Tabell 1.

**Tabell 1: Typiske krav til innlekkasje i norske tunneler**

	<b>Strengt</b>	<b>Middels</b>	<b>Moderat</b>
Akseptabel lekkasje	5 l/min/100 m	10 l/min/100 m	20 l/min/100 m
Områdesensitivitet	Meget sensitiv	Moderat sensitiv	Områdeavhengig

Målet med injeksjon er å fylle åpninger og sprekker i berget med injeksjonsmasse. I berginjeksjon er det ønskelig å skape en tett sone rundt tunnelprofilen. Den tette sonen bør strekke seg forbi, men ikke mye lengre enn lengden til bergsikringen. Sonen behøver ikke overstige 10 m utenfor tunnelkonturen. Vurdering av behovet for injeksjon ut fra observasjoner i dagen er vanskelig. Hvis man benytter behovsprøvd injeksjon, utføres undersøkelser under driving av tunnelen som sonderboring. Undersøkelsene består av vanntapsmåling med tidtaker og bøtte fra sonderhull, se Figur 2. Om vanntapet overstiger en gitt verdi, igangsettes injeksjon. "Measurement while drilling" (MWD) er antatt å ha et godt potensial for vurdering av behovet for injeksjon.



**Figur 2: Illustrasjon av metodikken for sonderboring og borhull for forinjeksjon. Kilde: Nilsen (2014).**

## 2.3 UTSTYR

Injeksjon krever en injeksjonsrigg som kan blande, holde, logge og pumpe injeksjonsmasse inn i berget. Av utstyr kreves også injeksjonsstaver, pakkere, slanger og koblinger for å føre injeksjonsmassen fra riggen til berget. Den norske standarden NS-EN 12715 (2000) beskriver krav til injeksjonsutstyr. Håndboka *Praktisk berginjeksjon for underjordsanlegg* (NFF, 2010) gir en detaljert framstilling av injeksjonsutstyr, metoder, sikkerhet og vedlikehold, og beskrivelse og tester av injeksjonsmasse.

## 2.4 MATERIALER FOR SEMENTINJEKSJON

Innen injeksjon skilles det mellom sementbaserte og ikke-sementbaserte injeksjonsmidler. I hovedsak benyttes sementbaserte midler til forinjeksjon. Ikke-sementbaserte produkter blir mest brukt til etterinjeksjon og spesialinjeksjon og har ikke vært inkludert i TIGHT-prosjektet. Sement er et komplekst materiale. Det går fra å være flytende rett etter blanding til å bli et fast materiale med styrke og stivhet. Sement kan utvise et stort spenn i egenskaper under flyt, i ro, under herdning og i herdnet form.

Injeksjonsement fins i ulike finhetsgrader. Finheten er vanligvis oppgitt i Blaine ( $m^2/kg$ ), men  $D_{95}$  er også mye brukt.  $D_{95}$  oppgir kornstørrelsen, hvor 95 % av massen har korn som er mindre. Kornstørrelsen er viktig i vurderingen av en injeksjonsement fordi den er forbundet med sementens inntrengingsevne. En kjent tommelfingerregel sier at minste sprekk som kan injiseres, er tre ganger størrelsen til største sementpartikkel, men forskning viser at ved små kornstørrelser, kreves det forholdsvis betydelig større sprekker. Faren for flokkulering, eller sammenbinding av mindre partikler til større, og filterkakedannelse ventes å øke med minkende kornstørrelse. Forslag til minste injiserbare sprekk basert på maksimal kornstørrelse varierer fra 3–10 (Stille, Gustavson & Hassler, 2012).

Ugunstige effekter knyttet til injeksjon er blant annet:

- *Filterkakedannelse.* Filterkakedannelse skjer når sement og vann skiller seg under inntrenging i bergsprekken. Det skaper en "kake" bestående av tettpakkede sementkorn og kan hindre et godt injeksjonsresultat.
- *Bleeding.* Bleeding er vannutskillelse av sementblandingen. Bleeding testes ved å la sement stå i en målesylinder og måle vannutskillelsen som forekommer i toppen av cylinderen. Om bleeding forekommer i en sprekk etter avsluttet injeksjon, kan det føre til kanaler som ikke er sementfylt, men vannførende. En sement defineres ifølge NS-EN 12715 (2000) som stabil om vann/sement-suspensjonen har mindre enn 0,5 % vannutskillelse.

## 2.5 POZZOLANER

For å bedre økonomien og miljøhensynet kan man erstatte deler av sementpartiklene med pozzolan. Pozzolan er et materiale som evner å hydratiseres uten å være sement. Blant pozzolanene er stoffer som slagg, mikrosilika og flygeaske. Effekten til disse materialene i sement avhenger av mengde, men har følgende generelle virkning:

- *Slagg*: Øker bindetiden, fører til mer langsom hydratisering og tregere fasthetsutvikling
- *Mikrosilika*: Reduserer sementens tendens til *bleeding*
- *Flygeaske*: Gir økt kohesjon og styrke samt redusert *bleeding*

## 2.6 VANN/SEMENT-TALL

Forholdet mellom vann og sement i en sementblanding er den viktigste faktoren for sementens egenskaper. I dagligtale omtales dette forholdet som v/c-tall og benevnes i det videre som v/c. Et høyt v/c-tall (>0,8) gir bedre flyteegenskaper og god inntrengingsevne, med et dårligere herderesultat og lengre herdetid. Dette kan føre til høyere masseforbruk og økt fare for hydraulisk jekking (Kveen & Lindstrøm, 2004). V/c-tallet kan også påvirke stabiliteten i forhold til vannutskillelse.

## 2.7 FLYTEGENSKAPER

Sement beskrives som en Bingham-væske. En Bingham-væske har en initiell skjærstyrke som må overvinnes før den begynner å flyte. Skjærstyrken og viskositeten til sement vil øke etter hvert som den herdnes. For å bedre flyteegenskapene kan dispergerende middel tilsettes sementen (kalles superplastiserende stoffer). Andre kjemiske midler som kan tilsettes injeksjonsmassen, er:

- *Retarder*: Utsetter den kjemiske reaksjonen i sementen
- *Størkningsaksellerator*: Framskynder størkning
- *Herdeaksellerator*: Framskynder herdningen
- *Stabilisator*: Stabiliserer injeksjonssementen

## 2.8 KONTROLL AV INNLEKKASJEN

Det er mulig å avgjøre lekkasjen inn i en tunnel ved å måle hvor mye vann som må pumpes ut. Testingen kan avgrenses til seksjoner av tunnelen ved å installere måleterskler som måler vannet som renner over. Brønner for måling og logging av grunnvannsstanden kan installeres rundt anlegget. Denne informasjonen kan brukes til å beskrive tunnelens påvirkning på grunnvannet og til å estimere innlekkasjen.

Mange innlekkasjekrav og målemetoder er indirekte metoder. Oppfølging av piezometrisk trykk og deformasjoner i bygg er derimot direkte målinger på effekten av grunnvannssenkning ved tunnelbygging.

## 2.9 STOPPKRITERIER FOR BERGINJEKSJON

Det fins ingen kjente metoder for å måle spredningen til injeksjonsmassen i berget. Det er kjent at spredningen styres av berget, injeksjonsmassen og injeksjonstrykket. I injeksjonsinstruksen er det vanlig å beskrive hvordan man skal styre injeksjonsmassen og trykket, og når injeksjon av et hull skal avsluttes. I Norge er det vanlig å injisere til injeksjonshullet ikke aksepterer mer masse med et trykk

opp mot og over 80 bar. Det er vanlig å starte injeksjonen med en tynn sementblanding som gradvis økes dersom hullet tar imot mye masse eller om trykkoppbygging uteblir.

Det fins også andre konsepter for styring av injeksjon. *GIN* (Grout Intensity Number) er en metode hvor injeksjonen skal følge et fastsatt trykk- og volumforløp. Dette er ment å eliminere faren for jekking av berget og setter et stoppkrav basert på injisert volum. Metoden er mest benyttet i forbindelse med injeksjon av damfundamenter.

*RTGC* (Real Time Grouting Control) er et system utviklet i Sverige som benytter forenklete geometrier til å estimere penetrasjonslengden til injeksjonsmassen. Det muliggjør å sette stoppkrav basert på estimert penetrasjon av injeksjonsmassen.

Hydraulisk jekking av berget forekommer når kraften som virker fra injeksjonsmassens trykk på sprekeoverflaten, er tilstrekkelig stor til å utvide sprekken (det vil si overvinne normalspenningene på sprekken). Hvor stor denne kraften må være avhenger av injeksjonsmassens utspredning, trykk og de geologiske forholdene.

## 2.10 FORSTÅELSE AV HVA SOM SKJER I BERGET

Generelt fins det lite kunnskap om hva som skjer inne i berget under injeksjon. I forskningsprosjektet "Miljø- og samfunnstjenlige tunneler" (Klüver & Kveen, 2004) ble det gitt en beskrivelse av injeksjon i forhold til bergmassen karakter, der bergmassen ble klassifisert i fire forskjellige grupper:

- *Bergmasse A*: Åpne sprekker uten vesentlig sprekebelegg (sandstein, kvartsitt, Oslofeltets lavabergarter)
- *Bergmasse B*: Sprekker med sprekefylling, tendens til kanaldannelse. Denne typen bergmasse utgjør hoveddelen av norsk berggrunn (Prekambrisk gneis og tilsvarende metamorfe bergarter).
- *Bergmasse C*: Tette plastiske bergarter med høy grad av sprekefylling, med små kanaler (metamorfe sedimentære bergarter som leirskifer, fyllitt, glimmerskifer, grønnskifer etc.)
- *Bergmasse D*: Bergmasse som er tektonisk påvirket, eller med karstfenomener som har ført til ekstrem åpen oppsprekking, eller åpne rom i berget.

I rapporten er effekten av de ulike geologiske faktorene på konduktiviteten og injiserbarheten i bergmassen gitt som:

- *Leirfyllingsgrad*: Høyt innhold → Nedsatt konduktivitet og injiserbarhet
- *Korngraderingen til sprekefyllingen*: God filtergradering → Stor motstand mot inntrenging av injeksjonsmasse
- *Sprekkeintensitet*: Høy sprekeintensitet → Høy konduktivitet
- *Sprekkeorientering*: Betydning for vanntilførsel samt parallellorienterte sprekker gir vanskelige forhold for tetting.
- *Sprekkeåpning*: Påvirker konduktivitet og vanntilførsel
- *Topografi*: Påvirker vanntilførsel
- *Spenninger i bergmassen*: Nær dagen → Liten innspenning, derav åpne sprekker. Dypere → Høy innspenning, mer lukkede sprekker og vanligvis lavere konduktivitet

- *Anisotrope spenningsforhold:* Sprekkene har forskjellig åpning avhengig av sprekkeorientering i forhold til spenningene. I slike tilfeller er det vanskelig å fylle alle sprekkesystemene.

## **2.11 OPPSUMMERING**

Berginjeksjon er et teknisk og komplekst tema som krever materialkunnskap, utstyrskompetanse, bergmekanisk forståelse, praktisk erfaring og geologisk bakgrunn for de som er ansvarlig for planlegging og utføring av injeksjonen. Optimalisering av berginjeksjon i tunnelindustrien vil kreve både god praktisk og god teoretisk forståelse.

### 3 ARBEIDSPAKKE 3 – LABORATORIETESTING AV INJEKSJONS-SEMENT

---

Arbeidet med sementforståelse og laboratorietesting av sement er utført av NGI og SINTEF i samråd med industripartnerne i prosjektet. Fra SINTEF har Ola Skjølvold og Harald Justnes skrevet rapporter og utført tester på fersk sement. Arbeidspakken ble ledet av NGI ved Bahman Boholi og Elin Katrine Morgan testet filtrasjonsstabilitet, kornfordeling og styrke på fersk sement.

En artikkel om styrke og filtrasjonsstabilitet er publisert i tidsskriftet *Tunnelling and Underground Space Technology* (Bohlooli et al., 2018). I dette kapitlet oppsummerer vi testene og testresultatene til arbeidspakke 3. Grunnlaget er den publiserte artikkelen, konferansepapirer og interne rapporter fra arbeidet.

Hovedformålet med sementtestingen i TIGHT var å teste sementproduktene under forhold som var sammenfallende med de rådene forhold *in situ* i tunnel under injeksjonsarbeider. De fleste testene er derfor utført i både romtemperatur og ved kontrollert temperatur på rundt 8 °C. Under følger en oversikt over testene med en kortfattet beskrivelse:

*UCS*: styrken til herdet sement

*Filtrasjon*: sementens evne til å trenge igjennom et filter

*Stabilitet*: vannutskillelse under herdning

*Avbinding*: stadiet der sementen holder formen, men er tilnærmet uten styrke

*Konsistens*: hvor "tykk" sementmassen er

*Kalorimetri*: varmeutgivelse under herdning. Forløpet er et mål på hvordan sementen hydratiseres, som innebærer at sementkornene binder til seg vann og danner nye og større partikler.

*Densitet*: vekten til sementkornene per volumenhet

*Overflateareal*: overflate på korn per vektenhet

*Kornfordeling*: fordelingen av kornstørrelsen til sementpartiklene

*Blaine*: luftpermeabilitetstest basert på hastigheten luft kan passere gjennom en porøs seng av partikler under en gitt trykkgradient, som en funksjon av overflatearealet av pulveret

*BET*: overflatearealevaluering av partikler ved adsorpsjon av nitrogen multilagsmålinger, målt som en funksjon av relativ trykk

*Permeabilitet*: evnen til vanngjennomtrenging til den herdede sementen. Permeabilitet er dermed også et mål på porøsitet.

### 3.1 FORSØKSOPPSETT

Sju sementer fra fire forskjellige produsenter ble plukket ut til testing. Alle sementene ble testet for densitet, Blaine, BET og kornfordeling. Sementene er anonymisert og resultatene fra de innledende testene er vist i Tabell 2.

**Tabell 2: Resultat fra innledende tester av ulike sementblandinger**

Sement	Sement A	Sement B	Sement C	Sement D	Sement E	Sement F	Sement G
Densitet [g/cm <sup>3</sup> ]	3,17	3,16	3,10	3,16	3,17	3,16	3,21
Blaine [cm <sup>2</sup> /g]	729	541	706	793	856	557	892
BET	1,88	1,58	1,93	1,95	2,16	1,49	2,11
D <sub>95</sub> [µm]	17	18	25	29	30	33	12

Metoden for måling av finhet med Blaine (luftgjennomstrømning) er utviklet for vanlige portland-sementer. Siden flere av sementene er malt finere enn vanlig sement ble det også utført BET måling. BET måler spesifikk overflate med nitrogenabsorpsjon.

Etter den innledende testen ble tre sementer valgt ut for videre testing basert på testresultatene. Sementene A, B og C ble valgt, og alle referanser til sementene A, B og C i det videre korresponderer med sementene A, B og C i Tabell 2.

### 3.2 BLANDINGER

Hvordan sement blandes, påvirker egenskapene til sementen. For at testresultatene skal kunne sammenliknes, ble det benyttet lik blandedprosedyre for alle de testede sementene. Det ble utført 4 blandinger med forskjellig v/c-tall og temperatur. En Waring laboratoriemikser ble benyttet til å blande sementen, se figur 3. Mikseren ble først fylt med vann. Sementen ble så tilsatt under omrøring over 30 sekunder. Massen ble deretter blandet i 2 minutter, det vil si at total blandetid var 2 minutter og 30 sekunder. Mikseren blandet med 2 000 omdreininger i minuttet. Tabell 3 viser de utførte blandingerne.



**Tabell 3: Utførte blandinger**

Blanding nr.	1	2	3	4
Sement (kg)	1,75	2,00	2,35	2,85
Vann (kg)	2,10	2,00	1,88	1,71
v/c-forhold	1,2	1,0	0,8	0,6

### 3.2.1 Blandinger med tilsetningsstoffer

Sementene A, B og C med v/c-tall 0,8 ble testet med forskjellige typer plastiserende stoffer. Sement B ble i tillegg testet med 10 % mikrosilika. Følgende tilsetningsstoffer ble testet:

**Figur 3: Waring hurtigmikser**

- Mapei GroutTech System N (dosering: 0,5–1,5 % av sementvekt)
- BASF Rheobuild PF2000 (dosering: 1–2 % av sementvekt)
- Normet TamCem SP-I (dosering: 0,5–1,5 % av sementvekt)

Mikrosilikaen som ble brukt, var Elkem Emsac 500E silica slurry med 50 % vanninnhold. Benyttet dosering av tilsetningsstoffene var som anbefalt fra databladene til produktene. Utførte blandinger for sementene A og B er vist i Tabell 4, og for sementene C og D i Tabell 5, der blanding D er sement B med mikrosilika. Hvilke tilsetningsstoffer som er benyttet, er anonymisert. Blandingen av sementen var her den samme som for sement uten tilsetningsstoffer. Mikrosilika ble tilsatt sammen med vannet før sementen ble tilsatt. Sementen og blandingene ble utført ved en temperatur på 8 °C.

**Tabell 4: Utførte blandinger med ulike tilsetningsstoffer, sement A og B**

Blanding	A-1	A-2	A-3	B-1	B-2	B-3
<b>Sement</b>	<b>A</b>			<b>B</b>		
Tilsetning	1	2	3	1	2	3
Sement (g)	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000
Mikrosilika (g)	–	–	–	–	–	–
Totalt vanninnhold (g)	2 400	2 400	2 400	2 400	2 400	2 400
v/c+s	0,8					

**Tabell 5: Utførte blandinger med ulike tilsetningsstoffer, sement C og D**

Blanding	C-1	C-2	C-3	D-11	D-12
<b>Sement</b>	<b>C</b>			<b>B</b>	
Tilsetning	1	2	3	1	1
Sement (g)	3 000	3 000	3 000	2 700	2 700
Mikrosilika (g)	–	–	–	540	540
Totalt vanninnhold (g)	2 400	2 400	2 400	2 640	2 930
v/c+s	0,8			0,9	1,0

### 3.3 KONSISTENS

Konsistensen til sementen ble målt med standard Marsh Cone- og bordutflytningstest. Marsh Cone er en trakt med en indre diameter for utløpet på 4,5 mm. Trakten fylles med 1,7 liter sement, og tiden det tar for en liter sement å renne igjennom trakten er målet på konsistensen. I en bordutflytningstest fylles en sylinder med indre diameter på 39 mm og en høyde på 60 mm med sement, plassert på en glassplate (NS-EN 445:2007, 2008). Sylindren løftes fra glassplata med en stødig, rask bevegelse slik at sementen flyter ut over glassplaten. Utbredelsen til sementen på glassplaten er målet på konsistensen. Utbredelsen måles som den midlere diameteren av to målinger målt vinkelrett på hverandre. Bilde av Marsh Cone- og bordutflytningstesten er gitt i Figur 4. Resultatene fra Marsh Cone- og bordutflytningstesten med blandinger ved 20 °C er gitt i Tabell 6 og for 8 °C i Tabell 7.

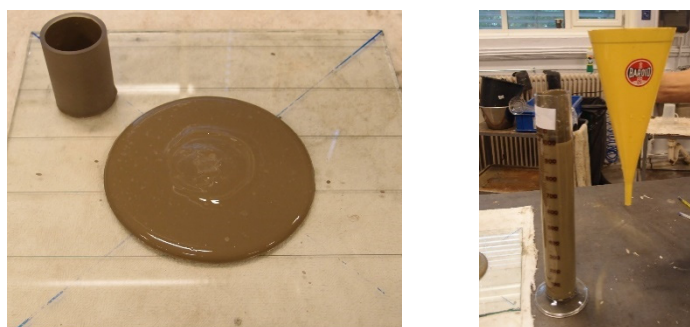
**Tabell 6: Resultater av utbredelse med ring og Marsh Cone tid ved 20 °C**

Sement	Sement A				Sement B				Sement C			
v/c	1,2	1,0	0,8	0,6	1,2	1,0	0,8	0,6	1,2	1,0	0,8	0,6
Temperatur	20	19	19	19	19	20	20	20	19	19	19	19
Utbredelse [mm]	290	255	229	143	284	263	222	127	295	255	220	150
Marsh Cone [sek]	30,3	32,6	36,4	52,1	30,4	32,6	39,2	88,4	31,0	33,9	39,6	—*

\* Massen var ikke egnet for prøving med Marsh Cone, kun 480 ml fløt ut av trakta på 90 sekunder.

**Tabell 7: Resultater av utbredelse med ring og Marsh Cone tid ved 8 °C**

Sement	Sement A				Sement B				Sement C			
v/c	1,2	1,0	0,8	0,6	1,2	1,0	0,8	0,6	1,2	1,0	0,8	0,6
Temperatur	7	7	6	6,5	6	6	6	7	7	7	7	6
Utbredelse [mm]	295	290	250	205	280	280	255	190	285	260	215	160
Marsh Cone [sek]	32,0	33,5	36,1	50,4	30,3	31,5	36,0	51,1	31,5	34,3	39,6	75,6

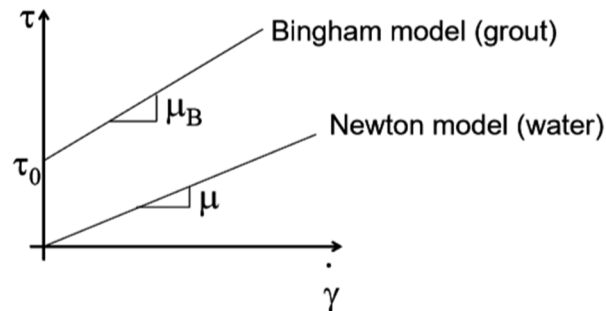


**Figur 4: Bordutflytning (til venstre) og Mars Cone-test (til høyre)**

Konsistensen til sement beskriver noe av flyteegenskapene. Sement kan utvise et stort spenn i flyteegenskaper fra den er blandet til den er herdnet. Like etter blanding er sementen flytende. Etter hvert

som sementen hardner, endres flyteegenskapene fra det som gjelder for en Bingham-væske til et plastisk materiale, og sluttresultatet er et elastisk fast materiale.

Sement beskrives som nevnt over ofte som en Bingham-væske. Det betyr at sementen har en initiell skjærstyrke som må overvinnnes før flyt skjer. Etter at skjærstyrken er brutt, oppfører sementen seg som en vanlig væske. Hvordan skjærraten (strømningshastighet mot kanalåpning) relateres til skjærstyrken er vist i Figur 5.



**Figur 5: Bingham og newtonsk beskrivelse. Kilde: Dalmalm (2004)**

Det er vanlig å tilsette stoffer i sementblandingen som skal bedre flyteegenskapene til injeksjons-sementen. Hvordan forskjellige sementer påvirker flyteegenskapene er gitt av Dalmalm (2004) som vist i Figur 6.

Additive / action	Influence on:		
	Yield stress*	Viscosity*	Binding time*
Decreased W/C ratio	+++	+++	--
Increased specific cement surface	++	++	--
Decreased temperature	++	+	++
Addition of bentonite	++	++	+/-
Addition of silica	+++	++	-
Addition of superplasticizer	---	---	++
Addition of sodium silicate	+++	+	-
Addition of calcium chloride	+	+	---

\*)   +++   large increase   ---   large decrease  
       ++    moderate increase   --   moderate decrease  
       +    small increase    -    small decrease  
       +/-   indifferent

**Figur 6: Effekt av tilsetningsstoffer i sement. Kilde: Dalmalm (2004)**

### 3.3.1 Testresultater med tilsetningsstoffer

Marsh Cone og utbredelsestest ble også utført med sement tilsatt tilsetningsstoffer. Resultatene fra Marsh Cone og bordutflytningstesten for sement A og B med tilsetningsstoffer er vist i Tabell 8 og Tabell 9.

**Tabell 8: Testresultat for sement A og B med tilsetningsstoff**

Blanding	A-1	A-2	A-3	B-1	B-2	B-3
Sement	A			B		
Tilsetning	1	2	3	1	2	3
Fersk sement temperatur (°C)	9	9	9	9	9	10
Utbredelse (mm)	292	310	253	274	262	209
Marsh Cone (sek)	32,7	32,1	37,9	36,0	37,0	51,5

**Tabell 9: Testresultat for sement C med tilsetningsstoff. Blandingene D er sement B med mikrosilika**

Blanding	C-1	C-2	C-3	D-11	D-12
Sement	C			B	
Tilsetning	1	2	3	1	1
Fersk sement temperatur (°C)	10	10	10	11	11
Utbredelse (mm)	255	229	224	300	285
Marsh Cone (sek)	37,6	39,9	42,4	33,6	34,7

### 3.4 FLYTEGENSKAPER

Marsh Cone og utbredelsestesten er kvalitative testmetoder. Det ble utarbeidet sammenhenger mellom testene. Disse resultatene er ikke gjengitt her, men finnes i Skjølvold & Justnes (2016). I TIGHT ble det også utført en mer direkte kvantitativ test av flytegenskapene til sement A, B og C ved 20 °C ved bruk av et Physica parallellplateviskometer. Apparatet består av to plater med diameter på 50 mm, der den øvre plata roterer og den undre plata er stasjonær. Sementen ligger mellom platene, og torsjonskraften måles på den nedre plata. Ved å måle ved forskjellige rotasjonshastigheter kan viskositeten bestemmes som stigningstallet til sammenhengen mellom skjærkraften og rotasjonshastigheten ved regresjon. Resultatene fra testene er gitt i tabellene i de neste underkapitlene (Tabell 10 til Tabell 21).

#### 3.4.1 Reologi sement A ved 20 °C

**Tabell 10: Flytmotstand for Sement A som funksjon av v/c ved 20 °C**

v/c	1,2	1,0	0,8	0,6
Syklus 1	389 Pa/s ved 18 min	615 Pa/s ved 16 min	1 325 Pa/s ved 14 min	4 349 Pa/s ved 16 min
Syklus 2	416 Pa/s ved 34 min	826 Pa/s ved 32 min	1 833 Pa/s ved 32 min	Størknet
Syklus 3	Størknet	Størknet	Størknet	Størknet
Syklus 4	Størknet	Størknet	Størknet	Størknet

**Tabell 11: Data fra lineær regresjon av flytkurve for Sement A som funksjon av v/c ved 20 °C**

Linær reg →	$\mu$ [mPa·s]	$\tau_{dyn}$ [Pa]	$r^2$	$\mu$ [mPa·s]	$\tau_{dyn}$ [Pa]	$r^2$	$\mu$ [mPa·s]	$\tau_{dyn}$ [Pa]	$r^2$	M [mPa·s]	$\tau_{dyn}$ [Pa]	$r^2$
v/c	1,2			1,0			0,8			0,6		
Syklus 1	31,4 ved 18 min	0,4	,997	38,9 ved 16 min	1,4	,992	75,1 ved 14 min	3,7	,995	183 ved 13 min	17,0	,994
Syklus 2	27,0 ved 34 min	0,8	1,00	44,7 ved 32 min	2,4	1,00	90,0 ved 32 min	6,3	,995	Størknet		
Syklus 3	Størknet			Størknet			Størknet			Størknet		
Syklus 4	Størknet			Størknet			Størknet			Størknet		

**Tabell 12: Statisk flyteskjærspenning etter 10 s hvile for Sement A versus v/c ved 20 °C**

v/c	1,2	1,0	0,8	0,6
Syklus 1	0,1 Pa ved 19 min	1 Pa ved 17 min	1 Pa ved 15 min	14 Pa ved 15 min
Syklus 2	0,2 Pa ved 35 min	1 Pa ved 33 min	1 Pa ved 33 min	Størknet
Syklus 3	Størknet	Størknet	Størknet	Størknet
Syklus 4	Størknet	Størknet	Størknet	Størknet

**Tabell 13: Statisk flyteskjærspenning etter 10 min hvile for Sement A versus v/c ved 20 °C**

v/c	1,2	1,0	0,8	0,6
Syklus 1	0,5 Pa ved 29 min	25 Pa ved 27 min	185 Pa ved 27 min	Størknet ved 25 min <sup>a</sup>
Syklus 2	Størknet ved 45 min <sup>a</sup>	Størknet ved 40 min <sup>a</sup>	Størknet ved 40 min <sup>a</sup>	Størknet
Syklus 3	Størknet	Størknet	Størknet	Størknet
Syklus 4	Størknet	Størknet	Størknet	Størknet

<sup>a</sup> Estimert størkningstid fra kalometri

### 3.4.2 Reologi sement B ved 20 °C

**Tabell 14: Flytmotstand for Sement B som funksjon av v/c ved 20 °C**

v/c	1,2	1,0	0,8	0,6
Syklus 1	215 Pa/s ved 13 min	567 Pa/s ved 14 min	1 292 Pa/s ved 14 min	4 733 Pa/s ved 16 min
Syklus 2	232 Pa/s ved 29 min	593 Pa/s ved 30 min	1 319 Pa/s ved 30 min	5 033 Pa/s ved 32 min
Syklus 3	249 Pa/s ved 45 min	615 Pa/s ved 46 min	1 332 Pa/s ved 46 min	5 384 Pa/s ved 48 min
Syklus 4	264 Pa/s ved 61 min	629 Pa/s ved 62 min	1 356 Pa/s ved 62 min	5 662 Pa/s ved 64 min

**Tabell 15: Data fra lineær regresjon av flytkurve for Sement B som funksjon av v/c ved 20 °C**

Linær reg →	$\mu$ (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)	$r^2$
v/c	1,2			1,0			0,8			0,6		
Syklus 1	19,7 ved 13 min	0,0	1,00	31,3 ved 14 min	1,6	,996	56,9 ved 14 min	4,9	,993	139 ved 16 min	23,2	,986
Syklus 2	21,1 ved 29 min	0,0	,999	33,8 ved 30 min	1,6	,996	59,7 ved 30 min	5,0	,992	168 ved 32 min	23,2	,988
Syklus 3	22,2 ved 45 min	0,1	1,00	35,5 ved 46 min	1,7	,995	60,4 ved 46 min	5,0	,991	177 ved 48 min	24,9	,986
Syklus 4	23,0 ved 61 min	0,1	1,00	36,7 ved 62 min	1,7	,995	62,2 ved 62 min	5,1	,990	198 ved 64 min	25,3	,990

**Tabell 16: Statisk flyteskjærspenning etter 10 s hvile for Sement B versus v/c ved 20 °C**

v/c	1,2	1,0	0,8	0,6
Syklus 1	0,2 Pa ved 14 min	1 Pa ved 15 min	1 Pa ved 15 min	8 Pa ved 17 min
Syklus 2	0,2 Pa ved 30 min	1 Pa ved 31 min	1 Pa ved 31 min	8 Pa ved 33 min
Syklus 3	0,2 Pa ved 46 min	1 Pa ved 47 min	1 Pa ved 47 min	8 Pa ved 49 min
Syklus 4	0,2 Pa ved 62 min	1 Pa ved 63 min	1 Pa ved 63 min	8 Pa ved 65 min

**Tabell 17: Statisk flyteskjærspenning etter 10 min hvile for Sement B versus v/c ved 20 °C**

v/c	1,2	1,0	0,8	0,6
Syklus 1	1 Pa ved 24 min	1 Pa ved 25 min	5 Pa ved 25 min	16 Pa ved 27 min
Syklus 2	1 Pa ved 40 min	1 Pa ved 41 min	5 Pa ved 41 min	16 Pa ved 43 min
Syklus 3	1 Pa ved 56 min	1 Pa ved 57 min	5 Pa ved 57 min	16 Pa ved 59 min
Syklus 4	1 Pa ved 72 min	1 Pa ved 73 min	5 Pa ved 73 min	16 Pa ved 75 min

### 3.4.3 Reologi sement C ved 20 °C

**Tabell 18: Flytmotstand for Sement C som funksjon av v/c ved 20 °C**

v/c	1,2	1,0	0,8	0,6
Syklus 1	463 Pa/s ved 17 min	877 Pa/s ved 12 min	1807 Pa/s ved 16 min	6832 Pa/s ved 12 min
Syklus 2	512 Pa/s ved 33 min	945 Pa/s ved 28 min	1944 Pa/s ved 32 min	7204 Pa/s ved 30 min
Syklus 3	533 Pa/s ved 49 min	1019 Pa/s ved 44 min	2079 Pa/s ved 48 min	7588 Pa/s ved 47 min
Syklus 4	541 Pa/s ved 65 min	1065 Pa/s ved 60 min	2187 Pa/s ved 65 min	8009 Pa/s ved 65 min

**Tabell 19: Data fra lineær regresjon av flytkurve for Sement C som funksjon av v/c ved 20 °C**

Linear fit →	$\mu$ (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)	$r^2$
v/c	1,2			1,0			0,8			0,6		
Syklus 1	27,1 ved 17 min	1,2	,997	44,4 ved 12 min	2,9	,994	72,2 ved 16 min	7,3	,996	293 ved 12 min	24,9	,999
Syklus 2	30,5 ved 33 min	1,3	,997	46,2 ved 28 min	3,3	,993	72,3 ved 32 min	8,4	,991	283 ved 30 min	29,1	,996
Syklus 3	32,6 ved 49 min	1,3	,997	48,4 ved 44 min	3,6	,993	82,2 ved 48 min	8,6	,993	313 ved 47 min	29,6	,998
Syklus 4	33,6 ved 65 min	1,3	,997	50,6 ved 60 min	3,8	,993	86,4 ved 65 min	9,1	,991	334 ved 65 min	30,8	,998

**Tabell 20: Statisk flyteskjærspenning etter 10 s hvile for Sement C versus v/c ved 20 °C**

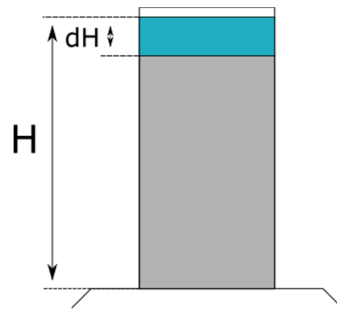
v/c	1,2	1,0	0,8	0,6
Syklus 1	1 Pa ved 18 min	1 Pa ved 13 min	1 Pa ved 17 min	12 Pa ved 14 min
Syklus 2	1 Pa ved 34 min	1 Pa ved 29 min	1 Pa ved 33 min	12 Pa ved 31 min
Syklus 3	1 Pa ved 50 min	1 Pa ved 45 min	1 Pa ved 50 min	12 Pa ved 49 min
Syklus 4	1 Pa ved 66 min	1 Pa ved 61 min	1 Pa ved 66 min	13 Pa ved 67 min

**Tabell 21: Statisk flyteskjærspenning etter 10 min hvile for Sement C versus v/c ved 20 °C**

v/c	1,2	1,0	0,8	0,6
Syklus 1	1 Pa ved 28 min	1 Pa ved 23 min	5 Pa ved 27 min	45 Pa at 25 min
Syklus 2	1 Pa ved 44 min	1 Pa ved 39 min	5 Pa ved 43 min	40 Pa ved 42 min
Syklus 3	1 Pa ved 60 min	1 Pa ved 55 min	5 Pa ved 60 min	30 Pa ved 60 min
Syklus 4	1 Pa ved 76 min	1 Pa ved 71 min	5 Pa ved 76 min	28 Pa ved 77 min

### 3.5 STABILITET OG AVBINDING

Vannutskillelsen (stabil hvis < 0,5 %) ble testet med 2 stk. 250 ml målesylindere for hver sementblanding. Volum av vann og underliggende masse ble avlest hver halvtime fram til 2 timer og etter 24 timer. Resultatene fra testen vises i Tabell 22 og Tabell 23. Skjematisk oppsett av stabilitet-testen (også kalt bleeding-test) er vist i Figur 7.



Figur 7: Skjematisk oppsett av stabilitetstest

Tabell 22: Vannutskillelse ved 20 °C

Sement		Sement A				Sement B				Sement C			
v/c		1,2	1,0	0,8	0,6	1,2	1,0	0,8	0,6	1,2	1,0	0,8	0,6
% Utskilt	0 min	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	30 min	0,6	0	0	0	4,8	1,6	0,8	0,2	4,3	1,0	0,4	0,4
	60 min	0,6	0	0	0	10,6	2,4	0,8	0,8	9,6	1,4	0,6	0,4
	90 min	0,6	0	0	0	17,8	2,8	1,2	0,8	13,0	2,4	0,6	0,6
	120 min	0,6	0	0	0	21,2	3,2	2,2	0,8	13,8	2,5	0,6	0,8
	24 timer	0	0	0	0	18,4	1,2	0	0	11,4	0	0	0

Tabell 23: Vannutskillelse ved 8 °C

Sement		Sement A				Sement B				Sement C			
v/c		1,2	1,0	0,8	0,6	1,2	1,0	0,8	0,6	1,2	1,0	0,8	0,6
% Utskilt	0 min	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	30 min	0,8	0,4	0,4	0	2,2	0,8	0,4	0,4	2,0	0,4	0	0
	60 min	0	0	0	0	4,6	1,4	1,0	0,8	4,0	0,8	0,4	0
	90 min	0	0	0	0	6,4	3,6	1,6	0,8	5,6	1,0	0,4	0
	120 min	0	0	0	0	15,2	5,4	2,4	1,0	8,0	1,4	0,4	0
	24 timer	0	0	0	0	24,8	11,6	1,8	0	11,4	0	0	0

Begynnende avbinding er definert som 2 °C temperaturstigning i sementen. Resultatene fra avbindingstesten er vist i Tabell 24 og Tabell 25.

**Tabell 24: Avbindingstid ved 20 °C**

Sement	Sement A				Sement B				Sement C				
	v/c	1,2	1,0	0,8	0,6	1,2	1,0	0,8	0,6	1,2	1,0	0,8	0,6
Tid til 2 °C temperaturstigning (timer-min)	0-30	0-25	0-20	0-20	6-30	4-55	6-15	5-20	3-50	3-50	3-15	3-45	

**Tabell 25: Avbindingstid ved 8 °C**

Sement	Sement A				Sement B				Sement C				
	v/c	1,2	1,0	0,8	0,6	1,2	1,0	0,8	0,6	1,2	1,0	0,8	0,6
Tid til 2 °C temperaturstigning (timer-min)	0-45	0-45	0-45	0-45	-*	23-55	20-40	17-10	14-35	13-00	11-45	9-50	

### 3.5.1 Stabilitet med tilsetningsstoffer

Resultater for stabilitet og avbinding ble også utført for sement med tilsetningsstoffer. Resultatet fra vannutskillelsen er vist i Tabell 26 og Tabell 27.

**Tabell 26: Vannutskillelse med tilsetningsstoff for sement A og B**

Blanding nr.		A-1	A-2	A-3	B-1	B-2	B-3
Sement		A			B		
Vannvolum i prosent av opprinnelig sement volum etter:	0 min	0	0	0	0	0	0
	30 min	0,2	1,2	0,4	0,8	1,2	0,6
	60 min	1,6	2,0	0,4	1,2	1,6	0,8
	90 min	1,6	2,8	0,4	2,2	1,6	1,0
	120 min	2,0	3,2	0,4	2,4	1,6	1,2
	24 timer	0	8,4**	0	2,8*	1,6*	2,4*

\* Utskilt vann ble gjenopptatt av sementen etter 2–3 dager.  
 \*\* Utskilt vann ble gjenopptatt av sementen etter rundt 12 dager.

**Tabell 27: Vannutskillelse med tilsetningsstoff for sement C og sement B (med mikrosilika)**

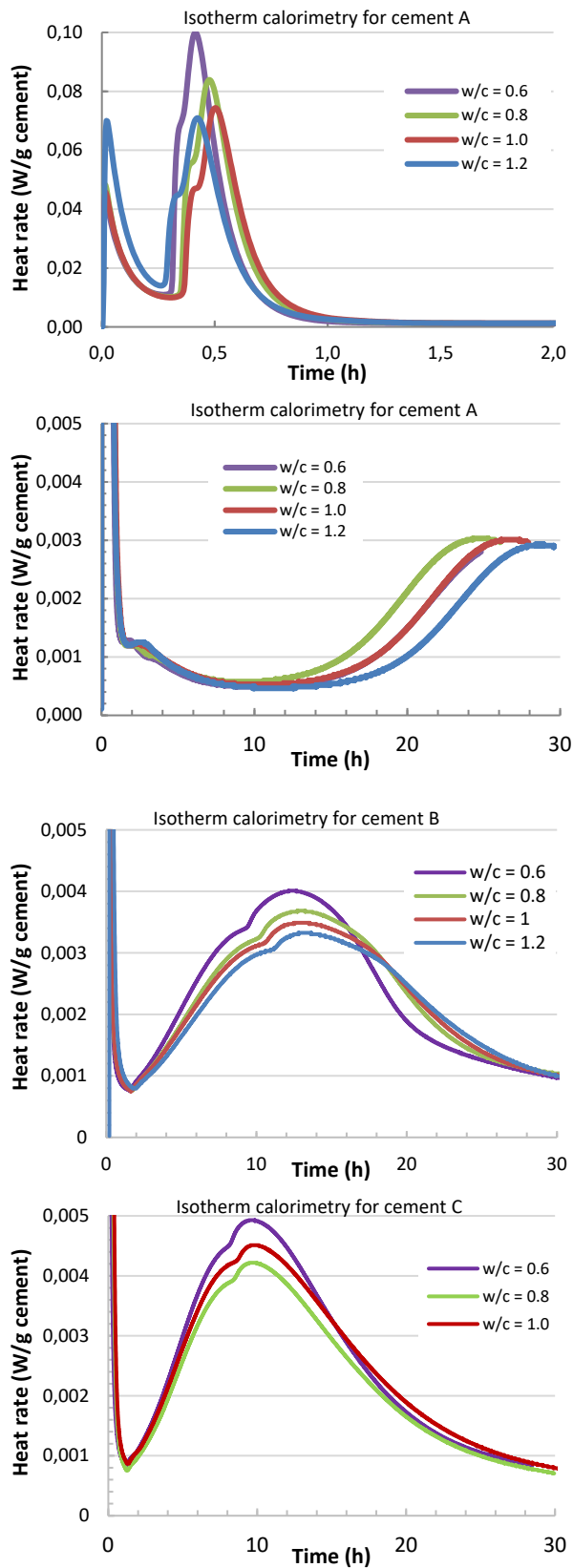
Blanding nr.		C-1	C-2	C-3	D-11	D-12
Sement		C			B	
Vannvolum i % av opprinnelig sement volum etter:	0 min	0	0,4	0	0	0
	30 min	0	0,4	0	0,4	0
	60 min	0	0,4	0,4	0,4	0,4
	90 min	0	0,8	0,8	0,8	0,8
	120 min	0,4	0,8	0,8	0,8	0,8
	24 timer	0	0	0	0	0

## 3.6 KALORIMETRI

Resultatene fra kalorimetri er oppgitt i per gram sement i pastaen for å lette sammenlikningen med forskjellige vannforhold. Varmeutviklingen til en sement er beskrivende for hvordan sementen herdner. I vanlige plasstøpte betongkonstruksjoner ønskes ikke en rask avgivelse av varme fordi det kan skade betongen på grunn av stor temperaturgradient fra støpens kjerne mot dens ytterkanter. Injeksjon i berg har en helt annen geometri enn vanlig betongstøp, så det vites ikke hvordan dens varmeavgivelse påvirker herderesultatet i berg. Resultatet fra kalorimetrimålingene for sement A, B og

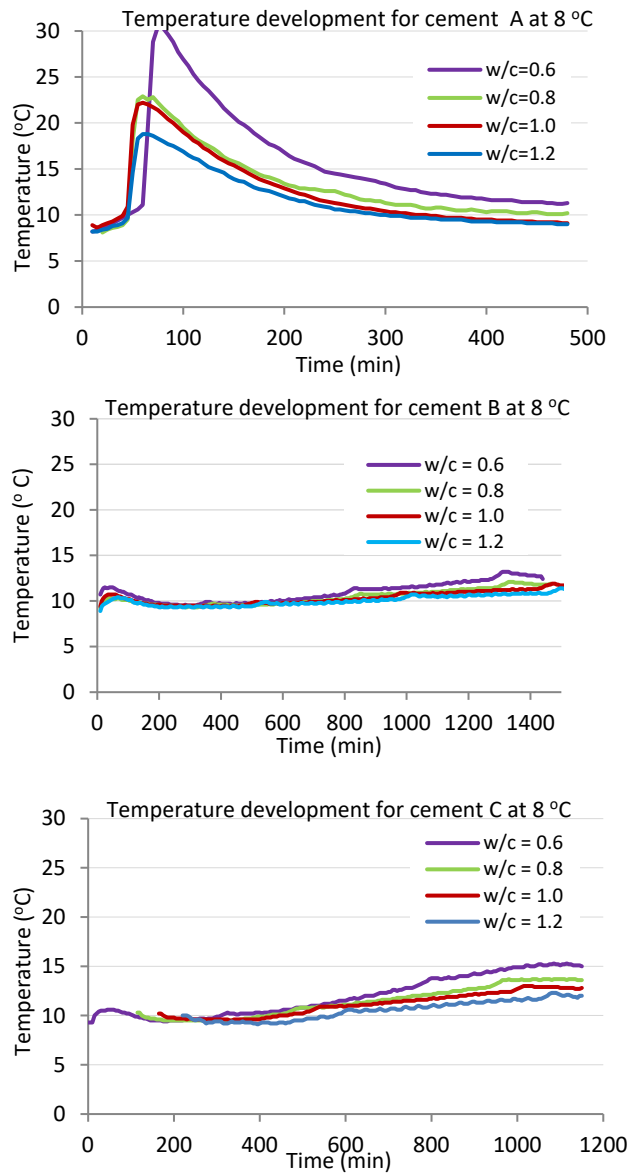


C uten tilsetningsstoffer er gitt i Figur 8. Det bemerkes at sement A utviste meget stor varmeutvikling den første halvtimen etter blanding. På grunn av dette måtte resultatet deles opp i to plott.



Figur 8: Isotherm kalorimetri for sement A, B og C

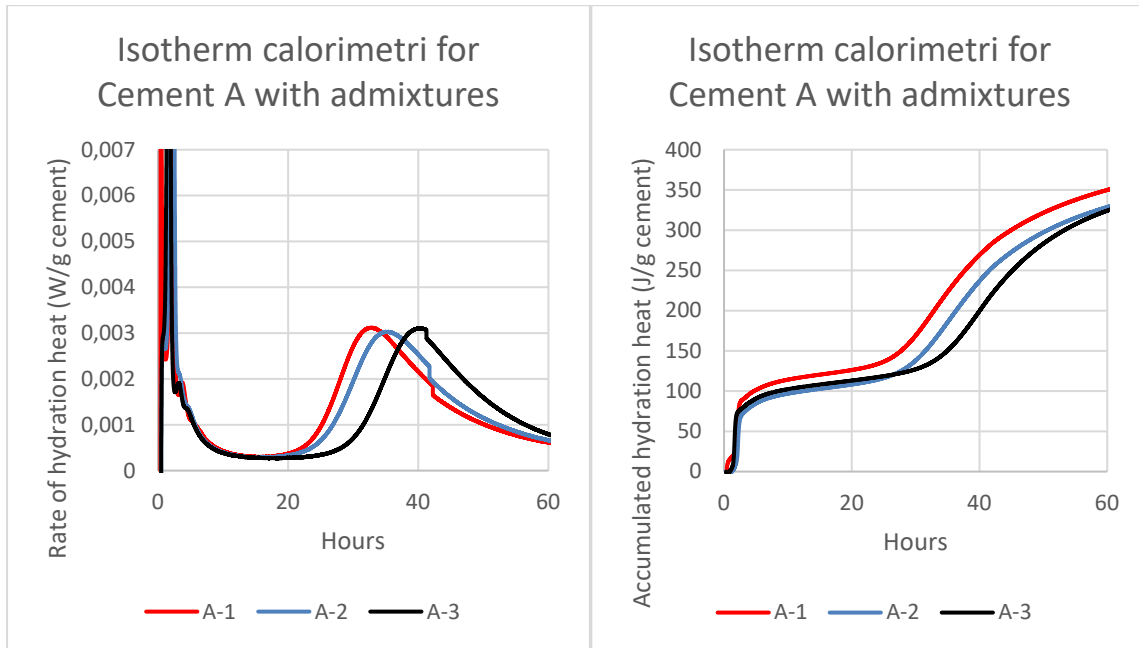
Temperaturutviklingen til sementene er gitt i Figur 9.



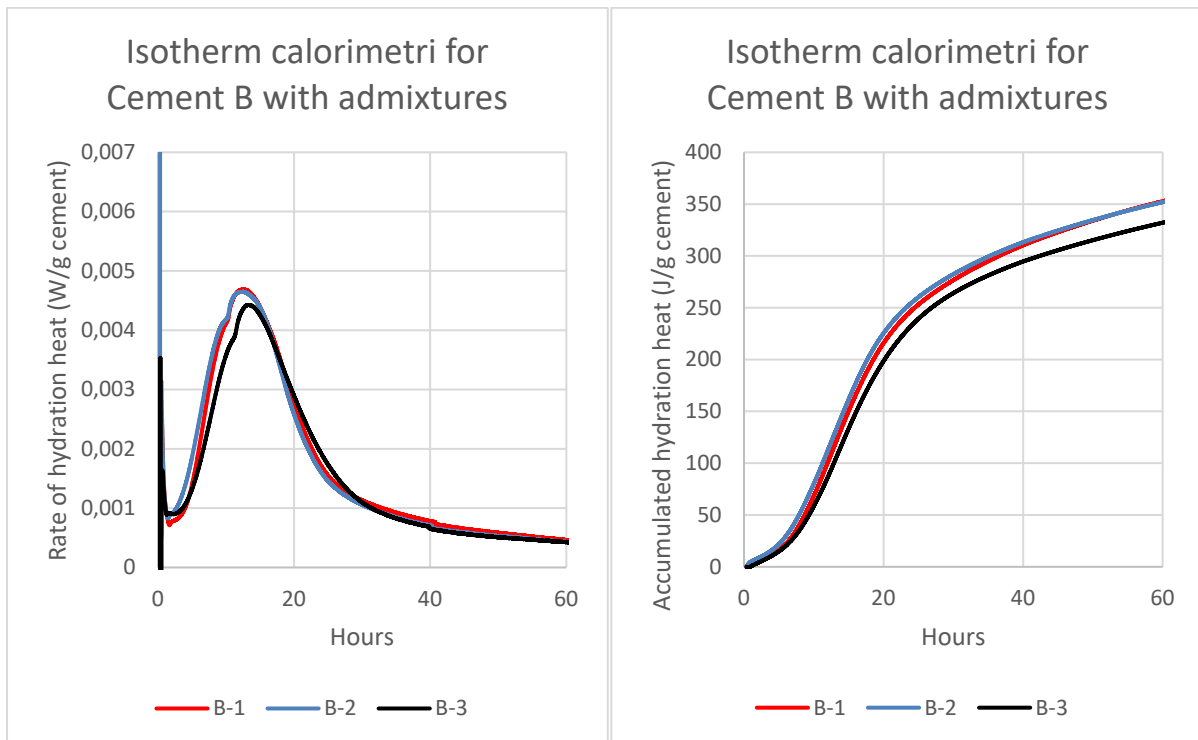
Figur 9: Temperaturutvikling for sement A, B og C

### 3.6.1 Kalorimetri og temperaturutvikling for sement A, B og C med tilsetningsstoffer

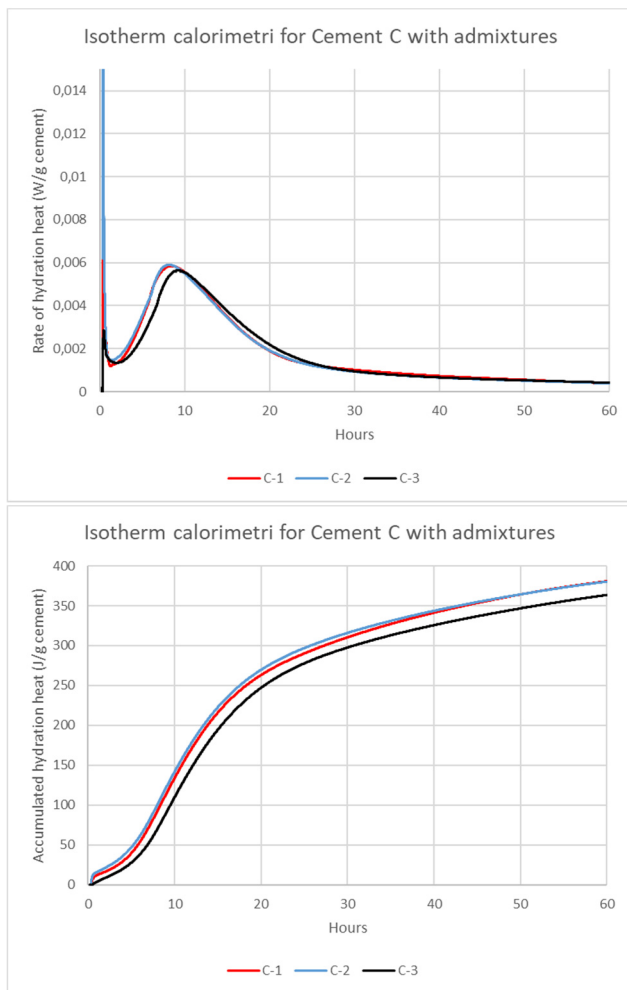
Resultatene fra testene med isotherm kalorimetri er gitt i Figur 10 til Figur 13 nedenfor.



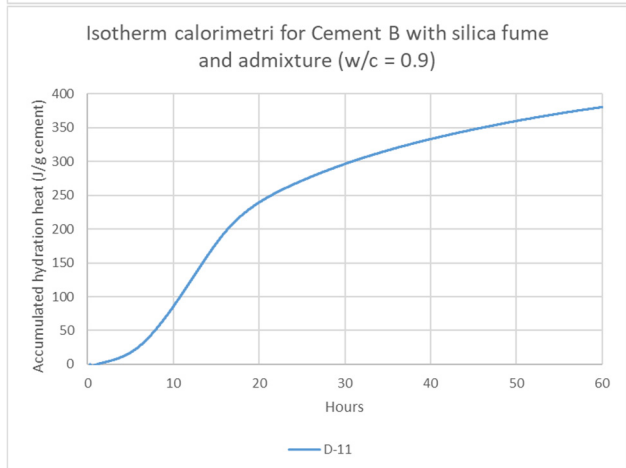
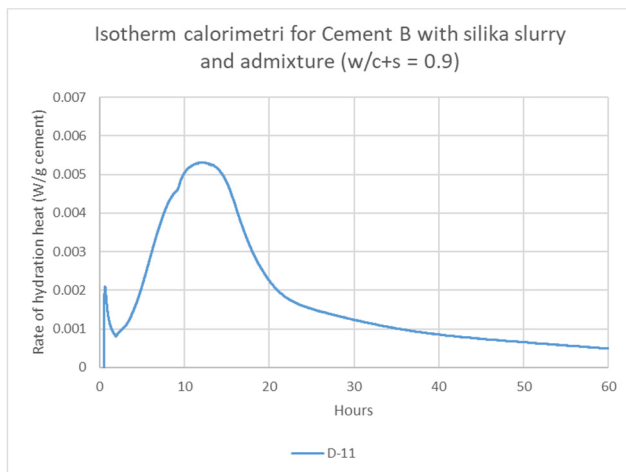
**Figur 10: Isotherm kalorimetri for sement A med tilsetningsstoffer**



**Figur 11: Isotherm kalorimetri for sement B med tilsetningsstoffer**

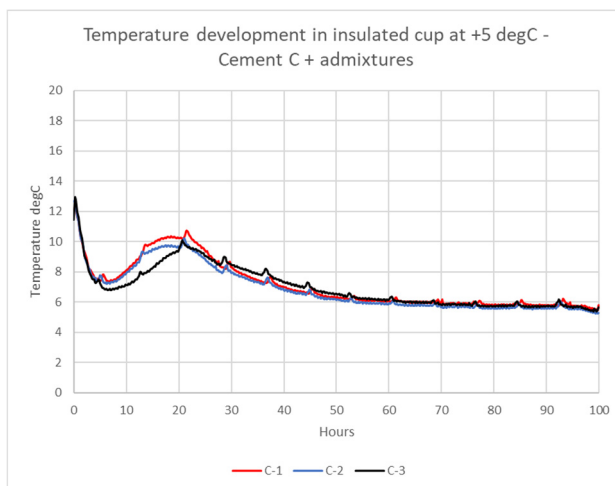
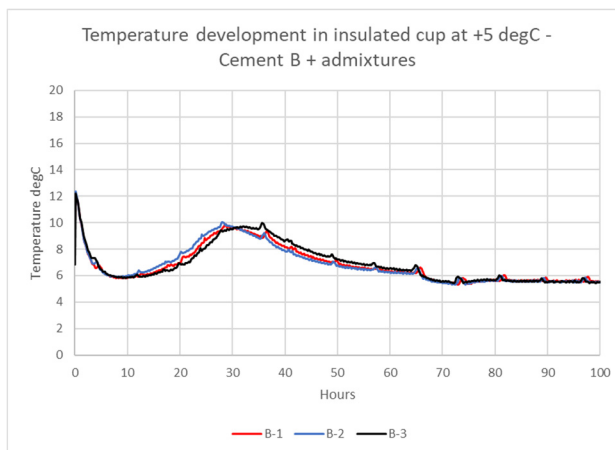
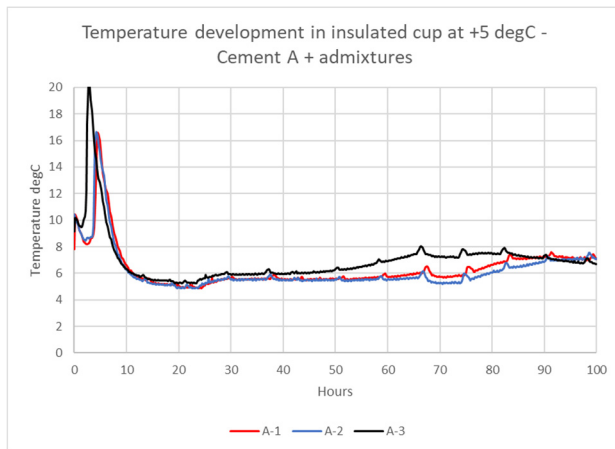


**Figur 12: Isoterm kalorimetri for sement C med tilsetningsstoffer**



**Figur 13: Isotherm kalorimetri for sement B med silikaslurry (til venstre) og med silika skum (til høyre)**

Temperaturutviklingen for sement A, B og C med tilsetningsstoffer er gitt i Figur 14 nedenfor.



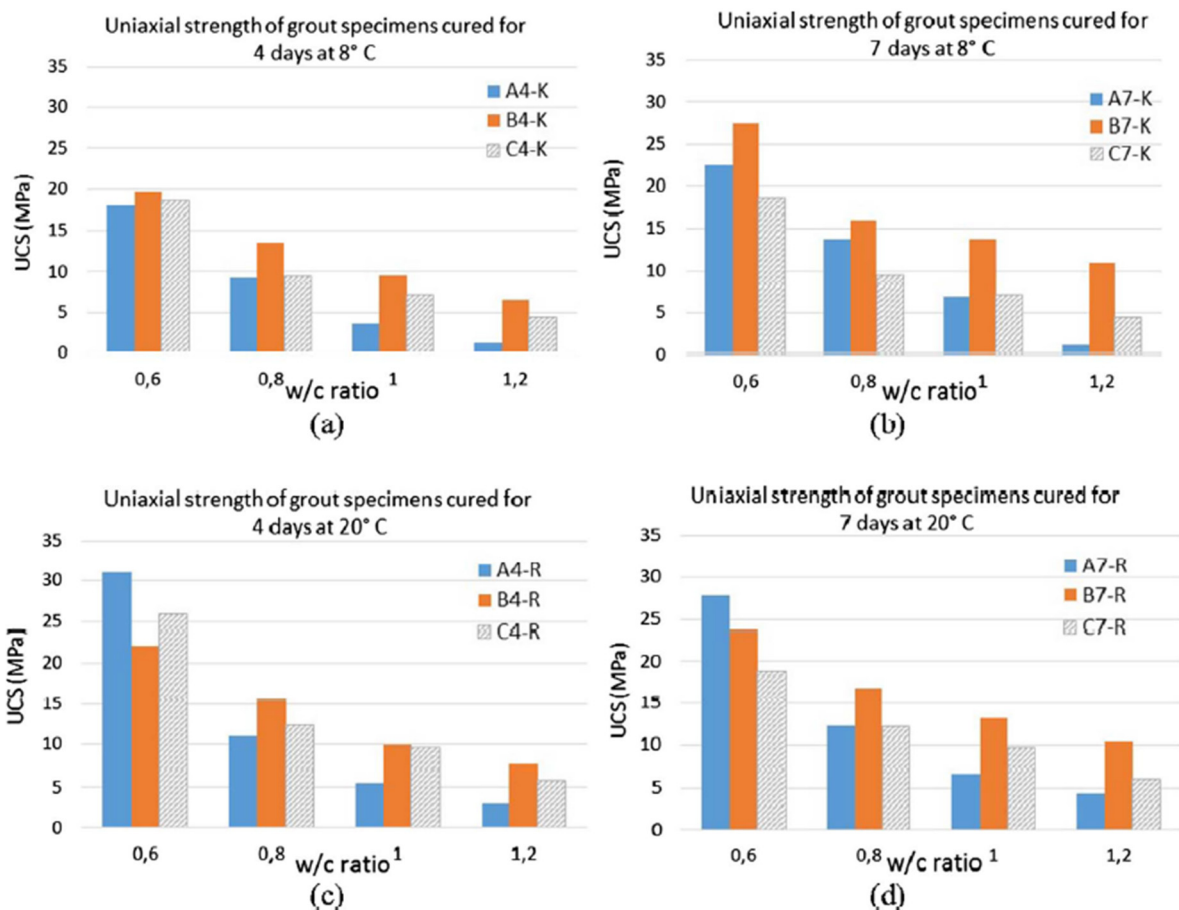
**Figur 14: Temperaturutvikling for sement A (øverst til venstre), B (øverst til høyre) og C (nederst) med tilsetningsstoffer**

### 3.7 UCS – ENAKSIELL TRYKKSTYRKE

To serier med sementblandinger med v/c-tall 0,6, 0,8, 1,0 og 1,2 ble preparert med temperaturer på 8 °C og 20 °C. Serien med temperatur på 8 °C ble blandet og lagret for herdning ved 8 °C. Den andre serien ble blandet og lagret i romtemperatur for herdning ved ca. 20 °C. Sementen herdnet i sylindere lagd av pleksiglass med diameter på 50 mm og høyde på 100 mm. UCS ble testet på prøver som hadde herdnet i 4 og 7 dager. Hver sementblanding har fått benevning med en ID bestående av tre tegn. For eksempel vil tegnene i ID-en A0.6K stå for: A står for sementtypen, 0.6 for v/c-tallet og K står for temperaturen hvor K = 8 °C og R = 20 °C. Totalt 96 prøver ble preparert og testet, to prøver for hver temperatur, sement og v/c-tall. Aksiell deformasjon ble målt sammen med den aksielle lasten. Styrken til prøven,  $\sigma$ , ble beregnet etter følgende likning:

$$\sigma = \frac{P}{\pi r^2}$$

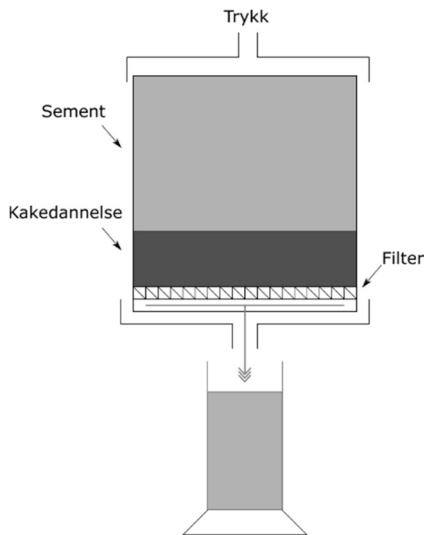
Resultatene fra styrketesten er gitt i Figur 15.



Figur 15: Enaksiell trykkstyrke for sement A, B og C uten tilsetningsstoffer

### 3.8 FILTRASJONSSTABILITET

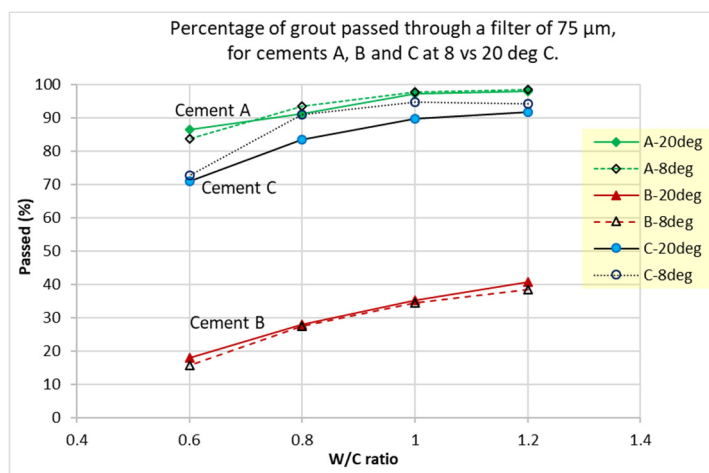
Filtrasjon er definert som separasjon av de faste partiklene (sementpartiklene) i en slurry (sementen), mens man forsøker å presse slurryen igjennom en åpning. I en filtrasjonstest er åpningen et kvadratisk filter med en gitt maskevidde. Filtrasjonstesten er tenkt å være det beste målet på inntrengingsevnen til en sement. I en filtrasjonstest blir sementen under trykk forsøkt presset gjennom et kvadratisk filter. Figur 16 viser et skjematisk oppsett av filtertesten.



**Figur 16: Skjematisk oppsett av en filtertest**

I TIGHT er det utført filtertest på sement A, B og C både med og uten tilsetningsstoffer og ved forskjellige temperaturer. I testen veies sementen før testen begynner. Testresultatet er vekten av hva som passerer filteret. Resultatet er oppgitt som vektprosent av mengden som passerte filteret.

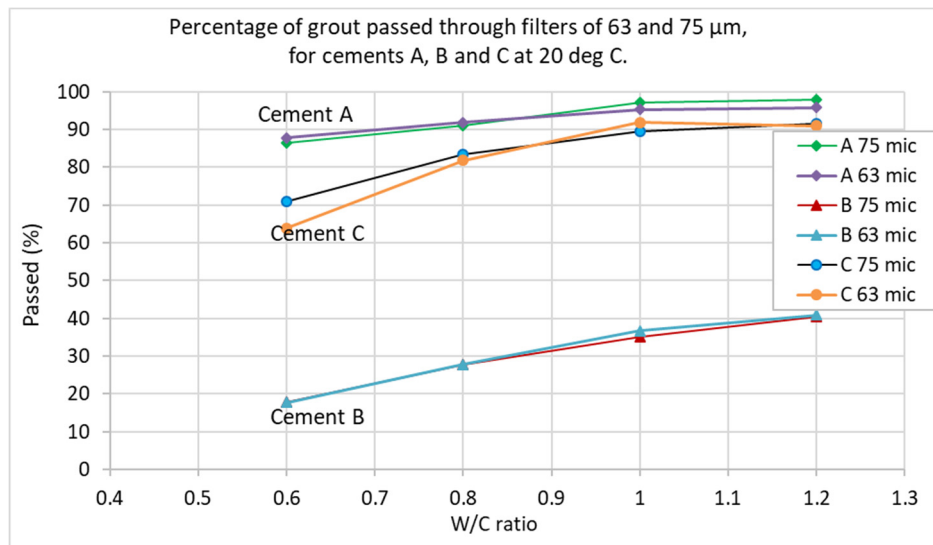
Resultat fra filtrasjonstesten for sement A, B og C ved 20 °C og 8 °C med 75 µm filter er vist i Figur 17.



**Figur 17: Filtrasjonsstabilitet for sement A, B og C med 75 µm filter ved temperatur på 8 °C og 20 °C**



Figur 18 viser resultatet fra filtrasjonsstabilitetstesten med filterstørrelse på 75 og 63  $\mu\text{m}$  ved 20  $^{\circ}\text{C}$ .

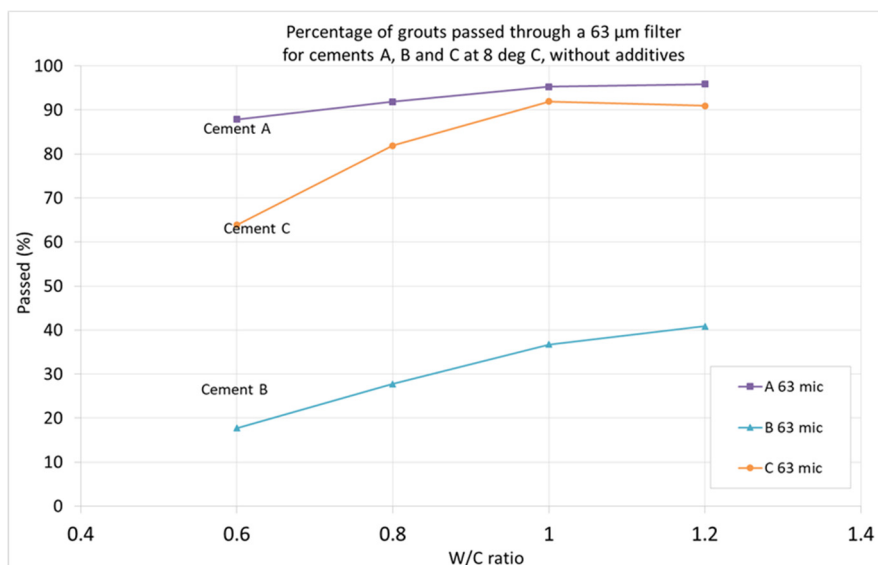


**Figur 18: Filtrasjonsstabilitet for sement A, B og C med 75  $\mu\text{m}$  og 63  $\mu\text{m}$  filter ved temperatur 20  $^{\circ}\text{C}$**

Resultatene fra filtrasjonsstabilitetstestene viser at det er stor forskjell mellom sementene. Sement A har klart best filtrasjonsstabilitet for alle v/c-forhold. Filtrasjonsstabiliteten er sterkt kontrollert av kornstørrelsen til sementen. Derfor er det overraskende at sement C, som har større  $D_{95}$ , har bedre filtrasjonsstabilitet enn sement B.

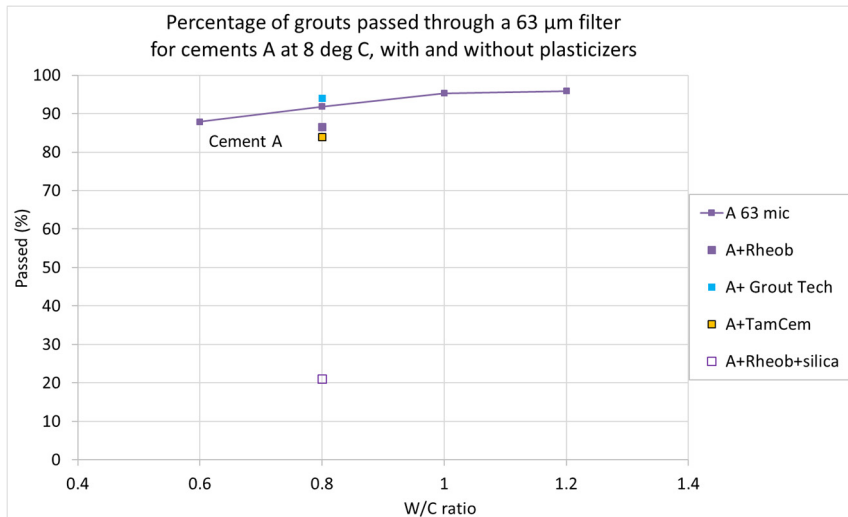
### 3.8.1 Filtrasjonsstabilitet med tilsetningsstoffer

Det ble også utført test av filtrasjonsstabiliteten med tilsetningsstoffer, tilsatt som forklart i kapittel 3.2.1. Filterstørrelsen som ble benyttet, var 63  $\mu\text{m}$  med en blandings- og testtemperatur på 8  $^{\circ}\text{C}$ . Resultatet fra filtrasjonstesten uten tilsetningsstoffer er vist i Figur 19.



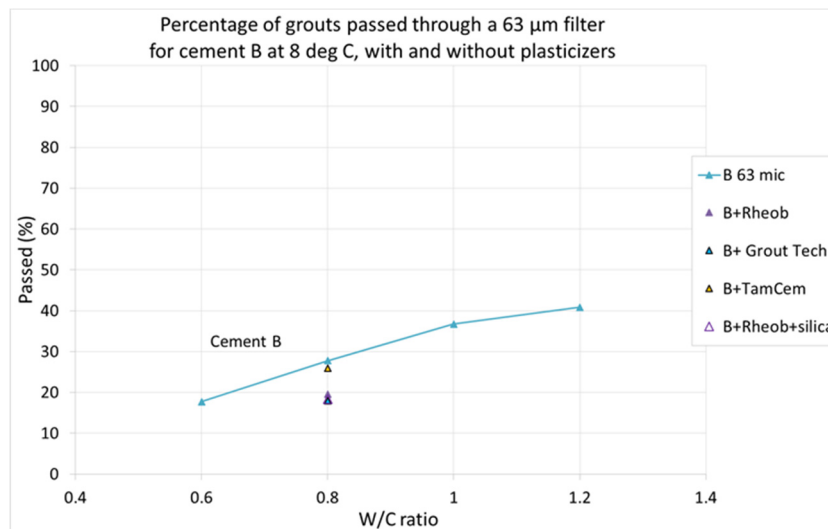
**Figur 19: Filtrasjonsstabilitet for sement A, B og C med 63  $\mu\text{m}$  filter ved 8  $^{\circ}\text{C}$  uten tilsetningsstoffer**

Blandinger med tilsetningsstoffer ble kun utført for v/c-tall 0,8. Det er utført testing av tre ulike produkter med de tre sementtypene. Én testblanding ble også utført med tilsetning av et plastiserende stoff pluss silika, der det ble tilsatt silika tilsvarende 10 % av sementvekten. Også dette forsøket ble gjentatt for de tre ulike sementtypene. Resultatet for sement A med og uten tilsetningsstoffer er vist i Figur 20. Resultatet viser liten, men negativ påvirkning på filtrasjonsstabiliteten når ulike plastiserende stoffer er benyttet. Med tilsetning av 10 % silika i sement A falt filtrasjonsstabiliteten fra ca. 85 til ca. 20 %. Her er det viktig å poengtere at tilsetningsmengden av silika i dette tilfellet er høy.



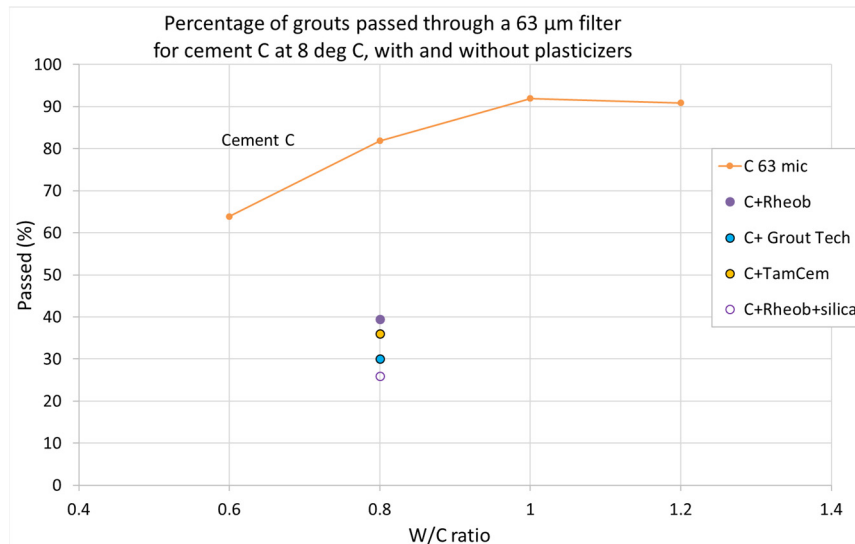
**Figur 20: Filtrasjonsstabilitet for sement A med ulike tilsetningsstoffer**

Filtrasjonsresultatene for sement B med tilsetningsstoffer er vist i Figur 21. Resultatet viser en liten, men negativ effekt på filtrasjonsstabiliteten med tilsetning av plastiserende stoffer samt silika.



**Figur 21: Filtrasjonsstabilitet for sement B med forskjellige tilsetningsstoffer**

Filtrasjonsresultatene for sement C med tilsetningsstoffer er vist i Figur 22, og viser en stor negativ effekt på filtrasjonsstabiliteten i alle blandingene med plastiserende stoffer, inkludert blandingen med silika.



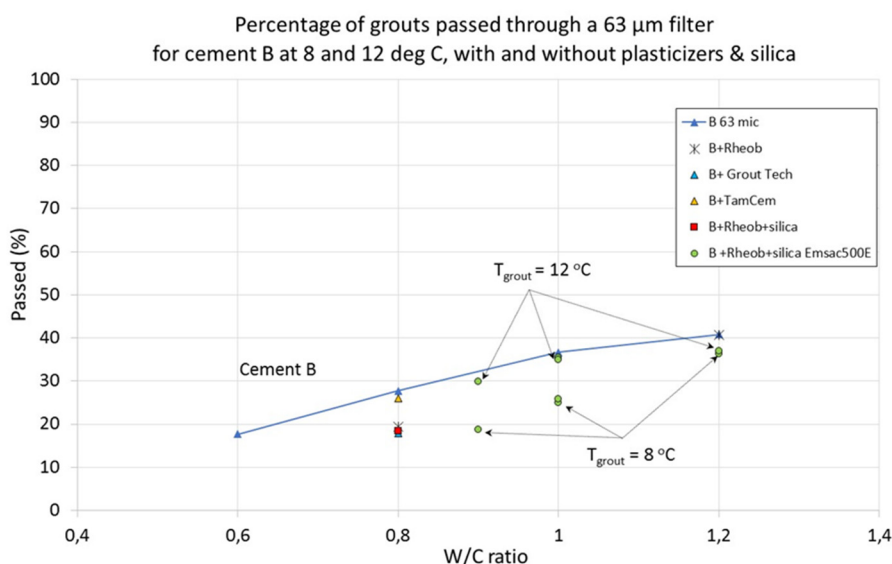
**Figur 22: Filtrasjonsstabilitet for sement C med forskjellige tilsetningsstoffer**

Filtrasjonsstabilitetstestene ble kritisert underveis i prosjektet fordi det ikke var testet ved bruk av andre typer tilsetningsstoffer. På grunn av lav filtrasjonsstabilitet i sement B ble det på denne sementen utført supplerende tester for å se på effekten av plastiserende stoff (Rheobuild) og stabilisator (silika) ved ulike v/c-forhold og temperaturer. Silikaen som ble brukt under de øvrige filtrasjonstestene var blandet ut på laboratoriet. Fordi blandingen av silika i laboratoriet ikke er tilsvarende som ute på anlegg, ble det testet med EMSAC 500E, en ferdigblandet silikaslurry levert av Elkem. Det ble lagd sementblandinger av sement B med Rheobuild (dosering = 1,5 %) og silikaslurry (dosering = 10 %) med forskjellig v/c-tall og temperatur. Utførte blandinger er vist i Tabell 28.

**Tabell 28: Utførte blandinger for sement B med silika og plastiserende stoff**

Blanding	B0.9a	B0.9b	B1a	B1b	B1c	B1d	B1.2a	B1.2b	B1.2c*
v/c	0,9	0,9	1,0	1,0	1,0	1,0	1,2	1,2	1,2
Sement (g)	500	500	500	500	500	500	500	500	500
Vann (g)	445	445	500	500	500	500	600	600	600
Rheobuild (g)	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5
Temp. til sement (°C)	9,7	12	9,5	12,5	8,5	11,5	8,1	12,3	8,5
Silikaslurry EMSAC 500E (g)	50	50	50	50	50	50	50	50	0

Figur 23 viser samlede resultater fra alle filtrasjonstestene utført på sement B. De viser at effekten av tilsetningsstoffene var liten ved 12 °C, men ved 8 °C har alle prøvene med tilsetningsstoffer en reduksjon i filtrasjonsstabiliteten.



Figur 23: Filtrasjonsstabilitet for sement B med forskjellige tilsetningsstoffer

### 3.9 PERMEABILITET

Måling av permeabilitet ble utført på fire prøver. Sementblandingen til prøvene ble lagd samtidig med UCS-testingen og støpt i sylindere med diameter 25 mm. Prøvene herdnet i sju dager før permeabilitetsprøving. Testen ble utført med konstant vannsøyhle, med et poretrykk på 10 MPa og et omslutningstrykk på 12 MPa, som ga et effektivt konsolideringstrykk på 2 MPa. Poretrykksgradienten fra topp til bunn ble målt til 0,2 MPa. Permeabiliteten ble målt når strømmingen var stabil. Permeabilitetsresultatene er vist i Tabell 29.

Tabell 29: Resultat fra permeabilitetstestingen

Sement	Prøve	v/c	Permeabilitet [cm/s]	Herdeforhold
A	A1.2R	1,2	$1.83 \cdot 10^{-7}$	20 °C
B	B1.0R	1,0	$1.51 \cdot 10^{-10}$	20 °C
	B1.2R	1,2	$3.89 \cdot 10^{-11}$	20 °C
C	C1.0R	1,0	$5.35 \cdot 10^{-10}$	20 °C

Testen visert at det er en ubetydelig transport av vann gjennom herdnet injeksjonssement for alle sementtypene.

### 3.10 DISKUSJON OG KONKLUSJONER FRA ARBEIDSPAKKE 3

I arbeidspakke 3 ble det utført et stort utvalg av laboratorietester på ulike typer sement og sementblandinger. For å ivareta alle partnerners interesser har det vært viktig for prosjektet å ha et objektivt forhold til resultatene og anonymisere mange av dem. Grunnen er at testene ikke nødvendigvis representerer produktene prestasjoner i praksis på anlegg, på grunn av stedlige forhold som temperaturer, geologi og blandemetoder. Produktleverandørene har fått tilgang på data som de selv kan jobbe videre med i deres drift.

For TIGHT-prosjektet som helhet har testene vist noen trender som er av interesse for bransjen. I det følgende oppsummeres og diskuteres funnene som kan være av videre interesse.

Varmeutviklingen i en sement beskriver hvordan sementen herdner. Varmeutviklingen ble målt ved kalorimetri og det ble funnet svært ulike forløp for varmeutvikling, avhengig av blandingens temperatur og type sement. Sement A og B var de to mest finkornede sementene med  $D_{95}$  på henholdsvis 17 og 18  $\mu\text{m}$ , sement C hadde en  $D_{95}$  på 29  $\mu\text{m}$ . I sement A ble det målt en topp med varmeutvikling etter 20 minutter, med varighet på ca. 30 minutter, før den endelige varmeutviklingen startet etter 14 timer, der økningen varte i ca. 8 timer. I sement B, med ganske lik  $D_{95}$ , var det ingen initiell varmeutvikling, men varmeutviklingen startet etter 2 timer, med økning i 10 timer. Når testen ble utført i 8 °C, var det bare sement A som viste en plutselig og høy varmeutvikling etter 1 time, som gradvis avtok, mens sement B og C hadde en gradvis og lav varmeutvikling.

Årsaken til disse resultatene ble ikke avdekket i prosjektet, men det kan antas at resultatene kan ha betydelig påvirkning på selve injeksjonsforløpet og herdetiden til ulike sementtyper. Ved testing av flyteegenskapene til de tre sementtypene, ved bruk et parallellplateviskosimeter, hadde sement A størknet etter ca. 45 minutter. Resultatene fra kalometri og parallellplateviskosimeter indikerer at i noen sementer kan herdeprosessen ha startet før sementen pumpes inn i bergmassen, avhengig av oppholdstiden i agitatoren på injeksjonsriggen. Om dette påvirker injeksjonsresultatet negativt eller positivt er ikke kjent og bør utredes videre.

Testene utført på filtrasjonsstabilitet viser noen av de mest uventede resultatene fra utførte laborietester i TIGHT-prosjektet. Testresultatene viste at sement B med  $D_{95}$  på 18  $\mu\text{m}$  hadde en betydelig lavere filtrasjonsstabilitet enn sement C med  $D_{95}$  på 29  $\mu\text{m}$ , og i alle unntatt én blanding ble filtrasjonsstabiliteten dårligere ved tilsetning av superplastiserende stoffer. Resultatene ble retestet flere ganger, og det ble stilt mange spørsmål rundt blandemetoder, produktblandinger og testmetoder. Det som er viktig å være oppmerksom på, er at sementens atferd er påvirket av svært mange faktorer, for eksempel kornfordelingskurve, temperaturer, blandemetoder og tilsetningsstoffer, samt at laborietester på filtrasjonsstabilitet ikke nødvendigvis representerer sementens evne til å trenge inn i og bre seg utover sprekker i bergmassen. Generelt kan det konkluderes med at testene som er utført i prosjektet, viser at det man forventer teoretisk sett kan være langt unna det resultatet man får i praksis.

Resultatene fra arbeidspakke 3 viser at det er fortsatt er mye som gjenstår når det kommer til forståelsen av sementbasert injeksjonsmasse. Det kan være utfordrende å finne den optimale sementblandingen, og produkter med tilsynelatende samme egenskaper oppfører seg veldig forskjellig. Kombinasjoner av ulike produkter er også uforutsigbart. Derfor er det svært viktig at alle prosjekter utfører relevante tester på de sementblandingene man skal bruke under stedlige forhold og benytter samme blandemetode som man skal benytte ved injeksjon.

## 4 ARBEIDSPAKKE 4 – STRØMNING OG TRYKKFORDELING I BERGET UNDER INJEKSJON

---

Sjur Mo og Paal Skjetne ved SINTEF har undersøkt om numeriske analyser kan benyttes for å bedre forståelsen av injeksjon. Arbeidet har fokusert på sementbasert injeksjon av et borhull som krysser en sprekk. Arbeidet gjengitt nedenfor er basert på interne rapporter og publiserte artikler fra denne arbeidspakken.

### 4.1 SEMENTEGENSKAPER

De viktigste egenskapene til sement i denne sammenhengen er massetetthet, viskositet (reologi) og kornstørrelse. I den første simuleringen ble injeksjonsmassen betraktet som en énfase-væske med en tyngdetetthet og viskositet. Det betyr at kun kornstørrelsen påvirker reologien. Simuleringen blir senere utvidet, der sement betraktes som en blanding av faste partikler og vann, som gjør modellen i stand til å vurdere effekter som *bleeding* (vannutskillelse).

I simuleringen er følgende verdier for tyngdetetthet ( $\rho$ ) og viskositet ( $\mu$ ) brukt for sementen, dersom ikke annet er oppgitt:

$$\rho_{c,mix} = 1600 \text{ kg/m}^3 \quad \mu_{c,mix} = 0.050 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

$$\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3 \quad \mu_w = 0.001 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

### 4.2 TYPISKE HASTIGHETER

En strømningsrate på 30 liter/min fra en injeksjonsrigg og inn i et injeksjonshull ligger ofte i øvre grense for vanlig injeksjon ved forinjeksjon i tunnel. Strømningsraten i et borhull med diameter 54 mm kan beregnes som følger:

$$U_{in} = \frac{Q}{\pi R_b^2} \approx 0.22 \text{ m/s}$$

hvor  $R_b$  er injeksjonshullradiusen

For en enkel aksesymmetrisk sprekk med sprekkåpning  $h$  orientert normalt på borhullet vil strømningshastigheten i sprekkene avta inverst proporsjonalt med avstanden fra injeksjonshullet.

$$U_{joint}(r) = \frac{Q}{2\pi r h} = U_{joint}^{in} \frac{R_b}{r}$$

hvor hastigheten inn i sprekkene fra borhullet er representert av forholdet:

$$U_{joint}^{in} = U_{joint}(R_b) = \frac{Q}{2\Pi R_b h} = \frac{2.94mm}{h} m/s$$

### 4.3 FORENKLEDE MODELLER

Før man begynner å utføre mer komplekse numeriske modeller, er det nyttig å studere forenklete modeller for å få en idé om forventet oppførsel, hvilket er bakgrunnen for den påfølgende 2D-modellen.

#### 4.3.1 2D-modell

Trykkgradienten til en væske med laminær strømning mellom to parallelle plater er gitt i følgende likning:

$$\frac{dp}{dx} = -\frac{12\mu Q}{h^3 w} = -\frac{12\mu U_{in}}{h^2}$$

hvor tverrsnittsarealet  $A = hw$  og ruhetseffekter er approksimert med å legge til følgende faktor:

$$f_\varepsilon = 1 + 3.1(\varepsilon/h)^{1.5}$$

#### Aksesymmetri

Med aksesymmetri, det vil si lik strømning i alle retninger og konservering av masse, kan sprednings-hastigheten beregnes som:

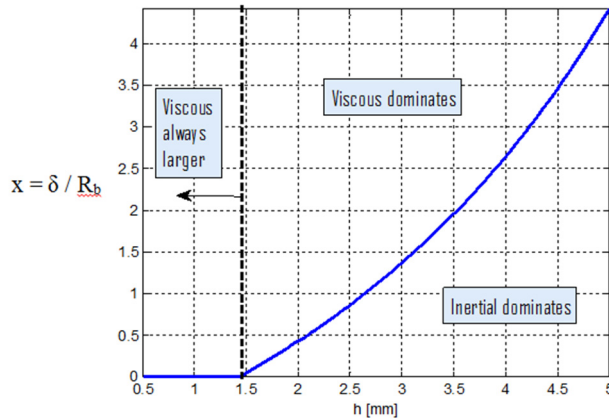
$$\frac{dr}{dt} = \frac{Q}{2\Pi h r} = \frac{U_{in} \Pi R_b^2}{2\Pi h r} = \frac{U_{in} R_b^2}{2h r}$$

Trykkprofilen kan bli approksimert som:

$$\begin{aligned} p(r) - p(R_b) &= -f_\xi \frac{12\mu Q}{2\Pi h^3} \ln\left(\frac{r}{R_b}\right) + \frac{3\rho Q^2}{20\Pi^2 h^2} \left[ \frac{1}{R_b^2} - \frac{1}{r^2} \right], \quad Q = 2\Pi h R_b U_{joint}^{in} \\ &= \underbrace{-f_\xi \frac{12\mu U_{joint}^{in}}{h^2} R_b \ln\left(\frac{r}{R_b}\right)}_{\text{Viscous}} + \underbrace{\frac{3\rho (U_{joint}^{in})^2}{5} \left[ 1 - \left(\frac{R_b}{r}\right)^2 \right]}_{\text{Intertial}} \end{aligned}$$

Likningen for trykkprofilen består av to deler. Trykkfallet i likningen består av et bidrag fra de viskøse kreftene og trykkendringen som følge treghet ved hastighetsendring av injeksjonsmassen (Bernoulli-

effekten). Fra likningen kan man finne hvilke krefter som er dominerende for trykkfallet. For sprekker med åpning  $h < 1,4$  mm vil alltid de viskøse kreftene dominere. For sprekketørrelser over 1,4 mm kan det være et betydelig bidrag fra treghetskreftene.



Figur 24: Grafisk framstilling av forholdet mellom viskøse krefter og massetregghet som kilde til trykktap, i relasjon til sprekkåpning

### Strømning i rør (injeksjonshullet)

Strømningen i injeksjonshullet tilsvarer strømning i rør. Injeksjon med strømningsrater opp til 30 l/min vil ikke gi et Reynoldstall over 380. Strømningen kan derfor regnes som laminær med trykkfall som følger:

$$\frac{\Delta P}{L} = 32 \frac{\mu U_{in}}{D_b^2} = 8 \frac{\mu Q}{\pi D_b^4}$$

### Trykktap i vinkler

Dersom friksjonskreftene ignoreres, kan det ekstra trykktapet som følge av retningsendringen til strømningen bli estimert til:

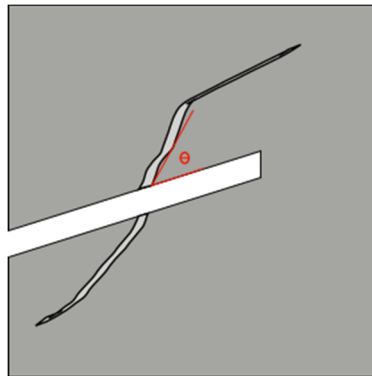
$$\Delta P_{bend} = \frac{1}{2} \rho U^2 \frac{\Delta \theta}{90^\circ}$$

Ekstra trykktap i injeksjonsmassen under inntrenging i en sprekk med vinkel  $\theta^- = 180^\circ - \theta$ , sammenliknet med en vinkel  $\theta^+ = \theta (< 90^\circ)$  relativt til borhullet, kan uttrykkes som:

$$\Delta p(\theta) \approx \frac{1}{2} \rho U^2 (180^\circ - 2\theta/90^\circ) = \rho U^2 (1 - \theta/90^\circ)$$



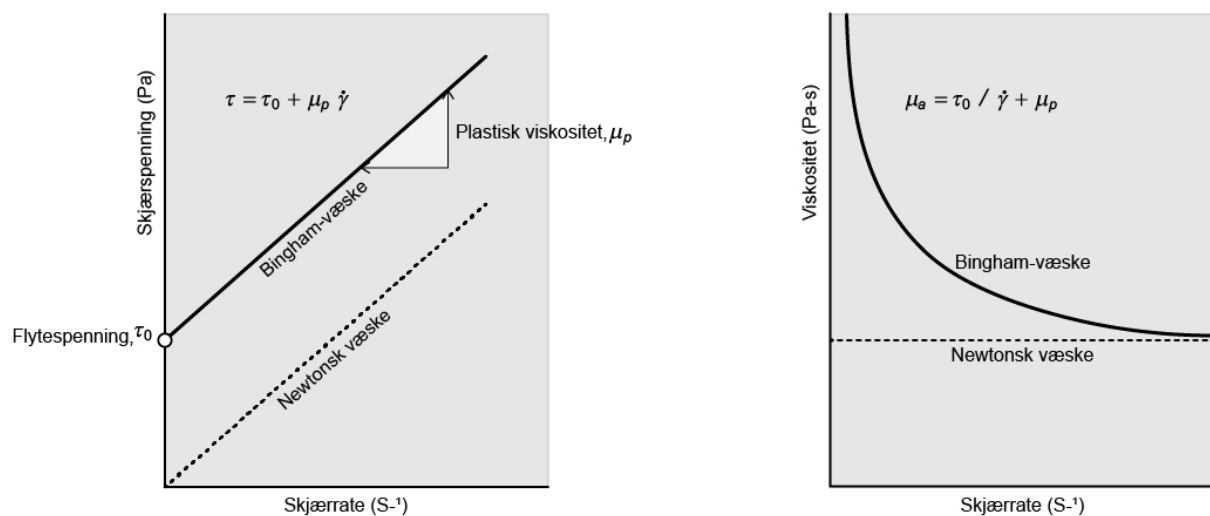
Figur 25 viser en illustrasjon over en sprekk som krysser et borhull med en vinkel  $\theta$ .



**Figur 25: Illustrasjon som viser vinkelen mellom injeksjonshullet og en bergsprekk**

### Ikke-newtonske væsker

For å modellere ikke-newtonske væsker gjøres viskositeten avhengig av skjærraten. Sement modelleres som en ikke-newtonsk væske med skjærstyrke og skjærtynnende egenskaper og omtales som en Bingham-væske.



**Figur 26: Skjærrate mot skjærspenning for newtonsk væske og Bingham-væske.**

Figur 26 viser forskjellen mellom en Bingham-væske og en newtonsk væske (for eksempel vann). Til venstre i figuren er skjærspenningen gitt som funksjon av skjærraten for en Bingham-væske lik den for newtonsk væske. Til høyre ses den skjærtynnende egenskapen til sement ved at viskositeten minker med økende skjærrate. En metode for å modellere reologien til sement, hvor man tar hensyn til reduksjon i viskositet ved økende skjærrate, er Herschel-Bulkley-modellen, også kalt "yield stress power law".

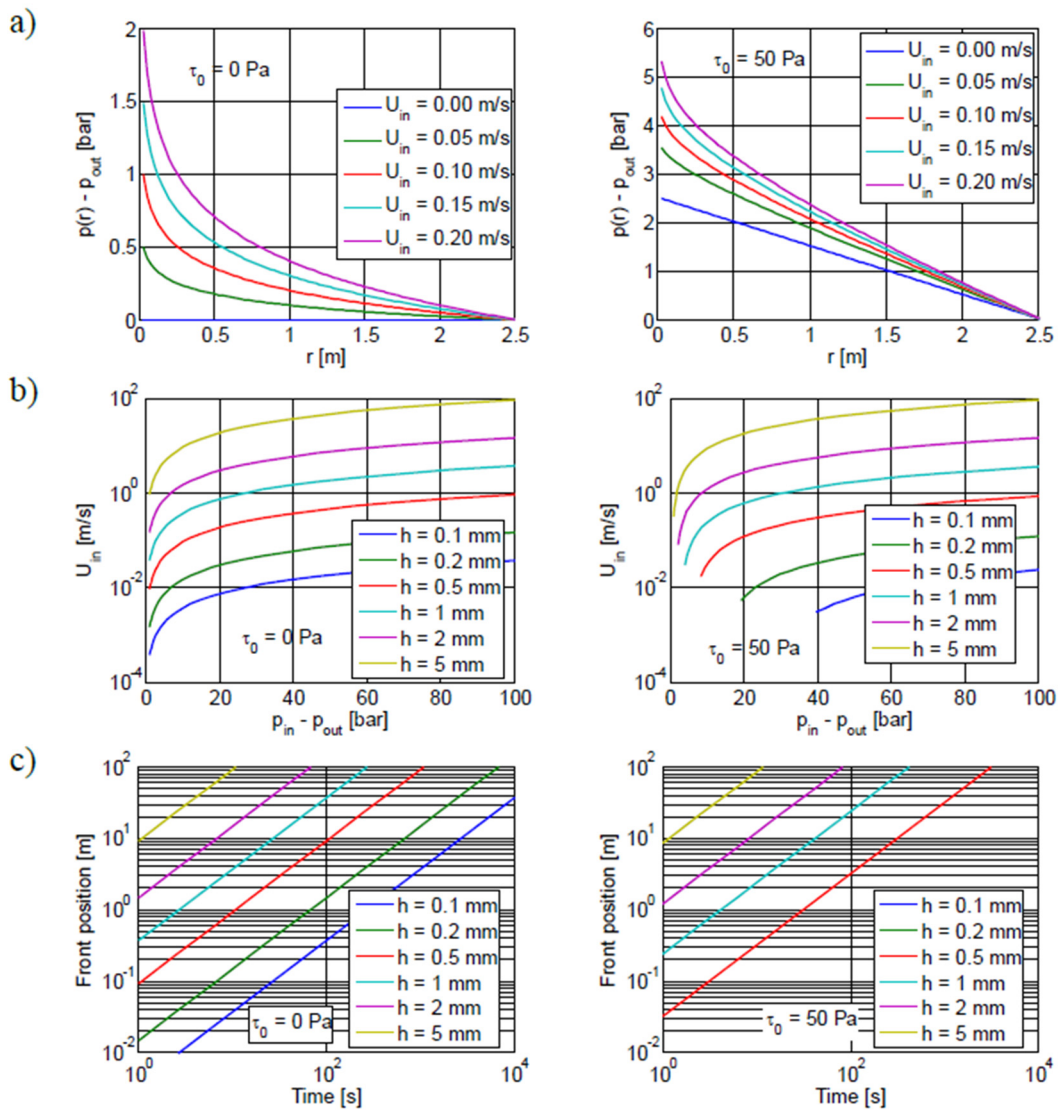
$$\tau = (\dot{\gamma}) = \begin{cases} \mu_0 \dot{\gamma}, & \dot{\gamma} \leq \dot{\gamma}_0 \\ \tau_0 + K \dot{\gamma}^n, & \dot{\gamma} > \dot{\gamma}_0 \end{cases}$$

hvor  $\dot{\gamma}$  er en "cut-off"-verdi for å hindre numeriske problemer. Med denne modellen kan det radielle trykkprofilet utledes til:

$$p(r) = p_{out} + \int_r^{R_{out}} dr 2\tau_{wall}(r)/h$$

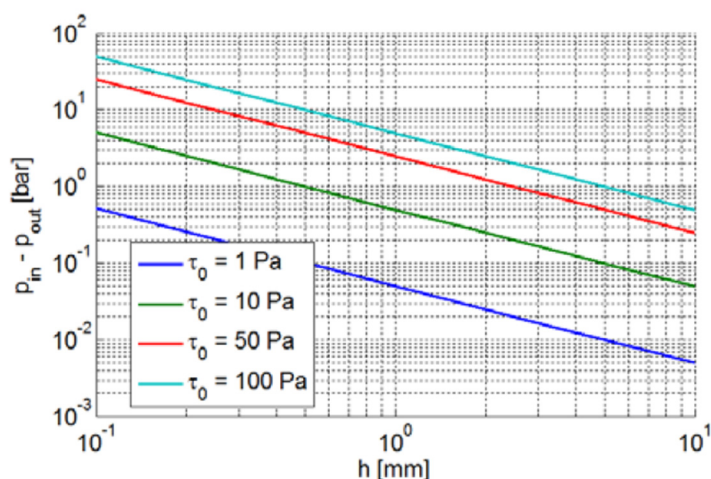
hvor  $p_{out} = p(r = R_{out})$

Det er også mulig å løse likningen med hensyn til hastigheten for et gitt trykkfall mellom injeksjonshullet og injeksjonsfronten og posisjonen til injeksjonsfronten. Trykkprofilet radielt ut fra et injeksjonshull er vist i Figur 27 a, hastigheten i Figur 27 b og posisjonen i Figur 27 c.



Figur 27: Trykk (a), hastighet (b) og posisjon (c) som funksjon av avstand, trykk og tid fra den numeriske simuleringen

Ved å sette hastigheten for trykkfallet meget lavt, i dette tilfellet  $10^{-6}$  m/s, kan man estimere trykket som behøves for å initiere flyt. Figur 28 viser kritisk injeksjonstrykk for å initiere flyt inn i en sprekk for forskjellige sprekkåpninger. Figuren viser at for en væske med skjærstyrke på 10 Pa vil det minimum kreves et trykk på 2,5 bar for å initiere flyt i en sprekk med åpning på 200  $\mu\text{m}$ .



Figur 28: Minste trykk for å initiere flyt som funksjon av sprekkåpning

#### 4.4 CFD-SIMULERING

I dette studiet er ANSYS Fluent benyttet for å kjøre CFD-simuleringer (Computer Fluid Dynamics). Hovedutfordringen med studiet var det store forholdet mellom sprekkstørrelsen og injeksjons-utbredelsen. En typisk sprekkåpning i bergmasse er gjerne  $< 1$  mm, mens utbredelsen er mange meter. Det var nødvendig å bruke minst 10 beregningsceller over sprekkåpningen og antallet celler måtte derfor reduseres i lengderetningen for å begrense beregningslasten. Studiet har derfor sett på dominerende effekter og muligheter for forenkling av geometrien.

#### 4.5 ÉNFASETESTER

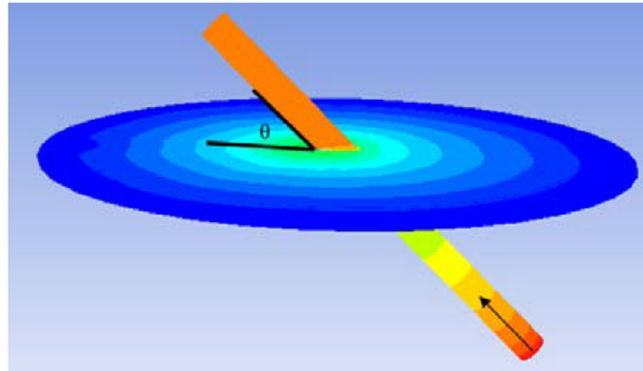
Målet med de følgende simuleringene var å studere betydningen av viskositet, treghet og vinkelen mellom injeksjonshullet og sprekk. Beregningene startet med en 3D-simulering, videre ble beregningsmodellen forenklet etter hva som ble funnet mulig å forenkle. I studiet er derfor 3D redusert til 2D og igjen redusert til en aksesymmetrisk modell. Alle utførte simuleringer er listet i Tabell 30.

Tabell 30: Utførte numeriske forsøk og hvilke parametre som er evaluert

Modell	Geometri	Parametere
3D	Borehull + sprekk	Sprekkvinkel
	Sprekk	Sprekkvinkel (ellipsoidisk innløp)
	Sprekk	Variierende sprekkåpning (porøs sone)
	Sprekk	Variierende sprekkåpning (modifisert geometri)
2D	Borehull + sprekk	Sprekkvinkel
Aksiell	Borehull + sprekk	Sprekkvinkel + sprekkåpning
	Sprekk	Variierende sprekkåpning (porøs sone)

## 4.6 3D-SIMULERING

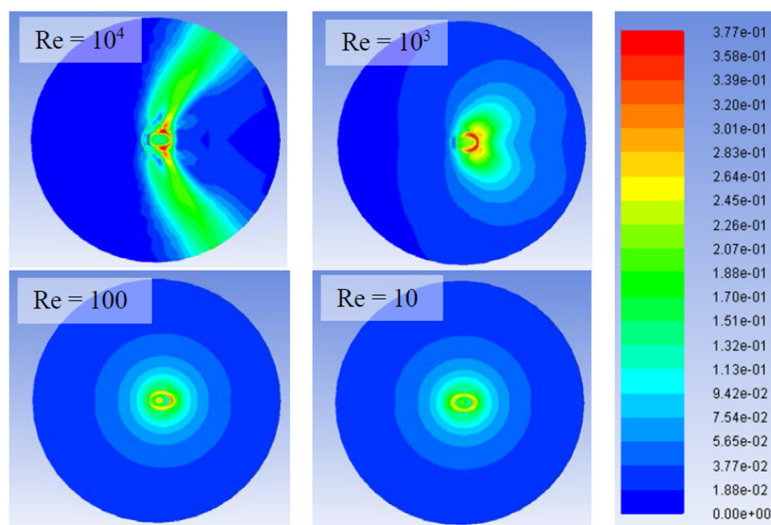
3D-simuleringen ble utført med geometrien vist i Figur 29. Med denne modellen er det mulig å simulere effekten av vinkelen mellom injeksjonshullet og sprekk. Modellen er utformet slik at strømmingen kommer fra bunnen av injeksjonshullet og beveger seg i pilens retning. Toppen av borhullet er stengt for utstrømning.



**Figur 29: 3D-modell av injeksjon av borhull og sprekk**

I tilfeller med høye strømningshastigheter og store sprekkåpninger vil vinkelen mellom injeksjonshullet og sprekk ha stor betydning. Når sprekkåpningen blir liten og/eller strømningshastigheten minker, vil de viskøse kreftene som virker i sprekk bli dominerende. Disse faktorene vil derfor minske betydningen av hva som skjer rundt innløpet til sprekk ved sementbasert injeksjon i bergmasse.

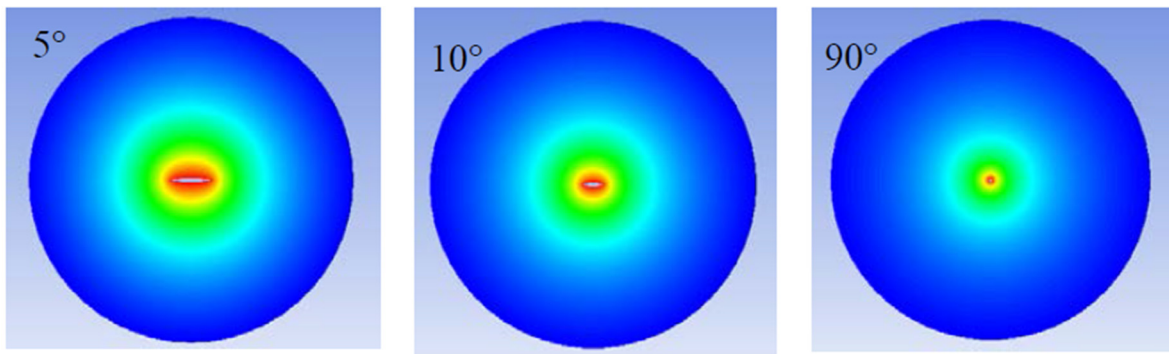
Denne effekten ble studert ved å variere viskositeten til væsken, med en fast vinkel på  $45^\circ$  mellom injeksjonshullet og sprekk. Simuleringen ble utført ved å variere Reynoldstallet, der innløpshastighet var satt til 0,2 m/s, med en sprekkåpning på 10 mm. Resultatet er vist i Figur 30.



**Figur 30: Strømning for forskjellige Reynoldstall, der lavt Reynoldstall representerer høy viskositet**

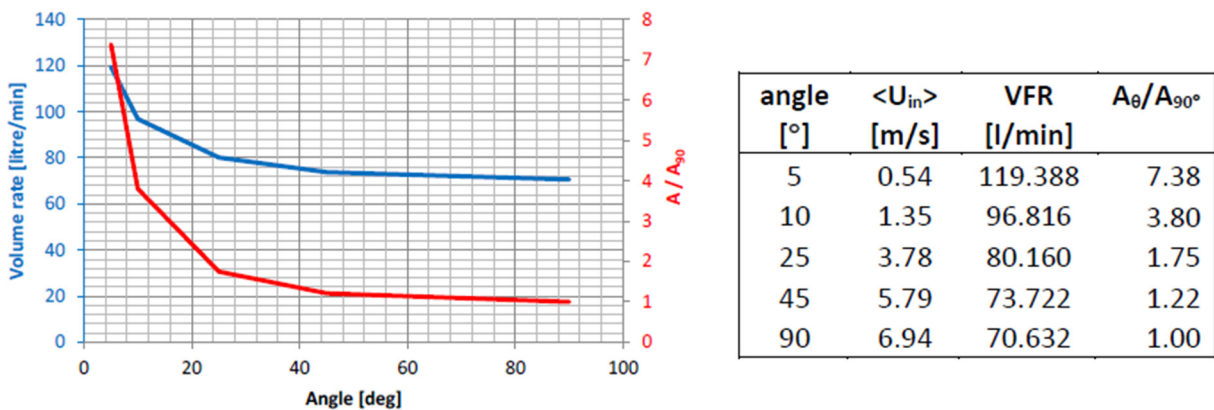
Figur 30 viser at for lavt Reynoldstall, det vil si høy viskositet, er spredningen ganske uniform i alle retninger, men ved høyere Reynoldstall endrer strømmingen karakter. Injeksjon vil under vanlige, relevante forhold ha et Reynoldstall  $\approx 200$ , i tillegg vil sprekkåpningen være mindre ( $h \sim 1$  mm). Det vil redusere påvirkningen av vinkelen  $\theta$  mellom injeksjonshullet og sprekken ytterligere i forhold til det som er vist i simuleringen.

Modellen kan forenkles ved å modellere injeksjonshullet som et elliptisk innløp. Trykkfordelingen i sprekken under injeksjon med varierende vinkel  $\theta$  er vist i Figur 31. Figuren viser at selv om innløpet til sprekken blir større med minkende vinkel, er fordelingen av trykket jevnt radielt fordelt.



**Figur 31: Strømning med ulike vinkler mellom injeksjonshullet og bergsprekken**

Forskjellen i strømningshastighet i sprekken som funksjon av vinkelen mellom injeksjonshullet og sprekken er vist grafisk i Figur 32.



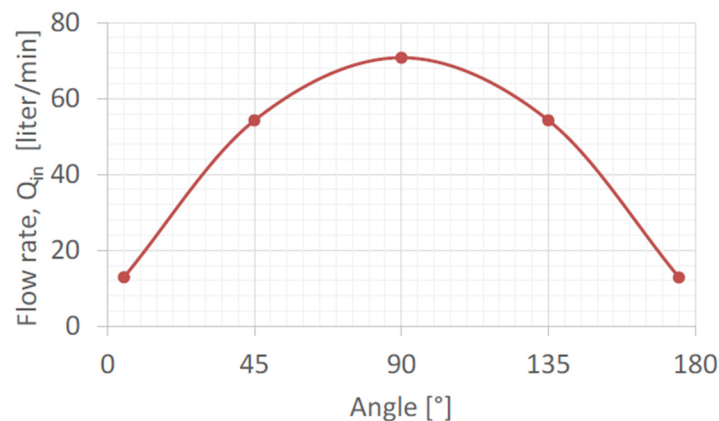
**Figur 32: Strømningshastighet som funksjon av vinkelen mellom injeksjonshullet og bergsprekken**

Resultatene fra simuleringen viser at vinkelen mellom injeksjonshull og bergsprekken har liten betydning for injeksjonen av sprekken, hvilket betyr at man ikke nødvendigvis behøver å krysse en sprekk nært normalt med et injeksjonshull for å oppnå effektiv injeksjon på den samme sprekken.

#### 4.7 AKSESYMMETRISK 3D-MODELL

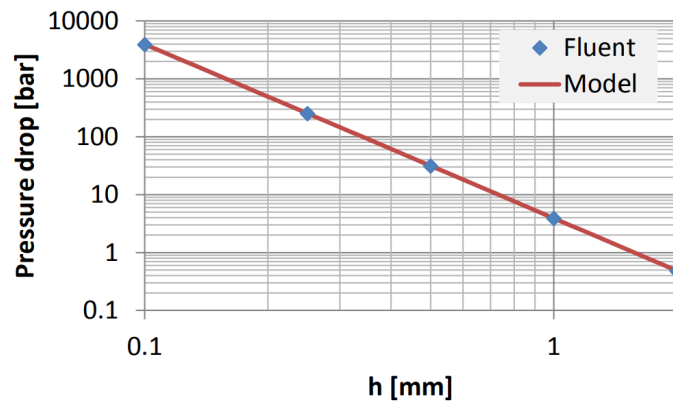
I denne simuleringen er en todimensjonal modell av en sprekk rotert rundt senteraksen til injeksjonshullet. Her ble effekten av vinkelen mellom injeksjonshullet og sprekken vurdert, samt effekten av å variere størrelsen på sprekken.

Resultatene fra simuleringen med varierende vinkel ( $\theta$ ) mellom injeksjonshullet og sprekken fra 0–180° er vist i Figur 33. Modellen var utformet med en sprekkåpning på 1 mm, med et konstant trykk på 10 bar, der væsken hadde en tyngdetetthet på 1 000 kg/m<sup>3</sup> og viskositet på 0,1 Pa·s. Resultatet viser at det har liten betydning for strømningsraten om strømmingen går framover eller bakover i sprekken fra borhullet. Det betyr at trykktapet for endring av strømningsretning er ubetydelig sammenliknet med trykktapet forårsaket av viskositeten.



**Figur 33: Strømningsrate med varierende vinkel mellom injeksjonshullet og bergsprekken fra 0 til 180°**

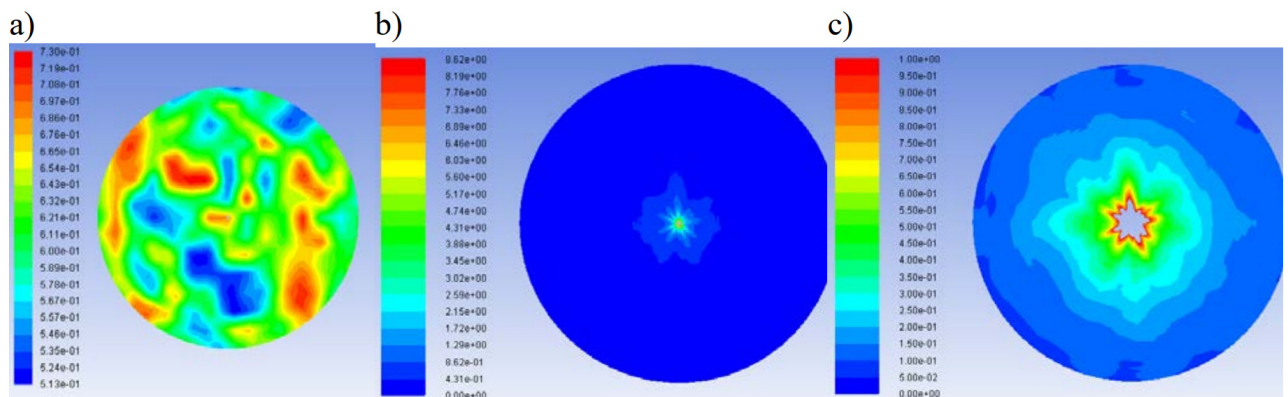
Sprekkåpningen er den viktigste parameteren relatert til trykktap i sprekker. Siden vinkelen mellom injeksjonshullet og sprekken i flere utregninger har vist seg å ha liten betydning for trykktapet, kan man forenkle modellen ved at injeksjonshullet krysser sprekken vinkelrett ( $\theta = 90^\circ$ ) og bare endrer sprekkåpningen. Figur 34 viser trykktap som resultat av endringer av sprekkåpning, der resultatene fra både beregningsmodell og simulering i ANSYS Fluent er representert.



**Figur 34: Trykktap som et resultat av endring av sprekkåpning. Sammenlikning av resultater fra beregningsmodell og simulering i ANSYS Fluent**

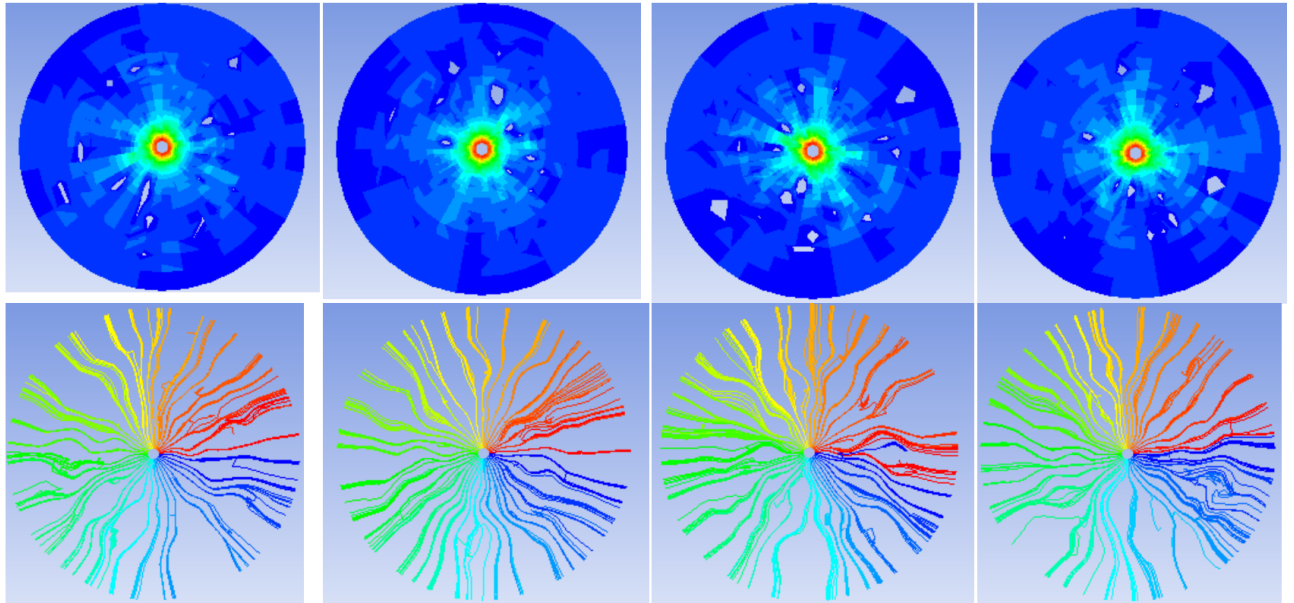
For å inkludere variasjoner i sprekkåpningen kan man gjøre endringer i sprekken geometri. Det er også mulig å legge inn porøse soner i modellen for å kunne simulere viktige effekter som forårsakes av endringer i sprekken geometri. En utfyllende beskrivelse av denne modellen fins i Skjetne & Mo (2016).

Videre ble det generert en ruhetsmodell ved hjelp av Matlab, som ble bruk til simulering i ANSYS Fluent. Ruhetsmodellen er vist i Figur 35 a. Hastighetsprofilene for strømning gjennom sprekkgeometrien er vist i Figur 35 b og c. Modellen viser at ruhetens innvirkning på strømningshastigheten avtar raskt når man beveger seg bort fra borhullet.



**Figur 35: a) ruhetsmodell med relativ sprekkåpning; b) og c) viser hastighetsprofiler.**

Det ble også generert stokastiske sprekkeplan, med kontaktsoner mellom de to sprekkeplanene. Her ble det kjørt mange simuleringer for å samle statistiske data. Figur 36 viser et eksempel der nominal hydraulisk sprekkåpning er satt til 1 mm. Gaussisk variasjon i sprekkåpning har et standardavvik på 0,3162 mm.



**Figur 36:** Den øvre rekken viser konturplott av strømningshastighet, der rød er 0,5 m/s og blå er 1 mm/s. Den nedre rekken viser strømningslinjer, der fargene identifiserer startposisjon for strømmingen fra innløpet.

## 4.8 TOFASESTRØMNING, INJEKSJONSMASSE SOM FORTRENGER VANN

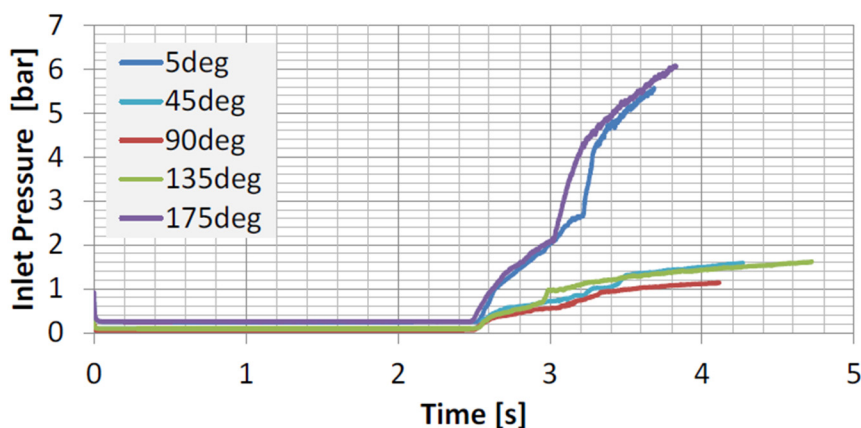
I de følgende simuleringene er injeksjonshullet og sprekken fylt med vann. Ved injeksjon vil injeksjonsmassen fortrenge vannet. For å løse dette tofaseproblemet ble det benyttet en VoF (*Volume of Fluid*)-modell i ANSYS Fluent. Dette er en numerisk metode for å følge og finne grenseflater mellom to forskjellige væsker. Metoden er best egnet til å behandle veldefinerte grenser mellom væsker og passer derfor godt til å simulere hva som skjer i sjiktet mellom grunnvann og sement. Dersom kreftene i skillet mellom væskene ignoreres, vil trykket i skillet mellom sement og grunnvann være det samme, men avtakende fra injeksjonshullet og utover.

### 4.8.1 Aksesymmetrisk – Newtonsk

#### Effekt av vinkelen mellom injeksjonshullet og sprekken

Figur 37 viser innløpstrykket til sprekken som funksjon av tid for forskjellige vinkler mellom injeksjonshullet og sprekken, der injeksjonsmassens tyngdetetthet ( $\rho$ ) er 1 600 kg/m<sup>3</sup> og viskositet ( $\mu$ ) er 0,05 Pa·s. Man kan se at strømmingen er veldig lik for sprekker med vinkel  $\theta$  og  $180^\circ - \theta$ . Derfor bør vinkelpar  $\theta$  og  $180^\circ - \theta$  sammenliknes.





Figur 37: Innløpstrykk for forskjellige vinkler mellom injeksjonshullet og bergsprekken ved aksesymmetrisk geometri

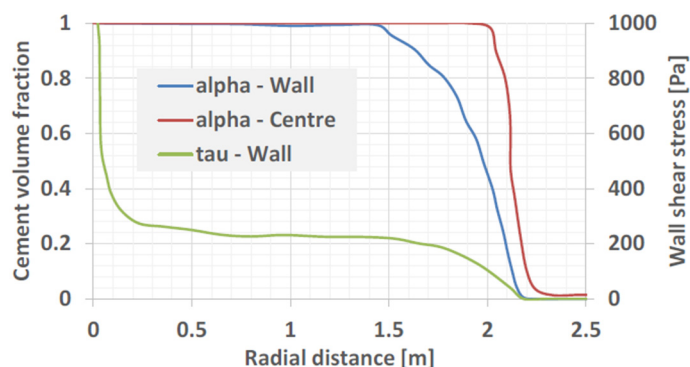
#### 4.8.2 3D aksesymmetrisk, ikke-newtonsk Effekten av skjærstyrken

Effekten av skjærstyrken til sementen er modellert med en aksesymmetrisk sprekke. Dette vil si en disk med åpning ( $h$ ) og et hull i midten. Sementen er antatt å være en Bingham-væske, der de reologiske parameterne er oppgitt i Tabell 31.

Tabell 31: Parametere for strømningsmodell

Parameter	Verdi
Flytspenning, $\tau_0$	200 Pa
Konsistensindeks, $K$	0,1 Pa·s
Antall sprekker, $n$	1
Sprekkåpning, $h$	1 mm

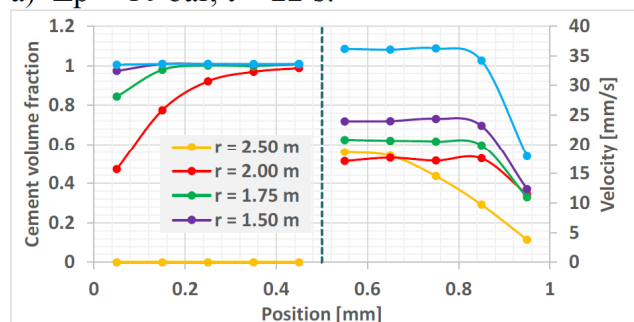
Skjærstyrken i denne modellen er kunstig høy, for å synliggjøre effekten av skjærkraften. Beregningene er først utført med et overtrykk på  $\Delta P = 10$  bar. Figur 38 viser radial variasjon av volumfraksjon sement (vegg og senter) og skjærkraften langs veggen. Det kan observeres at det er betydelig forskjell i volumfraksjonen av sement i veggen og i midten av sprekken. Det bekreftes også av tverrprofilet av hastigheten av sementfronten i Figur 39 a. I diskusjon av dette resultatet ble det konkludert med at dette var en indikasjon på at en vannfilm reduserer skjærkraften mot veggen, som reduserer friksjonen. Ved kanalisert strømning av en Bingham-væske vil man få en pluggdannelse i sentrale deler av kanalen. Pluggen skyves fram av trykket, mens det langs veggene er soner hvor friksjon og skjærkrefter virker, som beskrevet i arbeidspakke 5, kapittel 5.4. Dette er en mer kjent forklaring på resultatene fra denne simuleringen.



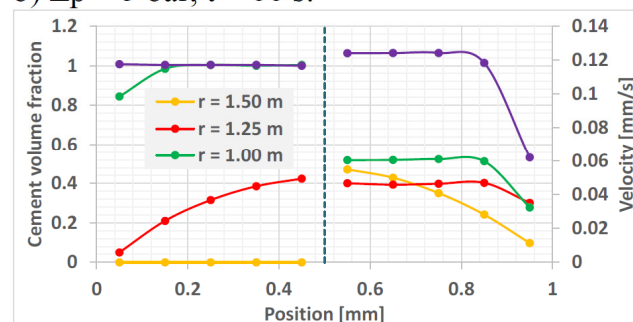
**Figur 38: Radial variasjon av volumfraksjon sement (rød og blå linje) og skjærkraften (grønn linje) etter 22 sekunder**

Videre ble simuleringen utført med et overtrykk på  $\Delta P = 5$  bar, der tverrprofilen av volumet og hastigheten er vist i Figur 39 b. Når injeksjonsmassens front ble evaluert over tid, stagnerte den etter 2,5 meter ved 10 bar og 1,2 meter ved 5 bar. Når injeksjonsfronten stagnerer, betyr det at summen av friksjon i systemet er lik kraften fra injeksjonstrykket.

a)  $\Delta p = 10$  bar,  $t = 22$  s:



b)  $\Delta p = 5$  bar,  $t = 66$  s:



**Figur 39: Tverrprofil over sprekåpningen som viser sementfronten (venstre) og hastighet (høyre), a) ved  $\Delta P = 10$  bar og b)  $\Delta P = 5$  bar**

## 4.9 OPPSUMMERING ARBEIDSPAKKE 4

Beregningene og numerisk simulering som er utført i denne arbeidspakken, har belyst noen viktige effekter som også har sammenheng med praktisk utførelse av forinjeksjon i tunnel:

- Ved sementbasert injeksjon av sprekker i bergmasse er det de viskøse egenskapene til sementen som dominerer. Det betyr at sprekkenes orientering relativt til borhullet har liten betydning for spredning av injeksjonsmassen. Om borhullet treffer sprekken veldig skrått, får man eksponert mer av sprekkeflaten, som kan gi en liten, positiv effekt. I praksis betyr dette at det ikke spiller så stor rolle hvordan borhull treffer sprekken ved forinjeksjon, så lenge sprekåpningen er stor nok til at sementen kan gå inn i sprekken. Dette forenkler også beregningsmodeller og numerisk simulering for spredning av injeksjonsmasse.
- Fra resultatene av numerisk modellering med tofasestrømning ble det konkludert med at tilstedeværelsen av vann hadde en positiv effekt på spredningen av injeksjonsmassen. Grunnlaget for denne konklusjonen er litt uklar, og det bør gjøres flere vurderinger relatert til denne effekten, da det er vanskelig å skille mellom det som i dette studiet ble definert som "wetting" og selve strømningsmodellen for Bingham-væsker.

## 5 ARBEIDSPAKKE 5 – INJEKSJON KOBLET SAMMEN MED BERGMEKANIKK

---

Som arbeidspakke 4 handler også arbeidspakke 5 om numerisk modellering av injeksjonsforløpet, men med fokus på tilbakeberegning ved bruk av virkelige injeksjonsdata, samt responsen til bergmassen. Arbeidet ble ledet av Tore Ingvald Bjørnerå ved NGI og utført av ham selv og kolleger i NGI. Dette kapittelet er basert på interne rapporter, presentasjoner og publikasjoner fra arbeidspakken.

### 5.1 INTRODUKSJON

Arbeidet har satt søkelys på to hovedaspekter ved injeksjon:

1. *Hvordan oppfører injeksjonsmassen seg under injisering?*
2. *Hvordan responderer bergmassen på å bli injisert?*

Forholdet mellom injeksjon og bergrespons er hovedsakelig gitt av injeksjonstrykket. En detaljert beskrivelse av strømningsegenskapene til injeksjonsmassen er derfor viktig. Det innebærer modellering av ikke-newtonske væsker, spreknettverk og interaksjon mellom vann/luft og injeksjonsmassen.

En utfordring med numerisk modellering av injeksjon er knyttet til den store forskjellen på dimensjoner mellom det som skal modelleres. Åpningen til en bergsprekk kan være i  $\mu\text{m}$ , mens utbredelsen til sprekken og injeksjonsmassens strømning kan være flerfoldige meter, endog titalls meter fra injeksjonspunktet. En koblet modell med både bergrespons og komplekse strømningsprosesser vil være beregningsintensivt. Av den grunn var det praktisk sett urealistisk å bruke komplette 3D FEM (endelig-element-modeller) for å modellere injeksjon. I dette studiet ble det derfor brukt forenklede endimensjonale og semianalytiske modeller.

For å kunne uttrykke strømningslikningene på en hensiktsmessig måte har vi dratt nytte av den tynne strukturen til en sprekk, ved å redusere antall dimensjoner. Reduksjonen av antall dimensjoner muliggjør problemløsning ved bruk av en overflate i stedet for volum, eller en linje i stedet for en overflate. Hver reduksjon i antall dimensjoner fører til enklere integrering av strømningslikningene som reduserer beregningslasten.

Strømningsegenskapene til sement og vann er svært forskjellige. Det fins ulike måter å beskrive hvordan interaksjonen mellom disse oppfører seg. Sement og vann kan betraktes som to blandbare væsker, hvor sement opptrer som en suspensjon bestående av både vann og sement. En annen måte å modellere på er å betrakte sement og vann som to ikke-blandbare væsker med klart definerte grenser mellom hverandre. Flyteegenskapene til sement kan modelleres som en Bingham-væske, som er definert som ikke-newtonsk. Det betyr en økt motstand mot flyt i forhold til en newtonsk væske som vann.

Modelleringen som er utført, er gjort med tofasestrømning, hvor de numeriske beregningene er validert med analytiske løsninger. Skandinaviske bergarter har lite porevolum, og vann i berget beveger seg hovedsakelig gjennom sprekkene i bergmassen og kan defineres som en sprekkakvifer. Trykk og resulterende strømning er modellert både med og uten mulighet for sprekkutvidelse / hydraulisk jekking.

## 5.2 GRUNNLEGGENDE LIKNINGER

Beskrivelse av strømningen til injeksjonsmassen baserer seg på massekonservering av injeksjonsmassen og andre tilstedeværende væsker, i dette tilfellet vann. Sement kan betraktes som en suspensjon av sementpartikler i vann, og strømningen kan beskrives med følgende likning:

$$\nabla \cdot (\rho c) = 0, \quad \frac{\delta \phi \rho c}{\delta t} + \nabla \cdot (-\rho D \cdot \nabla c + \rho q c) = R$$

hvor  $c$  er konsentrasjonen av sement i vann beskrevet som en volumfraksjon,  $\phi$  er porøsiteten (lik 1 i en sprekk),  $D$  er spredningskoeffisienten,  $\rho$  tyngdetettheten til blandingen,  $q$  er volumetrisk fluks i sprekkene og  $R$  er bidragsleddet. Hastighetsprofilen til en væske i en sprekk blir funnet fra Navier-Stokes-likningene for laminær strømning og er parabolisk over sprekkåpningen  $b$ .

Den gjennomsnittlige hastigheten er lik den volumetriske fluksen  $q$  og kan bli funnet ved integrasjon av hastighetsprofilen over sprekkåpningen delt på arealet av tverrsnittet, ved bruk av følgende likning:

$$q = -\frac{b^2}{12\mu} \nabla p$$

hvor  $\mu$  er viskositeten til væsken og  $p$  er trykket. Tyngdetettheten og viskositeten til væsken vil være avhengig av konsentrasjonen av sement etter følgende forhold:

$$\mu(c) = \mu_g c + \mu_w (1 - c), \quad \rho(c) = \rho_g c + \rho_w (1 - c)$$

En alternativ måte for å modellere sement og vann som to ikke-blandbare væsker med massekonservering av væskene er:

$$\frac{\delta(\phi S_\alpha \rho_\alpha)}{\delta t} + \nabla \cdot (\rho_\alpha q_\alpha) = R_\alpha$$

hvor  $\alpha$  representerer væskefasen ( $g$  for sement og  $w$  for vann),  $S_\alpha$  er volumfraksjonen av væskefasen og  $S_g = c$ , og  $R_\alpha$  er bidragsleddet til væskefasen.

Ved å introdusere en relativ permeabilitet for hver væskefase,  $k_{r\alpha}$ , kan den volumetriske fluksen uttrykkes som:

$$q_{\alpha} = -\frac{b^2 k_{r\alpha}}{12\mu_{\alpha}} \nabla p_{\alpha}$$

For å fullføre likningssettet introduseres følgende likninger for de to fasemetningene og fasetrykkene:

$$s_g + s_w = 1$$

$$p_c = p_g - p_w = f(s_{\alpha})$$

hvor  $p_c$  er kapillærtrykket, som er trykkdifferansen over grenseflaten til de to ikke-blandbare væskene og er ofte uttrykt som en funksjon av metningen,  $S_{\alpha}$ . Korrelasjonen mellom kapillærkraften og gravitasjonen kan finnes eksperimentelt, men også analytisk ved å balansere kapillærkraften mot gravitasjonen. I litteraturen fins det flere forslag. Fra Brooks & Corey (1964) er følgende korrelasjon gitt for et nettverk av åpninger med uniformt fordelt trykk:

$$p_c = p_d / s_w$$

hvor  $p_d$  er inngangstrykket, det minste trykket som er nødvendig for at sement skal kunne fortrenge vann i sprekken. Den relative permeabiliteten,  $k_{r\alpha}$ , er ofte korrelert til kapillærtrykket, men i en sprekke kan permeabiliteten antas å være proporsjonal med fasemetningen:

$$k_{rw} = s_w \text{ og } k_{rg} = 1 - s_w$$

En siste korrelasjon er fluidets totale trykk i sprekken,  $p_s$ , som er likt injeksjonstrykket og poretrykket:

$$p_s = p_w s_w + p_g s_g$$

Indeksen  $s$  i  $p_s$  refererer til trykket som påføres sprekkeveggene eller poreveggene i et porøst stoff.

De to formuleringene for blandbar og ikke-blandbar væske representerer to forskjellige konseptuelle modeller. Begge modellene gir sammenliknbare estimater for spredningene og fordelingen av injeksjonsmasse. Valget av modell beror derfor på andre kriterier som beregningshastighet, stabilitet og preferanse. Modellen og likningene for ikke-blandbar væske er benyttet i den videre modelleringen, hovedsakelig av numeriske årsaker. En blandbar modell er mindre stabil og krever større diffusjonsledd for å konvergere mot en løsning.

### 5.3 REDUKSJON AV ANTALL DIMENSJONER FOR IKKE-BLANDBAR VÆSKE

Likningen for massekonservering tilpasses til en ikke-blandbar væske, der bidragsleddet  $R$  fjernes:

$$\rho_{\alpha} \left( \frac{ds_{\alpha}}{dt} + s_{\alpha} c_{f\alpha} \frac{dp_{\alpha}}{dt} + s_{\alpha} \nabla \cdot v_s \right) + \nabla \cdot (\rho_{\alpha} q_{\alpha}) = 0$$

Hvor  $\nabla v_s$  er den volumetriske tøyingsraten, gitt fra materialbeskrivelsen av berget og  $c_{f\alpha}$  er kompressibiliteten til væskefasen,  $\alpha$ , og kan beregnes ved bruk av følgende likning:

$$c_{f\alpha} \rho_{\alpha} = \frac{\delta \rho_{\alpha}}{\delta p_{\alpha}}$$

I likningen er partiellderivatene byttet ut med materialderivater fordi det er forventet signifikant deformasjon.

På grunn av den store forskjellen mellom sprekkåpning og utbredelse kan variablene i likningen for massekonservering antas å være konstante over sprekkåpningen. Det reduserer antall dimensjoner. Ved å benytte Leibenz integrasjon oppnås følgende likning for massebevaring:

$$b \rho_{\alpha} \left( \frac{ds_{\alpha}}{dt} + s_{\alpha} c_{f\alpha} \frac{dp_{\alpha}}{dt} + s_{\alpha} \left( \tilde{\nabla} \cdot v_s + \frac{1}{b} \frac{db}{dt} \right) \right) + \tilde{\nabla} \cdot (b \rho_{\alpha} q_{\alpha}) = 0$$

der notasjon for sprekkoverflategradienten er:

$$\tilde{\nabla} = \left[ \frac{\delta}{\delta s_1}, \frac{\delta}{\delta s_2}, 0 \right]^T$$

## 5.4 INJEKSJONSMASSE: BINGHAM-VÆSKE

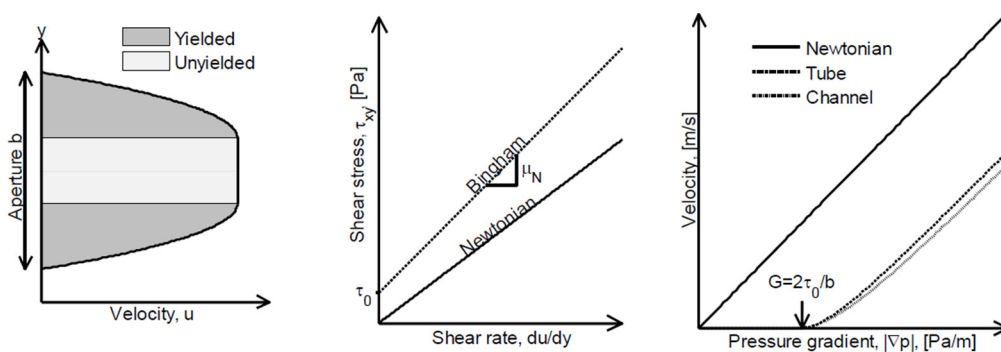
En newtonsk væske, som vann, er beskrevet med en viskositet  $\mu$  med et lineært forhold til skjærraten:

$$\tau = \mu \dot{\gamma}$$

Hvor  $\tau$  er skjærstresstensen og  $\dot{\gamma}$  er skjærratetensen for væsken. Under laminær strømning i en sprekk vil hastighetsprofilen over sprekkåpningen ha en parabolisk form. Gjennomsnittet over hastighetsprofilen viser at hastigheten er proporsjonal med trykkgradienten som virker på væsken (Darcys lov). Injeksjonsmasser som sement betegnes som et Bingham-væske. Det betyr at væsken har en skjærstyrke som må overvinnes for at væsken skal flyte:

$$\tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma}$$

hvor  $\tau_0$  er skjærstyrken til sementen. På grunn av skjærstyrken er det forventet at sement i en sprekk kan være i flyt langs sidene, mens det i midten vil være en fast kjerne hvor skjærstyrken ikke er brutt.



**Figur 40: Pluggflyt og Bingham-modell**

Som illustrert i Figur 40 vil strømning i en Bingham-væske mellom to plater bestå av en strømning langs kantene og en midtre del som oppfører seg som en fast masse. For å approksimere strømningen av en Bingham-væske i en kanal eller et rør med en tofasestrømningsmodell kan viskositeten approksimeres ved å beregne en effektiv viskositet:

$$\mu_g = \mu_{eff} = \mu_N/R$$

hvor  $\mu_N$  er den newtonske viskositeten og  $R$  er det volumetriske forholdet mellom sementpluggen og strømningen langs kantene:

$$R = A_{flyt}/A_{plugg}$$

For en Bingham-væske i et rør kan forholdet regnes ut med følgende formel:

$$R = \left[ 1 - \frac{4}{3} \left( \frac{G}{|\nabla p|} \right) + \frac{1}{3} \left( \frac{G}{|\nabla p|} \right)^4 \right], \quad \text{for } |\nabla p| > G$$

hvor

$$G = \frac{2\tau_0}{b}$$

Fra likningene ser vi at når  $|\nabla p| = G$ , er  $R = 0$ . Det gjelder for en Bingham-væske med uendelig stor viskositet, men vil gi problemer ved treg eller ingen konvergens under simulering. Derfor er variabelen  $G_2$  introdusert.  $G_2$  vil aldri bli 0, men alltid ha en liten residualverdi og er definert slik at  $G_2 = (|\nabla p|)/G > 1$ . Ved å erstatte viskositeten  $\mu_g$  i leddet for volumetrisk fluks med den effektive viskositeten  $\mu_{eff}$  kan man se at  $q_g$  er proporsjonal med  $R$  som illustrert i Figur 40.

## 5.5 VALIDERING AV IKKE-NEWTONSK STRØMNING

For å validere modellen blir løsningen sammenliknet med en analytisk løsning. Parameterne for valideringen er gitt i Tabell 32.

**Tabell 32: Modellparametere**

Parameter	Verdi	Beskrivelse
$\mu_g$	1 Pa·s	Injeksjonsmassens newtonske viskositet
$\nabla p$	300 kPa	Injeksjonstrykk
$b$	0,1 mm	Sprekkåpning
$\tau_0$	2 Pa	Skjærstyrke
$p_d$	2 kPa	Inngangstrykk
$G_2$	1,01	Maks viskositetsforhold

For en newtonsk væske vil den numeriske løsningen sammenliknes med den analytiske løsningen til spredningen:

$$I = b \sqrt{\frac{t\Delta p}{6\mu_g}}$$

hvor  $I$  er spredningen. For en Bingham-væske benyttes følgende likningssett:

$$t_D = \frac{t}{t_0}$$



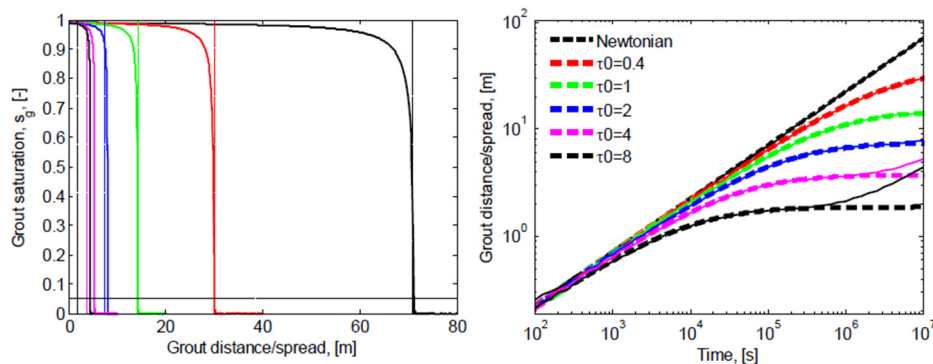
$$t_0 = \frac{6\mu_g \Delta p}{\tau_0^2}$$

$$t_D = \frac{I_D}{3(1 - I_D)} + \frac{2}{9} \ln \left[ \frac{2(1 - I_D)}{2 + I_D} \right]$$

$$I_D = \frac{I}{I_{\max}}$$

$$I_{\max} = \frac{\Delta p \cdot b}{2\tau_0}$$

Likningene over er benyttet for å validere den numeriske beregningen. Resultatet er vist i Figur 41, der vi kan se at den numeriske løsningen avviker fra den analytiske først når skjærstyrken blir høy.



**Figur 41: Grafisk framvisning av validering av modell**

## 5.6 HYDRAULISK JEKING

Når injeksjonsmassen injiseres i oppsprukket berg, kan trykket føre til mekanisk påvirkning av bergmassen som utvidelse av en eksisterende sprekk, kalt hydraulisk jekking. Dersom trykket som virker fra injeksjonsmassen overskrider minste hovedspenning og bergmassens strekkfasthet, kan det dannes nye sprekker, kalt hydraulisk splitting.

Aktivering eller gjenåpning av eksisterende sprekker (hydraulisk jekking) kan kreve et høyt trykk. Sprekker kan gjenopprette sin opprinnelige form og utvise en form for kohesjon. Kohesjonen kommer fra bergmassens stivhet i retningen normalt på sprekkplanet. Trykket hvor sprekken begynner å utvide seg kalles kritisk trykk,  $p_i$  og virker normalt på sprekkplanet. Det betyr at spenningsforholdene og orienteringen til sprekkene er viktig i bedømmelsen av faren for jekking. I forbindelse med injeksjon av bergmasse estimeres ofte det kritiske trykket konservativt ut fra overdekningen. Trykk som overstiger det kritiske trykket, er bidraget til sprekkens utvidelse og kalles for  $p_e$ .

### Eksempel på hydraulisk jekking

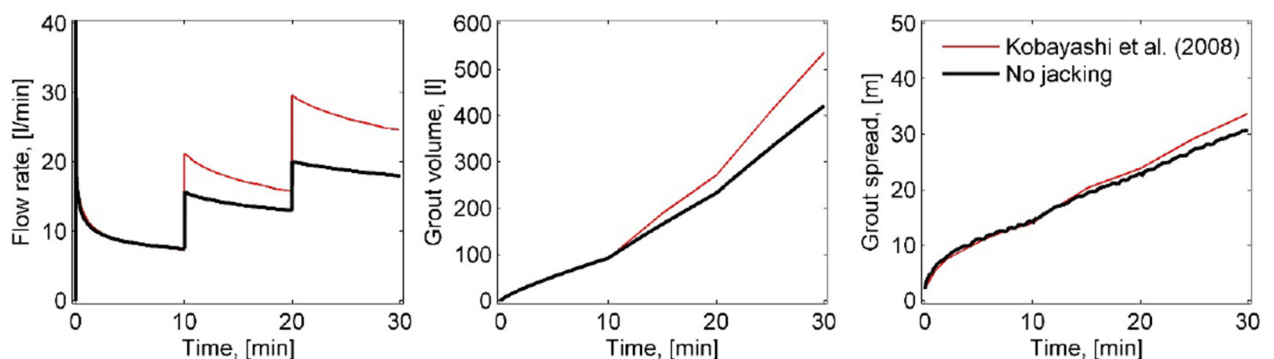
Effekten av sprekkutvidelse ble i dette studiet modellert med en halvsidig modell med uendelig utstrekning. I beregningseksemplet er det modellert en horisontal sprekk med 100 meters utstrekning

og 0,15 mm sprekkåpning. Overdekning er 40 meter. En fullstendig liste over parameterne brukt i eksemplet er gitt i Tabell 33.

**Tabell 33: Modellparametere**

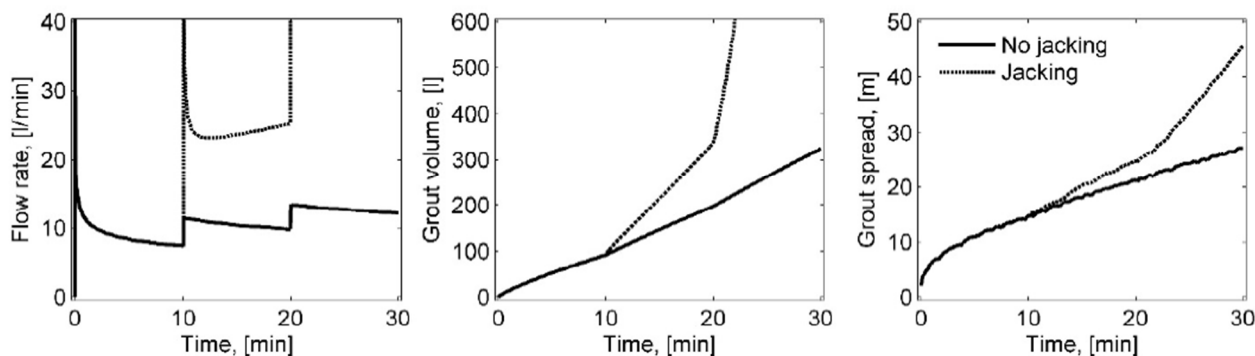
Parametere	Verdi	Beskrivelse
$\mu_g$	5,6 mPa·s	Injeksjonsmassens newtonske viskositet
$\mu_w$	1 mPa·s	Vannets viskositet
$\Delta p$	1–3 Mpa	Injeksjonstrykk
$p_i$	1 MPa	Kritisk trykk for sprekkutvidelse
$b$	0,15 mm	Initiell sprekkåpning
$\tau_0$	0,296 Pa	Injeksjonsmassens skjærstyrke
$c_f$	0,4 1/GPa	Kompressibiliteten til vann og injeksjonsmassen
$p_d$	2 kPa	Inngangstrykk
$G_2$	1,01	Viskositetsforholdskoeffisient
$E$	80 GPa	Youngs modulus for berget
$\nu$	0,2	Poissontall for berget

Injeksjonstrykket i sprekkmodellen startet med 1 MPa, fulgt av en økning på 1 MPa hvert tiende minutt. For en modell som ikke tar hensyn til sprekkutvidelse, men som har fast sprekkåpning, er resultatene sammenliknet med følgende studier: Kobayashi et al. (2008) og Stille (2015). Resultatet kan ses i Figur 42, hvor den svarte linjen representerer modellen beskrevet her. Den røde linjen er resultatene fra Kobayashi et al. (2008). Det er en god overenstemmelse mellom modellen i dette studiet og studiet presentert i Kobayashi et al. (2008).



**Figur 42: Modellresultater uten hydraulisk jekking**

Figur 43 viser forskjellen med og uten hydraulisk jekking. Den heltrukne svarte linjen viser strømming uten jekking mens den stiplede viser strømmingen hvor sprekken fikk utvide seg. Det kan observeres at det er stor økning i strømningsraten, stor økning i forbruket av injeksjonsmasse og økt spredning av injeksjonsmasse.



Figur 43: Modellresultater med og uten hydraulisk jekking

## 5.7 NUMERISK SIMULERING

Utleddningen av likningene for strømning i sprekker viser at injeksjon av bergmasse kan modelleres konseptuelt med en enkelt effektiv modell. I en slik modell representerer en sprekk summen av alle sprekke i bergmassen. Siden orientering og sprekkestrekning vanligvis ikke er kjent, antas modellsprekken å være litt større enn den ønskede forseglingslengden. Modellsprekken befinner seg i sentrum av en sfærisk modell med en fast ytterkant. Injeksjonen foregår i sentrum av sprekken med strømning,  $Q_g$ . Modellsprekkens ytterkanter regnes som stengt for injeksjonsmassen, men vannet har kontakt med omgivelsene gitt av injiserbarheten,  $I_{inj}$ . Injiserbarheten er et samlebegrep som inkluderer "alle ukjente" forhold med betydning for injeksjonsmassens inntrenging. Injiserbarheten finnes ved å dele den loggede (virkelige) strømningen med det loggede trykket:

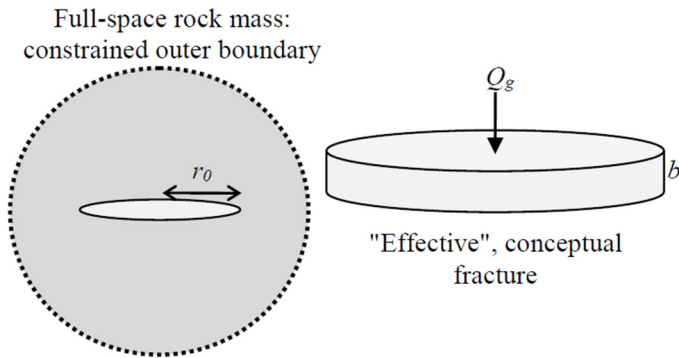
$$I_{inj} = \frac{Q}{\Delta p}$$

Injiserbarheten vil være lav om strømningen og/eller trykket er høyt. Høy injiserbarhet forekommer når strømningen er høy og/eller trykket er lavt.

En blandet grensebetingelse for vannet basert på injiserbarheten er:

$$\frac{\delta p_w}{\delta n} = I_{inj}(p_w - p_w^a)$$

hvor  $n$  er en utadgående vinkelrett vektor og  $p_w^a$  er det omliggende vanntrykket. Når injiserbarheten er høy, er sprekken åpen. Formelen impliserer da at  $p_w \approx p_w^a$ . Om injiserbarheten er lav, vil trykket,  $p_w$ , være høyt. Figur 44 viser den konseptuelle modellen.



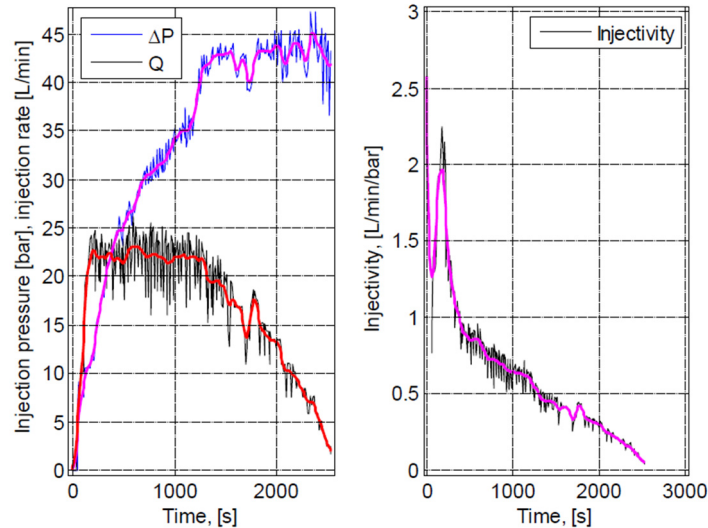
**Figur 44: Konseptuell tegning av sprekkmodellen**

De hydrauliske parameterne brukt i modellen er vist i Tabell 34.

**Tabell 34: Modellparametere for beregningsmodellen**

Parametere	Verdi	Beskrivelse
$\mu_g$	30 mPa·s	Injeksjonsmassens viskositet
$\mu_w$	1 mPa·s	Vannets viskositet
$b$	0,3 mm og 0,5 mm	Opprinnelig sprekkåpning
$\tau_0$	15 Pa	Injeksjonsmassens skjærstyrke
$c_f$	0,4 1/GPa	Kompressibilitet til vann og injeksjonsmassen
$p_d$	2 kPa	Inngangstrykk
$G_2$	1,01	Viskositetsratio koeffisient
$r_0$	25 m	Spredningsradius

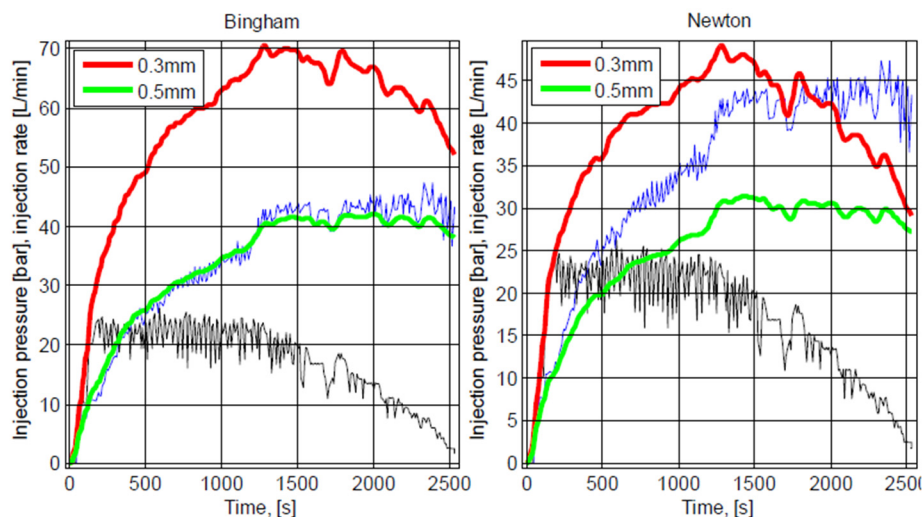
Formelen som beskriver injiserbarheten, er uttrykket som setter grensebetingelsene for modellen. Modellparameterne er hentet fra virkelige injeksjonsdata. Injeksjonsdataene som er benyttet i de videre utregningene, er vist grafisk i Figur 45. Her kan man se hvordan trykket gradvis øker mens strømmingen gradvis faller. Det fører til at injiserbarheten starter høyt før den gradvis minker. De loggede dataene er jevnet ut for å fjerne støy.



**Figur 45: Data fra injeksjonsrigg, brukt i beregningsmodellen**

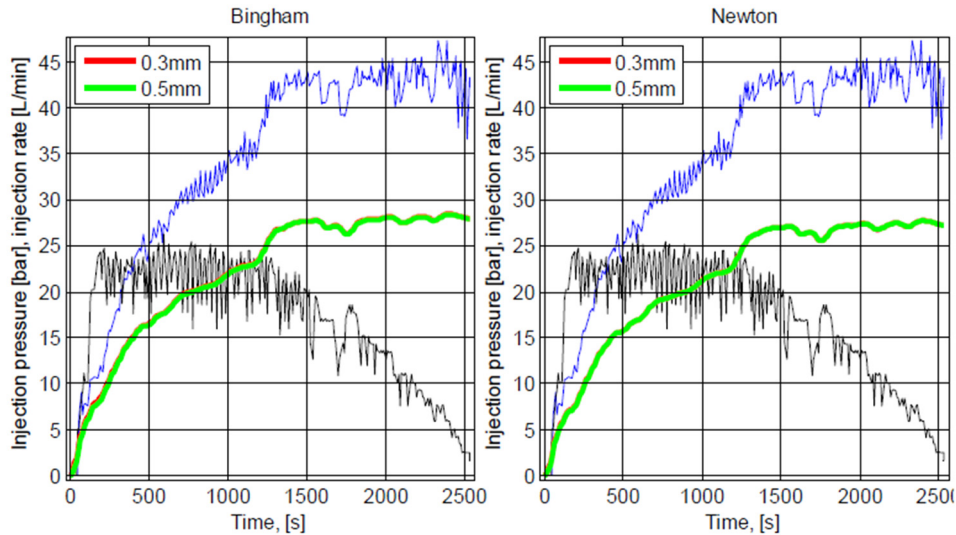
## Resultater

Resultatene fra modellen er som nevnt beregnet ved bruk av injeksjonsdata vist i Figur 46 og parameterne i Tabell 34. Først er det vurdert om det er forskjell i modellens evne til å reprodusere trykkgrafen med injeksjonsmassen beskrevet som en Bingham-væske og som en newtonsk væske. Resultatet gjengitt i Figur 46 viser at Bingham-modellen er best beskrivende for den faktiske injeksjonen. I modellen er det benyttet to forskjellige sprekkåpninger på 0,3 og 0,5 mm. Fra figuren kan man se at trykket estimeres godt for en Bingham-væske med sprekkåpning på 0,3 mm.



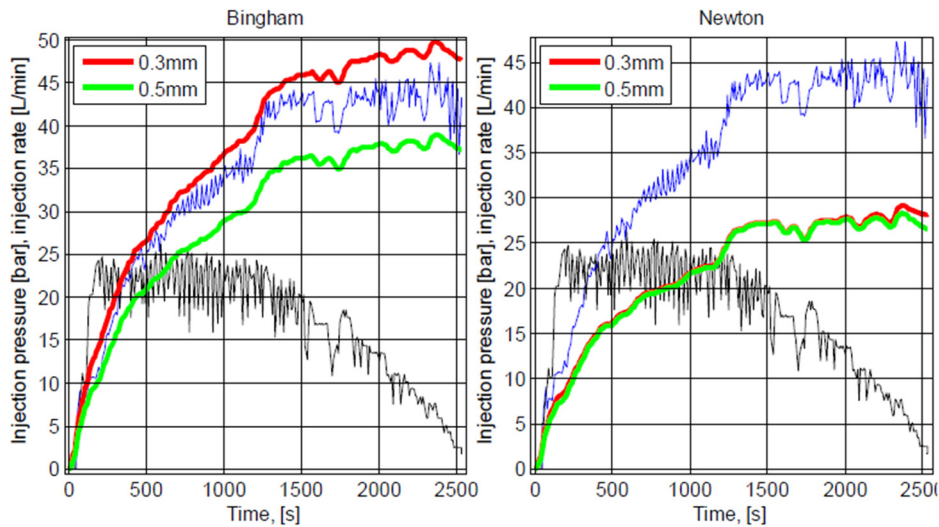
**Figur 46: Resultater uten geomekaniske effekter**

Dersom geomekaniske effekter tillates, vil modellens permeabilitet og sprekkåpning variere. Resultatet er vist i Figur 47. Grafen viser at enhver økning i trykk blir nøytralisert av den resulterende sprekkutvidelsen.



**Figur 47: Resultater med variabel sprekkåpning og permeabilitet**

Dersom kun permeabiliteten tillates endret, blir resultatene i modellen som vist i Figur 48. Resultatet viser hvordan trykkøkningen dempes av den økte permeabiliteten.



**Figur 48: Resultater med variabel permeabilitet**

### Diskusjon av resultater

Modelleringen viser at Bingham-modellen passer best til å estimere injeksjonen. Modellen viser også at det er mulig å finne modellparametere som beskriver injeksjon ved bruk av denne numeriske modellen.

## 5.8 OPPSUMMERING AV ARBEIDSPAKKE 5

Arbeidet som er utført i denne arbeidspakken, viser at man ved å benytte teoretisk formelverk i kombinasjon med faktiske data fra utført injeksjon kan få informasjon om sprekksystemet man injiserer, samt definere hendelser som hydraulisk jekking under injeksjonsforløpet. Dette er også mye av tankegangen rundt RTGC-metoden (Real Time Grouting Control), som presenteres av Stille (2015). For å kunne bruke slike simuleringer i praksis, som et verktøy for å beskrive bergmassen som injiseres, kreves det mye fortløpende informasjon om reologien til injeksjonsmassen. Dette er noe forskningsmiljøet i Sverige (KTH og Chalmers) jobber kontinuerlig med. Denne typen numerisk simulering kan ha et stort potensial i framtiden.

## 6 ARBEIDSPAKKE 6 – SKALERT LABORATORIEMODELL FOR INJEKSJON

---

Arbeidspakken ble ledet av NTNU-IGP ved Gunnar Vistnes og utført av hans kollegaer ved Berglaboratoriet.

Formålet med å bygge en skalert injeksjonsmodell var å teste teoretisk kunnskap og finne ny innsikt om hvordan injeksjonsmassen oppfører seg under høye trykk i små sprekker. For å oppnå dette ble modellen designet slik at følgende faktorer skal kunne varieres:

- Sprekkeegenskaper
- Injeksjonsmassens egenskaper
- Injeksjonstrykk
- Strømningsrate

Bruken av laboratoriemodell var også direkte knyttet til noen av de andre arbeidspakkene, hvor planen var å teste og verifisere resultater fra det numeriske arbeidet og laboratorietestene av sement.

Det var også ønskelig at forholdene under injeksjon i laboratoriemodellen skulle være likest mulig forholdene under injeksjon i felt. Dette inkluderer blandingsmetode for sement, sementblandinger, temperaturer, pumpeutstyr og injeksjonstrykk. Derfor ble det anskaffet en kolloidalmikser og spesialkonstruert pumpe for å sikre nøyaktig kontroll av trykk og strømning. Utstyret er avbildet i Figur 49.



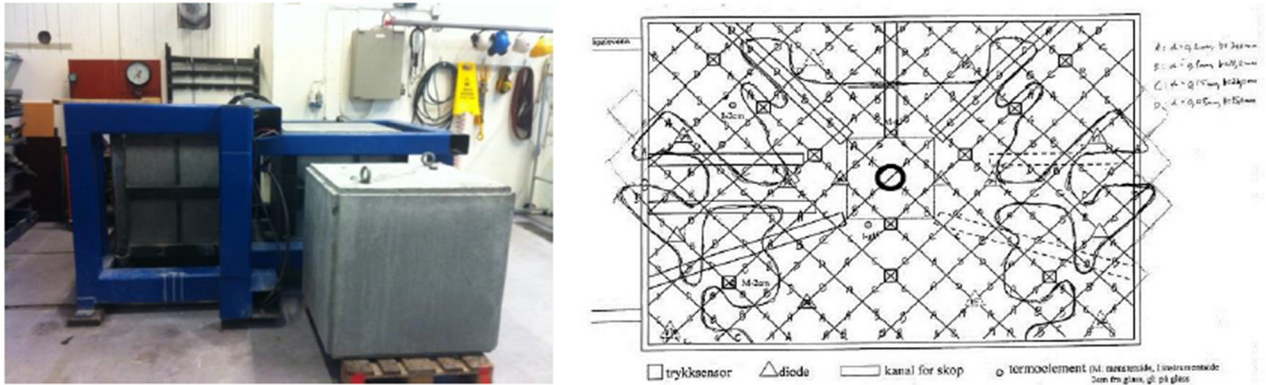
*Figur 49: Kolloidalmikser og spesialkonstruert pumpe for injeksjon av laboratoriemodell*

### 6.1 TIDLIGERE FORSØK MED INJEKSJONSMODELL

Mellom 2000 og 2003 ble det utført et stort forskningsprosjekt kalt "Miljø og samfunnstjenlige tunneler" (Kveen & Lindstrøm, 2004). I dette prosjektet utviklet SINTEF/NTNU en sprekkemodell bestående av to sementblokker som ble presset imot hverandre. For å simulere en bergsprekk var det



plassert to glassplater med utfreste spor mellom sementblokkene. I senter av modellen var det lagd et injeksjonshull som var innløpet for sementen. Figur 50 viser et bilde av modellen og skisse av glassplatene.



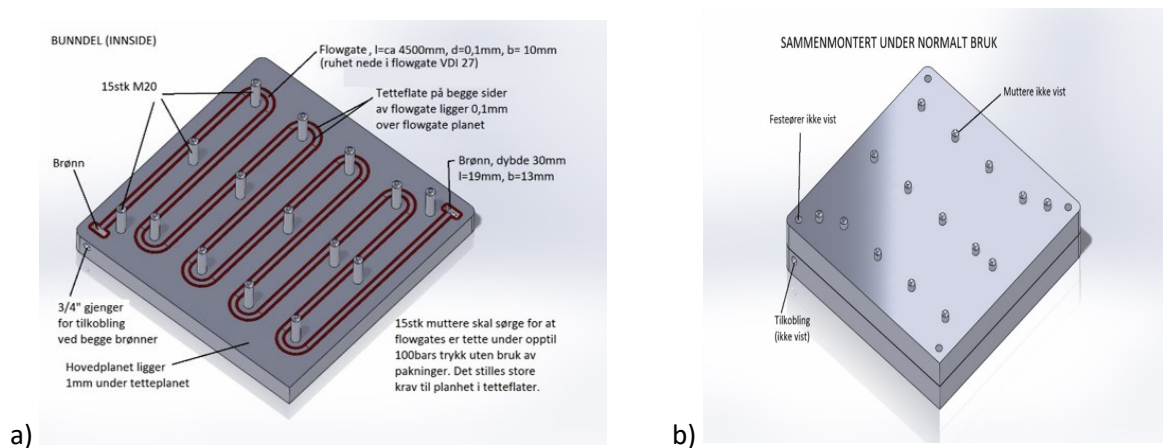
**Figur 50: Injeksjonsmodell utviklet under forskningsprosjektet "Miljø og samfunnstjenlige tunneler". Sementblokkene er avbildet til venstre, til høyre ses en skisse av sprekkmodellen.**

Sprekkmodellen fungerte ikke optimalt fordi glasset sprakk under testing og trykket måtte holdes mye lavere enn det som er vanlig i norsk praksis. Lærdommene fra modellen ble tatt med i betraktningen under planleggingen av injeksjonsmodellen til TIGHT.

## 6.2 INJEKSJONSMODELLEN TIL TIGHT

Injeksjonsmodellen i TIGHT tok med seg erfaringene fra injeksjonsmodellen til "Miljø og samfunnstjenlige tunneler". Det ble også utført en litteraturstudie på laboratoriemodeller og skrevet en rapport på "State of the art" for laboratoriemodeller på injeksjon, med beskrivelse av planlagt modell (Vistnes, Strømsvik & Nilsen, 2017).

Modellen består av to stålplater med et utfrest spor i bunnplata, dimensjonert for bruk av høye injeksjonstrykk. Figur 51 viser modelloppsettet, med a) plantegning av sprekker i stålplata, og b) lukket modell med bolteplassering. Begge endene på sprekken kan brukes som innløp eller utløp, der det er brønner med gjenger for tilkobling av injeksjonsslange. Modellen monteres sammen med bolter og dimensjoneres for et trykk på 100 bar. Figuren viser detaljerte modellspesifikasjoner.



**Figur 51: Plantegninger av injeksjonsmodell: a) viser sprekkdesign og b) viser lukket modell med bolteplassering.**

Modellen ble testet ved injeksjon av vann, der injeksjonstrykket var 5,5 bar. Modellen var ikke tett, og det var vannlekkasjer flere plasser langs kantene. Det ble utført flere modifikasjoner på modellen, blant annet bedre polering av kantene langs sprekken og økt antall bolter for å fordele innspenningstrykket bedre. Modellen ble tettere, men ikke tett nok. Figur 52 viser den utfreste sprekken med polert kant.



Bunnplate

**Figur 52: Modellens bunnplate med utfrest sprekk-kanal. Rundt sprekk-kanalen er det en polert kant som presses mot topplata når modellen boltes sammen.**

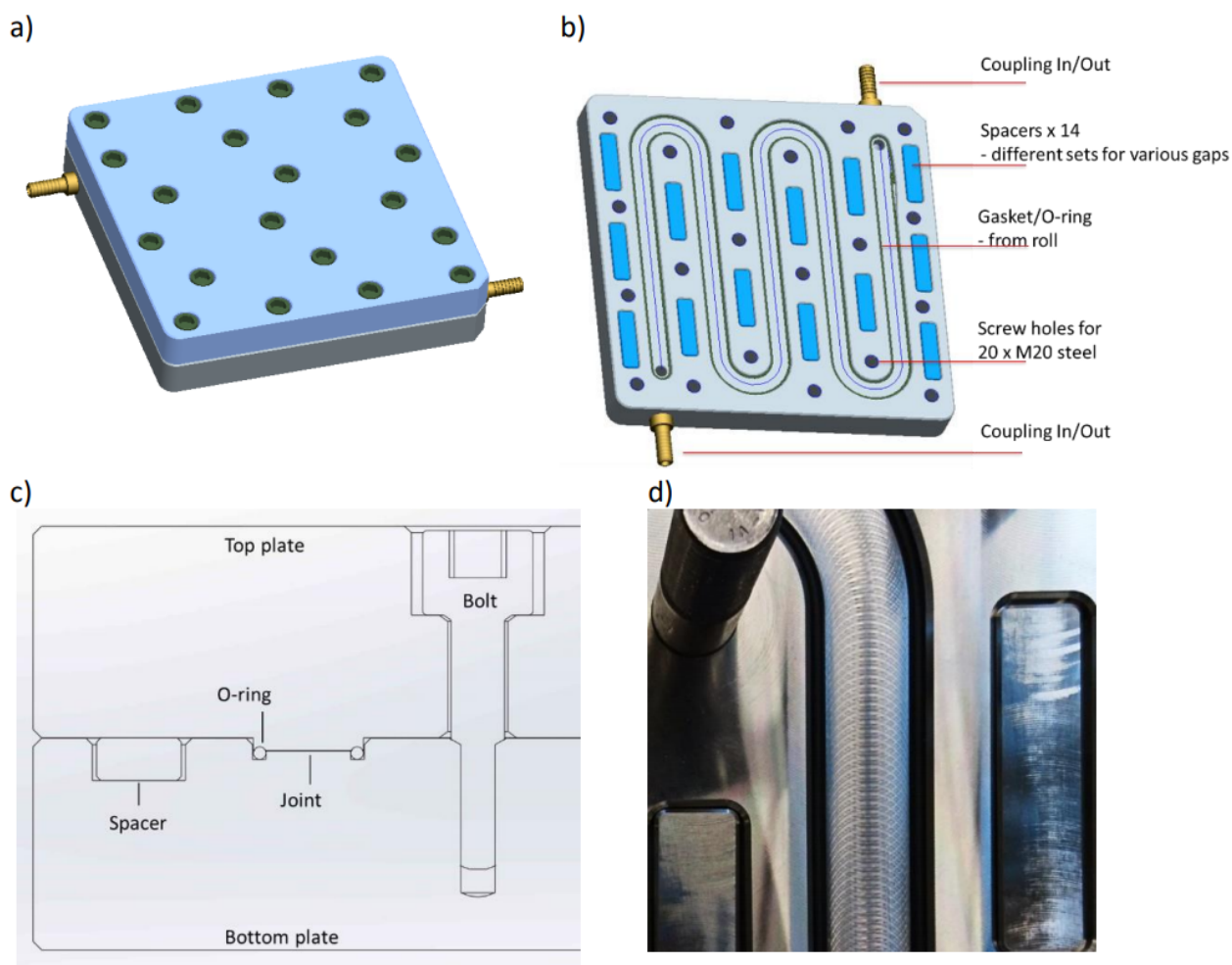
Selv om den første sprekkmodellen ikke fungerte som den skulle, fikk den første testen et resultat som er verdt å bringe videre: Injeksjon av vann under 5,5 bar i en sprekk med åpning på 100  $\mu\text{m}$ , 1 cm bredde og 4,5 meter lengde ga bare lett drypping ved utløpet og lekkasjene i modellen var tilsvarende (under målbar grense). Strømning av en sementbasert injeksjonsmasse i en slik modell kan antas å være vanskelig, selv om laboratorieforskning dokumenterer at enkelte sementtyper kan penetrere sprekker ned mot 90  $\mu\text{m}$  uten filtrering (Stille, 2015).

Basert på erfaringene fra den første modellen ble det produsert en ny versjon: Følgende endringer ble utført:

- Økning av den justerbare sprekkåpningen fra 30–100  $\mu\text{m}$  til 100–300  $\mu\text{m}$ . Dette gjorde også produksjonen lettere og ga mulighet for økt sprekkruhet.

- Det ble frest spor til å legge O-ring langs kanten av sprekken, se tegning i Figur 53 a.
- Sprekkebredden ble økt fra 1 til 2 cm, som letter installasjon av O-ring.
- Sprekkrughet ble satt til et aritmetisk gjennomsnittlig avvik på 3  $\mu\text{m}$ .

En full beskrivelse av den nye modellen er illustrert i Figur 53. På grunn av tid og budsjett ble det dessverre ikke foretatt noen tester på den endelige sprekke modellen.



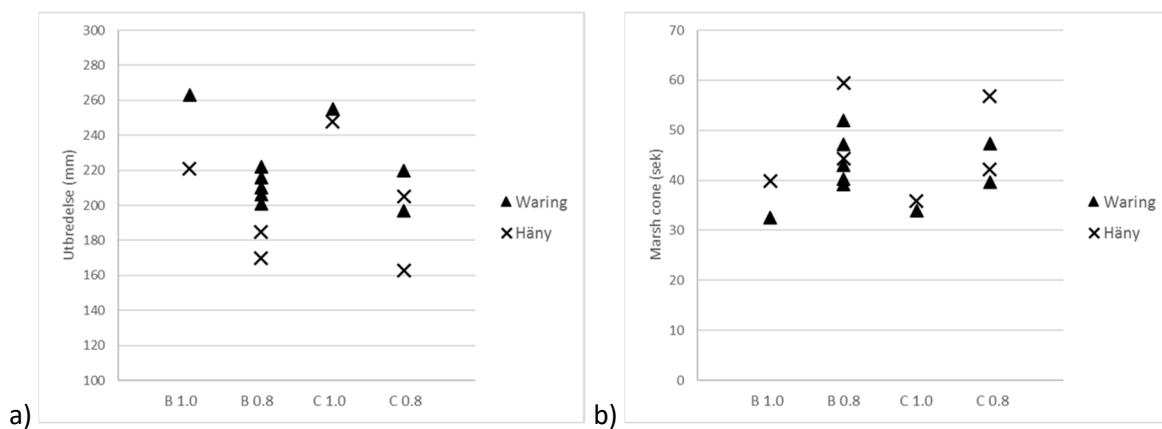
**Figur 53: Ny versjon av injeksjonsmodell: a) lukket modell med boltemønster, b) bunnplata med spesifikasjoner, c) tverrsnitt av deler av modellen og d) bilde av sprekke med ruhet, kantet med O-ring**

### 6.3 TESTING AV INJEKSJONSMASSE

Selv om det ikke ble gjort tester ved bruk av injeksjonsmodellen, ble det utført enkle tester på injeksjonsmasse blandet med kolloidalmikseren, sammenliknet med injeksjonsmasse blandet ved bruk av laboratoriemikser. Grunnen til dette er at forskning har vist at blandemetode har betydelig innvirkning på egenskapene til en sementbasert injeksjonsmasse, og at resultatene fra laboratorietester ikke nødvendigvis samsvarer med hva som faktisk foregår i praksis.

Kolloidalmikseren og Waring-laboratoriemikseren, som er brukt ved laboratorietestene i arbeidspakke 3, blander på forskjellig måte og har ulikt blandingsvolum. Kolloidalmikseren, levert fra Häny, blander 50 liter sement om gangen. Blandingen skjer ved at sementen sirkulerer fra tanken gjennom et rør, ut av en slisse og tilbake i tanken, mens Waring hurtigmikser fungerer som en blender. Ved blanding i kolloidalmikseren ble det først tilsatt vann, videre ble sementen tilsatt i løpet av 1,5 minutter, etterfulgt av 2 minutter med blanding.

De ble utført Marsh Cone-test og bordutflytningstest med sementene B og C, der sementblandingen er like som blandingene presentert i arbeidspakke 3. Det ble kjørt tester for begge sementene ved v/c-forhold på 0,8 og 1,0. Resultatene er vist i Figur 54: Resultater fra a) Marsh Cone-test og b) bordutflytningstest, for sementblandingen B og C med v/c-forhold 1,0 og 0,8



Figur 54: Resultater fra a) Marsh Cone-test og b) bordutflytningstest, for sementblandingen B og C med v/c-forhold 1,0 og 0,8

Resultatene viser at det er betydelig forskjell mellom blandingene, både innad for samme blandinger og mellom blandemetodene. Ved utbredelsestesten ser vi at det er større utbredelse av massen som er blandet med laboratoriemikseren, og ved Marsh Cone-test er det også raskere gjennomstrømning av den massen som er blandet i denne blanderen; dette gjelder spesielt for sement B. Resultatene tyder på at viskositeten er høyere i sement blandet med kolloidalmikseren. Årsaken kan være en kombinasjon av at sementen blir bedre blandet i laboratoriemikseren og at blandingsvolumet er mindre. Det ble også observert gjenliggende sementklumper på over 2 mm i filteret til Marsh Cone-testen for sement blandet med kolloidalmikseren.

Resultatene bekrefter hvor vanskelig det kan være å utvikle laboratorietester for injeksjon og hvordan disse relaterer seg til reelle *in situ*-forhold under forinjeksjon i tunnel.

## 6.4 OPPSUMMERING AV ARBEIDSPAKKE 6

Planlegging og bygging av modellen har vært en tidkrevende prosess preget av forsinkelser både i produksjonen av sprekkmodellen og ved levering av injeksjonspumpa. Mye av årsaken til dette er ønsket om å injisere ved injeksjonstrykk tilsvarende det som brukes i praksis ved forinjeksjon av bergmasse i tunnel. Høye trykk ved laboratorietesting krever at man har en svært sikker modell som

er dimensjonert til å tåle forsøk ved slike trykk. Ved TIGHT-prosjektets slutt ble det derfor ikke utført tester av den endelige modellen. Alt utstyret er på plass og klart til bruk, og det er et ønske om at injeksjonsmodellen kan benyttes i et nytt prosjekt.

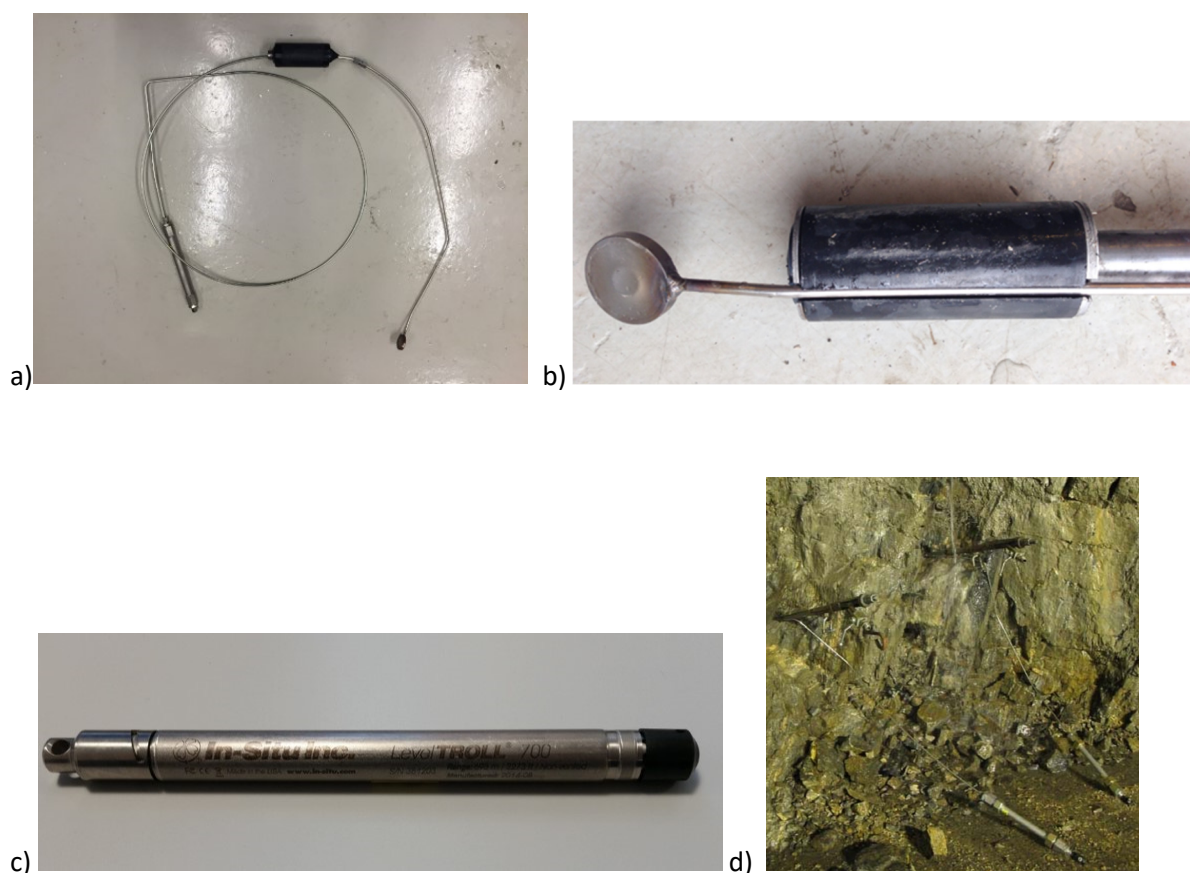
Det er viktig å framheve arbeidet som ble gjort i denne arbeidspakken relatert til testing av sement. Resultatene bekrefter arbeidet som er gjort i arbeidspakke 3, hvor hovedkonklusjonen var som følger: Det kan være utfordrende å finne den optimale sementblandingen, og produkter med tilsynelatende samme egenskaper oppfører seg veldig forskjellig. Derfor er det svært viktig at alle prosjekter utfører relevante tester på de sementblandingene man skal bruke under stedlige forhold og benytter samme blandemetode som man skal benytte ved injeksjon.

## 7 ARBEIDSPAKKE 7 – FULLSKALA TESTING UNDER INJEKSJON

Arbeidspakken ble ledet av NGI ved Lloyd Tunbridge som har utviklet en metode og instrumentering for å måle trykket innenfor pakkeren i injeksjonshull. Arbeidet ble påbegynt før TIGHT-prosjektet, men ble videreutviklet og modifisert gjennom flere felttester utført som en del av TIGHT. Måleutstyret gjør at trykkdata fra injeksjonshull kan samles inn kontinuerlig, uavhengig av operasjonene på injeksjonsriggen. Det gjør det mulig å identifisere og dokumentere forbindelser mellom injeksjonshull. Trykktap mellom riggen og injeksjonshullet kan også måles. I denne arbeidspakken er det samlet inn data fra flere injeksjonsskjermer utført på tunnelprosjekter i Åsland (Follobanen), Kongsberg og Bergen.

### 7.1 UTSTYR

Utstyret består av en trykkballong "flat jack" i metall koblet sammen med et rør til et forseglet hus hvor dataloggeren sitter. Systemet er tett og vannbårent. Trykkballongen plasseres innenfor pakkeren i injeksjonshullet. Røret fra trykkballongen passerer pakkeren gjennom en frest slisse og går til en stålkapsel hvor en datalogger med membran ligger inni. Figur 55 viser bilder av målesystemet. Dataloggeren kan på denne måten registrere trykket i injeksjonshullet via trykkforplantningen i vannet i systemet. Etter utført injeksjon kan dataloggeren frakobles og gjenbrukes. Resten av utstyret blir sprengt bort ved neste salve.



**Figur 55: a) komplett montert målesystem, kveilet for transport, b) trykkballong med vannfylt rør som går gjennom en slisse i pakkeren, c) trykkloggeren som legges inni stålkapselen, d) utstyret montert i tunnel**

## 7.2 FELTARBEID

I første fase av feltarbeidet var det lagd utstyr for å måle 6 hull under injeksjon av en skjerm. Under prosjektet ble det lagd utstyr for å måle 15 hull under injeksjon av en skjerm. Tabell 35 gir en oversikt over alle felttestene som ble utført i denne arbeidspakken under TIGHT-prosjektet. Fordi en logger ble tapt under arbeid og to loggere ikke fungerte, ble siste runde (runde 5) i felt utført med 12 loggere. Resultatene fra denne runden kom helt i sluttfasen av TIGHT-prosjektet, og det var av den grunn ikke mulig å tolke resultatene innenfor prosjektets rammer. Resultatene fra feltarbeidet ble derfor brukt i MSc-oppgaven til Ida Skjæraasen (se publikasjonsoversikten i kapittel 1.2).

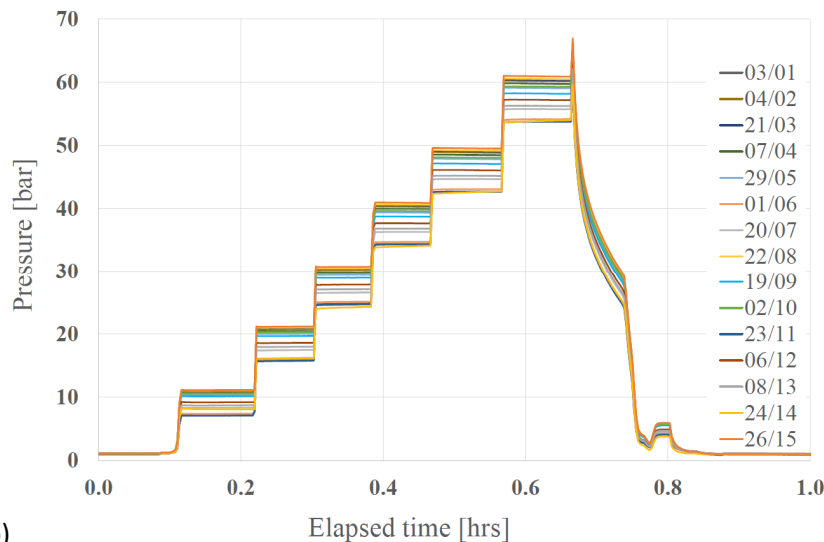
**Tabell 35: Oversikt over utførte felttester**

Runde	Sted	Tidspunkt	Antall loggere
1	Åsland (Follobanen)	Høst 2015	6
2	Kongsbergtunnelen	Vår 2016	15
3	Kongsbergtunnelen	Sommer 2016	15
4	Lyshorntunnelen (E39-Bergen)	Vår 2017	15
5	Lyshorntunnelen (E39-Bergen)	Høst 2017	12

Etter at loggerenhetene var montert, fylt med vann og kveilet som illustrert i Figur 55 a, ble de testet under trykk for å kontrollere at trykkmåleren registrerte faktisk trykk. I starten ble dette gjort ved å legge trykkballongen i et stålrør, som ble trykksatt med vann. Dette var en tung og tidkrevende jobb, spesielt når det ble mange loggerenheter. På de to siste rundene (runde 4 og 5) ble det derfor benyttet en trykktank på NGI, hvor alle loggerne ble testet under det samme trykket, se Figur 56. På denne måten hadde alle loggerne samme kalibreringstest, som gjorde at arbeidet ble lettere og resultatene ble kvalitetsmessig bedre.



a)



b)

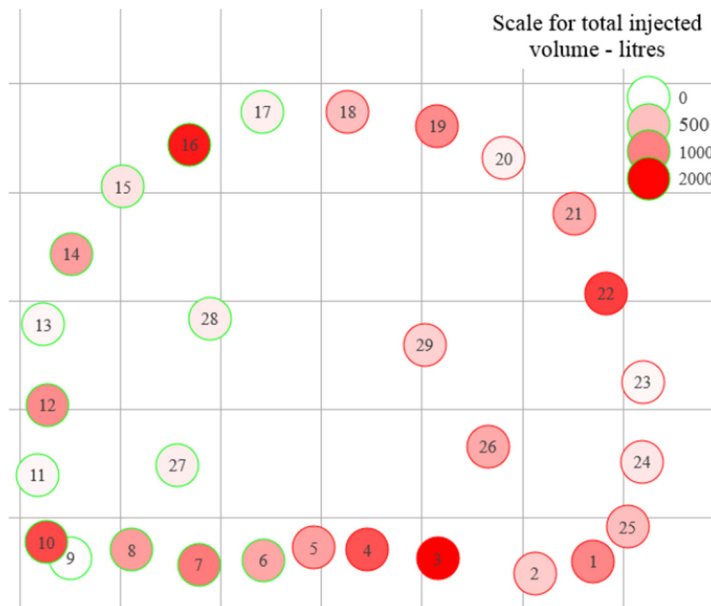
**Figur 56: a) testing av loggere i trykk tank før de ble fraktet til tunnel, b) resultater for kalibreringstest av loggere**

Utstyret ble montert samtidig med installering av injeksjonsstavene i injeksjonshullene på tunnelstappen. Selve injeksjonen ble utført etter vanlig injeksjonsprosedyre angitt fra byggherre. Ved feltrunde 4 og 5 ble det foretatt injeksjon av vann i de hullene som hadde montert logger.

### 7.3 RESULTATER

I denne rapporten presenteres bare deler av de utførte testene, hovedsakelig ved å gi et utdrag av publikasjonen Tunbridge, Strømsvik & Aarset (2017). Denne artikkelen presenterer feltrunde 3, som ble utført i Kongsbergtunnelen sommeren 2016. Her ble totalt 15 av 29 injeksjonshull instrumentert på en injeksjonsrunde. Plasseringen av injeksjonshullene og plassering av dataloggerne kan ses i Figur 57. En grafisk oversikt over trykk og strømningsforløpet under hele injeksjonsrunden er vist i Figur 58.



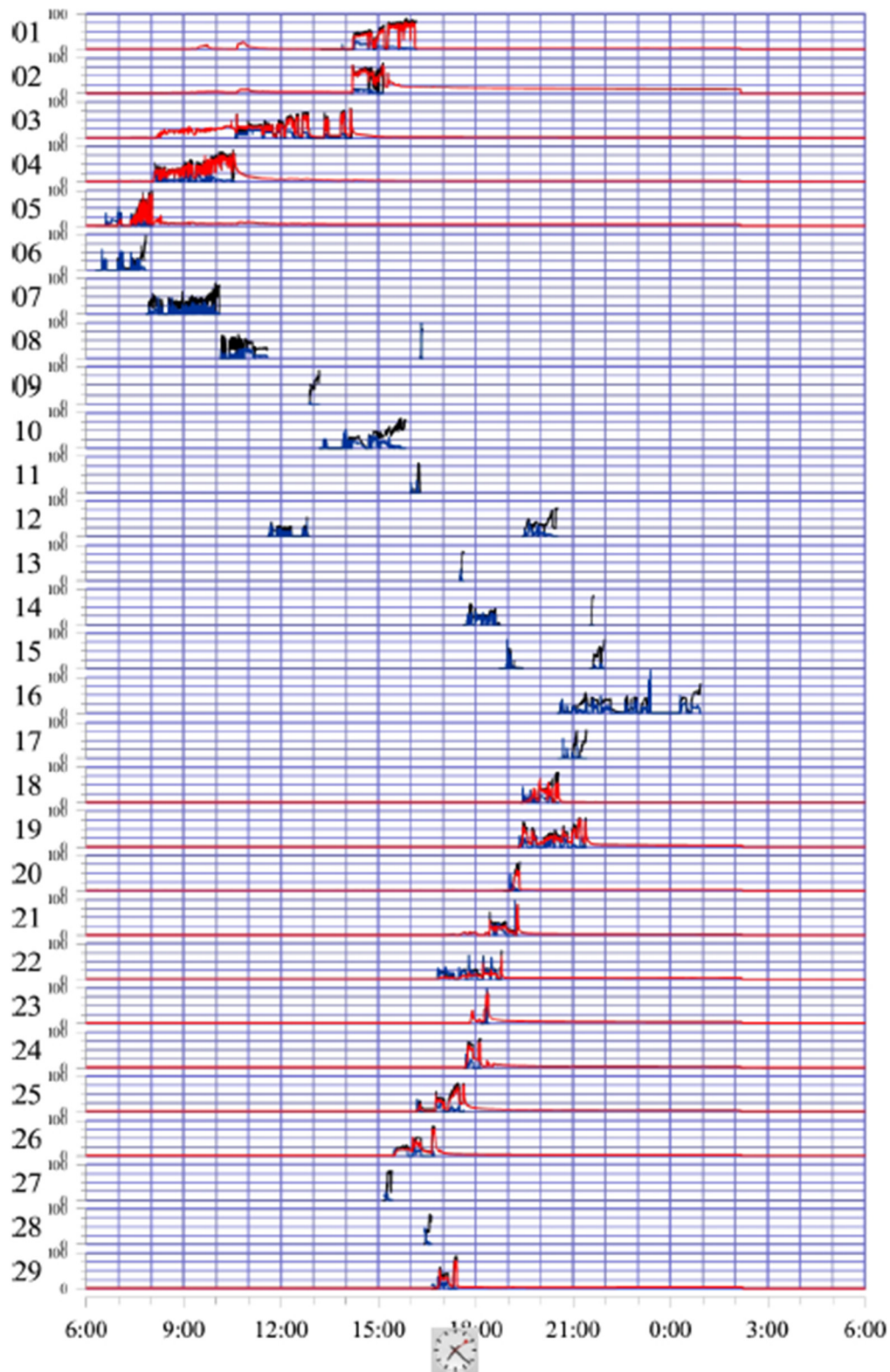


**Figur 57: Plassering av injeksjonshull på tunnelstuppen. Hullene utstyrt med loggere er markert med en grønn sirkel rundt hullnummer, og styrken på rødfargen angir masseinnngang i de enkelte injeksjonshullene.**

Etter installering av alle måleenhetene i injeksjonshullene ble alle injeksjonsstavene på stoff lukket, også de som ikke hadde trykkmålere innenfor. Slik fikk man en grov måling på grunnvannstrykket før injeksjon.

Ved detaljert sammenlikning av trykket på injeksjonsriggen og trykket i hullet fikk man bekreftet at trykktapet fra injeksjonsriggen til injeksjonshullet er ubetydelig. Merk at trykket målt på injeksjonsriggen kun pågår mens selve injeksjonen av hullet foregår.

Ved felttestene 4 og 5 ble en andel av injeksjonshullene injisert med vann før injeksjon av sement. Det var utfordrende å vurdere disse resultatene siden vanntapet i injeksjonshullet var større enn utstyrets kapasitet til å pumpe. Fordi vann har mye høyere transmissivitet i bergmasse enn sement ble det konkludert med at det er praktisk vanskelig å utføre vanntapmålinger ved bruk av injeksjonsriggen over hele lengden av injeksjonshullet.



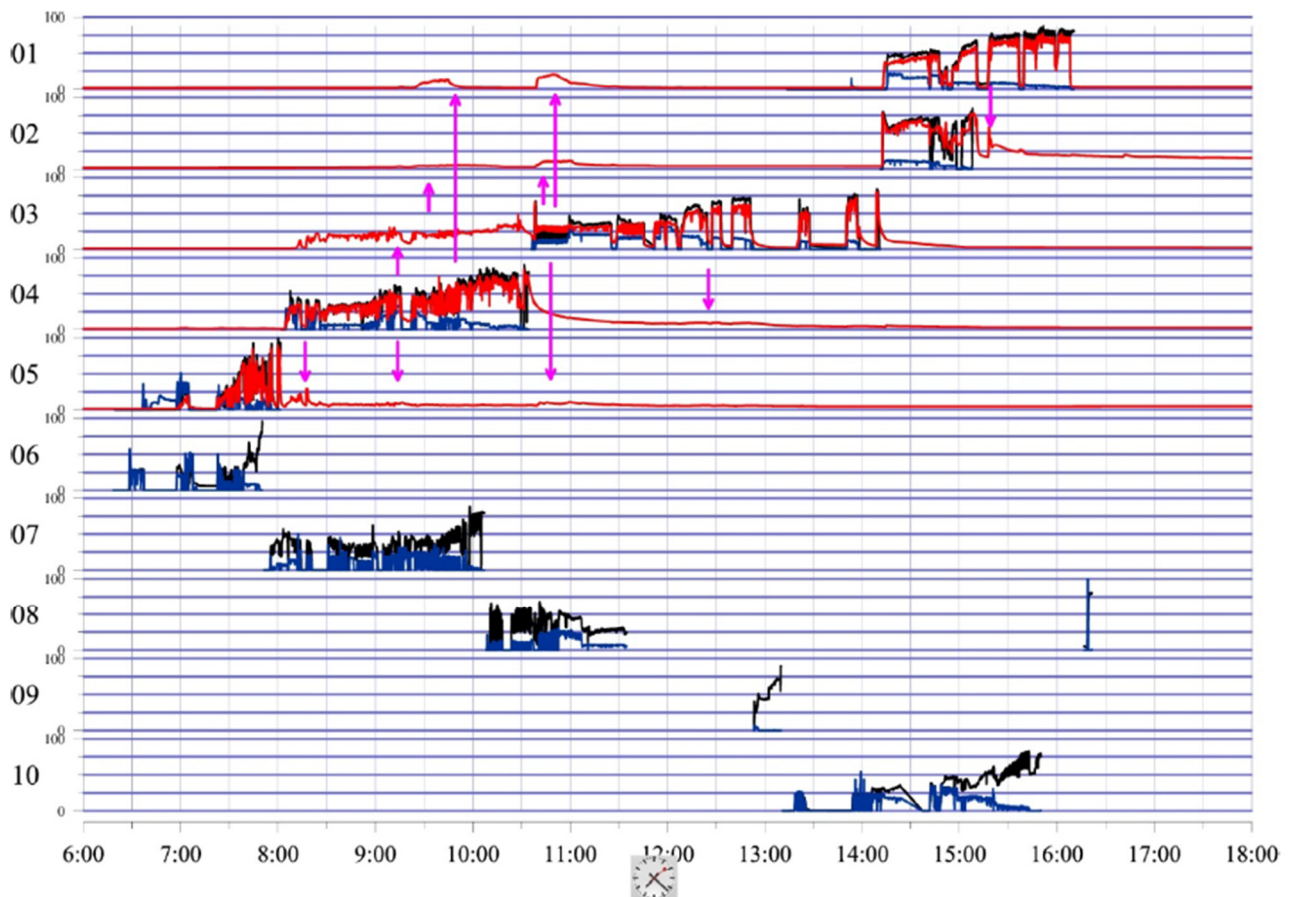
Figur 58: Grafisk oversikt over trykk og strømning for alle injeksjonshullene i hele injeksjonsrunden. Blå linje angir strømning, svart er trykket målt på injeksjonsriggen, rød angir trykket målt med logger i injeksjonshull.

## 7.4 DISKUSJON

Ved bruk av trykk og strømningsdata fra riggen og trykkdata fra loggerne kan man tolke trykkforbindelser mellom hullene. I Figur 59 er det markert flere trykkforbindelser mellom hullene. En

trykkforbindelse kan ses ved at trykkloggen i et hull viser økning i trykk, selv om det ikke utføres injeksjon i hullet. Ved å sammenlikne dette trykket med andre hull kan man identifisere hvilke hull som er kilden til trykkøkningen. I resultatene fra denne injeksjonsrunden ble det funnet forbindelse mellom hullene 1 til 5 og 26 i sålen (ikke vist i figuren). Felles for disse hullene er at det ble injisert relativt likt masseforbruk fra 200 til 400 liter. I høyre sidevegg ble det observert forbindelse mellom hull 21 og 22 med et målt masseforbruk på 657 og 1 520 liter, og mellom 23 og 24 med masseforbruk på 70 og 188 liter. Videre ble det observert en liten forbindelse mellom hull 26 og 29 med masseforbruk på 675 og 365 liter. Det er også interessant å legge merke til at trykkforbindelsene ikke alltid er toveis. Man kan observere at ved injeksjon av hull 4, er det en forplantning av trykket i hull 5, men ved injeksjon av hull 5 er det ingen trykkforbindelse til hull 4. Årsaken til dette er ikke kjent.

Geologisk kartlegging av stuff og området innenfor rekkevidden av injeksjonsskjermen indikerte flere gjennomgående sprekker på kryss av tunnelen. Derfor var det forventet at det skulle være betydelig mer forbindelse mellom hullene enn det som ble funnet.



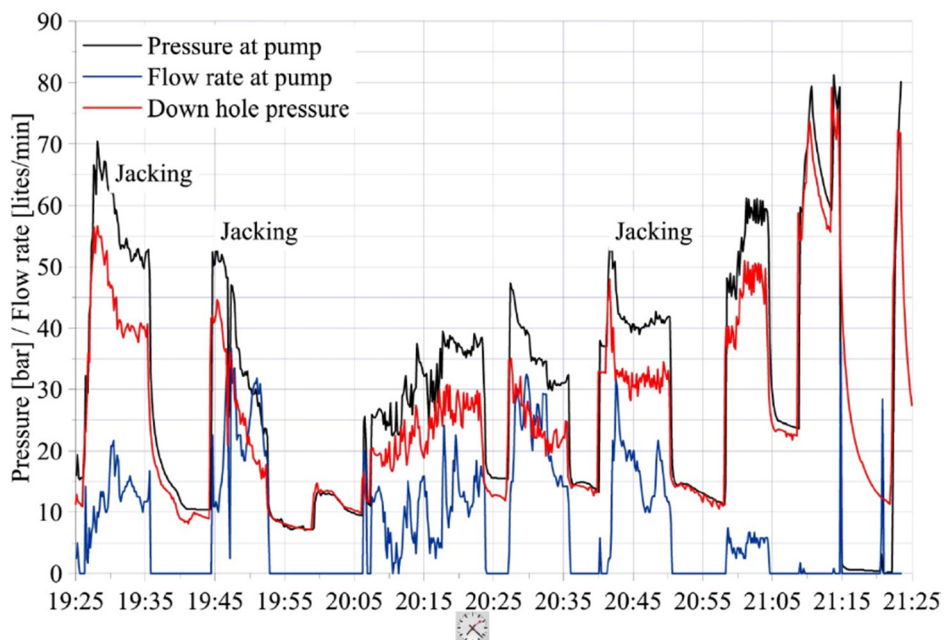
**Figur 59: Grafisk framstilling av trykk og strømning i injeksjonshull. Blå linje angir strømning, svart er trykket målt på injeksjonsriggen, rød angir trykket målt med logger i injeksjonshull. Trykkforbindelser mellom injeksjonshull er vist med piler.**

Ved tolkning av trykk og strømningsforholdet i hvert hull kan man identifisere hendelser som hydraulisk jekking. Trykktap ved konstant strømning, økning i strømning uten trykkøkning eller

trykktap ved økt strømming er tegn på at det kan ha oppstått hydraulisk jekking under injeksjon. Ved analyse av injeksjonsloggene fra denne feltundersøkelsen var det relativt få hendelser som indikerte hydraulisk jekking, selv om injeksjonstrykket var opptil 90 bar.

Figur 60 presenterer en trykk- og strømningsgraf som viser indikasjoner på hydraulisk jekking. Merk at operatørene gjerne stanser pumpa etter at jekking har funnet sted. Det fører til et trykkforløp som kan være sammenliknbart med kurven for lukketrykk "shut in pressure", som man får ved bergspenningsmålinger utført ved hydraulisk splitting. Ved injeksjon har man mange flere ukjente faktorer enn ved en kontrollert hydraulisk splitting for å finne minste hovedspenning i bergmassen:

1. Orienteringen av sprekken er ukjent.
2. Injeksjonsmassen er ikke-newtonsk, som påvirker hastigheten på trykkfallet.
3. Det kan være flere sprekker i børhullet. Selv om det bare er én sprekk som jekkes, kan trykktapet påvirkes av injeksjonsmasse som går til andre sprekker.



**Figur 60: Graf over trykk og strømningsforløp i et av injeksjonshullene som indikerer at det har oppstått hydraulisk jekking.**

Det er en interessant tanke at man kan benytte tolkning av injeksjonsdata til å gjøre en vurdering på bergmassens minste hovedspenning. For å kunne utføre en slik vurdering er man avhengig av kontinuerlig logging innenfor pakkere slik som i dette studiet, samt at man må kjøre studier med mulighet til utføre hydraulisk splitting i samme området som det blir utført hydraulisk jekking ved sementbasert injeksjon, for å vurdere korrelasjonen mellom disse typen målinger.

## 7.5 KONKLUSJONER

Konklusjonene er basert på en oppsummering av arbeidet som er utført i denne arbeidspakken:

- Grunnvannstrykket kan måles i injeksjonshull hvis man oppnår relativt tett stuff ved å lukke alle injeksjonsstavene.
- Det er lite/ubetydelig trykktap mellom injeksjonsriggen og injeksjonshullet.
- Det ble funnet relativt få hydrauliske forbindelser mellom injeksjonshullene, sammenliknet med hva som var forventet med hensyn til geologi.
- Når det er en hydraulisk forbindelse mellom injeksjonshull, kan det observeres ved å benytte trykklogging i injeksjonshullene.
- Ved å stoppe injeksjonen rett etter det har oppstått hydraulisk jekking kan tolkning av trykktapet målt i injeksjonshullet ha et potensial med hensyn til vurderinger av minste hovedspenning.
- Hydraulisk jekking av sprekker oppsto ved høye trykk, om man sammenliknet med bergspenninger beregnet ved bruk av overdekning. Her er det verdt å bemerke at overdekning som et verktøy til å bestemme *in situ* bergspenninger i Skandinavia ikke er realistisk, blant annet på grunn av høye horisontalspenninger. I ph.d.-arbeidet utført i TIGHT er det flere betraktninger rundt dette punktet (se publikasjonsoversikten i kapittel 1.2).

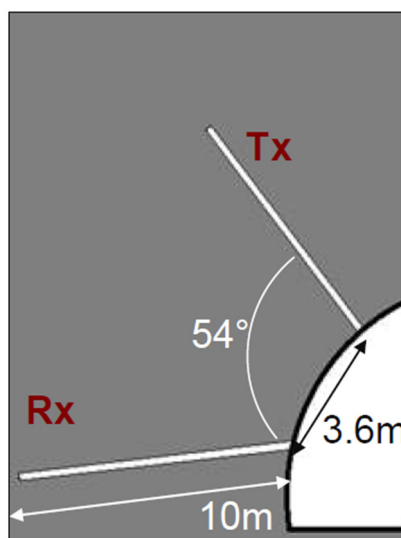
Arbeidet i denne arbeidspakken fokuserer på bruk av den informasjonen som er tilgjengelig under injeksjonsarbeidene. På en enkel og rimelig måte har man mulighet til å hente data som kan gi nyttig informasjon under selve injeksjonen, samt hente data til forskning. Måling av injeksjonstrykk i injeksjonshull under hydraulisk jekking kan ha potensial til å gi data som kan brukes til å gjøre vurderinger av bergspenninger, men for å komme dit må det utføres mer forskning på området.

## 8 ARBEIDSPAKKE 8 – MONITORING

Denne arbeidspakken har hatt som mål å måle injeksjonens utbredelse i berget. NGI, ved Yngve Kvistedal og Sara Bazin, har hatt ledelsen av arbeidspakken og de valgte å benytte Ground Penetration Radar (GPR) som målemetode. I dette tilfellet ble GPR brukt til å sende radiobølger gjennom bergmassen, der signalresponsen ble tolket og derav bergmassens elektriske konduktivitet. Siden hastigheten til signalet er bestemt av bakkens elektriske permeabilitet kan tidsserier med data konverteres til avstand. GPR er et godt, ikke-intrusivt, verktøy for å kartlegge grunnen, men penetrasjonen er sterkt avhengig av bølgelengden og materialets elektriske konduktivitet. I leire og vannmettet jord kan penetrasjonen være på centimeter. I materiale med mindre elektrisk konduktivitet kan penetrasjonen være flere titalls meter.

### 8.1 FORSØKSOPPSETT

Målet med feltforsøket var å finne om det er mulig å identifisere enkeltsprekker med og uten injeksjonsmasse. Ved Åsland (Follobanen) ble forsøket utført ved å bore 2 hull radielt inn i tunnelveggen i en tunnel hvor det hadde vært utført systematisk forinjeksjon. Forsøket ble utført med spesialkonstruerte antenner. Figur 61 viser antennenenes posisjon i tunnelprofilen, der Tx er senderantenne og Rx er mottakerantenne.



*Figur 61: Modelloppsett av GPR i tunnel, med senderantenne (Tx) og mottakerantenne (Rx)*

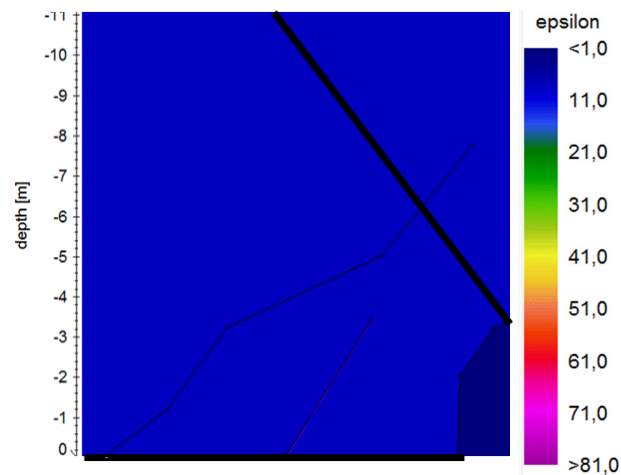
Forsøket ble utført ved å sende signaler fra senderantennen. Signalene ble registrert i mottakerantennen. I senderhullet ble det sendt signaler fra flere posisjoner med 0,25 meters intervaller. Hvert signal ble registrert på flere steder i mottakerhullet, også her med 0,25 meters intervaller. Dette ga til sammen  $41 * 41 = 1\ 681$  datainnsamlingspunkter for forsøket.

### 8.2 SYNTETISKE DATA

Ved tolkning av datasettene ble det benyttet syntetisk data. Syntetisk data hermer etter virkelige data, ved å bruke maskinlæring for å hente ut de statistiske egenskapene. Bruk av syntetiske data er en god måte å visualisere hvordan en vannfylt eller sementfylt sprekke vil kunne se ut når virkelige data

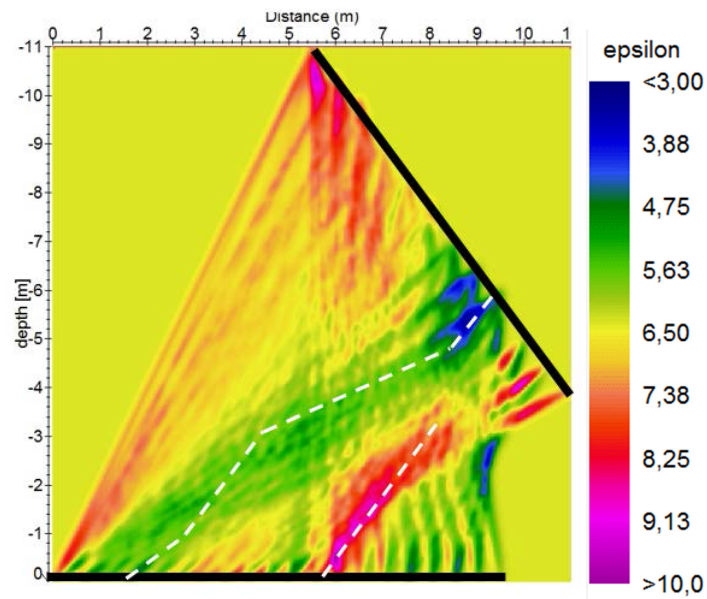
skal tolkes. Dimensjonen til bergsprekker er en utfordring, som ved numerisk modellering. En bergsprekk kan ha en åpning mindre enn 1 mm og kan være flere meter (titalls meter) i utstrekning. GPR har vanligvis en oppløsning i cm-skala. Orienteringen til en sprekk vil derfor være viktig for om den kan oppdages.

I den syntetiske modellen vist i Figur 62 er berget gitt en dielektrisk konstant lik 9 og tunnelen lik 1 (luft). Den lange sprekken er injisert og den dielektriske konstanten er satt til 3. Den korte sprekken er vannfylt med dielektrisk konstant lik 81.



**Figur 62: Syntetisk modell**

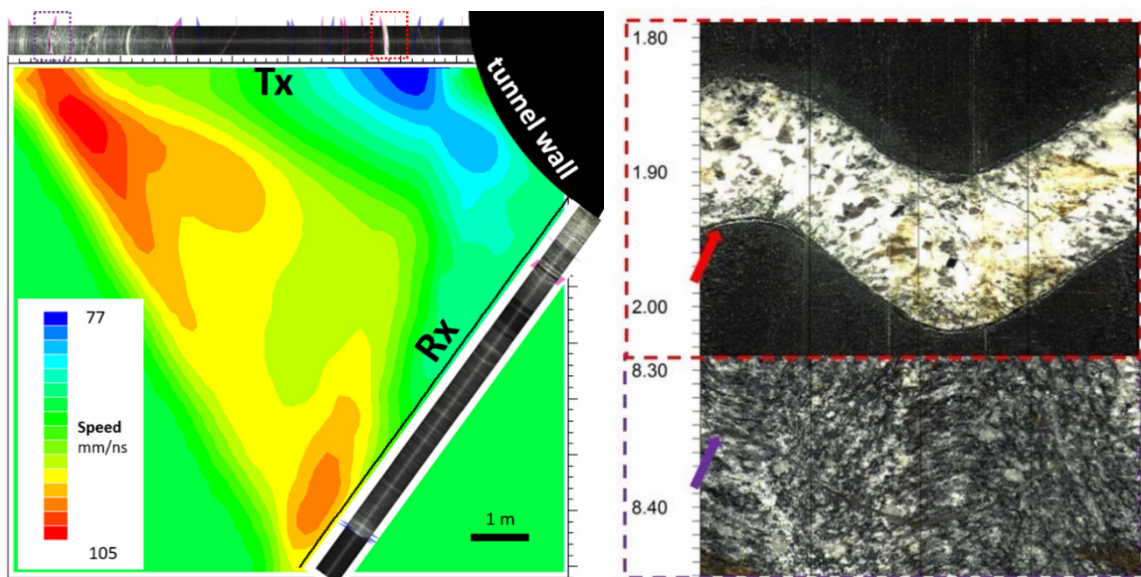
Fra denne modellen kan syntetiske returtider beregnes, som videre benyttes til å konstruere et tomogram over invertert dielektrisk konstant, se Figur 63. Figuren viser hvor de syntetiske sprekkene ligger.



**Figur 63: Resultat syntetisk modell**

### 8.3 FELTFORSØK

Tomogrammet produsert fra forsøksdataene er vist i Figur 64.



**Figur 64: Resultat fra feltforsøk. Til venstre tomografi og til høyre bilder fra OTV**

Testhullene ble undersøkt med Optisk Televiewer (OTV). Bildene fra OTV med tolkede sprekker er lagt over bildet av tomografien for sammenlikning.

Resultatene fra forsøket estimerer en EM bølgehastighet på mellom 77 og 105 mm/ns. Gjennomsnittshastigheten er på 89,6 mm/ns. Det korresponderer med en dielektrisk konstant på 11,2. Dette stemmer godt overens med verdier som eksisterer for norsk gneis. Konseptuelt vil hastigheten øke i sprekker fylt med sement, mens den vil synke i vannfylte sprekker. Bildene til høyre i Figur 64 viser et



utdrag fra bilder tatt med OTV. Øverst vises en vannfylt sprekk nær tunnelveggen og nederst vises en sprekk fylt med sement som ligger lengre inn i hullet. Posisjonene til disse utdragene kan ses i tomografibildet. De identifiserte sprekke og deres fylling stemmer godt overens med resultatene fra tomografien.

## **8.4 KONKLUSJON**

Resultatene fra forsøket indikerer at GPR i borehull kan brukes til å vurdere injiserte og vannførende sprekker fra EM-hastighetsdistribusjonen.

Det er en utfordring å vurdere spredning av sement under injeksjon av bergmasse fordi det per i dag ikke fins gode verktøy for å kartlegge den faktiske beliggenheten av sprekker, sprekkorienteringer eller størrelsen på sprekkeåpninger. Derfor er det vanskelig å forutsi hvordan sementen brer seg ved forinjeksjon av bergmasse. GPR er et interessant verktøy for kartlegging av sementens spredning, og det hadde vært interessant å utføre flere tester ved bruk av GPR for å utforske potensialet.

## 9 PH.D.

---

### 9.1 INTRODUKSJON

Ph.d.-arbeidet i TIGHT ble ikke utført direkte under noen av arbeidspakkene i prosjektet. Det var et samarbeid med relevante arbeidspakker, der forskningsresultatene og arbeidsprosessene var til stor nytte for forskningen som ble utført av ph.d.-kandidaten.

Hovedformålet med ph.d.-arbeidet var å opparbeide en grunnleggende forståelse av injeksjonsarbeidet som utføres i dagens praksis, samt å vurdere om dette er i tråd med ønsket resultat, samtidig som miljø og prosjektøkonomi er ivaretatt på best mulig måte. En del av arbeidet besto også av å lokalisere områder for forbedring av dagens praksis.

Forskningen ble utført ved å dokumentere dagens praksis, analysere data fra utført berginjeksjon i norske tunnelprosjekter, samt en praktisk feltstudie der det ble utført tester av injisert bergmasse. Resultatene ble sammenstilt med forskningsfunn fra TIGHT og internasjonale publikasjoner.

### 9.2 SAMMENDRAG AV UTFØRT FORSKNING

I ph.d.-studiet er det hovedsakelig benyttet to metoder for å undersøke og dokumentere forinjeksjon av bergmasse:

1. Analyse av data fra injeksjonsprosessen: Her ble samspillet mellom trykk og strømningsrate under injeksjon studert. Det ble utviklet en algoritme for å identifisere hydraulisk jekking i injeksjonslogger, som videre ble brukt til å gjøre en større analyse av injeksjonsdata. Dette arbeidet resulterte i to publikasjoner.
2. Feltstudie med vurdering av bergmasse i tunnel hvor det hadde vært utført systematisk forinjeksjon. Her ble det foretatt ni kjerneboringer med 10 meters dybde fra tunnelprofilen. Det ble utført kjernelogging, Optisk televiwer (OTV) og vanntapsmålinger. Dette arbeidet resulterte i én publikasjon.

### 9.3 UTVIKLING AV METODE FOR Å TOLKE HYDRAULISK JEKING I INJEKSJONSLOGGER

Under ph.d.-studiet ble det utviklet en metode for å tolke hydraulisk jekking som forekommer under sementbasert forinjeksjon i bergmasse. Utvikling av denne metoden er et resultat av følgende forskningsarbeid:

- Feltarbeid i samarbeid med arbeidspakke 7
- Litteraturstudie
- Numerisk modellering og simulering
- Studie av injeksjonslogger fra utført injeksjon i 7 norske tunnelprosjekter

Det ble utformet en algoritme for tolkning av hydraulisk jekking til bruk for analyse av injeksjonslogger. Algoritmen ble et verktøy for å samle relevante data fra injeksjonslogger med hensyn til hydraulisk jekking. Under arbeidet ble det også utformet en indeks, kalt PF-indeksen, som ble et viktig verktøy for å forenkle tolkningen av samvirket mellom injeksjonstrykket og strømningsforløpet under injeksjonen. PF-indeksen viste seg også å ha en god funksjon med tanke på oppfølgingen av injeksjonsforløpet og

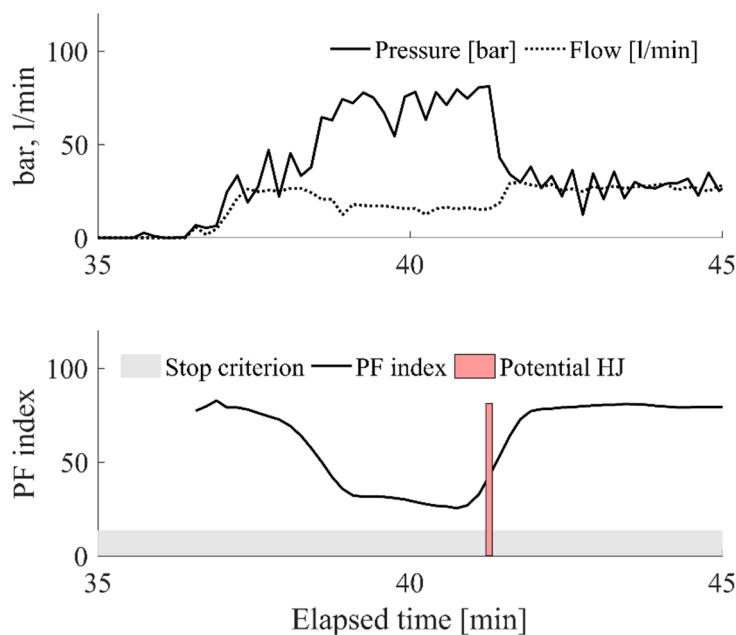
kan fungere som et enkelt stopkriterium i prosjekter hvor stopkriteriet er basert på trykk og strømning, slik som i mange norske tunnelprosjekter.

Følgende formel benyttes for å beregne PF-indeksen:

$$PF = 0,9 \text{ min/l} \cdot Q - \frac{0,9 \cdot P}{1 \text{ bar}} + 81$$

der  $Q$  er strømningsrate gitt i l/min og  $P$  er injeksjonstrykket gitt i bar.

Øverste graf i Figur 65 viser injeksjonstrykk og strømningsrate under injeksjon av et hull der det plutselig oppstår trykktap og økt strømning, som er en god indikasjon på at det har oppstått hydraulisk jekking. Den nederste grafen viser PF-indeksens korresponderende forløp, og man kan legge merke til at under trykkoppbygningen synker verdien, men når motstanden forsvinner, stiger den. I dette eksemplet er stuttrykket angitt å være 80 bar ved en strømningsrate på 5 l/min eller lavere. I prinsippet skal PF-indeksen nå fram til det grå feltet for at injeksjonen kan avsluttes, men på grunn av hydraulisk jekking øker PF-indeksen dramatisk. Denne visualiseringen gir et klart og tydelig signal på at man har havnet i en situasjon der man har mistet motstanden og at injeksjonsmassen forsvinner ut av systemet, hovedsakelig via bare én sprekk, i stedet for at injeksjonsmassen fordeles på alle tilgjengelige sprekker som ligger tett til tunnelprofilet. I et slikt tilfelle bør injeksjonen avbrytes og startes på nytt etter en kort pause. Da bygges injeksjonstrykket opp på nytt og jobben med å injisere lokalt kan fortsette. Trykket bør deretter holdes like under det trykket hendelsen oppsto ved. Ved å justere injeksjonsprosedyren etter at det har oppstått hydraulisk jekking spares det tid og injeksjonsmasse, samt at man oppnår en bedre spredning av injeksjonsmassen lokalt. Risikoen for spredning av injeksjonsmasse til overflaten minimeres også.



**Figur 65:** Grafen øverst viser trykk og strømningsforløp ved injeksjon av et hull. Grafen nederst viser korresponderende PF-indeks, der hydraulisk jekking er markert i rødt og det grå området markerer stopkriteriet, tilsvarende 80 bar med 5 l/min eller mindre strømning.

## 9.4 STUDIE AV SEMENTFORBRUK I RELASJON TIL TYPE INJEKSJONSMASSE OG HYDRAULISK JEKKING

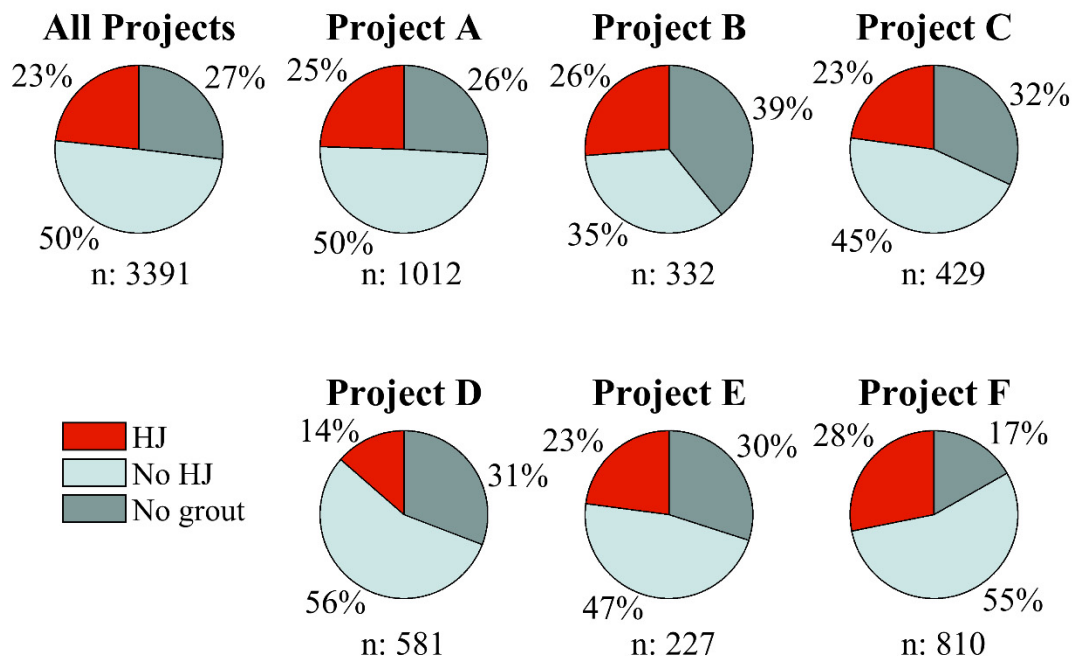
Algoritmen som ble utviklet, ble videre brukt til screening og tolkning av 3 391 injeksjonshull hentet fra 91 injeksjonsskjermer utført i 6 norske tunneler. Herav var 65 injeksjonsskjermer industrisement (OPC) og 26 skjermmer mikrosegment (MFC). Tabell 36 gir en enkel oversikt over datagrunnlaget For ytterligere informasjon, se Strømsvik (2019a).

Tabell 36: Oversikt over datagrunnlaget for studiet

Tunnel	Skjermer	Hull	Sement
A	31	1 012	OPC
B	8	332	MFC
C	12	429	9 MFC 3 OPC
D	16	581	8 MFC 8 OPC
E	6	227	1 MFC 5 OPC
F	18	810	OPC

### 9.4.1 Resultater og diskusjon av dataanalyse fra injeksjonsprosessen

Figur 66 gir en oversikt over prosentandel injeksjonshull med indikasjoner på at det har oppstått hydraulisk jekking. Her kan man se at hydraulisk jekking under forinjeksjon av bergmasse er en vanlig hendelse i Norge.

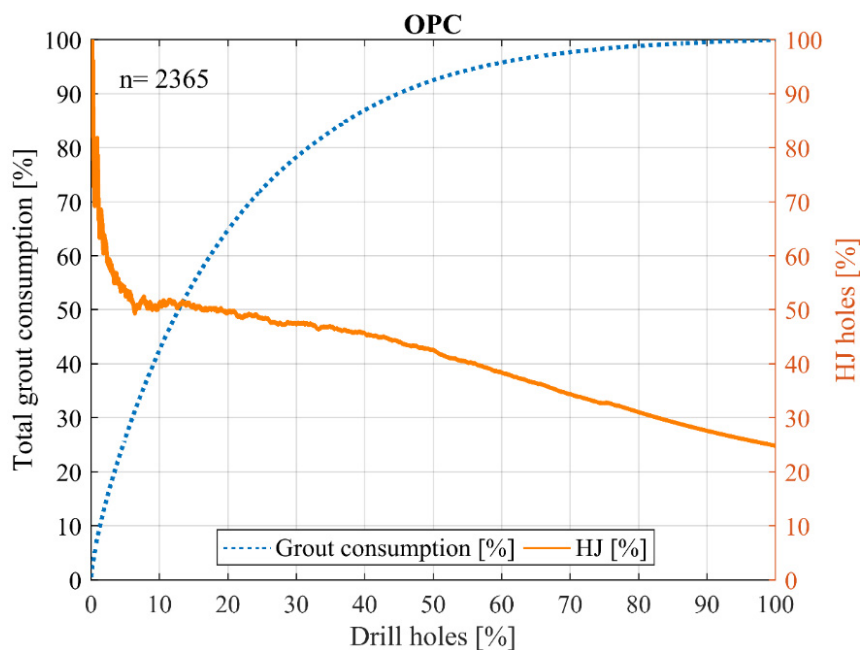


Figur 66: Prosentandel borhull hvor det er indikasjoner på hydraulisk jekking (rød) og hull hvor sementmengden er mindre eller lik volumet på borhullet (mørkegrå)

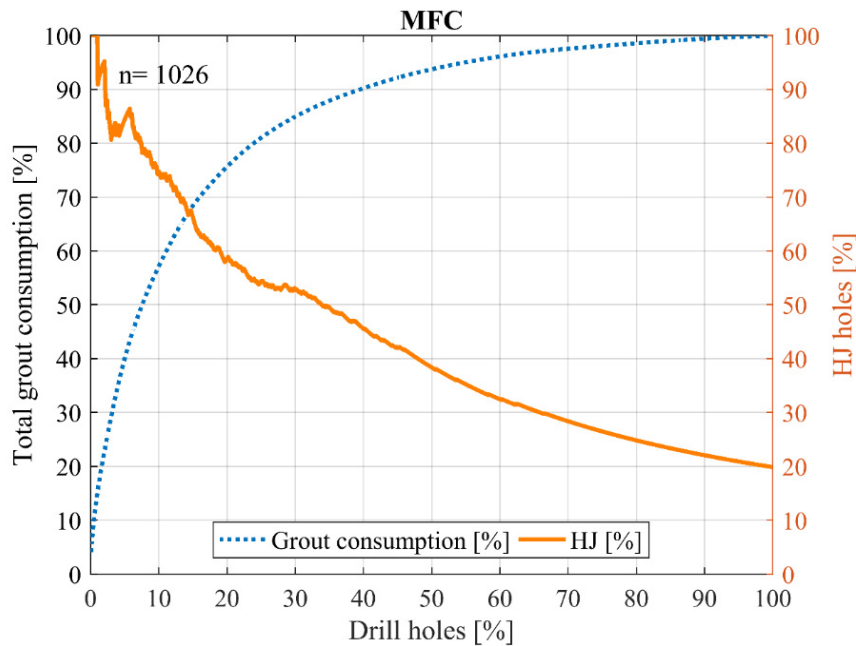
Hydraulisk jekking av sprekker er antatt å gi en betydelig økning i sementforbruk. I dette studiet er det derfor fokusert på forbruk av sement i relasjon til hydraulisk jekking. Figur 67 viser en sortering av 2365 borhull injisert med industrisement, der hullene er rangert i forhold til mengde. Hullene med størst mengdeforbruk er plassert til venstre, med avtakende mengde mot høyre. Blå graf viser akkumulert mengde i prosent av totalt medgått mengde. Den oransje grafen viser andelen av hullene hvor det er indikasjoner på hydraulisk jekking. Ved utvalg av de 10 % av hullene med høyest sementforbruk er det funnet indikasjoner på hydraulisk jekking i 50 % av hullene, som indikerer at høyt forbruk er relatert til hydraulisk jekking.

Figur 68 viser en tilsvarende sortering over 1 026 borhull injisert med mikrosement. Ved utvalg av de 10 % av hullene med høyest sementforbruk er det funnet indikasjoner på hydraulisk jekking i 75 % av hullene, noe som gir enda sterkere indikasjon på at høyt forbruk er relatert til hydraulisk jekking.

Disse grafene viser også at ved bruk av mikrosement er det en mindre andel av hullene som står for høyt forbruk enn ved bruk av industrisement. Grafene viser også at det generelt sett er mindre hydraulisk jekking ved bruk av mikrosement (19 %) enn industrisement (24 %), men at det i hullene med høyt forbruk av mikrosement er betydelig høyere frekvens av jekking. Det betyr at hydraulisk jekking ved bruk av mikrosement gir høy sannsynlighet for stort sementforbruk.



**Figur 67: Graf som viser sementforbruk ved bruk av OPC i relasjon med hydraulisk jekking, der de hullene med høyest sementforbruk er sortert til venstre, gradvis avtakende mot høyre**



**Figur 68:** Graf som viser sementforbruk ved bruk av MFC i relasjon med hydraulisk jekking, der de hullene med høyest sementforbruk er sortert til venstre, gradvis avtakende mot høyre

Tabell 37 gir en oversikt over medianverdiene for resultatene, der mikrosement er sammenliknet med industrisement. Her ser vi at generelt sett er forbruket av industrisement 50 % høyere enn forbruket av mikrosement. Dette resultatet er uavhengig av hydraulisk jekking eller ikke. Som også indikert i Figur 67 og Figur 68 viser resultatene her at det generelt sett er mindre hydraulisk jekking, men når det er hydraulisk jekking, er det svært mye høyere forbruk.

Tabell 37 viser også at det er større tidsforbruk i hull der det er indikasjoner på hydraulisk jekking. På mikrosement øker tidsforbruket mer enn volumet, mens for industrisement øker volumet mer enn tidsforbruket, som indikerer at strømningsraten er høyere i hull hvor det er indikasjoner på hydraulisk jekking ved bruk av mikrosement.

Ut fra disse resultatene er det vanskelig å avdekke den detaljerte sammensetningen av årsaks-sammenhenger mellom høyt forbruk av injeksjonsmasse og hydraulisk jekking. På den ene siden er det åpenbart at sementforbruket øker når man har dilatert sprekkåpningen ved hydraulisk jekking. På den andre siden er det større sannsynlighet for at det oppstår hydraulisk jekking i store sprekker som injeksjonsmassen lett trenger inn i. Økningen i av sementforbruket på grunn av hydraulisk jekking skjer derfor ofte i de sprekke som allerede er et høyere forbruk i. En medvirkende årsak til høyere forbruk av sement i hull hvor det har oppstått hydraulisk jekking er derfor også relatert til sprekkes karakter i utgangspunktet. Derfor bør det utføres flere studier for å få en bedre forståelse av hvordan hydraulisk jekking påvirker forbruk av injeksjonsmasse.

**Tabell 37: Medianverdier for sammenlikning av sement og tidsforbruk for OPC og MFC**

	<b>Median OPC</b>	<b>Median MFC</b>
Grout consumption per round	26 000 litres	13 000 litres
Holes with no grout take	21%	35%
HJ holes	24%	19%
Grout consumption per metre of drill hole, no HJ	29 l/m	17 l/m
Grout consumption per metre of drill hole, with HJ	52 l/m	41 l/m
Time usage per metre of drill hole, no HJ	3.4 min	2.1 min
Time usage per metre of drill hole, with HJ	6.4 min	4.7 min
Increase in grout consumption per round in HJ holes	68%	115%
Increase in time per round, in holes where HJ is detected	79%	90%

På grunn av store forskjeller mellom mikrosegment og industrisement ble det foretatt en vurdering av injeksjonsforløpet for de to sementtypene. Ved analyse av injeksjonsloggene ble det observert at trykkoppbygningen i mikrosegment skjedde raskere. Det medfører at ønsket sluttrykk blir nådd raskere, som resulterer i reduksjon i forbruk av både tid og mengde sement.

Spørsmålet blir derfor: Hvorfor er det høyere motstand/trykkoppbygning ved injeksjon av mikrosegment? Laboratorietester av injeksjonssegment presentert av Håkansson, Hässler & Stille (1992) viser at det er en betydelig endring i flyteegenskapene relatert til kornstørrelsen av partiklene i en sementbasert injeksjonsmasse. Ettersom den spesifikke overflaten på partiklene i sementen øker, øker også både skjærstyrke og viskositet til injeksjonsmassen. Resultatene fra arbeidspakke 3 i TIGHT-prosjektet viser også at ved de utførte laboratorietestene starter herdeprosessen i enkelte typer mikrosegment allerede 30 minutter etter blanding. Denne prosessen er også med på å øke både skjærstyrken og viskositeten til mikrosegment ytterligere.

Sementmassens skjærstyrke og viskositet er de viktigste faktorene når det gjelder trykkoppbygning under injeksjon. Som beskrevet i arbeidspakke 4, kapittel 4.3.1, er det de viskøse kreftene som dominerer når det kommer til trykktap i sprekker, spesielt i sprekker med sprekkeåpning under 1,5 mm. Det betyr at det ofte er de viskøse kreftene i injeksjonsmassen som er dominerende ved økt motstand ved injeksjon.

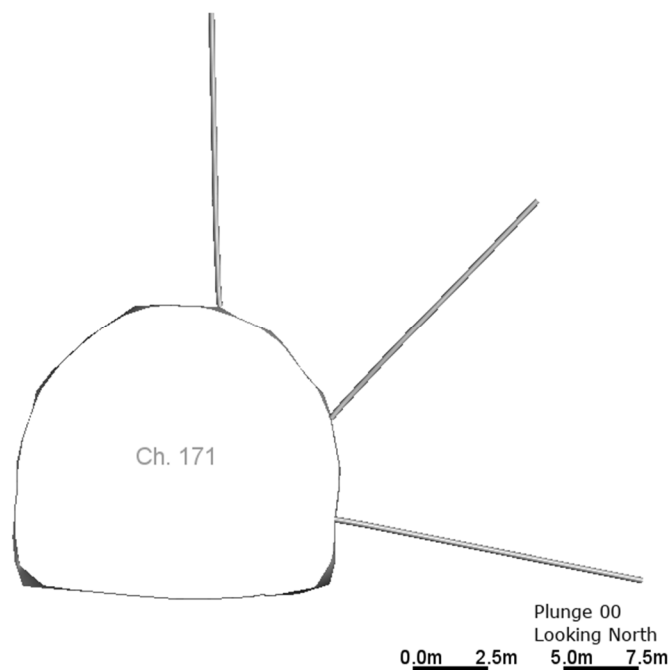
Laboratorietester presentert av Draganović & Stille (2011) viser at finkornede sementer med  $D_{95}$  på 12  $\mu\text{m}$  og 16  $\mu\text{m}$  kan ha dårligere penetrabilitet enn mer grovkornet sementblanding med  $D_{95}$  på 32  $\mu\text{m}$ . Stille (2015) presenterer en tabell som indikerer tilsvarende resultater, samt at funnene ved testing av penetrabilitet i arbeidspakke 3 i TIGHT-prosjektet viser samme trend for en av de finkornede sementene testet der. Det kan gi en forklaring på hvorfor antall hull som ikke tar sement ved bruk av mikrosegment (35 %), er høyere enn ved bruk av industrisement (21 %).

I studiet ble det også sett på sementforbruk i forhold til geologiske parametere. Fordi grunnlagsdataene ikke var egnet til formålet ble det ingen signifikante resultater fra denne delen av studiet. Resultatene er presenter i detalj i Strømsvik (2019a).

Dataene ble også benyttet for å evaluere om det er mulig å definere trykket for hvor det er risiko for at det oppstår hydraulisk jekking. I studiet ble det totalt anslått å være 780 hull med et trykk og strømningsforløp som indikerte hydraulisk jekking. Estimater ble brukt videre i denne delen av studiet. Her ble trykket ved hydraulisk jekking sammenliknet med overdekning og volum injisert masse, for så å sammenlikne med det som kalles "rule of thumb" relatert til overdekningen og GIN-metoden (Grout Intensity Number). Det ble ikke funnet noen korrelasjoner her. Resultatene er presentert i detalj i Strømsvik (2019b).

## 9.5 FELTSTUDIE AV FORINJISERT TUNNEL

Under ph.d.-arbeidet ble det gjennomført en feltstudie. Feltarbeidet ble utført på Åsland, der det er et nettverk av tunneler drevet ved boring og sprenging i forbindelse med Follobanen-prosjektet. Bane NOR stilte med tre områder hvor de tilrettela for arbeid og dekket kostnadene for kjerneboring, OTV og vanntapsmålinger. I hvert område ble det boret tre kjernehull med 10 meters dybde, hvor undersøkelsene ble utført. Se Figur 69.



**Figur 69: Illustrasjon av forsøksoppsett med kjerneboring av injisert bergmasse i tunnel. Kilde: Strømsvik & Gammelsæter (2020)**

Resultatene fra studiet er publisert i Strømsvik & Gammelsæter (2020).



Som en oppsummering av studiet kan følgende konklusjoner presenteres:

- Injeksjonsmassens penetrasjon av sprekker i bergmassen var mindre enn forventet ut fra laboratorietester på denne typen sement. Det ble funnet sement i 20 % av de dokumenterte sprekkeene, og ingen av disse sprekkeene hadde under 1 mm i sprekkeåpning.
- Det ble funnet at hydraulisk transmissivitet for vann var høyere i grovkornede bergarter som granittisk gneis enn i finkornede bergarter som amfibolitt og suprakrustal gneis.
- Hydraulisk jekking under injeksjon kan ha bidratt til unødvendig stort forbruk av sement i ett av områdene som var undersøkt i dette studiet.

Generelt ble det konkludert med at sementforbruket i ett av testområdene var unødvendig stort. For å kunne ta kvalifiserte beslutninger om når man bør avslutte injeksjonen og dermed unngå overforbruk under forinjeksjon av tunnel, er det viktig vurdere sprekkenes karakter og orientering fortløpende.

## 9.6 RESULTATER I SAMMENHENG MED DAGENS UTFØRELSE AV INJEKSJON

I ph.d.-avhandlingen handler et av kapitlene om hvordan resultatene fra den utførte forskningen kan relateres til dagens praktiske injeksjonsarbeid. Kapitlet er i korte trekk gjengitt nedenfor.

Det ble konkludert med at dagens praksis med høytrykksinjeksjon under normale grunnforhold er en god metode med tanke på reduksjon av innlekkasje i tunneler. En vellykket injeksjon bør ikke bare bedømmes med hensyn til oppnådd reduksjon av innlekkasje: Faktorer som økonomi og miljø bør også inkluderes. Funnene fra ph.d.-studiet indikerer at sementforbruket i mange tilfeller er unødvendig høyt og bør evalueres. Mye av overforbruket ser ut til å være knyttet til injeksjonsforløpet etter at det har oppstått hydraulisk jekking.

I det praktiske injeksjonsmiljøet er det delte meninger om hvorvidt hydraulisk jekking er en positiv eller negativ hendelse ved forinjeksjon av bergmasse. Ved tunneldriving under normale forhold er hydraulisk jekking som regel en negativ hendelse fordi:

- Ved injeksjon av et hull hvor det har oppstått hydraulisk jekking, ledes injeksjonsmassen hovedsakelig inn i den sprekken som har blitt utsatt for hydraulisk jekking. Trykktapet i systemet fører til betydelig dårligere injeksjon av de andre sprekkeene som er i kontakt med dette injeksjonshullet. Det er alltid bare én sprekke som jekkes av gangen.
- Man forbruker unødvendig mye sement på grunn av økt transmissivitet i en sprekke, som leder mye av massen bort fra det området man ønsker å injisere.
- Økningen i sprekkeåpningen i en sprekke kan gå på bekostning av andre sprekker, som derav blir vanskeligere å injisere.

Hydraulisk jekking av sprekker under forinjeksjon beskrives som å "poppe ballongen". Man mister mottrykket, som er grunnlaget for å ivareta injeksjon av alle injiserbare sprekker rundt tunnelprofilen, mens massen stikker av via en sprekke. Om pumpekapasiteten er stor nok til å holde sprekken jekket, kan injeksjonen foregå over en svært lang tidsperiode, og injeksjonsmassen spres bort fra området hvor den egentlig var tilsiktet.

I områder der grunnforhold gjør det vanskelig å utføre injeksjon, for eksempel på grunn av mye sprekkfylling, kan hydraulisk jekking ha positiv effekt på injeksjonsresultatet.

Per dags dato fins det ingen gode verktøy for å forutsi under hvilke forhold og trykk hydraulisk jekking oppstår. Skal det utføres effektiv høytrykksinjeksjon, må man akseptere at det forekommer tilfeller av hydraulisk jekking. *Man bør derfor flytte fokuset på hvordan man håndterer hendelser som hydraulisk jekking.* I kapittel 9.3 er det en kort beskrivelse av hvordan injeksjonsprosedyren kan justeres. En mer fullstendig beskrivelse fins i ph.d.-avhandlingen (Strømsvik, 2019b).

Den største utfordringen under dette studiet var lav samplingsrate på loggingen av strømningshastighet, injeksjonstrykk og medgått mengde på injeksjonsriggene. På det beste var samplingsraten hvert 10. sekund, men i mange logger var det lengre tidsintervaller, i tillegg til at tidsintervallet ikke var konstant. For å kunne utføre gode analyser under forinjeksjon i tunnel bør datainnhentingene forbedres betraktelig.

## 10 SAMMENDRAG AV MASTEROPPGAVER

---

I dette kapitlet presenteres sammendragene hentet fra de seks MSc-oppgavene skrevet i forbindelse med TIGHT-prosjektet.

### 10.1 HYDRAULISK JEKING VED HØYTRYKKSINJEKSJON AV BERG

Av Stine Merete Hvoslef Moe (2016)

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

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

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

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

## **10.2 INJEKSJON PÅ BODØ-TUNNELEN – ANALYSE AV ELEKTRONISK INJEKSJONSDATA**

Av Sølve Utstøl Pettersen (2016)

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

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

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

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

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

## **10.3 ANALYSE AV PUMPEDATA SOM VERKTØY FOR OPPFØLGING AV INJEKSJONS-ARBEIDER**

Av Eivind Sundset Moe (2018)

I forbindelse med driving av tunneler og bergrom i Norge er det i mange tilfeller en utfordring å håndtere vannlekkasje inn til anlegget. Det er ofte vanskelig å forutse omfanget av innlekkasjene da de avhenger av en del parametere det er vanskelig å ha fullstendig kontroll på, for eksempel spenningsforhold, sprekketetthet, sprekk-karakter og lokalisering av svakhetssoner. Avhengig av

anleggets bruk og det omkringliggende områdes sensitivitet bestemmes det tetthetskrav for anlegget før driving. I Norge er forinjeksjon med sement og høyt trykk den vanligste metoden for å oppnå tilstrekkelig tetthet.

Sementbasert forinjeksjon i Norge er utviklet gjennom mange år med erfaringer. Men det er fortsatt vanskelig å forutse tids- og masseforbruket til injeksjonsarbeidene ved en tunnel. Denne uforutsigbarheten gjør det vanskelig å planlegge videre driving, i tillegg til at det er utfordrende å forutse kostnadene til injeksjon. Målet med denne oppgaven er å vise hvordan pumpedata kan benyttes som verktøy til å følge opp injeksjonsarbeider.

Pumpedata fra Eysturøyar-tunnelen på Færøyene ble brukt til å analysere tids- og masseforbruket av de utførte injeksjonsarbeidene. I tillegg er det framstilt grafer som viser trykkutviklingen og sementstrømningen for injeksjonsforløp. Ved å benytte tids- og masseanalysen sammen med grafene av injeksjonsforløp er "problemhull" med stort forbruk og lang injeksjonstid uten tilfredsstillende utvikling filtrert ut. Som et grep for å kutte ned på tids- og masseforbruket for disse hullene er det utført beregninger for bruk av kombinasjonsinjeksjon. Beregningene viser at det er store mulige innsparinger å oppnå i tids- og masseforbruket.

Arbeidet med injeksjonsforløpene førte til framstilling av en ny prosedyre som kan benyttes mens injeksjonen foregår, og som kan brukes sammen med kombinasjonsinjeksjon til å kutte tids- og masseforbruket. Den nye prosedyren ble benyttet på data fra både Eysturøyar-tunnelen på Færøyene og Lyshorn-tunnelen like sør for Bergen. Dette er to prosjekter drevet i helt ulik geologi. Bruken av den nye prosedyren og beregninger for bruk av kombinasjonsinjeksjon viser at man potensielt kunne spart omtrent 80 tonn sement og nesten 70 timer injeksjonstid ved å følge prosedyren.

#### **10.4 UNDERSØKELSE AV FENOMENET HYDRAULISK JEKING SOM FØLGE AV SEMENT-BASERT FORINJEKSJON I SVARTÅS-TUNNELEN, VESTGÅENDE LØP PÅ E134 VED KONGSBERG, BUSKERUD**

Av Sondre Wenaas (2018)

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

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

Fra 20 skjermer er det tolket at hydraulisk jekking har forekommet i de omkringliggende sprekkene rundt 273 av 809 injeksjonshull. Hendelsene med hydraulisk jekking er tolket visuelt basert på trykk/flyt-grafene og QP-indeksen (trykk/flyt-indeks) fra injeksjonsforløpene. I oppgaven er det vist at hydraulisk jekking fører til økt masse- og tidsforbruk. Ved en økning i 10 % jekkede hull per skjerm øker injisert volum med 10 000 l og injeksjonstiden øker med 5 t og 40 min. For skjermene hvor det er brukt et injeksjonstrykk fra 50 til 70 bar, er det en sammenheng mellom bergoverdekning og hydraulisk jekking. Ved en økning i bergoverdekningen på 10 m reduseres prosent jekkede hull per skjerm med 9 %. Likevel: Hvis bergoverdekning er ca. 10 m større for hullene i sålen sammenliknet med hullene i hengen, er det større sannsynlighet for hydraulisk jekking i hullene i sålen enn i hullene i hengen.

Teoretisk sett kan spredningslengden til injeksjonsmassen brukes som stoppkriterium, og RTGC-metoden (Real Time Grouting Control) er utviklet for å estimere spredningslengden til injeksjonsmassen. Dersom spredningslengden hadde blitt brukt som stoppkriterium, ville det i kun 2 injeksjonshull blitt injisert 490 l mindre injeksjonsmasse, og injeksjonstiden ville blitt redusert med 47 min. En slik besparelse ville redusert de totale kostnadene. Det er flere feilkilder som gjør at den faktiske spredningslengden kan være kortere enn antatt. Ved en for kort spredningslengde er det mulig at bergmassen ikke blir tilstrekkelig tett. For å få en tilstrekkelig tett bergmasse vil kostnadene øke.

## **10.5 MODELLBASERT BERGINJEKSJON – UTFORSKNING, VURDERING OG BRUK AV MODELLER FOR BERGINJEKSJON**

Av Martin Hovda Haugsand (2018)

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 sammenliknet 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 elastisk materiale. Trykkdata på forbundne 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 forbundne hull er avhengig av strømning og jekking.

## **10.6 ANALYSE AV INJEKSJONSTESTDATA, LYSHORN-TUNNELEN, E 39, SVEGATJØRN-RÅDAL**

Av Ida Skjæraasen (2019)

Forskningsprosjektet "TIGHT – True Improvement in Grouting High Pressure Technology" ble opprettet med et mål om å øke forståelsen av hvordan berget påvirkes av ulike injeksjonsparametere, med særlig fokus på bergets respons på høye injeksjonstrykk. I forbindelse med forskningsprosjektet utviklet NGI et målesystem som gjorde det mulig å måle trykket på innsiden av injeksjonshull. Ved å instrumentere flere injeksjonshull i en skjerm med det utviklede målesystemet var det mulig å observere trykkvariasjonene som oppsto i de instrumenterte hullene i løpet av en injeksjonsrunde. Oppgaven tar for seg innsamlede data fra en injeksjonstest med det utviklede målesystemet der det ble injisert vann i de instrumenterte hullene i forkant av injeksjonsrunden. Gjennom visuell vurdering

av trykk målt inne i injeksjonshull og sammenlikning med trykk og strømning målt på injeksjonsriggen ble det gjort en undersøkelse av trykktap gjennom utstyr, hullforbindelser, trykkfordelingen i berget og forskjeller og ulikheter ved injeksjon av vann og sement.

Det ble observert at for injeksjon av sementmasser, stemte trykket målt på rigg godt overens med trykket målt inne i injeksjonshullet. For injeksjon av vann ble det observert merkbare trykktap for flere hull. Det ble konkludert at utstyret var egnet for sementinjeksjon, men diameterforskjellen mellom injeksjonsutstyret og injeksjonshullet gjorde utstyret uegnet for vanntapsmålingene. Vanntapsmålingene ble utført med testlengde lik borhullets lengde, og grunnet de geologiske forholdene ved testområdet ble det bedømt at denne testlengden var for stor. Kombinasjonen av uegnet utstyr og testlengde gjorde at vanntapsmålingene ikke kunne brukes for vurdering av vanntap som injeksjonsprediksjon.

Det ble identifisert langt flere trykkforbindelser under injeksjon av vann enn av sement. Det tydet på at de tilgjengelige strømningsveiene var mer begrenset for den valgte sementmassen sammenliknet med vann. Observasjon av tilsynelatende jekking ved injeksjon av både vann og sement i samme hull, der tilsynelatende jekketrykk var langt lavere for injeksjon av vann, tydet på det samme. Fra de identifiserte hullforbindelsene under injeksjon av vann ble det observert store variasjoner i trykktapet med gjennomsnittlig avstand mellom hullene i forbindelsen. De observerte forskjellene i trykktapet ble forklart med at det var forskjeller i strømningsdimensjonalitet langs forbindelsene.

Kun én vedvarende hullforbindelse ble identifisert under injeksjonsrunden med mikrosegment. Utviklingen av responstrykket i forbindelsen ble delt inn i tre faser, der det ble funnet tegn til at responstrykket økte etter at masseresepsten ble justert med lavere vanninnhold per kg sement. Det kan tyde på at en begrensning i tilgjengelige strømningsveier for den mer viskøse sementblandingen førte til at en mye større andel av injiserte masser strømmet i retning av forbindelsen. Det ble tolket hullfylling i responshullet grunnet forbindelsen, noe som ble bekreftet ved vurdering av responshullets injeksjonsforløp.

## 11 SAMMENDRAG AV UTFØRT ARBEID I TIGHT

---

Berginjeksjon er et teknisk og komplekst tema som krever materialkunnskap, utstyrskompetanse, bergmekanisk forståelse, praktisk erfaring og geologisk bakgrunn hos de som er ansvarlig for planlegging og utføring av injeksjonen. Optimalisering av berginjeksjon i tunnelindustrien vil kreve både god praktisk og teoretisk forståelse. TIGHT-prosjektet har forsket på problemstillinger som dekker et bredt spekter av dagens injeksjonspraksis – fra den teoretiske forståelsen til den praktiske utførelsen. Mange av forskningsresultatene har betydning for dagens injeksjonspraksis, og disse resultatene oppsummeres kort nedenfor.

Det ble utført et stort utvalg av laboratorietester av ulike injeksjonssementer, med og uten tilsetningsstoffer. Generelt kan det konkluderes med at testene som er utført under prosjektet, viser at det man teoretisk sett forventer kan være langt unna det resultatet man får i praksis. Det kan være utfordrende å finne den optimale sementblandingen, og produkter med tilsynelatende samme egenskaper oppfører seg veldig forskjellig. Kombinasjoner av ulike produkter er også uforutsigbart. Tester på sement utført i arbeidspakke 6 viser også at blanding av sement ved bruk av kolloidalmikser, tilsvarende blandemetode som i felt, gir andre resultater enn blanding ved bruk av laboratoriemikser. Resultatene viser at det i alle prosjekter er svært viktig å utføre relevante tester på de sementblandingene som skal brukes under stedlige forhold, og å benytte samme blandemetode som man skal benytte ved injeksjon.

To av arbeidspakkene i prosjektet benyttet numerisk modellering og simulering for å øke forståelsen av hvordan injeksjonsmassen sprer seg i bergmassen. I arbeidspakke 4 ble det blant annet gjort en vurdering av hvilke parametere som fører til trykktap i sprekke, som i praksis betyr motstand under pumping på injeksjonsriggen (kombinasjonen trykkøkning og reduksjon i strømning målt på riggen). Her ble det funnet at i tillegg til sprekkeåpningen er det de viskøse egenskapene til sementen som dominerer, spesielt i små sprekker. Ved simulering ble det derfor funnet at vinkelen for hvordan borhullet treffer har liten betydning for spredningen av injeksjonsmasse, så lenge sprekken er injiserbar i det punktet hvor borhullet krysser sprekken.

Arbeidet i arbeidspakke 5 knyttet til numerisk simulering viser at ved å benytte teoretisk formelverk i kombinasjon med faktiske data fra utført injeksjon, kan man få informasjon om sprekkesystemet man injiserer, samt definere hendelser som hydraulisk jekking under injeksjonsforløpet. Dette er også mye av tankegangen rundt RTGC-metoden (Real Time Grouting Control) som presenteres av Stille (2015). For å kunne benytte slike simuleringer i praksis, som et verktøy for å beskrive bergmassen som injiseres, kreves det fortløpende informasjon om reologien til injeksjonsmassen. Dette er noe forskningsmiljøet i Sverige (KTH og Chalmers) jobber kontinuerlig med. Denne typen numerisk simulering kan ha et stort potensial i framtiden.

Planlegging og bygging av modellen har vært en tidkrevende prosess, preget av forsinkelser både i produksjonen av sprekkemodellen og ved levering av injeksjonspumpa. Mye av årsaken ligger i ønsket om å injisere ved injeksjonstrykk tilsvarende det som brukes i praksis ved forinjeksjon av bergmasse i tunnel. Høye trykk ved laboratorietesting krever at man har en svært sikker modell som er



dimensjonert til å tåle forsøk ved slike trykk. Ved TIGHT-prosjektets slutt ble det derfor ikke utført tester av den endelige modellen. Alt utstyret er på plass og klart til bruk, og det er et ønske om at injeksjonsmodellen kan benyttes i et nytt prosjekt.

Arbeidet utført i arbeidspakke 7 fokuserte på bruk av informasjonen som er tilgjengelig under injeksjonsarbeidene. På en enkel og rimelig måte har man mulighet til å hente data som kan gi nyttig informasjon under selve injeksjonen, samt hente data til forskning. Måling av injeksjonstrykk i injeksjonshull under hydraulisk jekking kan ha potensial til å gi data som kan brukes til å gjøre vurderinger av bergspenninger, men for å komme dit må det utføres mer forskning på området.

Arbeidspakke 8 undersøkte metoder for å dokumentere spredning av injeksjonsmasse i berget. Det er en utfordring å gjøre vurderinger av spredning av sement under injeksjon av bergmasse, da man per i dag ikke har gode verktøy for å kartlegge den faktiske beliggenheten av sprekker, sprekkorienteringer og/eller størrelsen på sprekkåpninger. Derfor er det vanskelig å forutsi hvordan sementen brer seg ved forinjeksjon av bergmasse. GPR er et spennende verktøy for å kartlegge sementens spredning, og det hadde vært interessant å utføre flere tester ved bruk av GPR for å utforske potensialet.

I ph.d.-avhandlingen ble konkludert med at dagens praksis med høytrykksinjeksjon under normale grunnforhold er en god metode med tanke på reduksjon av innlekkasje i tunneler. Men en vellykket injeksjon bør ikke bare bedømmes med tanke på oppnådd reduksjon i innlekkasje; faktorer som økonomi og miljø bør også inkluderes. Funnene fra ph.d.-studiet indikerer at sementforbruket i mange tilfeller ser ut til å være unødvendig høyt og bør evalueres. Mye av overforbruket synes å være knyttet til injeksjonsforløpet etter at det har oppstått hydraulisk jekking av sprekker i bergmassen. Per i dag fins det ingen gode verktøy for å forutsi under hvilke forhold og trykk hydraulisk jekking oppstår. Skal man fortsette med effektiv høytrykksinjeksjon, må man akseptere at det forekommer tilfeller av hydraulisk jekking. Derfor bør fokuset flyttes over på hvordan man håndterer hendelser som hydraulisk jekking. Avhandlingen gir en detaljert beskrivelse av hvordan dette kan utføres i praksis.

## 12 SLUTTORD

---

I Norge benyttes et høyt injeksjonstrykk som ofte er i grenseland i forhold til bergspenningene. Hydraulisk jekking av sprekker i bergmassen under injeksjon er en svært vanlig hendelse – mer en regel enn et unntak. Hydraulisk jekking under typiske forhold er nesten alltid negativt, spesielt med tanke på spredning av sement i sprekker som ligger tett til tunnelen, samt sement- og tidsforbruk. Det er ingen tvil om at høyt injeksjonstrykk gir en god spredning av injeksjonsmasse på kort tid, men når man tipper over til hydraulisk jekking, er potensialet for unødvendig overforbruk av tid og sement stort. Derfor er det ekstra viktig å følge injeksjonen tett under slike forhold, slik at man kan utføre endringer i injeksjonsprosedyren når det oppstår hydraulisk jekking. I det store og hele er det ikke jekkingen i seg selv som er problemet, men injeksjonsprosedyren som følger i etterkant.

Funn i TIGHT tyder på at den norske tunnelbransjen bør, eller må, revurdere injeksjonskonseptet som er blitt benyttet så langt. Høyt trykk kan være bra for resultatet, men ikke ubetinget og til enhver tid. En større differensiering av injeksjonstrykket synes å være nødvendig. Det samme gjelder bruken av injeksjonsmasse: Grov eller finmalt sement kan ha sine fordeler og ulemper. Alle tunnelprosjekter er unike, derfor må også injeksjonsprosedyrer og -opplegg tilpasses hvert enkelt prosjekt og dets omstendigheter.

Data fra norske tunnelanlegg tyder på at vi ikke helt forstår eller tar inn over oss konsekvensen av høyt trykk til enhver tid, da jekking er en gjenganger ved mange anlegg.

Prosjektet har funn som vi tror skal øke bevisstheten i industrien om at en optimal injeksjonsstrategi er viktig for å sikre kostnads- og tidseffektiv tunnelbygging. Kunnskapen har potensial til å redusere mengden injeksjonsmasse og tiden som brukes til injeksjon. Den oppnådde kunnskapen vil komme alle deltakende partnere til gode i form av optimalisert tunneldriving.

## 13 OVERSIKT OVER PERSONER INVOLVERT I TIGHT

Følgende personer har vært involvert i forskningsprosjektet TIGHT:

Navn	Tilknytning	Tilhørighet
Eivind Grøv	Prosjektleder	SINTEF/NTNU
Elin K. Morgan	Prosjektledelse	NGI
Hans Olav Hognestad	Representant fra partner	BASF/Mapei
Bjarne Ruud	Representant fra partner	Mapei
Karl Gunnar Holter	Representant fra partner	BASF
Arvid Dokken	Representant fra partner	BASF
Frode Nilsen	Representant fra partner	LNS
Per Gunnar Andersen	Representant fra partner	AMV
Trine Bye Sagen	Representant fra partner	Bane NOR
Juan Barrera	Representant fra partner	Bane NOR
Hanne Wiig Sagen	Representant fra partner	Bane NOR
Jørn Gjennestad	Representant fra partner	Veidekke
Arild Neby	Representant fra partner	Statens vegvesen
Knut Boge	Representant fra partner	Geo Vita
Ivar Andersen	Representant fra partner	ITS
Ola Woldmo	Representant fra partner	Normet
Torvald Wetlesen	Representant fra partner	Bever Control AS
Silje Hatløy Hagen	Representant fra partner	Bever Control AS
Tae-Min Oh	Representant fra samarbeidspartner	KIGAM
Hang Bok Lee	Representant fra samarbeidspartner	KIGAM
Thomas Dalmalm	Representant fra samarbeidspartner	BeFo
Per Tengborg	Representant fra samarbeidspartner	BeFo
Zhao Zhiye	Representant fra samarbeidspartner	Nanyang Technological University
Kristin Hilde Holmøy	Arbeidspakke 2	SINTEF
Torun Rise	Arbeidspakke 2	SINTEF
Bahman Bohlooli	Arbeidspakke 3	NGI
Ola Skjølsvold	Arbeidspakke 3	SINTEF
Harald Justnes	Arbeidspakke 3	SINTEF
Nghia Trinh	Arbeidspakke 4	SINTEF
Paal Skjetne	Arbeidspakke 4	SINTEF
Sjur Mo	Arbeidspakke 4	SINTEF
John Christian Morud	Arbeidspakke 4	SINTEF
Tore Ingvald Bjørnarå	Arbeidspakke 5	NGI
Bjørn Nilsen	Arbeidspakke 6	NTNU
Gunnar Vistnes	Arbeidspakke 6	NTNU
Lloyd Tunbridge	Arbeidspakke 7	NGI
Arnstein Aarseth	Arbeidspakke 7	NGI
Roger Olsson	Arbeidspakke 7	NGI
Yme Asgeir Kvistedal	Arbeidspakke 8	NGI
Sara Bazin	Arbeidspakke 8	NGI
Helene Strømsvik	Ph.d.-kandidat	NTNU
Stine Merete Hvoslef Moe	Masteroppgave	NTNU
Sølve Utstøl Pettersen	Masteroppgave	NTNU
Eivind Sundset Moe	Masteroppgave	NTNU
Sondre Wenaas	Masteroppgave	NTNU
Martin Hovda Haugsand	Masteroppgave	NTNU
Ida Skjæraasen	Masteroppgave	NTNU

## 14 ACKNOWLEDGEMENT

---

This paper is a part of the research project “True Improvement in Grouting High pressure Technology for tunneling (TIGHT)” financed by the Research Council of Norway (project no. 236676/O30), in cooperation with Statens Vegvesen, Jernbaneverket, and industrial partners BASF, Mapei, Geovita, LNS, ITS, Normet, Bever Control, AMV and Veidekke. Research partners in TIGHT are NGI, NTNU and SINTEF, whilst KIGAM of Korea and Nanyang University in Singapore together with BeFo of Sweden are associated with TIGHT.

## 15 REFERANSER

---

- Bazin, S. (2018). *TIGHT WP8 – Grout monitoring. Imaging of grout distribution with crosshole GPR*. Trondheim: Norwegian Geotechnical institute.
- Bazin, S., Kvistedal, Y., Anschütz, H., Tunbridge, L., Jankowski, P., Fannian, K., Strømsvik, H. & Grøv, E. (2018). Case study of crosshole GPR tomography for grouting distribution in rock fractures. *Conference Proceedings, EAGE-HAGI 1st Asia Pacific meeting on Near Surface Geoscience & Engineering 9–13 April 2018, Yogyakarta, Indonesia*, 1-5.
- Bjørnarå, T.I., Bohloli, B. & Tunbridge, L. (2016). Grout flow and pressure response in rock mass, with hydromechanical modelling. *8<sup>th</sup> Nordic Grouting Symposium, Oslo, Norway, September 26-27, 2016*.
- Bjørnarå, T.I., Tunbridge, L. & Bohloli, B. (2017). Hydromechanical modelling of rock mass grouting. *American Rock Mechanics Association, 51st U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, 25-28 June, San Francisco, California, USA*.
- Bohlooli, B., Omolo L.O., Soldal, M., Wilkinson H.D. & Morgan E.K. (2016). Mechanical and flow properties of cement grouts. *8th Nordic Grouting Symposium, 26-27 September 2016, Oslo, Norway*.
- Bohlooli, B., Morgan, E.K., Grøv, E., Skjølsvold, O. & Hognestad, H.O. (2018). Strength and filtration stability of cement grouts at room and true tunnelling temperatures. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 71, 193-200. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2017.08.017>.
- Bohlooli, B., Skjølsvold, O., Justnes, H., Olsson, R., Grøv, E. & Aarset, A. (2019). Cement grouts for tunnelling – Rheology and flow properties tested at different temperatures. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 91, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2019.103011>.
- Brooks, R.H. & Corey, A.T. (1964). *Hydraulic properties of porous media*. Hydrology papers no. 3. Fort Collins, Col.: Colorado State University.
- Dalmalm, T. (2004). *Choice of grouting method for jointed hard rock based on sealing time predictions* (Doktoravhandling). Royal Institute of Technology, Stockholm.
- Draganović, A. & Stille, H. (2011). Filtration and penetrability of cement-based grout: Study performed with a short slot. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 26, 548-559.
- Gothäll, R. & Stille, H. (2009). Fracture dilation during grouting. *Tunnelling and underground space technology*, 24, 126-135.
- Grøv, E. (2016). TIGHT – a research project on modern rock mass grouting techniques. *8th Nordic Grouting Symposium, Oslo, Norway, 26.-27. September 2016*.
- Grøv, E. (2017). TIGHT: Et forskningsprosjekt om moderne teknikker innen berginjeksjon. I K. Kvalheim Dunham, Ø. Dammyr, M. Rømoen & S. Engen (Red.), *Fjellsprengningsteknikk, Bergmekanikk, Geoteknikk 2017* (s. 13.1-13.27). Oslo: Norsk Forening for Fjellsprengningsteknikk, Norsk Bergmekanikkgruppe og Norsk Geoteknisk Forening.
- Haugsand, M.H. (2018). *Modellbasert berginjeksjon – Utforskning, vurdering og bruk av modeller for berginjeksjon* (Mastergradsavhandling). NTNU, Trondheim.
- Holmøy, K.H., Strømsvik, H. & Rise, T. (2015). *State of the art for sementbasert forinjeksjon*. SINTEF rapport SBF2015 F0318. Trondheim: SINTEF Byggforsk.
- Håkansson, U., Hässler, L. & Stille, H. (1992). Rheological properties of microfine cement grouts. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 7, 453-458.

- Justnes, H. & Skjølvold, O. (2017). Characterization of cements for injection. I M.T. Hasholt (Red.), *Proceedings of the XXIII Nordic Concrete Research Symposium, Aalborg, Denmark, 21-23 August 2017* (s. 201-204). Oslo: The Nordic Concrete Federation.
- Klüver, B.H. & Kveen, A. (2004). *Miljø- og samfunnstjenlige tunneler: Berginjeksjon i praksis*. Publikasjon nr. 104. Oslo: Vegdirektoratet.
- Kobayashi, S., Stille, H., Gustafson, G. & Stille, B. (2008). *Real time grouting control method. Development and application using Åspø HRL data*. SKB Rapport R-08-133. Stockholm: Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Kveen, A. & Lindstrøm, M. (2004). *Miljø- og samfunnstjenlige tunneler: Sluttrapport*. Publikasjon nr. 105. Oslo: Vegdirektoratet.
- Moe, E.S. (2018). *Analyse av pumpedata som verktøy for oppfølging av injeksjonsarbeider* (Mastergradsavhandling). NTNU, Trondheim.
- Moe, S.M.H. (2016). *Hydraulisk jekking ved høytrykksinjeksjon av berg* (Mastergradsavhandling). NTNU, Trondheim.
- NFF. (2010). *Praktisk berginjeksjon for underjordsanlegg*. Håndbok nr. 6. Oslo: Norsk Forening for Fjellsprengningsteknikk.
- Nilsen, B. (2014). Characteristics of water ingress in Norwegian subsea tunnels. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 47(3), 933-945. doi:10.1007/s00603-012-0300-8.
- NS-EN 12715:2000. (2000). *Execution of special geotechnical works – Grouting*. Oslo: Standard Norge.
- NS-EN 445:2007. (2008). *Grout for prestressing tendons – Test methods*. Oslo: Standard Norge.
- Pettersen, S.U. (2016). *Injeksjon på Bodøtunnelen – Analyse av elektronisk injeksjonsdata* (Mastergradsavhandling). NTNU, Trondheim.
- Skjetne, P. & Mo, S. (2016). Numerical simulations of grout flow in simplified geometries. *8th Nordic Grouting Symposium, Oslo, Norway, 26.-27. September 2016*.
- Skjølvold, O. & Justnes, H. (2016). Characterization of cement types used for rock injection. *8th Nordic Grouting Symposium, Oslo, Norway, 26.-27. September 2016*.
- Skjæraasen, I. (2019). *Analyse av injeksjonstestdata, Lyshorntunnelen, E 39, Svegatjørn-Rådal* (Mastergradsavhandling). NTNU, Trondheim.
- Stille, H. (2015). *Rock grouting: Theories and application*. Stockholm: BeFo.
- Stille, H., Gustafson, G. & Hassler, L. (2012). Application of new theories and technology for grouting of dams and foundations on rock. *Geotechnical and Geological Engineering*, 30(3), 603-624. doi:10.1007/s10706-012-9512-7.
- Strømsvik, H. (2016). Investigation of parameters for on-site monitoring of pre-grouting in hard rock. *8th Nordic Grouting Symposium, Oslo, Norway, 26.-27. September 2016*.
- Strømsvik, H. & Grøv, E. (2017). Interpretation of pressure and flow during pre-grouting in hard rock tunneling. *Grouting 2017, Honolulu, USA*.
- Strømsvik, H., Morud, J.C. & Grøv, E. (2018). Development of an algorithm to detect hydraulic jacking in high pressure rock mass grouting and introduction of the PF index. *Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research*, 81, 16-25. doi: 10.1016/j.tust.2018.06.027.
- Strømsvik, H. (2019a). The significance of hydraulic jacking for grout consumption during high pressure pre-grouting in Norwegian tunnelling. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 90, 357-368. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2019.05.014>.

- Strømsvik, H. (2019b). *Assessment of High Pressure Pre-Excavation Rock Mass Grouting in Norwegian Tunnelling* (Doktoravhandling). NTNU, Trondheim.
- Strømsvik, H. & Gammelsæter, B. (2020). Investigation and assessment of pre-grouted rock mass. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10064-019-01722-9>.
- Tunbridge, L., Aarset, A. & Tønnesen, E. (2016a). *Measurement of grout injection pressure in situ*. WTC 2016.
- Tunbridge, L., Aarset, A., Tønnesen, E., Strømsvik, H. & Moe, S. (2016b). Measurement of grout injection pressure in-situ and interpretation of in-situ stresses. Bergmekanikkdagen 2016 og 8th Nordic Grouting Symposium 2016.
- Tunbridge, L., Strømsvik, H. & Aarset, A. (2017). Results of in situ pressure measurements during pre-excavation grouting in rock tunnels. WTC 2017 Bergen.
- Vistnes, G. & Nilsen, B. (2018). *TIGHT WP6-Model design and initial testing*. Trondheim: NTNU, Department of Geoscience and Petroleum.
- Vistnes, G., Strømsvik, H. & Nilsen, B. (2017). *TIGHT WP6-State of the art and planned laboratory testing apparatus*. Trondheim: NTNU, Department of Geoscience and Petroleum.
- Wenaas, S. (2018). *Undersøkelse av fenomenet hydraulisk jekking som følge av sementbasert forinjeksjon i Svartåstunnelen, vestgående løp på E134 ved Kongsberg, Buskerud* (Mastergradsavhandling). NTNU, Trondheim.
- Yahia, A., Mantellato, S. & Flatt, R.J. (2016). Concrete rheology: a basis for understanding chemical admixtures. I P-C. Aïtcin & R.J. Flatt (Red.), *Science and technology of concrete admixtures* (s. 97–127). Cambridge, UK: Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/C2015-0-00150-2>.

# Sementbasert berginjeksjon

## Sluttrapport fra prosjektet TIGHT

Ved tunnelbygging i urbane strøk eller andre steder med strenge krav til vannkontroll er berginjeksjon første linje av forsvar. Norge har vært en global pådriver for utvikling og bruk av berginjeksjon. Berginjeksjon i Norge er i stor grad basert på empiriske erfaringer opparbeidet gjennom mange år. Erfaringsgrunnlaget er en solid basis for utførelse av berginjeksjon, men det er et behov for vitenskapelig basert kompetanse som kan bidra til optimalisering av injeksjonsarbeidene.

Denne sluttrapporten er utarbeidet av SINTEF Community på vegne av forskningsprosjektet TIGHT (True Improvement in Grouting High pressure Technology for tunneling). Den er basert på artikler, rapporter og presentasjoner utarbeidet av de enkelte arbeidsgruppene gjennom prosjektperioden, samt ett ph.d.-arbeid ved NTNU finansiert av prosjektet. Seks MSc-oppgaver er også skrevet i forbindelse med prosjektet.

Rapporten skal gi nye impulser og ny viten, og forhåpentligvis vil den medvirke til teknologiutvikling hos de selskapene som har deltatt i TIGHT. Vårt håp er at resultatene fra TIGHT-prosjektet skal bidra til en forutsigbar og mer tids- og kostnadseffektiv arbeidsoperasjon, samtidig som den gir tunneler som er tette nok for formålet.

TIGHT har vært et KPN (Kompetanseprosjekt for Næringslivet) under programmet som Norges Forskningsråd har kalt BIA (Brukerstyrt Innovasjonsarena).