

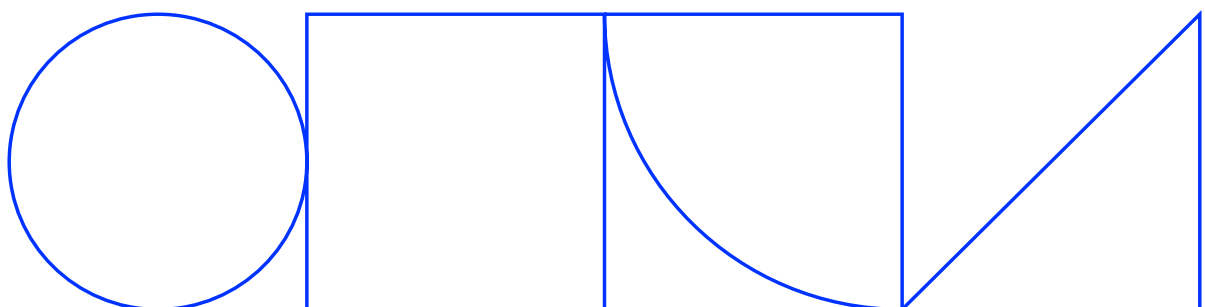
PROJEKTNR. 13868

Verifiering av RTGC-teorin i en artificiell spricka med justerbara spaltvidder

En numerisk och experimentell undersökning

Giedrius Žirgulis (RISE), Liangchao Zou (KTH)

RISE
2024-11-13



Förord

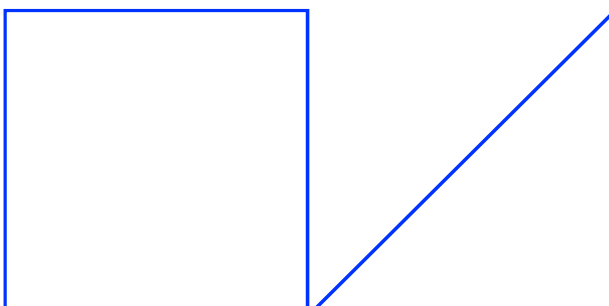
Detta projekt utfördes av Giedrius Žirgulis (RISE) som projektledare och forskare inom injektering, Liangchao Zou (KTH) som forskare inom numeriska simuleringar och Maria Golubeva, Tomas Norrstrand, Muje Kiqina, Thed Hendriksson och Markus Abrahamsson (RISE) som laboratorier ingenjörer.

Material för provning tillhandahålls av Master Builders Solutions Sverige AB och Heidelberg Materials Cement Sverige AB.

Arbetsgruppen i detta projekt var Ali Nejad Ghafar (Implenia Sverige AB), Ulf Håkansson (Skanska Sverige AB), Almir Draganović (Svensk Kärnbränslehantering AB) och Tommy Ellison (BESAB AB).

Projektets referensgrupp bestådd av Lisa Hernqvist (Trafikverket), Ali Nejad Ghafar (Implenia Sverige AB), Robert Sturk (Skanska Sverige AB), Almir Draganović (SKB) och Patrik Vidstrand (BeFo).

Projektet finansierades av BeFo, SBUF och RISE.



Sammanfattning

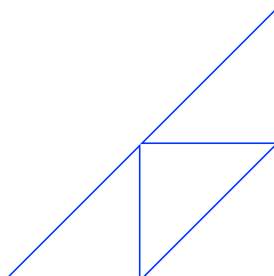
Vid cementbaserad injektering är otillräcklig fördelning av injekteringsbruk i bergsprickorna ett av de stora problemen, vilket negativt påverkar den resulterande tätningen och livslängden för underjordiska strukturer. Å andra sidan är ett överskott av injekteringsbruk varken ekonomiskt eller miljövänligt. Därför är optimering av bruksfördelningen av största vikt vid berginjektering för att tillhandahålla den mest tillförlitliga och ekonomiska lösningen för tätning av underjordiska anläggningar. Real Time Grouting Control-teorin (RTGC) är följaktligen en metod som har utvecklats för att övervaka/förutsäga spridningen av injekteringsbruk i bergsprickor. Den förutsäger omfattningen av injekteringsbrukets inträngning över tiden med hjälp av injekteringsbrukets egenskaper och det applicerade trycket. Trots omfattande arbete som utförts för att verifiera det i både lab och fält, har det ännu inte undersökts tillräckligt i labbet under geometriska förhållanden som en riktig spricka i berg (dvs i en spricka med variabla, icke efterföljande spaltvidder).

Detta projekt gör därför ett nytt försök att undersöka prestandan av RTGC-teorin vid närvaro av förträngningar. Tanken är att undersöka hur nära resultaten av förutsägelser av injekteringsbruksutbredning av RTGC-teorin (vid olika spaltvidder) är de experimentella resultaten som erhålls med användning av en artificiell spricka med justerbara inställningar. En rättvis jämförelse tillhandahålls vidare mellan de förutsagda resultaten och resultaten av numeriska simuleringar under olika spaltvidds fördelningar. Förutsägelserna erhöles med både den hydrauliska spaltvidder, det sätt som teorin tidigare användes i de tidiga utvecklingsstadierna, såväl som den genomsnittliga fysiska öppningen, det sätt som teorin för närvarande används i fälttillämpningar.

Unik utrustning, Variable Aperture Long Slot II (VALS II), designades och tillverkades för att uppfylla kraven i denna undersökning. Den består av flera korta spaltviddsplattor fästa på 4m lång basplatta. Spaltviddsplattorna har olika öppningsstorlekar för simulering av bergsprickor och kan monteras på basplattan i valfri sekvens för att bilda önskad spaltviddsstorleksfördelning med avseende på VALS II-inloppet för injekteringsbruk.

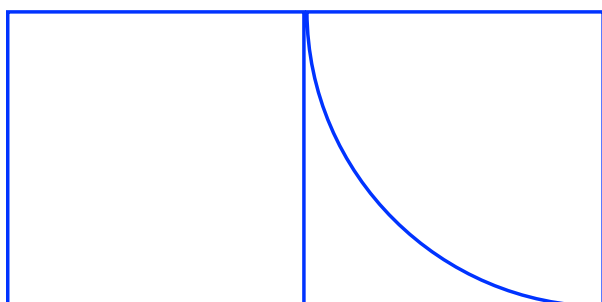
Provningsresultat visade vikten av korrekt utvärdering av injekteringsbruksreologi vid tillämpning av RTGC-teori. Baserat på det drogs slutsatsen att om man applicerade färskt injekteringsbruks reologiska egenskaper gav RTGC-teorin inte lika exakta förutsägelser för injekteringsbrukets utbredning i tid som injekteringsbrukets reologiska egenskaper 30 minuter efter blandning.

Nyckelord: Real Time Grouting Control Teori, Variabel spaltviddsfördelning, Numerisk simulering



Innehåll

1	Introduktion	7
2	Material och metoder	7
2.1	Utformning av Variable Aperture Long Slot II (VALS II)	7
2.2	RTGC Testuppställning	9
2.3	Experiment för att testa RTGC-teori	11
2.3.1	Alternativ för spaltfördelning	11
2.4	Material och blandning	11
2.5	Rutin för experiment	12
3	Resultat av laborietester	13
3.1	Uppmätt vatten- och markflöde	13
3.1.1	Spaltfördelning A2	13
3.1.2	Spaltfördelning A5	14
3.1.3	Spaltfördelning A1	15
3.2	Sammanfattning av experimentella data	17
3.2.1	Test av injekteringsbrukets reologi	17
3.2.2	Injekteringsbrukets frontspredning	17
4	Laboriemätningar vs. RTGC-teori och numerisk förutsägelse	18
4.1	Spaltfördelning A2	18
4.2	Spaltfördelning A5	19
4.3	Spaltfördelning A1	19
5	Slutsatser	20



1 Introduktion

Kontroll och optimering för injekteringsbruk i sprickor är viktigt för att ge en tillförlitlig och ekonomisk vattentät zon. En av de mest avancerade teoretiska metod för injektering är Real Time Grouting Control (RTGC). Dock saknas det referens till laborieförsök för utvärdering av RTGC för komplexa konstruktioner under själva injekteringsfasen.

Målet med detta projekt är att verifiera tillförlitligheten av RTGC teorin genom experimentella och numeriska försök enligt:

- Designa och bygga en provrigg med justerbara spaltvidder.
- Experimentella försök för utvärdering av RTGC-teorin för att förutse injekteringsbrukets flöde genom olika spaltvidder.
- Verifiera prestanda för RTGC-teorin med en numerisk simulering av injekteringsbrukets flöde.

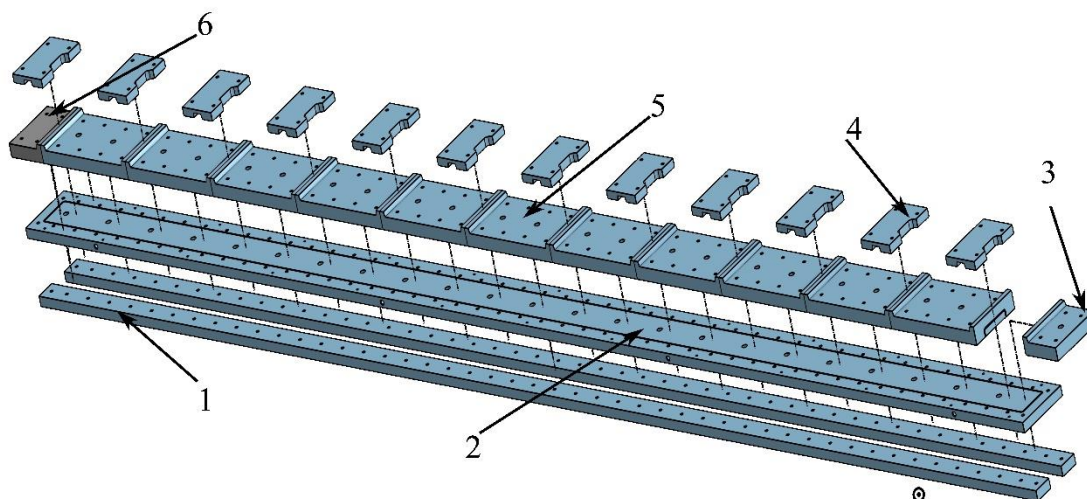
Undersök hur vida hydraulisk b_h eller fysisk b_{phy} spaltvidder ger mer realistiska RTGC förutsägelser.

2 Material och metoder

2.1 Utformning av Variable Aperture Long Slot II (VALS II)

Utformningen av en ny version av Variable Aperture Long Slot II (VALS II) baserades på erfarenheter av att använda den äldre versionen av VALS för laborieforskning.

VALS II bestod av alla nya komponenter (Figur 1). Denna design hade en något längre bottenplatta än VALS, vilket gjorde det möjligt att montera 11 spaltplattor på den.

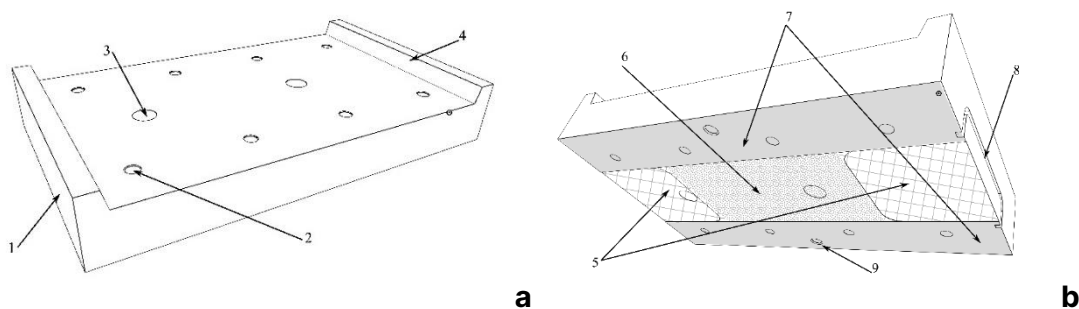


Figur 1. VALS II: 1- styvhetsribbor, 2- bottenplatta, 3- inloppsplatta, 4- flänsplattor, 5- spaltplattor, 6- utloppsplatta.

Den slutliga längden på VALS II var 4230 mm och bredden på 210 mm. Den bestod av följande komponenter:

- Två styvhetsribbor i botten (artikel 1 i Figur 1). Deras syfte är att öka styvheten hos VALS II under experiment med injekteringsbruk under tryck.
- Bottenplatta (artikel 2 i Figur 1). Den fungerar som basen på vilken de övre spaltplattorna är monterade. Bottenplattan har en plan yta bearbetad med ett tryck på $\pm 10 \mu\text{m}$, ett spår för placering av O-ringstättning och flera hål för att fästa ventiler under VALS II för injekteringsutflöde. Placeringen av ventilerna kan väljas fritt och hål som inte används kan pluggas med 1/2-tums blindpluggar.
- Inlopps- och utloppsplattor (artiklarna 3 och 6 i Figur 1) är till för tätning av båda ändarna av VALS II-riggen. Inloppsplattan har även ett hål för trycksensor och en slangkoppling för injekteringsinflöde.
- Spaltplattor (artikel 5 i Figur 1). Dessa är plattorna som har bearbetat gap med visst djup, vilket kallas spaltstorlek. Spaltstorleken är bearbetad med en precision på $10 \mu\text{m}$. Spaltplattans egenskaper visas i Figur 2 och består av:
 - o Plan yta (1) vinkelrät mot bottenplattan och är ytan som trycker mot O-ringstättningen på intilliggande platta för att göra en förseglad anslutning mellan spaltplattorna.
 - o Bulthålen (2) är till för att dra åt spaltplattorna till bottenplattan och styvhetsribborna.
 - o Gångade öppningar (3) är till för att placera tryckgivare, om de inte används är de tätade med blindplugg.
 - o Flänsar (4) på spaltplattan är till för att dra åt intilliggande plattor med hjälp av förankringsplattor.
 - o Fickor med ett djup på $500 \mu\text{m}$ (5) är till för att simulera ojämn yta av bergsprickor.
 - o Spaltområde (6) där spalt med önskad storlek bildas när spaltplattan är ordentligt fastskruvad på bottenplattan.
 - o Precisionsbearbetad ($\pm 10 \mu\text{m}$) plan yta (7) är kontaktytan mellan spaltplattan och bottenplattan, dessa två ytor måste vara i god kontakt för att säkerställa korrekt spaltstorlek under testet.
 - o Spåret (8) är till för att placera O-ringen för att täta två intilliggande plattor.
 - o Placeringsstifthålet (9) är för korrekt placering av spaltplattan på bottenplattan.
- Förankringsplattan (artikel 4 i Figur 1) är till för att dra åt två spaltplattor i längdriktningen genom kontakt med flänsarna på spaltplattorna (Figur 2 (a) 4).

Tätheten mellan alla komponenter i VALS II uppnås med O-ringar med en diameter på 5 mm: en lång O-ring installeras i bottenplattan före montering och flera korta O-ringar placeras mellan spaltplattorna under monteringen av VALS II. O-ringarna har en shore-hårdhet på 60.

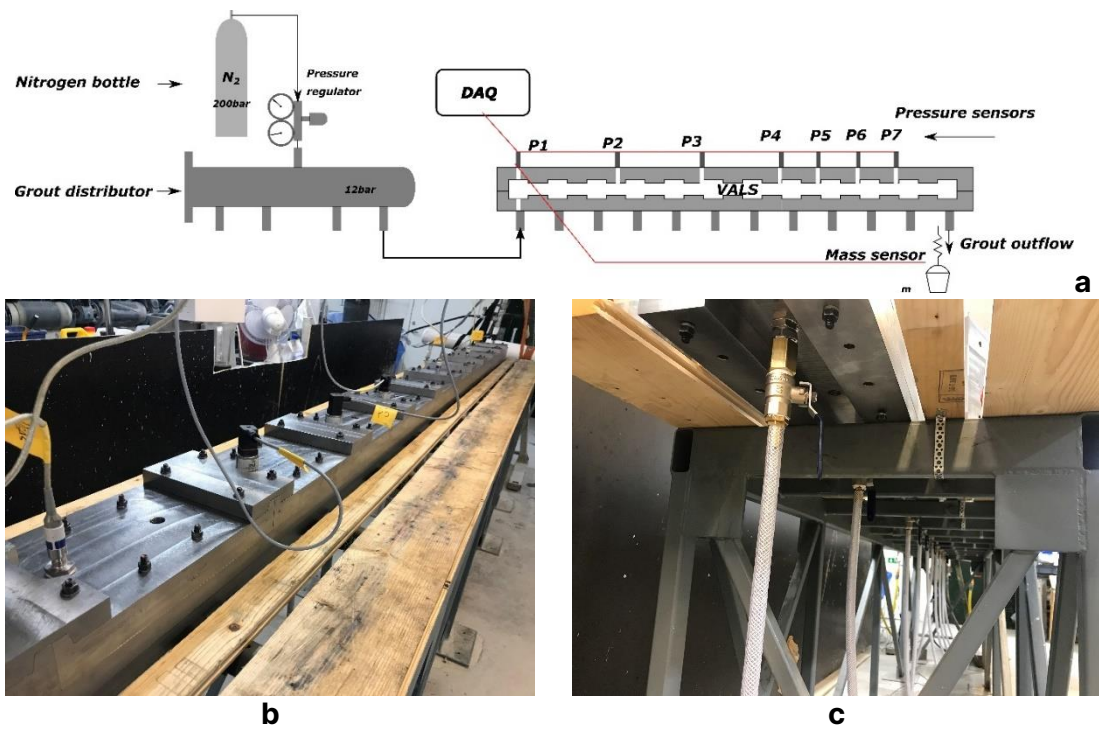


Figur 2. Spaltplatta: ovanifrån utsikt (a) och botten utsikt (b). Här: 1- är en sida plan yta, 2- hål för åtdragning av bultar, 3- hål för trycksensor, 4- flänsar för åtdragning av intilliggande plattor tillsammans med slipsplattor, 5- fickor av 500 µm storlek, 6- öppningsyta, 7- plan yta, 8- spår för O-ringstättning, 9- hål för lokalisering av stift.

2.2 RTGC Testuppställning

Skissen av testuppställningen presenteras i Figur 3a och bilden av monterad VALS II i Figur 3b. Upplägget bestod av följande komponenter:

- Kväveflaska som fungerade som källa för 200 bars tryck.
- Tryckregulator som användes för att minska trycket i injekteringsbruk till 11 bar.
- Fördelningsenhet. Det är en ståltank designad för att tåla högt tryck. Den har en kapacitet på 12 liter och fylldes med injekteringsbruk som sedan trycksattes med hjälp av kväve.
- VALS II riggaggregat med viss spaltfördelning. Monteringen görs genom att först dra åt utloppsplattan (Figur 1 artikel 6), följt av gradvis åtdragning av spaltplattor (artikel 5 i Figur 1) och flänsplattor (artikel 4 i Figur 1).
- Trycksensorer installerade i de övre spaltplattorna. De användes för att registrera injekteringsfrontens utbredningshastighet.
- Viktsensorn var placerad under VALS II utflödesventiler (Figur 3c). Viktsensorn fästes på det rörliga stativet och en stålhink fästes på viktsensorn. Under experimentet användes viktsensor för att kvantifiera injekteringsbrukets flödes hastighet genom varje spalt.
- Data Acquisition System (DAQ) används för att registrera signaler från alla sensorer.

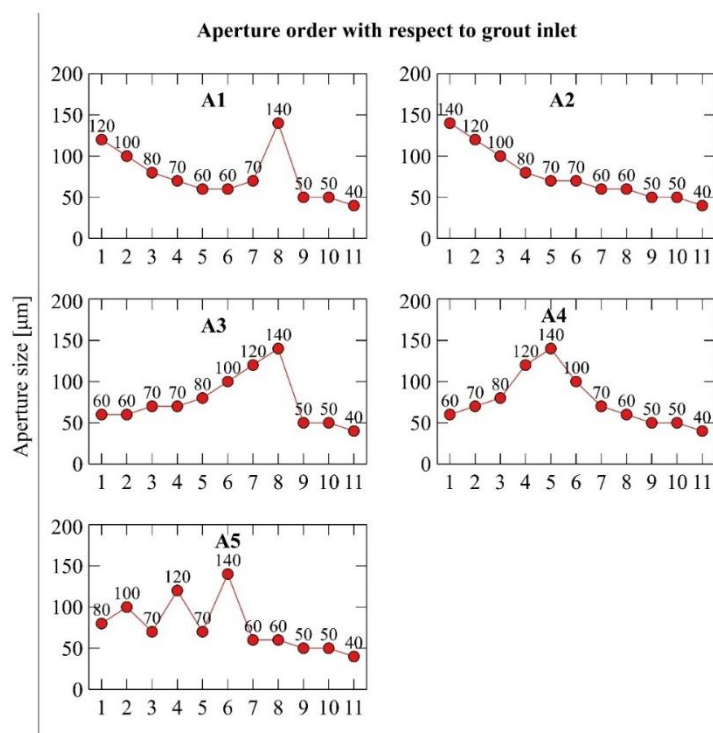


Figur 3. Testuppställning och komponenter för RTGC-teoretiska experiment (a), vy av monterad VALS II med trycksensor installerad (b) och injekteringsutloppsventiler installerade under VALS II (c).

2.3 Experiment för att testa RTGC-teori

2.3.1 Alternativ för spaltfördelning

Fem alternativ för spaltfördelning övervägdes (Figur 4). De utformades för att återspegla olika versioner av fördelningen av de övre plattorna för att simulera ojämn sprickfördelning.



Figur 4. Alternativ för spaltfördelning.

2.4 Material och blandning

Bindemedlet som användes för injekteringsbruket var cement MP650 och plastmedlet var Glenium 151. Receptet för injekteringsbruket visas i Tabell 1. Materialen (bindemedel och vatten) förvarades i ett klimatrum vid 5°C och levererades till blandningsstationen precis före testet. Experimentprogrammet började med Recept 1, som i den andra halvan av experimenten justerades något till Recept 2. Det bör noteras att ett enda recept var avsett att användas i experimenten. På grund av frekvent filtrering vid testning av alternativ A2 modifierades dock blandningen till ett vattencementtal w/c på 1,1 för att minska risken för filtrering.

Tabell 1. Recept på injekteringsbruksblandning.

	Recept 1	Recept 2
w/c	1.0	1.1
Cement	MP650	MP650
Superplasticizer Glenium 151	1.0%	0.8

Injekteringsbruket blandades med hjälp av en laboratorieblandare med hög blandningshastighet. En typisk batchstorlek bestod av 3 kg cement och vatten enligt receptet. Blandningsrutinen var följande:

1. Tillsätt vatten och flytmedel i mixern.
2. Ställ in blandningshastigheten till 2000 rpm och tillsätt cement under 1 minut.
3. Ställ in blandningshastigheten på 5000 rpm och blanda injekteringsbruket i 4 minuter.

Injekteringsbrukets egenskaper (Marsh kon tid, filtreringspump och Mud balance) testades efter att ha mottagit en ny cementsats. Injekteringsreologin övervakades dock under varje experiment. Reologin mättes med en laboratorie-viskosimeter Brookfield DV2T.

Tabell 2. Egenskaper hos färskt blandat injekteringsbruk.

	0 minut	10 minuter	30 minuter
Marsh kon tid	32.2 sec	32.5 sec	35.7 sec
Filtreringspump:			
40	50ml	-	-
63	300ml	-	-
Mud balance	1.475g/cm ³	-	-

2.5 Rutin för experiment

Experimentrutinen består av följande steg:

1. Montering av VALS II.
2. Anslutning av injekteringsslang, kväveflaska, tryck- och vikt-sensorer, förberedelse av fördelningsenhet.
3. Förberedelse av injekteringsblandning i mixer med hög blandningshastighet.
4. Fyllning av injekteringsbruk i fördelningsenheten och trycksättning av injekteringsbruket till 10 bar. Provet av injekteringsblandningen lämnas för mätning av injekteringsbrukets viskositet, Marsh kon tid och Mud balancetest. Injekteringsviskositeten mättes vid 0, 10, 20 och 30 minuter efter blandning.
5. Öppna injekteringsventilen på VALS II. Vanligtvis var ett injekteringsbruk vid denna tidpunkt 5-7 minuter gammal efter blandning.
6. Registrering av data från sensorer.
7. Stoppa testet, trycklösa fördelningsenheten.
8. Demontering av VALS II och fördelningsenhet och rengöring.

Resultaten av vatten- och injekteringstester användes enligt följande:

- en vattenflödes hastighet vid VALS II-utloppet och en injekteringsutvinningsutbredning över tid användes för utvärdering av RTGC-teorin.
En flödes hastighet för vatten och ett injekteringsbruk vid varje öppning användes som grund för att bedöma VALS II-monteringen och testets repeterbarhet (om storleken på öppningarna är konstanta för varje test).

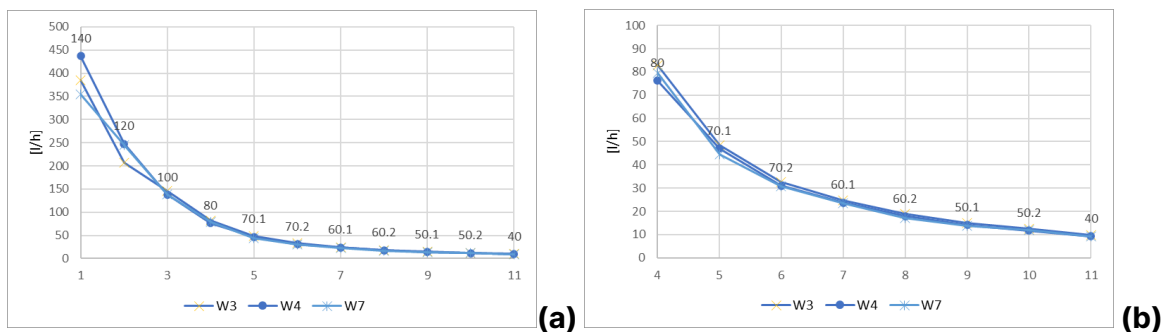
3 Resultat av laboratorietester

Testresultaten för spaltfördelningsalternativen A2, A5 och A1 presenteras här i kronologisk ordning.

3.1 Uppmätt vatten- och markflöde

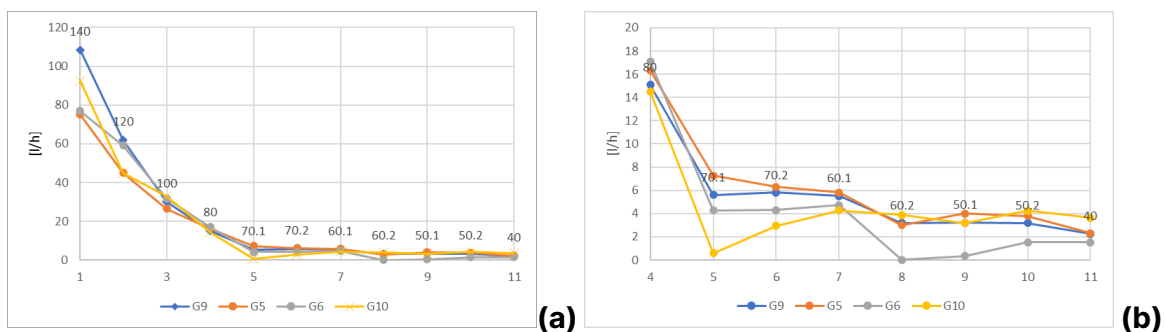
3.1.1 Spaltfördelning A2

Sju vattentester utfördes för att samla in data från tre lyckade tester. Resultaten visas i Figur 5. Som resultaten visar är vattenflödes hastigheterna likartade vid alla tre lyckade testupprepningar, särskilt flödes hastigheten är nästan lika vid små spalter (Figur 5b), eftersom flödes hastigheten vid den sista spalten användes för beräkningar av b_h .



Figur 5. Vattenflödes hastigheten vid varje spalt i A2: grafen för alla spalter (a) och grafen för små spalter i slutet av VALS II (b)

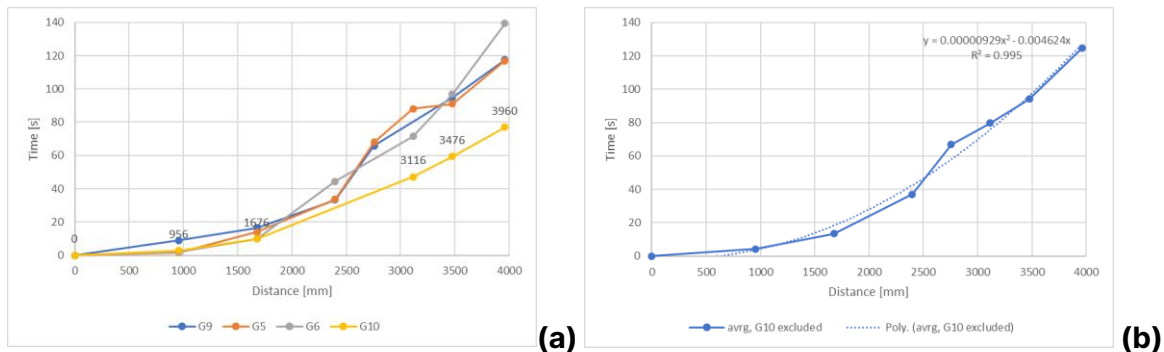
För injekteringstester hade dock endast G5 och G9 obehindrat flöde i alla spalter. De andra testerna hade filtrering i vissa spalter (se flödes hastigheten för G10 vid spalt 5 och G6 vid spalter 8 och 9 i Figur 6b). Trots detta visar liknande flödes hastigheter i de lyckade testsektionerna (se flödes hastigheterna för G10 vid spalter 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 10, 11 och G6 vid spalter 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 10, 11 i Figur 6a och b) i graferna på god repeterbarhet av testerna.



Figur 6. Injekteringsbrukets flödes hastighet vid lyckade tester för varje spalt i A2: grafen för alla spalter (a) och grafen för små spalter i slutet av VALS II (b)

I experimentdata för injekteringsbrukets frontutbredning över tid visade G10 en långsammare utbredning (Figur 7a). Detta kan förklaras av en läcka som inträffade vid skarven mellan spaltplattorna 4 och 5, dvs. på ett avstånd av 1600 mm från inloppet. Som framgår av grafen (se Figur 7a), följer injekteringsbrukets utbredning under G10-

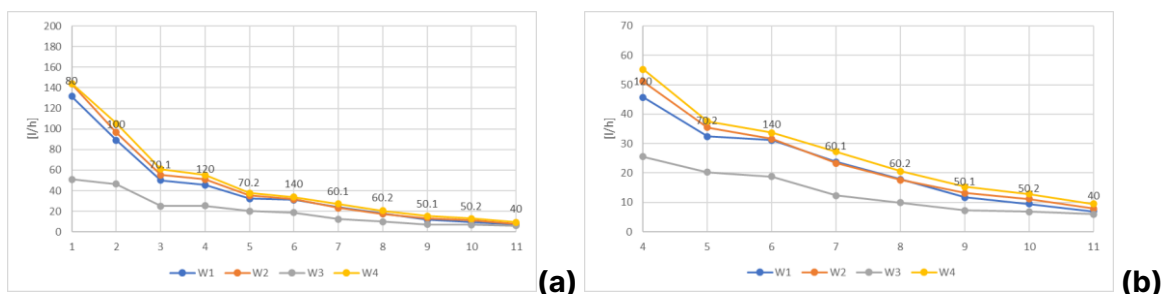
testet trenden för de andra testerna fram till denna punkt, men efter att ha passerat en trycksensor på ett avstånd av 1676 mm börjar grafen för injekteringsbrukets utbredning att avvika. Därför exkluderades G10:s utbredningsresultat från beräkningarna av medelvärdet (Figur 7b).



Figur 7. Registrerad injekteringsfrontutbredning A2: grafen för alla tester (a) och medelvärden med anpassad funktion med exkluderade registrerade tidsvärden för G10-test (b).

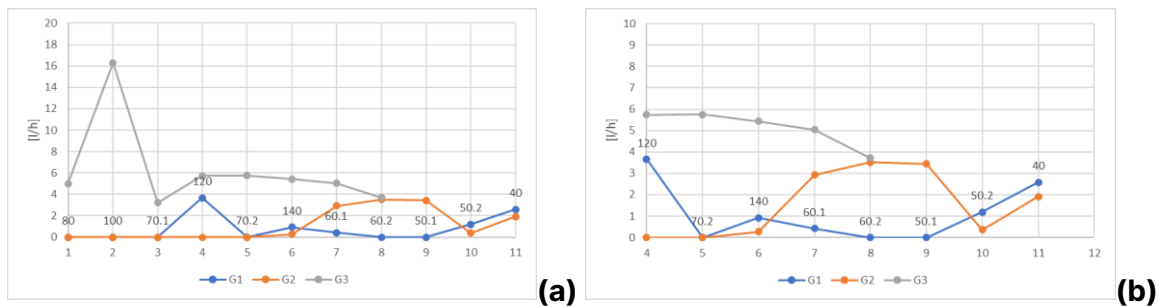
3.1.2 Spaltfördelning A5

För beräkningen av medelflödes hastigheten i vattentestet för A5 exkluderades resultatet från W3. De andra testerna visade god repeterbarhet i både stora och små spalter (Figur 8).



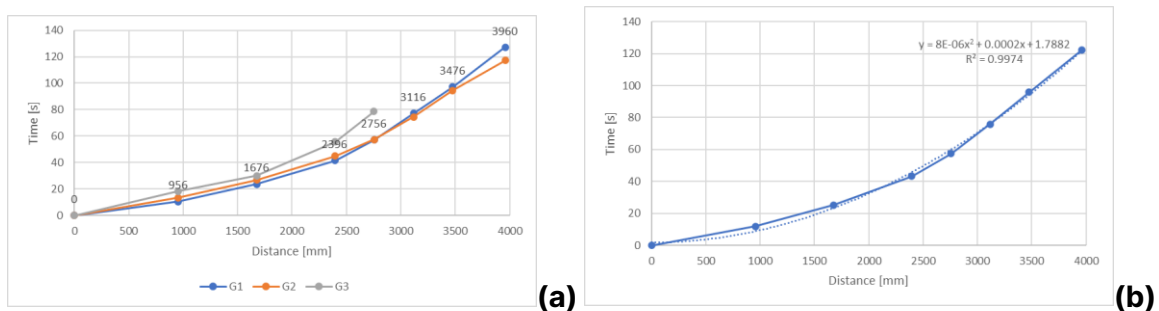
Figur 8. Vattenflödes hastigheten vid varje spalt av A5: grafen för alla spalter (a) och grafen för små spalter i slutet av VALS II (b).

Vid mätning av injekteringsbrukets flödes hastighet vid varje spalt för att bekräfta testrepeterbarhet för A5 inträffade filtrering ganska ofta (Figur 9 a och b). Testrepeterbarheten kan antas vara lyckad endast genom mätpunkter vid 40 μm , 60,2 μm och 120 μm spalter. Mätningarna av injekteringsbrukets frontutbredning visade bättre resultat (Figur 10).



Figur 9. Injekteringsflödets hastighet vid varje öppning i A5: diagrammet för alla öppningar (a) och diagrammet för små öppningar i slutet av VALS II (b).

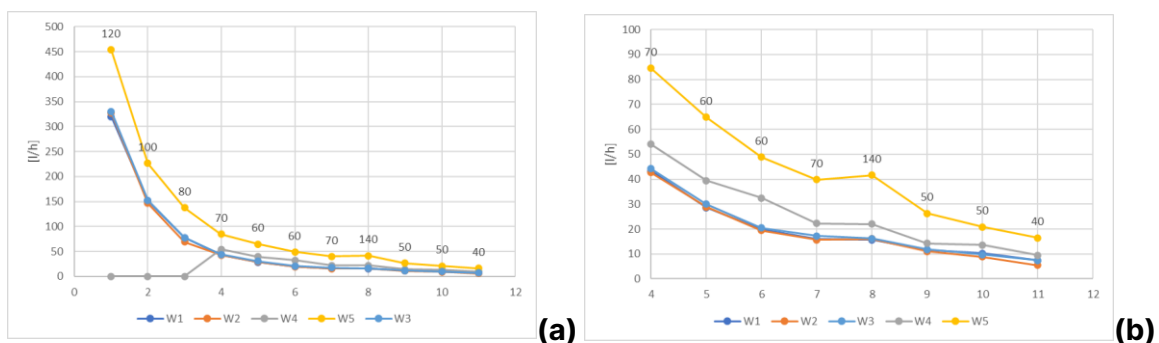
Här var G3-testet endast delvis lyckat och användes inte för beräkning av genomsnittliga tidsvärden för injekteringsbrukets utbredning över avstånd.



Figur 10. Registrerad injekteringsfrontutbredning i A5: grafen för alla tester (a) och medelvärden med anpassad funktion med utesluten G3 (b).

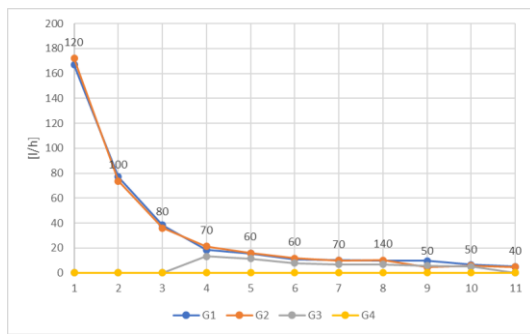
3.1.3 Spaltfördelning A1

Baserat på resultaten av A1-vattentester, vid beräkning av medelvärdet för vattenflödet vid VALS II-utlopp, uteslöts W5-resultat. De andra testrepetitionerna var ganska konsekventa.

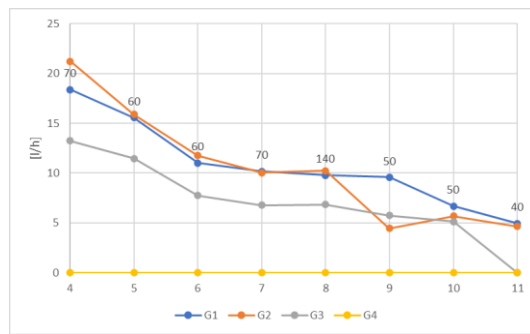


Figur 11. Vattenflödes hastigheten vid varje spalt av A1: grafen för alla spalter (a) och grafen för små spalter i slutet av VALS II (b)

Vid mätning av flödes hastigheten för injekteringsbruk under test G4 inträffade ett dataregistreringsfel för massasensorsignalen (Figur 12), men G4-resultaten inkluderades ändå i analysen av injekteringsbrukets spridning.



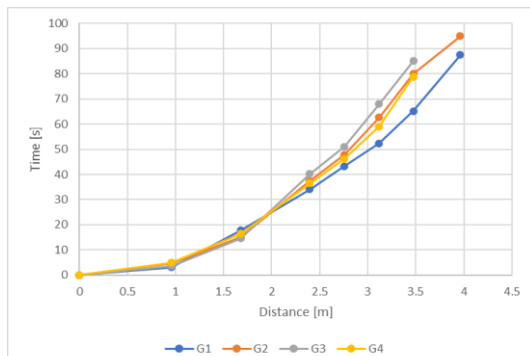
(a)



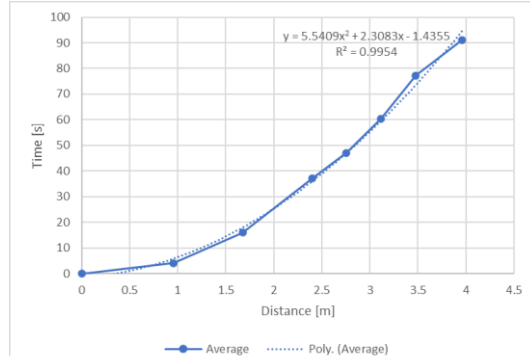
(b)

Figur 12. Flödes hastigheten för injekteringsbruk vid varje spalt av A1: grafen för alla spaltar (a) och grafen för små spaltar i slutet av VALS II (b).

Trots massasensorfelet var registreringen av injekteringsbrukets frontspridning för G4-testet framgångsrik. Testets repeterbarhet var stabil under första halvan av VALS II från inloppet.



(a)



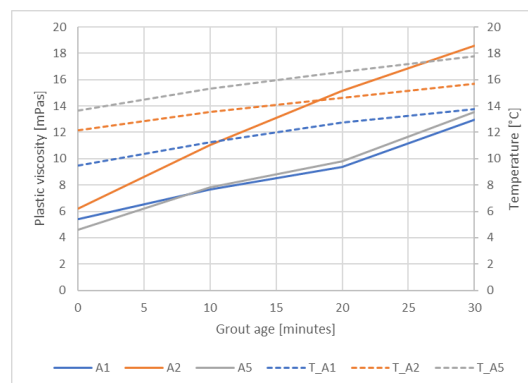
(b)

Figur 13. Registrerad spridning av injekteringsbrukets front i A1: grafen för alla tester (a) och medelvärden med anpassad funktion (b).

3.2 Sammanfattning av experimentella data

3.2.1 Test av injekteringsbrukets reologi

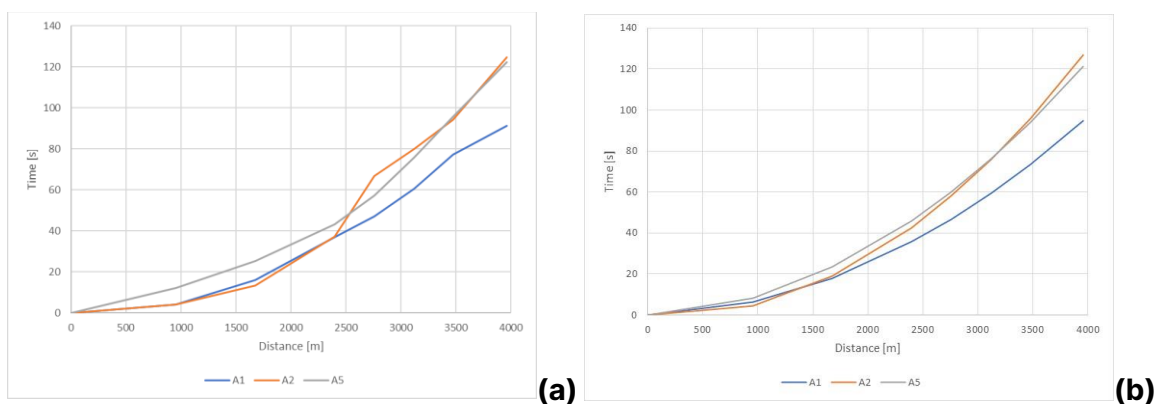
Sammanfattningen av reologitesterna för injekteringsbruk visar att alla injekteringsbrukblandningar uppvisade en linjär ökning av plastisk viskositet över tid (Figur 14). Injekteringsbrukblandningar för A2 visade en snabbare ökning, vilket kan förklaras av lägre vct-tal (se avsnitt 2.4). Injekteringsbrukblandningar för alternativen A1 och A5 visade liknande egenskaper, med något snabbare ökning av plastisk viskositet under tidsramen från 20 minuter till 30 minuter.



Figur 14. Uppmätt genomsnittlig plastisk viskositet och temperatur för injekteringsbruk över tid för alla alternativ för spaltfördelning.

3.2.2 Injekteringsbrukets frontspridning

Från genomsnittsdata av injekteringsbrukets frontspridning (Figur 15) visade spridningen för A2 en brantare kurva jämfört med A1 och A5, vilket också kan förklaras av lägre vct-tal och därmed högre plastisk viskositet för injekteringsbruket. A1 och A5 uppvisar liknande beteende, där spridningen för A1 är snabbare. Detta antas bero på det slumpmässiga mönstret av spaltfördelning i A5 (Figur 4) som bör skapa högre friktionsförlust och därmed bromsa spridningen av injekteringsbrukets front.



Figur 15. Genomsnittlig spridning av injekteringsbrukets front över tid i alla alternativ för spaltfördelning: genomsnittsdata (a) och funktion (b).

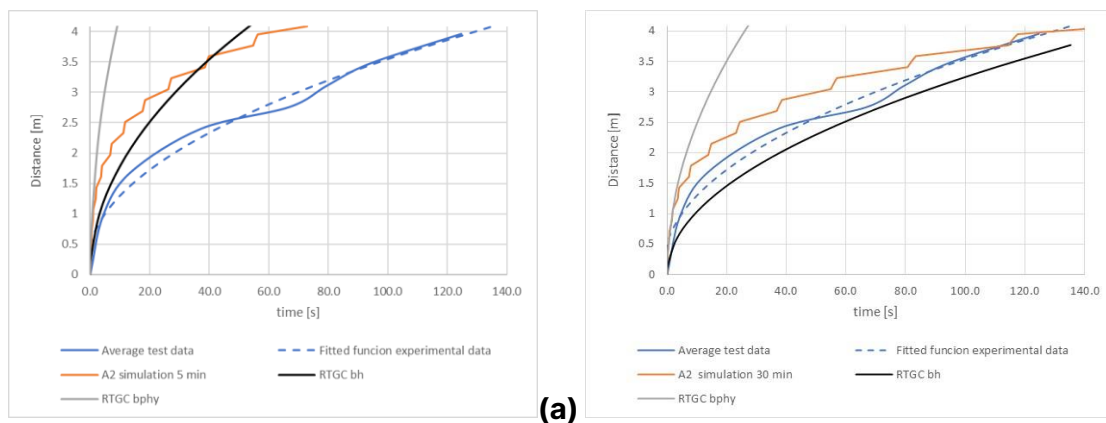
4 Labororiemätningar vs. RTGC-teori och numerisk förutsägelse

4.1 Spaltfördelning A2

Som det framgår av grafen överskattar RTGC-resultaten med b_{phy} kraftigt injekteringsbrukets spridningshastighet. När b_h används är RTGC-förutsägelsen närmare testresultaten, men överskattningen av injekteringsbrukets spridning är fortfarande ganska hög.

Numeriska simuleringsresultat överskattar dock också injekteringsbrukets spridningshastighet och liknar mer förutsägelsen. Det bör noteras att för numeriska simuleringar vid injekteringsbrukets ålder av 0 minuter användes injekteringsbrukets egenskaper vid 5 minuter i stället, eftersom det var den vanliga åldern för injekteringsbruket när dataregistreringen i laborietestet började.

För att förbättra RTGC-förutsägelsen av injekteringsbrukets spridning användes reologidata från senare mätningar efter blandning. Det visade sig att när reologin för injekteringsbruket vid 30 minuters ålder användes, var RTGC b_h förutsägelsen ganska nära experimentella resultat (Figur 16 b) med viss underskattning av injekteringsbrukets spridning. Detta tyder på att reologiegenskaperna för injekteringsbruket vid tiden mellan 20 och 30 minuter bör användas för mer exakt RTGC-förutsägelse. Dessutom förbättras de numeriska simuleringsresultaten också, medan RTGC b_{phy} här fortfarande är långt ifrån experimentella resultat.



Figur 16. RTGC-analys och numeriska simuleringsresultat för alternativ A2 med användning av injekteringsreologiska mätningar som 0 minuter efter blandning (a) och 30 minuter efter blandning (b).

4.2 Spaltfördelning A5

Resultaten av RTGC-analysen för alternativ A5 bekräftar fynden för spaltfördelning A2-tester. Här överskattar RTGC b_h förutsägelsen och den numeriska analysen med reologi vid 0 minuter injekteringsbrukets spridning jämfört med laboratorieresultaten (Figur 17a), medan beräkningar baserade på reologi vid 30 minuter ger en mycket bra överensstämmelse för RTGC b_h med experimentella resultat (Figur 17b) och en liten överskattning för den numeriska simuleringen. För b_{phy} ger RTGC i båda fallen återigen överskattade spridningsförutsägelser.

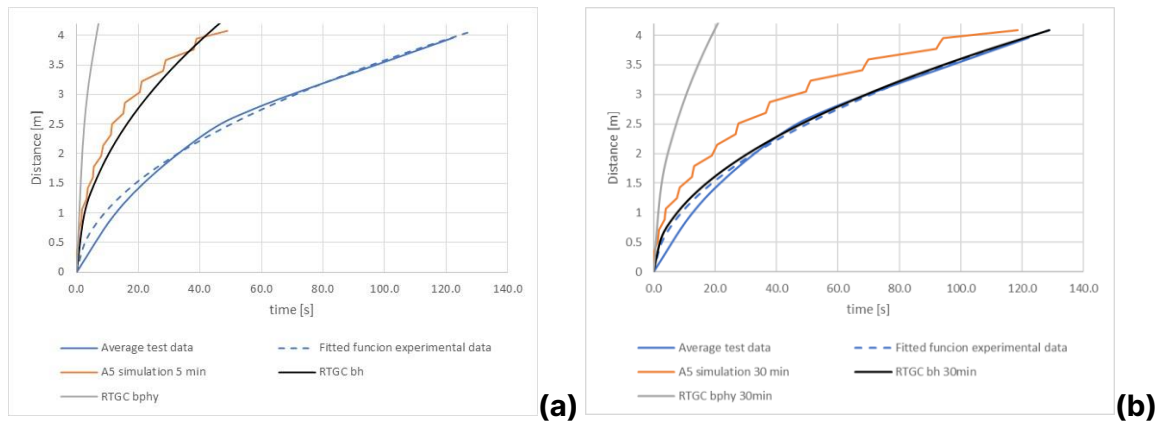


Figure 17. RTGC-analysis och numeriska simuleringsresultat för alternativ A5 med reologimätningar av injekteringsbruk vid 0 minuter efter blandning (a) och 30 minuter efter blandning (b).

4.3 Spaltfördelning A1

RTGC b_h förutsägelsen och den numeriska analysen för A1 följer nära fynden för A5, även om viss underskattning kan observeras för RTGC b_h vid spridningstiden 100 sekunder (Figur 18b). Detta tyder på att extrapolerade egenskaper för injekteringsbruket mellan 20 och 30 minuter bör användas.

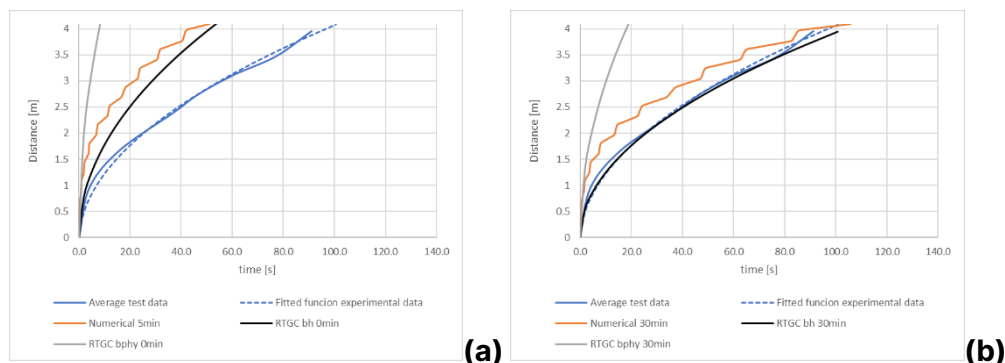


Figure 18. RTGC-analysis och numeriska simuleringsresultat för alternativ A1 med reologimätningar av injekteringsbruk vid 0 minuter efter blandning (a) och 30 minuter efter blandning (b).

5 Slutsatser

Den förbättrade versionen av VALS II designades och konstruerades framgångsrikt. VALS II visade sig vara tät för både vatten- och injekteringsbrukstester under tryck. Resultaten hade god repeterbarhet och visade att efter varje ny montering av VALS II förblir den designade spaltstorleken liknande.

Laboratorietesterna med injekteringsbruk med VALS II visade att filtreringsfenomenet var ganska vanligt. Det inträffade oftast för cementbruk med lägre vct-tal för spaltfördelning A2 och när man jämförde tester med injekteringsbruk med samma vct-tal inträffade det oftare för spaltfördelning A5, dvs. med större geometriska begränsningar jämfört med A1.

Vid mätning av injekteringsbrukets spridning vid spaltfördelningar observerades det att spridningen var långsammare för alternativet med högre begränsningar A5 jämfört med A1, medan den långsammaste spridningen observerades för injekteringsbruk med lägre vct-tal vid spaltfördelning A2.

Även om injekteringsbrukets spridning i bergsprickor styrs av den fysiska spalten b_{phy} visade jämförelsen av RTGC-förutsägelser med experimentella resultat att den hydrauliska spalten b_h bör användas för beräkningar av spridningsavståndet.

RTGC b_h förutsägelsen överskattar injekteringsbrukets spridning över tid jämfört med laboratorieresultaten om reologiska egenskaper vid 0 minuter används. När reologiska egenskaper vid 30 minuter efter blandning används, stämmer RTGC b_h förutsägelserna mycket väl med testresultaten.

Numerisk simulering av injekteringsbrukets spridning baserad på de fysiska variabla spalterna ger mer exakta förutsägelser jämfört med RTGC-lösningen baserad på fysisk spalt. De numeriska resultaten överskattade dock fortfarande penetrationsavståndet jämfört med experimentella testresultat. Den främsta anledningen till den lilla överskattningen jämfört med de experimentella resultaten är att de tidsberoende (kontinuerligt föränderliga) reologiska egenskaperna och den extra friktionsförlusten orsakad av tröghetseffekter inte beaktas i de numeriska simuleringarna. Dessa effekter kan inkluderas i RTGC-förutsägelserna genom att använda den hydrauliska spalten.