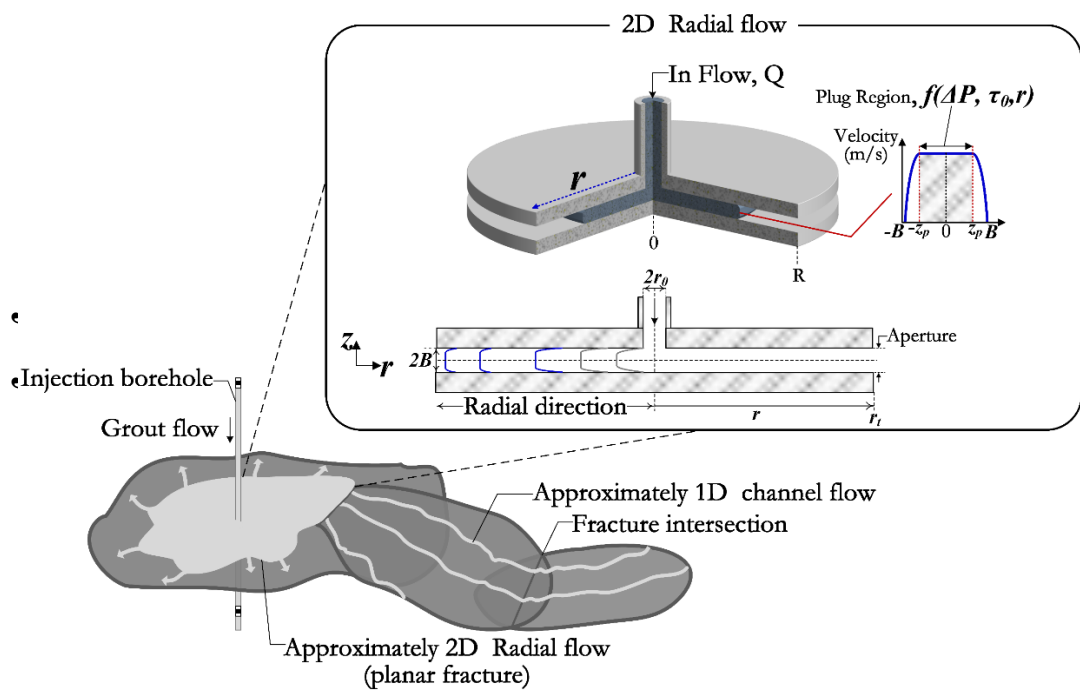


PROCESS OCH KVALITETSKONTROLL AV INJEKTERING



SBUF 13225: Process och kvalitetskontroll av injektering

Doktorand: John Shamu ^a

Handledare: Ulf Håkansson ^{a,b} and Stefan Larsson ^a

^a Kgl Tekniska Högskolan KTH, ^b Skanska Sverige AB ^b

Sammanfattning

Cementbaserade injekteringsmedels reologiska egenskaper har en stor påverkan på strömning och inträngningslängd i sprickigt berg. Medlens reologi är komplex, inklusive tixotropi, men strömningen beskrivs ändå oftast med den enkla Binghammodellen i injekterings-sammanhang. De två parametrarna från denna modell, flytgräns och viskositet, används sedan inom injekteringsdesign, för t.ex. tunnlar och dammar, för att bedöma inträngningen. Eftersom cementbaserade medel är tixotropa suspensioner försvåras utvärderingen vid mätning med konventionella rotationsviskometrar på grund av glidning vid fasta begränsningsytor, sedimentation/separation av partiklarna och instabila flöden vid låga deformationshastigheter. En systematisk mätprocedur för att studera ovanstående problem med rotationsviskometer och koncentriska cylindrar samt olika vanliga vattencementtal, har utförts inom ramen för detta licentiatarbete. Av särskilt intresse har varit att studera effekten av olika geometrier och tidsintervallet mellan mätningarna, inklusive den instabila delen av flödeskurvan **då** deformationshastigheten är lägre än ett kritiskt värde. Denna del av kurvan har i litteraturen beskrivits som karakteristisk för tixotropa suspensioner, t.ex. cementbaserade injekteringsmedel. Praktiskt kan ovanstående kunskap användas för att förbättra mätningen av de reologiska egenskaperna. Existensen av en kritisk deformationshastighet under vilken det inte finns något stabilt flöde, i kombination med glidning vid fasta begränsningsytor, diskuteras särskilt med hänsyn till dess påverkan på faktisk inträngning i släta och raa bergsprickor.

Ett annat fokus i licentiatarbetet har varit att studera icke-Newtonska modellvätskors (Carbopol) radiella strömning mellan parallella plattor. Denna typ av strömning geometri används ofta som en idealiserad konfiguration för strömning i bergsprickor. I jämförelse med andra enklare geometrier, finns endast en begränsad forskning utförd för denna geometri både **då** det gäller analytiska och numeriska beräkningar men framförallt **då** det gäller experiment. Som ett första steg inför en mer systematisk undersökning av icke-Newtonsk radiella strömning presenteras i detta arbete framtagandet av en fysisk laboriemodell där hastighetsprofilerna mellan plattorna för första gången visualiserats med hjälp av ultraljud. De utförda mätningarna med tre olika öppningar mellan plattorna samt tre olika värden på det konstanta flödet, visar på en distinkt plugg som är ett resultat av vätskans flytgräns samt glidning i gränsskiktet mellan vätskan och plattornas fasta begränsningsytor. En jämförelse mellan uppmätta hastighetsprofiler och analytiskt beräknade diskuteras där resultaten överensstämmer relativt väl, med beaktande av de långtgående förenklade antaganden som krävs för de radiella beräkningarna.

Fortsatta studier kommer att fokuseras på att förbättra laboriemodellen **för** en mer detaljerad studie av icke-Newtonska vätskors strömning och hur pluggen utvecklas under den radiella inträngningen, vilket fortsättningsvis är av betydelse för design av injektering i bergsprickor.

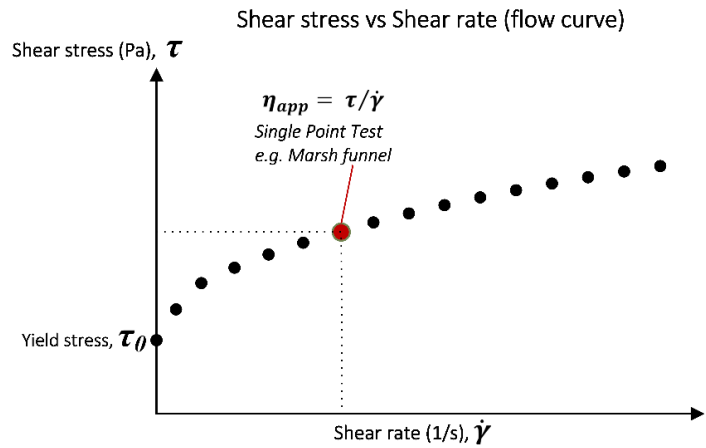
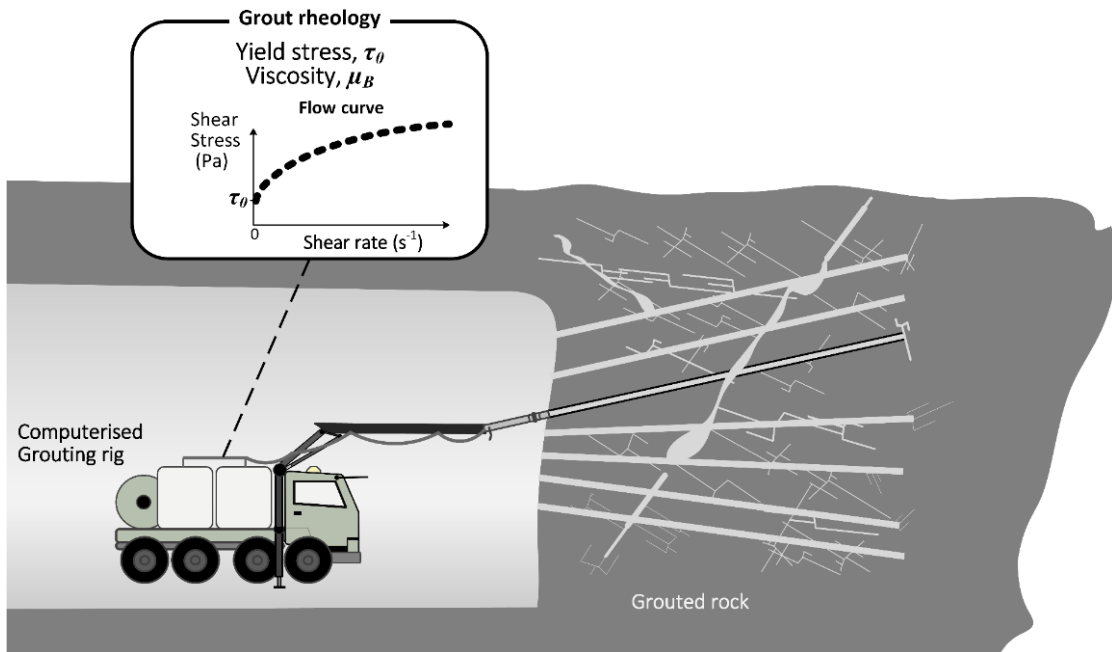
1. Introduktion

Injektering med cementbaserade injekteringsmedel utgör en viktig del inom anläggningsbyggandet i Sverige, tex vid tunneldrivning och dammbyggnad. Cementbaserade medel används främst pga dess relativt låga kostnad

och dess skonsammare miljöpåverkan jämfört med kemiska injekteringsmedel. Miljödomar som föreskriver begränsad vatteninträning i underjordiska tunnlar för att mildra konsekvenser för miljön, t.ex. sättningar och dränering av vattenresurser utgör krav för byggverksamheten [5]. Dessa krav, i kombination med behovet av att minska injekteringstiden och kostnaderna har lett till fokuserad injekteringsforskning som syftar till att förbättra cementbrukens strömningsegenskaper och deras karakterisering för den praktiska användningen.

Det nuvarande forskningsläget relaterat till cementbaserade injekteringsmedels strömningsegenskaper har nu nått en avancerad nivå, där ny digital teknik för kvalitetssäkring, t.ex. ultraljudsbaserade reologiska mätningar testas nu och optimeras för förbättring av injekteringsutförandet [6], [7].

Det ultimata målet att kunna mäta de reologiska egenskaperna direkt och kontinuerligt under injekteringsprocessen (in-line, figur 1c) för processtyrning och kvalitetskontroll, och därmed minska behovet av off-line-metoder och användning av opålitliga och enkla anordningar, t.ex. Marshkon i faktiska fältapplikationer (figur 1a). Enkla anordningar, såsom Marshkon, erbjuder endast en skenbar viskositet i motsats till hela flödeskurvan (se figur 1b). Det finns fortfarande mycket arbete som bör utföras för att förstå de underliggande fenomenen för den komplexa strömningen av cementbruk. Genom att skapa en ökad förståelse för dessa fenomen kan man möjliggöra en implementering av in-line metoder och en förbättring av injekteringsdesign och utförande.

a**b****c**

Figur 1: (a) Marshkon, (b) schematisk flödeskurva, (c) illustration av in-line mätning av reologin på cementbruk under pågående injektering.

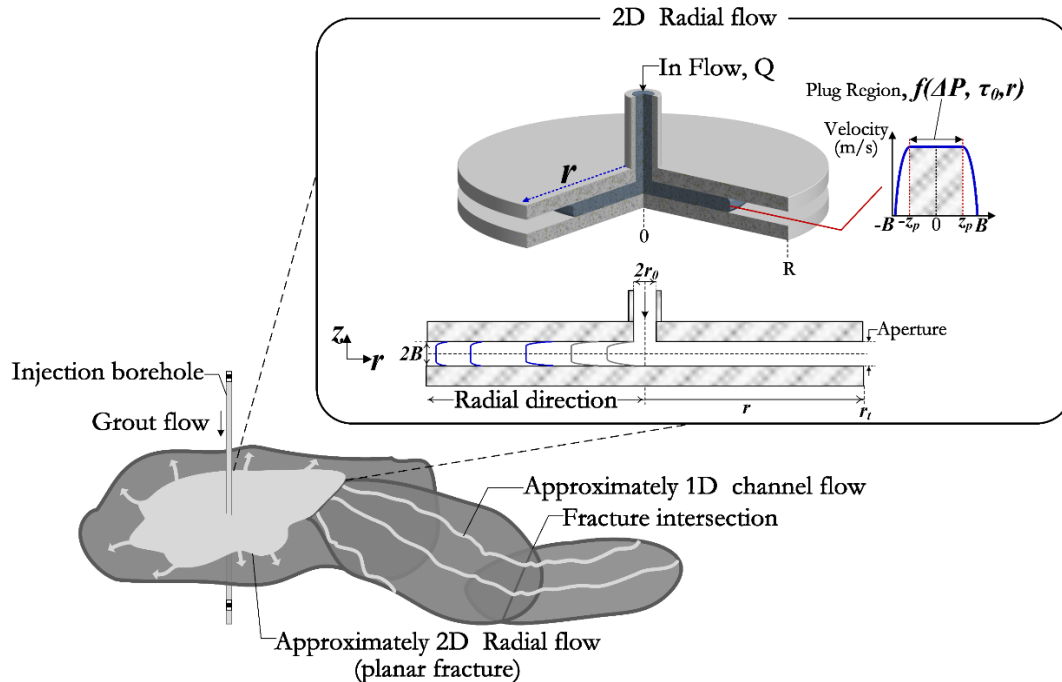
För att mäta de reologiska egenskaperna på ett kontrollerat sätt utförs ofta laboratorieförsök med olika typer av reometrar, tex rotationsviskosimeter (off-line metod). Dessa försök utförs antingen i kontrollerad skjuvhastighetsläge (CSR) eller kontrollerat skjuvspänningläge (CSS), för att erhålla en flödeskurva (skjuvspänning-skjuvhastighetsförhållande) för cementbruket (figur 1b). Resultaterande data från reometermätningar anpassa ofta till Bingham's konstitutiva lag, som är en förenklad modell för att beskriva flödesbeteendet hos vätskar med flytgräns (sk. yield stress fluids, YSF).

Bingham-modellen definieras som: $\tau = \tau_0^B + \mu_B \gamma$, där flytgränsen är τ_0^B , Bingham-viskositeten (plast) är μ_B , τ är skjuvspänningen och γ skjuvhastigheten.

Denna förenklade modell tar dock inte hänsyn till flödesfenomen som: (1) flödeslokalisering i form av skjuvband och skjuvlokalisering, (2) glidning och (3) sedimentation som är vanliga för suspensioner såsom cementbaserade injekteringsmedel.

Flödeslokalisering är när vätskan i flödesgeometri separeras i strömmande och icke-strömmande lager vid låga skjuvhastigheter. Specifikt är skjuvbandning "shear-banding" där lokalisering kopplad till de inneboende fysikaliska materialegenskaperna hos tixotropa suspensioner, t.ex. cementbruk, bentonit och borrhätskor, som inte kan strömma då rådande spänning är lägre än flytspänningen (flytgränsen) och motsvarande kritisk skjuvhastighet; γ_c ; medan skjuvlokalisering är uppdelning i statiska och strömmande band på grund av flödesgeometrin, dvs när flytspänningen τ_0 inte överskrids genom hela gapet [8]. Glidning, sedimentation och sekundärflöde är karakteristiska fenomen för suspensioner som i sin tur påverkas av reometerens geometri och mätintervall t_w . Inom injekteringslitteraturen finns det inte varit mycket forskningsarbete som beskriver den kombinerade effekten av reometerens geometri, mätintervallet på de kritiska skjuvningshastigheterna och glidningsfenomen, som ses i flödeskurvorna för cementbruk, särskilt vid låga skjuvhastigheter (< 10 1/s). För att få en detaljerad förståelse det instabila flödesbeteendet genomfördes en systematisk studie bestående av olika rotationsreometriska test på typiska cementbruk. Resultaten visade att det finns regioner i flödeskurvan som domineras av instabilt flöde under en kritisk skjuvhastighet och glidning som måste beaktas under analysen av flödeskurvor.

För att studera nuvarande beräkningsmodeller inom injektering, som baseras på radiell strömning mellan två planparallella skivor, har en fysisk laboriemodell tagits fram. Flödet, hastighetsprofilen och pluggbildning jämförs mellan modellen och de teorier som idag används inom RTGC (Real Time Grouting Concept). Denna konfiguration, i vilken en vätska tränger in i mitten av två skivor är av intresse för injekteringsdesign, eftersom det idealiskt simulerar cementinjektering från ett centralt injektionsborrhål, varifrån bruket sprider sig radiellt utåt i omgivande sprickor [4], [9] (figur 2). Pluggflödesregionen i hastighetsprofilen för en "Yield-stress fluid" (YSF) är direkt relaterad till vätskans strömningsegenskaper (konstitutiva samband mellan skjuvspänning och deformationshastighet), eftersom pluggregionen är ett icke-skjuvat område, där spänningarna utmed spricköppningen är lägre än flytgränsen. Endast en begränsad mängd forskning har presenterat analytiska och numeriska lösningar som beskriver de förväntade hastighetsprofilerna för (YSF) i denna flödesgeometri [5], [10], [11]. En experimentell studie som ett första steg mot verifiering av befintlig teori, baserad på mätningen av formen på pluggflödesregionen utmed den radiella inträngningen utgjorde också en viktig del av det nuvarande forskningsarbetet.

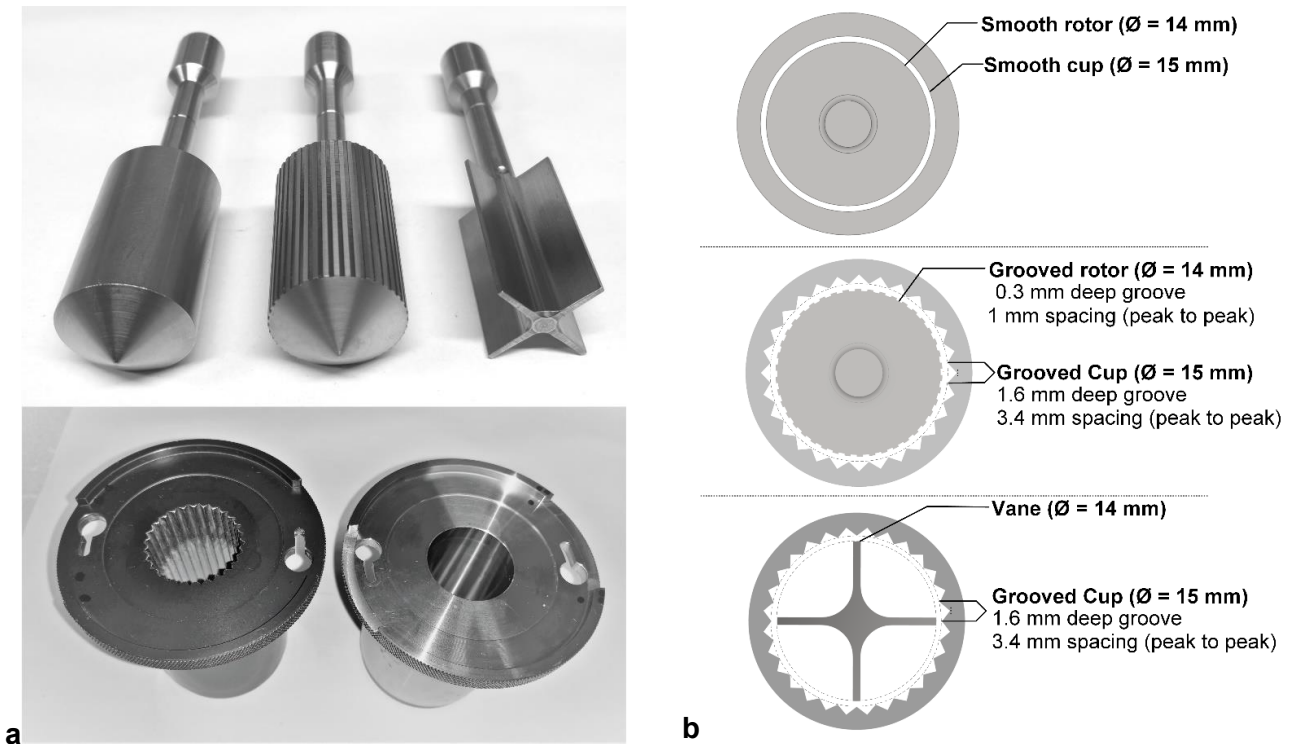


Figur 2: Schematisk illustration av den idealiserade 2D-radiella flödeskonfigurationen och 1D-kanaler

1.1. Mätning av flödeskurvor för cementbruk

Tre olika geometrier på koncentriska cylindrar användes i den systematiska studien av flödeskurvor erhållna från typiska cementbruk framställda med vattencementtal (vct) 0,6 och 0,8. Bruken framställdes från Cementa Injektering 30 (IC30) genom att blanda dem med en skjuvhastighet på 1000 rpm med en höghastighetsblandare under 4 minuter. För att studera beteendet hos ren cement användes inga tillsatser. Efter 2 minuters blandning laddades sedan cementbruken i reometerns behållare (kopp) och förblandades vid 300 1/s för att uppnå en referens för mätningarna, fria från variationer i hanteringen. Hela blandnings- och mätproceduren beskrivs i referens [8].

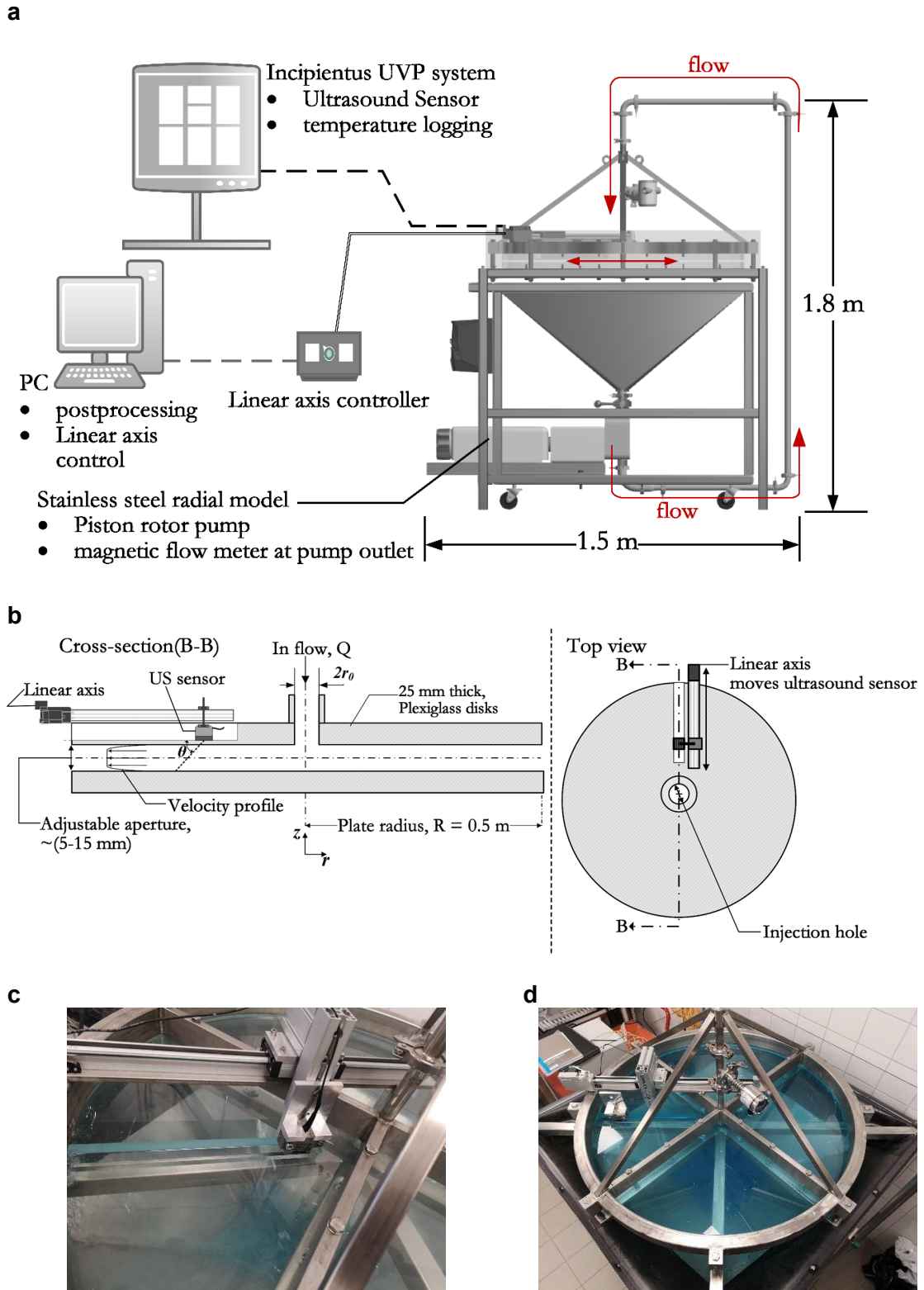
Flödeskurvor erhöles i kontrollerat skjuvhastighetsläge (CSR) med tre olika mätintervall på 4 s; 24 s och 40 s. Mätintervallet definieras som provperioden där skjuvhastigheten hålls konstant innan skjuvspänningen registreras. Figur 3 visar de olika geometrier på reometern som användes.



Figur 3: Reometer geometrier (a) övre raden från vänster, 14 mm diameter DIN-rotor (slät), 14 mm diameter räfflad rotor och fyrblads vinge med 14 mm i diameter; nedre raden från vänster räfflad kopp och slät kopp. (b) Kombinerade geometrier (uppifrån och ner) slät kopp och slät rotor, räfflad rotor och räfflad kopp samt vinge och räfflad kopp.

1.2. Radial flow experiments and Ultrasound Velocity Profiling (UVP)

Den ursprungliga utformningen av den fysiska radiella modellen baserades på modeller presenterade i litteraturen [12], [13]. Målet var att ha ett radiellt flöde som var fritt från hindrande föremål, t.ex. fästelement, för att noggrant studera det radiella flödet av Carbopol. Hela uppställningen inklusive en bild av den faktiska modellen som används visas i figur 4. Komponenterna inkluderade en magnetisk flödesmätare (Discomag DMI 6531, Endress + Hausser) vid pumpputtaget och en PT100-temperaturgivare.



Figur 4: Radiell flödesmodell (a) schematiskt illustration av det radiella flödessystemet (b) flödesområdet mellan de parallella plattorna och den motoriserade linjära axeln (c) bild som visar ultraljudssensor i slitsen (d) bild av ekerramen.

En kolvrotorpump användes för att pumpa vätskan vid valda flödeshastigheter som reglerades från en frekvensomriktare (VSD). Vätskan cirkulerades sedan från botten av tanken in i det radiella flödesområdet där mätningen utfördes. En motoriserad linjär axel (Isel LEZ 1) med en repeterbarhet på $\pm 0,2$ mm användes för att flytta ultraljudssensorn (US-sensorn figur 4b) som användes för att erhålla hastighetsprofilen vid olika radiella avstånd. Scheman och bilder av den linjära axeluppsättningen och den radiella modellen visas i figur 4. Slitsen som visas i figur 4b och 4c skars i den övre skivan för att möjliggöra tillräcklig spridning av ultraljudstrålen, utan betydande dämpning pga skivans tjocklek. Efter bearbetningen var väggtjockleken i slitsen 5 mm (ursprungligen 25 mm). Det önskade spalten (öppningen) mellan skivorna uppnåddes med ett metalliskt distanssystem runt skivans periferi. Den övre ekramen användes som stöd för toppskivan för att bibehålla önskad öppning även vid höga flödes- och tryckförhållanden.

1.3. Carbopol

En modellvätska, Carbopol 980 (Lubrizol®, Belgien), användes för studien i stället för cement för att studera vätskans strömning utan störning från tixotropiska och tidsberoende (från hydratiseringen) effekter som är karakteristiska för cement. Carbopol vätskan framställdes enligt [14], [15] med blått färgämne och spårpartiklar för att underlätta ultraljudshastighetsmätningen. De reologiska parametrarna som var representativa för Carbopol var: Herschel Bulkley-parametrar $\tau_0 = 2,24$ Pa, $k = 2,28$ Pasⁿ och $n = 0,4$ (se [16]).

1.4. Mätning med ultraljud - Ultrasound Velocity Profiling (UVP)

UVP-metoden som används för att mäta hastighetsprofiler är en metod som har använts för ett brett spektrum av komplexa vätskor, allt från livsmedelsprodukter till mineralsuspensioner [7], [17]. De individuella hastigheterna vid varje punkt i flödesgeometrin där hastighetsprofilen mäts beräknas som, där f_c är den centrala ultraljudstransmissionsfrekvensen, är ljudets hastighet, Doppler-växelfrekvensen för partiklar som strömmar vid ett visst avståndsläge (grind) och är Doppler-vinkeln. Flera studier har visat att noggrannheten för hastighetsuppskattningen beror på korrekt bestämning av ljudhastigheten i vätskan som studeras samt Doppler-vinkeln, där bidraget från felaktiga vinkelvärden är ganska betydande. Därför utfördes i detta arbete mätningen av denna vinkel i detalj med hjälp av en nålhydrofon enligt [18].

När rätt Doppler-vinkel och ljudets hastighet var bestämda användes de sedan som ingångsparametrar till UVP-mjukvaran för Incipientus Flow Visualizer (IFV) -systemet som användes i denna studie. Den senaste systemutvecklingen har skett beträffande elektronik och icke-invasiva sensorer, som kan mäta genom industriella stålrör [7], [18], [19], www.incipientus.com. Hastighetsprofiler erhöles längs den radiella slitsen som visas i figur 4b. Före varje hastighetsprofil cirkulerades Carbopol vätskan först i flödesslingan under 2 minuter för att få en homogen vätska vid mätningen.

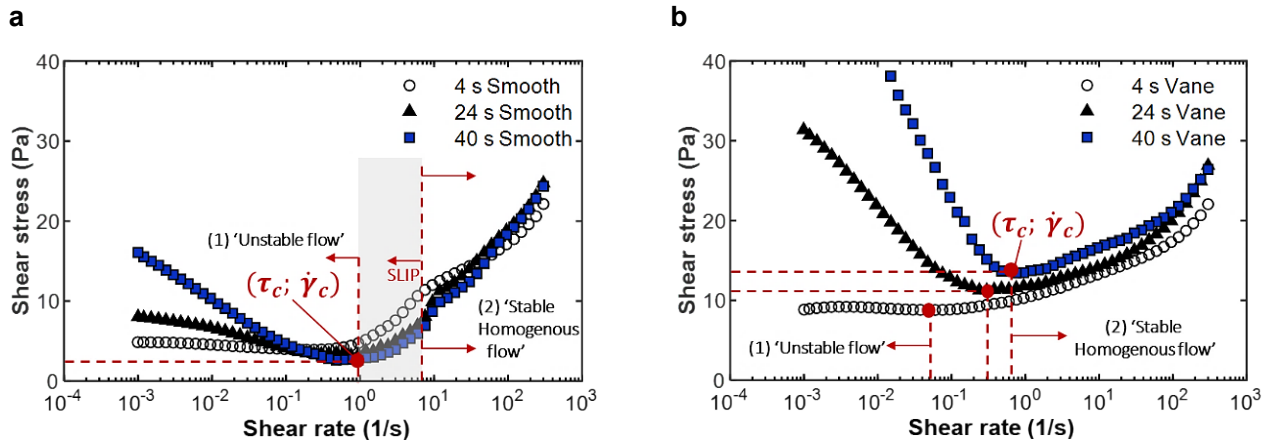
Pluggbestämning: Som en del av arbetet utvecklades en anpassad CUSUM-plugg algoritm för att uppskatta den relativa plug-regionen i varje profil (se [16]).

3. Resultat

3.1. Flödeskurvor: kontrollerad skjuvhastighet (CSR) i Couette geometri

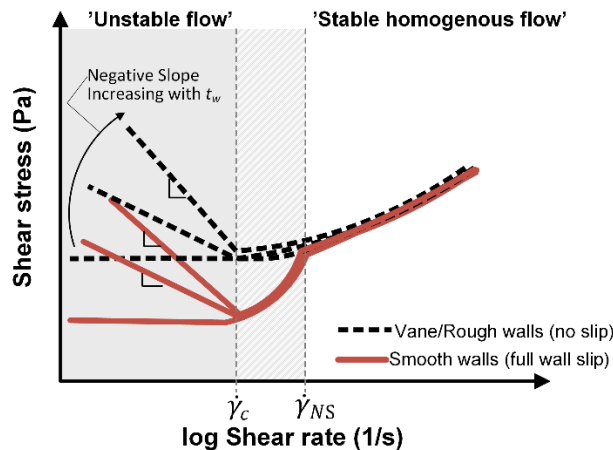
Flera flödeseffekter observerades i de uppmätta kurvorna för de tre olika geometrierna och de tre mätintervallen för de två cementbruken (vct = 0,6; 0,8). Figur 5 belyser den stora skillnaden mellan flödeskurvor från den helt släta geometrin jämfört med den räfflade geometrin. Effekten av signifikant glidning vid väggen ses i mätningarna med den släta geometrin, med början vid ~ 10 1/s (figur 5a). Med den räfflade geometri minskades avsnittet väsentligt, men dessa data hade mycket högre uppmätta spänningsvärden, särskilt för längre mätvärden (= 24 s, 40 s) och under den kritiska skjuvhastigheten ($\dot{\gamma}_c$), där instabila flöden framgår (avtagande del av flödeskurvan) (figur 5b). De högre spänningsvärdena i data för den räfflade geometrin, jämfört med de andra flödeskurvorna, berodde främst på ökad strukturell uppbyggnad, sedimentation och eventuellt sekundära flöden då vingen används. Den räfflade koppen och rotorn förväntades minska glidningen,

men detta var inte uppenbart. Glidning vid vägen observerades också för denna geometri även om den var något mindre jämfört med den helt släta geometrien. Den räfflade geometrin visade därför att en speciell, vätskeberoende, råhet är nödvändig för att minska glidningen för suspensioner som cementbruk.



Figur 5: Flödeskurvor av cementbruk vid vct (vattencementtal) 0,6; (a) slät kopp och slät rotor; (b) vinge och räfflad kopp [16].

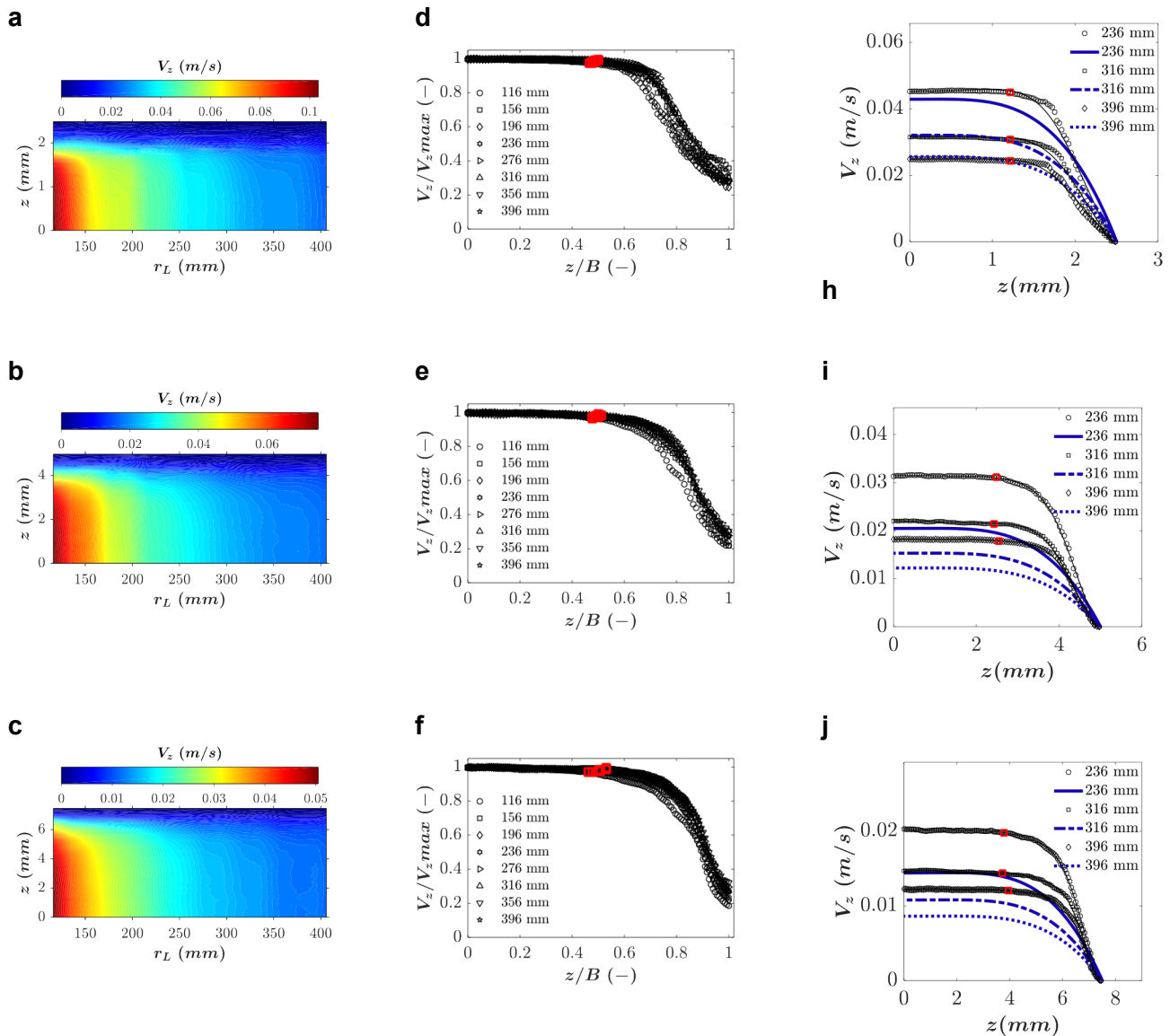
Den kompletta uppsättningen flödeskurvor från samtliga mätningar, inklusive kurvanpassning till Binghammodellen, framgår av [8]. Här illustreras ett förenklat schema för att sammanfatta de viktigaste resultaten från studien (figur 6). Mätningarna visar i allmänhet När de CSR-baserade flödeskurvorna ritas i linjär-logaritmiskt format visar mätningarna att det finns en instabil flödesregim under en kritisk skjuvhastighet. För de slätare geometrierna dominerar glideffekterna till en ungefärlig deformationshastighet (no-slip). För de testade cementbruken (vct 0,6 och 0,8) nådde glidhastigheten ett värde på 10 1/s och den kritiska skjuvningshastigheten låg inom intervallet 0,1-1 1/s. Därför bör data under (no-slip) elimineras från flödeskurvanalys när man använder helt släta geometrier.



Figur 6: Generaliserad CSR flödeskurvor för typiska cementbruk (vct: 0,6 och 0,8) vid olika mätintervall och koncentrisk cylindergeometri.

3.2. Hastighetsprofiler vid radiell strömning

Hastighetsprofilerna uppmätta i den radiella flödesmodellen visade att det för vätskor med en flytgräns spänning, existerar en distinkt plugg vid radiellt flöde. Som väntat för släta plexiglasväggar fanns det en betydande glidning vid väggarna som noterades som vägghastigheter skilt från noll, dvs. $\sim 0,2-0,4$ av den maximala axiella hastigheten (figur 7d, e, f). Efter korrigering för glidning, blir det en relativt bra överensstämmelse mellan de analytiska bestämda hastighetsprofilerna och de uppmätta (Figur 7b). Glidningen ökade troligen också den totala pluggtjockleken på grund av mindre skjuvdeformation. Dessutom kan pluggen form ha ökat betydligt genom sekundärt flöde på grund av Carbopol vätskans elasticitet. Dessa och andra relaterade flödes effekter som kunde ha varit närvarande i de radiella data som presenteras här måste systematiskt studeras vidare men ligger utanför ramen för det aktuella arbetet i denna avhandling.



Figur 7: Färgkonturer för hastighetsprofilerna vid 40 l/min, för öppningar (a) 5 mm, (b) 10 mm och (c) 15 mm; motsvarande normaliserade hastighetsprofiler (d) 5 mm, (e) 10 mm och (f) 15 mm, de röda rutorna är

pluggregionen baserat på CUSUM-beräkningen; jämförelser av analytiska och uppmätta hastighetsprofiler vid vald radiell position (h) 5 mm, (i) 10 mm och (j) 15 mm.

4. Slutsatser och förslag på fortsatt arbete

Syftade med detta arbetet har varit att bättre förstå reologiska mätningar gjorda på cementbruk och andra ”Yield-stress fluids” (YSF) och deras tillämpning vid injektering av bergsprickor. De viktigaste slutsatserna från detta arbete sammanfattas enligt följande:

- I allmänhet beror de CSR-baserade flödeskurvorna för cemenbruk på mätprotokollet, inklusive testgeometri och mätintervall. De resulterande flödeskurvorna kan separeras i två regioner: (i) instabilt flöde under en kritisk skjuvhastighet, där flödeslokalisering (skjuvllokalisering och skjuvbandning) förekommer, särskilt vid längre testintervall (ii) ett stabilt homogent skjuvområde för skjuvhastigheter ovan den kritiska skjuvhastigheten. Vägglidningseffekter som ses med släta geometrier under γ_{NS} kan elimineras med hjälp av att använda en vinge. Vingen är emellertid mer lämpad för korta testintervall, eftersom den är mer mottaglig för tixotropa effekter, sekundära flöden och sedimentation.
- För radiell strömning användes ultraljudshastighetsmätningen framgångsrikt för att mäta radiella hastighetsprofiler. Mätningarna visade att det finns distinkta pluggregioner, och för längden på den använda experimentella modellen var pluggen relativt konstant. De aktuella resultaten är emellertid inte helt entydiga eftersom det fanns en viss skillnad med analytiska förutsägelser som behöver ytterligare undersökning. Dessa skillnader förklaras av närvaron av glidning vid väggarna, otillräckliga längder för att uppnå utbildad strömning, vissa felaktigheter i data nära väggarna och den troliga förekomsten av sekundära flöden.
- I framtiden kommer arbetet med mätning av cementbruk att fokuseras på att utveckla de befintliga inline-metoderna för kontinuerlig mätning baserat på ultraljud, samtidigt som man använder den kunskap som samlas in från de off-line mätningar som idag utförs. När det gäller den radiella modellen kommer några justeringar av den existerande modellen att utföras.

5. Referenser

- [1] U. Håkansson, “Rheology of fresh cement-based grouts,” KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, 1993.
- [2] Å. Fransson, J. Funchag, and J. Thörn, “Swedish grouting design: hydraulic testing and grout selection,” *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement*, vol. 169, no. 4, pp. 275–285, Nov. 2016.
- [3] L. Zou, U. Håkansson, and V. Cvetkovic, “Two-phase cement grout propagation in homogeneous water-saturated rock fractures,” *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 106, pp. 243–249, Jun. 2018.
- [4] H. Stille, *Rock grouting - Theories and Applications*. Stockholm: Vulkanmedia, 2015.
- [5] G. Gustafson, J. Claesson, and Å. Fransson, “Steering Parameters for Rock Grouting,” *Journal of Applied Mathematics*, vol. 2013, 2013.
- [6] M. Rahman, U. Håkansson, and J. Wiklund, “In-line rheological measurements of cement grouts: Effects of water/cement ratio and hydration,” *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 45, pp. 34–42, Jan. 2015.
- [7] M. Rahman, J. Wiklund, R. Kotzé, and U. Håkansson, “Yield stress of cement grouts,” *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 61, pp. 50–60, Jan. 2017.
- [8] T. J. Shamu and U. Håkansson, “Rheology of cement grouts: On the critical shear rate and no-slip regime in the Couette geometry,” *Cement and Concrete Research*, p. S0008884619301437, May 2019.
- [9] U. Håkansson, “Rheology of fresh cement-based grouts,” Royal Institute of Technology, Stockholm, 1993.
- [10] G. Dai and R. Byron Bird, “Radial flow of a Bingham fluid between two fixed circular disks,” *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, vol. 8, no. 3–4, pp. 349–355, Jan. 1981.
- [11] T. J. Shamu, L. Zou, R. Kotzé, J. Wiklund, and U. Håkansson, “Radial flow velocity profiles of a yield stress fluid between smooth parallel disks,” Apr-2019.
- [12] S. B. Savage, “Laminar Radial Flow Between Parallel Plates,” *Journal of Applied Mechanics*, vol. 31, no. 4, p. 594, 1964.
- [13] B. R. Laurencena and M. C. Williams, “Radial Flow of Non-Newtonian Fluids Between Parallel Plates,” *Transactions of the Society of Rheology*, vol. 18, no. 3, pp. 331–355, Sep. 1974.
- [14] M. Dinkgreve, M. M. Denn, and D. Bonn, “‘Everything flows?’: elastic effects on startup flows of yield-stress fluids,” *Rheologica Acta*, vol. 56, no. 3, pp. 189–194, Mar. 2017.

- [15] E. Di Giuseppe *et al.*, “Characterization of Carbopol® hydrogel rheology for experimental tectonics and geodynamics,” *Tectonophysics*, vol. 642, pp. 29–45, Feb. 2015.
- [16] T. J. Shamu, “On the measurement and application of cement grout rheological properties,” KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, 2019.
- [17] J. Wiklund, I. Shahram, and M. Stading, “Methodology for in-line rheology by ultrasound Doppler velocity profiling and pressure difference techniques,” *Chemical Engineering Science*, vol. 62, no. 16, pp. 4277–4293, Aug. 2007.
- [18] T. J. Shamu, R. Kotze, and J. Wiklund, “Characterization of Acoustic Beam Propagation Through High-Grade Stainless Steel Pipes for Improved Pulsed Ultrasound Velocimetry Measurements in Complex Industrial Fluids,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 16, no. 14, pp. 5636–5647, Jul. 2016.
- [19] S. Ricci, V. Meacci, B. Birkhofer, and J. Wiklund, “FPGA-Based System for In-Line Measurement of Velocity Profiles of Fluids in Industrial Pipe Flow,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 5, pp. 3997–4005, May 2017.