







BINGHAMPLUGGENS UTSEENDE VID TVÅ-DIMENSIONELL RADIELL STRÖMNING.

John Shamu, Ulf Håkansson

November 2019

SBUF stödjer forskning & utveckling

> som leder till praktisk handling

SBUF 13470: Binghampluggens utseende vid två-dimensionell radiell strömning.

Doktorand: John Shamu^a

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

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

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 injekteringssammanhang. De två parametrarna från denna modell, flytgräns och viskositet, används sedan inom injekteringsdesign, för t.ex. tunnlar och dammar, för att bedöma inträngningen.

Det presenterade arbetet är en del av en licentiatavhandling som studerar icke-Newtonska modellvätskors (Carbopol) radiella strömning mellan parallella plattor. Denna typ av strömningsgeometri 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 laboratoriemodell 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 laboratoriemodellen 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 vatteninträngning i underjordiska tunnlar för att mildra konsekvenser för miljön, t.ex. sättningar och dränering av vattenresurser utgör krav för byggverksamheten [1]. 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 praktisk användning.

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 [2], [3]

Det ultimata målet är 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 simpla 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.



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

För att studera nuvarande beräkningsmodeller inom injektering, som baseras på radiell strömning mellan två planparallella skivor, har en fysisk laboratoriemodell 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], [5] (figur 2). Plugflödesregionen 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 mindre än flytgränsen. Endast en begränsad mängd forskning har

presenterat analytiska och numeriska lösningar som beskriver de förväntade hastighetsprofilerna för (YSF) i denna flödesgeometri [1], [6], [7]. 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 illustrering av den idealiserade 2D-radiella flödeskonfigurationen och 1D-kanaler

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 3. Komponenterna inkluderade en magnetisk flödesmätare (Discomag DMI 6531, Endress + Hausser) vid pumputtaget och en PT100-temperaturgivare.

En kolvrotorpump används 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 3b) som används för att erhålla hastighetsprofilen vid olika radiella avstånd. Scheman och bilder av den linjära axeluppsättningen och den radiella modellen visas i figur 3. Slitsen som visas i figur 3b och 3c 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). Den 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.



Figur 3: Radiell flödesmodell (a) schematisk 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.

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 [8], [9] 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 [10]).

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

UVP-metoden för att mäta hastighetsprofiler har använts för ett brett spektrum av komplexa vätskor, från livsmedelsprodukter till mineralsuspensioner [3], [11]. De individuella hastigheterna vid varje punkt i flödesgeometrin där hastighetsprofilen mäts beräknas som,

$v_i = c f_{d_i} / 2 f_0 cos \theta$

där f_0 är den centrala ultraljudstransmissionsfrekvensen, c är ljudets hastighet, f_{d_i} Doppler-växelfrekvensen för partiklar som strömmar vid ett visst avståndsläge (grind) och θ 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 [12].

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 [3], [12], [13] (www.incipientus.com). Hastighetsprofiler erhölls längs den radiella slitsen som visas i figur 3b. 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 plugg-regionen i varje profil (se [10]). CUSUM-algoritmen syftade till att noggrant identifiera plugg-regionen i det strömmande tvärsnittet, genom en serie beräkningssteg. Först utjämnades originaldata för att minimera lokala fluktuationer och brus i hastighetsprofilen; denna profil normaliserades sedan i förhållande till den maximala hastigheten i tvärsnittet (dvs i mitten). Sedan beräknades medianvärdet samt standardavvikelsen för en fjärdedel av de totala hastighetspunkterna, som en tillförlitlig uppskattning av plugghastigheten. Slutligen beräknades startpositionen för plugg-regionen som den punkt vid vilken hastighetsprofilstorleken var 6 standardavvikelser under medianvärdet för plugghastigheterna.

2. Resultat

2.1. 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. ~ 0,2-0,4 av den maximala axiella hastigheten (figur 4d, e, f). Efter korrigering för glidning, blir det en relativt bra överensstämmelse mellan de analytiska bestämda hastighetsprofilerna och de uppmätta (Figur 4b). 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 flödeseffekter 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 4: 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.

3. Slutsatser och förslag på fortsatt arbete

Syftet 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:

• 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 jämfört 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 in-line 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.

4. Referenser

- [1] G. Gustafson, J. Claesson, and Å. Fransson, "Steering Parameters for Rock Grouting," *Journal of Applied Mathematics*, vol. 2013, 2013.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] H. Stille, Rock grouting Theories and Applications. Stockholm: Vulkanmedia, 2015.
- [5] U. Håkansson, "Rheology of fresh cement-based grouts," KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, 1993.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] M. Dinkgreve, M. M. Denn, and D. Bonn, "Everything flows?': elastic effects on startup flows of yieldstress fluids," *Rheologica Acta*, vol. 56, no. 3, pp. 189–194, Mar. 2017.
- [9] E. Di Giuseppe *et al.*, "Characterization of Carbopol® hydrogel rheology for experimental tectonics and geodynamics," *Tectonophysics*, vol. 642, pp. 29–45, Feb. 2015.
- [10] T. J. Shamu, "On the measurement and application of cement grout rheological properties," KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, 2019.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.