

Flow-Viz, ultraljudsbaserad in-line karakterisering och styrning av flödesegenskaper hos injekteringsmedel i realtid.

Flow-Viz, ultrasound based in-line characterization and real-time control of the flow properties of cementitious material.

Ulf Håkansson, PhD, Skanska AB/KTH

Johan Wiklund, PhD, SP-Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

Sammanfattning

Injektering med cementbaserade medel används inom undermarksbyggande för att tätta tunnlar och bergrum mot inläckande vatten och för att minska grundvattensänkning och därmed risken för sättningar. Reologiska flödesegenskaper såsom viskositet och flytgräns är oftast de viktigaste styrparametrarna för att kunna kontrollera och säkerställa en hög och jämn kvalitet för injekteringsarbetet. Trots detta mäts reologiska flödesegenskaper än idag främst med hjälp av enkla empiriska mätanordningar som kräver ett provuttag från processlinjen, som sedan måste analyseras av en operatör i ett provisoriskt fältlab eller efter lång tid och under andra förhållanden i laboratorium. Operatören har stort inflytande på de uppmätta resultaten vilket leder till stora variationer i de uppmätta värdena och resultaten kan de inte användas för effektiv process- och kvalitetsstyrning. Det behövs en robust mätstandard där kriterierna för hur de reologiska egenskaperna i detalj skall utvärderas, t.ex. över vilket spann på skjuvhastighet som den linjära Binghammodellen skall appliceras. Tyvärr har inte särskilt mycket skett på detta område de senaste 30 åren och slutkommentaren i Håkanssons (1993) avhandling har relevans än idag: "Also, the development of "on-line" measurements is needed so that significant properties can be continuously measured during a grouting operation."

I detta arbete har vi presenterat Flow-Viz som är det första kommersiellt tillgängliga in-line karakteriseringssystemet för industriella tillämpningar. Det har utformats särskilt för icke-invasiv, in-line, kontinuerlig, i realtid hastighetsprofil och reologisk bedömning av ogenomskinliga, icke-newtonska industriella vätskor. Flow-Viz-systemet har installerats i pilotanläggningar för internationella företag och används även för akademiska forskning på injekteringsbruk. Med nya verktyg som Flow-Viz är det möjligt att styra och kontrollera injekteringsprocessen och på så vis uppnå önskat resultat.

Summary

Grouting with cement-based medium is used in underground construction to seal the tunnels and caverns against water ingress and to reduce the lowering of the groundwater level and hence the risk of settlement. Rheological flow properties, such as viscosity and yield stress, are usually the most important parameters to control and ensure a high and consistent quality of the

grout. Despite this, rheological flow properties are still today mainly measured using simple empirical measurement devices that require a sampling from the process line, which must then be analyzed by an operator in a provisional field lab or after a long period of time and under other conditions in a laboratory. The operator thus has great influence on the measured results leading to large variations in the measured values and results cannot be used for effective process and quality control. A robust measurement method and instrument is therefore needed in combination with criteria for how the rheological properties shall be evaluated, for example, over which range in shear rate as the linear Bingham model can be applied. Unfortunately, not much has happened in this area over the last 30 years and the final comment in Håkansson (1993) thesis still applies today: "Also, the development of" on-line "measurements is needed so that significant properties can be continuously measured during a grouting operation." In this work, we have presented Flow-Viz, which is the first commercially available in-line characterization system for industrial applications. It has been designed specifically for non-invasive, in-line, continuous, real-time velocity profile and rheological characterization of opaque, non-Newtonian industrial fluids. The Flow-Viz system has been installed in pilot plants for international companies and is used for academic research on cement grouts. With new in-line tools like Flow-Viz, it is possible to control the injection grouting process and thus to achieve the desired grouting results.

Inledning

Injektering med cementbaserade medel används inom undermarksbyggande för att tätta tunnlar och berggrum mot inläckande vatten och för att minska grundvattensänkning och därmed risken för sättningar. I samtliga undermarksprojekt i Sverige utförs en miljöprövning med resulterande miljödömdom som dikterar maximalt tillåtet inläckage till anläggningen. De flesta infrastrukturprojekt är idag förlagda till urbana miljöer och kostnaderna för att undvika vattenrelaterade problem och uppfylla miljödömdomar utgör i storleksordningen 10 % av projektets totalkostnad. Trots att injektering utgör en stor del av den totala kostnaden för ett undermarksprojekt finns det idag ingen standardiserad metodik för mätning av injekteringsmedels reologiska egenskaper. Den svenska injekteringsforskningen de senaste 30 åren är världsledande men det återstår mycket arbete med att demonstrera och implementera forskningsresultaten i praktisk tillämpning. Här har alla parter i anläggningsbranschen ett stort ansvar om nödvändiga framsteg skall vara möjliga i framtiden.

Reologiska flödesegenskaper såsom viskositet och flytgräns är oftast de viktigaste styrparametrarna för att kunna kontrollera och säkerställa en hög och jämn kvalitet på injekteringsbruket. Trots detta mäts reologiska flödesegenskaper än idag främst med hjälp av enkla empiriska mätanordningar eller i bästa fall med konventionella roterande viskometrar eller reometrar. Det största problemet med båda typerna av nämnda instrument är att de kräver ett provuttag från processlinjen, som sedan måste analyseras i ett provisoriskt fältlab eller i ett riktigt laboratorium off-site. Den mest lovande mätprincipen bygger istället på det så kallade

tubviskosimeter-konceptet där man mäter ett volymsflöde i kombination med tryckfall över en känd sträcka. Ifrån volymsflödet kan man beräkna skjuvhastigheten och ifrån tryckfallet får man skjuvspänningen invid väggen och detta medför att man kan beräkna viskositet i en punkt. Ett problem är att detta är en enpunktsmätning och därför endast kan användas för de enklaste Newtonska vätskorna medans mer än 95% av alla industriella vätskor uppvisar icke-Newtonskt beteende (Barnes 1999, Roberts 2000).

Även om ovannämnda instrument och metoder ofta är enkla att använda är det tidskrävande och operatören har stor påverkan på de uppmätta resultaten. Detta leder till stora variationer i de uppmätta värdena och eftersom dessa mätmetoder och instrument kräver provuttag och är tidskrävande kan de inte heller användas för effektiv process- och kvalitetsstyrning. Det enda sättet att få ökad kunskap om injekteringsbruk och dess flödesegenskaper och att kunna styra dessa för att uppnå en förbättrad kvalitetskontroll är att införa kontinuerliga mätningar av viktiga kvalitetsparametrar såsom viskositet och flytgräns direkt i processlinjen. Några få processreometrar har testats för ett litet antal industriella tillämpningar, men eftersom de endast kan mäta viskositeten för en enda skjuvhastighet har de haft mycket begränsad framgång. Fram tills nu har det inte funnits någon praktisk in-line lösning för icke - Newtonska och ogenomskinliga industriella vätskor (Roberts 2000).

Flow-Viz är det första kommersiella instrument som möjliggör mätningar av flödesegenskaper hos industriella vätskor direkt i processlinjen. Flow-Viz är en teknikplattform, baserad på en pulsad ultraljudsteknik, som används i kombination med tryckfallmätningar för att bestämma reologiska flödesegenskaper (Wiklund). Flow-Viz är alltså en förbättrad version av en konventionell tubviskosimeter men som till skillnad ifrån dessa ger en komplett flytkurva, kontinuerligt och i realtid. Beröringsfria och kontinuerliga mätningar av kvalitetsparametrar med hjälp av Flow - Viz instrumentet möjliggör snabb karakterisering av vätskeflödesegenskaper, förbättrad kunskap om produkttegenskaper, tidig feldetektering och möjlighet till snabba korrigeringar av processparametrar, vilket leder till förbättrat injekteringsresultat. Slutmålet är en komplett och operatörsoberoende processautomation.

Cementbaserade injekteringsmedels reologi

Reologi - är det viktigt?

Reologi innefattar vetenskapen om vätskors deformationsegenskaper och har därmed en fundamental roll då det gäller all form av teoribildning inom strömningsmekaniken. Att känna till ett injekteringsmedels reologiska egenskaper är nödvändigt för att kunna uppskatta och förutsäga ett injekteringsförlopp. Egenskaperna påverkar sambandet mellan tryck och flöde samt avgör vilken maximal inträngningslängd som kan uppnås för en given sprickgeometri (Hässler, 1991). Olika krav ställs på ett injekteringsmedel beroende på i vilket skede av en

injektering som avses. Medlet skall ha god inträngningsförmåga under själva injekteringen och det skall uppfylla täthets- och/eller hållfasthetskrav då det väl är på plats.

Den senaste tidens teorisprång inom injekteringsforskningen i Sverige, det som går under namnet "Real Time Grouting Control" – RTGC (Kobayashi, et al. 2008), är baserad på en karakteristisk (injekterings)tid vilken i sin tur innehåller Binghammodellens två reologiska parametrar, flytgräns och viskositet. Ursprunget till detta utvecklingssteg, vid injektering under konstant tryck, är en opublicerad artikel av Gunnar Gustafson och Johan Claesson (2005), där man med hjälp av dimensionslösa parametrar definierade styrande faktorer för en- och tvådimensionell strömning i bergsprickor. Samma artikel har sedan publicerats i Journal of Applied Mathematics (Gustafson et al., 2013) och en praktisk tillämpning av ovanstående teori har utförts av Gustafson och Stille (2005). I den sistnämnda artikeln gjordes förenklingar för att erhålla en analytisk lösning för tvådimensionell strömning och man granskade även olika stoppkriterier och hur de var beroende av de reologiska parametrarna. För att kunna använda denna nya teori, RTGC, krävs alltså kunskap om det cementbaserade injekteringsmedlens reologiska egenskaper samt deras förändring med tiden.

Det är även allmänt känt i reologikretsar att de reologiska egenskaperna och deras variation är en mycket bra indikator för andra, önskade eller oönskade, förändringar och därmed för en kontinuerlig kvalitetskontroll.

Reologiska modeller

Cementbaserade injekteringsmedel är suspensioner som vid normala koncentrationer har en komplicerad reologi som dessutom är svår att mäta, både i laboratorium och i fält. Interaktion och bindningar mellan de suspenderade partiklarna skapar en nätverksstruktur som leder till ett icke-linjärt samband mellan skjuvspänning och skjuvhastighet, tixotropiska egenskaper och en flytgräns som måste överskridas för att strömning överhuvudtaget skall ske.

Cementbaserade injekteringsmedel är inte bara suspensioner utan ändrar dessutom sina egenskaper med tiden, under de kemiska reaktioner som sker vid hydratiseringen av cementkornen.

Data från viskositetsmätningar av cementbaserade injekteringsmedel och vanligen använda vattencementtal är ofta skjuvtunnande, med en flytgräns, och följer därför den icke-linjära Herschel-Bulkley modellen väl. Detta till trots är den vanligaste modellen inom injektering den linjära Binghammodellen, som innehåller en flytgräns och (plastisk) viskositet. Modellen är enkel och innehåller parametrar som går att kommunicera och förstå ur en fysikalisk synvinkel, vilket inte alltid är fallet med de mer komplexa modellerna.

Cementbaserade injekteringsmedel är dessutom tixotropa vilket innebär att framförallt flytgränsen är historieberoende. När medlet har stått stilla ett tag kommer den att ha en högre flytgräns än om medlet varit under konstant omrörning något som är vanligt förekommande hos en annan vanlig suspension – tixotrop målarfärg. I ett diagram med skjuvspänning som

funktion av skjuvhastighet framträder tixotropin som en hysteres, där kurvan med ökande skjuvhastighet (upp-kurvan) inte sammanfaller med kurvan med avtagande skjuvhastighet (ner-kurvan).

Reologi – hur mäter man?

Lab mätning-Viskometer

Vanligen mäts de reologiska egenskaperna med hjälp av en rotationsviskometer, bestående av ett statiskt kärl (cup) och en roterande cylinder (bob). Andra geometrier förekommer också ("cone-and plate" och parallel-plate") liksom utrustning där kärlet i stället roterar och cylindern är still. Ett allmänt problem är glidning (slip) mellan vätskan och en fast begränsningsyta, såsom en vägg. För att minska detta problem används olika metoder att skapa en icke-jämn yta på både kärl och cylinder. Ett annat sätt är att använda en vinge (vane) i stället för cylinder på samma sätt som när man mäter skjuvhållfasthet på lera med oförstörande provning in-situ. En viktig parameter för utvärderingen är storleken på gapet mellan cylinder och kärl och det är olika förfaringssätt om detta är stort eller litet (Håkansson, 1994).

De finns olika sätt att skapa en skjuvspänning antingen med en pålagd rotationshastighet (Controlled Shear Rate) eller pålagt rotationsmoment (Controlled Shear Stress). Vanligen används det förstnämnda men den senare är bra om man är ute efter att bestämma den sanna flytgränsen (Rahman et al., 2015). Ett stort problem med mätning med rotationsviskometer är separation mellan den fasta, dvs partiklarna, och den flytande fasen. Denna separation kan vara initierad antingen av gravitationen eller genom att partiklarna slungas bort från mätcylindern vid höga rotationshastigheter. Oavsett fenomen så innebär detta att man erhåller en koncentrationsgradient i mätkärl och att man till slut mäter något annat än vad som är representativt för injekteringsbruket. Sammanfattningsvis kan sägas att cementbaserade injekteringsmedel har en komplex reologi, som är tids och historieberoende, är svåra att mäta och resultaten är både metodberoende och utförandeberoende. Detta medför att det är angeläget att snart definiera en mätstandard som gör det möjligt att mäta på ett likartat sätt och där resultat går att jämföra från gång till gång.

Fältmätning - Marshkon

Flödeskoner används allmänt inom olika industrier för att bestämma framförallt suspensioners strömningsegenskaper. Marshkonen, se Figur 1, kommer från oljeindustrin där man är intresserad av egenskaperna på borrhätskor ("drill-muds"). Tiden som det tar för en viss volym att strömma ut ur konen är den storhet som mäts och denna innehåller en kombinerad effekt av de olika ingående reologiska parametrarna. Utan vidare analys ger olika utströmningstider en relativ jämförelse mellan olika vätskor, densitet och koncentration.

En sluten analytisk lösning för utströmning ur koner har gjorts av Håkansson (1994), för Newtonska vätskor och för en förenklad Bingham modell. Ett nomogram har tagits fram och om den ena av parametrarna, flytgräns eller viskositet, är känd kan den andra bestämmas. Nomogrammet är nyligen uppdaterat och finns beskrivet i Stille (2015), "Rock Grouting – Theories and Applications".

Fördelen med Marshkonen är att den är fältmässig och lätt att använda. Den används flitigt inom olika industrier och ett bra referensmaterial finns att tillgå.

En nackdel med Marshkonen är att den direkt ger ett inte mått på de reologiska egenskaperna. Det är vidare inte troligt att det råder fullt utbildad strömning i det korta röret vilket gör att det är svårt att göra korrekt bedömning. Röret har även en glatt insida vilket medför att antagandet om noll hastighet vid väggen kan ifrågasättas. Utströmningstiden är mycket känslig för variationer i rördiameter varför det är mycket viktigt att röret noggrant rengörs mellan provtagningar.

Här skulle man kunna vidareutveckla konceptet med en "kon" som är bättre anpassad för cementbaserade injekteringsmedel.



Figur 1. Marshkon för fältmätning

Figure 1. Marsh cone for field measurements

Plate-Cohesion Meter – PCM (Lombardi 1985)

Med en PCM mäter man skillnaden i vikt på en plastplatta som har doppats ner i injekteringsbruket och dess vikt i torrt tillstånd. Om bruket har en flytgräns kommer ett tunt skikt att fastna på plattan och vikten därmed öka.

En fördel med metoden är att den är mycket enkel och endast behöver ett kärl, en enkel våg och en platta med rå yta.

En nackdel är att vågen är känslig för fältbruk och att det inte finns så många referenser trots den långa tid som idén funnits tillgänglig.

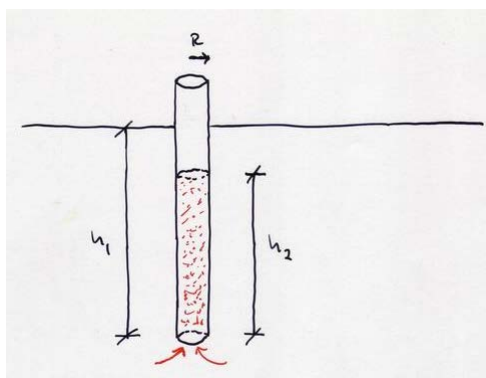
Även Lombardi (1985) har tagit fram ett nomogram ur vilket flytgräns eller viskositet kan utläsas om en av dessa två parametrar är känd från t.ex. PCM.

Stigrör - "Raise-pipe" (Håkansson, 1991:2, 1993)

Stigröret, se Figur 2, är ett enkelt instrument för att bestämma flytgränsen på injekteringsmedel i fält. Flytgränsen bestäms genom att utnyttja det faktum att strömningen upphör då den maximala skjuvspänningen, vid rörväggen, är lika med flytgränsen. Rörets diameter måste vara känd liksom injekteringsbrukets densitet. Bruket inne i röret kommer inte att stiga lika högt som nivån utanför röret och genom att använda skillnaden mellan de två nivåerna kan flytgränsen bestämmas med formeln i Figur 2. En lite mer avancerad modell av stigröret finns beskriven i Håkansson (1994).

Fördelen med stigröret är att det är enkelt att använda och att strömningssituationen sammanfaller med det som sker i fält, dvs en strömning som har hög hastighet i början och som sedan avtar tills injekteringsbruket stannar i en spricka.

Nackdelar har främst med röret att göra och svårigheten att rengöra instrumentet. Det är mycket svårt att hitta genomskinliga rör med en rå insida som behövs för att undvika glidning mellan injekteringsbruket och rörväggen. Om röret är glatt kommer nivån inuti röret att komma högre än vad som dikteras av dess flytgräns och rådande rördiameter.



$$\tau_0 = \frac{\gamma R}{2} \left(\frac{h_1}{h_2} - 1 \right)$$

Figur 2. Stigrör för mätning av flytgräns i fält

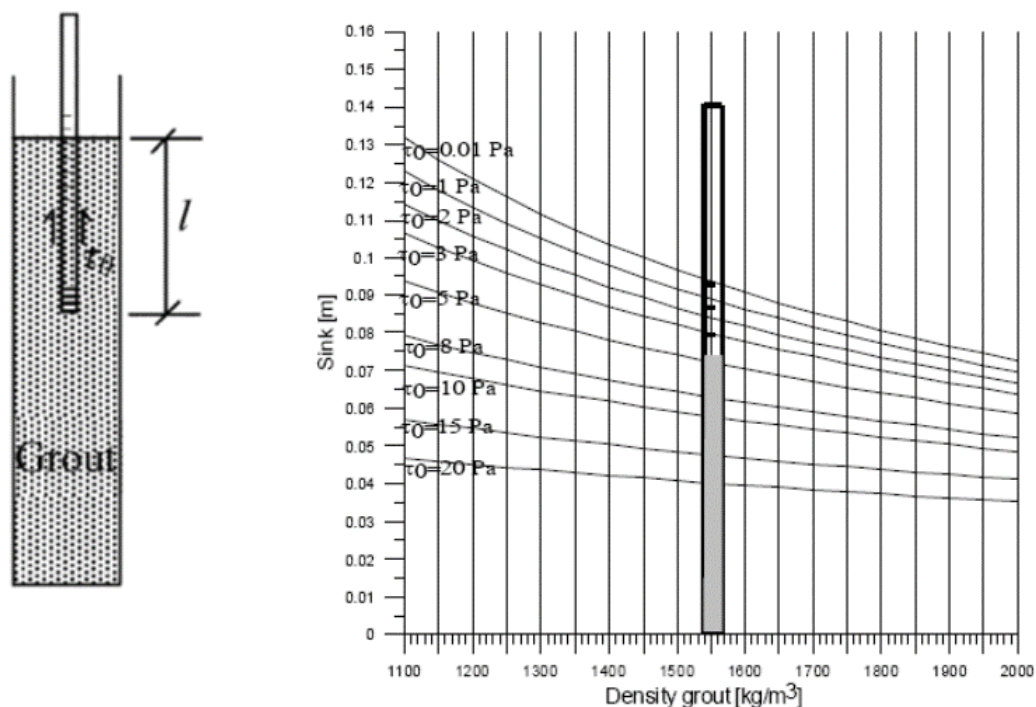
Figure 2. Raise-pipe for field measurements of yield stress

Yield stick (Axelsson, 2005)

Yield-stick, se Figur 3, är ett enkelt instrument för att bestämma flytgränsen på injekteringsmedel i fält. Flytgränsen bestäms genom att sänka ner en träpinne i injekteringsbruket. Pinnen har en vikt i botten och totalvikten måste vara känd liksom dimensionen på pinnen. På grund av att injekteringsbruket har en flytgräns kommer pinnen inte att sjunka till botten på kärlet utan stanna innan. Genom att känna till nedsjunkningsdjupet kan flytgränsen direkt bestämmas, se Figur 3.

Fördelen med stigröret är att det är enkelt att använda och lätt att rengöra.

Nackdelar är förknippade med handhavandet och möjligheten att erhålla repetitiva och representativa resultat.



Figur 3. Yield-stick för mätning av flytgräns i fält

Figure 3. Yield-stick for field measurements of yield stress

Exempel på reologikrav

Förbifart Stockholm

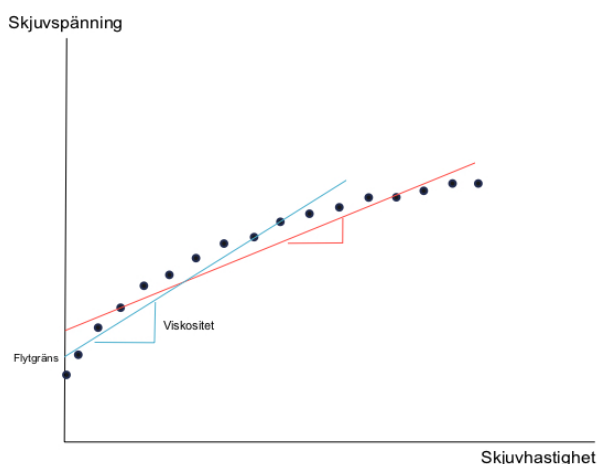
I ett stort pågående undermarksprojekt, Förbifart Stockholm, ställs krav på cementbaserade injekteringsmedel i den Tekniska Beskrivningen (TB) och i Kontrollprogram Berg.

Beträffande reologiska egenskaper föreskrivs följande mätmetoder:

- Rheometer (viskometer) för flytgräns och viskositet
- Marshkon
- Yield-stick för flytgräns

Man föreskriver tre blandningar med angivande av flytgräns och viskositet. Det framgår att utvärderingen skall ske med Binghammodellen men inte över vilket spann av skjuvhastighet som den linjära approximationen skall ske. Detta innebär ett godtyckligt förfarande och medför att spridningen i resultatet kommer att bli stort (se Figur 4).

Vidare föreskrivs en väntetid mellan injektering och salvbörning på 3 timmar. Om man i stället ställde krav på hållfasthetstillväxten på injekteringsbruket skulle denna tid kunna reduceras. Det finns acceleratorer som kan användas för att uppnå den nödvändiga hållfastheten och tillväxten kan mätas med fallkon, som också har föreskrivits.



Figur 4. Linjär anpassning där resultatet beror på det spann av skjuvhastighet som väljs
Figure 4. Linear regression where the result depends on the chosen span of shear rate

DIN standard

Den standard som man idag hänvisar till i tekniska beskrivningar och kontrollprogram (DIN 53 019) behandlar främst instrumentgeometrier, kalibrering, mätfel och korrektionsfaktorer och beskriver inte hur de reologiska egenskaperna skall eller bör utvärderas med t.ex. Binghammodellen.

Krav på förprovning som hänvisar till ovanstående standard och utvärdering med Binghammodellen ger därmed inte tillräckligt med information om vad som skall göras eller hur det skall göras.

Pulsad ultraljudsteknik för bestämning av cementbaserade injekteringsmedels reologi

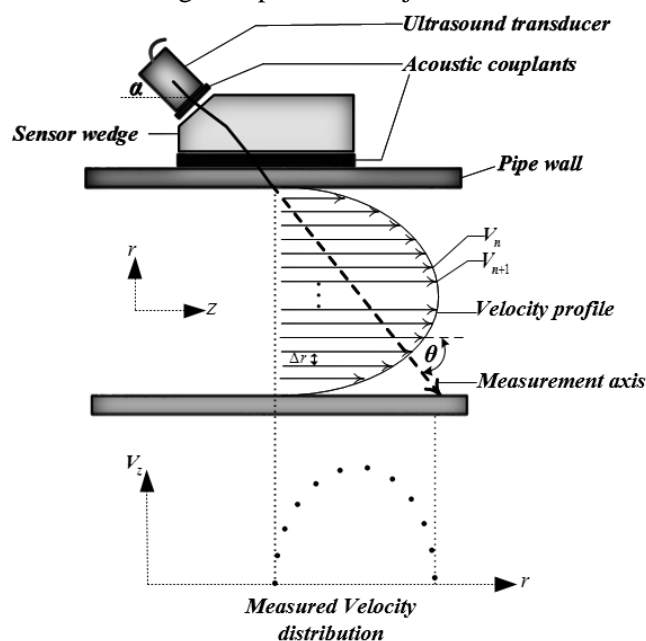
Pulsad ultraljudsteknik började användas för industriella tillämpningar redan i slutet av 80-talet men först under senare år har tekniken nått ett stadium av utveckling som tillåter exempelvis visualisering av flöde. Den stora fördelen med ultraljudsteknik härrör från det faktum att det kan penetrera optiskt opaka material, det är en relativt billig teknik och möjliggör snabba, kontinuerliga och beröringsfria detaljerade mätningar av fluidegenskaper. Pulsad ultraljudsteknik härstammar ifrån dess användning inom det medicinska området och introducerades på 1950-talet (Satomura, 1957). En av de första att utforska med tekniken utanför det medicinska området var Takeda, (1986, Takeda, (1991)). Det som främst gör att pulsad ultraljuds teknik är intressant för mätning av flödesegenskaper är att man kan mäta en komplett och momentan hastighetsprofil. Då hastighetsprofilen ger den fullständiga skjuvhastighetsfördelningen i exempelvis rörströmning kan tekniken således användas för bestämning av flödesegenskaper hos icke-Newtonska industriella vätskor.

Pulsad ultraljuds-velocimetry (PUV)

Den grundläggande principen bakom pulshade ultraljudssystem är baserad på ljudvågors rörelse och dess förmåga att passera genom olika typer av material. De flesta pulshade ultraljudssystem som mäter hastighetsprofiler, främst blodflöden, förlitar sig på detektion av Dopplerskift på olika djup inom röret. Dopplereffekt är ett fysikaliskt fenomen, som innebär en förändring av frekvensen (svängningstalet) hos en signal, till exempel ljud eller ljus, beroende på om källan närmar sig eller avlägsnar sig i förhållande till observatören. Dopplereffekten föreslogs först 1842 av den österrikiska fysiker Christian Andreas Doppler som först märkte det i ljudvågor (Jensen, 1996). Det fenomen som beskrivs av Doppler-effekten är att en förändring i den observerade frekvensen för en ljudvåg som inträffar när källan och observatören är i rörelse i förhållande till varandra, med ökande frekvens, när källan och observatören närmar sig varandra och minskande när de rör sig ifrån varandra (Jensen, 1996). På liknande sätt kan denna princip användas för ultraljudstransducers, som genererar korta ljudvågor (pulser) med våglängden λ , in i ett fluidmedium, som innehåller partiklar. De utsända ljudvågorna sprids och reflekteras i gränsytan mellan partiklar och kontinuerlig fas. Då partiklarna är i rörelse med en icke-nollhastighetskomponent i förhållande till den akustiska strålens linje och transducern är stationär i förhållande till en partikel, sker en Dopplerförskjutning och den mottagna signalen blir "Doppler skiftad" med frekvens f_d . Den berömda Doppler formeln som beskriver hastigheterna hos partiklarna som är i rörelse i mediet ges då av :

$$v = \frac{(c \times f_d)}{(2 \times f_e \times \cos \theta)} \quad (1)$$

där c är ljudhastigheten i mediet, θ är Doppler vinkel och Dopplerfrekvensen är $f_d = f_{\text{emitted}} - f_{\text{received}}$. Jensen (1996) understryker att den klassiska Dopplereffekten är bara en mätartefakt i pulssade ultraljudssystem. Detta beror på det faktum att man mäter tidsförskjutningen mellan flera pulser och inte det faktiska Doppler-skiftet. Mätningen är i grund och botten endimensionell (1D) och ger en hastighetsprofil projicerad utmed mätlinjen men kan givetvis utökas med många mätlinjer. Eftersom huvuddelen av de små reflekterande partiklarna antas röra sig med en hastighet som är lika med den hos den kontinuerliga fasen kan den sanna hastighetsfördelning utmed mätlinjen hållas. Figur 5 visar en schematisk illustration av mätning av en hastighetsprofil i rörströmning med pulssad ultraljudsteknik.



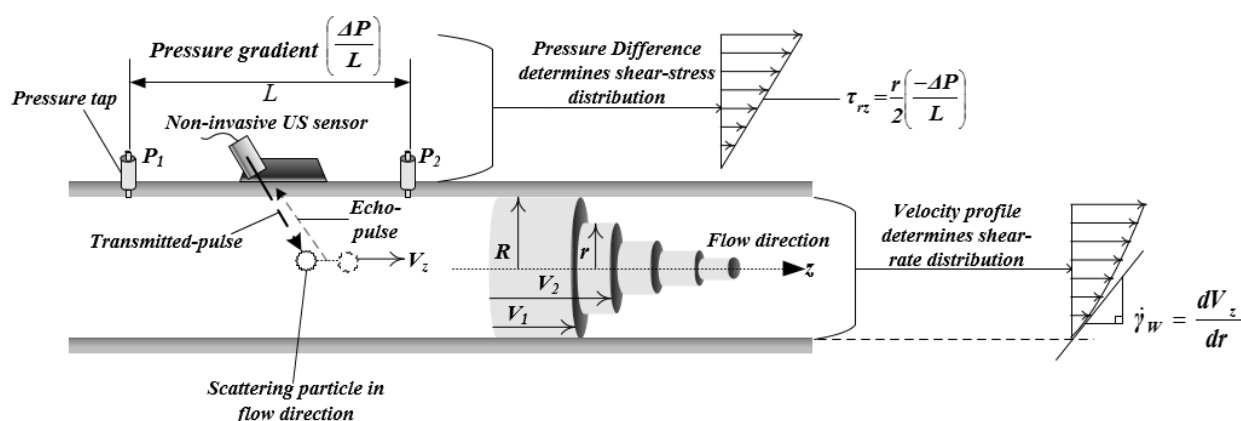
Figur 5. Schematisk illustration av mätning av en hastighetsprofil i rörströmning med pulssad ultraljudsteknik.

Figure 5. Schematic illustration of the measurement of a velocity profile in pipe flow using pulsed ultrasound

PUV+ PD Metod för bestämning av fluiders reologi

Pulsed Ultrasound Velocimetry (PUV) –baserade mätningar av hastighetsprofiler kan kombineras med simultana mätningar av en tryckskillnad (Pressure Difference - PD) över en bestämd mätsträcka. Ifrån uppmätt hastighetsprofil kan man beräkna skjuvhastigheten i varje radiell punkt och ifrån tryckfallet får man skjuvspänningen invid väggen, som varierar linjärt ifrån vägg till rörets mitt och detta medför att man kan beräkna viskositet för alla positioner och skjuvhastigheter i radiell led. Denna nya metod för in-line reometri, allmänt känd som PUV+PD eller UVP + PD metoden är alltså en förbättrad version av en konventionell

tubviskosimeter men som till skillnad ifrån denna ger en komplett flödesprofil och flytkurva, kontinuerligt och i realtid. PUV+PD konceptet presenterades första gången i litteraturen av Kowalewski, 1980. Trots detta dröjde det fram tills 2007 innan den första praktiska metoden och systemet, Flow-Viz för visualisering och reologisk karakterisering av industriella fluider (Wiklund 2007, Wiklund et al. 2014, Kotze et al. 2015). Flow-Viz är en teknikplattform, baserad på en pulsad ultraljudsteknik, som har utvecklats och optimerats på SIK - Svenska Institutet för Livsmedel och Bioteknik, senare SP-Sveriges Tekniska Forskningsinstitut, tillsammans med flera samarbetspartners under 15 års tid. Metoden tillåter realtidsmätningar av hastighetsprofiler, volymflöde, koncentration av partiklar såväl som akustiska och reologiska egenskaper direkt in-line, under verkliga dynamiska processbetingelser. Den har fördelar jämfört med kommersiellt tillgängliga processviskosimetrar och off-line reometrar då metoden är beröringsfri och är tillämplig på ogenomskinliga och koncentrerade suspensioner, har små sensordimensioner och relativt låg kostnad. Genom anpassning till reologiska modeller kan avancerade flödesberäkningar genomföras och data kan användas för att validera dessa modeller. Det är också möjligt att bestämma reologiska parametrar direkt med den så kallade gradientmetoden där gradienten av hastighetsprofilen används för bestämning av skjuvhastighet (Wiklund 2007, 2014). Detta förfarande illustreras i Figur 6. Gradientmetodens stora fördel är att den inte kräver någon förkunskap om reologi eller flödesbeteendet hos de vätskor som karakteriseras.



Figur 6. Schematisk illustration av PUV+ PD metod för bestämning av fluiders reologi.
 Figure 6. Schematic illustration of the PUV + PD method for determining the fluid rheology.

Begränsningar med PUV+PD metoden

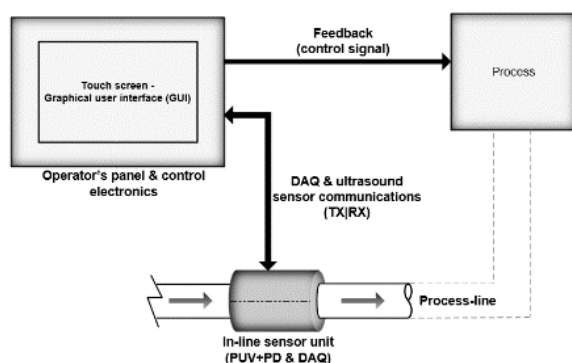
De viktigaste begränsningarna i med PUV+PD metoden inkluderar: flerfasströmning som innehåller stor mängd gas, behov av reflekterande partiklar och dämpning av ultraljud över en kritisk partikelkoncentration. Med rätt utrustning och sensorer kan man dock med lätthet även

mäta i vatten / cement –tal under 0.6. Det måste också nämnas att det finns en begränsning i maximal mätbar flödes hastighet för ett visst mätavstånd med pulsat ultraljud. Dessa två parametrar är kopplade till frekvens, ljudhastighet och pulsrepetitionsfrekvensen , som är relaterad till den tid det tar för en utsänd puls till att reflekteras tillbaka till ultraljudssensorn.

$$V_{max} \cdot P_{max} = \frac{c^2}{8f_0} \quad (2)$$

Flow-Viz en komplett teknikplattform för bestämning av fluiders reologi

Flow – Viz systemet är en teknikplattform som är framtagen för visualisering och reologisk karakterisering av industriella fluider, kontinuerligt och beröringsfritt direkt i processlinjen (Wiklund 2007, 2014, Kotze 2015). Flow-Viz bygger på PUV+PD principen, levererar data i realtid för kontinuerlig feedback till operatör eller styrsystem och process- och kvalitetskontroll. Tekniken har tillämpats på ett brett sortiment vätskor och industriella tillämpningar, t.ex. olja, petroleum, mat, mineraler, choklad, explosiva emulsioner, läkemedelsindustrin och mer. Flow-Viz systemet har framgångsrikt installerats hos internationella storföretag i Europa och Nordamerika. Figur 7 visar en schematisk illustration där Flow-Viz systemet integrerats för process- och kvalitetskontroll av industriella fluider.



Figur 7 - Schematisk illustration där Flow-Viz systemet integrerats för process- och kvalitetskontroll av industriella fluider.

Figure 7 - Schematic illustration of the Flow Viz integrated system for process and quality control of industrial fluids.

Flow - Viz -systemet består av tre integrerade delar som visas i Figur 8.

1. Flow-Viz operatörspanel - som innehåller industri-PC, ombord elektronik för signalkonditionering , pulser / mottagare elektronik och en multi - pekskärm för inmatning av data och visualisering .
2. Avancerat grafiskt användargränssnitt (GUI), Flow-Viz systemprogramvaran som styr användarinmatning och utmatning och kommunikation mellan ombordevik elektronik och industri-PC
3. Sensorenhet med beröringsfria ultraljudssensorer för mätningar av hastighetsprofil tillsammans med tryckgivare för differenstryckmätningar samt PT100 temperaturgivare. Sensorenheten har normalt sett ett rostfritt skyddshölje som omsluter SS136L stålroret som utgör mätsektionen. Denna kan också försees med värmemantel. Sensorer med diameter som sträcker sig från 10 till 200 mm inre diameter är standard men större sensor mått kan även användas.

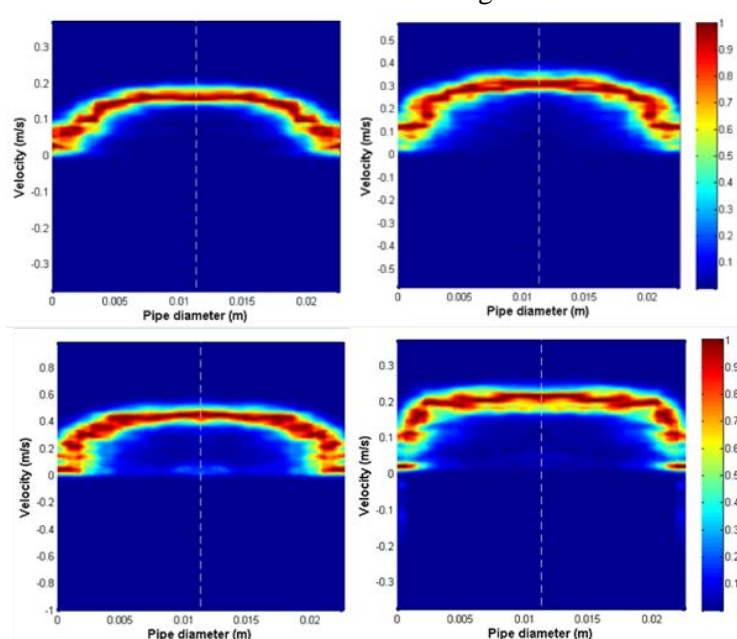


Figur 8 : Flow- Viz™ -systemet (a) Flow-Viz operatörspanel (b) integrerad in-line sensorenhet

Figure 8: The Flow Viz™ system (a) Flow Viz Operator's Panel (b) integrated in-line sensor unit .

Exempel på visualisering och reologisk karakterisering av injekteringsbruk

Inom injektering har man idag behov av kvalitetskontroll av bruket och att flödesegenskaperna måste justeras i enlighet med rådande bergförhållanden. I ett doktorandprojekt som utförs av Skanska AB, Kungliga Tekniska Högskolan och SP - Tekniska Forskningsinstitut Sverige, har Flow-Viz systemet utvärderats för mätning av flöde, hastighetsprofiler och reologi in-line under injektering (Rahman 2015). Ett sekundärt mål var att karakterisera olika vatten / cement –tal hos injekteringsbruk och att undersöka effekten av olika tillsatser, såsom olika reglermedel.. Ett exempel på hastighetsprofiler uppmätta med användning av Flow-Viz systemet för injekteringsbruk med olika vatten / cement -tal visas i Figur 9.



Figur 9: Hastighetsprofiler uppmätta med Flow - Viz systemet för injekteringsbruk med olika vatten / cement –tal ifrån 0.8-0.6.

Figure 9: Velocity profiles measured with Flow - Viz system grout with different water / cement ratios from 0.8-0.6

Mätdata visade att alla vatten / cement-tal har skjuvtunnande beteende med ökande skjuvhastighet och resultaten stämmer väl överens vid en jämförelse mellan in-line mätningar gjorda med Flow-Viz och i lab. med reometer. Flytgränsen ökade med ett minskande vatten / cement-tal och med ökande tid efter blandning, som förväntat. Forskningsresultaten har vidare visat att de kolvpumpar som används idag producerar pulserande flöden som är svåra att mäta med befintliga flödesmätare (exempelvis det kommersiella Logac systemet) och att mer exakta mätningar av flödeshastighet kan erhållas med pulsad ultraljudsteknik. Tillgång till ny data som momentana hastighetsprofiler kan leda till en optimering av pumpdesign vilket också kan leda till förbättrat injekteringsresultat.

Slutsatser

Som framgår av listan på referenser har inte särskilt mycket skett på detta område de senaste 30 åren. Det finns behov av en robust mätstandard där kriterierna för hur de reologiska egenskaperna i detalj skall utvärderas är definierat, t.ex. över vilket spann på skjuvhastighet som den linjära Binghammodellen skall appliceras. Det bör också ställas krav på hållfasthetstillväxt på injekteringsbruket så att väntetiden före salvbörning kan reduceras. Det är också önskvärt med en kontinuerlig, beröringsfri mätning i föreliggande process, dvs monterad på injekteringsriggen så att man kan erhålla data i realtid för styrning och kontroll av injekteringsförloppet. Detta kan utföras med hjälp av ultraljud och slutkommentaren i Håkanssons (1993) avhandling gäller än idag: "Also, the development of "on-line" measurements is needed so that significant properties can be continuously measured during a grouting operation."

I denna artikel har vi presenterat Flow-Viz som är det första kommersiellt tillgängliga in-line karakteriseringssystemet för industriella tillämpningar. Det har utformats särskilt för icke-invasiv, in-line, kontinuerlig och i realtid hastighetsprofil samt reologisk bedömning av ogenomskinliga, icke-newtonska industriella vätskor. Flow-Viz-systemet har installerats i pilotanläggningar för internationella företag och används även för akademisk forskning på injekteringsbruk. Utmaningen är nu att övertyga injekteringsbranschen att ersätta dagens primitiva standardmetoder med exempelvis Flow-Viz. Systemet anpassas nu för användning i fält men arbete återstår med att ta fram verktyg för att styra injekteringsprocessen med den nya informationen och på så vis uppnå önskat resultat.

Referenser

Axelsson, M. 2005. A robust method to determine the shear strength of cement-based injection grouts in the field. Tunneling and Underground Space Technology, TUST.

Barnes H. 1999. A. On-line or process viscometry—A review. Applied Rheology 1999;9:102–7.

Gustafson, G. Claesson, J. 2005. Steering parameters for rock grouting. *Submitted to Journal of Rock Mechanics and Mining Science*.

Gustafson, G. Stille, H. 2005. Stop criteria for cement grouting. Felsbau 23, NR. 3.

Gustafson, G. Claesson, J. Fransson, Å. 2013. Steering Parameters for Rock Grouting. Journal of Applied Mathematics.

- Håkansson, U. 1991:1. Injektering i jord och berg en svartkonst? Bygg & teknik, 8/91.
- Håkansson, U. Hässler, L. Stille, H. 1991:2. Mätmetodik för injekteringsmedels reologiska egenskaper. Stiftelsen Bergsteknisk Forskning – BeFo 241: 1/91.
- Håkansson, U., Hässler, L. Stille, H. 1993. Rheological properties of cement-based grouts – measuring techniques and factors of influence. Proc. Int. Conference on grouting in rock and concrete, Salzburg 11-12 Oct. Editor R. Widman, Balkema.
- Håkansson, U. 1994. Injekteringsmedels strömningsegenskaper. SveBeFo Rapport 15.
- Hässler, L. 1991. Grouting of rock - Simulation and Classification. PhD Thesis, KTH Royal Institute of Technology.
- Kobayashi, S. Stille, H. Gustafson, G. & Stille, B. 2008. Real time grouting control method – Development and application using Äspö HRL data. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co, SKB.
- R. Kotzé, S. Ricci, B. Birkhofer, J. Wiklund, 2015. Performance tests of a new non-invasive sensor unit and ultrasound electronics”, *Flow Meas. Instrum.*, vol. 46, 2015, in press.
- Kowalewski TA.1980. Velocity profiles of suspension flowing through a tube. *Archiv. Mech.* 32 857-865.
- Lombardi, G. 1985. The role of cohesion in cement grouting of rock. 15:e Congres des Grandes Barrage, Lausanne (ICOLD).
- Rahman, M. 2015. Rheology of cement grout – Ultrasound based in-line measurement technique and grouting design parameters. Doctoral thesis, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
- Rahman M, Håkansson U, Wiklund J 2015 In-line rheological measurements of cement grouts: Effects of water/cement ratio and hydration. *Tunnelling and Underground Space Technology* 45:34–42.
- Roberts I. 2000. In-line and on-line rheology measurement. In: Kress-Rogers, Brimelow, editors. *Instrumentation and sensors for the food industry*. Abington Hall (Cambridge): Wood head Publishing Limited. p. 1–403.
- Satomura S. 1957. Ultrasonic Doppler method for the inspection of cardiac function J ,*Acoust Soc Am* 29, 1181-1185

Stille, H. 2015. Rock Grouting – Theories and Applications. Stiftelsen Bergsteknisk Forskning – BeFo.

Takeda Y. (1991). Velocity Development of an ultrasound velocity profile monitor. Nuclear Engineering and Design, 126: 277-284

Wiklund J, Shahram I, Stading M. 2000. Methodology for in-line rheology by ultrasound Doppler velocity profiling and pressure difference techniques, Chem. Eng. Sci. 62 4159-4500

Wiklund, J. Kotzé, R., Birkhofer, B., Ricci, S. Meacci, V. Haldenwang, R. and Stading. M. 2014. Flow-VizTM – A fully integrated and commercial in-line fluid characterization system for industrial applications. Proc. of 9th Ultrasonic Doppler Methods for Fluid Mechanics and Fluid Engineering (ISUD9), pp. 165-168,