

## Injektering – styrning och kontroll

Injektering med cementbaserade injekteringsmedel används för att täta sprickor i berg. Forskning inom injektering har pågått i Sverige sedan början av 1980-talet men resultaten har ännu inte utnyttjats fullt ut i praktiska tillämpningar. Forskningen har kommit så långt att vi idag kan styra injekteringen i realtid, baserat på mätningar av tryck och flöde. Detta innebär att vi är redo att gå från ett hantverk till ingenjörskonst.

Injekteringsmedels strömningsegenskaper utgör fundamental indata till de modeller som tagits fram för att kunna styra ett injekteringsförlopp. Dock saknas idag mätmetoder som kontinuerligt kan leverera data om egenskaperna och deras förändring med tiden. Inom detta projekt har metodiken för styrning av injektering verifierats i ett antal praktiska fallstudier med gott resultat. Mätningar av injekteringsmedels strömningsegenskaper har utförts med en ny metod baserad på ultraljud. Resultaten visar att metoden är användbar för kontinuerlig mätning av egenskaperna med vanligen använda vattencementtal under pågående injektering.

### Bakgrund

Injektering av sprickor i berg utförs för att täta tunnlar och berg-rum mot inläckande vatten och för att minska eller förhindra en grundvattensänkning. Stora mängder injektering används också vid tätning av berggrunden i samband med byggandet av dammar grundlagda på berg. I Sverige är kraven stränga i jämförelse med de flesta andra länder och dessa krav styrs av lagstiftning i form av miljödomar. Injektering är kostsamt och utgör ofta en betydande del av tidsåtgången för ett projekt. Injekteringen sker främst med cementbaserade suspensioner som via borrade hål i berget pumpas och trycks in i sprickorna med speciellt framtagen utrustning. Forskningen i Sverige inom detta område är världsledande, men resultaten har ännu inte implementerats fullt ut i den praktiska verksamheten. Särskilt de senaste åren har dock ett genombrott skett, främst inom injekteringens styrmekanismer och genom att nya material har dykt upp på marknaden. Vi kan idag styra en injektering med hjälp av mätning av tryck och flöde och vi vet nu mer om vilket kriterium som skall användas för att avsluta en injektering. Metodiken benämns "Real Time Grouting Control" – RTGC.



Figur 1. Gotvand dammen i Iran under byggnation

På grund av dess tillgänglighet, hållbarhet och relativt låga pris, i förhållande till andra material, används cementbaserade medel ofta vid injektering. Bestämning av cementbaserade injekteringsmedels strömningsegenskaper utgör en viktig parameter i den framtagna styrningsmetodik. Dock finns det idag endast relativt primitiva metoder, både i laboratoriet och i fält, och mätningen utgör ofta ett avbrott i det praktiska utförandet. Många traditionella mätmetoder är dessutom för känsliga för att användas i en tuff tunnelmiljö och de kan inte användas kontinuerligt, "in-line", på injekteringsriggen under pågående injektering.

Inom livsmedelsindustrin har man under 2000-talet tagit fram en metodik, baserad på ultraljud, för mätning av suspensioners strömningsegenskaper. Metodiken baseras på en kombination av två tekniker (se figur 3) – en för att visualisera hastighetsprofilen så kallad "Ultrasound Velocity Profiling (UVP)" samt en annan för bestämning av tryckfallet över en viss sträcka, så kallad "Pressure Difference (PD)". Metodiken förkortas vanligen UVP+PD. Föreliggande projekt behandlar både verifiering av styrmetodik i ett antal praktikfall samt genomförbarhetsstudie för mätningar av egenskaper baserade på ultraljud.

## Syfte

Syftet med styrning av injektering är att verifiera den senaste tidens teoriutveckling och att översätta denna till fungerande praktiska verktyg. Syftet med kontroll av injektering är att utveckla en ny metodik, baserad på ultraljud, för bestämning av injekteringsmedels strömningsegenskaper, kontinuerligt under pågående injektering.

## Genomförande

Arbetet har utförts som två doktorandprojekt på avdelningen för jord- och bergmekanik på KTH, med finansiering från SBUF och FORMAS/BeFo. De två doktoranderna har varit Jalaeddin Rafi (styrning) och Mashuqur Rahman (kontroll).Handledare har varit professor Håkan Stille och adjungerad professor Ulf Håkansson. Huvudhandledare har varit professor Stefan Larsson. Samtliga handledare tillhör avdelningen för jord- och bergmekanik på KTH och Ulf Håkansson är även anställd på Skanska AB i Stockholm.

## Resultat

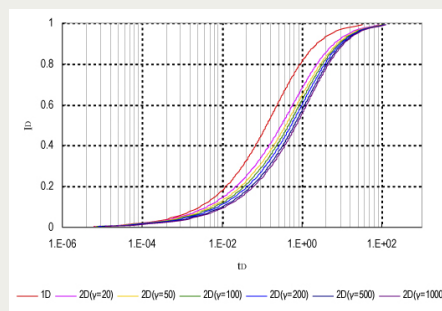
### Styrning av injektering

I detta arbete har det teoretiska tillvägagångssättet "Real Time Grouting Control" – RTGC validerats genom fallstudier. Egenskaper för använda material, injekteringstryck och flödesdata tillsammans med karaktäristiska geologiska egenskaper har samlats in från projekt utförda i sedimentära bergarter, Gotvand Dam i Iran (se figur 1) och THX Dam i Laos, och hårt kristallint berg, Citybanan i Sverige.

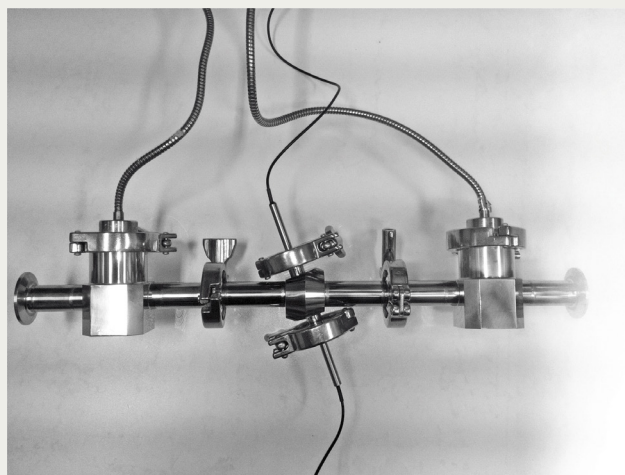
För att erhålla en lyckad injektering är målet att uppnå den eftersträvade tätningen av sprickorna och samtidigt förhindra rörelser i berget på grund av injekteringstrycket. Empiriska metoder har utvecklats i syfte att bestämma tillåtna injekteringstryck, lämpliga egenskaper för injekteringsbruk och stoppkriterier. Det finns emellertid otydligheter i hur de ska användas och deras relevans har ifrågasatts. I dessa metoder har antaganden och kriterier baserats på tumregler och erfarenhet från tidigare projekt och de största osäkerheterna är kopplade till brukets spridning i sprickorna under injekteringen och om sprickorna vidgas.

Inom föreliggande projekt beskrivs ett teoretiskt underbyggt angreppssätt, baserat på en analytisk lösning (se figur 2), vilket möjliggör en uppskattning av inträngningslängden för injekteringsbruket i sprickan i realtid. Vidare kan teorin uppskatta trender för flödet av injekteringsbruket. I samband med utvecklingen av denna teori har gränser för elastisk vidgning av sprickorna och brottgränsen för lyftning av bergmassan tagits fram. Detta möjliggör både identifiering av när uppsprickning påbörjas och uppskattning av sprickans vidgning i realtid.

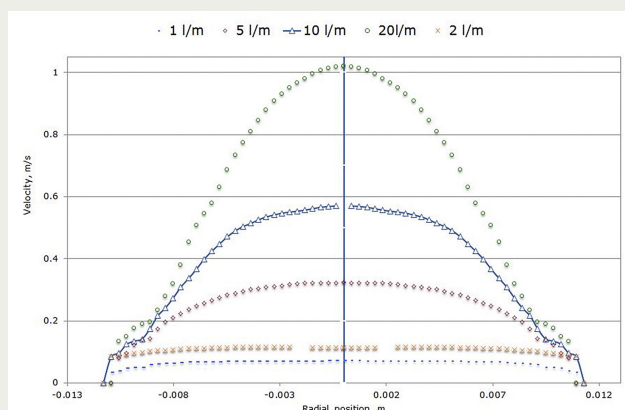
Den applicerade teorin har gjort det möjligt att studera flödet av injekteringsbruk och vidgning av sprickor i sedimentärt berg. För projekt utförda i hårt kristallint berg med övervägande vertikala sprickor bekräftar teorin att användandet av högre injekteringstryck är möjligt, vilket kan minska den erforderliga injekteringstiden. I arbetet har ingen hänsyn tagits till eventuella variationer i brukets egenskaper under injekteringen eller till variationer i spricköppningar (apertur). Trots dessa antaganden har lovande



Figur 2. Den teoretiska grunden för RTGC utgörs av dimensionalitet och inträngningslängd.



Figur 3. Givare för ultraljud (i mitten) samt givare för mätning av tryckförlust.



Figur 4. Hastighetsprofiler uppmätta med ultraljud vid olika flöden.

resultat med att verifiera uppskattningen av brukets spridning och risken för lyftning av bergmassan under injekteringen uppnåts med den använda metoden.

Det visar sig att genom att använda inträngningslängd som stoppkriterium kan total injekteringstid och bruksparametrar optimeras. Risken för hydraulisk spräckning har uppskattats genom att bestämma gränsvärden baserat på inträngningslängd. Från fältförsöken i Iran och Laos har detta gett ett tillfredsställande resultat. Geologin i Citybanan består främst av vertikala sprickor vilket innebär att mycket högre tryck är nödvändigt för att riskera hydraulisk spräckning. Teorin styrker här användandet av höga tryck vilket minskar injekteringstiden.

## Kontroll av injektering

För första gången har metodik baserad på ultraljud använts på cementbaserade injekteringsmedel. Metodiken är utvecklad av livsmedelsindustrin och försöken har utförts hos Institutet för Livsmedel och Bioteknik AB – SIK, i Göteborg. Försöken har dels gjorts under fältliknande förhållanden genom att koppla samman mätutrustningen med en konventionell injekteringsutrustning – UNIGROUT E22H från Atlas Copco, dels i en mer kontrollerad laboratoriemiljö.

En stor fördel med denna metodik är att det man letar efter – hastighetsprofilen i slangar och rör – direkt kan mätas och visualiseras, kontinuerligt "in-line". Viskositet och flytgräns bestäms sedan dels med hjälp av reologiska modeller, såsom Bingham och Herschel-Bulkley, dels utan modeller genom den så kallade "gradient metoden". Resultaten från de båda tillvägagångssätten har jämförts och även verifierats med konventionell reometer med hjälp av koncentriska cylindrar.

Försöken i fältmiljö visade att det går att mäta upp ett pulserande flöde, som är resultatet av använd pumptyp – i detta fall en kolvpump, och att man i framtiden skulle kunna skräddarsy sin pumpkaraktäristik efter syfte och behov. Försöken i laboratoriemiljö, med en skrupump, har gjort det möjligt att vidareutveckla och kalibrera givarna vilket lett till en högre energi och därmed större penetrationsdjup av signalen i det uppmätta röret. UVP+PD metodiken har visat sig fungera bra för att bestämma de faktiska reologiska parametrarna på cementbaserade injekteringsmedel utan att behöva använda sig av reologiska modeller. Det har även varit möjligt att mäta mycket små flöden (< 1 liter/minut) med denna metod. Det finns inga känsliga delar som är i kontakt med cementsuspensionen och resultatet är en bild av hastighetsprofilen (se figur 4) i röret. Inga mätningar behöver göras "off-line" på annan plats eller med annan utrustning.

## Slutsatser

Fältförsök i tre olika geologiska formationer har visat att det är möjligt att uppskatta injekteringslängden samt risken för hydraulisk spräckning med RTGC-metodiken. Osäkerheter relaterade till de geologiska och hydrogeologiska egenskaperna är i dagsläget det främsta hindret för att kunna använda metoden.

Försöken med ultraljud, både i fält och i laboratoriemiljö, visar att UVP+PD är en lovande ny metodik för bestämning av flöde och cementbaserade injekteringsmedels reologiska egenskaper samt deras förändring med koncentration och tid, kontinuerligt "in-line".

Mätutrustningen finns nu tillgänglig som en kommersiell produkt, färdigt för implementering.

## Ytterligare information

### Kontaktpersoner:

Styrning av injektering – **Håkan Stille**, KTH,  
tel 070-8601105, e-post: hakan.stille@byv.kth.se  
Kontroll av injektering – **Ulf Håkansson**, KTH/Skanska AB,  
tel 070-3712493, e-post: ulf.hakansson@skanska.se.

### Litteratur:

- Design approaches for grouting of rock fractures; Theory and practice. KTH, ISSN 1650-951X, Jalaleddin Yaghoobi Rafi, 44 sid + 4 artiklar.
- In-line rheology of cement grouts – Feasibility study of an ultrasound based non-invasive method. KTH, ISSN 1650-951X, Mashuqur Rahman, 27 sid + 4 artiklar.

Ovanstående kan beställas från KTH, tel 08-7908049,  
sofia.jonsson@byv.kth.se, www.kth.se

### Internet:

[www.flow-viz.com](http://www.flow-viz.com)