

STANDARDISERAD MÄTNING FÖR CEMENTBASERADE INJEKTERINGSMEDELS REOLOGI

STANDARDISED MEASUREMENT FOR RHEOLOGICAL PROPERTIES OF CEMENT BASED GROUTS

Ulf Håkansson, Skanska/KTH

Almir Draganovic, KTH

Johan Funehag, Tyréns/LTU

Sammanfattning

Inom undermarksbyggande vill man minimera påverkan på grundvattennivå och dränering av berget kring byggnader och konstruktioner. Man vill också minimera vatteninflöde till undermarksanläggningen vilket kan påverka både produktion av anläggningen och dess funktion negativt. Injektering med cementbaserade medel är idag den vanligaste metoden, för att minimera dessa problem.

Injekteringsmedels reologiska egenskaper har en avgörande påverkan på ett injekteringsresultat och utgör också en bra indikator på medlets kvalitet. Trots detta finns det ingen standard eller procedur för mätning av de reologiska egenskaperna, vilket gör det mycket svårt att jämföra data från dagens mätningar och uppfylla stipulerade krav.

Föreliggande arbete syftar till att sammanställa dagens kunskap för att därigenom komma fram till ett förslag på en standardiserad procedur för mätning av cementbaserade injekteringsmedels reologiska egenskaper.

Summary

Within underground construction, one wants to minimize the impact on ground water levels and drainage in the vicinity of surrounding buildings and structures. An aim is also to reduce water inflow to the excavation, which can affect both the production of the facility and its future operation adversely. Grouting with cement-based grouts are currently the most common method, in order to minimize these problems. The used grouts rheological properties have a crucial influence on a grouting result and are

also a good indicator of grout quality. Despite this, there is no standard or procedure for measuring the rheological properties, which makes it very difficult to compare the data from today's measurements and fulfill stipulated requirements. The present work aims to compile current knowledge to come up with a proposal for a standardized procedure for the measurement of cement-based grout's rheological properties.

Inledning

Inom undermarksbyggandet vill man minimera påverkan på grundvattennivå och dränering av berget kring byggnader och konstruktioner. Man vill också minimera vatteninflöde till undermarksanläggningen vilket kan påverka både produktion av anläggningen och dess funktion negativt. Injektering med cementbaserade medel är idag den vanligaste metoden, för att minimera dessa problem.

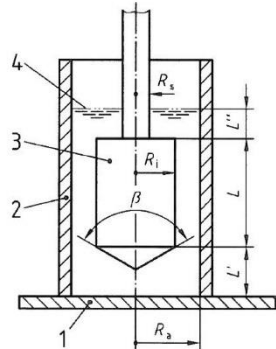
I samtliga undermarksprojekt i Sverige utförs en miljöprövning med resulterande miljödömdom som dikterar maximal tillåtet inläckage till anläggningen. De flesta infrastrukturprojekt är idag förlagda till urbana miljöer och kostnaderna för att undvika vattenrelaterade problem och uppfylla miljödömdomar utgör i storleksordningen 10 % av projektets totalkostnad.

De reologiska egenskaperna hos injekteringsbruket, såsom viskositet och flytgräns, påverkar inträngningslängden av vilket i sin tur är en avgörande faktor för det slutliga tätningsresultatet. Egenskaperna är också viktiga styrparametrar för att kunna kontrollera och säkerställa en hög och jämn kvalitet på injekteringsarbetet. Trots detta mäts reologiska strömningsegenskaper än idag främst med hjälp av enkla empiriska mätanordningar eller i bästa fall med konventionella roterande viskometrar eller reometrar (där den förstnämnda är av enklare, fältmässigare, karaktär).

Idag finns inga procedurer eller standarder i Sverige som beskriver hur man ska mäta och utvärdera flytgräns och viskositet av cementbaserade injekteringsmedel, trots att detaljerade krav förekommer i de flesta av dagens handlingar och kontrakt för undermarksprojekt. Det kan antas att denna brist på procedur och standard ofta är en källa till tidskrävande irrelevant arbete, onödiga diskussioner och motsättningar mellan parterna i dagens undermarksprojekt.

Den Tyska standarden DIN 53019 (2008) beskriver principerna för mätning av viskositet och reogram (grafisk representation mellan skjuvspänning och skjuvdeformation) med rotationsreometrar och i standarden definierade geometrier (Figur 1). Som framgår av figuren kan olika geometriska förhållanden användas,

beroende på hur hög ”viskositet” som vätskan har. Standarden beskriver inte hur de reologiska parametrarna skall utvärderas.



$$\begin{aligned}L/R_i &= 3 \\L'/R_i &= 1 \\L''/R_i &= 1 \\R_s/R_i &= 0.3 \\R_a/R_i &= 1.0847 \\ \beta &= 120^\circ \pm 1^\circ\end{aligned}$$

Figur 1. Geometriska förhållanden i DIN 53019

Ett viktigt bidrag från 30 års forskning är att utnyttja den kunskap som erhållits till att föreslå ett standardiserat sätt att mäta parametrar som har betydelse för ett lyckat injekteringsresultat.

Syftet med föreliggande projekt har varit att beskriva de vanligaste frågeställningarna och utifrån dagens kunskap ge förslag på en standardiserad mätprocedur för cementbaserade injekteringsmedels reologiska egenskaper, både i fält och i laboratorium.

Inom ramen för detta projekt har vi ställt följande krav på en standardiserad mätmetod för cementbaserade injekteringsmedels reologiska egenskaper. Metoden skall vara:

- Baserad på forskning och erfarenhet
- Relevant för rådande applikation
- Ingenjörsmässig och robust
- Praktisk och beprövad
- Följa en existerande standard

Efter att tidigt ha konstaterat behovet av en standard inom injektering, har en strategi för projektarbetet inledningsvis tagits fram och innehållit följande steg för att nå målet med ett förslag på mätstandard – litteraturstudie, mätning av kalibreringsvätskor och cementbruk enligt DIN 53019 (med två olika reometrar) samt besvarande av de frågeställningar som framkommit under arbetets gång.

Litteraturstudie

Det kan konstateras att det finns ett stort urval av standardiserade instrument för att bestämma vätskors viskositet men inga standardiserade metoder då det gäller att bestämma icke-Newtonska vätskor och deras vanligen förekommande flytgräns, beskrivna i litteraturen.

För mätning av viskositet på cementbaserade injekteringsmedel är litteraturen begränsad till olika sorters rotationsviskosimetrar, främst de som är baserade på koncentriska cylindrar, och den så kallade Marshkonen, trots att den inte mäter viskositet direkt.

För mätning av flytgräns är man hänvisad till en stor mängd, mer eller mindre enkla, metoder framtagna inom olika forskningsprojekt.

Samtliga studerade metoder baseras på att ett prov tas bort från processen (injekteringsriggen) och att mätningen sker off-line, i ett laboratorium eller i fält. På senare tid har därför förslag kommit fram på metoder som mäter de reologiska egenskaperna in-line, dvs direkt i föreliggande injekteringsprocess, med hjälp av ultraljud (Håkansson et al, 2012; Rahman, 2015; Håkansson & Wiklund, 2017).

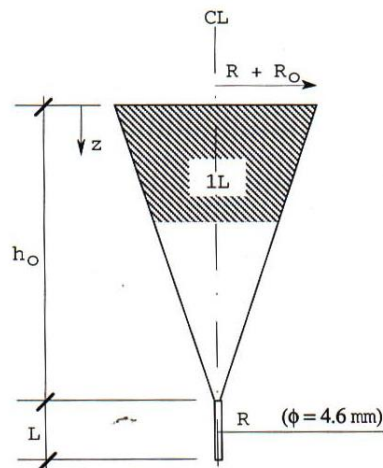
Mätning av viskositet

Vanligen mäts de reologiska egenskaperna med hjälp av en rotationsreometer, bestående av ett statiskt kärl (cup) och en roterande cylinder (bob), sk. koaxialcylinder. Andra geometrier förekommer också (t.ex. ”cone-and-plate” och ”parallel-plate”) liksom utrustning där kärlet i stället roterar och cylindern är stilla.

Med en rotationsreometer kan viskositeten utvärderas från mätdata genom en kurvanpassning till olika reologiska modeller, såsom t.ex. Bingham modellen. Osäkerheter är relaterade till operatören, proceduren, mätdata och hur bra modellen passar till data. Ett kroniskt problem med denna typ av utrustning är glidning (slip) mellan vätska och fasta begränsningsytor. Vid analys och teoribildning antas ofta att vätskan har noll relativ hastighet vid fasta begränsningsytorna (väggarna) vilket dessvärre oftast inte är fallet (Håkansson, 1993, 1994; Eriksson et al, 2004; Nehdi & Rahman, 2004; QD Nguyen, 2006, 2012; Rahman, 2015, Zou et al, 2018). Olika sätt att minska detta problem är t.ex. genom sandning, blästring eller svarvade skåror och i vissa fall genom att använda en vinge, som vid bestämning av lerors skjuvhållfasthet. Problemet med slip förekommer främst vid låga skjuvhastigheter, säg mindre än 10 1/s (Shamu & Håkansson, 2019).

Ett ytterligare problem vid mätning med rotationsviskosimeter är separation mellan den fasta och den flytande fasen, dvs. mellan cementpartiklarna och vattnet. 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 mätkärllet och att man till slut mäter något annat än vad som är representativt för injekteringsbruket.

Marshkonen (Figur 2) är ett instrument som kommer från oljeindustrin för mätning av borrhvetskors strömningsegenskaper. Man fyller konen med en bestämd mängd vätska och registrerar den tid det tar för en liter att rinna ut ur ett rör längst ned i konen. Med Marshkonen kan man inte bestämma viskositeten direkt utan den tid som mäts utgör en kombination av densitet, viskositet och flytgräns. För att kunna separera viskositet och flytgräns krävs att den ena är känd *á-priori* (Håkansson, 1993, 1994; H Nguyen, 2006; Sahmaran, 2008; H Nguyen, 2011; Sadrizadeh et al, 2017). Densiteten kan enkelt bestämmas, med t.ex en mud-balance. Marshkonen är enkel att använda och lämpar sig väl för kvalitetskontroll i fält.



Figur 2. Marshkon för uppskattning av strömningsegenskaper hos borrhvetskors inom oljeindustrin, $L = 50 \text{ mm}$ (2"), $h_o = 305 \text{ mm}$ (12"), $R+R_o = 76 \text{ mm}$ (6")

Mätning av flytgräns

Mätning av flytgräns kan indelas i direkta och indirekta metoder. Med direkta metoder fås ett värde på flytgränsen emedan man i indirekta metoder måste extrapolera fram flytgränsen med hjälp av mätdata och anpassade reologiska modeller. Felkällor förekommer dels i data som reometern genererar, beroende på

mätprocedur och operatör, och dels i den reologiska modell som data måste anpassas till, t.ex. Bingham modellen.

Med rotationsreometern kan man även direkt bestämma flytgränsen. Detta görs med hjälp av att använda en vinge i stället för cylinder (QD Nguyen, 1983), göra ett kryp test eller ”stress-relaxation” (Rahman et al, 2016), dvs. stänga av rotationen och se vid vilket vridmoment som cylindern stannar.

För att direkt bestämma flytgränsen, utan reometer, har ett antal, mer eller mindre enkla, metoder tagits fram av vilka ett urval är följande:

- Plate Cohesion Meter (Lombardi, 1985)
- Raise-pipe (Håkansson, 1993, 1994)
- Lutande plan (Cousot & Boyer, 1995)
- Slotted-plate (Zhu et al, 2001)
- Cylindrisk penetrometer (Uhlherr et al, 2002)
- Yield-stick (Axelsson & Gustafson, 2005)

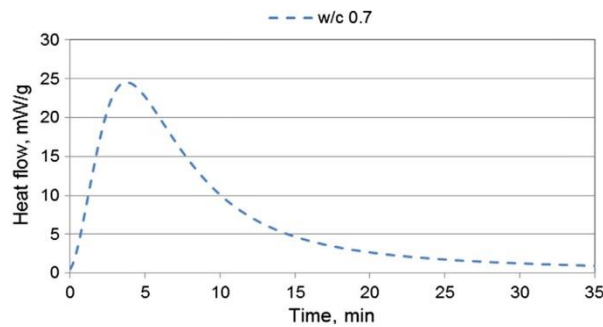
Slutsatser från litteraturstudien

Generellt kan sägas att cementbaserade injekteringsmedel (en suspension) har en komplex reologi (icke-Newtonsk med flytgräns), som är svår att mäta, är tids- och historieberoende (pga. hydratisering och tixotropi), och ger ett resultat som beror på metod, operatör och procedur.

Ovanstående medför att det är mycket angeläget att definiera en mätstandard som gör det möjligt att mäta på ett likartat sätt och där resultat går att jämföra från gång till gång. Det skulle också vara bra om man kunde erhålla både viskositet och flytgräns med en och samma metod.

Slutsatsen från litteraturstudien är att mätmetoden bör baseras på rotationsreometer (off-line) eller mätning med ultraljud (in-line). För den sistnämnda krävs dock ytterligare utveckling innan metoden kan appliceras under pågående injektering.

För att erhålla representativa värden på egenskaperna, eftersom de ändras pga. hydratiseringen då cementen blandas med vatten, bör mätningarna påbörjas efter en viss tid. Mätningar av värmeutvecklingen efter blandning med vatten indikerar att man bör vänta ca. 20 minuter innan man påbörjar de reologiska mätningarna, se Figur 3.



Figur 3 Värmeutveckling (mW/g) med tid efter blandning av cement och vatten för vct 0.7, Rahman et al, (2016)

Material och mätinstrument

Litteraturstudien visade att mycket få har använt DIN 53019 standarden och följt den strikt vid mätningen av reologiska egenskaper av cementbruk. Variationen av använda metoder och instrument har varit stor.

Syfte med de egna mätningarna är att testa en rotationsreometer enligt DIN 53019 på bruk och utvärdera möjligheten att använda denna för ett detaljerat standardiseringsförslag. Mätningarna syftar också till att finna en möjlig bärbar viskometer för förprovning i fält samt att ge ett ytterligare underlag för diskussionen kring val av instrument, tid för mätning och val av skjuvhastighetsintervall. Utöver försök på bruk har en del kalibreringsmätningar med hög och lågviskösa vätskor genomförts för att verifiera noggrannheten hos reometrarna, speciellt vid mätning av skjuvspänning vid låga skjuvhastigheter.

Material

Cementa Injekteringscement, IC30, max kornstorlek (diameter): 30 μm

Vattencementtal, vct: 0,6; 0,8 och 1,2

Tillsatser: flytmedel, iFlow (0,2 % av cementvikten)

Kalibreringsvätska: högviskösa (500 mPas) och lågviskösa (10 mPas)

Mätinstrument

Reometer: TA AR2000

Viskometer: Brookfield LV-II

Blandare 1: laboratorieblandare Dispermat CV3, RPM: 10000
Blandningstid: 4 minuter + 1 minut efter tillsats av flytmedel, iFlow
Blandare 2: fältblandare Atlas Copco Unigrout
Mätningstidpunkt: direkt efter blandning och efter 15 min (med omrörning 3000 RPM under väntetiden)
Temperatur: 23°C (lab), 7°C (fält)

Resultat

Kalibreringsvätska

Reometer TA AR2000 har en stor noggrannhet. Mätningar med låg viskösa vätskor vid låga skjuvhastigheter kan dock vara osäkra. En bidragande faktor kan vara glidning mellan vätskan och väggen på cylindern eller kärlet, dvs ”slip”.

Referensmätningar med cementbruk

Repetierbarheten är bra med låg standardavvikelse för TA AR2000. Mätningar med bruk med låga vct har något lägre repeterbarhet. Resultat är förväntat och rimligt. Mätningar vid låga skjuvhastigheter (< 25 1/s) kan vara problematiska.

För Brookfield LV-II kan dess kapacitet överskridas om bruket har en flytgräns över 10 Pa. Jämförelse mellan laboratorie- och fältmätningar var svårt att utföra pga. den stora temperaturskillnaden. Trots detta fungerade mätningarna tillfredsställande.

Diskussion

Val av instrument för mätning av viskositet

Den sensitivitetsanalys som har gjorts inom projektet visar att viskositeten har en stor påverkan på brukets spridning och därför bör denna bestämmas direkt med reometer. Litteraturstudien visade också att i de flesta publicerade artiklar med provning av cementbruk använder koaxialcylinder geometri. Egna mätningar med denna geometri enligt DIN-53019 visade inga betydande problem, utom möjligtvis mätningar vid låga skjuvhastigheter.

Allt detta tyder på att val av rotationsreometer/viskosimeter med koaxialcylinder geometri enligt DIN 53019 standard är det mest rimliga valet.

Val av instrument för mätning av flytgräns

Jämfört med viskositet är det mera osäkert hur man ska mäta flytgränsen. Litteraturstudien visar att det finns flera instrument att mäta flytgräns med, direkt eller indirekt. Dessutom är själva definitionen av flytgräns varierande vid utvärderingen av mätdata och både statisk och dynamisk flytgräns förekommer (Rahman et al, 2016).

En stor fördel skulle vara att använda viskositetsmätningen och bestämma flytgränsen med en av de indirekta metoderna än att göra en separat mätning. Sensitivitetsanalysen visar också att flytgränsen inte har så stor påverkan under de första 5 meters spridning. Om man dessutom exkluderar värdena från mätningen med rotationsviskosimeter vid låga skjuvhastigheter, blir skillnad i flytgräns mindre mellan de olika utvärderingsmodellerna. Baserat på detta föreslås det därför att extrapolera flytgränsen enligt Bingham modellen från viskositetsmätningar med reometer. För att kunna göra detta krävs att intervallet för extrapolationen definieras, dvs. över vilket spann av skjuvhastigheter som skall användas.

Skjuvhastighetsintervall och kurvanpassning med Bingham modellen

Litteratur och referensmätningar med TA AR2000 reometer enligt DIN-53019 visar att mätningar vid framförallt låga skjuvhastigheter kan vara störda och osäkra (Shamu & Håkansson, 2019). Därför är det väsentligt att betrakta de skjuvhastigheter som förekommer i bruket under spridning i en verklig spricka. Skjuvhastigheterna vid 2D radiell strömning kan beräknas enligt följande ekvation (personlig kommunikation, Zou 2018):

$$\dot{\gamma} = \frac{\tau_0}{\mu} \left(\frac{1}{I_D} - 1 \right) \frac{I_D \cdot \gamma}{1 + (I_D \cdot \gamma)} \frac{1}{\ln(1 + I_D \cdot \gamma)}; \gamma = \frac{I_{max}}{r_{bh}}$$

En referensberäkning har gjorts med följande indata: viskositet 30 mPas, flytgräns 2 Pa, tryck 2 MPa och spricköppning 100 µm.

Den övre relevanta skjuvhastighetsgränsen är relaterad till spridning av bruket i början av injekteringen där de beräknade skjuvhastigheterna är mycket höga (oändliga). Vid vår referensspricka och 0.9 m spridning är den beräknade

skjuvhastigheten vid sprickväggen 1025 1/s. Den nedre relevanta skjuvhastighetsgränsen är relaterad till önskad spridning av bruket. Önskad spridning i denna referensspricka kan exempelvis vara 5 m, där den beräknade skjuvhastigheten, enligt ovanstående formel, är ca. 113 1/s.

För tunnare bruk ($v_{ct}=0.8$ och 1.2) är påverkan på flytgränsen och viskositet nästan obetydlig. För tjockare bruk ($v_{ct}=0.6$) är den väsentlig pga. att mätning vid skjuvhastighet 1 [1/s] inte följer den linjära trenden och är osäker. Den övre gränsen för skjuvhastighet ges av de olika instrumentens maxkapacitet och det är därför nödvändigt att välja ett rimligt värde. Mätningar med höga skjuvhastigheter kräver speciell mätutrusning och vi har inte någon mäterfarenhet med så höga skjuvhastigheter. Erfarenhet visar att 250 1/s är lämpligt.

Den undre gränsen styrs av osäkra mätvärden vid låga skjuvhastigheter. Uppmätta spänningar för 1 – 25 1/s anses inte relevanta i vår applikation för bestämning av flytgräns och viskositet. Detta beror på glidning (slip) och tixotropi, dvs. att partiklarna börjar flockulera vid liten relativ rörelse mellan dessa. Erfarenhet visar att ett lämpligt värde är 25 1/s.

Upp/ner kurva

Eftersom mätningar med upp- och nerkurva ger olika resultat bör dessa göras med nerkurva pga. att skjuvningen i bruket börjar från en högre skjuvhastighet och minskar med inträngningen under injekteringsprocessen. På så sätt återspeglar mätningsprocessen bättre verkligheten.

Tidpunkt för mätningen

Med hänvisning till Figur 3 är det lämpligt att förlägga mätningen efter att den största värmeutvecklingen har passerat, dvs. efter ca. 20 minuter. Detta för att erhålla representativa värden som inte störs av den initiala fasen av hydratiseringen (C3A).

Förslag till mätprocedur

Följande provningsprocedur rekommenderas för mätning av cementbaserade injekteringsmedels reologiska egenskaper i laboratorium:

Använd rotationsreometer med koaxialcylindrar enligt standarden DN 53019 och skjuvhastigheter i fallande ordning (dvs. mätningen börjar med det högsta värdet och sedan avtagande, sk ”down-curve”):

1. Använd skjuvhastighetsintervall: 250, 175, 150, 125, 100, 75, 50 och 25 [1/s]
2. Starta mätningen efter 5 min blandning + 15 min omrörning
3. Utvärdera flytgräns och plastisk viskositet enligt den linjära Bingham modellen (kurvanpassning till ovanstående skjuvhastigheter)
4. Repetera mätningen 3 gånger
5. Presentera alla mätningar grafiskt, inklusive den linjära kurvanpassningen
6. Presentera tabell med flytgräns och viskositet för varje mätning, inklusive medelvärde och standardavvikelse
7. Presentera brukstemperatur för varje mätning. Bör utföras vid 8°C
8. Beskriv använd reometer, råhet och geometri
9. Beskriv bruk (cementsort, vct, tillsatser), blandare och blandningsprocedur

Förprovning i fält: samma procedur som ovanstående men med en bärbar, robust enklare viskometer (typ Brookfield). Om instrumentet inte klarar de högsta skjuvhastigheterna, tas dessa bort före den linjära kurvanpassningen. Referensmätningar görs samtidigt med mud-balance (densitet) och Marshkon (utströmningstid).

Fortlöpande provning i fält: kvalitetskontroll görs med mud-balance och Marshkon.

Referenser

- Axelsson M, Gustafson G. 2006. A robust method to determine the shear strength of cement-based injection grouts in the field. *Tunnelling and Underground Space Technology* 21, 499–503
- Coussot, P. and S. Boyer, 1995, Determination of yield stress fluid behaviour from inclined plane test, *Rheol. Acta* 34, 534-543.
- Nehdi M, Rahman M-A (2004) Estimating rheological properties of cement pastes using various rheological models for different test geometry, gap and surface friction. *Cem Concr Res* 34:1993–2007. doi: 10.1016/j.cemconres.2004.02.020
- Nguyen, Q.D., Boger, D.V., 1983. Yield stress measurement for concentrated suspensions. *J. Rheol.* 27, 321.

- Nguyen Q. D, Akroyd T, Daniel C. De Kee and Lixuan Zhu . 2006. Yield stress measurements in suspensions: an inter-laboratory study; Korea-Australia Rheology Journal Vol. 18, No. 1, pp. 15-24
- Nguyen H., Remond S., Gallias J.L, Bigas J.B., Muller P., 2006. Flow of Herschel–Bulkley fluids through the Marsh cone, *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* 139 128–134.
- Nguyen H., Remond S., Gallias J.L., 2011. Influence of cement grouts composition on the rheological behaviour. *Cement and Concrete Research*, Volume 41, Issue 3, pg 292-300.
- Rahman M. 2015. Rheology of cement grout –Ultrasound based in-line measurement technique and grouting design parameters. Doctoral Thesis, KTH.
- Rahman M., Wiklund J., Kotzé R., Håkansson U. 2016. Yield stress of cement grouts. *Tunnelling and Underground Space Technology* 61, 50–60.
- Sadrizadeh, S., A. N. Ghafar, A. Halilovic, and U. Håkansson. 2017. “Numerical, Experimental and Analytical Studies on Fluid Flow through a Marsh Funnel.” *Journal of Applied Fluid Mechanics*. 10(6): 1501-1507.
- Sahmaran M., Özkan N., Keskin S.B., Uzal B., Yaman İ.Ö., Erdem T.K. 2008. Evaluation of natural zeolite as a viscosity-modifying agent for cement-based grouts. *Cement and Concrete Research* 38. 930–937.
- Uhlherr, P.H.T., J. Guo, T.-N. Fang and C. Tiu, 2002, Static measurement of yield stress using a cylindrical penetrometer, *Korea-Australia Rheology J.* 14, 17-23.
- Zhu, L., N. Sun, K. Papadopoulos and D. De Kee, 2001, A slotted plate device for measuring static yield stress, *J. Rheol.* 45, 1105-1122.
- Zou L., Håkansson U., Cvetkovic V. 2018. Two-phase cement grout propagation in homogeneous water-saturated rock Fractures. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. Volume 106, pg 243-249.
- 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.
- Shamu, J., Håkansson, U. 2019. Rheology of cement grouts: on the critical shear rate and no-slip regime in the Couette geometry. *Cement and Concrete Research*. (submitted)

STANDARDISERING AV MÄTNINGEN AV INTRÄNGNINGSFÖRMÅGA AV CEMENTBRUK

Standardisation of penetrability measurements of cementitious grouts

Almir Draganovic, KTH

Ulf Håkansson, Skanska, KTH

Johan Funehag, Tyrens/LTU

Sammanfattning

Injektering av undermarkskonstruktioner utförs för att minimera påverkan på grundvatten. Det är viktigt att injekteringen genomförs med ett bruk som har en god inträngningsförmåga och kan spridas tillräckligt långt för att förebygga påverkan på grundvatten. För att åstadkomma det behöver vi en mätmetod för att kvalitetsäkra inträngningsegenskaper av bruk. Idag finns det flera metoder som används vilket skapar problem när man ställer krav på bruk och vid analysen av resultat. Syftet med denna artikel är att systematisera och analysera dessa metoder och föreslå en metod för standard.

Summary

Grouting of underground constructions is performed to minimize impact on groundwater. It is important that the grouting is carried out with a grout that has good penetration ability and can be spread far enough to achieve effective sealing. In order to achieve this, we need a measurement method for quality assuring penetration properties of grout. Today, there are several methods that are used for these measurements. This creates problems when we want to set requirements and also in the analysis of results. The purpose of this article is to systematize and analyze these existing methods and propose a method for standard.

1 Introduktion

Injektering av undermarkskonstruktioner utförs för att minska vatteninflöde till konstruktioner, förhindra dränering och sättningar i omgivande mark. Det är viktigt att injekteringen genomförs med ett injekteringsbruk som har en god inträngningsförmåga och kan spridas tillräckligt långt för att förebygga ovan nämnda problem. Pluggbildning och

filtrering av bruket är dock två processer som motverkar spridningen av bruket och försämrar effekten av injektering. Pluggbildning är en process när cementpartiklarna i bruket bygger en brygga över en öppning eller sprickviddminskning under flödet genom en spricka och på så sätt skapar en plugg i sprickan. Denna process minskar flödet och till slut kan stoppa det. Filtreringen av bruket sker under pluggbildning.

Idag används Svensk standard SS-EN 14497:2004 för att mäta filtreringsstabilitet hos cementbaserade injekteringsbruk med filterpump. Enligt denna standard mäter man volymen av passerat bruk genom 125, 100, 75, 45 och 32 μm filter. Den största passerade volymen som kan mätas med filter pumpen är 300 ml. Är det självklart att man kan anta att provade bruk kan injektera sprickor större än det minsta filtret där 300 ml bruk har passerat? Ett annat problem med denna standard är tolkning av uppmätta data. Andra relevanta frågor är om mätprocedur, provtryck, provvolym och filter representerar den filtreringsprocessen som sker i sprickorna.

Denna standard är framtagen 2004 men baseras på forskningen från 1980-90 talet. Sedan dess har man tagit fram nya instrument. De kan delas principiellt i två grupper där inträngningsförmåga mäts med filter och spalt. Instrument som mäter inträngning med filter är Widman Filterpress (Widman, 1996), Gelman pressure filter (Warner, 2004), API Filter press (De Paoli m fl., 1992; API 13B-1; Manual USACE, 2017), Filterpress (Eriksson och Stille, 2003).

Eriksson och Stille (2003) insåg problematiken kring mätningen av inträngningsegenskaper av bruk med filterpumpen och tolkningen av data. Som en lösning på det tog de fram filterpress och utvecklade parametrarna b_{min} och b_{krit} för att beskriva inträngningsegenskaper av ett bruk. Parameter b_{krit} representerar den minsta sprickan som kan injekteras utan pluggbildning och filtrering och b_{min} representerar den största sprickan som inte alls kan injekteras. Sprickor mellan b_{min} och b_{krit} kan delvis injekteras p.g.a. filtrering och pluggbildning. Parametrarna b_{min} och b_{krit} mäts i [μm]. Det är en klar definition av inträngningsegenskaper.

De filterbaserade instrument som togs fram i USA utvecklades med en annan syn på filtrering. Filtreringsstabil bruk i USA betyder att bruket inte kommer att ändra densitet och reologiska egenskaper betydligt under själva inträngningen p.g.a. att porlösningen skulle flyta snabbare än själva cementpartiklarna. Den syftar också att det finns risk att

porlösningen trycks in i små sprickor eller porsystem. Parameter ”pressure filtration coefficient” som representerar filtreringsstabilitet bestäms enligt denna ekvation

$$K_{pf} = \frac{V_{filter}}{V_{prov} \cdot \sqrt{t_{min}}}$$

och mäts i [min^{-1/2}]. USA metoden mäter inte inträngningsförmåga och resultat kan inte direkt jämföras med svenska metoder.

Instrument som tagits fram som mäter inträngning med spaltgeometri är: NES (Sandberg, 1997), Kort spalt (Draganović och Stille, 2011), Penetrakon (Axelsson och Gustafson, 2010), Lång spalt (Draganović och Stille, 2014), Lång spalt med varierande spaltvidder så kallad VALS (Ghafar m fl. 2016b).

En analys av uppmätt inträngningsförmåga (bkrit) av olika bruk med filter- och spaltinstrument visade att dessa instrument ger olika resultat. Orsaker till denna skillnad är flera: olika mätgeometrier, olika mättryck, olika mätvolym men framförallt en tydlig orsak är olika utvärderingsmetoder. Huvudanledning för att spaltinstrument har tagits fram är diskussionen och uppfattningen att mätningen av inträngningsförmåga med filter inte är representativ för brukets inträngning genom sprickor. Andra relevanta problem är mättryck, mätvolym och utvärderingsmetod.

2 Lämplig mätinstrument ?

Vi kan aldrig veta hur inträngningsprocess i en spricka vid en sprickviddminskning sker exakt. Under inträngningen varierar sprickvidd, flödes karaktär (1D, 2D, 3D), tryck, kanske också brukets egenskaper pga. filtrering, blandning med vatten, osv. Det finns många instrument men det är väldigt svårt att svara vilken av dem mäter inträngningen genom en sprickviddminskning på bästa sätt. Valet av ett instrument är väldigt svårt och måste baseras på ingenjörsmesigt bedömning också. Utöver val av instrument måste vi också diskutera lämpligt provvolym, provtryck och utvärderingsmetod för bestämning av b_{krit} .

Filterpump kan inte kontrollera tryck. Provvolum är också begränsad. Baserad på ingenjörsmässig bedömning filtreringsprocessen i filterpumpen återspeglar inte filtreringsprocessen i en spricka heller. Allt detta tyder att filterpumpen inte är lämpligt för mätning av b_{krit} -standard. Däremot pga. enkelheten är det ett väldigt lämpligt instrument

för kvalitetskontroll av cement och blandning. Stora cementpartiklar eller klumpar av dåligt blandade bruk kommer att fastna direkt vid mätningen.

Widman filterpress och Gelman pressure filter är avsedda för mätning om hur bruket tappar porlösningen och vatten under inträngningen i stort. Resultat från Gelman pressure filter är "Pressure filtration coefficient" (Kpf) uppmät i $[\text{min}^{-1/2}]$ och själva filtret, som kan vara filterpaper eller liknade, är relativt ospecificerad. Det gör jämförelse med vår uppfattning om inträngning svårt. Mätresultat presenteras inte i $[\mu\text{m}]$. Därför dessa instrument är inte lämpliga för mätning av inträngningsegenskaper av bruk i vår mening.

Penetrakon skulle kunna eventuellt användas för mätning av bkrit-standard. Nuvarande utvärderingsmetoden kan vara subjektivt men den skulle kunna ändras. I sällat för att en människa ska observera flöde och bedöma övergång från kontinuerligt till droppande skulle man kunna mäta volymen av passerade bruk i tid för olika spaltvidder och på så sätt mäta bkrit-standard. Ett problem med detta instrument kan vara då mätning av den aktuella spaltvidden. Är det tillräckligt robust? En annan relevant fråga är om den tål stora tryck upp till 15 bar. Kan mätning av spaltstorleken påverkas vid provning med stora tryck och är den då säker?

Filterpressen ger en liknade resultat som kort spalt och Penetrakon vid låga tryck och liknande utvärderingsmetod men med mycket större flödestväryta vilket gör jämförelse tveksam. Provvolymer är ingen begränsning men tryck är begränsad till upp till 2 bar. Så denna metod är också tveksam baserad på ett storflödestväryta och begränsning för mätning med högre tryck.

Baserad på ingenjörsmässig bedömning tror vi att VALS är instrument som mäter inträngningsprocess i sprickor bäst. Men denna metod är väldigt krävande för oftare provningar och är inte heller lämpligt för fältarbete.

Mätningar med kort spalt både med hög och låg tryck visade liknande resultat som VALS vilket tider att dessa två metoder återspeglar inträngningsprocessen på ett liknande sätt. Dessutom är denna metod väldigt robust. Det är inte mycket som kan gå fel. Idag kan man tillverka en kort spalt med mycket stor noggrannhet. En tillverkad, kontrollerad och märkt spalt kan användas länge. Detta ger en mycket liten osäkerhet på spaltstorleken. Kort spalt kan användas för mätningar med låga och höga tryck. Om vattenspolning som rengöring

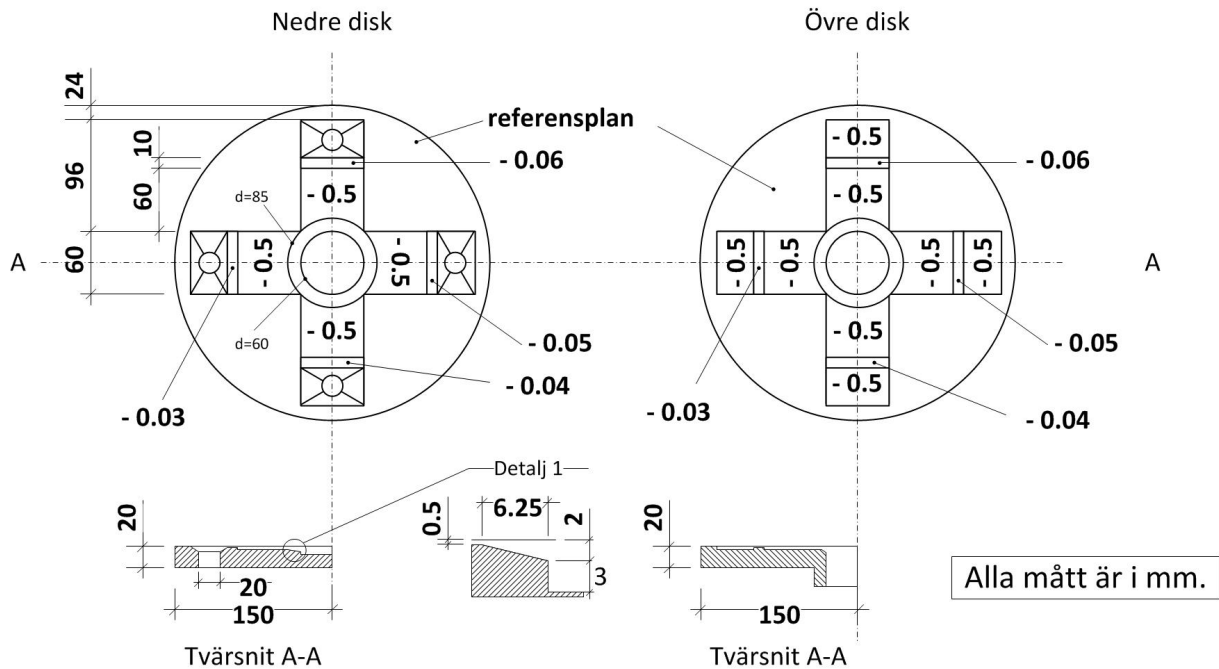
fungerar mellan två mätningar minskar det betydligt tiden och hantering vid flera mätningar på en och samma blandning av bruk. Med vattenspolning som rengöring kan man inte få ett ”bättre” inträngning, möjligtvis en sämre vilket tvingar operatören att rengöra instrument om mätningen med renspolad spalt inte kan upprepas. Förslagsvis kan man ha 4 olika spalter i en disk. Det skulle förenkla och effektivisera mätningen. En mätning ger resultat på fyra spalter..

NES är en liknande instrument som kort spalt fast den har inte spaltviddminskning i spalten så inträngningsprocess är inte likadan som i kort spalt. Den simulerar mera inträngningsprocessen från borrhålet till sprickan vilket är också relevant speciellt om mätresultat uppmäta med NES är sämre från resultat uppmäta med kort spalt.

3 Förslag till ny standard (instrument, mätprocedur och utvärderingsmetod)

3.1 Förslag till mätinstrument

Figur 1 visar ett förslag på ett nytt instrument för provning av inträngningsegenskaper av bruk i labb och fält. Det är en utvecklad version av korta spalten. Huvudskillnaden är att den ha fyra olika spalter. Det ger fyra resultat på en gång vilket är en stor effektivitetsförbättring. När en övre och nedre disk skruvas ihop framställer de fyra artificiella sprickor med en sprickviddminskning var. Spalter är en 60 mm bredda. Spaltvidd är 1 mm i början och reduceras till önskad spaltvidd. Spaltvidder efter spaltviddminskningar reduceras till 120, 100, 80 och 60 μm . Man kan också tillverka spalter med något större eller mindre spaltviddminskningar beroende på vilken bruk man provar. Skillnaden mellan två närliggande spalter kan vara 10 μm inställt för 20 μm . Efter varje spaltviddminskning fins ett hål för samling av passerat bruk. Spalten runt hållet är utformad så att passerat bruk samlas lätt. Viktigt är att ingången från ”borrhålet” till varje spår är tillräckligt stor och att spaltviddminskningen är tillräckligt långt från ”borrhålet” att eventuell pluggbildning vid en spaltviddminskning inte påverkar pluggbildning i andra spalter.



Figur 1: Anpassad kort spalt för labb- och fältprovning.

3.2 Lämpligt provtryck?

Literaturstudiet och de presenterade mätningar genomförda med olika tryck med NES, kort spalt och VALS ((Hjertström (2001), Draganović och Stille (2011), Ghafar m fl. (2016b))), visade att inträngningsförmågan hos cementbaserade bruk är tryckberoende. Ett högre tryck ger en bättre inträngning.

Det är intressant att tryckskillnad mellan en punkt strax bakom brukets front och en punkt strax framför fronten inte är så stor och ändras inte betydande under spridningen av bruket. På samma sätt ändras inte heller tryckskillnad över en sprickviddminskning i sprickan betydande vid brukets spridning om ingen pluggbildning sker. Det som ändras vid inträngningen är brukets spridningshastighet. I början är hastigheten störst och minskar med inträngningen pga. att ackumulerade skjuvspänningen ökar. Det betyder att högre tryck ger en högre hastighet och en högre hastighet ger en bättre inträngning. Det leder till att bruket kan lättare passera en förträngning nära borrhålet än en förträngning av samma storlek som befinner sig längre från borrhålet.

Detta innebär att bkrit är tryck- och hastighetsberoende. Dimensionerande provtryck skulle

vara trycket som ger brukshastighet i den kritiska (dimensionerande) sprickan när bruket når den önskade inträngningslängden (I_{design}). Denna dimensionerande provtryck för den dimensionerande sprickvidd kan bestämas baserad på RTGCM och kubiklag. Kubiklagen gäller för Newton vätskor så antagelse att bruk är en Newton vätska kan vara problematiskt. Se nedan ingångsdata för beräkning av provtryck för provning av inträngningsegenskaper med kort spalt.

$$b_{ref} = 100 \cdot 10^{-6} \text{ m}$$

$$I_{design} = 5 \text{ m}$$

$$Pg = 2 \text{ MPa}$$

$$\tau_0 = 2 \text{ Pa}$$

$$\mu = 0.03 \text{ Pas}$$

$$w = 0.06 \text{ m (spaltbredd)}$$

Det beräknade provtrycket är 0.09 bar. Det verkar vara väldigt låg. Ingen metod har provat med en sådan låg tryck. Vi vet inte hur det skulle kunna påverka resultat. Provning med VALS med tryckmätning längst hela spalten vid motsvarande brukshastigheter skulle kunna vara intressant för att undersöka denna problematik. .

Vidare, en basering av provtryck på olika b_{ref} , I_{design} , och olika brukegenskaper skulle ge olika provtryck vid olika projekt. Det skulle komplicera provningar betydligt. Dessutom användning av så låga tryck som 1 m vattentryck är oprövade och vi vet inte vilka konsekvenser det skulle kunna orsaka. Utöver allt detta, kan provning med så låga tryck vara för konservativt också. Det är en fråga för framtida forskning.

Injekteringstryck i tunnlar är vanligtvis 2 MPa över grundvattentryck när det inte finns risk för jacking. Tryck av 1 MPa (10 bar) kan vara lämplig för provning. Då hastigheten av bruket i spalten vid provningen skulle motsvara hastigheten av bruket i sprickor något längre från borrhålet och samtidigt borde inte det vara för konservativt.

3.3 Lämplig provvolym?

Eriksson och Stille (2003) undersökte frågan om en lämplig provvolym av bruk vid provningar med filtepressen. De kom fram att 1 liter bruk kan vara en lämplig mängd. Dessa undersökningar visade att risken för filtrering ökar med volymen av provat bruk och

kan förekomma även i 270 μm filter med 10 l provvolym. Därför är det svårt att bestämma en relevant provvolym.

Provvolymen kan relateras till volymen av bruk som behövs för att injektera den minsta spricka som beskrivs i kravet till en önskad spridningslängd (Idesign). Filtreringen är inte relevant efter att bruket har nått den önskade spridningen. Problemet som kan uppstå då är att sprickvidden av den minsta sprickan kan vara så liten att volymen kan vara också mycket liten. Ett annat problem är att olika krav i olika projekt skulle ge olika provvolymen vilket skulle inte vara praktiskt. Samma diskussion hade vi med provtryck. Provvolymen därför bör baseras på en referensspricka med sprickvidd till ex. 100 μm .

Frågan är också om provvolymen ska motsvara hela volymen av en referensspricka som ska injekteras eller kan den vara mindre till exempel en kvart? Frågan är om brukets spridning genom fyra olika kvarter av en spricka är oberoende av varandra. Om flödet är oberoende då är det ett parallellt system och en lämplig utvärderingsvolym kan vara runt 2 l för 5 m spridning i en 100 μm referens spricka.

I så fall, vid provningar i laboratoriet med spalten med fyra utgångar, skulle man behöva blanda ca 10 l bruk på en gång för att göra en mätning. Det är en för stor mängd för de flesta labblandare som har en kapacitet på 5 l. Det skulle försvåra mätningar i laboratoriet. Det är det viktigt att laboratorieprovningar och fältprovningar är lika så mycket som möjligt.

En annan aspekt vid bestämningen av provvolymen borde vara också mängd av bruk som är representativ för hela blandningssatsen. Är bruket så homogen efter blandningen att för exempel är 1 l bruk kan bli representativ för 100 l sats. Kommer 1 l bruk att innehålla de största partiklarna i bruket och eventuella partikelklumpar? I laboratorie provningar är det inte problem eftersom man använder nästan hela satsen av 5 l vid provning med den föreslagna spalten. Eriksson och Stille (2003) bestämde 1 l som tillräcklig och hanterbar provningsvolym.

Baserad på ovanstående diskussion föreslås 1 l som provningsvolym. Men pga. av denna osäkerhet kan man i början, när man tar fram detta instrument och börjar med fältmätningar, mäta med 2 l men utvärdera med en 1 och 2 l. Det kostar ingenting. Officiellt utvärdering baseras på 1 l. På så skulle man kunna i efterhand lösa denna osäkerhet.

3.4 Utvärderingsmetod

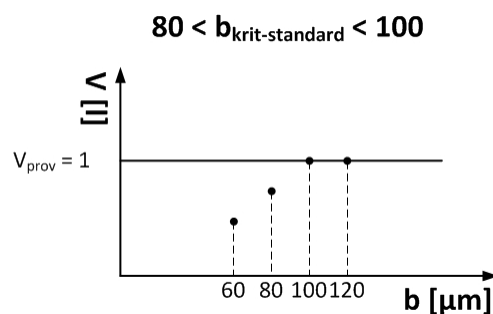
Vi har visat att b_{krit} är inte bara bruksberoende. Den är också tryckberoende, instrumentberoende och utvärderingsmetodberoende. Så skriva bara b_{krit} som en egenskap av ett bruk är fel utan att nämna dessa faktorer dvs. med vilken instrument den är mätt, med vilken tryck och hur den har utvärderats.

Figur 2 visar förslag för utvärdering av mätningen med det förslagna instrumentet. Provningen visar att genom 60 och 80 μm spalter passerade mindre än 1 l bruk. Vi har fått ett stop av flödet i dessa spalter. Genom 100 och 120 μm spalter passerade mer än 1 l bruk. Kravet på bruk, mättningsresultat och utvärdering kan definieras för exempel så här:

1. Krav : $b_{\text{krit-standard}} < 100 \mu\text{m}$
2. Mättningsresultat: $80 \mu\text{m} < b_{\text{krit-standard}} < 100 \mu\text{m}$
3. Utvärdering av resultat: Bruket klarar ställda krav.

Kravet beskrivs med att $b_{\text{krit-standard}}$ av provade bruket måste vara mindre av ett givet värde. Exempelvis 100 μm . Mättningsresultat av $b_{\text{krit-standard}}$ redovisas med ett mätområde till ex. $80 \mu\text{m} < b_{\text{krit-standard}} < 100 \mu\text{m}$ och resultatet av provningen blir att bruket klarar eller inte klarar det ställda kravet.

En eventuell linjär regression av uppmätta data enligt metoden Eriksson och Stille (2003) kan ge ibland större och ibland mindre b_{krit} än den uppmätta, (Draganovic och Ghafar, 2017). Det beror mycket på antal mätningar och storleksskillnad av filter mellan närliggande mätningar. Storleksskillnaden av filter mellan två närliggande mätningar bestämmer noggrannheten. Det finns egentligen inget behov för linjermanalys av uppmätta data. b_{min} är inte heller något som varierar mycket och ligger runt 30-40 μm för här nämnda bruk för att det ska vara motivering för flera mätningar mellan b_{krit} och b_{min} . Om man vill kan man mäta b_{min} med spalten på samma sätt som b_{krit} . Man måste bara tillverka spalten med mindre spaltvidder.



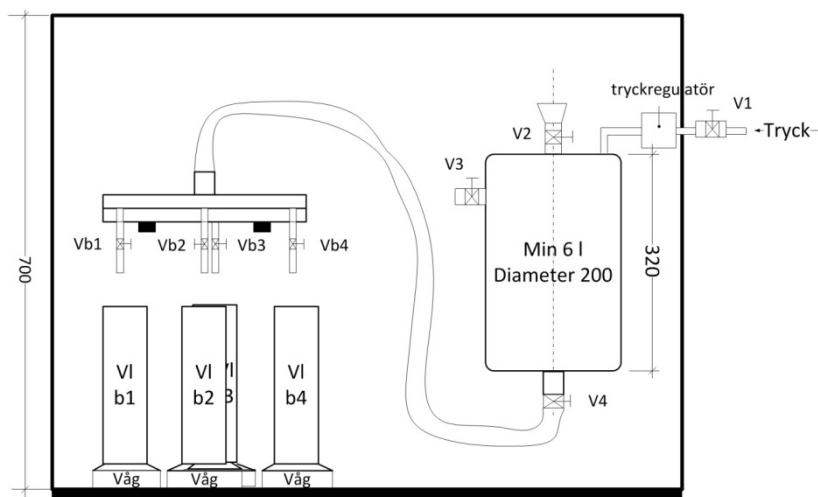
Figur 2: Utvärdering av b_{krit} -standard

3.5 Förslag till testprocedur

Figur 3 visar komplett utrusning för provning av bruk med den nya korta spalten.

Testprocedur:

1. Initial läge. Alla ventiler stängda utom V2, Vb1-Vb4.
2. Fyll brukbehållare med minimum 6 l bruk och stäng V2.
3. Trycksätt brukbehållare med 10 bar tryck genom att öppna V1.
4. Starta mätning genom att öppna ventil V4.
5. Stoppa mätning i respektive utgång om 1 l bruk (V_{prov}) har passerat genom att stänga respektive utgångsventil (Vb1-Vb4). Observera att man måste stänga utgångsventill när 1 l bruk har passerat utgången. Annars är det risk att man tömmer behållare genom den största spalten innan mätningen är färdig.
6. Mätningen är färdig när antigen 1 l bruk har passerat eller stopp av flödet har inträffat i alla spalter.
7. Anteckna passerade volymer genom respektive spalt.
8. Presentera resultat $b_1 < b_{krit-standard} < b_2$ enligt utvärderingsmetoden presenterad i Figur 2.
9. Repetera 3 gånger. Man måste klara kravet med minst två mätningar.



Figur 3: Komplet utrustning och mätprocedur för provning av bruk med den nya korta spalten.

4 Slutsatser

Under inträngningen varierar sprickvidd, flödes karaktär (1D, 2D, 3D), tryck, kanske också brukets egenskaper pga. filtrering, blandning med vatten, osv. Vi kan aldrig veta hur inträngningsprocess i en spricka vid en sprickviddminskning sker exakt. Det är väldigt svårt att välja ett instrument som mäter denna process på ett bra sätt. Valet måste baseras på ingenjörsmesigt bedömning också.

Det är flera betydelsefulla moment som vi vill åstadkomma med en ny standard. Det främsta är att välja ett instrument som vi tror är någorlunda representativ för process som vi mäter. Det är kanske minst lika viktigt att mätningen standardiseras så att alla mäter inträngningen på samma sätt. Då kan mätresultat från olika mätningar jämföras och analysera på ett vettigt sätt. Beställare kommer också att kunna ställa krav på bruk på ett bättre sätt än idag, där både krav på bruket samt sättet hur man ska mäta finns beskrivna.

Vi har också sett att bkrit är inte bara bruksberoende. Det är också provtryck-, provvolym-, instrument- och utvärderingsmetodberoende. Så skriva bara bkrit som en egenskap av ett bruk är fel utan att nämna dessa faktorer dvs. med vilken instrument den är mätt, med vilken tryck och hur den har utvärderats.

Vi har också visat om provtryck och provvolym skulle baseras på dimensionerande injektering (bkraV, Idesign, reologi av bruk) skulle dem variera i varje projekt. En och samma bruk skulle ge olika bkrit-standard vid olika projekt vilket är inte praktiskt och skulle vara förvirrande. Därför bör man välja provtryck och provvolym baserat på referensinjektering.

5 Referenser

- Axelsson M., Gustafson G., (2010). The Penetrakon, a new robust field measurement device for determining the penetrability of cementitious grouts. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 25, (1), 2010, 1-8.
- De Paoli B., Bosco R., Granata R., Bruce D.A., (1992). Grouting, Soil Improvement and

Geosynthetics. Proceeding of the ASCE Conference.

Draganović A., 2009. Provning av injekteringsbruk Bangårdstunneln/Citybanan. KTH, Avdelning för jord och bergmekanik. Uppdragsrapport: 2009-10-23.

Draganović, A., Stille H., 2011. Filtration and penetrability of cement-based grout: Study performed with a short slot. *Tunnelling and Underground Space Technology* 26, 548-559

Draganović A., Stille H., 2014. Filtration of cement based grout using a long slot. *Tunnelling and Underground Space Technology* 43, 101-112.

Draganović A., Björk C., 2014. Penetrability of cement-based grouts dependent on the PSD-curve and cement chemistry, BeFo rapport 134.

Draganović A., 2016. Provning av bruk åt ÅF/Trafikverket på KTH 20160616.

Draganović, A. Ghafar, A.N. (2017). Issues in measurements and evaluation of penetrability of cement-based grout measured with filter pump and penetrability meter in the field. 5th International Conference on Grouting and Deep Mixing. Honolulu, Hawaii.

Eriksson M., Stille H., (2003). A Method for Measuring and Evaluating the Penetrability of Grouts. Proc. 3th International Conference, Grouting and Ground Treatment, Geotechnical Special Publication No. 120 (pp 1326-1337). New Orleans.

Eriksson, M., Friedrich, M., & Vorschulze, C. (2004). Variation in the Rheology and Penetrability of Cement-based Grouts - An Experimental Study. *Cement and Concrete Research*, 34 (7), 1111-1119.

Gandais, M., & Delmans, F. (1987). High Penetration C3S Bentonite-cement Grouts for Finely Fissured and Porous Rock. *Proc Int. Conference on Foundation and Tunnels* (pp 29-33). London.

Ghafar, A. N., Ali Akbar, S., Al-Naddaf, M., Draganovic, A., Larsson, S. 2016a. Uncertainties in Grout Penetrability Measurements; Evaluation and Comparison of Filter pump, Penetrability meter and Short slot. – Submitted to Journal of Geotechnical and Geological Engineering.

Ghafar, A. N., S. Sadrizadeh, K. Magakis, A. Draganovic, and S. Larsson. 2016b. "Varying Aperture Long Slot (VALS), a method for Studying Grout Penetrability into Fractured Hard Rock." Accepted ASTM International - Geotechnical Testing Journal.

Hansson, P. (1995). "Filtration stability of cement grouts for injection of concrete structures". In: *Proc. IABSE Symposium, San Francisco*, pp. 1199–1204.

Hjertström, S. (2001). Microcement- Penetration versus particle size and time control. *4th nordic rock grouting symposium* (pp. 61-71). Stockholm: SveBeFo Report 55.

McKinley J. D., Bolton M. D., 1999. A geotechnical description of fresh cement grout-filtration and consolidation behaviour. *Magazine of Concrete Research*, 51, 295-307.

Nobuto, J., Nishigaki, M., Mikake, S., Kobayashi, S., & Sato, T. (2008). Study on filtration property of grouting materials; High-pressure filtration test. *Doboku Gakkai Ronbunshuu C*, 64 (4), 813-832.

Sandberg, P. (1997). NES-metod för mätning av injekteringsbruks inträngningsförmåga. *Svensk Bergs- & Brukstidning*.

Stille H. (2015). Rock Grouting-Theories and Applications. BeFo. ISBN 978-91-637-7638-0

Svensk standard SS-EN 14497:2004 "Betongkonstruktioner - Produkter och system för skydd och reparation – Provning av produkter och system för skydd och reparation -

Bestämning av filtreringsstabilitet hos injekteringsmaterial”

U.S. Army Corps of Engineers, 2017. Engineering and Design GROUTING TECHNOLOGY, Manual No. 1110-2-3506. 31March2017.

Widmann, R. (1996). International Society for Rock Mechanics Commission on Rock Grouting. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech.* , 33 (8), 803-847.

Zimmermann R W, Bodvarsson G S (1996) Hydraulic conductivity of rock fractures. *Transport in Porous Media* 23, 1–30.