STANDARDISERING AV MÄTNINGEN AV INTRÄNGNINGSFÖRMÅGA AV CEMENTBRUK

Standardisation of penetrability measuremets 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 fins 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 for 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 create 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 exiting 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 anat 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 principiell 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 bmin och bkrit for att beskriva inträngningsegenskaper av ett bruk. Parameter bkrit representerar den minsta sprickan som kan injekteras utan pluggbildning och filtrering och bmin representerar den största sprickan som inte alls kan injekteras. Sprickor mellan bmin och bkrit kan delvis injekteras pga. filtrering och pluggbildning. Parametrarna bmin och bkrit mäts i [µm]. Det är en klar definition av inträngningsegenskaper.

De filterbaseradeinstrument som togs fram i USA utvecklades med en annan syn på filtrering. Filtreringsstabilt bruk i USA betyder att bruket inte kommer att ändra densitet och reologiska egenskaper betydligt under själva inträngningen pga. 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 koefficient” 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 splat (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 framföralt 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 sprickviddminsking 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 sprickviddminsking på bästa sätt. Valet av ett instrument är väldigt svår 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. Provvolym är också begränsad. Baserad på ingenjörsmässig bedömning filtreringsprocessen i filerpumpen återspeglar inte filtreringsprocessen i en spricka heller. Allt detta tyder att filterpumpen inte är lämpligt för mätning av bkrit-standard. Däremot pga. enkelheten är det ett väldigt lämplig 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 koefficient” (Kpf) uppmät i [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 [µm]. 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. Provvolymen är ingen bengränsning 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

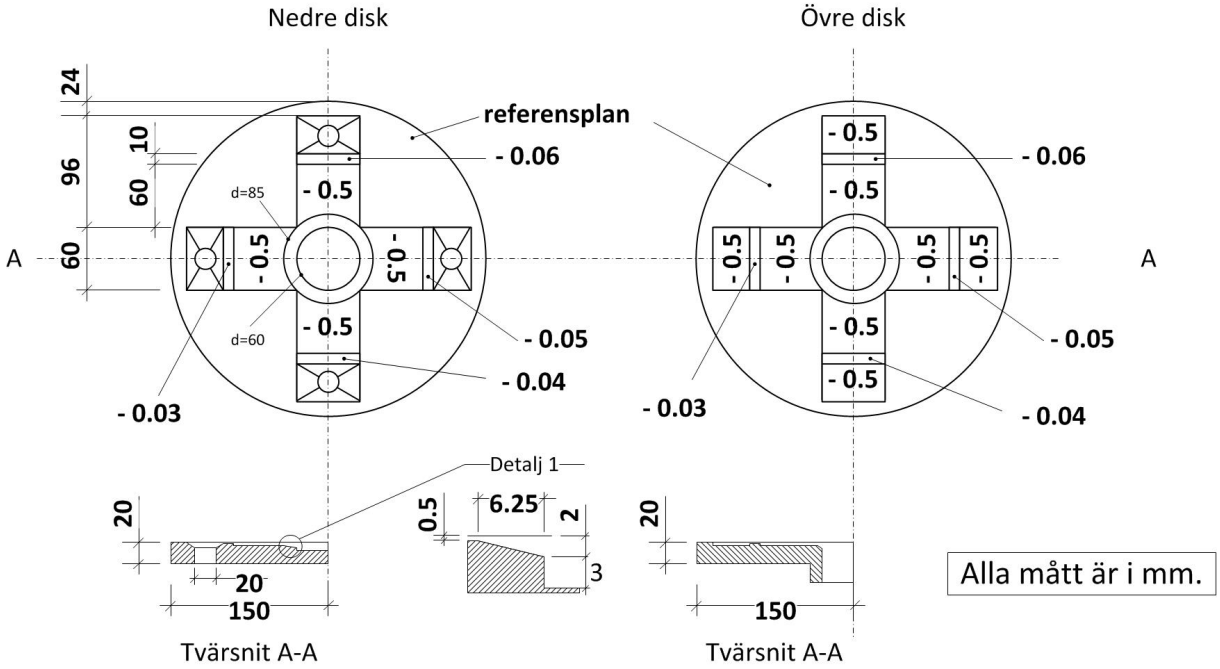
fungerar mellan två mätningar minskar det betydligt tiden och hantering vid flera mätningar på en och samma blandning av bruk. Med vattenspolning som rengöring kan man inte få ett ”bättre” inträngning, möjligtvis en sämre vilket tvingar operatören att rengöra instrument om mätningen med renspolad spalt 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 spaltviddminsking 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 genoförda 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 punk 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 sprickviddminsking 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 (Idesign). Denna dimensinerande provtryck för den dimensinerande 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.

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

$Idesign = 5m$

$Pg = 2\ MPa$

$\tau_0 = 2\ Pa$

$\mu = 0.03 Pas$

$\mathrm{w} = 0.06\,\mathrm{m}$ (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 kana vara intressant för att undersöka denna problematik. .

Vidare, en basering av provtryck på olika bref , Idesign, 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 alt 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 anat problem är att olika krav i olika projekt skulle ge olika provvolymer vilket skulle inte vara praktiskt. Samma diskussion hade vi med provtryck. Provvolymen därför bör baseras på en referensspricka med sprickvidd till ex. 100 µm.

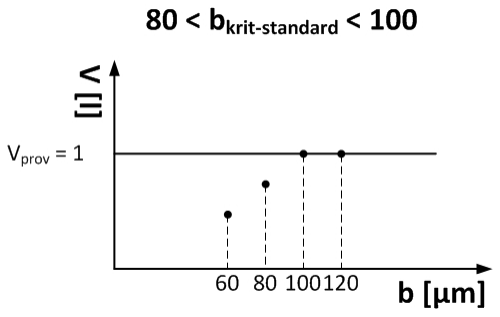
Frågan är också om provvolymen ska motsvara hela volymen av en referensspricka som ska injekteras eller kan den vara mindre till exempel en kvart? Frågan är om brukets spridning genom fyra olika kvarter av en spricka är oberoende av varandra. Om flödet är oberoende då är det ett parallellt system och en lämplig utvärderingsvolym kan vara runt 2l 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 bestämingen 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 störta 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 ingeting. Officiellt utvärdering baseras på 1 l. På så skulle man kunna i efterhand lösa denna osäkerhet.

3.4 Utvärderingsmetod

Vi har visat att bkrit är inte bara bruksberoende. Den är också tryckberoende, instrumentberoende 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.
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 en 1 l bruk.
Kravet på bruk, mätningsresultat och utvärdering kan definieras för exempel så här:
1. Krav : bkrit-standard < 100 µm
2. Mätningsresultat: 80 µm < bkrit-standard < 100 µm
3. Utvärdering av resultat: Bruket klarar ställda krav.
Kravet beskrivs med att bkrit-standard av provade bruket måste vara mindre av ett givet värde. Exempelvis 100 µm. Mätningsresultat av bkrit-standard redovisas med ett mätområde till ex. 80 µm < bkrit-standard < 100 µm och resultatet av provningen blir att bruket klarar eller inte klararar det ställda kravet.
En eventuell linjär regression av uppmätta data enligt metoden Eriksson och Stille (2003)kan ge ibland större och ibland mindre bkrit än den uppmätta, (Draganovic och Ghafar, 2017). Det beror mycket på antal mätningar och storleksskillnad av filter mellan närliggande mätningar. Storlekskillnaden av filter mellan två närliggande mätningar bestämmer noggrannheten. Det finns egentligen inget behov för linjeranalys av uppmätta data. Bmin 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 bkrit och bmin. Om man vill kan man mäta bmin med spalten på samma sätt som bkrit. Man måste bara tillverka spalten med mindre spaltvidder.



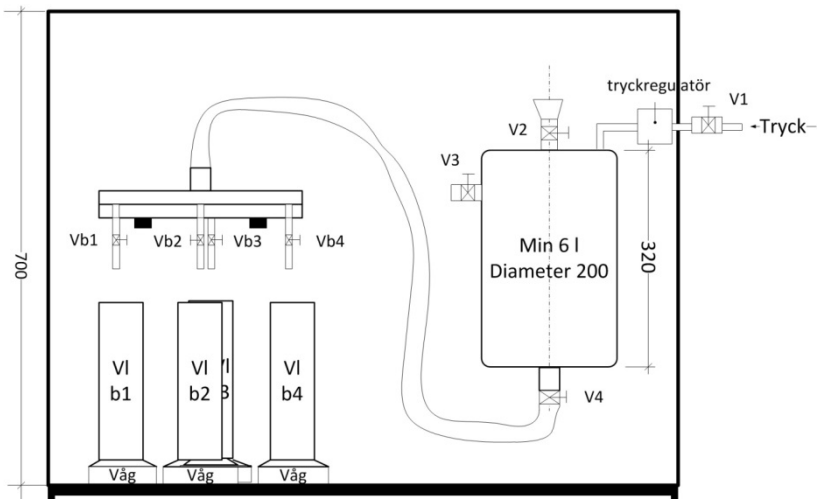
Figur 2: Utvärdering av $b_{krit\text{-}standard}$

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 $b1<b_{krit\text{-}standard}<b2$ enligt utvärderingsmetoden presenterad i Figur 2.
9. Repetera 3 gånger. Man måste klara kravet med minst två mätningar.



Figur 3: Komplett utrusning 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 sprickviddminsking 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 mätingen 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 provryck 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 Commision 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*.