

# GRUNDLÄGGANDE EGENSKAPER FÖR INJEKTERING OCH INTRÄNGNING AV BRUK

## Fundamentals around grouting and penetration of grout

*Johan Funehag, Chalmers tekniska högskola*  
*Johan Thörn, Chalmers tekniska högskola*

### Sammanfattning

Injektering i hårt berg inkluderar bland andra vetenskaper som flöde av vätskor, reologi, hydrogeologi, materialkännedom och geologi. Att faktiskt förstå och ha en känsla för hur flöde fungerar i sprickor är viktigt. Detta kan lätt glömmas av och energi läggs allt som oftast på andra delar, exempelvis på materialkännedom. Denna artikel syftar till att beskriva hur flöde sker i sprickor och bör kunna bidra till en känsla av hur flödet av bruk faktiskt sker. Artikeln utgår från framtagna samband för spridning baserat på Binghamflöden för att beskriva hur yttre händelser som kan uppträda vid vanlig injektering kan påverka spridningen. En verifiering av inträngningslängder i en nyligen tillverkad sprickmodell används för att visa hur ett Binghamflöde beter sig. Både spridning och hur ett sambandshål påverkar spridningen visas samt hur detta kan påverka designkriterier.

Presentationen innefattar filmvisning av injekteringsflöde i sprickmodellen syftar till att belysa hur teoretiska beräkningar kan användas som modeller för bruksspridning (filmerna hålls tillgängliga på [www.chalmers.se/hydrogeologi-injektering](http://www.chalmers.se/hydrogeologi-injektering)).

### Abstract

Grouting of hard rock involves sciences like fluid-flow, rheology, hydrogeology, material science and geology. Lately, it sometimes seems like that we have forgotten how fluids behave in fractures and more efforts are spent on the other sciences. The aim of this paper is to show fluid flow behavior. The paper use penetration equations for bingham flow to assess circumstances encountered in real grouting works. A verification of the spreading of grout in a geometrically known replica is shown and used to address the basics of a bingham flow. Both spreading and how a connected borehole affects the penetration will be discussed. How grouting works can be adapted to fulfill the requirements of spreading will be concluded.

The movies of the spreading that is shown during the presentation will bring light to the concepts of theoretical grout spread (available afterwards at [www.chalmers.se/hydrogeology-grouting](http://www.chalmers.se/hydrogeology-grouting))

## **Inledning**

Injektering i hårt berg innefattar många olika ämnesområden; materialkunskap, hydrogeologi, maskinkunskap, flödesegenskaper etc. För att få en effektiv och fungerande injektering behövs viss förståelse inom alla områden. Forskningen och förståelsen som ofta baseras på redan befintligt kunnande/utförande har kommit långt. Vi kan nu beskriva en bergmassa passande injektering, vi kan bestämma egenskaper på bruk och vilken brukstyp som är lämpligast för ett aktuellt jobb, vi kan sätta, till viss del, krav på utrustning som bör användas. Att beskriva vad som sker inne i sprickan är vi sämre på. Däremot för att kunna optimera injekteringen behövs förståelse om flöde i sprickor samt vilka begränsningar och problem som kan uppstå vid injektering.

Ett antal olika ”fenomen” som faktiskt händer i varje tunnelprojekt är utgångspunkt för denna artikel. De fenomen som hanteras här är specifikt ytläckage och sambandshål. Vidare kommer erosion av injekteringsbruk att belysas mer översiktligt. Med ytläckage menas att injekteringsmedel kommer via en spricka tillbaka in i tunneln. Med sambandshål menas att medan injektering sker i ett borrhål så kommer injekteringsmedel ut i ett annat borrhål. Med erosion av injekteringsmedel menas att bruket under pågående injektering på något sätt eroderas (minskar i utbredning) eller späds ut.

## **Grundläggande samband**

En del av injekteringsbranschen väljer att följa konceptet/metoden för ett bruks inträngningslängd. Det grundläggande är att den maximala inträngningslängden beror av pålagt tryck,  $\Delta p$  [Pa], sprickvidden,  $b$  [m] samt skjuvgränsen på bruket,  $\tau_0$  [Pa] (Lombardi, 1985, Hässler, 1991). Som noteras så är inte tiden en del av denna grundläggande konceptualisering. Förståelse för hur dessa parametrar påverkar inträngningslängden kommer ganska enkelt, till exempel ökar sprickvidden blir inträngningslängden längre och görs bruket styvare så blir inträngningslängden kortare.

## **Injekteringsdesign baserat på inträngningslängd för cementbruk**

Det är lätt att inse att tiden för injektering har en stor påverkan på inträngningslängden. I numeriska beräkningar kan tiden lätt inorporeras som en faktor. För att lösa detta så togs binghampluggens tillväxt in. Antagandet var då att när binghampluggen vuxit till så den är lika bred som sprickvidden så stannar bruksflödet av, se bland annat (Hässler, 1991). För att analytiskt räkna ut inträngningslängden är det lite mer komplicerat.

Den flödesrelaterade parameter som har en tidskomponent är viskositeten med enheten Pa·s. Gustafson och Claesson (2004) och Gustafson et al. (2013) beskriver hur inträngningslängden beror av tiden. Härledning av sambanden återfinns i dessa. De mest användbara slutsatserna är följande:

Den maximala inträngningslängden,  $I_{max,cement}$ , som kan nås utan begränsning av den effektiva injekteringstiden kan beräknas som:

$$I_{\max, \text{cement}} = \frac{\Delta p \cdot b}{2\tau_0} \quad (\text{ekv 1})$$

Att nå full inträngningslängd enligt ekvation 1 är endast möjligt om man bortser från att att bruket härdar, och den effektiva injekteringstiden för att nå dit skulle bli mycket lång. Inträngningen sker snabbast i början av förloppet och den beror av den effektiva injekteringstiden i enlighet med nedanstående ekvationer (2-4).

$$t_0 = \frac{6\mu_g \cdot \Delta p}{\tau_0^2} \quad (\text{ekv 2})$$

$t_0$  är en karakteristisk tid som relateras till brukets viskositet,  $\mu_g$ , och flytgräns,  $\tau_0$ , samt till injekteringsövertrycket,  $\Delta p$ . Den karakteristiska tiden har enheten sekunder. För att kunna beräkna inträngningslängden omvandlas den karakteristiska tiden till en dimensionslös tid,  $t_D$ , genom att relatera den effektiva injekteringstiden,  $t$ , till den ovan beskrivna karakteristiska tiden.

$$t_D = \frac{t}{t_0} \quad (\text{ekv 3})$$

Genom att ansätta en önskvärd effektiv injekteringstid, fås ett värde på den dimensionslösa tiden. Denna används i ekvation 4 för att ta fram beräkningsfaktorn för tvådimensionellt flöde och ansatt effektiv injekteringstid,  $\theta_{2D}$  samt för *endimensionellt* flöde (flöde i kanaler),  $\theta_{1D}$

$$\theta_{2D} = \frac{t_D}{2(3+t_D)} \quad \text{och} \quad \theta_{1D} = \frac{t_D}{2(0,6+t_D)} \quad (\text{ekv 4})$$

Beräkningsfaktorn,  $\theta$ , används sedan för att beräkna den dimensionslösa inträngningslängden för tvådimensionellt flöde och ansatt effektiv injekteringstid,  $I_D$ .

$$I_D = \sqrt{\theta^2 + 4\theta} - \theta \quad (\text{ekv 5})$$

Den dimensionslösa inträngningslängden beskrivs med ett värde mellan 0 och 1 som sedan används för att utgående från den maximala inträngningslängden,  $I_{\max, \text{cement}}$  enligt ekvation 1. Då erhålls för den ansatta effektiva injekteringstiden den aktuella inträngningslängden  $I_{2D}$  med enheten meter;

$$I_{2D} = I_{D,2D} \times I_{\max, \text{cement}} \quad (\text{ekv 6})$$

Det inses lätt att när hänsyn tas till den effektiva injekteringstiden blir inträngningslängden alltid kortare än den maximala beräknade inträngningslängden.

### **Innebörden**

När ett borrhål injekteras fås inträngning i alla sprickor samtidigt möjligen undantaget det ovanliga fallet att en spricka som korsar borrhålet har en större sprickvidd än borrhålet i sig själv.

Relaterar man inträngningslängden till sprickvidd så är den relativa inträngningslängden *alltid lika* lång i alla sprickor,  $I_D = \text{konstant}$ . Som ett exempel, ekvation 1 ger att om sprickvidden ökas från 100 till 200  $\mu\text{m}$  med tryck och skjuvgräns konstanta blir den maximala inträngningen dubbelt så lång i 200  $\mu\text{m}$  jämfört med 100  $\mu\text{m}$ .

Viskositeten, alltså trögheten, styr hastigheten på inträngning. En hög viskositet ger en långsammare inträngning, en snabbare tryckupbyggnad vid pumpen och mer motståndskraftig mot utspädning. Det motsatta gäller också.

Skjuvgränsen bestämmer i princip hur lång inträngningslängd man får. En hög skjuvgräns ger kortare inträngning och därmed mindre bruksåtgång.

### **Använda i designarbete och uppföljning**

Förinjektering innebär traditionellt sett att 20-25 m långa injekteringshål borrar framför tunnelstuff med ett stick på 4-5 m. Denna geometri används oftast oavsett vilken riktning de vattenförande sprickorna har. Vid svårare passager och hårda krav på inläckage till tunneln kan ett längre överlapp mellan skärmarna än de vanliga 5 m användas. Design av förinjektering kan göras på följande sätt:

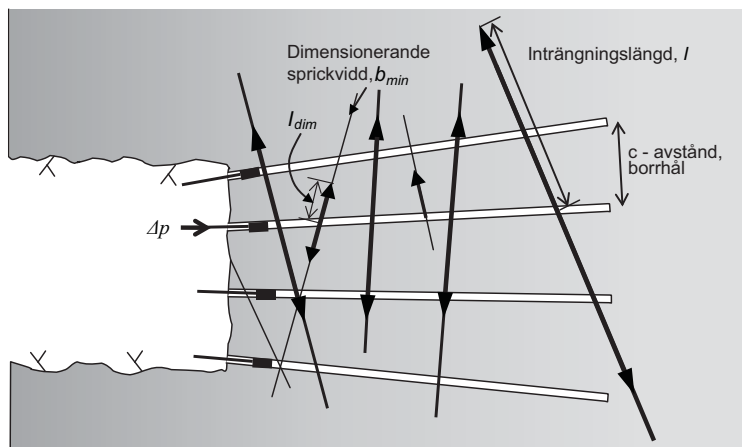
Utifrån upprättad geohydrologisk prognos för berget fås information om vilket täthetskrav som är ställda på tunneln och vilka injekteringsmedel som bör vara mest lämpliga för tunneln.

**Berget-** sprickvidder och grundvattentryck ger minsta erforderliga spricka som är nödvändig att täta för att klara inläckagemålet. Detta uppnås genom att anpassa nedanstående grupper av designparametrar inom deras respektive rimliga/möjliga gränser.

- **Skärmgeometrin-** Antal borrhål, borrhålens spridning och riktning, stick, spetsavstånd.
- **Injekteringstekniken-** injekteringstryck och injekteringstid. Lämplig utrustning.
- **Injekteringsmaterialet-** Cement (och/eller silica sol/annat fintättningsmedel), viskositet (-viskositetstillväxt), skjuvgräns (geltid).

De ovanstående faktorerna är summerade i Figur 1. Slutmålet i designarbetet är att beräkna fram en inträngningslängd i den dimensionerande sprickvidden. Den dimensionerande sprickvidden är den minsta sprickvidd som behöver tätas för att nå täthetskravet som ställts på tunneln. Den kan identifieras exempelvis genom analyser av platspecifik kärnkartering med tillhörande hydrotester och användning av pareto-

fördelningen (se Gustafson et.al 2004 och Claesson et.al 2013). Fransson et al. (2012) ger en sammanfattande beskrivning av delstegen.



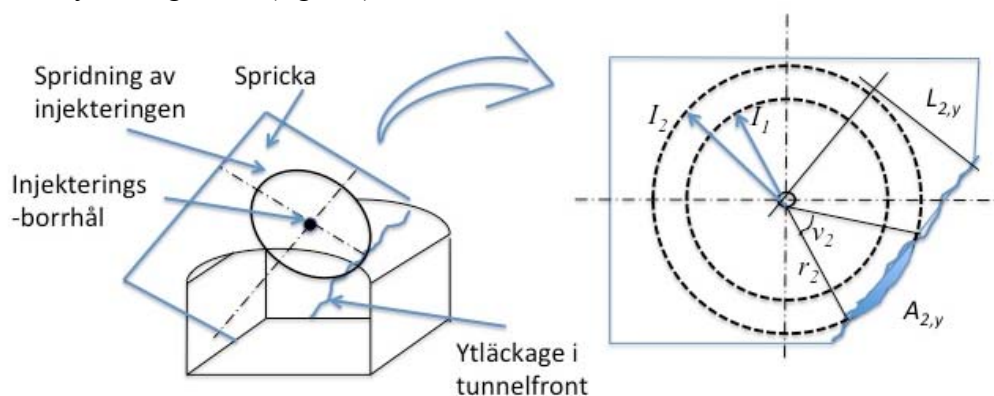
Figur 1. Schematisk bild över hur design av en injektering med dess ingående faktorer åskådliggörs.

Figure 1. Sketch visualizing grouting design parameters.

Ett överlapp av injekteringsmedlet i den dimensionerande sprickan antas, säg 50% och via detta kan ett c- avstånd mellan borrhålen beräknas som  $I=1,25 \times \text{ÖL}$  (ÖL=överlapp). Givet den erforderliga inträngningslängden kan tryck och tid beräknas. Bruksegenskaperna kan väljas för att minimera bruksåtgång och även så att utspädning och erosion minimeras, se vidare Axelsson (2009).

## Beskrivning av ytläckage och sambandshål

En spricka som mynnar ut i tunnelfront kan ge upphov till ett ytläckage. Självklart kan det också ske via flera konnekterade sprickor. I nedanstående figur visas schematiskt hur ett ytläckage sker (figur 2).



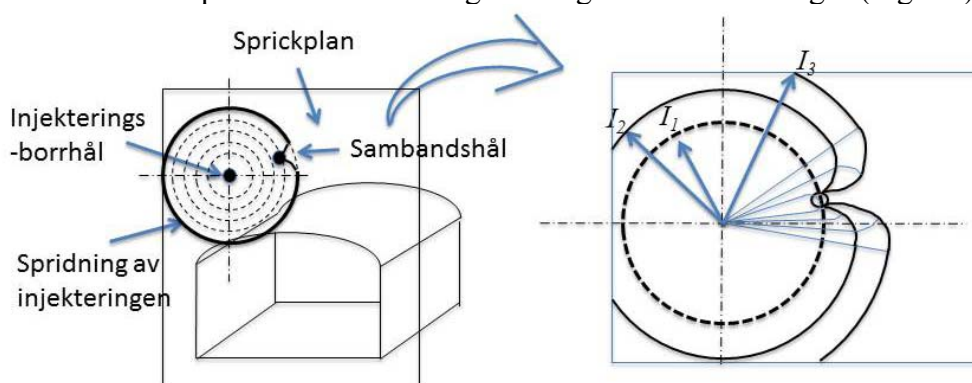
Figur 2. Schematisk bild över ytläckage, vänster samt en beskrivning av förutsättningar för ytläckage, höger.

Figure 2. Left: Sketch of surface leakage. Right: a description of the conditions for a surface leakage.

I högra delen av Figur 2 ser vi att vid inträngningslängd,  $I_1$  har ytläckaget ännu inte nåtts, alltså är den radiella spridningen opåverkad av ytläckaget. Vid inträngningslängd,  $I_2$ , har en viss del av injekteringsmedlet runnit ut via ytläckaget, nämligen andelen  $A_{2,y}/A_2$ . Där  $A_{2,y}$  är cirkelsegmentets area och  $A_2$  är hela cirkelns area. Avståndet  $L_{2,y}$  är det vinkelräta avståndet mellan ytläckaget och borrhålet. Denna används för att bestämma arean av cirkelsegmentet.

Om sprickans vidd varken påverkas av injekteringsstrycket eller att öppningen på sprickan är större mot tunnelfront kommer andelen som rinner ut via ytläckaget vara lika liten hela tiden så länge inträngning sker. Således kan förhållandet mellan injekteringsvolym och volymen som "rinner" ut via ytläckaget bestämmas. Ju närmare borrhålet är ytläckaget ju större blir volymen som rinner ut men blir aldrig större än halva volymen. Detta förutsätter dock förenklingen att den hydrauliska gradient in mot tunneln är noll vilket aldrig är fallet, men för fallet förinjektering med en salva överlapp av injekteringskärmarna kan gradienten åtminstone bli låg. I figur 2 antas också gradienten vara noll, annars skulle spridningen anta en oval form.

Ett sambandshål fungerar i princip på samma sätt som ett ytläckage men borrhålet är en punktkälla. Sambandshålet står i kontakt med atmosfärstryck vilket får antas vara konstant. Konceptuellt skulle det fungera enligt nedanstående figur (Figur 3).

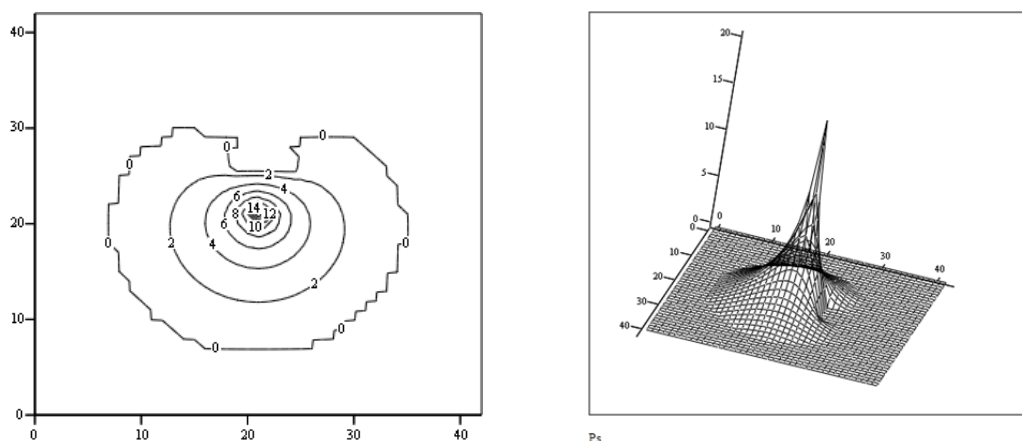


Figur 3. Principiell bild över hur ett sambandshål påverkar injekteringsflödet.  
 Figure 3. Sketch of the influence from connected boreholes on the grout spread.

Inträngningslängden,  $I$  i bilden ovan förhåller sig  $I_3 > I_2 > I_1$  och tidsteget är lika stort mellan dem. Låtes inträngningen fortsätta kommer injekteringsflödet att sluta sig bakom sambandshålet. På samma sätt som för ytläckage kan den påverkade volymen beräknas geometriskt men beräkningen blir här svårare. Det kan dock sägas att den påverkade volymen är betydligt mindre än för ytläckage.

Både ytläckage och sambandshål exemplifieras i Figur 4 där ett sambandshål av storleken  $3 \times 200$  mm modellerades på ett avstånd 0,5 m från det injekterade borrhålet, se Funehag (2007), det är alltså att betrakta som ett jättestort sambandshål eller ett litet ytläckage. Det aktuella försöket utfördes med silica sol och brukets inträngning modellerades som för en newtonvätska med tillväxt av viskositet. Formen av

spridningen i Figur 4 liknar ett äpple. Injekteringstiden är 24 min och spridningen är ca 0,75 m i en sprickvidd på 50  $\mu\text{m}$  och ett övertryck på 2 bar. För ytterligare data hänvisas till Funehag, (2007). Värt att nämna är att spridningen till sambandshålet tog ca 2,5 min och tätningen i sprickan kunde bekräftas genom borrhåll av ytterligare kärnborrhåll tillsammans med hydrauliska tester.



Figur 4. Beräkningen i FDM för spridningen av injekteringsbruk (silica sol) runt ett injekteringsborrhål och påverkan av ett större sambandshål. Vänster, x-y diagram av spridningen där 0 linjen motsvarar injekteringsfronten, sambandshålet är i ovankant. Höger, tryckfördelningen över det injekterade område, sambandshålet är sett snett neråt och åt höger i bilden.

*Figure 4. A finite difference model (FDM) for grout spread (silica sol) around a grouting borehole and the effect of a large connected borehole. The left-hand part is a contour plot of the grout spread where the pressure = 0 contour represent the grout front. The right-hand part is a 3D representation of the pressure (connected borehole in the lower-left portion of the cone)*

### Innebörden

Den praktiska innebörden är att ett ytläckage ”stjäl” inte *allt* bruk. Om trycket kan bibehållas och den mängd bruk som rinner ut *inte* utgör ett hinder mot vad som tillåts enligt arbetsmiljön och miljöpolicyen för projektet bör injekteringen fortgå tills designkriterier uppnås.

Sambandshål eller liknande stjäl inte heller allt bruk. De kan istället användas som observation och bevis att inträngningen nått en viss längd. En hantering för att kunna nyttja sambandshålet för fortsatt injektering kan utarbetas. Det är inte nödvändigt att förkasta borrhålet och se det som misslyckande. Injektering bör även här fortgå tills designkriterier uppnåtts.

## **Sprickmodell**

Att verifiera inträngningslängden av cementbruk radiellt har länge varit en fråga för forskningen. Tidigare har en sprickmodell byggts och använts för hydraulisk karakterisering och beskriva vattnets eroderande krafter (Fransson, 2001 resp Axelsson, 2009). Den befintliga modellen hade en verklighetstrogen variation av sprickvidden, men för stor hydraulisk sprickvidd för att kunna noggrant beräkna spridningen (det krävdes väldigt låga injekteringstryck). En ny större planparallell modell byggdes på Chalmers (Johan Thörn) under våren 2013. Sprickvidden kan ändras genom att montera brickor (shimsbrickor) av känd tjocklek (0,100, 0,050 respektive 0,025 mm) mellan två plexiglasskivor. Här användes flera bultar och tjocka plexiglasskivor för att förhindra i rimligaste mån utvidgning av sprickvidden under injektering. Injekteringen görs via ett hål (diameter 50 mm). I Figur 5 visas storleken på sprickmodellen samt ett av försöken med bruksspridning. Uppströms (höger i figur 5) och nedströms (vänster i figur 5) finns kanaler med en vidd på flera mm. Dessa används för att samla upp bruket samt simulera ytläckage. Nedströmskanalen är ansluten till en slasktank som kan trycksättas, och uppströmskanalen är ansluten till en vattentank. Vidare finns ett hål på ett avstånd på ca 80 cm från injekteringshålet som efterliknar ett sambandshål. Detta kan antingen stängas eller hållas öppet.

Rengöring av sprickan görs genom att spola vatten från uppströmssidan vilket eroderar bruket och rengör sprickan. Den pålagda strömningen av vatten används för att erhålla en viss gradient (vilken kan bestämmas) över sprickan. Detta används också för att demonstrera hur inträngningen påverkas om den utförs i ett gradientfält. Innan varje injektering görs en hydraulisk karakterisering av sprickan med hjälp av en vattenförlustmätning. Från vattenförlustmätningen bestäms den hydrauliska sprickvidden vilken utgör en ingångsparameter till val av inträngningslängd att studera.

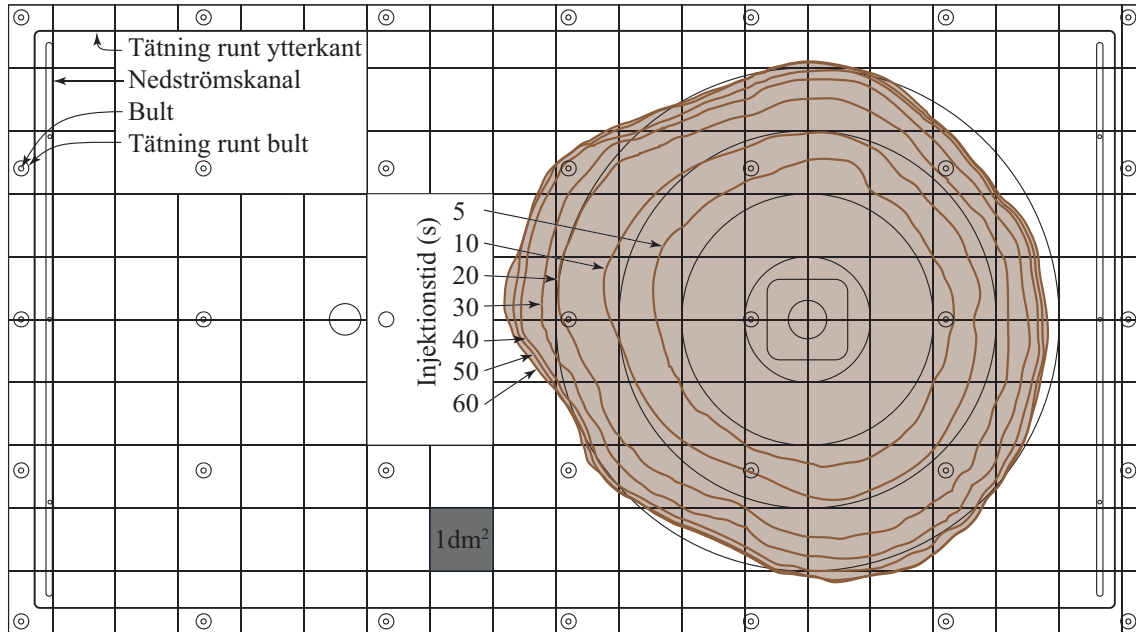
## **Resultat**

Resultaten baseras på verifikationer av inträngningslängder av cementbruk för att åskådliggöra noggrannheten i de använda parametrarna samt hur inträngningslängden eventuellt påverkas av ytläckage, sambandshål och erosion.

Brukets egenskaper och injekteringstekniken som användes för spridningen i Figur 5 var följande; Cementa injektering 30 blandat till  $VCT = 0,8$ , som gav viskositet = 18 mPas och skjuvgräns = 3 Pa. Injekteringsövertryck = 0,5 bar och en från vattenförlustmätning framräknad hydraulisk sprickvidd om 220  $\mu\text{m}$  (specifik kapacitet och kubiska lagen). Spridningen visar att det går snabbare i början för att sedan sakta ner. Detta är det uppbyggda motståndet i sprickan som blir allt större vilket ger en långsammare inträngning. Ett stopp fås på inträngningen när det pådrivande injekteringstrycket står i jämvikt med den uppbyggda "friktionsmotståndet". Skjuvgränsen på bruket gör att ett distinkt stopp erhålls. Utan en skjuvgräns hade inträngningen skett i oändlighet men gått väldigt långsamt. Den uppmätta medelinträngningen vid olika tidpunkter har plottats i nedanstående diagram (Figur 6). Medelinträngningen används eftersom en helt rund form på spridningen är svår att få (något ojämn vidd på sprickan). Samtidigt ses att

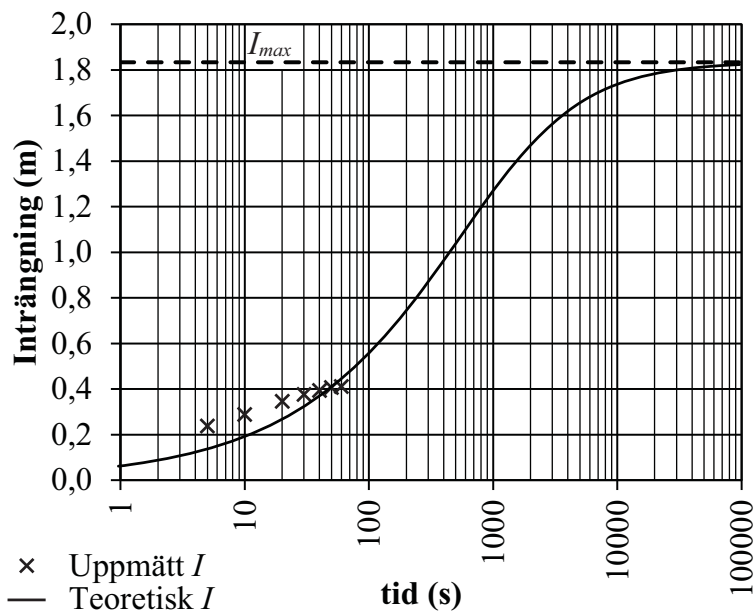


sprickvidden har en stor inverkan på inträngningen. I aktuellt fall kan den fysiska sprickvidden variera ca 50  $\mu\text{m}$  runt medelsprickvidden (den hydrauliska sprickvidden) 220  $\mu\text{m}$ .



Figur 5: Brukets spridning vid 5, 10, 20, 30, 40, 50 och 60s efter injekteringen påbörjades.

*Figure 5: The grout spread at 5, 10, 20, 30, 40, 50 and 60 s after that grouting started.*



Figur 6: Brukets medelinträngning vid 5, 10, 20, 30, 40, 50 och 60s efter injekteringen påbörjades, jämfört med teoretiskt beräknad inträngning enligt ekvationerna ovan.

*Figure 6: The average grout spread at 5, 10, 20, 30, 40, 50 and 60 s after grouting started compared to spread calculated according to the equations above.*

Figur 6 visar att den uppmätta inträngningen (kryss) stämmer mot den teoretiskt beräknade (heldragen linje). Beräkningen visar också att den maximalt möjliga inträngningslängden är ca 1,8 m givet uppsättningen av parametrar vilket verkar vara en rimlig spridning.

Ett flertal körningar har gjorts och flera av dem har filmats. Filmer med förklarande texter kan ses på <http://www.chalmers.se/hydrogeologi-injektering>. Där kommer inom en snar framtid även ses hur designverktyg för injektering kan användas samt diverse resultat från injekteringar som gjorts.

## Slutsatser

Att förstå hur flöde i sprickor sker, är en grundläggande förståelse som bör finnas hos alla i injekteringsbranschen. I denna artikel beskrivs ett antal reflektioner relaterade till hur ett injekteringsflöde påverkas av yttre omständigheter. Vidare har de initiala laboratoriestudierna visat att inträngningslängden radiellt verkar stämma mot de teorier som är framtagna

## Referenser

- Axelsson M (2009). Prevention of erosion of fresh grout in hard rock. Doktorsavhandling, Chalmers tekniska högskola, Göteborg.
- Funehag J (2007). Grouting of Fractured Rock with Silica Sol. Grouting design based on penetration length. Doktorsavhandling, Chalmers tekniska högskola, Göteborg.
- Fransson Å (2001). Characterisation of Fractured Rock for Grouting Using Hydrogeological Methods. Doktorsavhandling, Chalmers tekniska högskola, Göteborg.
- Fransson Å, Zetterlund M, Gustafson G, Funehag J, Hernqvist L, Butrón C. (2012) A Swedish grouting design concept: Hydraulic testing and selection of grout. 4th International Conference on grouting and Deep Mixing. New Orleans, LA, USA, ASCE Geotechnical special publication No 228. 2: 1691-1700.
- Gustafson G, Claesson J (2004). Steering parameters for Rock Grouting. PM, Institutionen för geologi, Chalmers tekniska högskola, Göteborg
- Gustafson G, Claesson J, Fransson Å (2013). Steering parameters for rock grouting. Journal of Applied Mathematics. Volume 2013 (2013), Article ID 269594, 9 pages.
- Gustafson G, Fransson Å, Funehag J, Axelsson M (2004). Ett nytt angreppssätt för bergbeskrivning och analysprocess för injektering. Väg- och vattenbyggaren, 4.
- Hässler L (1991). Grouting of Rock- Simulation and Classification. Report. Department of Soil and Rock Mechanics, Royal Institute of Technology. Stockholm.
- Lombardi G (1985). The Role of Cohesion in Cement Grouting of Rock. Commission Internationale des Grands Barrages. Lausanne.