

Tryckuppbyggnadens inverkan på injekteringstid och inträngningslängd vid en injektering

How the pressure-build up influence the grouting time and penetration length

*Johan Funehag, Johan Claesson, Chalmers tekniska högskola
Johan Ankner, Edvirt*

Abstract

When grouting of hard crystalline rock the penetration length is affected of how fast the pressure is reached the design pressure. The slower the pressure build up, the shorter penetration length for given grouting time. One of several stop criteria for grouting is to reach the design pressure and keep this pressure for a certain time. This is done to achieve a certain penetration length in a fracture. If, for instance the amount of energy put in, the interpretation can be that a higher pressure and shorter time grouting time is equal work done as lower pressure and longer grouting time. In both cases the desired penetration length is reached. A design based on calculation of required grout parameters, time and pressures transformed to real grouting works is not often simple. One part of this is to estimate the true time spent on each grouting borehole with the pressure build up as one of the parameters. When grouting against flowing fractures the pump is working with large grout flows till a "back-pressure" is established and the grout pressure is increasing. With small pump capacities this can take long time an action to prevent this is to use a stiffer grout or a pump with larger capacity (a combination of both are rare). This paper highlights different theoretical aspects when the pressure affects the penetration length and how the grouting time is changed based on the pump capacity. It suggests a way of how a choice of pump is reflected on the water flows from the boreholes. Finally, a recommendation is given on choice of grouting time during actual grouting based on the observation of the pressure build up.

Sammanfattning

Vid injektering i sprickigt berg påverkas inträngningslängden bland annat av hur fort trycket kan nå designtryck. Ju långsammare tryckuppbygganden sker desto kortare blir inträngningslängden för en given injekteringstid. Ett av flera stoppkriterier för att slutföra en injektering är att nå designtryck och bibehålla trycket i en viss tid. Detta för att nå en viss inträngningslängd i en bergsspricka. Väljs istället energimängder som kriterium kan tolkningen vara att ett högt tryck under en kortare tid ger samma arbete som ett lägre tryck under en längre tid. I båda fallen nås inträngningslängden. Från en design med beräkningar av erforderliga bruksparametrar, tid och tryck till att omsätta teorin i praktiken är inte alltid enkelt. En del ligger i att det är svårt att bestämma/uppskatta hur trycket kommer att byggas i sprickorna och borrhålet. Vid injektering mot kraftigt vattenflödande bergsmassa jobbar pumpen med stora pumpflöden för att till slut nå ett mottryck och trycket i pumpen ökar. Vid små pumpkapaciteter kan detta ta en avsevärd

tid och en åtgärd kan vara att göra bruket styvare eller använda kraftigare pumpar (båda alternativen görs sällan). Artikeln belyser olika teoretiska fall då trycket påverkar inträngningslängd och hur tiden förändras beroende på olika val av pumpkapacitet. Hur ett val av pump kan göras på basis av flödet ur borrhål visas. Slutligen ges en rekommendation som kan vara till hjälp för att välja injekteringstid beroende på om man når designtryck eller inte.

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. Förståelsen kring injektering i hårt berg har utvecklats. Materialegenskaperna kan beskrivas och mätas, för berget och dess sprickor finns metoder för att kunna bedöma injekterbarheten, upprätta en design och utföra en uppföljning för att nå en förutsägbar process. Däremot hur utrustning och framförallt hur pumparnas kapaciteter påverkar injekteringen är inte beskrivet något nämnvärt. Med ett förutsägbart pumpbeteende (tryckuppbyggnad) givet bergets hydrauliska egenskaper kan tiden för en injektering bättre prognosticeras. Denna artikel gör en första ansats till att beskriva hur inträngningslängden påverkas av kapaciteten på pumpen. Man kan förstå att ett kraftigt vattenflödande bergmassa har förmodligen stora sprickvidder. Med en pump med liten kapacitet på flöde och tryck kommer det ta lång tid att nå ett högt sluttryck. Samtidigt kostar en pump med stor kapacitet mycket pengar och används en stor pump för små flöden kan stora tryckvariationer förväntas och regleringen av pumpen blir komplicerad.

Att använda lämplig pumpkapacitet för den tänkte injekteringen är det bästa ekonomiska alternativet både med tanke på tidsbesparing och investeringskostnad. Att använda en pump som når fullständig tryckuppbyggnad på väldigt kort tid i alla injekteringshål för en tunnel är knappt möjligt, kanske inte önskvärt heller med tanke på tryckvariationerna i borrhålet. Med en för dålig pumpkapacitet utgörs en stor del av injekteringstiden att nå designtryck.

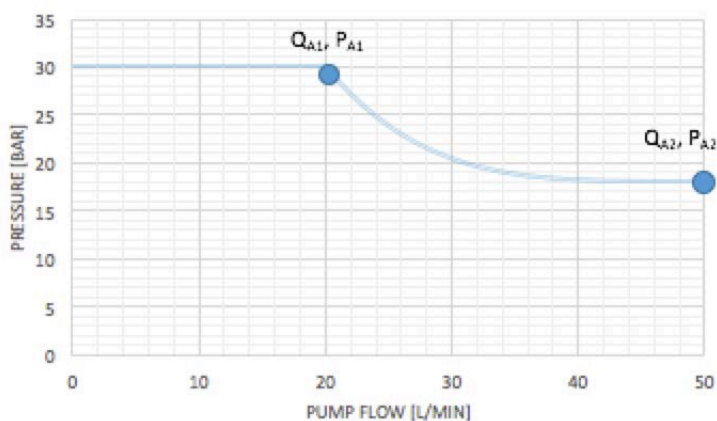
Artikeln utgår från den teoretiska beskrivningen av hur inträngningslängden beräknas för radiellt flöde i en spricka, se Gustafson och Claesson, 2004 samt Gustafson G, Claesson J, Fransson Å (2013). I dessa beskrivningar utgår trycket från ett konstant designtrycket och sedan beräknas tryckfördelningen längs inträngningen radiellt. I denna artikel används en ny formulering av inträngningslängden av injekteringsmedlet med ett begränsat trycket av pumpkapaciteten, tex pumpen klarar av att pumpa ett maxflöde på 50 l/min vid ett tryck på ca 20 bar. Detta innebär att trycket i borrhålet och spricksystemet beräknas beroende vilket flöde som kan pumpas. Vid ett önskvärt högre tryck, säg 30 bar är maxflödet enbart 20 l/min. Begränsningen i en typisk kolvump kan utgöras dels av hur fort kolven kan/får slå, storleken på kolven samt vilka begränsningar hydraulaggregatet har.

Grundläggande samband

Vanligtvis baseras designarbete på ett bruks inträngningslängd. Inträngningen har också visat sig lämplig som utgångspunkt när man vill förstå och lära sig hur injekteringen fungerar. Det grundläggande är att den maximala inträngningslängden beror av pålagt tryck, Δp [Pa], sprickvidden, b [m] samt skjuvgränsen/flytgränsen på bruket, τ_0 [Pa] (Lombardi, 1985, Hässler, 1991).

Pumpkaraktäristik

Den vanligaste typen av pump för injektering är sk. förträngningspump. En volym vätska pressas genom en mindre öppning vilket gör att trycket stiger enligt $p_1 V_1 \times K = p_2 V_2 \times K$. Utan att vara fullständigt komplett finns det inom denna kategori pumpar; kolv-, centrifugal- kugghjuls och skruvpumpar. Kolvpumpar är idag den vanligaste pumptypen för injektering och skruvpumpar används för bultbruk. Samtliga pumpar kan pumpa stora flöden och trycket kan hållas relativt konstant trots att flödet varierar. Ett exempel på hur en pumpkaraktäristik kan se ut visas i figur 1 nedan.



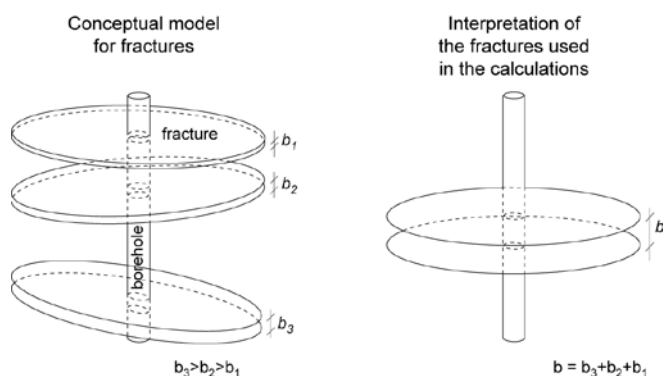
Figur 1. Exempel på pumpkaraktäristik. Linjen visar de begränsande värdena på flöde och tryck. För de lägre flödena 0-20 l/min kan pumpen trycka med maximalt 30 bar. För det största flödet (>50 l/min) det största trycket är 18 bar.

Figure 1. An example of a pump characteristic. The line is the limiting values of flows and pressures. When the pump works with the lower flows (0-20 l/min) it can pump with maximum pressure (30 bar). For larger flows the pressure gradually decreases. For the largest flows (>50 l/min) the maximum pressure it can pump is 18 bar.

Antalet slag eller varv på pumpen resulterar i ett flöde. Genom att hålla ett konstant tryck innebär det att varvtalet eller antalet slag justeras. Trycket i hela systemet fram till sprickorna bestäms av mottrycket. Då pump, slangar och borrhål vid en injektering anses som stora i dimensioner relativt sprickan så är det oftast så att trycket fram till sprickan är det samma. Längs fram vid injekteringsfronten är övertrycket noll. Vid en kort inträngning är de mothållande krafterna små i sprickan och trycket i sprickan har inte nått sitt önskvärda tryck om pumpkapaciteten är liten. Allt eftersom inträngning sker i sprickan ökas de mothållande krafterna och trycket i systemet kan öka.

Vattenförande sprickor i borrhål och dess tryckuppbyggnad

Den använda konceptuella modellen för tolkning av sprickor som korsar ett borrhål är att varje spricka är enskild och de hydrauliska egenskaperna för sprickorna är statistiskt sett oberoende av varandra och flödet i sprickan är radiellt (2-D). Vidare så är den totala transmissiviteten för alla sprickor lika med summan av de enskilda sprickornas transmissivitet (se figur 2) (Fransson, 2001). Från det uppmätta flödet och grundvattentrycket ur borrhålet, alltså en vattenförlustmätning beräknas den hydrauliska sprickvidden via den "kubiska lagen".



Figur 2. Konceptuell modell för hur sprickor korsar ett borrhål och hur detta tolkas till en enskild spricka med större sprickapertur.

Figure 2. Conceptual model for fractures crossing a borehole and how this can be interpreted to single fracture with larger aperture.

För beräkningsfallen, att simulera en tryckuppbyggnad, är således en förenklingen till att flödet kommer från enbart en spricka. Vidare antas att pumpens tryckuppbyggnad påverkas av det totala flödet från pumpen och motståndet i sprickan. I denna artikel redovisas inte den kompletta lösningen för tryckuppbyggnaden då flera sprickor korsar borrhålet. Här används modellen enligt konceptuella modellen i figur 1 för att göra tolkningen hur flera sprickor tolkas till en större.

Ett av syftena med artikeln är att visa för vilka totala sprickvidder pumpkapaciteten har betydelse för injekteringstiden. Ett grundläggande beaktande är att det är flera sprickor som korsar ett borrhål och dess sammanlagda sprickvidd får en sådan betydelse att flödet och trycket ur pumpen får betydelse på inträngningslängden och tid. Om vattenflödet ut ur borrhålet mäts till ca 10 l/min vid ett grundvattentryck på 2 bar ger detta en sprickvidd på ca 240 μm (beräkning via specifika kapaciteten och kubiska lagen). Det största flödet kommer sannolikt från den största sprickan som korsar borrhålet men en viss del kommer från de mindre sprickorna. Hur inträngningslängder pga. tryckuppbyggnaden sker i flera sprickor samtidigt formuleras i den matematiska bakgrundsrapporten som det arbetas med (Claesson, 2016, in prep).

Tryckuppbyggnaden för borrhålet kommer ändå att kunna beräknas och inträngningslängden blir då påverkad relativt sprickvidden lika mycket i varje spricka.

Resultat

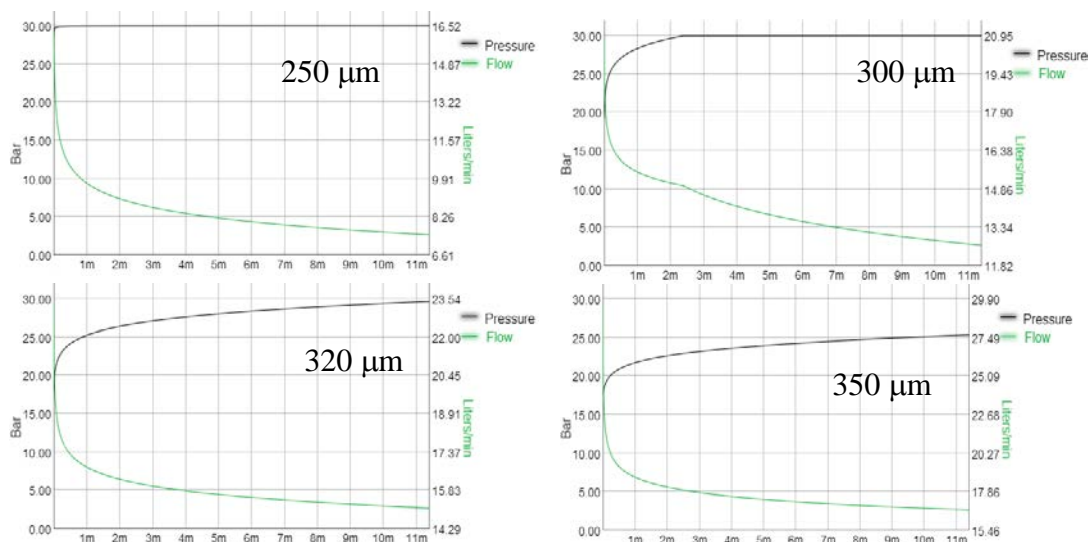
Aktuell matematisk utveckling

Den matematiska lösningen från 2004 eller 2013 för radiellt Binghamflöde i ett sprickplan är förhållandevis komplicerad. Vi har nu kunnat formulera om lösningen på ett enklare sätt och som bör vara lättare att implementera i ett datorprogram. Vi har en grundlösning i dimensionslös form för ett enhetspumpflöde (the "mother" function). Lösningen för varje tänkbart fall ges från denna genom lämplig skalning av de ingående variablerna. Grundlösningen ges i sin tur av två explicita formler. Lösningen ger bl.a. en explicit formel för erforderligt pumptryck Δp för varje givet inträngningsdjup I och pumpflöde Q . Hela tidsförloppet ges av en integral enligt lösningen från 2004 eller 2013. Alternativt erhålls tidsförloppen ($I(t)$, $\Delta p(t)$ etc.) från en explicit olinjär differentialekvation för $I(t)$. För datorlösningen krävs att man använder något matematikprogram som Mathcad eller Matlab. Den tidigare lösningen gällde för ett konstant pumptryck Δp . Denna lösning har nu utvidgats till fallet med en variabel pumpkaraktistik enligt Figur 1. Pumptrycket är här en funktion av pumpflödet. Vidare har pumpflödet ett maximalt värde som ej kan överskridas.

En komplikation i den teoretiska lösningen är att under den allra första tiden är inträngningsdjupet mycket litet. Tryckgradienten blir då stor. Det krävs ett högre pumptryck än vad pumpen kan leverera. Binghamlösningen kan då ej upprättas. För att hantera detta antar vi att sprickan fylls med det maximala pumpflödet fram till det frontläge där pumpen kan upprätthålla ett Binghamflöde. Från denna tidpunkt kan Binghamlösningen tillämpas. Det kan noteras att denna effekt är mycket liten för små sprickvidder under ca 200 μm . Vi har påbörjat arbetet med att utvidga beräkningsmetoden till fall med flera sprickplan med olika sprickvidd. Vi har goda förhoppningar att kunna få fram exakta lösningar även för dessa fall. En komplikation även här är att pumpen inte förmår att upprätta erforderligt pumptryck under en kort första period. Hur pumpflödet skall fördelas mellan sprickplanen under denna korta första period vet vi ännu inte.

Tryckuppbyggnaden i olika sprickvidder med samma pumpkapacitet

I nedanstående figurer visas hur trycket byggs upp till önskvärda 30 bar beroende på sprickvidd. Pumpkapaciteten är Q_{A1} , $P_{A1} = 15$ l/min, 30 bar och Q_{A2} , $P_{A2} = 30$ l/min, 18 bar (se Figur 1).

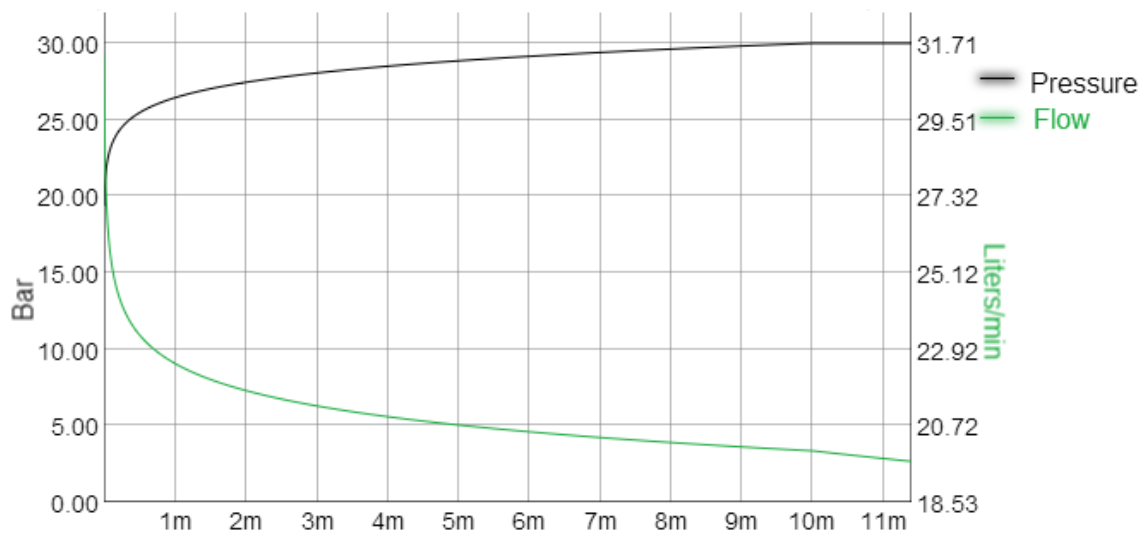


Figur 3. Fyra stycken pumpkurvor som visar tryck och flöde mot tiden. Trycket är den översta linjen (svart) och flödet den nedre (grön). Översta vänstra bilden är den totala sprickvidden, 250 μm. Översta högra bilden, en sprickvidd på 300 μm. Nedre vänstra bilden 320 μm. Och nedersta högra bilden 350 μm.

Figure 3. Four pump curves that shows pressure and flow against time. The pressure is the top line (black) and the flow is the lower (green). The above left picture is for total aperture of 250 μm. The top right figure is for the aperture of 300 μm and the bottom left is 320 μm and the bottom right is 350 μm.

För exemplet med den totala sprickvidden på 250 μm nås det önskvärda trycket på 30 bar väldigt snabbt. För fallet med en sprickvidd på 300 μm det tar ca 2,5 minuter att nå 30 bar. För 320 μm tar det ca 10 minuter och för den största sprickvidden på 350 μm nås enbart ett tryck på 25 bar först efter 10 minuter, det fortsätter dock att stiga. Värt att notera är att de angivna sprickvidderna är tolkade enbart en sprickvidd som korsar borrhålet. Hur detta fungerar för mer än en spricka är under arbete.

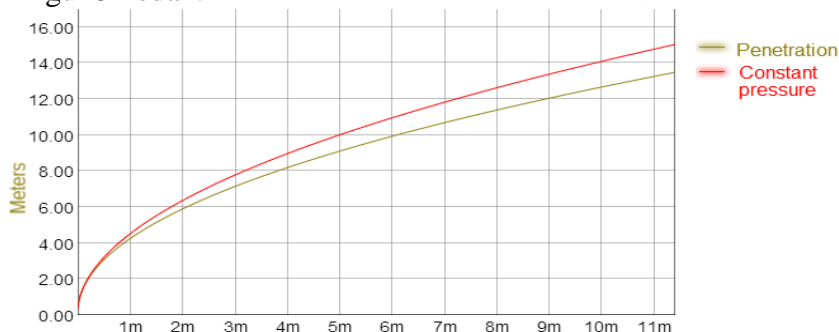
För att nå ett tryck på 30 bar inom 10 minuter för sprickvidden på 350 μm behöver pumpkapaciteten ökas till Q_{A1} och Q_{A2} till 20 resp. 50 l/min, se figur 4 nedan.



Figur 4. Pumpkurva för en sprickvidd på 350 µm. Pumpkapaciteten är här ökad till 20 resp. 50 l/min.

Figure 4. Pump curve for fracture aperture of 350 µm. The pump capacity is here increased to 20 and 50 l/min respectively.

Att pumpkapaciteten spelar roll för tryckuppbyggnaden är visad i figur 3 och 4 ovan. Vid en långsam tryckuppbyggnad bör inträngningen ske långsammare. I figur 5 nedan visas hur inträngningslängden påverkas för 350 µm sprickvidd där trycket inte når de önskade 30 baren som i figur 3. Pumpkapaciteten är således den lägre, 15 och 30 l/min. Inträngningen visas vid den aktuella tryckuppbygganden jämfört med ett konstant tryck i figur 5 nedan.

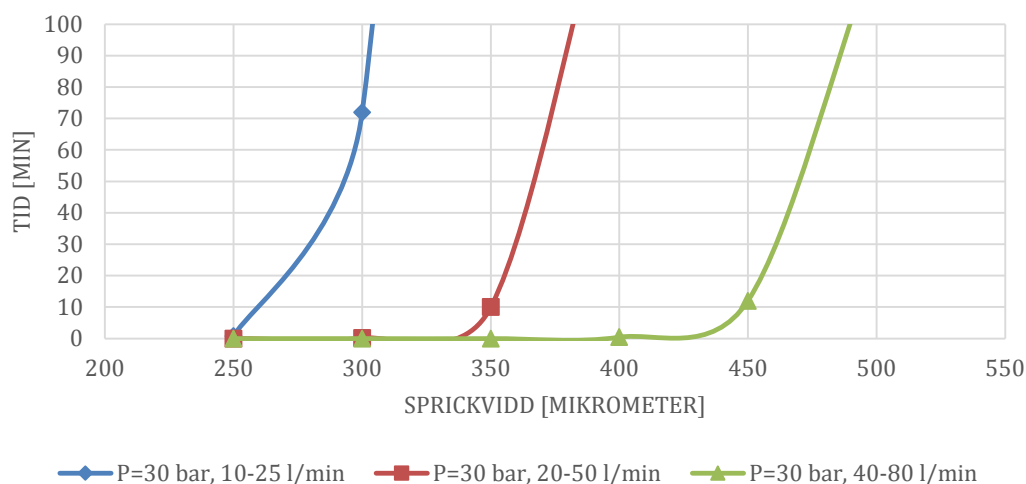


Figur 5. Visar hur inträngningslängden (y-axeln i meter) över tid (x-axeln i minuter) för en sprickvidd på 350 µm påverkas av en tryckuppbyggnad i borrhålet jämfört med ett konstant tryck (här 30 bar). Den undre linjen är inträngningslängden vid tryckuppbyggnad (grön linje). Den övre är inträngningen för ett konstant tryck.

Figure 5. Showing how the penetration length over time in fracture aperture of 350 µm is affected by the pressure build up in the borehole compared with a constant pressure. The bottom green line is the penetration with pressure build up and the top line is the penetration with a constant pressure.

Från figur 5 kan det tyckas att inträngningslängden inte blir avsevärt påverkad då trycket byggs upp. I detta exempel rör det om ca 10% lägre för en inträngning påverkad av tryckuppbyggnaden. Fallet som jämförs är sprickvidden 350 μm och den lägre pumpkapaciteten där trycket enbart nådde ca 25 bar efter 10 minuter i figur 4 ovan. Det innebär att skillnaden i tryck är ca 5 bar över större delar inträngningen. Ett sänkt tryck på 5 bar (konstant) har enbart detta en påverkan av ca 10% på inträngningslängden så den beräknade tryckuppbyggnaden har väldigt liten påverkan på inträngningslängden. Att notera är att trycket stiger väldigt fort och den tid som trycket är lägre än det önskvärda är en relativt kort tid. Formuleringen som gjorts här är att borrhålet blir fyllt omedelbart vilket inte är ett realistiskt scenario.

En summering över hur lång tid det tar för att nå design tryck för olika sprickvidder och pumpkapaciteter visas i figuren 6 nedan. Vi ser att för den minsta pumpkapaciteten 10-25 l/min och ett design tryck på 30 bar påverkas tryckuppbyggnaden avsevärt redan vid en sprickvidd på ca 250 μm . För den medelstora kapaciteten, 20-50 l/min och trycket 30 bar tar tryckuppbyggnaden ca 10 min vid en sprickvidd på 350 μm . För den kraftigaste pumpen behöver sprickvidden bli större än 450 μm för att tryckuppbyggnaden ska ta längre tid än 10 min.



Figur 6. Tiden för tryckuppbyggnad vid olika sprickvidder och pumpkapaciteter. Designtrycket är 30 bar för samtliga fall.

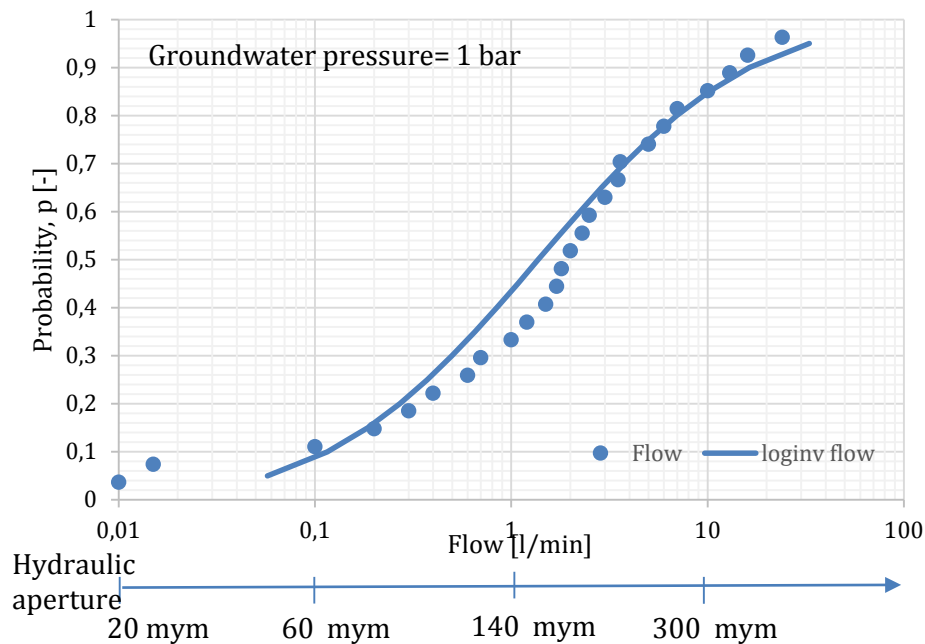
Figure 6. Time for pressure build up for different fracture apertures and pumpcapacities. The design pressure is 30 bar for all cases.

Innebörden för entreprenörens val av pump

Förinjektering innebär traditionellt sett att man borrar 20-25 m långa borrhål framför tunnel stuff med ett stick på 4-5 m. Om vattenförlustmätningar används för varje borrhål i en skärm är erfarenheten att flera borrhål har väldigt små flöden eller är helt torra. En del har ett mätbart flöde och ett fåtal har ett flöde som är stort. Det är självklart önskvärt att samma noggranna mätningar kan erhållas i ett tidigt förundersökningskede men tid och resurser tillåter sällan detta. Med en god kännedom av bergmassan och en analys av vattenflödena mätta i samtliga borrhål vid en projektering kan det dock bli en

avsevärd mängd data som skulle kunna vara behjälplig för entreprenören att välja rätt pump. Eller åtminstone göra påtala/visa att för vissa borrhål kommer det ta en längre tid att nå ett sluttryck på injekteringen. Ett exempel visas nedan.

Ett exempel med vattenflöden och grundvattentryck från många borrhål är samlade i grafen nedan (Figur 5). Till de uppmätta flödena visas en korresponderande hydraulisk sprickvidd och skall här ses som den totala sprickvidden från borrhålet beräknat med den specifika kapaciteten och kubiska lagen.



Figur 5. Exempel på inflöden i borrhål (punkter) för en bergmassa. Flödena följer hyfsat en log-normal fördelning (linje). För inflödena till borrhålen visas också en korresponderande hydraulisk sprickvidd vid ett antaget grundvattentryck på 1 bar (10 meter).

Figure 5. Example of inflows (dots) in boreholes in an rockmass. The flows follow rather well an log-normal distribution (line). To the inflows a corresponding hydraulic aperture at a groundwater pressure of 1 bar (10 meter) is presented.

Nytan av att veta inflödena i valet av pump kan vara att man kan sikta på att klara alla flöden eller ett visst antal av dem. Som exempel kan vara 80% av inflödena är lägre än 7 l/min (eller här 265 μ m). Med en pump som klarar av en snabb tryckuppbyggnad för sprickvidder upp till 265 μ m vore kanske lämpligt. Men det innebär att 20% av borrhålen kommer tryckuppbygganden ta längre tid och skall noteras. Att använda en alldeles för stor pump för de små flödena skulle innebära att trycket varierar mycket och om krav finns på stabila tryck är det inte lämpligt.

Analys och Diskussion

Tryckuppbyggnaden vid en injektering kan ta avsevärd tid om sprickvidderna (flödena) är stora eller om pumpkapaciteten är förhållandevis liten. Att enbart ställa stoppkriterier såsom en viss injekteringstid vid ett givet tryck ger då missvisande resultat. Så länge trycket är högre än grundvattentrycket så får vi en inträngning. Om hänsyn kan tas till tryckuppbyggnaden och valet av pump i designskedet kommer vi sannolikt närmre en bättre uppskattning av injekteringstiden för en projektering.

Hur tryckuppbyggnaden påverkas vid flera sprickor som korsar borrhålet är under utredning. Den konceptuella modell över sprickvidder som antar att man kan addera de enskilda sprickorna till en total sprickvidd kan vara missvisande. De initiala beräkningarna antyder att så enkelt är det inte.

Beräkningarna som presenterats här baseras på radiellt flöde i en spricka. Med den formulering vi har gjort så går det att bedöma tiden det tar för att nå fullt designtryck om kännedom om sprickvidderna finns. Detta är ett steg att kunna få mer verklighetsanpassade injekteringsscenario i framtiden. Dock måste en viss kalibrering göras mot verkliga pumpkurvor för att bättre greppa initieringsfasen vid halfyllnad. Att tryckuppbygganden inte har någon större inverkan på inträngningslängden förutsatt att designtrycket nås inom tio minuter har visats för en spricka. Det återstår hur det är för flera sprickor. Många injekterare har bevittnat att när ett borrhål pumpas kan det ta lång tid att nå ett tryck. Ibland begränsas pumpflödet medvetet för att inte riskera att bruket tar slut i omröraren. Men i flera fall där blandningskapaciteten inte är en begränsande faktor så är det pumpkapaciteten som är orsaken till tiden för tryckuppbyggnad. Att flödet är strikt radiellt i sprickorna kan självklart diskuteras och det är kanske mer troligt att för borrhål där tryckuppbyggnaden tar lång tid så kanske flödet är mer tre-dimensionellt (3-D). Ett 3-D system kräver mycket större volymer bruk för att nå en tryckjämvikt i spricksystemet. Vidare så visar resultaten på att det är för stora sprickor, över ca 250 μm , som tryckuppbygganden tar tid. Av erfarenhet är det sällan vi har utvärderat så stora sprickvidder vid normala infrastruktur tunnlar. Relationen mellan flödesdimension-sprickvidd-pumpkapacitet är något som vi måste arbeta vidare med för att nå mer verkliga scenarion.

Tryckuppbygganden påverkas också av vilken typ av bruk man använder. Ett styvt bruk (hög skjuvgräns/flytgräns) kommer snabbare upp i tryck än ett bruk som är mer lättflytande (lägre skjuvgräns/flytgräns). Detta betyder att tryckuppbyggnaden kommer ta längre tid för ett lättflutet bruk än ett trögflytande.

Rekommendation av anpassade injekteringstider

Till dess att en mer verklighetsanpassad formulering finns baserat på flera sprickor som korsar borrhålet kan injekteringstiden anpassas mot observerad tryckuppbyggnad. Innebörden är att om en tryckuppbyggnad inte kan nå inom 5 minuter från det att borrhålet är fyllt måste injekteringstiden ökas. Typiskt är för varje 5 bar lägre injekteringstryck ökas tiden med 5 minuter. Skulle det önskvärda trycket vara långt ifrån det uppnådda måste bruket förändras till ett ”tjockare” bruk. Se nedan för ett sådant förslag på tabell.

	Övertryck	Injekteringstid
Ordinarie design	30 bar	15 min
Trycket uppnår enbart	25 bar	15+5 min
Trycket uppnår enbart	20 bar	15+10 min
Trycket uppnås knappt alls	<20 bar på 10 min	”tjocka på” bruket

Referenser

- Claesson J, (2016). Mathematical background report of the motherfunction, Chalmers University of Technology, Department of Civil- and Environmental Engineering. *In prep.*
- Fransson Å (2001). Characterisation of Fractured Rock for Grouting Using Hydro-geological Methods. Doktorsavhandling, Chalmers tekniska högskola, Göteborg.
- 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.