

# Injektering i teori och praktik

## Fördelning av bergmassans hydrauliska egenskaper, bergmassans respons vid injektering och inläckage i tunnlar.

Björn Stille

Lic / Department of Civil and Environmental Engineering, Chalmers University of Technology.  
lic 2016:1,  
ISSN 1652-9146

### Sammanfattning

Informationen som uppsatsen är baserad på kommer från flera fallstudier som har utförts på tunnelprojekt som Namntall, Norra länken (NL101, NL33 och 34), Citybanan (Bangårdstunneln och Station Odenplan) och Varvsberget m fl. med syfte att studera injekteringsprocessen. För varje fallstudie har hundratals till tusentals injekteringsborrhål studerats.

Injekteringsresultaten inklusive de mätningar som gjordes i samband med injekteringen visar tydligt att de geologiska och hydrogeologiska förhållandena påverkar bruksåtgång och resultatet av injekteringsprocessen. Den tydligaste påverkan på injekteringsresultatet är tätheten på zoner. Där ju fler zoner som tunneln korsar desto större bruksåtgång men också större inläckage kan förväntas.

Studierna visar att de geohydrologiska förhållandena kan beskrivas statistiskt med en lognormal fördelning. En enkel metodik för att kurvanpassa datan beskrivs i uppsatsen. Metoden kan användas till att förbättra de geohydrologiska prognoserna vilket i förlängningen kan leda till bättre kalkylerbarhet. För att ytterligare förbättra prognoserna/analyserna för ett injekterings- sammanhang presenteras en metodik för att skala testresultaten till relevant längd, lämpligen injekteringsborrhålets längd.

Injekteringsprocessen analyserades med ”The Real Time Grouting Control Method” och resultaten visar att denna metod fungerar och är applicerbar. Analyserna visar också att metoden möjliggör en diagnos av möjlig hävning i bergmassan.

För att utvärdera injekteringsresultatet kan den statistiska fördelningen av bergmassans genomsläpplighet (geohydrologiska förhållanden) användas. Eftersom fördelningen är skalad till injekteringsborrhålets längd kan omfattningen av icke tätade sprickor uppskattas för varje injekteringsborrhål. Med detta som bas sätts en gräns för tätheten efter injektering. För att beräkna inläckage efter injektering kan denna metodik användas. I uppsatsen visas även på ett alternativt synsätt vid beräkning av inläckande vatten. Resultaten har jämförts med verkligt inläckage för några olika projekt vilket visar att resultatet från det nya synsättet är rimligt och jämförbart. Metoden är relativt enkel att använda.

Uppsatsen visar att det finns stor variation på grundläggande egenskaper, mellan olika beräkningsmodeller och inom injekteringsprocessen. Design och utförande bör därför vara anpassningsbara för att säkerställa ett gott resultat med hänsyn till begränsning av inläckage och övergripande ekonomi. För att hantera denna variation rekommenderas att observationsmetoden används i projekten.

## Publikationslista

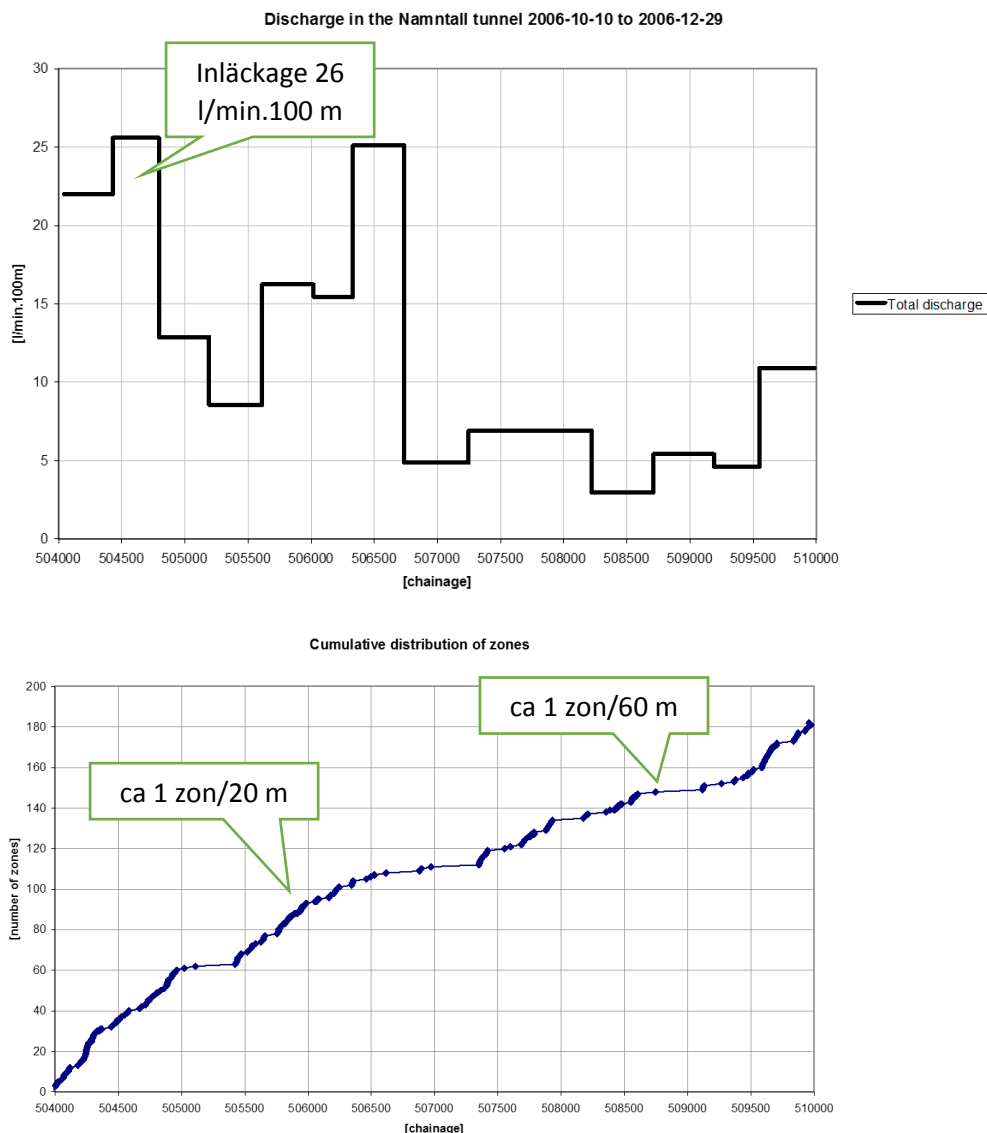
Uppsatsen baserades på följande publikationer:

- I. Stille B., Gustafson G. (2010). A review of the Namntall Tunnel project with regard to grouting performance. *Tunnelling and Underground Space Technology*. Vol. 25, pp. 346-356.
- II. Stille B., Stille H., Gustafson G., Kobayashi S. (2009). Experience with the real-time grouting control method. *Geomechanics and Tunnelling*. Vol 2, pp. 447-459.
- III. Stille B., Stille H. (to be submitted 2016). Distribution of rock mass hydraulic conductivity and its application to rock engineering problems.

## Fallstudie 1: Namntall tunneln

Den sex km långa Namntall tunneln är en del av Botnia banan som går mellan Örnsköldsvik och Kramfors. Tunneln byggdes som en del av en total entreprenad och består av en enkelspårstunnel (65 m<sup>2</sup>) och en parallell servicetunnel (35 m<sup>2</sup>). Beställaren, Botniabanan AB (BBAB), var ett partnerskap (90/10) mellan Trafikverket dåvarande Banverket och kommunerna i området. Kontraktet vanns av Skanska Sverige AB som huvudentreprenör för anläggningsarbetet. Kontraktet omfattade totalt sett den sex km långa Namntall Tunnel, flera ovanjords delar och ytterligare en fem km lång tunnel (Björnböle tunneln). Tunnelarna togs ut mellan 2004 och 2007 med borrning och sprängning.

Under projektets gång visade det sig att vatten inläckagen var relativt stora i vissa delar av tunneln. För att förstå problematiken och analysera orsakerna till denna genomfördes denna fallstudie. Bland annat så kan en tydlig korrelation ses mellan inläckage och antal zoner, se figur 1.



Figur 1. Inläckage och antal zoner i Namntalltunneln räknat från söder (sektion 504+000).

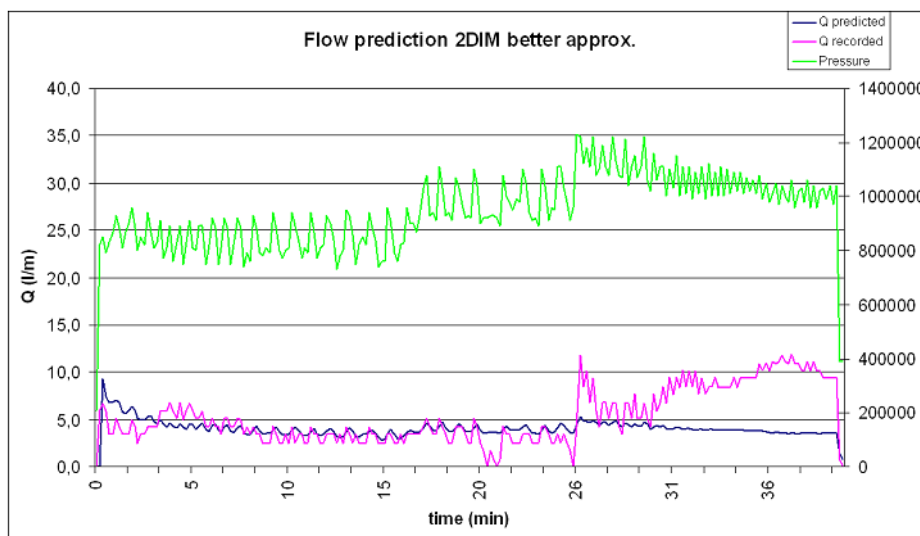
## Fallstudie 2: Norra Länken 33 och 34.

### Erfarenheter med "Real time grout control method" RTGC.

Teorin i RTGC användes för att visa att injekteringsteori kan användas i praktiken genom att observera injekteringstrycket och bruksflödet under pågående injektering. Genom att observera dessa parametrar kan injekteringen stoppas vid en teoretisk inträngningslängd. Därmed kan stoppkriterierna förändras från de traditionella: stopstryck, volym eller flöde till mer spårbara ("vetenskapliga"): injekteringstid (vid ett visst tryck) och volym, även minsta flöde definieras vanligen för täta håll.

För att kunna använda teorin fullt ut antas minsta/största sprickvidd som måste injekteras och inträngningslängden i denna beräknas.

Teorin möjliggör en förståelse för injekteringsförloppet vilket i sin tur medför att företeelser som "jacking" hydraulisk spräckning eller lyftning kan observeras. Se till exempel figur 2 där verkligt bruksflöde plötsligt ökar. Jämför även med beräknat flöde givet verkligt injekteringstryck.



Figur 2. Bruksflöde (vänster Y-axel) och injekteringstryck (höger Y-axel). Den blå linjen visar beräknat flöde, rosa visar verkligt flöde och grön linje visar injekteringstrycket.

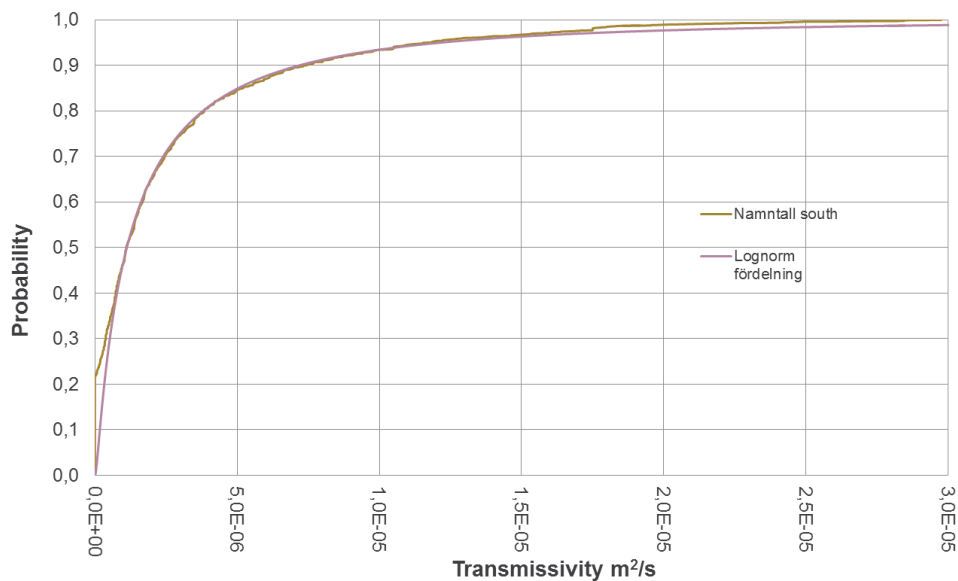
## Fallstudie 3: Namntall tunneln, Citybanan (Bangårdstunneln och Station Odenplan)

### Fördelning av bergmassans hydrauliska konduktivitet och dess applicering på bergtekniska problem

Den vanligaste indata vid prognos av geohydrologiska egenskaper kommer från vattenförlustmätningar vanligen utförda för testlängder mellan 3 och 9 m. Under byggtiden

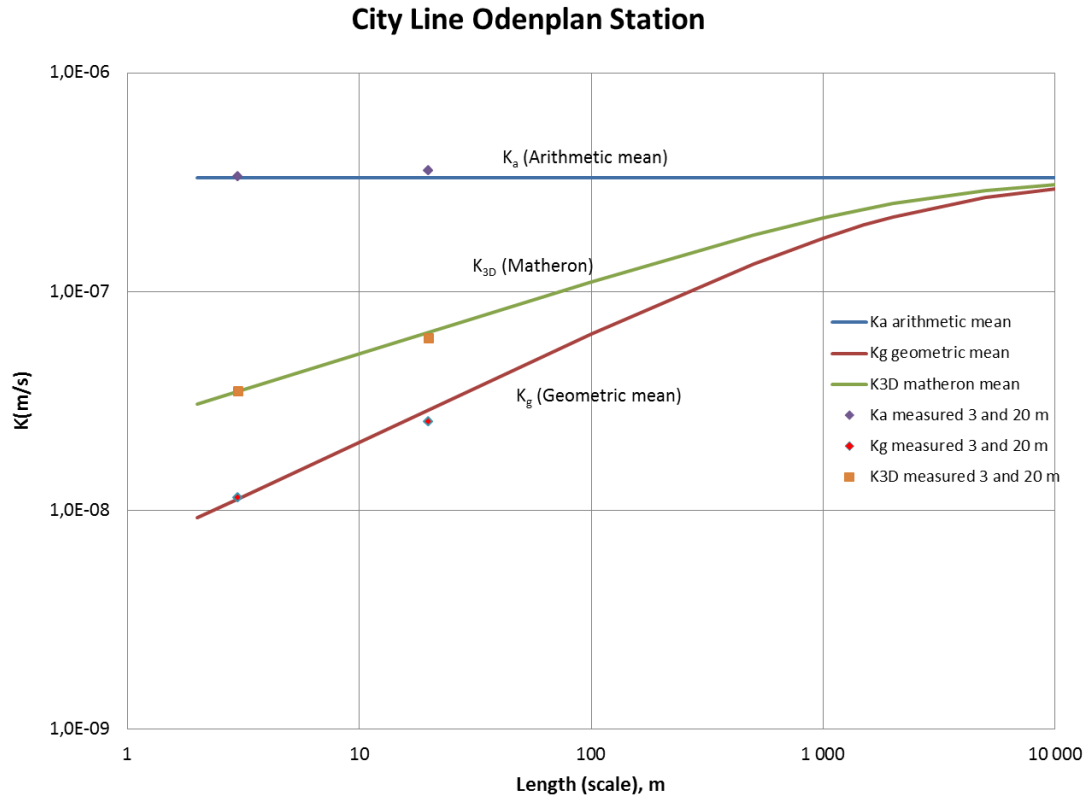
kan motsvarande mätningar utföras i injekteringsborrhålen som till exempel vid byggandet av Namntall tunneln. Studien visar att mätnoggrannheten alltid bör utvärderas och till exempel för Namntall tunneln så medför mätintervallet för flödesgivaren att resultat utanför intervallet 0,2 till 4 lugeon (liter/min.m.MPa) bör betraktas som osäkra (motsvarar transmissivitet  $T = 7,4 \cdot 10^{-7}$  och  $1,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ ).

Mätningarna i de studerade projekten visar att mätdatan (vattenförlustmätningarna) är lognormal fördelad, se figur 3. Därmed kan även en teoretisk anpassning göras med de statistiska egenskaper som definierar lognormalfördelningen (medelvärde och standardavvikelse). Lognormalfördelningen kan dessutom skalas upp till relevant skala genom variansreduktion.



Figur 3. Namntall syd. Vattenförlustmätning och teoretisk lognormalfördelning.

Medelvärdet ändras inte med större skala medan median (geometriskt medelvärde) är beroende av variationen i bergmassan och ökar med större skala. Mätningar i Station Odenplan visar på samma trend som beräkningarna. Baserat på mätningar i 3 m intervall är det rimligt att tro att median värdet är ökar med ca 2.5 gånger, se figur 4.



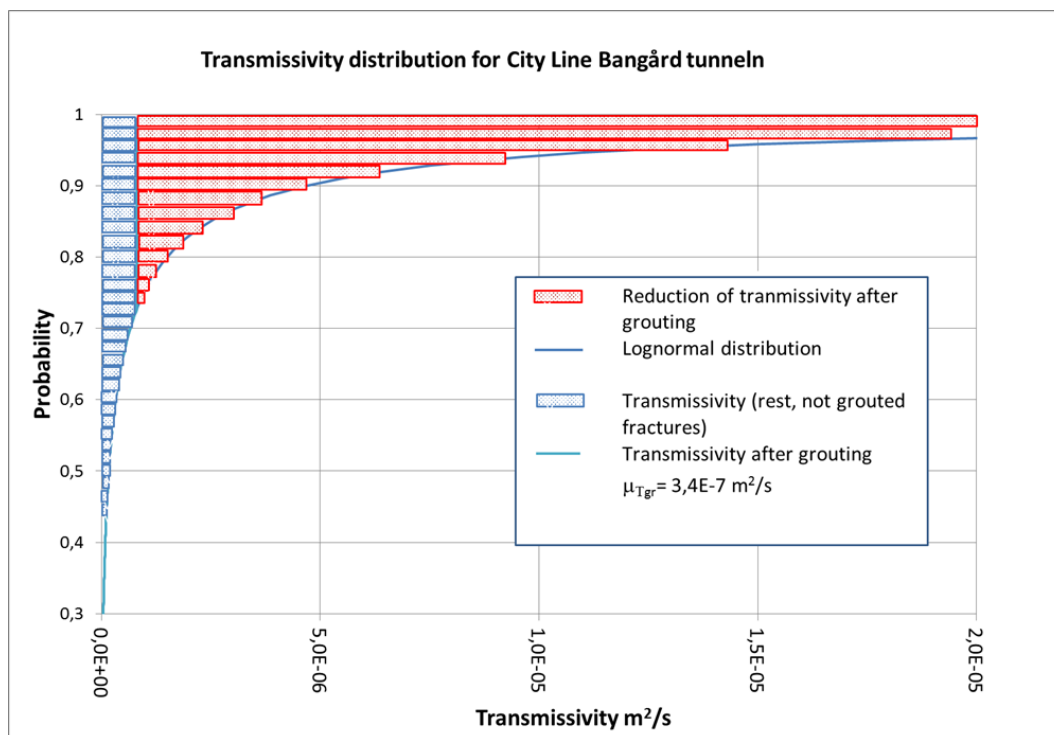
Figur 4. Teoretisk beräkning av geometriskt medelvärde (median) och mätpunkter i samma borrhål utförda i station Odenplan.

#### Fallstudie 4: Namntall tunnel, Citybanan (Bangårdstunneln och Station Odenplan)

Analys av vattenläckage efter injektering, föreslagen modell.

Noggrannheten när inläckage i tunnlar ska prognosticeras är av stort intresse eftersom detta är en del av miljödomstolens underlag vid fastställande av tillåtet inläckage. Därefter förs kraven vidare i förfrågningsunderlag och därmed kommer frågor som kalkylerbarhet och risk att värderas av entreprenör i anbud. Därmed påverkar inläckageberäkningen även den totala projektkostnaden.

Genom att använda en sprickmodell vid bedömning av injekteringsresultaten kan genomsläppligheten efter injektering illustreras, se figur 5.



Figur 5. Illustration av resultaten efter injektering. Röd färg visar tätade sprickor och Blå färg visar kvarvarande genomsläpplighet efter injektering.

Konceptuellt innebär modellen i uppsatsen att sprickor tätas och "tas bort" från fördelningen. Därmed kan en annan ekvation användas vid beräkning av inläckaget. I tabellen visas beräkningsresultat jämfört med verkligt uppmätt inläckage.

Tabell 1. Beräknat och uppmätt inläckage.

Case	H [m]	$K_0$ [m/s]	$K_{grout}$ [m/s]	Calculated seepage standard eq. [l/min.100m]	Calculated seepage modified eq. [l/min.100m]	Measured seepage [l/min.100m]
Namntall South	50	$1.6 \cdot 10^{-7}$	$7.0 \cdot 10^{-8}$	34.0	16.4	10-25*
Namntall North	135	$5.0 \cdot 10^{-8}$	$1.5 \cdot 10^{-8}$	24.3	8.5	5-7*
City Line, Bangård Tunnel	27	$1.4 \cdot 10^{-7}$	$1.7 \cdot 10^{-8}$	10.7	2.2	1-3**
City Line, Odenplan Station	20	$2.3 \cdot 10^{-7}$	$2.4 \cdot 10^{-8}$	13.0	2.5	2***

## Diskussion och slutsatser

Uppsatsen visar att en lognormalfördelning kan användas vid prognostisering av bergmassans genomsläpplighet. När detta görs är det viktigt att ta hänsyn till mätnoggrannheten. Fördelningen bör alltid skalas upp till relevant skala. Används medianvärdet i beräkningar är det särskilt viktigt att skalan betraktas.

Trots all teori är det verkligheten som avgör om projektet blir lyckat. Mycket handlar därför om förberedelser och möjlighet att ändra design och utförande. Med hänsyn till den stora variation som finns rekommenderas att basen för design är en observations metod. Möjligheten måste därmed finnas att utvärdera resultaten under pågående projekt.

När det gäller injektering i praktiken kan följande generella slutsatser dras:

- Den injekterade sprickvidden är ungefär dubbelt så stor som den hydrauliska sprickvidden.
- För de studerade fallen kan ca 50-70% av bergmassan anses vara oinjekterad (ur ett inläckage beräkningsperspektiv).
- Samband mellan hål påverkar injekteringsresultatet. Vilket resulterar i områden som inte är eller bara delvis är injekterade. Efter tredje eller fjärde hålet med samband som injekteras sekventiellt kan hålen betraktas som förlorade (liten bruksåtgång, kort injekteringstid och därmed kort inträngningslängd).
- Mixer kapaciteten kan begränsa injekteringsresultatet speciellt i områden med större bruksåtgång och många hål med samband.
- ”Jacking”, hydraulisk spräckning eller lyftning bör undvikas.
- Två (eller fler) injekteringsskärmar kan behövas för att täta mer genomsläppliga områden.
- För de flesta injekteringsskärmar kan en person vid stoffen bara hantera två slangar effektivt. För mer genomsläppliga områden kan upp till fyra slangar hanteras om injekteringstiden är 15-20 min per hål.
- En effektiv injekteringsprocedur kräver erfaren personal och kan begränsa problem relaterade till samband mellan hål och mixer kapacitets problem.