



UPPSALA  
UNIVERSITET

UPTEC W 21013

Examensarbete 30 hp

September 2022

# Utvärdering av metod för beräkning av teoretiska sprickvidder för bestämning av tättningsresultat

*Evaluation of method for calculation of theoretical fracture  
apertures for determination of grouting results*

---

Adela Toranian

Everything should be made as simple  
as possible, but not simpler.

- *Albert Einstein*

# Referat

## Utvärdering av metod för beräkning av teoretiska sprickvidder för bestämning av tätningsresultat

*Adela Tornian*

Vid projektering av berg och främst tunnelarbete uppstår det geotekniska och hydrogeologiska utmaningar. När tunneldrivning pågår vill man säkra berget genom tätning innan sprängning. Detta görs med injektering. Problematiken med tunneldrivning är att det uppstår höga inläckage av grundvatten då borrhålen träffar vattenförande sprickor i bergmassan. Vattenflödet mäts i olika mätdammar kontinuerlig under hela arbetsgången. Dessa mätdammar är placerade framför tunnelfronten, i den så kallade stuffen. Examensarbetet har tillsammans med Golder och Trafikverket analyserat 15 utvalda mätdammar. Dessa 15 har haft en jämn mätserie för hösten 2020 då en ny design för injekteringen implementerats under våren 2020. Examensarbetet fokuserar enbart på en entreprenad i tunnelarbetet *E4 Förbifart Stockholm*. Beräkningsmetoden vilken utvärderas baseras på en baklängesberäkning från loggad injekteringsdata till att beräkna en teoretisk sprickvidd. Den teoretiska sprickvidden baseras på reologin för injekteringsmedlet, tryck och injekteringstid samt vilka sprickor som prognostiserats under den hydrogeologiska undersökningen. Hypotesen för studien är att höga inläckage av grundvatten korrelerar mer stora sprickor i bergmassan, och låga inläckage korrelerar med mindre sprickor i bergmassan. Därför kategoriserades inläckagen för mätdammarna till högt inläckage respektive lågt inläckage. För att undersöka detta beräknades de teoretiska sprickorna med beräkningsverktyget MrGrout som har kapacitet att hantera en stor mängd data. Detta genomfördes för respektive kategori. Resultatet visade att det grafiskt fanns en väldigt liten skillnad mellan sprickvidderna för högt inläckage respektive lågt inläckage. För kategorin högt inläckage visade det sig att 50% av alla sprickvidder dominerades av en storlek under  $250 \mu m$ . För lågt inläckage var 50% av den dominerande sprickvidden under  $200 \mu m$ . För att undersöka om det fanns en statistisk signifikant skillnad mellan kategorierna utfördes ett T-test. Nollhypotesen för testet bestämdes till att det inte finns en skillnad. Resultatet av testet visade att vi inte kunde förkasta nollhypotesen och att det inte finns en signifikant skillnad. Alla grafiska tolkningar visade en ytterst liten skillnad. Det gjordes flera antaganden för att genomföra metoden vilket i sin tur leder till fler osäkerheter. Beräkningsmetoden är automatiserad vilket är till fördel vid analys av stor datamängd. Nackdelen med metoden är att en manuell beräkning hade givit ett mycket säkrare resultat och tagit längre tid.

En manuell beräkning hade även givit ett subjektivt resultat vilken i sin tur skulle kräva att flera upprepade försök behövs för att göra en statistiskt oberoende utvärdering. Slutsatsen är därför att metoden bör användas på andra projekt för att kunna jämföra om inläckage korrelerar med sprickvidder i bergmassan. Just denna studie ger inget direkt underlag för att veta om vi uppnått tillräcklig erhållen tätning. Metoden är i en tidig fas för att kunna använda teoretiska sprickvidder i praktiska beslut för tunneldrivning.

# Abstract

## **Evaluation of method for calculation of theoretical fracture apertures for determination of grouting results**

*Adela Toranian*

When constructing a tunnel, the main challenges are geotechnical and hydrogeological. In the working process the aim in tunneling is to secure the rock mass by sealing the mass before blasting. This is done by grouting. The problem with tunneling is that there is a high leakage of groundwater when the boreholes hit fractures that conduct the groundwater through the rock mass. The water flow is measured in dams continuously throughout the tunneling process. These dams are located at regular intervals along the tunnel. This master thesis has together with Golder and Trafikverket analyzed 15 selected dams. These 15 dams were selected because they had a uniform measurements of flow series for autumn 2020. But also, more important, a new grouting design was implemented in spring 2020. This study is limited to one contract from the project *E4 Bypass Stockholm*. The evaluated method is based on a backward calculation from grouting data to determine a theoretical fracture aperture. The theoretical fracture aperture is calculated from the rheology of grouting, pressure, and time for grouting but also the predicted fractures during the geological investigations. The hypothesis through the whole master thesis is that high leakage of groundwater correlates with larger fractures in the rock mass, and low leakage of ground water correlates with smaller fractures in the rock mass. Therefore, the leakage was categorized as high leakage and low leakage, respectively for the dams. To investigate this, the theoretical fractures were determined with a calculation tool, MrGrout. This program has the capacity to handle a large amount of data. The result consists of graphical interpretations of the theoretically calculated fractures from each category. The results showed that graphically there was a very small difference between the fractures for high leakage and low leakage, respectively. For the category of high leakage, it was found that 50% of all fractures were dominated by a size below  $250\mu m$ . The low leakage had 50% of the dominated fractures below  $200\mu m$ . To investigate whether there was a statistically significant difference between the categories the result continued with a T-test. The null hypothesis for the test was that there is no difference. The results of the test showed that we could not reject the null hypothesis and that there is no significant difference. However, the margin was too small to be able to secure the hypothesis graphically. Several assumptions were made to implement the method, which leads to uncertainties. The calculation method

is made automatically, which is advantageous when analyzing a large amount of data. The disadvantage of the method is that a manual calculation would have given a more reliable result but also take longer to calculate. A manual calculation had also made the result subjective, which in turn would require several repeated attempts to make a statistically independent evaluation. The conclusion is therefore that the method should be used on other projects to be able to compare whether leakage correlates with fractures in the rock mass. This study does not provide a direct basis for knowing whether we have achieved a sufficient seal. The method is in an early phase to be able to use theoretical fractures in practical decisions for tunneling.

## Förord

Det här examensarbetet omfattar 30 högskolepoäng och avslutar utbildningen till civilingenjörsprogrammet i miljö-och vattenteknik, Uppsala Universitet. Min handledare för examensarbetet har varit Fredrik Osterman på Golder. Ämnesgranskaren från institutionen för geovetenskaper har varit Lars M. Hansen. Jag vill tacka Fredrik Osterman som har varit en fantastisk handledare genom hela examensarbetet. Genom goda råd, vägledning, uppmuntran och aktivt samarbete har jag inte bara fått ny kunskap utan också fått en fin vänskap. Jag hoppas verkligen att jag får chansen att jobba vid din sida i framtiden. Tack.

Jag vill även tacka Lars M. Hansen för ett fantastisk kompetensområde som varit starten för mitt intresse inom geoteknik och geologi. Det har varit en ära att få ha honom som ämnesgranskare.

Jag vill även tacka Miriam Cegrell från Golder för hennes förtroende och stöd genom hela examensarbetet.

Sist vill tacka min mamma, Nina Toranian, och pappa George Toranian som stöttat mig genom hela utbildningen. Utan er hade jag inte alls varit här. Ni är mina förebilder. Tänk att ni gjorde allt detta möjligt för mig. Hur ska jag någonsin kunna ge tillbaka. Tack. Jag vill också nämna min goa mormor, Anna-Liisa Berghäll.

*Någonstans bland stjärnorna vill jag hoppas och tro att du ler och är stolt.  
Till min morfar Hans Berghäll.*

*Adela Toranian, mars 2021, Uppsala*

Copyright ©Adela Toranian och Institutionen för geovetenskaper, Luft-, vatten- och landskapslära, Uppsala universitet. UPTEC W 21013, ISSN 1401-5765 Publiceras digitalt hos Institutionen för geovetenskaper, Uppsala universitet, Uppsala, 2022.

## Populärvetenskaplig sammanfattning

Det är en utmaning att veta om ett berg är tillräckligt tätt innan berguttag. Anledningen till att vi tätar berget är för att grundvatten läcker in via befintligt spricksystem i bergmassan. I den här studien har jag utvärderat en beräkningsmetod för att analysera om det finns ett samband mellan stora sprickor i bergmassan och höga inläckage samt motsatsen, att mindre sprickor i så fall skulle generera låga inläckage. Resultatet av studien visade att det inte fanns en statistisk skillnad mellan höga inläckage och låga inläckage. Detta blev ett väldigt intressant utfall då en del av graferna resultatet ändå visade på grafisk skillnad. Från detta kunde slutsatsen dras att det inte går helt att utesluta ett samband men att det finns utvecklingspotential för beräkningsmetoden och att flera projekt borde testa metoden.

Beräkningsmetoden har inte genomförts tidigare vilket gör att resultatet inte har en vetenskaplig jämförelse. Resultatet är baserat på enbart en entreprenad och därför skulle det vara intressant om flera projekt inom tunnelarbete skulle tillämpa metoden. Resultatet från studien baseras på en automatiserad beräkning med ett program som heter MrGrout (Osterman 2020). Det skulle vara intressant att se utfallet från en manuell beräkning. Jag anser därför att resultatet är relevant för att kunna jämföra med upprepade försök i andra projekt.

Vår vackra huvudstad Stockholm breder ut sina yttersta kanter och växer åt alla möjliga riktningar. Konsekvensen av detta är att trafiken blir allt mer belastad. Trafikverket beslutade om att bygga en ny vägtunnel, *E4 Förbifart Stockholm*, som avser att avlasta trafiken och bli den nya rutten för E4:an. Det är tunnelprojektet som genererat detta examensarbete. På flera ställen i tunnelarbetet har det varit problem med höga inläckage av grundvatten. Det har orsakat komplikationer i projektet som främst handlar om att man inte lyckas erhålla tillräcklig tätning i bergmassan. Med tätning av tunnel så menas att man sprutar in ett tätningsmedel i borrhål, i detta projekt en cementblandning. Denna tätningsmetod kallas i praktiken för *injektering*. Man injekterar med ett *injekteringsmedel* via högt tryck för att träffa befintliga sprickor i bergmassan.



# Innehåll

<b>1</b>	<b>Inledning</b>	<b>9</b>
1.1	Bakgrund . . . . .	9
1.2	Problemformulering . . . . .	10
1.3	Frågeställning . . . . .	12
1.4	Avgränsning . . . . .	12
1.5	Syfte och mål . . . . .	12
<b>2</b>	<b>Litteraturstudie</b>	<b>12</b>
2.1	Geologisk bakgrund . . . . .	12
2.1.1	Bergarter i Stockholmsområdet . . . . .	13
2.2	Spricksystem i berg . . . . .	13
2.2.1	Sprickor . . . . .	14
2.3	Grundvattenflöde i berg . . . . .	15
2.3.1	Konceptuella modeller . . . . .	15
2.3.2	Darcys lag . . . . .	15
2.3.3	Flödet i en spricka . . . . .	16
2.4	Bergets hydrogeologi . . . . .	18
2.4.1	Anisotropi . . . . .	18
2.4.2	Sprickzon . . . . .	18
2.5	Sprickinjektering i praktiken . . . . .	20
2.6	Sprickinjektering i teorin . . . . .	21
2.6.1	Reologi . . . . .	21
2.6.2	Injekteringsmedel . . . . .	23
2.6.3	Teoretiska sprickvidden . . . . .	24
2.7	E4 Förbifart Stockholm . . . . .	26
2.8	Injekteringskoncept inom Förbifart Stockholm . . . . .	26
2.8.1	Injekteringstryck . . . . .	26
2.8.2	Skärmgeometri . . . . .	26
2.8.3	Antal injekteringsomgångar . . . . .	27
2.8.4	Originaldesign ABC . . . . .	27
2.8.5	Reviderad design ABC-2 . . . . .	28
2.8.6	Reviderad design ABC-3 . . . . .	29
2.8.7	Reviderad design ABC-4 . . . . .	29

<b>3</b>	<b>Metod</b>	<b>30</b>
3.1	Data . . . . .	30
3.2	Beräkningar . . . . .	33
3.2.1	MrGrout . . . . .	33
3.2.2	MrCalc . . . . .	33
3.2.3	Analys . . . . .	35
<b>4</b>	<b>Resultat</b>	<b>37</b>
<b>5</b>	<b>Diskussion</b>	<b>46</b>
5.1	Sammanfattningsvis . . . . .	46
5.2	Osäkerheter . . . . .	46
5.3	Vad säger resultatet . . . . .	47
5.3.1	Statistisk tolkning . . . . .	48
5.3.2	Beräknad medelapertur . . . . .	48
5.4	Fördelar och Nackdelar . . . . .	48
5.4.1	Fördelar . . . . .	48
5.4.2	Nackdelar . . . . .	48
5.5	Referensprojekt . . . . .	49
5.6	Framtida arbete och rekommendationer . . . . .	50
<b>6</b>	<b>Slutsats</b>	<b>51</b>
<b>7</b>	<b>Bilagor</b>	<b>55</b>
7.1	Bilaga 1 . . . . .	55
7.2	Bilaga 2 . . . . .	58
7.3	Bilaga 3 . . . . .	60
7.4	Bilaga 4 . . . . .	66

## Ordlista

---

Orogenes	Bergkedjebildning
Sondering	Borrprovtagning
Bergklass	Ett mått på bergkvalitet
Bergmassa	Berget i helhet med alla sprickor
Konduktivitet	Genomsläpplighet för vatten i bergmassa
Sprickzon	Koncentrerad sprickbildning i bergmassa
Krosszon	Zon av krossat bergmaterial
VCT	Vattencementtal, kvoten mellan vatten och cement
Avsänkning	Grundvattennivån sjunker
Injektering	Fyllning av hålrum
Reologi	Läran om fluiders och fasta kroppars deformation
Proportionalitetskonstant	Beskriver samband mellan parametrar
IK	Injekteringsklass
Packerdjup	Avståndet mellan hålmynning och packer i hålet
Stuff	Tunnelfronten i riktning med tunneldrivning.

---

## 1 Inledning

### 1.1 Bakgrund

Stockholm breder ut sig och är en ständigt växande huvudstad. Ytor exploateras främst för bostäder och trafiken blir alltmer belastad. För att kunna klara av denna tillväxt med avseende på trafiken så har Trafikverket beslutat om en vägtunnel som planeras att bli en ny rutt för E4:an. Tunnelbygget är mitt i byggskedet och kommer sträcka sig från södra till norra delen av Stockholm med namn *E4 Förbifart Stockholm*. I figur 1 (se sida 11) visas kartan över den planerade förbifarten. Anledningen till varför Trafikverket valt att bygga under mark är främst för att inte behöva störa omgivningen och därmed behöva inte platser av kultur- eller naturvärde riskera att förstöras (Trafikverket 2018).

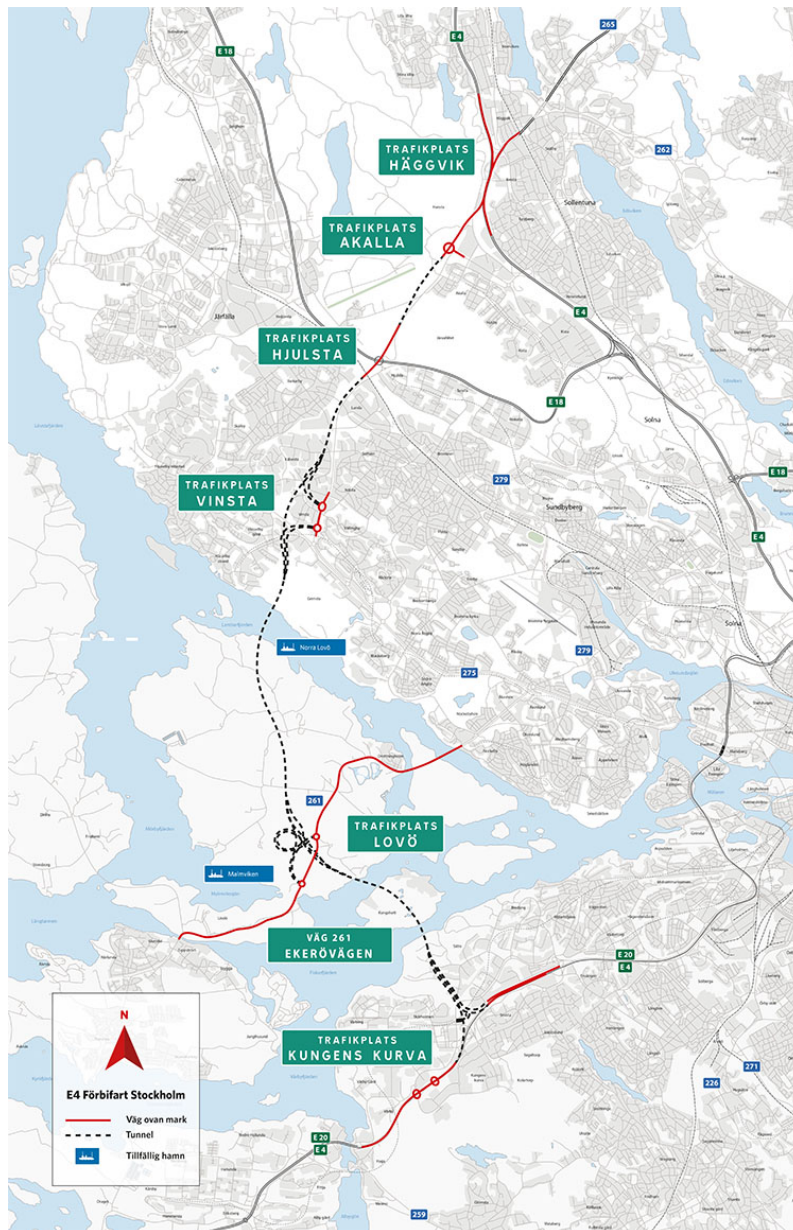
Det är näst intill omöjligt att ge en säker prognos om bergmassans egenskaper där tunneln ska passera. Det krävs därför flera geologiska och hydrogeologiska undersökningar både innan, under och efter berguttag för att minska osäkerheterna. En av de största utmaningarna inom ett tunnelprojekt är att erhålla tillräcklig tätning av bergmassan efter tunneluttag. Detta då grundvattnet hittar sig ner till pågående tunnelarbete genom befintliga spricksystem. Följden av en misslyckad

tättningsinsats kan då bli en avsänkning av grundvattennivåer vilket inte är önskvärt då det medför flera andra problem relaterade till arbetsmiljö i tunneln (främst vid väldigt höga inläckage) och sättningar i ovanliggande jordlager. Bergmassan tätas vanligtvis genom en metod som kallas för sprickinjektering (i tal injektering) vilket betyder att ett injekteringsmedel sprutas in i borrhål med övertryck för att därefter tränga in i sprickor som skär borrhålet.

## 1.2 Problemformulering

Problematiken ligger i svårigheten att täta sprickor i berg vid tunnelarbete. Syftet med sprickinjektering i kristallint berg inom Förbifarten är att minska inläckage av vatten till underjordsanläggningen. Detta är komplicerat eftersom man inte helt kan känna till bergmassans egenskaper framför stoff. Det är också svårt att förut säga injekteringsresultatet med full säkerhet. Istället behöver man prognosticera injekteringsresultatet, det är det enda sättet att bilda en teoretisk uppfattning om bergmassan. Det är inte förrän efter tunneln har tagits ut som en utvärdering av injekteringsresultatet kan göras i form av okulärbesiktning eller vattenmätningar. Det finns en inneboende svårhet i att bedöma injekteringsresultatet under tiden injekteringen pågår, eller efter injektering utförts men innan berget har tagits ut.

Konsultföretagen *AFRY* och *AECOM* har tillsammans med *Trafikverket* tagit fram ett nytt injekteringskoncept, *ABC-4*, som implementerades under våren 2020 och pågår i skrivandets stund. Examensarbete ges på beställning av *Trafikverket* tillsammans med medverkande externa parter *AFRY* och *AECOM* där arbetet skrivs för underkonsulten *Golder* med fokus på injekteringsdesign inom Förbifarten. Metoden för arbetet innefattar att göra en baklängesberäkning av teoretiska sprickvidder baserat på loggad data från injektering inom Förbifart Stockholm. Teoretiska sprickvidder beräknas med hjälp av beräkningsverktyget *MrCalc* (Osterman 2020). *MrCalc* beräknar sprickvidder från olika parametrar baserat på reologi för injekteringsmedlet samt fysikalsika egenskaper från injekteringen. Urvalet av data för analysen sker baserat på grundvattenflödet till olika mätdammar i tunnlar. Baserat på flödet går det att ta fram två typer av ideala bergmassor, en med lågt inläckage av grundvatten och en med högt inläckage av grundvatten. Därefter väljs injekteringsdata från respektive ideala bergmassa och analyseras separat för att kunna utröna om det finns en koppling mellan den beräknade teoretiska sprickvidden och inläckaget.



Figur 1: Denna karta är tagen från Trafikverket (2020) och visar hur E4 Förbifart Stockholm planeras att sträcka sig. Kartan visar placeringen av de sex nya trafikplatserna vilka ansluter till och från förbifarten. Trafikplatserna är *Kungens kurva*, *Lövön*, *Vinsta*, *Hjulsta* och *Häggvik*.

### 1.3 Frågeställning

- Kan den beräknade teoretiska sprickvidden  $b_g$  utgöra beslutsunderlag för när eforderlig tätning har uppnåtts för en given injekterings-skärm?
- Finns det en trend mellan flödet av inläckage och den teoretiskt beräknade sprickvidden?
- Är metoden för att beräkna teoretiska sprickvidder för att utvärdera erhållen tätning lämplig?

### 1.4 Avgränsning

- Examensarbetet analyserar enbart data från entreprenad FSE403.
- Examensarbetet analyserar enbart teoretiska sprickvidder.
- Examensarbetet undersöker enbart mätdammar med jämn mätserie från år 2019-2020.
- Analysen sker enbart för sista injekteringsomgången i en given injekterings-skärm.
- Metoden i examensarbetet fokuserar enbart på automatiserad beräkning.

### 1.5 Syfte och mål

Syftet med examensarbetet är att utvärdera metoden för uträkning av teoretiska sprickvidder som beslutsunderlag för styrning av injektering, baserat på loggad data från utförd injektering av respektive injekteringsdesign.

## 2 Litteraturstudie

### 2.1 Geologisk bakgrund

Begrunden i Stockholmsområdet tillhör den så kallade svekokarelska orogenen vilket representerar 2,0-1,8 miljarder år gammal bergkedjebildning. Denna bildning dominerar i östra Sverige. Den svekokarelska orogenen kan delas in i olika litotektiniska enheter, se bilaga 1 figur 15, vilka skiljer sig beroende på olika

berggrunders ursprung, struktur, metamorfa och kronologiska utveckling inom det orogena bältet (Wahlgren et al., 2018).

### 2.1.1 Bergarter i Stockholmsområdet

Berggrunden i Stockholm domineras up av paleoproterozoiska metasedimentära bergarter (Wahlgren et al., 2018). Detta motvarar den ljusblå färgen på kartan i bilaga 1 figur 16. Det finns även kristallin kalksten och felsiska metavulkaniter från samma tidsperiod i Stockholmsområdet. De djupbergarter som bildats först är granitoider men senare har det bildats graniter som vi känner till och pegmatiter (Wik et al., 2004). Ursprungsmaterialet för metasedimentära bergarter är bildat från sedimentation av lera och sand. I området så varierar fördelningen mellan glimmer och kvarts-fältspat och bergarterna är vanligtvis omvandlade och har genomgått en kraftig uppsmältning (Wahlgren et al., 2018). Från tidens hela bergartsbildning så utgör granitoiderna de vanligaste bergartstyperna i Stockholm, även kallat kristallint berg (Wik et al., 2004). I bilaga 2 finns en genererad karta över Stockholms berggrung, den är från SGU:s kartgenerator (2021). Platsen är utvald för där E4 Förbifart Stockholm planeras att bli och det går att se de dominerande granitoiderna i området. Berggrundsgeologin i Stockholm har en lång historia med flertalet glaciationer som ägt rum och påverkat både landskap, jordarter och berggrund för att ta den formen som vi ser idag. *Burefalk Strauss* och *Roško* har skrivit ett arbete, *Fastställande av lineamentens karaktär med avseende på bergkvalitet enligt  $Q_{bas}$  och  $RMR_{bas}$  inför tunnelkonstruktion i Solna, Stockholm samt kvalitetsutvärdering av Astrock hyperdata report, 2016*. Arbetet tar upp mer detaljer för vad som händer i bergartsbildningen kopplat till tiden de bildades. Detta för en bredare kunskap samt djupare förståelse för denna del av litteraturstudien.

## 2.2 Spricksystem i berg

Sprickor bildas i berg då berget utsätts för spröd deformation genom spänningar orsakade av teoretiska krafter. Sprickor i berg är anledningen till att vatten kan flöda genom bergmassa. När det talas om bergets spricksystem så menas alla sprickor i den omtalade bergmassan. Detta innefattar alla storlekar på sprickor och sorteras efter sin orientering vilket kallas för sprickgrupp. Andra sätt att sortera är genom att klassa sprickorna efter längd, vinkel, sprickfyllnad eller karaktär. För att kunna förstå hydrogeologin i ett kristallint berg så behövs förståelse av spricksystemet (Gustafsson 2012). Det kristallina berget i Sverige är väldigt gammal och

på grund av sin åldern så har berggrunden utsatts för flera händelser som orsakat sprickbildningen vid olika tillfällen.

*Bergartsbildning.* När magma stelnar så förändras bergmassan från plastisk till mer spröd och volymen minskar samtidigt vid kristallation. Denna process går väldigt långsamt då alla delar av en magmatisk bergartsbildning inte stelnar samtidigt (Wahlgren et al. 2018 och Andersson 2014). Detta skapar rörelser i bergmassan och har genererat tidiga svaghetszoner samt krympsprickor (Gustafsson 2012). Krympsprickor kan liknas vid en sprickbildning då en lera torkar (Cementa AB u.å.).

*Bergkedjebildning.* I Sverige finns det spår av tre bergkedjor vilka alla har erroderats innan vår tid. Dessa kan kännas vid genom sprickmönster och deformationer som lämnats kvar (Gustafsson 2012).

*Glaciären.* I samband med den senaste glaciationen samt avsmältningen sker det flera processer vilka påverkar sprickighet. Då isen försvann skedde en tryckavlastning vilken gav upphov till sprickor i berggrunden parallella med markytan då berget expanderade. Dessa sprickor kallas för bankningsplan. När isen rörde sig så uppstod även skjuvspänning mot bergytan som påverkar sprickbildning. Även vattenflöde i spricksystem följt av permafrost orsakar frostsprängning vilket är då sprickor vidgas (Gustafsson 2012).

*Markytan.* Sprickbildning vid markytan sker vid erosion och vittring (ibid).

### **2.2.1 Sprickor**

Det storskaliga sprickmönstret orsakas främst av krafter som uppkommer vid kontinentaldrift och plattetektonik. Krafterna som verkar ger horisontella spänningar i jordskorpan vilket även sker vid kontinentalkollision. Denna process pågår hela tiden. När bergmassan pressas och deformerar kan skjuvspänning uppstå vilket betyder att bergmassor dras mot varandra. Detta kan i sin tur orsaka skjuvbrott vilket är en vanligt förekommande brottsmekanism i en spröd bergmassa.

Sprickor har inte plana parallella ytor. Det måste finnas kontaktpunkter mellan ytorna för att bergspänningen ska kunna överföras. Sprickfyllning är vanligt förekommande i form av bergfragment eller att det skett mineralbildning, se figur 4 (ibid.).



Grundvattenflödet sker främst i sprickgångarna men är inte begränsat till dem. Grundvattenflödet tar vägen där motståndet är lägst vilket betyder vägen där sprickorna har störst hydraulisk apertur. Flödesfördelningen i sprickan kommer på grund av detta bli ojämn. Eftersom sprickvidden samt flödet varierar så används en så kallad hydraulisk apertur  $b$ . Denna avser den totala sprickvidden för alla samlade sidosprickor vilka tillhör den undersökta större sprickan. Sidosprickorna kan ibland vara mindre porer vilka inte bidrar till grundvattenflödet (Gustafsson 2012).

## 2.3 Grundvattenflöde i berg

### 2.3.1 Konceptuella modeller

Bergets geometri och sprickbildning är väldigt komplex och därför krävs det modeller som beskriver grundvattenflödet på ett konceptuellt sätt för att bilda en teoretisk uppfattning. Ragvald (2012) beskriver om flera olika modeller i sitt arbete om grundvattenströmning i gruvor. Hon skriver om kontinuummodellen som beräknar ett flöde i tre dimensioner. För att göra det antas berget vara homogent med ett effektivvärde på konduktiviteten. Eller så antas berget vara stokastiskt utifrån en statistisk fördelning. Andra sätt att modellera flöden är med en diskret sprickmodell där grundvattnet antas flöda i ett nätverk av plana sprickor (Ragvald, 2012). Studier för grundvattenströmning och olika modeller Ragvald (2012) undersöker baseras på Gustafson (2009). Han skriver om planparallella sprickor i två dimensioner som tillsammans bildar ett nätverk i tre dimensioner, vilket antas i detta examensarbete och följande avsnitt baseras i stor utsträckning på den uppdaterade versionen, Gustafson (2012).

### 2.3.2 Darcys lag

Grundvatten flödar via porer och sprickor genom jordlager vid transport. Flödet antas vara laminärt vilket betyder att krafter som uppstår vid ändrad flödesriktning försummas samt att flödet ej är turbulent. Antagandet ger ett linjärt samband mellan det specifika grundvattenflödet  $q$  och mediets egenskaper. Ett uttryck för sambandet är *Darcys Lag* (Fetter 1988), se ekv.(1). När flödet  $Q$  i volym per tidsenhet passerar tvärsnittsarea  $A$  i mediet (en jordart) beskrivs detta av produkten mellan konduktiviteten  $K$  och gradienten  $\frac{\Delta h}{\Delta l}$ , eller  $dh/dl$ .

Konduktiviteten kan beskrivas som en motståndskoefficient där  $K$  varierar beroende av jordart. För att beräkna specifika flödet i små steg i en jord skrivs uttrycket om enligt implikationen i ekv.(1).

$$q = \frac{Q}{A} = K \cdot \frac{\Delta h}{\Delta l} \Rightarrow -\frac{dh}{dl} \cdot K \quad (1)$$

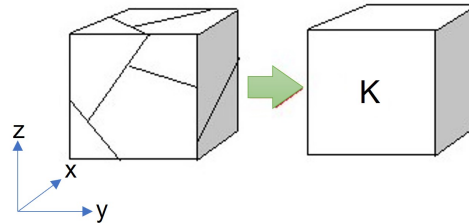
$q$	specifika flödet	$m s^{-1}$
$Q$	vattenflöde	$m^3 s^{-1}$
$A$	tvärsnittsarea	$m^2$
$K$	hydraulisk konduktivitet	$m s^{-1}$
$\frac{\Delta h}{\Delta l}$	gradient	[-]

### 2.3.3 Flödet i en spricka

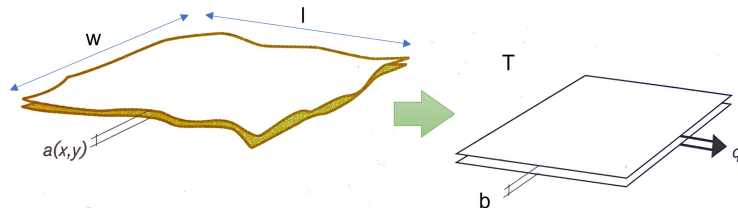
Darcys lag beskriver konduktiviteten för en viss jordart men grundvattenflöde sker även genom bergets sprickor. Bergets hydrauliska egenskaper kräver geometrisk analys för djupare förståelse. För att förenkla kan berget tänkas vara antingen homogent, se figur 2, eller som ett nätverk med plana strukturer (Gustafson, 2012). I verkligheten är bergets sprickor tvådimensionella med plana strukturer och bildar tillsammans ett 3-dimensionellt nätverk (Gustafson, 2009 och Ragvald, 2012). Sprickan har en ändlig utbredning,  $l$ , samt en sprickvidd  $b$ , se figur 3. För att beskriva sambandet mellan flödet i sprickan och den hydrauliska gradienten kan Darcys lag skrivas om från konduktivitet  $K$  i en jordart till transmissivitet  $T$  i en bergmassa. (Gustafsson 2012). Ekv.(2) är väldigt lik ekv.(1) på så sätt att vi här har ett specifikt flöde i spricka  $q_f$  som beskrivs med vattenflödet  $Q$  per breddenhet hos bergmassan  $W$ . Hela denna biten går att översätta till en liknande produkt som ekv.(2) men här kommer en ny parameter in vilket är *transmissivitet*,  $T$ . Transmissiviteten är en proportionalitetskonstant som beskriver förmågan hos ett jord- eller berglager att leda vatten (NE 2020).

$$q_f = \frac{Q}{W} = T \cdot \frac{\Delta h}{\Delta l} \Rightarrow -\frac{dh}{dl} \cdot T \quad (2)$$

$q_f$	flöde i spricka	$m^2 s^{-1}$
$Q$	vattenflöde	$m^3 s^{-1}$
$W$	bredd	$m$
$T$	transmissivitet	$m^2 s^{-1}$
$\frac{\Delta h}{\Delta l}$	gradient	[-]



Figur 2: För att visuellt förstå vilken förenkling som görs i en jordart eller bergmassa så visar den vänstra kuben teoretiska sprickor eller gångar för grundvattenflödet. I verkligheten så finns det inte endast ett värde på konduktiviteten vilket gör det komplext att beräkna alla möjliga värden. Därför antas jordarten eller berget vara homogent vilket innebär att vi antar ett värde för konduktiviteten  $K$  igenom hela massan eller jordprofilen, enligt den högra kuben (Gustafson 2012). Koordinatsystemet i figuren visar endast orienteringen. Denna kub kan tänkas upprepas i en bergmassa. *Figuren är baserad på: Hydrogeologi för bergbyggare (sida 26), Gunnar Gustafson 2012.*



Figur 3: Sprickor är i verkligheten semiplana strukturer som förenklas och antas vara helt plana strukturer. Till vänster ser vi en teoretisk planparallel spricka med bredden  $w$ , längden  $l$  och storleken på sprickan mellan planen  $a(x, y)$ . För att koppla denna konceptuella spricka till ekv.(2) ses den vänstra tolkningen. Den visar transmissiviteten  $T$  för ett specifikt grundvattenflöde  $q_f$  genom en teoretisk sprickvidd  $b$  (Gustafson, 2012). *Figuren är baserad på: Hydrogeologi för bergbyggare (sida 27), Gunnar Gustafson 2012.*

## 2.4 Bergets hydrogeologi

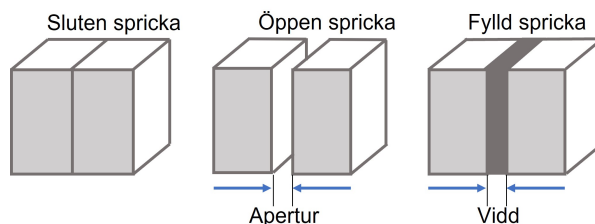
### 2.4.1 Anisotropi

Den hydrauliska konduktiviteten är ett mått på mediets förmåga att leda vatten. Som beskrivet i figur 2 varierar konduktiviteten i olika riktningar beroende av porer, sprickstruktur lageföljd i jordprofil eller sprickriktning i bergmassan. Det här kallas för anisotropi och motsatsen är då ett medium som har samma egenskaper i alla riktningar vilket kallas isotropi (Dominico och Schwartz, 1998). Alla jord- och bergarter som omvandlats är mer eller mindre anisotropa (Sundberg 1991). Detta ger även antagandet att spricksystem i bergmassor är anisotropa (Ragvald 2012).

### 2.4.2 Sprickzon

En sprickzon är en samling sprickor längs ett plan med en viss orientering. Figur 3 visar hur en teoretisk spricka ser ut i två dimensioner. Sprickzoner och krosszoner utgör passager som ofta betyder mer komplicerade tekniska lösningar med avseende på tätning och förstärkning. Sprickzoner och krosszoner utgör ofta områden med högre inläckage än övriga bergmassor. Gustafson (2012) visar flera konceptuella figurer som förklarar olika spricksystem. På sida 21 i *Hydrogeologi för bergbyggare* finns hittas *figur 2.14* - en konceptuell modell av en sprickzon (spröd deformationszon). Figuren visar en bergmassa i tvärsnitt med ett komplext spricksystem. Det uppstår en zonkärna med större gångar och mer fler frekventa sprickor i mitten av bergmassan. Zonkärnan omringas av övergångszoner vilket är spricksystem som inte är lika frekventa men ändå kopplade till varandra som ett nätverk. Tillsammans bildar de den totala zombredden, denna sträcker sig enligt de röda pilarna upp och ned i bergmassan, vilket motsvarar den hydrauliska aperturen  $b$

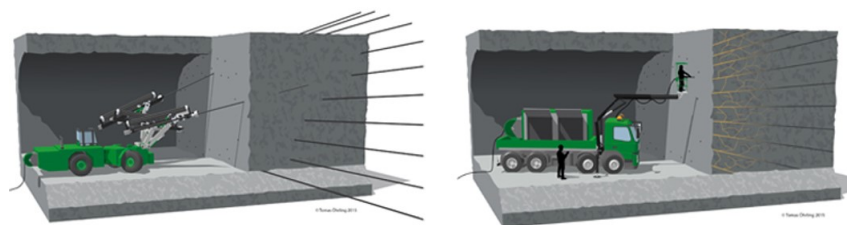
När sprickintensiteten i en sprickzon ökar, är berget oftast krossat och därför kallas det istället en krosszon. I zonen är spricksystemet anisotropt som tidigare nämnts. Detta eftersom deformationen i zonen bildar parallella sprickor. Gustafson (2012) visar en konceptuell figur av sprickförekomst på sida 16, 2.4. Figuren visar hur en bergmassa veckas på grund av deformation. Deformation kan ske av olika anledningar och variera gradvis beroende av bergart. Ignea (2015) gjorde en studie för stora sprickzoner i Fiskarfjärden där hon undersökt olika synliga deformationer som bildats från tiden då kontinenter kolliderade och landhöjning i form av bergkedjor tog sin form. Gustafson (2012) förklarar i sin figur hur spänningar  $\sigma$  bildas vid tryck och deformation. Av befintliga sprickor mellan veckningar som visas i figuren bildas de parallella sprickorna som finns i dagens bergmassa. Ibland kan flera krosszoner förekomma längs deformationen vilket medför att genomsläppligheten i zonen får hög anisotropi. Längs zonen är transmissiviteten hög och tvärs zonen är den låg.



Figur 4: Konceptuell definition av sprickapertur. Längst till vänster ser vi en sluten spricka, i mitten en öppen spricka där avståndet mellan sprickväggen utgör apertur. Den till höger visar en fylld spricka vilket utgör en sprickvidd. *Figuren är baserad på: Definition och beskrivning av parametrar för geologisk, geofysisk och bergmekanisk kartering av berg, Allan Stråhle 2001*

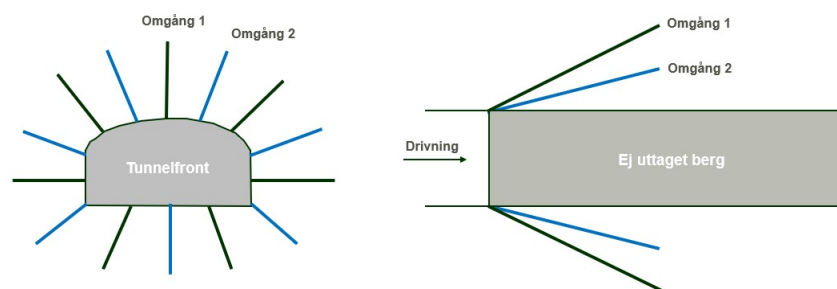
## 2.5 Sprickinjektering i praktiken

För att kunna genomföra ett berguttag i ett tunnelarbete måste bergmassan i de flesta fallen tätas, något som vanligen görs med injektering. Detta startar med en förinjektering vilket betyder att en en skärm av borrhål borrar vid tunnelfronten likt en tratt, se figur 5, för att sedan injekteras med injekteringsmedlet. Principen för injektering är att trycka in injekteringsbruk i sprickorna för att skapa ett område runt tunneln med lägre hydraulisk konduktivitet än innan injekteringen. Den konceptuella arbetsgången är att först borrar och injekteras en uppsättning hål runt tunneln från fronten, vilket blir omgång 1. Efter omgång 1 upprepas borrning samt injektering för potentiella ytterligare omgångar (se figur 6) och vidare tills arbetet uppfyllt kriterier för designen. Det optimala är att hela borrhålet fylls med injekteringsmedel samt att trycket regleras på så sätt att bruket klarar att tränga in i de anslutande sprickorna i spricksystemet. Men det finns fyra huvudsakliga faktorer som orsakar osäkerhet.



Figur 5: Till vänster i figuren är det borrhålen som förbereds i en trattliknande skärm. Detta är till förinjekteringen och är metoden som används för att tätas bergmassan. Den högra delen av figuren visar en injekteringsrigg som trycksätter injekteringsmedel i de borrade hålen. Figuren visar konceptuellt hur bruket tränger in i spricksystemet (Trafikverket 2020). Bildkälla: Trafikverket 2020.

1. Vissa sprickor har för liten öppning för att bruket ska klara av att tränga in. Detta då cementpartiklarna är större än vissa sprickvidder.
2. Bruket tränger inte tillräckligt långt in i sprickan för att det ska ske en överlappning mellan antingen hål i samma skärm eller mellan hål i efterföljande skärmar.
3. Spricksystemets dimensionalitet är okänd vilket gör att den teoretiska inträngningen kan underskattas eller överskattas.
4. Borrhålet måste träffa sprickan på ett ställe där denna är öppen och vattenförande för att bruk ska kunna spridas från just detta borrhål.



Figur 6: Detta är en förenklad modell över hur omgång 1 och omgång 2 av injekteras. Den vänstra, "Tunnelfront", är framför stuf där båda omgångarna har numrerade borrhål för varje skärm som injekteras. Den högra delen ser vi tunneln från sidan. Här visas även vilken riktning tunneln driver åt, se pilens riktning. Den grå färgen är bergmassa figuren är tagen från Osterman (2020a). Bildkälla: Fredrik Osterman, 2020.

## 2.6 Sprickinjektering i teorin

### 2.6.1 Reologi

Reologi är läran om materialets deformations-och flytegenskaper. De storheter som berör reologi är viskositet och flytgräns. Viskositeten bestämmer hur snabbt en vätska flödar (deformeras). Flytgräns innebär den applicerade kraften som krävs för att vätskan ska röra sig eller börja flyta. Det finns två olika modeller för att beskriva reologiska egenskaper, *Binghammodellen* och *Newtonmodellen*

(Häglund 2013 och Betonghandboken 1997), se figur 7. För ett cementbaserat injekteringsmedel används *Binghammodellen* (Betonghandboken 1997). Häglund (2013) skriver att både bruk och mikrobruk (finare) kan anses vara Binghammaterial och reologin kan därför beskrivas med viskositet och flytgräns.

**Binghamvätska** → har en flytgräns.

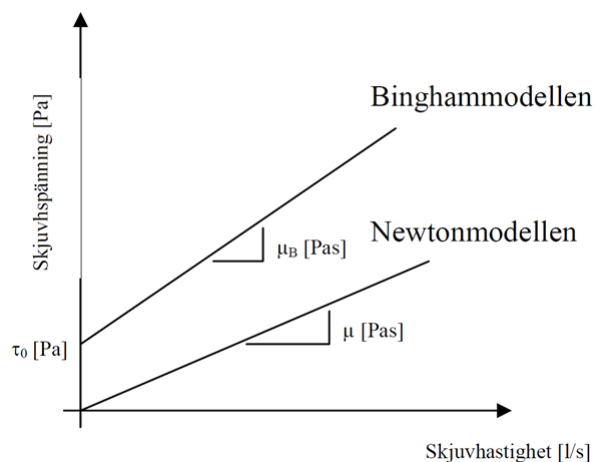
**Newtonskvätska** → har ej flytgräns.

Reologin i ett injekteringsmedel kan mätas med både direkta och indirekta metoder. För att göra en direkt mätning används en rheometer där injekteringsmedlets skjuvspänning mäts för olika skjuvgradienter. Inträngningsförmågan går att mäta på olika sätt. Dessa mätningar behöver göras för injekteringsmedlet och baseras på de hydrogeologiska undersökningarna som gjort innan i den bergmassan som planeras att tätas. En sån mätning kallas för förprovning och följer olika kriterier baserat på reologin (Stille 2016 och ÅF et. al., 2020)

De två parametrar vilka utvärderar inträngningsförmågan utgörs av  $b_{min}$  och  $b_{krit}$ . Dessa parametrar står för:

- Passerad volym  $\leq b_{min}$  definierar den fysiska apertur genom inget cementbruk kan penetrera. För sprickor  $\leq b_{min}$  sker 100% filtrering av cementbruket.
- Passerad volym  $\geq b_{krit}$  innebär en sprickvidd stor nog för att ingen plugg bildas och 100% av injekteringsmedlet penetrerar sprickan och kan flöda fritt.
- För sprickvidder mellan  $b_{min}$  och  $b_{krit}$  uppstår gradvis pluggbildning med viss penetrering av sprickorna till dess att en fullt utvecklad plugg bildats.





Figur 7: Här ses hur de olika modellernas egenskaper varierar för så kallade Binghamvätska samt Newtonskvätska. I figuren ser vi att Newtonmodellen startar i origo medan Binghammodellen startar en bit upp på y-axeln eftersom den har en flytgräns  $\tau_0$  given i *Pascal*. På x-axeln visas skjuvhastigheten givet i  $s^{-1}$ . Det som visas mitt i grafen,  $\mu_0$  och  $\mu$ , bestämmer viskositeten för respektive modell (Betonghandboken 1997). Bildkälla: Fredrik Osterman, 2020b, baserad på teorier om reologi.

### 2.6.2 Injekteringsmedel

Det finns olika injekteringsmedel. Kemiska, polymeriska och cementbaserade. Det vanligaste injekteringsmedlet är en cementsuspension bestående av cement, vatten och eventuella tillsatsmedel (Osterman 2020). Egenskaperna hos cementbaserade injekteringsmedel skiljer sig ifrån grundvattets. Detta betyder att injekteringsmedlet och vattnet beter sig olika i bergmassans spricksystem. I en studie som Holmkvist (2016) gjorde för vattenmätning av bruk och betong så jämfördes vct för olika blandningar av bruk. En del av resultatet handlade om hur bruket härddar vilket är en central del i förprovning för injekteringen. Detta för att kunna träffa de sprickvidder som förväntas utan att bruket hinner stelna (härda) för snabbt. Studien var baserad på teorier från Fagerlund (1992) som undersökte flertalet vct för betong.

Spridningen av injekteringsmedlet, alltså inträngningen, beror på flytegenskaper, sprickapertur och injekteringsutförandet. Skillnaden i reologiska egenskaper är

betydande eftersom cementbruket är mer trögflytande och har även en fysiskt begränsad inträngningsförmåga. Brukets egenskaper är även tidsberoende då injekteringsmedlet härdar efter ett tag. Egenskaperna styrs av vilken cement som används, eventuella tillsatsmedel samt vattencementtalet (vct). Vct styr hur lättflytande bruket är enligt:

Högt vct → mer vatten per enhet cement, lättflytande

Lågt vct → mindre vatten per enhet cement, trögflytande.

För att uppnå en tillräcklig tätningseffekt i en bergmassa för tunnelarbete behöver injekteringsmedlet uppfylla följande tre krav:

- Kunna tränga in i dimensionerande sprickvidder
- Erhålla tillräcklig spridning av bruket i dimensionerande spricka.

### 2.6.3 Teoretiska sprickvidden

För att kunna beräkna den teoretiska sprickvidden så används dels reologin för injekteringsmedlet, trycket för sprickinträngning från injekteringsriggen (riggen loggar detta för varje hål) samt teoretiska parametrar baserat på platsspecifika mätningar. Från dessa går det att göra en baklängesberäkning för att komma fram till en teoretisk sprickvidd. Ekvationerna beskriver inträngning i två dimensioner (Stille 2016).

Den teoretiska tiden som beskriver hur lång tid det tar att uppnå maximala teoretiska inträngningen av en Binghamvätska i en plan-parallell spricka kallas karakteristiska tiden och beror av reologin i injekteringsmedlet samt injekteringstrycket, se ekv.(3) (Palmström & Stille 2015).

$$t_0 = \frac{6\Delta p\mu_g}{\tau_0^2} \quad (3)$$

$t_0$	karaktäristiska injekteringstiden	$s$
$\Delta p$	effektivt injekteringstryck	$Pa$
$\mu_g$	injekteringsmedlets viskositet	$Pa\cdot s$
$\tau_0$	injekteringsmedlets flytgräns	$Pa$

Den relativa tiden beskriver kvoten mellan den verkliga injekteringstiden och den

karaktäristiska tiden (Palmström & Stille 2015). Detta för att veta hur förhållandet mellan den verkliga tiden och den teoretiska tiden, se ekv.(4).

$$t_D = \frac{t}{t_0} \quad (4)$$

$t$  injekteringstid  $s$   
 $t_D$  relativa tiden  $[-]$

För att ta reda på den relativa inträngningslängden som beskriver hur långt injekteringsbruket har trängt in i en spricka jämfört med den maximala inträngningslängden beräknas först spridningen i två dimensioner enligt ekv.(5). Spridningen baseras på den relativa tiden från ekv.(4). Den relativa inträngningslängden baseras i sin tur på spridningen, se ekv.(6).

$$\Theta_{2D} = \frac{t_D}{2(3 + t_D + 0.23 \ln(t_D))} \quad (5)$$

$$I_D = \sqrt{\Theta_{2D}^2 + 4\Theta_{2D}} - \Theta_{2D} \quad (6)$$

$\Theta_{2D}$  spridning i 2D  $[-]$   
 $I_D$  relativa inträngningslängden  $[-]$

Brukets flöde genom en spricka mäts i volym per tidsenhet. Det finns ett samband mellan flödet och brukets egenskaper i en spricka med aperturen  $b$ . I ekv.(7) visas relationen mellan brukets flöde  $Q$ , inträngningslängden per tidsenhet och sprickaaperturen i kubik,  $b^3$ . Ekv.(8) visar att sprickaaperturen i kubik beror av volym samt brukets reologi, tryck och inträngningslängd.

$$Q = \frac{dV_{tot}}{dt} = 2\pi \cdot I_D \cdot \frac{dI_D}{dt_D} \cdot \frac{1}{t_0} \cdot \left[ \frac{\Delta p}{2\tau_0} \right]^2 \cdot \sum b^3 \quad (7)$$

$$\sum b^3 = \frac{V_{tot}}{\pi I_D^2 \left( \frac{\Delta p}{2\tau_0} \right)^2} \quad (8)$$

$Q$  flöde  $m^3 s^{-1}$   
 $V_{tot}$  volym bruk  $m^3$   
 $b$  sprickaapertur  $m$

$$T_f = \frac{\rho g}{12\mu} b^3 \quad (9)$$

$T_f$  transmissivitet  $m^2 s^{-1}$   
 $\rho$  densitet bruk  $kgm^{-3}$

## 2.7 E4 Förbifart Stockholm

E4 förbifart Stockholm är en enorm trafiksatsning på beställning av Trafikverket. I projektet deltar flera stora konsultföretag med kunskap inom flera teknikområden. Det nya vägsystemet knyter ihop nya spår och vägar i hela Stockholm. Förbifarten kommer länka södra delen av Stockholm med norra delen och kommer tillsammans med den yttre tvärleden skapa nya linjer ihop med vägnätet och kollektivtrafiksystemet. Resultatet av E4 Förbifart Stockholm förväntas bidra till dels att binda samman de regionala stadskärnorna, knyta ihop norr och söder under Mälaren, avlasta trafiken ovan mark samt flera andra positiva möjligheter (Trafikverket 2019). Förbifart Stockholm är ett av Sveriges genom tiderna största infrastrukturprojekt. För att minska påverkan av projektet på omgivningen så kommer Förbifartens 18 km av totala 21 km konstrueras i tunnlar. Tack vare att E4 Förbifart Stockholm är förlagd mestadels i tunnlar kommer påverkan på naturområden och kulturella värden minska då projektering ovan mark reduceras (Osterman & Creutz 2019).

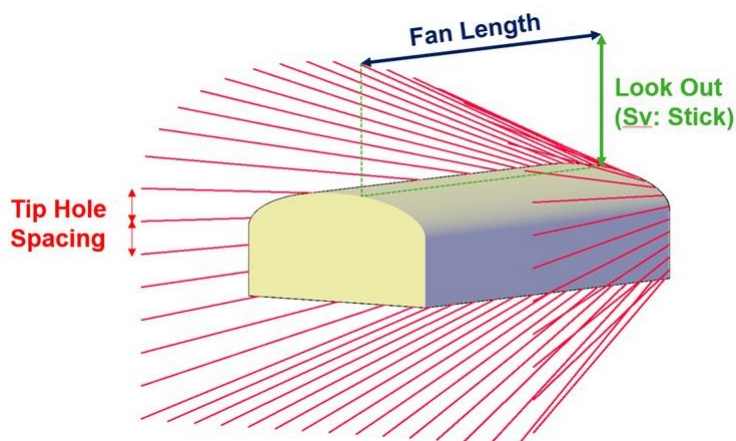
## 2.8 Injekteringskoncept inom Förbifart Stockholm

### 2.8.1 Injekteringstryck

Trycket baseras på de dimensionerande inträngningslängderna för de valda bruksblandningarna och dimensionerande sprickvidder,  $b_{dim}$  och  $b_{max}$ . Injekteringstrycket kontrolleras även mot andra faktorer som utrusningens kapacitet och spränging av bergmassan (ÅF, Trafikverket & Golder 2020).

### 2.8.2 Skärmgeometri

Skärmgeometri definieras av riktning och placering av injekteringshålen. De avgörande parametrarna för en injekteringskärm är längd, hålstick för respektive injekteringshål, hålspetsavstånd och skärmöverlapp, se figur 8. Att utforma en injekteringskärm tar hänsyn till hur nära injekteringsborrhålen kan borras utan att påverka injekteringsresultatet. Om borrhålen blir för täta kan det uppstå så kallat *samband* vilket leder till sämre tätning. Injekteringskärmens design har till syfte att säkerställa att injekteringen utförs runt hela tunneln (ÅF, Trafikverket & Golder 2020).



Figur 8: Här ser vi en injekteringskärm igenom en teoretisk bergmassa. Figuren är en tre-dimensionell tolkning av tidigare figur 6. Den röd texten beskriver hålspetsavstånd, den gröna text beskriver hålstick för respektive injekteringshål och den blåa text beskriver längden (Osterman 2019). *Bildkälla: Fredrik Osterman 2019.*

### 2.8.3 Antal injekteringsomgångar

Antal injekteringsomgångar betyder antalet injekteringskärmor borrade i samma bergmassa. En injekteringsomgång innebär att injekteringshål borrar och injekteras för att sedan härda. Detta sker innan potentiellt nästa omgång kan starta i samma bergmassa. Generellt gäller att desto fler injekteringsomgångar desto tätare tunnel. Antalet omgångar styrs av vilken injekteringsklass som väljs (ÅF, Trafikverket & Golder 2020).

### 2.8.4 Originaldesign ABC

#### *Allmänt*

Arbetsgången bestäms beroende av de olika injekteringsklasserna IKA, IKB och IKC.

#### *Strategi*

För att kunna täta bergmassan så valdes en kontinuerlig förinjektering som metod. Täthetskraven följde injekteringsklasserna och de olika skärmarna valdes därför också efter klassificering. Lägre täthetskrav fick IKA. Berg med medelgenomsläpplighet fick IKB och berg med högre injekteringskrav fick IKC.

### *Skärmgeometri och antal omgångar*

IKA: skärmarna borrades i 1 omgång med 5m hålspetsavstånd och 5m stick med borrhåslängder på 25m.

IKB: skärmarna borrades i 1 omgång med 2,5m hålspetsavstånd och 5m stick med borrhåslängder på 25m.

IKC: skärmarna borrades i 2 omgångar med vardera 2,5m hålspetsavstånd och 5m stick med borrhåslängder på 25m. Efter 2 omgångar är hålspetsavstånden 1,25m.

### *Stoppkriterier*

Stoppkriterier väljs efter maxtiden som här var 15min med volym 500L och flödesstoppkriterie på  $2Lmin^{-1}$  under 5min. Samma stoppkriterier gäller för alla injekteringsklasser.

## **2.8.5 Reviderad design ABC-2**

### *Allmänt*

Injekteringsdesignen justerades för att uppnå en förbättrad erhållen tätning. Det var främst IKB och IKC som förändrades. IKA togs bort och den nya designen fick även ny benämning; IK B2 och IK C2

### *Strategi*

Den nya strategin baserades på att en hypotes om att tunnlarna får bättre erhållen tätning vid ökad injekterad volym. För detta så ökade även injekteringstrycket från tidigare design.

### *Skärmgeometri och antal omgångar*

IKA: borttagen.

IK B2: skärmarna borrades i 1 omgång med 2,5m hålspetsavstånd och 5m stick, botten borrades vartannat hål med 7,5m stick. Borrhåslängder var 25m.

IK C2: skärmarna borrades i 2 omgångar med vardera 2,5m hålspetsavstånd och 7,5m i första omgången och 5m stick i andra omgången med borrhåslängder på 25 samt 28m för att säkerställa överlapp i botten. Efter 2 omgångar är hålspetsavstånden 1,25m.

### *Stoppkriterier*

Maxtiden togs bort och volymstoppkriteriet ökade från 500 till 1200L. Alternativet var att stoppa injektering vid flödesstoppkriterie  $2Lmin^{-1}$  under 5min och injekteringstiden minst 20min. Efter bruksbyte ändrades volymstoppkriteriet på 2400L med samma flödesstoppkriterie.

## **2.8.6 Reviderad design ABC-3**

### *Strategi*

Strategin följer B2 och C2 som baserades på den ovannämnda hypotesen. Det infördes kontrollhål med obligatorisk vattenförlustmätning då inläckaget inte reducerades tillräckligt. För att öka inträngningen i mindre sprickor användes micro-cement.

### *Skärmgeometri och antal omgångar*

IKA: borttagen.

IKB: borttagen.

IK C3: skärmarna borrades i 2 omgångar med vardera 2,5m hålspetsavstånd och 7,5m i första omgången och 5m stick i andra omgången med borrhåls-längder på 25 samt 28m för att säkerställa överlapp i botten. Efter 2 omgångar är hålspetsavstånden 1,25m.

### *Stoppkriterier*

Designen hade samma stoppkriterier som B2 och C2 där tidsstoppkriteriet togs bort och volymstoppkriteriet var 1200L.

## **2.8.7 Reviderad design ABC-4**

### *Allmänt*

Injekteringsdesignen baseras på två injekteringsklasser som kallas IK1 och IK2. Dessa är anpassade efter bergmassans vattengenomsläpplighet. Detta anses motsvara gynnsamma förhållanden för IK1 och ogynnsamma förhållanden för IK2.

### *Strategi*

Denna strategi är baserad på samma geometriska utformning som ABC-3. Injekteringsstrategin tar hänsyn till problem som upptäcks under pågående injektering

med ABC-3 kopplat till utförandet samt bergets egenskaper. Vid större genomsläpplighet finns behov att minska antal injekteringshål som borrar eftersom fler hål minskar möjligheten att täta effektivt då det i dessa fall uppstår samband mellan hål.

#### *Skärmgeometri och antal omgångar*

- IK2: skärmarna borrades i 2 omgångar med vardera 2,5m hålspetsavstånd och 7,5m i första omgången och 5m stick i andra omgången med borrhåls-längder på 25 samt 28m för att säkerställa överlapp i botten. Efter 2 omgångar är hålspetsavstånden 1,25m.

#### *Stoppkriterier*

Injektering med startblandning har tidsstoppkriterie på 30min och därmed inget volymsstoppkriterie. Injektering efter bruksbyte stoppas på flödesstoppkriterie  $2Lmin^{-1}$  under 5min eller volymsstoppkriterium 700L. Tidsstoppkriteriet på 30min baseras på injektering i ett sämre berg med fler sprickor.

## **3 Metod**

### **3.1 Data**

Från Trafikverkets mätdatabas för omgivningspåverkan (TMO) används data från mätdammar. Datan begränsas till delprojekt norr (DP Norr) under entreprenad FSE403 i E4 Förbifart Stockholm. Alla mätdammar har en egen serie av flödesmätningar vilka är loggade för olika tider för olika delprojekt inom förbifarten. Totalt har data från 28 mätdammar hämtats och analyserats. Från dessa valdes 15 stycken baserad på att de hade jämna mätningar de senaste tre månaderna (augustinovember). De andra mätdammarna hade avvikande mätvärden på grund av de exempelvis varit ur drift, översvämningar har skett eller att senaste mätningen var för långt tillbaka. För de utvalda 15 mätdammarna beräknades både ett aritmetiskt och geometriskt medelvärde från de senaste tre månaderna. Detta för att det geometriska medelvärdet stämde bättre överens med mätserien för värdet blev mer viktat och representativt för mätserien. Baserat på de beräknade medelvärdena delades mätdammarna in i *Högt inläckage* respektive *Lågt inläckage*. Mätdammar med inläckage i snitt över  $10Lmin^{-1}$  tolkades som högt inläckage och mätdammar under kategoriserades som lågt. Varje mätdamm har en numrering som beskriver var den är lokaliserad. En sådan numrering ser exempelvis ut på följande sätt; *md-401-01*" vilket betyder *mätdamm nummer 01 i tunnel 401*". Varje mätdamm har



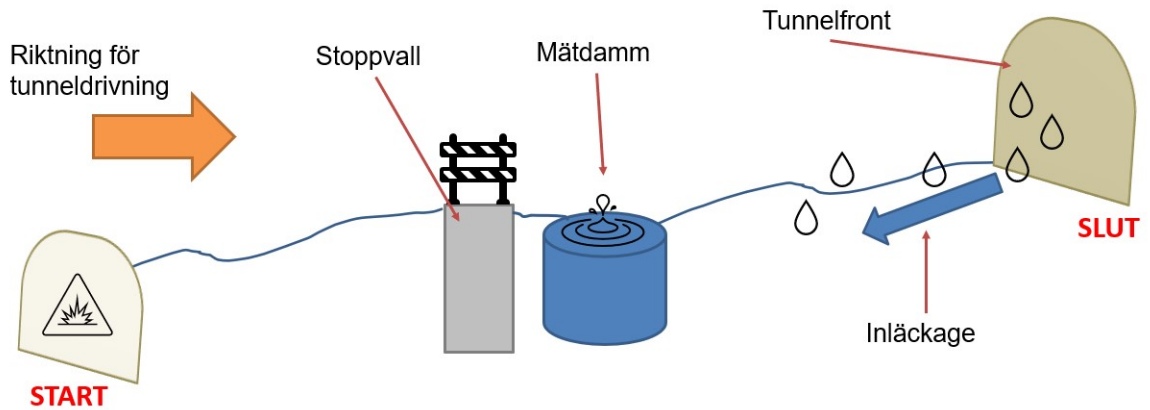
en placering som anges med en sifferkombination. Denna kombination sträcker sig åt båda sidorna från mätdammen och utgör en sträcka, se tabell 1 för exempel på en mätdamm. För varje mätdamm beräknades först sträckan mellan start och

Tabell 1: Exempel på damm belägen mellan övre och nedre tunnelfront, en enklare tolkning är att varje mätdamsområde avgränsas av mätdamsslut och mätdamsstart. Dessa är hämtade ur produktionsuppföljningen för entreprenad FSE403.

Mätdamm	Geometriskt medelvärde	Mätdamsstart	Mätdamsslut
md-401-12	$2,80Lmin^{-1}$	123362	123488

slut, nedan är exempel från tabell 1. Siffran framför numreringen berättar om det är norrgående eller södergående tunnel. Figur 9 visar en konceptuell modell över hur sträckan för mätdammen ser ut samt annan information för bättre förståelse.

$$Distans = slut - start = 123488 - 123362 = 126m. \quad (10)$$



Figur 9: Konceptuell modell för hur mätdammarna är konstruerade i tunneln. Bilden visar riktningen för tunneldrivningen, en startposition och slutposition. Dessa två positioner omringar mätdammen där flödesmätningar sker. Bilden visar även den tunnelfronten som inläckaget sker ifrån, den blå pilen. För att grundvattnet inte ska rinna iväg så finns en stoppvall för att stanna upp flödet för att möjliggöra mätningen. Det är alltså 15 sådana här dammar som ingår i beräkningen för teoretiska sprickvidder.

Det beräknade avståndet användes sedan för att beräkna det normerade inläckaget för att kunna jämföra inläckage från varje mätdamm och bilda en uppfattning om hur mycket vatten det egentligen är per 100 meter tunnel. För att bestämma denna siffra användes det geometriska medelvärdet för varje mätdammsserie.

$$\frac{2,80Lmin^{-1}}{126m}100m^{-1} = 2,20Lmin^{-1}100m^{-1}. \quad (11)$$

De normerade inläckagen möjliggjorde jämförelse på vad som ansågs vara ett högt inläckage respektive lågt. Se tabell 5 i resultatdelen.

## 3.2 Beräkningar

### 3.2.1 MrGrout

*MrGrout* (Osterman 2020c) är ett program som syftar till att förfina och editera loggdata från injekteringsriggar. Loggdata är framtagna från injekteringsriggar tillsammans med handskrivna protokoll. *MrGrout* editerar främst för att få en homogen dataserie att använda i beräkningsverktyget *MrCalc*.

### 3.2.2 MrCalc

*MrCalc* (Osterman 2020d) är ett beräkningsverktyg som använder loggdata från injekteringsriggarna. *MrCalc* gör en baklängesberäkning från loggade parametrar till en teoretisk sprickvidd. För att underlätta beräkningen i *MrCalc* sorterades alla injekteringssektioner inom varje mätdamm efter injekteringsmedel. Detta betyder att för en mätdamm i exempel tabell 1 så finns det flera injekteringssektioner mellan mätdamsstart och mätdamsslut. Alla dessa har varsitt protokoll där det finns noterat vilket injekteringsmedel som använts. För alla mätdammar i tabell 5 är det antingen *injektering 30* eller *Microcem 8000* som varit aktuella. Det som händer först är att injekteringsdatan inom en mätdamm laddas in i *MrCalc* där alla sektioner har samma injekteringsmedel. I alla protokoll är det blandning 2 som används, därför väljes även blandning 2 för alla sektioner i *MrCalc*. Sedan börjar datan analyseras och då behöver packerdjupet inmatas manuellt för detta är också något som varierar för varje sektion. Packerdjupet varierar mellan 1 – 1.5m. Baserat på erfarenheter från förprovet blandas tre olika injekteringsmedel, blandning 1, blandning 2 och blandning 3, vilka alla skiljer sig åt i reologin, se tabell 2 och 3 för de olika egenskaperna.

Tabell 2: Reologiska egenskaper för injekteringsmedlet Microcem 8000.

<b>Microcem 8000</b>	Blandning 1	Blandning 2	Blandning 3
Flytgräns [ <i>Pa</i> ]	1,00	2,43	4,15
Viskositet [ <i>mPas</i> ]	12,00	17,67	82,00

Tabell 3: Reologiska egenskaper för injekteringsmedlet Injektering 30.

<b>Injektering 30</b>	Blandning 1	Blandning 2	Blandning 3
Flytgräns [ <i>Pa</i> ]	2,44	4,377	5,887
Viskositet [ <i>mPas</i> ]	21	45,333	445,333

Reologin är känd samt injekteringstrycket vilket ger den karaktäristiska tiden till första formeln för baklängesberäkningen, se ekv.(3). Den verkliga tiden  $t$  klockas under injekteringsgången och därmed kan den relativa tiden  $t_D$  beräknas med ekv.(4). Den relativa tiden  $t_D$  används sedan till beräkningen av den relativa in-trängslängden enligt ekv.(5) och ekv.(6). Genom nämnda steg kan den teoretiska sprickvidden  $b$  beräknas. Denna beräkning gör MrCalc utifrån loggdatan för alla hål i alla sektioner och tar fram medelvärden för varje omgång från tabell 5. Några viktiga osäkerheter som denna metod innefattar är:

- Egenskaperna för bruken varierar mellan varje injekteringstillfälle.
- Packerdjupet varierar också mellan skärmarna och behöver matas in manuellt.
- Beräkning av transmissivitet beror av vattnets fysikaliska egenskaper, inte av bruket.
- Skärmarna har injekterats i olika omgångar; omgång 1, omgång 2 även omgång 3 finns men väldigt sällan. Det är den sista omgången som valts till analysen. Osäkerheten är att ibland är omgång 1 den sista omgången och ibland är det omgång 3.
- Mr Calc automatiserar beräkningen för teoretiska sprickvidder. På grund av detta så antar programmet en teoretisk sprickvidd vid låga bruksåtgångar. Detta betyder att om bruksåtgången är mindre än teoretisk hålvolym så antas en sprickvidd på cirka  $46\mu\text{m}$  baserat på  $b^3 = 10^{-13} \text{ m}^3$  och användning av ekv.(8).

Den samlade beräknade data från alla skärmar exporteras till en excelfil. Det har gjorts två sådana excelfiler efter indelningen av högt respektive lågt inläckage. Varje skärm har flera borrhål med numrering. För en skärm har ett medelvärde av ett antal nyckelparametrar beräknats, däribland den teoretiska sprickvidden vilken är av huvudintresse för denna analys. Se bilaga 3, tabell 7 och tabell 8 för hela dataserien för respektive kategori. I bilaga 4 tabell 9 hittas den sammanfattade dataserien med medelsprickvidderna. Eftersom det är den sista omgången för varje skärm som är intressant för analysen så har övriga omgångar tagits bort i analysen. Efter justering av omgångar och skärmar så har följande data analyserats i resultatet:

- Lågt inläckage → 8 mätdammar → 112 skärmar.
- Högt inläckage → 7 mätdammar → 80 skärmar.

### 3.2.3 Analys

För att jämföra sprickvidderna för lågt respektive högt inläckage så gjordes först en statistisk analys av endast den teoretiska sprickan för båda fallen. Metoden var med låddiagram vilket beskriver spridning för en dataserie. Från sprickvidderna beräknades:

Tabell 4: En förklaring för att kunna tolka tabell 6 och dess parametervärde.

Utdata	Beteckning	Betydelse
Minsta värdet	min	minsta värdet i båda dataserierna.
Första kvartilen	Q1	värdet underskrivs av 25% av dataserien . för respektive observation
Median	-	statistiskt värde som representerar mitten av en sorterad dataserie.
Tredje kvartilen	Q3	värdet överskrivs av högst 25% av dataserien för respektive observation.
Maximala värdet	max	är det största värdet i båda dataserierna.
Intervall	-	max-min.
Medelvärde	-	genomsnittliga värdet av hela dataserien.
Geometriskt medelvärde	-	viktat medelvärde av dataserien som tar hänsyn till hur alla observationer varierar.

Se resultatdelen för de olika värdena i tabell 6 samt tillhörande figur 10.

Eftersom MrCalc beräknar den teoretiska sprickvidden  $b$  baklänges utifrån loggat tryck och flöde men korrelerbart till den totala volymen injekterat bruk, är en del av analysen en graf där bruksvolymen har sorterats i storleksordning. Därefter har kurvan med sorterad volym plottats tillsammans med respektive beräknade teoretisk sprickvidd för att kunna se hur dessa egentligen förhåller sig till varandra se figur 13 och figur 14.

## 4 Resultat

För att se variationen på inläckaget från tunnelfroterna till mätdammarna, så visar tabell 5 nedan en sortering av det normerade inläckaget. Mätdammarna är positionerade mellan start och slut. Mätsträckan är beräknad enligt ekv.(10) och det normerade inläckaget är beräknad med ekv.(11). Det normerade inläckaget har sitt lägsta värde vid  $2,20Lmin^{-1}100m^{-1}$  och samtidigt är det högsta normerade inläckaget på  $21,0Lmin^{-1}100m^{-1}$ . Mellan varje startposition och slutposition finns det flera injekteringsskärmar där varje skärm består av en serie borrhål. En sådan skärm kan återses i figur 8, kapitel 2. Varje skärm, sektion och antal borrhål per skärm och omgång finns samlat i bilaga 3, tabell 7 och tabell 8. Brytpunkten för när det normerade inläckaget går från lågt inläckage till högt inläckage sker enligt tabell 5 där det normerade inläckaget går från  $7,10Lmin^{-1}100m^{-1}$  till  $12,00Lmin^{-1}100m^{-1}$ .

Tabell 5: Sammanställning av alla 15 mätdammar med beräknad normerat inläckage samt klassificering för högt eller lågt inläckage. Linjen i mitten av tabellen markerar endast gränsen mellan lågt inläckage och högt inläckage.

Mätdamm	Start-position	Slut-position	Mätsträcka [m]	Normerat inläckage [ $Lmin^{-1}100m^{-1}$ ]	Tolkning av inläckage
md-401-12	123362	123488	126	2,20	Lågt
md-401-15	124000	124300	300	2,60	Lågt
md-401-07	122239	122585	346	2,90	Lågt
md-412-03	0641	0915	274	3,20	Lågt
md-402-15	224000	224300	300	4,20	Lågt
md-402-07	222236	222585	349	5,60	Lågt
md-401-09	122821	122993	172	5,70	Lågt
md-412-02	0404	0641	237	7,10	Lågt
md-401-10	122993	123180	187	12,00	Högt
md-401-11	123180	123362	182	12,80	Högt
md-411-04	0408	0706	298	13,00	Högt
md-401-08	122585	122821	236	13,70	Högt
md-402-12	223380	223493	113	14,90	Högt
md-401-13	123488	123664	176	16,20	Högt
md-414-02	0425	0679	254	21,10	Högt

Från de beräknade skärmarna och sammanställning av alla injekteringsomgångar som hittas i bilaga 3, tabell 7 och tabell 8, behövde data sorteras efter de sista omgången. Denna sortering genomfördes manuellt för båda kategorierna, högt inläckage och lågt inläckage. Den sista versionen av dataserien visas i den färgkodade tabellen i bilaga 4, tabell 9. Det är från denna tabell som en statistisk analys genomförts för att ta fram parametrar och värden i tabell 6 nedan. Parametrarna för både högt inläckage och lågt inläckage presenteras tillsammans i samma tabell för att kunna se hur de skiljer sig åt.

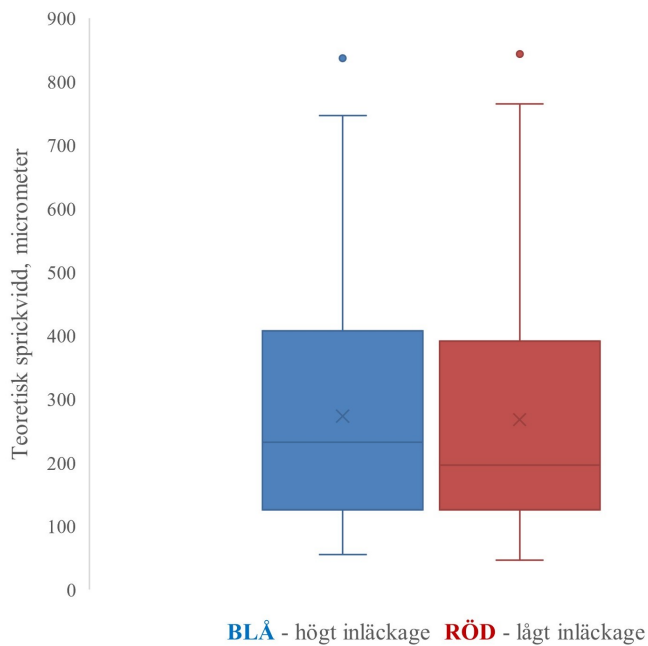
Tabell 6: Olika parametrar från dataserie för den teoretiska sprickvidden  $b$  är sammanställd i denna tabell. För att se hela mätserien, se bilaga 4, tabell 9.

Värde	Högt $b [\mu m]$	Lågt $b [\mu m]$
Min	53	46
Q1	126	126
Median	232	196
Q3	408	391
Max	837	843
Intervall	782	797
Medelvärde	273	268
Geometriskt medelvärde	222	207

För att kunna tolka siffrorna i tabell 6 så finns förklaring för alla parametrar tidigare i tabell 4. Dataserien för högt inläckage och lågt inläckage från bilaga 4, tabell 9, och parametrarna som beräknats i tabell 6 presenteras i två låddiagram i figur 10. Detta valdes för att kunna se spridningen av teoretiska sprickvidder för respektive kategori, högt inläckage och lågt inläckage.

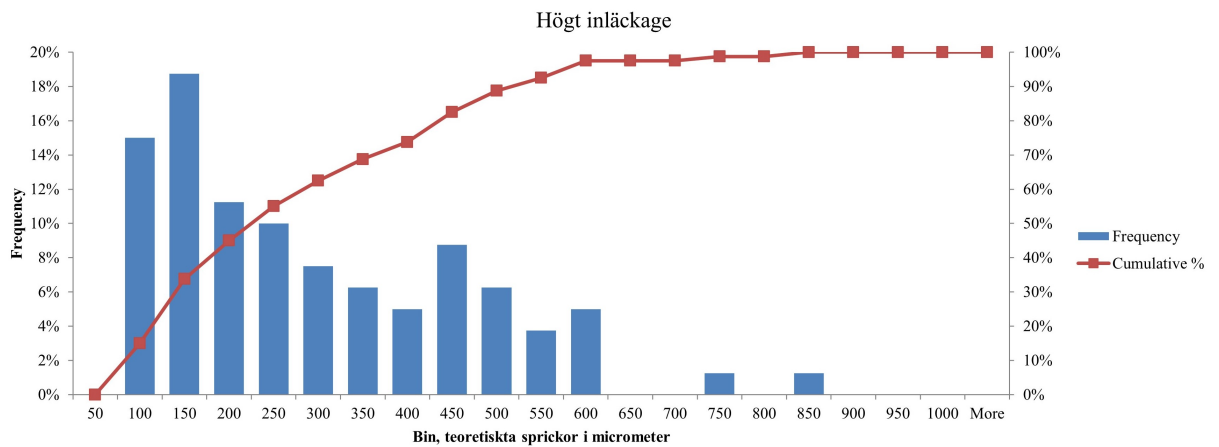


I låddiagrammet som figur 10 visar kan spridningen tolkas med hjälp av de beräknade kvartilerna från tabell 6. Teoretiska sprickvidder för höft inläckage presenteras av det blå låddiagrammet och teoretiska sprickvidder för lågt inläckage presenteras av den röda. Sprickvidderna sprider sig kring samma storleksordning och visar på väldigt små skillnader. Måttet på y-axeln är sorterade sprickvidder i storleksordning. En viktig sak att notera är att antalet observationer skiljer serierna åt. Båda serierna har en vardera punkt utanför vilket är ett extremvärde. Extremvärde i låddiagram tolkas som en observation som inte ligger innanför 1.5 kvartilavstånd från den övre kvartilen, Q1.

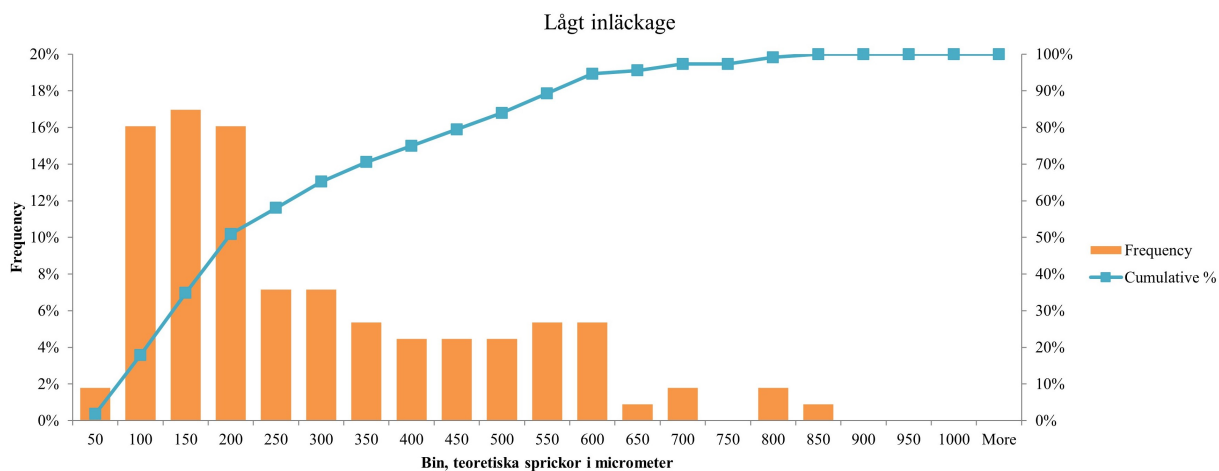


Figur 10: Två kategorier för mätserierna representerade i låddiagram. Denna visar spridningen i teoretisk beräknade sprickvidder för respektive kategori given i  $\mu m$ . Den blå visar  $b$  för högt inläckage. Den röda visar  $b$  för lågt inläckage. Denna baseras på tabell 6 samt bilaga 4, tabell 9.

Låddiagrammet i figur 10 visar en översiktlig spridning för de olika kategorierna. Något som inte går att se i respektive låddiagram är hur pass många beräknade sprickor som tillhör en viss sprickvidd. För att hantera detta så användes datan för dessa sprickvidder till att göra två histogram, ett för respektive kategori. Detta visade sig bli en ännu tydligare och mer detaljerad tolkning av figur 10. Varje kategori delades in i så kallade *bins* för olika teoretiska sprickvidder. Detta för att kunna få ett tydligare resultat för vilken storlek av sprickvidder som uppstår mest.Handledare för examensarbetet, Fredrik Osterman var till stor hjälp för att ta fram histogrammen i figur 11 och figur 12.



Figur 11: Histogrammet visar kategorin högt inläckade. I figuren är uppdelningen (bins) av sprickvidder längs x-axeln efter intervallet  $50\mu m$ . De flesta sprickor antar storleken mellan  $100 - 600\mu m$ . De blå staplarna står för frekvensen. Denna frekvens berättar hur många procent av alla sprickvidder som antar just denna storlek på sprickvidd, alltså tillhörande bin. I histogrammet avläses den största andelen sprickor som motsvarar 18% anta en sprickvidd på  $150\mu m$ , se den högsta stapeln. Den röda kummulativa grafen visar hur sprickvidderna är viktade. Från den högra vertikala axeln tolkas att cirka 50% av alla sprickvidder har antar storleken  $250\mu m$  eller mindre.



Figur 12: Histogrammet visar kategorin lågt inläckage. I denna kategori är 17% av sprickviddernas storlek på  $150\mu m$ , se x-axeln. Den högsta stapeln omringas av två närliggande sprickvidder, 16% antar storleken  $100\mu m$  och lika stor andel antar  $200\mu m$ . Dessa tre bins för sprickvidderna dominerar för lågt inläckage. Den kumulativa kurvan i denna figur visar att 50% av alla sprickvidder i kategori lågt inläckage antar storleken  $200\mu m$  eller mindre, enligt den högra, vertikala axeln.

Från figur 11 och figur 12 avlästes följande:

- Högt inläckage: 50% av alla 80  $b \geq 250\mu m$ .
- Lågt inläckage: 50% av alla 113  $b \geq 200\mu m$ .

Här är  $b$  den teoretiskt beräknade sprickvidden. För att ta reda på om det finns en signifikant skillnad mellan sprickvidderna för högt inläckage och lågt inläckage så görs ett *T-test*. För att underlätta beräkningen används *Excel* och programmets inbyggda funktioner. Beräkningen och teorin baseras på Lindgren (1976) som skrivit om testet samt antaganden för att genomföra testet. De två kategorierna är oberoende av varandra. T-testet behöver veta om variansen för kategorierna är lika eller skiljer sig åt. För att beräkna variansen beräknas först standardavvikelsen för respektive kategori. Standardavvikelsen ges av ekv.(12) (Lindgren 1976).

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (b_i - \mu)^2} \quad (12)$$

$\sigma$	standardavvikelsen	$\mu m$
$N$	antalet mätpunkter	$[-]$
$b_i$	teoretisk sprickvidd	$\mu m$
$\mu$	medelvärde av $b$	$\mu m$

Variansen som beräknas av standardavvikelsen är ett mått på hur sprickvidderna varierar kring medelvärdet. Detta uttrycks som  $V(b)$  vilket betyder i för detta fall *variansen för teoretiska sprickvidder  $b$*  enligt:

$$V(b) = \sigma^2 \quad (13)$$

Beräkningen för respektive kategori gav följande utfall:

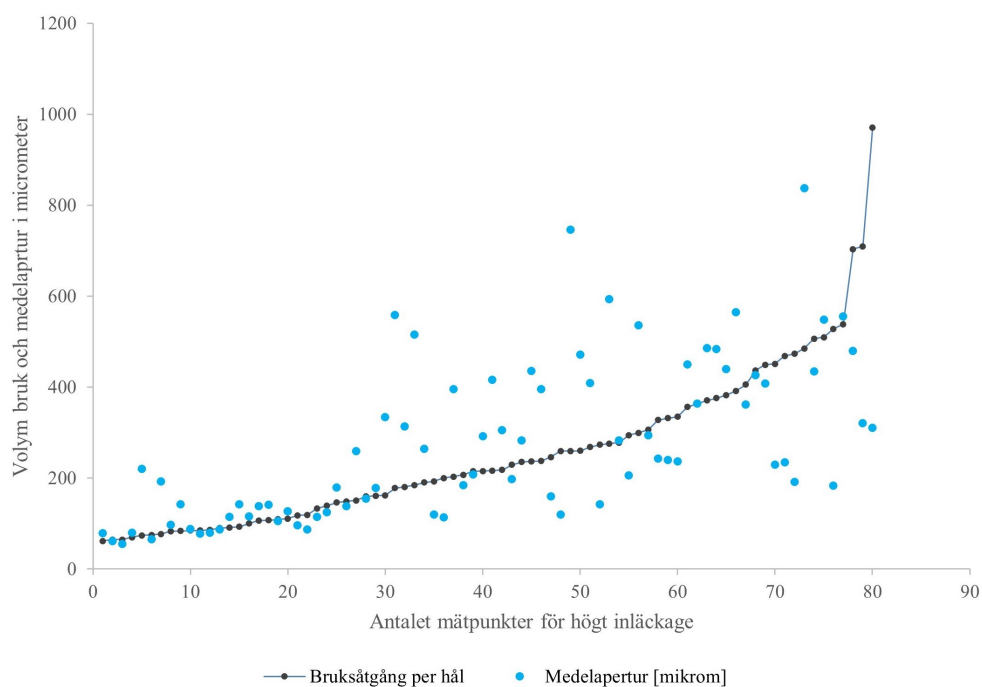
- Högt inläckage:  $\sigma_H \approx 174\mu m$
- Lågt inläckage:  $\sigma_L \approx 189\mu m$

vilket betyder att även att variansen för respektive kategori inte är lika med varandra,  $\sigma_H^2 \neq \sigma_L^2$ , se ekv.(13). Notera att denna kontroll är endast för att ställa in rätt parametrar i excel för beräkningen av T-test då det finns flera varianter. Testet har följande antaganden:

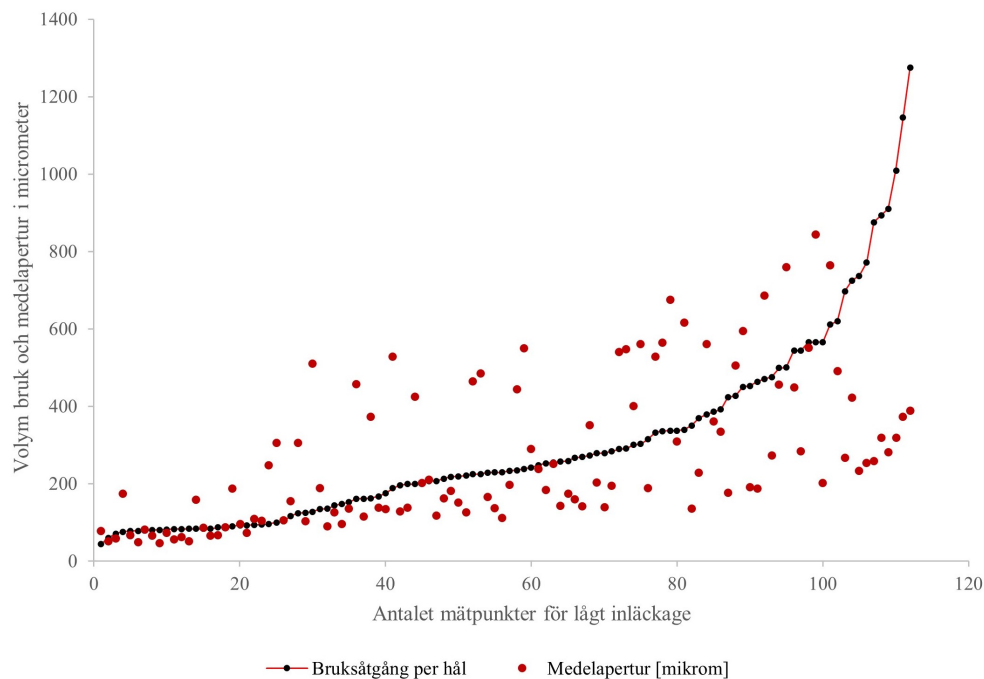
- All data är normalfördelad.
- Eneklidigt T-test.
- Hypotesen  $H : b_H > b_L$ .
- Nollhypotesen  $H_0$  : det finns ingen skillnad.
- Kategorierna är oberoende av varandra.
- Medelvärdena för kategorierna är oberoende av varandra.
- Variansen är olika för respektive kategori.
- Konfidensintervallet är 95%.
- Signifikansnivån är  $p = 0,05$ .

Om T-testet visar ett värde lägre än signifikansnivån då finns det en signifikant skillnad mellan de teoretisk beräknade sprickvidderna för respektive kategori, högt inläckage och lågt inläckage. Resultatet av T-testet gav ett  $p = 0,42$  vilket betyder att det inte går att förkasta nollhypotesen och därför finns det ingen signifikant skillnad mellan kategorierna.

Varje teoretiskt beräknad spricka har en motsvarande volym bruk per borrhål. I graferna som visas i figur 13 och figur 14 så har dataserien för alla injekterade hål sorterats i storleksordning. Detta visas som *bruksåtgång per hål* från lägsta volymen till den största. De teoretiska sprickvidderna har automatiskt sorterats med avseende på respektive sorterade bruksvolym. På x-axeln är det antal hål som visas, varje bruksåtgång har en egen teoretiskt beräknad spricka. Både volym bruk och teoretiskt beräknade spricka har samma enhet och visas på y-axeln vilket är i *micrometer* precis som låddiagrammet i figur 10. Medelapertur som nämns i båda figurerna 13 och figur 14 motsvarar de teoretiskt beräknade sprickvidderna vilka beräknas i MrCalc enligt metod.



Figur 13: Observationerna visar sorterad volym bruk dess respektive teoretiskt beräkande sprickvidd  $b$  för högt inläckage. Eftersom volym bruk och sprickvidd har samma enhet så presenterar y-axeln micrometer volym och teoretisk sprickvid. Det som presenteras på x-axeln är antalet observationer.



Figur 14: Observationerna visar sorterad volym bruk dess respektive teoretiskt beräknade sprickvidd  $b$  för lågt inläckage. Eftersom volym bruk och sprickvidd har samma enhet så presenterar y-axeln micrometer volym och teoretisk sprickvidd. Det som presenteras på x-axeln är antalet observationer.

Både figur 13 och figur 14 visar att det finns en spridning för teoretiska sprickvidder som avviker från volym bruk. Det kan också avläsas i figur 14 att bruksåtgången per hål har tätare observationer vilket förklaras med att det är fler punkter i dataserien. Återigen så är det teoretiskt beräknade sprickvidder och inte verkliga. De baseras främst på volym bruk och reologin i bergmassan. Det är viktigt att ha detta i åtanke vid tolkning av graferna då sprickvidderna ger en fingervisning på spridningen.

## 5 Diskussion

### 5.1 Sammanfattningsvis

Det är en utmanande uppgift att bedöma bergmassans egenskaper framför stuff eftersom bergmassan till stor del är helt okänd. Det är inte förrän vid sprängning resultatet visar sig och då kan det vara försent för att vissa problem inte ska uppstå. För att kunna bilda en teoretisk uppfattning om bergmassan så prognostiseras sprickbidning som förväntas genom hydrogeologiska - samt geotekniska undersökningar. Problemformuleringen för examensarbetet har handlat om utmaningen gällande inläckage av grundvatten under tunneldrivning. Data från flera mätdammars inflöde av grundvatten har undersökts. Mätdammarna kategoriserades i högt respektive lågt inläckage av vatten. Syftet till examensarbetet var att utvärdera om metoden för att ta fram en teoretisk spricka kan vara ett underlag för att koppla teoretiska sprickvidder i bergmassor med högt inläckage respektive lågt inläckage. Det behövdes en utredning för om det finns någon korrelation mellan inläckage och teoretiska sprickor som påträffas vid injektering. Därför delades kategorierna in i högt - respektive lågt inläckage.

### 5.2 Osäkerheter

Genom arbetet har det uppstått fler osäkerheter som är viktiga att känna till.

- Kategorierna som resultatet baseras på, högt inläckage och lågt inläckage, baseras inte på någon tidigare studie utan bestämdes baserat på erfarenhet och godtycklig data från den specifika entreprenaden som examensarbetet behandlar. Osäkerheten här blir frågan om vad som innebär ett högt respektive lågt inläckage? Kan vi kvantitativt bestämma det? Ett högt inläckage i stockholmsområdet kanske inte betyder ett högt inläckage i något annat område på grund av geologi och geografi.
- Vid normalisering av flödena så förändrades vissa mätdammars inläckage väldigt mycket. Det kunde handla om en mätdamm som haft väldigt höga flöden på en förhållandevis kort sträcka och därmed kategoriserades som högt inläckage. Efter normaliseringen per 100 meter tunnel så ändrades siffran för inläckaget drastiskt och bytte kategori till lågt inläckage istället. Osäkerheten här blir att den verkliga uppfattningen av mätdammens inflöde av grundvatten tycks vara stor på plats och i den här utvärderingen minskar siffran drastiskt.



- Det låga inläckaget har mer data i sin mätserie vilket kan ge utslaget att medelvärdet är betydligt mycket närmare varandra i storlek, se tabell 6.
- Beräkningen som MrCalc gör sker automatiserat. Det finns både fördelar och nackdelar med detta och diskuteras i en senare del. Osäkerheten blir att programmet antar värden som gör att den teoretiskt beräknade sprickvidden får samma fel baserat på att bruksvolymen är mindre än den teoretiska hålvolymer.

### 5.3 Vad säger resultatet

Ett översiktligt resultat för de teoretiskt beräknade sprickvidderna ses i figur 10. Båda mätserierna visade en variation i samma storleksordning. Vid analys av de uträknade parametrarna i tabell 6 ses att medelvärdet av sprickvidderna för det låga inläckaget beräknades till  $268[\mu m]$  vilket är lägre än för det höga inläckaget på  $273[\mu m]$ . Skillnaden är väldigt liten. Samtidigt så visar kolumnen med lågt inläckage även ett större maximalt värde för teoretisk spricka både inom tredje kvartilen och punkten som ligger utanför beräknade mätserien. En annan märkbar notering är att medianen för det låga inläckaget är lägre än det högre inläckaget.

- För högt inläckage  $\rightarrow$  median  $\approx 232,0[\mu m]$
- För lågt inläckage  $\rightarrow$  median  $\approx 196,0[\mu m]$

Detta är ett resultat som är i linje med ställda hypotes om att större teoretiska sprickvidder korrelerar med högt inläckage och mindre teoretiska sprickvidder korrelerar med lågt inläckage. Det geometriska medelvärdet visar sig också följa trenden med att vara lägre för det låga inläckaget jämfört med det högre för det höga inläckaget. Det aritmetiska medelvärdet följer också trenden vilket hypotesen visar sig stämma men med små marginaler. Eftersom figur 10 inte berättar vilka sprickvidder som dominerar så gjordes även histogram för respektive kategori, se figur 11 och figur 12. Dessa visade en mycket tydligare tolkning. Enligt histogrammen visade den kummulativa kurvan att det inte fanns en grafisk skillnad för 50% av sprickvidderna. Däremot visar den visuella tolkningen en väldigt liten skillnad vilket betyder att osäkerheter kring att dela upp egna bins för respektive kategori behöver inte ge en sann bild.

### 5.3.1 Statistisk tolkning

T-testet visade att det inte fanns en signifikant skillnad mellan kategorierna och nollhypotesen kunde inte förkastas. Detta betyder att högt inläckage inte antar större sprickvidder enligt statistiken jämfört med lågt inläckage. Dataserierna ligger väldigt nära varandra i figur 10 och det tillsammans med T-testet säger att de enbart är stokastiskt fördelade oberoende av kategoriseringen.

### 5.3.2 Beräknad medelapertur

För att kunna resonera kring hur pass nära verkligheten den teoretiska sprickan (medelapertur) är så plottades två grafer för högt respektive lågt inläckage, se figur 13 och figur 14. Båda graferna visar att den teoretiska medelaperturen har stor spridning för den volym bruk som fylls. För båda graferna så är molnet av medelapertur inte lika spridd för minsta sprickvidder. Grafiskt är det möjligt att tolka att fram till  $\approx 200[\mu m]$  följer den teoretiska sprickan godtyckligt den injekterade volymen. Varför det visar sig vara så kan bero på hur injekteringen i praktiken funkar relativt sprickor  $b < 200[\mu m]$ . Det finns också en osäkerhet som förklarar detta och det handlar om förenklingen som MrCalc gör för bruksvolymen mindre än den teoretiska halvvolymen. Varför detta sker beror på att programmet, som tidigare nämnt, beräknar stora mängder data automatiskt.

## 5.4 Fördelar och Nackdelar

### 5.4.1 Fördelar

Fördelen med att kunna beräkna en teoretisk spricka med avseende på volym injektering är att det ger en teoretisk uppfattning om hur sprickigheten i berget skulle kunna vara. Denna teori ger möjlighet att beräkna väldigt små sprickor vilket är till fördel då dessa är svåra att se själv med ögat. Att använda en automatiserad beräkningsmetod ger oss möjligheten att hantera stora mängder data. De fel som uppstår i automatiserad beräkning ger samma utfall överallt, det vill säga, att om samma fel sker över hela dataserien så kan resultatet ändå tolkas eftersom båda kategorierna i detta fall antar *lika mycket* fel.

### 5.4.2 Nackdelar

Nackdelen med denna metod är att resultatet inte visade på någon signifikant skillnad mellan kategorierna högt inläckage och lågt inläckage. Det fanns heller ingen

tidigare liknande studie för beräkning av teoretiska sprickvidder vilket också blir en osäkerhet då metoden inte blir vetenskapligt jämförbar. Det är även svårt att särskilja inläckage av grundvattnet i mätdammen från det vatten som används under arbetet för exempelvis borrhålen.

## 5.5 Referensprojekt

Att ta hänsyn till inläckaget och anpassa injekteringskonceptet längs tunneln under drivning har blivit det moderna tillvägagångssättet. Injektering är en konventionell lösning på tätning - speciellt med cementbruk. Inom branschen idag blir injektering ett sorgebarn. Den största utmaningen är att så tidigt som möjligt i projekt koppla hydrogeologin till bergtekniken. Motivering är att bergteknik designar väldigt ingenjörsmässigt för ett problem som behöver en geologisk förståelse med insikt i den stora naturliga variabilitet som finns inom geologi och hydrogeologi.

För denna studie beräknades den teoretiska sprickvidden baserat på volym bruk för olika skärmar. Syftet var att se om större inläckage korrelerade med stora teoretiska sprickor och tvärt om - men så visade inte fallet. I en liknande analys *Nyttan av vattenförlustmätningar vid tätning av tunnlar* (Engström, Persson & Gustafson 2009) bestämdes spricksystemet i berget av numerisk modellering. I studien fanns två principiella sätt att bygga bergmodellen på; en kontinuummodell eller en diskret sprickmodell. Kontinuummodellen möjliggjorde en viss skala bergvolym som ett representativt volymselement (REV). Upp till REV antogs berget vara homogent. Skalan tillämpas speciellt för modellering där bergsvolymen betraktas som ett ekvivalent kontinuum. I studien innebar ekvivalent kontinuum att bergmassan delades in i ett regelbundet raster där varje cell antog samma värde på olika hydrauliska egenskaper. Modellen beskrev flödet in och ut ur en cell baserat på beräkning av grundvattennivåer vilket tar hänsyn till bland annat grundvattentrycket. Detta hade varit en ytterligare aspekt att ta hänsyn till vid de utvalda mätdammarna då komplexiteten i varför vi får ett högt respektive lågt inläckage även påverkas av hydrologin. I referensstudien beräknades den effektiva transmissiviteten från flödet genom cellen och den bergvolym som omkring injekteringsskärmen. Varför detta blir intressant är för att grundvattennivån är den parametern som påverkar utfallet i modellen. Det betyder att spricksystemet i berget för en längre sträcka med flertalet cellen inte påverkar flödet in och ut - utan istället bergvolymen. Det medför att vi kan ha samma injekteringsskärm med lika många borrhål förbestämt i modellen och därmed blir inläckaget baserat på den effektiva transmissiviteten samt en effektiv konduktivitet som är lika i alla punkter och riktningar. I min stu-

die så finns en stor variation i injekteringsskärmar, omgångar samt antalet borrhål. Ju fler borrhål vi har i en skärm desto större sannolikheten till att träffa på en vattenförande spricka - vilket bidrar till ett högre uppmätt inläckage i en mätdamm. För en längre tunneldel som visat på sämre berg och därmed ett relativt högre inläckage skulle modellering av bergvolymen kunna ge ett övergripande resultat för mängden vatten som kan tänkas passera - vilket i sin tur ger en fingervisning på hur man kan tackla deformationszoner. Observera att det blir en väldigt grov uppskattning av inläckage. Med det sagt, det ena sättet utesluter inte det andra. Om alla mätdammar i min serie skulle vara från samma del av tunneln skulle man kunna implementera modellering för de båda kategorierna genom att använda data på grundvattennivåer samt ett medelvärde på antal borrhål per injekteringsskärm som projekteringen bestämt. Det skulle i så fall ge ett resultat på två effektiva konduktiviteter- ett högt värde och ett lägre värde - vilket i sin tur lägger grunden till på vilket sätt vi lättare kan utvärdera en möjlig vattendom för tunnelprojekt i branschen.

## **5.6 Framtida arbete och rekommendationer**

Om en liknande studie hade gjorts efter denna så hade det varit bra att undersöka eventuellt en annan entreprenad för att se om det ger samma resultat eller om förhållandena i bergmassan skiljer sig åt. Något som även hade varit intressant att se är om man hade lyckats göra en manuell beräkning för MrCalc för varje enskilt borrhål. Detta hade förmodligen givit ett noggrannare utfall i resultatet och hade visat en bättre korrelation i figur 13 och figur 14. Nackdelen med manuell beräkning är att det skulle ta längre tid och hanteringen av data skulle bli subjektiv. För att sedan kunna göra en statistisk bedömning skulle det även krävas att flera genomförde en manuell beräkning för att kunna ta fram ett rättvist medelvärde. Just för denna studie så visade resultatet på att det inte fanns en signifikant skillnad mellan kategorierna. Därför hade det även varit intressant att utvärdera andra möjliga parametrar för vad det höga inläckaget beror av. Det skulle kunna vara platsspecifikt, förekomst av uppspruckna bergarter, bergets mäktighet eller kanske befintliga grundvattenmagasin. Beräkningssättet anses behöva testas på andra datamängder med andra geologiska förhållanden. Metoden har utvecklingspotential och bör fortsätta testas och utvärderas.

## 6 Slutsats

Den beräknade teoretiska sprickvidden  $b$  går inte helt att använda som beslutsunderlag för att säkerställa erforderlig tätning för en given injekteringsskärm. Men som vi såg går det inte heller att utesluta för mindre sprickvidder där sprickvidden korrelerade grafiskt och godtyckligt med bruksåtgången. Det är inte nära någon sanning men det skulle vara intressant att undersöka om de punkter som uppnår en högre korrelation endast har fått injektering omgång 1. Det kunde ses en trend för en viss del av statistiken gällande inläckage av vatten ihopkopplat med sprickvidden. Däremot skulle det behövas mer data samt ytterligare kategorisering. Det skulle vara intressant att ta med klassificeringen av berget. Det statistiska t-testet visade att det inte fanns någon signifikant skillnad mellan kategorierna. Det fanns ändå en grafisk skillnad mellan kategorierna vilket betyder att vi inte kan utesluta resultatet helt. Det skulle vara intressant att se hur resultatet skulle bli från andra entreprenader och att man i så fall delar in till minst tre kategorier av teoretiskt beräknade sprickvidder. Jag skulle säga att metoden fortfarande är i en tidig fas för att kunna utvärdera tätning för all typer av bergmassor men att relativt mindre sprickiga sektioner skulle snart kunna använda en teoretisk trend för sprickor.

## Referenser

- [1] Andersson, S. (2014). *Deformation, Metamorphism and Remobilisation in the Hornkullen Polymetallic Deposit, Western Bergslagen, Sweden*. Institutionen för geovetenskaper, Uppsala Universitet.
- [2] Axelsson, K och Mattson, H. (2016). *Geoteknik*. Studentlitteratur AB.
- [3] Betonghandboken. (1997). *Betonghandboken - Material*. Svensk Byggtjänst.
- [4] Burefalk Strauss, M. Roško, S. (2016). *Fastställande av lineamentens karaktär med avseende på bergkvalitet enligt  $Q_{bas}$  och  $RMR_{bas}$  inför tunnelkonstruktion i Solna, Stockholm samt kvalitetsutvärdering av Astrock hyperdata report*. Institutionen för geovetenskaper, Uppsala Universitet.
- [5] Cementa AB (u.å). *De första viktiga timmarna*. Danderyd [2020-09-14].
- [6] Dominico, P. A. och Schwartz, F. W. (1998). *Physical and Chemical Hydrogeology*. 2:a upplagan, New York: John Wiley & Sons.
- [7] Engström, A., Persson, K. och Gustafson, G. (2009). *Nyttan av vatenförlustmätningar vid tätning av tunnlar. BeFo Rapport 91*. Tekn. rapport. Stockholm.
- [8] Fagerlund, G. (1992). *Betongkonstruktioners beständighet: en översikt (3:e uppl.)* Cementa.
- [9] Fetter, C.W. (1988). *Applied Hydrology*. Ohio: Merrill Publishing Co.
- [10] Gustafson, G. (2009). *Hydrogeologi för bergbyggare*. Stockholm, Forskningsrådet Formas.
- [11] Gustafson, G. (2012). *Hydrology for Rock Engineers*. Värnamo, Forskningsrådet Formas.
- [12] Holmkvist, A. (2016). *Inverkan av torktemperatur vid vattenmätning av bruk och betong*. Institutionen för Teknikvetenskaper, Tillämpad mekanik, Byggteknik, Uppsala Universitet.
- [13] Håkansson, U. (1994). *Injekteringsmedels strömningsegenskaper*. (rapport nr: 15). Stockholm, SveBoFo.

- [14] Häglund, J. (2013). *Samverkan mellan nya cementtyper och tillsatsmedel för betongtillverkning*. Institutionen för Teknikvetenskaper, Byggt teknik, Uppsala Universitet.
- [15] Hässler, L. (1991). *Grouting of Rock-Simulation and Classification*. Stockholm: KTH.
- [16] NE (u.å.). *Transmissivitet*. <https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/l%C3%A5ng/transmissivitet> [2020-09-21].
- [17] Ignea, S. (2015). *Major Fracture Zones in Fiskarfjärden, Stockholm*. Institutionen för geovetenskaper, Uppsala Universitet.
- [18] Lindgren, B. W. (1976). *Statistical Theories (3:e uppl.)* New York: MacMillan Publishing Company.
- [19] Osterman, F. (2020a). *Injekteringsarbeten i Förbifarten i Stockholm*. Presentation, Golder.
- [20] Osterman, F. (2020b). *Injekteringsteorier*. Presentation, Golder.
- [21] Osterman, F (2020c). *MrGrout*. Dataprogram för att förfina loggdata, Golder, Stockholm.
- [22] Osterman, F (2020d). *MrCalc*. Beräkningsverktyg för beräkning av bl. a. teoretiska sprickvidder, Golder Stockholm.
- [23] Osterman, F. och Creutz, M. (2019). *The Stockholm Bypass - Design and execution of grouting works*. Geomechanics and tunneling 12. No.2. DOI: 10.1002/geot.201800070 [2020-09-07].
- [24] Palmström, A. och Stille, H. (2015). *Rock Engineering (2:a uppl.)* London: Ice Publishing.
- [25] Ragvald, J. (2012). *Ett gruvschakts påverkan på grundvattnets nivå och strömning i det omgivande berget*. Examensarbete i miljö-och vattenteknik ISSN 1401-5765. Institutionen för geovetenskaper, Uppsala Universitet.
- [26] Stille, H. (2015). *Rock Grouting - Theories and Applications*. Vulkan Förlag.
- [27] Strähle, A. (2001). *Definition och beskrivning av parametrar för geologisk, geofysisk och bergmekanisk kartering av berg*. ISSN 1402-3091, Geosigma, Stockholm.

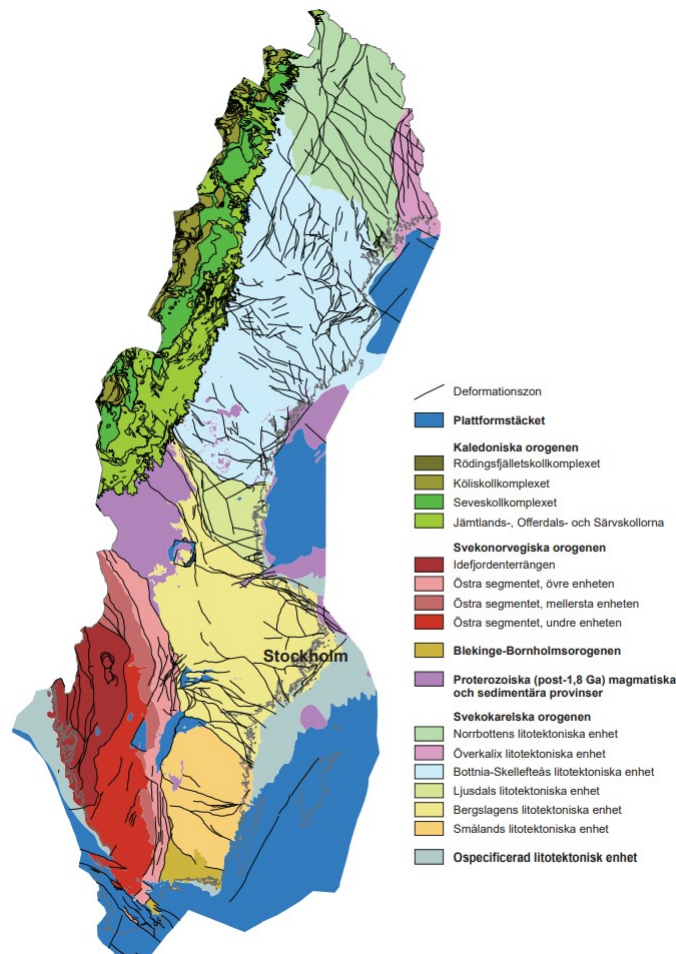
- [28] Sundberg, J. (1991). *SGI- Termiska egenskaper i jord och berg*. (rapport nr: 12). Linköping: Statens Geotekniska institut.
- [29] Trafikverket (2019). *Om E4 Förbifart Stockholm-projektet*. <https://www.trafikverket.se/nara-dig/Stockholm/vi-bygger-och-forbattrar/Forbifart-stockholm/Om-projektet/>. [2020-09-07].
- [30] Trafikverket (2018). *Bakgrund E4 Förbifart Stockholm*. <https://www.trafikverket.se/nara-dig/Stockholm/vi-bygger-och-forbattrar/Forbifart-stockholm/Om-projektet/Bakgrund/> [2021-03-06].
- [31] Wahlgren, C-H. Schoning, K. Tenne, M. Maersk Hansen, L. (2018). *Stockholmsområdets berggrund, jordarter, geologiska utveckling och erfarenheter från infrastrukturprojekt*. Uppsala: SGU - Sveriges geologiska undersökning.
- [32] Wik, N-G. Stephens, M B. Sundberg, A. (2004). *Malmer, industriella mineral och bergarter i Stockholms län*. [Rapporter och meddelanden nr. 117] Uppsala: SGU.
- [33] AFRY, Stille B.(Aecom) (2021). *E4 Förbifart Stockholm - Bilaga 3, Injektionstekniska åtgärder i Tunnel Norr* Trafikverket Solna.



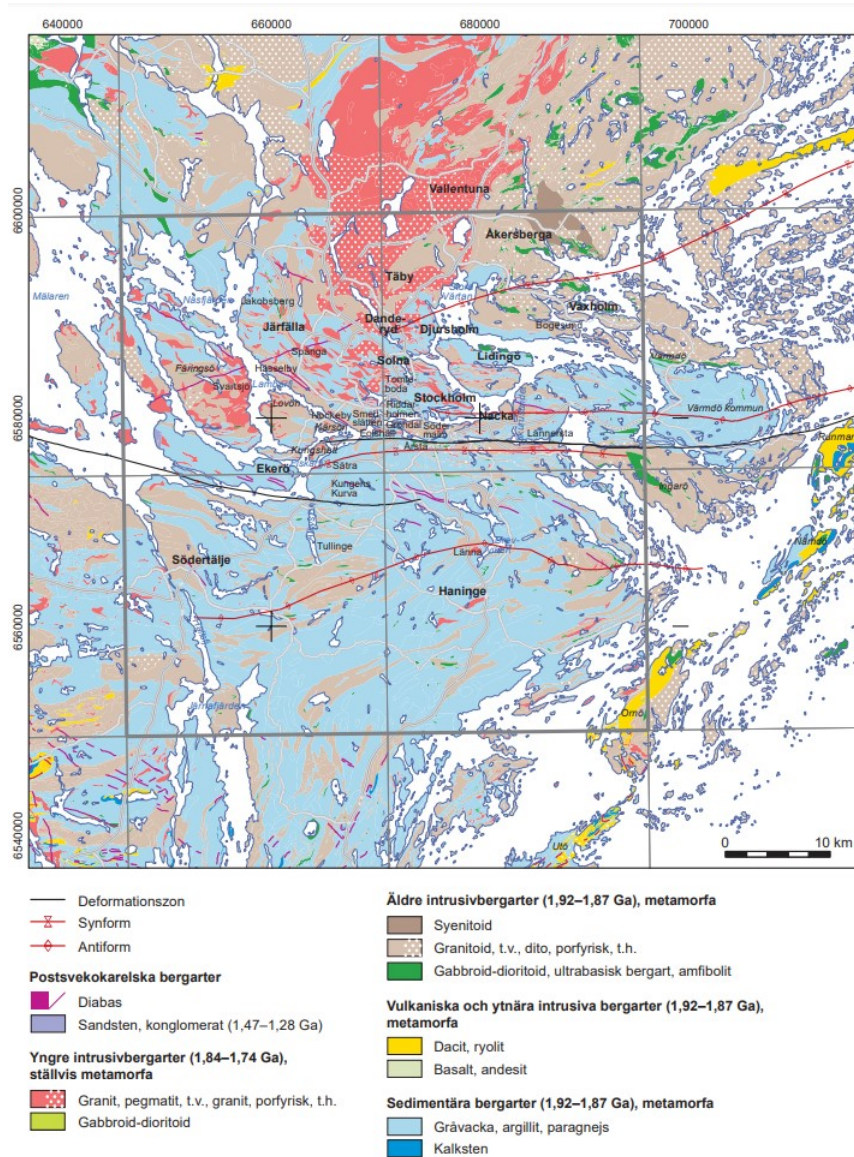
## **7 Bilagor**

### **7.1 Bilaga 1**

I denna bilaga visas figur 15 med hela Sveriges indelning av berggrund efter enheter. Här visas även figur 16 med Stockholms berggrund.



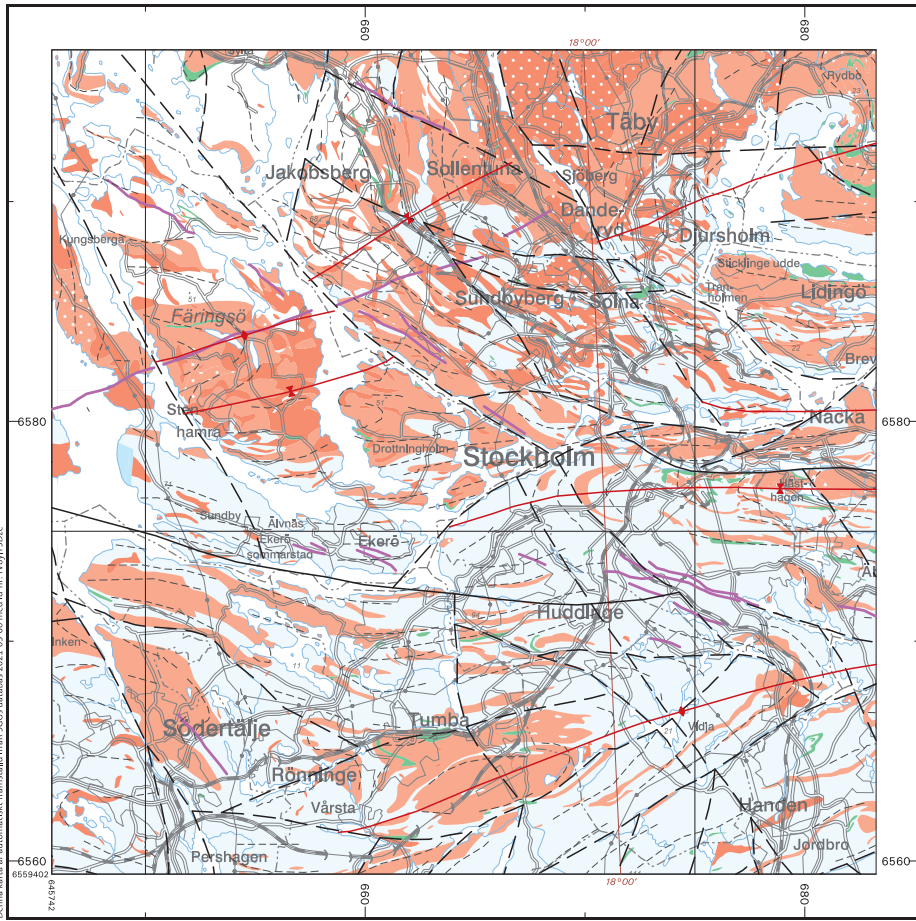
Figur 15: Hela Sveriges indelning efter berggrundens ursprung. De olika färgerna beskriver de olika litotekniska enheter efter kronologisk ursprung. Det området som är av intresse för examensarbetet är enheten för Stockholmsområdet vilket avläses som *Bergslagens litotekniska enhet*, den ljusgula delen. Kartan visar att denna enhet dominerar hela östra mellan-Sverige och tar sig in till centrala Sverige. Längst Stockholmsområdets yttre skärgård ses att deformationszonerna, de svarta linjerna uppkommer mer frekvent (Wahlgren et al. 2018). Detta är speciellt intressant ur ett geotekniskt perspektiv då berggrundens deformationsegenskaper och sprickbildning på denna plats är viktiga parametrar att känna till för examensarbetet.



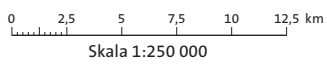
Figur 16: Kartan är över Stockholmsområdets berggrund. Det som dominerar är sedimentära bergarter vilka är metamorfa, den ljusblå färgen. Det uppkommer också yngre metamorfa bergarter som granit och pegmatit, det ses som det ljusröda. De äldre bergarterna enligt de ljusbruna färger är de olika granitoider (Wahlgren et. al., 2018).

## **7.2 Bilaga 2**

Genererad karta från SGU. Kartan representerar en bättre överblick av bergarter lokaliserat kring där Förbifarten kommer vara. I bilaga 1 figur 15 så visas hela stockholmsområdet. Denna genererade efter vart Förbifarten kommer bli.



© Sveriges geologiska undersökning (SGU)  
 Huvudkontor:  
 Box 670  
 751 28 Uppsala  
 Tel: 018-17 90 00  
 E-post: kundservice@sgu.se  
 www.sgu.se



Topografiskt underlag: Ur GSD-Översiktskartan  
 © Lantmäteriet. MS2009/08799  
 Rutnät i svart anger koordinater i SWEREF 99 TM.  
 Gradnätet i brunt anger latitud och longitud  
 i referenssystemet SWEREF 99.

## Berggrundskarta

1:250 000

Kartan ger en generaliserad bild av berggrundens utbredning. Observationer av bergarter och inbördes ålder har gjorts på hållar. Sammansättningen av den berggrund som är täckt av lösa jordarter har tolkats från observationer på närliggande hållar, geofysiska mätningar och, där sådana finns, från borrhälsanalyser eller grävningar.

Ytor som är för små för att visa på kartan representeras som linjer. Lägesnoggrannheten är normalt bättre än 100 m för observationer. För tolkningar, exempelvis vissa bergartsgränser, kan noggrannheten vara mycket lägre.

Ytterligare information finns lagrad i SGUs databas, exempelvis detaljerad information om mineraliseringar eller berggrundens mineralsammansättning, kemiska sammansättning, petrofysiska egenskaper eller naturligt förekommande radioaktiv strålning, och kan beställas från SGU. I de få fall ospecificerade ytor förekommer så hänvisar vi till våra tryckta kartor för mer information.

- Strukturell formlinje, plastisk deformation
- Spröd deformationszon (förkastning, spricka, sprickzon)
- Deformationszon, ospecificerad
- Synform
- Antiform
- Ultrabasisk, basisk och intermediär intrusivbergart (gabbro, diorit, diabas m.m.)

Massformiga bergarter, yngre än svekokarelska orogenesisen (1740-910 miljoner år)

Kvarts-fältpatrik sedimentär bergart (sandsten, gråvacka m.m.)

Ställvis gnejsiga bergarter i svekokarelska orogenesisen (1880-1740 miljoner år)

Sur intrusivbergart (granit, granodiorit, monzonit m.m.)

Sur intrusivbergart (granit, granodiorit, monzonit m.m.). Porfyrisk eller ögonförande

Huvudsakligen gnejsiga bergarter i svekokarelska orogenesisen (2850-1870 miljoner år)

Sur intrusivbergart (granit, granodiorit, monzonit m.m.)

Sur intrusivbergart (granit, granodiorit, monzonit m.m.). Porfyrisk eller ögonförande

Ultrabasisk, basisk och intermediär intrusivbergart (gabbro, diorit, diabas m.m.)

Kvarts-fältpatrik sedimentär bergart (sandsten, gråvacka m.m.)

## 7.3 Bilaga 3

### Tabell 7:

Hela dataserien för högt inläckage. Från vänster i tabellen finns följande information i varje kolumn:

- Entreprenad
- Anläggningsdel
- Section
- Omgång
- Datum
- Antal hål
- Total bruksåtgång
- Bruksåtgång per hål [micrometer]
- Cementtyp
- Startblandning
- Medelapertur [m]
- Medelapertur [micrometer]
- Medeltransmissivitet [m<sup>2</sup>/s]

Entreprenad	Anläggningsdel	Sektion	Omgång	Datum	Antal hål	Total bruksåtgång	Bruksåtgång per hål	Cementtyp	Startblandning	Medelaperitur [m]	Medelaperitur [mikrom]	Medeltransmissivitet [m2/s]
FSE403	J401N	122/598	Omgång 1	2018-01-20	11	5573	506.636366	Injektering 30	Blandning 2	0.000434758	434.7582706	0.000142418
FSE403	J401N	122/614	Omgång 1	2018-01-30	10	3630	363	Injektering 30	Blandning 2	0.000364183	364.1829632	4.25036E-05
FSE403	J401N	122/632	Omgång 1	2018-02-10	13	3584	275.6923077	Injektering 30	Blandning 2	0.000593253	593.2530988	0.000141535
FSE403	J401N	122/649	Omgång 1	2018-02-24	15	2668	177.8666667	Injektering 30	Blandning 2	0.00055883	558.8304518	0.00013386
FSE403	J401N	122/665	Omgång 1	2018-03-06	16	2953	184.5625	Injektering 30	Blandning 2	0.000515178	515.1782072	0.000247349
FSE403	J401N	122/683	Omgång 1	2018-03-16	15	6738	449.2	Injektering 30	Blandning 2	0.000407487	407.4867167	0.000146178
FSE403	J401N	122/689	Omgång 1	2018-03-21	14	5483	391.6428571	Injektering 30	Blandning 2	0.00056502	565.0201616	0.000189899
FSE403	J401N	122/700	Omgång 1	2018-04-04	16	13239	827.4375	Injektering 30	Blandning 2	0.000730121	730.1214679	0.000339377
FSE403	J401N	122/700	Omgång 2	2018-04-06	46	10027	217.9782609	Injektering 30	Blandning 2	0.000305029	305.029018	7.06755E-05
FSE403	J401N	122/735	Omgång 1	2018-04-26	20	4325	216.25	Injektering 30	Blandning 2	0.000415965	415.9650861	7.11397E-05
FSE403	J401N	122/750	Omgång 1	2018-05-08	13	4884	375.6923077	Injektering 30	Blandning 2	0.000483482	483.4818949	0.000248002
FSE403	J401N	122/767	Omgång 1	2018-05-22	14	7534	538.1428571	Injektering 30	Blandning 2	0.000554991	554.9906972	0.000124021
FSE403	J401N	122/785	Omgång 1	2018-06-08	39	7772	199.2820513	Injektering 30	Blandning 2	0.000388266	388.2655255	0.000101173
FSE403	J401N	122/785	Omgång 2	2018-06-11	30	6438	214.6	Injektering 30	Blandning 2	0.000207528	207.5280378	1.66125E-05
FSE403	J401N	122/802	Omgång 1	2018-06-26	39	5879	150.7435897	Injektering 30	Blandning 2	0.000259314	259.3140376	1.82723E-05
FSE403	J401N	122/819	Omgång 1	2018-07-05	15	2708	180.5333333	Injektering 30	Blandning 2	0.000313799	313.7990277	4.61053E-05
FSE403	J401N	123/007	Omgång 1	2019-01-03	41	13728	334.8292683	Injektering 30	Blandning 2	0.000237055	237.0554818	0.000104857
FSE403	J401N	123/021	Omgång 1	2012-11-30	40	11120	278	Injektering 30	Blandning 2	0.000282839	282.8394437	4.75371E-05
FSE403	J401N	123/031	Omgång 1.1	2019-01-28	15	2987	199.1333333	Injektering 30	Blandning 2	0.000185466	185.4655361	1.74139E-05
FSE403	J401N	123/031	Omgång 1.2	2019-01-25	25	8407	336.28	Injektering 30	Blandning 2	0.000276658	276.6576562	6.25168E-05
FSE403	J401N	123/031	Omgång 1	2019-02-01	35	3245	92.71428571	Injektering 30	Blandning 2	0.000142331	142.331488	5.32314E-06
FSE403	J401N	123/046	Omgång 1	2019-04-03	32	2670	83.4375	Injektering 30	Blandning 2	8.29491E-05	82.94908582	1.19269E-06
FSE403	J401N	123/046	Omgång 2	2019-04-06	40	2996	74.9	Injektering 30	Blandning 2	6.57564E-05	65.75641799	6.47541E-07
FSE403	J401S	123/222	Omgång 1	2019-11-26	41	8209	200.2195122	Injektering 30	Blandning 2	0.000113857	113.8567396	4.43544E-06
FSE403	J401S	123/240	Omgång 1	2019-11-05	41	7620	185.8536585	Injektering 30	Blandning 2	0.000181532	181.5321842	0.000368041
FSE403	J401S	123/240	Omgång 2	2019-11-07	33	3653	110.6969697	Injektering 30	Blandning 2	0.000126699	126.6989289	3.47218E-06
FSE403	J401S	123/252	Omgång 1	2019-10-24	41	4486	109.4146341	Injektering 30	Blandning 2	0.000124293	124.2925097	4.6042E-06
FSE403	J401S	123/252	Omgång 2	2019-10-25	34	3629	106.7352941	Injektering 30	Blandning 2	0.00013845	138.450307	5.95488E-06
FSE403	J401S	123/263	Omgång 1	2019-10-13	41	3579	87.29268293	Injektering 30	Blandning 2	0.000110966	110.9662195	2.24261E-06
FSE403	J401S	123/263	Omgång 2	2019-10-15	33	2852	86.42424242	Injektering 30	Blandning 2	7.97843E-05	79.784345	1.02625E-06
FSE403	J401S	123/274	Omgång 1	2019-10-04	41	3638	88.73170732	Injektering 30	Blandning 2	0.000100361	100.3611384	2.73989E-06
FSE403	J401S	123/274	Omgång 2	2019-10-05	33	3015	91.36363636	Injektering 30	Blandning 2	0.00011423	114.2301818	2.11118E-06
FSE403	J401S	123/279	Omgång 1.1	2019-02-21	31	4391	141.6451613	Injektering 30	Blandning 2	0.000117328	117.3275194	6.68566E-06
FSE403	J401S	123/279	Omgång 2.1	2019-02-23	19	1710	90	Injektering 30	Blandning 2	0.000119625	119.6251083	3.14743E-06
FSE403	J401S	123/279	Omgång 2.2	2019-02-25	11	839	76.27272727	Injektering 30	Blandning 2	7.50901E-05	75.09008974	5.09405E-07
FSE403	J401S	123/297	Omgång 1	2019-01-29	31	6165	198.8709677	Injektering 30	Blandning 2	0.000189859	189.8586616	1.1908E-05
FSE403	J401S	123/297	Omgång 2	2019-01-30	30	3222	107.4	Injektering 30	Blandning 2	0.00014128	141.2795408	4.4234E-06
FSE403	J401S	123/314	Omgång 1	2018-12-21	40	34369	859.225	Injektering 30	Blandning 2	0.001254196	1254.196208	0.533494988
FSE403	J401S	123/314	Omgång 2	2019-01-03	31	9507	306.6774194	Injektering 30	Blandning 2	0.000294361	294.3606438	2.56371E-05
FSE403	J401S	123/330	Omgång 1	2018-12-04	31	28449	917.7096774	Injektering 30	Blandning 2	0.000684284	684.2841164	0.000783689
FSE403	J401S	123/330	Omgång 2	2018-12-07	30	9944	331.4666667	Injektering 30	Blandning 2	0.00023924	239.2398427	2.42181E-05
FSE403	J401S	123/348	Omgång 1	2018-11-15	31	23199	748.3548387	Injektering 30	Blandning 2	0.000390313	390.3126197	8.38265E-05
FSE403	J401S	123/348	Omgång 2	2018-11-16	30	14058	468.6	Injektering 30	Blandning 2	0.000235055	235.0545327	2.32426E-05
FSE403	S401S	123/490	Omgång 1	2018-06-27	11	5605	509.5454545	Injektering 30	Blandning 2	0.000548304	548.304349	0.000165129
FSE403	S401S	123/508	Omgång 1	2018-06-14	20	10052	502.6	Injektering 30	Blandning 2	0.000458688	458.6879315	8.30465E-05
FSE403	S401S	123/508	Omgång 2	2018-06-16	13	1300	100	Injektering 30	Blandning 2	0.000115442	115.4416128	2.79139E-06
FSE403	S401S	123/519	Omgång 1	2018-06-05	39	9735	249.6153846	Injektering 30	Blandning 2	0.000172429	172.429253	2.0269E-05
FSE403	S401S	123/519	Omgång 2	2018-06-06	31	3684	118.8387097	Injektering 30	Blandning 2	8.71069E-05	87.10687785	5.29551E-06
FSE403	S401S	123/531	Omgång 1	2018-05-23	39	12783	327.7692308	Injektering 30	Blandning 2	0.000242466	242.4661043	3.17046E-05
FSE403	S401S	123/531	Omgång 2	2018-05-24	32	7340	229.375	Injektering 30	Blandning 2	0.000197655	197.6548091	3.00415E-05
FSE403	S401S	123/541	Omgång 1	2018-05-15	39	9856	252.7179487	Injektering 30	Blandning 2	0.000170117	170.1704433	2.5877E-05
FSE403	S401S	123/541	Omgång 2	2018-05-16	33	6843	207.3636364	Injektering 30	Blandning 2	0.000183938	183.9377675	1.74061E-05
FSE403	S401S	123/553	Omgång 1	2018-04-27	39	5200	133.3333333	Injektering 30	Blandning 2	0.000115023	115.0232549	1.47836E-05
FSE403	S401S	123/553	Omgång 2	2018-05-02	31	2786	89.87096774	Injektering 30	Blandning 2	8.72612E-05	87.2611606	5.82759E-06
FSE403	S401S	123/563	Omgång 1	2018-04-19	31	3735	120.483871	Injektering 30	Blandning 2	0.000115221	115.2207991	8.71871E-06
FSE403	S401S	123/563	Omgång 2	2018-04-19	39	4259	109.2051282	Injektering 30	Blandning 2	0.000105722	105.7223178	4.78485E-06
FSE403	S401S	123/575	Omgång 1	2018-04-05	39	3743	95.97435897	Injektering 30	Blandning 2	0.000105435	105.4347048	4.95192E-06
FSE403	S401S	123/575	Omgång 2	2018-04-10	31	2628	84.77419355	Injektering 30	Blandning 2	7.78124E-05	77.81243254	2.0778E-06
FSE403	S401S	123/588	Omgång 1	2018-03-23	39	6214	159.3333333	Injektering 30	Blandning 2	0.000154966	154.9656158	1.16154E-05
FSE403	S401S	123/588	Omgång 2	2018-03-27	31	2013	64.93548387	Injektering 30	Blandning 2	5.53705E-05	55.37045464	2.22792E-07
FSE403	S401S	123/598	Omgång 1	2018-03-13	32	12580	393.125	Injektering 30	Blandning 2	0.000366905	366.9050149	0.000415506
FSE403	S401S	123/598	Omgång 2	2018-03-14	32	5152	161	Injektering 30	Blandning 2	0.000178133	178.1330796	2.03062E-05
FSE403	S401S	123/608	Omgång 1	2018-03-01	31	2608	84.12903226	Injektering 30	Blandning 2	0.000105203	105.2032004	3.02333E-06
FSE403	S401S	123/608	Omgång 2	2018-03-02	31	3650	117.7419355	Injektering 30	Blandning 2	9.65761E-05	96.57613454	3.67846E-06
FSE403	S401S	123/620	Omgång 1	2018-02-21	31	2293	73.96774194	Injektering 30	Blandning 2	9.33063E-05	93.3062727	2.18394E-06
FSE403	S401S	123/620	Omgång 2	2018-02-22	31	1913	61.70967742	Injektering 30	Blandning 2	7.8754E-05	78.75401712	1.87279E-06
FSE403	S401S	123/632	Omgång 1	2018-02-10	35	1869	53.4	Injektering 30	Blandning 2	5.05231E-05	50.5230629	1.18664E-07
FSE403	S401S	123/632	Omgång 2	2018-02-13	31	2011	64.87096774	Injektering 30	Blandning 2	6.13441E-05	61.34412869	3.38143E-07
FSE403	S401S	123/649	Omgång 1	2018-01-26	17	2431	143	Injektering 30	Blandning 2	0.000528756	528.756075	0.000128559
FSE403	S401S	123/649	Omgång 2	2018-01-30	15	2430	162	Injektering 30	Blandning 2	0.000334379	334.3786246	3.67584E-05
FSE403	S402N	223/757	Omgång 1	2018-02-16	16	6486	405.375	Injektering 30	Blandning 2	0.000362126	362.1263866	5.4934E-05
FSE403	S402N	223/774	Omgång 1	2018-02-27	11	2612	237.4545455	Injektering 30	Blandning 2	0.000395179	395.1791814	5.10852E-05
FSE403	S402N	223/810	Omgång 1	2018-04-05	17	6060	356.4705882	Injektering 30	Blandning 2	0.000450224	450.2240052	6.62775E-05
FSE403	S402N	223/827	Omgång 1	2018-04-14	11	4079	370.8181818	Injektering 30	Blandning 2	0.0004862	486.2000923	7.8072E-05
FSE403	S402S	223/380	Omgång 1	2019-02-05	33	14884	451.030303	Injektering 30	Blandning 2	0.000229184	229.1839035	3.99676E-05
FSE403	S402S	223/397	Omgång 1	2019-01-19	35	5244	149.8285714	Injektering 30	Blandning 2	0.000122256	122.2564029	4.26458E-06
FSE403	S402S	223/397	Omgång 2	2019-01-22	30	2537	84.56666667	Injektering 30	Blandning 2	8.84567E-05	88.45672117	1.11687E-06
FSE403	S402S	223/412	Omgång 1	2018-12-14	38	5899	155.2368421	Injektering 30	Blandning 2	0.000124472	124.4721643	6.26649E-06
FSE403	S402S											

FSE403	RT411	0/480	Omgång 1	2018-10-28	32	22703	709.46875	Injektering 30	Blandning 2	0.000321062	321.0621396	7.58077E-05
FSE403	RT411	0/498	Omgång 1	2018-10-14	17	16508	971.0588235	Injektering 30	Blandning 2	0.000310585	310.5851508	4.56376E-05
FSE403	RT411	0/515	Omgång 1	2018-09-27	31	18009	580.9354839	Injektering 30	Blandning 2	0.000239959	239.9589503	3.34425E-05
FSE403	RT411	0/515	Omgång 2	2018-10-03	25	6147	245.88	Injektering 30	Blandning 2	0.000159744	159.7440339	7.86483E-06
FSE403	RT411	0/548	Omgång 1	2018-09-04	29	4236	146.0689655	Injektering 30	Blandning 2	0.000178993	178.993237	8.93652E-06
FSE403	RT411	0/566	Omgång 1	2018-08-21	32	7533	235.40625	Injektering 30	Blandning 2	0.000282925	282.9249913	2.43447E-05
FSE403	RT411	0/583	Omgång 1	2018-08-14	13	2803	215.6153846	Injektering 30	Blandning 2	0.000292268	292.2676658	2.14067E-05
FSE403	RT411	0/600	Omgång 1	2018-07-07	30	5702	190.0666667	Injektering 30	Blandning 2	0.000263977	263.9769359	3.02809E-05
FSE403	RT411	0/616	Omgång 1	2018-06-29	14	3638	259.8571429	Injektering 30	Blandning 2	0.00047175	471.7498955	7.73247E-05
FSE403	RT411	0/632	Omgång 1	2018-06-21	9	2694	299.3333333	Injektering 30	Blandning 2	0.000536112	536.112465	0.000237694
FSE403	RT411	0/646	Omgång 1	2018-06-15	14	2839	202.7857143	Injektering 30	Blandning 2	0.000395799	395.7986735	4.38699E-05
FSE403	RT411	0/663	Omgång 1	2018-06-06	9	2131	236.7777778	Injektering 30	Blandning 2	0.000435578	435.5782005	6.84103E-05
FSE403	RT411	0/680	Omgång 1	2018-05-31	15	4025	268.3333333	Injektering 30	Blandning 2	0.000409137	409.1368435	6.65509E-05
FSE403	RT411	0/697	Omgång 1	2018-05-23	9	3933	437	Injektering 30	Blandning 2	0.000426042	426.0419247	9.57342E-05
FSE403	RT414	0/441	Omgång 1	2017-05-06	34	8828	259.6470588	Injektering 30	Blandning 2	0.00074648	746.4800507	0.018030137
FSE403	RT414	0/500	Omgång 1	2017-06-16	16	11967	747.9375	Injektering 30	Blandning 2	0.000691478	691.4775514	0.000247137
FSE403	RT414	0/500	Omgång 2	2017-06-17	16	7763	485.1875	Injektering 30	Blandning 2	0.000836908	836.9077748	0.004903847
FSE403	RT414	0/517	Omgång 1	2017-07-02	15	10604	706.9333333	Injektering 30	Blandning 2	0.000890294	890.2939752	0.00172533
FSE403	RT414	0/517	Omgång 2	2017-07-03	16	11250	703.125	Injektering 30	Blandning 2	0.000479635	479.6345318	0.000110967
FSE403	RT414	0/641	Omgång 1	2017-10-20	26	1921	73.88461538	Injektering 30	Blandning 2	0.000239412	239.4117293	1.91215E-05
FSE403	RT414	0/641	Omgång 2	2017-10-21	26	1928	74.15384615	Injektering 30	Blandning 2	0.000220347	220.3473149	1.43525E-05
FSE403	RT414	0/658	Omgång 1	2017-10-27	26	2100	80.76923077	Injektering 30	Blandning 2	0.000246762	246.762067	1.83532E-05
FSE403	RT414	0/658	Omgång 2	2017-10-30	26	1996	76.76923077	Injektering 30	Blandning 2	0.000192516	192.5161057	1.07441E-05
FSE403	RT414	0/675	Omgång 1	2017-11-03	27	2902	107.4814815	Injektering 30	Blandning 2	0.000174454	174.4544707	9.32603E-06
FSE403	RT414	0/675	Omgång 2	2017-11-07	23	1605	69.7826087	Injektering 30	Blandning 2	8.00423E-05	80.04232505	1.31442E-06



**Tabell 8:**

Hela dataserien för lågt inläckage. Samma information som i tabell 7.

Entreprenør	Anlægsdel	Sektion	Omgang	Datum	Antal høl	Total bruksåtgång	Bruksåtgång per høl	Cementtyp	Startblandning	Medelaperturn [m]	Medelaperturn [mikrom]	Medeltransmissivitet [m2/s]
FSE403	J401S	122/246	Omgång 1	2019-08-21	33	2487	75.36363636	Microcem 8000SR FSE403	Blandning 2	5.83557E-05	58.35565676	2.78285E-07
FSE403	J401S	122/246	Omgång 2	2019-08-22	33	2348	71.15151515	Microcem 8000SR FSE403	Blandning 2	5.81151E-05	58.11514329	6.51256E-07
FSE403	J401S	122/265	Omgång 1	2019-08-05	33	2804	84.96969697	Microcem 8000SR FSE403	Blandning 2	6.04679E-05	60.46785429	6.26607E-07
FSE403	J401S	122/265	Omgång 2	2019-08-06	20	1666	83.3	Microcem 8000SR FSE403	Blandning 2	5.10585E-05	51.05852227	1.44123E-07
FSE403	J401S	122/279	Omgång 1	2019-06-26	31	2427	78.29032258	Microcem 8000SR FSE403	Blandning 2	4.29235E-05	49.2935454	9.07606E-08
FSE403	J401S	122/280	Omgång 2	2019-06-26	31	2576	83.09677419	Microcem 8000SR FSE403	Blandning 2	5.61177E-05	56.11774841	3.28735E-07
FSE403	J401S	122/563	Omgång 1	2017-12-29	16	3604	225.25	Injektering 30	Blandning 2	0.000484341	484.3414471	7.6572E-05
FSE403	J401S	122/581	Omgång 1	2018-01-11	16	3594	224.625	Injektering 30	Blandning 2	0.000463908	463.9078938	6.60495E-05
FSE403	J401S	122/297	Omgång 1	2019-06-06	31	2312	74.58064516	Injektering 30	Blandning 2	5.5639E-05	50.36895772	1.09704E-07
FSE403	J401S	122/297	Omgång 2	2019-06-27	31	2576	83.09677419	Injektering 30	Blandning 2	6.15705E-05	61.57047098	7.78416E-07
FSE403	J401S	122/315	Omgång 1	2019-05-23	31	2745	88.5483871	Injektering 30	Blandning 2	7.86578E-05	78.65776607	2.09649E-06
FSE403	J401S	122/315	Omgång 2	2019-05-23	31	2423	78.16129032	Injektering 30	Blandning 2	6.74075E-05	67.40748899	4.01083E-07
FSE403	J401S	122/332	Omgång 1	2019-05-09	31	2934	94.64516129	Injektering 30	Blandning 2	8.74055E-05	87.40545432	1.55443E-06
FSE403	J401S	122/332	Omgång 2	2019-05-10	31	2535	81.77419355	Injektering 30	Blandning 2	7.32384E-05	73.23835892	6.2173E-07
FSE403	J401S	122/348	Omgång 1	2019-04-12	37	10601	286.5135135	Injektering 30	Blandning 2	0.000166505	166.5048321	2.31774E-05
FSE403	J401S	122/348	Omgång 2	2019-04-16	45	4167	92.6	Injektering 30	Blandning 2	9.59401E-05	95.94013732	2.51543E-06
FSE403	J401S	122/359	Omgång 1	2019-04-06	31	2925	94.35483871	Injektering 30	Blandning 1	0.000103747	103.7469568	1.61786E-06
FSE403	J401S	122/365	Omgång 1	2019-03-29	37	11565	312.5675676	Injektering 30	Blandning 2	0.000260449	260.4488658	3.87837E-05
FSE403	J401S	122/365	Omgång 2	2019-04-01	37	5622	151.9459459	Injektering 30	Blandning 2	0.00013565	135.6499798	1.16672E-05
FSE403	J401S	122/382	Omgång 1	2019-03-13	37	11586	313.1351351	Injektering 30	Blandning 2	0.000314939	314.9392403	6.73815E-05
FSE403	J401S	122/382	Omgång 2	2019-03-14	22	2061	93.68181818	Injektering 30	Blandning 2	0.000109223	109.2232442	1.44818E-06
FSE403	J401S	122/400	Omgång 1	2019-02-28	37	6731	181.9189189	Injektering 30	Blandning 2	0.000195572	195.5722907	1.7534E-05
FSE403	J401S	122/400	Omgång 2	2019-02-28	22	5026	228.4545455	Injektering 30	Blandning 2	0.000165682	165.6823561	7.089E-06
FSE403	J401S	122/414	Omgång 1	2019-02-14	37	3397	91.81081081	Injektering 30	Blandning 2	0.000134517	134.5166107	8.59564E-06
FSE403	J401S	122/414	Omgång 2	2019-02-15	22	1932	87.81818182	Injektering 30	Blandning 2	8.69102E-05	86.91018384	1.5376E-06
FSE403	J401S	122/431	Omgång 1	2012-11-30	37	6814	184.1621622	Injektering 30	Blandning 2	0.000217169	217.1685684	1.77284E-05
FSE403	J401S	122/431	Omgång 2	2019-01-25	37	4313	116.5675676	Injektering 30	Blandning 2	0.000155059	155.0589881	9.79842E-06
FSE403	J401S	122/480	Omgång 1	2018-06-16	15	2991	199.4	Injektering 30	Blandning 2	0.000424814	424.8136639	5.16035E-05
FSE403	J401S	122/497	Omgång 1	2018-03-05	13	4378	336.7692308	Injektering 30	Blandning 2	0.000674711	674.711451	0.000909687
FSE403	J401S	122/515	Omgång 1	2018-02-07	16	6832	427	Injektering 30	Blandning 2	0.000500587	505.8704245	0.000111048
FSE403	J401S	122/531	Omgång 1	2018-01-27	15	4544	302.9333333	Injektering 30	Blandning 2	0.000560487	560.4865776	0.00022043
FSE403	J401S	122/548	Omgång 1	2018-01-13	15	2414	160.9333333	Injektering 30	Blandning 2	0.000457566	457.5758975	7.52528E-05
FSE403	J401N	122/836	Omgång 1	2018-08-10	18	2924	162.4444444	Injektering 30	Blandning 2	0.000373203	373.2032936	4.39632E-05
FSE403	J401N	122/852	Omgång 1	2018-08-23	36	3455	95.97222222	Injektering 30	Blandning 2	0.000247449	247.4488144	1.49366E-05
FSE403	J401N	122/869	Omgång 1	2018-09-07	31	2336	75.35483871	Injektering 30	Blandning 2	0.000174698	174.6984746	8.09456E-06
FSE403	J401N	122/886	Omgång 1	2018-09-17	17	1501	88.29411765	Injektering 30	Blandning 2	4.64159E-05	46.41588834	6.26455E-08
FSE403	J401N	122/886	Omgång 1	2018-09-18	17	1235	72.64705882	Injektering 30	Blandning 2	4.64159E-05	46.41588834	6.26455E-08
FSE403	J401N	122/904	Omgång 1	2018-09-26	32	5600	175	Injektering 30	Blandning 2	0.000134726	134.7256756	7.00313E-06
FSE403	J401N	122/920	Omgång 1	2018-10-05	43	11060	257.2093023	Injektering 30	Blandning 2	0.000142263	142.262615	8.94291E-06
FSE403	401S	123/364	Omgång 1	2018-11-02	31	14257	459.9032258	Injektering 30	Blandning 2	0.000233137	233.1374177	2.377E-05
FSE403	401S	123/364	Omgång 2	2018-11-03	30	6216	207.2	Injektering 30	Blandning 2	0.000181112	181.1124958	6.98233E-06
FSE403	401S	123/382	Omgång 1	2018-10-13	31	7087	228.6129032	Injektering 30	Blandning 2	0.000171132	171.1319455	1.39031E-06
FSE403	401S	123/382	Omgång 2	2018-10-15	30	8370	279	Injektering 30	Blandning 2	0.000139727	139.7266947	0.99348E-06
FSE403	401S	123/399	Omgång 1	2018-10-03	31	5066	163.4193548	Injektering 30	Blandning 2	0.000154201	154.2006609	0.00012099
FSE403	401S	123/399	Omgång 2	2018-10-04	30	4836	161.2	Injektering 30	Blandning 2	0.00015702	115.7024552	7.10445E-06
FSE403	401S	123/416	Omgång 1	2018-09-21	31	13139	423.8387097	Injektering 30	Blandning 2	0.000176792	176.7923673	1.76415E-05
FSE403	401S	123/434	Omgång 2	2018-09-10	31	4589	148.0322581	Injektering 30	Blandning 2	9.6102E-05	96.10202082	3.76845E-06
FSE403	401S	123/440	Omgång 1	2018-09-05	33	33294	1008.909091	Injektering 30	Blandning 2	0.000318724	318.7237842	6.01202E-05
FSE403	401S	123/458	Omgång 1	2018-08-23	16	4367	272.9375	Injektering 30	Blandning 2	0.000350682	350.6815541	3.37313E-05
FSE403	401S	123/474	Omgång 1	2018-08-11	16	8221	513.8125	Injektering 30	Blandning 2	0.000585934	585.9389997	0.000155751
FSE403	401S	123/474	Omgång 2	2018-08-13	18	6941	385.6111111	Injektering 30	Blandning 2	0.000361056	361.0562248	5.81501E-05
FSE403	S401N	124/006	Omgång 1	2018-11-08	36	9692	269.2222222	Injektering 30	Blandning 2	0.000141531	141.5306394	7.27886E-06
FSE403	S401N	124/039	Omgång 1	2018-12-04	31	21619	697.3870968	Injektering 30	Blandning 2	0.000267079	267.0794961	2.96833E-05
FSE403	S401N	124/076	Omgång 1	2019-01-30	34	15395	452.7941176	Injektering 30	Blandning 2	0.000191187	191.1870349	1.42286E-05
FSE403	S401N	124/113	Omgång 1	2019-03-08	37	20946	566.1081081	Injektering 30	Blandning 2	0.000201481	201.4806112	3.12875E-05
FSE403	S401N	124/148	Omgång 1	2019-04-04	37	26808	724.5405405	Injektering 30	Blandning 2	0.000421713	421.7127101	9.52288E-05
FSE403	S401N	124/148	Omgång 2	2019-04-06	31	6789	219	Injektering 30	Blandning 2	0.000151155	151.1154425	8.4137E-06
FSE403	S401N	124/165	Omgång 1	2019-04-17	36	21845	606.8055556	Injektering 30	Blandning 2	0.000323744	323.743787	5.09674E-05
FSE403	S401N	124/165	Omgång 2	2019-04-24	28	8813	314.75	Injektering 30	Blandning 2	0.00018884	188.839507	1.1325E-05
FSE403	S401N	124/165	Omgång 3	2019-04-29	34	9082	267.1176471	Injektering 30	Blandning 2	0.000159575	159.5750177	9.49459E-06
FSE403	S401N	124/188	Omgång 1	2019-05-14	38	20673	544.0263158	Injektering 30	Blandning 2	0.000283786	283.7857024	4.32054E-05
FSE403	S401N	124/188	Omgång 2	2019-05-16	31	8018	258.6451613	Injektering 30	Blandning 2	0.000173905	173.9053888	1.37902E-05
FSE403	S401N	124/205	Omgång 2	2019-05-23	33	8181	247.9090909	Injektering 30	Blandning 2	0.000237949	237.9491151	2.14162E-05
FSE403	S401N	124/205	Omgång 1	2019-05-24	31	3947	127.3225806	Injektering 30	Blandning 2	0.000172292	172.2921379	5.06338E-06
FSE403	S401N	124/223	Omgång 1	2019-06-13	37	9435	255	Injektering 30	Blandning 2	0.000251297	251.2967427	2.34179E-05
FSE403	S401N	124/261	Omgång 1	2019-08-20	33	5525	167.4242424	Injektering 30	Blandning 2	0.000138363	138.363092	5.29565E-06
FSE403	S401N	124/280	Omgång 1	2019-09-05	33	12204	369.8181818	Injektering 30	Blandning 2	0.000228212	228.2121065	4.0557E-05
FSE403	S401N	124/298	Omgång 1	2019-09-20	33	6565	198.9393939	Injektering 30	Blandning 2	0.000138434	138.434106	6.4929E-06
FSE403	S401N	224/223	Omgång 2	2019-06-14	14	2832	202.2857143	Injektering 30	Blandning 2	0.000201617	202.0695524	9.7559E-06
FSE403	S401N	124/241	Omgång 1	2019-07-04	37	8633	233.3243243	Injektering 30	Blandning 2	0.0001975	197.4998358	2.01347E-05
FSE403	J402S	222/245	Omgång 1	2019-08-14	31	4963	160.0967742	Microcem 8000SR FSE403	Blandning 2	7.73171E-05	77.3170895	2.62265E-06
FSE403	J402S	222/245	Omgång 2	2019-08-14	31	2487	80.22580645	Microcem 8000SR FSE403	Blandning 2	6.5388E-05	65.38799282	4.89598E-07
FSE403	J402S	222/261	Omgång 1	2019-06-29	31	2966	95.67741935	Microcem 8000SR FSE403	Blandning 2	8.64809E-05	86.48087303	1.44614E-06
FSE403	J402S	222/261	Omgång 2	2019-07-04	18	1566	87	Microcem 8000SR FSE403	Blandning 2	6.66277E-05	66.62774662	8.11155E-07
FSE403	J402S	222/279	Omgång 1	2019-06-12	31	2590	83.5483871	Injektering 30	Blandning 2	6.5541E-05	65.54097672	8.34456E-07
FSE403	J402S	222/296	Omgång 1	2019-05-23	31	3269	105.4516129	Injektering 30	Blandning 2	9.47568E-05	94.75678583	2.3381E-06
FSE403	J402S	222/296	Omgång 2	2019-05-25	31	2588	83.48387097	Injektering 30	Blandning 2	8.63366E-05	86.33655697	1.3821E-06
FSE403	J402S	222/313	Omgång 1	2019-05-09	31	2478						

FSE403	J402S	222/549	Omgång 1	2018-02-24	23	1021	44.39130435	Injektering 30	Blandning 2	7.83232E-05	78.32319683	2.14975E-06
FSE403	S402N	224/014	Omgång 1	2018-09-28	42	30938	736.6190476	Injektering 30	Blandning 2	0.000233341	233.3413697	3.09966E-05
FSE403	S402N	224/019	Omgång 2	2018-10-05	45	8819	195.9777778	Injektering 30	Blandning 2	0.00012779	127.7899006	6.22941E-06
FSE403	S402N	224/037	Omgång 1	2018-10-29	39	9787	250.9487179	Injektering 30	Blandning 2	0.000160162	160.1616497	1.46285E-05
FSE403	S402N	224/037	Omgång 2	2018-11-01	18	16389	910.5	Injektering 30	Blandning 2	0.000281602	281.6016589	2.98358E-05
FSE403	S402N	224/055	Omgång 1	2018-11-16	36	16691	463.6388889	Injektering 30	Blandning 2	0.000187346	187.3455781	1.84943E-05
FSE403	S402N	224/071	Omgång 1	2018-12-01	37	42399	1145.918919	Injektering 30	Blandning 2	0.000373064	373.0644932	5.87259E-05
FSE403	S402N	224/103	Omgång 1	2019-01-24	42	26860	639.5238095	Injektering 30	Blandning 2	0.000239364	239.3637777	2.87265E-05
FSE403	S402N	224/103	Omgång 2	2019-01-26	14	3090	220.7142857	Injektering 30	Blandning 2	0.000126066	126.0663639	5.58014E-06
FSE403	S402N	224/120	Omgång 1	2019-02-08	35	30630	875.1428571	Injektering 30	Blandning 2	0.000258825	258.8252541	2.87179E-05
FSE403	S402N	224/138	Omgång 1	2019-02-22	35	31269	893.4	Injektering 30	Blandning 2	0.000318239	318.2393992	4.72184E-05
FSE403	S402N	224/155	Omgång 1	2019-03-09	39	49740	1275.384615	Injektering 30	Blandning 2	0.000388373	388.3727816	5.76905E-05
FSE403	402N	224/191	Omgång 1	2019-04-09	41	18046	440.1463415	Injektering 30	Blandning 2	0.000313834	313.8341445	6.59186E-05
FSE403	402N	224/191	Omgång 2	2019-04-11	30	14274	475.8	Injektering 30	Blandning 2	0.00027334	273.4396724	3.66587E-05
FSE403	402N	224/208	Omgång 1	2019-04-25	40	15230	380.75	Injektering 30	Blandning 2	0.000252033	252.0325659	3.66553E-05
FSE403	402N	224/208	Omgång 2	2019-04-26	34	8593	252.7352941	Injektering 30	Blandning 2	0.000183458	183.4577159	1.29461E-05
FSE403	S402N	224/226	Omgång 2	2019-05-13	34	9637	283.4411765	Injektering 30	Blandning 2	0.000194709	194.709464	1.65676E-05
FSE403	S402N	224/226	Omgång 1	2019-05-11	43	20426	475.0232558	Injektering 30	Blandning 2	0.000306192	306.1917497	8.48096E-05
FSE403	S402N	224/243	Omgång 1	2019-05-31	40	13865	346.625	Injektering 30	Blandning 2	0.000255067	255.0673632	2.82313E-05
FSE403	S402N	224/243	Omgång 2	2019-06-04	34	4588	134.9411765	Injektering 30	Blandning 2	0.000188481	188.4805545	7.78476E-06
FSE403	S402N	224/261	Omgång 1	2019-07-01	36	5087	141.3055556	Injektering 30	Blandning 2	0.000190268	190.2679621	0.000121476
FSE403	S402N	224/261	Omgång 2	2019-07-05	40	8287	207.175	Injektering 30	Blandning 2	0.000209712	209.7122004	2.54512E-05
FSE403	S402N	224/280	Omgång 1	2019-08-30	46	8821	191.7608696	Injektering 30	Blandning 2	0.000205246	205.2460096	2.76036E-05
FSE403	S402N	224/280	Omgång 2	2019-09-02	36	5176	143.7777778	Injektering 30	Blandning 2	0.000126223	126.2230121	5.06923E-06
FSE403	S402N	224/291	Omgång 1	2019-09-16	38	8098	213.1052632	Injektering 30	Blandning 2	0.000162359	162.3592648	1.9946E-05
FSE403	RT412	0/418	Omgång 1	2017-08-10	17	2164	127.2941176	Injektering 30	Blandning 2	0.000510373	510.3733289	9.56166E-05
FSE403	RT412	0/436	Omgång 1	2017-08-22	20	3764	188.2	Injektering 30	Blandning 2	0.000527888	527.8884556	0.000164496
FSE403	RT412	0/455	Omgång 1	2017-09-02	14	6306	450.4285714	Injektering 30	Blandning 2	0.000594319	594.3188154	0.000224067
FSE403	RT412	0/473	Omgång 1	2017-09-25	16	4628	289.25	Injektering 30	Blandning 2	0.000539911	539.9180822	0.000192357
FSE403	RT412	0/491	Omgång 1	2017-10-11	14	4748	339.1428571	Injektering 30	Blandning 2	0.000616582	616.582144	0.000641375
FSE403	RT412	0/508	Omgång 1	2017-10-28	30	7265	242.1666667	Injektering 30	Blandning 2	0.000289607	289.6069287	2.69523E-05
FSE403	RT412	0/525	Omgång 1	2017-11-15	32	9298	290.5625	Injektering 30	Blandning 2	0.000547415	547.4147867	6.00320531
FSE403	RT412	0/540	Omgång 1	2017-12-04	20	6741	337.05	Injektering 30	Blandning 2	0.000309019	309.0189632	5.79237E-05
FSE403	RT412	0/556	Omgång 1	2017-12-19	14	5301	378.6428571	Injektering 30	Blandning 2	0.000561	560.9999657	0.000182459
FSE403	RT412	0/574	Omgång 1	2018-01-06	11	5981	543.7272727	Injektering 30	Blandning 2	0.00044847	448.469817	8.60673E-05
FSE403	RT412	0/597	Omgång 1	2018-01-25	14	8680	620	Injektering 30	Blandning 2	0.000490677	490.6774885	9.54267E-05
FSE403	RT412	0/615	Omgång 1	2018-02-07	13	3097	238.2307692	Injektering 30	Blandning 2	0.000550359	550.3594916	0.000121245
FSE403	RT412	0/632	Omgång 1	2018-02-14	11	6217	565.1818182	Injektering 30	Blandning 2	0.000551662	551.6621119	0.000322489
FSE403	RT412	0/714	Omgång 1	2018-05-26	12	5648	470.6666667	Injektering 30	Blandning 2	0.00068632	686.319576	0.000302169
FSE403	RT412	0/648	Omgång 1	2018-02-27	14	4284	306	Injektering 30	Blandning 2	0.000397044	397.0436923	7.58424E-05
FSE403	RT412	0/648	Omgång 2	2018-03-01	10	3916	391.6	Injektering 30	Blandning 2	0.000333822	333.8219962	3.46109E-05
FSE403	RT412	0/662	Omgång 1	2018-03-13	13	6484	498.7692308	Injektering 30	Blandning 2	0.000455428	455.4283526	0.000170216
FSE403	RT412	0/679	Omgång 1	2018-03-29	10	7516	751.6	Injektering 30	Blandning 2	0.000638733	638.7330483	0.00020636
FSE403	RT412	0/679	Omgång 2	2018-04-04	16	5374	335.875	Injektering 30	Blandning 2	0.000564309	564.3087855	0.002312718
FSE403	RT412	0/697	Omgång 1	2018-04-25	12	7333	611.0833333	Injektering 30	Blandning 2	0.000764754	764.7543382	0.002475477
FSE403	RT412	0/730	Omgång 1	2018-06-19	12	6000	500	Injektering 30	Blandning 2	0.000758915	758.9149372	0.000491466
FSE403	RT412	0/746	Omgång 1	2018-08-10	33	2967	89.90909091	Injektering 30	Blandning 2	0.000187946	187.94555	1.36646E-05
FSE403	RT412	0/758	Omgång 1	2012-11-28	22	2198	99.90909091	Injektering 30	Blandning 2	0.000305742	305.7424827	0.000606464
FSE403	RT412	0/776	Omgång 1	2018-09-15	28	2336	83.42857143	Injektering 30	Blandning 2	0.00015805	158.0503138	9.21942E-06
FSE403	RT412	0/792	Omgång 1	2018-10-03	31	23923	771.7096774	Injektering 30	Blandning 2	0.000254204	254.2040775	1.88119E-05
FSE403	RT412	0/809	Omgång 1	2018-10-12	29	3917	135.0689655	Injektering 30	Blandning 2	8.96177E-05	89.61768834	1.16663E-06
FSE403	RT412	0/827	Omgång 1	2018-10-22	29	6650	229.3103448	Injektering 30	Blandning 2	0.000110974	110.9737965	3.54192E-06
FSE403	RT412	0/844	Omgång 1	2018-11-08	35	28359	810.2571429	Injektering 30	Blandning 2	0.00021345	213.449732	2.6035E-05
FSE403	RT412	0/844	Omgång 2	2018-11-09	25	8755	350.2	Injektering 30	Blandning 2	0.000135627	135.6266225	4.16276E-06
FSE403	RT412	0/913	Omgång 1	2019-01-11	32	2964	92.625	Injektering 30	Blandning 2	7.32829E-05	73.2828688	1.14177E-06

## **7.4 Bilaga 4**

### **Tabell 9:**

Här visas de teoretiskt uträknade medelsprickvidderna baserat på tabell 7 och tabell 8.

- Antal medelsprickvidder för högt inläckage: 80
- Antal medelsprickvidder för lågt inläckage: 112

Sorterad bruksåtgång för högt inläckage		Sorterad bruksåtgång för lågt inläckage	
Bruksåtgång per hål	Medelapertur [mikrom]	Bruksåtgång per hål	Medelapertur [mikrom]
61.70967742	78.75401712	44.39130435	78.32319683
64.87096774	61.34412869	60.11111111	51.6659169
64.93548387	55.37045464	71.15151515	58.11514329
69.7826087	80.04232505	75.35483871	174.6984746
74.15384615	220.3473149	78.16129032	67.40748899
74.9	65.75641799	78.29032258	49.2935454
76.76923077	192.5161057	78.4516129	81.05947607
83.13636364	97.35759901	80.22580645	65.38799282
83.47826087	142.6571572	80.47058824	46.41588834
84.56666667	88.45672117	81.77419355	73.23835892
84.77419355	77.81243254	83.09677419	56.11774841
86.42424242	79.784345	83.09677419	61.57047098
89.87096774	87.2611606	83.3	51.05852227
91.36363636	114.2301818	83.42857143	158.0503138
92.71428571	142.331488	83.48387097	86.33655697
100	115.4416128	83.5483871	65.54097672
106.7352941	138.450307	87	66.62774662
107.4	141.2795408	87.81818182	86.91018384
109.2051282	105.7223178	89.90909091	187.94555
110.6969697	126.6989289	92.6	95.94013732
117.7419355	96.57613454	92.625	73.2828688
118.8387097	87.10687785	93.68181818	109.2232442
133.3333333	115.0232549	94.35483871	103.7469568
139.175	124.4165861	95.97222222	247.4488144
146.0689655	178.993237	99.90909091	305.7424827
148.6	137.9735669	102.8108108	105.5238867
150.7435897	259.3140376	116.5675676	155.0589881
159.3333333	154.9656158	124.0344828	305.5545127
161	178.1330796	125.1111111	102.9554094
162	334.3786246	127.2941176	510.3733289
177.8666667	558.8304518	134.9411765	188.4805545
180.5333333	313.7990277	135.0689655	89.61768834
184.5625	515.1782072	143.7777778	126.2230121
190.0666667	263.9769359	148.0322581	96.10202082
192.9354839	120.0465565	151.9459459	135.6499798
200.2195122	113.8567396	160.9333333	457.7558975
202.7857143	395.7986735	161.2	115.7024552
207.3636364	183.9377675	162.4444444	373.2032936
214.6	207.5280378	167.4242424	138.363092
215.6153846	292.2676658	175	134.7256756
216.25	415.9650861	188.2	527.8884556
217.9782609	305.029018	195.9777778	127.7899006
229.375	197.6548091	198.9393939	138.434106
235.40625	282.9249913	199.4	424.8136639
236.7777778	435.5782005	202.2857143	201.6695524

237.4545455	395.1791814	207.175	209.7122004
245.88	159.7440339	207.2	118.1124958
259.375	119.8141666	213.1052632	162.3592648
259.6470588	746.4800507	217.7037037	181.3031775
259.8571429	471.7498955	219	151.1154425
268.3333333	409.1368435	220.7142857	126.0663639
273.1842105	142.2838666	224.625	463.9078938
275.6923077	593.2530988	225.25	484.3414471
278	282.8394437	228.4545455	165.6823561
294.2307692	205.7525142	229.1176471	136.817168
299.3333333	536.112465	229.3103448	110.9737965
306.6774194	294.3606438	233.3243243	197.4998358
327.7692308	242.4661043	234.7272727	444.4702908
331.4666667	239.2398427	238.2307692	550.3594916
334.8292683	237.0554818	242.1666667	289.6069287
356.4705882	450.2240052	247.9090909	237.9491151
363	364.1829632	252.7352941	183.4577159
370.8181818	486.2000923	255	251.2967427
375.6923077	483.4818949	257.2093023	142.262615
382.3611111	439.9222939	258.6451613	173.9053888
391.6428571	565.0201616	267.1176471	159.5750177
405.375	362.1263866	269.2222222	141.5306394
437	426.0419247	272.9375	350.6815541
449.2	407.4867167	278.5652174	202.7316588
451.030303	229.1839035	279	139.7266947
468.6	235.0545327	283.4411765	194.709464
473.3513514	191.62325	289.25	539.9108022
485.1875	836.9077748	290.5625	547.4147867
506.6363636	434.7582706	300.5	400.1149347
509.5454545	548.304349	302.9333333	560.4865776
527.8108108	183.0355026	314.75	188.839507
538.1428571	554.9906972	332.1	527.9998195
703.125	479.6345318	335.875	564.3087855
709.46875	321.0621396	336.7692308	674.711451
971.0588235	310.5851508	337.05	309.0189632
		339.1428571	616.582144
		350.2	135.6266225
		369.8181818	228.2121065
		378.6428571	560.9999657
		385.6111111	361.0562248
		391.6	333.8219962
		423.8387097	176.7923673
		427	505.8704245
		450.4285714	594.3188154
		452.7941176	191.1870349
		463.6388889	187.3455781
		470.6666667	686.319576

475.8	273.4396724
498.7692308	455.4283526
500	758.9149372
543.7272727	448.469817
544.0263158	283.7857024
565.1818182	551.6621119
566.0909091	843.396984
566.1081081	201.4806112
611.0833333	764.7543382
620	490.6774885
697.3870968	267.0794961
724.5405405	421.7127101
736.6190476	233.3413697
771.7096774	254.2040775
875.1428571	258.8252541
893.4	318.2393992
910.5	281.6016589
1008.909091	318.7237842
1145.918919	373.0644932
1275.384615	388.3727816