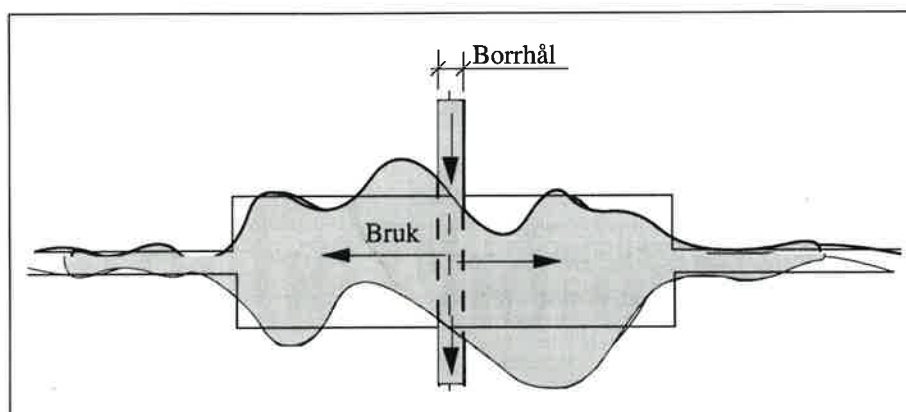




# **BERÄKNING AV INJEKTERAD VOLYM I BERGSPRICKOR**

Thomas Janson

STIFTELSEN SVENSK BERGTEKNISK FORSKNING  
SWEDISH ROCK ENGINEERING RESEARCH  
**SveBeFo Rapport 30**

**BERÄKNING AV INJEKTERAD  
VOLYM I BERGSPRICKOR**

**Calculation of grout volumes in rock joints**

Thomas Janson, KTH

## Förord

SveBeFo:s forskning inom injekteringstekniken syftar till bättre kunskaper om injekteringsmedels verkan för att täta bergsprickor i tunnlar och berg-rum. Tidigare framtagna modeller för att matematiskt simulera injekte-ringens flöde i sprickorna har av Thomas Janson utvecklats och modifierats för att bättre kunna förutsäga injekteringsmedlets spridning vid olika sprickmönster. Modellerna kan därmed komma till användning för att bedöma aktuell injekteringsvolym, som är en viktig parameter när det gäller att styra arbetet mot ett visst tätningsresultat. De nya modellerna har också prövats mot verkliga förhållanden med för denna typ av arbeten god överensstämmelse.

Arbetet, som också har presenterats som licentiatsavhandling, ska ses som ett steg på vägen mot en bättre teknik och kontroll över injekteringsresultat, där fortsatt forskning krävs både i fråga om teoriutveckling, laboratorie-försök och fältarbeten. Sådana arbeten pågår för närvarande såväl i SveBeFo:s regi som i ett större injekteringsforskningsprogram initierat av Svensk Kärnbränslehantering (SKB) och i form av mera praktiskt inriktade arbeten inom Nutek:s "industriforskningsprogram".

Projektet har följts av SveBeFo:s referensgrupp för injekteringsforskning, bestående av Martin Brantberger, Stabilator, Tommy Ellison, Besab, Jan Alemo, Vattenfall Utveckling, Anders Heiner, VBB, Lars Hässler, Vattenfall Hydropower, Håkan Stille, KTH och Gunnar Gustafson, CTH samt under-tecknad.

Stockholm i december 1996

Tomas Franzén

## SAMMANFATTNING

Injektering i berg är en mycket komplex process som styrs av olika faktorer, såsom hydrogeologin och geologin, använd injekteringsteknik (injekteringsmedel, tryck och arbetsmetod) samt inläckningskriterium och krav på beständighet. Kunskapen om hur de olika faktorerna påverkar injekteringsresultatet är fortfarande relativt begränsad.

Syftet med denna rapport är att beskriva en metod för att bedöma och styra injekteringsvolymen, en metod som även kan ligga till grund för ett klassificeringssystem.

Avsikten med en injektering är att skapa en tätande skärm mot ett vattenflöde. Skärmen skall uppfylla de ställda täthetskraven med hjälp av en bestämd inträngningslängd och sprickutfyllnad. Inträngningslängden och sprickutfyllnaden kan styras under injekteringen med hjälp av injekteringsvolymen. Med hjälp av en teoretisk modell som beskriver injekteringsvolymen skulle inträngningslängden och sprickutfyllnaden således indirekt kunna kontrolleras. Tre modeller, med varierande detaljeringsgrad, har tagits fram med avseende på bergets sprickplansgeometri. I modellerna har teoretiska och empiriska samband, för att bestämma injekteringsvolymen, utvecklats, baserade på två tidigare arbeten (Hässler, 1991 och Håkansson, 1993).

Den enklaste modellen beskriver injekteringen i ett tänkt cirkulärt sprickplan. Geometrin hos det injekterade sprickplanet beskrivs med hjälp av inträngningslängden och resultat av vattenförlustmätningen. Den andra modellen beskriver injekteringen på samma sätt som den enklaste modellen, förutom att bruket är begränsat till en sektionsdel i det cirkulära sprickplanet. Den sista modellen beskriver injekteringen i ett kanalsystem, vars geometri beskrivs med hjälp av flera geologiska parametrar.

En litteraturstudie av sprickegenskaper har gjorts för att få ett bättre underlag till de sprickgeometriska antagandena som gjorts i modellerna. Denna litteraturstudie visar att de två första modellerna beskriver injekteringsvolymen på ett acceptabelt sätt medan faktorer som sprickvidd och inträngningslängd blir felaktiga. I den sista modellen beskrivs samtliga faktorer, såsom volym, sprickvidd och inträngninglängd, mer korrekt.

Modellerna har testats genom jämförelse, dels mellan uppmätta och beräknade volymer vid fyra olika fältinjekteringar, dels mellan uppmätta och beräknade sprickvidder vid fältstudier av injekterade sprickor.

Fältresultaten har gett en god uppfattning om vilka faktorer som mest påverkar injekteringsflöden i sprickor. Utvärderingen av fältresultaten bekräftar att tre huvudkategorier av faktorer tillsammans påverkar injekteringsresultatet, nämligen : injekteringstekniken, hydrologeologin och geologin.

Modellerna ger en bra uppfattning om den genomsnittliga mängden bruk, som kan förväntas för en serie injekteringshål. Den mest komplexa modellen ger de bästa resultaten vid jämförelse med de andra modellerna.

Vid användning av alla tre modellerna är en riktig utvärdering av brukets flytgräns (förutsätter ett stabilt bruk) och bergets transmissivitet av stor betydelse. En ytterligare viktig utgångspunkt för modellerna är att sprickornas utbredning är mycket större än brukets förväntade inträngningslängd.

Den mest komplexa modellen skulle kunna ligga till grund för ett framtida klassificeringssystem. Ett sådant system för att prognostisera och styra injekteringen bör vara indelat i de tre huvudfaktorerna, så att bergets hydrogeologi och geologi tillsammans med de ställda täthetskraven styr vilken injekteringsteknik som skall användas.

## SUMMARY

Grouting of rock is a very complex process. The grouting is governed by many factors such as hydrogeology and geological conditions, the grouting technology (grout mix, pressure and work methods), water inflow criteria and required durability. Knowledge of how the different factors influence the result is limited.

The purpose of this report is to describe a method to predict the grout volume which can also be used as a base for a classification system.

The aim of grouting is to create a watertight zone against water flow. This zone should fulfil a tightness requirement by grout penetrating a certain length of fractures and filling the aperture of these. The penetration length and filling of the aperture can be controlled by regulating the grouted volume. Three models have been developed, with different degrees of details, regarding the description of rock joints. Theoretical and empirical relationships, based on two earlier works (Hässler, 1991 and Håkansson, 1993), have been used and developed to predict the volume.

The first model simulated fractures to be grouted as circular discs. The geometry of the grouted part of the discs was characterized by the penetration length and water loss measurement. The second model described the grouting in the same way as the first model but the grout only penetrates a certain section of the disc. The last model, the most complex one, described the grout as penetrating a system of channels with a geometry characterized by a number of geological parameters.

A literature survey of joint properties has been carried out to find support for the joint geometry assumptions that have been used for the models. This study shows that the first two models described the volume in an acceptable way but factors like aperture and penetration length are incorrectly described. In the last model the volume, aperture and penetration length are described more correctly .

The models have been tested by comparison ; (i) between measured and calculated grouting volume, in four different field studies ; (ii) between measured and calculated aperture, in a detailed study of grouted joints.

The field studies have resulted in an enhanced understanding of the most important factors which control the grout flow in joints. The analysis of the tests confirms the importance of the three main categories of factors which together control the grouting : grouting technology (pressure and grout mix properties), hydrogeology (transmissivity and fracture porosity) and geology (number of fractures, fracture aperture and geometry).

The models show a good agreement as regards the mean value of grouted volumes, for a number of grouting holes. The most complex model gave the best results compared with the other models. For all models a good evaluation of the yield value of the grouting material and the transmissivity of the rock mass are very important. It is also important to note that the models are based on the assumption that the extension of the joints is much larger than the anticipate grout penetration length.

It is proposed that a future grouting classification system should be based on the most complex model. Such a system to prognosticate and govern the grouting process and result must be based on the three main categories of parameters, so that the hydrogeology and geology as well as the prescribed tightness requirements will be taken into account to control the grout technology to be used.

# INNEHÅLLSFÖRTECKNING

|                                                                        |           |
|------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>FÖRORD.....</b>                                                     | <b>i</b>  |
| <b>SAMMANFATTNING .....</b>                                            | <b>ii</b> |
| <b>SUMMARY .....</b>                                                   | <b>iv</b> |
| <b>INNEHÅLLSFÖRTECKNING.....</b>                                       | <b>vi</b> |
| <b>NOMENKLATUR.....</b>                                                | <b>ix</b> |
| <br>                                                                   |           |
| <b>1 INLEDNING .....</b>                                               | <b>1</b>  |
| 1.1 Bakgrund .....                                                     | 1         |
| 1.2 Målsättning .....                                                  | 2         |
| 1.3 Omfattning.....                                                    | 2         |
| <b>2. MODELLER FÖR INJEKTERING I ENSKILDA SPRICKOR.....</b>            | <b>5</b>  |
| 2.1 Bakgrund .....                                                     | 5         |
| 2.2 Sprickplansmodell I .....                                          | 7         |
| 2.3 Sprickplansmodell II .....                                         | 9         |
| 2.4 Sprickplansmodell III .....                                        | 12        |
| <b>3. LITTERATURSTUDIE AV SPRICKEGENSKAPER.....</b>                    | <b>17</b> |
| 3.1 Bakgrund .....                                                     | 17        |
| 3.2 Enskild spricka.....                                               | 18        |
| 3.2.1 Allmän sprickbeskrivning.....                                    | 18        |
| 3.2.2 Spricköppningsgeometrin.....                                     | 21        |
| 3.3 Spricksystem.....                                                  | 33        |
| 3.3.1 Bergmassevolymens egenskaper.....                                | 33        |
| 3.3.2 Frekvensen av vatten- och injekteringsförande sprickor.....      | 37        |
| 3.4 Slutsatser.....                                                    | 37        |
| <b>4 APPLIKATION AV SPRICKPLANSMODELLERNA VID FÄLTINJEKTERING.....</b> | <b>41</b> |
| 4.1 Samband för beräkningar och parameterbestämning .....              | 41        |
| 4.1.1 Allmänt .....                                                    | 41        |
| 4.1.2 Tillförlitligheten och jämförelser av sprickplansmodellerna .... | 41        |
| 4.1.3 Samband för modell I :.....                                      | 42        |

|                                                                |           |
|----------------------------------------------------------------|-----------|
| 4.1.4 Samband för modell II :                                  | 43        |
| 4.1.6 Samband för modell III :                                 | 45        |
| 4.2 Äspötunneln, Oskarshamn.....                               | 47        |
| 4.2.1 Allmänt.....                                             | 47        |
| 4.2.2 Resultat.....                                            | 48        |
| 4.2.3 Övrigt.....                                              | 51        |
| 4.2.4 Diskussion.....                                          | 52        |
| 4.3 LaFortuna-dammen, Panama.....                              | 53        |
| 4.3.1 Allmänt.....                                             | 53        |
| 4.3.2 Resultat.....                                            | 54        |
| 4.3.3 Övrigt.....                                              | 58        |
| 4.3.4 Diskussion.....                                          | 59        |
| 4.4 Uritunneln, Indien.....                                    | 59        |
| 4.3.1 Allmänt.....                                             | 59        |
| 4.3.2 Resultat.....                                            | 61        |
| 4.3.4 Diskussion.....                                          | 62        |
| 4.5 Transporttunnel under Kungliga Biblioteket, Stockholm..... | 62        |
| 4.3.1 Allmänt.....                                             | 62        |
| 4.3.2 Resultat.....                                            | 63        |
| 4.3.3 Diskussion.....                                          | 65        |
| 4.7 Slutsatser vid fältapplikationer.....                      | 66        |
| <b>5 STUDIE AV INJEKTERADE SPRICKOR, Äspö.....</b>             | <b>69</b> |
| 5.1 Bakgrund.....                                              | 69        |
| 5.2 Uppmätta sprickor.....                                     | 69        |
| 5.2.1 Allmänt.....                                             | 69        |
| 5.2.2 Mätmetod.....                                            | 70        |
| 5.2.3 Geologi.....                                             | 70        |
| 5.2.4 Resultat av sprickviddsmätning.....                      | 71        |
| 5.2.5 Diskussion.....                                          | 72        |
| 5.2.6 Slutsatser.....                                          | 74        |
| 5.3 Beräknad vidd - detaljerad geologi.....                    | 74        |
| 5.3.1 Allmänt för beräkningar och geologi.....                 | 74        |
| 5.3.2 Hydrauliska vidden.....                                  | 76        |
| 5.3.3 Mekaniska vidden.....                                    | 77        |
| 5.3.4 Grunddata för beräkningar av injekteringsvidder.....     | 78        |
| 5.3.5 Vidd modell I.....                                       | 80        |
| 5.3.6 Vidd modell II.....                                      | 81        |

|          |                                                  |            |
|----------|--------------------------------------------------|------------|
| 5.3.7    | Vidd modell III.....                             | 82         |
| 5.4      | Beräknad vidd - allmän geologi.....              | 84         |
| 5.4.1    | Allmänt.....                                     | 84         |
| 5.4.2    | Resultat vidd.....                               | 84         |
| 5.5      | Diskussion av resultatet.....                    | 85         |
| 5.5.1    | Inledning.....                                   | 85         |
| 5.5.2    | Jämförelse mellan uppmätt och beräknad vidd..... | 90         |
| 5.5.3    | Geologiska parametrar.....                       | 93         |
| 5.5.4    | Slutsatser.....                                  | 94         |
| <b>6</b> | <b>SLUTSATSER.....</b>                           | <b>97</b>  |
|          | <b>REFERENSER .....</b>                          | <b>103</b> |
|          | <b>BILAGOR.....</b>                              | <b>109</b> |

## NOMENKLATUR

|            |                                                                      |                     |
|------------|----------------------------------------------------------------------|---------------------|
| $I_I$      | maximala inträngningen i modell I                                    | [m]                 |
| $I_{II}$   | maximala inträngningen i modell II                                   | [m]                 |
| $I_{III}$  | maximala inträngningen i modell III                                  | [m]                 |
| $L_b$      | borrhålets längd                                                     | [m]                 |
| $L$        | borrhålets influensradie                                             | [m]                 |
| $N$        | antalet sprickplan som skär ett borrhål                              | [st]                |
| $N_w$      | antalet vattenförande sprickplan som skär borrhål                    | [st]                |
| $N_g$      | antalet injekterade sprickplan som skär ett borrhål                  | [st]                |
| $Q_w$      | flödet från vattenförlustmätningen                                   | [m <sup>3</sup> /s] |
| $T$        | transmissiviteten                                                    | [m <sup>2</sup> /s] |
| $T_i$      | transmissiviteten i ett speciellt hål                                | [m <sup>2</sup> /s] |
| $V_I$      | beräknad volym i modell I                                            | [m <sup>3</sup> ]   |
| $V_{II}$   | beräknad volym i modell II                                           | [m <sup>3</sup> ]   |
| $V_{III}$  | beräknad volym i modell III                                          | [m <sup>3</sup> ]   |
| $V_{ber}$  | beräknad volym                                                       | [m <sup>3</sup> ]   |
| $V_i$      | uppmätt volym i ett speciellt hål                                    | [m <sup>3</sup> ]   |
| $V_{inj}$  | uppmätt volym                                                        | [m <sup>3</sup> ]   |
| $V_{tot}$  | uppmätt volym i flera hål                                            | [m <sup>3</sup> ]   |
| $W$        | borrhålets omkrets                                                   | [m]                 |
| $\Delta P$ | tryckskillnaden mellan pålagd injekteringstryck och grundvattentryck | [Pa]                |

|                        |                                                                |                      |
|------------------------|----------------------------------------------------------------|----------------------|
| $\Delta P_w$           | tryckskillnaden mellan pålagd vattentryck och grundvattentryck | [Pa]                 |
| $b_I$                  | sprickvidden i modell I                                        | [m]                  |
| $b_{II}$               | sprickvidden i modell II                                       | [m]                  |
| $b_g$                  | sprickkanalvidden i modell III                                 | [m]                  |
| $\bar{b}$              | medelsprickvidden i modell III                                 | [m]                  |
| $b$                    | aritmetiska medelvidden                                        | [m]                  |
| $b_{\text{harm}}$      | harmoniska medelvidden                                         | [m]                  |
| $b_i$                  | vidden i en punkt på sprickplanet                              | [m]                  |
| $b_{\text{hyd}}$       | hydrauliska vidden                                             | [m]                  |
| $b_{g, \text{tot}}$    | kanalmedelvidden längs den maximala inträngningen              | [m]                  |
| $b_{\text{kon}}$       | kanalvidden i sprickans högkonduktiva område                   | [m]                  |
| $b_{\text{kanal}}$     | kanalvidden i sprickans mindre konduktiva område               | [m]                  |
| $b_{\text{hyd}}$       | hydrauliska vidden                                             | [m]                  |
| $g$                    | jordaccelerationen                                             | [m/s <sup>2</sup> ]  |
| $r_w$                  | borrhålsradien                                                 | [m]                  |
| JRC                    | råhetskoefficienten "joint roughness coefficient"              |                      |
| RMR                    | bergklassificeringssystem "rock mass rating"                   |                      |
| $\alpha$               | sektionsvinkeln (spridningsvinkeln) i modell II                | [rad]                |
| $\alpha_{\text{vald}}$ | sektionsvinkeln baserat på RMR                                 | [rad]                |
| $\mu_w$                | vattnets viskositet                                            | [Pa s]               |
| $\rho_w$               | vattnets densitet                                              | [kg/m <sup>3</sup> ] |
| $\sigma$               | standardavvikelsen                                             | [m]                  |

|           |                                                                                      |      |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------|------|
| $\tau_o$  | injekteringsmedlets skjuvhållfasthet (flytgräns)                                     | [Pa] |
| $\beta$   | kvoten mellan totala arean för spricksystemet och arean för det primära sprickplanet |      |
| $\psi$    | kvoten mellan $N_g$ och $N_w$                                                        |      |
| $\kappa$  | kvoten mellan $b_g$ och $b_{hyd}$                                                    |      |
| $\lambda$ | kvoten mellan den krokiga inträngningsvägen och den radiella vägen                   |      |
| $\theta$  | kvoten mellan $\bar{b}$ och $b_{hyd}$                                                |      |

# 1 INLEDNING

## 1.1 Bakgrund

Grundvattenflöden i bergssprickor kan orsaka många problem, såsom grundvattensänkning, inläckage till bergtunnlar, läckageförluster under vattenkraftdammar eller i samband med lagring av kärnbränsleavfall. Ett vanligt sätt att lösa problemen är att stoppa eller minska vattenflödet i berget med hjälp av injektering, dvs att med ett övertryck pressa in ett injekteringsmedel i sprickor och hålrum.

Injektering i berg är en mycket komplex process som styrs av olika faktorer, såsom naturliga (bergets egenskaper och vattenförhållanden), påverkbara (injekteringsmedel, tryck och arbetsmetod) samt olika täthetskrav (inläckningskriterium och beständighet). Kunskapen om hur de olika faktorerna påverkar injekteringsresultatet är begränsad. Cementbaserade injekteringsmedel är idag de vanligaste materialen vid injektering.

Begreppet injektering nämndes för första gången för ungefär två hundra år sedan av en fransk ingenjör (Nonveiller, 1989). Utvecklingen sedan dess har till största delen ägt rum genom ett sk "trial-and-error" - förfarande där användbara och väl definierade metoder har saknats. Tillvägagångssättet har alltså oftast baserats på erfarenheter från tidigare injekteringsprojekt. Dessa erfarenheter kan dock vara svåra att överblicka och överföra från fall till fall. De första systematiska studierna av injekteringsförloppet påbörjades i Sverige kring 1970 av exempelvis Bergman et al (1970) och Lysén & Palmqvist (1976). Sedan början av 1980-talet (Hässler, et al 1986) har forskning bedrivits vid avdelningen för Jord- och Bergmekanik, KTH, i syfte att få en bättre kunskap om injekteringens styrmekanismer.

Forskningen har hitintills resulterat i två doktorsavhandlingar. Den första (Hässler, 1991) beskriver strömningsteorier för att simulera ett injekteringsförlopp med en Binghamvätska och metoder för att mäta flödesegenskaperna samt ger förslag till en klassificeringsmetodik. I den andra avhandlingen (Håkansson, 1993) beskrivs mätmetoder i laboratorium och fält av injekteringsmedlens strömningsegenskaper samt egenskapsförändringar hos olika cementsuspensioner. På grundval av dessa arbeten har teoretiska och empiriska samband utvecklats för att kunna förutbestämma volymåtgång vid injektering och även kunna styra

förloppet. Sambanden beskrivs i denna rapport och tillämpas för att testa och verifiera sambanden.

## 1.2 Målsättning

Målsättningen med denna etapp i forskningsarbetet som bedrivs på avdelningen Jord- och Bergmekanik inom SveBeFo's ramprogram, är att med definierade samband erhålla ett mer förutsägbart och kontrollerat injekteringsförlopp vid injektering med cementbaserade bruk. Syftet med denna rapport är att beskriva en metodik för att bestämma en förväntad injektering, dvs att få en bättre förståelse för de viktigaste mekanismerna vid injektering och att föreslå ett klassificeringssystem med avseende på hydrogeologin och geologin för att kunna välja lämpligt injekteringsmedel och tryck.

Injekteringsens spridning i berg kan bland annat kontrolleras genom injekteringsvolymen, vilken beror av inträngningen i sprickor. Spridningen och inträngningen beror i sin tur på flera faktorer. Huvudfaktorn är själva flödesmotståndet i sprickorna, dvs hur långt medlet kan tränga in i sprickorna innan det blir ett stopp, vilket i huvudsak beror på sprickvidden och flödesegenskaperna hos injekteringsmedlet. Övriga faktorer som bidrar till en god tätning är medlets utfyllnadsförmåga i sprickorna och dess penetrationsförmåga i vattenförande sprickor så att inläckningen reduceras till önskad storlek.

## 1.3 Omfattning

Kapitel två beskriver injektering med tre sprickplansmodeller, baserad på olika geometriska antaganden av sprickor i berg. På grundval av sprickplansmodellerna kan beräkningar av injekteringsens spridning (injekteringsvolymen och inträngningslängder) göras med hjälp av indata från de olika injekteringsfaktorerna (teknik, hydrogeologi samt geologi). Dessa modeller har även beskrivits i tidigare rapporter (Janson, 1993) och (Stille et al, 1993, 1994).

Kapitel tre är en litteraturstudie rörande sprickor och flöden i sprickor, främst koncentrerad på egenskaper som antagits i sprickplansmodellerna.

I kapitel fyra testas modellernas tillförlitlighet genom att beräkna injekteringsens volym, spricköppningen och inträngningslängden för olika utförda injekteringar. Slutligen jämförs de beräknade resultaten med uppmätta eller uppskattade värden. De olika injekteringsprojekten är arbeten utförda i Äspötunneln (Oskarshamn), LaFortuna-dammen

(Panama), Uritunneln (Indien) och Kungliga Bibliotekets bergrum (Stockholm). Jämförelsen mellan verklig och förväntad injektering ger en uppfattning om hur väl teorierna överensstämmer med praktisk injektering samt en förståelse av de mekanismer som styr injekteringen.

I kapitel fem redovisas en detaljstudie av injekterade sprickor i fält (Äspötunneln). För att verifiera modellernas olika antaganden görs en jämförelse mellan uppmätta sprickvidder fyllda med injekteringsbruk och beräknade. En analys görs också för att bestämma storleken av modellernas olika geologiska parametrar samt för att utröna om några speciella kännetecken kan observeras för de studerade sprickorna.

I kapitel sex avslutas rapporten med en redovisning av de viktigaste slutsatserna.

## 2. MODELLER FÖR INJEKTERING I ENSKILDA SPRICKOR

### 2.1 Bakgrund

En bergmassa består av bergmaterial och sprickor. Sprickorna kan vara fyllda med olika sprickmaterial eller vara helt eller delvis öppna. De helt eller delvis öppna sprickorna kan vara vattenförande, om vatten finns och om det förekommer en tryckgradient.

Avsikten med en injektering är att skapa en tätande skärm mot ett vattenflöde, exempelvis runt ett hålrum i berget. Skärmen skall uppfylla de ställda täthetskraven med hjälp av en bestämd inträngning och sprickutfyllnad. Att kontrollera brukets inträngning och sprickutfyllnad i berget på ett enkelt sätt är dock svårt pga bergets komplexa uppbyggnad. Däremot kan injekteringsvolymen kontrolleras på ett enkelt sätt genom att mäta inpumpad mängd i berget. Den förväntade volymen skulle kunna beräknas med hjälp av inträngningslängden och bergets "öppenhet" (porositet) för använt injekteringsbruk. Inträngningslängden är beroende av tryck, typ av injekteringsbruk samt bergets spricköppning (Hässler, 1991). Vidare antas att bergets porositet kan beskrivas på ett enkelt sätt med förenklade sprickgeometrier. Av ovanstående resonemang skulle således inträngningslängden och sprickutfyllnaden kunna styras under injekteringen med hjälp av injekteringsvolymen. Genom en modell som beskriver injekteringsvolymen skulle indirekt inträngningen och sprickutfyllnaden således kunna kontrolleras.

Ett normalt hårt berg innehåller vanligtvis flera sprickor som påverkar vattenströmningen i bergmassan. Vattenströmningen är också beroende av de enskilda sprickornas egenskaper och av hur de är sammanbundna. Ett mycket uppsprucket berg med en stor bergmassa skulle kunna liknas vid ett poröst medium vid modellering av vattenströmningen. En injektering däremot påverkar vanligtvis ett begränsat antal sprickor. Injekteringsbruket har normalt en högre viskositet än vatten samt en flytgräns (skjuvspänning), detta ökar kraven på en geometrisk beskrivning av injekteringsmodellerna (Hässler, 1991). Allt detta leder till att bergmassan bör beskrivas som diskreta sprickplan vid beräkning av injektering i berg.

Injekteringsbruket har en begränsad inträngningsförmåga vid användandet av stabila cementbaserade injekteringsmedel. Den begränsade inträngningen beror på två huvudfaktorer, dels sprickvidden, dels brukets reologiska egenskaper, flytgränsen (Håkansson, 1993). Den minsta vidden är beroende av cementens kornstorlek. En allmän tumregel som vanligtvis används är att vidden bör vara 3-5 gånger större än maximal kornstorlek (Mitchell, 1970, Bergman et al, 1970). Dessa två begränsande faktorer finns dock ej för vattenflöden i sprickor. Således är en hundra procentig tätning mot vatten i sprickor med ett cementbaserat injekteringsmedel ej möjlig.

Sprickan som injekteringen startar i har även en begränsad utbredning, både med avseende på den öppna injekteringsbara delen och sprickan i sin helhet. Dock kan sprickan korsas av andra injekteringsbara sprickor, så att ett system av korsande sprickor i bergmassan påverkar spridningen av bruket och åtgången. Antalet korsande sprickor är bland annat beroende av sprickfrekvensen för var och en av de olika sprickgrupperna.

För att kunna förutse injekterings spridning i berget måste således den enskilda sprickan och spricksystemets geometri kunna beskrivas väl. Med hänsyn till alla ovanstående hänsyn har tre olika modeller i varierande detaljeringsgrad tagits fram, som beskriver injekterings inträngning, injekterad volym och spricköppningen i berget (Janson, 1993, Stille et al, 1993, 1994). De geometriska antagandena är de som i första hand skiljer sig mellan modellerna. Nedan följer en kort beskrivning av respektives modells geometriska antagande :

**Modell I** : Injekteringen antas ske i ett cirkulärt sprickplan symmetriskt utifrån borrhålet, dock med samma penetreringsförmåga som vattnet.

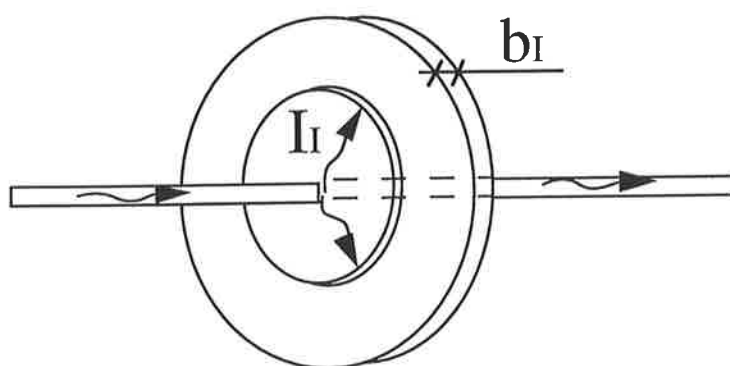
**Modell II** : Injekteringen antas ske i ett kanalsystem ut från borrhålet. Det injekterade kanalsystemet förenklas ner (projekteras) till en sektionsdel (tårtbit) på ett parallellt cirkulärplan. Teorierna bygger på den tänkta sektionsdelen i sprickplanet, även i denna modell antas det att bruket har samma penetreringsförmåga som vatten.

**Modell III** : Injekteringen antas ske i ett sprickplanssystem med det primära planet ut från borrhålet. Modellen är en utveckling av modell I men med större hänsyn till bergets egenskaper samt skillnaden mellan vattnets och injekteringsbrukets spridning och penetreringsförmåga i berg. Speciellt beaktas kanalströmning.

## 2.2 Sprickplansmodell I

### Antagande

Modellen är baserad på att injekteringen sker i plana cirkulära sprickskivor med en konstant spricköppning  $b_I$ , se figur 2.1. Sprickplanet genomskärs i centrum av borrhålet och injekteringsmedlet från borrhålet fyller ut skivan symmetriskt från centrum. Utfyllnaden sker med en inträngningslängd  $I_I$ . Antalet injekteringsbara sprickplan längs borrhålet antas vara samma som de antagna vattenförande sprickplanen. Spricköppningen ( $b_I$ ) för sprickplanet beräknas utifrån bergets transmissivitet ( $T$ ).



Figur 2.1: Modell I injekteringen sker i ett cirkulärt sprickplan.

*Figure 2.1 : In model I the penetration takes place in a circular disc.*

För att modellen skall gälla måste även följande villkor uppfyllas :

- Att injekteringen har skett till stopp, dvs ej någon mer inträngning av injekteringsmedlet i sprickorna.
- Att laminär strömning föreligger.
- Att tryckskillnaden ( $\Delta P$ ) och medlens egenskaper ( $\tau_0$ ) är kända och har ett konstant värde under injekteringen.
- Att injekteringsmedlet är separationsstabil och har en god filtreringsstabilitet under hela injekteringsförloppet.
- Att ingen deformation av sprickorna sker.

### Samband

Inträngningslängden för injekteringen, dvs utfyllnadens radie från borrhålet, kan uttryckas enligt Hässler (1991) som :

$$I_I = \frac{\Delta P \cdot b_I}{2 \cdot \tau_0} \quad (2:11)$$

där  $\Delta P$  är tryckskillnaden mellan det pålagda injekteringsstrycket [Pa] och grundvattenstrycket [Pa] och  $\tau_0$  är injekteringsmedlets skjuvhållfasthet [Pa] (Håkansson et al 1991).

Injekteringsvolymen för utfyllnaden i sprickplanet kan uttryckas som :

$$V_I = I_I^2 \cdot b_I \cdot \pi \quad (2:12)$$

Vanligtvis utförs en vattenförlustmätning av bergmassan med hjälp av en manschettmätning. Manschettmätningen avskärmar ett stycke av ett borrhål i en bergmassa med gummipackning, varvid vatten injiceras i borrhålet. Från vattenförlustmätningen kan då följande uttryck för transmissiviteten (T) skrivas (Gustafson 1986) :

$$T = \frac{Q_w \cdot \rho_w \cdot g \cdot P_{Dw}}{\Delta P_w \cdot 2 \cdot \pi}$$

och med en tolkning av sprickplanen, om samtliga sprickplan längs borrhålet antas till samma sprickvidd :

$$T = \frac{N_w \cdot b_{hyd}^3 \cdot \rho_w \cdot g}{12 \cdot \mu_w} \quad (2:13)$$

där  $Q_w$  är flödet från vattenförlustmätningen [ $m^3/s$ ],  $\Delta P_w$  för tryckskillnaden mellan pålagt vattentryck och grundvattentryck [Pa],  $\mu_w$  för vattnets viskositet ( $1.3 \cdot 10^{-3}$  Pas),  $N_w$  är antalet vattenförande sprickor längs borrhålet [st],  $b_{hyd}$  är spricköppningen vid vattenförlustmätningen (hydrauliska spricköppningen) [m] och  $P_{Dw}$  är en funktion av borrhåls längden och dess radie, dvs det dimensionslösa uttrycket (Gustafson 1986) :

$$P_{Dw} = \ln \frac{L_b}{r_w}$$

Sambandet för inträngningslängden ( $I_n$ ) samt antagandet av antalet sprickplan (N) som skär borrhålet ger följande uttryck för den förväntade injekteringsvolymen i ett enskilt borrhål :

$$V_I = \left( \frac{\Delta P}{2 \cdot \tau_0} \right)^2 \cdot N \cdot b_I^3 \cdot \pi \quad (2:14)$$

eller baserat på transmissiviteten, där antagandet att  $b_I$  respektive  $N$  är lika med  $b_{hyd}$  respektive  $N_w$  :

$$V_I = \left( \frac{\Delta P}{2 \cdot \tau_0} \right)^2 \cdot \frac{12 \cdot T \cdot \mu_w}{\rho_w \cdot g} \cdot \pi \quad (2:15)$$

För modell I kan den förväntade volymen beräknas utifrån transmissiviteten. Genom uppskattning av antalet vattenförande sprickor ( $N_w$ ) kan spricköppningen ( $b_I$ ), och därmed även inträngningslängden  $I_I$ , beräknas för den förväntade injekteringen.

#### *Olika parametrar för modell I*

För att beskriva modellernas komplexitet har de ingående faktorerna indelats i kända, antagna och beräknade enligt tabell 2.1, dvs för att i modell I kunna beräkna  $V_I$ ,  $b_I$  och  $I_I$  måste  $N_w$  antas, om  $T$ ,  $\Delta P$  och  $\tau_0$  är kända.

**Tabell 2.1.** De olika parametrarna för modell I.

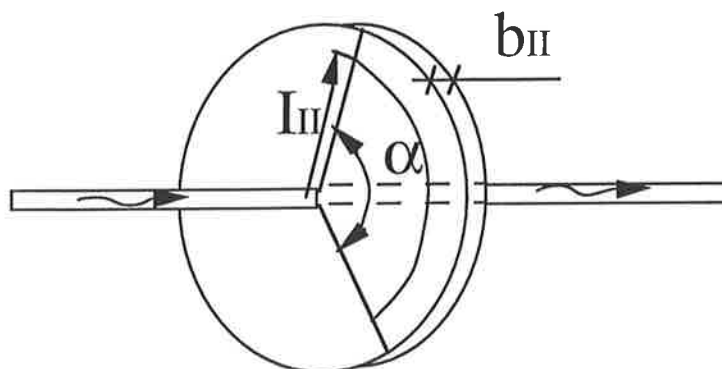
| Kända                 | Antagna | Beräknade       |
|-----------------------|---------|-----------------|
| $T, \Delta P, \tau_0$ | $N_w$   | $V_I, b_I, I_I$ |

## 2.3 Sprickplansmodell II

#### *Antaganden*

Denna modell är en förenkling av Hässlers (1991) "Geometrisk modell för klassificering av berget". Principen är att injekteringen ut från borrhålet antas ske i kanalsystem ut i berget. Kanalsystemet förenklas ner (projekteras) till ett tänkt plan med en grad av öppenhet för injektering. Ytorna av de injekteringsbara kanalerna i planet summeras och beskrivs som en sektionsdel (tårtbit) i det cirkulära sprickplanet med en sektionsvinkel och en öppning  $b_{II}$ , se figur 2.2. Sektionsvinkeln benämns som spridningsvinkeln  $\alpha$  och beror på bergets geologi, dvs hur inträngningen av injekteringsmedlet utbreder sig i det aktuella berget. Sprickplanets radie är summan av borrhålets radie  $r_w$  och borrhålets

influensavstånd,  $L$ , medan sektionsdelens utfyllnadslängd är inträngningslängden för injekteringen. Antalet injekteringsbara sprickplan längs borrhålet antas vara samma som de vattenförande sprickplanen.



Figur 2.2: Modell II injekteringen sker i en sektionsdel med vinkeln  $\alpha$

*Figure 2.2 : In model II the penetration takes place in a part of a disc.*

För att modellen skall gälla måste även följande villkor uppfyllas :

- Att injekteringen har skett till stopp, dvs ej någon mer inträngning av injekteringsmedlet i sprickorna.
- Att laminär strömning föreligger.
- Att tryckskillnaden ( $\Delta P$ ) och medlens egenskaper ( $\tau_0$ ) är kända och har ett konstant värde under injekteringen.
- Att injekteringsmedlet är separationsstabil och har en hög filtreringsstabilitet under hela injekteringsförloppet.
- Att spridningsvinkeln  $\alpha$  kan uppskattas utifrån en bergkartering.
- Att ingen deformation av sprickorna sker.

#### *Samband*

Inträngningslängden av injekteringen i sektionsdelen kan uttryckas enligt Hässler (1991 ) som :

$$I_{II} = \frac{\Delta P \cdot b_{II}}{2 \cdot \tau_0} \quad (2:21)$$

där  $\Delta P$  är tryckskillnaden mellan det pålagda injekteringstrycket [Pa] och grundvattenstrycket [Pa] och  $\tau_0$  är injekteringsmedlets skjuvhållfasthet [Pa] (Håkansson et al 1991).

Injekteringsvolymen för sektionsdelen i sprickplanet kan beräknas som :

$$V_{II} = I_{II}^2 \cdot b_{II} \cdot \frac{\alpha}{2} \quad (2:22)$$

och med samtliga sprickplan (N) längs borrhålet, om samtliga sprickplan längs borrhålet antas till samma sprickvidd :

$$V_{II} = \left( \frac{\Delta P}{2 \cdot \tau_0} \right)^2 \cdot N b_{II}^3 \cdot \frac{\alpha}{2} \quad (2:23)$$

Utifrån vattenförlustmätning i ett borrhål som skall injekteras kan följande uttryck ställas upp (Hässler 1991) :

$$Q_w = \frac{\Delta P_w \cdot N b_{II}^3}{12 \cdot \mu_w} \cdot \frac{\alpha}{\ln(1 + \alpha \cdot L/W)} \quad (2:24)$$

där  $b_{II}$  är spricköppningen för sektionsdelen [m] och kan beräknas, om varje enskild kanalöppning  $b_i$  längs kanalen vore känd, som det harmoniska medelvärde av sprickvidderna , se appendix A, dvs :

$$\frac{1}{b_{II}} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{b_i}$$

$\alpha$  är den öppna del av sprickplanet där injekteringen kan tränga in, dvs en sektionsvinkel [rad]; L är influensavståndet till områdets yttre rand (cirka 200-500 gånger borrhålsradien dvs 5-15 m); W är borrhålets omkrets (vanligtvis ca 0,18 m);  $Q_w$  är flödet från vattenförlustmätningen [m<sup>3</sup>/s] och  $\Delta P_w$  för tryckskillnaden mellan pålagd vattentryck [Pa] och grundvattentryck [Pa].

Av vattenförlustmätningen och uppskattning av spridningsvinkeln ( $\alpha$ ) kan den förväntade volymen beräknas för modellen. Genom uppskattning av antalet sprickor (N) längs borrhålet kan spricköppningen ( $b_{II}$ ) och därmed även inträngningslängden ( $I_{II}$ ) beräknas för den förväntade injekteringen.

#### *Olika parametrar för modell II.*

För att beskriva modellernas komplexitet har de ingående faktorerna indelats i kända, antagna och beräknade enligt tabell 2.2, dvs för att i modell II kunna beräkna  $V_{II}$ ,  $b_{II}$ , och  $I_{II}$  måste L, N och  $\alpha$  antas; om  $Q_w$ ,  $\Delta P_w$ ,  $\tau_0$ ,  $\Delta P$  och W är kända.

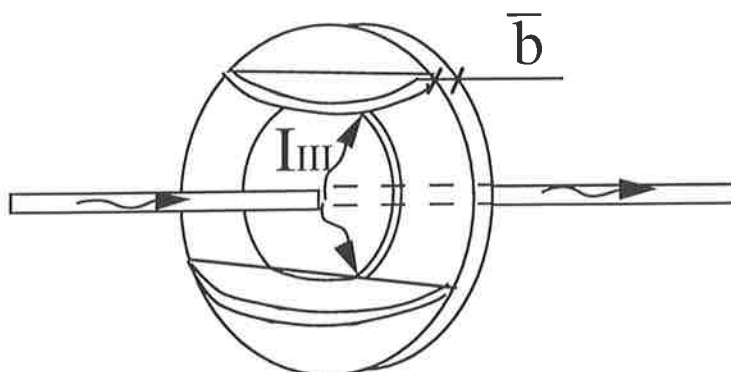
**Tabell 2.2.** De olika parametrarna för modell II.

| Kända                     | Antagna        | Beräknade                |
|---------------------------|----------------|--------------------------|
| $Q_w, \Delta P_w, \tau_0$ | $L, N, \alpha$ | $V_{II}, b_{II}, I_{II}$ |

## 2.4 Sprickplansmodell III

### Antaganden

Modell III är en utveckling av modell I, där försök att beskriva injekteringens inträngning i berget görs mer detaljerat än i tidigare modeller. Injekteringen i modell III sker ut från borrhålet i ett system av cirkulära sprickplan. När injekteringsbruket trycks in i sprickan, söker sig medlet den "lättaste vägen", dvs följer den största sprickvidden, och ett kanalmönster i sprickan bildas under injekteringen. Sprickplanen har en medelspricköppning  $\bar{b}$  och en utfyllnadslängd  $I_{III}$  av injekteringsmedel ut från borrhålet, se figur 2.3.



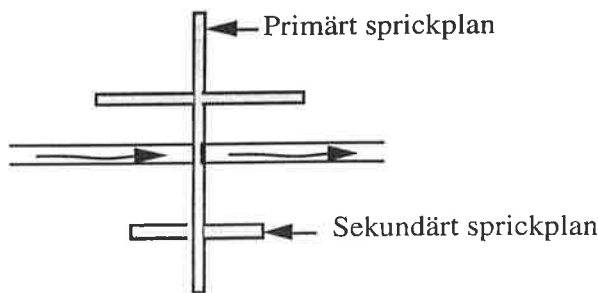
Figur 2.3. Modell II injekteringen sker i sprickplanssystem.

*Figure 2.3 : In model III the penetration takes place in a system of discs.*

Det primära sprickplanet ut från borrhålet skär även andra sprickplan (sekundära sprickplan) i berget, se figur 2.4. Sprickplanen är uppbyggda enligt samma princip som modell I men tar hänsyn till olika geologiska parametrar. Parametrarna tar hänsyn till bergets olika beteenden mellan inträngning av vattnet och injekteringsbruk, inträngningens krokiga väg i berget och effekten av sekundära sprickplanen. Injekteringsvolymen i modellen beräknas med hjälp av parametrarna  $\theta$ ,  $\beta$  och  $\psi$ . Medelspricköppningen  $\bar{b}$  för sprickplanet vid injekteringen kan beskrivas som produkten av parametern  $\theta$  och den uppskattade hydrauliska spricköppningen  $b_{hyd}$  från en vattenförlustmätning dvs :

$$\bar{b} = \theta \cdot b_{hyd}$$

Faktorn  $\beta$  är kvoten mellan den totala arean för spricksystemet och arean för det primära sprickplanet.



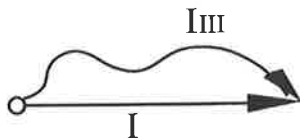
Figur 2.4. Injekteringen i modellen sker i primära och sekundära sprickplan.

*Figure 2.5 The grouting occur in primary and secondary discs.*

Antalet injekteringsbara sprickplan  $N_g$  som skär borrhålet bestäms som produkten av reduktionsparameten  $\psi$  och antalet vattenförande sprickplan  $N_w$  dvs :

$$N_g = \psi \cdot N_w$$

Inträngningslängden  $I_{III}$  beräknas med hjälp av parametrarna  $\kappa$  och  $\lambda$ , där  $\lambda$  är parametern för sprickkanalens krokighet i sprickplanet, dvs kvoten mellan den krokiga inträngningsvägen och den radiella vägen ut från borrhålet, se figur 2.5.



Figur 2.5 Sprickkanalens krokiga väg  $I_{III}$  i sprickplanet.

*Figure 2.5 The curve way  $I_{III}$  in a disc.*

Parametern  $\kappa$  beskrivs som kvoten mellan kanalöppningen  $b_g$  och den hydrauliska spricköppningen  $b_{hyd}$  från vattenförlustmätningen dvs :

$$\kappa = b_g / b_{hyd}$$

Vore varje enskild kanalöppning  $b_i$  längs den injekterade kanalen känd, skulle  $b_g$  och  $\bar{b}$  kunna beräknas utifrån  $b_i$ . Sprickplanets medelöppning  $\bar{b}$  beräknas som medelvärdet av de varierande sprickvidderna utmed hela sprickplanet dvs :

$$\bar{b} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} b_i$$

Sprickkanalens öppning  $b_g$  beräknas som det harmoniska medelvärde av sprickvidderna, se bilaga 1, dvs :

$$\frac{1}{b_g} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{b_i}$$

För att modellen skall gälla måste även följande villkor uppfyllas :

- Att injekteringen har skett till stopp, dvs ej någon mer inträngning av injekteringsmedlet i sprickorna.
- Att laminär strömning föreligger.
- Att tryckskillnaden ( $\Delta P$ ) och medlens egenskaper ( $\tau_0$ ) är kända och har ett konstant värde under injekteringen.
- Att de olika geologiska parametrarna  $\psi$ ,  $\kappa$ ,  $\lambda$ ,  $\theta$ ,  $\beta$  kan uppskattas, bl a utifrån en bergkartering.
- Att injekteringsmedlet är separationsstabil och har en god filtreringsstabilitet under hela injekteringsförloppet.
- Att ingen deformation av sprickorna sker.

### *Samband*

Inträngningslängden av injekteringen i sprickplanssystemet kan uttryckas som :

$$I_{III} = \frac{\Delta P \cdot b_g}{2 \cdot \tau_0 \cdot \lambda} \quad (2:31)$$

där  $\Delta P$  är tryckskillnaden mellan det pålagda injekteringsstrycket [Pa] och grundvattenstrycket [Pa] och  $\tau_0$  är injekteringsmedlets skjuvhållfasthet [Pa] (Håkansson et al 1991).

Injekteringsvolymen för sprickplanssystemet kan beräknas som :

$$V_{III} = I_{III}^2 \cdot \bar{b} \cdot \pi \cdot \beta \cdot N_g \quad (2:32)$$

En tolkning av transmissiviteten för sprickplanen ger (se ekvation 2:13) :

$$N_w b_{hyd}^3 = \frac{T \cdot 12 \cdot \mu_w}{\rho_w \cdot g} \quad (2:33)$$

Allt detta ger följande :

$$V_{III} = \left( \frac{\Delta P}{2 \cdot \tau_0} \right)^2 \cdot \frac{12 \cdot T \cdot \mu_w}{\rho_w \cdot g} \cdot \frac{\psi \cdot \kappa^2 \cdot \theta \cdot \beta \cdot \pi}{\lambda^2} \quad (2:34)$$

Av transmissiviteten och en uppskattning av de fem olika geologiska parametrarna kan den förväntade volymen beräknas. Genom uppskattning av antalet vattenförande sprickor ( $N_w$ ) kan även spricköppningen ( $b_g$ ) och därmed även inträngningslängden ( $I_{III}$ ) beräknas för den förväntade injekteringen.

#### *Olika parametrar för modell III*

För att beskriva modellernas komplexitet har de ingående faktorerna indelats i kända, antagna och beräknade enligt tabell 2.3, dvs för att i modell III kunna beräkna  $V_{III}$ ,  $b_g$  och  $I_{III}$  måste  $N_w$ ,  $\psi$ ,  $\kappa$ ,  $\lambda$ ,  $\theta$  och  $\beta$  antas, om  $T$ ,  $\Delta P$  och  $\tau_0$  är kända.

**Tabell 2.3.** De olika parametrarna för modell III.

| Kända                 | Antagna                                     | Beräknade               |
|-----------------------|---------------------------------------------|-------------------------|
| $T, \Delta P, \tau_0$ | $N_w, \psi, \kappa, \lambda, \theta, \beta$ | $V_{III}, b_g, I_{III}$ |

### 3. LITTERATURSTUDIE AV SPRICKEGENSKAPER

#### 3.1 Bakgrund

Syftet med följande litteraturstudie är att få ett bättre underlag till de sprickgeometriska antaganden som gjorts för sprickplansmodellerna i kapitel 2. Litteraturen om sprickor i hårt berg är mycket omfattande. Därför har i detta kapitel ett selektivt urval gjorts. Urvalet är främst koncentrerat till de sprickegenskaper som kan tänkas påverka spridningen av injektering i berget.

För transport av cementbaserade injekteringsmedel i sprickor har främst erfarenheter ifrån undersökningar av vattenströmning studerats. Den stora skillnaden mellan vatten och injekteringsbruk är brukets begränsade inträngningsförmåga i en enskild spricka. Detta innebär att det är färre sprickor i berget som är injekteringsförande än vattenförande.

I de, kapitel 2, beskrivna sprickplansmodellerna har olika sprickegenskaper antagits. Dessa egenskaper påverkar modellerna olika och värderas således olika, beroende på vilken effekt de har. Effekterna baseras på antaganden om injekteringens spridningsmekanismer i berget. De olika sprickegenskaper som har visat sig vara av huvudintresse för injekteringens spridning i berget kan grupperas i två nivåer. Den första nivån är egenskaper för den enskilda sprickan och den andra nivån är för spricksystemet.

De egenskaper som styr flödet i en enskild spricka är främst :

- Bildning och utseende, såsom sprickytor, olika spricktyper, spricköppning samt spricklängd.
- Spricköppningsgeometrin, såsom sprickvidd, kontaktytors andel, kanalmönster i sprickplanet, kanalöppning, sprickviddsfördelning samt injekteringsbrukets inträngningsförmåga i sprickan.

De olika egenskaper i ett spricksystem som styr flödet är främst :

- Bergmassans konduktivitet och sprickegenskaper såsom sprickfrekvens/avstånd, korsningar och orientering.
- Andelen vatten- och injekteringsförande sprickor.

Ytterligare faktorer som kan påverka injekteringsflödet i bergssprickor, men till vilka ingen direkt hänsyn har tagits i de beskrivna sprickplansmodellerna, är följande :

- Sprickråhet, fyllnadsmaterial, styvhet och korrelation mellan de olika sprickegenskaperna
- Spänningen och hållfastheten i berget
- Metoden vid injekteringsarbetet, såsom varierande injekteringstryck och injekteringsmedel

Undersökningar av andra bergegenskaper, såsom bergart (Palmqvist, 1983), har inte nämnvärt kunnat visas påverka injekteringens spridning i berget.

Kapitlet avslutas med en sammanfattning av de viktigaste slutsatserna baserad på litteraturstudien.

## 3.2 Enskild spricka

### 3.2.1 Allmän sprickbeskrivning

För att ett vätskeflöde i en enskild spricka skall kunna beskrivas måste följande tre geometriska antaganden göras (Pollard & Aydin, 1988) :

- (i) Sprickan har två relativt parallella ytor.
- (ii) Ytorna är relativt plana.
- (iii) Spricköppningen är relativt liten i förhållande till spricklängden.

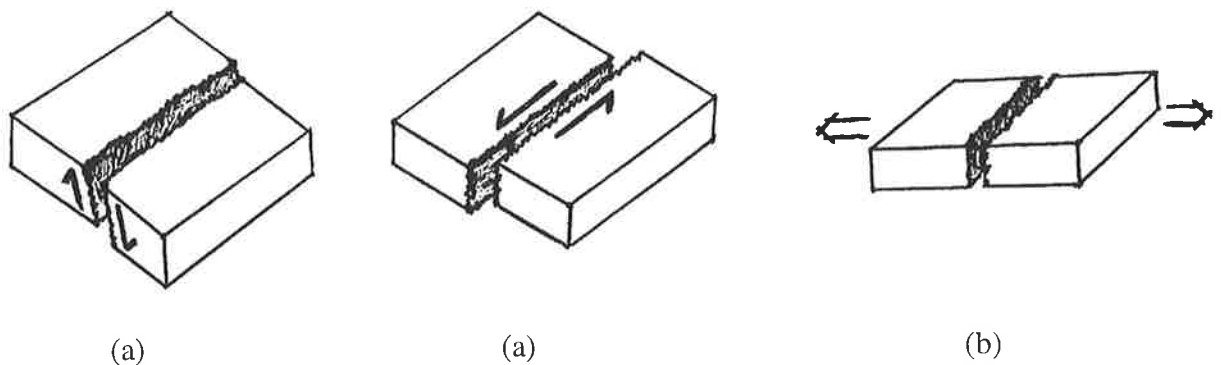
#### *Bildning och utseende*

Kunskapen om hur sprickor bildas i berg är bristfällig (Pollard & Aydin, 1988). Sprickor uppkommer vid avsvälning av lavaflöden eller vid uttorkning av sedimentära lager samt

vid spänningsförändringar i den hårda bergmassan. Deras utseende beror i huvudsak på spänningsbilden i berget, både sådan den är nu och sådan den var vid bildningen, samt de mekaniska och de fysikaliska egenskaperna i bergmassan.

En spricka består oftast av ett antal mindre spricksegment. Ett segmenten uppstår under ett kort tidsförlopp. Flera segment bildar tillsammans en "vanlig" spricka, där varje segment har sin egen struktur.

Grovt kan sprickor indelas i två olika spricktyper beroende på de spänningar som har påverkat eller bildat sprickan: dels sådana där ytorna endast är "isärdragna", dvs dragsprickor, dels sådana där sprickytorna är förskjutna i sidled, dvs skjuvsprickor, se figur 3.1. Vanligt är dock att sprickan eller berget har varit utsatt för flera olika tektoniska rörelser under olika tidsperioder. Spricköppningen är då oftast en kombination av drag- och skjuvrörelser, ibland som en mindre eller större förkastning. Förkastningssystem innehåller oftast enkla spricksegment, vilka är sammanslutna via komplexa sk "fault step". De olika spricktyperna har väsentligt olika flödes- och transportegenskaper (Tsang, 1990).



Figur 3.1 Skjuvsprickor (a) eller dragspricka (b) beroende på spänningsbilden

*Figure 3.1 Shear joints (a) or tension joint (b) depending on the stresses*

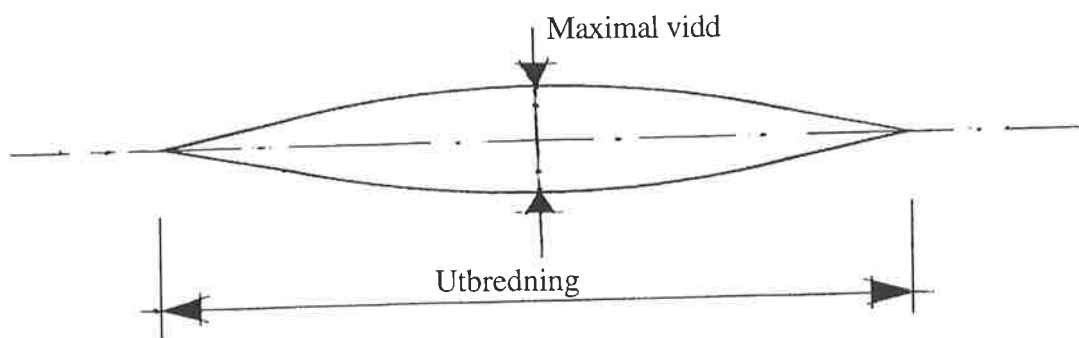
En spricka kan beskrivas som en tredimensionell struktur bestående av två motsatta ytor, som kan karaktäriseras som jämna, kontinuerliga och kurvplana linjer. Dessutom har en spricka en viss råhet med en skrovlig och randig textur som bildar ett asymmetriskt fiskfjällsliknande mönster. Ytstrukturen påminner om cirkulära eller elliptiska vågor, vilket kan identifieras som deformationsfronten vid sprickbildningsprocessen (Gabrielsen, 1990). Ytan har således en mer eller mindre oregelbunden vågighet, vilket kan karaktäriseras med exempelvis råhetsparametern "joint roughness coefficient", JRC (Barton & Chobey, 1977).

Sprickans utseende beror på bergets tektoniska historia, dvs vilka rörelser berget har varit utsatt för, vilka spänningar som verkar på sprickan samt mängden fast sprickfyllnadsmaterial. Allmänt kan sägas att spricköppningen minskar i storlek med ökat djup i berget, vilket gäller speciellt för dragsprickor, (Cunha, 1990). De största potentiella öppningarna i hårt berg finns normalt i följande ordning : dragsprickor, förkastningar (kombination av drag- och skjuvrörelser) och skjuvsprickor (Aydan & Kawameto, 1990), men där vertikala sprickor har de största öppningarna oavsett typ. Undersökningar ger att huvuddelen av de vattenförande sprickorna oftast är vertikala i hårt berg. Ett fåtal observationer (Mazurek et al, 1995) tyder på att de vattenförande sprickorna är parallella med den maximala tryckspänningsriktningen. Geologiska undersökningar utförda i ett begränsat antal tunnlar visar att stora vattenflöden oftast sker genom zoner med en hög frekvens av öppna dragsprickor som står i förbindelse med varandra (Watanabe, 1994).

Sprickfyllnadsmaterialet kan även påverka injekteringen beroende på om materialet är mjukt och löst eller fast och hårt. Löst material kan eventuellt komprimeras eller tryckas undan i sprickan av flödet (Pusch et al, 1985). Där sprickor med hårt material förekommer, exempelvis kvarts, har resultat visat att injekteringsens spridning minskar betydligt (Munier & Hermansson, 1994). Längre sprickor innehåller dock ofta en kombination av olika material.

### *Spricklängd*

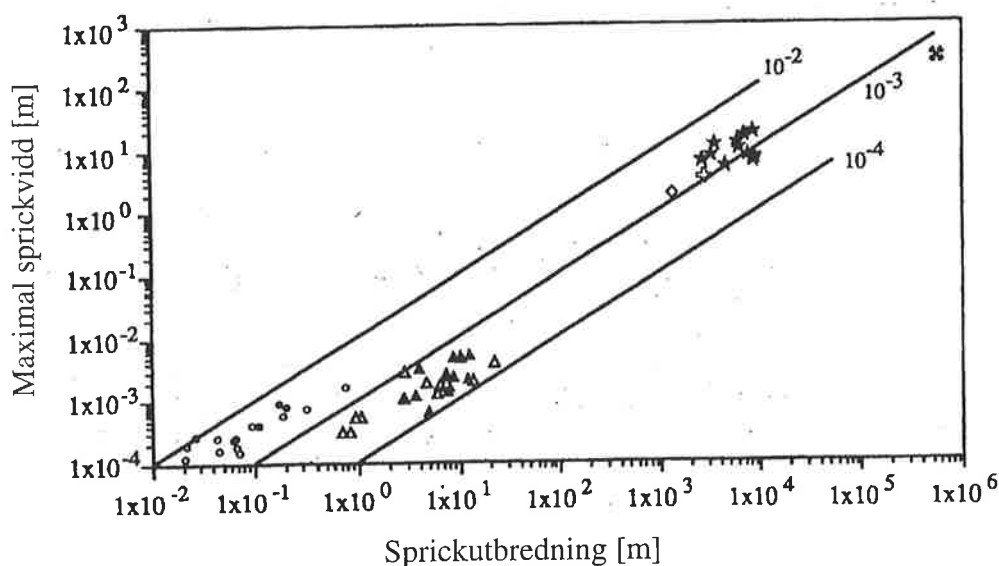
Den enskilda sprickans längd har också stor betydelse för injekteringsens spridning i bergmassan. En metod för att bestämma spricklängden är att utgå från sprickvidden och anta att berget är ett elastiskt material. Detta skulle ge ett linjärt förhållande mellan spricklängd och maximal sprickvidd. Förhållandet skulle således ge att långa sprickor är mer mottagliga för injekteringsbruk, vilket också finns bekräftat (Munier & Hermansson, 1994).



Figur 3.2 Idealiserad spricka med en maximal sprickvidd och utbredning

*Figure 3.2 Jonit with an idealized shape*

Sprickprofilen är ofta idealiserad som i figur 3.2. Sprickplan antas normalt ha en cirkulär form. Detta är dock orealistiskt för en bergmassa, eftersom berget i verkligheten ej är perfekt elastiskt. Vid olika fältmätningar av spricklängd och vidd har dock ett allmänt förhållande mellan längd och maximal vidd observerats, se figur 3.3, (Vermilje & Scholtz, 1995). För enstaka skjuvsprickor varierar förhållandet mellan  $5 \cdot 10^{-4}$  och  $5 \cdot 10^{-3}$  (maximal vidd mot längden), medan förhållandet är något högre för dragsprickor. Mindre sprickor är oftast isolerade segment, medan längre ofta består av ett antal parallella segment som binds ihop med varandra till en längre spricka, en så kallad multispricka. Således påverkas också förhållandet längd-vidd av längden på sprickan, i de fall där enstaka kortare sprickor har ett empiriskt förhållande av  $10^{-2}$  -  $10^{-3}$  och en multispricka  $10^{-3}$  -  $10^{-4}$ .



Figur 3.3 Sammanställning av olika fältmätningar mellan förhållandet maximal sprickvidd och utbredning (Vermilje & Scholtz, 1995)

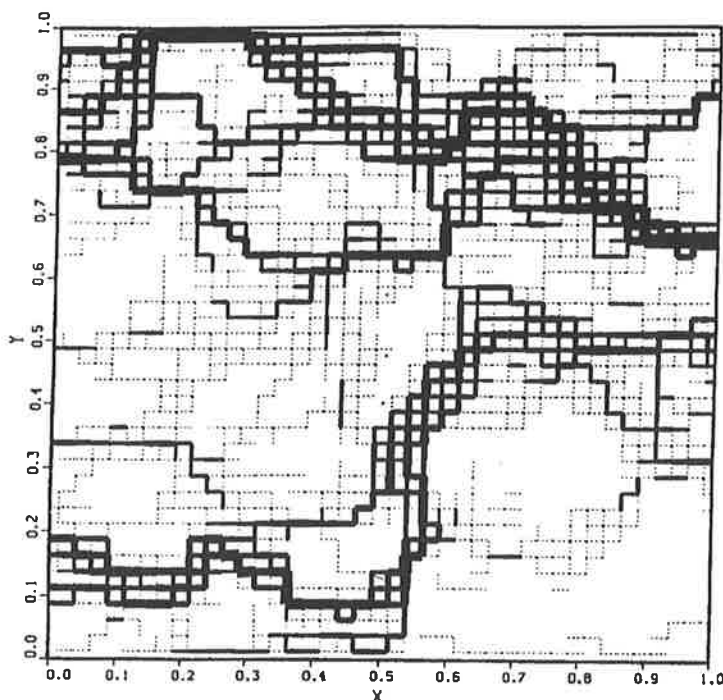
Figure 3.3 The relationship between maximum aperture and vein length from different field measurements (Vermilje & Scholtz, 1995)

### 3.2.2 Spricköppningsgeometrin

#### *Sprickvidden*

Sprickor har en vidd, dvs ett avstånd mellan sprickyterna. Sprickvidden är definierad som skillnaden mellan de två sprickyternas avstånd till ett referensplan som är parallellt med de båda sprickyterna. Denna sprickvidd inkluderar även kontaktpunkterna och

varierar från punkt till punkt utmed sprickplanet, från noll (dvs täta kontaktytor) till vanligtvis millimeterstora öppningar pga sprickans råhet. Sprickvidden är den mest väsentliga parametern för transport av vätska i berg. Flödet genom en spricka är fundamentalt olik flödet genom ett poröst medium. I en spricka sker flödet i tvådimensionella plan och är direkt beroende av sprickviddsfördelningen (Gale, 1990). Flödesmönstret i sprickan blir komplext därför att viddfördelningen finns i alla riktningar i sprickplanet och sprickytorna även går ihop i kontaktytor. Mellan kontaktytorna flödar vätskan fram beroende på vidden i de krokiga eller raka strömningsvägarna, se figur 3.4.



Figur 3.4 Sprickans komplexa flödesmönster beroende på viddfördelning över sprickplanet, linjernas tjocklek är proportionell mot flödet (Moreno et al, 1990)

*Figure 3.4 The fluid flow pattern in a joint is depending on the aperture variation, the thickness of the lines are proportional to the flow value (Moreno et al, 1990)*

### Kontaktytor

Att uppskatta spricköppningen, hela sprickplanets viddfördelning, är svårt beroende på att flera faktorer påverkar dess geometri. En viktig faktor är kontaktytorna, dvs andelen "täta" ytor i sprickan. Normalt har sprickplanen en viss kontakt med varandra. I dessa kontaktpunkter överförs tryck och skjuvspänningar från ena ytan till den andra. Kontaktytans andel i en spricka kan ge en viss information om spricköppningen (Hakami, 1995). Det är tyvärr mycket svårt att definiera var kontaktytorna finns i sprickan, därför

att någon skarp gräns mellan kontakt och icke kontakt är svår att urskilja i sprickan, även i minsta detalj (mikroskala).

Flera studier har gjorts för att bestämma andelen kontaktytor i sprickor. Alltifrån några få procent upp till sjuttio procent har redovisats som resultat ; 1 - 40 % (Pyrak-Nolte et al, 1987) ; cirka 40 % (Hakami, 1995) och 40 - 70 % (Bandis et al, 1983). Vid samtliga studier utom Hakami (1995) har kontaktytorna definierats som täta, vilket är svårtolkat. Därför bör lämpligtvis en kontaktyta definieras med ett gränsvärde hos dess vidd, där en vidd under ett visst värde räknas som kontaktyta. Gränsvärdet i injekteringssammanhang bör vara all yta under 0.1 - 0.4 mm beroende på de olika brukens inträngningsförmåga. Ytor där bruket inte förmår att tränga in kan definieras som kontaktytor.

Andelen kontaktytor anses främst bero på spänningsförhållandet. Teoretiska studier har gjorts som visar hur ytan förändras med normalspänningen (Zimmerman et al, 1990). Dock har inga relationer observerats i undersökningar för att finna de direkta förhållandena mellan normalspänning och kontaktytor (Hopkins et al, 1990). Det har också visats att sprickråheten har en stor betydelse för kontaktytan.

### *Kanalmönster*

Variationer i sprickvidden påverkar flödesmönstret. Det har visat sig att flödet är olikformigt fördelat inuti en enskild spricka (Geier et al, 1992).

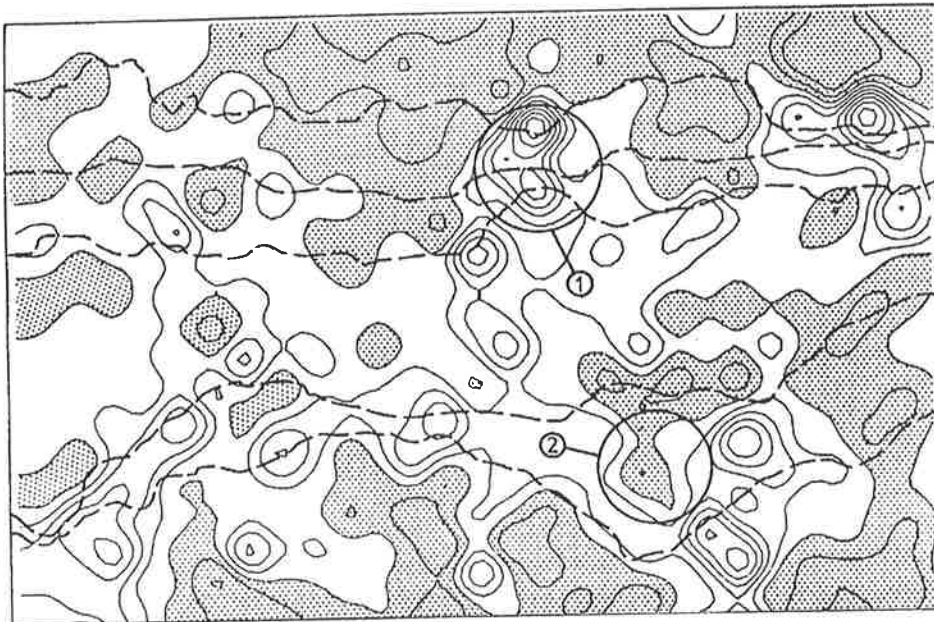
De större sprickvidderna i ett plan är de mest intressanta vid flödesberäkningar, eftersom flödet är relaterat till vidden i kubik. Om områdena med de större sprickvidderna är sammanhängande bildas strömningskanaler i sprickan där flödet huvudsakligen sker. Undersökningar, visar tydligt att vidden är korrelerad, dvs punkter med stora värden på vidden är oftast sammanhängande vilket även gäller för sprickans kontaktytor (Pyrak-Nolte et al, 1990). Således är det främst fördelningen av kanalvidderna som styr vätskeflödet och ej något slags medelvärde på vidden för hela sprickan.

Fältundersökningar av flödet genom individuella sprickor visar att flödets fördelning i en viss spricka är oregelbunden pga kanaleffekten (Abelin et al, 1990) och att endast ett fåtal strömningskanaler i sprickan leder vatten i sprickan. Ytorna däremellan påverkar strömningen ytterst lite (Geier & Axelsson, 1991). Detta innebär att sprickplanen ej har någon likformig konduktivitet, utan flödet sker i huvudsak i mönster där minsta möjliga motståndet finns. Resultat från undersökningar visar att endast 5 - 20% av sprickplanets yta transporterar vatten, då främst som strömningskanaler (Abelin et al, 1985, Moreno et

al, 1990). Av stor betydelse för injekteringsresultatet är således var borrhålet träffar sprickan.

Skjuvsprickor kan tänkas uppträda med mer tydliga kanalmönster än dragsprickor, vilket också har visats (Martin et al, 1990). Borrhålstester av vattenströmningen i skjuvzoner har varierat kraftigt, beroende på om man har träffat en sk kanal i sprickan eller ej. Detta är också korrelerat till bergspänningen, dvs låga spänningar - stora vattenflöden och tvärtom.

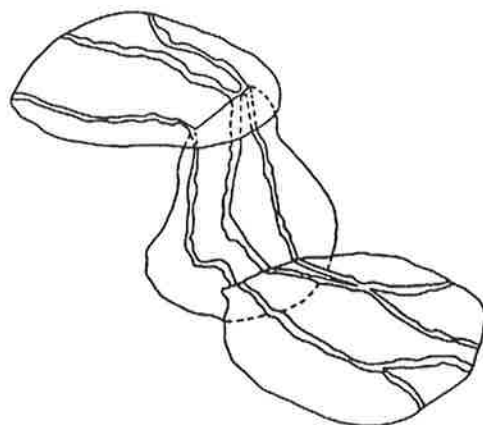
Strömningskanalerna genom en spricka är dock inte raka utan ringlar runt kontaktytorna. Krokigheten illustreras oftast som figur 3.4 och 3.5 vid experimentella och numeriska strömningsförsök (Brown, 1989, Hakami, 1988). Denna krokighet uttrycks som förhållandet mellan kanallängden och raka längden. Undersökningar visar att detta förhållande är beroende av viddfördelningen, dvs medelvidden och standardavvikelsen (Brown, 1989). Olika undersökningar och utvärderingsmetoder (direkta mätningar och indirekta beräkningar) ger att förhållandet varierar från 1.1 till 2.9 beroende på viddfördelningen.



Figur 3.5 Strömningslinjerna i en uppmätt spricka, där stora värden på vidden finns i de ljusa områdena. Strömningen konvergerar till stora viddar (1) och divergerar de små vidderna (Hakami, 1988)

*Figure 3.5 Stream lines of the flow overlayed the aperture for a studied joint. The stream lines converge into areas with larger aperture and diverge from the tighter areas (Hakami, 1988)*

En kanalmodell har utvecklats för ett spricksystem av Tsang & Tsang (1987), se figur 3.6. Modellen har utvecklats för att kunna beräkna flöden i sprickor med hänsyn till kanalbildningen i sprickor. Modellen är baserad på ett fåtal strömningskanaler med varierande vidd i sprickan, som är spatiellt korrelerade. Kanalerna antas fortsätta i korsande sprickor. Giltigheten för modellen kan diskuteras, eftersom stora förenklingar måste göras. Trots detta visar beräkningar och jämförelser med utförda experiment att en beskrivning av sprickornas geometri utifrån sprickvidd och spatiell korrelation kan användas för att beräkna flödet på ett godtagbart sätt. Modellen visar också att flödet är känsligt för ändringar av vidden, dvs en strypning påverkar flödet kraftigt. Vid applicering av modellen baserad på fältresultat (som vidd och tryckdata) visar beräkningsresultat att ett injicerat flödet i en spricka påverkar normalt 5 till 8 efterföljande sprickplan (Press et al, 1990). Senare studier av Tsang & Tsang (1989) visar dock att de beskrivna strömningskanalerna ej kan ses som rörtuber i sprickplanet, utan att också strömningskanalerna är direkt beroende av sprickviddsfördelningen över hela sprickplanet. På grund av att viddfördelningsmönstret över sprickplanet varierar, blir utseendet hos strömningsvägarna (kanalutseendet) oftast beroende av tryckriktningen i planet, dvs flödet följer den lättaste vägen längs tryckgradienten.



Figur 3.6 Utvecklad kanalmodell genom flera sprickor av Tsang och Tsang (1987)

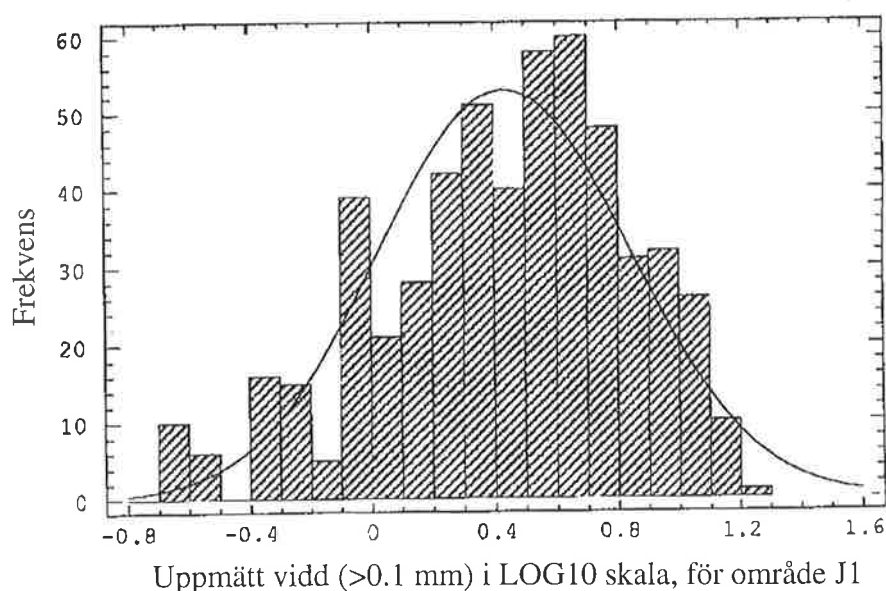
*Figure 3.6 A channel model for flow in a joint system, developed by Tsang and Tsang (1987)*

En annan modell för flödesberäkningar i en spricka med varierande vidd har framtagits av Neuzil & Tracy (1981). Vidden varierar här vinkelrätt mot flödesriktningen men är konstant längs flödet. Modellen visar att andelen strömningskanaler i sprickan växer snabbare än storleken på modellen ökar, dvs större utsträckta sprickor har en större vattenströmning relativt mindre sprickor.

Försök i fält visar dock att sprickkanalerna plötsligen kan upphöra helt, utan att sprickan slutar (Abelin et al, 1990). Hydrauliska förbindelser mellan olika konduktiva områden i sprickplanet varierar kraftigt i storlek och riktning och är känsliga för yttre förändringar, exempelvis tryck och olika vätskor (Geier et al, 1992).

### *Sprickviddsfördelning*

Hela sprickvidden för ett sprickplan kan beskrivas som en fördelning med ett medelvärde och en standardavvikelse. Ett flertal studier av sprickviddsfördelningar är gjorda (Pyrak-Nolte et al, 1987, Gale, 1987, Gentier et al, 1989, Hakami, 1988, 1994). Även teoretiska studier är utförda (Brown, 1987, Zimmerman et al, 1990). Samtliga undersökningar förutom Hakami (1994) är dock begränsade med avseende på maximal sprickvidd till sprickor mindre än 0.5 mm, vilket är ett lågt värde på sprickvidden i injekterings-sammanhang.



Figur 3.7 Uppmätt sprickviddsfördelning i logaritmisk skala (Hakami, 1994)

*Figure 3.7 Log-normal distribution function fitted to the histogram for measured aperture (Hakami, 1994)*

De utförda studierna har visat att sprickviddsfördelningen kan beskrivas som en normal eller lognormal fördelning om kontaktytorna ej medräknats. Hakamis mätningar (1994) med större värden på vidderna och ett gränsvärde på kontaktytan (0.1 mm) gav att 40% av hela sprickplanet är kontaktytor. Histogram för uppmätta sprickvidder ger två delområden, dels ett stort antal värden mindre än 0.1 mm, dels en lognormal liknande

fördelningskurva för värden över 0.1 mm, se figur 3.7. Medelvärde för den delen är 2.3 mm. Dock rekommenderas (Hakami, 1994) att sprickplanets öppningsgeometri vid flödesberäkningar beskrivs med minst tre parametrar, nämligen medelvidden, standardavvikelsen eller variansen för fördelningen samt viddens spatiella korrelationsstruktur.

Utseendet hos fördelningarna varierar från studie till studie. En påverkande faktor är exempelvis hur "matchade" sprickytorna är till varandra. Omatchade ytor ger relativt större standardavvikelser än matchade (Hakami, 1995). Vid jämförelser mellan undersökningarna visar det sig att sprickor med större medelvärden på vidden har en större varians, dvs spridning på värdena. Detta kan vara av intresse, eftersom olika varianser med samma medelvärden påverkar flödena i sprickan olika.

Med hjälp av sprickviddsfördelningen kan tre medelvärden på vidden beräknas, nämligen den aritmetiska, geometriska och harmoniska vidden. Förhållandet mellan de tre medelvärdena är följande : aritmetiska > geometriska > harmoniska.

Den aritmetiska vidden är medelvärdet för en serie värden och används normalt för att beskriva en uppmätt sprickviddsfördelning och sprickvolymen. Vid benämningen medelvidd menas den aritmetiska vidden.

Det har visat sig att den sprickvidd som påverkar vattenflödet kan beskrivas som det geometriska medelvärdet (Tsang & Tsang, 1990). Vid sprickmodellering (Stratford et al, 1990) med olika fördelningskurvor har det visat sig att transmissiviteten vid konstant aritmetisk medelvidd minskar med ökande standardavvikelser. Detta förklaras av att den effektiva transmissiviteten kan beräknas som det geometriska medelvärdet av den lokala transmissiviteten för ett tvådimensionellt fält med en lognormal fördelning av permeabiliteten. Det geometriska värdet är en funktion av standardavvikelsen (Gustafson, 1985). Således ger en förändring av standardavvikelsen en direkt påverkan på det geometriska värdet. Flödet påverkas även kraftigt av korrelationslängden av vidden. Sprickplan med liten korrelation måste passera många "sprickstryppningar" (lokalt små vidder), och således begränsas vattenströmningen (hastigheten). Transmissiviteten för sådana sprickplan är direkt beroende av det geometriska värdet av vidden, dvs standardavvikelsen styr till stor del storleken hos vattenflödet (Stratford et al, 1990).

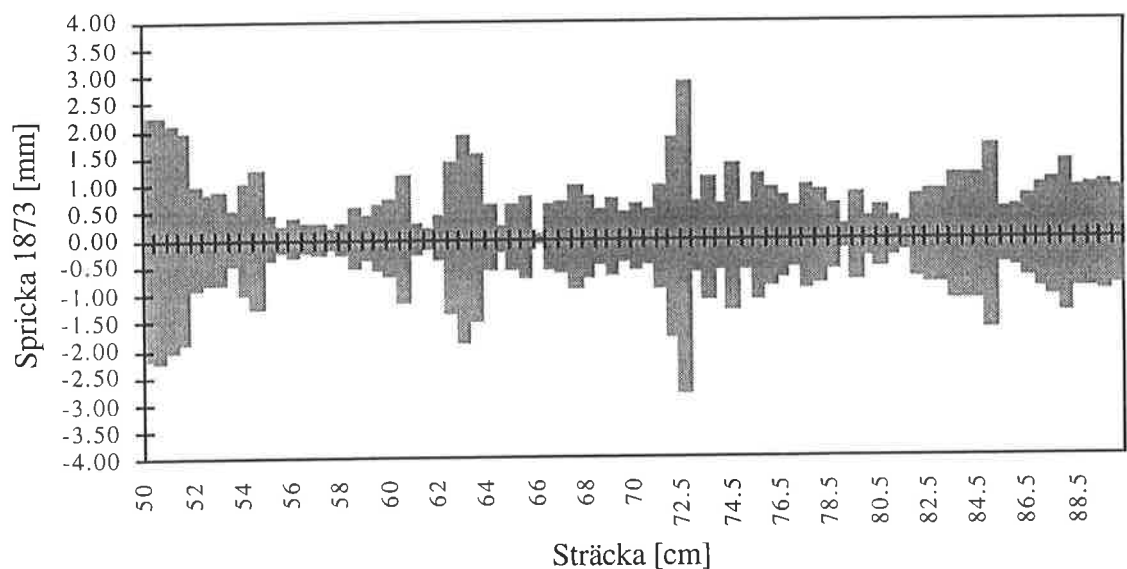
Samma resultat, dvs större standardavvikelse ger mindre vattengenomsläpplighet, har även redovisats av Zimmerman et al (1991) genom numeriska beräkningar. Dessa beräkningar visade att kvoten mellan aritmetiska medelvidden (b) och dess

standardavvikelse ( $\sigma$ ) är relaterad till en normaliserad permeabilitet, vilket motsvarar kubiken av kvoten mellan den hydrauliska vidden ( $b_{hyd}$ ) och medelvidden, som uttrycks enligt följande halvempiriska samband (Zimmerman et al, 1991) :

$$(b_{hyd}/b)^3 = 1 - e^{-0.56*b/\sigma}$$

Uttrycket kan jämföras med parametern  $\theta$  i kapitel 2, som är förhållandet mellan medelvidden genom den hydrauliska vidden. Parameterns  $\theta$  storlek skulle således vara beroende av den aritmetiska medelvidden och standardavvikelsen för sprickplanet vid injekteringen enligt uttrycket ovan.

Vid injektering flödar troligtvis bruket genom de större sprickvidderna, vilket bildar sprickkanaler med en egen viddfördelning i sprickplanet. För flödesberäkning av injekteringsbruk kan dessa varierande viddar ersättas med en ekvivalent medelvidd. Den ekvivalenta vidden motsvaras av den harmoniska vidden, se kapitel 2 och figur 3.8. Den harmoniska vidden har en stor inverkan på injekteringsens spridning i sprickor (Stille et al, 1993), eftersom denna är styrande för hur långt injekteringsbruket kan gå i sprickan, innan injekteringsfronten stoppas upp av brukets skjuvspänning (Hässler, 1991). Därefter fyller bruket troligtvis upp eventuella finare sprickvidder längs med kanalerna



Figur 3.8 Uppmätt sprickkanal med varierande vidd (se kapitel 5)

*Figure 3.8 Studied joint channel with varying aperture (see chapter 5)*

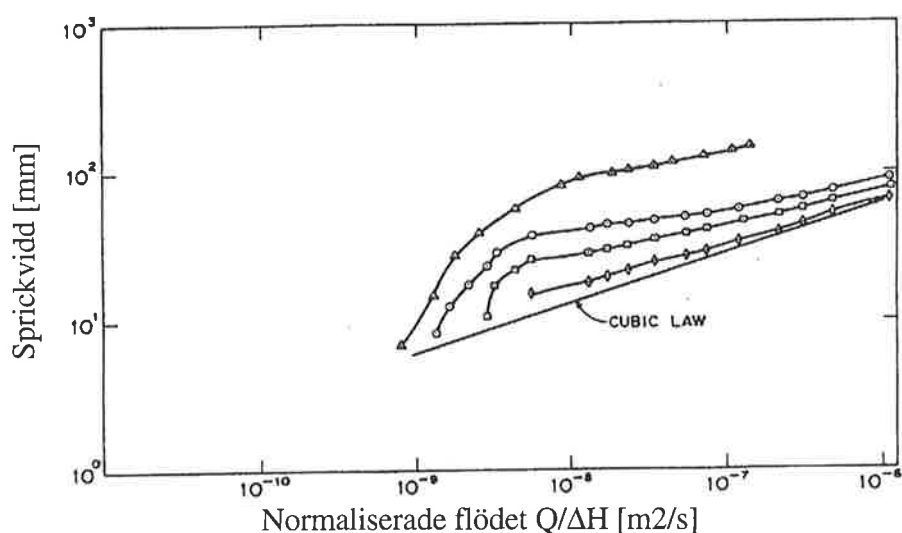
Undersökningar eller studier av enbart de större sprickviddernas fördelning, vilket motsvarar kanalernas viddfördelning, och dess relation till hela sprickplanets viddfördelning är dock ej utförda. En rimlig gissning vore att kanalvidderna har ett större medelvärde och en mindre standardavvikelse än hela sprickans viddfördelning.

### *Den hydrauliska vidden*

En vanlig metod och normalt det enklaste sättet att uppskatta sprickvidden är med hjälp av vattenflödet, dvs den sk hydrauliska vidden. Den hydrauliska vidden är baserad på den sk Navier-Stokes ekvation med antagande av ett laminärt vattenflöde i en planparallell spricka samt på att Darcys lag gäller. Sambandet finns uttryckt i kapitel 2.

Ekvationen är känd som "cubic law" och säger att flödet är proportionellt mot vidden i kubik. "Cubic law" är användbar då en uppskattning av sprickvidden behöver göras. Svårigheten är att beräkna transmissiviteten för bergmassan. Detta görs vanligtvis genom olika mättningsförfaranden där olika grader av antaganden måste göras. Ett vanligt mättningsförfarande är borrhålstester där inflödet av vatten under ett visst tryck i ett borrhål mäts. Genom olika samband, beroende på olika antaganden, såsom bergets homogenitet, isotropi, utbredning samt ett stationärt flöde, kan transmissiviteten sedan beräknas (Gustafson, 1985), se kapitel 2. Beräkningen är vanligtvis baserad på en sprickgeometri som skär borrhålet vinkelrätt och är radiellt cylindrisk ut från borrhålet.

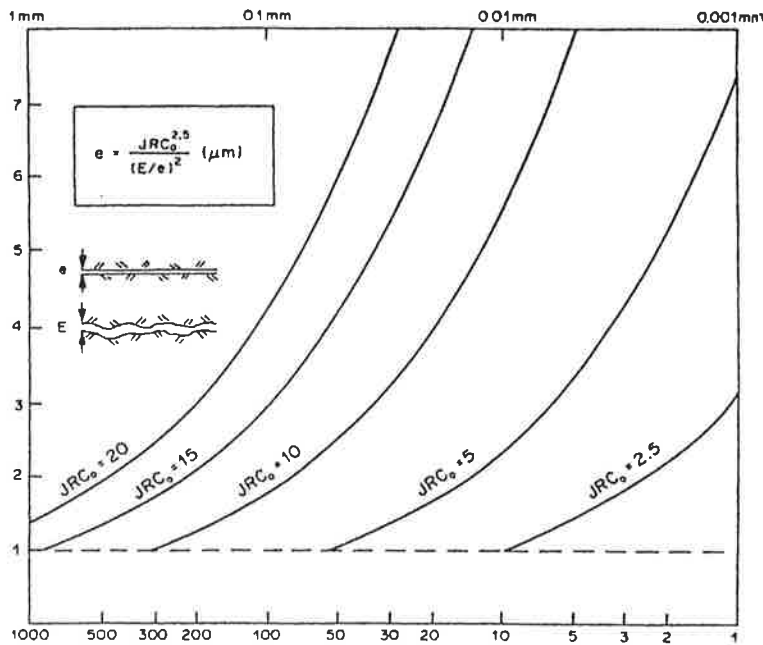
Försök med parallella plan med råa ytor har visat att "cubic law" är giltig för mindre sprickvidder ( $< 0.2$  mm) (Gale, 1990), dock utan verkande normalspänningar på försöksproven. Normalspänningens inverkan är dock viktig, eftersom den bildar kontaktytor mellan sprickytorna. Senare studier (Pyrak-Nolte et al, 1990, Gale, 1990, Zimmerman et al, 1991) av vattenflöden i sprickor, med normalspänningar på ytorna, har visat att "cubic law"-beteendet för flödet avviker ifrån uppmätt flöde, se figur 3.9. Resultaten visar att den uppmätta aritmetiska vidden är större än "cubic law"-värdet. Vidare har undersökningarna visat att konduktiviten i försöken beror av provstorleken.



Figur 3.9 Avvikelser från "cubic law" beroende på ökande normalspänning (Gale, 1990)

*Figure 3.9 Divergence from cubic law model depending on the normal stress value (Gale, 1990)*

Resultaten förklaras med att det uppmätta flödet påverkas mer av de minsta vidderna längs strömningskanalerna, sk strypningar, än vad det teoretiska "cubic law"-flödet ger, där hela viddfördelningen påverkar värdet lika mycket. Barton et al (1985) har tagit fram ett diagram och ett samband som korregerar den hydrauliska vidden till en sk mekanisk vidd, baserat på empiriska iakttagelser, se figur 3.10. Den mekaniska vidden motsvaras av den aritmetiska. Den mekaniska vidden beror på "joint roughness coefficient", JRC, dvs ju råare yta desto större empirisk faktor får den hydrauliska vidden. Den empiriska faktorn varierar mellan 1.0 och 3.0 för sprickvidder vid injekteringssammanhang, dvs större än 0.1-0.2 mm, där faktorn blir lägre för större viddar. Korrelationen är baserad på empiriska försök, där tester även visar att en förändring av spänningen i sprickan kan ge en förväntad viddförändring och således en förändrad konduktivitet i sprickan (Barton et al, 1985). Vid undersökningar (Hakami, 1988) där en jämförelser mellan uppmätt medelsprickvidd (aritmetiska) och beräknad hydraulisk vidd har gjorts blev förhållandet mellan 1.1 och 1.7. Jämförelser har dock endast kunnats utföras för sprickor mindre än 0.5 mm. Av hittills vunna erfarenheter kan dock sägas att den hydrauliska vidden ger en god uppskattning av medelsprickvidden



Figur 3.10 Mekaniska vidden (E) baserad på JRC och hydrauliska vidden (Barton et al, 1985), med den hydrauliska vidden (e) på x-axeln och den empiriska faktorn på y-axeln

*Figure 3.10 The mechanical aperture (E) based on JRC and hydraulic aperture (e), where e is on the x-axis and the empirical relation (E/e) is on the y-axis*

Undersökningar av kanalvidder för vattenflöden längs strömningsvägen visar att kanalvidden är betydligt större än den hydrauliska vidden. Längs kanalen är kanalvidden cirka tre gånger större än den hydrauliska vidden och dessutom är spridningen i planet begränsad (Tsang & Tsang, 1989).

Det finns fälttester där den beräknade vidden ( $b_{hyd}$ ) har visat sig betydligt mindre än den observerade, vilket förklaras med att indikationer på närvaro av stillastående bassänger av vatten finns intill flödesvägarna. En viss volym stillastående vatten i sprickor kan förekomma även vid höga gradienter (Geier et al, 1992).

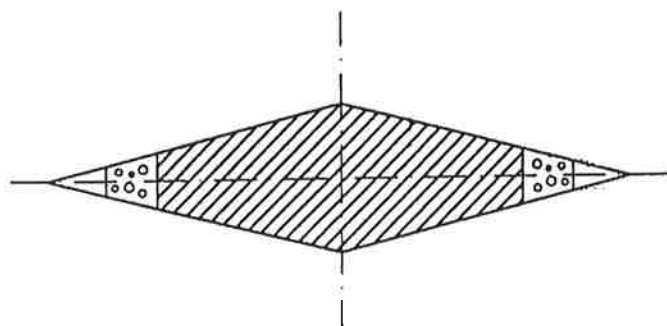
#### *Inträngningsförmågan hos injekteringsbruk i sprickor*

Vid ett filtreringsstabil injekteringsbruk kan inträngningsförmågan i en spricka begränsas i två steg, först av att suspensionen kan penetrera spricköppningen, vilket beror på suspensionens kornfördelning och största kornstorlek, sedan av att suspensionens

begränsade inträngningslängd pga brukets flytgräns vid en tillräcklig tryckgradient och sprickvidd, se kapitel 2.

Vid tidigare studier (Bergman et al, 1970, Mitchell, 1970) av cementbaserade medel, med höga vct och ej finmald cement har en allmän tumregel utvecklats som säger att medlet tränger in i sprickor större än 3 - 5 gånger maximala kornstorleken. Senare försök i spalter och i rör fyllda med sand eller glasspärlor har dock visat att bruket ( $d_{\max} = 65 \mu\text{m}$ ) kan penetrera öppningar ner till 0.1 mm, dvs 2 gånger maximal kornstorlek, (Bogdanoff, 1990). Således kan normalt cementbruk ( $d_{\max} = 65 \mu\text{m}$ ) klara sprickor ner till 0.1 - 0.2 mm, vilket motsvarar en konduktivitet på ca  $10^{-6}$  -  $10^{-8}$  m/s, baserat på ekvation 2:13. Dessa värden på konduktiviteten har också uppnåtts i flera projekt (Pusch et al, 1985, Nilsson, 1986, Ewert, 1992).

Vid fältförsök rörande fintätning vid det sk Stripa-projektet (Pusch et al, 1985, Pusch et al, 1991), har flera intressanta resultat framkommit. Försök med bentonitkvartsblandningar har penetrerat sprickvidder ner till 0.05 mm och uppnått en låg konduktivitet, ner till  $10^{-9}$  m/s. Medelkonduktiviteten har således förbättras med en till tre tiopotenser i fint berg. Extremt finmalen cement ( $d_{\max} = 16 \mu\text{m}$ ) med låga vct, tillsats av superplasticizer och med en viskositet under 10 Pas, har kunnat penetrera sprickor med vidder ner till 0.02 mm med en inträngningslängd till decimeters djup, vid sk dynamisk injektering. Liknande resultat har även uppnåtts vid fintättningsförsök i Kanada med cementbaserade medel, med låga vct (0.4-0.6) genom tillsats av silikat och superplazicier, (Keil & Boyd, 1989). Vidare har Stripaundersökningen kommit fram till att en reducering av konduktiviteten på ned till  $10^{-10}$  m/s eller mer ej är möjlig. Detta förklaras i undersökningen med att bruket i sprickan blandar fyllnadsmaterialet som bromsar upp en fintätning. Fyllnaden av bruk i sprickor har även studerats. Fyllnaden består av en tät fast kärna i mitten av kanalen. Kärnan övergår sedan till en mer porös blandning för att ut mot "kantsammanstrålningen" inte fylla kanalen alls, se figur 3.11. Vidare resultat att notera från försöken är att ett optimalt hålavstånd vid finyttätning gav 0.5 till 0.7 m och att tryck upp till 1 MPa inte gav någon uppsprickning av sprickor nära tunnelytan.



Figur 3.11 Schematiskt skiss på injekteringens utfyllnad i en kanal (Pusch et al, 1991)

*Figure 3.11 Skeleton sketch on filling of grout in a joint channel (Pusch et al, 1991)*

### 3.3 Spricksystem

Litteratursökning om egenskaper hos ett spricksystem som styr flödet ger ett begränsat resultat. Få direkta undersökningar finns, och slutsatserna är oftast grova eller baserade på studier av enskilda sprickor.

#### 3.3.1 Bergmassevolymens egenskaper

Sprickor förekommer sällan ensamma i bergmassan utan oftast som en serie av enstaka parallella sprickor (Pollard & Aydin, 1988). Dock förekommer ibland sk enstaka slumpmässiga sprickor. Undersökningar har visat att endast en liten del av alla sprickor är vattenförande, men att de vattenförande sprickorna inte är hydrauliskt begränsade i bergmassan utan är väl sammanbundna (Doe & Geier, 1990, MacLeod et al, 1992). Vid en vattenförlustmätning i ett borrhål kommer således vattnet endast att tryckas ut i några enskilda sprickor men ändå påverka en större bergmassa. Utbredningen av den påverkade massan beskrivs med en influensradie. I litteraturen finns dock en osäkerhet kring influensradiens storlek, som kan variera från tiotals meter till hundratals.

Vattengenomsläppligheten i en bergmassa är vanligtvis definierad med hjälp av en vatten injektionstest (Lugeon test) och uttrycks som uppmätt vattenflöde (l/min) i borrhålet per meter och vid 1 MPa, vilket kan omräknas till en hydraulisk konduktivitet (m/s) med faktorn  $1.7 \cdot 10^{-7}$  (Bergman & Nord, 1982). Trots till synes lika förhållanden med avseende på bergmassans homogenitet, kan testresulten skifta betydligt. Detta beror på flera faktorer, såsom antalet och karaktären hos de korsande sprickorna. För att beskriva

vattengenomsläppligheten i en bergvolym väl krävs att testen görs i en volym som innehåller tillräckligt många konduktiva sprickor och med tillräckligt många borrhål. Denna medelvärdesvolym kallas vanligen för representativa elementvolymen (REV). Uppskattningar (Gustafson, 1985) på REV för injektionstester visar att mellan 1000 och 10 000 sprickor bör innefattas i volymen som testas, eller att volymen skall uppta 10 till 20 gånger medelavståndet för spricksetet (Wei et al, 1995), dvs att uppfylla REV inte är praktiskt samt oekonomiskt att genomföra. Vissa undersökningar (Cunha, 1990, Wei et al, 1995) visar också att ökad diameter i bergtunnlar ökar vatteninflödet, eftersom sannolikheten ökar att träffa fler vattenförande sprickor. Detta skulle innebära att ju större borrhålsdiametern är vid vattenförlustmätningen desto mer representativt värde skulle fås, vilket dock inte alla undersökningar visar.

Försök att hitta samband mellan vattenförande respektive injekterade sprickor med olika bergegenskaper i en stor bergvolym är utförd för Hard Rock Laboratory, Äspö, (Munier & Hermansson, 1994). Antalet karterade sprickor i undersökningen är ca 3500. I denna undersökning är de vattenförande sprickorna lokaliserade i sprickzoner eller som spricksvärmar i bra berg. En hög frekvens av vattenförande sprickor föregås ofta av en hög koncentration av kvarts i sprickor. Detta påverkar även injekteringsbarheten, eftersom sprickorna med kvarts ofta är smala sprickor eller hopläkta sprickor. Spricklängden varierar beroende på bergart, till exempel är sprickor i diorit längre än i aplit, grönsten och granit. Detta påverkar även injekterbarheten, eftersom sprickor med vatten eller injekteringsbruk tillhör de längre sprickorna, med andra ord långa sprickor innehåller oftare vatten och tar lättare bruk. Granit och grönsten har en högre frekvens av vattenförande sprickor, men diorit och aplit har en relativt högre frekvens av sprickor som är injekterade.

Att beräkningar av flöden i berg är mycket komplexa och att många antaganden måste göras visar resultat från det sk samarbetsprojektet DECOVALEX, där flera olika forskargrupper har tillämpat "sina egna" numeriska beräkningsprogram för samma strömningsproblem. Resultaten uppvisar dålig överensstämmelse för flöden i enskilda sprickor och vid det totala inflödet till en tunnel mellan de olika numeriska programmen. Slutsatsen är "att de fysikaliska lagar som styr strömningen i en enskild spricka ännu saknas" (Jing et al, 1995).

#### *Sprickfrekvens/avstånd*

Sprickavståndet mellan enskilda sprickor är aldrig regelbundet pga olika faktorer (Pollard & Aydin, 1988), som exempelvis att olika bergarter har olika frekvens samt att

sprickbildningen har skett under olika omständigheter och förändras med tiden. Frekvensen av vattenförande sprickor i finkornig granit är högre än i andra bergtyper (Mazurek et al, 1995).

Bergmassans vattengenomsläpplighet påverkas av förhållandet mellan sprickavståndet och spricklängden samt avståndet mellan olika sprickgrupper. För att bergmassan skall ha någon betydande vattengenomsläpplighet skall spricklängden var minst två gånger större än sprickavståndet (Wei et al, 1995). Medelavståndet inom en sprickgrupp kan förenklat uppskattas ifrån en rak linje i berget, där den totala sprickfrekvensen för linjen delas med roten ur tre (Wei et al, 1995) eller med en kvalitativ kartering av ett kärnborrhål.

#### *Antalet bruksförande sprickgrupper*

Den teoretiska bruksåtgången varierar kraftigt med antalet bruksförande sprickgrupper. Vid flera sprickgrupper kan ett sfäriskt flöde erhållas, om sprickgrupperna är orienterade mot varandra i bergmassan. En teoretisk beräkning av injekteringsvolymen baserad på ett sfäriskt (tredimensionellt) flöde ger, jämfört med ett endimensionellt respektive tvådimensionellt flöde, 500 respektive 10 gånger större volym (Hässler & Håkansson, 1993).

Frågor som hur stort antalet bruksförande sprickgrupper är därför av stor betydelse. Sprickor/sprickgrupper med olika orientering i samma bergmassa har dock visat sig ha olika egenskaper, vilket påverkar flödet i bergmassan.

Utvärderingen av injekterade sprickor i Äspölaboratoriet visar att de i huvudsak är orienterade i en och samma strykning och lutningsriktning. Denna riktning är även parallell med huvudspänningsriktningen i berget (Hermansson, 1995). Däremot är inte de vattenförande sprickorna lika tydligt orienterade i en riktning. Detta förklaras med att vattnet även finns i finare sprickor än de grövre injekteringsbara (Hermansson, 1995). Att injekteringen sprids främst i en sprickriktning, vanligtvis i brantstående sprickor, visar även tidigare undersökningar (Palmqvist, 1983).

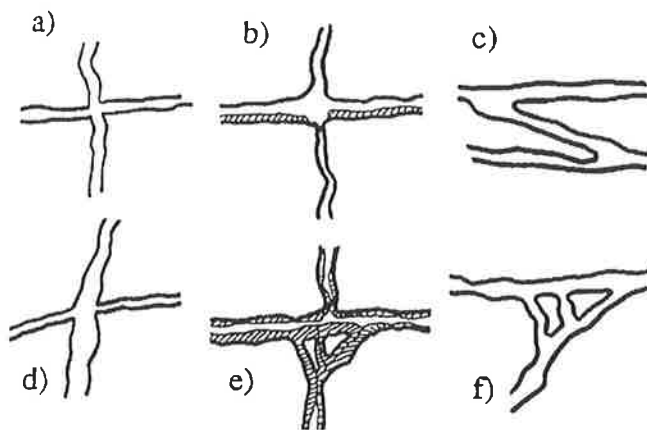
Injekteringstrycket i en bergmassa med en sprickriktning bör vara större än vid flera riktningar anser Ewert (1992). Detta beror på att borrhålet skär enstaka isolerade sprickplan, där förlusten av tryckgradienten inte minskar lika mycket som vid flera riktningar (högre permeabilitet), där trycket fördelar sig över en större yta ju mer inträngningen i berget ökar.

Förhållandet mellan sprickorienteringen och största huvudspänningsriktningen kan påverka vattenflödet betydligt. Undersökningar visar att flödet ökar med största huvudspänningen parallellt sprickan (cirka 2.5 gånger), medan det minskar vid största huvudspänning vinkelrätt sprickan (cirka 4 gånger) jämfört med lika stora huvudspänningar.

### *Korsningar*

Kanalströmning kan förväntas ske i korsningarna mellan de enskilda sprickorna, eftersom korsningarna oftast ger en ökad area i förhållande till sprickkanalens. Korsningarnas volym i bergmassan är dock liten i förhållande till spricköppningarnas. Frågan är i vilken omfattning dessa korsningar påverkar storleken och riktningen hos flödet. Studier av korsningarnas betydelse för flödet är dock begränsade.

Korsningarnas geometri kan teoretiskt variera på många olika sätt (Hakami, 1995), och därmed även storleken på flödet, se figur 3.12. Hakami (1995) har mätt vidden dels i en korsning mellan två lika stora sprickor dels i de båda sprickorna. Resultatet visar att storleken av vidden i korsningen är större än i själva sprickorna. Vid en beräkning av konduktiviteten, baserad på "cubic law" och uppmätta vidder skulle den bli betydligt större i korsningen än i sprickorna. Vid beräkning och modellering av bergmassans konduktivitet föreslås det att den geometriska beskrivningen är olika för sprickkanaler och korsningar, så att olika värden på konduktiviteten erhålls (Geier & Axelsson, 1991).



Figur 3.12 Tänkta korsningsgeometrier (Hakami & Larsson, 1993)

Figure 3.12 Possible intersection geometries (Hakami & Larsson, 1993)

Dock har det visat sig att oftast förekommer endast en eller ett fåtal större konduktiva sprickor i hårt berg längs ett testat borrhål (Stille et al, 1993) och att övriga sprickor har en liten påverkan på den totala konduktiviteten längs borrhålet. Detta skulle innebära att

korsningarna påverkar storleken på flödet marginellt, eftersom en mindre spricka som korsar en större oftast har en mindre utsträckning än den större. Däremot skulle flödesriktningen följa i korsningen till dess slut och sedan fortsätta i den större, eftersom vidden troligtvis ökar något i korsningen jämfört med i sprickorna.

Enstaka undersökningar av korsningars betydelse vid injektering har utförts i Stripa (Pusch et al, 1985). Kartering av injekteringsmaterial i sprickor har gjorts efter injekteringen men uppvisar inte något entydigt resultat. Ibland finns huvuddelen av materialet i korsningarna och ibland inte.

### 3.3.2 Frekvensen av vatten- och injekteringsförande sprickor

Studier av den konduktiva sprickfrekvensen i relation till totala sprickfrekvensen har utförts i borrhålstester (Axelsson et al, 1994). Dessa studier visar att den konduktiva frekvensen utgör mellan 5 % och 25 % av den totala.

Ytterligare en studie av sprickorna längs en karterad tunnel gav att åtta procent av totala antalet sprickor innehöll vatten och injekteringsbruk (Munier & Hermansson, 1994). Sprickorna antas ha varit vattenförande innan injekteringen skedde. Vidare var korrelationen mellan storleken på vattenförlustmätningar och mängden bruk skiftande. Ibland fanns en tendens till korrelation, men denna var dock mycket slumpmässig. De flesta injekteringssektioner innehöll dock enstaka vattenledare, dvs enstaka sprickor med mycket injektering. Vidare observerades att sprickor med både injekteringsbruk och vatten var sex gånger vanligare än sprickor med enbart bruk, vilket betyder att bruket tätar sällan sprickan fullständigt.

Utvärdering av hur stor andel av de vattenförande sprickorna som dominerar det totala Lugeon-värdet har gjorts (Stille et al, 1993). Resultatet visar att 90% av Lugeon-värdet kommer ifrån 10% av sprickorna, vilka också är de största. Dessa är också de som med största sannolikhet tar emot hela injekteringsvolymen.

## 3.4 Slutsatser

Baserat på den redovisade litteraturstudien har följande viktiga faktorer sammanställts med hänsyn till de beskrivna sprickplansmodellerna :

- En spricka kan karaktäriseras som en disk med jämna och kontinuerliga men vågiga ytor med en viss ytråhet i en mer detaljerad skala.

- En spricka har en begränsad utbredning som förhåller sig till sprickans maximala vidd.
- Vidden varierar kraftigt utmed sprickplanet, så att dels huvudströmningen av vätskor sker i ett fåtal kanaler dels så att en stor andel av ytan är "tät", vilka benämns som kontaktytor.
- Storleken på kanalvidden har avgörande betydelse för flödestorleken i berget.
- Uppskattningen av den hydrauliska vidden undervärderar storleken på den aritmetiska vidden något, men ger en god uppfattning om sprickplanets medelsprickvidd under vattenförlustmätningen.
- Sprickor finare än 0.2 mm penetreras vanligtvis inte av konventionellt injekteringsbruk, men med ett extremt finmalet bruk med tillsatser kan vidderna ner till 0.02 - 0.05 mm penetreras.
- För att få ett representativt värde på bergmassans hydrauliska konduktivitet måste en stor bergmassa testas, vilket även också bör gälla vid injektering för att få ett representativt värde.
- Endast en liten del (5-25%) av alla sprickor är hydrauliskt konduktiva och de injekterade sprickorna finns oftast representerade i en sprickgrupp.

De beskrivna modellerna i kapitel 2 är deterministiska och är framtagna för att beräkna den totala volymen injektering. Vid beräkning av vattenflöden i sprickor rekommenderas att öppningsgeometrin beskrivs med en medelvidd, dess standardavvikelse samt viddens spatiella korrelation. Detta borde även påverka flödesförloppet för injekteringen och sålunda arbetet på en vidareutveckling av modellerna.

På grundval av denna litteraturstudie kan de sprickgeometriska antagandena i modellerna värderas. Ingen av modellerna tar hänsyn till följande sprickegenskaper : spricktyp, spänningsförhållande och spricklängd.

Modell I beskriver sprickan som en planparallell disk, vilket endast ger en grov bild av sprickor i berg. I modellen tas ingen hänsyn till skillnader mellan vattnets och brukets inträngningsförmåga i sprickor, vilket ger att diskens vidd och därmed injekterings inträngningslängd blir felaktig. Däremot bör volymen bli acceptabel, eftersom indirekta medelvidden, uttryckt i transmissiviteten, ungefär motsvaras av den hydrauliska vidden.

Modell II beskriver flödet i en spricka bättre än modell I, speciellt med avseende på kanalströmningen, men gör ingen skillnad mellan vattnets och brukets strömningsväg i sprickor. Baserat på de gjorda undersökningarna av andelen kontaktytor på ett sprickplan skulle spridningsvinkeln i modellen kunna grovt uppskattas till omkring  $0.15 - 0.80 \cdot \pi \cdot (0.05-0.25)$ , eftersom kontaktytorna utgör ca 50% av sprickplanet ( $\pi$ ) och andelen vattenförande sprickor i bergmassan utgör mellan 5-25% av det totala antalet sprickor. Ungefär lika värden på volymen som i modell I bör erhållas, men däremot felaktiga värden på vidden och följaktligen även på inträngningslängden.

Modell III är mer komplex och beskriver olika sprickegenskaper som påverkar flödet bättre än modell I och II, men den ger ingen fullständig sprickbild. Den mer komplexa beskrivningen ger flera geologiska parametrar att bestämma som dessutom varierar från undersökning till undersökning. Följande värden kan grovt uppskattas på basis av litteraturstudien:

- för  $\theta$  mellan 1.1 - 1.7, där det lägre värdet förväntas erhållas vid stora sprickvidder och det högre värdet vid höga injektettringstryck. Om sprickornas aritmetiska vidd ( $b$ ) och dess standardavvikelse ( $\sigma$ ) kan följande samband användas :  $(b_{hyd}/b)^3 = 1 - e^{-0.56 \cdot b/\sigma}$ , eftersom  $\theta$  är kvoten mellan  $b$  och  $b_{hyd}$
- för  $\kappa$  lägst 3.0, vilket i första hand gäller för vattenflöden, men troligtvis något större värde för injekteringsflöden
- för  $\psi$  mellan 0.3 - 1.0
- för  $\lambda$  mellan 1.1 - 2.7, beroende på viddfördelning
- för  $\beta$  lägst 1.0, eventuellt högre om antalet konduktiva sprickgrupper är fler än två

## 4 APPLIKATION AV SPRICKPLANS-MODELLERNA VID FÄLTINJEKTERING

### 4.1 Samband för beräkningar och parameterbestämning

#### 4.1.1 Allmänt

För att beräkningar av teoretiska injekteringsvolymen baserade på de beskrivna sprickplansmodellerna skall kunna göras måste olika indata vara kända. Dessa indata är kännedom om injekterings stopptryck, brukets reologiska egenskaper samt bergets mottaglighet för injektering, dvs bergmassans transmissivitet, gjorda utifrån vattenförlustmätningar och geologiska egenskaper. Vid beräkning av teoretiska sprickvidder och inträngningslängder måste även den injekterade volymen vara känd.

Vattenförlustmätningar görs vanligtvis i injekteringshålen före själva injekteringen. Efter injektering av första borrhålet sker en påverkan av transmissiviteten på övriga borrhål i skärmen. Denna sker på grund av en överlappning mellan borrhålen ifrån injekteringen. Med anledning av överlappningen kan endast det första injekterade hålet i varje skärm beräknas med sprickplansmodellerna. För att finna sk "första hål" i en och samma skärm har en metod utformats, där flera "första hål" i en skärm kan identifieras. Metoden är baserad på injekteringsordningen och de hydrauliska sambanden av hålen i en skärm, se Andersson 1994.

#### 4.1.2 Tillförlitligheten och jämförelser av sprickplansmodellerna

Bedömningen av sprickplansmodellernas tillförlitlighet är baserad på den beräknad volym, sprickvidd och inträngningslängd. Dessa beräkningar jämförs i första hand med den uppmätta volymen, men även mot rimliga sprickvidder och observerade inträngningslängder. Frågor rörande kopplingen mellan injekterad volym och uppnådd täthet ligger utanför syftet med avhandlingen.

### *Volymen*

De beräknade volymerna för de olika modellerna jämförs med den uppmätta verkliga volymen. Jämförelsen sker för varje enskilt borrhål. Kvoten mellan beräknad volym och uppmätt beräknas; om denna blir 1.0 är modellen fullständig. Kriteriet för tillförlitligheten har dock valts till intervallet  $0.5 < V_{\text{ber}}/V_{\text{inj}} < 2.0$ , dvs den beräknade volymen för ett enstaka borrhål tillåts erhålla ett fel på en faktor två. Detta är presenterat i diagramform som visar förhållandet mellan beräknad volym och uppmätt för respektive modell. Resultaten är även redovisade som medelvärde och median på kvoten samt andelen som kan anses som tillförlitlig. I två av fallen (Äspö och LaFortuna) har även en regressionsanalys gjorts med uppmätt och beräknad volym som variabler.

### *Sprickvidden*

Sprickvidden beräknats med hjälp av antalet uppskattade sprickor och med den verkliga uppmätta volymen i borrhålet. Antalet sprickor har bedömts efter en sprickkartering. De beräknade sprickvidderna jämförs med den enkla tumregeln för att en fysisk inträngning av injekteringsbruk i en spricka skall vara möjlig. Tumregeln säger att sprickvidden skall vara mer än 2-5 gånger den maximala kornstorleken för injekteringsbruket. Resultatet av de beräknade sprickvidderna redovisas som medelvärde och medianen samt andelen av sprickvidden större än tumregeln.

### *Maximal inträngningslängd*

En jämförelse mellan beräknad inträngningslängd och "verklig" inträngningslängd kan normalt inte göras. Men för Äspöfallet har den verkliga inträngningslängden observerats till längder mellan 3 och 15 m från visuella borrhålsundersökningar. Grundat på detta, för Äspö-fallet, har beräknad längd mellan 5 och 15 m bestämts vara kriterium för modellernas tillförlitlighet med avseende på inträngningen. Resultatet av de beräknade inträngningslängderna redovisas i diagramform samt som medelvärde, median och andelen av längder inom kriteriet.

#### 4.1.3 Samband för modell I :

### *Beräkningar*

Genom kännedom om transmissiviteten kan den förväntade volymen beräknas, se ekvation 2:15 :

$$V_I = \left( \frac{\Delta P}{2 \cdot \tau_0} \right)^2 \cdot \frac{12 \cdot T \cdot \mu_w}{\rho_w \cdot g} \cdot \pi$$

Med hjälp av en geologisk kartering av bergmassan kan antalet sprickor (N) uppskattas och sprickvidden  $b_I$  beräknats utifrån den uppmätta volymen, enligt ekvation 2:14 :

$$b_I = \sqrt[3]{V_{inj} \left( \frac{2 \cdot \tau_0}{\Delta P} \right)^2 \cdot \frac{1}{N \cdot \pi}}$$

Maximala inträngningen  $I_I$  kan sedan beräknas med hjälp av den beräknade sprickvidden, se ekvation 2:11 :

$$I_I = \frac{\Delta P \cdot b_I}{2 \cdot \tau_0}$$

#### *Bedömning av modellen*

Resultatet från den beräknade volymen ( $V_I$ ) kan jämföras med den uppmätta ( $V_{inj}$ ). Ifrån den beräknade sprickvidden ( $b_I$ ) och inträngningslängden ( $I_I$ ) kan även en bedömning av modellens tillförlitlighet göras.

#### 4.1.4 Samband för modell II :

##### *Beräkningar*

Genom vattenförlustmätningen och bestämning av spridningsvinkel  $\alpha$  kan volymen beräknas, enligt ekvation 2:23 och 2:24 :

$$V_{II} = \left( \frac{\Delta P}{2 \cdot \tau_0} \right)^2 \cdot \frac{12 \cdot Q_w \cdot \mu_w}{2 \Delta P_w} \cdot \ln \left( 1 + \frac{\alpha_{vald} \cdot L}{W} \right)$$

Spridningsvinkeln ( $\alpha_{vald}$ ) har bestämts utifrån bergsklassificeringen (RMR) enligt tabell 4.1. Dessa uppskattningar gjordes i ett tidigt skede i projektet (Janson, 1993, Stille et al, 1994) och har efteråt kunnat verifieras genom den utförda litteraturstudien i kapitel 3.

**Tabell 4.1 :** Uppskattning av spridningsvinkeln  $\alpha$  i modell II (very good är endast baserat på ett fåtal injekteringar).

| Bergsklass (RMR) | $\alpha_{\text{vald}}$ [rad] |
|------------------|------------------------------|
| Very good        | 2.4                          |
| Good             | 0.8                          |
| Fair             | 0.4                          |
| Poor             | 0.2                          |

Enligt tabell 4.1 minskar storleken på spridningsvinkeln ju sämre bergkvaliteten är. Detta kan förklaras med andra ord som "att ju sämre berg desto färre relativt sett öppna och ofyllda sprickor än mot bättre berg". Det bättre berget har dock normalt färre antal sprickor än det sämre, men en större andel konduktiva sprickor än det sämre berget. Med hjälp av en geologisk kartering av bergmassan kan antalet sprickor (N) uppskattas och sprickvidden  $b_{II}$  beräknas utifrån den uppmätta volymen, enligt ekvation 2:23 :

$$b_{II} = \sqrt[3]{2 \cdot V_{inj} \left( \frac{2 \cdot \tau_0}{\Delta P} \right)^2 \cdot \frac{1}{N \cdot \alpha}}$$

där spridningsvinkeln  $\alpha$  beräknats utifrån den uppmätta volymen och gjorda vattenförlustmätningen, enligt ekvation 2:23 och 2:24 :

$$\alpha = \left[ e^{\left( \frac{\Delta P_w \cdot 2 \cdot V_{inj}}{12 \cdot \mu_w \cdot Q_w} \cdot \left( \frac{2 \cdot \tau_0}{\Delta P} \right)^2 \right)} - 1 \right] \cdot \frac{W}{L}$$

Maximala inträngningen  $I_{II}$  kan sedan beräknas med hjälp av den beräknade sprickvidden, se ekvation 2:21 :

$$I_{II} = \frac{\Delta P \cdot b_{II}}{2 \cdot \tau_0}$$

#### *Bedömning av modellen*

Resultatet från den beräknade volymen ( $V_{II}$ ) kan jämföras med den uppmätta ( $V_{inj}$ ). Även från den beräknade spricköppningen ( $b_{II}$ ) och inträngningslängden ( $I_{II}$ ) kan en bedömning av modellens tillförlitlighet göras. Den bestämda spridningsvinkeln ( $\alpha_{\text{vald}}$ ) kan även jämföras med en beräknad  $\alpha$ , som baseras på den uppmätta volymen  $V_{inj}$ .

#### 4.1.6 Samband för modell III :

##### *Beräkningar*

Genom beräkningar av transmissiviteten och uppskattning av de geologiska parameterna kan volymen beräknas, enligt ekvation 2:34 :

$$V_{III} = \left( \frac{\Delta P}{2 \cdot \tau_0} \right)^2 \cdot \frac{12 \cdot T \cdot \mu_w}{\rho_w \cdot g} \cdot \frac{\psi \cdot \kappa^2 \cdot \theta \cdot \beta \cdot \pi}{\lambda^2}$$

De geologiska parameterna har bestämts utifrån olika egenskaper se tabell 4.2.

**Tabell 4.2 :** Uppskattning av de olika geologiska parameterna i modell III (very good är endast baserat på ett fåtal injekteringar).

| Med hänsyn till                 | Parameter | Utvärdering (värde)                    |
|---------------------------------|-----------|----------------------------------------|
| Antal injekteringsbara sprickor | $\psi$    | 0.4 Very good rock                     |
|                                 |           | 0.2 Good rock                          |
|                                 |           | 0.1 Fair rock                          |
|                                 |           | 0.3 Poor rock, ofyllda sprickor        |
|                                 |           | 0.1 "- , halvfyllda sprickor           |
|                                 |           | 0.05 "- , fyllda sprickor              |
| Kanalvidd för injektering       | $\kappa$  | 4.0*                                   |
| Injekteringens mönster i berget | $\lambda$ | 1.5                                    |
| Medelvidd för injektering       | $\theta$  | 1.0**                                  |
| Sekundära sprickplan            | $\beta$   | Antal huvudsprickgrupper delat med två |

\* Vid LaFortuna - projektet har värdena på parametern justerats beroende på cementtyp

\*\* Antas stora sprickor (ca > 0.3 mm) och ingen sprickdeformation

Bestämningen av parametrarna har styrts genom provning, dels enligt tumregeln för fysisk inträngning, dels enligt fysikaliska antaganden (Janson, 1993, Stille et al, 1993, 1994). Tabell 4.2 skall dock ses som ett första försök att bestämma storleken hos parametrarna. Rimligheten i de gjorda uppskattningarna har dock efteråt kunnat verifieras genom den litteraturstudie som redovisats i kapitel 3.

Det har observerats att sämre berg har en högre frekvens av mer eller mindre konduktiva sprickor än bättre berg, men endast ett fåtal av dessa sprickor är injekterbara. Däremot är de konduktiva sprickorna i bättre berg mer injekterbara. Av detta fås alltså ett högre värde på  $\psi$  parametern i det bättre berget än i det sämre. Med hjälp av den uppmätta volymen och de fyra parametrarna  $\psi$ ,  $\lambda$ ,  $\theta$  och  $\beta$  kan kanalvidden  $b_g$  beräknas :

$$b_g = \kappa \cdot b_{hyd}$$

där parametern  $\kappa$  uttrycks som, från ekvation 2:36 :

$$\kappa = \sqrt{V_{inj} \cdot \left(\frac{2 \cdot \tau_0}{\Delta P}\right)^2 \cdot \frac{\rho_w \cdot g}{12 \cdot T \cdot \mu_w} \cdot \frac{\lambda^2}{\psi \cdot \theta \cdot \beta \cdot \pi}}$$

och  $b_{hyd}$  beräknas utifrån transmissiviteten och antalet vattenförande sprickor ( $N_w$ ), enligt ekvation 2:13 :

$$b_{hyd} = \sqrt[3]{\frac{12 \cdot T \cdot \mu_w}{\rho_w \cdot g \cdot N_w}}$$

Maximala inträngningen  $I_{III}$  kan sedan beräknas med hjälp av den beräknade sprickvidden, från ekvation 2:31 :

$$I_{III} = \frac{\Delta P \cdot b_g}{2 \cdot \tau_0 \cdot \lambda}$$

#### *Bedömning av modellen*

Resultatet från den beräknade volymen ( $V_{III}$ ) jämföras med den uppmätta ( $V_{inj}$ ). En ytterligare jämförelse kan göras mellan en vald och beräknad geologisk parameter, på grundval av den uppmätta volymen tillsammans med övriga parametar. Även från den beräknade sprickvidden ( $b_g$ ) och inträngningslängden ( $I_{III}$ ) kan en bedömning av modellens tillförlitlighet göras.

Även parametern  $\psi$  kan beräknats utifrån uppmätta injekteringsvolymen, enligt ekvation 2:36, och jämförts med den valda  $\psi$ , under förutsättning att övriga parametrar är kända :

$$\psi = V_{inj} \cdot \left(\frac{2 \cdot \tau_0}{\Delta P}\right)^2 \cdot \frac{\rho_w \cdot g}{12 \cdot T \cdot \mu_w} \cdot \frac{\lambda^2}{\kappa^2 \cdot \theta \cdot \beta \cdot \pi}$$

## 4.2 Äspötunneln, Oskarshamn

### 4.2.1 Allmänt

Arbetet med nedfartstunneln för Äspölaboratoriet, Oskarshamn, är genomförd som en selektiv förinjektering längs tunneln. Tunneln har gått igenom berg av varierande kvalitet och flera zoner med hög konduktivitet och stora vattentryck samt styrts av ett önskemål på begränsad spridning av injekteringsbruket i bergmassan.

Bergmassan har i huvudsak bestått av granit, vilket har skiftat från "äka" granit till mer dioritliknande. Den hydrauliska strukturen har i huvudsak funnits i enstaka sprickor, mindre förkastningar samt i större svaghetszoner. I två av zonerna har extrema injekteringsinsatser gjorts. Transmissiviteten har normalt varit i storleksordningen  $0.5 - 1.0 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ , men för de två zonerna varit betydligt högre  $2\ 000 - 15\ 000 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ .

Underlaget för beräkningarna och jämförelser mellan de tre modellerna är baserad på injekteringsresultaten av nedfartstunneln i sektion 0/000 - 2/600. Av 136 injekterings-skärmar har 44 st uppfyllt förutsättningarna, och dessa fyrtiofyra kan användas till beräkningar och bedömningar av modellerna. De gjorda injekteringarna har protokollförts under arbetet, så att volym, tryck och bruk har noterats samt en vattenförlustmätning har uppmätts för varje enskilt borrhål, innan injekteringen startat (Stille et al, 1993, 1994). De reologiska egenskaperna, dvs flytgränsen och viskositeten, har bestämts med hjälp av en Brookfield Rheoset rotationsviskosimeter och utvärderas enligt princip av Håkansson (1993).

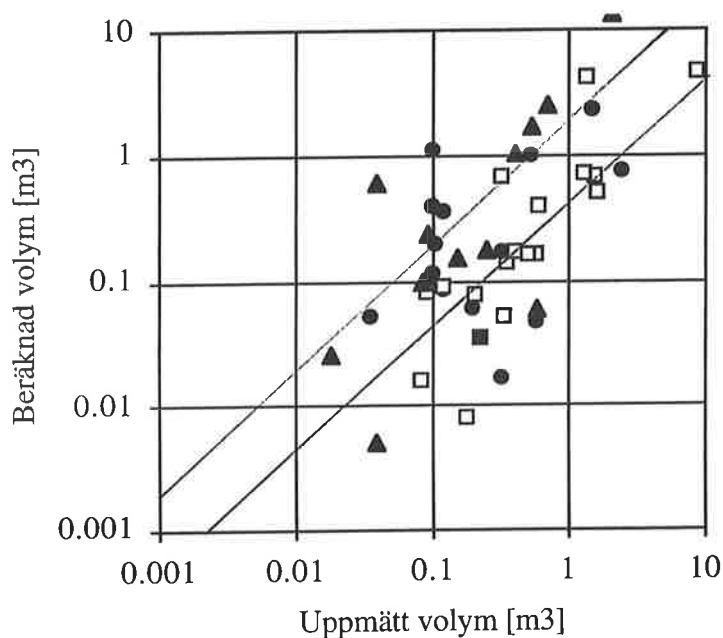
Tryck och injekteringsbruk har ofta varierats med tiden i varje enskilt injekteringshål. Vid beräkning har de tryck- och flytgränsvärden som varierats bestämts som ett medeltal för varje borrhål.

Tunnelkarteringen (Stanfors et al, 1993, 1994) har använts för att bestämma de olika geologiska parametrarna i modellerna och för att bestämma sprickfrekvensen. Sammanställning av de 44 skärmarna och för de 44 första borrhålen har redovisats i en tidigare rapport (Stille et al, 1993, 1994).

#### 4.2.2 Resultat

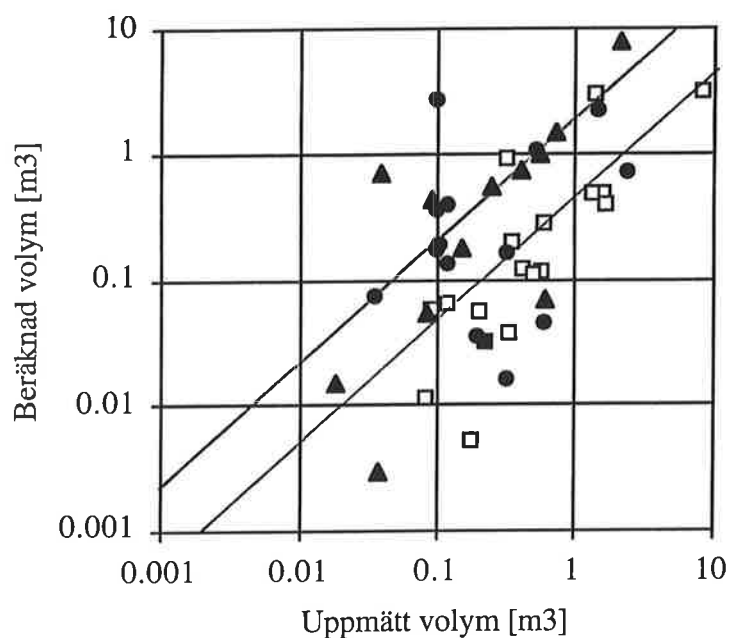
##### *Volymen*

Figur 4.1, 4.2 och 4.3 visar förhållandena mellan beräknad volym och uppmätt för respektive modell I, II och III. Punkterna mellan de inritade linjerna kan anses som tillförlitliga, dvs hamnar inom en faktor två. Varje enskild punkt i figurerna anger även från vilken bergklass (RMR) injekteringshållet har skett, fyllda kvadrater : Very good rock; ofyllda kvadrater : Good rock; fyllda trianglar : Fair rock och fyllda cirkelar : Poor rock.



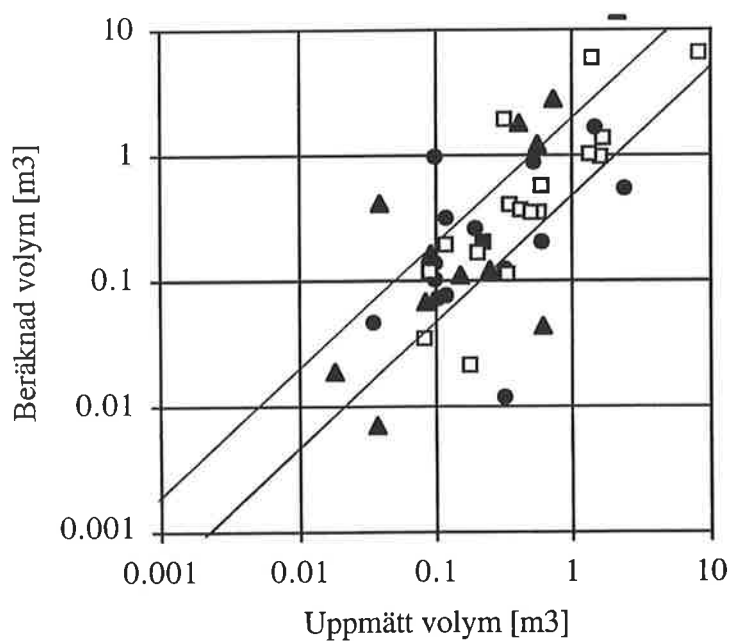
Figur 4.1 Förhållandet beräknad volym mot uppmätt för sprickplansmodell I

*Figure 4.1 Comparision between calculated and measured grout take for model I*



Figur 4.2 Förhållandet beräknad volym mot uppmätt för sprickplansmodell II

*Figure 4.2 Comparison between calculated and measured grout take for model II*



Figur 4.3 Förhållandet beräknad volym mot uppmätt för sprickplansmodell III

*Figure 4.3 Comparison between calculated and measured grout take for model III*

Tabell 4.3 visar medelvärdet och medianen av kvoten mellan beräknad och uppmätt volym i respektive modell samt andelen av tillförlitliga beräknade volymer. En regressionsanalys är utförd där korrelationskoefficienten  $r$  är redovisad i tabell 4.3.

**Tabell 4.3 :** Jämförelse mellan sprickplansmodellernas medelvärde, median och tillförlitlighet med avseende på kvoten, beräknad genom uppmätt volym samt korrelationskoefficienten  $r$  med volymerna som variabler.

| Modell | Medelvärde | Median | Tillförlitlighet | Koefficienten $r$<br>(idealvärdet är 1.0) |
|--------|------------|--------|------------------|-------------------------------------------|
| I      | 1.76       | 0.71   | 36 %             | 0.62                                      |
| II     | 2.07       | 0.58   | 30 %             | 0.56                                      |
| III    | 1.80       | 0.90   | 59 %             | 0.71                                      |

Medelvärdena är högre än medianerna, vilket kan förklaras med att ett fåtal hål har ett betydligt större beräknat värde än motsvarande uppmätt. Således bör medianvärdet väljas vid utvärderingen. Modell III ger det bästa volymsresultat jämfört med modell I och II.

#### *Sprickvidd*

Resultaten av de beräknade sprickvidderna finns redovisad i två tidigare rapporter (Stille et al, 1993, 1994). Den beräknade sprickvidden har jämförts med tumregeln för att en inträngning i en spricka skall vara möjlig. För de använda injekteringsbruken skall sprickvidden då vara större än  $200 \cdot 10^{-6}$  m för att en möjlig inträngning skall kunna ske. En jämförelse mellan modellernas medelvärde och median för sprickvidden visas i tabell 4.4 samt andelen av sprickvidder större än  $200 \cdot 10^{-6}$  m.

**Tabell 4.4:** Jämförelse mellan modellernas medelvärde, median och tillförlitlighet med avseende på sprickvidden.

| Modell | Medelvärde [m]      | Median [m]          | Andel över<br>$200 \cdot 10^{-6}$ m |
|--------|---------------------|---------------------|-------------------------------------|
| I      | $76 \cdot 10^{-6}$  | $76 \cdot 10^{-6}$  | 0 %                                 |
| II     | $120 \cdot 10^{-6}$ | $33 \cdot 10^{-6}$  | 23 %                                |
| III    | $303 \cdot 10^{-6}$ | $262 \cdot 10^{-6}$ | 66 %                                |

Sprickvidderna för modell I är koncentrerade till låga värden. Vidderna i modell II har en stor spridning, dvs med många låga och höga värden, vilket förklarar den stora skillnaden

mellan medel- och medianvärdet. Slutligen är sprickvidderna i modell III högre än i I och II, med flertalet över sprickkriteriet ( $200 \cdot 10^{-6}$  m).

### *Maximal inträngning*

Den verkliga maximala inträngningslängden har noterats till längder mellan 3 och 15 m från visuella borrhålsundersökningar (Rhen & Stanfors, 1993). Resultaten av de beräknade inträngningslängderna finns redovisade i två tidigare rapporter (Stille et al, 1993, 1994). Inträngningslängden i modell I är väl koncentrerad till kortare längder (2-14 m), medan längderna för modell II varierar kraftigt från 0 till 95 m. Beräknad längd mellan 5 och 15 m bestäms vara kriterium för modellernas tillförlitlighet med avseende på inträngningen, baserat på borrhålsundersökningen och det förhållandet att borrhålet som beräknas har den största åtgången bruk i skärmen. Tabell 4.5 visar medelvärdet och medianen för de uppskattade längderna i modellerna samt deras andel av tillförlitligheten.

**Tabell 4.5:** Jämförelse mellan modellernas medelvärde, median och tillförlitlighet med avseende på maximal inträngningslängd.

| Modell | Medelvärde [m] | Median [m] | Andel i intervallen 5-15m |
|--------|----------------|------------|---------------------------|
| I      | 5.8            | 4.9        | 45 %                      |
| II     | 13.0           | 2.8        | 16 %                      |
| III    | 14.9           | 11.8       | 59 %                      |

### 4.2.3 Övrigt

Ytterligare kontroll för att bestämma modellernas tillförlitlighet kan göras genom en bedömning av de olika parametrarna i modell II och III.

#### *Modell II*

Jämförelse mellan vald spridningsvinkel  $\alpha_{\text{vald}}$  och uppskattad  $\alpha$ , vilken är en funktion av uppmätt volym, ger att 12 borrhål (27%) i modellen ligger inom intervallen  $0.2 < \alpha_{\text{vald}}/\alpha < 5.0$ .

#### *Modell III*

Kontroll av parametern  $\psi$  görs efter bestämning av övriga faktorer (se tabell 4.2) samt av uppmätt volym och transmissivitet. Jämförelse mellan den valda  $\psi$  och beräknade ger att 37 borrhål (84%) ligger inom intervallen  $0.2 < \psi_{\text{vald}}/\psi < 5.0$ .

#### 4.2.4 Diskussion

Modellernas tillförlitlighet varierar mellan de olika modellerna och med hänsyn till de olika jämförda faktorerna (volym, sprickvidd eller inträngningslängd), se sammanställning tabell 4.6.

**Tabell 4.6 :** Jämförelse mellan modellernas tillförlitlighet med avseende på volym, sprickvidd och inträngningslängd.

| Modell | Volym<br>[%] | Sprickvidd<br>[%] | Inträngningslängd<br>[%] |
|--------|--------------|-------------------|--------------------------|
| I      | 36           | 0                 | 45                       |
| II     | 30           | 23                | 16                       |
| III    | 59           | 66                | 59                       |

#### *Samtliga modeller*

Tabell 4.6 visar att modell III har störst tillförlitlighet i jämförelse med modell I och II vid samtliga tre bedömningar. För modell I är ingen inträngning av bruk i sprickorna möjlig. Modell II uppvisar stor känslighet (stora spridningar hos resultaten) för mindre indatafel.

Det är av väsentlig betydelse för inträngningen är om injekteringen verkligen har skett till stopp. Modellförsök visar att en fullständig inträngning kräver en betydligt längre injektering än vad som är gjord. Tiden för injekteringsarbetet per borrhål varierar mellan 10 och 90 min i Äspö. Detta kan i vissa fall vara en betydande felkälla, eftersom modellerna förutsätter ett injekteringsstopp.

#### *Modell I och II*

I modell I och II tas ingen hänsyn till vattnets och injekteringsbrukens olika inträngningsförmåga i sprickor .

#### *Modell I*

För modell I behövs endast ett antagande (antalet sprickor) göras för att styra injekteringen med hjälp av tryck och bruk. Vid en jämförelse mellan de olika uppskattningarna mot de övriga modellerna ger modell I lägre värden hos sprickvidden och därmed även inträngningslängden. Modellen är den enklaste och ger delvis bra resultat över inträngningen och volymsberäkningen.

### *Modell II*

Tre antaganden behövs göras i modell II, för att kunna bestämma en förväntade injektering nämligen antalet sprickor, influensavståndet och spridningsvinkeln. Modell II ger störst spridning på resultatet av inträngningslängd och sprickvidd jämfört med modell I och III.

Problemet med modell II är, förutom bedömningen av spridningsvinkeln  $\alpha$ , antagandet av influensavståndet  $L$ , dvs hur fronten eller intilliggande öppna borrhål påverkar den yttre randen av sprickplanet.

### *Modell III*

För modell III behövs sex antaganden göras innan den förväntade injekteringen kan uppskattas. För användning av modellen behövs en större erfarenhetsbas för att kunna bedöma parametrarna. Modellen ger det bästa resultatet i jämförelse med modell I och II men innehåller flest faktorer. Bestämningen av de geologiska parametrarna styrs av bergskarteringen, och parametrarna är svåra att bedöma "rätt" med det begränsade erfarenhetsmaterialet.

## **4.3 LaFortuna-dammen, Panama**

### **4.3.1 Allmänt**

La Fortuna var ett dammprojekt i Panama som följdes upp genom ett examensarbete av Brantberger (1993). Den injektering som utfördes på La Fortuna var en skärminjektering i två rader, utförd genom en betongplatta längs dammperiferin. Här användes ett "splitspacing"förfarande, där hålen injekterades nedifrån och upp.

Längs den ena kanten, hädanefter benämnd "vänstra kanten", på dammen var de geologiska förhållandena homogena och bestående av uppsprucken och krossad andesit. Storleken på transmissiviteten var normalt cirka  $10 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ . Injekteringsabsorptionerna uppfylldes oftast (5-10 kg cement / meter borrhål) vid ett stoppkriterium på  $< 5 \text{ l/15 min}$  med ett sluttryck på 0.2 - 0.4 MPa beroende på djup. Hydraulisk uppspräckning erhöles vid 0.4 MPa, närmast ytan, efter tryckförsök. Sprickorna var ofta fyllda med framför allt kalcit och med en yta som var slät men med en skiffrig, spröd struktur. Utförd bergklassificering gav ett RMR - värde på cirka 50.

På den andra dammsidan, hädanefter benämnd "högra kanten", var de geologiska förhållandena mycket varierande med starkt vittrat berg närmast ytan men med tilltagande djup blev de successivt bättre. Bergarterna var skiftande andesit, agglomerat och breccia. Storleken på transmissiviteten varierade mellan 10 och  $1\,000 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ .

Sprickorna i det bättre berget var vittrade, så att omvandlingsprodukter som resudialjord eller klorit fyllde sprickorna. Kornfraktionen i det vittrade materialet var som hos sand eller ännu finare.

Injekteringsförloppet protokollfördes vart femte minut med avseende på mängd, tryck och bruk, tills ett stoppkriterium nåddes. Injekteringsbruket som normalt användes var ett portlandcement med vct 2.0, i volymrelation, och med tillsats av bentonit. Dessutom användes ett microcement med vct 1.4, i volymrelation, och med flytmedel. Brukens reologiska egenskaper bestämdes både på plats med en fältutrustning och i laboratoriet med hjälp av en rotationsviskosimeter (Brookfield Rheoset) och utvärderas enligt principer utarbetade av Håkansson (1993).

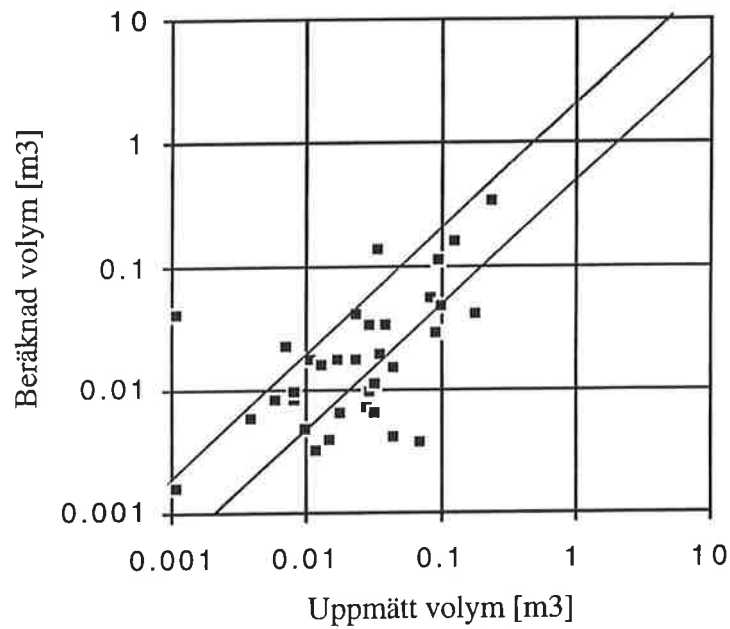
Pga de skilda geologiska förutsättningarna är beräkningarna uppdelade i två geologiska zoner, dels för vänstra kanten, dels för den högra. Antalet injekterade hål som är analyserade i vänstra respektive högra kanten är 36 st respektive 88 st.

Beräkningarna har begränsats till sprickplansmodell I och III. För modell III har värdet av den geologiska parametern  $\kappa$  justerats beroende på cementtyp. Vid injektering av portlandcement har ett något högre värde valts (6.5) och för mikrocementen ett något lägre (3.0). En sammanställning av de 124 injekteringshålens och dess indata för beräkningarna finns i examensarbetet (Brantberger, 1993).

#### 4.3.2 Resultat

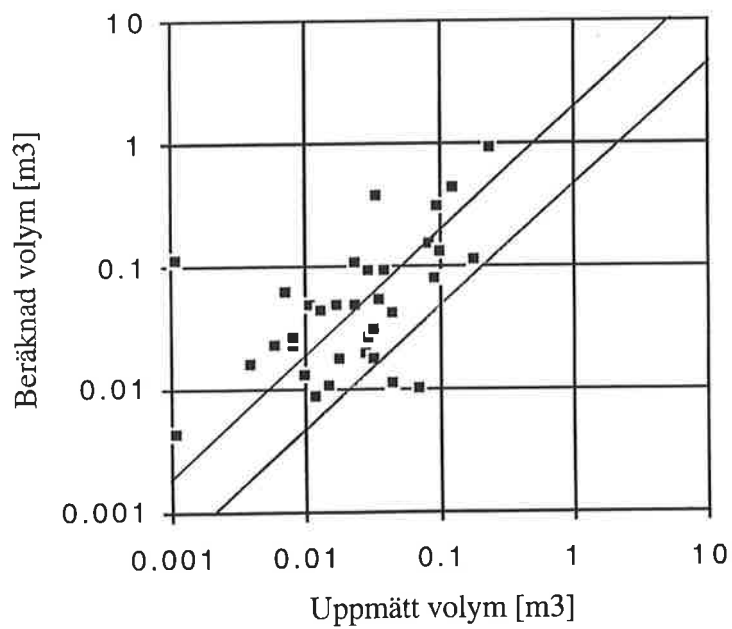
##### *Volymen*

Figur 4.4 och 4.5 visar förhållandet mellan beräknad och uppmätt volym för vänstra sidan baserat på modell I och III. Figur 4.6 och 4.7 visar motsvarande förhållande för högra sidan.



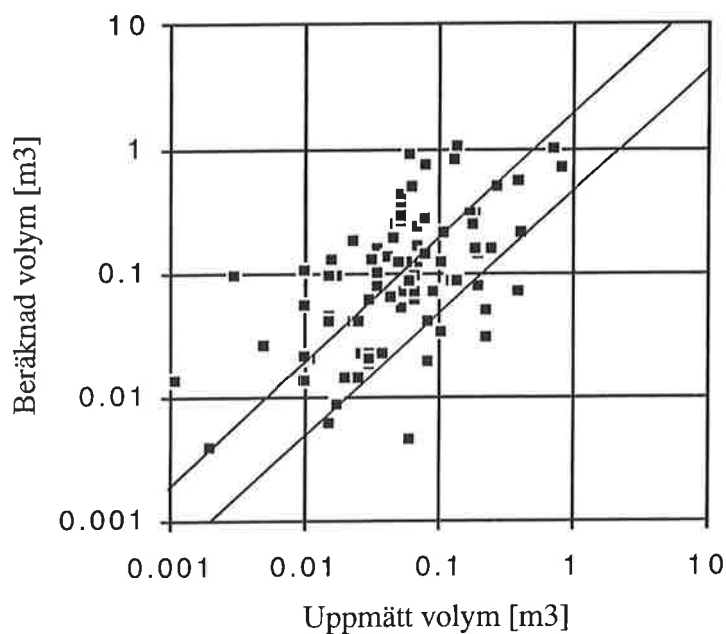
Figur 4.4 Förhållandet beräknad volym mot uppmätt för vänstra sidan och modell I

*Figure 4.4 Comparison between calculated and measured grout take for the left side and model I*



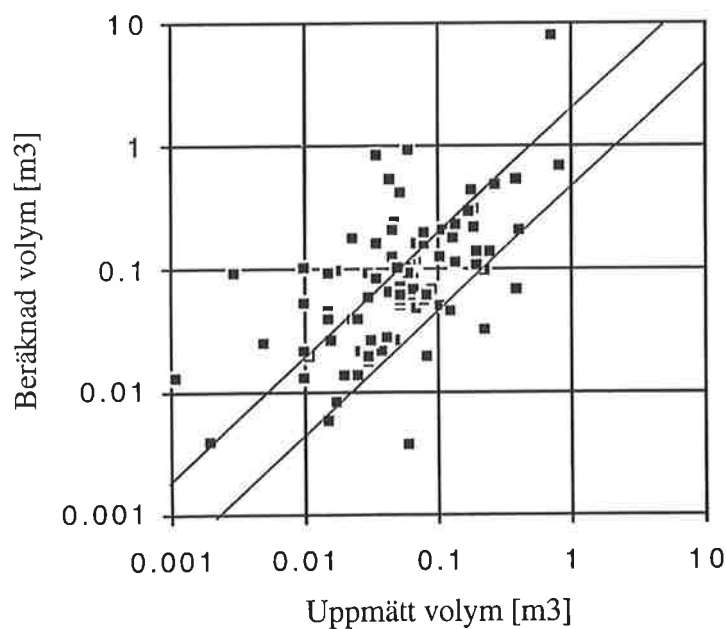
Figur 4.5 Förhållandet beräknad volym mot uppmätt för vänstra sidan och modell III

*Figure 4.5 Comparison between calculated and measured grout take for the left side and model III*



Figur 4.6 Förhållandet beräknad volym mot uppmätt för högra sidan och modell I

*Figure 4.6 Comparison between calculated and measured grout take for the right side and model I*



Figur 4.7 Förhållandet beräknad volym mot uppmätt för högra sidan och modell III

*Figure 4.7 Comparison between calculated and measured grout take for the right side and model III*

Tabell 4.7 visar medelvärdet och medianen av kvoten mellan beräknad och uppmätt volym för respektive sida och modell samt andelen av tillförlitliga beräknade volymer. Även en regressionsanalys är utförd mellan beräknad och uppmätt volym, där korrelationskoefficienten  $r$  är redovisad i tabell 4.7.

**Tabell 4.7:** Jämförelse mellan sprickplansmodellernas medelvärde, median och tillförlitlighet med avseende på kvoten beräknad genom uppmätt volym samt korrelationskoefficienten  $r$  med volymerna som variabler.

| Sida/<br>Modell | Medelvärde | Median | Tillförlitlighet | Koefficienten $r$<br>(idealvärdet är 1.0) |
|-----------------|------------|--------|------------------|-------------------------------------------|
| V/I             | 2.26       | 0.81   | 47 %             | 0.64                                      |
| H/I             | 3.04       | 1.66   | 46 %             | 0.45                                      |
| V/III           | 5.70       | 2.20   | 42 %             | 0.64                                      |
| H/III           | 2.90       | 1.44   | 59 %             | 0.56                                      |

Medelvärdet är högre än medianen, vilket kan förklaras med att ett fåtal beräknade hål har ett betydligt större värde än motsvarande uppmätta. Således är medianen mer användbar än medelvärdet vid en utvärdering av resultatet. Båda modellerna ger likartade resultat (median och tillförlitlighet), dock är tillförlitligheten bättre i modell III på högra sidan än i modell I.

### *Sprickvidd*

De beräknade sprickvidderna i modell I är nästan alltid mindre än de öppningar som krävs för att injektering med portlandcementtypen ska vara möjlig, vilket är baserat på den sk tumregeln att öppningen ska vara större än 2 - 5 gånger maximal kornstorlek, dvs de beräknade öppningarna är mindre än  $300 \cdot 10^{-6}$  m. I modell III beaktas möjlig penetrering i sprickkanaler av parametern  $\kappa$ , så att en stor andel av de beräknade öppningarna klarar tumregeln. En jämförelse mellan kanternas och modellernas medelvärde och median för beräknade spricköppningar samt andelen av öppningar större än  $300 \cdot 10^{-6}$  m redovisas i tabell 4.8.

**Tabell 4.8:** Jämförelse mellan kanternas och sprickplansmodellernas medelvärde, median och tillförlitlighet med avseende på sprickvidden.

| Sida/<br>Modell | Medelvärde [m]      | Median [m]          | Andel över<br>$300 \cdot 10^{-6}$ m |
|-----------------|---------------------|---------------------|-------------------------------------|
| V/I             | $53 \cdot 10^{-6}$  | $48 \cdot 10^{-6}$  | 0 %                                 |
| H/I             | $71 \cdot 10^{-6}$  | $66 \cdot 10^{-6}$  | 0 %                                 |
| V/III           | $370 \cdot 10^{-6}$ | $340 \cdot 10^{-6}$ | 69 %                                |
| H/III           | $440 \cdot 10^{-6}$ | $420 \cdot 10^{-6}$ | 74 %                                |

#### *Maximal inträngning*

Inträngningslängderna på de båda sidorna beräknades till mellan 1 och 6 m för modell I och 4 och 15 m för modell III. Fältobservationer indikerar att någon större horisontell spridning har ej skett, som exempelvis att c/c-avståndet mellan hålen är 1.0 - 1.5 m. Resultaten av de beräknade medel- och medianvärdena för inträngningslängden är presenterade i tabell 4.9.

**Tabell 4.9:** Jämförelse mellan kanternas och sprickplansmodellernas medelvärde, median och tillförlitlighet med avseende på maximal inträngningslängd.

| Sida/Modell | Medelvärde [m] | Median [m] |
|-------------|----------------|------------|
| V/I         | 1.8            | 1.6        |
| H/I         | 3.0            | 2.6        |
| V/III       | 7.2            | 6.6        |
| H/III       | 10.8           | 9.3        |

#### 4.3.3 Övrigt

Ytterligare utvärderingar av injekteringsresultatet har utförts, som exempelvis att finna samband mellan Luegontalet och injekteringsabsorption. Resultaten av den utvärderingen visar att inga direkta samband erhöles. Dock finns en tendens på rätlinjigt samband för mikrocementen mot Luegontalet. Även en utvärdering av tätningseffekten genom splitspacingförfarandet är utförd genom sk "reduction ration" samt frekvenshistogram (Weaver, 1991). Resultat tyder på att den vänstra sidan var ganska tät men att det rådde svåra injekteringsförhållanden med varierande tätningseffekt vid den högra.

#### 4.3.4 Diskussion

Skillnaden i resultat mellan modell I och III är liten för volymen, vilket kan bero på svårigheten att bestämma de geologiska parametrarna i modell III. För vänstra sidan är beräkningarna med modell I något bättre än med III, vilket ej var förväntat, eftersom de geologiska förhållandena var mer homogena och tydligare än på högra sidan och de geologiska parametrarna vara lättare att bestämma. Detta kan bero på att bestämningen av parametrar är delvis baserade på RMR - klassificeringen, vilket inte är helt bra. En egen klassificering av sprickornas injekteringsegenskaper skulle därför vara bättre.

Resultaten av spricköppningarna i modell I är orimliga. Detta kan förklaras med att ingen hänsyn tas till skillnaden i inträngningsförmågan mellan vatten och bruk i modell I.

Vid beräkningarna baserade på modell III har hänsyn till de två cementtyperna tagits, där mikrocementen har antagits ha en bättre inträngningsförmåga i sprickorna än portlandcementen. Den bättre inträngningsförmågan har justerats genom den geologiska parametern som beaktar sprickvidden. Dock bör även parametern som beaktar antalet injekterade sprickor ha olika värden beroende på cementtyp, vilket inte har gjorts i beräkningarna.

Bestämningen av flytgränsen är baserad på olika utvärderingsmetoder, statiska och dynamiska (Håkansson, 1993), som utförts i i fält respektive i laboratoriet. Dessa bestämningar ger naturligtvis olika värden på flytgränsen. Här valdes flytgränsvärdet som erhålls genom fältmätningen (stigrörsmätning), vilket motiverades med att mätningen efterliknar injekteringen väl, samt att utvärderingen ligger närmare det statiska värdet, som påverkar inträngningslängden i huvudsak, än dynamisk (Håkansson, 1993).

### 4.4 Uritunneln, Indien

#### 4.3.1 Allmänt

Uri var ett kraftverksprojekt i norra Indien som studerades och dokumenterades genom ett examensarbete av Rosenlind och Tichy (1993). Den uppföljning som är utförd koncentrerar sig på förinjekteringen av en sk ingångstunnel och en tilloppstunnel. Målet med tätningen var att få bergytan så pass torr att en betonginklädnad kunde göras utan några problem med vatteninläckning.

Ingångstunneln var belägen i sk Panjal-vulkanit, bestående av grönsten som uppträder omväxlande med skiffrighet eller i massiva skikt. De studerade tunnelavsnitten var rika på sprickzoner, vidare förekom lerzoner. Huvudsprickornas lutning var ofta vertikal. Även subhorisontella förekom, med ett avståndet mellan 6 - 20 cm och med vanligtvis skrovliga och lätt vittrade ytor med ett lerskikt. Storleken på transmissiviteten varierade mellan 10 och  $200 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ . Utförd bergklassificering gav ett RMR - värde mellan 50 och 60.

Tilloppstunneln var belägen i sk Tanawal-skiffer, bestående av kvartsitiska och kloritiska glimmerskiffrar, som avbröts på några ställen av Panjal-vulkanit. Huvudsprickornas lutning var ofta vertikal, nästan parallell med tunneln, men även tunna subhorisontella krosszoner förekom. I övrigt hade sprickorna samma egenskaper som ingångstunneln. Storleken på transmissiviteten varierade men var normalt cirka  $100 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ . Utförd bergklassificering gav ett RMR - värde mellan 40 och 50.

Vattenförlustmätningar utfördes sällan pga tidsförluster av tunneldrivningen. Dock utfördes ett fåtal mätningar av examensarbetarna, men endast en minuts mätning tilläts. Detta var dock inte tillfredsställande. Normalt rekommenderas minst två minuter och efter att ett fortvarighetstillstånd har uppnåtts. Mycket osäkra värden erhöles alltså för transmissiviteten. Tyvärr startade ibland inte injekteringen i det vattenförlustmätta hålen, så vid jämförelse mellan beräknad volym, vilken är baserad på mätningen, och uppmätt har det närmaste injekterade hålet använts.

Injekteringssättet var vanligtvis den sk "tjocka på" - metoden, dvs börja från bruk med höga vct (3.0) och övergå till lägre vartefter. Dessa bruk är ej separationsstabila, en separation mellan 25 och 30% uppmättes vanligtvis och med flytgränsvärden under 0.5 Pa, vilket innebär att medlet saknar en "verklig" flytgräns enligt Håkansson (1993). Volymåtgången för varje hål var svår att bestämma, eftersom varje pump har fyra utgångar och volymen registrerades enbart pumpen. Dessutom observerades att doseringen av tillsatser var bristfälligt utförd, samt att stora densitetsvariationer uppmättes av från gång till gång hos lika blandningar.

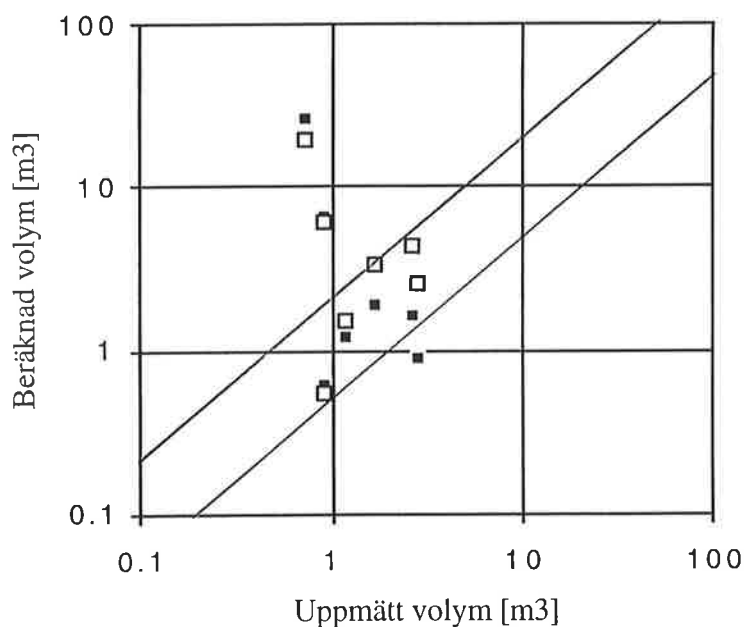
Förutsättningarna för att göra någon bra jämförelse mellan beräknad och uppmätt volym för flertalet skärmar är mycket små. Beräkningar är dock gjorda, baserade på de 10 skärmar som kunde följas upp direkt på plats och kontrolleras med avseende på dosering och bruksegenskaper (Rosenlind & Tichy, 1993). I denna rapport har ytterligare begränsningar av antalet skärmar gjorts. Skärmar som är injekterade med tunna bruk, dvs med uppmätta flytgränser under 0.5 Pa, är ej med i utvärderingen. Vidare är endast volymberäkningarna baserade på modell I och III, utvärderade pga av alla osäkerheter i

indata. Resultaten av de återstående sju hålen/skärmarna är presenterade i efterföljande avsnitt.

#### 4.3.2 Resultat

##### *Volym*

Figur 4.8 visar förhållandet mellan beräknad volym och verklig uppmätt för både modell I och III, där de ofyllda punkterna representerar modell I och de fyllda modell III. Punkterna mellan de inritade linjerna kan anses som tillförlitliga, dvs hamnar inom en faktor två.



Figur 4.8 Förhållandet beräknad volym mot uppmätt för sprickplansmodell I och III, där de ofyllda punkterna representerar modell I och de fyllda modell III

*Figure 4.8 Comparison between calculated and measured grout take for model I (non filling points) and model III (filling points)*

Tabell 4.10 visar medelvärdet och medianen av kvoten mellan beräknad och uppmätt volym i respektive modell.

**Tabell 4.10:** Jämförelse mellan sprickplansmodellernas medelvärde och median med avseende på kvoten, beräknad genom uppmätt volym.

| Modell | Medelvärde | Median |
|--------|------------|--------|
| I      | 5.8        | 1.6    |
| III    | 8.3        | 3.0    |

Medelvärdet är högre än medianen, vilket kan förklaras med att ett fåtal hål har ett betydligt större beräknat värde än motsvarande uppmätt. Således är medianen mer användbar än medelvärdet vid en utvärdering av resultatet. Modell I ger det bästa volymresultat jämfört med modell III. Dock är dessa resultat mycket osäkra och underlaget litet (endast sju hål) för att tolka några tydliga slutsatser av undersökningen.

#### 4.3.4 Diskussion

De beräknade värdena stämmer dåligt överens med de verkliga vilket inte var speciellt överraskande. Detta beror främst på tre faktorer : (i) modellerna är baserade på en homogen Bingham vätska dvs med en flytgräns och viskositet vilket de använda bruken ej alltid uppfyller, (ii) grunddatan som transmissiviteten är osäker, (iii) den jämförbara volymen bara kan uppskattas ifrån pumpen samt att antalet jämförelser är för få.

Tanken med "tjocka på" bruk är att försöka få bruket att tränga tillräckligt långt in i berget och sedan tjocka på vart efter. Metoden ger ofta ett godkänt resultat men är mycket tids- och rutinkrävande. Dock har bruket i detta projekt ej nått speciellt långt in vilket upptäcks vid ofta uppträdande läckage invid swellexbultarna som har en längd på 3m.

Studien visar framför allt hur viktigt det är med ett stabilt och homogent bruk för att injekteringsvolymen skall kunna styras genom trycket och bruksegenskaper.

## 4.5 Transporttunnel under Kungliga Biblioteket, Stockholm

### 4.3.1 Allmänt

Ändamålet med Kungliga Biblioteket-projektet var att spränga ut arkiv i berggrunden under biblioteket. I samband med dessa arbeten genomfördes sk injekteringstester, utförda i fyra injekteringsskärmar i transporttunneln nedre del (Andersson, 1994). Injekteringstesterna bestod av omfattande hydrauliska tester, olika injekteringsförfaranden

(SH-bruk, mikrobruk och kemiska medel fördelat på olika skärmdelar och etapper) samt egenskapsprovning av bruket och beräkningar baserade på sprickplansmodellerna.

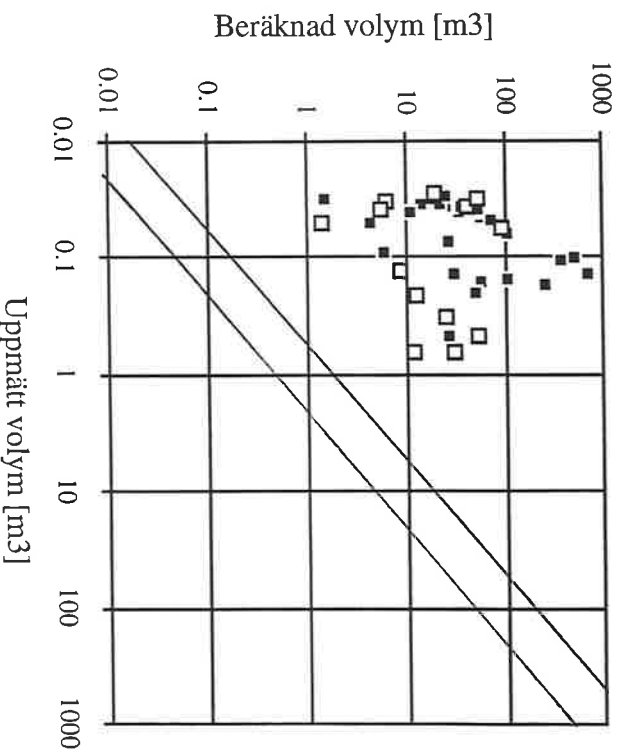
Berggrunden under biblioteket är en grå, medel- till grovkornig granit och en grå medelkornig gnejs. Berget är genomskuret av smala pegmatitgångar. Svaghetszonerna är sällsynta men omvandlad, stark vittrad röd granit förekommer. Sprickfrekvensen är generellt låg och bergkvaliten god. Transmissiviteten uppmättes till ca  $1 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  för de två första skärmarna och till mellan 1 och  $100 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  för de två efterföljande.

Eftersom modellerna baseras på att bergmassan kring injekteringshålen är ostörd efter vattenförlustmätningen, kan normalt endast förstahålen användas i jämförelsen mellan beräknad och uppmätt volym. För att få fler hål att analysera utvecklades en metod för att få fler hål vid beräkningen. Metoden baseras i första hand på injekteringsordningen och i andra hand på de hydrauliska sambanden som erhöles vid interferenstesterna. Målet var att finna hål som var så lite påverkade av injekteringsprocessen som möjligt. Vidare gjordes injekteringen i två etapper. Efter första etappen gjordes en ny vattenförlustmätning för att kontrollera delresultatet. Baserat på ovanstående kunde sammanlagt 40 injekteringshål analyseras.

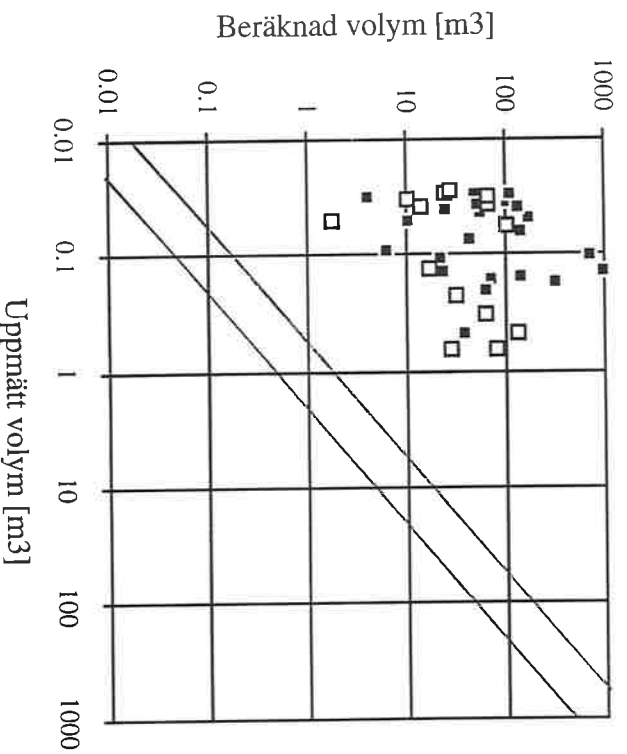
Injekteringsbrukens egenskaper mättes dels i fält, dels i laboratoriet med samma mätutrustning, dvs både fältutrustning och rotationsviskosimeter. De injekteringsbruk som användes i de 40 hålen var i första hand baserade på SH-cement, med tillsats av bentonit och intraplast med ett vattencementtal på 3.0. Ett fåtal hål baserades på mikrocement med tillsats av flytmedel, med ett vattencementtal på 1.5. Mätningarna gav en separation på 38% respektive 13% och mycket små flytgränser (0.1 respektive 0.6 Pa för SH-bruket respektive mikrobruket). Orsaken till den höga separationen för SH-bruket var att blandningsordningen mellan bentoniten och cementen var felaktig. Injekteringen är således inte möjlig att förutsäga med modellerna, eftersom de baseras på stabila och homogena bruk.

#### 4.3.2 Resultat

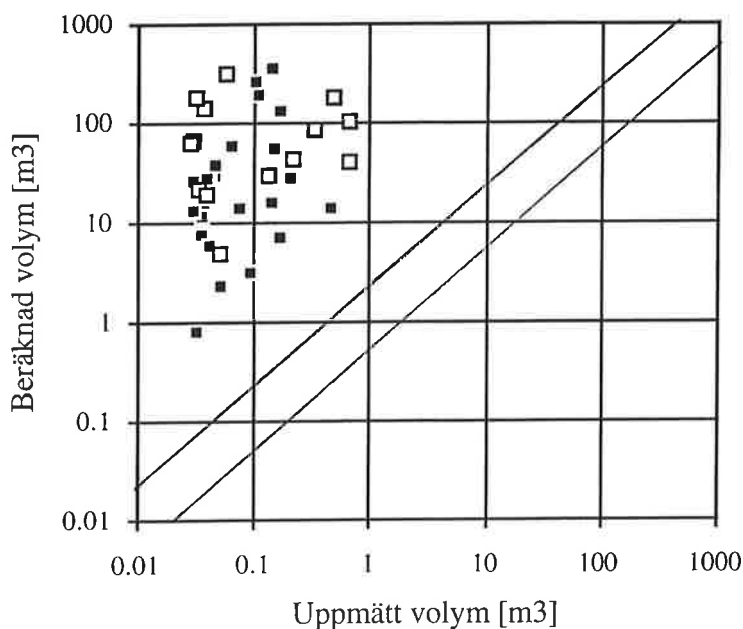
Injekteringsskärmarna har delats in i två grupper med olika geologiska förutsättningar (nr 20 och 21 respektive 23 och 24). Figur 4.9, 4.10 och 4.11 visar förhållandet mellan beräknad volym och uppmätt för respektive modell I, II och III, där ofyllda kvadrater representerar skärmarna 20 och 21 och fyllda kvadrater 23 och 24.



Figur 4.9 Förhållandet beräknad volym mot uppmätt för sprickplansmodell I  
 Figure 4.9 Comparison between calculated and measured grout take for model I



Figur 4.10 Förhållandet beräknad volym mot uppmätt för sprickplansmodell II  
 Figure 4.10 Comparison between calculated and measured grout take for model II



Figur 4.11 Förhållandet beräknad volym mot uppmätt för sprickplansmodell III

*Figure 4.11 Comparison between calculated and measured grout take for model III*

Tabell 4.11 visar medelvärdet och medianen av kvoten mellan beräknad och uppmätt volym i respektive modell.

**Tabell 4.11:** Jämförelse mellan sprickplansmodellernas medelvärde och median med avseende på kvoten beräknad genom uppmätt volym.

| Modell | Medelvärde | Median |
|--------|------------|--------|
| I      | 895.5      | 635.9  |
| II     | 1323.8     | 811.7  |
| III    | 893.8      | 409.1  |

#### 4.3.3 Diskussion

De beräknade värdena stämmer dåligt överens med de verkliga, vilket inte var speciellt överraskande. Endast de så kallade förstahålen kan användas vid jämförelsen. Dessa hål har endast injekterats med blandningarna SH 3.0 eller MC 1.5, som inte är stabila. Eftersom en stabil injekteringsfront förutsätts i beräkningarna, kan volymsåtgången egentligen inte prognostiseras med modellerna.

Vid en jämförelse mellan de tre modellernas beräknad injekteringvolym, kan en tydlig skillnad utläsas. För skärmparet i det täta berget (skärmar 20 och 21) fås i modell III överlägset störst volym, därefter modell II, och minst volym fås i modell I. I det uppspruckna berget (skärmar 23 och 24) ger en liknade beräkning det omvända, dvs minst volym för modell III, modell I något mer och slutligen ger modell II störst volym.

Studien visar framför allt hur viktigt det är med ett stabilt och homogent bruk för att få någon möjlighet att styra injekteringsvolymen med trycket och bruksegenskaperna.

#### **4.7 Slutsatser vid fältapplikationer**

De tre olika modellerna visar klart att injekteringen beror på främst tre olika kategorier av huvudfaktorer :

- (i) injekteringstekniken, såsom valt injekteringstryck och bruk (olika bruksegenskaper)
- (ii) bergets hydrologi uttryckt i transmissivitet
- (iii) bergets geologiska egenskaper, såsom sprickfrekvens och öppningsgeometri.

##### Injekteringsmedel

För att kunna förutsäga något om injekteringen genom de uppställda modellerna måste stabila och filtreringsstabila injekteringsmedel användas, vilket medlen i Uritunneln och Kungliga Biblioteket-projektet inte var.

Rätt blandningsordning av tillsatskomponenter är nödvändig för att uppnå sökt injekteringseffekt.

##### Egenskapsmätningar

För alla modeller är flytgränsen av stor betydelse, och en liten förändring av uppskattat värde kan resultera i stora fel i beräknad injekteringsvolym.

Skillnader i mätresultat för flytgränsen mellan fältutrustning och viskosimetern är oundvikliga. Fältutrustningen ger en god uppfattning om kvaliteten på blandningen, speciellt mellan olika blandningsomgångar i fält. Mycket tunna blandningar, dvs sådan

med mycket låga reologiska egenskaper, är svårsmätbara och osäkra för mätningar med viskosimetern och speciellt med fältutrustning.

Förslagsvis görs egenskapsbestämningen i laboratorium före injekteringen (med samma blandningsordning som i fält), med viskosimetern och fältutrustning, varefter regelbunden mätning med fältutrustning utförs i fält.

### Sprickplansmodellerna

Modellerna övervärderar ibland värdet på volymen för enstaka hål något, pga att injekteringen ofta ej sker till verkligt stopp. Således bör medianvärdet från flera hål användas vid uppskattning av injekteringsvolymen.

Den förväntade injekteringsvolymen är även direkt beroende av beräknad transmissivitet. Den beräknade transmissiviteten är dock beroende av utvärderingsmetod. Felet i beräknad transmissivitet kan vara upp till en tiopotens.

Kunskapen om hur geologin påverkar injekteringsens spridning är liten. I modell III har flera olika hänsyn tagits till geologin med goda resultat, men underlaget är begränsat. Modellerna bör dock kunna utgöra basen i ett framtida klassificeringssystem för injektering. Speciellt bör variansen på sprickvidderna beaktas, eftersom den har stor betydelse för bruksflödet.

Tillämpningar av modellerna har givit ytterligare begränsningar såsom :

- kan oftast endast användas i sk förstahål, pga den påverkan av transmissiviteten och geologin som erhålls vid injekteringen i sådana hål.
- förutsätter att den injekterbara sprickan är så stor att injekteringsfronten endast stoppas upp av flytgränsen och inte av någon filterplugg eller sprickände.
- tar ingen direkt hänsyn till eventuella förändringar under injekteringen.

## 5 STUDIE AV INJEKTERADE SPRICKOR, Äspö

### 5.1 Bakgrund

Syftet med detta kapitel är att verifiera sprickplansmodellerna. Detta görs genom att jämföra i fält uppmätta sprickvidder med beräkningar baserade på modellerna. De beräknade vidderna har bestämts med olika geometriska antaganden för sprickplanen beroende på geologin. Ett av målen är att kunna bestämma de geologiska parametrarna i detalj och jämföra dem med de värden som har uppskattats i tidigare kapitel (4.1). Vidare undersöks hur karaktären på sprickor påverkar injekteringens spridning i hårt berg och om de injekterade sprickorna har några gemensamma kännetecken, såsom typ, viddfördelning mm.

Först redovisas medelsprickvidderna av uppmätta sprickor. Sedan beräknas de teoretiska vidderna med hjälp av olika sprickplansmodeller och typer av flöden (vatten eller injekteringsbruk). Slutligen jämförs de uppmätta vidderna med de beräknade, och en diskussion förs över giltigheten av mätningen, olika antaganden och resultatet av analysen.

### 5.2 Uppmätta sprickor

#### 5.2.1 Allmänt

Sprickor och zoner med höga vattenflöden har injekterats i transporttunneln ner till Äspölaboratoriet, Oskarshamn. Under drivningens gång har en utförlig sprickkartering gjorts av tunneln, då bland annat sprickinnehåll och förekomst av injekteringsbruk noterats. Bruket var rödfärgat för att framträda bättre. Fem av de totalt 170 karterade sprickorna med bruk har studerats i detalj från tunnelytan med avseende på injekteringsmedlets inträngningsförmåga i sprickor. De fem observerade sprickorna är benämnda efter tunnelsektion. Vid en sektion (1140) har två sprickor observerats och skiljs åt genom tillägget W eller R (W för vägg och R för tak). Dessutom har två sprickor (1140 W och 2667) varit möjliga att mäta i två olika sprickprofiler (vinkelrätt till

varandra). Det begränsade antalet observerade sprickor beror på praktiska problem, såsom att de är svårfunna under utfällningar och smuts.

### 5.2.2 Mätmetod

Efter ytrensning av varje sprickprofil har en referenslinje placerats parallellt med profilen och mätts in med avseende på orientering i rymden. Mätning av sprickvidden är utförd med skjutmått som har en noggrannhet på en tiondels millimeter. Mätningen har utförts var femte millimeter längs profilen. Sprickprofilerna är även dokumenterade med fotografier, på vilka även en kontrollmätning har gjorts. Längden på mätprofilerna varierar mellan 30 och 90 cm, beroende på att endast sammanhängande profiler av bruk har mätts samt att bergets irregularitet påverkar möjligheten att mäta sprickprofilen på plats. Några av de observerade sprickprofilerna är presenterade i bilaga 2.

### 5.2.3 Geologi

Orientering (strykning/styrkningsvinkel), trolig spricktyp samt övriga geologiska kännetecken hos de fem observerade och uppmätta sprickorna är presenterade i tabell 5.1.

**Tabell 5.1** Tunnelläge, orientering, spricktyp och övriga geologiska kännetecken för de fem observerade sprickorna

| Spricka | Orientering | Spricktyp       | Övriga observationer                                       |
|---------|-------------|-----------------|------------------------------------------------------------|
| 1140 W  | 004 / 78    | Skjuv ("fault") | glatt glidyta ("slicken lines"), kalcit och klorit fyllnad |
| 1140 R  | 288 / 84    | Drag            | klorit fyllnad                                             |
| 1873    | 92 / 72     | Drag            | klorit fyllnad                                             |
| 2287    | 127 / 90    | Drag            | kalcit och klorit fyllnad                                  |
| 2667    | 120 / 86    | Skjuv ("fault") | glatt glidyta ("slicken lines"), kalcit och klorit fyllnad |

Spricka 1140 W är väl synlig i tunneln, där den är över 15 m lång. Sprickmineraliseringen består av både kalcit och klorit vilket indikerar "reaktivering". En glatt glidyta är också synlig i planet med en svag lutning. Spricka 1140 R skär nästan vinkelrätt genom spricka 1140 W. Det är en tydlig dragspricka med taggig profil och en liten spridning av sprickvidden, och den har endast mineralisering av klorit. Den enstaka sprickan 1873 är troligtvis en dragspricka men syns ej helt tydligt. Den uppvisar endast

mineralisering av klorit. Spricka 2287 är den smalaste av de observerade sprickorna, med långa, raka, synliga sprickändar med nollvidder. Denna spricka är troligtvis en dragspricka och skärs inte av någon annan spricka. Den har mineralisering av kalcit och klorit. Spricka 2667 påminner mycket om skjuvsprickan 1140 W. Sprickmineraliseringen består av både kalcit och klorit. Dessutom har sprickan glatt glidyta med svag lutning och är således en tydlig skjuvspricka.

#### 5.2.4 Resultat av sprickviddsmätning

De uppmätta sprickvidderna är presenterade i diagram (se bilaga 3 och 4) både i nominell skala (bilaga 3) och i logaritmisk skala (bilaga 4). Från de uppmätta vidderna beräknas det aritmetiska medelvärdet och dess standardavvikelser, medianvärdet samt det harmoniska medelvärdet för varje spricka. Baserat på de observerade sprickprofilerna och med hjälp av typiska sprickprofilsmallar (Brown, 1981) har råhetskoefficienten JRC bestämts. Bergklassificeringen RMR, JRC och de beräknade medelvärdena är presenterade i tabell 5.2 för de uppmätta sprickorna.

**Tabell 5.2** Bergklassificeringen RMR, råhetskoefficient JRC, aritmetiska medelvärdet och dess standardavvikelse, median och harmoniska medelvärdet för de uppmätta sprickorna

| Spricka | Bergklassi-<br>ficering | JRC   | Aritmetiskt<br>medelvärde | Standard-<br>avvikelse | Median | Harmoniskt<br>medelvärde |
|---------|-------------------------|-------|---------------------------|------------------------|--------|--------------------------|
|         | [RMR]                   |       | [mm]                      | [mm]                   | [mm]   | [mm]                     |
| 1140 W  | Good                    | 4-6   | 4.42                      | 2.55                   | 4.35   | 2.45                     |
| 1140 R  | Good                    | 14-16 | 2.49                      | 1.23                   | 2.35   | 1.85                     |
| 1873    | Good                    | 8-10  | 1.66                      | 1.07                   | 1.45   | 1.06                     |
| 2287    | Good                    | 10-12 | 1.05                      | 0.60                   | 0.95   | 0.71                     |
| 2667    | Fair                    | 6-8   | 3.51                      | 2.05                   | 2.85   | 1.99                     |

Skjuvsprickorna, 1140 W och 2667, är uppmätta i två delprofiler längs sprickan. De två delprofilerna är även vinkelräta mot varandra, dvs är uppmätta längs tunnelväggen eller taket. Skjuvsprickor har vanligtvis en profil som är vågig pga skjuvrörelsen. Denna vågighet tillsammans med att de uppmätta sprickorna är brantstående gör att de uppmätta delprofilerna skär sprickplanet antingen längs eller tvärs sprickans vågighet. De uppmätta delprofilerna har olika riktningar i sprickplanet (längs eller tvärs sprickans vågighet). För

spricka 1140 W har vågigheten även visats av Hakami (1994). Resultat av mätningen för de olika riktningarna är presenterade som histogram i bilaga 5. Resultaten visar att en och samma skjuvspricka har olika viddfördelningar beroende på riktning i sprickplanet. Detta förklaras utav skjuvsprickans vågighet. Värdet på vidden är högre och profilen är mjukare längs vågigheten än mätprofilen tvärs vågigheten i skjuvsprickorna (se tabell 5.3). Vidare har en analys med semivariogram gjorts (bilaga 6) för att styrka de olika riktningarnas karaktär. Semivariogrammen av uppmätt vidd och profil visar att det finns skillnader i korrelation mellan de olika riktningarna beroende på hur mätprofilen skär vågigheten. För riktningen tvärs vågigheten finns en periodicitet, dvs en återkommande korrelation, medan längs vågigheten inga perioditeter kan upptäckas.

**Tabell 5.3** Råhetskoefficient JRC, aritmetiskt medelvärde och dess standardavvikelse, median och harmoniskt medelvärde för de olika profilerna i skjuvsprickorna 1140 W och 2667

| Spricka     | JRC | Aritmetiskt<br>medelvärde<br>[mm] | Standard-<br>avvikelse | Median<br>[mm] | Harmoniskt<br>medelvärde<br>[mm] |
|-------------|-----|-----------------------------------|------------------------|----------------|----------------------------------|
| 1140 längs* | 6   | 6.39                              | 2.24                   | 5.90           | 5.80                             |
| 1140 tvärs* | 4   | 3.78                              | 2.30                   | 3.48           | 2.06                             |
| 2667 längs* | 6   | 5.73                              | 1.53                   | 5.65           | 5.36                             |
| 2667 tvärs* | 8   | 2.22                              | 0.86                   | 2.27           | 1.46                             |

\*Skjuvsprickor har en vågig profil och uppmätning kan göras längs två olika profiler i sprickan, dels längs vågigheten dels tvärs.

### 5.2.5 Diskussion

Det bör observeras att de uppmätta sprickvidderna och dess medelvärden i tabell 5.2 och 5.3 endast är baserade på de uppmätta sprickprofilerna. Hur representativa de uppmätta profilerna är för hela sprickan kan endast gissas. Gissningsvis är de uppmätta sprickornas vågighet och ytråhet representativa sprickorna i sin helhet. Däremot representerar storleken på sprickvidden sannolikt den övre halvan av hela sprickornas viddfördelning.

De uppmätta värdena på sprickvidden är höga, ca 1-4 mm. De höga värdena är ett resultat av urvalsprocessen för att finna möjliga sprickor att mäta i fält. Urvalet har baserats på två kriterier : dels att de injekterade sprickorna ska vara synliga på bergyta i tunneln, dels att

sprickorna ska gå att komma åt med mätutrustningen. Detta gör att de studerade sprickorna tillhör en grupp av starkt vattenförande sprickor som finns i berget. Dessa är dock ur injekteringssynpunkt de som först och främst bör tätas.

Enligt tumregeln för inträngning av injekteringsbruk i smala spalter kan endast sprickor med en vidd större än 0.2 mm penetreras med de använda cementtyperna. I överensstämmelse med detta är således alla uppmätta punkter längs sprickprofilen större än 0.2 mm. Sprickplanen har dock kontaktytor vilka inte är möjliga att fylla med injekteringsbruk, och dessa ytor förekommer således bara när vidderna är mindre än 0.2 mm. Vattnet kan naturligtvis tränga in i spricköppningar mindre än 0.2 mm.

För dragsprickorna har troligtvis mätprofilen i sprickan gjorts längs kanaler mellan sprickans kontaktytor (se kapitel 3). Sprickvidderna representerar således kanalvidden i sprickan. Den teoretiska kanalvidden,  $b_g$ , definieras som : inversen av summa inversen för viddstorleks punkter längs en injekterad sprickkanal ( $1/b_g = 1/n * \sum 1/b_i$ ), vilket är detsamma som det harmoniska medelvärde för en talserie. De harmoniska medelvärdena i tabell 5.2 är höga, men värdet representerar, som tidigare sagts, vidden för starkt vattenförande dragsprickor. Antagandet att de uppmätta värdena är representativa baseras på ; 1) att de tre dragsprickorna är i samma storleksordning ; 2) att sannolikheten är liten för att alla tre sprickkanalerna är sk extremer.

För de synliga delarna av skjuvsprickorna har ingen kontaktyta kunnat registreras. Skjuvsprickorna är också väl dokumenterade som sk enstaka högkonduktiva sprickor (Stanfors et al, 1993, 1994, Munier & Hermansson, 1994) och bör logiskt sett även ha relativt höga sprickviddsvärden. En kontroll kan göras av att inte något extremt område i sprickorna har undersökts för spricka 1140 W. Detta med hjälp av resultat från en tidigare undersökning av sprickan (Hakami, 1994). I undersökningen har en yta istället för en profil uppmätts och analyserats för att beskriva spricköppningsgeometrin. I studien har viddfördelningen över en större yta undersökts, där resultatet av vidden visade ett aritmetiskt medelvärde på 2.3 mm. Dock har ungefär 40% av ytan en vidd mindre än 0.15 mm. Denna yta definieras som kontaktyta (se kapitel 3), och sprickvidder mindre än 0.15 mm kan ej anses som injekterbar. Om samma andel kontaktyta antas längs mätprofilen för spricka 1140 W skulle det aritmetiska medelvärdet beräknas till 2.7 mm. Den beräknade medelvidden skulle således vara i samma storleksordning som den tidigare studien av samma spricka, vilket styrker att uppmätningen är representativ för sprickdelen. Enligt Hakami (1994) skall längden av den uppmätta profilen vara minst 500 gånger större än medelvärdet av sprickvidden, om en uppmätning säkert skall kunna karaktärisera

sprickan. Denna rekommendation har dock inte varit möjligt att följa vid den gjorda mätningen.

#### 5.2.6 Slutsatser

Uppmätningen visar på en klar skillnad mellan viddfördelningen för drag- respektive skjuvspricka. Skjuvsprickorna har högre värden och större spridning på vidden än dragsprickorna, se tabell 5.2.

Dragsprickorna synes ha samma viddfördelning längs en profil oavsett mätprofilens riktning i planet, medan skjuvsprickorna har en klar skillnad på viddfördelning, beroende på hur mätprofilen ligger i förhållande till sprickytans vågighet. Mätprofilen längs ytans vågighet ger högre värden på vidden än tvärs vågigheten (se tabell 5.3). De uppmätta skjuvsprickorna kan förväntas ta mer injekteringsbruk än dragsprickorna. Detta främst beroende på större vidder. I relation till vidden fås dock en mindre volym i skjuvsprickorna jämfört med dragsprickorna pga vågigheten och den större spridningen på vidden, som ger ett mer asymmetriskt spridningsmönster samt fler strypningar av flödet. För dragsprickor kan det omvända förväntas, dvs en mer symmetriskt kanalinträngning i sprickan och mindre strypningar längs kanalerna.

De uppmätta viddfördelningarna synes följa en normal eller lognormal fördelning (se bilaga 3 och 4). Lognormal-fördelningen beskriver dock resultatet bättre, eftersom en beskrivning med normalfördelning ger negativa värden på vidden vid den undre fördelningssvansen.

### 5.3 Beräknad vidd - detaljerad geologi

#### 5.3.1 Allmänt för beräkningar och geologi

Två skilda beräkningssätt har använts för beräkning av den teoretiska vidden, beroende på olika geometriska antaganden och indata. :

- |     |                                    |                                                                                    |
|-----|------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| (i) | Hydrauliska och mekaniska vidden : | baserad på indata från vattenförlust-mätningen och antalet vattenförande sprickor. |
|-----|------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|

- (ii) Injekteringsvidden : baserad på indata från injekterings-  
volymen, trycket och bruks-  
egenskaper.

De följande beräkningarna av vidden baseras på indata från den detaljerade karteringen av de fem sprickorna. Den detaljerade karteringen är baserad dels på visuella observationer vid uppmätningen av de enskilda sprickorna, dels på den tunnelkartering som har gjorts kontinuerligt av varje spricka under tunneldrivningens gång. Indata från tunnelkarteringen är främst sprickfrekvensen och bergkvalitet, där sprickfrekvensen är antalet bedömda eller karterade vattenförande sprickor.

Sprickorna 1140 W och 2667 är dokumenterade som sk enstaka högkonduktiva sprickor (Stanfors et al, 1993, 1994). Det är med största sannolikhet dessa sprickor som har varit helt dominerande vid vattenförlustmätningen och injekteringen av borrhålet. Därför antas det här att endast en konduktiv spricka har funnits i dessa borrhål, trots att mindre sprickor med små vattenflöden har observerats längs tunnelväggen parallellt med borrhålet efter sprängningen.

I tabell 5.4 presenteras antalet konduktiva sprickor (tolkning av karteringen),  $N_w$  ; det uppmätta värdet på transmissiviteten,  $T$  ; och det total antalet sprickor (Stanfors et al, 1993, 1994),  $N$ , längs de injekterade borrhålen. Dessa värden ( $N_w$ ,  $T$  och  $N$ ) utgör grunddata för samtliga beräkningar av vidden.

**Tabell 5.4** Grunddata för beräkning av vidden

| Spricka | Antal konduktiva sprickor, $N_w$ | Transmissivitet $T$ ,<br>[m <sup>2</sup> /s] | Totalt antal sprickor, $N$ |
|---------|----------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------|
| 1140 W  | 1*                               | $10.8 \cdot 10^{-6}$                         | 56                         |
| 1140 R  | 3                                | $8.8 \cdot 10^{-6}$                          | 57                         |
| 1873    | 5                                | $8.0 \cdot 10^{-6}$                          | 44                         |
| 2287    | 4                                | $3.4 \cdot 10^{-6}$                          | 46                         |
| 2667    | 1*                               | $21.0 \cdot 10^{-6}$                         | 42                         |

\* enstaka högkonduktiv spricka

### 5.3.2 Hydrauliska vidden

Beräkningen av den hydrauliska vidden baserar sig på teorier för vattenflödet i planparallella sprickor med en konstant vidd,  $b_{hyd}$  (se figur 5.1). Vattnet injiceras in i borrhålet, vilket i sin tur korsar sprickan, och vattnet trycks in i sprickan.



Figur 5.1 Hydrauliska vidden,  $b_{hyd}$ , för en planparallell spricka

Figure 5.1 Hydraulic aperture,  $b_{hyd}$

#### Samband

Vidden i en planparallell spricka kan uttryckas med hjälp av den sk "cubic law", vilken är baserad på ett laminärt flöde och Darcy's lag, som :

$$b_{hyd}^3 = \frac{12 T \mu_w}{\rho_w g N_w} \quad (5.1)$$

där transmissiviteten,  $T$ , beräknas från vattenförlustmätningen ;  $\mu_w$  är viskositeten för vatten ( $1.3 \cdot 10^{-3}$  Pas vid  $+ 10^\circ\text{C}$ ) ;  $\rho_w$  är densiteten för vatten och  $g$  är jordaccelerationen.

#### Resultat

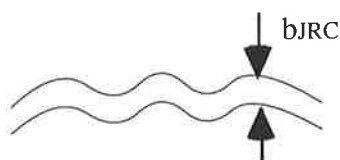
Den hydrauliska vidden är beräknad enligt ekvation (5.1) och grunddata ( $T$  och  $N_w$ ) är tagna från tabell 5.5. Resultatet för de fem sprickorna är presenterat i tabell 5.5.

**Tabell 5.5** Beräknad hydraulisk vidd

| Spricka | Hydraulisk vidd $b_{hyd}$ [mm] |
|---------|--------------------------------|
| 1140 W  | 0.260                          |
| 1140 R  | 0.170                          |
| 1873    | 0.140                          |
| 2287    | 0.110                          |
| 2667    | 0.320                          |

### 5.3.3 Mekaniska vidden

Mekaniska vidden,  $b_{JRC}$ , är en modifiering av den hydrauliska. Sprickvidden beräknas utifrån sprickans vågighet och ytråhet, se figur 5.2.



Figur 5.2 Mekaniska vidden,  $b_{JRC}$ , för en rå sprickyta

Figure 5.2 Mechanical aperture,  $b_{JRC}$

Bestämningen av den mekaniska vidden är baserad på att sprickans mekaniska råhet är känd och att den hydrauliska vidden är beräknad. Råheten är identifierad enligt JRC - index (joint roughness coefficient). Den mekaniska vidden tar hänsyn till sprickans råhet men inte till några viddvariationer i sprickan, dvs bestämningen ger ett medelvärde på hela sprickans vidd. Syftet med råhetskorrrelationen är att ju råare sprickan är desto mer bromsas vattenflödet i sprickan upp och tolkningen av vidden från vattenförlustmätningen blir undervärderad (se kapitel 3).

### Resultat

Den mekaniska vidden är beräknad enligt ekvation (5.1) och korrigerad med hjälp av det empiriska diagrammet i figur 3.10. Grunddata är presenterade i tabell 5.4 samt beräkningsresultatet i tabell 5.6.

**Tabell 5.6** Beräknad mekanisk vidd

| <b>Spricka</b> | <b>Mekanisk vidd <math>b_{JRC}</math> [mm]</b> |
|----------------|------------------------------------------------|
| 1140 W         | 0.260                                          |
| 1140 R         | 0.370                                          |
| 1873           | 0.200                                          |
| 2287           | 0.180                                          |
| 2667           | 0.320                                          |

#### 5.3.4 Grunddata för beräkningar av injekteringsvidder

De tre beskrivna sprickplansmodellerna i kapitel två har utnyttjats för att beräkna injekteringsvidderna. Modellerna är baserade på olika geometriska antaganden. Modell I har en konstant vidd, modell II har en konstant kanalvidd och modell III har en varierande vidd, dels längs kanalströmningen, dels över hela sprickplanet.

Beräkningarna baseras på förutsättningar om att injekteringstrycket och flytgränsen för bruket är kända och konstanta under injekteringsförloppet samt att flödet har nått ett stopp och att det inte finns någon sprickdeformation pga injekteringstrycket.

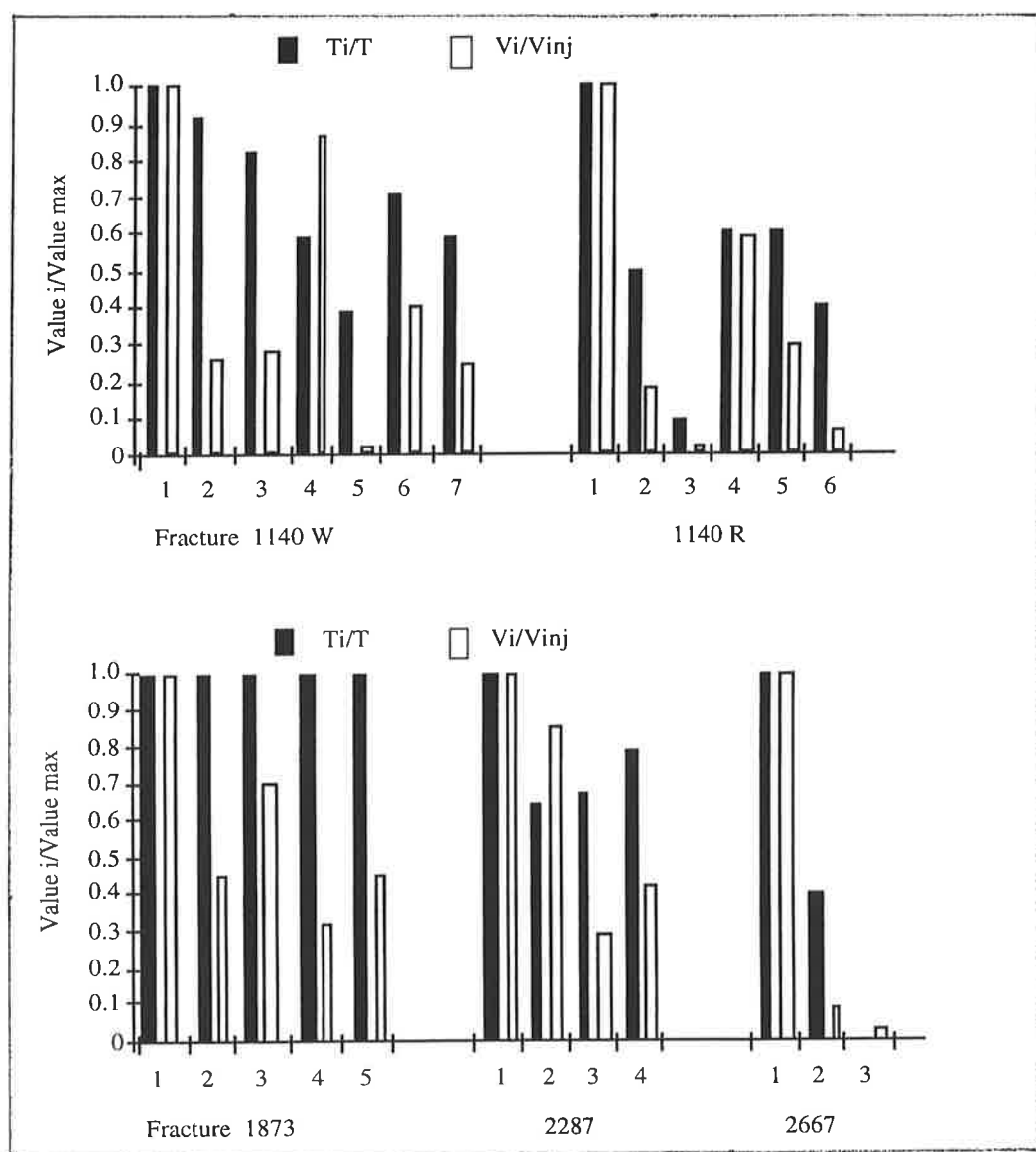
Beräkning av de tre vidderna är alla baserad på uppmätta värden på injekteringstrycket ( $\Delta P$ ), volymen ( $V_{inj}$ ) och flytgränsen ( $\tau_o$ ) för bruket.

Att bedöma vilket/vilka borrhål i injekteringsskärmen som har korsat den uppmätta sprickan och fyllt den med bruk är inte helt lätt. Bedömningen görs i två steg. Första steget är att lokalisera möjliga borrhål som kan tänkas korsa sprickan. Detta görs med hjälp av sprick- och tunnelorientering samt visuella observationer. I det andra steget bestäms vilket av de möjliga borrhålen som har fyllt den aktuella sprickan. Denna bedömning baseras på injekteringssekvens samt uppgifter om transmissivitetsvärdet och injekterad volym i de enskilda injekteringshålen. Vanligtvis är det första injekterade borrhålet i sekvensen det eftersökta.

Förhållandet mellan transmissiviteten i respektive borrhål ( $T_i$ ) och den maximala ( $T$ ) bland de möjliga hålen, liksom förhållandet mellan volymen i respektive borrhål ( $V_i$ ) och

den största volymen bland de möjliga hålen ( $V_{inj}$ ) är presenterade i figur 5.3. Figuren visar att de rätta borrhålen, markerade som nummer 1 i figuren, har troligtvis valts.

De olika transmissivitetsvärdena, volymerna och läget för de olika borrhålen i skärmen är även presenterade i bilaga 7.



Figur 5.3 Förhållandet mellan transmissiviten och volymen i respektive borrhål ( $T_i$  och  $V_i$ ) och det den maximala ( $T$  och  $V_{inj}$ ) bland de möjliga hålen.

Figure 5.3 The relationship between (i) the hole transmissivity ( $T_i$ ) and maximal ( $T$ ), (ii) the hole grout take ( $V_i$ ) and maximal ( $V_{inj}$ ) in the section.

De uppmätta värdena på injekteringstrycket ( $\Delta P$ ), volymen i det eftersökta borrhålet ( $V_{inj}$ ), totala volymen för samtliga möjliga hål ( $V_{tot}$ ), flytgränsen ( $\tau_o$ ) samt totala antalet möjliga hål i sekvensen är presenterade i tabell 5.7.

**Tabell 5.7** Indata för beräkningar av injekteringsvidden, för samtliga modeller

| <b>Spricka</b> | <b>Tryck <math>\Delta P</math></b><br>[10 <sup>6</sup> MPa] | <b>Volym</b><br><b><math>V_{inj}</math> [m<sup>3</sup>]</b> | <b>Volym</b><br><b><math>V_{total}</math> [m<sup>3</sup>]</b> | <b>Flytgräns <math>\tau_o</math></b><br>[Pa] | <b>Antal</b><br><b>möjliga hål</b> |
|----------------|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|------------------------------------|
| 1140 W         | 0.9                                                         | 0.54                                                        | 1.46                                                          | 9.5                                          | 7                                  |
| 1140 R         | 1.7                                                         | 0.49                                                        | 1.05                                                          | 8.5                                          | 6                                  |
| 1873           | 2.2                                                         | 0.62                                                        | 1.82                                                          | 11.0                                         | 5                                  |
| 2287           | 1.4                                                         | 0.07                                                        | 0.18                                                          | 20.0                                         | 4                                  |
| 2667           | 0.8                                                         | 0.76                                                        | 0.85                                                          | 6.0                                          | 3                                  |

Följande kan observeras från uppmätta data, redovisade i tabell 5.7 :

- Volymen är i samma storleksordning för samtliga sprickor förutom spricka 2287.
- Trycket är ungefär hälften i dragsprickorna (1140 R och 1873) jämfört med skjuvsprickorna (1140 W och 2667).

Följaktligen bör storleken på vidden för skjuvsprickorna vara ungefär det dubbla mot dragsprickorna, vilket överensstämmer med tabell 5.2.

- Den uppmätta volymen för spricka 2287 är ungefär en tiondel jämfört med de övriga sprickorna, men har också den minsta sprickvidden och störst flytgräns.

Ovanstående bekräftar att volymen är proportionell mot trycket och omvänt proportionell mot flytgränsen.

### 5.3.5 Vidd modell I

#### *Samband*

Injekteringen antas ske från borrhålet med en symmetrisk inträngningslängd från hålet in i planparallella diskar. Beräkningen av vidden  $b_I$  i disken är baserad på förhållandet mellan volymen ( $V_{inj}$ ), inträngningslängden och antalet diskar ( $N_w$ ) som borrhålet korsar och uttrycks som :

$$b_I^3 = V_{inj} \left( \frac{2 \tau_o}{\Delta P} \right)^2 \frac{1}{N_w \pi} \quad (5.2)$$

där  $\tau_o$  är flytgränsen för bruket och  $\Delta P$  är skillnaden mellan injekterings- och grundvattentrycket.

### Resultat modell I

Vidden är beräknad enligt ekvation (5.2). Antalet diskar antas vara lika med antalet konduktiva sprickor (tabell 5.4), återstående indata är hämtad från tabell 5.7. Resultatet är presenterat i tabell 5.8 för de fem sprickorna.

**Tabell 5.8** Beräkning av vidderna baserad på modell I

| Spricka | Vidden $b_I$ [mm] |
|---------|-------------------|
| 1140 W  | 0.420             |
| 1140 R  | 0.170             |
| 1873    | 0.160             |
| 2287    | 0.160             |
| 2667    | 0.380             |

### 5.3.6 Vidd modell II

#### Samband

Injekteringen antas ske från borrhålet in i delvis öppna planparallella diskar. Öppningen beskrivs med en sektionsvinkel  $\alpha$ , vilken baseras på geologin (se kapitel 2). Vidden  $b_{II}$  i disksektionen är baserad på förhållandet mellan volymen ( $V_{inj}$ ), inträngningslängden, sektionsvinkeln  $\alpha$  och antalet diskar ( $N_w$ ) som borrhålet korsar och uttrycks som :

$$b_{II}^3 = 2 V_{inj} \left( \frac{2 \tau_o}{\Delta P} \right)^2 \frac{1}{N_w \alpha} \quad (5.3)$$

där  $\tau_o$  är flytgränsen för bruket och  $\Delta P$  skillnaden mellan injekterings- och grundvattentrycket.

### Resultat modell II

Vidden är beräknad enligt ekvation (5.3). Antalet diskar antas vara lika med antalet konduktiva sprickor (tabell 5.4). Värdet på sektionsvinkeln  $\alpha$  baseras på bergkvaliten (se

kapitel 3). För spricka 2667 är värdet 0.4 och för övriga sprickor 0.8. Återstående indata är hämtade från tabell 5.7. Resultatet presenteras i tabell 5.9.

**Tabell 5.9** Beräkning av vidderna baserad på modell II

| Spricka | Vidden $b_{II}$ [mm] |
|---------|----------------------|
| 1140 W  | 0.840                |
| 1140 R  | 0.340                |
| 1873    | 0.310                |
| 2287    | 0.320                |
| 2667    | 0.950                |

### 5.3.7 Vidd modell III

#### *Samband*

Injekteringen antas ske från borrhålet in i ett system av flera diskar, vilka har en komplex oregelbunden geometri. Geometrin beskrivs med fem geologiska parametrar (se kapitel 2). Inträngningen av bruket antas ske främst i strömningskanaler som har en varierande vidd. Medelkanalvidden  $b_g$  är en funktion av injekteringsvolymen ( $V_{inj}$ ), inträngningslängden, transmissiviteten ( $T$ ) och de fyra geologiska parametrarna ( $\psi$ ,  $\lambda$ ,  $\theta$  och  $\beta$ ) :

$$b_g = \kappa b_{hyd} \quad (5.4)$$

där  $b_{hyd}$  är den hydrauliska vidden, vilken är beräknad i avsnitt 5.3.2 och parametern  $\kappa$  kan uttryckas som :

$$\kappa^2 = V_{inj} \left( \frac{2 \tau_o}{\Delta P} \right)^2 \frac{\rho_w g}{12 T \mu_w} \frac{\lambda^2}{\psi \theta \beta \pi} \quad (5.5)$$

där  $\tau_o$  är flytgränsen för bruket,  $\Delta P$  skillnaden mellan injekterings- och grundvatten-trycket,  $\rho_w$  och  $\mu_w$  vattnets densitet respektive viskositet. De geologiska parametrarna ( $\psi$ ,  $\lambda$ ,  $\theta$ ,  $\kappa$  och  $\beta$ ) är beskrivna i kapitel 2.

#### *Resultat modell III*

Kanalvidden är beräknad enligt ekvation (5.4) och med hjälp av ekvation (5.5). Parametervärdena är baserade på den detaljerade geologiska karteringen och bestämda

med hjälp av tabell 4.2. Värdena på de fyra sökta parametrarna är presenterade i tabell 5.10.

**Tabell 5.10** Uppskattning av de fyra sökta geologiska parametrarna  $\psi$ ,  $\lambda$ ,  $\beta$  och  $\theta$

| Spricka | Geologiska parametrar |           |         |          |
|---------|-----------------------|-----------|---------|----------|
|         | $\psi$                | $\lambda$ | $\beta$ | $\theta$ |
| 1140 W  | 1.0                   | 1.5       | 1.0     | 1.0      |
| 1140 R  | 0.58                  | 1.5       | 2.0     | 1.0      |
| 1873    | 0.45                  | 1.5       | 1.0     | 1.0      |
| 2287    | 0.44                  | 1.5       | 1.5     | 1.0      |
| 2667    | 1.0                   | 1.5       | 1.0     | 1.0      |

Antalet diskar antas vara en för de borrhål som korsar spricka 1140 W och 2667. Således är  $\psi$  lika med 1.0 för dessa borrhål. För övriga borrhål är  $\psi$  baserad på förhållandet mellan antalet injekterade och konduktiva sprickor. Bestämningen av värdet på  $\beta$  är baserad på sprickorientering och antalet sprickset. Parametern  $\beta$  har bestämts till 1.0 för skjuvsprickorna 1140 W och 2667, eftersom dessa är dokumenterade som enstaka högkonduktiva sprickor. Beräkningarna av kanalvidden  $b_g$  är presenterade i tabell 5.11.

**Tabell 5.11** Beräkning av vidderna baserad på modell III

| Spricka | Parametern $\kappa$ | Kanalvidden $b_g$ [mm] |
|---------|---------------------|------------------------|
| 1140 W  | 3.2                 | 0.820                  |
| 1140 R  | 1.4                 | 0.240                  |
| 1873    | 2.7                 | 0.380                  |
| 2287    | 3.4                 | 0.370                  |
| 2667    | 1.9                 | 0.620                  |

## 5.4 Beräknad vidd - allmän geologi

### 5.4.1 Allmänt

Beräkningar med sprickplansmodellerna har i kapitel 4.2 gjorts för samma tunnelprojekt. Dock har geologiska data baserats på en generell kartering (Stanfors et al, 1993, 1994) längs det studerade tunnelavsnitten. Resultaten från de tidigare beräkningarna tyder på bra överensstämmelse mellan beräknade och uppmätta volymer. Den goda överensstämmelsen ger därför anledning till beräkningar av vidden, baserad på den generella karteringen. För den generella karteringen gäller att totala antalet sprickor och konduktiva sprickor antas vara detsamma, eftersom den generella karteringen saknar information om sprickinnehåll. Beräkningen av antalet sprickor längs borrhålet är baserad på medelsprickfrekvensen längs tunnelavsnittet. I tabell 5.12 är de indata som skiljer sig från den detaljerade karteringen presenterade.

**Tabell 5.12** Indata från den generella karteringen

| Spricka | Antalet sprickor [N och Nw] | Parametern $\psi$ | Parametern $\beta$ |
|---------|-----------------------------|-------------------|--------------------|
| 1140 W  | 60                          | 0.2               | 2.0                |
| 1140 R  | 30                          | 0.2               | 2.0                |
| 1873    | 40                          | 0.2               | 1.0                |
| 2287    | 60                          | 0.2               | 1.5                |
| 2667    | 50                          | 0.1               | 1.5                |

### 5.4.2 Resultat vidd

Beräkningarna av de olika vidderna ( $b_{\text{hyd}}$ ,  $b_{\text{JRC}}$ ,  $b_{\text{I}}$ ,  $b_{\text{II}}$ , och  $b_{\text{g}}$ ) är utförda enligt tidigare samband, dvs ekvation 5.1 och figur 5.2, 5.3 och 5.4. Resultatet är presenterat i tabell 5.13 för de fem sprickorna.

**Tabell 5.13** Beräkning av vidderna baserad på den generella karteringen

| <b>Spricka</b> | <b>Hydraulisk<br/>vidd<br/><math>b_{hyd}</math> [mm]</b> | <b>Mekanisk<br/>vidd<br/><math>b_{JCR}</math> [mm]</b> | <b>Injekterings-<br/>vidd<br/><math>b_I</math> [mm]</b> | <b>Injekterings-<br/>vidd<br/><math>b_{II}</math> [mm]</b> | <b>Injekterings-<br/>vidd<br/><math>b_g</math> [mm]</b> |
|----------------|----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| 1140 W         | 0.07                                                     | 0.07                                                   | 0.11                                                    | 0.22                                                       | 0.33                                                    |
| 1140 R         | 0.08                                                     | 0.25                                                   | 0.08                                                    | 0.16                                                       | 0.19                                                    |
| 1873           | 0.07                                                     | 0.15                                                   | 0.08                                                    | 0.16                                                       | 0.29                                                    |
| 2287           | 0.04                                                     | 0.12                                                   | 0.07                                                    | 0.13                                                       | 0.22                                                    |
| 2667           | 0.09                                                     | 0.12                                                   | 0.10                                                    | 0.26                                                       | 0.43                                                    |

## 5.5 Diskussion av resultatet

### 5.5.1 Inledning

Frågan är om huvudsyftet med studien, att söka giltigheten av antagandena i de teoretiska sprickplansmodellerna, har uppnåtts genom resultaten i de föregående avsnitten. Giltigheten bestäms genom att jämföra de beräknade vidderna med de uppmätta sprickvidderna.

Men först av allt måste villkoren för modellerna vara uppfyllda, om en jämförelse skall kunna göras. Om villkoren är uppfyllda kan de olika antagandena för varje modell kontrolleras. Antagandena kontrolleras genom att jämföra beräknad vidd med uppmätt sprickvidd. Om överensstämmelsen är god, är modellen tillförlitlig, men om överensstämmelsen är dålig skulle modellens antagande inte vara korrekt.

#### *Den hydrauliska och mekaniska vidden*

Villkor:

Beräkningen av vidden är baserad på det injicerade vattenflödet i en spricka, vilket förutsätter en Newtonsk vätska med en konstant viskositet och ingen flytgräns samt ett inkompressibelt flöde. Vidare förutsätts det att Darcy's lag gäller, dvs ett laminärt, stationärt flöde i en riktning samt att ingen glidning längs sprickytan förekommer.

Antagande:

Antagandena för den hydrauliska vidden är att disken har en konstant vidd med planparallella ytor, antalet diskar är samma som antalet konduktiva sprickor och alla konduktiva sprickor har samma vidd.

Antagandena för den mekaniska vidden är samma som för den hydrauliska vidden förutom att flödet inte sker i planparallella diskar utan är parallellt med sprickans råhetsprofil.

### *Injekteringsvidderna*

Villkor:

Det viktigaste villkoret för samtliga beräkningar av injekteringsvidden är att dessa är baserade på ett injekteringsflöde, vilket förutsätter en Binghamsk vätska med konstant viskositet och flytgräns samt ett inkompressibelt flöde. Flytgränsen ger en maximal inträngningslängd i sprickan, och följaktligen måste den förutsättningen uppfyllas att sprickans längdutbredning ska vara större än brukets inträngningslängd. Vidare förutsätts det att Darcy's lag gäller, dvs ett laminärt, stationärt flöde i en riktning samt att ingen glidning längs sprickytan förekommer.

Antagande:

Modell I är beskriven som en disk med konstant vidd och antalet diskar är samma som antalet konduktiva sprickor.

Modell II har samma antagande som modell I men är beskriven som en delvis öppen disk, där storleken hos öppningen beror på geologin.

Modell III är beskriven som ett system av diskar med oregelbunden yta, dvs kontaktpunkter, och där antalet konduktiva och injekterade sprickor är skilda. Vidden mellan kontaktytorna är definierad som kanalvidden.

### *Kontroll av villkoren*

Villkoren för den hydrauliska och mekaniska vidden, dvs att Newtonskt flöde och Darcy's lag gäller i sprickor, är tidigare accepterade (Gustafson, 1985).

De två första förutsättningarna för injekteringsvidderna, dvs ett Binghamskt flöde och Darcy's lag i sprickor, har undersökts genom laboratorieexperiment (Hässler, 1991, Håkansson, 1993). Experimenten visar att de två förutsättningarna är acceptabla. Den

tredje förutsättningen att sprickans längdutbredningen ska vara större än brukets inträngningslängden är okänd och måste således studeras närmare.

Först av allt måste de uppmätta sprickornas längdutbredning bestämmas. Flera olika fältundersökningar har utförts för att hitta ett empiriskt samband mellan sprickutbredning och vidd (Vermily & Scholz, 1995) (se kapitel 3). Resultaten av undersökningarna har sammanförts i ett diagram med axlarna sprickutbredning och maximal sprickvidd (se figur 3.3). Förhållandena mellan maximal vidd och sprickutbredning är en faktor mellan  $1 \cdot 10^{-4}$  och  $1 \cdot 10^{-3}$  för de intervall som gäller för de uppmätta sprickorna.

Maximala sprickvidden och uppskattad sprickutbredning är presenterade i tabell 5.14.

**Tabell 5.14** Uppmätt maximal sprickvidd och uppskattad sprickutbredning

| Spricka | Maximal sprickvidd [mm] | Uppskattad sprickutbredning [m] |
|---------|-------------------------|---------------------------------|
| 1140 W  | 13                      | 26 (13-130)*                    |
| 1140 R  | 7                       | 14 (7-70)*                      |
| 1873    | 6                       | 12 (6-60)*                      |
| 2287    | 3                       | 6 (3-30)*                       |
| 2667    | 10                      | 20 (10-100)*                    |

\* Intervallen för sprickutbredningen baserade på figur 3.3

Nästa steg är att beräkna injekteringens inträngningslängd och jämföra den med sprickutbredningen. Beräkningen av inträngningslängden är baserad på det uppmätta harmoniska medelvärde, vilket motsvarar kanalvidden i sprickplansmodell III. Inträngningslängden  $I_{III}$ , med krokighetsparameten  $\lambda$ , kan uttryckas som :

$$I_{III} = \frac{\Delta P b_{\text{harm}}}{2 \tau_o k_3} \quad (5.6)$$

Värdet på sprickornas harmoniska vidd hämtas från tabell 5.2, indata från tabell 5.7 samt parametern  $\lambda$  från tabell 5.10. Beräkning av inträngningslängderna, enligt ekvation (5.6) presenteras i tabell 5.15.

**Tabell 5.15** Beräknad injekterad inträngningslängd

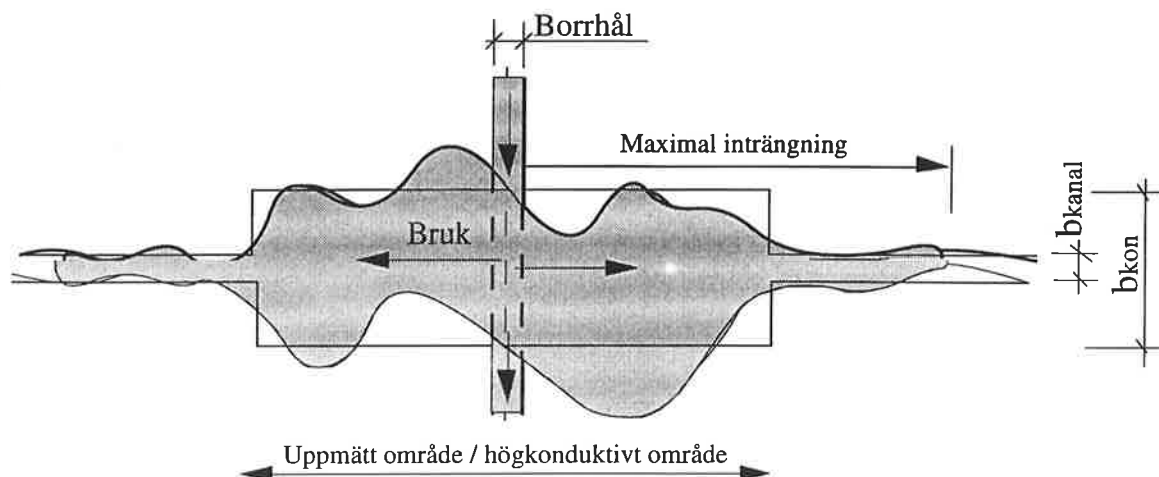
| <b>Spricka</b> | <b>Inträngningslängd, med parametern <math>\lambda</math> III [m]</b> |
|----------------|-----------------------------------------------------------------------|
| 1140 W         | 77                                                                    |
| 1140 R         | 123                                                                   |
| 1873           | 71                                                                    |
| 2287           | 17                                                                    |
| 2667           | 88                                                                    |

Den beräknade inträngningslängden är större än den uppskattad sprickutbredningen, jämför tabell 5.14 och 5.15. Slutsatsen är att det tredje villkoret ej är uppfyllt, eftersom inträngningslängden är betydligt större än sprickutbredningen.

Ytterligare en bekräftelse på att det tredje villkoret inte är uppfyllt kan erhållas genom att jämföra beräknad volym, baserad på beräknad inträngningslängd, och uppmätt volym (se tabell 5.7). Den beräknade ger extremt stora volymer jämfört med den uppmätta, 1.0 - 118.0 m<sup>3</sup> mot 0.18 - 1.82 m<sup>3</sup>.

#### *Inträngningen i sprickor*

En förklaring till den dåliga överensstämmelsen mellan sprickutbredning och inträngningslängd är att större sprickor troligtvis kan uppdelas i två typområden (se kapitel 3). Den ena typen är områden med inga eller få sk kontaktytor och är därmed högkonduktiva med stora sprickvidder. Den andra typen av områden är tätare och har en stor andel kontaktytor, vilket gör att vattnet/bruket endast leds i enstaka strömningskanaler och är därmed mindre konduktivt än i de högkonduktiva områdena. Den totala inträngningslängden för bruket är således summan av utbredning för det högkonduktiva området och kanalinträngningen i det mindre konduktiva området (se figur 5.4).



Figur 5.4 Större sprickor kan troligtvis indelas i två konduktiva områden, högkonduktiva och mindre konduktiva områden.

Figure 5.4 Joint with a high conductive area and low conductive areas.

De två typområdena är utspridda över hela sprickytan, där de högkonduktiva områdena är som öar med de mindre konduktiva områdena runtomkring. De högkonduktiva öarna förbinds av strömningskanaler genom mindre konduktiva områden.

Injekteringen antas vanligtvis starta i de högkonduktiva områdena, och spridningen av bruket bromsas sedan kraftigt upp i strömningskanalerna. Trots detta kan injekteringen nå nya högkonduktiva områden. Injekteringen kan även starta i tätare områden där stora vattenflöden även kan uppmätas beroende på förbindelserna till de högkonduktiva områdena. Men där sprids injekteringen betydligt trögare.

Beräkning av vidden baserad på indata från vatten- och injekteringsflöden antas representera medelvidden för sprickplanet med de båda områdena inkluderade (enligt kapitel 3). De uppmätta sprickvidderna representerar troligtvis ett högkonduktivt område i sprickplanen, eftersom urvalet av uppmätningarna medför att det tydligaste snittet av sprickorna observeras. Således är den enkla jämförelsen mellan uppmätt sprickvidd och beräknad vidd inte möjlig att göra.

Medelvidden  $b_{g,tot}$  längs den maximala injekteringsinträngningen är följaktligen uppdelad i två huvuddelar ; en vidd  $b_{kon}$  i det högkonduktiva området, vilket även motsvarar de uppmätta resultaten ; en kanalvidd  $b_{kanal}$  för de mindre konduktiva området. Den riktiga medelvidden längs inträngningen kan om kanalerna är lika långa uttryckas som :

$$\frac{1}{b_{g,tot}} = \left( \frac{1}{b_{kon}} + \frac{1}{b_{kanal}} \right) \frac{1}{2} \quad (5.7)$$

Den beräknade medelvidden  $b_g$  ska således överensstämja med  $b_{g,tot}$  och den uppmätta vidden  $b_{harm}$  med  $b_{kon}$ .

### 5.5.2 Jämförelse mellan uppmätt och beräknad vidd

Resultaten av uppmätta och beräknade sprickvidder är sammanställda i tabell 5.16 och tabell 5.17. De beräknade vidderna i tabell 5.16 är baserade på den generella karteringen, medan de i tabell 5.17 är baserade på den detaljerade karteringen. Överensstämmelsen mellan uppmätt och beräknad vidd i de båda tabellerna är dålig.

*Beräkning av vidden baserad på den generella karteringen*

**Tabell 5.16** Sammanställning av de uppmätta sprickvidderna och beräknade vidderna baserad på den generella karteringen

| Spricka | Uppmätt sprickvidd [mm] |            | Beräknad vidd, generella karteringen [mm] |           |       |          |       |
|---------|-------------------------|------------|-------------------------------------------|-----------|-------|----------|-------|
|         | Aritmetiska             | Harmoniska | $b_{hyd}$                                 | $b_{JRC}$ | $b_I$ | $b_{II}$ | $b_g$ |
| 1140 W  | 4.42                    | 2.45       | 0.07                                      | 0.07      | 0.11  | 0.22     | 0.33  |
| 1140 R  | 2.49                    | 1.85       | 0.08                                      | 0.25      | 0.08  | 0.16     | 0.19  |
| 1873    | 1.66                    | 1.06       | 0.07                                      | 0.15      | 0.08  | 0.16     | 0.29  |
| 2287    | 1.05                    | 0.71       | 0.04                                      | 0.12      | 0.07  | 0.13     | 0.22  |
| 2667    | 3.51                    | 1.99       | 0.09                                      | 0.12      | 0.10  | 0.26     | 0.43  |

De beräknade vidderna i tabell 5.16 är mycket mindre än de uppmätta. Detta gäller för samtliga beräkningsmodeller. Denna dåliga överensstämmelsen var dock förväntad, eftersom i samtliga beräkningsmodeller antalet konduktiva sprickor har antagits att vara detsamma som det totala antalet sprickor längs borrhålet. Antagandet ger att många små sprickor fördelar vatten och injekteringsflöde lika sinsemellan, vilket således inte skulle vara riktigt.

*Beräkning av vidden baserad på den detaljerade karteringen*

**Tabell 5.17** Sammanställning av de uppmätta sprickvidderna och de beräknade vidderna baserad på den detaljerade karteringen

| Spricka | Uppmätt sprickvidd [mm] |           | Beräknad vidd, detaljerad kartering [mm] |           |       |          |       |
|---------|-------------------------|-----------|------------------------------------------|-----------|-------|----------|-------|
|         | Aritmetisk              | Harmonisk | $b_{hyd}$                                | $b_{JRC}$ | $b_I$ | $b_{II}$ | $b_g$ |
| 1140 W  | 4.42                    | 2.45      | 0.26                                     | 0.26      | 0.42  | 0.84     | 0.82  |
| 1140 R  | 2.49                    | 1.85      | 0.17                                     | 0.37      | 0.17  | 0.34     | 0.24  |
| 1873    | 1.66                    | 1.06      | 0.14                                     | 0.20      | 0.16  | 0.31     | 0.38  |
| 2287    | 1.05                    | 0.71      | 0.11                                     | 0.18      | 0.16  | 0.32     | 0.37  |
| 2667    | 3.51                    | 1.99      | 0.32                                     | 0.32      | 0.38  | 0.95     | 0.62  |

Vid beräkning av  $b_{hyd}$  och  $b_{JRC}$  har några geologiska parametrar bestämts. Parametrarna är antalet konduktiva sprickor för de båda beräkningarna, och för  $b_{JRC}$  en bestämning av JRC - index. Dessa parametrar är dock relativt väl dokumenterade, och således kan bestämningen anses relativt trovärdig. Trots den trovärdiga bestämningen är överensstämmelsen dålig. Den dåliga överensstämmelsen var dock inte oväntad, eftersom antagandena om att sprickor har konstant vidd och att alla konduktiva sprickor längs borrhålet har samma storlek på vidden är mycket förenklade.

Vid beräkningen av  $b_I$  har antalet injekterade sprickor längs borrhålet bestämts. Detta har bestämts till att vara samma som antalet konduktiva sprickor. Bestämningen påverkar dock inte beräkningsresultatet så mycket, eftersom antalet konduktiva sprickor har antagits vara en, för spricka 1140 W och 2667, eller ett fåtal (3-5 st) för de övriga sprickorna. Trots detta är överensstämmelsen dålig, vilket kan förklaras på samma sätt som i stycket ovan, dvs att antagandena är mycket förenklade.

En jämförelse mellan de två beräknade vidderna  $b_{hyd}$  och  $b_I$  skulle däremot kunna göras eftersom de geometriska antagandena är lika men beräkningarna är baserade på vattnets och brukets flöde. Överensstämmelsen är bra mellan  $b_{hyd}$  och  $b_I$ , vilket styrker att de uppmätta vatten- och injekteringsflödena är riktigt valda.

Vid beräkningen av  $b_{II}$  har två geologiska parametrar bestämts. Den första parametern är samma som för  $b_I$ , dvs antalet injekterade sprickor som har bestämts till att vara samma som antalet konduktiva sprickor. Den andra är värdet på sektionsvinkeln  $\alpha$ , vilken är

baserad på bergklassificeringen. Trots att hänsyn tagits till bergets mottaglighet för bruk, genom sektionsvinkeln, är överensstämmelsen dålig. En förklaring kan vara att den kombinerade effekten av den bestämda sektionsvinkeln och antagandet om konstant sprickvidd ger ett felaktiga resultat. Även antagandet att antalet injekterade sprickor är detsamma som antalet vattenförande kan vara inkorrekt men har ingen större betydelse för beräkningarna.

Vid beräkningen av  $b_g$  har fem geologiska parametrar bestämts. De är antalet injekterade respektive konduktiva sprickor längs borrhålet samt de tre parametrarna  $\psi$ ,  $\theta$ , och  $\beta$ . Trots att sprickplanet har beskrivits mer detaljerat än i tidigare modeller, är överensstämmelsen mellan uppmätt sprickvidd och beräknad dålig. En förklaring kan vara att villkoret att utbredningen av sprickplanet skall vara större än brukets inträngningslängd inte är uppfyllt.

Det harmoniska medelvärde av de uppmätta sprickvidderna och den beräknade vidden  $b_g$  är båda beskrivna som en ekvivalent vidd för en spricka. En större spricka är troligtvis uppdelad i två typområden (se avsnitt 5.4.2). Den beräknade vidden  $b_g$  representerar medelvidden för de båda typområdena, och det uppmätta värdet på vidderna enbart det högkonduktiva området. Följaktligen påverkas injekteringsflödet av en större sprickdel än vad den observerade sprickuppmätningen är gjord på. Således är inte det uppmätta värdet representativt för flödets kanalvidd  $b_g$  och därför kan en jämförelse inte göras.

Baserad på den beräknade vidden  $b_g$  kan injekteringens inträngningslängd beräknas. Beräkningen görs enligt ekvation (5.6) med  $b_g$  som indata enligt tabell 5.17. Resultatet är presenterat i tabell 5.18.

**Tabell 5.18** Beräknad inträngningslängd, med  $b_g$  som indata

| Spricka | Vidden $b_g$ [mm] | Inträngningslängden $I_{III}$ [m] |
|---------|-------------------|-----------------------------------|
| 1140 W  | 0.82              | 26                                |
| 1140 R  | 0.24              | 16                                |
| 1873    | 0.38              | 22                                |
| 2287    | 0.37              | 9                                 |
| 2667    | 0.62              | 28                                |

De beräknade inträngningslängderna i tabell 5.18 är endast något mindre än uppskattad sprickutbredning, enligt tabell 5.14. Denna jämförelse stärker antagandet att beräknad

vidd  $b_g$  motsvarar sprickans medelvidd  $b_{g,tot}$ , för den injekterade sprickytan. Om antagandet är riktigt, dvs att  $b_{g,tot}$  är lika med  $b_g$ , och att den högkonduktiva vidden  $b_{kon}$  motsvarar den uppmätta  $b_{harm}$ , skulle kanalvidden  $b_{kanal}$  i det tätare området kunna beräknas enligt ekvation (5.7). Den beräknade kanalvidden  $b_{kanal}$  är presenterad i tabell 5.19 tillsammans med  $b_g$  och  $b_{harm}$ .

**Tabell 5.19** Beräknad  $b_{kanal}$  tillsammans med de tidigare redovisade  $b_g$  och  $b_{harm}$

| Spricka | $b_{kanal}$ [mm] | $b_g$ [mm] | $b_{harm}$ [mm] |
|---------|------------------|------------|-----------------|
| 1140 W  | 0.50             | 0.82       | 2.45            |
| 1140 R  | 0.13             | 0.24       | 1.85            |
| 1873    | 0.23             | 0.38       | 1.06            |
| 2287    | 0.25             | 0.37       | 0.71            |
| 2667    | 0.37             | 0.62       | 1.99            |

Ovanstående resonemang ger att injekteringens spridning i en större spricka är mycket beroende av de högkonduktiva områdenas utbredning i sprickan. Vidare ger den att, om sprickplanets utbredning är större än inträngningslängden, det är möjligt att beräkna vidden längs injekteringens strömningsväg i sprickan utifrån modell III (se figur 5.6). Om sprickplanets utbredningen inte är större än inträngningslängden, är injekteringens inträngning lika med avståndet från borrhålet till sprickändan.

### 5.5.3 Geologiska parametrar

Ett av delsyftena med sprickmätningen var att bättre bestämma de geologiska parametrarnas storlek. Bestämningarna kan dock inte göras, eftersom en direkt jämförelse mellan uppmätta och beräknade sprickvidder ej är giltig, då ju mätningen troligtvis är gjord i sprickans mest öppna del. Dock kan en bestämning av parametern  $\psi$  göras, eftersom parametern kan bestämmas utifrån den detaljerade sprickkarteringen.

#### *Parametern $\psi$*

Baserad på den detaljerade sprickkarteringen, runt de fem observerade sprickorna har förhållandet mellan konduktiva och det totala antalet sprickor observerats till mellan 0.10 och 0.15 och för injekterade och konduktiva sprickor till cirka 0.50 (se tabell 5.20). En undersökning längs hela tunneln (3000m tunnellängd med 11000 sprickor) ger ett förhållande mellan konduktiva och det totala antalet sprickor på 0.13. Vidare

undersökning, baserad på karteringen, av alla injekteringssektioner längs tunneln (med 4100 sprickor) ger ett medelförhållande på 0.09 mellan konduktiva och det totala antalet sprickor och 0.47 mellan konduktiva och injekterade sprickor. Konduktiva sprickor som även är fyllda med bruk efter injekteringen, dvs ej fullständigt tätade sprickor, är 26%.

**Tabell 5.20** Totala antalet sprickor, förhållandet konduktiva och totala sprickor samt förhållandet konduktiva och injekterade sprickor för skärmarna runt de uppmätta sprickorna.

| <b>Spricka</b> | <b>Totala antalet sprickor</b> | <b>Förhållandet konduktiva och totala</b> | <b>Förhållandet konduktiva och injekterade</b> |
|----------------|--------------------------------|-------------------------------------------|------------------------------------------------|
| 1140 W         | 56                             | 0.12                                      | 0.46                                           |
| 1140 R         | 57                             | 0.11                                      | 0.58                                           |
| 1873           | 44                             | 0.13                                      | 0.45                                           |
| 2287           | 46                             | 0.10                                      | 0.44                                           |
| 2667           | 42                             | 0.15                                      | 0.46                                           |

#### 5.5.4 Slutsatser

De viktigaste slutsatserna från uppmätningen av sprickvidder är följande :

- Skillnader i viddfördelning har observerats mellan uppmätta skjuv- och dragsprickor. Skjuvsprickorna har högre värden och en större spridning av vidden än dragsprickorna. Detta bör även påverka injekteringsens spridning i berget.
- Beräkning av vidderna baserad på olika villkor och antaganden, ger alltför små värden jämfört med de uppmätta sprickvidderna. Den dåliga överensstämmelsen för den hydrauliska och mekaniska vidden samt injekteringsvidderna  $b_I$  och  $b_{II}$  beror i första hand på de inkorrekta antagandena för beräkningsmodellerna. För injekteringsvidden  $b_g$  (modell III) beror den dåliga överensstämmelsen i första hand på det ej uppfyllda villkoret att sprickutbredningen skall vara större än inträngningslängden.
- Injekteringsens inträngningslängd beror bland annat av det harmoniska medelvärde av sprickvidden, som väsentligen styr injekteringsprocessen i en spricka. För vatten är däremot det geometriska medelvärde styrande för flödet. En kortare stryplängd, dvs

en sträcka med små sprickvidder längs en sprickkanal, har en större inverkan på det harmoniska medelvärdet än det geometriska. Detta förklarar således varför stora vattenflöden inte alltid ger stora injekteringsflöden.

- Undersökningen visar att en större spricka består troligtvis av dels högkonduktiva områden, dels mindre konduktiva områden. De uppmätta vidderna representerar antagligen endast de högkonduktiva områdena i sprickorna.
- En av de viktigaste parametrarna för att beräkna sprickvidden är förhållandet mellan totala antalet sprickor och konduktiva eller injekterbara sprickor. Undersökningen gav att förhållandet mellan konduktiva och totala antalet sprickor är cirka 0.1 (kvoten mellan konduktiva och total antalet sprickor), och för injekterade och konduktiva cirka 0.5 (kvoten mellan injekterade och konduktiva sprickor).

## 6 SLUTSATSER

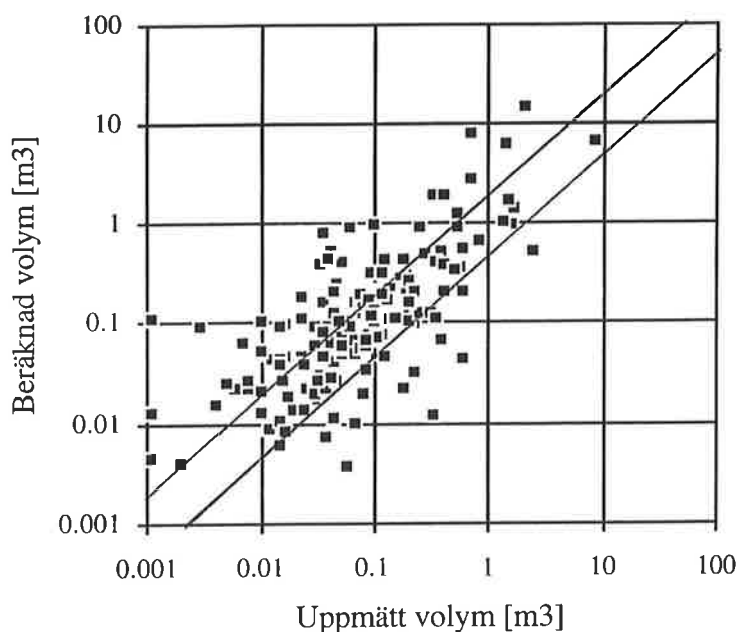
Tidigare studier av injekteringsförloppet i berg visar på svårigheten att förutbestämma detta förlopp (Lysen & Palmqvist, 1976, Bergman & Nord, 1982, Palmqvist, 1983, Pusch et al, 1985, Hässler et al, 1986). Förutsägelse och kontroller baseras därför på empiri, personliga erfarenheter och gissningar. Försök att prognostisera injekteringen med hjälp av vattenförlustmätningar har gjorts med varierande framgång (Palmqvist, 1983, Ewert, 1992, Munier & Hermanson, 1994).

I denna rapport är tre modeller beskrivna för att förutsäga och styra injekteringen. Den första modellen beskriver spridningen av injekteringen i berget på ett förenklat sätt. Beskrivningarna av modell II och III har en ökande komplexitet. Modell III är den mest komplexa. Dock är samtliga modeller baserade på tre kategorier av huvudfaktorer, nämligen :

- (i) injekteringstekniken såsom valt injekteringstryck och bruk (olika bruksegenskaper).
- (ii) bergets hydrologi, såsom transmissiviteten och grundvattentrycket.
- (iii) bergets geologiska egenskaper, såsom sprickfrekvens, vidd och sprickgeometri.

Modellerna är testade i fyra projekt, varav två uppfyller förutsättningarna väl. Dessa två är Äspötunneln och LaFortuna-dammen (se kapitel 4).

Ingen av modellerna är fullständig och kan därför inte till fullo bestämma en förväntad injektering. Modellerna ger en bra uppfattning om medelvärdet på mängden bruk som kan förväntas åtgå för en serie injekteringshål (se figur 6.1). Däremot är uppskattningen av förbrukningen för ett enstaka hål, inträngningslängd och speciellt sprickvidd mer tveksam.



Figur 6.1 Jämförelse mellan uppmätt volym och beräknad baserad på modell III, för de två användbara projekten Äspö och LaFortuna.

*Figure 6.1 Comparision between calculated and measured grout take for model III, in the two project : Äspö and LaFortuna.*

Litteraturstudien och resultat redovisade i kapitel 5 ger en bra uppfattning om de viktigaste sprickegenskaperna som påverkar flödet i sprickor. Flertalet av dessa egenskaper finns även beaktade i modell III. Värdena på dessa egenskaper finns till stor del undersökta och bestämda, dock med en variation över resultatet. Överensstämmelsen mellan de bestämda värdena och de använda i modellerna (kapitel 4) är bra. Vidare ger litteraturstudien att en fullständig beskrivning av sprickgeometrin inte är möjlig att göra på ett praktiskt sätt och således att en exakt flödesbeskrivning i sprickor inte är möjlig.

För modell I behöver endast ett antagande (antalet sprickor) göras för att styra injekteringen med hjälp av tryck och medel. I modellen tas ingen hänsyn till skillnaden i beteende mellan vattnets och injekteringsbrukets inträngningsförmåga i sprickor. Vid en jämförelse med de övriga modellerna ger modell I lägre värden på sprickvidden. Modellen är den enklaste och ger godtagbara resultat vid beräkningen av volym och inträngning.

Tre antaganden behöver göras för modell II, nämligen antalet sprickor, influensavståndet och spridningsvinkeln, för att kunna bestämma en förväntad injektering. I modellen tas

ingen hänsyn till skillnaden i beteende mellan vattnets och injekteringsbrukets inträngningsförmåga i sprickor. Modell II uppvisar stor känslighet (stora spridningar hos resultaten) för mindre indatafel, på grund av att modellens grundekvation för vattenförlust innehåller en logaritmisk funktion.

Svårigheten med modell II är, förutom bedömningen av spridningsvinkeln  $\alpha$ , antagandet av influensavståndet  $L$ , dvs hur stor påverkan injekteringen har på sprickplanets yttre rand. Litteraturstudien ger endast en grov tolkning av värdena på spridningsvinkeln, men dessa ligger inom de intervall som erhöles vid beräkningar i kapitel 4.

För modell III behöver sex antaganden göras, innan den förväntade injekteringen kan uppskattas. För användning av modellen behövs en större erfarenhetsbank än för övriga modeller.

I modell III har flera olika hänsyn tagits till geologin med det bästa resultatet som följd. Litteraturstudien och beräkningarna i kapitel 4 gav i stort sätt samma värden på de geologiska parametrarna.

Tillförlitligheten varierar mellan de olika modellerna och mellan de olika jämförda faktorerna (volym, spricköppning eller inträngningslängd). Modell III gav det bästa resultatet vid jämförelse med modell I och II men innehåller flera parametrar. Av väsentlig betydelse för inträngningen och därmed volymen är om injekteringen verkligen har skett till stopp. Laboratieförsök (Håkansson, 1993) visar att en fullständig inträngning kräver en betydligt längre injektering än vad som oftast görs, speciellt för bruk med låga flytgränsvärden. Det finns därmed en tendens till att de teoretiskt beräknade mängderna övervärderar volymsåtgången något. Vidare tar modellerna ingen hänsyn till variationer av de enskilda egenskaperna i bergmassan.

För alla modellerna är flytgränsen av stor betydelse där en liten förändring av uppmätt värde kan resultera i stora skillnader i beräknad volym.

Ett stabilt injekteringsbruk måste användas för att kunna tillämpa modellerna, eftersom förutsättningarna i modellerna är baserade på att injekteringsfronten stoppas upp när flytgränsen överskrids i ett stabilt bruk. Om ett ostabilt bruk används, sker troligtvis stoppet pga en filtreringsplugg, dvs när cementkornen avfiltreras och bildar en plugg vid en avsmalnade spricköppning. Var dessa pluggar uppstår i sprickan är dock svårt eller omöjligt att förutsäga. Det är mera sannolikt att filtreringspluggen inträffar i fina sprickor

än i mer öppna. Detta ger att modellerna är mest användbara vid mer öppna sprickor och sprickzoner än i finsprickigt berg.

Modellerna är känsliga för vilken utvärderingsmetod som väljs för transmissiviteten. Beroende på utvärderingsmetod och testförfarande kan transmissiviteten variera med en tiopotens, och således även den beräknade injekteringsvolymen.

Modellerna förutsätter vidare att sprickutbredningen skall vara större än inträngningslängden.

Kan inte hela sprickan observeras vid en uppmätning av vidden, är en jämförelse med beräknad vidd inte meningsfull för att verifiera modellerna. De i kapitel 5 uppmätta sprickvidderna gav för stora värden jämfört med de beräknade.

Injekteringens inträngningslängd är baserad på det harmoniska medelvärde av sprickvidden. För vattnet är det däremot de geometriska medelvärde som styr flödet. En kortare sträcklängd, dvs en sträcka med små sprickvidder längs en sprickkanal, har en större inverkan på det harmoniska medelvärde än det geometriska. Detta ger således en förklaring till varför stora vattenflöden inte alltid ger stora injekteringsflöden.

#### Framtida arbete

Användningen av modellerna är begränsade till ostörda hål i en injekteringstrumpet, dvs vanligtvis kan enbart beräknad volym av förstahål i trumpeten jämföras med uppmätt. Modellerna bör utvecklas så att hela trumpeten kan volymberäknas.

Den redovisade modell III kan ligga till grund för ett framtida klassificeringssystem. Ett sådant system för att prognostisera och styra injekteringsarbetet måste indelas i de tre redovisade kategorierna av huvudfaktorer, där bergets hydrogeologi och geologi tillsammans med de ställda täthetskraven styr vilken injekteringsteknik som skall användas. Hydrogeologin baseras på väl utförda vattenmätningar, vars resultat ger en transmissivitet som indata. Geologin baseras på en sprickkartering där parametrar som antalet sprickgrupper och deras typ, råhet, orientering, frekvens och vidd karteras. Ytterligare faktorer som påverkar penetreringsförmågan i berget är normalspänning och cementtyp.

Värdena på parametrarna i modell II och III har en variation i berget. Följaktligen bör modellerna resultera i någon statistisk fördelning.

I modellerna har resultat från vattenförlustmätning använts för att beskriva bergets "öppenhet" (porositet). Porositeten motsvarar bergets öppenhet för vatten och ej för injekteringsbruket. Detta aktualiserar frågan om en "brukförlustmätning" skall användas istället för en vattenförlustmätning för att beskriva bergets mottaglighet för injekteringsbruk.

Brukets flytgräns kan mätas och utvärderas på flera olika sätt. Flytgränsen har en stor betydelse för injekteringsresultatet, och därför bör en enhetlig mätning- och utvärderingsmetod som ger det mest riktiga flytgränsvärdet tas fram.

## REFERENSER

- Abelin, H. Neretnieks, I. Tunbrant, H. Moreno, L. (1985), Final report of the migration in a single fracture - Experimental results and evaluation. Technical Report 85-03, SKB-Stripa Project
- Abelin, H. Birgersson, L. Widen, H. Ågren, T. Moreno, L. Neretnieks, I. (1990), Channeling experiment. Technical Report 90-13, SKB-Stripa Project
- Andersson, H. (1994), Injekteringsforskning i bergrum under Kungliga Biblioteket. SveBeFo-rapport nr 14, Stockholm
- Axelsson, C-L. Hansen, L. Hässler, L. (1994), Byggbarhetsanalys av några hypotetiska fall. AR 44-94-004, SKB-Djupförvar
- Aydan, Ö. Kawamoto, T. (1990), Discontinuitets and their effect on rock mass. Rock Joints, Proc. of ISRM Int. Symp., Loen Norway, 1990, pp 149-156
- Bandis, S.C. Lumsden, A. Barton, N.R. (1983), Fundamentals of rock joints deformation. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. v 20, No 6, pp 249-268
- Barton, N. Choubey, K. (1977), The shear strength of rock joints in theory and practics. Rock Mech, 10, pp 1-54
- Barton, N. Bandis, S. Bakhtark, K. (1985), Strength, deformation and conductivity coupling of rock joints. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. v 22, No 3, pp 121-140
- Bergman, S.G.A. Lindman, K. Söderman, P. (1970), Injekteringsmedels inträngning i sand och tunna spalter. BFR-rapport R45 : 1970, Stockholm
- Bergman, S.G.A. Nord, G (1982), Täta tunnlar lagom - On adequate tighteningn of tunnels. BeFo 64:1/82, Stockholm
- Bogdanoff, I. (1990), Fintätning av berg. Inst för Geoteknik, B90:1, CTH, Göteborg
- Brantberger, M. (1993), Uppföljning av damminjekteringen på LaFortuna projektet. Inst Jord och Bergmekanik, KTH, nr 93/19, Stockholm
- Brown, E.T. (1981), Rock characterization testning and monitoring. ISRM Suggested methods. Pergamon Press
- Brown, S.R. (1987), Fluid flow through rock joints. The effect of surface roughness. J. Geoph. Res. v 92, No B2, pp 1337-1347
- Brown, S.R. (1989), Transport of fluid and electric current through a single fracture. J. Geoph. Res. v 94, No 87, pp 9429-9438
- Cunha, A.P. (1990), Scale effect in rock mechanics. Scale effects in rock masses, Proc. of ISRM Int Symp.,Lissabon, 1990, pp 3-27

- Doe, T. Geier, J. (1990), Interpretation of fracture system geometry using well test data. Technical Report 91-03, SKB-Stripa Project
- Ewert, F.K. (1992), The individual groutability of rock. Water Power & Dam Constr. January 1992, pp 23-30
- Gabrielsen, R.H. (1990), Characteristics of joints and faults. Rock Joints, Proc. of ISRM Int. Symp., Loen Norway, 1990, pp 11-17
- Gale, J. (1987), Comparison of coupled fracture deformation and fluid flow models with direct measurements of fracture pore structure and stress-flow properties. 28th US Symp. on Rock Mech., Arizona, pp 1213-1222
- Gale, J. (1990), Hydraulic behaviour of rock joints. Rock Joints, Proc. of ISRM Int. Symp., Loen Norway, 1990, pp 351-362
- Geier, J.E. Axelsson, C-L. (1991), Discrete fracture modelling of the Finnsjö rock mass - phase 1. Technical Report 91-13, SKB
- Geier, J.E. Axelsson, C-L. Hässler, L. Benabderrahmane (1992), Discrete fracture modelling of the Finnsjö rock mass - phase 2. Technical Report 92-07, SKB
- Gentier, S. Billaux, D. van Vliet, L. (1989), Laboratory testing of the voids of a fracture. Rock Mech. and Rock Engineering, v 22, pp 149-157
- Gustafson, G. (1986), Geohydrologiska förundersökningar i berg. BeFo 84:1/86, Stockholm
- Hakami, E. (1988), Water flow in single rock joints. Luleå University of Technology, Luleå
- Hakami, E. (1994), Pore volume characterization. Progress Report 25-94-30, SKB-Äspö HRL
- Hakami, E. (1995), Aperture distribution of rock fractures. Division of Engineering Geology, Department of Civil and Environmental Engineering Royal Institute of Technology, Stockholm
- Hakami, E. Larsson, E. (1993), Geometry and hydraulic characteristics of rock fractures. AR 93-33, SKB
- Hermansson, J. (1995), Structural geology of waterbearing fractures. Progress Report 25-95-23, SKB-Äspö HRL
- Hopkins, D.L. Cook, N.G.W. Myer, L.R. (1990), Normal joint stiffness as a function of spatial geometry and surface roughness. Rock Joints, Proc. of ISRM Int. Symp., Loen Norway, 1990, pp 203-210
- Håkansson, U. Hässler, L. Stille, H. (1991), Mätmetodik för injekteringsmedels reologiska egenskaper. BeFo 241:1/91, Stockholm
- Håkansson, U. (1993), Rheology of fresh cement-based grouts. Department of Soil and Rock Mechanics, Royal Institute of Technology, Stockholm.
- Hässler, L. (1991), Grouting of Rock Simulation and Classification. Department of Soil and Rock Mechanics, Royal Institute of Technology, Stockholm.

- Hässler, L. Andersson, J. Stille, H. (1985), Injekteringens styrmekanismer - etapp I. BeFo 105:1/85, Stockholm.
- Hässler, L., Håkansson, U. (1993), The influence of flow geometry on interpretation of Lugeon tests and choice of grout material and grouting method. Proc. of the Int. Conf. on Grouting in Rock and Concrete, Salzburg, Austria
- Janson, T. (1993), Injektering i sprickplan - Äspö-tunneln. Avd för Jord- och Bergmekanik, Nr 93/10, KTH, Stockholm
- Jing, L. Stephansson, O. Kautsky, F. (1995), Modelling of coupled thermo-hydro-mechanical process - DECOVALEX. Bergmekanikdag 1995, BeFo, Stockholm
- Keil, L.D. Boyd, J.M. (1989), Experiments with cement-based grouts for nuclear waste management. 42nd Canadian Geotechnical Conference, Canada
- Lysen, L. Palmqvist, K. (1976), Tätning av bergtunnlar. BFR-rapport R4 : 1976, Stockholm
- MacLeod, R. Gale, J. Bursey, G. (1992), Site characterization and validation. Technical Report 91-03, SKB-Stripa Project
- Martin, C.D. Davison, C.C. Kozak, E.T. (1990), Characterizing normal stiffness and hydraulic conductivity of a major shear zone in granite. Rock Joints, Proc. of ISRM Int. Symp., Loen Norway, 1990, pp 549-556
- Mazurek, M. Bossart, P. Eliasson, T. (1995), Classification and characterization of waterconducting features at Äspö : Results of phase 1 investigations. Progress Report 25-95-03, SKB-Äspö HRL
- Mitchell, J. (1970), In-place treatment of foundation soils. Proc. ASCE Jour. of SMFE, paper 7035, pp 117-152
- Moreno, L. Tsang, C.F. Tsang, Y. Neretnieks, I (1990), Some anomolous features of flow and solute transport arising from fracture aperture variability. Water Resources Res. v 26, No 26, pp 2377-2391
- Munier, R. Hermanson, J. (1994), Updating of the geological structural model. Progress Report 25-94-05, SKB-Äspö HRL
- Neuzil, C.E. Tracy, J.V. (1981), Flow through fractures. Water Resources Res. 17, No 1. pp 191-199.
- Nilsson, T. (1986), Aktuella metoder och medel för injektering, Bergmekanikdag 1986, BeFo, Stockholm
- Nonveiller, E. (1989), Grouting-Theory and practice. Elsevier, Amsterdam
- Palmqvist, K. (1983), Tätning av bergtunnlar - Injekteringsutförande och resultat. BeFo 66:1/83, Stockholm
- Pollard, D.D. Aydin, A. (1988), Progress in understanding jointing over the past century. America Bulletin 100. pp 1181-1204
- Press, D.E. Halliday, S.M. Gale, J.E. (1990), Application of computer aided design (CADD) in data display and integration of numerical and field results - Stripa phase 3. Technical Report 91-04, SKB-Stripa Project

- Pusch, R. Erlström, M. Börgesson, L. (1985), Sealing of rock fractures. A survey of potentially useful methods and substances. Technical Report 85-17, SKB
- Pusch, R. Börgesson, L. Karnland, O. Hökmark, H. (1991), Final report on test 4 - Sealing of natural fine-fracture zon. Technical Report 91-26, SKB-Stripa Project
- Pyrak-Nolte, L.J. Myer, L.R. Cook, N.G. Witherspoon, P.A. (1987), Hydraulic and mechanical properties of natural fractures in low permeability rock. Proc. 6th Int. Cong. on Rock Mech. v 1, pp 225-231, Montreal, Canada
- Pyrak-Nolte, L.J. Nolte, D.D. Myer, L.R. Cook, N.G.W. (1990), Fluid flow through single fractures. Rock Joints, Proc. of ISRM Int. Symp., Loen Norway, 1990, pp 405-412
- Rhen, I. Stanfors, R. (1993), Passage through water-bearing fracture zones. Evaluation of investigations in fracture zones NE-1, EW-3 and NE-3. Progress Report 25-92-18, SKB-Äspö HRL
- Rosenlind, A. Tichy, R. (1993), Förinjektering i bergtunnel-Uppföljning av Uri-vattenkraftprojektet i Kashmir, Indien, Inst Jord och Bergmekanik, KTH, nr 93/15, Stockholm
- Stanfors, R. Liedholm, M. Munier, R. Olsson, P. Stille, H. Wikberg, P. (1993), Geological-structural evaluation of data from section 700-1475 m. Progress Report 25-93-05, SKB-Äspö HRL
- Stanfors, R. Liedholm, M. Munier, R. Olsson, P. Stille, H. Wikberg, P. (1994), Geological-structural and mechanical evaluation of data from tunnel section 1475-2265 m. Progress Report 25-93-10, SKB-Äspö HRL
- Stratford, R.G. Herbert, A.W. Jackson, C.P. (1990), A parameter study of the influence of aperture variation on fracture flow and cosequences in a fracture network. Rock Joints, Proc. of ISRM Int. Symp., Loen Norway, 1990, pp 413-422
- Stille, H. Gustafson, G. Håkansson, U. Olsson, P (1993), Experiences from the grouting of the section 1-1400 m of the tunnel. Progress Report 25-92-19, SKB-Äspö HRL
- Stille, H. Janson, T. Olsson, P (1994), Experiences from the grouting of the section 1340-2565 m of the tunnel. Progress Report 25-94-13, SKB-Äspö HRL
- Tsang, C.F (1990), Coupled behavior of rock joints. Rock Joints, Proc. of ISRM Int. Symp., Loen Norway, 1990, pp 505-518
- Tsang, Y.W. Tsang, C.F (1987), Channel model of flow through fractured media. Water Resources Res. v 23, No 3, pp 467-479
- Tsang, Y.W. Tsang, C.F (1989), Flow channeling in a single fracture as a two-dimensional strongly heterogeneous permeable medium. Water Resources Res. v 25, No 9, pp 2076-2080
- Tsang, Y.W. Tsang, C.F (1990), Hydrological characterization of variable-aperture fractures. Rock Joints, Proc. of ISRM Int. Symp., Loen Norway, 1990, pp 423-431
- Vermilye, J.M. Scholz, C.H. (1995), Relation between vein length and aperture. J. Struct. Geol. 17, pp 423-434

- Watanabe, K. (1994), Geological structures that are the candidates for channel in fractured rock. Technical Note, SKB-Äspö HRL
- Weavear, K. (1991), Dam foundation grouting. ASCE, New York
- Wei, Z.Q. Eggert, P. Descoeundres, F. (1995), Permeability predications for jointed rock mass. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. v 32, No 3 pp 251-261
- Zimmerman, R.V. Chen, D.W. Long, J.C.S. Cook, N.G.W. (1990), Hydromechanical coupling between stress, stiffness, and hydraulic conductivity of rock joints and fractures. Rock Joints, Proc. of ISRM Int. Symp., Loen Norway, 1990, pp 571-577
- Zimmerman, R.V. Kumas, S. Bodvarsson, G.S. (1991), Lubrication theory analysis of the permeability of rough-walled fractures. Int.J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. v 28, No 4, pp 325-331

## BILAGOR

- Bilaga 1     Teoretiskt kanalvidd
- Bilaga 2     Observerade sprickor : 1873, 2287 och 2667
- Bilaga 3     Resultat av samtliga uppmätta sprickvidder, nominell skala
- Bilaga 4     Resultat av samtliga uppmätta sprickvidder, logaritmisk skala
- Bilaga 5     Resultat av spricka 1140 W och 2667, beroende på  
                 mättriiktning
- Bilaga 6     Semivariogram, spricka 1140 W
- Bilaga 7     Grunddata för beräkning av injekteringsvidder :  
                 transmissivitet, injekteringsvolym och borrhåls läge i  
                 skärmen

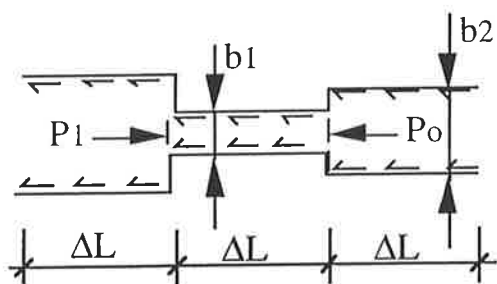
## BILAGA 1

### Teoretiskt kanalvidd för sprickor med injekteringsflöden

Den teoretiska kanalvidden för sprickor, med ett injekteringsflöde, är baserad på kanaler med varierande vidd och parallella ytor (Janson, 1993, Stille et al, 1993), se figur A1. Sambandet för maximal inträngningslängd (I) i en kanal med konstant vidd är känt (Hässler, 1991, Håkansson, 1993) och beror på övertrycket ( $\Delta P$ ), vidden (b) och brukets flytgräns ( $\tau_o$ ) enligt följande :

$$I = \frac{\Delta P b}{2 \tau_o} \quad (A1)$$

Studera nu kanalens längdsektion med varierande kanalvidd och med samma dellängder  $\Delta L$  över hela kanalen :



Figur A1 : Injektering i en kanal med varierande vidd

Gör en jämviktsbetraktelse :

$$P_1 b_1^2 \pi = \tau_o 2 \pi \Delta L + P_0 b_1^2 \pi \quad (A2)$$

Om ekvationen summeras över hela inträngningslängden I med avseende på det att :

$$I = \sum \Delta L = N \Delta L \text{ och } P_1 - P_0 = \Delta P \quad (A3)$$

ger följande uttryck :

$$\Delta P = 2 \tau_o \sum_{n=1}^N \frac{\Delta L}{b_n} \quad (A4)$$

eller :

$$\Delta P = 2 \tau_o \frac{I}{N} \sum_{n=1}^N \frac{1}{b_n} \quad (A5)$$

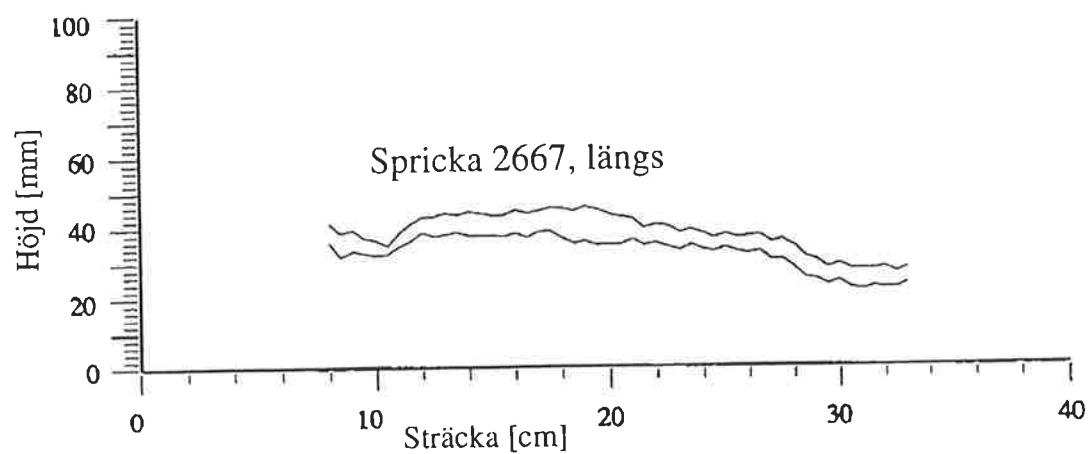
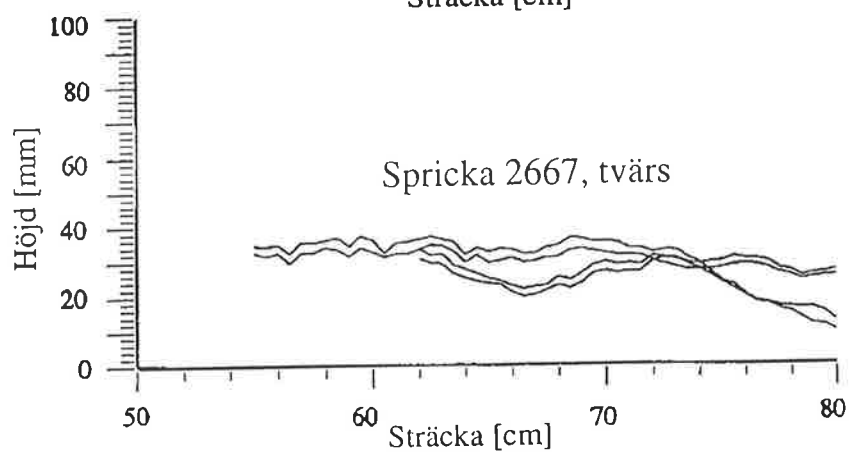
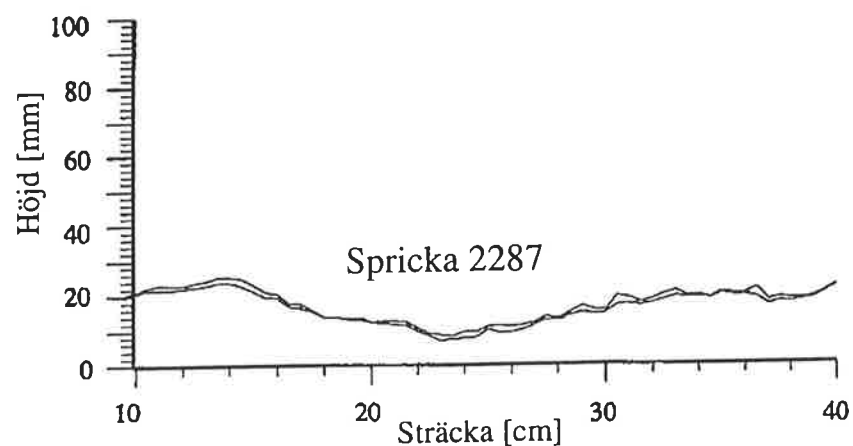
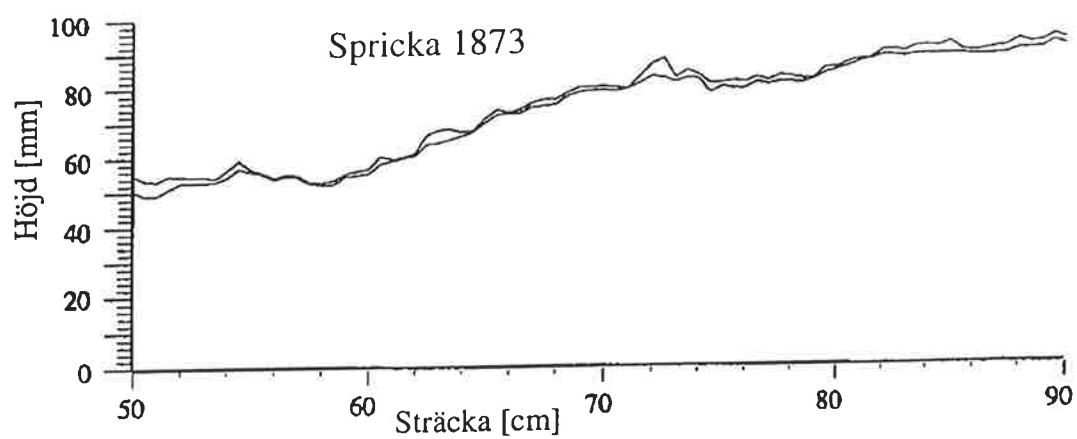
alltså

$$I = \frac{\Delta P}{2 \tau_o} \frac{1}{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{1}{b_n}} \quad (A6)$$

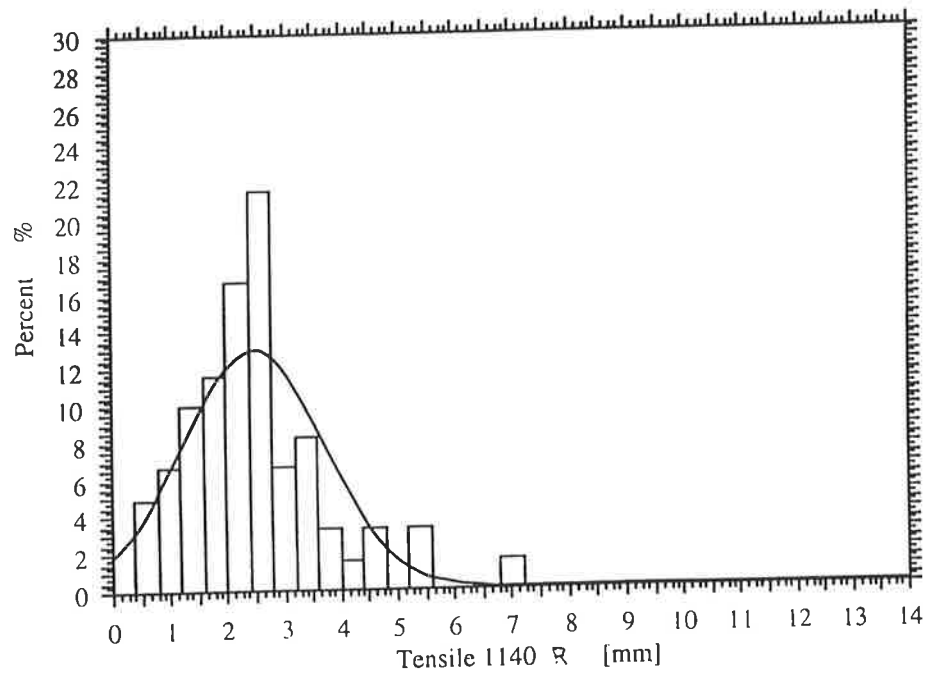
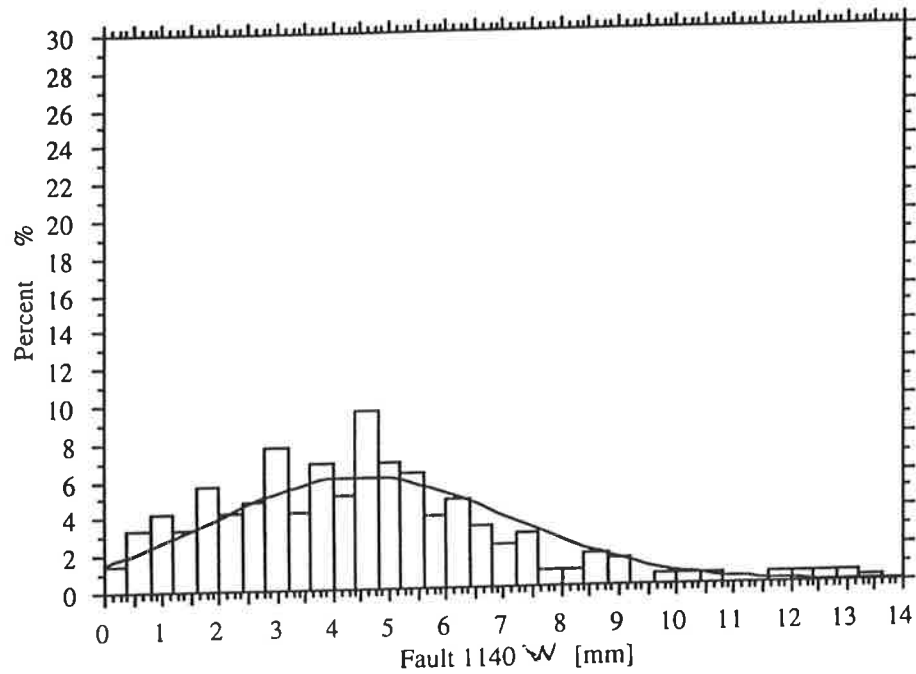
Medelvidden för kanalernas längdsektion i sprickplanet med varierande kanalvidd  $b_n$  och  $N$  antal tvärsektioner blir :

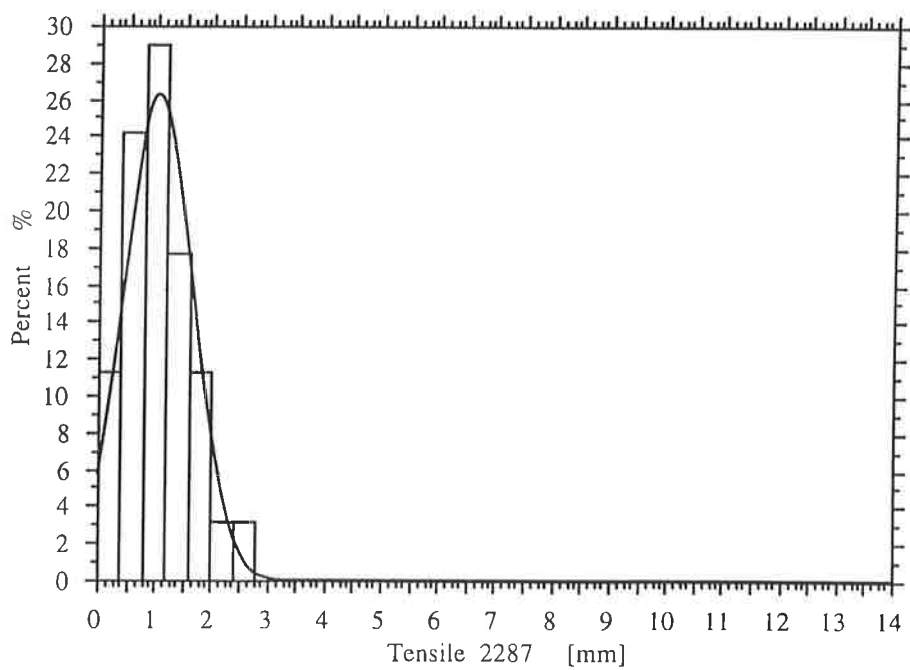
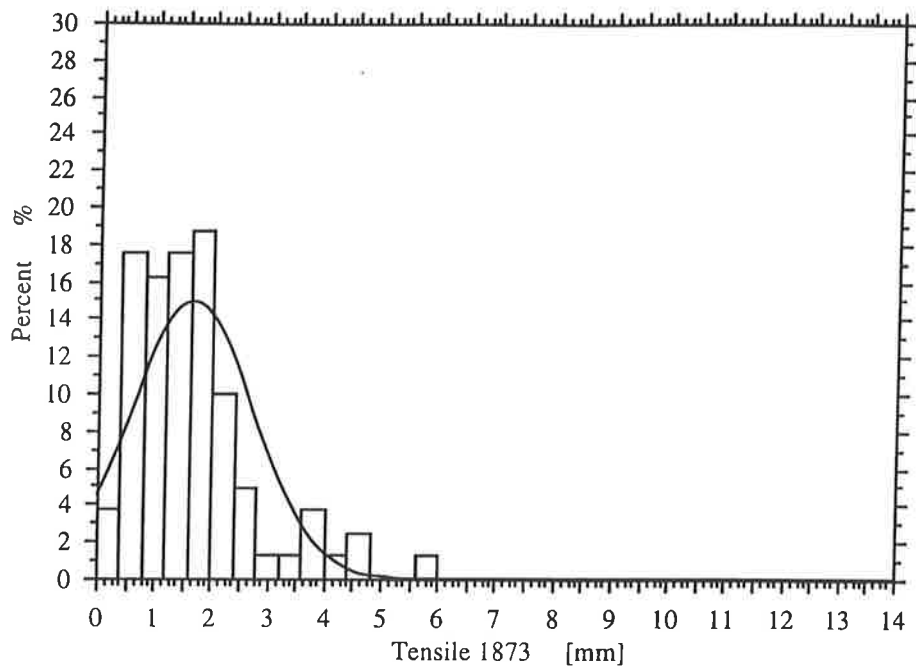
$$b = \frac{1}{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{1}{b_n}} \quad (A7)$$

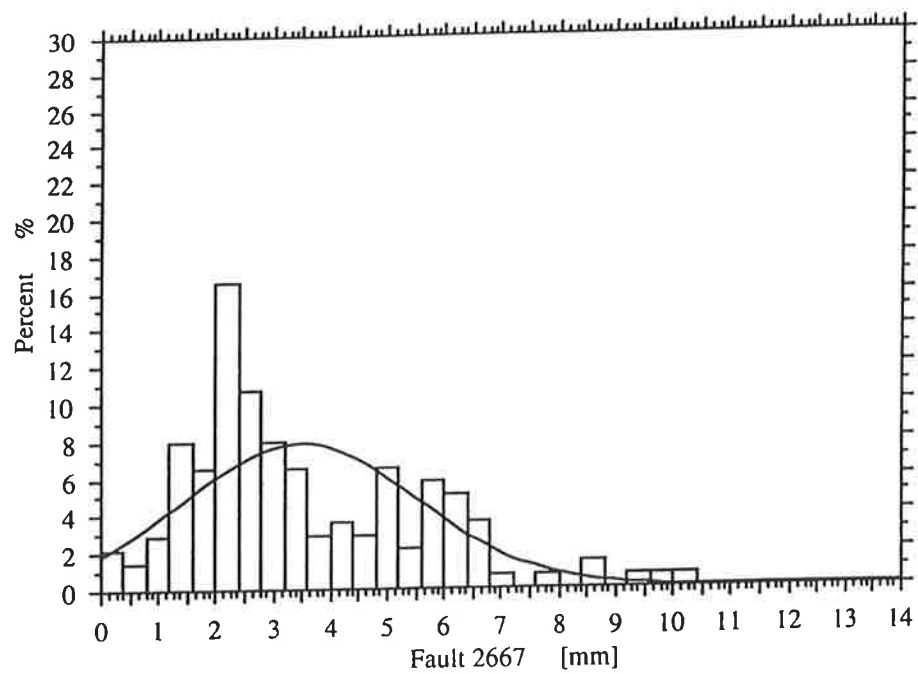
Injekteringens kanalvidden kan definieras som det harmoniska medelvärde,  $b_{\text{harm}}$ , av viddfördelningen längs en sprickkanal. Denna vidd har en stor inverkan på injekteringens spridning i sprickor eftersom strömning i sprickor sker i de största sprickvidderna dvs längs sprickkanaler. Vidden  $b_{\text{harm}}$  är styrande för hur långt injekteringsbruket kan gå i sprickan innan injekteringsfronten stoppas upp p g a flytgränsen.



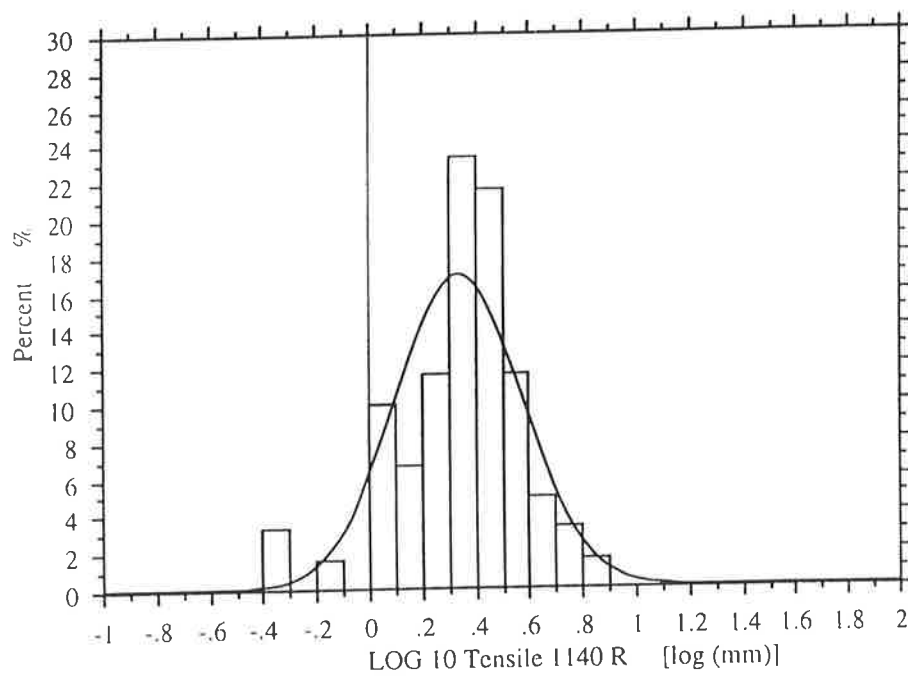
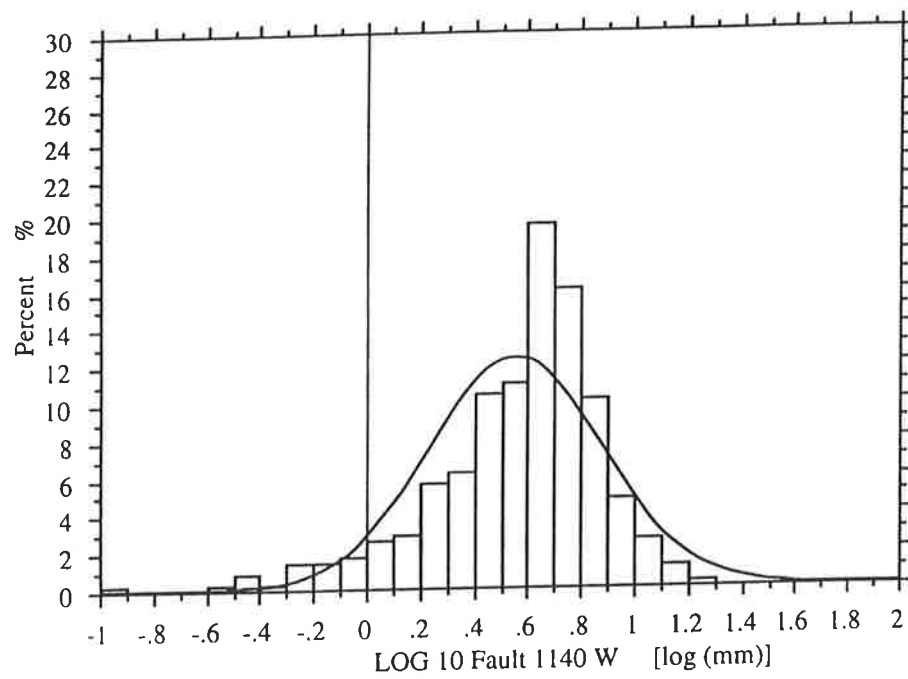
## HISTOGRAM ALL

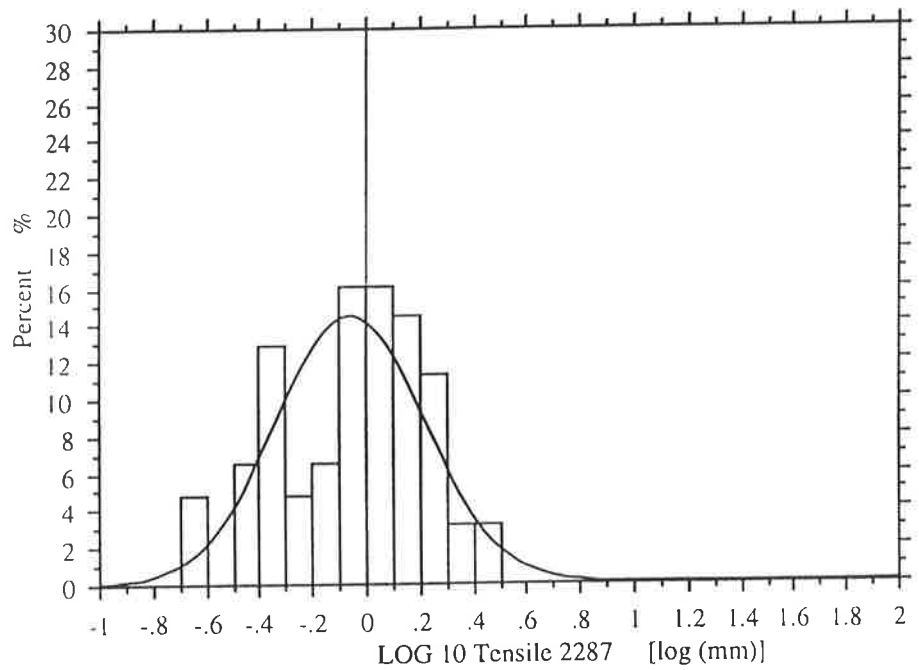
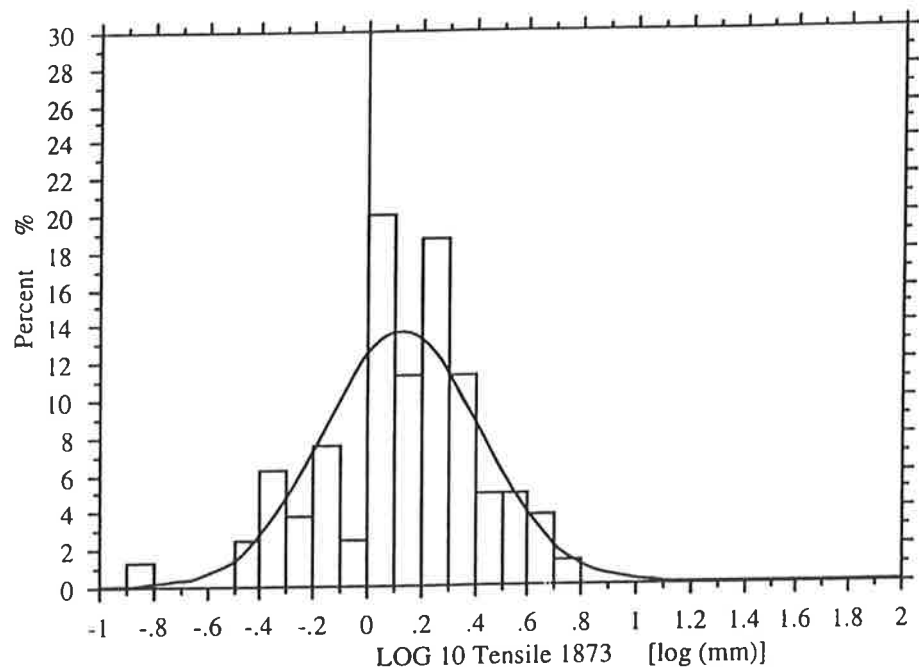


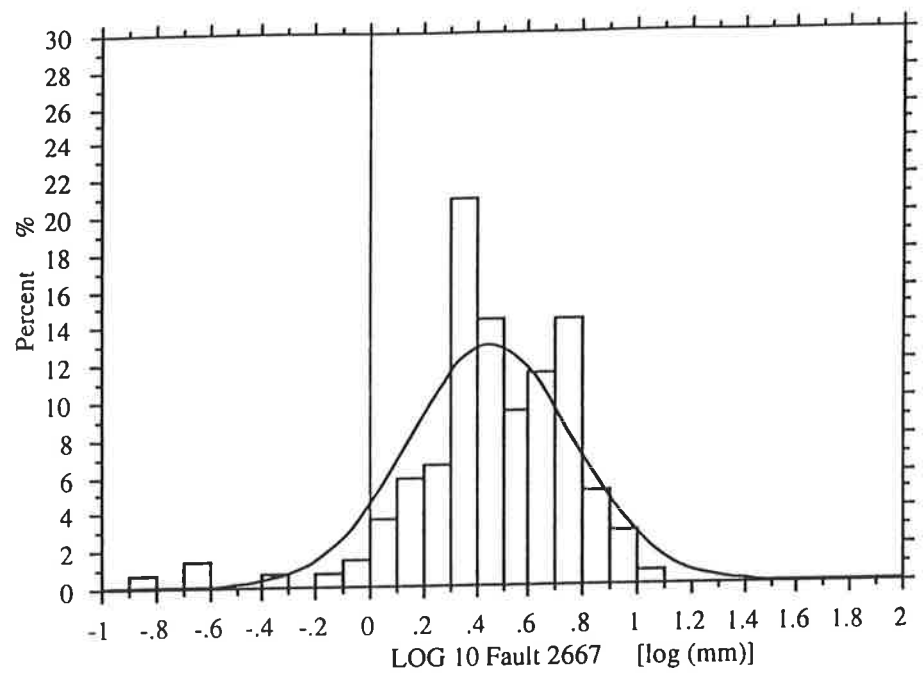




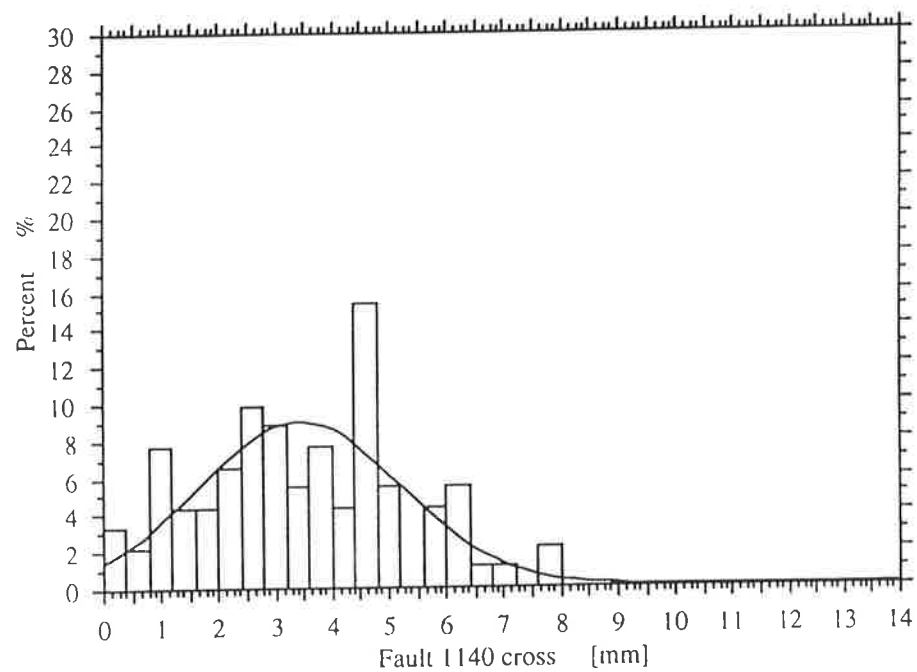
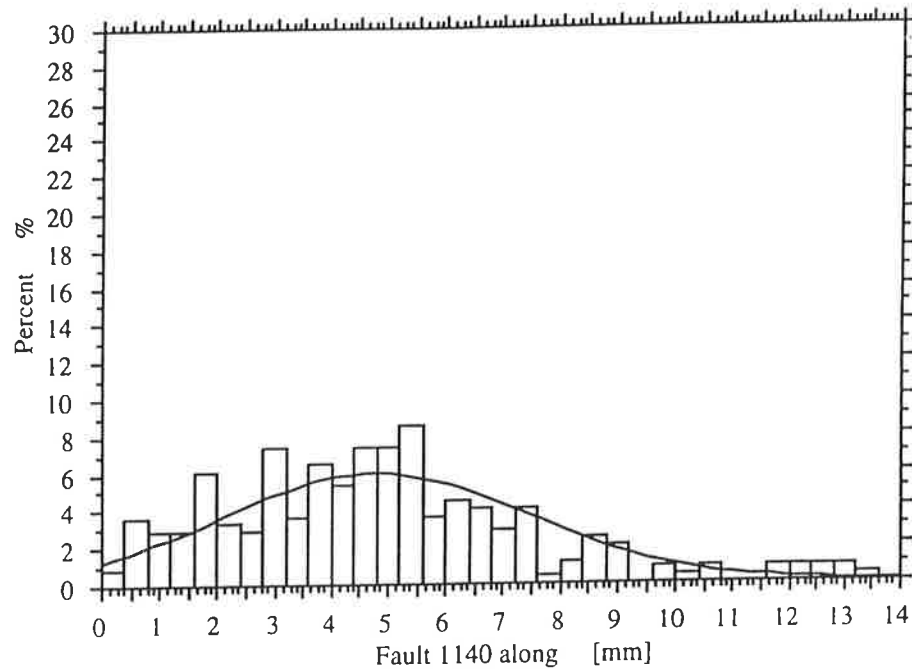
HISTOGRAM LOG HELA

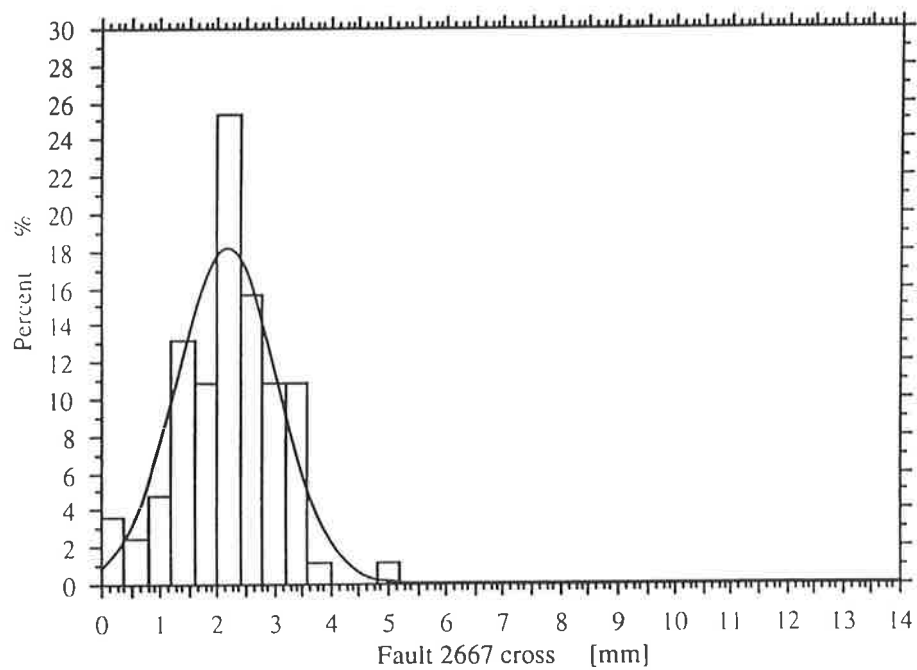
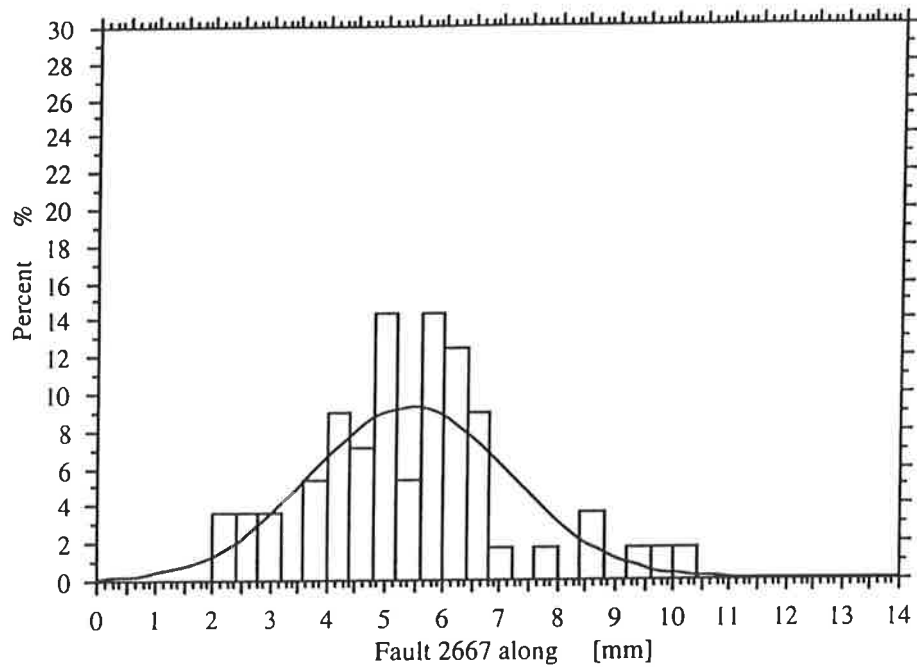




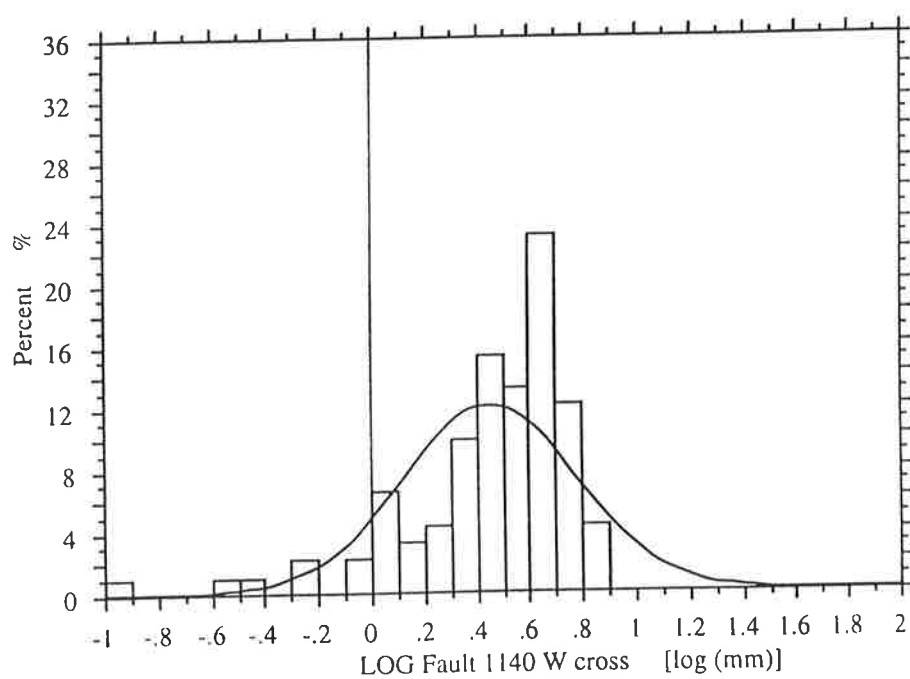
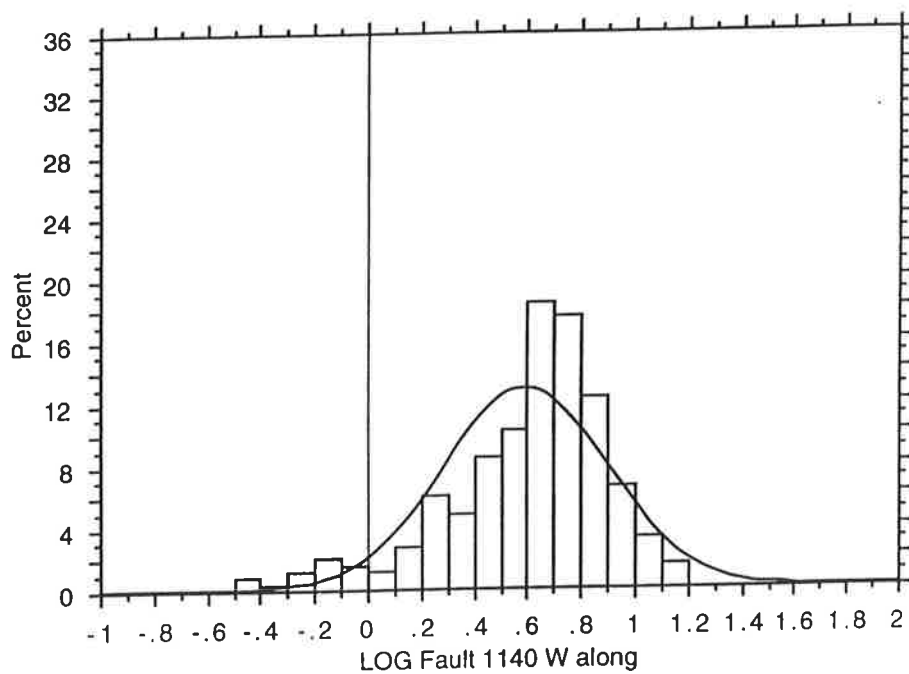


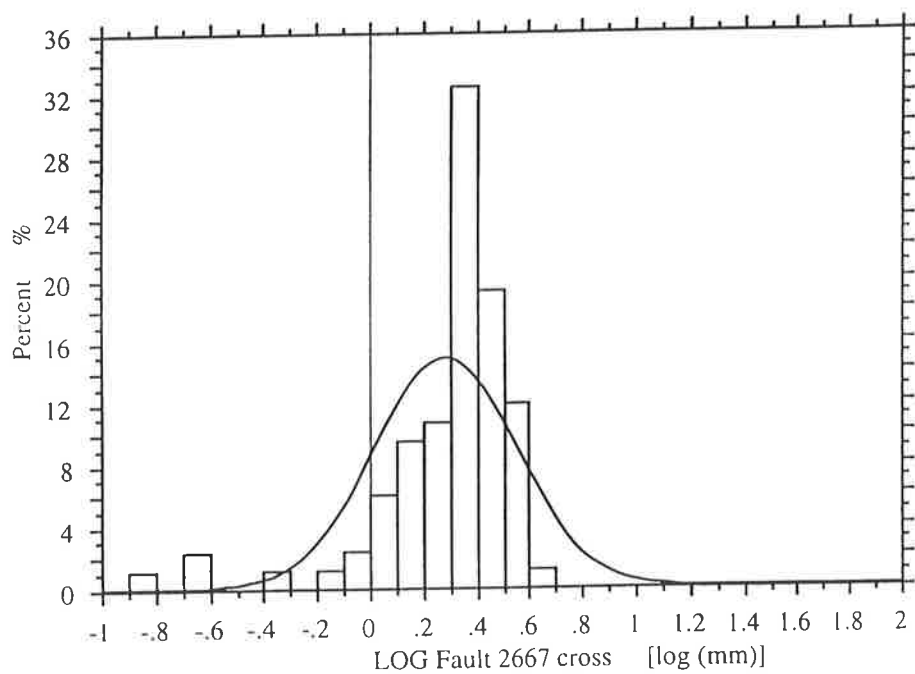
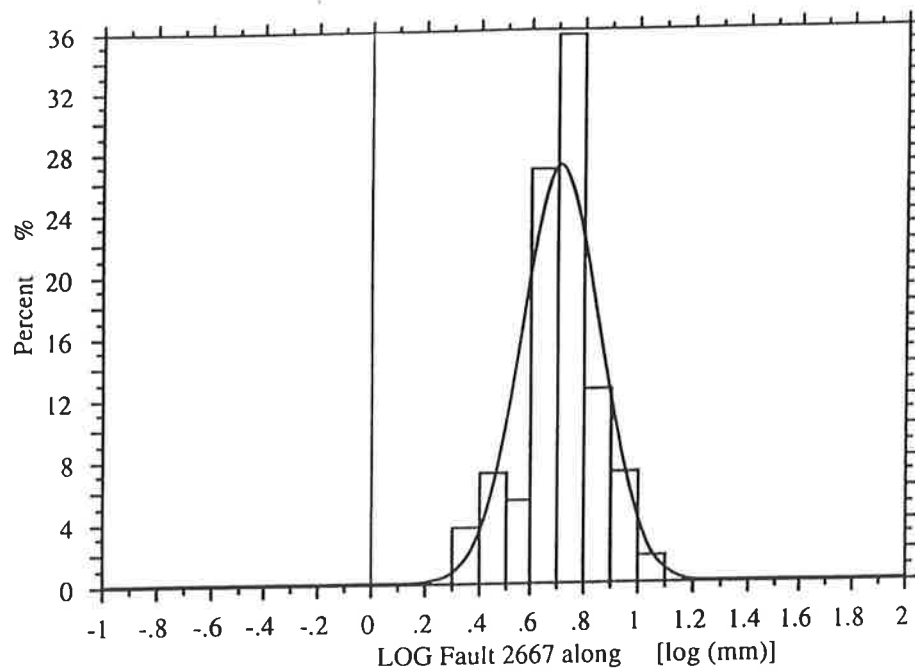
## HISTOGRAM FAULT

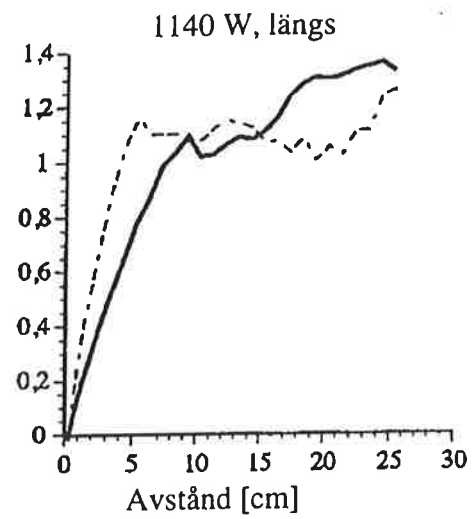
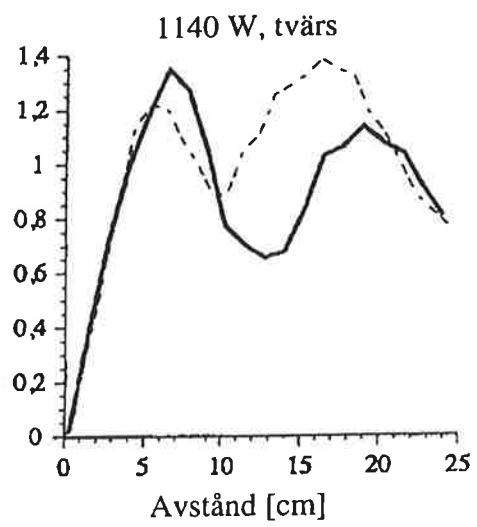




# HISTOGRAM FAULT LOG

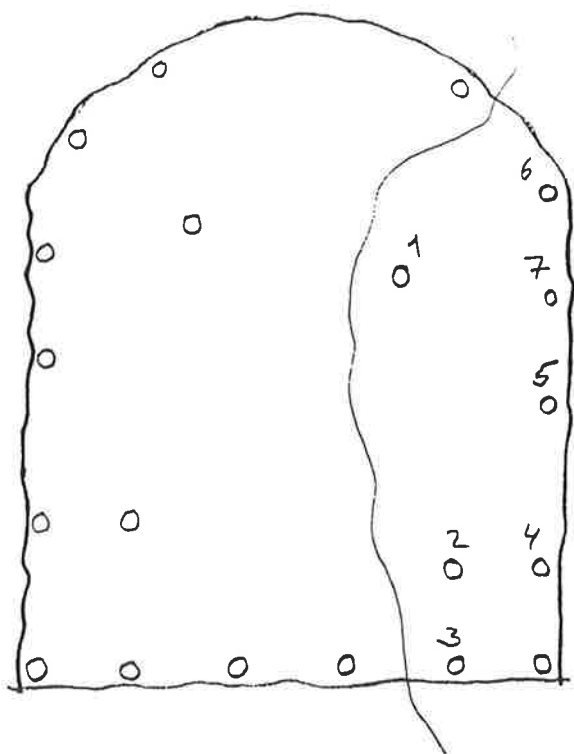




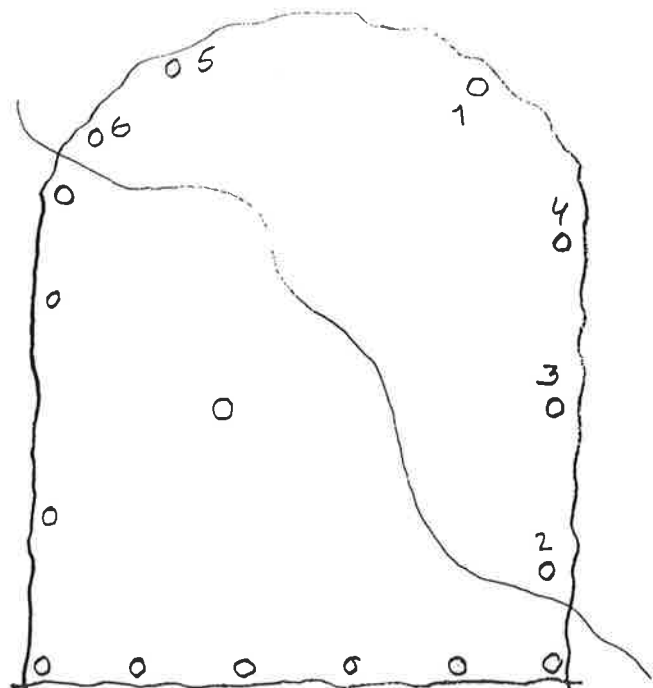


Semivariogram : 1140 W

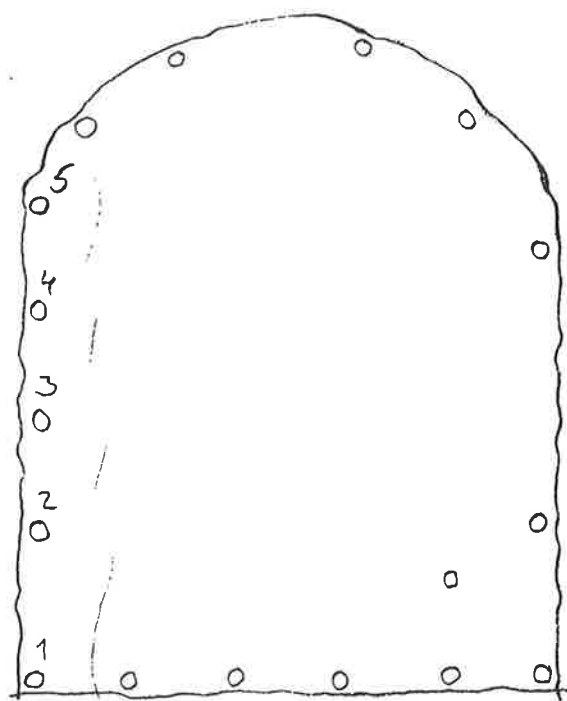
| Spricka | Borrhåls<br>nummer | Injekterings-<br>volym [m <sup>3</sup> ] | Transmissivitet<br>[m <sup>2</sup> /s] |
|---------|--------------------|------------------------------------------|----------------------------------------|
| 1140 W  | 1                  | 0.54                                     | 10.8*10 <sup>-6</sup>                  |
|         | 2                  | 0.14                                     | 9.9*10 <sup>-6</sup>                   |
|         | 3                  | 0.15                                     | 8.9*10 <sup>-6</sup>                   |
|         | 4                  | 0.47                                     | 6.4*10 <sup>-6</sup>                   |
|         | 5                  | 0.01                                     | 4.1*10 <sup>-6</sup>                   |
|         | 6                  | 0.02                                     | 7.7*10 <sup>-6</sup>                   |
|         | 7                  | 0.13                                     | 6.4*10 <sup>-6</sup>                   |
| 1140 R  | 1                  | 0.49                                     | 8.8*10 <sup>-6</sup>                   |
|         | 2                  | 0.09                                     | 4.4*10 <sup>-6</sup>                   |
|         | 3                  | 0.01                                     | 0.8*10 <sup>-6</sup>                   |
|         | 4                  | 0.29                                     | 5.3*10 <sup>-6</sup>                   |
|         | 5                  | 0.14                                     | 5.3*10 <sup>-6</sup>                   |
|         | 6                  | 0.03                                     | 3.5*10 <sup>-6</sup>                   |
| 1873    | 1                  | 0.62                                     | 8.0*10 <sup>-6</sup>                   |
|         | 2                  | 0.28                                     | 8.0*10 <sup>-6</sup>                   |
|         | 3                  | 0.44                                     | 8.0*10 <sup>-6</sup>                   |
|         | 4                  | 0.20                                     | 8.0*10 <sup>-6</sup>                   |
|         | 5                  | 0.28                                     | 8.0*10 <sup>-6</sup>                   |
| 2287    | 1                  | 0.07                                     | 3.4*10 <sup>-6</sup>                   |
|         | 2                  | 0.06                                     | 2.2*10 <sup>-6</sup>                   |
|         | 3                  | 0.02                                     | 2.3*10 <sup>-6</sup>                   |
|         | 4                  | 0.03                                     | 2.7*10 <sup>-6</sup>                   |
| 2667    | 1                  | 0.76                                     | 21.0*10 <sup>-6</sup>                  |
|         | 2                  | 0.07                                     | 8.3*10 <sup>-6</sup>                   |
|         | 3                  | 0.02                                     | -                                      |



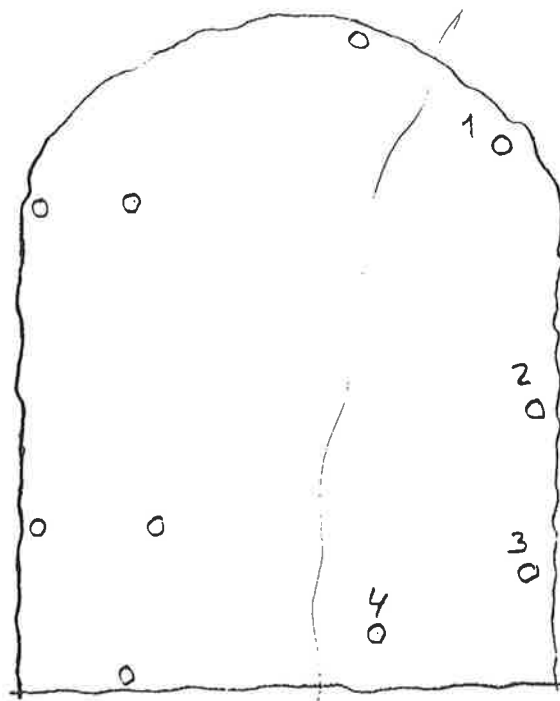
1140 W



1140 R



1873



2287

2667

