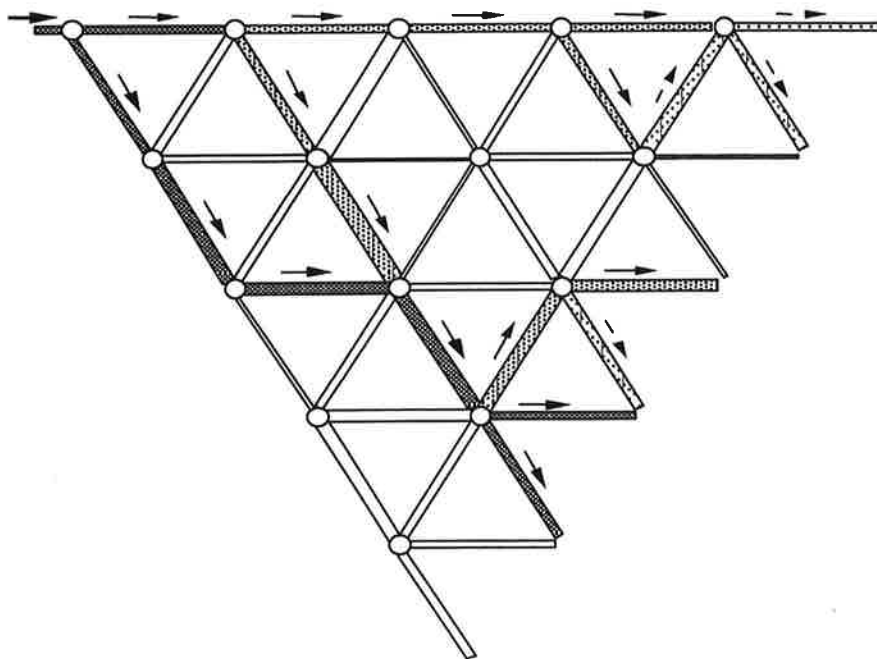




# **BERÄKNINGSMODELLER FÖR INJEKTERING TESTADE I LABORATORIUM**

Thomas Janson

STIFTELSEN SVENSK BERGTEKNISK FORSKNING  
SWEDISH ROCK ENGINEERING RESEARCH

# **BERÄKNINGSMODELLER FÖR INJEKTERING TESTADE I LABORATORIUM**

**Calculation models for grouting evaluated by  
laboratory tests**

Thomas Janson

SveBeFo Rapport 40

Stockholm 1999  
ISSN 1104-1773  
ISRN SVEBEFO-R--40--SE

## FÖRORD

SveBeFos forskning om injektering syftar till bättre kunskaper om injekteringsmedels verkan för att täta bergsprickor i tunnlar och bergrum. Forskningen har främst varit inriktad på cementbaserade material, där tre doktorandprojekt genomförts sedan mitten av åttiotalet vid avdelningen för jord- och bergmekanik på KTH. Därtill har ett projekt kring s k kemisk injektering bedrivits vid Chalmers, samfinansierat med Byggforskningsrådet och SBUF. Det fullföljdes i och med Helen Anderssons doktorsavhandling sommaren 1998, som behandlade egenskaper hos enkomponents polyuretaner. En sammanfattande svenskspråkig rapport publiceras av SveBeFo under 1999.

Thomas Jansons projekt (SveBeFo 161/651) har byggt på de två tidigare arbetena vid KTH, nämligen Lars Hässlers utveckling av en matematisk modell för simulering av injekteringsmedels flöden i sprickigt berg, och Ulf Håkansson laborieförsök kring injekteringsmedlens reologiska egenskaper. Det här redovisade projektet har syftat till att ta fram en prognosmodell för att bedöma bruksinträngning och därmed åtgången av injekteringsmedel under olika bergförhållanden. Modellen har prövats mot fältdata med relativt god överensstämmelse med beaktande av de stora osäkerheter som ligger i beskrivningen av aktuella bergparametrar. Laborieförsök i nätverk av plaströr har bekräftat modellens giltighet för väl definierade förhållanden.

Projektet fullföljdes sommaren 1998 med doktorsavhandlingen "Calculation models for estimation of grout take in hard jointed rock". I SveBeFo-rapport 30 "Beräkning av injekterad volym i bergsprickor" beskrivs utvecklingen av beräkningsmodellerna, medan föreliggande rapport redovisar projektets fortsättning med laborieförsök.

Projektet har följts av en referensgrupp, bestående av Tommy Ellison, Besab, Martin Brantberger, Stabilator, Jan Alemo, Vattenfall Utveckling, Lars Hässler, Vattenfall Hydropower (SwedPower), Anders Heiner, VBB, Gunnar Gustafson, CTH, Håkan Stille (vetenskaplig handledare), KTH och undertecknad.

De hittills genomförda forskningsprojekten har bidragit med viktig ny kunskap om injekteringsförlopp i berg och samtidigt visat på de stora svårigheter som ligger i att kontrollera förlopp som styrs av ett stort antal svårbestämda faktorer. I mitten av nittio-talet har ytterligare injekteringsforskning påbörjats, dels med stöd av Nuteks konsortie-program Väg-Bro-Tunnel, med anledning av allt större krav på täthet hos tunnlar, dels med stöd av SKB i samband med forskningsprogram för djupförvar av radioaktivt avfall. Det är viktigt att hittills vunna erfarenheter nu kan prövas i praktiskt tätnings-arbete, vilket också sker i regi av Vägverket sommaren 1999 vid tunnelarbeten för Södra Länken i Stockholm. SveBeFo kommer att verka för att resultat från de pågående aktiviteterna sammanfattas och kommer till allmän kännedom.

Stockholm i juni 1999

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.

I följande rapport beskrivs strömningsförsök med injekteringsmedel i olika rörmodeller. Modellerna har byggts av plaströr och injekteringsmedel har tryckts in i modellerna. Strömningsförsöken i modellerna har gjorts för att verifiera grundläggande samband och antaganden i tidigare presenterade beräkningsmodeller för injekterad volym (Janson, 1996). Volymsberäkningen grundar sig på teoretiska samband för den maximala inträngningen i sprickkanaler. Utvärdering av beräkningsmodellerna har tidigare gjorts genom jämförelse med resultat från fält (Janson, 1996). Svårigheterna med fältresultaten är att den exakta geometrin är okänd. Beräkningsmodellerna har därför även testas med kända geometrier, vilket redovisas i denna rapport. Syftet med försöken har således varit att testa de teoretiska sambanden för inträngning i kända rörgeometrier och att jämföra beräknad injekterad volym med resultat från försök i laboratoriemodeller.

Strömningsförsöken är gjorda i två huvudgeometrier, dels ett antal enkla rörgeometrier, dels en römnätsmodell. Försöken i de enkla rörgeometrierna har utförts i tre skilda serier. I försöksserie I består modellerna av enskilda rör med konstanta radier. I försöksserie II består modellerna av dels enskilda rör med varierande radier, dels av förgrenade rör med varierande radier. I försöksserie III består modellerna av dels korsande rör, dels enskilda rör som uppdelas i flera mindre rör och sedan sluts ihop till ett enskilt rör. Den registrerade maximala inträngningen har jämförts med den beräknade och resultatet visar på bra överensstämmelse. Försöken bekräftar beräkningarna att den maximala inträngningen av injekteringsmedel i ett enskilt rör är oberoende av römnätet i övrigt.

Römnätsmodellen kan ses som en sjättedels cirkulär skiva med ett utpräglat kanalsystem, där inträngningen av medlet sker. Kanalsystemet bildas av ett nät av plaströr. Den uppmätta volymen i römnätsmodellen jämförs med de beräknade volymerna. Jämförelsen ger olika bra resultat beroende på beräkningsmodell och inträngningslängd. Generellt fås mindre volymer vid beräkning än vid uppmätning. De låga beräknade volymerna beror troligtvis av de låga transmissivitetererna erhållna från vattentesterna.

Vidare har simulerats försök för andra geometrier på römnätsmodellen. De simulerade försöken visar att kraftiga lokala rörradievariationer påverkar vattenflödet genom modellen endast marginellt medan injekteringsvolymen påverkas väsentligt. Indata till volymsberäkningarna, som baseras på vattentesterna, ger då felaktiga resultat.

Beräkningsmodellerna ger en klar och god bild över de viktigaste faktorerna som styr injekteringsvolymen. En systematik för att välja injekteringstryck och flytgräns föreslås, baserad på modell III, vilken är den modell som tar hänsyn till flest geologiska parametrar.

## SUMMARY

Grouting in rock is a very complex process. The grouting is governed by various factors such as natural (rock joint properties and water conditions), modifiable factors (grout, pressure and working methods) and tightness requirements (leakage criterion and durability). Knowledge of how the different factors affect the results of grouting is limited.

The purpose of this report is to describe a method for determination of an expected grouting process, i.e. to have a better understanding of the most important mechanisms in grouting. Theoretical and empirical relationships have been used and developed to predict the grout volume.

Physical laboratory models of plastic tubes have been constructed to test the calculation models in known geometries. The calculation models are based on theoretical relationships for maximum penetration for different geometries. In the first experiments, with simple tube geometries, the aim was to test the theoretical relationships for maximum penetration into known tube geometries. In principle the penetration process and maximum length followed the theoretical expressions.

In the second experiments, a laboratory model of a network of tubes was built. The calculated volume is compared with that measured in the laboratory model. In the laboratory tests the geometry is known and all factors in the expressions for volume, such as the grouting pressure, the yield value of the grout, the transmissivity of the laboratory model and the geometric parameters, can be determined. The tests yield different degrees of agreement between measured and calculated volumes. The greater the penetration of grout into the network model, the better is the agreement. The reason for this is that the calculation models are based on the mean values from the whole tube network model and also that no local variations in the joint plane are taken in account.

Further simulation was made with tube radii different from those in the tests. The simulated tests show that when the variation of tube radius is small the calculation models give a good agreement with simulated volume and reverse.

## 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]                 |
| $I_{\max}$   | maximala inträngning i rör                                           | [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] |
| $V_I$        | 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> ]   |
| $V_{IV}$     | beräknad volym, baserad på inträngningslängd                         | [m <sup>3</sup> ]   |
| $V_{i,norm}$ | normaliserad volym i ett speciellt hål                               | [m <sup>3</sup> ]   |
| $V$          | uppmätt volym                                                        | [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]                |
| $P_o$        | initiella trycket                                                    | [Pa]                |
| $P_z$        | trycket vid $z=0$                                                    | [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]                  |
| $g$               | jordaccelerationen                                                                   | [m/s <sup>2</sup> ]  |
| $r$               | rörradie                                                                             | [m]                  |
| $r_w$             | borrhålsradien                                                                       | [m]                  |
| $r_{\text{hm}}$   | harmonisk medelradie                                                                 | [m]                  |
| $r_i$             | radien i en punkt i rörsystemet                                                      | [m]                  |
| $r_o$             | pluggradie                                                                           | [m]                  |
| $v_z$             | injekteringsmedlets inträngningshastighet                                            | [m/s]                |
| $z$               | läge längs röret                                                                     | [m]                  |
| $\alpha$          | sektionsvinkeln (spridningsvinkeln) i modell II                                      | [rad]                |
| $\mu_w$           | vattnets viskositet                                                                  | [Pa s]               |
| $\mu_B$           | injekteringsmedlets 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 |                      |
| $\varepsilon_o$   | relativa pluggradien                                                                 |                      |
| $\psi$            | kvoten mellan $N_g$ och $N_w$                                                        |                      |
| $\kappa$          | kvoten mellan $b_g$ och $b_{\text{hyd}}$                                             |                      |
| $\lambda$         | kvoten mellan den krokiga inträngningsvägen och den radiella vägen                   |                      |
| $\theta$          | kvoten mellan $\bar{b}$ och $b_{\text{hyd}}$                                         |                      |

# INNEHÅLLSFÖRTECKNING

|                                                              |           |
|--------------------------------------------------------------|-----------|
| FÖRORD .....                                                 | III       |
| SAMMANFATTNING .....                                         | IV        |
| SUMMARY .....                                                | V         |
| NOMENKLATUR .....                                            | VI        |
| INNEHÅLLSFÖRTECKNING .....                                   | 1         |
| <b>1. INLEDNING .....</b>                                    | <b>3</b>  |
| 1.1 BAKGRUND .....                                           | 3         |
| 1.2 ALLMÄNT .....                                            | 4         |
| <b>2. SAMBAND FÖR INTRÄNGNING OCH INJEKTERAD VOLYM .....</b> | <b>5</b>  |
| 2.1 BAKGRUND .....                                           | 5         |
| 2.2 INTRÄNGNING AV BINGHAMVÄTSKOR I RÖR .....                | 6         |
| 2.3 SPRICKPLANSMODELL I .....                                | 8         |
| 2.3.1 <i>Antaganden</i> .....                                | 8         |
| 2.3.2 <i>Samband</i> .....                                   | 9         |
| 2.4 SPRICKPLANSMODELL II .....                               | 10        |
| 2.4.1 <i>Antaganden</i> .....                                | 10        |
| 2.4.2 <i>Samband</i> .....                                   | 11        |
| 2.5 SPRICKPLANSMODELL III .....                              | 12        |
| 2.5.1 <i>Antaganden</i> .....                                | 12        |
| 2.5.2 <i>Samband</i> .....                                   | 14        |
| <b>3. FÖRSÖK I ENKLA RÖRGEOMETRIER .....</b>                 | <b>15</b> |
| 3.1 ALLMÄNT .....                                            | 15        |
| 3.2 FÖRSÖKSSERIE I .....                                     | 15        |
| 3.2.1 <i>Inledning</i> .....                                 | 15        |
| 3.2.2 <i>Indata</i> .....                                    | 15        |
| 3.2.3 <i>Resultat</i> .....                                  | 15        |
| 3.3 FÖRSÖKSSERIE II .....                                    | 16        |
| 3.3.1 <i>Inledning</i> .....                                 | 16        |
| 3.3.2 <i>Indata</i> .....                                    | 17        |
| 3.3.3 <i>Resultat</i> .....                                  | 17        |
| 3.4 FÖRSÖKSSERIE III .....                                   | 18        |
| 3.4.1 <i>Inledning</i> .....                                 | 18        |
| 3.4.2 <i>Indata</i> .....                                    | 19        |
| 3.4.3 <i>Resultat</i> .....                                  | 20        |
| 3.5 DISKUSSION OCH SLUTSATSER .....                          | 21        |
| <b>4. FÖRSÖK I RÖRNÄTSMODELL .....</b>                       | <b>22</b> |
| 4.1 ALLMÄNT .....                                            | 22        |
| 4.2 FÖRVÄNTAD MAXIMAL INTRÄNGNING .....                      | 23        |
| 4.3 FÖRVÄNTAD INTRÄNGNINGSVOLYM .....                        | 23        |
| 4.3.1 <i>Indata</i> .....                                    | 24        |
| 4.3.2 <i>Beräknad volym</i> .....                            | 26        |
| 4.4 RESULTAT .....                                           | 26        |

|           |                                                  |           |
|-----------|--------------------------------------------------|-----------|
| 4.5       | DISKUSSION AV RESULTATET .....                   | 29        |
| 4.6       | SIMULERADE RÖRFÖRSÖK .....                       | 31        |
| <b>5</b>  | <b>SLUTSATSER FRÅN LABORATORIEFÖRSÖKEN .....</b> | <b>33</b> |
| <b>6.</b> | <b>DISKUSSION AV BERÄKNINGSMODELLERNA .....</b>  | <b>35</b> |
| 6.1       | ALLMÄNT .....                                    | 35        |
|           | <b>REFERENSER .....</b>                          | <b>37</b> |
|           | <b>BILAGOR .....</b>                             | <b>39</b> |
|           | MODELLFÖRSÖK I-1 OCH 2 .....                     | 40        |
|           | MODELLFÖRSÖK I-3 OCH 4 .....                     | 40        |
|           | MODELLFÖRSÖK II-1 .....                          | 41        |
|           | MODELLFÖRSÖK II-2 .....                          | 41        |
|           | MODELLFÖRSÖK II-3 .....                          | 41        |
|           | MODELLFÖRSÖK II-4 .....                          | 42        |
|           | MODELLFÖRSÖK II-5 .....                          | 42        |
|           | MODELLFÖRSÖK III-1 .....                         | 42        |
|           | MODELLFÖRSÖK III-2, A OCH B .....                | 43        |
|           | MODELLFÖRSÖK III-2, C OCH D .....                | 43        |
|           | MODELLFÖRSÖK III-3, A OCH B .....                | 43        |
|           | MODELLFÖRSÖK III-3, C OCH D .....                | 44        |
|           | MODELLFÖRSÖK III-4, A OCH B .....                | 44        |
|           | MODELLFÖRSÖK III-4, C OCH D .....                | 44        |

# 1. INLEDNING

## 1.1 Bakgrund

I följande rapport beskrivs strömningsförsök med injekteringsmedel i olika försöksmodeller. Modeller av plaströr har byggts och injekteringsmedel har tryckts in i försöksmodellerna. Strömningsförsöken har gjorts för att verifiera grundläggande samband för inträngning av en Binghamvätska och beskrivna beräkningsmodeller för injekterad volym. Tidigare utvärderingar (Janson, 1996) av beräkningsmodellerna är gjorda med resultat från fält. Svårigheterna med fältresultaten är att den exakta geometrin är okänd. Beräkningsmodellerna har därför testas med kända geometrier, vilket redovisas i denna rapport.

Rapporten avslutas med en diskussion om hur de beskrivna beräkningsmodellerna kan tillämpas. Diskussionen baserar sig på tidigare tester (Janson, 1996) och laborieförsöken.

En litteraturstudie har genomförts för att ta tillvara tidigare erfarenheter och resultat, speciellt med avseende på de grundläggande sambanden för inträngningen. Tidigare laborieförsök, där en teoretisk bakgrund finns och injekteringsmedlets egenskaper är redovisade har rapporterats av Wittke (1968), Wallner (1976), Hässler (1991) och Börjesson et al (1992). I Wittke (1968) har samband för maximal inträngning redovisats och verifierats genom inträngningsförsök med planparallella glasplattor. En teori för injekteringsflödet, med antagande om plan laminär strömning och en Binghamvätska, har härletts av Wallner (1976). Härledningen ger ett samband för inträngningen som funktion av tiden. Ekvationerna för inträngningen, i en spricka med konstant vidd, har lösts med användning av finita elementmetoden. Teorin och beräkningsmetoden har verifierats i en modell av glasplattor. Vidare har Wallner redovisat inträngningsförsök i spaltmodeller med förgreningar. I dessa försök har även en bra korrelation erhållits mellan registrerat resultat och beräknat.

Vidare har Hässler (1991) härlett sambanden för flöden hos en Binghamvätska. Härledningen är gjord med ett något annorlunda tillvägagångssätt än Wallners men med samma slututtryck, dvs ett numeriskt uttryck för inträngningen med tiden. Beräkningar av sambanden har gjorts med ett specialskrivet numeriskt dataprogram. Beräkningsmetoden har verifierats genom en kanalnätmodell. Modellen bestod av två plexiglasskivor, mellan dessa skivor limmades plattor i ett symmetriskt mönster så att mellan plattorna bildades ett kvadratisk kanalnät. Försöksresultaten visade på god överensstämmelse med beräknade resultat.

Börjesson et al (1992) har gjort ett stort antal inträngningsförsök i en tunn spalt i stål, med både ett dynamiskt och statiskt injekteringsstryck. Spalten har varit både helt planparallell och haft en triangulär sektion. Försöken har gjorts enligt författarna för att studera injekteringsmekanismerna, verifiera de framtagna dynamiska flödessambanden, jämföra dynamisk injektering med statisk och bestämma minimal sprickvidd för olika injekteringsmedel. Injekteringsmedlens materialmodell har av författarna antagits följa en

annan modell än Bingham ("Power-law") och de reologiska egenskaperna (flytgränsen och viskositeten) är uppmätta. Resultaten med avseende på maximal inträngningslängd för statisk injektering visar på en acceptabel överensstämmelse mellan registrerad och teoretisk inträngning. För ett av de testade bruken är dock inte överensstämmelsen acceptabel, vilket förklaras med att bruket inte följer den antagna materialmodellen.

## 1.2 Allmänt

Försöken är gjorda på avdelningen Jord och Bergmekaniks laboratorium, KTH. I samtliga försök har en blandning av silikastoft och vatten använts som injekteringsmedel. Anledningen till materialvalet är att blandningen har minimala tidsberoende effekter, som exempelvis härdning av medlet.

Bestämning av medlens reologiska egenskaper (flytgräns och viskositet) är utförda med en rotationsviskosimeter, utrustad med en koncentrisk cylinder (Håkansson et al, 1991). Rotationsviskosimetern mäter medlets egenskaper kontinuerligt under en lång tidsperiod. Utvärderingen av mätningen har utförts med en Bingham modell som linjär approximation till de reologiska mätsekvenserna.

Medlet är injekterat i genomskinliga, luftfyllda, cirkulära plaströr. Rören har en rå inneryta, råheten fås genom sandblästring i kortare rörlängder (1-2 m) som sedan sammanfogas till en modelluppställning. Diametern på rören varierar från 3 till 20 mm beroende på modellens geometriska utseende.

Försöken är gjorda enligt följande :

- Medlet blandas i en höghastighetsblandare i 10 minuter.
- Avluftning av medlet.
- Medlet hålls i ett expansionskärl och i rotationsviskosimeterns mätkärl
- Via expansionskärlen läggs ett känt lufttryck på och medlet tränger in i rörmodellen samtidigt som mätningen av medlet görs i rotationsviskosimetern.
- Inträngningen registreras kontinuerligt under hela förloppet dels med manuell avläsning av tid och inträngningslängd, dels med videokamera som registrerar förloppet.

## 2. SAMBAND FÖR INTRÄNGNING OCH INJEKTERAD VOLYM

### 2.1 Bakgrund

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 genom 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 (Wallner, 1976, Lombardi, 1985, Hässler, 1991). Vidare antas att bergets porositet kan beskrivas på ett enkelt sätt med förenklade sprickgeometrier. Av ovanstående resonemang skulle således inträngningslängd kunna styras under injekteringen med hjälp av injekteringsvolymen. Genom en beräkningsmodell som beskriver injekteringsvolymen skulle indirekt inträngningen och sprickutfyllnaden således kunna kontrolleras. För injekteringsbruk, baserat på cement och vatten, använts normalt den sk Bingham modellen som materialmodell. Detta för enkelhetens skull och det faktum att sprickgeometrin där flödet sker är i detalj så lite känd (Håkansson, 1991).

I tidigare studier (Wallner, 1976, Lombardi, 1985, Hässler 1991) har de grundläggande flödessambanden för en Binghamvätska presenterats. En teoretisk injekteringsvolym kan beräknas ur dessa samband, för en känd geometri såsom en plan spalt eller kanal. Flödessambanden är dock inte analytiskt lösbara utan måste lösas numeriskt, såsom med finita elementmetoden (Wallner, 1976) eller med ett specialskrivet flödesprogram (Hässler, 1991). För en plan spalt med konstant vidd kan ett enkelt uttryck för den maximala inträngningen erhållas och därmed även den maximala volymen. I realiteten är dock inte sprickan absolut flat, vidden varierar och är svårbestämbar, inte oändligt lång och innehåller tätpunkter/fyllnadsmaterial, så att det enkla uttrycket för maximal volym inte kan användas direkt i praktiken (Lombardi, 1985). Det enkla uttrycket måste därmed modifieras så att sprickgeometrin och fysikaliska egenskaper tas i beaktande. Hitintills har därför vanligtvis injekteringsvolymen prognosticerats med gissningar och erfarenheter där volymen oftast anges i kg cement/borrmeter eller i liter bruk/m<sup>3</sup>, normalt 1-4 liter/m<sup>3</sup> i sprucket berg enligt Widmann (1995). En ytterligare metod att försöka beräkna volymen är med hjälp av bergets porositet och injekteringsmedlets fyllnadsgrad i sprickorna eller med hjälp av bergets magasin-koefficient för injekteringsmedlet (Widmann, 1995). Dessa metoder kräver dock omfattande och dyra förundersökningar som ändå ger osäkra data som resultat. Ett uttryck för volymen med en direkt eller indirekt enkel bestämning av sprickvidd och flödesvariation i sprickan baserat på en geologisk beskrivning har ej kunnat påträffas i litteraturen. En ny, enkel modell som beskriver injekteringsvolym och innehåller geologiska faktorer, vilka bestämmer flödet i sprickan, bör vara av intresse att utveckla.

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.

Injekteringsbruket har normalt en högre viskositet än vatten samt en flytgräns (skjuvspänning) och injekteringen påverkar vanligtvis ett begränsat antal sprickor. Dessa fakta ökar kraven på en geometrisk beskrivning av sprickor vid modellering av injekteringsflöden (Hässler, 1991). Allt detta leder till att bergmassan istället bör beskrivas som diskreta sprickplan vid beräkning av injektering i berg. Injekteringsbruket har en begränsad inträngningsförmåga. Den begränsade inträngningen beror på flera faktorer bland annat relationen mellan brukets kornstorleksfördelning och sprickvidden, brukets reologiska egenskaper och injekteringstryck. 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). Denna tumregeln är omdiskuterad och inträngningsförmågan torde bero mera av brukets specifika kvalitet (Houlsby, 1990). Brukets flytgräns skall vara minst 0.5 - 1.0 Pa och vara separationsstabil för att Binghammodellen skall vara relevant (Håkansson, 1991).

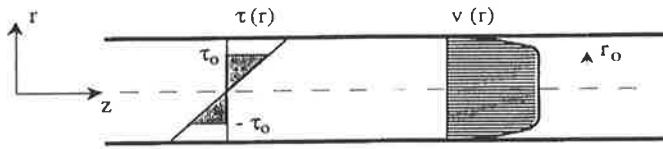
För att behålla sprickvidden konstant bör det maximala injekteringstrycket begränsas. Maximal lyftkraft i en spricka är proportionell mot maximal volym och tryck, vilket även överensstämmer bra med empiriska erfarenheter (Lombardi, 1985). Vid stabila bruk reduceras lyftkraften i förhållande till instabila bruk, likaså reduceras kraften ytterligare när flera sprickor injekteras i ett borrhål samtidigt, dvs volymen fördelas på fler sprickor. Ovanstående ger att problem med uppspräckning sällan förekommer vid tryck upp till 3 - 4 MPa (Lombardi & Deere, 1993), som kan användas under förutsättning att volymen är måttlig. En ytterligare faktor som kan begränsa inträngningen är brukets filtreringsstabilitet (Hansson, 1995). Hur denna faktor påverkar inträngningen i detalj är dock okänt och har därför inte beaktats. 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 injekteringsens spridning i berget måste således den enskilda sprickan och spricksystemets geometri kunna beskrivas väl. Med hänsyn till alla ovanstående faktorer har tre beräkningsmodeller med varierande detaljeringsgrad tagits fram, som beskriver injekteringsens inträngning, injekterad volym och spricköppningen i berget (Janson, 1993, 1996a, Stille et al, 1993, 1994). De principiella skillnaderna mellan modellerna finns i de geometriska antagandena.

I nästa avsnitt beskrivs teorin för inträngningen av injekteringsmedel i rör och i de efterföljande avsnitten beskrivs de framtagna beräkningsmodellerna för injekterad volym i sprickplan.

## **2.2 Inträngning av Binghamvätskor i rör**

En vätska deformeras kontinuerligt då den utsätts för en yttre kraft, dvs vätskan strömmar. För en vätska är det inte deformationen mellan olika inre skikt som utgör kriteriet för kraftjämvikt, vilket gäller för en fast kropp, utan hastigheten hos deformationen, dvs

töjningshastigheten (Håkansson, 1994). I försöken sker strömningen av vätskan i långa cirkulära rör. Vätskan antas vara en sk Binghamvätska. Detta innebär att den har en flytgräns,  $\tau_0$ , en viskositet,  $\mu_b$ , samt är inkompressibel. Vidare förutsätter vi långsam strömning (dvs ett lågt Reynolds tal) och "no-slip" vid de fasta begränsningsytorna. Vid strömning av Binghammaterial, till vilket injekteringsmedel normalt räknas, bildas en plugg eller med andra ord det finns en kärna som rör sig som en stel kropp i medlet. I pluggen finns inte någon hastighetsgradient och kraftjämvikt råder där, se figur 2.1. Den maximala inträngningen i varje förgrening uppnås vid fullt utbildad plugg som då fyller ut röret. Pluggbildningen beror av flytgränsen och tryckgradienten. Flytgränsen antas vara konstant längs hela inträngningen.



Figur 2.1 Hastighetsprofilen för en Binghamvätska i ett rör (Håkansson, 1994)  
*Bingham flow in a circular pipe (Håkansson, 1994)*

Den maximala inträngningslängden ( $I_{\max}$ ), i rören beror av trycket ( $\Delta P$ ), rörradien ( $r$ ) och flytgränsen ( $\tau_0$ ) och sambandet uttrycks enligt Håkansson (1994) :

$$I_{\max} = \frac{\Delta P r}{2 \tau_0} \quad (2:1)$$

Består modellen av sammansatta rördelar med varierande radier och lika dellängder kan rörradien ( $r$ ) ersättas med modellens harmoniska medelvärde av rörradierna ( $r_{hm}$ ) på motsvarande sätt som vidden har hanteras av Gustafson & Stille (1996). Maximal inträngning kan då uttryckas enligt följande :

$$I_{\max} = \frac{\Delta P r_{hm}}{2 \tau_0} \quad (2:2)$$

där den harmoniska medelradien kan uttryckas enligt följande :

$$r_{hm} = \frac{1}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{r_i}} \quad (2:3)$$

där  $r_i$  är varje rördels radie och  $n$  är antalet rördelar. Formeln kan även användas vid modeller med olika dellängder om en indelning i fiktiva rördelar utföres så varje verklig rördel blir en multipel av den fiktiva längden. Uttrycken (2:1 och 2:2) för maximal inträngning vid vätskeströmning gäller oavsett antalet rörförgreningar eller ökande area av strömningsvägar, dvs "inträngningen i de olika förgreningarna är oberoende av varandra" (Hässler, 1991).

Vid injekteringsstoppet i hela rörsystemet, vilket inträffar samtidigt i alla förgreningar, är den totala tryckförlusten lika längs alla rörgrenar oavsett röргеometri. Genom att mäta de reologiska egenskaperna ( $\mu_0$  och  $\tau_0$ ) för medlet som används i modellerna kan ett samband för inträngningshastigheten ( $v_z$ ) uttryckas enligt Håkansson (1994) som :

$$\bar{v}_z^B = \frac{r^2}{8 \mu_B} \left[ 1 - \frac{4}{3} \epsilon_o + \frac{1}{3} \epsilon_o^4 \right] \frac{\delta P}{\delta z} \quad (2:4)$$

där pluggutbildningen ( $\epsilon_o$ ) uttrycks som :

$$\epsilon_o = \frac{r_o}{r} = \frac{2 \tau_o}{r \frac{\delta P}{\delta z}} \quad (2:5)$$

Uttrycket kan ej lösas analytiskt eftersom pluggradien ( $r_o$ ) också är en funktion av tryckgradienten ( $\Delta P/\Delta z$ ). Emellertid kan sambandet mellan tid och inträngning upprättas enkelt om antagandet görs att pluggen är konstant under en liten sträcka,  $\Delta z$ , längs röret. Därmed kan uttrycket (2:4) förenklas enligt följande :

$$\bar{v}_z^B = \frac{r^2}{8 \mu_B} \left[ 1 - \frac{4}{3} \epsilon_o + \frac{1}{3} \epsilon_o^4 \right] \frac{(P_o - P_z)}{Z} \quad (2:6)$$

där

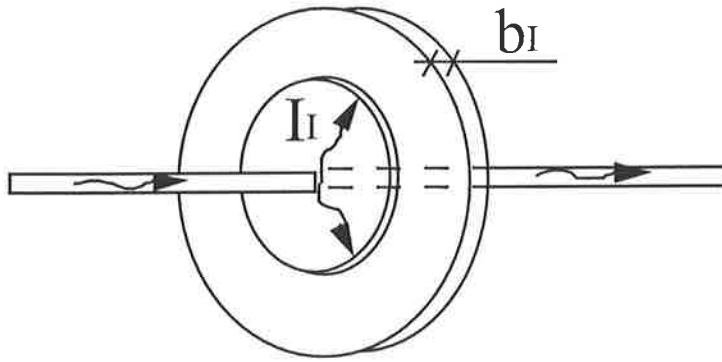
$$\epsilon_o = \frac{2 \tau_o}{r \frac{(P_o - P_{z - \Delta z})}{Z - \Delta Z}} \quad (2:7)$$

och  $Z$  är läget för injekteringsfronten vid en viss tidpunkt,  $P_o$  initiella trycket ( $z=0$ ) och  $P_z$  trycket vid injekteringsfronten. Pluggutbildningen ( $\epsilon_o$ ) går mot 1.0 vid injekteringsstoppet (inträngningshastigheten,  $v_o = 0$ ). Ekvationen för inträngningshastigheten har använts för att kontrollera giltigheten av den uppnådda inträngningen i de enkla rörgeometriförsöken, kapitel 3.

## 2.3 Sprickplansmodell I

### 2.3.1 Antaganden

Modellen är baserad på att injekteringen sker i plana cirkulära sprickskivor med en konstant spricköppning  $b_i$ , se figur 2.2. Sprickplanet genomskärs i centrum av borrhålet och injekteringsmedlet från borrhålet fyller ut skivan symmetriskt från centrum. Utfyllnaden sker med en inträngningslängd  $l_i$ . Antalet injekteringsbara sprickplan längs borrhålet antas vara samma som de antagna vattenförande sprickplanen. Spricköppningen ( $b_i$ ) för sprickplanet beräknas från bergets transmissivitet ( $T$ ).



Figur 2.2 I modell I sker injekteringen i ett cirkulärt sprickplan.  
*In Model I penetration takes place in a circular disc.*

För att modellen skall gälla måste följande villkor uppfyllas :

- Att injekteringen sker till stopp
- 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.

### 2.3.2 Samband

Inträngningslängden för injekteringen, dvs utfyllnadens radie från borrhålet, kan uttryckas som :

$$I_I = \frac{\Delta P \cdot b_I}{2 \cdot \tau_0} \quad (2:8)$$

där  $\Delta P$  är tryckskillnaden mellan det pålagda injekteringstrycket [Pa] och grundvattenstrycket [Pa] och  $\tau_0$  är injekteringsmedlets skjuvhållfasthet [Pa].

Injekteringsvolymen för utfyllnaden i sprickplanet kan uttryckas som :

$$V_I = I_I^2 \cdot b_I \cdot \pi \quad (2:9)$$

Ofta utförs en vattenförlustmätning av bergmassan med hjälp av en manschett. Manschetten 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) :

$$T = \frac{Q_w \cdot \rho_w \cdot g \cdot P_{Dw}}{\Delta P_w \cdot 2 \cdot \pi} \quad (2:10a)$$

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

$$T = \frac{N_w b_{hyd}^3 \rho_w \cdot g}{12 \cdot \mu_w} \quad (2:10b)$$

där  $Q_w$  är flödet från vattenförlustmätningen [m<sup>3</sup>/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 borrhålslängden och dess radie, dvs det dimensionslösa uttrycket (Gustafson 1986) :

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

Sambandet för inträngningslängden ( $I_I$ ) samt antagandet av antalet sprickplan ( $N$ ) som skär borrhålet ger följande uttryck, vilket även har visats av Lombardi (1985), för den förväntade injekteringsvolymen i ett enskilt borrhål :

$$V_I = \left( \frac{\Delta P}{2 \cdot \tau_0} \right)^2 \cdot N \cdot b_I^3 \cdot \pi \quad (2:11)$$

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

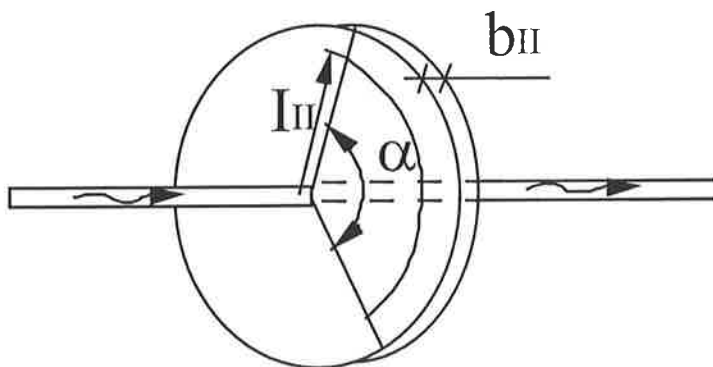
$$V_I = \left( \frac{\Delta P}{2 \cdot \tau_0} \right)^2 \cdot \frac{12 \cdot T \cdot \mu_w}{\rho_w \cdot g} \cdot \pi \quad (2:12)$$

För modell I kan den förväntade volymen beräknas utifrån transmissiviteten.

## 2.4 Sprickplansmodell II

### 2.4.1 Antaganden

Modellen 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 (projiceras) till ett tänkt plan med en grad av öppenhet för injektering. Ytorna av de injekteringsbara kanalerna i planet summeras och beskrivs som en sektionsdel i det cirkulära sprickplanet med en sektionsvinkel och en öppning  $b_{II}$ , se figur 2.3. 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 2.3 I Modell II sker injekteringen i en sektionsdel med vinkeln  $\alpha$ .  
*In Model II penetration takes place in a sector of a disc*

För att modellen skall gälla måste följande villkor uppfyllas :

- Att injekteringen sker till stopp
- 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 från en bergkartering.
- Att ingen deformation av sprickorna sker.

#### 2.4.2 Samband

Inträngningslängden av injekteringen i sektionsdelen kan uttryckas som :

$$I_{II} = \frac{\Delta P \cdot b_{II}}{2 \cdot \tau_0} \quad (2:13)$$

där  $\Delta P$  är tryckskillnaden mellan det pålagda injekteringstrycket [Pa] och grundvattenstrycket [Pa] och  $\tau_0$  är injekteringsmedlets skjuvhållfasthet [Pa].

Injekteringsvolymen för sektionsdelen i sprickplanet kan beräknas som :

$$V_{II} = I_{II}^2 \cdot b_{II} \cdot \frac{\alpha}{2} \quad (2:14)$$

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

$$V_{II} = \left( \frac{\Delta P}{2 \cdot \tau_0} \right)^2 \cdot N b_{II}^3 \frac{\alpha}{2} \quad (2:15)$$

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

$$Q_w = \frac{\Delta P_w \cdot N b_{II}^3}{12 \cdot \mu_w} \cdot \frac{\alpha}{\ln(1 + \alpha \cdot L/W)} \quad (2:16)$$

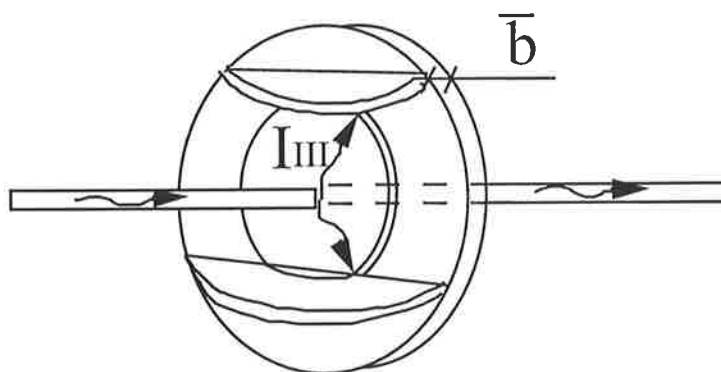
där  $b_{II}$  är spricköppningen för sektionssdelen [m];  $\alpha$  är den öppna del av sprickplanet där injekteringen kan tränga in, dvs en sektionsvinkel [rad];  $L$  är influensavståndet till områdets yttre rand (cirka 200-500 gånger borrhålsradien);  $W$  är borrhålets omkrets (vanligtvis ca 0,18 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.

## 2.5 Sprickplansmodell III

### 2.5.1 Antaganden

Modell III är en utveckling av modell I, där försök att beskriva injekterings 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 2.4.

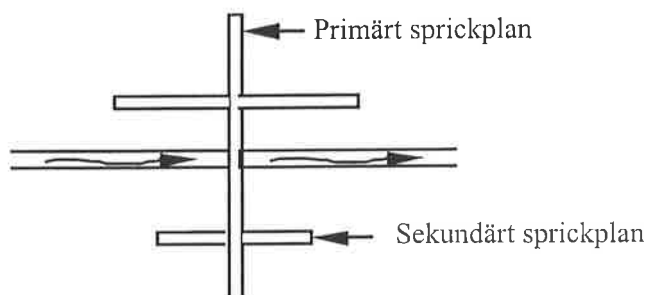


Figur 2.4 I Modell III sker injekteringen i sprickplanssystem.  
*In Model III penetration takes place in a system of discs.*

Det primära sprickplanet ut från borrhålet skär även andra sprickplan (sekundära sprickplan) i berget, se figur 2.5. Sprickplanen är beskrivna enligt samma princip som modell I men hänsyn tas till olika geologiska parametrar. Parametrarna tar hänsyn till vattnets och injekteringsbrukets olika beteenden vid strömning i berget, inträngningens krokiga väg och effekten av de sekundära sprickplanen. Injekteringsvolymen i modellen beräknas med hjälp av parametrarna  $\theta$ ,  $\beta$  och  $\psi$ . Medelspricköppningen  $\bar{b}$  för sprickplanet vid injekteringen kan beskrivs 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.

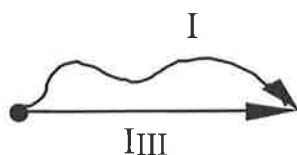


Figur 2.5. Injekteringen i modellen sker i primära och sekundära sprickplan.  
*Grouting in this model takes place in primary and secondary discs.*

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 2.6.



Figur 2.6 Sprickkanalens krokiga väg I i sprickplanet.  
*Tortuous path I 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 öppning  $b_i$  längs den injekterade kanalen känd, skulle  $b_g$  och  $\bar{b}$  kunna beräknas från  $b_i$ . Sprickplanets medelöppning  $\bar{b}$  beräknas som medelvärde av de varierande sprickvidderna utmed hela sprickplanet dvs :

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

Sprickkanalens öppning  $b_g$  beräknas som det harmoniska medelvärde av sprickvidderna dvs :

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

För att modellen skall gälla måste följande villkor uppfyllas :

- Att injekteringen sker till stopp
- 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 från en bergkartering.
- Att injekteringsmedlet är separationsstabil och har en god filtreringsstabilitet under hela injekteringsförloppet.
- Att ingen deformation av sprickorna sker.

### 2.5.2 Samband

Inträngningslängden av injekteringen i sprickplanssystemet kan uttryckas som :

$$I_{III} = \frac{\Delta P \cdot b_g}{2 \cdot \tau_0 \cdot \lambda} \quad (2:17)$$

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 :

$$V_{III} = I_{III}^2 \cdot \bar{b} \cdot \pi \cdot \beta \cdot N_g \quad (2:18)$$

En tolkning av transmissiviteten för sprickplanen ger (se ekvation 2:10) :

$$N_w b_{hyd}^3 = \frac{T \cdot 12 \cdot \mu_w}{\rho_w \cdot g} \quad (2:19)$$

Allt detta ger följande :

$$V_{III} = \left( \frac{\Delta P}{2 \cdot \tau_0} \right)^2 \cdot \frac{12 \cdot T \cdot \mu_w}{\rho_w \cdot g} \cdot \frac{\psi \cdot \kappa^2 \cdot \theta \cdot \beta \cdot \pi}{\lambda^2} \quad (2:20)$$

Av transmissiviteten och en uppskattning av de fem olika geologiska parametrarna kan den förväntade volymen beräknas.

### 3. FÖRSÖK I ENKLA RÖRGEOMETRIER

#### 3.1 Allmänt

Syftet med försöken i detta kapitel är att testa de teoretiska sambanden för inträngning i kända rörgeometrier. Försöken har utförts i tre skilda serier beroende på geometrin på rören och alla de tre serierna har presenterat tidigare av Janson (1996b). I försöksserie I består modellerna av enskilda rör med konstanta radier. I försöksserie II består modellerna av dels enskilda rör med varierande radier, dels av förgrenade rör med varierande radier. I försöksserie III består modellerna av dels enskilda rör som korsas av andra rör, dels enskilda rör som uppdelas i flera mindre rör och sedan sluts ihop till ett enskilt rör.

Resultaten har registrerats och uppritats i tids-inträngningsdiagram. Ett urval av dessa presenteras i bilagan. Utvärderingen av den maximala inträngningen och förloppet har sedan gjorts från diagrammen.

De tre försöksserierna redovisas i tre skilda avsnitt; en inledningsdel, en indata del och en resultatdel med kommentarer och delslutsatser. Det avslutande avsnittet (3.5) innehåller en kort diskussion och sammanfattande slutsatser av samtliga enkla rörförsök.

#### 3.2 Försöksserie I

##### 3.2.1 Inledning

I försöksserie I har modellen byggts för att kunna verifiera injekteringsstoppet vid konstant rörradie (ekvation 2:1). Modellerna består av raka genomskinliga rör. Flödet i försöksmodellerna har registrerats kontinuerligt fram till injekteringsstoppet. En kontroll av den beräknade inträngningskurvan, enligt ekvation 2:6, har gjorts genom att jämföra hur pass bra den överensstämmer med den registrerade kurvan.

##### 3.2.2 Indata

Indata som har använts i försöksserie I är presenterade i tabell 3.1.

**Tabell 3.1** Indata för försöksserie I  
*Input data in test series I*

| Försök | Tryck [kPa] | Radie [mm] | Flytgräns [Pa] | Viskositet [mPa s] |
|--------|-------------|------------|----------------|--------------------|
| 1      | 50          | 2.0        | 5.7            | 140                |
| 2      | 50          | 1.5        | 5.7            | 140                |
| 3      | 50          | 2.0        | 5.8            | 100                |
| 4      | 50          | 1.5        | 5.8            | 100                |

##### 3.2.3 Resultat

Maximal inträngningen som har registrerats och beräknats i försöksserie I är presenterad i tabell 3.2. Tids-inträngningsdiagrammen (I-1,2 och I-3,4) är presenterade i bilaga.

Skillnaden mellan beräknad inträngningslängd och registrerad, 1.00 till 1.11, kan accepteras eftersom de reologiska parametrarna har antagits till att vara konstanta under hela förloppet. Den beräknad inträngningskurva följer registrerade kurva väl, se bilaga.

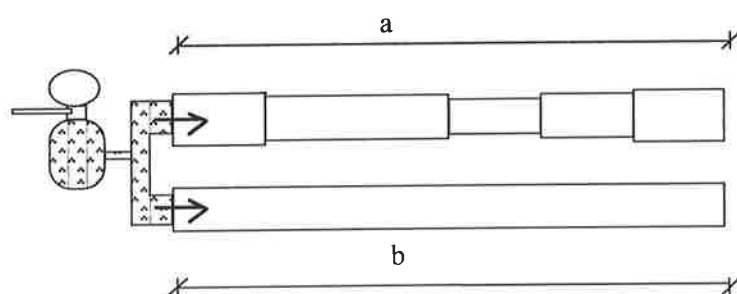
**Tabell 3.2** Resultat i försöksserie I  
*Results from test series I*

| Försök | Registrerad inträngning<br>[m] | Beräknad inträngning<br>[m] | Beräknad / Registrerad |
|--------|--------------------------------|-----------------------------|------------------------|
| 1      | 7.9                            | 8.8                         | 1.11                   |
| 2      | 6.0                            | 6.6                         | 1.10                   |
| 3      | 8.1                            | 8.6                         | 1.06                   |
| 4      | 6.5                            | 6.5                         | 1.00                   |

### 3.3 Försöksserie II

#### 3.3.1 Inledning

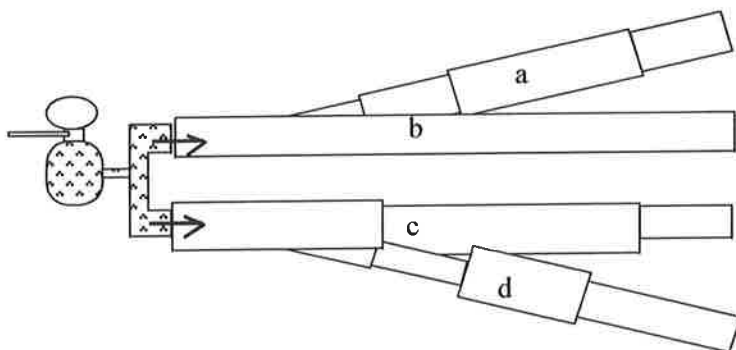
I försöksserie II består modellerna av rördelar med varierande radier. Försöken har gjorts för att verifiera den harmoniska medelradiens ( $r_{hm}$  ekvation 2:3) betydelse för den maximala inträngningen (ekvation 2:2). Försöken har gjorts i sex olika rörmodeller. Rörmodellerna (1-4) består av två parallella rörsystem; ett med varierande radie (a) och ett med konstant radie (b), se figur 3.1.



**Figur 3.1** Principskiss över rörmodellerna 1 - 4.  
*General arrangement of the first four tube set-ups.*

Rörmodellerna (5-6) består av två parallella system, där rören grenar ut till två rör i varje system, se figur 3.2. Inträngningen i förgreningarna (a, b, c och d) har registrerats.

Flödet i försöksmodellerna har registrerats kontinuerligt så att en jämförelse kan göras, dels mellan rören, dels mellan beräknad och registrerad inträngning.



Figur 3.2 Principskiss över rörmodell 5 och 6.  
*General arrangement of the last two tube set-ups.*

### 3.3.2 Indata

Indata som används i försöksserie II är presenterade i tabell 3.3. Avsikten med de valda radierna är att samma harmoniska medelvärde erhålls i alla rören.

**Tabell 3.3** Indata för försöksserie II, modell 1 – 6  
*Input data in test series II, model 1 - 6*

| Försök | Tryck [kPa] | Radie [mm]      | Flytgräns [Pa]* | Viskositet [mPa s]* |
|--------|-------------|-----------------|-----------------|---------------------|
| 1a     | 70          | 2.0 / 2.5 / 3.0 | 7.0             | 90                  |
| 1b     | 70          | 2.5             | 7.0             | 90                  |
| 2a     | 70          | 2.0 / 2.5 / 3.0 | 7.0             | 90                  |
| 2b     | 70          | 2.5             | 7.0             | 90                  |
| 3a     | 70          | 2.0 / 2.5 / 3.0 | 8.0             | 25                  |
| 3b     | 70          | 2.5             | 8.0             | 25                  |
| 4a     | 70          | 2.0 / 2.5 / 3.0 | 8.0             | 25                  |
| 4b     | 70          | 2.5             | 8.0             | 25                  |
| 5a     | 70          | 2.0 / 2.5 / 3.0 | 9.0             | 90                  |
| 5b     | 70          | 2.5             | 9.0             | 90                  |
| 5c     | 70          | 2.0 / 2.5 / 3.0 | 9.0             | 90                  |
| 5d     | 70          | 2.0 / 2.5 / 3.0 | 9.0             | 90                  |
| 6a     | 70          | 2.0 / 2.5 / 3.0 | 8.0             | 25                  |
| 6b     | 70          | 2.0 / 2.5 / 3.0 | 8.0             | 25                  |
| 6c     | 70          | 2.5             | 8.0             | 25                  |
| 6d     | 70          | 2.5             | 8.0             | 25                  |

\* Sazvar & Zeinali (1993)

### 3.3.3 Resultat

Maximal inträngningslängd som har registrerats och beräknats i försöksserie II är presenterad i tabell 3.4. Tids-inträngningsdiagrammen (II-1, II-2, II-3, II-4 och II-5) för försöken är presenterade i bilaga. Inträngningen i försök 6 under de första 10 sekunderna

har skett mycket hastigt och är inte möjlig att utvärdera. Anledningen till denna hastiga inträngning kan vara att en vattenhinna finns kvar på rörets inneryta.

Inträngningen i försök 1 och 2 upphör helt plötsligt efter ca 40 till 50 min. En orsak kan vara bildning av en torr hinna längst fram på fronten mot den fria luften. Kvoten mellan beräknad maximal inträngning och registrerad gav ett värde mellan 0.96 och 1.15 för försök 3, 4 och 5. Resultaten från försök 5, med fyra förgreningar, visar också att inträngningen i varje enskild förgrening är oberoende av inträngningen i de övriga förgreningarna.

**Tabell 3.4** Resultat för försöksserie II, modell 1 – 5  
*Results from test series, model 1 - 5*

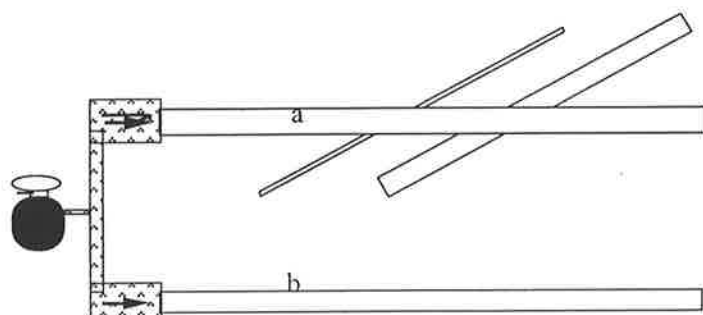
| Försök | Registrerad inträngning [m] | Harmoniska medelradien* [mm] | Beräknad inträngning [m] | Beräknad / Registrerad inträngning |
|--------|-----------------------------|------------------------------|--------------------------|------------------------------------|
| 1a     | 10.0                        | 2.5                          | 12.5                     | 1.25                               |
| 1b     | 10.4                        | 2.5                          | 12.5                     | 1.20                               |
| 2a     | 9.9                         | 2.7                          | 13.5                     | 1.36                               |
| 2b     | 10.4                        | 2.5                          | 12.5                     | 1.20                               |
| 3a     | 10.0                        | 2.5                          | 10.9                     | 1.09                               |
| 3b     | 9.5                         | 2.5                          | 10.9                     | 1.15                               |
| 4a     | 11.4                        | 2.5                          | 10.9                     | 0.96                               |
| 4b     | 10.7                        | 2.5                          | 10.9                     | 1.02                               |
| 5a     | 9.1                         | 2.5                          | 9.7                      | 1.07                               |
| 5b     | 8.9                         | 2.5                          | 9.7                      | 1.09                               |
| 5c     | 9.2                         | 2.5                          | 9.7                      | 1.05                               |
| 5d     | 10.3                        | 2.7                          | 10.5                     | 1.02                               |

\*baserad på registrerad inträngning och ekvation 2:2

### 3.4 Försöksserie III

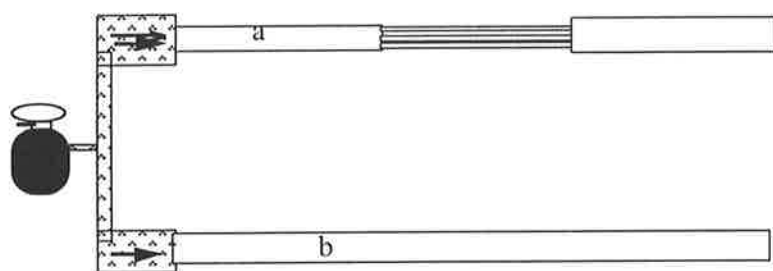
#### 3.4.1 Inledning

Avsikten med försöksserie III är att visa att ekvation 2:2 och 2:6 gäller för strömning i rörmodeller, dels med korsande rör (förgreningarna), dels vid en spridning av försöksrören i ett antal mindre rör. Försöken har gjorts i fyra olika modeller. Den första modellen består av två parallella genomskinliga rör med en konstant radie, se figur 3.3. Röret (a) korsas på två ställen först av ett rör med en mindre radie och sedan av ett rör med en större radie.



Figur 3.3      Principskiss för försök 1.  
*General arrangement of the first set-up*

De tre övriga modellerna (försök 2, 3 och 4) består först av ett 4 m långt rör som delas upp i ett antal mindre rör, efter ytterligare 4 m går de mindre rören ihop till ett rör, se figur 3.4. I försök 2 är summan av rördiametererna för de tre mindre rören ungefär samma som i det större röret. Försök 3 är uppbyggt som försök 2 förutom att uppdelningen sker i fyra mindre rör istället för tre. Försök 4 har samma utseende som 2 men med andra radier.



Figur 3.4      Principskiss för försök 2 - 4.  
*General arrangement of the three set-up (2-4)*

### 3.4.2      Indata

Indata som används i försöksserie III är presenterade i tabell 3.5. Försök 2, 3 och 4 är gjorda i två omgångar, där a och b är omgång ett samt c och d är omgång två.

**Tabell 3.5** Indata för försöksserie III  
*Input data in test series 1 - 4*

| Försök | Tryck [kPa] | Radie [mm]         | Flytgräns [Pa]* | Viskositet [mPa s] |
|--------|-------------|--------------------|-----------------|--------------------|
| 1a     | 65          | 2.75 / 1.5 / 5.0   | 10.0            | 35                 |
| 1b     | 65          | 2.75               | 10.0            | 35                 |
| 2a     | 70          | 3.5 + 3*2.0 + 3.5  | 13.0            | 25                 |
| 2b     | 70          | 3.5                | 13.0            | 25                 |
| 2c     | 60          | 3.5 + 3*2.0 + 3.5  | 13.0            | 30                 |
| 2d     | 60          | 3.5                | 13.0            | 30                 |
| 3a     | 70          | 3.5 + 4*2.0 + 3.5  | 12.0            | 30                 |
| 3b     | 70          | 3.5                | 12.0            | 30                 |
| 3c     | 50          | 3.5 + 4*2.0 + 3.5  | 12.0            | 40                 |
| 3d     | 50          | 3.5                | 12.0            | 40                 |
| 4a     | 35          | 5.0 + 3*2.75 + 5.0 | 12.0            | 45                 |
| 4b     | 35          | 5.0                | 12.0            | 45                 |
| 4c     | 50          | 5.0 + 3*2.75 + 5.0 | 13.0            | 45                 |
| 4d     | 50          | 5.0                | 13.0            | 45                 |

### 3.4.3 Resultat

Försök 1b störcdes av yttre faktorer efter ca 20 minuter. I försök 2, 3 och 4 uppvisar samtliga rör en systematisk störning av inträngningen efter en tid. Inträngningen förväntades att avta med tiden men efter 15 till 30 minuter en konstant eller accelererande hastighet. Försöken utfördes under en och samma månad och skilt från övriga försök. Anledningen till denna systematiska störning kan vara : (i) utrustningsfel såsom att expansionskärlet börjar trycka luft innan medlet i kärlet är slut, eftersom försöken har större rördimensioner än tidigare försök; (ii) blandningen får andra tidsegenskaper under trycket än vad reometern parallellt mäter. Tidigare försöksblandningar har dock inte uppvisat detta, men materialet (silikastoft) tillhör en annan leverans än tidigare försök.

Inträngningen som har registrerats och beräknats i försöksserie III är presenterad i tabell 3.6. Tids-inträngningsdiagrammen för försöken är presenterade i bilaga. Redovisade resultat i tabell 3.6 är registrerad inträngning fram till den systematiska störningen. I diagrammen har hela försöket redovisats inklusive störningen. Kvoten mellan beräknad maximal inträngning och registrerad gav ett värde mellan 0.94 och 1.11.

I försök 1a, med korsande rör (3 och 10 mm), har inträngningen registrerats i de korsande rören och beräknats. Kvoten mellan beräknad maximal inträngning och registrerad gav en bra överensstämmelse, 1.02 för båda rören. Jämförelse mellan försök 2 och 3 visar att antalet rörförgreningar inte har någon betydelse för maximal inträngning. Jämförelse mellan rören visar även att sluttrycket i förgreningarna är oberoende av grenarnas utseende.

**Tabell 3.6** Resultat för försöksserie III, modell 1 – 4  
*Results from test series, model 1 - 4*

| Försök | Registrerad inträngning [m] | Harmoniska medelradien* [mm] | Beräknad inträngning [m] | Beräknad / Registrerad inträngning |
|--------|-----------------------------|------------------------------|--------------------------|------------------------------------|
| 1a     | 9.3                         | 2.75                         | 8.9                      | 0.96                               |
| 1b     | -                           | 2.75                         | 8.9                      | -                                  |
| 2a     | 7.6 **                      | 2.65                         | 7.1                      | 0.94                               |
| 2b     | 9.6**                       | 3.5                          | 9.4                      | 0.98                               |
| 2c     | 6.2 **                      | 2.8                          | 6.5                      | 1.05                               |
| 2d     | 7.3 **                      | 3.5                          | 8.1                      | 1.11                               |
| 3a     | 7.9 **                      | 2.55                         | 7.4                      | 0.94                               |
| 3b     | 10.2 **                     | 3.5                          | 10.2                     | 1.00                               |
| 3c     | 5.9 **                      | 2.8                          | 5.8                      | 0.98                               |
| 3d     | 6.6 **                      | 3.5                          | 7.3                      | 1.11                               |
| 4a     | 5.6 **                      | 4.1                          | 6.0                      | 1.07                               |
| 4b     | 6.8 **                      | 5.0                          | 7.3                      | 1.07                               |
| 4c     | 7.0 **                      | 3.7                          | 7.1                      | 1.01                               |
| 4d     | 9.5 **                      | 5.0                          | 9.6                      | 1.01                               |

\* baserad på registrerad inträngning och ekvation 2:2

\*\* inträngningen till störningen

### 3.5 Diskussion och slutsatser

Av totalt 28 st försök har 16 st störts efter en tid. Antingen har försöket stannat plötsligt eller så har förloppet accelereras av okänd anledning. Störningarna har skett när huvuddelen av inträngningen är gjord, dvs förloppet har börjat att plana ut. Utvärderingen av de störda försöken har därför baserats på inträngningen och förloppet fram till störningen. Följande slutsatser har framkommit från samtliga försök :

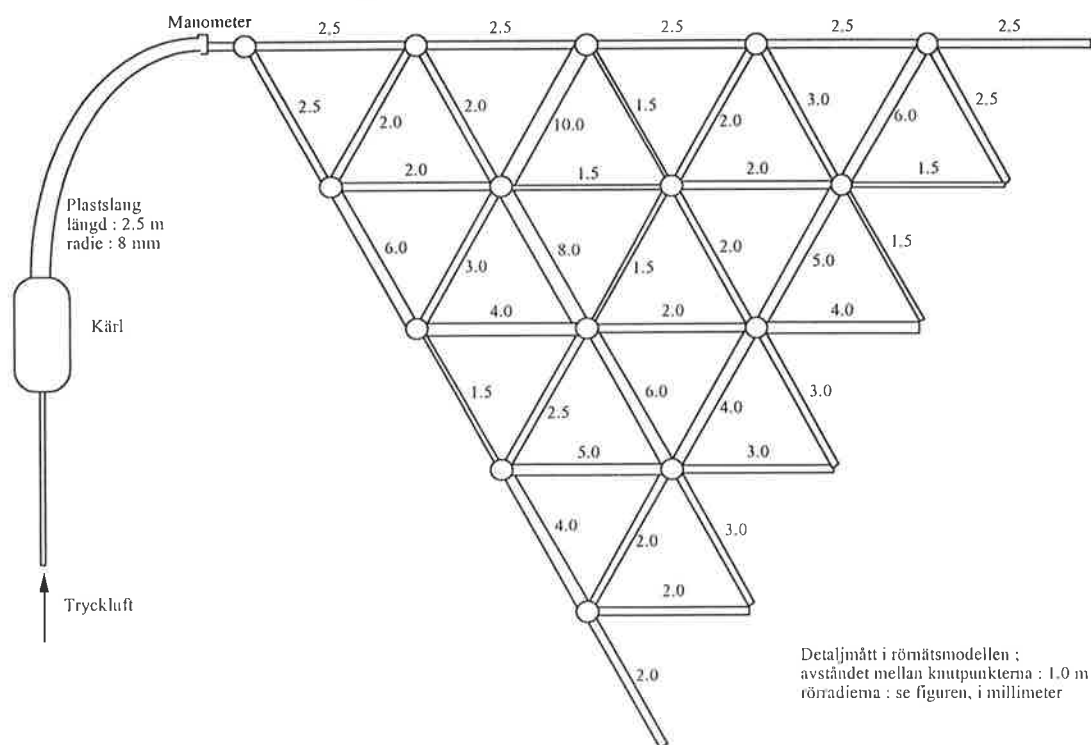
- $I_{\max}$  kan bestämmas (ekvation 6:1) om injekteringstryck, medel och radien är kända.
- Vid varierande radie är det den harmoniska medelradien som bestämmer  $I_{\max}$ .
- Den beräknade  $I_{\max}$  är oftast något längre än registrerad från samtliga försök, är 1.06 med en standardavvikelse på 0.10 och medianvärde på 1.05.
- Inträngningsförloppet följer i princip ekvation 6:6. Detta innebär bland annat att inträngningen planar ut långt innan  $I_{\max}$  uppnås.
- Försöken bekräftar att maximal inträngning av injekteringsmedel i en förgrening är oberoende av övriga förgreningar oavsett radie och antalet förgreningar.

Försöken bekräftar hur väsentlig kännedomen om fördelningen av radien hos varje rörförgrening är, för att bestämma inträngningen längs hela förgreningen. Inträngningen kan inte förutsägas enbart utgående från det initiala inträngningsförloppet, utan radiefördelningen längs hela rörförgreningen måste vara känd för att förutsäga hela inträngningsförloppet.

## 4. FÖRSÖK I RÖRNÄTSMODELL

### 4.1 Allmänt

Syftet med försöken var att testa beräkningsmodellerna i en laboriemodell. I laborieförsöken är geometrin känd och samtliga faktorer i volymsuttrycken kan bestämmas såsom injekteringstrycket, medlets flytgräns, laborationsmodellens transmissivitet och de geometriska parametrarna. En laborieuppställning har byggts. I de olika försöken har injekteringstryck och medlets flytgräns varierats. Bakgrunden till laboriemodellens utseende är att den kan beskrivas som en sjättedels plan med utpräglat kanalsystem. I kanalsystemet, som beskrivs som ett rörnätsmönster, sker all vätsketransport. Rören har varierande radier. Rören sammanbinds av knutpunkter, se figur 4.1. Rördelarna strömningsvägar motsvarar 2,5 % av diskens yta, vilket kan jämföras med resultat från undersökningar i sprickor som ger att strömningsvägarnas yta motsvarar 5-25 % av sprickans totala yta. Rörradierna och förhållandet mellan de olika rören har valts utgående från erfarenheter från de tidigare utförda enkla rörförsöken och resultat från strömningsstudier av sprickor (se Janson, 1996). Detta innebär bland annat att rörradierna i laborationsmodellen har valts med en skev fördelning och att i laborationsmodellen finns dominerande strömningsvägar.



Figur 4.1 Skiss över rörnätsmodellen.  
*Physical model for grouting in a tube network*

Innan försöken börjar har vattentester utförts i rörnätsmodellen vid olika tryck. Efter vattentesterna har rören torkats och därefter har inträngningsförsöken med

injekteringsmedel startat, där inträngning har registrerats. Anledningen till att rören är torra när inträngningsförsöken startar är att i inledande provning med injekteringsmedel (silikastoft) och vattenfyllda rör uppnåddes inte någon "kontakt" mellan medlet och rörytan. Någon djupare studie av orsaken till detta har inte gjorts, men en trolig orsak kan vara att sand-blästringen i rören ger en jämn rå yta där vattenhinnan stannar kvar när injekteringsmedlet (silikastoft) trycks genom rören.

## 4.2 Förväntad maximal inträngning

Det förväntade inträngningsstoppet i rörnätsmodellen beräknas med hjälp av uttrycket för maximal inträngning, se avsnitt 2.2. Den förväntade medelinträngningen i modellen görs med hjälp av ekvation 2:2, tryck och flytgräns enligt tabell 4.1 och med modellens harmoniska medelradien 2.5 mm.

**Tabell 4.1** Tryck och flytgräns för testerna och beräknat medel inträngningsstopp.  
*Pressure, yield value and calculated mean penetration*

| Tryck $\Delta P$ [kPa] | Flytgräns $\tau$ [Pa] | Medel inträngningsstopp [m] |
|------------------------|-----------------------|-----------------------------|
| 31                     | 11                    | 3.52                        |
| 17                     | 8                     | 2.66                        |
| 33                     | 15                    | 2.75                        |
| 34                     | 13                    | 3.27                        |

## 4.3 Förväntad inträngningsvolym

Den förväntade inträngningsvolymen i nätmodellen har beräknats utgående från de beskrivna beräkningsmodellerna i avsnitt 2.3 - 2.5, enligt ekvationerna 2:11, 2:15 och 2:20, och omskrivs enligt följande :

$$V_I = \left( \frac{\Delta P}{2 \tau_0} \right)^2 \cdot b_I^3 \cdot \pi \cdot \frac{1}{6} \quad (4.1)$$

$$V_{II} = \left( \frac{\Delta P}{2 \tau_0} \right)^2 \cdot b_{II}^3 \cdot \frac{\alpha}{2} \cdot \frac{1}{6} \quad (4.2)$$

$$V_{III} = \left( \frac{\Delta P}{2 \tau_0} \right)^2 \cdot \frac{b_g^2 \cdot \bar{b}}{\lambda^2} \cdot \pi \cdot \frac{1}{6} \quad (4.3)$$

där  $b_I$  och  $b_{II}$  baseras på resultat från vattentesten i rörnätsmodellen och  $\alpha$ ,  $b_g$ ,  $\bar{b}$  och  $\lambda$  på fördelningen av rörradie och nätmönster i nätmodellen. Trycket  $\Delta P$  och flytgränsen  $\tau_0$  varierar mellan de olika försöken, se tabell 4.3. Det förväntade inträngningsstoppet i varje nätgren har beräknats, se avsnitt 4.2. Baserat på den förväntade inträngningen har ytterligare en förväntad inträngningsvolym ( $V_{IV}$ ) beräknats, utgående från rörmodellens mönster och geometri.

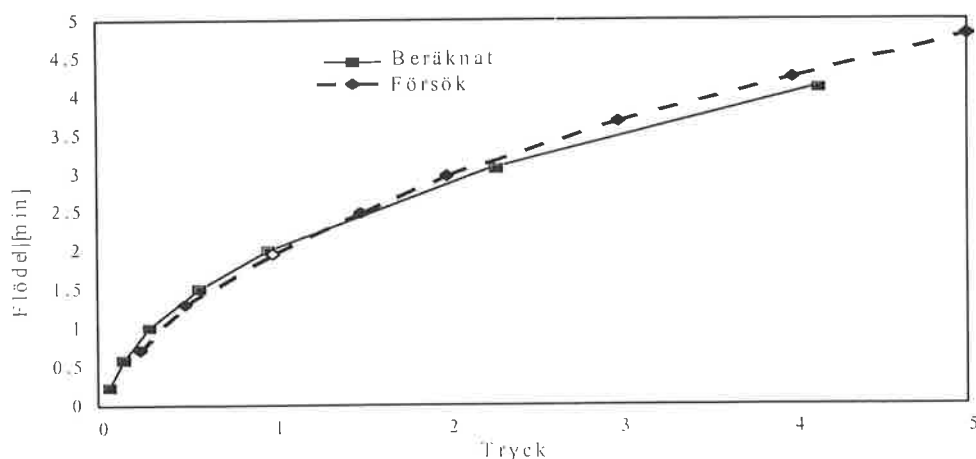
### 4.3.1 Indata

I vattentesterna uppmätts flödet ut ur rörmodellen vid känt vattentryck. Avsikten med vattentesterna är att erhålla indata till sprickplansmodellerna. Tryck och flöde från vattentesterna redovisas i tabell 4.2. I tabellen redovisas även beräkning av Reynolds tal (Vennard & Street, 1982) och transmissiviteten baserad på uppmätt tryck och flöde. Reynolds tal varierar över rörnätsmodellen och beror av var beräkningssnittet görs. Med vattentrycket 0,25 m och 0,5 m klaras det allmänna villkoret för laminär strömning ( $Re < 2000$ ) och därmed villkoret för att beräkna transmissiviteten. Transmissiviteten har beräknats enligt ekvation 2:10a och med en sjättedels disk.

**Tabell 4.2.** Tryck, flöde, Reynolds tal och transmissivitet från vattentesterna.  
*Pressure, flow, Reynolds value and transmissivity from the hydraulic test.*

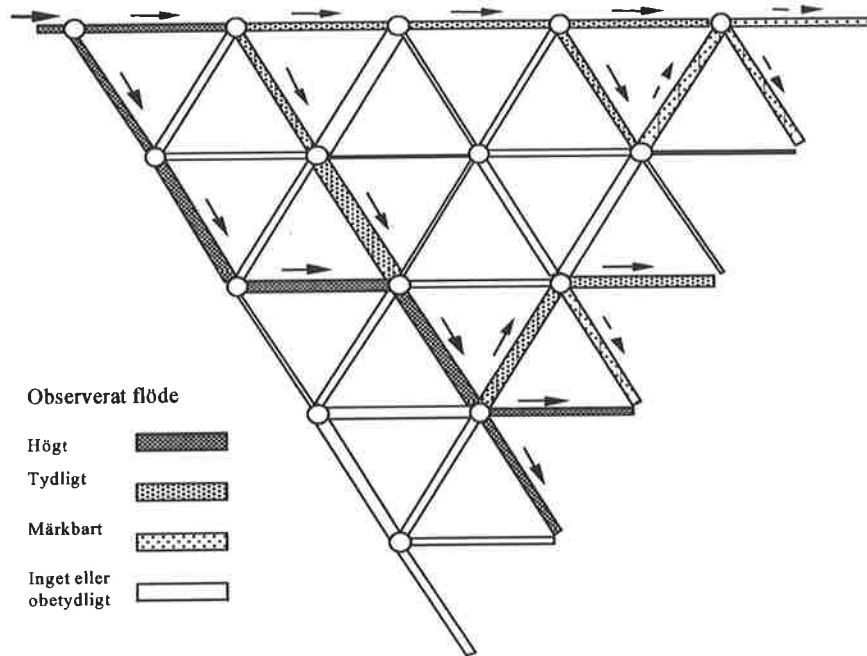
| Tryck [m] | Flöde [liter/min] | Reynolds tal ( $Re=U \cdot D \cdot \rho / \mu$ ) | Transmissivitet [ $m^2/s$ ] |
|-----------|-------------------|--------------------------------------------------|-----------------------------|
| 0,25      | 0,71              | 230 - 1160                                       | $3,44 \cdot 10^{-4}$        |
| 0,5       | 1,31              | 430 - 2140                                       | $3,17 \cdot 10^{-4}$        |
| 1,0       | 1,97              | 640 - 3320                                       | -                           |
| 1,5       | 2,48              | 810 - 4050                                       | -                           |
| 2,0       | 2,97              | 970 - 4850                                       | -                           |
| 3,0       | 3,70              | 1210 - 6040                                      | -                           |
| 4,0       | 4,25              | 1390 - 6940                                      | -                           |
| 5,0       | 4,80              | 1570 - 7830                                      | -                           |

Kurvan för uppmätt vattentryck och -flöde redovisas i figur 4.2. Tolkningen av testresultaten i figur 4.2 visar att rörnätsmodellen motsvarar en större öppen spricka med turbulent strömning. Ett nära linjärt förhållande (laminär strömning) mellan flödet och trycket finns i figuren vid trycket mindre än 0,5 m. En beräkning av tryck-flöde, baserad på lika in- och utflöde i knutpunkterna och allmänna friktionsformeln, Darcy-Weisbachs ekvation, (Cederwall & Larsen, 1981) har jämförts med uppmätt tryck-flöde. Beräkningarna har gjorts med hjälp av Hardy-Cross metod (Vennard & Street, 1982), och är även redovisade i figur 4.2. Jämförelsen mellan uppmätt och beräknat värde ger en godtagbar överensstämmelse.



**Figur 4.2** Uppmätt och beräknad tryck-flödeskurva för vattentestet.  
*Measured and calculated pressure and flow for the hydraulic test*

Vidare har färgimpulser gjorts i rörnätsmodellen för att studera de huvudsakliga flödesvägarna för vattnet. Impulsen tillfördes vid stationärt flöde, med hjälp av ett färgämne som injicerades i röret före första knutpunkten. Resultatet från färgimpulsen, figur 4.3, visar tydligt att huvudströmningen följer de största rörradierna i kombination med de större tryckgradienterna. Efter att huvudströmningsvägarna är kända har tryckförlusterna, på grund av sektionsförändringar och förgreningar i rörmodellen, beräknats. Förlusterna för tryckhöjden 0.25 m har beräknats till 0.018 m (7 % av den totala tryckhöjden). Vid beräkning av förväntad inträngningsvolym har indata för de geometriska förhållandena baserats på hela rörnätsmodellen.



Figur 4.3 Resultat från färgimpulserna, där huvudvägarna för flödet är markerade.  
Results of colour test. The main flow paths are marked.

Kanalöppningen  $b_g$  är ekvivalent med den harmoniska medelradien  $r_{hm}$ , för rörnätsmodellens radier, vilket ger att :

$$b_g = 2,50 \text{ mm}$$

Medelspricköppningen  $\bar{b}$  för rörnätsmodellen är beräknad som kvoten mellan totala rörvolymen och ytarean i modellen, vilket ger att :

$$\bar{b} = 0,18 \text{ mm}$$

Krokighetsparametern  $\lambda$  bestäms med hjälp av rörnätsmodellens mönster. Parametern beräknas som medelvärdet av kvoten mellan rörlängd och radiell längd från första knutpunkten till övriga knutpunkter, längs de mest troliga flödesvägarna, vilket ger att :

$$\lambda = 1,05$$

Sektionsvinkeln  $\alpha$  bestäms med hjälp av rörnätsmodellens spridningsmönster och rördiametrarna. Vinkeln är beräknad som arctan för kvoten mellan summan av

rördiametrarna ut från knutpunktssnittet och avståndet till knutpunktssnittet. Vinkeln multipliceras med sex för att få hela diskens sektionsvinkel, vilket ger att :

$$\alpha = 7,8^\circ (0,14 \text{ rad})$$

Med hjälp av vattentestet, med trycket 0.25 m minus förlusterna, beräknas  $b_I$  och  $b_{II}$  enligt avsnitt 2.3 och 2.4, där  $b_I$  antas vara lika med  $b_{hyd}$ . För beräkning av  $b_{II}$  antas  $L$  respektive  $W$  vara 5 m respektive 4,4 mm, vilket ger att :

$$b_I = 0,84 \text{ mm}$$

$$b_{II} = 2,59 \text{ mm}$$

#### 4.3.2 Beräknad volym

I tabell 4.3 redovisas beräknad inträngningsvolym, enligt ovanstående samband och indata, för de olika tryck och flytgränser som användes i försöken.

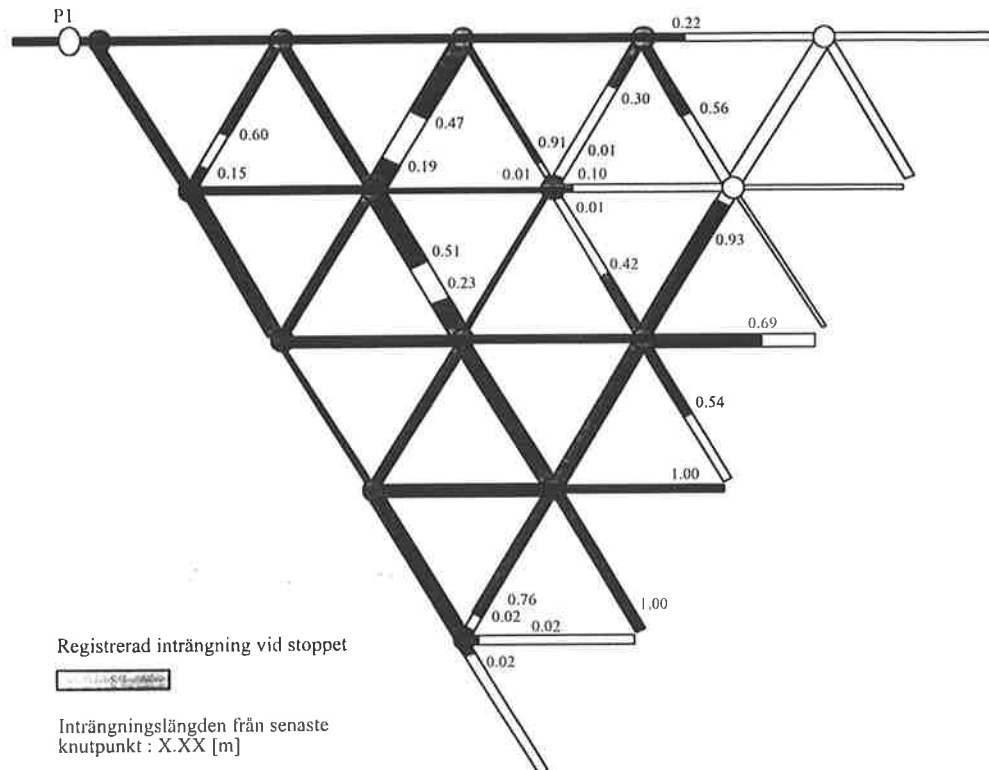
**Tabell 4.3** Beräknad volym  
*Calculated volume*

| Tryck P [kPa] | Flytgräns $\tau_o$ [Pa] | VI [liter] | VII [liter] | VIII [liter] | VIV [liter] |
|---------------|-------------------------|------------|-------------|--------------|-------------|
| 31            | 11                      | 0,60       | 0,40        | 1,06         | 1,37        |
| 17            | 8                       | 0,35       | 0,23        | 0,60         | 1,03        |
| 33            | 15                      | 0,37       | 0,24        | 0,65         | 1,06        |
| 34            | 13                      | 0,52       | 0,35        | 0,91         | 1,28        |

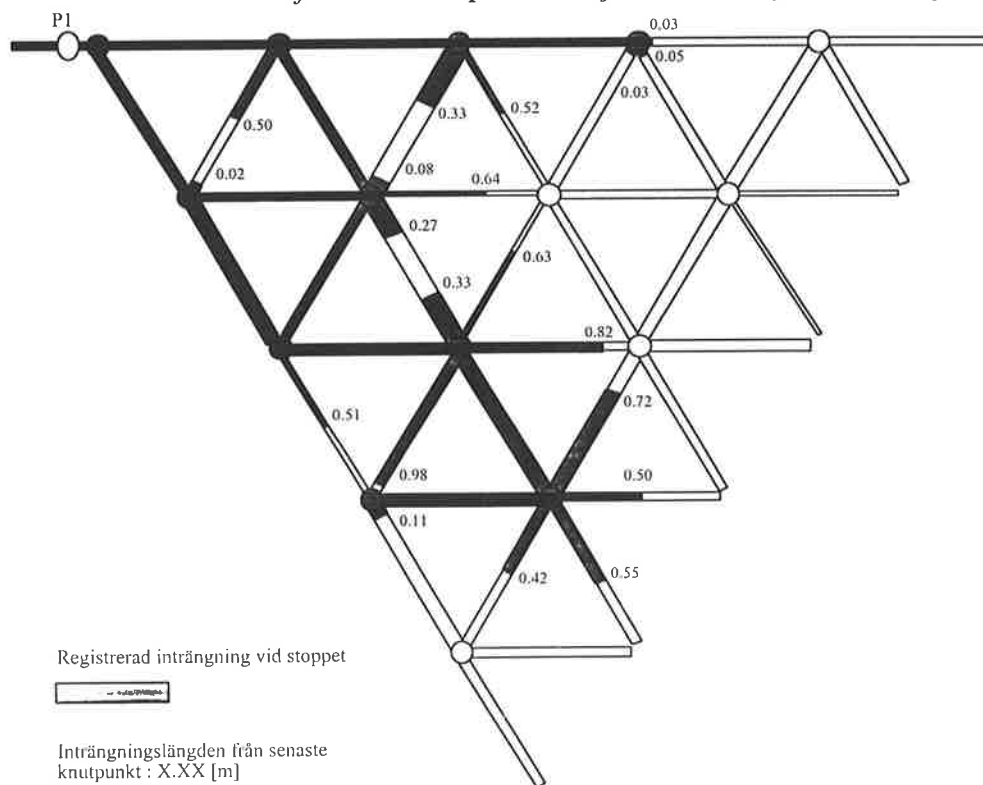
## 4.4 Resultat

Sju försök i rörnätsmodellen är gjorda. Av dessa sju försök är fyra användbara vid jämförelse med förväntad inträngningsvolym. Orsaken till att de övriga tre är oanvändbara vid jämförelsen är att två av försöken avstannade kort (cirka en minut) efter försökets start och att ett försök genomfördes med ett för högt tryck (55 kPa). De avstannade försöken berodde troligtvis på pluggbildning i medlet vid sektionsminskningen mellan tillförselslangen och rörnätsmodellen (i det ena försöket syntes en luftficka strax efter sektionsminskningen). Vid försöket med för högt tryck, vilket berodde på trasig tryckmanometer, flödade medlet efter en stund (7 - 8 minuter) ut ur nätmodellen och inget inträngningsstopp uppnåddes. Övriga fyra försök som uppnådde ett inträngningsstopp är redovisade i figur 4.4 - 4.7.

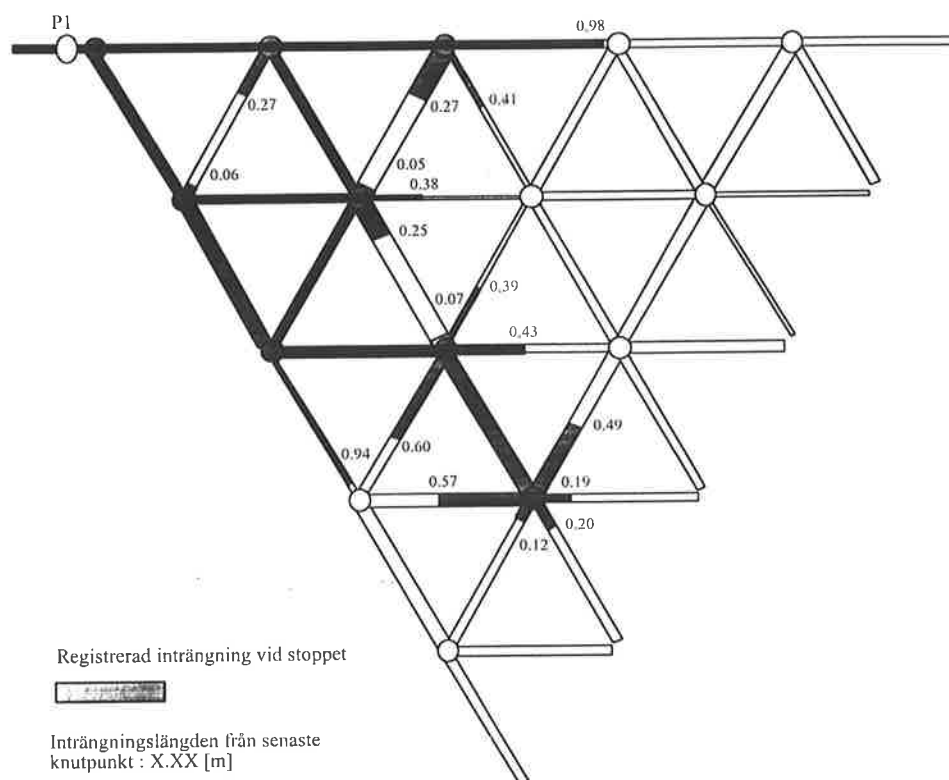
Från inträngningsresultaten uppmättes den injekterade volymen. I rören mellan knutpunkterna 2 - 6, 3 - 7 och 7 - 11 uppstod en luftficka. Detta på grund av att trycket i rören inte kan utjämnas mellan två isolerade injekteringsfronter i ett rör, vilket gjorde att rören inte fylldes ut helt. I sista försöket ( $\Delta P = 34 \text{ kPa}$  och  $\tau_o = 13$ ) har en luftning gjorts mitt i de lufttrycksfyllda rören och därmed har inträngningen blivit större, förbi luftningen. Vid uppmätningen av injekterad volym har luftfickorna antagits vara fyllda, vilket motiveras med att det i praktiken antas finnas utrymningsvägar för den instängda luften att utjämnas i.



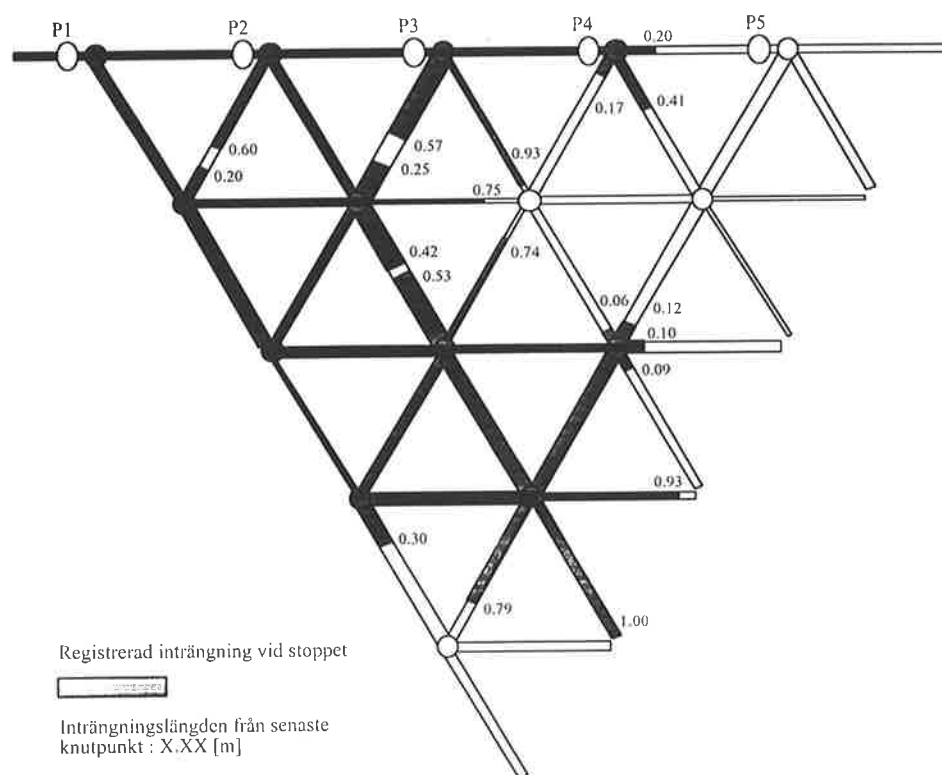
Figur 4.4 Resultat från försöken, tryck 31 kPa och flytgräns 11 Pa.  
*Results of the test at a pressure of 31 kPa and yield value of 11 kPa.*



Figur 4.5 Resultat från försöken, tryck 17 kPa och flytgräns 8 Pa.  
*Results of the test at a pressure of 17 kPa and yield value of 8 kPa.*



Figur 4.6 Resultat från försöken, tryck 33 kPa och flytgräns 15 Pa.  
*Results of the test at a pressure of 33 kPa and yield value of 15 kPa.*



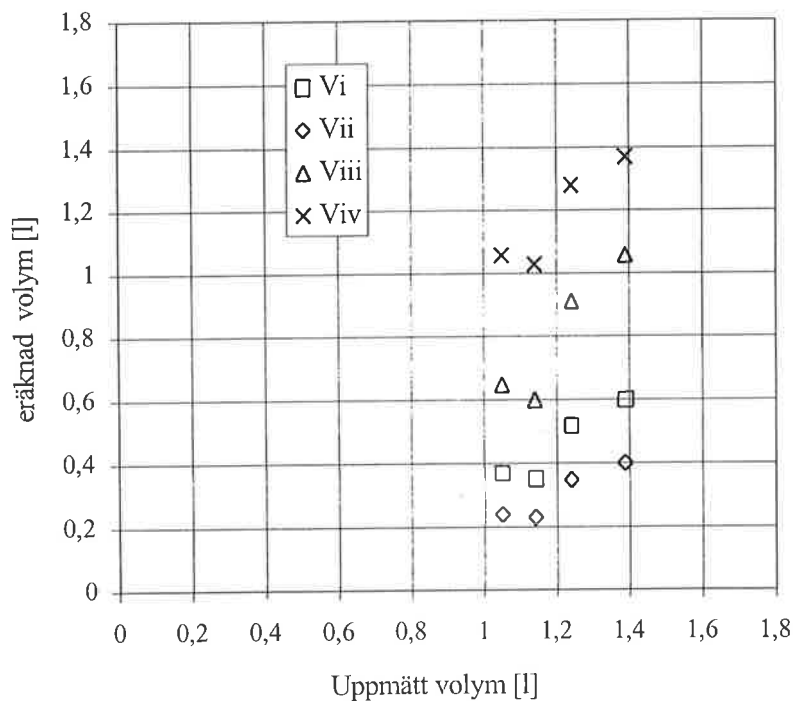
Figur 4.7 Resultat från försöken, tryck 34 kPa och flytgräns 13 Pa.  
*Results of the test at a pressure of 34 kPa and yield value of 13 kPa.*

I tabell 4.4 redovisas den uppmätta volymen.

**Tabell 4.4** Injekterad volym  
*Grouted volume*

| Tryck P [kPa] | Flytgräns $\tau_0$ [Pa] | V [liter] |
|---------------|-------------------------|-----------|
| 31            | 11                      | 1.39      |
| 17            | 8                       | 1.14      |
| 33            | 15                      | 1.05      |
| 34            | 13                      | 1.24      |

Förhållandet mellan beräknad och uppmätt volym är uppritad i figur 4.8.



Figur. 4.8 Jämförelse mellan beräknad och uppmätt injekterad volym.  
*Comparison between calculated and measured volume.*

## 4.5 Diskussion av resultatet

Samtliga beräknade volymer är av samma storleksordning som uppmätta volymer. Skillnaden mellan uppmätta och beräknade volymer är dock tydlig. Volymerna  $V_I$  och  $V_{II}$  är klart mindre än uppmätt volym. De beräknade värden på  $V_{III}$  är betydligt bättre än  $V_I$  och  $V_{II}$  men mindre än uppmätt. Beräknad volym  $V_{IV}$ , som baseras på inträngningsstoppet, har

en bra överensstämmelse, vilket var förväntat eftersom tidigare försök (kapitel 3) gav bra överensstämmelse.

De lägre värdena på den beräknade volymen ( $V_I$ ,  $V_{II}$  och  $V_{III}$ ) var inte förväntade eftersom tidigare jämförelser mellan beräknad och i fält uppmätt volym inte uppvisar samma tydliga skillnad, se Janson, 1996. En orsak till de mindre värdena ( $V_I$  och  $V_{II}$ ) kan beror på vattentesterna som ger små indatavärden (transmissiviteten). Villkoret för laminär flöde i råa sprickor kan vara så lågt som  $Re < 300$ , enligt Gustafson (1986). Vidare poängterar Rehnbinders (1991) att en avvikelse från Darcy's lag, vilken transmissiviteten baseras på, kan ske vid ännu lägre Reynolds tal. Den teoretiska transmissiviteten för nätmodellen, vid låga Reynolds tal enligt figur 4.2, ger ca 50 % större volymer för  $V_I$  och  $V_{II}$  än de volymer som beräknas utgående från transmissiviteten från vattentesterna.

Sprickplansmodellerna ( $V_I$ ,  $V_{II}$  och  $V_{III}$ ) är baserade på tre huvudfaktorer nämligen : injekteringsteknik ( $\Delta P$  och  $\tau_o$ ), transmissivitet ( $T$ ) och geologisk beskrivning av berget. Laboratorieförsöken med enkla rörgeometrier verifierar sambandet för maximal inträngning, som är direkt kopplat till injekteringstekniken. Huvudfaktorerna transmissiviteten och geologin beskriver den geometri som injekteringen sker i. Genom att normalisera volymerna mot tekniken ( $\Delta P$  och  $\tau_o$ ), dvs :

$$V_{i,norm} = V_i / \left( \Delta P / 2 \cdot \tau_o \right)^2$$

kan ett test göras av den geometriska beskrivningen. I tabell 4.5 redovisas de normaliserade volymerna.

**Tabell 4.5** Normaliserad volym  
*Normalised volume*

| $(\Delta P / 2 \cdot \tau_o)^2$ | $V_{I,norm}$<br>[liter] | $V_{II,norm}$<br>[liter] | $V_{III,norm}$<br>[liter] | $V_{uppmätt,norm}$<br>[liter] |
|---------------------------------|-------------------------|--------------------------|---------------------------|-------------------------------|
| $2,0 \cdot 10^6$                | 0,30                    | 0,20                     | 0,53                      | 0,70                          |
| $1,14 \cdot 10^6$               | 0,31                    | 0,20                     | 0,53                      | 1,01                          |
| $1,20 \cdot 10^6$               | 0,31                    | 0,20                     | 0,54                      | 0,87                          |
| $1,72 \cdot 10^6$               | 0,30                    | 0,20                     | 0,53                      | 0,73                          |

En större inträngning fås när trycket är högt och flytgränsen låg, vilket innebär att när huvudfaktorn  $(\Delta P / 2 \cdot \tau_o)^2$  ökar fås en stor inträngning. En bättre överensstämmelse mellan uppmätt och beräknad volym fås ju större inträngningen är.

Förklaringar till detta framkommer vid en jämförelse mellan rörradiefördelningen vid den längsta och minsta inträngningen av försöken. Jämförelsen visar att den längsta inträngningen har mätts vid en rörfördelning lik hela rörnätsmodellens rörfördelning från vilken uppskattningar av parametrar har skett, medan den minsta inträngningen har mätts vid en större variation på rörfördelningen än hos den längsta.

## 4.6 Simulerade rörförsök

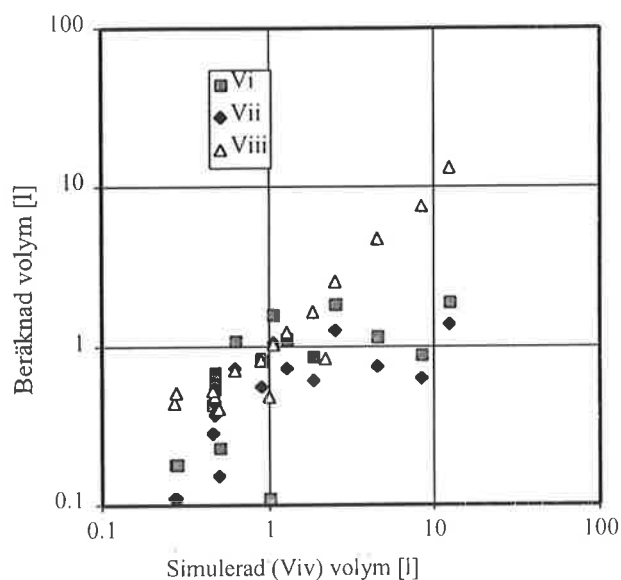
Den maximala inträngningslängden och volymen  $V_{IV}$  kan beräknas med god överensstämmelse med försöken. Simuleringar av rörnätsmodellen med andra rörradier än vid försöken är således möjliga. Volym  $V_{IV}$  kan därmed användas som jämförelse mot  $V_I$ ,  $V_{II}$  och  $V_{III}$  vid simulering av maximal inträngning i varierande försöksupställningar. Totalt arton simuleringar har gjorts, med olika val av rörradier. Indata bestämdes på samma sätt som tidigare. Detaljerad redovisning av de olika rörgeometrierna och indata finns i Janson (1998). Resultat från simuleringarna är redovisade i tabell 4.6. I samtliga simuleringsförsök har trycket och flytgränsen hållits konstant, 30 kPa respektive 10 Pa.

Den simulerade volymen  $V_{IV}$  ökar med ökande standardavvikelse medan beräknad volym  $V_I$  och  $V_{II}$  minskar. Förklaringen till detta är att med ökande standardavvikelse erhålls några få rör med stora radier, som relativt sett ger stora volymer (radien upphöjt till två), men även ett ökande antal rör med små radier som ger fler strypningar av vattenflödet och därmed ett lägre vattenflöde. För den beräknade volymen  $V_{III}$  fås en bättre överensstämmelse med ökande standardavvikelse. Samma simuleringsresultat, att injekteringsvolymen ( $V_{IV}$ ) ökar med ökande standardavvikelse, har även tidigare erhållits av Gustafson & Stille (1996).

**Tabell 4.6** Injekterad volym från simuleringsförsöken  
*Grout volumes from the simulated tests*

| Rörgeometri [mm] | $V_{IV}$ [liter] | $V_I$ [liter] | $V_{II}$ [liter] | $V_{III}$ [liter] |
|------------------|------------------|---------------|------------------|-------------------|
| 1                | 0.47             | 0.67          | 0.43             | 0.53              |
| 2                | 0.47             | 0.56          | 0.36             | 0.47              |
| 3                | 0.91             | 0.83          | 0.55             | 0.81              |
| 4                | 1.88             | 0.86          | 0.60             | 1.64              |
| 5                | 8.49             | 0.89          | 0.61             | 7.52              |
| 6                | 0.27             | 0.33          | 0.20             | 0.44              |
| 7                | 1.08             | 1.57          | 1.04             | 1.01              |
| 8                | 2.54             | 1.84          | 1.27             | 2.55              |
| 9                | 12.45            | 1.89          | 1.35             | 13.30             |
| 10               | 0.28             | 0.36          | 0.22             | 0.50              |
| 11               | 0.63             | 1.08          | 0.71             | 0.70              |
| 12               | 1.28             | 1.11          | 0.71             | 1.23              |
| 13               | 4.60             | 1.14          | 0.74             | 4.77              |
| 14               | 0.46             | 0.42          | 0.28             | 0.52              |
| 15               | 0.50             | 0.23          | 0.15             | 0.40              |
| 16               | 1.00             | 0.11          | 0.07             | 0.48              |
| 17               | 1.36             | 0.06          | 0.04             | 0.63              |
| 18               | 2.22             | 0.09          | 0.07             | 0.84              |

En jämförelse mellan referensvolymen och beräknad volym är redovisad i figur 4.9.



Figur 4.9 Jämförelse mellan  $V_{IV}$  och beräknad volym.  
Comparison of  $V_{IV}$  and calculated volume.

Orsaken till skillnaden är att  $V_I$  och  $V_{II}$  är direkt beroende av resultatet från vattentesterna. Vattenflödet genom rörnätsmodellen begränsas kraftigt av de mindre rörradierna som dominerar i de simulerade modellerna. Simuleringen visar att vattenflödet genom en rörnätsmodell är okänsligt för lokala större rörgeometrier inom modellen. Däremot påverkas injekteringsvolymen väsentligt av extrema geometrier inom ett rörnät.

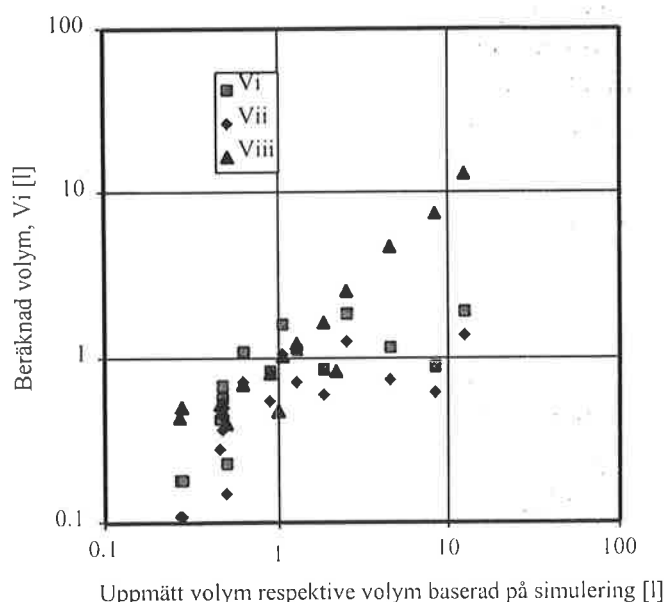
Beräkningsmetod  $V_I$  och  $V_{II}$  erfordrar begränsad indata, i första hand resultat från vattentest, och ger godtagbara resultat vid små spridningar på rörradie och vid större inträngningar. Beräkningsmetod  $V_{III}$  erfordrar mer detaljkänedom om geometrin som skall injekteras men ger också bättre överensstämmelse med uppmätta resultat, speciellt vid stor inträngning av medlet i rörnätsmodellen.

## 5 SLUTSATSER FRÅN LABORATORIEFÖRSÖKEN

Försöksresultaten i enkla rörgeometrier, med konstant eller varierande radie, bekräftar sambanden mellan inträngning, tryck, injekteringsmedel och geometri, vilket även har visats i tidigare försök med andra geometrier (Wittke, 1968, Wallner, 1976, Hässler, 1991 och Börgesson et al, 1992). De enkla rörförsöken visar vidare att maximal inträngning i en rörförgrening är oberoende av övriga rörförgreningar.

Försöken i rörnätsmodellen visar att de tre framtagna sprickplansmodellerna ger olika bra överensstämmelse mellan uppmätt och beräknad volym, modell III ger den bästa överensstämmelsen. Desto större inträngning av injekteringsmedel i rörnätsmodellen ju bättre överensstämmelse. Orsaken till detta är att sprickplansmodellerna inte tar hänsyn till lokala variationen i sprickplanet utan indata är baserad på rörnätsmodellens medelvärden. Detta medför att ju större yta som injekteras, desto mindre betydelse får lokala variationer och sprickplansmodellerna ger en bättre överensstämmelse med uppmätta volymer.

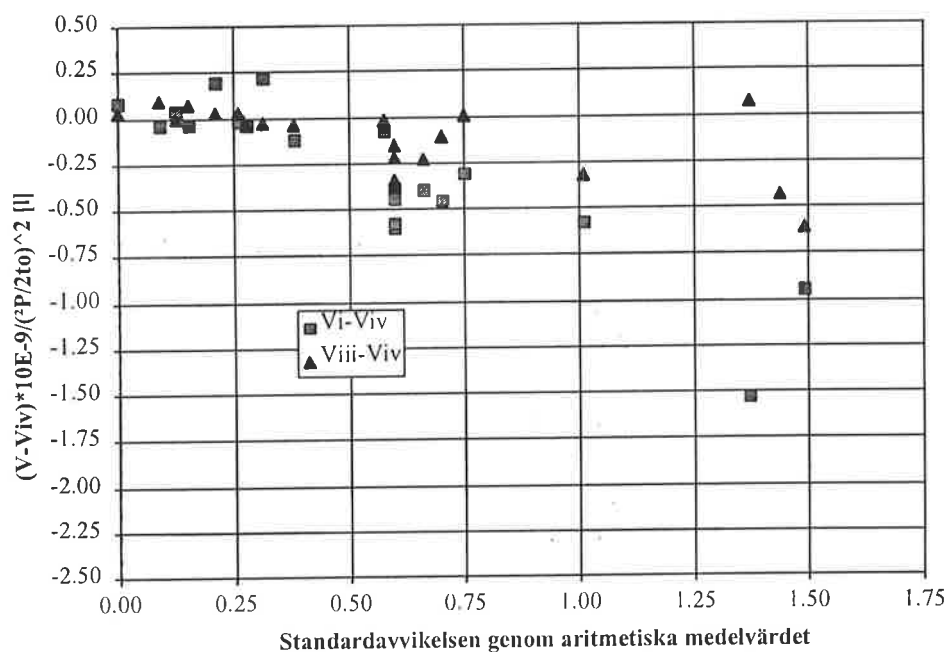
Resultat från de simulerade försöken visar att lokala variationer i rörnätsmodellen påverkar vattenflödet minimalt medan injekteringsvolymen förändras kraftigt, speciellt vid stora variationer.



Figur 5.1 Jämförelse mellan beräknad och uppmätt/simulerad volym  
*Comparison between calculated and simulated or measured volume.*

En jämförelse av alla referensvolymen ( $V_{IV}$ ) och beräknad volym ( $V_I$ ,  $V_{II}$  och  $V_{III}$ ) för både försök och simulerade resultat, är redovisad i figur 5.1. Figuren visar att beräkningsmodell III ger bäst överensstämmelse. Trots att de geologiska parametrarna i modell III är väl kända i rörnätsmodellen finns en skillnad på resultat mellan beräknad ( $V_{III}$ ) och uppmätt volym.

I figur 5.2 redovisas de beräknad volym ( $V_I$  och  $V_{III}$ ) minus ( $V_{IV}$ ), subtraktionen normaliseras genom att dela med faktorn  $(\Delta P / 2 * \tau_o)^2$ , detta jämförs med variationskoefficienten, dvs standardavvikelsen genom det aritmetiska medelvärdet, för rörradierna. Figuren visar att skillnaden mellan beräknad och uppmätt/simulerad volym ökar med ökande värde på variationskoefficienten, vilket innebär att desto större variation på rörradierna ju sämre överensstämmer beräkningsmodellerna med uppmätta volymer.



Figur 5.2 Y-axeln; differensen mellan beräknad ( $V_I$  respektive  $V_{III}$ ) och simulerad volym ( $V_{IV}$ ) som delas med relativa inträngningen  $(\Delta P / 2 * \tau_o)^2$ . X-axel; variationskoefficienten (standardavvikelsen genom aritmetiska medelvärdet) för rörradierna.

*Calculated volume ( $V_I$  and  $V_{III}$ ) minus simulated volume ( $V_{IV}$ ) divided by relative penetration and the coefficient of variation (standard deviation/arithmetic mean)*

## 6. DISKUSSION AV BERÄKNINGSMODELLERNA

### 6.1 Allmänt

Tre modeller för beräkning av injekterad volym har utvecklats. Beräkningsmodellerna har testats i olika fältprojekt och laboratieförsök. Modellerna ger en klar och god bild över de viktigaste faktorerna som styr injekteringsvolymen och hur faktorerna är kopplade till varandra. Faktorerna är injekteringstryck, flytgräns och bergmassans effektiva porositet som uttrycks med en transmissivitet och geometrisk beskrivning (geologiska parametrar). Speciellt viktigt för beräkningsmodellerna är kännedomen om injekteringsbruket.

I samtliga tester har den mest geologisk beskrivande modellen, modell III, givit bäst resultat vid en jämförelse mellan de tre modellerna. Detta visar hur viktig kännedomen om bergmassans geometriska förutsättningar är för att kunna förutsäga injekteringsbrukets inträngning.

Beräkningsmodellernas användbarhet är starkt kopplad till injekteringsbrukets egenskaper. Bruket skall vara separationsstabil så att inträngningsstoppet beror på brukets flytgräns och ej på någon filterplugg. Flytgränsen skall vara större än cirka 1 Pa, vid lägre flytgränsvärden finns en materialmodell- och mätosäkerhet. Beräkningsmodellerna är baserade på ett medelvärdessynsätt, vilket innebär att variationer i exempelvis bergmassans geometri inte beskrivs i modellerna. Medelvärdessynen innebär vidare att beräkningar av volymen för en serie hål kan uppskattas, men ej volymen för enstaka hål.

Injekteringen utförs normalt för att uppnå ett täthetskrav, där målet är att skapa en tätande skärm så att täthetskravet uppfylls. Täthetskravet anges oftast med en maximalt tillåten inläckning  $Q_{\max}$ . Täthetskravet skall uppnås med hjälp av en tillräcklig inträngningslängd, penetrering och utfyllnad av bruket i sprickorna. Detta ger en minsta erforderlig injekterad volym, täthetsvolym. Med beräkningsmodellerna kan injekterad volym uppskattas, som en funktion av injekteringstryck och bruksegenskaper. Den injekterade volymen skall vara lika stor eller större än täthetsvolymen.

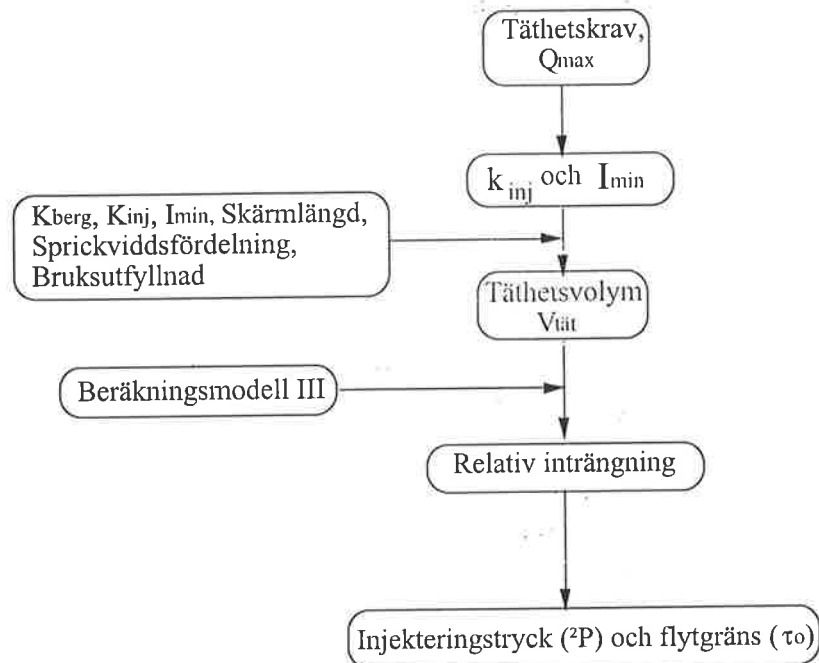
En systematisk arbetsgång för injektering föreslås baseras på modell II, enligt följande :

I : Från den maximala inläckningen ( $Q_{\max}$ ) kan skärmens utbredning ( $I_{\min}$ ) och maximala konduktivitet ( $k_{inj}$ ) bestämmas. Även praktiska faktorer, såsom bultlängd och skadezon från sprängning, påverkar bestämningen av skärmens utbredning.

II : Därefter uppskattas den erforderliga täthetsvolymen ( $V_{tät}$ ) med hjälp av skärmens konduktivitet och utbredning, bergets konduktivitet, skärmlängd, sprickviddsfördelning och brukets utfyllnadsgrad. Konduktiviteter och sprickviddsfördelning ger en porositet, som tillsammans med utbredningen, skärmlängd och bruksutfyllnad ger en täthetsvolym.

III : Från den erforderliga täthetsvolymen bestäms den relativa inträngningen, med hjälp av beräkningsmodell III. Den relativa inträngningen definieras som kvoten mellan injekteringstrycket och brukets flytgräns.

IV : När den relativa inträngningen har bestämts kan lämpligt injekteringstryck och flytgräns bestämmas för injekteringssituationen. Detta förutsätter dock att bruket tränger in i sprickorna tills ett injekteringsstopp fås med hjälp av brukets flytgräns, dvs att varken ett filtreringsstopp eller sprickbegränsningstopp erhålls.



Figur 6.1 En systematisk arbetsgång för att bestämma injekteringstryck och flytgräns  
*A systematic method to determine the pressure and yield value*

## REFERENSER

- Bergman, S.G.A. Lindman, K. Söderman, P. (1970), Injekteringsmedels inträngning i sand och tunna spalter. BFR-rapport R45 : 1970, Stockholm
- Börgesson, L. Pusch, R. Fredriksson, A. Hökmark, H. Karnland, O. Sanden, T. (1992), Final report of the rock Sealing Project - Sealing of Zones Disturbed by Blasting and Stress Release. Technical Report 92-21, SKB-Stripa Project
- Cederwall, K. Larsen, P. (1981). Hydraulik för väg- och vattenbyggare. Liber Läromedel
- Gustafson, G. (1986), Geohydrologiska förundersökningar i berg. BeFo 84:1/86
- Hansson, P. (1995), Filtration stability of cement grouts for injection of concrete structure. Proc. IABSE Symp. San Francisco 1995, pp 1199 - 1204
- Houlsby, A.C. (1990), Constrution and design of cement grouting, John Wiley and Sons
- Håkansson, U (1994), Injekteringsmedels strömningsegenskaper, SveBeFo-rapport nr 15
- Håkansson, U. Hässler, L. Stille, H. (1991), Mätmetodik för injekteringsmedels reologiska egenskaper. BeFo 241:1/91
- Hässler, L. (1991), Grouting of Rock Simulation and Classification. Department of Soil and Rock Mechanics, Royal Institute of Technology, Stockholm.
- Janson, T. (1993), Injektering i sprickplan - Äspö-tunneln. Avd för Jord- och Bergmekanik, Nr 93/10, KTH, Stockholm
- Janson, T. (1996a), Beräkning av injekterad volym i bergsprickor. SveBeFo-rapport nr 30
- Janson, T. (1996b), Ett injekteringsmedels inträngning i rörmodeller. Avd för Jord- och Bergmekanik, Nr 3025/96, KTH, Stockholm
- Lombardi, G. (1985), The role of cohesion in cement grouting of rock. 15th ICOLD-Congress, Lausanne, Vol. III, pp 235-261
- Lombardi, G. Deere, D. U. (1993), Grouting design and control using the GIN principle. Water Power 1993/3
- Mitchell, J. (1970), In-place treatment of foundation soils. Proc. ASCE Jour. of SMFE, paper 7035, pp 117-152
- Rissler, P. (1978), Determination of the water permeability of jointed rock. Institute for foundation engineering, soil mechanics, rock mechanics and water ways constrution, Aachen, Germany
- Sazvar, A. Zeinali, E. (1993), En Binghamvätskas inträngning i rörmodeller, Inst Jord och Bergmekanik, KTH, nr 93/16, Stockholm
- 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
- Vennard, J. K. Street, R. L. (1982). Elementary fluid mechanics. Wiley and sons

Wallner, M. (1976), Proagation of sedimentation stable cement pastes in jointed rock, Rock Mechanics and Waterways Constrution, University of Achen, Germany

Wittke, W. (1968), Zur Reichweite von Injektion in kluftigem Fels. Felsmechanik und Ingenieurgeologie, Suppl. IV.

Widmann, R. (editor) (1995), Commision on rock grouting, final report. ISRM

## BILAGOR

s. 40 :

**Modellförsök I-1 och 2**

**Modellförsök I-3 och 4**

s. 41 :

**Modellförsök II-1**

**Modellförsök II-2**

**Modellförsök II-3**

s. 42 :

**Modellförsök II-4**

**Modellförsök II-5**

**Modellförsök III-1**

s. 43 :

**Modellförsök III-2,a och b**

**Modellförsök III-2, c och d**

**Modellförsök III-3, a och b**

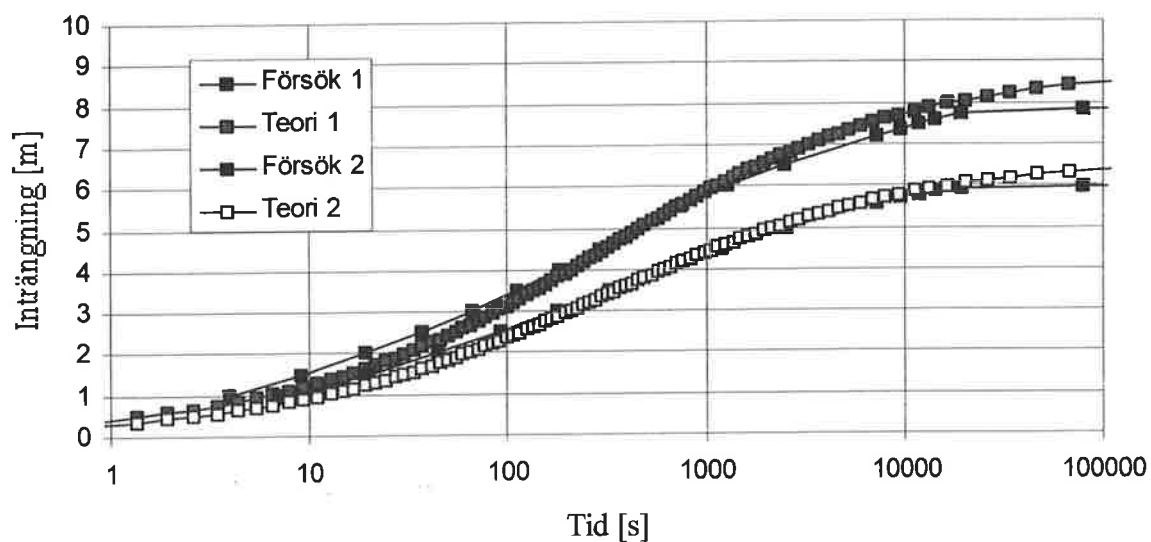
s. 44 :

**Modellförsök III-3, c och d**

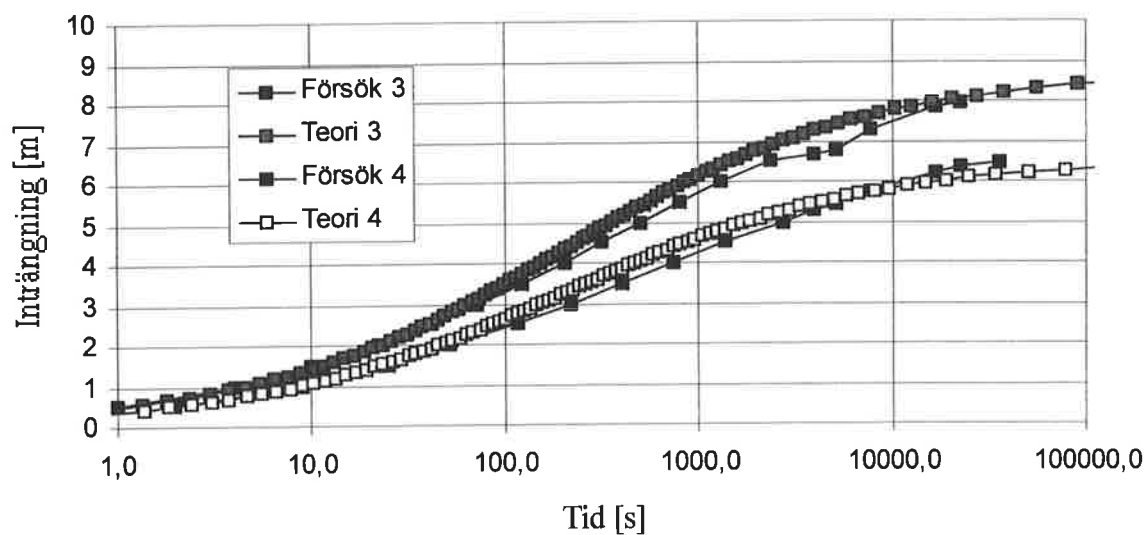
**Modellförsök III-4, a och b**

**Modellförsök III-4, c och d**

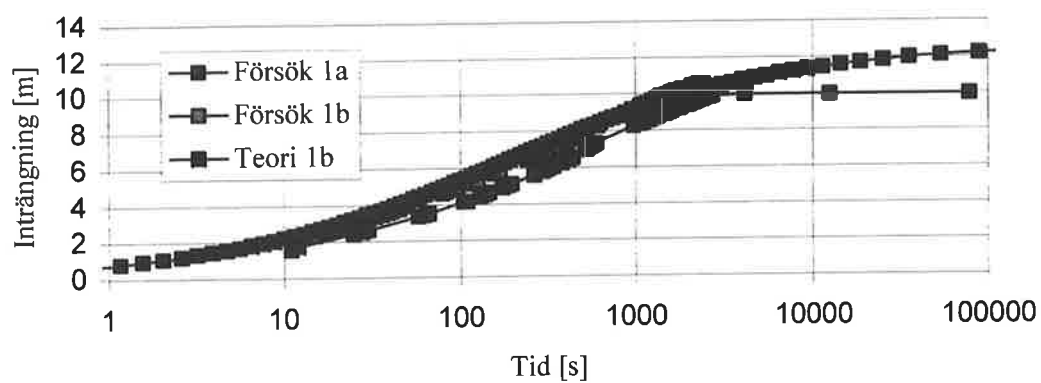
## Modellförsök I - 1 och 2



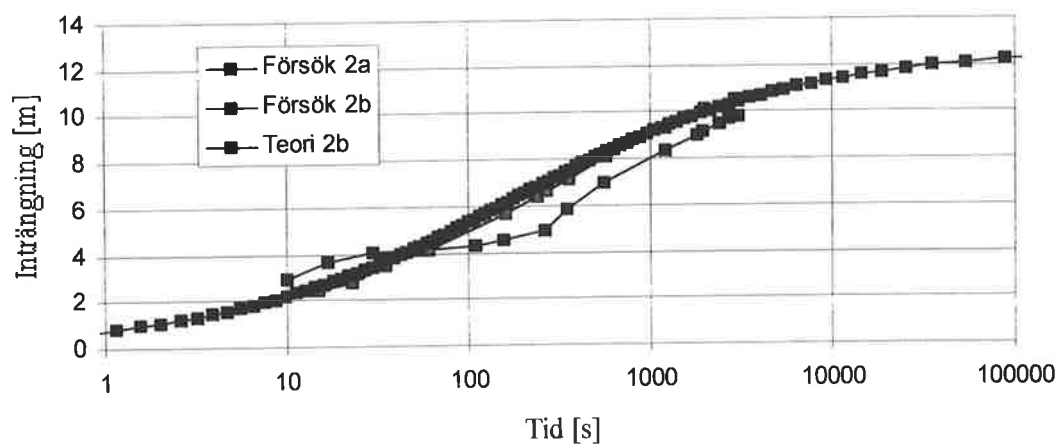
## Modellförsök I - 3 och 4



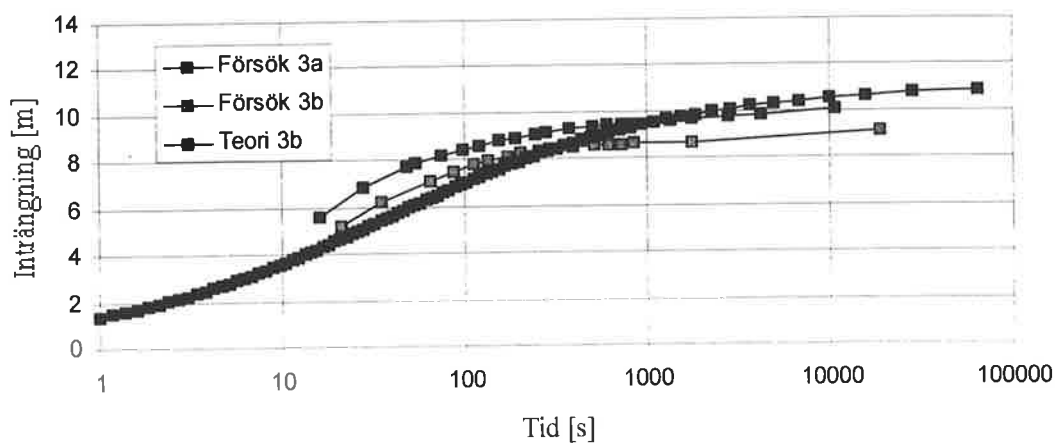
Modellförsök II - 1



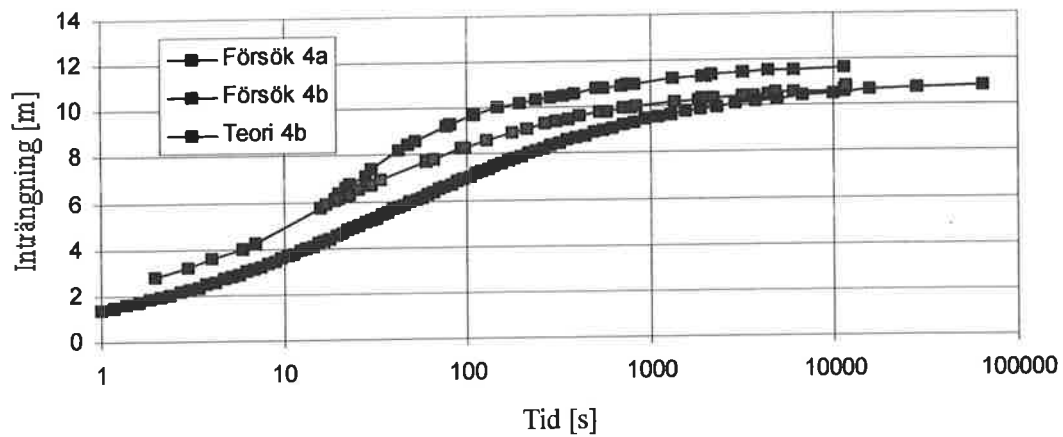
Modellförsök II - 2



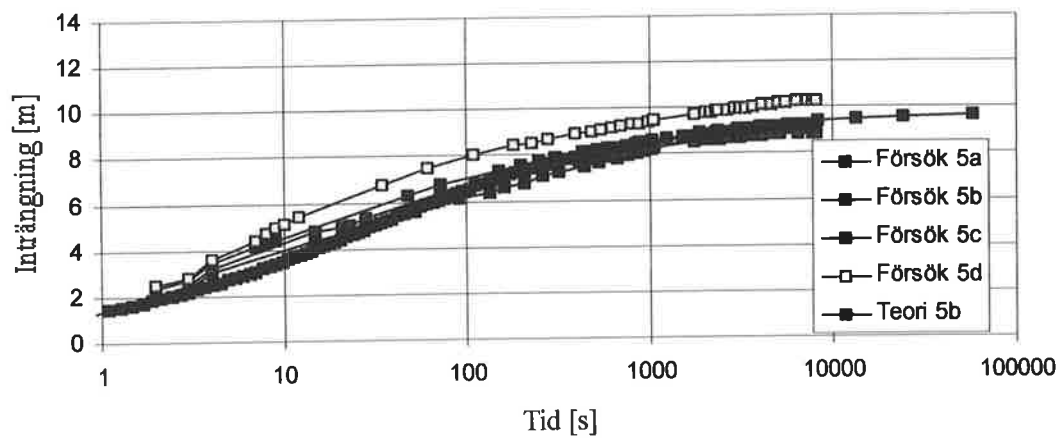
Modellförsök II - 3



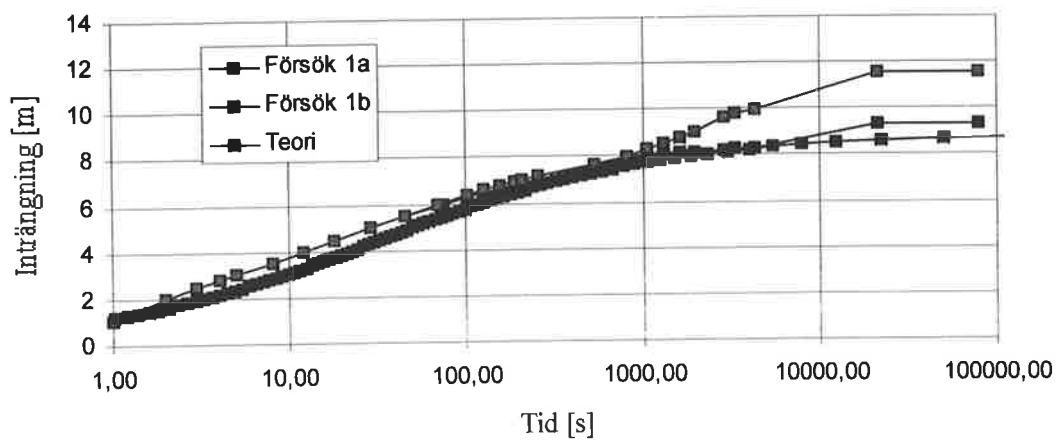
Modellförsök II - 4



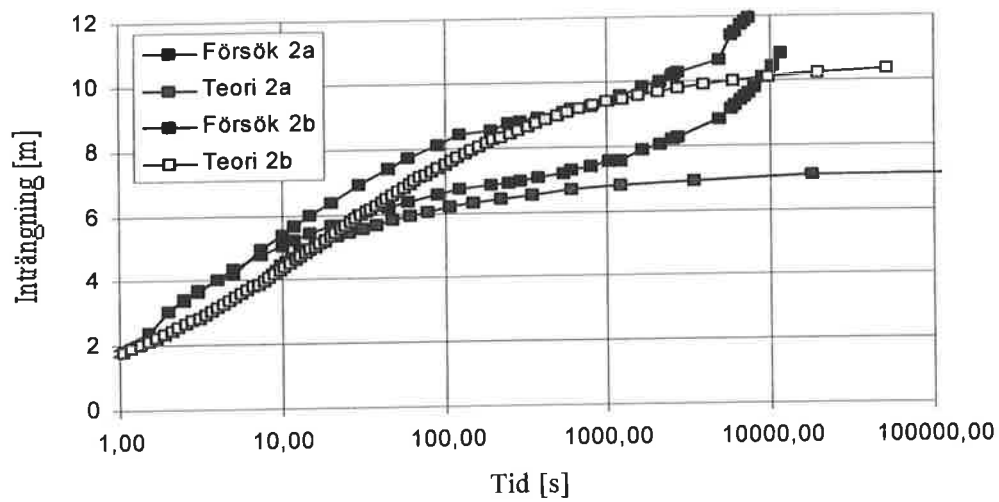
Modellförsök II - 5



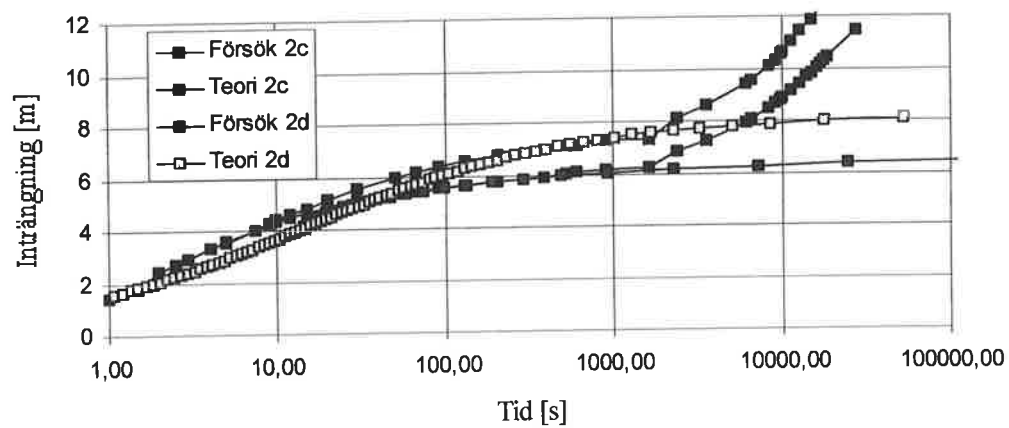
Modellförsök III - 1



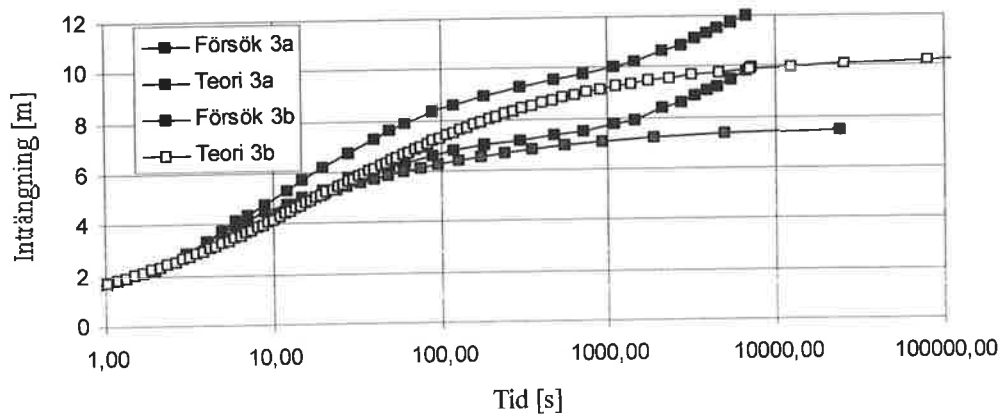
Modellförsök III - 2



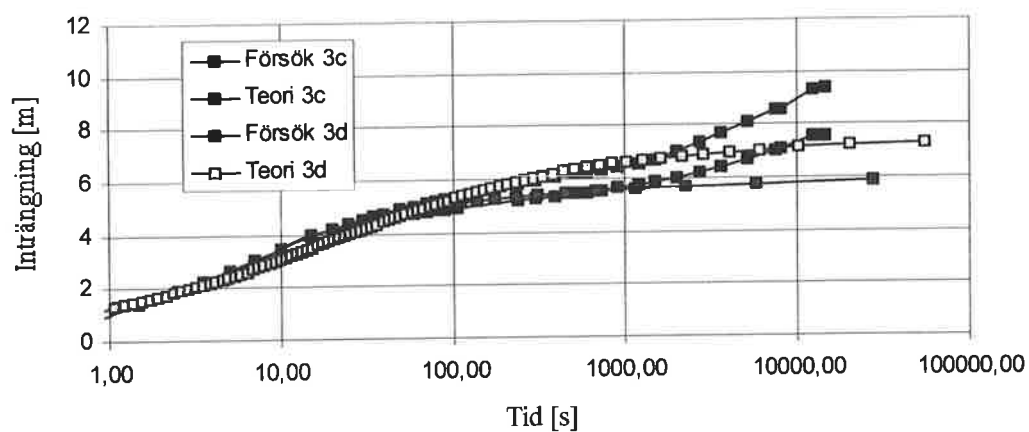
Modellförsök III - 2



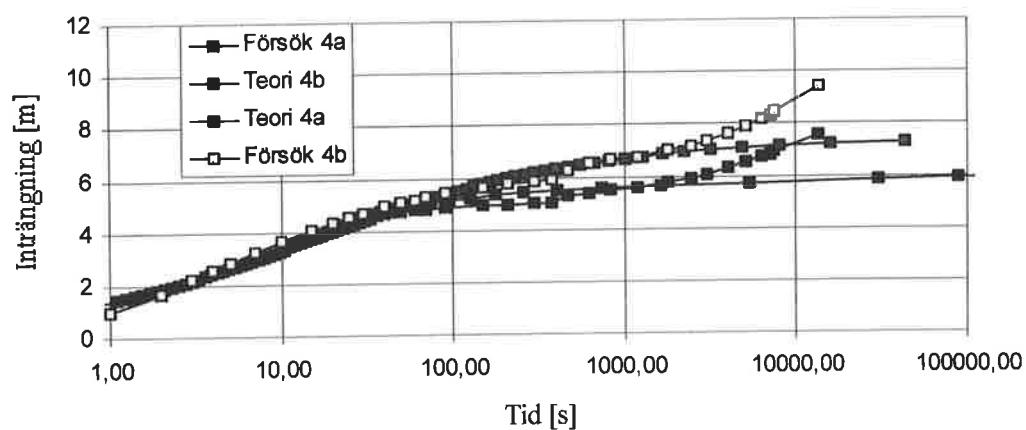
Modellförsök III - 3



Modellförsök III - 3



Modellförsök III - 4



Modellförsök III - 4

