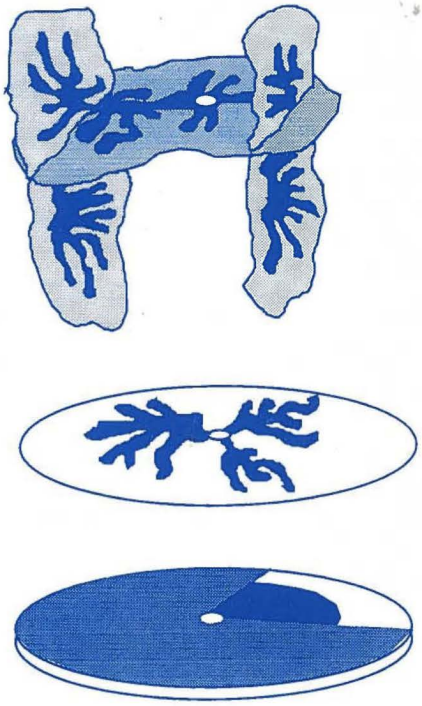
BeFo



Injektering av bergsprickor — simulering och klassificering

Lars Hässler

Stiftelsen Bergteknisk Forskning – BeFo
Swedish Rock Engineering Research Foundation

BeFo 241:2/91

Available in English as
Dr Thesis, Royal Inst of Technology,
Department of Soil and Rock Mechanics,
Stockholm, ISBN 91-7170-060-9
Grouting of Rock - Simulation and Classification, 1991

Injektering av bergsprickor — simulering och klassificering

Grouting of rock — simulation and classification

Lars Hässler
Jord- och bergmekanik, KTH

Stiftelsen Bergteknisk Forskning — BeFo
Swedish Rock Engineering Research Foundation
Stockholm 1991

ISRN BEFO--91/241-2--SE

FÖRORD

Injekteringens styrmekanismer är ett BeFo-projekt som bedrivits i flera steg med avsikten att successivt bygga upp en bättre kunskap om de injekteringsmedel och metoder som används för tätning av berganläggningar.

Den första etappen av projektet avrapporterades 1985 och avsåg matematisk modellering av strömning i bergsprickor. Dessa modeller har utvecklats vidare och bl a jämförts med resultat från laboratorieförsök vid institutionen för Jord- och bergmekanik på KTH. Viktiga indata vid beräkningarna är injekteringsmedlets reologiska (tidsberoende) strömningsegenskaper.Undersökningar av olika typer av injekteringsmedel och en utvecklad mätmetodik för att bestämma olika egenskaper har redovisats i rapporten Mätmetodik för injekteringsmedels reologiska egenskaper (BeFo 241:1/91) av Håkansson, Hässler, Stille.

Föreliggande rapport redovisar vidareutvecklade simuleringsmodeller för strömning i sprickor och spricknät samt ett förslag till klassificeringsteknik, som demonstrerar hur injekteringsarbeten ska kunna ske på ett effektivare och mer kontrollerat sätt än idag. I och med dessa rapporter har en andra etapp av projektet Injekteringens styrmekanismer slutförts och viktiga steg tagits mot en bättre kontroll över injekteringstekniken. Resultaten har också delvis prövats i praktisk tillämpning.

I projektets referensgrupp har bl a följande personer ingått:

Jan Alemo, Vattenfall Utveckling
Tomas Franzén, BeFo
Gunnar Gustafson, CTH
Carl Erik Klockars, SGAB
Ture Nilsson, Stabilator
Nils-Olof Sandell, BESAB
Håkan Stille, KTH / Skanska

Referensgruppens engagemang och stöd har varit av stor betydelse för projektet och vi planerar att inom samma grupp diskutera lämplig fortsättning av utvecklingsarbetet på injekteringsområdet.

Stockholm i maj 1991

Tomas Franzén

Summary

The aim of this project was to develop and use mathematical models describing the course of grouting to obtain a base for developing the grouting process. The models provide an understanding of what controls grouting and how the various grouting procedures affect the results of grouting. They may even be included in grouting processes of the future. Grouting is a complicated process involving a large number of sub-areas. This work is aimed at the following three fundamental sub-areas:

Methods of calculating the course of grouting
Methodology for measuring grout properties
Classification system for rock from a grouting point of view.

The work was basically theoretical and the main testing against reality was only carried out by making comparisons between calculations and a model test. But the work does contain a relatively complete concept for planning, calculating and improving grouting work.

Methods to calculate the course of events when grouting rock

Up to now, the possibility of calculating the penetration of grout into rock has been limited. This is due not only to the complicated and normally unknown structure of the rock but also to the complexity of the actual flow problem. Calculations must take into account the non-Newtonian and time-related properties of the grout. Furthermore, the existence of groundwater in the rock conductors and the fact that several different grouts can be expected to flow into the volume of rock being modelled must be taken into account. The software and mathematics presented demonstrate one possibility of handling these problems if channel-like properties are assigned to the individual conductors in the rock.

Some basic calculations examples are presented. The examples include the significance of the hardening process on the penetration of the grout, the significance of density on sloping fracture planes, a simple observation of the difference between pre-grouting and post-grouting, and a proposal that may lead to an improvement of post-grouting results. The object of the calculations was not to find any new method of grouting but to demonstrate how calculations can be used to increase understanding of the mechanisms that control grouting.

Grout properties

All scientific treatment of the grouting problem requires good knowledge of the flow properties of grouts and the way in which they change during the hardening process. The properties of most grouts existing today can be measured according to the method presented. Today properties are primarily available for chemical grouts. The properties of cement-based grouts are largely unknown, as are the effects of various admixtures. In the future greater demands will be put on information from suppliers. This information may be expected to include a physical description of the flow properties of the grout and the way they may change as a result of using admixtures.

Greater demands on the quality assurance of grouting work will also require this information. The measurement procedure must be standardized. As a step in this process, the method can be demonstrated

through a systematic and thorough measurement of some of the cement types and admixtures that are common on the market.

In the future, greater demands will be made on inspection of the properties of grouts on sites. It is unrealistic to expect all sites to be equipped with rotational viscometers, but simplified field-type methods can be developed.

Classification of rock for grouting purposes

The report presents the basis for a possible system of classifying rock for grouting purposes. Classification should preferably be done from measurements made during the course of grouting. Simple classification can also be done from the volume of grout consumed and the results from ordinary water-loss measurements.

It is demonstrated that the classification system proposed can be used to describe a complicated channel network using a few parameters. It is also shown theoretically that the penetration achieved by grout can be calculated from the classification.

Even if the classification system proposed proves inadequate for grouting needs, similar systems will be developed - because a functional classification system is needed.

A conceivable variant of the future grouting process includes an empirical classification based on pure geological data. As mentioned earlier, several attempts have been made to develop such methods in other contexts. The usability in this context, however, must be considered limited as the earlier attempts were not aimed at the development of basic calculation information for grouting. If the geometrical model proposed here for classification is proven to work in practice as well, it's parameters should facilitate the development of such an empirical system.

Injektering av bergsprickor - simulering och klassificering

Innehållsförteckning

Inledning 1

1. Bergets hydrauliska egenskaper 2
   1.1 Inledning 2
   1.2 Kanalnät 4

2 Strömning av icke-Newtonska vätskor 5
   2.1 Materialegenskaper hos injekteringsmedel 5
      2.1.1 Newtonska vätskor 5
      2.1.2 Binghamvätskor 6
      2.1.3 Tixotropi 6
   2.2 Kanalnät av endimensionella kanaler 7
      2.2.1 En horisontell kanal 7
      2.2.2 En lutande endimensionell kanal 15
      2.2.3 Hopkoppling av flera endimensionella kanaler 18
      2.2.4 Bestämning av Binghampluggens tjocklek 20
   2.3 Utvecklad numerisk modell 23
      2.3.1 Inledning 23
      2.3.2 Programmets beräkningsmöjligheter 23
      2.3.3 Övergripande metodik 23
      2.3.4 Indataproduktion 24
      2.3.5 Geometriskt datablock 25
      2.3.6 Tidsberoende, föränderligt datablock 25
      2.3.7 Övergripande beräkningsgång 27
      2.3.8 Blandning av injekteringsmedel och vatten i kanalernas knutpunkter 27
      2.3.9 Beräkning av tidssteg och använda iterationskriterier 28
      2.3.10 Initiering av nytt beräkningssteg 28
   2.4 Cirkulärcylindrisk strömning 29
      2.4.1 Binghamströmning i cirkulärcylindriskt sprickplan 29
      2.4.2 Utvecklad numerisk modell för cirkulärcylindrisk strömning 32

3 Provningsmetodik för injekteringsmedel 33
   3.1 Inledning 33
   3.2 Rotationsviskosimetri 33
   3.3 Mätning av Binghamvätskor 34
      3.3.1 Allmänt 34
      3.3.2 Använd utrustning 36
      3.3.3 Utvärderingsmetodik 37
      3.3.4 Speciella problem 43
      3.3.5 Mätning av störningskänsliga medel 45
   3.4 Standard för bedömning av injekteringsmedel 45

4 Verifiering av framtagna numeriska simuleringsprogram. 47
4.1 Inledning 47
4.2 Verifiering av kanalmodell 47
4.2.1 Uppbyggnad av fysisk modell 47
4.2.2 Resultat-beräknat 48
4.2.3 Kommentarer 51
4.3 Verifiering av cirkulärcylindrisk modell 52
4.3.1 Jämförelse med Wallner 52

5 Klassificering av berg ur injekteringssynpunkt 53
5.1 Inledning 53
5.2 Allmänt om klassificeringssystem 53
5.3 Klassificeringssystemets roll i injekteringsprocessen 55
5.4 Geometrisk modell för klassificering av berget 56
5.5 Klassificeringsparametrarnas geometriska betydelse 62
5.6 Bestämning av parametrarna ur injekteringar och vattenförlustmätningar 62
5.7 Val av injekteringsmetod utifrån klassificeringens parametrar 63

6 Några beräkningsexempel 67
6.1 Inledning 67
6.2 Använt kanalnät 67
6.3 Betydelsen av injekteringsmedlets härdningsförlopp 68
6.4 Klassificering av kanalnätet 69
6.4.1 Tidskonstant injekteringsmedel 70
6.4.2 Härdande injekteringsmedel 71
6.4.3 Kommentarer 72
6.5 Betydelsen av injekteringsmedlets densitet (lutande kanalnät) 75
6.6 En jämförelse mellan för- och efterinjektering 76

7 Sammanfattning och slutsatser 79
7.1 Inledning 79
7.2 Beräkningsmetoder för injekteringsförlopp i berg 79
7.3 Injekteringsmedlens egenskaper 79
7.4 Klassificering av berg med inriktning mot injektering 80

Referenser 81

Appendix: Källkod med tillhörande in- och utdatafiler för nätverksprogrammet 83
A.1 Inledning 83
A.2 Indatafil 83
A.3 Utdatafiler 85
A.4 Källkod i Fortran 90
A.4.1 Generell beräkningsdel 90
A.4.2 Pascaldel för öppning av filer 114
A.4.3 MAKEFILE för kompilering av Macintosh-version 115

Inledning

Målsättningen med detta projekt "injekteringens styrmekanismer" är och har varit att med hjälp av matematiska modeller som beskriver injekteringsförlopp erhålla en bas för en utveckling av dagens injekteringsprocess. Modellerna ger förståelse för vad som styr injekteringar och hur resultatet påverkas av olika injekteringsförfaranden. Modellerna kan även ingå som delar i framtidens injekteringsprocess.

Injektering är en komplicerad process som innefattar ett stort antal delområden. Det här arbetet är inriktat mot följande tre fundamentala områden:

Beräkningsmetoder för injekteringsförlopp

Mätmetodik för injekteringsmedel

Klassificeringssystem för berg ur injekteringssynpunkt.

Arbetet har i huvudsak varit teoretiskt och den väsentliga provningen mot verkligheten har endast utförts som jämförelser av beräkningar mot ett modellförsök. Arbetet innefattar dock ett relativt komplett koncept för hur injekteringsarbeten skulle kunna projekteras, beräknas och förbättras.

Sammanfattningsvis finns idag utvecklad metodik för mätning av injekteringsmedels strömningsegenskaper samt programvara för simulering av injektering i cirkulärcylindriska sprickplan och i kanalsystem. Vidare finns ett enkelt klassificeringssystem för sprickplan och sprickigt berg framtaget.

Bergmassans konduktiva delar består vanligen av ett stort antal oregelbundna sprickplan sammanbundna i sina skärningar. Det finns många tänkbara alternativ till hur dessa konduktiva delar skulle kunna beskrivas matematiskt. Valet att beskriva bergets sprickplan som kanalnät diskuteras i kapitel 1.

Trots att vi valt att beskriva de enskilda konduktiva delarna i bergmassan som enkla kanaler så blir matematiken relativt komplex. Nödvändig matematik för beräkning av Binghamströmning i enskilda kanaler och i kanalnät beskrivs i kapitel 2. Kapitel 2 beskriver även den utvecklade numeriska kanalmodellens uppbyggnad och datastruktur.

Under kap 2 behandlas även matematiken för cirkulärcylindrisk strömning. Modellen är enkel och kräver minimum av indata samt ger enkla och lättförståeliga utdata. Modellen är tänkt att användas för kvalitativa jämförelser mellan olika injekteringsmedel.

En förutsättning för att kunna beräkna injekteringsförlopp är givetvis en detaljerad kunskap om det aktuella injekteringsmedlets strömningsegenskaper. Rapporten behandlar därför kortfattat utvecklad mätmetodik för injekteringsmedel under kapitel 3. För en mera uttömmande behandling av detta ämne hänvisas till Håkansson et al 1991.

Under kapitel 4 görs ett försök till verifiering av framtagna numeriska modeller. Beräknat injekteringsförlopp i kanalmodellen jämförs med ett laboratorieförsök. Den cirkulärcylindriska modellen jämförs med en beräkning utförd av Wallner (1976).

I en framtida injekteringsprocess ingår säkerligen en klassificering av berget ur injekteringssynpunkt som en väsentlig del. Kapitel 5 behandlar ett förslag till ett enkelt klassificeringssystem och hur ett sådant skulle kunna användas i en framtida injekteringsprocess.

I kapitel 6 görs ett försök till att visa hur utvecklad programvara kan användas i praktiska sammanhang.

Mycket arbete återstår dock inom injekteringsområdet. I kapitel 7 sammanfattas uppnådda resultat kortfattat. Där diskuteras även några tänkbara framtida utvecklingar.

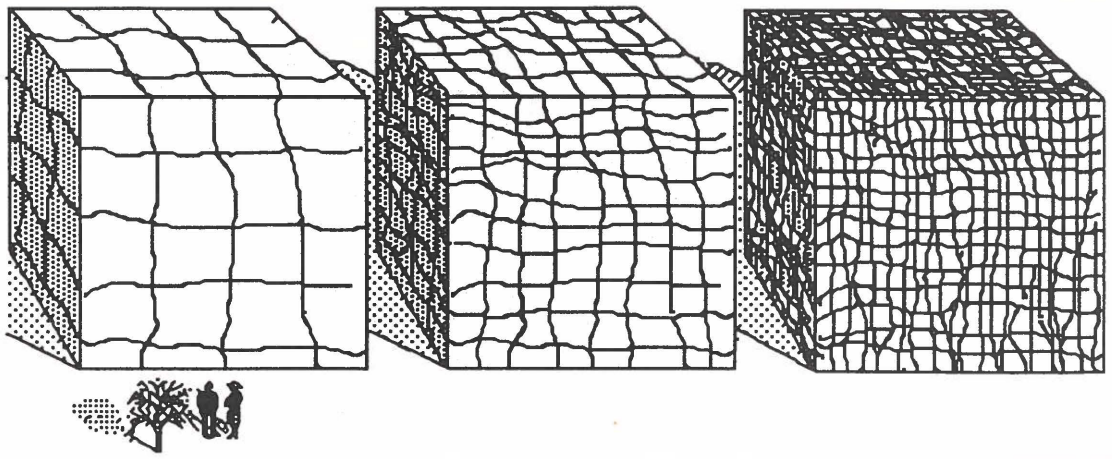
1. Bergets hydrauliska egenskaper

1.1 Inledning

Bergets hydrauliska egenskaper bestäms av dess hålrum och av hur dessa är sammanbundna. I kristallint berg är det väsentligen i sprickorna som strömning kan ske. Den intakta bergarten kan anses som tät.

Strömningsmotståndet i en enskild spricka bestäms av sprickvidd, fyllnadsmaterial och eventuellt av sprickans råhet (exempelvis Gale 1982). Man bör här notera att sprickvidden kan variera med sprickvätskans tryck (Noorishad et.al. 1982).

Strömningsvägarna och ledningsförmågan i en bergvolym som innehåller flera sprickor bestäms både av de enskilda sprickornas egenskaper och av hur de är sammanbundna (fig. 1.1). Om volymen är mycket uppsprucken så är de enskilda detaljerna i nätverket förmodligen av mindre intresse. Detta innebär att en mycket uppsprucken bergvolym kan liknas vid ett poröst medium. Om antalet sprickor däremot är få eller samlade i markanta sprickzoner så har det geometriska läget av de enskilda sprickorna (sprickzonerna) stor betydelse för ledningsförmågan (Andersson et.al. 1984).



Figur 1.1 : Olika grader av uppsprickning hos bergmassan. Från vänster till höger övergång från diskreta mot kontinuerliga förhållanden.

Mycket arbete finns uträttat vad gäller modeller för vattenströmning i berg. Modellerna kan förenklat indelas i huvudgrupperna kontinuummodeller och diskreta modeller. Modellernas lämplighet för att beskriva olika strömningsförlopp beror av vad som söks och enligt ovan på det simulerade områdets storlek och homogenitet. Är man intresserad av ett bruttoflöde genom en större jämnt uppsprucken bergmassa så kan ofta kontinuum-modeller vara tillfyllest (se Gustafson 1986). En injektering påverkar dock vanligtvis en begränsad bergvolym. Vätskorna har dessutom ofta en högre viskositet än vatten kombinerad med en skjuvhållfasthet vilket både begränsar det praktiskt påverkade området (influensområdet) och ökar kraven på modellens geometriska innehåll. Ovanstående leder till antagandet att bergmassan bör beskrivas som ett diskret medium vid simuleringar av injekteringar i berg.

En exakt simulering av ett injekteringsförlopp kräver givetvis en stor mängd kunskap och bakgrundsinformation. Som exempel kan nämnas:

1 Bergmassans indelning i sprickplan och zoner.

2 De enskilda sprickplanens och zonernas lokala hydrauliska egenskaper i alla punkter och i alla riktningar.

3 Injekteringsmedlets reologiska (strömnings) egenskaper med tidsförändringar.

4 En simuleringsmodell som fungerar och kan hantera denna stora mängd av data.

Det är knappast troligt att all ovanstående information någonsin kommer att finnas tillgängligt. Det är knappast heller praktiskt möjligt att tillverka en simuleringsmodell som riktigt medtar alla dessa egenskaper och lokala variationer. För att kringgå ovanstående problem tvingas man därför till förenklingar och att inrikta modellarbetet mot kvalitativa betraktelser.

Nedan följer en kortfattad beskrivning av tankegångarna bakom valet att beskriva sprickplan som kanalnät.

1.2 Kanalnät

Forskningen kring strömning i enskilda sprickplan är ingen ny företeelse. På senare tid har dock lagringsproblematiken vad gäller miljöfarligt avfall ökat insatserna. Detta beror på att man vid spridning av miljöfarligt material icke endast är intresserad av ett bruttoflöde utan även av att så noggrant som möjligt förutsäga tidsförloppet. Förenklat kan man säga att tidsförloppet till första kontaminering beror av den snabbaste vägen från källa till biosfär. För att bedöma den snabbaste vägen måste hänsyn tagas till sprickplansöppningarnas lokala variation. Forskningen har visat att strömning i sprickplan vid hårt berg sker i kanaler (se exempelvis Dverstorp 1991, Hakami 1988, Abelin 1986). Praktiska studier av tunnlar visar att inströmningen till mycket stor del sker punktvis vilket ytterligare styrker kanalströmningsteorin (Palmqvist et al 1991). Kanalbildning tänks främst ske genom att sprickplanet skjuvas så att undulationens klackar förskjuts och mellanrum skapas. En annan möjlig mekanism för uppkomst av dessa kanalnät är lokal urlakning av berget eller av eventuellt sprickfyllnadsmaterial (Evert 1985).

Tidsberäkningar vid avfallsproblemet kan jämföras med utbredningsberäkningar vid injekteringar. Den vanligt förekommande skjuvhållfastheten hos injekteringsmedlet i kombination med den öppnaste kanalvägen styr nämligen den maximala räckvidden för injekteringen. Den öppnaste kanalvägen styr dessutom på samma sätt som vid avfallsproblemet tidsförloppet, vilket är av intresse då injekteringsmedlet förväntas härda och/eller gela. Vi är med andra ord intresserade av en modell där lokala variationer inom bergmassans sprickplan kan beskrivas.

En injektering är som tidigare nämnts en relativt lokal företeelse. För normalt uppsprucket berg kan antalet sprickor som nås av injekteringsmedlet därför förväntas vara relativt lågt. Vi kan med andra ord förvänta oss att erhålla användbara beräkningsresultat även om beräkningsmodellen bara innefattar ett mindre antal sprickplan. I en mycket uppsprucken bergmassa påverkas givetvis många sprickplan av injekteringen trots att injekteringen är en lokal företeelse vilket ställer ökade krav på beräkningskapacitet.

Det finns flera andra modellalternativ än kanalnät som medtar lokala variationer inom bergmassans sprickplan. Som exempel kan nämnas finita elementmodeller (se Wallner 1976). Dessa blir dock mycket komplicerade och kräver stor beräkningskapacitet. Då vi aldrig exakt kommer att veta hur den enskilda topografin över ett sprickplan ser ut så verkar det onödigt att använda komplicerade FEM-modeller. Vad vi eftersträvar är istället en enkel modell som enkelt kan varieras att ge ett uppträdande liknande det som vi observerar och mäter i fält. Modellen med sprickplan som kanalnät är dessutom enkel nog för att tillåta beräkningar i större tredimensionella strukturer uppbyggda av ett flertal sprickplan utan att det därför krävs användande av superdatorer.

Sammanfattningsvis har arbetsinsatserna koncentrerats mot kanalnätsmodellen beroende på att den medför jämförelsevis enkel matematik med bibehållna möjligheter till stor variation både inom enskilda sprickplan och mellan olika sprickplan.

2 Strömning av icke-Newtonska vätskor

2.1 Materialegenskaper hos injekteringsmedel

Som tidigare nämnts så kräver en matematisk behandling av injekteringsproblematiken god kunskap om injekteringsmedlets strömningsegenskaper. Läran om vätskors strömningsegenskaper brukar förenklat benämnas reologi. Det finns ett stort antal olika reologiska modeller vetenskapligt beskrivna. De inom injekteringslitteraturen vanligast förekommande är följande:

1 Newtonska

2 Bingham

Nedan behandlas dessa två vätskemodeller i förenklad form. För en mera detaljerad genomgång av dessa modeller hänvisas till mätmetodikrapporten eller exempelvis Bird et al 1960.

2.1.1 Newtonska vätskor

"The resistance which arises from the lack of sliperyness originating in a fluid - other things being equal - is proportional to the velocity by which the parts of the fluid are being separated from each other".

Isaac S. Newton, ***Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica,*** 1687.

Den mest kända vätskemodellen är den Newtonska. Newton formulerade ett samband, som tecknas

$$\tau = \frac{F}{A} = -\mu \frac{du(z)}{dz} \qquad (2.1)$$

där F står för pådrivande kraft, A för arean och du/dz för hastighetsgradienten vinkelrätt strömningsriktningen. Minustecknet kommer här av teckenkonventionen för skjuvspänningar, dvs du/dz är negativ då skjuvspänningen är positiv och vice versa.

Proportionalitetskonstanten, μ, benämns viskositet och anger definitionsmässigt förhållandet mellan hastighetsgradienten och den skjuvspänning som krävs för att upprätthålla gradienten. Man kan observera att vätskemodellen endast har en materialparameter, viskositeten. Modellen gäller för vatten och många kemiska injekteringsmedel i ett initialt skede. Under härdnings och/eller gelningsförloppet ändras dock vätskornas egenskaper.

2.1.2 Binghamvätskor

Vätskor enligt Bingham kräver två materialparametrar för en beskrivning av strömningsförloppet. Det som tillkommit är en skjuvhållfasthet (jämfört med en Newtonsk vätska). En vätska utan skjuvhållfasthet strömmar alltid då den utsätts för en tryckgradient oavsett hur liten denna är. För en vätska med skjuvhållfasthet däremot krävs det att denna har överskridits innan strömning sker (jämför med t ex ketchup). Skjuvhållfastheten är ofta förknippad med partikelsuspensioner, dvs ett tvåfassystem där bindningar mellan den fasta fasens partiklar gör att blandningen erhåller en skjuvhållfasthet. När bindningarna väl har brutits är det till stor del medlets vätskefas som bestämmer hur medlet strömmar (Van Wazer et al, 1963). Cementbaserade injekteringsmedel är typiska partikelsuspensioner vilket kan förklara varför Binghammodellen har visat sig beskriva dessa vätskor på ett godtagbart sätt (se exempelvis Wallner 1976, Littlejohn 1982, Lombardi 1985). I litteraturen finns det dessutom uppgifter om lyckade beräkningar med Binghammodellen för andra suspensioner och pastor (se exempelvis Bird et al. 1960, Sellgren 1983).

Binghammodellen har det konstitutiva sambandet (Van Wazer et al 1963, Bird et al. 1960)

$$\tau = -\mu_B \frac{du(z)}{dz} + \tau_o \qquad \tau > \tau_o \tag{2.2}$$

där μ_B står för den så kallade plastiska viskositeten hos en Binghamvätska och τ_o utgör skjuvhållfastheten. Om skjuvspänningen är mindre än skjuvhållfastheten är hastighetsgradienten noll. Trots att modellen vid första anblicken ser ganska oskyldig ut ställer τ_o till problem i den matematiska formuleringen för flöde och strömningshastighet vilket kommer att synas nedan. Slutna matematiska lösningar kan därför endast erhållas vid enkla geometrier.

2.1.3 Tixotropi

Partikelsuspensioner har som ovan nämnts ofta en skjuvhållfasthet. Under vätskans strömning kan denna skjuvhållfasthet ibland öka under lungnare perioder med låg hastighetsgradient och minska under perioder med kraftigare omrörning. Skjuvhållfastheten kan med andra ord vara historieberoende. Detta historieberoende brukar benämnas tixotropi. Tixotropin storlek är beroende av använda tillsatsmedel och beaktas inte i här beskrivna modeller.

2.2 Kanalnät av endimensionella kanaler

Med kanal menas här en hålighet med begränsad längd och konstant tvärsnitt. Olika former på tvärsnittet kan användas. Nedan beskrivs det endimensionella fallet med planparallellt tvärsnitt. Med planparallellt tvärsnitt menas ett rektangulärt tvärsnitt där inga skjuvspänningar finns mellan vätskorna och rektangelns kortaste sidor. Detta är givetvis en förenkling som kräver att långsidan är betydligt längre än kortsidan. Om förhållandet mellan lång och kortsida antas vara litet så kan exempelvis cirkulära tvärsnitt användas istället. Härledningen av uttrycken för cirkulära tvärsnitt är snarlik den för planparallella plattor (se exempelvis Håkansson et al 1991).

Nedan beskrivna samband förutsätter följande:

- Laminär strömning
- Konstanta kanaltvärsnitt (förändras inte av tryckförändringar)
- Skarpa gränser mellan olika vätskor i samma kanal
- Inkompressibla vätskor

I ett större system av kanaler utgör den enskilda kanalen systemets byggelement. Matematiken som beskrivs här kan därför appliceras på varje enskild kanal i ett kanalsystem.

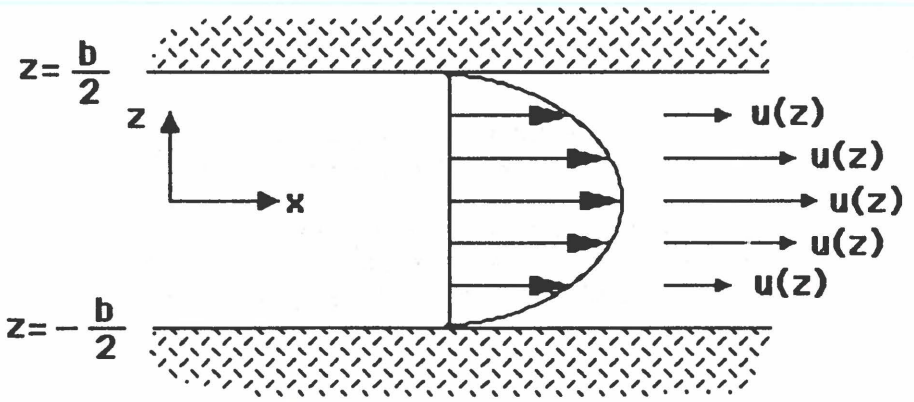
Kanalerna kan vara antingen lutande eller horisontella. Nedan beskrivs fallet med horisontell kanal följt av fallet med lutande kanal.

2.2.1 En horisontell kanal

Newtonsk strömning

Det enklaste fallet med en planparallell tvärsektion, helt fylld med vatten finns beskrivet av exempelvis Bird et al 1960. Nedan följer en genomgång av de matematiska sambanden.

I en plan parallell spricka (fig. 2.2.1) där strömningen sker i en riktning blir strömningsmodellen mycket enkel.



Figur 2.2.1: Stationär strömning i en plan parallell spricka med tjockleken b.

I sprickan är alla hastigheter 0 utom u(z) som är riktad i x-led. Genom att betrakta ett kontrollelement dxdydz och kräva att massa och rörelsemängd bevaras för kontrollelementet fås Navier Stokes ekvationer som i detta fall förenklar sig till (Bird et.al. 1960):

$$\frac{d}{dx}(\rho g) = 0 \tag{2.3}$$

$$\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} = 0 \tag{2.4}$$

Där τ är spänningstensorn för elementet i vätskan. Skjuvspänningen beror av vätskans strömning och reologi. Genom att utnyttja ekvation (2:1) och införa trycket P så kan man beskriva:

$$\tau_{xx} = P \tag{2.5}$$

$$\tau_{xz} = \tau(z) = -\eta \frac{du}{dz} \tag{2.6}$$

Sätter vi in ekvation (2.5) och (2.6) i (2.4) fås följande samband:

$$\frac{\partial}{\partial z}\left(\eta \frac{du}{dz}\right) = \frac{dP}{dx} \tag{2.7}$$

För att komma vidare måste man ange vilken reologisk modell som gäller för vätskan. Ekvation (2.7) kan då integreras två gånger så att hastighetsprofilen u(z) erhålles. Genom att slutligen beräkna medelvärdet av u(z) över sprickans tjocklek erhålles medelhastigheten $\overline{U}$.

För en Newtonsk vätska gäller $\eta = \mu$ = konstant varvid ekvation (2.7) lätt kan integreras. En integration med avseende på z ger:

$$\mu \frac{du(z)}{dz} = \frac{dP}{dx} z + c \tag{2.8}$$

ytterligare en integration ger

$$\mu u(z) = \frac{dP}{dx} \frac{z^2}{2} + c\, z + d \tag{2.9}$$

där man antagit att trycket inte ändras nämnvärt över sprickans tjocklek (ej en funktion av z). C och d är integrationskonstanter.

Genom att utnyttja att hastighetsprofilen har ett maxvärde i sprickans mitt ((du/dz) för z=0 är 0) och att hastigheten längs sprickväggen är 0 (u(b/2)=0) erhålls följande värden på integrationskonstanterna:

$$\mu 0 = \frac{dP}{dx} 0 + c \Rightarrow c = 0 \tag{2.10}$$

$$\mu 0 = \frac{dP}{dx}\frac{\left(\frac{b}{2}\right)^2}{2} + d \Rightarrow d = -\frac{dP}{dx}\frac{b^2}{8} \tag{2.11}$$

Medelvärdesbildning av strömningshastigheten ger följande:

$$\mu u(z) = \frac{dP}{dx}\frac{z^2}{2} - \frac{dP}{dx}\frac{b^2}{8} \tag{2.12}$$

$$\overline{U} = \frac{2}{b\,\mu}\frac{dP}{dx}\int_0^{\frac{b}{2}} \frac{z^2}{2} - \frac{b^2}{8}\,dz = \frac{b^2}{12\,\mu}\left(-\frac{dP}{dx}\right) \tag{2.13}$$

Om vattentryckshöjder används erhålls:

$$\frac{dP}{dx} = \rho_w\, g\,\frac{dh}{dx} = \gamma_w\,\frac{dh}{dx} \tag{2.14}$$

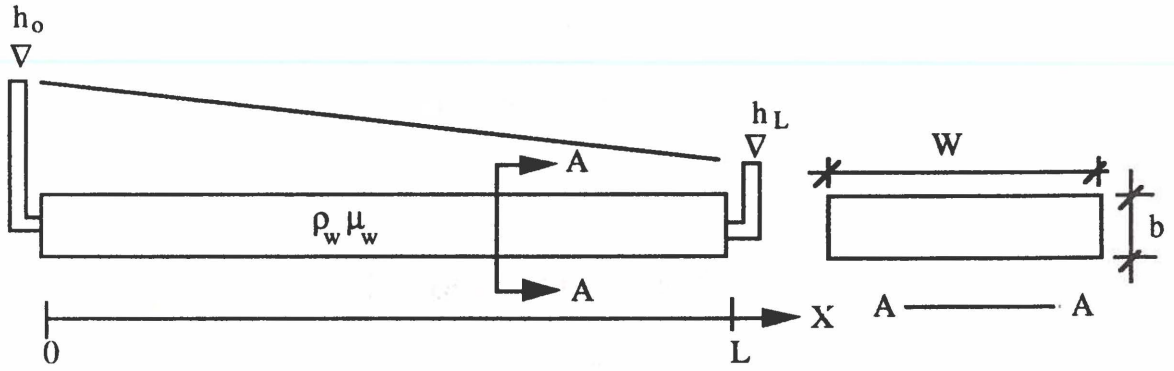
Och slutligen erhålls det välkända uttrycket för plan-parallell strömning:

$$\overline{U} = -\frac{\gamma_w b^2}{12\,\mu}\frac{dh}{dx} \tag{2.15}$$

En Newtonsk vätskas medelhastighet är tydligen proportionell mot sprickvidden i kvadrat och mot tryckgradienten samt omvänt proportionell mot viskositeten. Om vi betraktar en rektangulär kanal med längden L, höjden b och bredden W (se fig. 2.2.2) helt fylld med vatten och uttrycker en tänkt fronts hastighet i kanalen erhålls:

$$-\frac{dh}{dx} = \frac{h_0 - h_L}{L} \qquad \text{(se fig 2.2.2)}$$

$$\frac{dx}{dt} = \frac{\gamma_w b^2}{12\,\mu_w}\frac{h_0 - h_L}{L} \tag{2.16}$$

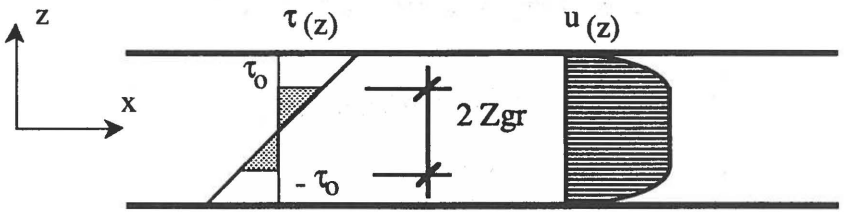


Figur 2.2.2: En horisontell kanal helt fylld med vatten.

Bingham strömning

Nästa fall med en planparallell tvärsektion och helt fylld kanal med en Binghamvätska finns beskrivet av exempelvis Wallner (1976). Wallner utgår från en tensorbetraktelse. Nedan följer en enklare härledning giltig för det endimensionella fallet.

För en Binghamvätska blir integrationen något besvärligare. En stel kärna uppstår kring mitten av sprickan om skjuvspänningen där är mindre än skjuvhållfastheten. Skjuvspänningen växer mot sprickans väggar (fig. 2.2.3). Antag att kärnan har tjockleken 2 Zgr.



Figur 2.2.3: Hastighetsprofil vid Binghamströmning. I mitten av sprickan strömmar en stel kärna med tjockleken 2 Zgr.

Tjockleken på den stela kärnan beräknas genom att skjuvdeformationer inte sker förrän skjuvspänningen överstiger skjuvhållfastheten τ_o. Ekvation (2.4) tillsammans med ekvation (2.6) ger:

$$\frac{d\tau(z)}{dz} = -\frac{dP}{dx} \tag{2.17}$$

Integreras denna ekvation en gång med avseende på z erhålles:

$$\tau(z) = -z\frac{dP}{dx} + c \tag{2.18}$$

τ (z=0)= 0 av symmetriskäl vilket ger att c=0. Eftersom τ (z=Zgr)= τ_o (skjuvhållfastheten) så fås slutligen:

$$\tau_0 = -Zgr\frac{dP}{dx} \tag{2.19}$$

Om vi sätter in ekvation 2.2 i ekvation 2.4 så erhålls:

$$\frac{\partial}{\partial z}\left(\mu_B\frac{du(z)}{dz} - \tau_o\right) = \frac{dP}{dx} \tag{2.20}$$

Integrerar vi denna ekvation en gång med avseende på z så fås:

$$\mu_B\frac{du(z)}{dz} - \tau_o + c = z\frac{dP}{dx} \tag{2.21}$$

där enligt tidigare

$$\tau_0 = -Zgr\frac{dP}{dx} \tag{2.22}$$

Randvillkoret (för den stela kärnan) att (du/dz)=0 för z=Zgr fastställer c till noll vilket ger:

$$\frac{du(z)}{dz} = \frac{1}{\mu_B}\frac{dP}{dx}(z - Zgr) \qquad z > Zgr \tag{2.23}$$

Ytterligare en integration med avseende på z ger:

$$u(z) = \frac{1}{\mu_B}\frac{dP}{dx}\left(\frac{z^2}{2} - z\,Zgr + d\right) \tag{2.24}$$

Randvillkoret att strömningshastigheten längs sprickväggen är 0 (u(z) för z=b/2 är 0) ger:

$$d = Zgr\frac{b}{2} - \frac{1}{2}\left(\frac{b}{2}\right)^2 \tag{2.25}$$

och

$$u(z) = \frac{1}{\mu_B}\frac{dP}{dx}\left(\frac{z^2}{2} - zZgr + Zgr\frac{b}{2} - \frac{b^2}{8}\right) \qquad z > Zgr \tag{2.26}$$

$$u(z) = \frac{1}{\mu_B}\frac{dP}{dx}\left(Zgr\frac{b}{2} - \frac{Zgr^2}{2} - \frac{b^2}{8}\right) \qquad z <= Zgr \tag{2.27}$$

Medelvärdesbildas hastighetsprofilen över tvärsnittet erhålls

$$\overline{U} = \frac{2}{b}\frac{1}{\mu_B}\frac{dP}{dx}\left(\int_{Zgr}^{\frac{b}{2}}\left(\frac{z^2}{2} - zZgr + Zgr\frac{b}{2} - \frac{b^2}{8}\right)dz + Zgr\left(Zgr\frac{b}{2} - \frac{Zgr^2}{2} - \frac{b^2}{8}\right)\right) \tag{2.28}$$

vilket ger:

$$\overline{U} = \frac{2}{b}\frac{1}{\mu_B}\frac{dP}{dx}\left(\left(\frac{1}{3}Zgr^3 - \frac{1}{24}b^3 + \frac{1}{4}Zgr\,b^2 - \frac{1}{2}Zgr^2 b\right) + \left(\frac{1}{2}Zgr^2 b - \frac{1}{2}Zgr^3 - \frac{1}{8}Zgr\,b^2\right)\right) \tag{2.29}$$

En förenkling av uttrycket med införande av vattentrycksgradienter istället för absoluta tryck ger följande (Wallner 1976):

$$\overline{U} = -\frac{\gamma_w b^2}{12\,\mu_B}\frac{dh}{dx}\left(1 - 3\frac{Zgr}{b} + 4\left(\frac{Zgr}{b}\right)^3\right) \tag{2.30}$$

där

$$Zgr = min\left[\frac{\tau_0}{\gamma_w\left|\frac{dh}{dx}\right|}, \frac{b}{2}\right] \tag{2.31}$$

Som synes förekommer kvoten Zgr/b i den icke-linjära delen av uttrycket för strömningshastigheten. Om vi övergår till följande:

$$Z = \frac{Zgr}{b} \tag{2.32}$$

och beaktar att

$$-\frac{dh}{dx} = \frac{h_0 - h_L}{L} \tag{2.33}$$

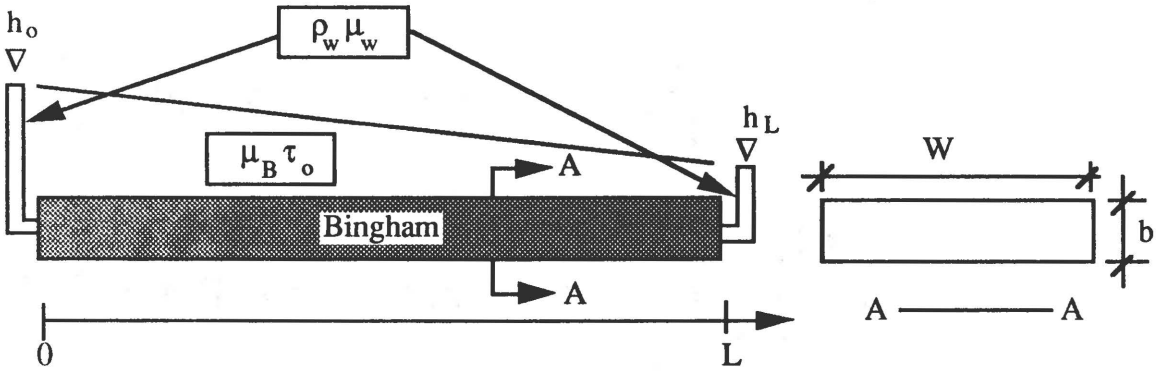
erhålls följande uttryck för flödet i en kanal helt fylld med en Binghamvätska (fig 2.2.4)

$$\frac{dX}{dt} = \frac{\rho_w g b^2 (h_o - h_L)}{12\,\mu_B(t)\,L}\left(1-3Z+4Z^3\right) \tag{2.34}$$

där Z står för halva Binghampluggens tjocklek delat med b och beräknas enligt nedan:

$$Z = \min\left(\frac{\tau_o(t)}{b\,\rho_w\,g\left|\frac{(h_o-h_L)}{L}\right|},\ \frac{1}{2}\right) \tag{2.35}$$

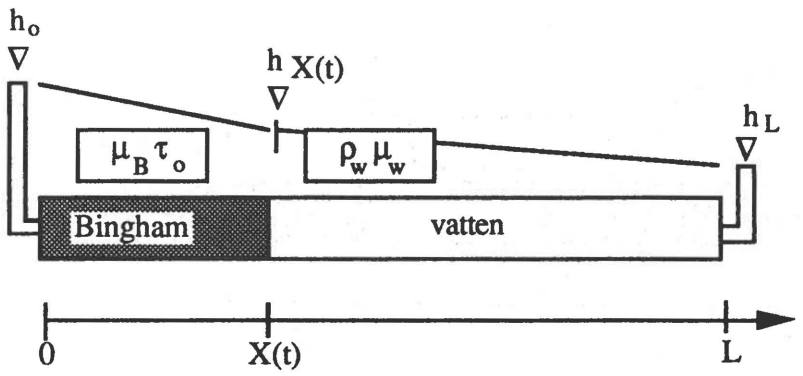
Injekteringsmedels strömningsegenskaper förändras vanligen under injekteringsförloppet ($\mu_B(t)$ och $\tau_o(t)$) vilket i detta fall innebär att viskositeten och skjuvhållfastheten varierar med tiden. Detta medför att flödeshastigheten (enligt uttryck 2.34 och 2.35) ändras med tiden.



Figur 2.2.4 Horisontell endimensionell kanal helt fylld med en Binghamvätska. Kanalen har öppningen b och bredden W samt utsätts för vattentryckshöjderna h0 och hL.

Strömning av Bingham och Newtonsk vätska i samma kanal

Som tidigare nämnts sker injektering vanligtvis i närvaro av vatten. För att kunna simulera injekteringar måste alltså även effekterna av vatten i kanalerna medtagas. Uttrycken för strömningshastigheten i en kanal fylld med både vatten och en Binghamvätska finns även härledda i Hässler et al 1986.



Figur 2.2.5: Horisontell endimensionell kanal helt fylld med vatten och en Binghamvätska. Kanalen har öppningen b och bredden W samt utsätts för vattentryckshöjderna h_0 och h_L.

I de olika områdena 0 till X (injekteringsmedel) och X till L (vatten) kommer tryckgradienten att vara konstant. Antagandet om konstant tvärsnitt och att vätskorna är inkompressibla medför att flödet är lika stort i båda kanaldelarna och därmed att medelhastigheterna är lika. Vid fronten (gränsskiktet mellan injekteringsmedel och vatten) kommer en språngvis ändring av tryckgradienten att ske. Vi kan därför använda ekvation (2.34) mellan x=0 och x=X(t) samt ekvation (2.16) mellan x=X(t) och x=L. Vi får följande ekvationssystem:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{\rho_w g b^2 (h_o - h_{X(t)})}{12 \mu_B(t) X(t)} (1 - 3Z + 4Z^3) \tag{2.36}$$

$$\frac{dx}{dt} = \frac{\rho_w g b^2 (h_{X(t)} - h_L)}{12 \mu_w (L - X(t))} \tag{2.37}$$

Elimineras $h_{X(t)}$ erhålls strömningshastigheten i kanalen enligt följande:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{\rho_w g b^2 (h_o - h_L)}{12 \left(X(t) \left(\frac{\mu_B(t)}{1 - 3Z + 4Z^3} - \mu_w \right) + L \mu_w \right)} \tag{2.38}$$

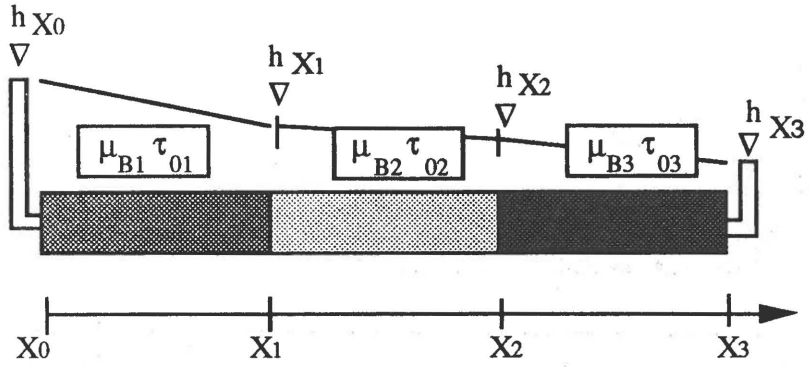
där Z liksom tidigare står för halva Binghampluggens tjocklek delat med b och beräknas enligt nedan:

$$Z = \min \left(\frac{\tau_o(t)}{b \rho_w g \left| \frac{(h_o - h_{X(t)})}{X(t)} \right|}, \frac{1}{2} \right) \tag{2.39}$$

Det bör dock observeras att $h_x(t)$ inte enkelt kan beräknas (se kap. 2.2.4).

Flera olika vätskor i samma kanal

Under injekteringen kan blandning av vatten och injekteringsmedel förväntas ske. Detta innebär att flera olika injekteringsmaterial kan finnas i en och samma kanal.



Figur 2.2.6 Horisontell endimensionell kanal fylld med flera Binghamvätskor. Kanalen har öppningen b och bredden 1 samt utsätts för vattentryckshöjderna h_{X0} och h_{X3}.

Flödet Q (eller hastigheten) är gemensamt för alla tvärsnitt. Detta leder till följande tre uttryck:

$$Q = \frac{\rho_w g\, b^3}{12\,\mu_{B_1}} \frac{(h_{X_0}-h_{X_1})}{(X_1-X_0)}\left(1-3Z_1+4Z_1^3\right)$$

$$Q = \frac{\rho_w g\, b^3}{12\,\mu_{B_2}} \frac{(h_{X_1}-h_{X_2})}{(X_2-X_1)}\left(1-3Z_2+4Z_2^3\right)$$

$$Q = \frac{\rho_w g\, b^3}{12\,\mu_{B_3}} \frac{(h_{X_2}-h_{X_3})}{(X_3-X_2)}\left(1-3Z_3+4Z_3^3\right) \qquad (2.40)$$

För den N:te delen gäller alltså:

$$Q = \frac{\rho_w g\, b^3}{12\,\mu_{B_N}} \frac{(h_{X_{N-1}}-h_{X_N})}{(X_N-X_{N-1})}\left(1-3Z_N+4Z_N^3\right) \qquad (2.41)$$

Eliminering av h_{X1} till h_{XN-1} ger följande uttryck oberoende av antalet olika Binghamvätskor i kanalen:

$$Q = \frac{\rho_w g\, b^3}{12} \frac{(h_{X_0}-h_{X_N})}{\sum_{i=1}^{N} \frac{(X_i-X_{i-1})\mu_{B_i}}{\left(1-3Z_i+4Z_i^3\right)}} \qquad (2.42)$$

där Z_i står för halva Binghampluggens tjocklek delat med kanalöppningen och kan beräknas ur:

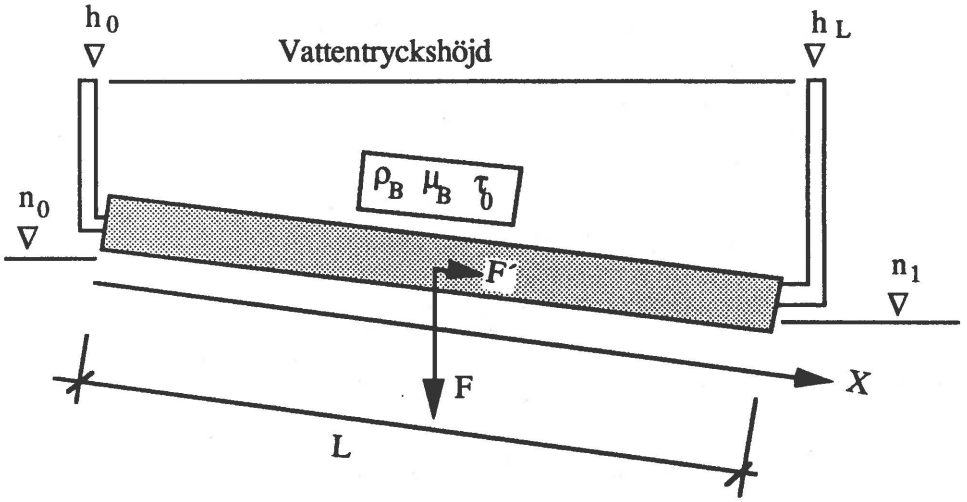
$$Z_i = \min\left(\frac{\tau_{o_i}(t)}{b\,\rho_w\, g \left|\frac{(h_{X_{i-1}}-h_{X_i})}{(X_i-X_{i-1})}\right|}, \frac{1}{2}\right) \qquad (2.43)$$

På samma sätt som vid närvaro av en Binghamvätska och vatten så är $(h_{X_{i-1}}-h_{X_i})$ ej enkelt bestämbar (se kap. 2.2.4).

Observera att om en eller flera sektioner av kanalen är fyllda med vatten så innebär det endast att summans nämnare för dessa delar blir 1 och att μ_B ersätts med vattnets viskositet μ_W.

2.2.2 En lutande endimensionell kanal

I en tredimensionell bergmassa är givetvis lutande sprickplan snarare en regel än ett undantag. Lutande sprickplan innebär lutande kanaler vilket innebär att densitetsskillnader mellan injekteringsmedlet och vatten påverkar strömningsförloppet. Nedan härleds fallet med flera Binghamvätskor i en kanal som i sina ändpunkter är påverkad av olika vattentryckshöjder. Vi börjar dock att betrakta en lutande kanal belägen under en horisontell vattenyta fylld med en Binghamvätska (se fig 2.2.7).



Figur 2.2.7 Lutande endimensionell kanal helt fylld med en Binghamvätska. Kanalen har öppningen b och bredden 1 och är belägen under en horisontell vattenyta.

Om densiteten på injekteringsmedlet är skild från vattnets så kommer skjuvspänningar att uppstå längs kanalens sidor. Om dessa skjuvspänningar överskrider injekteringsmedlets skjuvhållfasthet så kommer injekteringsmedlet att strömma i kanalen. Strömningsriktningen beror av om injekteringsmedlet är lättare eller tyngre än vattnet. All strömning orsakas av tryckgradienter. Trots att trycknivåerna längs kanalens ändpunkter är lika så finns det alltså en tryckgradient inne i kanalen. Denna tryckgradient kan härledas enligt följande:

$$F = (\rho_B - \rho_w)\, A\, L\, g \tag{2.44}$$

där A L är kanalens volym och F är den vertikalt riktade kraften orsakad av densitetsskillnaden. Den framåtdrivande kraften F´ kan skrivas som:

$$F' = (\rho_B - \rho_w)\, A\, L\, g\, \frac{(n_0 - n_1)}{L} \tag{2.45}$$

Den framåtdrivande kraften F´ motsvaras av följande tryckskillnad:

$$P = \frac{F'}{A} \Rightarrow \Delta P = (\rho_B - \rho_w) L g \frac{(n_0 - n_1)}{L} \tag{2.46}$$

För att följa tidigare använd konvention där gradienten uttryckts som meter vattenpelare per meter så måste tryckskillnaden omvandlas till meter vattenpelare enligt

$$h = \frac{P}{\rho_w g} \tag{2.47}$$

$$\Delta h = \frac{(\rho_B - \rho_w) L}{\rho_w} \frac{(n_0 - n_1)}{L} \tag{2.48}$$

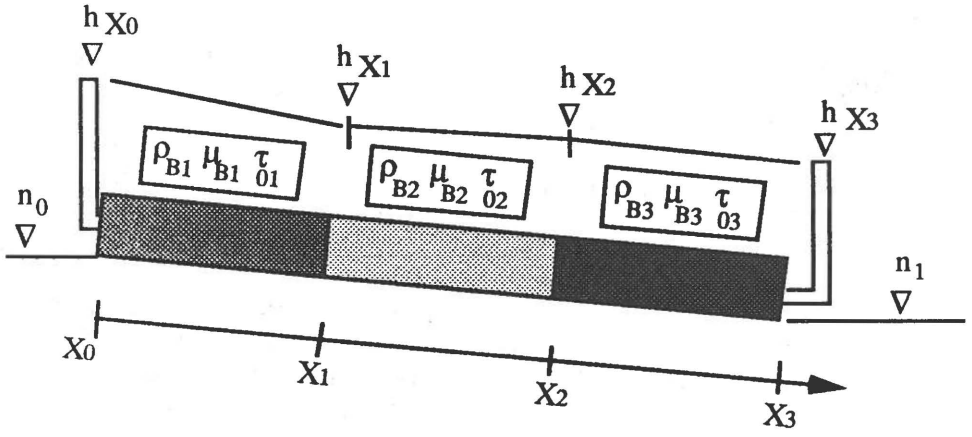
Gradienttillskottet av kanalens lutning och densitetsskillnaden är alltså

$$\frac{dh}{dX} = \frac{(\rho_B - \rho_w)}{\rho_w} \frac{(n_0 - n_1)}{L} \tag{2.49}$$

Vid lutande kanal, helt fylld av en Binghamvätska, ändras alltså det tidigare uttrycket för hastigheten till

$$\frac{dx}{dt} = \frac{\rho_w g b^2 \left((h_o - h_L) + \frac{(\rho_B - \rho_w)(n_0 - n_1)}{\rho_w} \right)}{12 \mu_B (t) L} (1 - 3Z + 4Z^3) \tag{2.50}$$

Flera olika injekteringsmedel kan fortfarande förväntas i en enskild kanal.



Figur 2.2.8 Lutande endimensionell kanal fylld med flera Binghamvätskor. Kanalen har öppningen b och bredden 1 samt utsätts för vattentryckshöjderna h_{X0} och h_{X3}.

För den första sektionen skulle alltså följande tillskott till gradienten erhållas (se fig 2.2.8).

$$\frac{\Delta h_1}{X_1 - X_0} = \frac{\frac{(n_0 - n_1)}{(X_3 - X_0)\rho_w} (\rho_{B\,1} - \rho_w)(X_1 - X_0)}{(X_1 - X_0)} \tag{2.51}$$

Sektionsvis erhålls alltså följande tre uttryck för flödet:

$$Q = \frac{\rho_w g\, b^3}{12\,\mu_{B1}} \frac{\left(h_{X_0} - h_{X_1} + \frac{(n_0 - n_1)}{(X_3 - X_0)\,\rho_w} (\rho_{B1} - \rho_w)(X_1 - X_0) \right)}{(X_1 - X_0)} (1 - 3Z_1 + 4Z_1^3)$$

$$Q = \frac{\rho_w g\, b^3}{12\,\mu_{B2}} \frac{\left(h_{X_1} - h_{X_2} + \frac{(n_0 - n_1)}{(X_3 - X_0)\,\rho_w} (\rho_{B2} - \rho_w)(X_2 - X_1) \right)}{(X_2 - X_1)} (1 - 3Z_2 + 4Z_2^3)$$

$$Q = \frac{\rho_w g\, b^3}{12\,\mu_{B3}} \frac{\left(h_{X_2} - h_{X_3} + \frac{(n_0 - n_1)}{(X_3 - X_0)\,\rho_w} (\rho_{B3} - \rho_w)(X_3 - X_2) \right)}{(X_3 - X_2)} (1 - 3Z_3 + 4Z_3^3) \qquad (2.52)$$

För den N:te delen gäller återigen alltså:

$$Q = \frac{\rho_w g\, b^3}{12\,\mu_{BN}} \frac{\left(h_{X_{N-1}} - h_{X_N} + \frac{(n_0 - n_1)}{(X_{max} - X_0)\,\rho_w} (\rho_{BN} - \rho_w)(X_N - X_{N-1}) \right)}{(X_N - X_{N-1})} (1 - 3Z_N + 4Z_N^3) \qquad (2.53)$$

där ρ_{BN} står för densiteten hos den N:te Binghamvätskan och ρ_w för vattnets densitet.

Om vi på samma sätt som innan eliminerar h_{X1} till h_{XN-1} erhålls följande uttryck:

$$Q = \frac{\rho_w g\, b^3}{12} \frac{\left(h_{X_0} - h_{X_N} + \frac{(n_0 - n_1)}{(X_N - X_0)\,\rho_w} \sum_{i=1}^{N} (X_i - X_{i-1})(\rho_{Bi} - \rho_w) \right)}{\sum_{i=1}^{N} \frac{(X_i - X_{i-1})\mu_{Bi}}{(1 - 3Z_i + 4Z_i^3)}} \qquad (2.54)$$

där Z_i skulle kunna beräknas ur följande:

$$Z_i = \min \left(\frac{\tau_{o_i}(t)}{b\,\rho_w\, g \left| \frac{\left(h_{X_{i-1}} - h_{X_i} + \frac{(n_0 - n_1)}{(X_N - X_0)\,\rho_w} (\rho_{Bi} - \rho_w)(X_i - X_{i-1}) \right)}{(X_i - X_{i-1})} \right|} , \frac{1}{2} \right) \qquad (2.55)$$

På samma sätt som tidigare så är dock $(h_{X_{i-1}} - h_{X_i})$ ej enkelt bestämbar vilket behandlas i kapitel 2.2.4.

Lutningen spelar liten roll för strömningshastigheten vid stora påförda tryckgradienter i närheten av en injekteringspunkt. Betydelsen ökar i områden längre bort där den påförda tryckgradientens effekt är mindre. (se kap. 6)

2.2.3 Hopkoppling av flera endimensionella kanaler

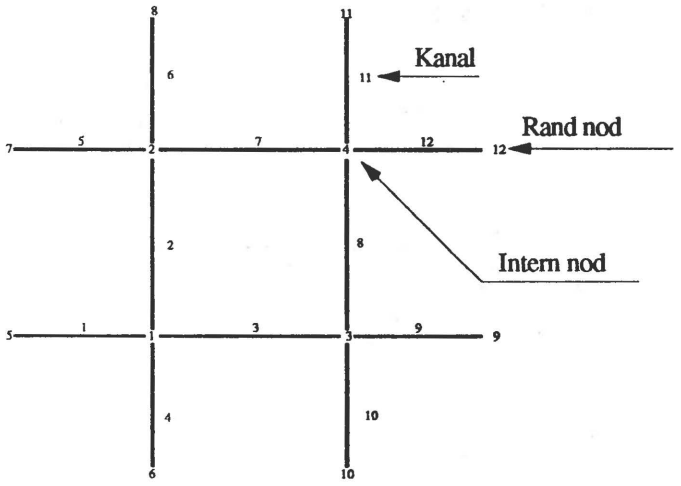
Om kanaler sammanbinds i knutpunkter erhålls ett kanalnätverk. Kanalnätverk är relativt enkla att behandla matematiskt och har stor flexibilitet. Ett kanalnätverk kan till exempel byggas upp för att simulera en bergmassas konduktiva sprickplan och hur dessa är sammankopplade. De enskilda sprickplanens egenskaper kan lätt varieras genom manipulationer med kanaldimensionerna och kanaltätheten. Skärningslinjerna mellan sprickplanen representeras av för flera sprickplan gemensamma kanaler.

Randvillkor

Randvillkoren för en bergmassa är vattentryckshöjderna längs bergmassans yttersidor. Om någon del står i kontakt med luft (bergrum eller dylikt) så är randvillkoret för dessa delar en tryckhöjd motsvarande den geometriska höjden. Vid injekteringen påförs ett villkor motsvarande injekteringstrycket i injekteringspunkten eller injekteringspunkterna.

Beräkning av obekanta tryck i knutpunkter

För att illustrera hur beräkningen går till och hur ekvationssystemet sätts upp har nedanstående exempel använts (se fig.2.2.9).



Figur 2.2.9: Ett kanalnät bestående av fyra interna noder (knutpunkter) och 8 randnoder.

Horisontellt fall

Tryckberäkningen baseras på villkoret att summan av flödet in till en knutpunkt (nod) är noll. Vätskeflödet från en horisontell kanal till en nod kan uttryckas enligt följande:

$$Q = k\,A\,(h_0 - h_L) = K\,(h_0 - h_L) \tag{2.56}$$

Trycken i randknutpunkterna är konstanta (randvillkor) under injekteringen. Om vi förutsätter att kanalnätet är horisontellt och betraktar knutpunkt 1 så kan följande samband uppställas (se fig 2.2.9):

$$(h_5 - h_1)\,K_1 + (h_2 - h_1)\,K_2 + (h_3 - h_1)\,K_3 + (h_6 - h_1)\,K_4 = 0 \tag{2.57}$$

h_N står för tryckhöjden i knutpunkten N och K_N står för kanal N´s konduktivitet multiplicerat med dess tvärsnittsarea.

Uttrycket skrivs lätt om till:

$$- h_1 (K_1 + K_2 + K_3 + K_4) + h_2 K_2 + h_3 K_3 = - h_5 K_1 - h_6 K_4 \qquad (2.58)$$

Behandlas de återstående tre interna knutpunkterna på samma sätt så erhålls följande tre ekvationer:

$$- h_2 (K_5 + K_6 + K_7 + K_2) + h_1 K_2 + h_4 K_7 = - h_7 K_5 - h_8 K_6$$

$$- h_3 (K_3 + K_8 + K_9 + K_{10}) + h_1 K_3 + h_4 K_8 = - h_9 K_9 - h_{10} K_{10}$$

$$- h_4 (K_7 + K_{11} + K_{12} + K_8) + h_2 K_7 + h_3 K_8 = - h_{11} K_{11} - h_{12} K_{12} \qquad (2.59)$$

Dessa fyra ekvationer bildar tillsammans följande symmetriska ekvationssystem:

$$\begin{pmatrix} -(K_1+K_2+K_3+K_4) & K_2 & K_3 & 0 \\ K_2 & -(K_5+K_6+K_7+K_2) & 0 & K_7 \\ K_3 & 0 & -(K_3+K_8+K_9+K_{10}) & K_8 \\ 0 & K_7 & K_8 & -(K_7+K_{11}+K_{12}+K_8) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \\ h_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -h_5K_1-h_6K_4 \\ -h_7K_5-h_8K_6 \\ -h_9K_9-h_{10}K_{10} \\ -h_{11}K_{11}-h_{12}K_{12} \end{pmatrix} \qquad (2.60)$$

Tryckhöjderna (m vattenpelare) h_1,h_2,h_3 och h_4 är våra obekanta. Konduktiviteten i kanaler helt fyllda med vatten ändras inte vid tryckförändringar (laminär strömning av Newtonvätska) och beräknas enligt (se ekv. 2.16):

$$k = \frac{\rho_w g\, b^2}{12 \mu_w L} \qquad (2.61)$$

De i ekvationssystemet använda K-beteckningarna motsvaras alltså vid vattenfyllda kanaler av:

$$K = \frac{\rho_w g\, b^3 W}{12 \mu_w L} \qquad (2.62)$$

där W står för kanalens bredd.

Det generella uttrycket för flödeskonduktiviteten i en horisontell kanal är alltså (se ekv. 2.42):

$$K = \frac{\rho_w g\, b^3 W}{12 \sum_{i=1}^{N} \frac{(X_i - X_{i-1}) \mu_{B_i}}{(1 - 3Z_i + 4Z_i^3)}} \qquad (2.63)$$

Observera att Z varierar med flödet och med vätskans egenskaper. Till skillnad från fallet med endast vatten i kanalen så är alltså problemet ickelinjärt.

Lutande fall

Om kanalen lutar så blir det hela något mera komplicerat. Det tidigare redovisade uttrycket för flödet i en lutande kanal (ekv. 2.54) kan på följande sätt delas upp i två delar där den ena delen är oberoende av tryckhöjden i kanalens ändar:

$$Q = \frac{\rho_w g\, b^3 W}{12} \frac{(h_{X_0} - h_{X_N})}{\sum_{i=1}^{N} \frac{(X_i - X_{i-1})\mu_{B\,i}}{(1-3Z_i+4Z_i^3)}} + \frac{\rho_w g\, b^3 W}{12} \frac{\frac{(n_0 - n_1)}{(X_N - X_0)\,\rho_w} \sum_{i=1}^{N} (X_i - X_{i-1})(\rho_{B\,i} - \rho_w)}{\sum_{i=1}^{N} \frac{(X_i - X_{i-1})\mu_{B\,i}}{(1-3Z_i+4Z_i^3)}} \tag{2.64}$$

Vätskeflödet från en lutande kanal till en nod kan alltså uttryckas enligt följande:

$$Q = K\,(h_0 - h_L) + C \tag{2.65}$$

Om vi på samma sätt som tidigare betraktar knutpunkt 1 i figur 5.6 så erhålls följande:

$$(h_5 - h_1)\,K_1 + C_1 + (h_2 - h_1)\,K_2 + C_2 + (h_3 - h_1)\,K_3 + C_3 + (h_6 - h_1)\,K_4 + C_4 = 0 \tag{2.66}$$

Detta innebär endast att en term tillkommer till högerledet i ekvationssystemet enligt nedan:

$$-h_1\,(K_1 + K_2 + K_3 + K_4) + h_2\,K_2 + h_3\,K_3 = -h_5\,K_1 - h_6\,K_4 - C_1 - C_2 - C_3 - C_4 \tag{2.67}$$

Om vätskan är icke-Newtonsk ändrar som tidigare nämnts tyvärr kanalen sina konduktiva egenskaper vid tryckförändringar. Detta innebär att ekvationssystemet blir olinjärt. Olinjära ekvationssystem kan dock exempelvis lösas med iterativa metoder. Beräkningarna itereras (upprepas) då tills tryck och konduktivitets-tillstånden konvergerar (förblir oförändrade mellan två beräkningsomgångar).

2.2.4 Bestämning av Binghampluggens tjocklek

Pluggtjockleken (2Zb) kan bestämmas på flera olika sätt. Gemensamt för alla kanalsektioner oberoende av innehåll är strömningshastigheten. Med hjälp av teorin för lösning av tredjegradsekvationer så kan värdet på Z i de olika kanalsektionerna explicit beräknas ur hastigheten. Betrakta följande ekvationssystem (formel 2.31 och 2.34):

$$\frac{dx}{dt} = \frac{\rho g b^2}{12\mu_B} \frac{dh}{dx} (1-3Z+4Z^3) \tag{2.68}$$

$$\frac{dh}{dx} = \frac{\tau_0}{\rho_w g b Z} \tag{2.69}$$

(gäller så länge Z<0.5 vilket motsvaras av att strömning sker)

Om dh/dx elimineras erhålls

$$\frac{dx}{dt} = \frac{b\tau_0}{12\mu_B} \frac{\left(1-3Z+4Z^3\right)}{Z} \tag{2.70}$$

Om ekvation (2.70) omskrivs erhålls följande tredjegradsekvation

$$4\frac{b\tau_0}{12\mu_B} Z^3 - \left(\frac{dx}{dt} + 3\frac{b\tau_0}{12\mu_B}\right) Z + \frac{b\tau_0}{12\mu_B} = 0 \tag{2.71}$$

$$Z^3 - 3\left(\frac{dx}{dt}\frac{\mu_B}{b\tau_0} + \frac{1}{4}\right) Z + 2\frac{1}{8} = 0 \tag{2.72}$$

Det algebraiska uttrycket för lösningen av en tredjegradsekvation beror av värdet på koefficienterna (se någon matematisk handbok). I detta fall gäller alltid så länge strömning pågår följande :

$$\left(-\left(\frac{dx}{dt}\frac{\mu_B}{b\tau_0} + \frac{1}{4}\right)\right)^3 + \left(\frac{1}{8}\right)^2 < 0 \tag{2.73}$$

Med utnyttjande av ovanstående och att 0<Z<0.5 så gäller:

$$Z_i = 2\sqrt{\frac{dx}{dt}\frac{\mu_{B_i}}{b\tau_{0_i}} + \frac{1}{4}} \cos\left(\frac{\pi}{3} + \frac{1}{3}\arccos\left(\frac{1}{8\left(\frac{dx}{dt}\frac{\mu_{B_i}}{b\tau_{0_i}} + \frac{1}{4}\right)^{1.5}}\right)\right) \tag{2.74}$$

Observera att övriga två rötter ej är giltiga då de inte ligger i intervallet 0 till 0.5. Detta uttryck gäller generellt oavsett antalet olika Binghamvätskor i kanalen och baseras på att vätskorna i alla kanaldelar har samma strömningshastighet. Ett liknande generellt uttryck kan dock ej erhållas utifrån kända tryck i kanalens ändpunkter då tryckgradienten varierar inom kanalen med vätskornas skjuvhållfasthet och viskositet.

Om man nöjer sig med att tillåta endast en Binghamvätska i kanalen åt gången så finns det dock flera möjligheter att beräkna Z utifrån kända tryck i kanalens ändpunkter. Som exempel kan kan uttryck 2.36, 2.37 och 2.39 kombineras vilket leder till följande:

$$Z = \tau_o \frac{\left(4\,\mu_w (L - X)\, Z^3 + \mu_w (L - X) + \mu_B X\right)}{3\tau_o\,\mu_w (L - X) + \rho_w\, g\, b\, \mu_B |h_o - h_L|} \tag{2.75}$$

Z måste dock beräknas iterativt. Möjligen kan ett liknande explicit uttryck som det när strömningshastigheten utnyttjades tas fram. Nyttan måste dock anses som begränsad då uttrycket bara gäller vid närvaro av en Binghamvätska.

Slutgiltigen kan Z explicit uttryckas som funktioner av hastigheten och kända tryck i kanalens ändpunkter:

$$Z = \frac{X\, b\tau_o}{\rho_w\, g\, b^2\, |h_o - h_X|} \tag{2.76}$$

$$h_X = h_L + \frac{dX}{dt}\frac{12\mu_w(L - X)}{\rho_w\, g\, b^2} \tag{2.77}$$

$$Z = \frac{X\, b\tau_o}{\rho_w\, g\, b^2\, |h_o - h_L| - 12\left|\frac{dX}{dt}\right| \mu_w(L - X)} \tag{2.78}$$

Observera att uttrycket 2.78 bara gäller vid närvaro av en och endast en Binghamvätska.

Vid det enklaste fallet med helt fylld kanal (h_X=h_L) så kan tryckgradienten direkt beräknas och utnyttjas vid beräkningen av Z.

2.3 Utvecklad numerisk modell

2.3.1 Inledning

Ingenjörsverksamhet brukar bestå av att på förhand beräkna konsekvenser av olika tillvägagångssätt och handlingar. Hittills har dock valet av injekteringsförfarande i huvudsak varit erfarenhetsbaserad. En av möjligheterna till ökad förståelse och provning av injekteringsmetoder är att simulera injekteringsförlopp i datamaskiner. I en sådan simuleringsmodell kan effekter av för injektering viktiga parametrar bedömas samtidigt som den kan fungera som provbänk för nya metoder och idéer. Det bör dock nämnas att här utvecklat program är en forskningsversion i huvudsak utvecklat för att prova beräkningsmöjligheterna och för att jämföra beräkningsresultat med uppmätta förlopp i modellförsök. Programmet har dock även i kapitel 6 använts för att prova klassificeringstankarna presenterade i kapitel 5. Källkoden för en Macintosh-version (MPW 3.0 och MacFortran/MPW) till beräkningsdelen av det utvecklade programmet finns fullständigt redovisad i appendix.

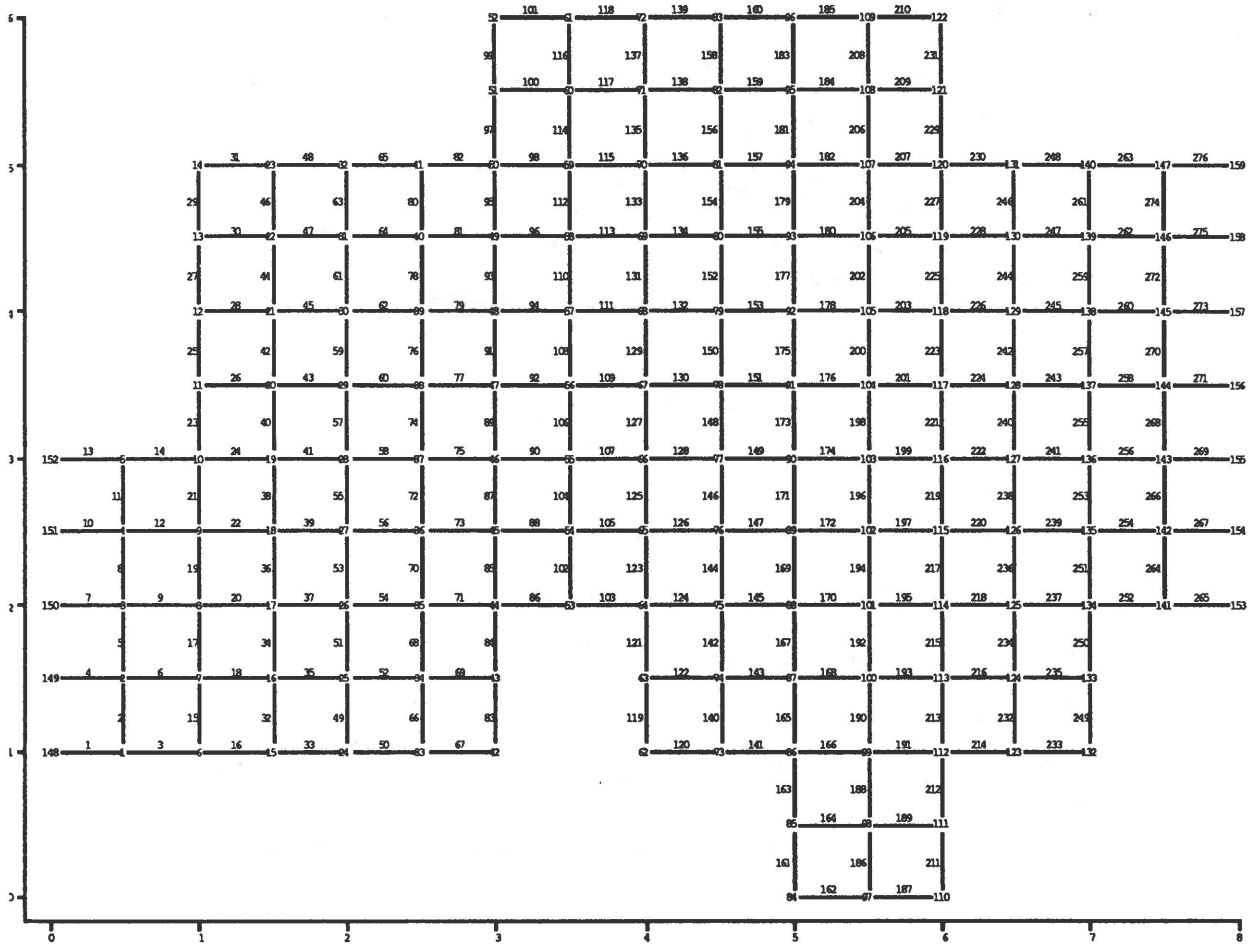
2.3.2 Programmets beräkningsmöjligheter

Målsättningen har inte varit att utveckla ett industriellt användbart komplett programpaket för generering, beräkning och uppföljning av injektering i tredimensionella diskreta bergvolymer. Insatserna har i stället koncentrerats mot beräkningsdelen av ett sådant framtida system. Ett enkelt fristående program klarar dock att generera indata för enkla kanalsystem och att grafiskt redovisa utdata. Detta kan användas för studier av effekter av varierande sprickegenskaper, injekteringsmedel och grundvattenförhållanden. Varierande grundvattenförhållanden innefattar även effekter av exempelvis avsiktliga manipulationer av grundvattetrycken i området för att förändra injekteringsresultatet. Beräkningsprogrammet kan användas för att bättre förstå hur man bäst utför en injektering i ett speciellt fall samt allmänt för att på ett tidigt stadium erhålla en bild av vilka injekteringsparametrar som är känsliga för att erhålla önskat resultat i en given bergmassa förenklad till enstaka sprickplan. Programmet beräknar och lagrar även tryck och flödesdata som kan jämföras med uppmätta data från injekteringar.

Programmet är baserat på tidigare redovisad matematik. Det förutsätts alltså att all strömning är laminär samt att kanaldimensionerna inte ändras av injekteringen. Om vatten och injekteringsmedel blandas i en knutpunkt erhåller vätskan som lämnar knutpunkten egenskaper baserade på graden av utspädning. Ekvationssystemet för tryckberäkningen packas med så kallad "sky-line" metodik och löses enligt Bathe (1982).

2.3.3 Övergripande metodik

Beräkningarna baseras på att bergmassans konduktiva delar kan beskrivas som ett nätverk av endimensionella kanaler. Varje kanal kan ha individuell längd, bredd och öppning. Bergmassans kanaler förutsätts initialt vattenfyllda. Grundvattentrycken runt studerad bergmassa utgör randvillkor och bestäms av indata. Programmet klarar både Bingham och Newtonska vätskor med tidsvarierande egenskaper. Idag kan endast indata genereras beskrivande enstaka sprickplan (se figur 2.3.1). Sprickplanen kan dock ha utsträckning i alla tre dimensionerna. Kanalerna i sprickplanet kan ges individuella tvärsnittsegenskaper.



Figur 2.3.1: Exempel på genererat sprickplan. Sprickplanet kan tillåtas luta i rymden. Sprickplanet kan även veckas i rymden.

2.3.4 Indataproduktion

Vanligtvis vid strömningsberäkningar så intresserar man sig för sammanlagda effekter typ genomströmmande vattenmängd osv. I detta fall måste dock ett flertal fronter följas under det simulerade tidsförloppet. Datastrukturen i programmet blir därför komplicerad. För att i någon mån förenkla används en datastruktur uppdelad på ett geometriskt, oföränderligt block och ett flödesberoende, föränderligt block. Det geometriska, oföränderliga blocket utgör indata till simuleringsprogrammet.

Produktion av indata till kanalnätsprogramvara är även i normalfallet komplicerad. I här utvecklad programvara kan indata matas in direkt i en textfil. Mängden indata blir dock stor redan vid enkla nätverk med ett fåtal kanaler. För att reducera inmatningsarbetet har därför ett speciellt program utvecklats som med hjälp av ett grafiskt användargränssnitt omvandlar minimum av rådata till erforderliga komplicerade indata. I programmet som är utvecklat för att användas på macintoshdatorer ges också möjligheter till uppritning av producerade nätverk för enkel

kontroll. Detta minskar risken för inmatningsfel och minskar tidsåtgången väsentligt. Programmet kan också redovisa beräkningsresultat.

2.3.5 Geometriskt datablock

Nätverket är uppdelat i kanaler och knutpunkter. Knutpunkterna kan vara randknutpunkter eller interna knutpunkter. Antalet interna knutpunkter bestämmer storleken på ekvationssystemet som måste lösas i tryckberäkningsdelen. Varje knutpunkt är i kontakt med ett variabelt antal kanaler. Knutpunkter och kanaler är numrerade i skilda system. Interna knutpunkter har lägre nummer än randknutpunkter. Till varje intern knutpunkt lagras en vektor som innehåller numren på de kanaler som står i direkt kontakt med knutpunkten. Antagna vattentryck lagras kopplade till respektive randknutpunkt. Till varje kanal lagras i sin tur data för kanalens ändpunktskoordinater i ett tredimensionellt ortonormerat koordinatsystem samt data för vilka knutpunkter som är kopplade till kanalen. Vidare finns data på kanalens längd, bredd och öppning lagrade.

Om så önskas kan även en del av randen definieras som ett rum eller en bergsida. Ovan beskrivna datastruktur räcker i så fall för att beräkna vattenströmningen genom nätverket till det definierade rummet innan en injektering. Vid injekteringen påförs nya tryck och därmed ändras den ursprungliga trycksituationen. För att kunna räkna på inströmmande vatten före och efter en injektering lagras därför data separat för de randknutpunkter som skall erhålla nya tryck. Detta innebär att det är enkelt att beräkna inströmmande vattenflöde efter avslutad injektering och därmed teoretiskt beräkna injekteringens effektivitet.

Vidare förutsätts injekteringsmedlets reologiska egenskaper och hur de ändras med tiden som känt. Vid injekteringsmedel av Binghamtyp beskrivs, i nuvarande programversion, de tidsberoende reologiska egenskaperna med två funktioner enligt $\tau_0=k1+k2*t^{k3}$ och $\mu=c1+c2*t^{c3}$ där k1, k2 och k3 respektive c1, c2 och c3 utgör indata till beräkningarna. Parametern t står för gången tid i sekunder sedan injekteringsmedlet blandades (injekteringens start). Värden på parametrarna kan erhållas ur mätningar beskrivna i kapitel 3.

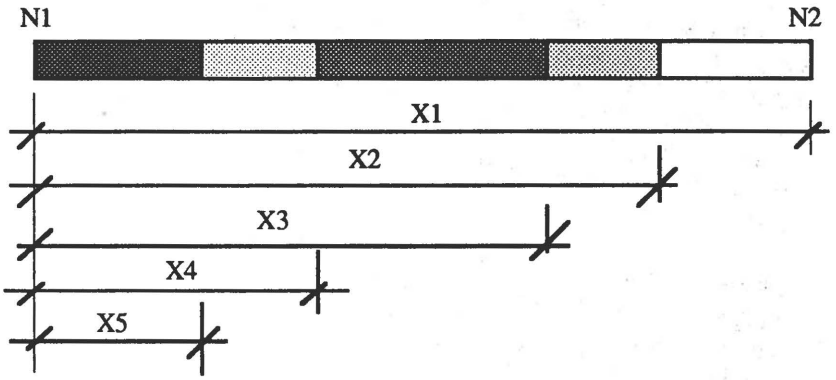
2.3.6 Tidsberoende, föränderligt datablock

Som tidigare nämnts skiljer sig detta program från traditionella flödesberäkningsprogram. För att klara den nödvändiga loggningen och uppföljningen av vad som händer under injekteringen kompletteras det tidigare nämnda konstanta geometriska datablocket med ett föränderligt, tidsberoende datablock.

Under injekteringens gång fylls kanaler och fronter propagerar in i kanalsystemet. Kanaler som nåtts av en injekteringsfront måste initieras. Injekteringsmedel späds i knutpunkter där både injekteringsmedel och vatten strömmar in (se kap 2.3.8).. Allt detta måste följas och dokumenteras under den simulerade injekteringens fortskridande.

För att följa hur injekteringsmedlet strömmar i en enskild kanal används en speciell datastruktur. Längs kanalen kan injekteringsmedlet vara utspätt i olika grad. Enligt tidigare härledd matematik (se kap. 2.2.2) så innebär detta att kanalen måste delas in i olika delsträckor. Till varje kanal finns därför två vektorer som innehåller data om varje delsträckas läge och utspädningsgrad. Om vektorerna tänks ha fem positioner (maximalt

fem delsträckor med olika utspädning i en kanal) så innehåller lägesvektorn fem variabler här benämnda X1 till X5. Dessa beskriver hur kanalen är injekterad. Kanalen vet dessutom som tidigare nämnts numren på knutpunkterna i dess ändar. X1 innehåller alltid avståndet från den lägre numrerade knutpunkten till kanalens andra ände. X2 innehåller avståndet från den lägre numrerade kanaländen till injekteringsfronten närmast den högre numrerade kanaländen. Om X2 är noll innebär det att kanalen bara innehåller en vätska, antingen vatten eller ett injekteringsmedel. X3 innehåller avståndet från den lägre numrerade knutpunkten till fronten närmast X2 osv. Se figur 2.3.2.



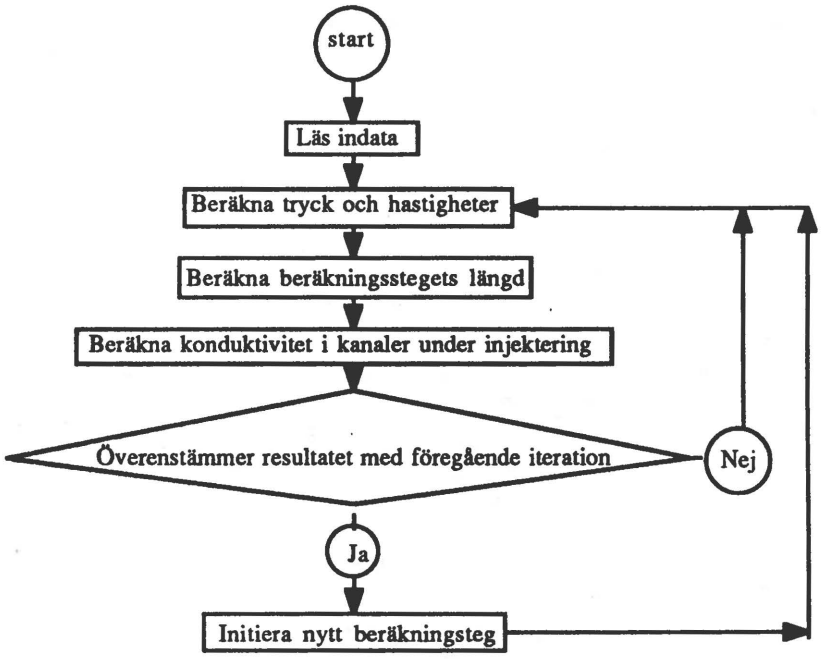
Figur 2.3.2: Kodning för kanal under injektering.

Till varje läge (X1,X2...) finns data om utspädningsgrad lagrad i den andra vektorn. I nuvarande version kan utspädningsgraden variera som heltal från noll till ett maxvärde där noll motsvarar rent vatten och maxvärdet rent injekteringsmaterial. Maxvärdet styr alltså antalet möjliga utspädningsgrader.

Strömningsriktningen betecknas som positiv om strömningen sker från ett lägre knutpunktsnummer mot ett högre. Kanaler som enbart innehåller vatten behöver ej specialgranskas då deras strömningsmotstånd ej ändras vid ändring av trycktillståndet över nätverket (laminär strömning). Kanalerna som innehåller injekteringsmedel uppför sig däremot olinjärt. För att underlätta och minimera beräkningarna lagras därför numren på alla kanaler som innehåller injekteringsmedel i en separat vektor. För att erhålla ett riktigt avslut av beräkningssteget när en front når en kanalände används i beräkningen längdsteg i kombination med tidssteg. Längdstegen varierar dock för kanalerna då strömningshastigheterna varierar. Detta innebär att varje kanal måste lagra separata längdsteg. För beräkningen av längdsteget är det endast av intresse att studera de kanaler som har fronter inom sig. Numren på dessa kanaler lagras därför i en separat vektor. Vidare lagras tryckskillnaden mellan kanalens ändar, strömningshastigheten vid ett tryck av 1 m vatten, senast beräknade strömningshastighet och strömningshastigheten från föregående beräkningssteg. En uppföljning av händelserna i knutpunkterna sker också. Numren på de knutpunkter som har nåtts av injekteringsmedel lagras i en separat vektor. Vidare lagras också senast beräknade tryck för varje knutpunkt. Den här beskrivna datastrukturen kan synas som onödigt komplicerad. Man måste dock betänka att detta är en forsknings och utvecklingsversion. Framtida programversioner kan säkerligen förenklas och förbättras med tanke på datastrukturen. Programmeringsspråket fortran är portabelt men har sina inbyggda begränsningar och en övergång till Pascal eller C skulle innebära en omedelbar förbättring.

2.3.7 Övergripande beräkningsgång

Programmet består av ett huvudprogram och ett antal subrutiner. När indata har erhållits görs först en beräkning av vattenförlusten för injekteringspunkterna och av hur mycket vatten som strömmar igenom nätet till eventuellt definierat rum vid trycktillståndet innan injekteringen har startat. Därefter ändras trycktillståndet så att det motsvarar injekteringssituationen och själva injekteringssimuleringen startar. Beräkningen avslutas med en ny beräkning av hur mycket vatten som strömmar igenom kanalnätet till eventuellt definierat rum vid de ursprungliga trycknivåerna. Detta för att på ett enkelt sätt ge möjligheter till en bedömning av den simulerade injekteringens effektivitet. Beräkningsgången sker i princip enligt fig 2.3.3.



Figur 2.3.3: Principiellt flödesschema för injekteringssimuleringen

2.3.8 Blandning av injekteringsmedel och vatten i kanalernas knutpunkter

Om både vatten och injekteringsmedel strömmar in i en knutpunkt förutsätts i denna programversion att injekteringsmedlet späds. Detta innebär att det från knutpunkten sker ett utflöde av ett nytt injekteringsmedel. Densiteten, skjuvhållfastheten och viskositeten hos detta "nya" injekteringsmedel erhålls genom linjär interpolation med hänsyn till volym och egenskaper på inströmmande medel. Det visar sig dock att antalet fronter snabbt blir mycket stort om antalet tillåtna injekteringsmedel är obegränsat. Detta innebär att längdstegen blir oacceptabelt korta med mycket lång exekveringstid som följd. I nuvarande version av programmet tillåts därför bara 10 olika utspädningsgrader.

2.3.9 Beräkning av tidssteg och använda iterationskriterier

Som tidigare nämnts lagras identifikationen för alla kanaler med fronter inom sig i en vektor. Det är dessa kanaler som används vid beräkningen av tidsstegets längd. För beräkning av tidsåtgången för en front att nå en knutpunkt används medelvärdet av hastigheten från föregående tidsstegs slut och strömningshastigheten vid det aktuella tidsstegs slut. Kanalen med kortast tid för en front att nå en knutpunkt bestämmer tidsstegets längd. Då flödet i kanalerna innehållande injekteringsmedel inte är en linjär funktion av tryckgradienten krävs ett iterativt förfarande där hela tryck och flödesberäkningen över kanalnätet upprepas till konvergens. Tre olika konvergenskriterier används. Innan ett nytt beräkningssteg påbörjas får skillnaden mellan fronternas lägen eller strömningshastigheten i någon kanal ej överstiga konvergenskriteriet. Skillnaden i tidsstegets längd får ej heller överstiga konvergenskriteriet. Konvergenskraven (beräkningsnoggrannheten) specificeras i indata till programmet.

2.3.10 Initiering av nytt beräkningssteg

Innan det nya beräkningssteget kan starta måste kanalernas tillstånd uppdateras. Erhållna strömningshastigheter vid det gamla beräkningsstegets slut och fronternas lägen permanentas för att erhålla en riktig start på nästa beräkningssteg. En viss lagring av en del nyttig information görs också. Aktuell tidpunkt tillsammans med tryck och flöde lagras för samtliga injekteringspunkter. Volymen förstört och utströmmat injekteringsmedel ackumuleras. Om någon front nådde en knutpunkt under det föregående tidssteget så lagras data om detta i en speciell fil. Givna indata innefattar tidpunkterna som skall specialgranskas vid utdatabearbetningen. Om någon sådan tidpunkt passerats lagras erforderliga data för en fullständig beskrivning av kanalnätets tillstånd. När den sista specificerade tidpunkten passerats avslutas beräkningen med en beräkning av genomströmmande vatten efter injekteringen vid den ursprungliga trycksituationen. Detta ger som tidigare nämnts möjligheter till att beräkna den simulerade injekteringens effektivitet.

2.4 Cirkulärcylindrisk strömning

2.4.1 Binghamströmning i cirkulärcylindriskt sprickplan

Strömningsekvationerna för strömning i en tvådimensionell spricka tas fram på samma sätt som i det endimensionella fallet. Genom att formulera kontinuitetssamband och komplettera dessa med konstitutiva samband fås motsvarande ekvationer för det tvådimensionella fallet.
Kontinuitetsekvationerna för massans bevarande blir:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\, b) + \rho \frac{\partial}{\partial x}(b\, \overline{U_x}) + \rho \frac{\partial}{\partial y}(b\, \overline{U_y}) = 0 \tag{2.79}$$

där $\overline{U_x}$, $\overline{U_y}$ är medelhastigheten i x respektive y-led och b är en funktion av x och y. Om sprickan och vätskan anses inkompressibla försvinner tidsderivatan som tidigare. Hastigheterna $\overline{U_x}$ och $\overline{U_y}$ kan beräknas genom att ytterligare generalisera hastighetsformlerna för plan endimensionell strömning av en Binghamvätska till (Gale 1982 och Wallner 1976):

$$\overline{U_x} = \frac{\gamma b^2}{12\,\mu}\left(-\frac{dh}{dx}\right)(1 - 3Z + 4Z^3)$$

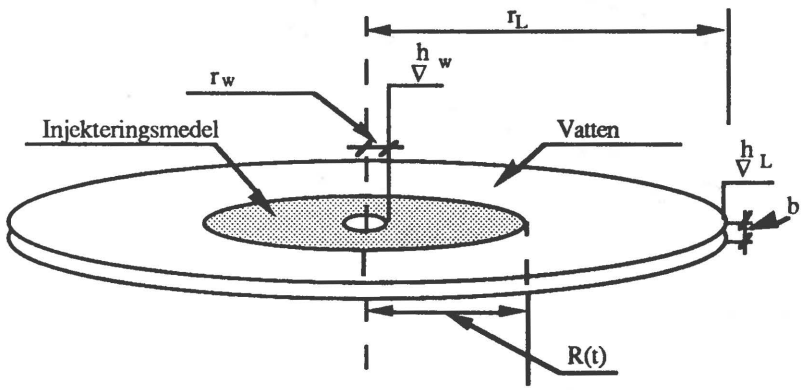
$$\overline{U_y} = \frac{\gamma b^2}{12\,\mu}\left(-\frac{dh}{dy}\right)(1 - 3Z + 4Z^3) \tag{2.80}$$

där

$$Z = min\left(\frac{\tau_0}{b\,\gamma}\frac{1}{\sqrt{\left(\frac{dh}{dx}\right)^2 + \left(\frac{dh}{dy}\right)^2}}, \frac{1}{2}\right) \tag{2.81}$$

För Newtonska vätskor är skjuvhållfastheten (τ_0) noll vilket leder till att även Z är noll.

En övergång till cylinderkoordinater förenklar uttrycken något. Den cirkulära symmetrin i det här fallet innebär förenklat att strömning endast sker i radiell riktning (se fig. 2.4.1).



Figur 2.4.1: Modell för strömning i horisontellt cirkulärcylindriskt sprickplan.

Den radiella strömningshastigheten längs en cirkel med radien r kan utryckas enligt :

$$\frac{dr}{dt} = -\frac{\rho_w g b^2}{12\mu_w}\frac{dh}{dr} \qquad \text{(vattenfylld del: } R(t) < r < r_L\text{)} \tag{2.82}$$

$$\frac{dr}{dt} = -\frac{\rho_w g b^2}{12\mu_B}\frac{dh}{dr}\left(1-3Z+4Z^3\right) \qquad \text{(injekterad del: } rw < r < R(t)\text{)} \tag{2.83}$$

Strömningshastigheten och gradienten varierar med r. Flödet Q är däremot konstant.

$$Q = 2\pi r b \frac{dr}{dt} \tag{2.84}$$

Efter substitution och omarrangemang av ekvationerna erhålls:

$$\int_{R(t)}^{r_L}\frac{dr}{r} = -\frac{2\pi b}{Q}\frac{\rho_w g b^2}{12\mu_w}\int_{h_{R(t)}}^{h_L} dh \tag{2.85}$$

$$\int_{r_w}^{R(t)}\frac{dr}{r\left(1-3Z+4Z^3\right)} = -\frac{2\pi b}{Q}\frac{\rho_w g b^2}{12\mu_B}\int_{h_w}^{h_{R(t)}} dh \tag{2.86}$$

En lösning av integralerna med tillbakagång till hastigheterna ger:

$$\frac{dr}{dt} = \frac{\rho_w g b^2 (h_{R(t)} - h_L)}{12\mu_w r \ln\left(\frac{r_L}{R(t)}\right)} \tag{2.87}$$

$$\frac{dr}{dt} = \frac{\rho_w g b^2 (h_w - h_{R(t)})}{12\mu_B r \int_{r_w}^{R(t)}\frac{dr}{r\left(1-3Z+4Z^3\right)}} \tag{2.88}$$

Eliminering av $h_{R(t)}$ (ekv. 2.87 och 2.88) ger följande uttryck för injekteringsfrontens hastighet för en viss tidpunkt eller injekterad sträcka:

$$\dot{R} = \frac{\rho_w g b^2 (h_w - h_L)}{12R\left(\mu_B\int_{r_w}^{R(t)}\frac{dr}{r\left(1-3Z+4Z^3\right)} + \mu_w \ln\left(\frac{r_L}{R(t)}\right)\right)} \tag{2.89}$$

med Z enligt:

$$Z = \min\left(\frac{\tau_o(t)}{b\,\rho_w g\left|\frac{dh}{dr}\right|}, \frac{1}{2}\right) \tag{2.90}$$

Den uppmärksamme läsaren ser omedelbart likheten med de tidigare härledda uttrycken för strömning i en endimensionell kanal. Skillnaden består i att den radiella strömningshastigheten avtar med radien vilket medför att Z ökar med radien. Så länge strömning sker gäller dock fortfarande följande (se formler (2.68) till (2.70)):

$$\frac{dh}{dr} = \frac{\tau_0}{\rho_w g b Z}$$

$$\frac{dr}{dt} = \frac{b\tau_0}{12\mu_B} \frac{(1-3Z+4Z^3)}{Z}$$

$$4\frac{b\tau_0}{12\mu_B} Z^3 - \left(\frac{dr}{dt} + 3\frac{b\tau_0}{12\mu_B}\right) Z + \frac{b\tau_0}{12\mu_B} = 0 \qquad (2.91)$$

Lösningen för denna tredjegradsekvation har tidigare presenterats. Flödet som tillförs i centrumhålet måste passera alla cirklar mellan r_w och r_L. Strömningshastigheten är fortfarande flödet delat med genomströmmad area. Detta leder till följande uttryck för strömningshastigheten som funktion av radien och flödet:

$$\frac{dr}{dt} = \frac{Q}{2\pi r b}$$

Insättes detta uttryck för dr/dt i tredjegradsekvationen för Z erhålls följande explicita lösning:

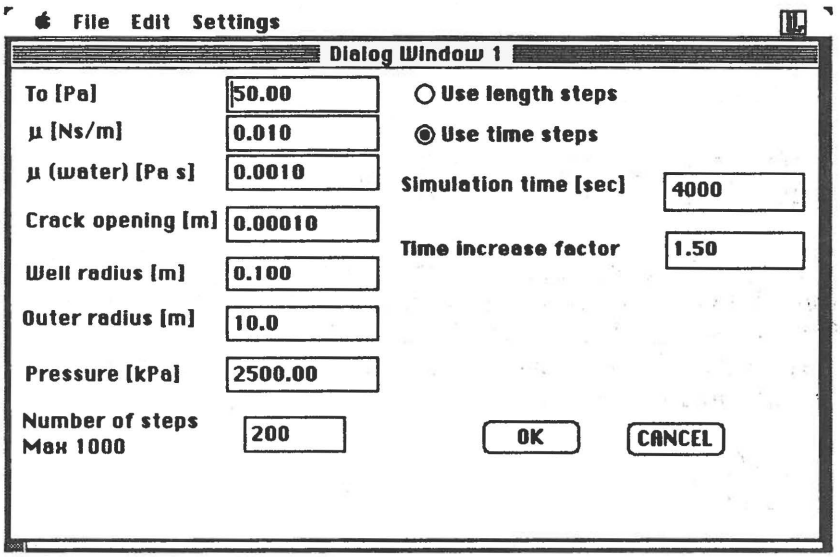
$$Z(r) = 2\sqrt{\frac{Q\mu_B}{2\pi r b^2 \tau_0} + \frac{1}{4}} \cos\left(\frac{\pi}{3} + \frac{1}{3}\operatorname{acos}\left(\frac{1}{8\left(\frac{Q\mu_B}{2\pi r b^2\tau_0} + \frac{1}{4}\right)^{1.5}}\right)\right) \qquad (2.92)$$

Alternativt kan tredjegradsekvationen för Z givetvis lösas iterativt.

Vid beräkningen av hela strömningsförloppet utnyttjas lämpligen att problemet kan betraktas som ett begynnelsevärdesproblem. Ekvation 2.89 kan då succsesivt lösas för ett antal tidpunkter eller frontlägen under förloppet. Initiellt beräknas hastigheten på fronten då hela sprickplanet är vattenfyllt. Ur den då beräknade hastigheten uppskattas frontens läge efter ett lämpligt ansatt tidssteg. Hastigheten vid det nya läget beräknas och från medelhastigheten från de båda frontlägena och det ansatta tidssteget beräknas ett nytt frontläge. Det hela upprepas tills det beräknade frontläget överenstämmer med det tidigare ansatta. Därefter påbörjas nästa tidssteg och proceduren upprepas.

2.4.2 Utvecklad numerisk modell för cirkulärcylindrisk strömning

Programmet är utvecklat för att användas på en persondator av typ Apple Macintosh. Detta ger ett synnerligen enkelt användargränssnitt samtidigt som allmän kommersiell programvara för grafisk redovisning av resultaten direkt kan användas. Utdata "klipps" helt enkelt ut för att "klistras" in i redovisningsprogrammen. Nedan i figur 2.4.2 visas inmatningsfönstret där indata definieras.



Figur 2.4.2: Indata för strömningssimulering i cirkulärt sprickplan.

När indata är producerat trycker användaren på OK-knappen varvid beräkningen startar. Utdata skrivs då ut i ett annat fönster på följande sätt:

```
------PHYSICAL PARAMETERS
Fluid viscosity [Pa s]...... 1,000e-2
Fluid shear limit [Pa]...... 5,000e+1
Water viscosity [Pa s]...... 1,000e-3

------BOUNDARY CONDITIONS
Well radius [m]............. 1,000e-1
Fracture extension [m]...... 1,000e+1
Fracture width [m].......... 1,000e-4
Injection pressure [Pa]..... 2,500e+6

------NUMERICAL PARAMETERS
Number of steps.............50
Step´s timebased
Total simulation time [sec].4000,0
Time step factor............1,5000

Maximum radius of propagation [m]..2,6000

StepTime  TimeGone  FrontSpeed  Q  Radius of propagation
 0,0000e+0  0,0000e+0  4,5239e+0  2,8425e-4  1,0000e-1
 3,1367e-6  3,1367e-6  4,5220e+0  2,8416e-4  1,0001e-1
 4,7050e-6  7,8416e-6  4,5191e+0  2,8404e-4  1,0004e-1
```

. och så vidare.

Dessa data kan sedan bearbetas i valfri annan programvara.

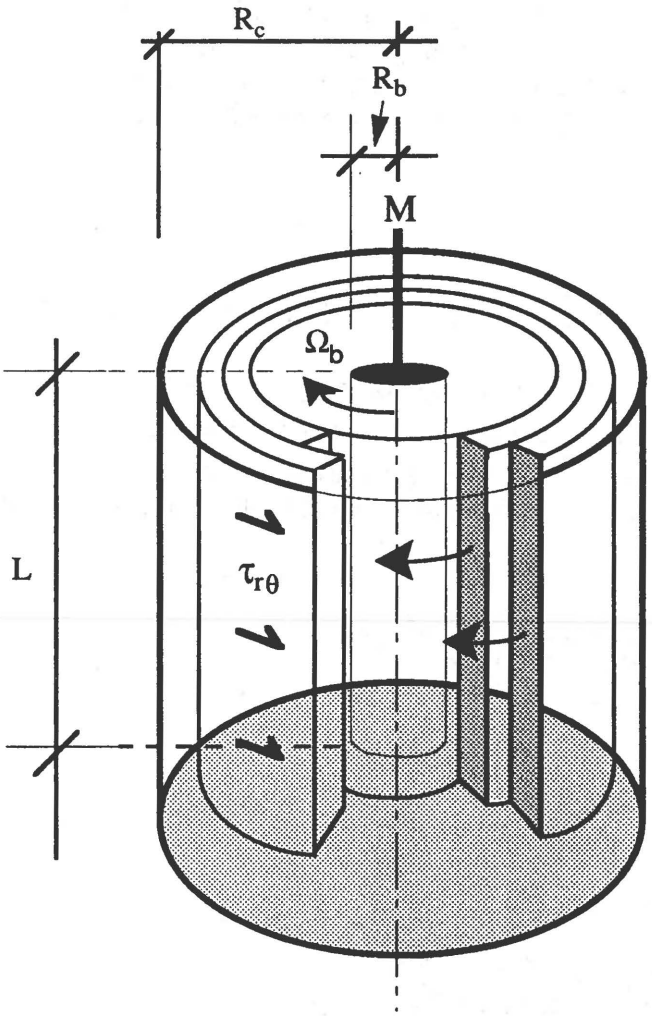
3 Provningsmetodik för injekteringsmedel

3.1 Inledning

Som tidigare nämnts så kräver en matematisk behandling av injekteringsproblematiken god kunskap om injekteringsmedlets strömningsegenskaper och hur dessa ändras under härdnings och gelningsförloppet. Inom detta arbete har därför ett system för mätning av Binghamvätskors egenskaper utvecklats. Systemet är baserat på rotationsviskosimetri och ger skjuvhållfasthet och viskositet som funktion av tiden. Systemet har vidareutvecklats till att innefatta omrörning under mätning av Håkansson et al (1991).

3.2 Rotationsviskosimetri

En roterande kropps rörelse i en vätska motverkas av viskösa krafter. Den motverkande kraftens storlek är beroende på vilken hastighet den roterande kroppen har, dvs det krävs ett ökat vridmoment för att öka rotationshastigheten. Den motverkande kraften har sitt ursprung i de skjuvspänningar som fortplantar sig från mätkroppen och utåt, se figur 3.1.



Figur 3.1: Mätkärl med mätprob samt några beteckningar. Vridmomentet varierar beroende på mätprobens rotationshastighet

Skjuvspänningens storlek vid konstant moment (konstant RPM) beror på positionen i vätskan dvs var, i gapet mellan mätkropp och mätkärlsvägg, betraktelsen sker.
Generellt gäller (Van Wazer et al 1963):

$$\tau_{r\theta} = \frac{M}{2\pi r^2 L} \qquad (3.1)$$

där M utgör det konstanta vridmomentet och L är mätkroppens korrigerade längd. Ekvation 3.1 är inte beroende av vätskans reologiska egenskaper utan är endast en funktion av radien i kvadrat. Ekvation 3.1 kan användas för att bestämma skjuvspänningen i valfritt snitt mellan R_b och R_c.

För att erhålla fundamentala ekvationer och samband för utvärderingen har följande antagits:

- vätskan är inkompressibel
- strömningen är laminär
- ingen radiell resp axiell strömningshastighet existerar
- stationära förhållanden råder (alla tidsderivator = 0)
- det förekommer ingen relativ hastighet mellan vätskan och fasta begränsningsytor ("No-slip" condition)
- effekterna från mätkroppens ändytor kan försummas (dessa korrigeras genom att öka mätkroppens längd vid utvärderingen)

3.3 Mätning av Binghamvätskor

3.3.1 Allmänt

Vid mätning av en Binghamvätska med skjuvhållfastheten τ_o, måste tre fall särskiljas:

1) om $\tau_b < \tau_o$ sker ingen strömning alls.
2) om $\tau_c > \tau_o$ sker strömning inom hela mätkärlet.
3) om $\tau_b > \tau_o > \tau_c$ sker strömning endast i det gap mellan mätprob och kärlvägg där skjuvhållfastheten har överskridits, se figur 3.2.

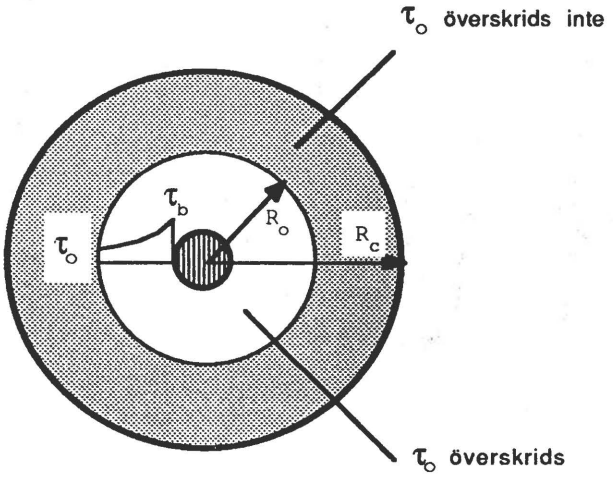


Fig 3.2 Strömning sker endast inom ett visst gap i mätkärlet

Nedanstående ekvation för utvärdering av en Binghamvätskas egenskaper vid rotationsviskometri finns härledd av flera författare (exempelvis Van Wazer et al 1963).

$$\Omega_b = \frac{M}{4\pi L \mu_B}\left[\frac{1}{R_b^2} - \frac{1}{R_0^2}\right] + \frac{\tau_o}{\mu_B} ln \frac{R_b}{R_0} \qquad (3.2)$$

Ω står för mätprobens rotationshastighet i radianer per sekund. Ekvationen (3.2) är känd som *Reiner-Riwlins* ekvation. Observera att $R_b \leq R_0 \leq R_C$. För förklaringar, se figur 3.1 och 3.2.

Om strömning sker inom hela mätkärlet ($R_0 = R_C$) ger insättning av ekvation. (3.1) i ekvation (3.2) tillsammans med några förenklingar och omstuvningar följande uttryck:

$$\tau_b - \tau_b \frac{R_b^2}{R_c^2} = \Omega_b 2\mu_B + 2\tau_o ln \frac{R_c}{R_b}$$

Observera att $\tau_b \frac{R_b^2}{R_c^2} = \tau_c$ enligt ekvation 3.1 (τ_c är skjuvspänningen längs mätkärlet) vilket slutligen ger

$$\tau_b - \tau_c = 2\tau_o ln \frac{R_c}{R_b} + 2\mu_B \Omega_b \qquad (3.3)$$

Ekvationen är ett linjärt samband mellan skjuvspänning och rotationshastighet och sambandet kan direkt användas för utvärdering av viskositet och skjuvhållfasthet ur mätresultat. Det krävs dock mätningar vid minst två olika rotationshastigheter eftersom det är två obekanta som skall bestämmas.

Den minsta skjuvspänning vid mätproben, $\tau_{b,min}$, som krävs för att uppfylla villkoret att vätskan skall strömma i hela kärlet ($\tau_c \geq \tau_o$) kan med hjälp av ekvation 3.1 beräknas ur

$$\tau_c = \tau_b \frac{R_b^2}{R_c^2} \geq \tau_o \Rightarrow \tau_{b,\,min} = \tau_o \frac{R_c^2}{R_b^2} \qquad (3.4)$$

Endast då skjuvspänningen utmed mätproben är större än $\tau_{b,min}$ kan ekvation 3.3 användas för utvärdering av Binghamvätskans parametrar.

I det normala fallet då τ_0 endast överskrids inom en del av mätkärlet, se figur 3.2, fås ett "effektivt" kärl som är mindre än mätkärlet. Det "effektiva" kärlets radie, R_0, (varierar med rotationshastigheten hos mätproben) bestäms som funktion av τ_b och τ_0 enligt:

$$\frac{\tau_o}{\tau_b} = \frac{R_b^2}{R_o^2}$$

vilket lätt skrivs om till

$$R_o = R_b \sqrt{\frac{\tau_b}{\tau_o}} \tag{3.5}$$

En insättning av ekvationerna 3.1 och 3.5 i ekvation 3.2 (Reiner-Riwlins) tillsammans med några omstuvningar ger följande motsvarighet till ekvation 3.3 för fallet då endast en del av vätskan i mätkärlet strömmar:

$$\tau_b - \tau_o = 2\mu_B\Omega_b - \tau_o \ln \frac{\tau_o}{\tau_b} \tag{3.6}$$

Den varierande radien på det "effektiva" kärlet ger alltså ett icke linjärt samband vid utvärderingen av Binghamvätskans materialparametrar.

En mätning med varierande rotationshastighet kan innefatta båda ovan beskrivna fall. Figur 3.3 visar en principiell plott av uppmätt skjuvspänning längs mätproben som funktion av rotationshastigheten där båda fallen innefattas. Det bör observeras att den icke-linjära delen på kurvan endast är resultatet av mätkärlets ändrade geometri.

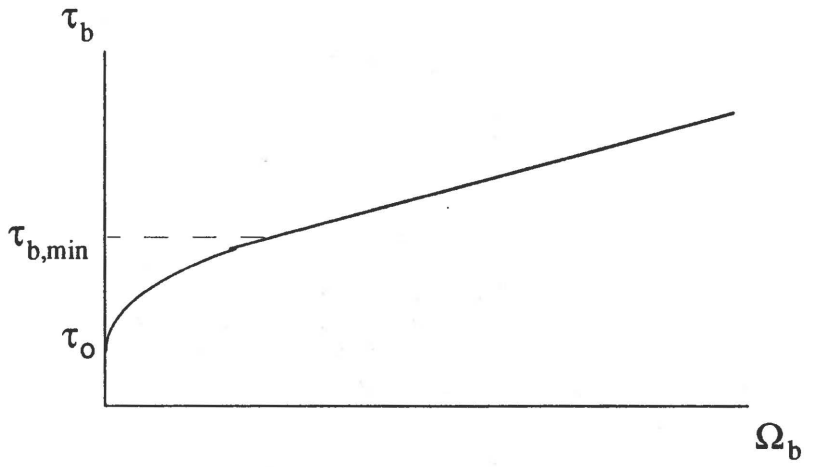


Fig 3.3 Vid mätning av en Binghamvätska fås en icke-linjär kurva. Om kärlet har liten diameter och τ_0 är lågt kan kurvan även ha en linjär del vid höga rotationshastigheter (Ω).

3.3.2 Använd utrustning

För att mäta injekteringsmedels reologiska egenskaper används en datoriserad Brookfield Rheoset rotationsviskosimeter. Viskosimetern mäter det vridmoment som krävs för att rotera en cylinderformad mätprob, nedsänkt i det aktuella medlet, vid en bestämd rotationshastighet. Viskosimetern är ansluten till en mikrodator som styr försöket, behandlar mätdata, ritar diagram över förloppen samt utvärderar de reologiska parametrarna och deras variation med tiden, se figur 3.4. Den stora fördelen med att använda en rotationsviskosimeter är att man kontinuerligt kan mäta egenskapernas förändring under en längre tidsperiod och på så sätt erhålla injekteringsmedlets härdningsförlopp.

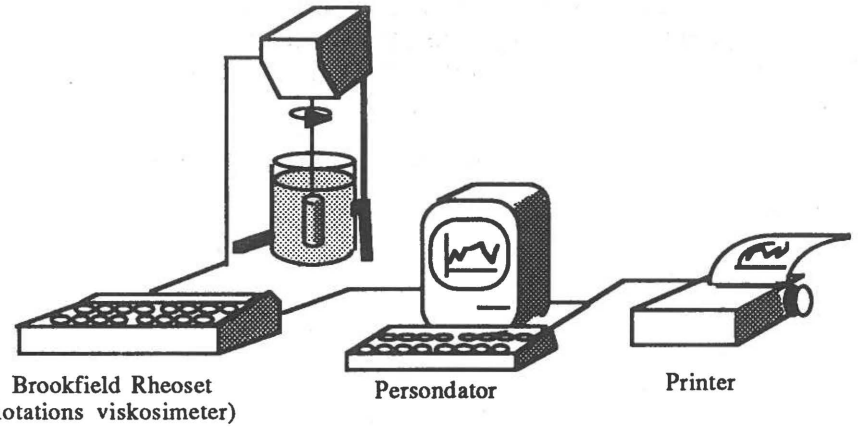


Fig 3.4 Utrustning för bestämning av reologiska egenskaper

Utvärderingen av egenskaperna är uppdelad i ett antal mätsekvenser under vilken rotationshastigheten ändras, antingen från lågt RPM till högt eller tvärtom. Under den korta tid (ca 5 min) som en sekvens varar antas egenskaperna vara tidskonstanta. Ett helt försök kan pågå i ett par timmar och bestå av ett stort antal sekvenser. Efter varje sekvens utvärderas och lagras värden på egenskaperna så att man efter hela försöket kan erhålla egenskapernas utveckling med tiden, se figur 3.5.

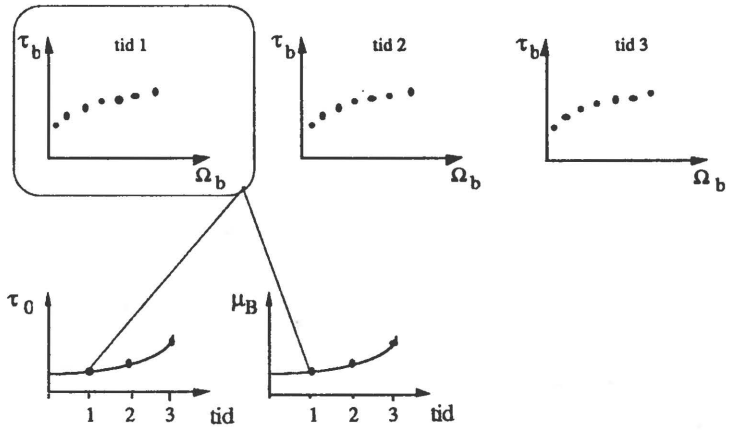
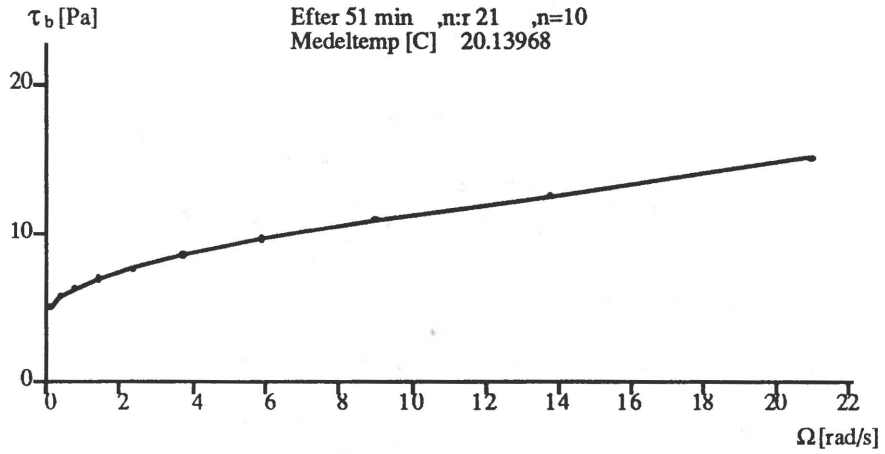


Fig 3.5 För varje sekvens (tid 1, tid 2, osv) utvärderas och lagras egenskaperna och därmed kan utvecklingen med tiden erhållas.

3.3.3 Utvärderingsmetodik

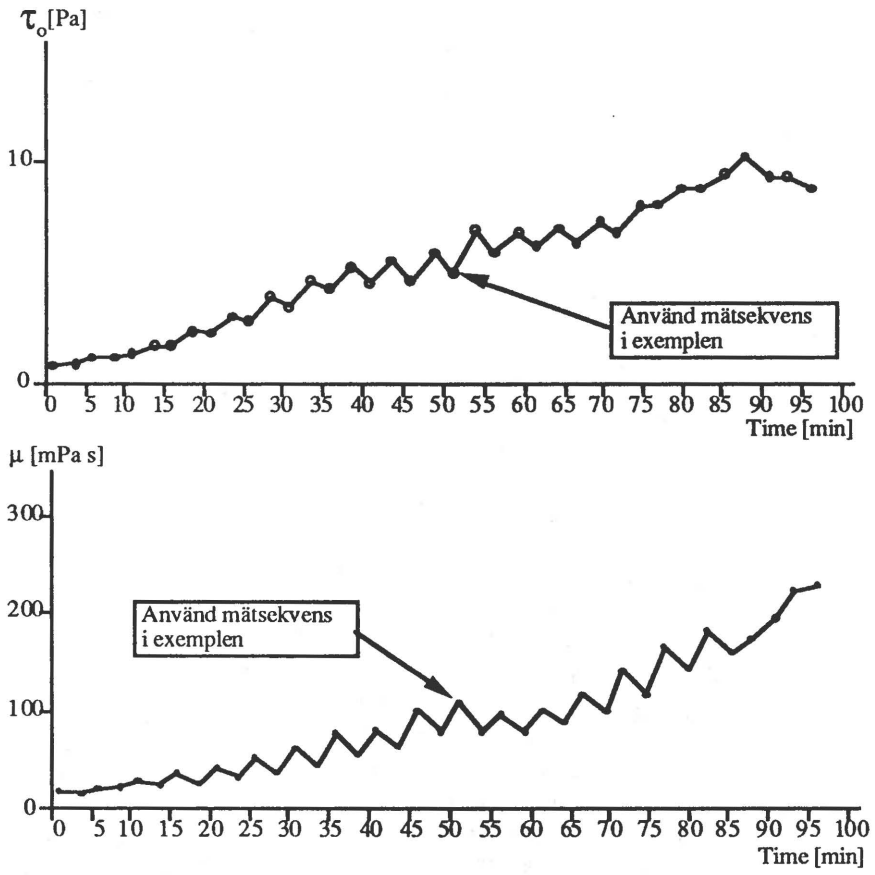
Nedan beskrivs tre olika metoder för att utvärdera de reologiska egenskaperna hos en Binghamvätska från viskosimeterns mätdata. Den första metoden gäller då vätskan i hela kärlet strömmar. I detta fall fås ett linjärt samband mellan skjuvspänning och rotationshastighet och utvärderingen görs enkelt med minsta-kvadrat metoden. Därefter följer två olika metoder där endast en del av vätskan i kärlet strömmar dvs man har egentligen ett mindre mätkärl än det använda. Detta "effektiva" mätkärls radie varierar med rotationshastigheten vilket, som tidigare nämnts, ger upphov till icke-linjära effekter. När värdena på de reologiska parametrarna har erhållits från de tre metoderna görs en jämförelse mellan mätdata och teori. Den metod som ger den bästa anpassningen till mätdata används och parametrarna därifrån väljs som representativa för aktuell sekvens.

För att åskådliggöra något av metodiken har en sekvens ur ett verkligt uppmätt förlopp använts i nedanstående exempel (se figur 3,6). Uppmätt injekteringsmedel var cementbaserat med tillsats av bl a flytmedel.



Figur 3.6: Använd sekvens för åskådliggörande av utvecklad utvärderingsmetodik. Sekvensen är tagen efter 51 minuters mätning (se fig.3.7).

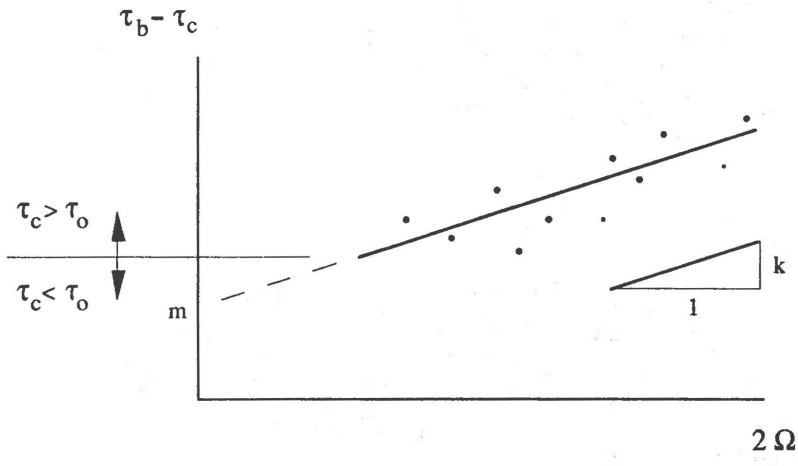
Förloppet innehöll dock ingen del där τ_b var större än $\tau_{b,min}$. De slutgiltigt utvärderade egenskapernas förändring med tiden framgår av figur 3.7 (nedan).



Figur 3.7: Förlopp ur vilket använd sekvens i exemplen är taget . Övre graf, skjuvhållfasthetens tillväxt och undre graf, viskositetens tillväxt.

Utvärdering vid strömning i hela kärlet

Då skjuvspänningen utmed mätkärlets vägg överskrider flytspänningen, $\tau_c > \tau_o$ ($R_o > R_c$), strömmar medlet inom hela kärlet. För att detta skall inträffa måste skjuvspänningen utmed mätprobens mantelyta, τ_b, vara större än $\tau_{b,min}$ (se ekvation 3.4). Om detta villkor är uppfyllt så erhålls τ_b ur det linjära sambandet i ekvation 3.3 (se fig. 3.8) .



Figur 3.8: Principen för linjär anpassning med minsta kvadrat metoden till ekvation 3.3. Figuren visar också hur värden väljs till den linjära delen respektive den olinjära delen av den uppmätta kurvan.

Anpassningen görs med minsta kvadratmetoden där skärningspunkten med ordinatan, m , och lutningen , k, ges av följande ekvationssystem:

$$\begin{pmatrix} n & \Sigma x \\ \Sigma x & \Sigma x^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} m \\ k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Sigma y \\ \Sigma y^2 \end{pmatrix} \qquad (3.7)$$

n är antalet mätvärden, $y = \tau_b - \tau_c$, $x = 2\Omega_b$. Viskositeten ges sedan av $\mu_B = k$ och skjuvhållfastheten fås ur

$$\tau_o = m \left(2 \ln \frac{R_c}{R_b} \right)^{-1}$$

Observera att det uppmätta förloppet kan bestå av både en linjär och en icke-linjär del. Tillhörighet på enskild mätpunkt bestäms enligt tidigare av $\tau_{b,min}$. I här använt exempel existerade ingen linjär del.

Utvärdering vid strömning i endast en del av kärlet

När skjuvspänningen utmed mätkärlets vägg är mindre än skjuvhållfastheten ($\tau_c < \tau_o$ och $R_o < R_c$) finns det en zon från mätkärlets vägg och inåt där medlet kvarstår i en fast fas, se figur 3.2. Inom denna zon, mellan R_o och R_c, är skjuvspänningen överallt mindre än skjuvhållfastheten vilket medför att vätskan där är stillastående. Medlet strömmar endast inom ett "effektivt" kärl vars radie, R_o, varierar med τ_b enligt ekvation 3.5. Eftersom det "effektiva kärlets" storlek varierar under mätsekvensens olika rotationshastigheter måste utvärderingen göras från det icke-linjära sambandet (ekv. 3.6) vilket komplicerar utvärderingen något. Ekvationen 3.6 kan omskrivas till:

$$\Omega_b = \frac{1}{2\mu_B}\left(\tau_b - \tau_o\left(1 + ln\frac{\tau_b}{\tau_o} \right)\right) \qquad (3.8)$$

Med utgångspunkt från ekvation 3.8 har två olika metoder utvecklats för att lösa den icke-linjära anpassningen, en direkt och en iterativ metod. På samma sätt som tidigare används ett beräknat $\tau_{b,min}$ (enligt ekv. 3.4) som kriterie för vilka värden som skall medtagas. I de här metoderna används dock istället de mätvärden som underskrider $\tau_{b,min}$ i analysen.

Metod I (direkt metod)

Deriveras ekvation 3.8 med avseende på τ_b erhålles:

$$\frac{d\Omega_b}{d\tau_b} = \frac{1}{2\mu_B}\left(1 - \tau_o \frac{d\, ln\, \tau_b}{d\, \tau_b}\right) = \frac{1}{2\mu_B}\left(1 - \frac{\tau_o}{\tau_b}\right)$$

Om derivatan multipliceras med τ_b och uttrycket stuvas om erhålls följande linjära uttryck:

$$\tau_b = \tau_o + 2\mu_B\, \tau_b \frac{d\Omega_b}{d\tau_b} \qquad (3.9)$$

Derivatan, $d\Omega/d\tau$, approximeras med differensen $\Delta\Omega/\Delta\tau$ mellan två mätvärden, dvs:

$$\frac{d\Omega_b}{d\tau_b} \approx \frac{\Delta\Omega_b}{\Delta\tau_b} = \frac{\Omega_b^{(i+1)} - \Omega_b^{(i)}}{\tau_b^{(i+1)} - \tau_b^{(i)}}$$

τ_b ansätts som medelvärdet mellan två skjuvspänningsmätningar enligt:

$$\tau_b^* = \tau_b^{(i)} + \frac{\Delta\tau_b}{2}$$

Följande del av högerledet i ekvation 3.9 kan då skrivas:

$$\tau_b \frac{d\Omega_b}{d\tau_b} = \Omega_b^* = \left(\tau_b^{(i)} + \frac{\Delta\tau_b}{2}\right)\left(\frac{\Omega_b^{(i+1)} - \Omega_b^{(i)}}{\tau_b^{(i+1)} - \tau_b^{(i)}}\right)$$

Slutligen fås följande linjära uttryck:

$$\tau_b^* = \tau_o + \mu_B \, 2\Omega_b^* \qquad (3.10)$$

Utvärderingen görs genom en anpassning med minsta kvadratmetoden enligt ekvation 3.7, där i detta fall $y = \tau_b^*$ och $x = 2\Omega_b^*$.
Skjuvhållfastheten ges av $\tau_o = m$ och viskositeten ges av $\mu_B = k$.

I figur 3.9 visas ett exempel från ett försök med värden enl ekvation 3.10 och motsvarande linjära anpassning.

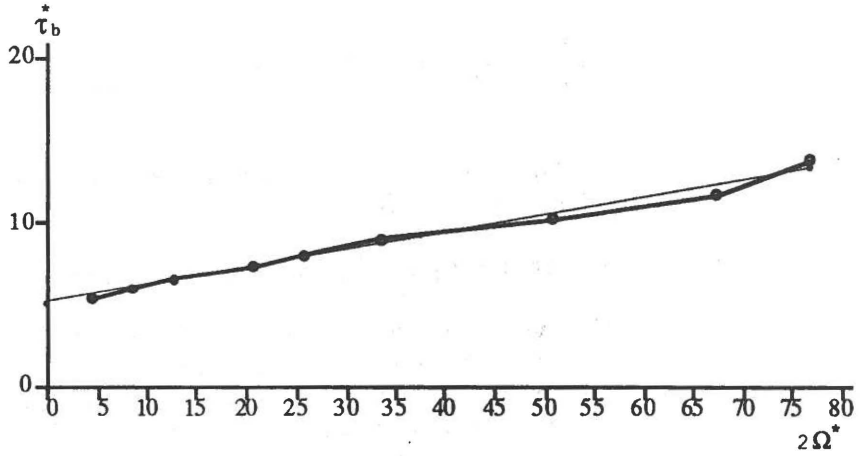


Fig 3.9 Linjär anpassning till mätdata från ett icke-linjärt mätförlopp med den så kallade "direkta metoden". Utvärderingen sker ur den räta (tunna) linjen.

Metod II (Iterativ metod)

Det visar sig att den ovan redovisade metoden med en direkt bestämning av Binghamegenskaperna ej alltid ger ett tillfredsställande resultat, dvs man erhåller ej en god överenstämmelse mellan mätvärden och utvärderade parametrar. Av den orsaken utvecklades ytterligare en utvärderingsmetod enligt nedan.

Ekvation 3.6 kan omskrivas till:

$$\tau_b - \tau_o \, ln \frac{\tau_b}{\tau_o} = \mu_B \, 2\Omega_b + \tau_o \qquad (3.11)$$

Om

$$\tau_b - \tau_o \, ln \frac{\tau_b}{\tau_o}$$

plottas som funktion av 2Ω så kommer lutningen på kurvan att beskriva μ_B och interceptet τ_o. Ett problem är dock att τ_o även ingår i vänsterledet och därför ej är direkt bestämbar. Här utvecklad metodik är iterativt och provar olika τ_o tills τ_o från framräknat intercept överensstämmer med det provade.I figur 3.10 visas mätvärden som iterativt har tagits fram och till

vilka en rät linje skall anpassas för att kunna utvärdera viskositeten och skjuvhållfastheten enligt ekvation 3.11.

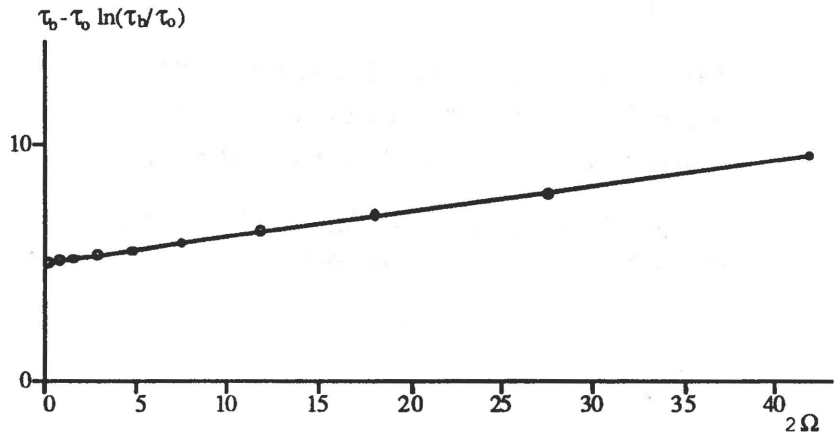


Fig 3.10 Linjär anpassning till mätdata från ett icke-linjärt mätförlopp med den så kallade "iterativa metoden".

Utvärdering av bästa anpassningsmetod

Från varje utvärderingsmetod erhålls en uppsättning värden på Binghamvätskans egenskaper giltiga för aktuell sekvens (tidpunkt). Det bör nämnas att den linjära kurvdelen vanligtvis inte uppnås med här använda rotationshastigheter och mätkärl. För fall med Newtonska vätskor eller mycket små mätkärl ökar givetvis den linjära delens betydelse.

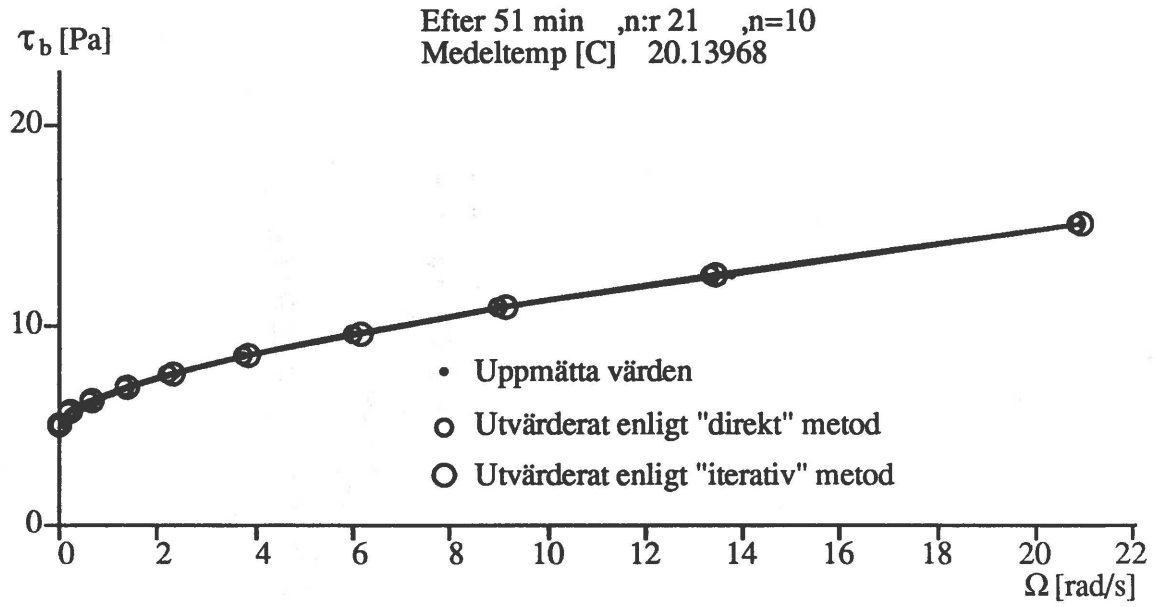
När Binghamvätskans parametrar är utvärderade sätts de och uppmätta τ_b in i ursprungsekvationerna. För $\tau_b > \tau_{b,min}$ används ekvation 3.2 som kan skrivas:

$$\Omega_b = \frac{1}{2\mu_B}\left(\tau_b \left(1 - \frac{R_c^2}{R_b^2} \right) - 2\tau_o \ln \frac{R_c}{R_b} \right) \qquad , \tau_b > \tau_{b,min}$$

För $\tau_b < \tau_{b,min}$ används ekvation 3.6 som kan skrivas:

$$\Omega_b = \frac{1}{2\mu_B}\left(\tau_b - \tau_o \left(1 + \ln \frac{\tau_b}{\tau_o} \right) \right) \qquad , \tau_b < \tau_{b,min}$$

En jämförelse görs sedan mellan mätdata och de motsvarande framräknade teoretiska punkterna, se figur 3.11.



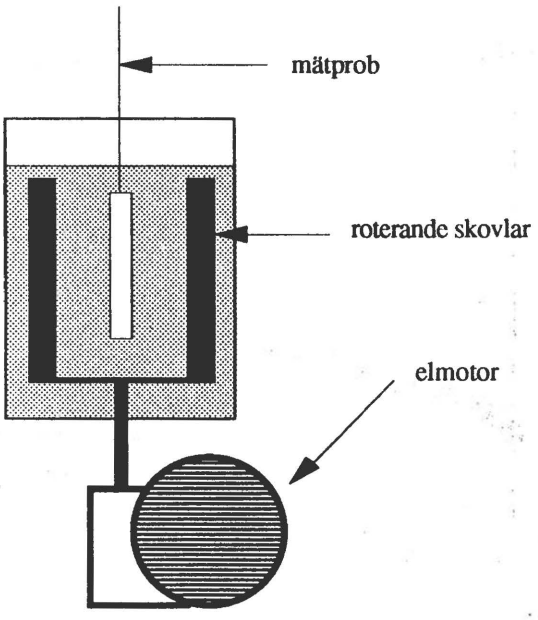
Figur 3.11: Jämförelse mellan mätdata och motsvarande teoretiska kurvor.Båda utvärderingarna i exemplet har mycket god passning. Den "iterativa metoden" visade sig dock i detta fall som något bättre.

Utifrån medeldifferensen mellan mätta och framräknade punkter bedöms kvaliteten på anpassningarna. Utvärderade egenskaper ur den bästa anpassningen används som representativa för aktuell mätsekvens (tidpunkt).

3.3.4 Speciella problem

Vid injektering med cementsuspensioner kan det vara viktigt att suspensionerna är stabila så att de enskilda partiklarna inte sedimenterar och blockerar fortsatt inträngning. Ett cementbaserat injekteringsmedel kan fås stabilt genom att använda ett lågt vatten-cement tal (vct) eller med hjälp av lämpliga tillsatsmedel, t ex bentonit. Viktigt är även att blandningen rörs om ordentligt, med t ex en kolloidkvarn, före injekteringen så att större aggregat slås sönder och inte sedimenterar.

Sedimentation kan även orsaka problem vid användandet av rotationsviskometri. Om alltför många partiklar sjunker till botten av mätkärlet eller om partiklarna slungas ut från mätproben, kommer mätningen att ske i en förtunnad blandning som inte är representativ för injekteringsmedlet.
För att lösa ovannämnda separationsproblem kan en omrörare anslutas till mätkärlet (Håkansson et al 1991), se figur 3.12. Efter en mätsekvens sätts omröraren igång och pressar medlet in mot mätproben som därmed får "färskt" material att mäta i. Sedimentationen mot botten minskas även genom att använda en industriell blandare som med hög hastighet finfördelar suspensionen innan själva mätningen börjar. Försiktighet måste dock iaktagas vid höghastighetsblandning eftersom temperaturen i vätskan stiger vilket kan påverka egenskaperna avsevärt.



Figur 3.12: Anordning för omrörning för att minska effekten av sedimentation

Som tidigare nämnts har en del injekteringsmedel tixotropa egenskaper. En tixotrop vätska som har stått still och fått "vila" har helt andra egenskaper än en vätska som har genomgått en kraftig omröring. Det räcker i vissa fall med mycket kort vila för att egenskaperna skall förändras.
Tixotropin ställer till problem då det gäller tolkning av resultaten som erhålls från rotationsviskosimetern eftersom man erhåller olika resultat beroende på om mätproben har startat med ett lågt RPM och ökat (vila innan mätning) eller om den har startat med ett högt RPM och minskat(störning innan mätning).

Vid mätning av Binghamvätskor (med skjuvhållfasthet) finns det vanligtvis en zon i mätkärlet där vätskan inte skjuvas. Detta medför att vätskan i den stillastående zonen får "vila" vilket kan påverka resultatet om vätskan är tixotrop. Motsvarande fenomen uppträder om man väntar för länge mellan tillblandning av suspensionen och tills dess att mätningen startar.
Framförallt tillsats av bentonit i ett cementbaserat injekteringsmedel gör att medlet får tixotropa egenskaper (Wallner, 1976). Bentonitpartiklarna bildar en gel mellan cementpartiklarna. Gelen bryts vid hög rotationshastighet men växer till i styrka när vätskan är stilla.
Effekten av tixotropin kan ses genom att man vid varannan mätning (upp/nedgång) får olika värden på parametrarna vilket ger ett taggigt utseende på kurvorna. Ett lågt vct (vilket minskar behovet av bentonit) tillsammans med flytmedel visar sig vara ett sätt att minska de tixotropa egenskaperna. Tixotropin påverkar självklart även en verklig injektering och därför bör man utföra sin mätning på ett sådant sätt att man efterliknar de faktiska förhållandena så bra som möjligt. Ett injekteringsmedel som tränger in i en spricka kommer att påverkas av en minskande skjuvspänning i takt med att tryckgradienten minskar ju längre medlet har nått. Detta kan innebära att en mätning bör påbörjas med ett högt RPM och därefter minskas.

3.3.5 Mätning av störningskänsliga medel

Vid mätning, av framförallt kemiska injekteringsmedel, kan problem uppstå om mätproben under sin rotation förstör de bindningar som uppkommer ur härdnings och/eller gelningsprocesserna. Så länge som härdningsförloppet inte påbörjats kan dock parametrarna utvärderas som vanligt och geltiden, dvs tiden mellan tillblandning och då gelningen börjar, noggrant bestämmas. Om mätningen fortsätter efter gelningen kommer mätproben att rotera i en "söndersliten" blandning som inte är representativ för medlet. Det har även visat sig att om medlet störs under själva gelningsprocessen så finns risk för att medlet ej erhåller den sluthållfasthet som annars skulle ha varit fallet (gäller exempelvis en del vattenglasbaserade medel). Det kan alltså vara avgörande för en kemisk injektering att noggrant känna till geltiden. Egenskapernas förändring efter gelningsprocessens start är dock fortfarande av intresse då medlet normalt skall motstå ett vattentryck när injekteringsmanschetten tas bort. För att möjliggöra mätningen av dessa störningskänsliga medel har ett speciellt mätprogram utvecklats. Mätningen utförs genom att sakta rotera mätproben tills eventuellt uppkommna bindningar börjar brytas. Därefter stoppas proben, högsta uppnådda skjuvspänning avläses och mätningen får vila ett förutbestämt intervall. Metoden ger endast skjuvhållfastheten och inte viskositeten.

3.4 Standard för bedömning av injekteringsmedel

I en framtid kommer med stor sannolikhet injekteringsmedel att bedömas och jämföras enligt någon standard. Hur denna bedömning skall gå till är idag oklart. I bedömningen bör förutom sedimentationskänslighet, beständighet och grovkornighet även medlets reologiska egenskaper med tidsförändringar ingå. Man kan tänka sig att de reologiska egenskaperna mäts på ett mera vetenskapligt sätt än vad som är brukligt idag. Då injekteringsmedel vanligtvis har icke-Newtonska egenskaper så innebär detta att flera materialegenskaper behövs för att beskriva vätskans egenskaper. Samtidigt ändras egenskaperna under härdnings och gelningsförloppet. Det är dock ej elementärt att utifrån värden på flera materialparametrar med tidsvariation uttala sig om en vätskas inträngningsförmåga. Ett sätt att komma runt detta problem kan vara att komplettera provningen av de reologiska egenskaperna med en provning av vätskornas inträngning i en fysisk eller matematisk modell. Den cirkulärcylindriska modellen beskriven i kapitel 2 är ett bra modellalternativ då den är enkel och efterliknar verkligheten något bättre än en endimensionell kanal eller ett rör. Som exempel på ett sådant tillvägagångssätt kan nämnas Hässler et al (1989).

4 Verifiering av framtagna numeriska simuleringsprogram.

4.1 Inledning

För en allmän acceptans av beräkningsmetoder brukar det krävas en godtagbar verifiering av beräkningsmetoden mot modellförsök och verkliga fall. I dagsläget finns dock väldigt få dokumenterade fall att tillgå.

Ett av problemen är att använda vätskors egenskaper sällan finns redovisade. Om egenskaperna finns redovisade så har man inte använt Binghamvätskor.

Ett annat uppenbart problem är att det inte finns verkliga injekteringar redovisade i tillräcklig detalj. Detta är naturligt då en sådan uppföljning måste bli synnerligen kostsam.

4.2 Verifiering av kanalmodell

I samband med ett examensarbete (Håkanssons 1987) byggdes en plexiglasmodell. Modellen användes för att studera hur väl den då utvecklade numeriska modellen kunde simulera verkligheten. Resultaten från dessa finns redovisade av Hässler at al (1987).Erhållna data från ett av dessa försök finns dock så väl dokumenterade att de även kan användas för en test av den nu vidareutvecklade modellen.

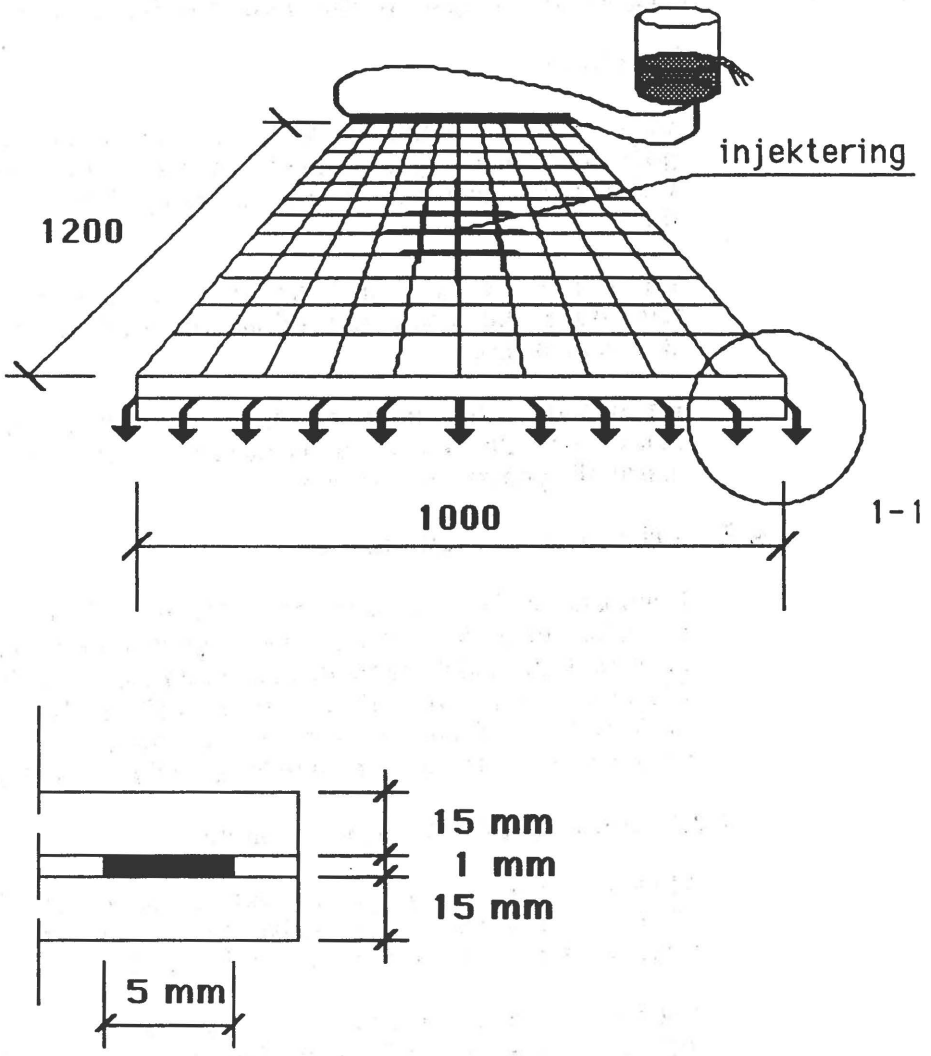
4.2.1 Uppbyggnad av fysisk modell

Modellen bestod av två plexiglas skivor med måtten 1200x1000x15 mm. Mellan dessa skivor limmades plattor av plexiglas, med måtten 90x90x1 mm, i ett symmetriskt mönster. Se fig. 4.1.1.

Ingen strömning kunde ske över de limmade plattorna. Dessa motsvarade alltså tänkta kontaktytor över sprickplanet eller eventuell fyllning i sprickplanet. Vätskeströmningen skedde i kanalerna (5 x 1 mm) som bildade ett nätverk mellan de kvadratiska plattorna. Genom ett höj- och sänkbart bräddavlopp längs ena kortsidan kunde en hydrauliska gradient genom modellen påföras. Den andra kortsidan mynnade ut i det fria och bägge långsidorna var täta.

Injekteringen skedde via ett hål i centrum av modellen.

De försök som gjordes i modellen videofilmades under samtidig registrering av tiden vilket möjliggjorde en kontinuerlig uppföljning av injekteringsfrontens läge.



1-1 Obs! ej skalenliga mått.

Fig.4.1.1 Fysisk modell för injektering av ett sprickplan (efter Håkansson 1987).

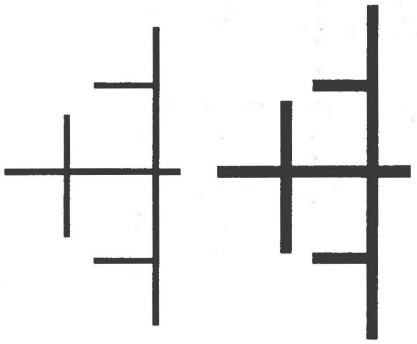
4.2.2 Resultat-beräknat

Nedan redovisas en jämförelse mellan beräknade frontlägen och uppmätta (filmade). Av symmetriskäl har endast en halva av sprickplanet tagits med. Bilderna visar injekteringsfrontens läge vid de tidpunkter som finns angivna. De grövre strecken representerar den uppmätta inträngningen och de finare den beräknade. Injekteringen startade i "röret" som syns till höger på varje bild. De indata som givits till programmet, förutom randvillkor och de rent sprickgeometriska, är :

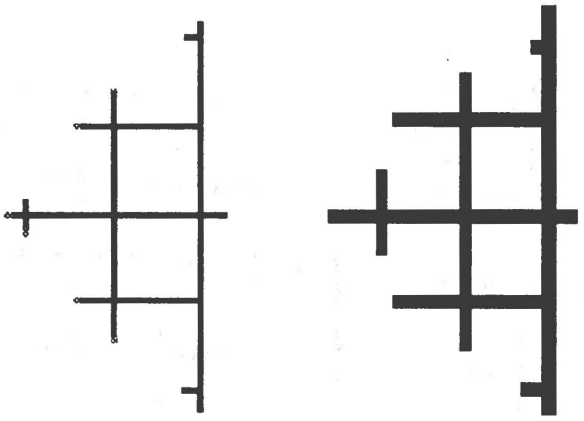
Hydraulisk gradient (dh/dx)	≈ 0.02 [m/m]
Injekteringstryck (mvp)	0,48 [m]
τ_o	3,0 [Pa]
μB	0,035 [Pa s]

Injekteringsmedlet var egenhändigt tillverkat med tids-konstanta egenskaper uppmätta med den tidigare redovisade rotationsviskosimetern (se kap. 3).

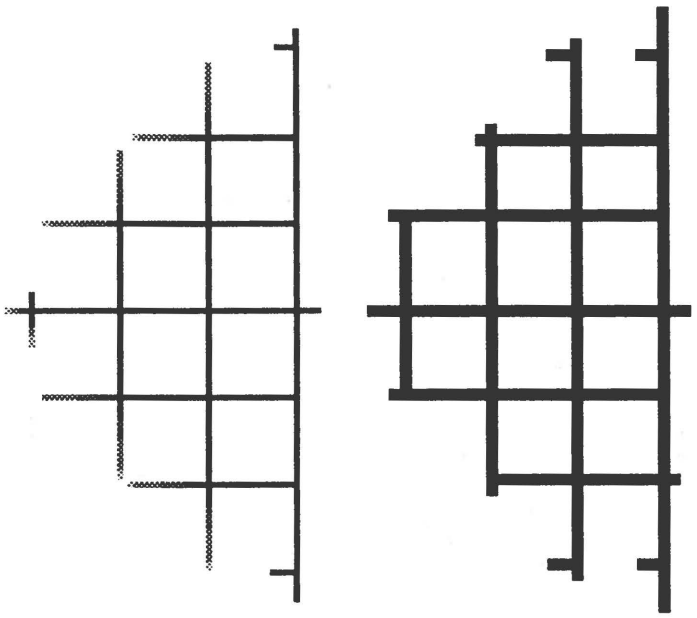
Anledningen till att gradienten sattes så lågt var att minimera de fel som då erhölls i den numeriska modellen när blandning mellan injekteringsmedel och vatten skedde i knutpunkterna. Denna utspädning medtas i nuvarande version av simuleringsprogrammet.



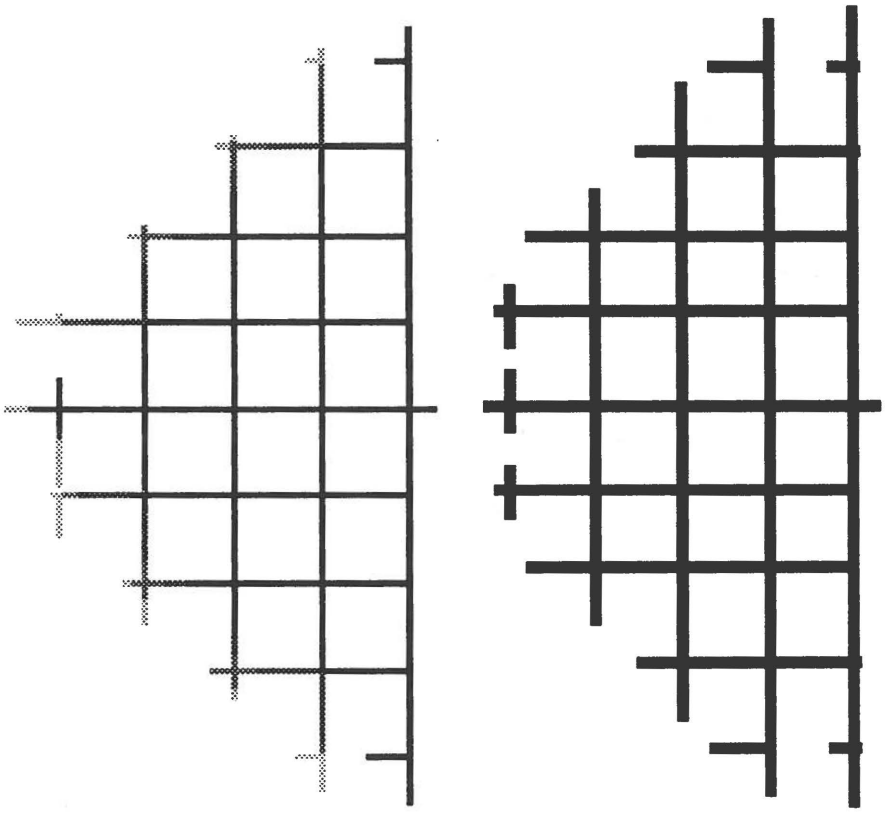
Figur 4.2.1: Jämförelse mellan beräknad och uppmätt inträngning efter 2.5 sekunder.



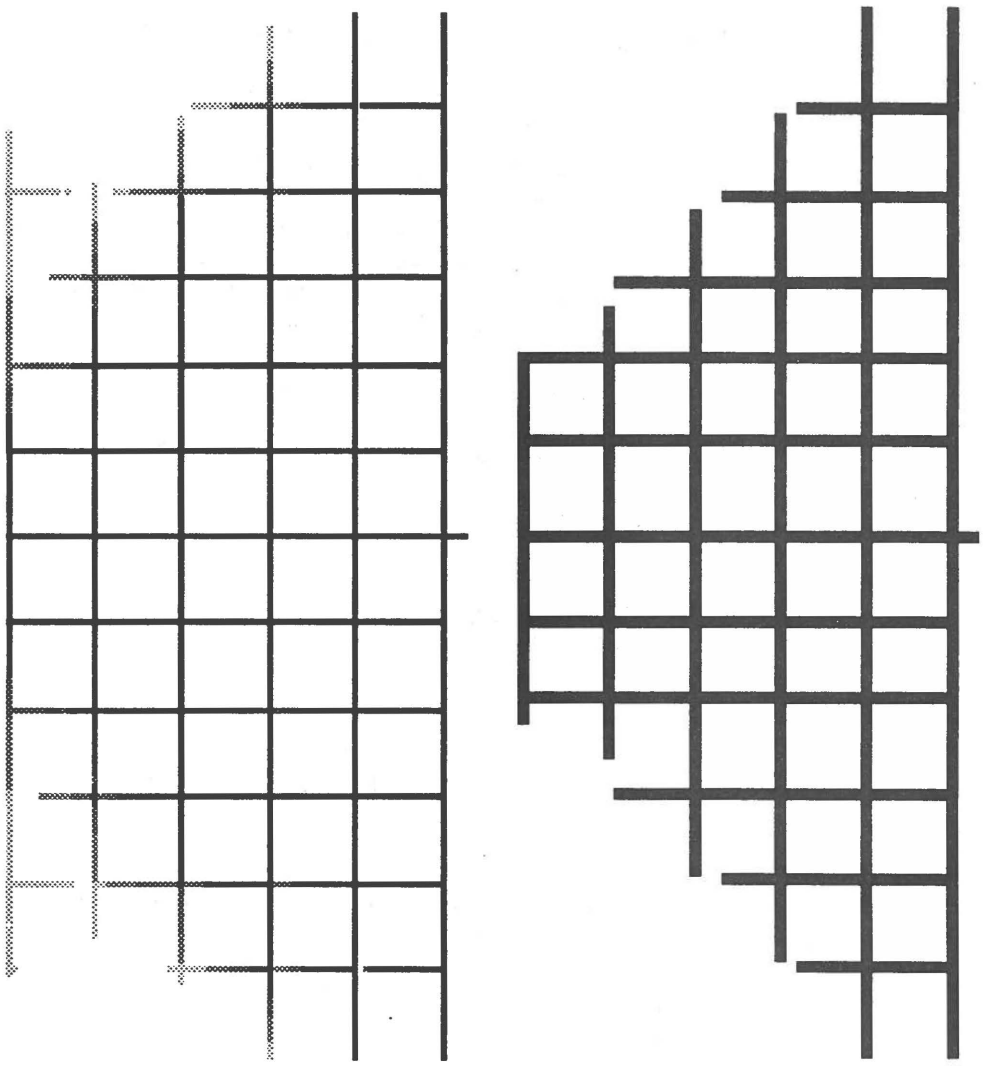
Figur 4.2.2: Jämförelse mellan beräknad och uppmätt inträngning efter 6 sekunder. En liten utspädning kan ses i den beräknade vänstra bilden.



Figur 4.2.3: Jämförelse mellan beräknad och uppmätt inträngning efter 22 sekunder. Utspädning kan tydligt ses i den beräknade vänstra bilden.



Figur 4.2.4: Jämförelse mellan beräknad och uppmätt inträngning efter 65 sekunder. Utspädning kan tydligt ses i den beräknade vänstra bilden. Den beräknade effekten av den påförda hydrauliska gradienten kan skönjas genom en nedåtförskjutning av det injekterade området (vänstra bilden).



4.2.5: Jämförelse mellan beräknad och uppmätt inträngning efter 1400 sekunder. Utspädning kan tydligt ses i den beräknade vänstra bilden. Den beräknade effekten av den påförda hydrauliska gradienten kan iaktagas genom en liten nedåtförskjutning av det injekterade området.

4.2.3 Kommentarer

Det kan konstateras att beräknade resultat bra överensstämmer med erhållna data från modellförsöket. Effekten av den påförda gradienten syns både i beräkningen och i modellförsöket.

För en fullt godtagbar verifiering vore det önskvärt med flera jämförelser med flera fysiska olika modellförsök. Till dags dato finns dock inga ytterligare modellförsök utförda.

4.3 Verifiering av cirkulärcylindrisk modell

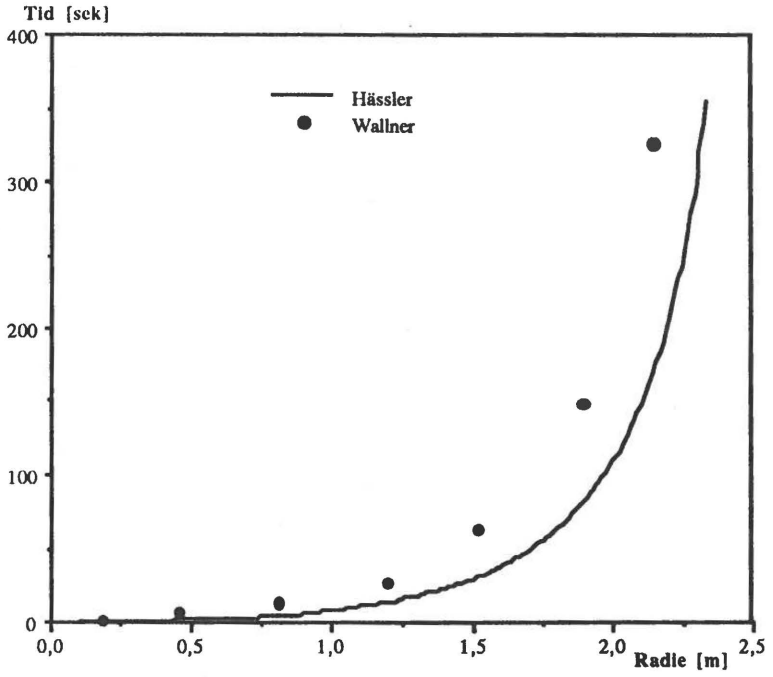
Inom projektet har inga cirkulärcylindriska försök med radiell strömning utförts. Wallner (1976) arbetade dock med liknande problem. Wallners beräkningar byggde på strömning av endast ett injekteringsmedel. Han bortsåg alltså från motstånd från eventuellt vattnen strömmande framför injekteringsfronten. Den här framtagna modellen kan alltså jämföras med Wallners beräkningar om vattnets viskositet sätt till noll. Samma jämförelse finns redovisad i Hässler et al (1986) men där använd numerisk modell är här förfinad.

4.3.1 Jämförelse med Wallner

Wallner redovisar en beräkning med följande indata enligt figur 2.3.1.

b=0.1 mm
r_w=0.1 m
r_L=10 m
h_w-hL=250 m vattenpelare
μ_w=0 Pa s
μ_B=0.01 Pa s
τ_O=50 Pa

Jämförelsen redovisas i nedanstående figur 4.2.1



Figur 4.3.1: Jämförelse mellan Wallners och här utvecklad modell. Överenstämmelsen är relativt bra.

Överenstämmelsen mellan modellerna är relativt bra. Skillnaden kan eventuellt förklaras med att Wallner räknar med en viss tid för tryckuppbyggnaden i injekteringspunkten.

5 Klassificering av berg ur injekteringssynpunkt

5.1 Inledning

Ett fungerande system för klassificering av berg ur injekteringssynpunkt är nödvändigt för en mera rationell behandling och optimering av injekteringsprocessen. Klassificeringssystemet skulle vara till stor nytta inte bara direkt ur teknisk synpunkt utan även för att skapa ett gemensamt språk för erfarenhetsöverföring och som grund för diskussioner injekterare emellan. Klassificeringen av berg ur injekteringssynpunkt måste på ett så detaljrikt sätt som möjligt innefatta geometrin hos bergmassans aktiva konduktorer (sprickplan, kanaler osv). Detta är helt nödvändigt då berget, ur injekteringssynpunkt, knappast kan betraktas som ett kontinuum (injekteringsmedlet strömmar i bergets sprickplan). Injekteringsmedlen har dessutom i de flesta fall icke-Newtonska tidsvarierande egenskaper vilket ökar kraven på klassificeringens geometriska innehåll. Nedan beskrivs författarens personliga tankar om klassificeringssystem samt ett förslag till klassificeringssystem baserat på en enkel geometrisk modell som tänks beskriva de viktigaste egenskaperna hos bergmassans konduktiva delar.

5.2 Allmänt om klassificeringssystem

För att ett klassificeringssystem skall fungera krävs några grundläggande egenskaper.

Ett klassificeringssystem skall vara relevant, reproducerbart och bestå av mätbara komponenter. Ett klassificeringssystem bör inte heller vara onödigt komplicerat.

Klassificeringssystem kan vara rent empiriskt baserade, grundade på någon mera eller mindre genomtänkt modell eller baserade på både empirik och modell.

Tillvägagångssättet för att bygga upp här eftersökta klassificeringssystem på rent empirisk väg kan tänkas vara att samla geologiska och hydrauliska data från ett stort antal injekteringslokaler. Korrelationer mellan insamlade data och injekteringsresultat kan sedan ge information om vilka parametrar som är viktiga för injekteringar . Dessa viktiga parametrar användas sedan vid klassificeringen som utgör grunden för valet av injekteringsmetod. Metoden har provats av exempelvis Palmqvist (1983). Han hade dock stora svårigheter att finna relevanta korrelationer.

Ett annat sätt kan vara att basera klassificeringssystemet på någon antagen modell som tros beskriva verkligheten och därmed innefatta nödvändiga parametrar för att beskriva det verkliga förloppet. Hydrologernas konduktivitetsbegrepp är ett exempel på ett sådant klassificeringssystem baserat på Darcys lag.

De flesta klassificeringssystemen som används inom geovetenskaperna är framtagna för att klassificera det betraktade materialet ur en specifik synpunkt. Nedan tas några enklare exempel upp. Inom varje disciplin finns dock mera avancerade betraktelsesätt.

Hydrologerna använder, som tidigare nämnts, ofta konduktivitet (Darcys lag som konceptuell modell) för att beskriva bergmassan ur vattenströmningssynpunkt. Klassificeringen är relevant för beräkningar av nettoflöden av vatten i större skala. Begreppet är dock sällan relevant

för transportproblem. Ej heller för strömning av andra vätskor än vatten. Konduktivitetsvärdet framtas vanligen ur responsen från inpressningsförsök eller andra manipulationer med det naturliga grundvattenståndet. Mätmetodiken (i sina enklare former) fungerar i större skala tack vare att bergmassan redan innan försöket vanligtvis är fylld med vatten.

Bergmekanikerna kan klassificera bergmassan efter ett flertal olika system. De mera sofistikerade systemen översätter en mängd av indata till någon materialmodell beskrivande bergmassans hållfasthet typ Mohr-Coulomb med en kohesion och en friktionsvinkel. Den konceptuella modellen kan sägas vara att berget kan betraktas som ett Mohr-Coulomb material. När väl bergmassans hållfasthet är "känd" så är det relativt enkelt att beräkna förstärkningsbehov och lämpliga dimensioner.

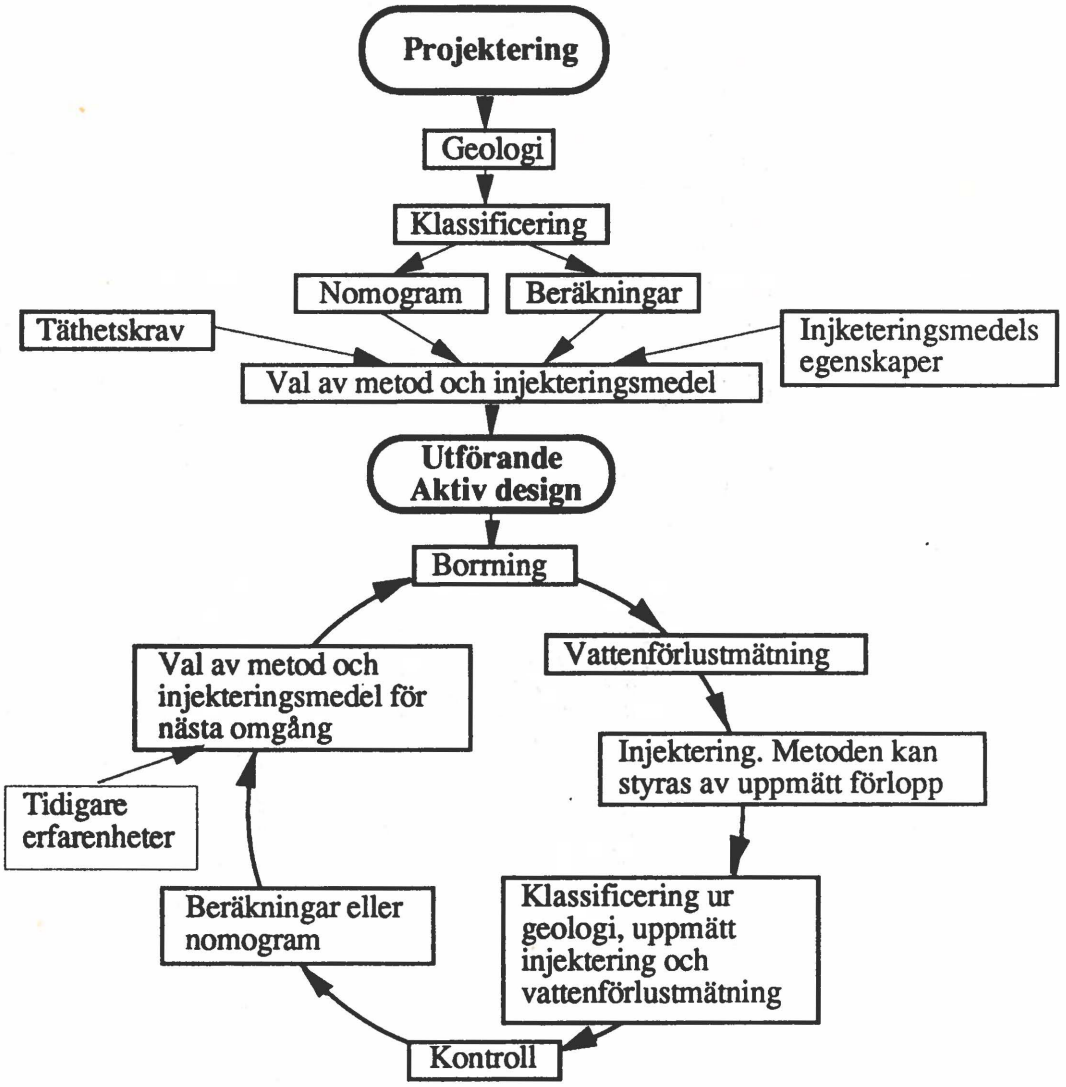
Den hållfasthetsintresserade geoteknikern klassar också ofta sitt jordmaterial enligt Mohr-Coulomb. Till skillnad från bergmmassan så är jordar vanligtvis ganska homogena. Homogeniteten gör att det är meningsfullt att använda laboratorieundersökta stickprov för att bedöma egenskaperna i en större volym. Även han använder alltså en materialmodell som konceptuell modell för sitt byggnadsmaterial.

Skillnaden mellan ovanstående exempel är hur klassificeringen utförs. Hydrologen provar en stor volym i fält och översätter mätresultatet till en konduktivitet som antas gälla i den provade volymen. Att bergmekaniskt prova representativa bergvolymer ställer sig svårt. Han är istället hänvisad till insamling av geologiska data och erfarenhetsbaserade klssificeringssystem. Geoteknikern tar däremot några stickprov som sedan antas vara representativa för en större volym. Alla arbetar dom dock efter någon enkel konceptuell modell och klassificeringssystemen är anpassade till att ge den konceptuella modellens parametrar. Modellen med bestämda parametrar används sedan för att optimera tänkt konstruktion eller för att bedöma konsekvenser av en tänkt insats.

Här föreslagna klassificeringssystem bygger på en generalisering av bergmassan till en enkel geometri där både vattenströmning och injekteringar kan beräknas. När väl generaliseringen är utförd så kan alltså injekteringsförlopp beräknas i modellen. Givetvis kan ingen perfekt överenstämmelse med verkligheten förväntas. Detta problem återfinns också inom alla andra geovetenskapliga klassificeringssystem.

5.3 Klassificeringssystemets roll i injekteringsprocessen

Den framtida injekteringsprocessen kan tänkas uppdelad i ett projekteringssteg och flera utförandesteg. Processens komponenter kan tänkas vara följande:



Figur 5.1: Tänkbara uppbyggnad av den framtida injekteringsprocessen

Vid utförandesteget så finns idag, vilket förklaras nedan, möjligheter att ur vattenförlustmätningar och uppmätta injekteringsförlopp framta de klassificerande geometriska parametrarna.

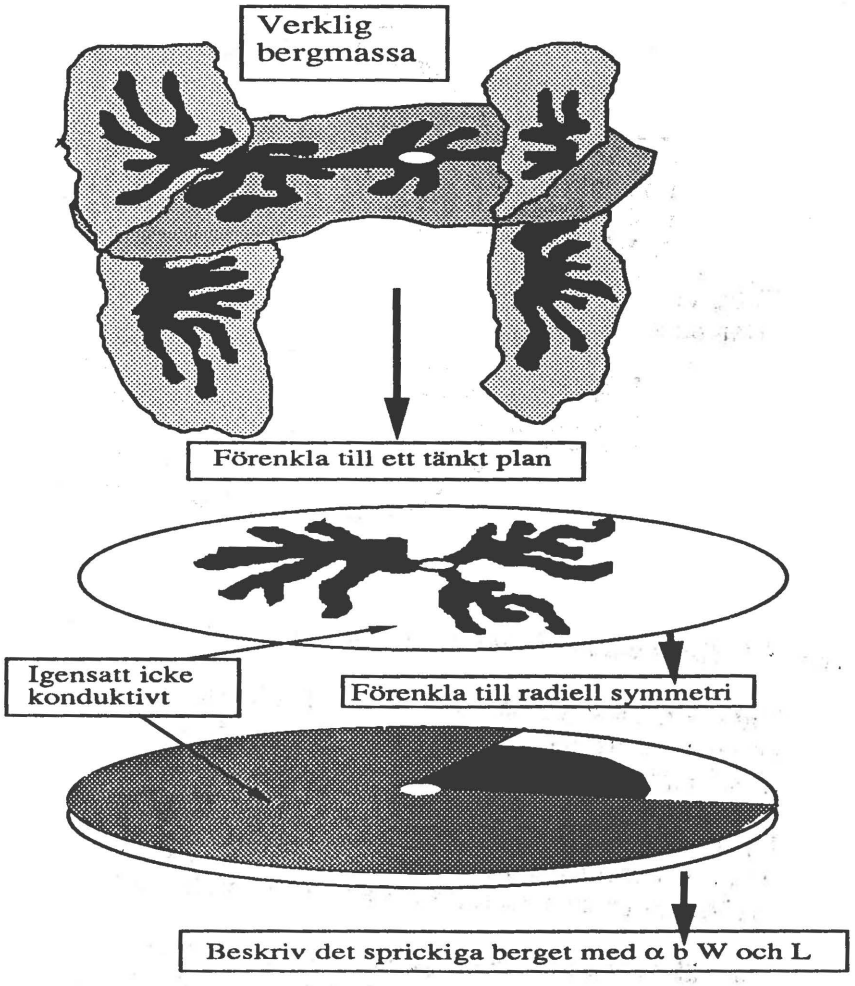
Under projekteringssteget måste dock klassificeringen sannolikt utföras empiriskt ur rena geologiska data. Hur de geometriska parametrarna skall utvärderas ur rena geologiska data får framtiden utvisa.

När väl de klassificerande geometriska parametrarna är framtagna kan valet av metod och injekteringsmedel göras via beräkningar eller möjligtvis nomogram där de geometriska parametrarna utgör indata.

5.4 Geometrisk modell för klassificering av berget

Ett klassificeringssystem för berg ur injekteringssynpunkt måste sannolikt baseras på en förenkling av den komplexa bergmassans geometri. Efter förenklingen skall endast de, ur injekteringssynpunkt, viktigaste geometriska egenskaperna hos berget finnas kvar. Hydrologer har börjat använda "dimensionalitet" som en parameter för att beskriva en bergmassa ur hydrologisk synpunkt (se Barker 1988). Begreppet är tämligen komplicerat med en matematisk grund till stor del baserad på komplicerade transformer. Förenklat kan dimensionaliteten hos en bergmassa sägas beskriva hur den genomströmmade ytan ökar med avståndet från källan. Ju högre dimensionalitet desto snabbare ökning av den genomströmmade ytan. Detta är givetvis även av intresse i injekteringssammanhang men den vanligtvis icke-Newtonska karaktären hos våra injekteringsmedel kräver en betydligt starkare fokusering mot de hydrauliska vägarnas direkta mått och spridning. Nedan beskrivs embryot till ett besläktad synsätt som säkerligen kan vara till nytta vid klassificeringen av en bergmassa ur injekteringssynpunkt. Den grundläggande matematiken är inte alltför svår och ingående parametrar kan idag teoretiskt bedömas utifrån fältförsök och uppmätta injekteringsförlopp.

Principiellt tänks klassificeringen utföras enligt figur 5.2:



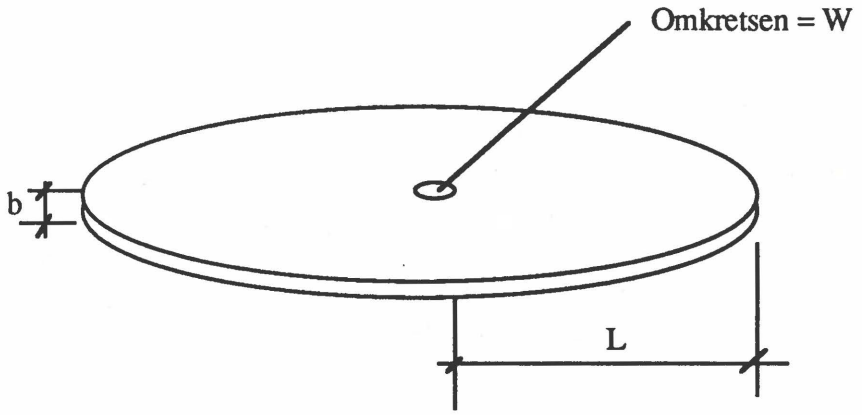
Figur 5.2: Klassificeringen utförs genom en förenkling av bergmassan

Ett mycket idealt sprickplan genomborrat av ett sonderingshål (eller injekteringshål) kan tänkas beskrivas planparallellt och cirkulärsymmetriskt (se fig. 5.3). Enligt kapitel 2 kan ett sådant sprickplan beskrivas med parametrarna radien på sonderingshålet (r_w), radien på sprickplanet (r_L) och spricköppning (b). Flödet vid en vattenförlustmätning i sonderingshålet erhålles ur följande uttryck (se formel 2.87):

$$Q_w = \frac{\rho_w g (h_w - h_L) b^3}{12\mu_w} \frac{2\pi}{ln\left(\frac{r_L}{r_w}\right)}$$

där h_w står för vattentryckshöjden i sonderingshålet och h_L för vattentryckshöjden längs sprickplanets ytterrand.

Alternativt kan ett sådant sprickplan tänkas beskrivas med avståndet från sonderingshålets vägg till sprickplanets ytterkant (L), öppningen (b) och omkretsen på sonderingshålet (W).



Figur 5.3: Cirkulärsymmetrisk planparallellt sprickplan. Spridningsvinkeln α är 2π.

Övergången från radier till W och L är enkel. Beakta följande:

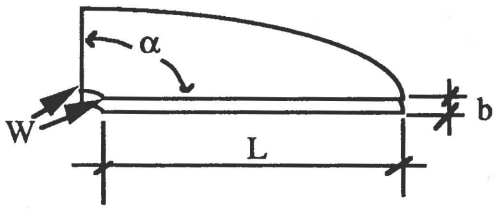
$$r_w = \frac{W}{2\pi}$$

$$r_L = \frac{W}{2\pi} + L \qquad (5.1)$$

2π är spridningsvinkeln vid det cylindriska fallet. Låt oss generalisera och kalla spridningsvinkeln för α. En substitution ger följande uttryck för flödet:

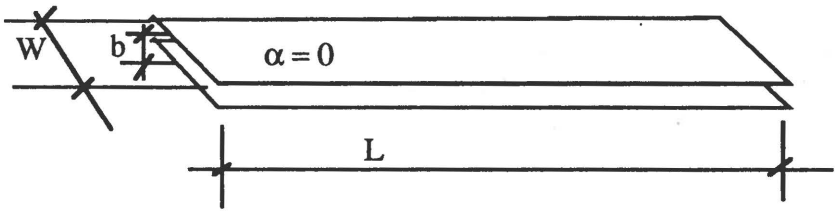
$$Q_w = \frac{\rho_w g (h_w - h_L) b^3}{12\mu_w} \frac{\alpha}{ln\left(1 + \frac{\alpha L}{W}\right)} \qquad (5.2)$$

Om bara viss del av ovan beskrivna sprickplan är konduktiv så minskar vinkeln för den konduktiva delen (se fig.5.4). Vinkeln för det helt konduktiva sprickplanet är givetvis 2π.



Figur 5.4: Delvis konduktivt sprickplan. α är π/2.

En "endimensionell" spricka kan beskrivas med samma parametrar (se fig. 5.5). Vinkeln α är här 0.



Figur 5.5: Endimensionell spricka. α är noll.

Sammanfattningsvis så kan alltså samtliga ovan beskrivna sprickplan beskrivas med föreslagna parametrar. Observera att α mycket väl kan tänkas större än 2π och mindre än 0. Det visar sig att det härledda uttrycket (5.2) gäller för alla olika α. Detta kan verka orimligt när α går mot noll (vid fallet med en endimensionell spricka). En Maclaurinutveckling ger dock följande för små α:

$$\frac{\alpha}{\ln\left(1+\frac{\alpha L}{W}\right)} \approx \frac{W}{L} \frac{1}{1 - \frac{\alpha L}{W} + \left(\frac{\alpha L}{W}\right)^2 - \left(\frac{\alpha L}{W}\right)^3 + \ldots\ldots}$$

Sätts α till noll erhålls

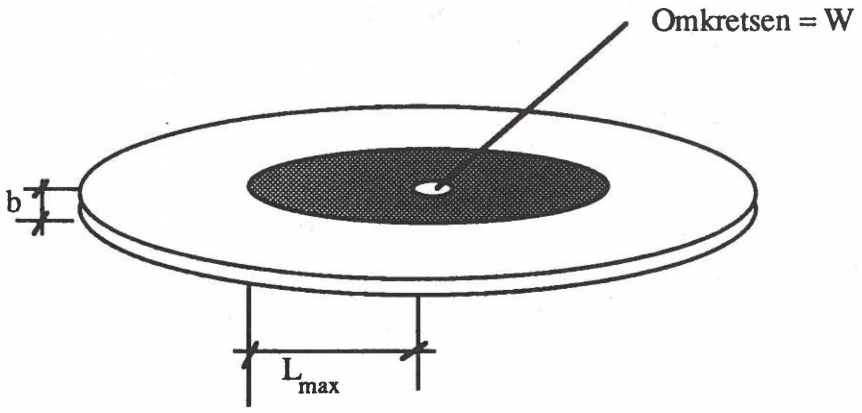
$$\frac{\alpha}{\ln\left(1+\frac{\alpha L}{W}\right)} \approx \frac{W}{L} \qquad (5.3)$$

Detta överensstämmer helt med det vanliga uttrycket för endimensionell strömning redovisat i kapitel 2.

Vi har alltså ett generellt uttryck för vattenflödet i sonderingshålet med b,α,L och W som obekanta.

Om vi nu injekterar sonderingshålet med en Binghamvätska (vätska med skjuvhållfasthet) så kan exempelvis volymen inträngt injekteringsmedel studeras. Injekteringsmedlets maximala inträngning är oberoende av α och beräknas enkelt ur ekvation 2.39 eller 2.90 med Z = 0.5 (se fig. 5.6 och Hässler et al 1986):

$$L_{max} = \frac{\rho_w g (h_w - h_L)}{2 \tau_o} b \qquad (5.4)$$



Figur 5.6: Inträngning av injekteringsmedel i ett sprickplan. Maximala inträngningslängden styrs av pådrivande tryck, b och av injekteringsmedlets skjuvhållfasthet (kohesion).

Volymen inträngt injekteringsmedel erhålls ur följande:

$$L_{max} = r_{L_{max}} - r_w$$

$$V_{inj} = \frac{\alpha}{2}\left(r_{L_{max}}^2 - r_w^2\right) b = \frac{\alpha}{2}\left(r_{L_{max}} - r_w\right)\left(r_{L_{max}} + r_w\right) b$$

$$r_{L_{max}} + r_w = L_{max} + 2\, r_w = L_{max} + 2\,\frac{W}{\alpha}$$

$$V_{inj} = \frac{\alpha}{2} L_{max}\left(L_{max} + 2\,\frac{W}{\alpha}\right) b$$

eller

$$V_{inj} = \frac{\rho_w\, g\,(h_w - h_L)}{2\,\tau_o}\, b^2\left(W + \frac{\rho_w\, g\,(h_w - h_L)}{2\,\tau_o}\,\frac{b\,\alpha}{2}\right) \qquad (5.5)$$

Vi har alltså ett ytterligare ett generellt uttryck där mängden injekterat material är en funktion med b,α och W som obekanta.

Volymen inträngt injekteringsmedel liksom resultat från vattenförlustmätningar sparas vanligtvis vid injekteringsarbeten. Från vanliga injekteringar så kan alltså två ekvationer uppställas. För att lösa ut alla fyra parametrarna behövs dock teoretiskt ytterligare minst två ekvationer. Dessa kan troligtvis erhållas om tryck och flöde mäts under injekteringen. Följande ekvation gäller för fallet med ett cirkulärsymmetriskt sprickplan (se ekv. 2.89):

$$U(R) = \frac{\rho_w\, g b^2 (h_w - h_L)}{12R\left(\mu_B(t)\displaystyle\int_{r_w}^{R} \frac{dr}{r\left(1-3Z+4Z^3\right)} + \mu_w \ln\left(\frac{R_L}{R}\right)\right)}$$

där U(R) är injekteringsfrontens hastighet, R är avståndet från cirkelns medelpunkt till injekteringsfronten, R_L är avståndet från cirkelns

medelpunkt till sprickplanets yttre rand och Z är halva Binghampluggens tjocklek delat med sprickplansöppningen b. Z varierar med avståndet från centrum. Om det uppmätta flödet uttrycks istället för frontens hastighet erhålles följande:

$$U(R) = \frac{Q}{2\,\pi R\,b}$$

$$Q = \frac{2\,\pi\,\rho_w\,g b^3 (h_w - h_L)}{12\left(\mu_B(t)\int_{r_w}^{R} \frac{dr}{r(1-3Z+4Z^3)} + \mu_w \ln\left(\frac{R_L}{R}\right)\right)}$$

där liksom tidigare 2 π motsvarar vinkeln α. Z varierar med r enligt följande (se kapitel 2):

$$Z(r) = 2\sqrt{\frac{Q\,\mu_B}{2\pi r\,b^2\tau_0} + \frac{1}{4}}\cos\left(\frac{\pi}{3} + \frac{1}{3}\arccos\left(\frac{1}{8\left(\frac{Q\,\mu_B}{2\pi r\,b^2\tau_0} + \frac{1}{4}\right)^{1.5}}\right)\right)$$

Om motsvarande substitutioner som tidigare utförs erhålls följande generella uttryck för flödet och för Z:

$$Q(\alpha,b,W,L,X) = \frac{\alpha\,\rho_w\,g b^3 (h_w - h_L)}{12\left(\mu_B(t)\int_0^{X} \frac{dx}{\left(x + \frac{W}{\alpha}\right)(1-3Z+4Z^3)} + \mu_w \ln\left(\frac{(L-X)\,\alpha}{X\,\alpha + W} + 1\right)\right)} \qquad (5.6)$$

$$Z(x,Q,\alpha,b,W) = 2\sqrt{\frac{Q\,\mu_B}{\alpha\,x\,b^2\tau_0 + W\,b^2\tau_0} + \frac{1}{4}}\cos\left(\frac{\pi}{3} + \frac{1}{3}\arccos\left(\frac{1}{8\left(\frac{Q\,\mu_B}{\alpha\,x\,b^2\tau_0 + W\,b^2\tau_0} + \frac{1}{4}\right)^{1.5}}\right)\right)$$

Liksom vid fallet med cirkulärcylindrisk strömning (se kap. 2.4) uttrycker ekvation 5.6 ett begynnelsevärdesproblem. För att beräkna hela injekteringsförloppet kan ekvation 5.6 successivt lösas för ett antal tidpunkter eller frontlägen under förloppet. Initiellt beräknas hastigheten på fronten då hela sprickplanet är vattenfyllt. Ur den då beräknade hastigheten uppskattas frontens läge efter ett lämpligt ansatt tidssteg. Hastigheten vid det nya läget beräknas och från medelhastigheten från de båda frontlägena och det använda tidssteget beräknas ett nytt frontläge. Det hela upprepas tills det beräknade frontläget överenstämmer med det tidigare ansatta. Därefter påbörjas nästa tidssteg och proceduren upprepas.

Även ekvation 5.6 är helt konsistent mot tidigare härlett uttryck för endimensionell strömning när α går mot noll.

När α går mot noll blir Z oberoende av x enligt:

$$Z((x),Q,(\alpha=0),b,W)=2\sqrt{\frac{Q\,\mu_B}{W\,b^2\tau_0}+\frac{1}{4}}\cos\left(\frac{\pi}{3}+\frac{1}{3}\arccos\left(\frac{1}{8\left(\frac{Q\,\mu_B}{W\,b^2\tau_0}+\frac{1}{4}\right)^{1.5}}\right)\right)$$

Uttrycket för flödet ändras då till:

$$Q=\frac{\frac{1}{12}b^3(h_0-h_L)\gamma_w\alpha}{\frac{\mu_B}{1-3Z+4Z^3}\int_0^X\frac{dx}{\frac{W}{\alpha}+x}+\mu_w\ln\left[\frac{(L-X)\alpha}{X\alpha+W}+1\right]}$$

$$\int_0^X\frac{dx}{\frac{W}{\alpha}+x}=\ln\left[\frac{X\alpha}{W}+1\right]$$

$$Q=\frac{\frac{1}{12}b^3(h_0-h_L)\gamma_w\alpha}{\frac{\mu_B}{1-3Z+4Z^3}\ln\left[\frac{X\alpha}{W}+1\right]+\mu_w\ln\left[\frac{(L-X)\alpha}{X\alpha+W}+1\right]}$$

Maclaurin utveckling kring α ger:

$$\ln\left(\frac{X\alpha}{W}+1\right)\approx\alpha\frac{X}{W}\left(1-\frac{\alpha X}{W}+\left(\frac{\alpha X}{W}\right)^2-\left(\frac{\alpha X}{W}\right)^3+\ldots\ldots\right)$$

$$\ln\left(\frac{(L-X)\alpha}{W+X\alpha}+1\right)\approx\alpha\left(\frac{L-X}{W}-\alpha\,\text{Polynom}(X,W,L)+\alpha^2\text{Polynom}(X,W,L)-\alpha^3\ldots\ldots\right)$$

Isättning ger:

$$Q=\frac{\frac{1}{12}b^2(h_0-h_L)\gamma_w\,b\,W}{\frac{\mu_B}{1-3Z+4Z^3}X+\mu_w(L-X)}$$

vilket är helt överensstämmande med uttrycket för endimensionell strömning (se kapitel 2).

Ekvation 5.6 är svår att behandla analytiskt. Numeriskt i datamaskiner går det dock bra. Observera att ekvation 5.6 beskriver förloppet från injekteringens början till dess slut. En anpassning av en med ekvation 5.6 beräknad tryck/flödeskurva till en uppmätt tryck/flödeskurva kan därför användas för att bedöma bergets klassificerande parametrar.

5.5 Klassificeringsparametrarnas geometriska betydelse

Sprickplansöppningen b är lätt att förstå utifrån den geometriska modellen. I ett verkligt fall så är b alltså något mått på bergmassans konduktiva delars medelöppning.

Det krokiga avståndet från vattenförlustmätningen till det påverkade områdets yttre rand beskrivs av L. Denna yttre rand kan jämföras med de geometriska yttre ränderna använda i traditionsenliga hydrauliska utvärderingar och i FEM-beräkningar. I ett verkligt fall skulle L även kunna motsvara något medelavstånd till stora vattenförande zoner i omgivningen.

Spridningsvinkeln α är lite svårare att beskriva. I den konceptuella modellen beskriver α en linjär tillväxt av den genomströmmade arean med avståndet från sonderingshålet. Observera att α mycket väl kan tänkas större än 2π. För en verklig bergmassa så kan α förväntas minska med sprickplanens igensatthet och öka med sprickdensiteten .

Parametern W beskriver i den konceptuella modellen kontakten mellan sonderingshål (injekteringshål) och bergmassans konduktiva delar. Bergmassans konduktiva delar består av sprickplan som kan vara mer eller mindre igensatta av fyllnadsmaterial eller annan påverkan. Det kan konstateras att W ökar med antalet korsade sprickplan och att W minskar med sprickplanens igensatthet. W kan alltså tänkas intimt kopplad till α.

5.6 Bestämning av parametrarna ur injekteringar och vattenförlustmätningar

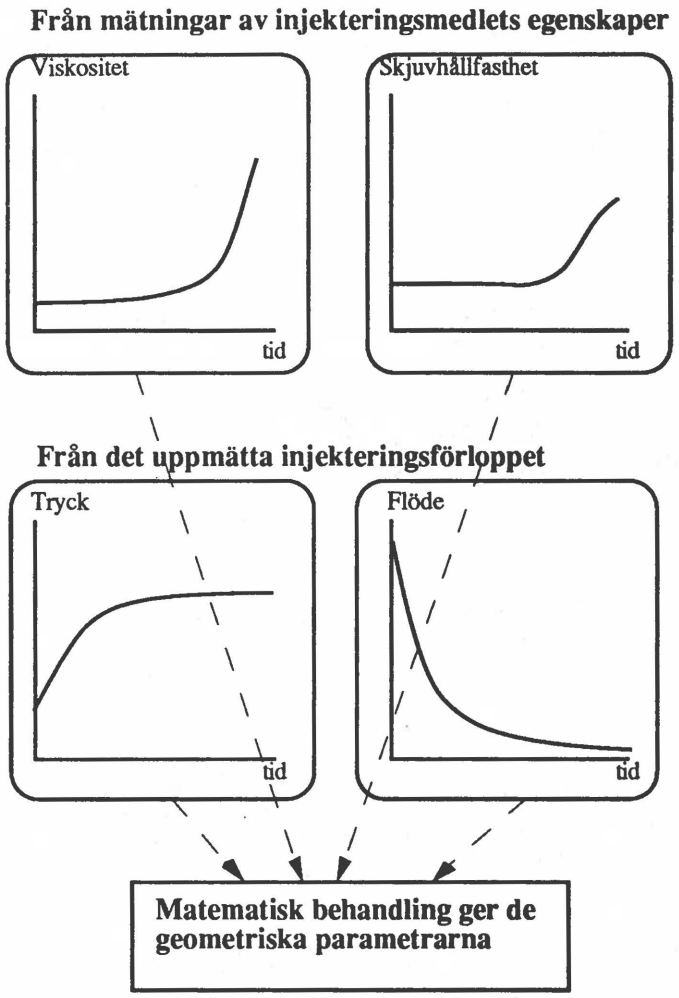
En klassificering av bergmassan utifrån injekteringsresultat kan ske på flera ambitionsnivåer beroende på uppmätta injekteringsdata och tillgänglig geologisk information. Observera att det krävs god kännedom om använda injekteringsmedels egenskaper.

En väldigt enkel klassificering kan tänkas ignorera bergmassans uppsprickning och endast ge värden per meter borrhål. Uppmätta värden (vattenförlust, injektionsvolym osv) delas då upp per meter borrhål innan klassificeringsberäkningarna görs. Denna enkla klassificering ger givetvis svårigheter vid framtagning av lämplig injekteringsmetodik.

En mera lämplig ambitionsnivå tar hänsyn till sprickfrekvenser och lokala sprickplansvariationer. Uppmätta värden delas då upp på enskilda sprickplan innan klassificeringsberäkningarna utförs. Alternativt kan speciella undersökningsinjekteringar utföras där enskilda sprickplan packas av.

Mängden insamlad information från injekteringarna styr också ambitionsnivån på klassificeringen. Om ingen registrering av tryck och flöde görs under injekteringen måste två variabler ansättas innan klassificeringsberäkningen utförs. Troligtvis är det lättast att ansätta W (kontaktlängd) samt L (influensområde) och medelst en enkel beräkning bedöma α och b utifrån mängden injekterat material och vattenförlustmätningar. Vid fall där tryck och flöde finns registrerade från injekteringen kan teoretiskt samtliga ingående parametrar bedömas. Det

hela är dock inte helt lätt då variationer i tiden kan förväntas både med avseende på applicerat tryck och injekteringsmedlets egenskaper (se fig. 5.7).

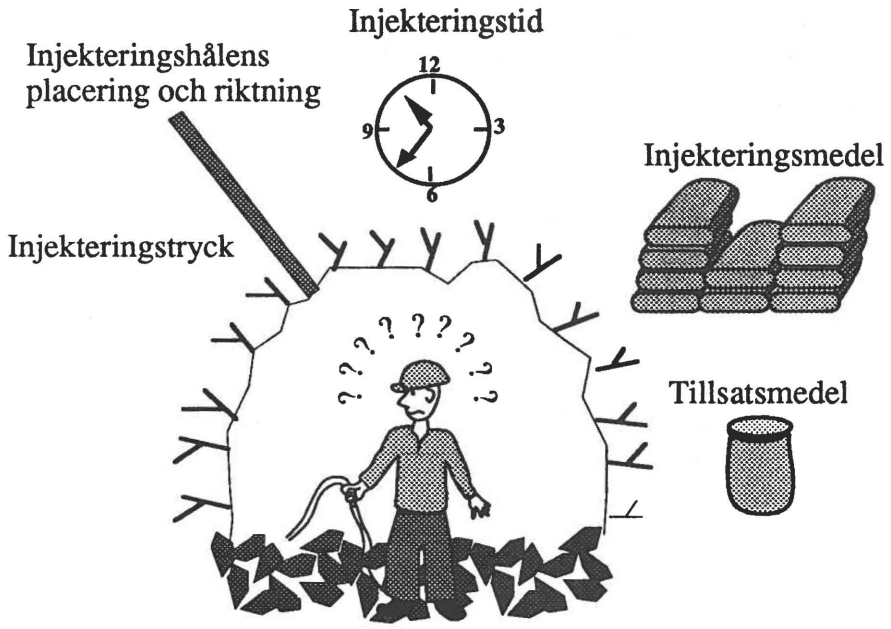


Figur 5.7: Injekteringsmedlets egenskaper tillsammans med det uppmätta flödesförloppet vid injekteringen ger indata till en utvärdering av de klassificerande geometriska parametrarna.

Med hjälp av de framtagna parametrarna beskrivande berget så kan lämpliga åtgärder för att förbättra injekteringsresultatet antingen beräknas i numeriska simuleringsmodeller eller/och erhållas från tidigare erfarenheter. Enkla nomogram kan eventuellt även tas fram till hjälp för praktikern.

5.7 Val av injekteringsmetod utifrån klassificeringens parametrar

Som bas för varje injekteringsarbete finns det fastställda täthetskravet (eller hållfasthetskravet). Det är ingenjörens uppgift att välja metod så att kravet uppnås med fullgod säkerhet till lägsta kostnad. En injekteringsmetod innefattar många olika delar (se figur 5.8).



Figur 5.8: Exempel på ingående komponenter i en injekteringsmetod.

Valet av metod är komplext och beror av de enskilda komponenternas verkliga kostnad. För att klara uppgiften behöver ingenjören bedöma effekten av metodvariationer. Denna bedömning kan göras utifrån de framtagna klassificeringsparametrarna.

Som tidigare beskrivits innehåller de fyra klassificerande parametrarna kondenserad geometrisk information om bergmassans konduktiva delar och om kopplingen injekteringshål- bergmassans konduktorer. En direkt uppspaltning av parametrarnas betydelse för injekteringsresultatet kan dock inte göras då samtliga parametrar tillsammans med injekteringsmedlets reologiska egenskaper och härdningsförlopp påverkar både inträngningen och tidsförloppet. För ett givet injekteringsmedel av Binghamtyp kan följande förenklade principer sägas gälla:

Sprickplansöppningen b styr direkt tillsammans med det använda injekteringsmedlets skjuvhållfasthet och använt injekteringstryck den maximala inträngningen av injekteringsmedlet. Variationer av injekteringstryck eller skjuvhållfasthet hos använt medel påverkar alltså direkt erforderligt hålavstånd för en given bergmassa.

Spridningsvinkeln α påverkar erforderlig volym injekteringsmedel för att nå en viss sträcka från injekteringshålet (inträngning). Spridningsvinkeln kombinerad med geologiska data kan dessutom också säkerligen användas för att bedöma kopplingen mellan bergmassans olika spricksystem och därmed ge underlag för val av hålavstånd.

Kontaktlängden W, som beskriver anslutningen mellan injekteringshålet och bergmassans konduktorer, påverkar tiden för att injektera en viss volym medel. Då det tar längre tid att injektera en större volym kan ett högt α tillsammans med ett lågt W motivera användandet av ett medel med långsammare härdningsförlopp eller lägre viskositet.

Influensavståndet L styr tillsammans med b och α motståndet från vattenströmningen bortanför injekteringsfronten. L påverkar alltså också tidsåtgången för att nå en bestämd sträcka.

För att demonstrera något om hur klassificeringssystemet kan tänkas användas visas nedan ett mycket förenklat projekteringsexempel för en tunnelinjektering.

Från tidigare injekteringar och/eller geologisk information antar injekteraren följande värden för berget framför tunnelfronten:

α =100°, b=0.15 mm, L=50 m och W uppskattas till 10 mm.
Sprickfrekvensen vinkelrätt tunnelfronten bedöms till 3 sprickor/m.

Skärmens utsträckning i tunnelns längsled är fastlagd till 30 m. Varje hål kan alltså förväntas skära ca 100 sprickplan. Av produktionstekniska skäl får injekteraren bara uppehålla driftcykeln en timme för injekteringsarbete. Manschetterna tillåts dock sitta kvar tills injekteringsmedlet uppnått tillräcklig hållfasthet för att motstå omkringliggande vattentryck. Injekteraren är alltså låst till en injekteringstid av en timme. Av bergmekaniska orsaker tillåts han inte använda högre tryck än 10 bar. Han har dock tillgång till två injekteringsmedel samt frihet att välja hålavstånd. Injekteringsmedlen har konstanta egenskaper under den första timmen. Egenskaperna är som följer:

medel	μ	τ_o	Kostnad kr/l
1	0.02	10	5
2	0.01	5	10

Omkretsen på området som skall förinjekteras är 40 m. Kostnaden per meter borrhål är 100 kr. Injekteraren kliar sig i huvudet och sätter sig ned vid sin PC och beräknar inträngning och åtgång vid det givna trycket efter en timme för de olika medlen. Resultaten framgår nedan:

medel	inträngning m	åtgång liter/sprickplan
1	5.4	4
2	8.5	10

Ur geologiska data bestämmer sig injekteraren för ett teoretiskt överlapp av 40 % mellan injekteringshålen och beräknar största hålavstånd till ca: 6 m för medel 1 och till ca: 10 m för medel 2. Kostnadskalkylen blev enligt nedan:

medel 1 7 hål a 3000 kr och 2800 l medel a 5 kr ger 35 kkr/skärm
medel 2 4 hål a 3000 kr och 4000 l medel a 10 kr ger 52 kkr/skärm

Injekteraren satsar självklart på medel 1 trots tätare hålavstånd.

Under tunnelns framdrift görs nya skärmar. Injekteraren använder självklart erhållna nya data och gamla data för en kontinuerlig förbättring och kostnadsoptimering av tätningsarbetet.

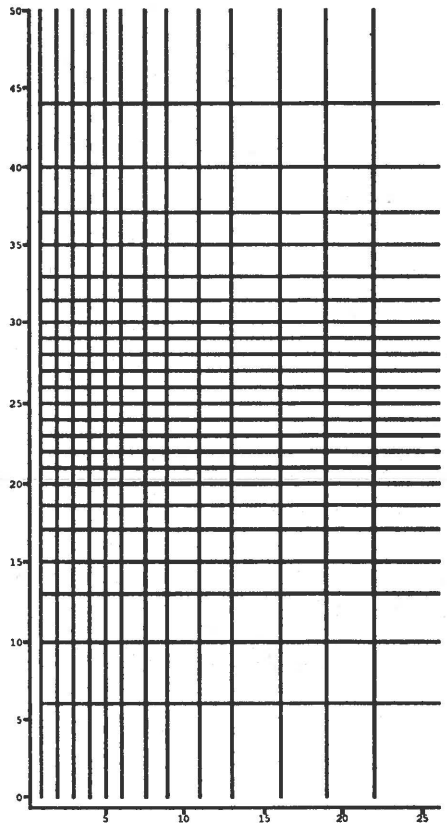
6 Några beräkningsexempel

6.1 Inledning

Nedan visas några exempel på beräkningar av injekteringsresultat i den utvecklade numeriska simuleringsmodellen. Beräkningarna är principiella och har inte utförts med målsättningen att exakt beskriva något verkligt fall. Exemplen visar dock något om vad modellen kan användas till. De ger även tillfälle till några klassificeringar utifrån teoretiskt beräknade injekteringsförlopp.

6.2 Använt kanalnät

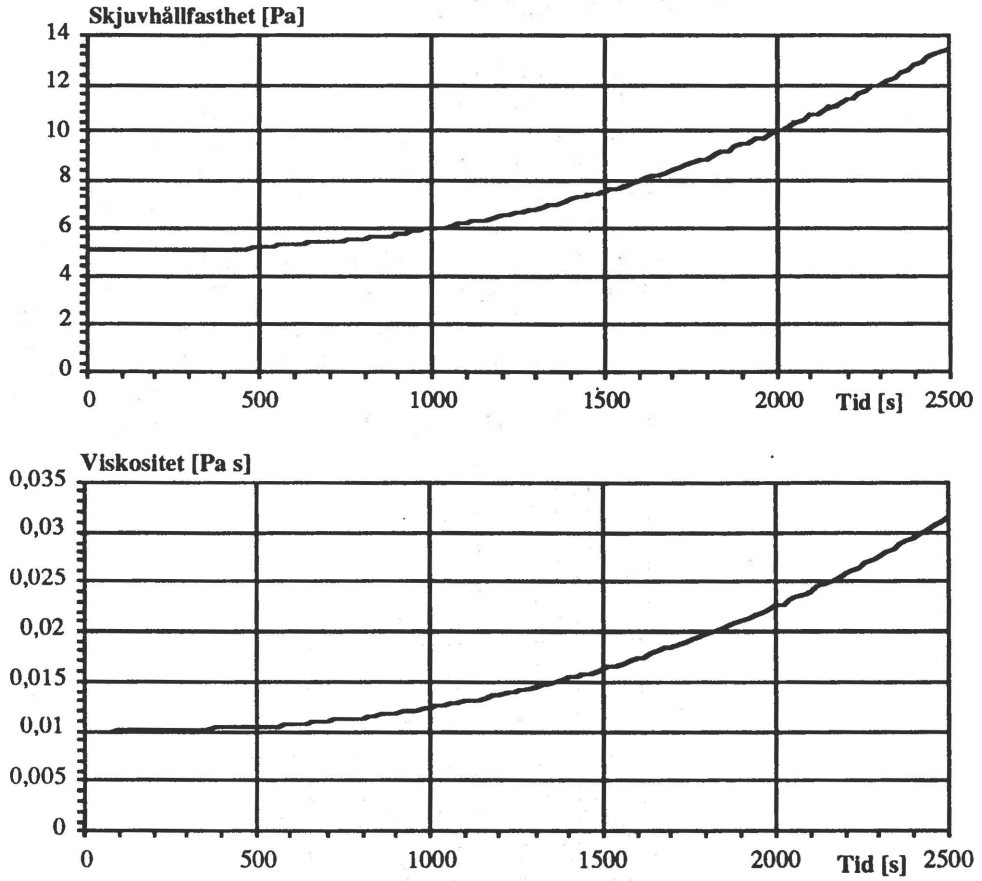
I alla exemplen användes i princip samma kanalnät. Kanalnätet var platt (inte veckat) och kan tänkas beskriva antingen ett kanaliserat sprickplan eller också viktiga kanaler längs skärningslinjerna mellan många sprickplan i en bergmassa. Det simulerade kanalnätet var kvadratiskt med en sida på 50 m och innehöll drygt 1200 kanaler. I simuleringsberäkningarna utnyttjades att kanalnätet var symmetriskt längs ett vertikalsnitt vilket halverade antalet kanaler och innebar att det modellerade sprickplanet var 25*50 m (se fig. 6.1). Alla kanaler hade en öppning 0.32 mm. Kanalerna var fördelade över sprickplanet med en koncentration mot mitten. Kanalbredderna var satta så att 4 % av ytan bestod av kanaler jämnt fördelat över sprickplanet. I alla exempel utom i det första ansattes sprickplanet som vertikalt.



*Figur 6.1: Använt kanalnät i beräkningarna. Det simulerade kanalnätet sträcker sig egentligen över en yta av 50*50 meter. Den horisontella symmetrin har dock utnyttjats vilket innebär att endast halva kanalnätet beräknas.*

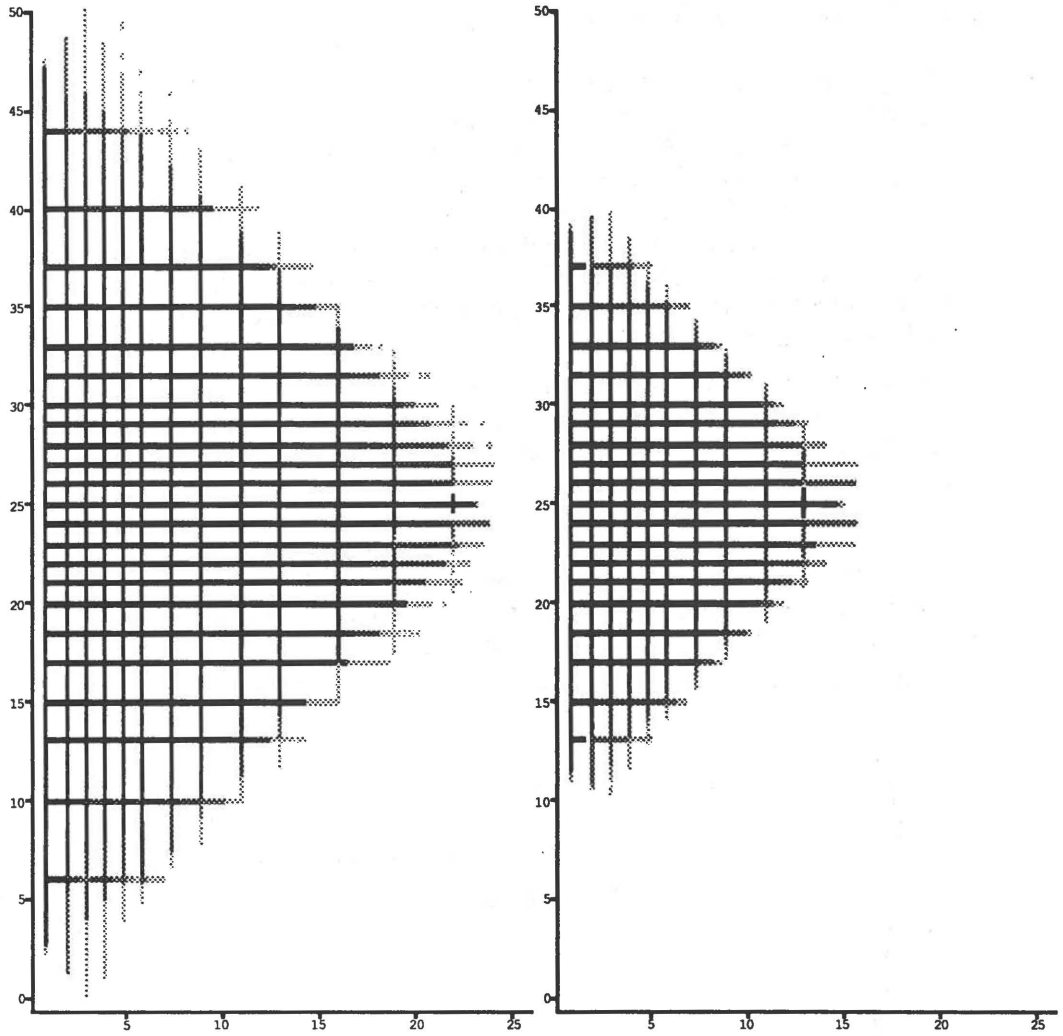
6.3 Betydelsen av injekteringsmedlets härdningsförlopp

För att demonstrera något om härdningsförloppets betydelse visas nedan två beräkningar där injekteringsmedlet i det första fallet hade tidskonstanta egenskaper och i det andra fallet ansattes att härda. Injekteringarna utfördes i sprickplanets centrum, alltså mitt på kanalnätets vänstra sida. En beräknad vattenförlustmätning i injekteringspunkten gav ca: 4.1 Lugeon. Båda injekteringsmedlen hade initialt en viskositet av 0.01 Pa s och en skjuvhållfasthet av 5 Pa. Det ena härdade dock enligt figur 6.2.



Figur 6.2: Härdningsförloppet för ett av de använda injekteringsmedlen. De horisontella axlarna visar tid i sekunder. För den övre grafen visar den vertikala axeln skjuvhållfastheten och för den undre, viskositeten.

Sprickplanet injekterades under två timmar med 10 bars övertryck. I fallet med härdande medel slutade inträngningen dock redan efter ca: 35 minuter. I det andra fallet med tidskonstant injekteringsmedel fortgick fortfarande en viss inströmning efter två timmars injektering. Resultatet från beräkningarna visas nedan i figur 6.3.



Figur 6.3: Skillnad i inträngning efter två timmars injektering i ett horisontellt kanalnätverk. Till vänster visas inträngningen för det tids-konstanta injekteringsmedlet. Till höger visas inträngningen för det härdande injekteringsmedlet. Graden av utspädning i de olika kanalerna visas som olika gråskalor där svart representerar outspätt injekteringsmedel och vitt rent vatten.

Som väntat kan en stor skillnad i inträngning iaktagas. Beräkningar av den här typen kan tänkas användas vid val av injekteringsmedel. Det bör beaktas att det inte alltid är maximal inträngning som är optimalt för injekteringsresultatet. Stora kostnader kan säkerligen inbesparas i en del fall med snabbhärdande medel då både tidsåtgången och åtgången volym injekteringsmedel minskar.

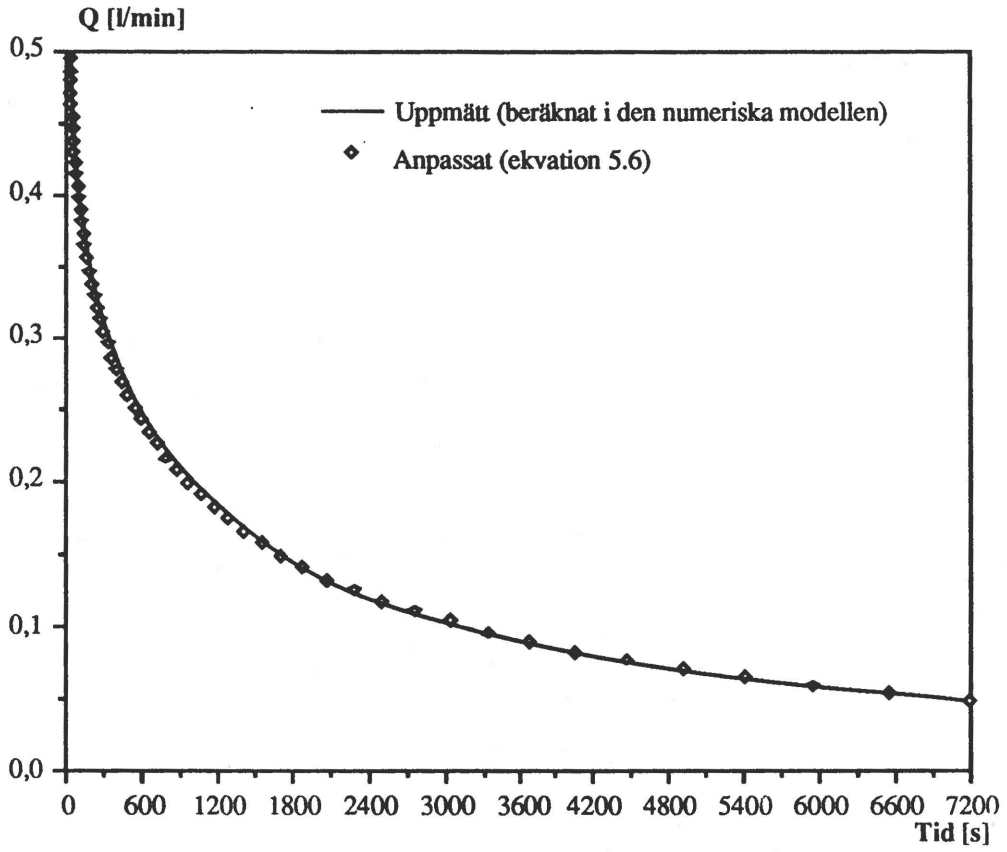
6.4 Klassificering av kanalnätet

I kapitel 5 redovisades ett förslag till klassificering av bergmassan ur injekteringssynpunkt. Vid klassificeringen måste exempelvis injekteringsmedlets härdningsförlopp medräknas. För att demonstrera och i någon mån verifiera klassificeringsmetoden har båda ovan (kap. 6.3) beräknade injekteringsförlopp använts. Klassificeringarna utfördes både med den "enklare" metoden (baserat på volym inträngt injekteringsmedel och uppmätt vattenförlust, se formler 5.2 och 5.5) och med den något mera komplicerade (baserat på hela det uppmätta injekteringsförloppet, se formel 5.6).

6.4.1 Tidskonstant injekteringsmedel

Beräkningen med det tidskonstanta injekteringsmedlet visade en injekterad volym av ca: 14.4 l injekteringsmedel i det beräknade sprickplanet efter 2 timmars injektering. Inströmningen hade dock inte avstannat vilket kan förklaras med använda tidskonstanta egenskaper hos injekteringsmedlet. I motsvarande verkliga injekteringssituation hade vi alltså mätt en vattenförlust på ca 4.1 Lugeon (se kap 6.3) och vi hade injekterat ca: 14.4 l injekteringsmedel. W i modellen var maximalt 8 cm (fyra kanaler om vardera 2 cm). L bör ligga någonstans mellan 25 och 50 m. Om vi ansätter L till 32 m så kan vi ur ekvation 5.2 och 5.5 beräkna b till 0.34 mm och α till 0.07 radianer. Vi skulle alltså grovt kunna klassificera bergmassan med dessa siffror. Man måste dock beakta att flödet inte hade avstannat vilket är ett av villkoren för att ekvation 5.5 skall gälla.

Om ett beräknat förlopp i klassificeringssystemets geometriska modell (ekvation 5.6) anpassas till insamlade (beräknade) data från injekteringens strömningsförlopp erhålls något annorlunda värden på de klassificerande parametrarna. En mycket god passning erhålls med L = 32 m, W = 0.87 cm, α =0.163 radianer och b = 0.32 mm (se fig. 6.4).



Figur 6.4: "Uppmätt" flödesförlopp från kanalmodellen och beräknat flödesförlopp enligt ekvation 5.6 efter passning av de klassificerade parametrarna för det tidskonstanta injekteringsmedlet. Som synes är överenstämmelsen mycket god. Övre delen av grafen är inte medtagen då detta skulle ha minskat upplösningen och omöjliggjort demonstrationen av den goda överenstämmelsen mellan uppmätt och anpassad kurva. Kurvorna börjar alltså vid 4,1 l/min vid tiden 0.

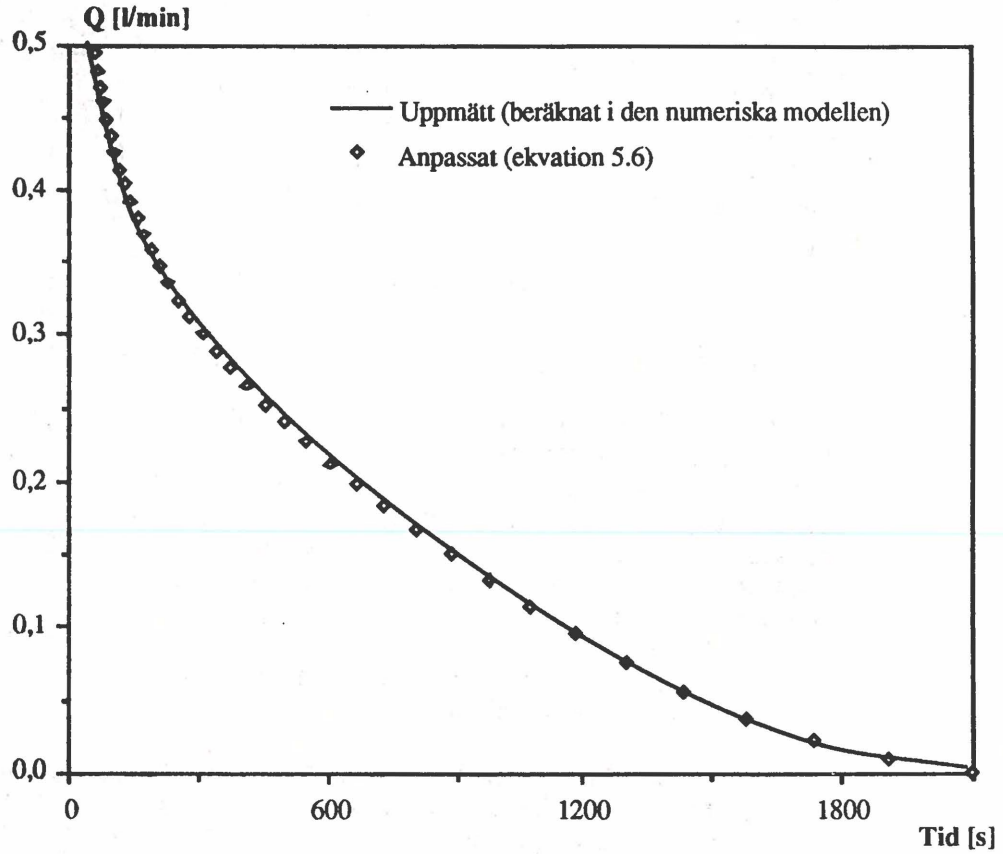
Skillnaden i resultat mellan de båda klassificeringarna kan som tidigare nämnts förklaras med injekteringsmedlets tidskonstanta egenskaper då frånvaron av härdning gör att maximal inträngning först uppnås efter mycket lång tid.

6.4.2 Härdande injekteringsmedel

Vid fallet med härdande injekteringsmedel försvåras klassificeringen något. För den "enkla" klassificeringen måste injekteringsmedlets skjuvhållfasthet uppskattas vid tidpunkten för upphört flöde från injekteringshål till berg. Tidpunkten kan i detta fall ur uppmätt injekteringsförlopp uppskattas till ca: 2100 sekunder. Efter 2100 sekunder kan injekteringsmedlets skjuvhållfasthet uppskattas till ca: 10.6 Pa.

Från det beräknade förloppet erhölls en injekterad volym av ca: 5.4 l för hela det simulerade kanalnätet. Enligt tidigare var vattenförlusten i kanalnätet ca: 4.1 Lugeon. Om vi liksom tidigare ansätter W till 8 cm och L till 32 m kan b beräknas till 0.17 mm och α till 1.0 radianer. Dessa värden överensstämmer inte speciellt bra med det använda kanalnätet.

Om däremot hela flödesförloppet används erhålls betydligt rimligare värden på parametrarna.



Figur 6.5: "Uppmätt" flödesförlopp från kanalmodellen och beräknat flödesförlopp enligt ekvation 5.6 efter passning av de klassificerade parametrarna för det härdande injekteringsmedlet. Som synes är överenstämmelsen mycket god.

En lika bra anpassning som vid fallet med det tidskonstanta injekteringsmedlet erhålls om W ansätts till 3.9 cm, L till 45 m, b till 0.32 mm och α till 0.127 radianer (se fig. 6.5).

6.4.3 Kommentarer

Klassificeringsresultatet vid fallet med tidskonstant injekteringsmedel och fallet med härdande injekteringsmedel bör vid en ytlig betraktelse bli identiskt. Skillnaden i resultat kan förklaras med den större inträngningen av det tidskonstanta medlet. Den större inträngningen medför att en större och därmed annorlunda area av nätverket är injekterat. Samtidigt kan den större injekterade arean minska störningseffekterna av det utspädda injekteringsmedlet vid fronten.

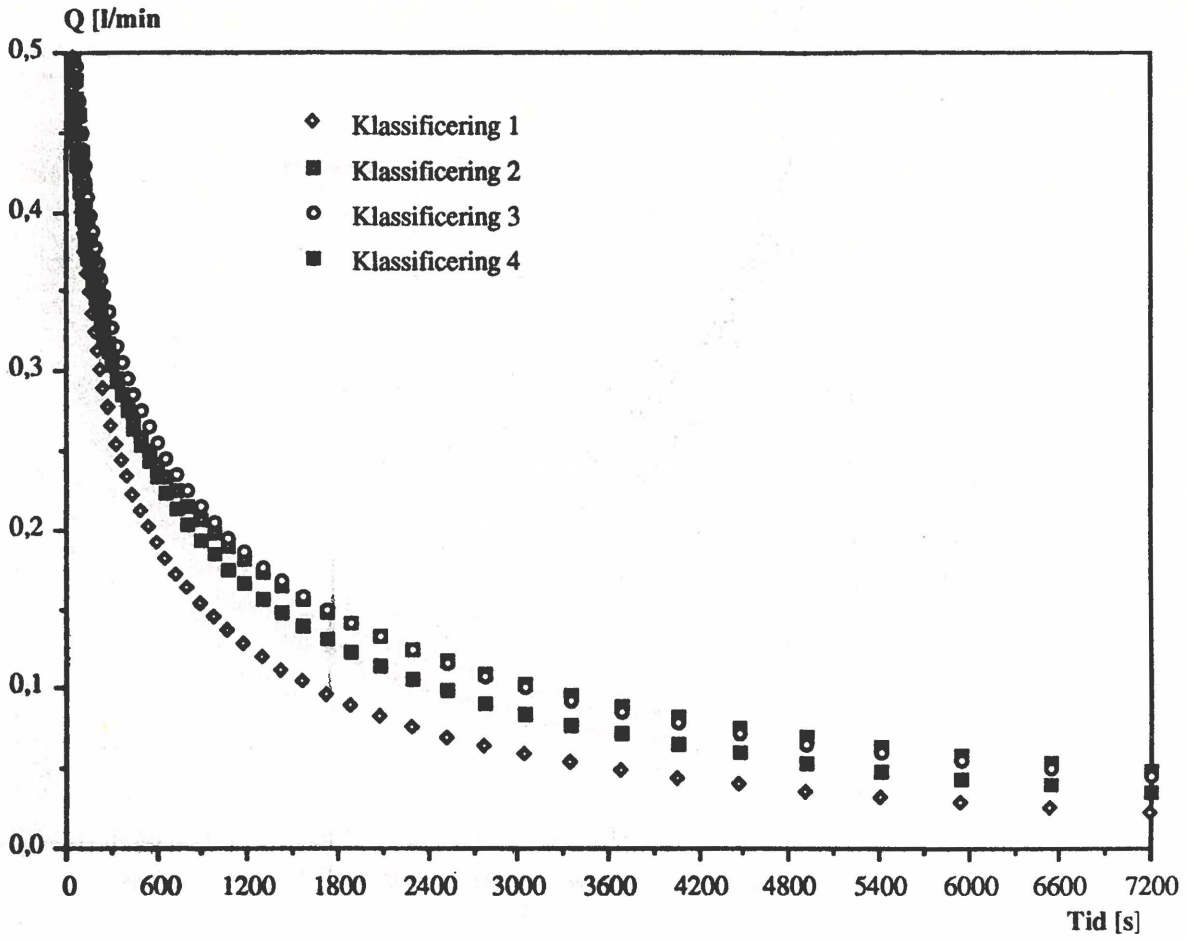
Klassificeringssystemet är tänkt att användas bl a för att på förhand bedöma injekteringsmedlets inträngning och förväntad åtgång samt att i efterhand bedöma uppnådd inträngning i berget. Från de ovan utförda klassificeringarna har fyra geometrier erhållits. En provning av de fyra klassificerande geometriernas relevans kan göras genom att jämföra beräknade inträngningar och volymer i de klassificerade geometrierna (formel 5.6) med vad som erhållits i kanalmodellen (numeriskt beräknade). En sådan jämförelse ger ett resultat enligt tabell 6.1 (nedan).

N:r	Klassificerad geometri					Beräknat ur klassificerad geometri		Uppmätt (beräknat med kanalmodell)	
	α [rad]	b [mm]	L [m]	W [cm]	Injekteringsmedel	Volym [l]	Inträngning [m]	Volym[l]	Inträngning [m]
1-k	0.07	0.34	32	8	Tidskonstant	9.9	27.7	14.4	≈22.5
2-k	0.163	0.32	32	0.87	Tidskonstant	14.4	23.4	14.4	≈22.5
3-h	1.0	0.17	32	8	Tidskonstant	14.5	12.8	14.4	≈22.5
4-h	0.127	0.32	45	3.9	Tidskonstant	12.8	24.8	14.4	≈22.5
1-k	0.07	0.32	32	8	Härdande	4.6	18.6	5.4	≈15
2-k	0.163	0.32	32	0.87	Härdande	5.7	14.5	5.4	≈15
3-h	1.0	0.17	32	8	Härdande	5.9	8.2	5.4	≈15
4-h	0.127	0.32	45	3.9	Härdande	5.4	16.1	5.4	≈15

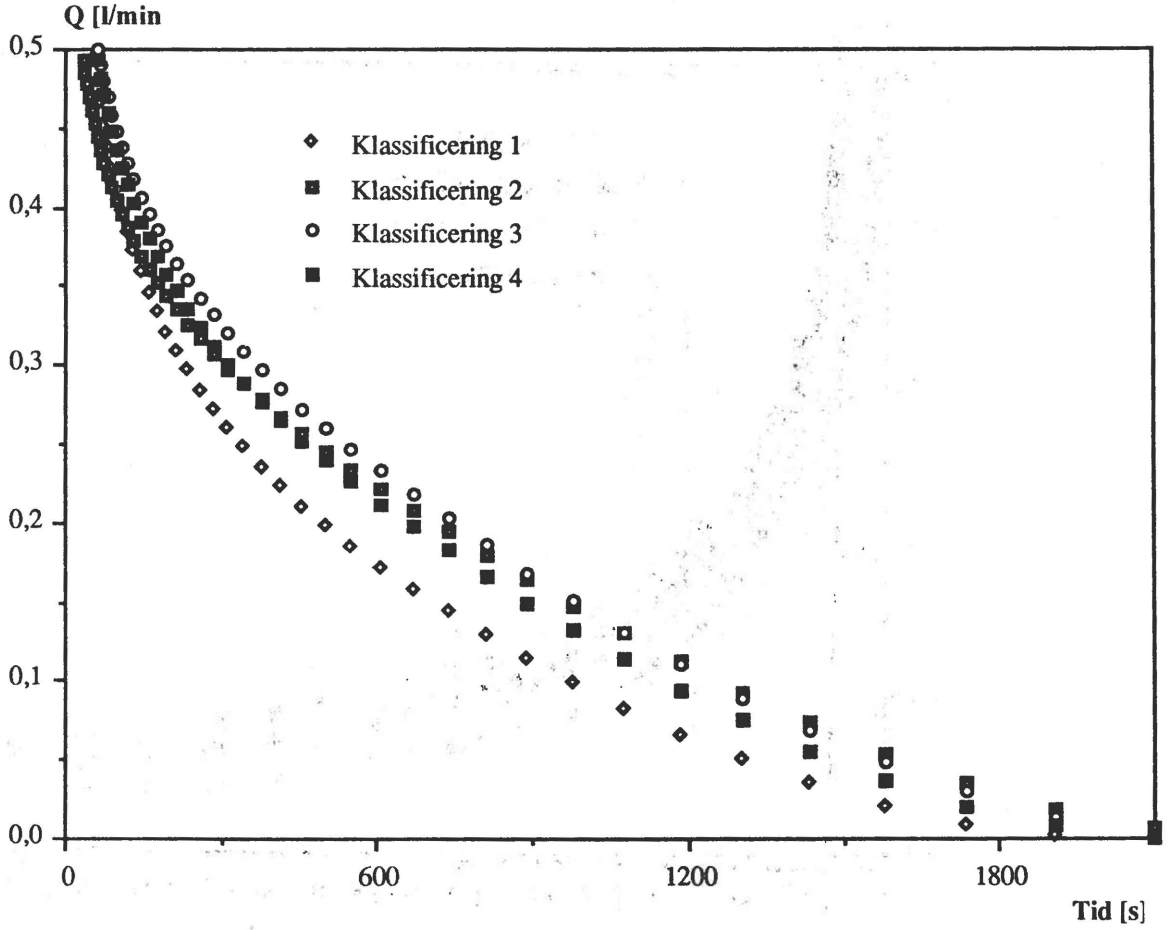
Tabell 6.1: Jämförelse av beräknad injekterad volym och inträngning i de klassificerade geometrierna med vad som uppmätts i kanalmodellen (från den numeriska modellen). Kolumnen längst till vänster beskriver hur den ursprungliga bestämningen av de geometriska parametrarna utfördes (k för klassificering ur injektering med tidskonstant injekteringsmedel och h för klassificering ur injektering med härdande medel). Överenstämmelsen är god utom möjligtvis för inträngningen vid fallen 3-h.

Resultatet visar en god överenstämmelse utom möjligtvis för inträngningen vid fallen 3-h.

Ett annat sätt att jämföra klassificeringsutfallen kan vara att grafiskt visa de beräknade flödesförloppen för alla fyra parameteruppsättningarna (klassificerande geometrierna) men med samma injekteringsmedel. Nedan i figur 6.6 och 6.7 visas sådana jämförelser där både det härdande och det tidskonstanta injekteringsmedlet använts i beräkningarna.



Figur 6.6: Jämförelse mellan beräknade flödesförlopp med det tidskonstanta injekteringsmedlet i de fyra framtagna geometrierna. Klassificering 2 motsvarar naturligtvis bäst det uppmätta förloppet (beräknat i kanalmodellen) då dess klassificerande geometri beräknats direkt ur detta uppmätta förlopp. Som väntat är skillnaden liten mellan de båda fallen där den klassificerande geometrin erhållits genom en anpassning till uppmätt injekteringsförlopp (fall 2 och 4). Det är dock anmärkningsvärt att skillnaden inte är större mellan fall 2 och fall 3.



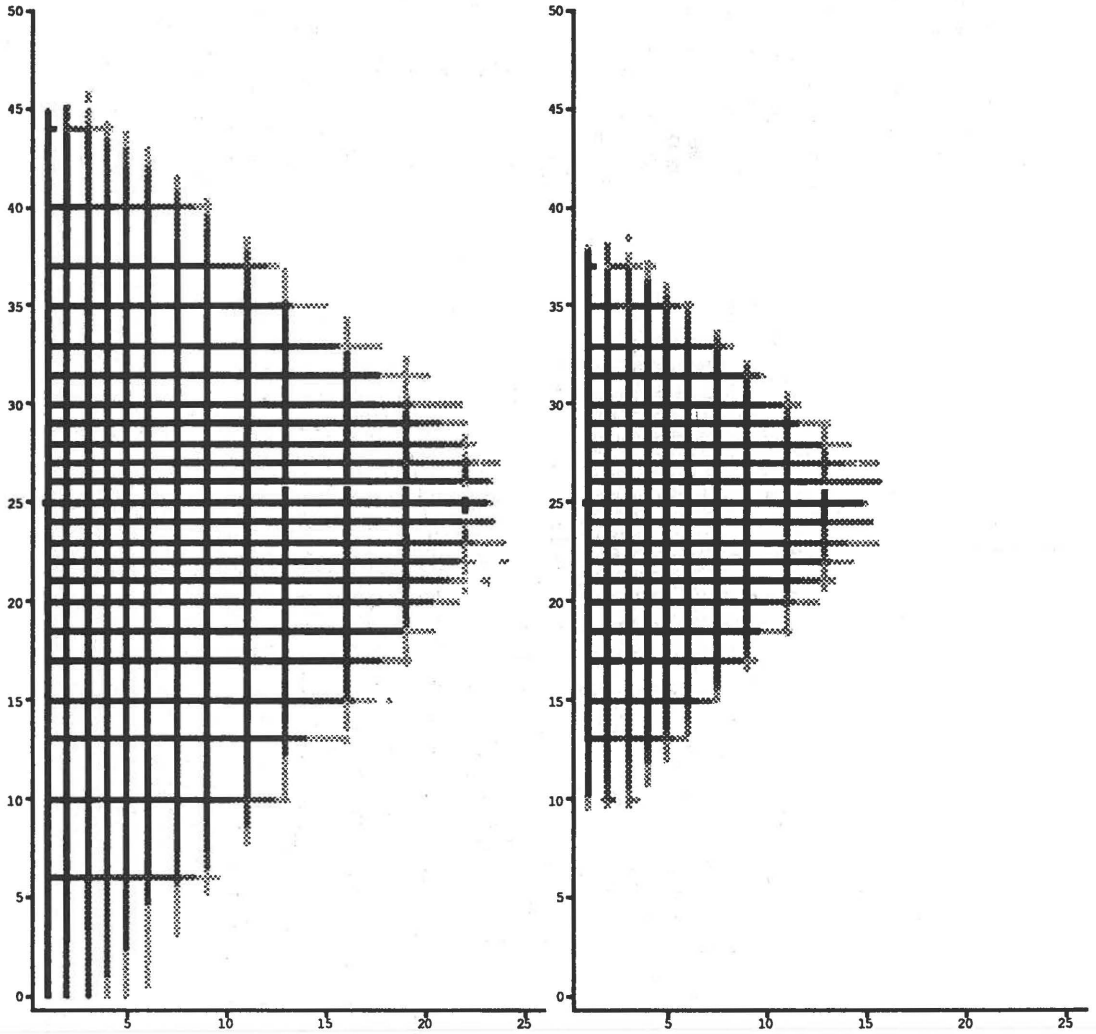
Figur 6.7: Jämförelse mellan beräknade flödesförlopp med det härdande injekteringsmedlet i de fyra framtagna geometrierna. Fall 4 motsvarar naturligtvis bäst det uppmätta förloppet (beräknat i kanalmodellen) då dess klassificerande geometri beräknats direkt ur detta uppmätta förlopp. Som väntat är skillnaden liten mellan de båda fallen där den klassificerande geometrin erhållits genom en anpassning till uppmätt injekteringsförlopp (fall 2 och 4). Det är dock anmärkningsvärt att skillnaden inte är större mellan fall 4 och fall 3.

Det kan konstateras att en mätbar skillnad i flödesförlopp erhålls i de olika geometrierna. Skillnaden mellan förloppen är dock begränsad vilket ökar betydelsen av kompletterande hydrauliska försök och geologiska uppföljningar.

De utförda klassificeringarna visar ett sätt att beskriva det relativt komplicerade kanalnätet med klassificeringssystemets fyra parametrar. Det kan konstateras att en lyckad klassificering av ett tänkt motsvarande verkligt fall hade möjliggjort en god förutsägelse av både injekteringsmedelsåtgång och inträngning i berget.

6.5 Betydelsen av injekteringsmedlets densitet (lutande kanalnät)

Som tidigare nämnts kan bergmassans kanaler och kanalnät förväntas luta. Effekten av denna lutning eller inklination styrs av injekteringsmedlets densitet i förhållande till vattnets. För att demonstrera något av dessa effekter har de tidigare redovisade exemplen med olika injekteringsmedel även räknats i ett vertikalt kanalnät (se fig. 6.8). I detta fall ansattes injekteringsmedlens densitet till 1.6 ton/m^3.



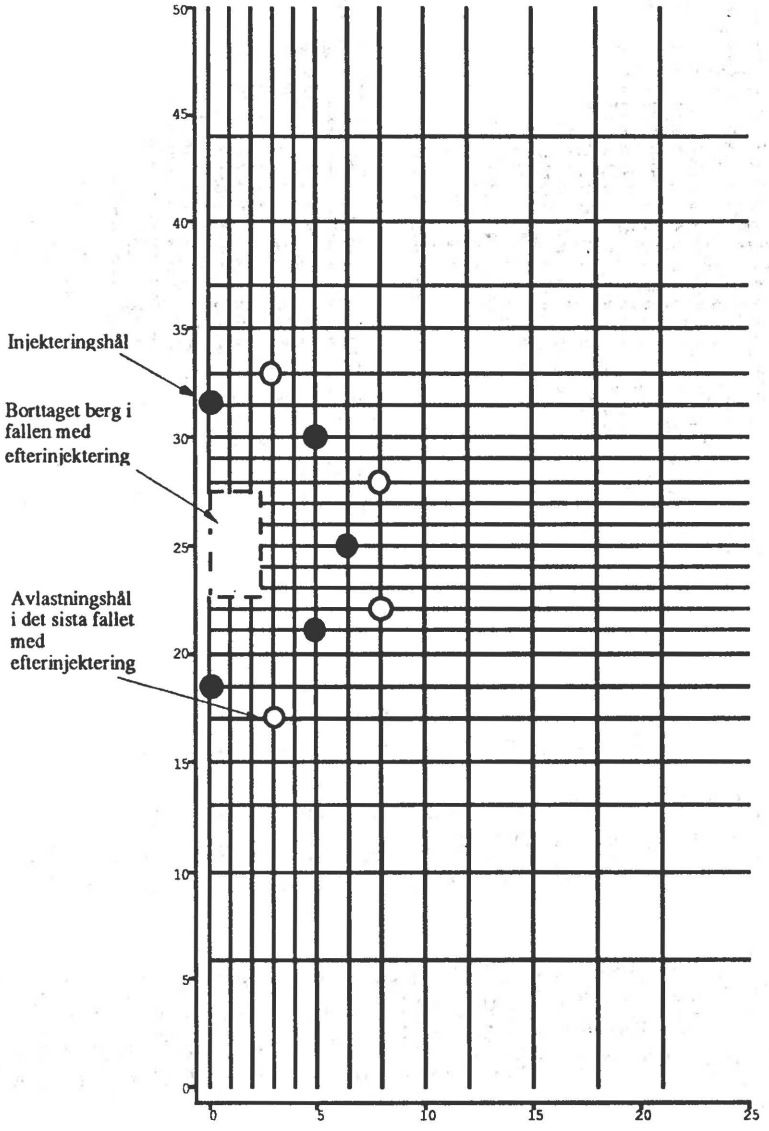
Figur 6.8: Effekten av injekteringsmedlets densitet i vertikalt kanalnätverk. Till vänster , ett injekteringsmedel med konstanta egenskaper. Till höger, ett injekteringsmedel med härdningsförlopp (se fig.6.2). Resultatet skall jämföras med figur 6.3.

Effekten av densiteten på injekteringsmedlets inträngning är inte försumbar ens i dessa fall där vi antagit en mycket god koppling mellan injekteringshål och det simulerade kanalnätet. Den goda kopplingen innebär höga gradienter över kanalnätet vilket reducerar betydelsen av densiteten.

En annan intressant iakttagelse är att de beräknade flödesförloppen är nästan identiska med de som erhölls med ett horisontellt kanalnät. Kanalnätets lutning påverkar alltså inte klassificeringen nämnvärt i det här fallet.

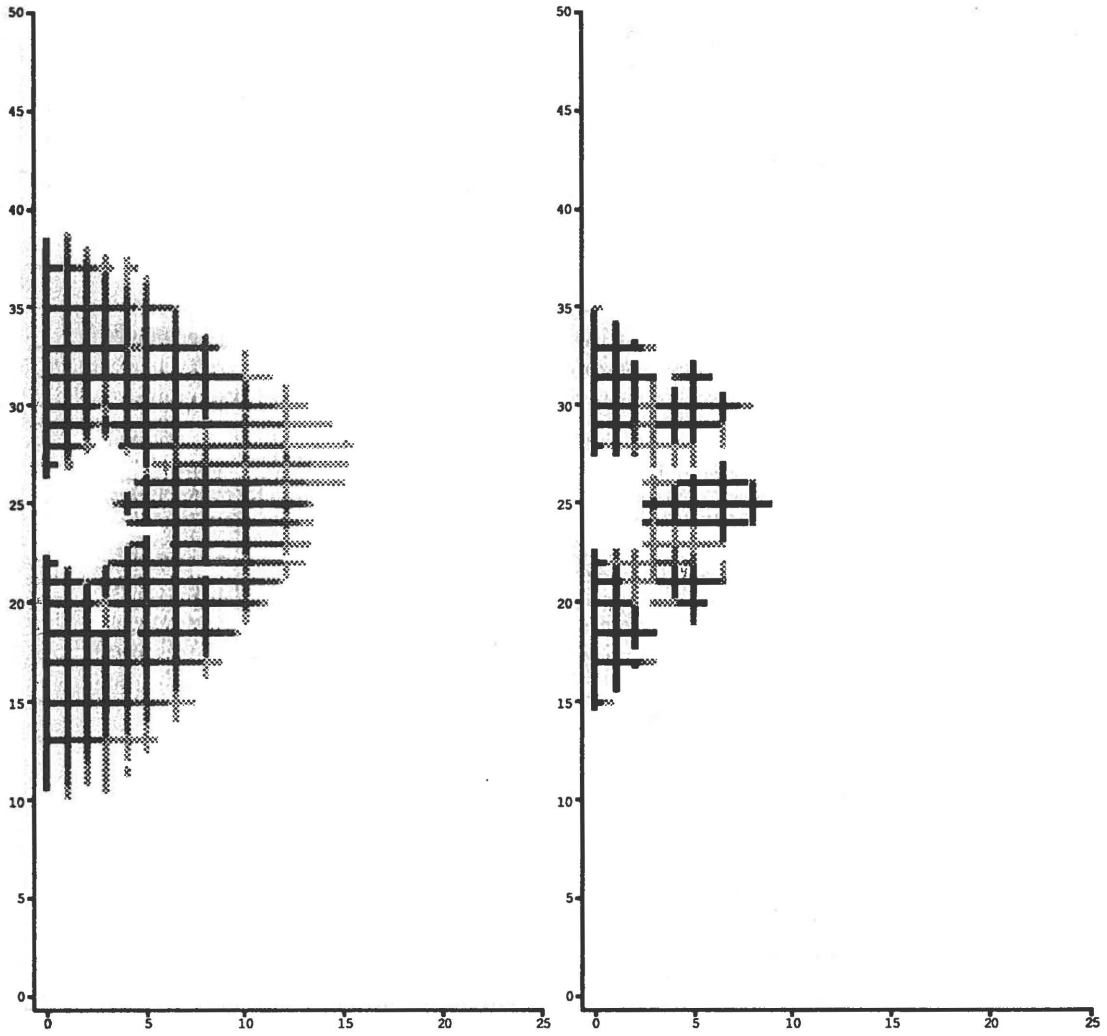
6.6 En jämförelse mellan för- och efterinjektering

Som en sista demonstration jämförs för och efterinjektering samt en efterinjektering med avlastningshål (Alberts 1966). Alla tre beräkningarna utfördes i det vertikala (stående) kanalnätet med det härdande injekteringsmedlet (densiteten 1.6 ton/m^3). I samtliga fall borrades 8 injekteringshål genom den simulerade kanalstrukturen (4 injekteringshål i modellen). Hålen injekterades samtidigt med ett övertryck av 10 bar (1 MPa över grundvattnets tryck). För att simulera det ibland förekommande fenomenet med bortsköljning av injekteringsmedlet vid efterinjektering krävdes en dålig koppling mellan injekteringshål och kanalnät (lågt W). Detta åstadkoms genom att ge injekteringshålen längden (L) 2m, öppningen (b) 0.32 mm och bredden (W) 5 mm. Högre konduktivitet i injekteringshålen gav relativt goda injekteringsresultat även i fallet med efterinjektering utan avlastningshål. Det principiella förfarandet visas nedan i figur 6.9.



Figur 6.9: Förfarande vid jämförelse mellan för- och efterinjektering.

Den beräknade inträngningen för förinjekteringen och den vanliga efterinjekteringen visas nedan i figur 6.10.



Figur 6.10: Beräknat injekteringsresultat för fallen med för och vanlig efterinjektering. Till vänster, förinjektering och till höger, efterinjektering. Efterinjekteringen visar dåligt injekterade områden mellan utsprängningen och det övriga kanalnätet.

Efterinjekteringen minskade inläckningen från 2.8 till 1.4 l/min och sprickplan. Resultatet kan inte anses som tillfredsställande. Dåligt injekterade områden finns kvar mellan det bortsprängda berget och det utanför liggande kanalnätet.

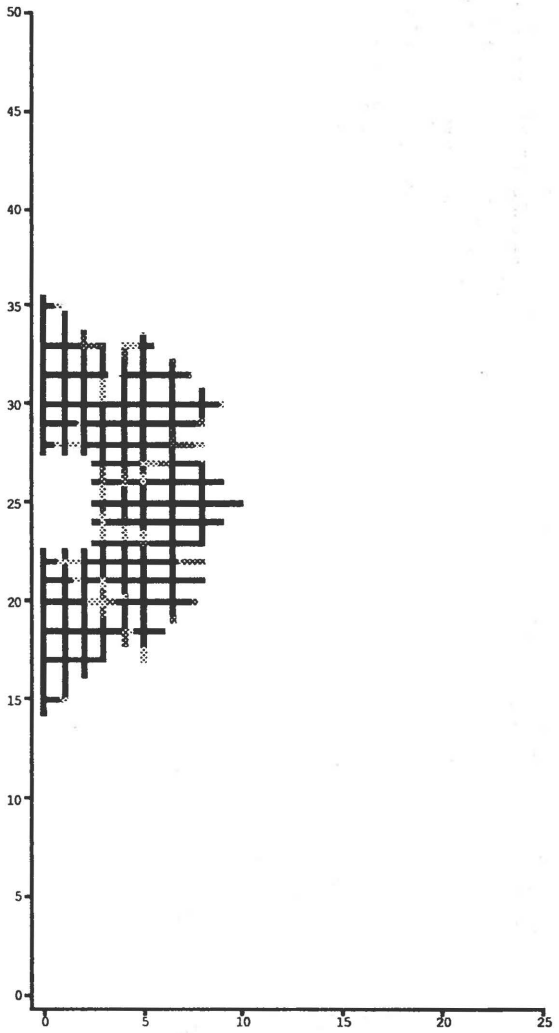
Området i centrum av kanalnätet vid förinjekteringen har blivit dåligt injekterat. Detta beror på att området är inneslutet av omkringliggande injekteringshål. Denna inneslutning ger en tryckstegring i området vilket gör att flödet mot centrum försvåras. Vid en verklig förinjektering kan det alltså vara betydelsefullt att injektera hålen separat så att flödet från ett hål inte störs av flödet från ett annat hål.

Vid efterinjekteringar är förhållandet troligtvis det omvända. Här kan ofta det största bekymret vara att injekteringsmedlet sköljs bort av en vattenström från berget in till det utbrutna området. Om så är fallet kan

troligtvis en samtidig injektering av alla hål på ett effektivt sätt motverka denna vattenström.

Ett sätt att förbättra resultatet kan vara att borra avlastningshål. I beräkningen visad nedan (figur 6.11) har 8 avlastningshål borrats genom det simulerade kanalnätet (4 i modellen) placerade enligt figur 6.7. Avlastningshålen gavs samma dåliga koppling till kanalnätet som injekteringshålen. Hålen placerade ovanför det utsprängda området gavs en tryckhöjd motsvarande det bortsprängda områdets takhöjd (hölls vattenfyllda). Övriga hål gavs en tryckhöjd motsvarande deras geometriska nivå i systemet (hölls torra).

Effekten av avlastningshålen är dramatisk. De tidigare dåligt injekterade områdena är nu fullgott fyllda med injekteringsmedel (se fig. 6.11).



Figur 6.11: Efterinjektering med avlastningshål. En dramatisk förbättring kan iaktagas jämfört med den vanliga efterinjekteringen utan avlastningshål. (se figur 6.10). De tidigare dåligt injekterade områdena är nu väl injekterade.

Känsligheten för bortsköljande vattenströmmar vid injekteringar beror enligt ovan till stor del på kontakten mellan injekteringshål och de vattenförande konduktorerna. Om problem föreligger kan resultatet säkerligen förbättras om avlastningshål används tillsammans med en samtidig injektering av samtliga injekteringshål.

7 Sammanfattning och slutsatser

7.1 Inledning

Det återstår mycket arbete innan injekteringsproblematiken har klivit upp från "svartkonst" (Morfeldt 1979) till vetenskap. Här redovisat arbete är bara en sten i ett större murverk. Några förhoppningsvis nyttiga resultat har dock framkommit. Nedan sammanfattas de tre behandlade delområdena med tillägg av några personliga tankar om framtiden.

7.2 Beräkningsmetoder för injekteringsförlopp i berg

Möjligheterna till beräkningar av injekteringsmedels inträngning i berg har hittills varit begränsade. Detta beror inte bara på bergets komplicerade och vanligtvis okända struktur utan även på själva strömningsproblemets komplexitet. Vid beräkningarna måste injekteringsmedlens icke-Newtonska och tidsföränderliga egenskaper medtas. Dessutom måste även hänsyn tagas till befintligt grundvatten i bergets konduktorer samtidigt som flera olika injekteringsmedel kan förväntas strömma i den modellerade bergvolymen. Här redovisad programvara och matematik visar en möjlighet att hantera ovanstående problem om egenskaper ansätts på det aktuella bergets konduktorer. Svårigheter med att ansätta bergets egenskaper leder dock till att vi i dagsläget är begränsade till principiella studier.

I kapitel 6 redovisades några enkla principiella beräkningar. Dessa beräkningar innefattar härdningsförloppets betydelse för injekteringsmedlets inträngning, densitetens betydelse vid lutande sprickplan och en enkel betraktelse av skillnaden mellan för- och efterinjektering samt ett förslag på hur efterinjekteringsresultat kanske kan förbättras. Målsättningen med beräkningarna var dock inte att anvisa några nya revolutionerande injekteringsmetoder utan istället att demonstrera hur beräkningar kan användas för att öka förståelsen för injekteringens styrande mekanismer.

En ökning av tillgängligheten och nyttan med här utvecklad beräkningsmetodik kräver fortsatt utveckling. Denna utveckling kan tänkas ske genom att något allmänt tillgängligt program för generering av diskreta spricksystem utvecklas till att generera kanalnät och att redovisa injekteringsresultat (se exempelvis Dershowitz et al 1991).

7.3 Injekteringsmedlens egenskaper

All vetenskaplig behandling av injekteringsproblematiken kräver god kunskap om injekteringsmedlens strömningsegenskaper och om hur de ändras under härdningsförloppet. Med i kapitel 3 redovisad metodik kan de flesta idag existerande injekteringsmedlen mätas. Idag finns dock endast egenskaper att tillgå från så kallade kemiska injekteringsmedel. Cementbaserade injekteringsmedels egenskaper är till stor del okända liksom effekterna av olika tillsatsmedel. I en framtid kommer åtminstone de beräkningsintresserade injekterarna att ställa ökade krav på information från leverantörerna. Den informationen kan förväntas innefatta en riktig fysikalisk beskrivning av medlens strömningsegenskaper med tidsförändringar och om hur dessa kan varieras genom användande av tillsatsmedel.

Ökade krav på kvalitetssäkring av injekteringsarbeten kräver också denna information. Mätningsförfarandet måste dock standardiseras innan en

mera generell användning i kravspecifikationer och dylikt kan användas. Som ett led i standardiseringsprocessen kan metoden demonstreras genom en systematisk genommätning av några på marknaden vanliga cementsorter och tillsatsmedel. Resultat från en sådan systematisk genommätning kan givetvis också direkt användas av injekterare vid val av injekteringsmedel samtidigt som de kan utgöra basen för en framtida "kokbok".

I en framtid kommer säkerligen ökade krav på kontroll av injekteringsmedlets egenskaper på arbetsplatserna. Det är orealistiskt att förvänta att alla arbetsplatser utrustas med komplicerade rotationsviskosimetrar. Istället kan förenklade fältmässiga mätmetoder utvecklas och verifieras (se Lombardi 1985 och Håkansson et al 1991).

7.4 Klassificering av berg med inriktning mot injektering

I kapitel 5 läggs grunderna för ett möjligt framtida system för klassificering av berg ur injekteringssynpunkt. Klassificeringen utförs företrädelsevis från uppmätta injekteringsförlopp. En enkel klassificering kan även utföras från åtgången volym injekteringsmedel och resultat från vanliga vattenförlustmätningar.

I kapitel 6 visas teoretiskt att det i kapitel 5 föreslagna klassificeringssystemet kan användas för att beskriva ett komplicerat kanalnät med ett fåtal parametrar. Det visas också teoretiskt att erhållen inträngning för en injektering kan beräknas ur klassificeringen.

Även om i kapitel 5 föreslaget klassificeringssystem visar sig otillräckligt för injekteringens behov kommer liknande system att utvecklas. Detta beror på faktumet att ett fungerande klassificeringssystem behövs.

I kapitel 5 diskuteras även en tänkbar variant av den framtida injekteringsprocessen. I den processen ingår en empirisk klassificering ur rena geologiska data. Som tidigare nämnts har flera försök till framtagning av sådana metoder gjorts i andra sammanhang. Användbarheten i detta sammanhang måste dock anses som begränsad då de tidigare försöken inte har varit inriktade mot framtagning av beräkningsunderlag för injekteringar. Om här föreslagna geometriska modell för klassificering visar sig fungera även i praktiska sammanhang bör modellens parametrar underlätta en framtagning av ett sådant empiriskt system.

Referenser

Abelin H., Migration in a single fracture, Ph.D. Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, 1986

Alberts C., Speciella förfaranden vid betongarbeten och injektering, kurs i betongteknik, föredrag nr: 6, Cement och Betonginstitutet, 1966

Andersson J., A.M. Shapiro och J. Bear, A stochastic model of a fractured rock conditioned by measured information, Water Resources Research, 20(1),79-88, 1984

Barker, J. A., A Generalized Radial-Flow Model for Pumping Tests in Fractured Rock, Water Resources Research, Vol. 24, pp. 1796-1804, 1988

Bathe, K-J., Finite Element Procedures in Engineering Analysis, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey 07632, 1982

Bird R.B, W.E. Stewart och Lightfoot, Transport Phenomena, Wiley and Sons, 1960

Dershowitz W, Geier J, Lee K, FracMan Discrete Feature Modelling System - User Documentation, Golder Associates Report 903-1368, Golder Associates Inc., Redmond WA., 1991

Dverstorp B., Analyzing Flow and Transport in Fractured Rock using the Discrete Fracture Network Concept (Thesis), Hydraulic Engineering, Royal Institute of Technology, Sweden, 1991

Evert F-K., Rock grouting with emphasis on dam sites, Springer verlag, 1985

Gale J.E., Assessing the permeability characteristics of fractured rock, Geologicl Society of America, Spec. pap. 189, 163-181, 1982

Gustafson G., Geohydrologiska förundersökningar i berg, BeFo 84:1/86, Stiftelsen Bergteknisk Forskning, 1986

Hakami E., Water flow in single rock joints, Licentiate Thesis 1988:11 L, Luleå University of Technology, Sweden, 1988

Håkansson U., Modellförsök - Icke Newtonsk strömmning i en-dimensionella kanaler, Examensarbete No. 4:87, Inst. för Jord och Bergmekanik, KTH, Stockholm, 1987

Håkansson U., Hässler L., Stille H., Mätmetodik för Injekteringsmedels Reologiska egenskaper, BeFo 241:1/91, Stiftelsen Bergteknisk Forskning, 1991

Hässler L., Andersson J, Stille H., Injekteringens styrmekanismer, Etapp I - Grundläggande samband, BeFo 105:1/85, Stiftelsen Bergteknisk Forskning, 1986

Hässler L., Håkansson U., Injektering i modell och verklighet, Bergmekanikdagen1989, BeFo, 1989

Hässler L., Stille H., Håkansson U., Simulation of grouting in jointed rock, Proc. 6 th International Congress on Rock Mechanics. Vol. 2, pp. 943-946, Montreal, Balkema, 1987

Littlejohn G.S., Design of cement based grouts, Grouting in geotechnical engineering, Proceedings American Society of Civil Engineers, ASCE, New Orleans, 1982

Lombardi G., The role of cohesion in cement grouting of rock, Quinziéme Congres des Grandes Barrage, Lausanne, 1985

MacFortran/MPW, absoft, 2781 Bond Street, Rochester Hills, MI 48309, (313) 853-0095, 1988

Morfeldt C-O, Är injektering i berg en svartkonst?, Bergmekanikdagen1979, BeFo, 1979

MPW 3.0, Macintosh Programmer's Workshop, Apple Computer Inc, 20525 Mariani Avenue, Cupertino, California 95014, 1988

Newton Isaac S., Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica, 1687

Noorishad J., M.S. Ayatollahi och P.A. Witherspoon, A finite element method for coupled stress and fluid flow in fractured rock masses, Ind. J. RockMech. Min. Sci. Geomech. Abstr., Vol 19, 185-193, 1982

Palmqvist K., Tätning av bergtunnlar. Injekteringsutförande och resultat, BeFo 66:1/83, Stiftelsen Bergteknisk Forskning, 1983

Pamqvist K., Lindström M., Channel Widths, SKB Arbetsrapport 91-06, SKB, Box 5864, 102 48 Stockholm, 1991

Sellgren A., Rheological analysis of industrial slurries, Water Resources Engineering Luleå, TULEÅ 1982:25, 1982

Van Wazer J.R., Lyons J.W., Kim K.Y. and Colwell R.E., Viscosity and flow measurement, a laboratory handbook of rheology, Monsanto chemical company, St.Louis, Missouri, Interscience publishers, 1963

Wallner M., Propagation of sedimentation stable cement pastes in jointed rock, Rock Mechanics and Waterways Construction, University of Achen, Germany, 1976

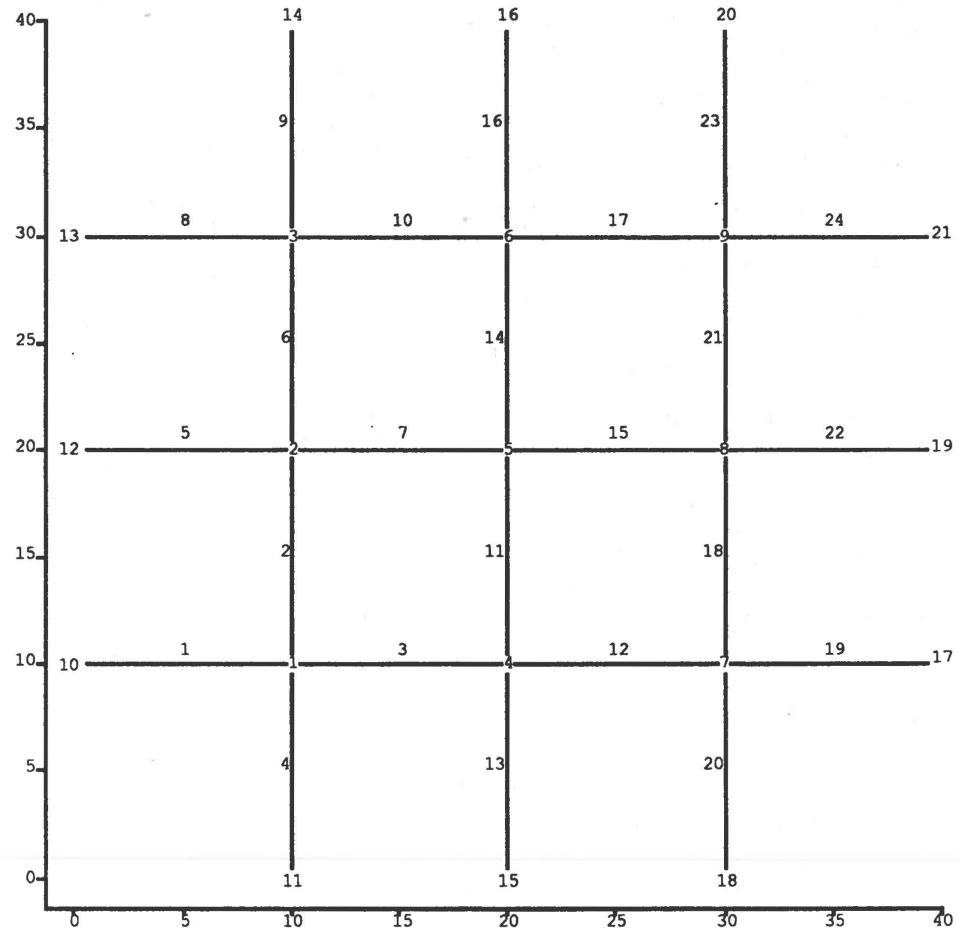
Appendix: Källkod med tillhörande in- och utdatafiler för nätverksprogrammet

A.1 Inledning

För att i någon mån möjliggöra en bredare användning av den utvecklade programvaran redovisas nedan formatet på indata och utdatafiler samt källkoden för kanalströmningsprogrammet. Indata och utdatafiler redovisas i samband med ett enkelt exempel.

A.2 Indatafil

Följande kanalnät skall injekteras i den numeriska modellen (fig. A.1).



Figur A.1: Kanalnät att injektera i nedanstående exempel.

Injekteringen sker via en extra kanal kopplad till knutpunkt 5. Indatafilen för injekteringssimuleringen heter Demoin och framgår nedan.

```
NUMBER OF JOINTS
   25
X1 Y1 Z1 X2 Y2 Z2 N1 N2 b CL W
 1.0e+1  1.0e+1  1.0e+1  0.0e+0  1.0e+1  1.0e+1  1  10 3.0e-4  1.0e+1  5.0e-2
 1.0e+1  1.0e+1  1.0e+1  1.0e+1  2.0e+1  2.0e+1  1   2 3.0e-4  1.0e+1  5.0e-2
 1.0e+1  1.0e+1  1.0e+1  2.0e+1  1.0e+1  1.0e+1  1   4 3.0e-4  1.0e+1  5.0e-2
 1.0e+1  1.0e+1  1.0e+1  1.0e+1  0.0e+0  0.0e+0  1  11 3.0e-4  1.0e+1  5.0e-2
 1.0e+1  2.0e+1  2.0e+1  0.0e+0  2.0e+1  2.0e+1  2  12 3.0e-4  1.0e+1  5.0e-2
 1.0e+1  2.0e+1  2.0e+1  1.0e+1  3.0e+1  3.0e+1  2   3 3.0e-4  1.0e+1  5.0e-2
 1.0e+1  2.0e+1  2.0e+1  2.0e+1  2.0e+1  2.0e+1  2   5 3.0e-4  1.0e+1  5.0e-2
 1.0e+1  3.0e+1  3.0e+1  0.0e+0  3.0e+1  3.0e+1  3  13 3.0e-4  1.0e+1  5.0e-2
 1.0e+1  3.0e+1  3.0e+1  1.0e+1  4.0e+1  4.0e+1  3  14 3.0e-4  1.0e+1  5.0e-2
 1.0e+1  3.0e+1  3.0e+1  2.0e+1  3.0e+1  3.0e+1  3   6 3.0e-4  1.0e+1  5.0e-2
 2.0e+1  1.0e+1  1.0e+1  2.0e+1  2.0e+1  2.0e+1  4   5 3.0e-4  1.0e+1  5.0e-2
 2.0e+1  1.0e+1  1.0e+1  3.0e+1  1.0e+1  1.0e+1  4   7 3.0e-4  1.0e+1  5.0e-2
 2.0e+1  1.0e+1  1.0e+1  2.0e+1  0.0e+0  0.0e+0  4  15 3.0e-4  1.0e+1  5.0e-2
 2.0e+1  2.0e+1  2.0e+1  2.0e+1  3.0e+1  3.0e+1  5   6 3.0e-4  1.0e+1  5.0e-2
 2.0e+1  2.0e+1  2.0e+1  3.0e+1  2.0e+1  2.0e+1  5   8 3.0e-4  1.0e+1  5.0e-2
 2.0e+1  3.0e+1  3.0e+1  2.0e+1  4.0e+1  4.0e+1  6  16 3.0e-4  1.0e+1  5.0e-2
 2.0e+1  3.0e+1  3.0e+1  3.0e+1  3.0e+1  3.0e+1  6   9 3.0e-4  1.0e+1  5.0e-2
 3.0e+1  1.0e+1  1.0e+1  3.0e+1  2.0e+1  2.0e+1  7   8 3.0e-4  1.0e+1  5.0e-2
 3.0e+1  1.0e+1  1.0e+1  4.0e+1  1.0e+1  1.0e+1  7  17 3.0e-4  1.0e+1  5.0e-2
 3.0e+1  1.0e+1  1.0e+1  3.0e+1  0.0e+0  0.0e+0  7  18 3.0e-4  1.0e+1  5.0e-2
 3.0e+1  2.0e+1  2.0e+1  3.0e+1  3.0e+1  3.0e+1  8   9 3.0e-4  1.0e+1  5.0e-2
 3.0e+1  2.0e+1  2.0e+1  4.0e+1  2.0e+1  2.0e+1  8  19 3.0e-4  1.0e+1  5.0e-2
 3.0e+1  3.0e+1  3.0e+1  3.0e+1  4.0e+1  4.0e+1  9  20 3.0e-4  1.0e+1  5.0e-2
 3.0e+1  3.0e+1  3.0e+1  4.0e+1  3.0e+1  3.0e+1  9  21 3.0e-4  1.0e+1  5.0e-2
 2.0e+1  2.0e+1  2.0e+1  2.0e+1  2.0e+1  2.0e+1  5  22 1.0e-2  2.0e+0  1.0e-2
NUMBER OF BOUNDARY NODES
  13
NUMBER OF INTERNAL NODES
  9
PRESSURE FOR BOUNDARY NODES. FIRST NODENUMBER   10
 4.0e+1  4.0e+1  4.0e+1  4.0e+1  4.0e+1  4.0e+1  4.0e+1  4.0e+1  4.0e+1  4.0e+1
 4.0e+1  4.0e+1  4.0e+1
TZERO-TIMECONSTANTS
 5.0e+0  6.0e-8  2.400e+0
VISCOSITY-TIMECONSTANTS
 1.0e-3  1.500e-10   2.400e+0
NUMBER OF GROUTING STRARTPOINTS
   1
NODENUMBERS FOR STARTPOINTS
  22
NUMBER OF NODES TO CHANGE PRESSURE IN
   1
NODENUMBER PRESSURE NODENUMBER PRESSURE.....
 2.200e+1  1.400e+2
JOINTS CONNECTED TO INTERNAL NODES
   1   2   3   4   0
   5   6   7   2   0
   8   9  10   6   0
   3  11  12  13   0
   7  14  15  11  25
  10  16  17  14   0
  12  18  19  20   0
  15  21  22  18   0
  17  23  24  21   0
NUMBER OF LENGTH-STEPS FOR THE JOINTS
   5
ACCURACY NUMBER
  20
NUMBER OF NODES CONNECTED TO ROOM
   0
NUMBER OF BREAKPOINTS
   3
 6.0e+1
 6.0e+2
 2.200e+3
density
 1.600e+0
```

Indatafilen innefattar förklarande text ovanför numeriska indata. Några förklaringar kan dock underlätta förståelsen. Filen består av följande data:

1 Antalet kanaler i beräkningen.

2 Geometriska data för varje enskild kanal och numren på knutpunkterna i kanernas änpunkter (N1 och N2).

3 Antalet randnoder (randvilkor)

4 Antalet interna knutpunkter (antalet obekanta i ekvationssystemet för beräkning av aktuellt tryck i knutpunkterna)

5 Den initiella vattentryckshöjden för randnoderna

6 Injekteringsmedlets skjuvhållfasthet med tidsvariation

7 Injekteringsmedlets viskositet med tidsvariation

8 Antalet randnoder att injektera

9 Nodnumren för randnoder att injektera

10 Antalet randnoder där det initiella trycket ändras vid injekteringen

11 Randnodsnummer följt av tryck (m vattenpelare) för de noder där trycket skall ändras under injekteringen.

12 Kanaler kopplade till interna knutpunkter. Första raden för knutpunkt 1 o s v.

13 Antalet längdsteg att använda per kanal.

14 Beräkningsnoggrannhet. Används tillsammans med antalet längdsteg som konvergenskriterie.

15 Antalet noder kopplade till eventuell kavitet eller sida som skall skyddas mot vatteninläckning. I detta fall har inga sådana noder definierats. Om så var fallet hade numren på dessa noder följt direkt efter post 15.

16 Antalet tidpunkter att specialgranska. När beräkningen passerar en sådan tidpunkt lagras data om kanalnätets tillstånd.

17 Tidpunkterna att specialgranska.

18 Injekteringsmedlets densitet.

A.3 Utdatafiler

Ett flertal utdatafiler skapas under simuleringens gång. Till att börja med skapas en logg över simuleringsberäkningen tillsammans med några andra nyttiga utdata. Filen erhåller som namn de första fyra bokstäverna i indatafilen följt av UT (i detta fall DemoUT). Begränsningen till 6 tecken i filnamn är historisk och beror av begränsningar i vissa gamla datamaskiners operativsystem. Den erhållna filen från här använda beräkningsexempel redovisas nedan:

```
OUTPUT FILES Demo
BREAKPOINTS SECONDS
 60.0000
 600.000
 2200.00
WATERLOSS UNDER TEN BAR OVERPRESSURE (100 m)
INJNOD      FLOW L/MIN     BPRESS
 22 1.7656728715532464 140.00000000000000
TOTAL LOSS L/MIN/10BAR (LAMINAR FLOW) 1.7656728715532464


NOD= 10 Q OUT TO ROCK IS  .00000000000000000
NOD= 11 Q OUT TO ROCK IS  .00000000000000000
NOD= 12 Q OUT TO ROCK IS  .00000000000000000
NOD= 13 Q OUT TO ROCK IS  3.828968392349807 46E-0022
NOD= 14 Q OUT TO ROCK IS  3.828968392349807 46E-0022
NOD= 15 Q OUT TO ROCK IS  .00000000000000000
NOD= 16 Q OUT TO ROCK IS  3.828968392349807 46E-0022
NOD= 17 Q OUT TO ROCK IS  .00000000000000000
NOD= 18 Q OUT TO ROCK IS  .00000000000000000
NOD= 19 Q OUT TO ROCK IS  .00000000000000000
NOD= 20 Q OUT TO ROCK IS  .00000000000000000
NOD= 21 Q OUT TO ROCK IS  .00000000000000000
NOD= 22 Q OUT TO ROCK IS  1.418136441611039 80E-0017

WATERVOLUME FLOWING IN TO ROOM----- .00000000000000000
WATERVOLUME FLOWING IN TO ROCK----- .00000000000000000
WATERVOLUME FL. OUT TO SUR. ROCK--- 1.418251310662810 29E-0017
ERROR IN CALC IS ------------------ 1.418251310662810 29E-0017
FLOW OF GROUT IN TO DOMAIN------ .00000000000000000
FLOW OF GROUT OUT OF DOMAIN IS----- .00000000000000000

Cnr Nod Com    Time1  Time2 NB   XNB CRDL  Dx    CL      XSpd      Nn    Np    Nd
  7   5 N1       5.4    1.4  1 10.00  0  .000 10.00 -.489E+00      5    18    20
 14   5 N1       5.4    1.4  1 10.00  0  .000 10.00 0.489E+00      5    18    20
 15   5 N1       5.4    1.4  1 10.00  0  .000 10.00 0.489E+00      5    18    20
 11   5 N1       5.4    1.4  1 10.00  0  .000 10.00 -.489E+00      5    18    20
  3   4 N1      26.8    6.6  1 10.00  0  .000 10.00 -.725E-01     10    33    40
 12   4 N1      26.8    6.6  1 10.00  0  .000 10.00 0.725E-01     10    33    40
 13   4 N1      26.8    6.6  1 10.00  0  .000 10.00 0.141E+00     10    33    40
  5   2 N1      33.3    1.4  1 10.00  0  .000 10.00 0.127E+00     11    36    44
  6   2 N1      33.3    1.4  1 10.00  0  .000 10.00 0.658E-01     11    36    44
  2   2 N1      33.3    1.4  1 10.00  0  .000 10.00 -.609E-01     11    36    44
 21   8 N1      33.3    1.4  1 10.00  0  .000 10.00 0.658E-01     11    36    44
 22   8 N1      33.3    1.4  1 10.00  0  .000 10.00 0.127E+00     11    36    44
 18   8 N1      33.3    1.4  1 10.00  0  .000 10.00 -.609E-01     11    36    44
 10   6 N1      34.7    1.6  1 10.00  0  .000 10.00 -.548E-01     12    39    48
 16   6 N1      34.7    1.6  1 10.00  0  .000 10.00 0.115E+00     12    39    48
 17   6 N1      34.7    1.6  1 10.00  0  .000 10.00 0.548E-01     12    39    48
  1   1 N1     217.9   11.8  1 10.00  0  .000 10.00 0.282E-01     20    68    85
  4   1 N1     217.9   11.8  1 10.00  0  .000 10.00 0.282E-01     20    68    85
 19   7 N1     217.9   11.8  1 10.00  0  .000 10.00 0.282E-01     20    68    85
 20   7 N1     217.9   11.8  1 10.00  0  .000 10.00 0.282E-01     20    68    85
  8   3 N1     250.9   66.4  1 10.00  0  .000 10.00 0.137E-01     22    80    99
  9   3 N1     250.9   66.4  1 10.00  0  .000 10.00 0.137E-01     22    80    99
 23   9 N1     250.9   66.4  1 10.00  0  .000 10.00 0.137E-01     22    80    99
 24   9 N1     250.9   66.4  1 10.00  0  .000 10.00 0.137E-01     22    80    99
  4   4 NST   2283.7     .0  3  6.17 10  .000 10.00 0.275E-05     26   119   142
GROUTING ENDED. NORMAL END OF EXECUTION.
EXECUTION TIME SEC  8.38333
DTITER= 2 DXITER= 1 SPITER= 16
CNR NB  X(M)   DX(MM) CL(M) B(MM)   TLIT(M) SPEED(M/S)    P(M)      COND
  1  3  5.13    .0000 10.00   .30 0.000E+00 0.216E-05 0.196E+02 0.165E-11
  2  1 10.00    .0000 10.00   .30 -.115E-10 -.468E-05 -.305E+02 0.192E-11
  3  1 10.00    .0000 10.00   .30 0.000E+00 -.227E-06 -.303E+02 0.113E-12
  4  3  6.17    .0000 10.00   .30 0.685E-11 0.275E-05 0.196E+02 0.175E-11
  5  1 10.00    .0000 10.00   .30 0.000E+00 0.104E-03 0.502E+02 0.312E-10
  6  1 10.00    .0000 10.00   .30 -.553E-12 0.186E-06 0.362E+02 0.921E-13
  7  1 10.00    .0000 10.00   .30 0.000E+00 -.109E-03 -.495E+02 0.331E-10
  8  3  3.60    .0000 10.00   .30 0.000E+00 0.208E-05 0.140E+02 0.224E-11
```

```
  9   3   2.91     .0000 10.00    .30 -.559E-11 0.231E-05 0.140E+02 0.288E-11
 10   1  10.00     .0000 10.00    .30 0.000E+00 -.420E-05 -.368E+02 0.171E-11
 11   1  10.00     .0000 10.00    .30 -.411E-09 -.255E-03 -.498E+02 0.685E-10
 12   1  10.00     .0000 10.00    .30 0.000E+00 0.227E-06 0.303E+02 0.113E-12
 13   1  10.00     .0000 10.00    .30 0.410E-09 0.255E-03 0.499E+02 0.683E-10
 14   1  10.00     .0000 10.00    .30 -.712E-10 0.340E-04 0.489E+02 0.119E-10
 15   1  10.00     .0000 10.00    .30 0.000E+00 0.109E-03 0.495E+02 0.331E-10
 16   1  10.00     .0000 10.00    .30 -.514E-10 0.256E-04 0.508E+02 0.857E-11
 17   1  10.00     .0000 10.00    .30 0.000E+00 0.420E-05 0.368E+02 0.171E-11
 18   1  10.00     .0000 10.00    .30 -.115E-10 -.468E-05 -.305E+02 0.192E-11
 19   3   5.13     .0000 10.00    .30 0.000E+00 0.216E-05 0.196E+02 0.165E-11
 20   3   6.17     .0000 10.00    .30 0.685E-11 0.275E-05 0.196E+02 0.175E-11
 21   1  10.00     .0000 10.00    .30 -.553E-12 0.186E-06 0.362E+02 0.921E-13
 22   1  10.00     .0000 10.00    .30 0.000E+00 0.104E-03 0.502E+02 0.312E-10
 23   3   2.91     .0000 10.00    .30 -.559E-11 0.231E-05 0.140E+02 0.288E-11
 24   3   3.60     .0000 10.00    .30 0.000E+00 0.208E-05 0.140E+02 0.224E-11
 25   1   2.00     .0000  2.00 10.00 0.000E+00 -.761E-04 -.292E+00 0.261E-07
NODE   PRESSURE   WVOL L   GVOL L
 10      40.0     .282     .0000
 11      40.0     .297     .0000
 12      40.0     .250     .3963
 13      40.0     .259     .0000
 14      40.0     .249     .0000
 15      40.0     .249     .8357
 16      40.0     .251   0.9477E-01
 17      40.0     .282     .0000
 18      40.0     .297     .0000
 19      40.0     .250     .3963
 20      40.0     .249     .0000
 21      40.0     .259     .0000
 22     140.0     .000    -4.898
ERROR= 2.25554686039686203E-0007
VOLUME INJEKTED GROUT  [L]= 4.8976992256939411
VOLUME OUTFLOWN GROUT  [L]= 1.7230986486538313
VOLUME INTACT IN MODEL [L]= 3.1339690509154454
VOLUME DILLUTED GROUT 1[L]= .00000000000000000
VOLUME DILLUTED GROUT 2[L]= 4.06315261246644078E-0002
NOD= 10 Q OUT TO ROCK IS  1.33376351497549300E-0009
NOD= 11 Q OUT TO ROCK IS  8.26808140498312172E-0009
NOD= 13 Q OUT TO ROCK IS  1.20252779642197217E-0009
NOD= 14 Q IN TO SYSTEM=   -4.03993456997829966E-0009
NOD= 17 Q OUT TO ROCK IS  1.33376351497549299E-0009
NOD= 18 Q OUT TO ROCK IS  8.26808140498312171E-0009
NOD= 20 Q IN TO SYSTEM=   -4.03993456997829965E-0009
NOD= 21 Q OUT TO ROCK IS  1.20252779642197217E-0009

WATERVOLUME FLOWING IN TO ROOM----- .00000000000000000
WATERVOLUME FLOWING IN TO ROCK----- -8.07986913995659930E-0009
WATERVOLYME FL. OUT TO SUR. ROCK--- 2.16087454327611737E-0008
ERROR IN CALC IS ----------------- 1.35288762928045744E-0008
FLOW OF GROUT IS IN TO DOMAIN------ -4.23723182019680505E-0007
FLOW OF GROUT OUT OF DOMAIN IS----- 4.10194305726875893E-0007
```

Datafilen används i huvudsak för att kontrollera att beräkningen har fungerat och för att studera injekterade volymer och injekteringens effektivitet (endast om något rum finns definierat).

När de ansatta tidpunkterna för specialgranskning passeras lagras som tidigare nämnts data om injekteringens tillstånd. Vid passerandet av den första tidpunkten benäms filen med indatafilens förts fyra bokstäver följt av 11, när den andra passeras indexeras filen med 12 o s v. Filen som skapades i det här fallet när 2200 sekunder passerades (Demo13) är uppbyggd enligt följande (den vänstra kolumnen står överst, därefter den högra):

```
25
25
1
 2.000        10
7
1
 10.00        10
14
1
 10.00        10
15
1
 10.00        10
11
1
 10.00        10
3
1
 10.00        10
12
1
 10.00        10
13
1
 10.00        10
5
1
 10.00        10
6
1
 10.00        10
2
1
 10.00        10
21
1
 10.00        10
22
1
 10.00        10
18
1
 10.00        10
10
1
 10.00        10
16
1
 10.00        10
17
1
 10.00        10
1
3
 10.00         0
 5.681         6
 5.127        10
4
3
 10.00         0
 6.732         6
 6.166        10
19
3
 10.00         0
 5.681         6
 5.127        10
20
3
 10.00         0
 6.732         6
 6.166        10
8
3
 10.00         0
 4.159         6
 3.597        10
9
3
 10.00         0
 3.450         6
 2.910        10
23
3
 10.00         0
 3.450         6
 2.910        10
24
3
 10.00         0
 4.159         6
 3.597        10
25
 0.2157E-05
-0.4682E-05
-0.2271E-06
 0.2752E-05
 0.1044E-03
 0.1855E-06
-0.1092E-03
 0.2081E-05
 0.2307E-05
-0.4203E-05
-0.2550E-03
 0.2271E-06
 0.2546E-03
 0.3398E-04
 0.1092E-03
 0.2558E-04
 0.4203E-05
-0.4682E-05
 0.2157E-05
 0.2752E-05
 0.1855E-06
 0.1044E-03
 0.2307E-05
 0.2081E-05
-0.7612E-04
 9
  59.62
  90.16
  53.96
  89.88
  139.7
  90.76
  59.62
  90.16
  53.96
  2284.
142 26 119 142
0
```

Den första delen på utdatafilen beskriver de kanaler som innehåller injekteringsmedel enligt följande:

1 Antalet kanaler som innehåller injekteringsmedel.

2 Numret på aktuell kanal

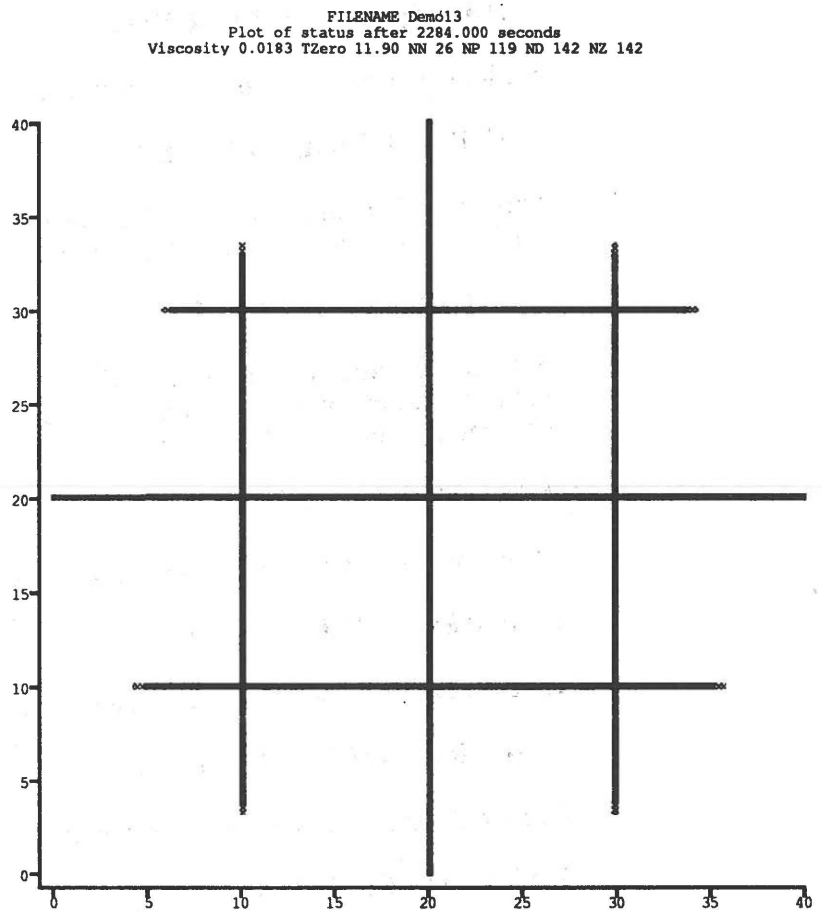
3 Antalet olika injekteringsmedel i kanalen

4 Frontläge (se kap. 2.3) och utspädningsgrad för den aktuella kanaldelen (10 betyder outspätt)

O s v för alla kanaldelar och för alla kanaler med injekteringsmedel.

Filen fortsätter med data om strömningshastigheten för varje kanal och data om aktuella tryckhöjder för varje internnod. Därefter följer data om den exakta tidpunkten för det beskrivna tillståndet (vanligtvis ej den beställda då ett tidssteg i beräkningarna vanligtvis inte avslutas precis vid den beställda tidpunkten) samt data om antalet utförda tidsteg och iterationer. Filen avslutas med data om knutpunkter där injekteringsmedlet späds vid det studerade tillfället (i detta fall sker ingen utspädning i någon knutpunkt).

En grafisk bild av injekteringsmedlets inträngning efter 2200 sekunder visas nedan (fig. A.2)



Figur A.2: Injekteringsmedlets inträngning efter 2200 sekunder.

Ytterligare två utdatfiler skapas under injekteringssimuleringen. Den ena indexeras FL (i detta fall DemoFL) och innehåller insamlade data för flödet under injekteringsförloppet. Den andra indexeras 10 (Demo10) och innehåller en komprimerad version av indatafilen. På så sätt samlas nödvändiga data för plottning och redovisning av injekteringsförloppet i filerna med index 10, 11, 12...., UT, FL.

A.4 Källkod i Fortran

Nedan redovisas en version av programmet som kan användas på macintoshdatorer med Motorola 68881 flyttalsprocessorer. Programversionen är utvecklad i MPW och använder Absoft Fortran 77 för MPW. Programmet använder en pascalrutin för standard Macintosh-gränssnitt vid öppning av filer. Denna del kan självklart inte användas av andra datorer. Programmet har alla "COMMON" deklarerade variabler liggande i en fil vid namn "thecommonb". För fullständigheten redovisas även använd "MAKEFILE" för kompilering och länkning. För att kompilera programkoden i annan dator måste variabeltypen extended (REAL*12) ibland bytas mot REAL*8 och alla delar benämna "SPECIAL MACINTOSH" bytas mot delar benämna "ORDINARY FORTRAN" eller tas bort.

A.4.1 Generell beräkningsdel

Programmet består av följande delar med uppgiften kort förklarad:

1 Huvudprogram NFLOW71

Kallar nedanstående rutiner och initierar injekteringssimuleringen.

2 SUBROUTINE WALLDAT

Skriver en fil med fullständiga data om den aktuella injekteringssituationen. Används om någonting går fel i beräkningen.

3 SUBROUTINE WPLDAT

Skriver filer med nödvändiga data för att redovisa aktuell flödessituation vid passerandet av tidpunkterna som skall specialgranskas. Se ovan för filer med index 11, 12.... o s v.

4 SUBROUTINE WGEDAT

Skriver en komprimerad version av indatafilen. Filen erhåller index 10.

5 SUBROUTINE INDAT

Läser indatafilen. Observera att indatafilens namn skall bestå av 6 tecken.

6 SUBROUTINE GETMAXA

Ordnar ekvationssytemet så att systemet kan lösas enligt Bathe (1982).

7 SUBROUTINE COLSOL

Ekvationslösare enligt Bathe (1982). Bygger på användande av så kallad skyline för att reducera minneskravet för simuleringarna.

8 SUBROUTINE PRESSU

Sätter upp ekvationssystemet, anropar COLSOL (ovan) och lagrar erhållna tryck och hastigheter.

9 SUBROUTINE SETNODDIL

Beräknar eventuell utspädning i de interna knutpunkterna.

10 SUBROUTINE DELTAX

Beräknar lämpligt tidssteg.

11 SUBROUTINE ZPLUG

Beräknar flödeskonduktiviteten i kanalerna (se kap. 2).

12 EXTENDED FUNCTION VISCF

Beräknar viskositeten i aktuell tidpunkt.

13 EXTENDED FUNCTION TZEROF

Beräknar skjuvhållfastheten i aktuell tidpunkt.

14 SUBROUTINE NEWST

Initierar nytt beräkningssteg.

15 SUBROUTINE AKTIVAT

Aktiverar knutpunkter som just nåtts av injekteringsmedel.

16 SUBROUTINE DEAKTIV

Deaktiverar knutpunkter som just tappat kontakt med injekteringsmedel.

17 SUBROUTINE NEOFEX

Avslutar beräkningen.

18 SUBROUTINE OUT

Skriver loggfilen indexerad UT.

19 SUBROUTINE FLOW

Beräknar flödet in i eventuellt rum före och efter injekteringen.

20 SUBROUTINE CHANGP

Ändrar tryck mellan initiell och injekteringssituation.

21 SUBROUTINE GETLUG

Beräknar lugeonvärdet för injekteringspunkterna.

Källkoden till beräkningsdelen är enligt nedan:

```
      PROGRAM NFLOW71
      INCLUDE 'thecommonb'
      INTEGER*2 I,J,IBREAK,K,MAXNWK
      CHARACTER*3 COM,UTFIL*6,FILNAME*6,PFIL*4
      LOGICAL DTIT,DXIT,SPIT
      EQUIVALENCE (FILNAME,PFIL)

C-----SPECIAL MACINTOSH
          PASCAL EXTERNAL READCALCIN
          INCLUDE "segload.inc"
          INTEGER*4 TickCount
          INLINE(TickCount=z'a975')
C-----MAKEWINDOW Se Absoft. Do not forget stackspace
          CALL MakeWindow
          CALL READCALCIN(FILNAME)
          CALL UnloadSeg(VAL(READCALCIN))
C-----END MAC SPECIAL

C-----ORDINARY FORTRAN
C         WRITE(*,*)'GIVE INPUT FILE'
C         READ(*,876) FILNAME
C         WRITE(*,*) FILNAME
C-----END ORDINARY FORTRAN
      OPEN(UNIT=88,FILE=FILNAME)
      WRITE(*,*) FILNAME
12    FORMAT(4A)
877   FORMAT(8A)
876   FORMAT(6A)
372   FORMAT(1A)
      CALL INDAT(FILNAME)
      CLOSE(88)
      NCLB=NCL
      WRITE(UTFIL,876)PFIL,'FL'
      OPEN(UNIT=76,FILE=UTFIL)
      WRITE(UTFIL,876)PFIL,'UT'
      OPEN(UNIT=77,FILE=UTFIL)
      WRITE(77,*)'OUTPUT FILES ',PFIL
      WRITE(77,*)'BREAKPOINTS SECONDS'
      DO 321 I=1,NBREAK
        WRITE(77,*) BREAK(I)
321   CONTINUE
      IBREAK=1
C-----SPECIAL MACINTOSH
          EXECTIME=TickCount()
C-----END MAC SPECIAL
      NNOINJ=0
      NCRINV=0
      NCRINJ=0
      NPRESSU=0
      NDELTAX=0
      NNEWST=0
      TIME(1)=0.
      TIME(2)=0.
      MAXBAT=10
      MAXNWK=20000
      CALL GETMAXA
      IF (MAXA(ISYS+1)-1.GT.MAXNWK) THEN
        WRITE(*,*)'A TO SMALL. ICREASE TO ',MAXA(ISYS+1)-1
        READ(*,*)I
        STOP
      ENDIF
      WRITE(*,*)'NEEDED A-SPACE=',MAXA(ISYS+1)-1
      BW=0
      DO 10 I=1,NCRACK
        K=ENDKOD(I,2)
```

```
        IF (K.LT.ISYS) THEN
          K=K-ENDKOD(I,1)
          IF (BW.LT.K) BW=K
        ENDIF
        DX(I)=0.
        COND(I)=817.5*B(I)**3*W(I)/X(I,1)/.001
        TILT(I)=0.
        CRDIL(I,1)=0
        NCRBAT(I)=1
        DO 666 J=2,MAXBAT
          CRDIL(I,J)=0
          X(I,J)=0
666     CONTINUE
10    CONTINUE
      WRITE(*,*) 'BANDWIDTH=',BW,' ISYS=',ISYS
      DO 11 I=1,ISYS
        ACK(I,1)=0.
        ACK(I,2)=0.
        NODDIL(I)=0
11    CONTINUE
      DO 13 I=ISYS+1,ISYS+NBOUND
        ACK(I,1)=0.
        ACK(I,2)=0.
13    CONTINUE
      NITER=0
      CALL GETLUG(TIME(1))
      TIME(1)=0.
      CALL PRESSU
      CALL FLOW
      CALL CHANGP(NPCHANG,PCHANG,BPRESS,ISYS)
      CALL PRESSU
      WRITE(76,3691) 0.00001,CHAR(9)
      DO 21 I=1,NCRACK
        DO 20 J=1,NUMSTA
          IF (ENDKOD(I,2).EQ.ISTART(J)) THEN
          WRITE(76,3691)-SPEED(I)*B(I)*
     2      W(I)*6.E4,CHAR(9)
3691          FORMAT(G10.4,A1,$)
            NCRINJ=NCRINJ+1
            CRINJ(NCRINJ)=I
            GOTO 21
          ENDIF
20      CONTINUE
21    CONTINUE
      WRITE(76,*)
      DO 30 I=1,NCRACK
        OSPEED(I)=SPEED(I)
30    CONTINUE
      CALL DELTAX
      CALL ZPLUG
      WRITE(77,*)'Cnr Nod Com    Time1  Time2 NB   XNB CRDL  Dx',
     2'    CL      XSpd     Nn     Np    Nd'
      J=10
      WRITE(FILNAME,2)PFIL,J
      CALL WGEDAT(FILNAME)
      WRITE(FILNAME,2)PFIL,IBREAK+10
      OPEN(UNIT=99,FILE=FILNAME)
2     FORMAT(A,I2)
      NSPIT=0
      NDXIT=0
      NDTIT=0
      DOWR=.FALSE.
      SPIT=.FALSE.
      DXIT=.FALSE.
      DTIT=.FALSE.
999   CONTINUE
      SPITER=.FALSE.
      DXITER=.FALSE.
      DTITER=.FALSE.
      CALL PRESSU
```

```
      CALL DELTAX
      CALL ZPLUG
      IF (ITER) THEN
        SPIT=SPITER
        DXIT=DXITER
        DTIT=DTITER
        NITER=NITER+1
        IF (NITER.GE.NCLB*NEPS-5) DOWR=.TRUE.
        IF (NITER.GT.NCLB*NEPS) THEN
          WRITE(*,*)'NO CONVERGENCE INCREASING NCL',NCL*2
          COM='MER'
          I=0
          NITER=0
          NCL=NCL*2
          CALL OUT(COM,I,I,NCL)
          DOWR=.FALSE.
          CALL DELTAX
          CALL ZPLUG
        ENDIF
        ITER=.FALSE.
        GOTO 999
      ENDIF
      DOWR=.FALSE.
      IF (SPIT) NSPIT=NSPIT+1
      IF (DXIT) NDXIT=NDXIT+1
      IF (DTIT) NDTIT=NDTIT+1
      CALL PRESSU
      IF ((NITER.LE.NEPS).AND.(NCL.GT.NCLB+1)) THEN
        NCL=NCL/2
        WRITE(*,*)'GOD CONVERGENCE DECREASING NCL ',NCL
      ENDIF
      IF (NITER.GT.NCLB*NEPS/2) THEN
        NCL=NCL*2
        WRITE(*,*)'SLOW CONVERGENCE INCREASING NCL ',NCL
      ENDIF
      NITER=0
      CALL DELTAX
      CALL NEWST
      IF (TIME(1).GE.BREAK(IBREAK)) THEN
        IF (IBREAK.EQ.NBREAK) THEN
          COM='MST'
          CALL NEOFEX(COM)
        ENDIF
        CALL WPLDAT
        CLOSE (99)
        IBREAK=IBREAK+1
        WRITE(FILNAME,2) PFIL,IBREAK+10
        OPEN(UNIT=99,FILE=FILNAME)
      ENDIF
      CALL DELTAX
      CALL ZPLUG
      GOTO 999
      END

      SUBROUTINE WALLDAT
      INCLUDE 'thecommonb'
      CHARACTER*12 FIL
      INTEGER*2 I,J
      WRITE(*,*)'FILENAME FOR ALLDATA FILE?'
      READ(*,2) FIL
2     FORMAT(6A)
      OPEN(UNIT=99,FILE=FIL)
      WRITE(99,*) 'NCRACK'
      WRITE(99,*) NCRACK
      DO 10 I=1,NCRACK
        WRITE(99,*) I
        WRITE(99,*)(ENDKOD(I,J),J=1,2)
        WRITE(99,*)B(I),X(I,1),W(I)
        WRITE(99,*)(CRACKK(I,J),J=1,6)
        WRITE(99,*)NCRBAT(I)
```

```
        DO 5 J=1,NCRBAT(I)
5         WRITE(99,*)X(I,J),CRDIL(I,J)
        WRITE(99,*) SPEED(I)
        WRITE(99,*) OSPEED(I)
        WRITE(99,*) COND(I)
10    CONTINUE
      WRITE(99,*) 'ISYS'
      WRITE(99,*) ISYS
      DO 20 I=1,ISYS
        WRITE(99,*)I
        WRITE(99,*)NODDIL(I),SPRESS(I)
        WRITE(99,*)(INS(I,J),J=1,5)
20    CONTINUE
      WRITE(99,*) 'NBOUND'
      WRITE(99,*) NBOUND
      DO 30 I=1,NBOUND
        WRITE(99,*) BPRESS(I)
30    CONTINUE
      WRITE(99,*) 'NNOINJ'
      WRITE(99,*) NNOINJ
      DO 40 I=1,NNOINJ
        WRITE(99,*) NODINJ(I)
40    CONTINUE
      WRITE(99,*) 'NCRINJ'
      WRITE(99,*) NCRINJ
      DO 50 I=1,NCRINJ
        WRITE(99,*) CRINJ(I)
50    CONTINUE
      WRITE(99,*) 'NCRINV'
      WRITE(99,*) NCRINV
      DO 60 I=1,NCRINV
        WRITE(99,*) CRINV(I)
60    CONTINUE
      WRITE(99,*) 'NUMSTA'
      WRITE(99,*) NUMSTA
      DO 70 I=1,NUMSTA
        WRITE(99,*) ISTART(I)
70    CONTINUE
      WRITE(99,*) 'NPCHANG'
      WRITE(99,*) NPCHANG
      DO 80 I=1,NPCHANG
        WRITE(99,*) (PCHANG(I,J),J=1,2)
80    CONTINUE
      WRITE(99,*) 'ACK COMING'
      DO 90 I=1,ISYS+NBOUND
        WRITE(99,*)(ACK(I,J),J=1,2)
90    CONTINUE
      WRITE(99,*) 'TIME'
      WRITE(99,*)(TIME(I),I=1,2)
      WRITE(99,*) 'VISCON'
      WRITE(99,*)(VISCON(I),I=1,3)
      WRITE(99,*) 'TZERO'
      WRITE(99,*)(TZERO(I),I=1,3)
      WRITE(99,*) 'NEPS,NCLB,NCL'
      WRITE(99,*) NEPS,NCLB,NCL
      WRITE(99,*) 'NUMBER OF VISITS'
      WRITE(99,*) NDELTAX,NNEWST,NPRESSU,NDELTAX
      WRITE(99,*) 'NROM'
      WRITE(99,*) NROM
      DO 100 I=1,NROM
        WRITE(99,*) ROM(I)
100   CONTINUE
      END

      SUBROUTINE WPLDAT
      INTEGER*2 II,I,J,K
      INCLUDE 'thecommonb'
1     FORMAT(G11.4)
2     FORMAT(G11.4,TR1,I4)
      WRITE(99,*) NCRINJ
```

```
      DO 10 I=1,NCRINJ
        WRITE(99,*) CRINJ(I)
        II=CRINJ(I)
        K=NCRBAT(II)
        WRITE(99,*)K
        DO 20 J=1,K
          WRITE(99,2)X(II,J),CRDIL(II,J)
20      CONTINUE
10    CONTINUE
      WRITE(99,*) NCRACK
      DO 40 I=1,NCRACK
        WRITE(99,1) SPEED(I)
40    CONTINUE
      WRITE(99,*)ISYS
      DO 50 I=1,ISYS
50        WRITE(99,1)SPRESS(I)
      WRITE(99,1) TIME(1)
      WRITE(99,*) NDELTAX,NNEWST,NPRESSU,NDELTAX
      J=0
      DO 60 I=1,ISYS
60        IF ((NODDIL(I).GT.0).AND.(NODDIL(I).LT.MAXBAT)) J=J+1
      WRITE(99,*)J
      DO 70 I=1,ISYS
        IF ((NODDIL(I).GT.0).AND.(NODDIL(I).LT.MAXBAT)) WRITE(99,*)
     2  I,NODDIL(I)
70    CONTINUE
      END

      SUBROUTINE WGEDAT(FIL)
      CHARACTER*6 FIL
      INTEGER*2 I,J
      INCLUDE 'thecommonb'
      OPEN(UNIT=99,FILE=FIL)
1     FORMAT(G11.4)
2     FORMAT(2G11.4)
3     FORMAT(3G11.4)
4     FORMAT(I4,G11.4)
      WRITE(99,*) NCRACK
      DO 10 I=1,NCRACK
        WRITE(99,*)(ENDKOD(I,J),J=1,2)
        WRITE(99,3)B(I),X(I,1),W(I)
        WRITE(99,3)(CRACKK(I,J),J=1,3)
        WRITE(99,3)(CRACKK(I,J),J=4,6)
10    CONTINUE
      WRITE(99,*) ISYS
      DO 20 I=1,ISYS
        WRITE(99,*)(INS(I,J),J=1,5)
20    CONTINUE
      WRITE(99,*) NBOUND
      DO 30 I=1,NBOUND
        WRITE(99,1) BPRESS(I)
30    CONTINUE
      WRITE(99,*) NUMSTA
      DO 70 I=1,NUMSTA
        WRITE(99,*) ISTART(I)
70    CONTINUE
      WRITE(99,*) NPCHANG
      DO 80 I=1,NPCHANG
        WRITE(99,4) NINT(PCHANG(I,1)),
     2  PCHANG(I,2)
80    CONTINUE
      WRITE(99,3)(VISCON(I),I=1,3)
      WRITE(99,3)(TZERO(I),I=1,3)
      WRITE(99,*) NEPS,NCL
      WRITE(99,*)NROM
      DO 100,I=1,NROM
        WRITE(99,*) ROM(I)
100   CONTINUE
      WRITE(99,*) NBREAK
      DO 101,I=1,NBREAK
```

```
        WRITE(99,1) BREAK(I)
101   CONTINUE
      WRITE(99,1)DENS
      END

      SUBROUTINE INDAT(INFIL)
      INTEGER*2 I,J
      INCLUDE 'thecommonb'
      CHARACTER*6 INFIL
      CHARACTER*80 DUM
1     FORMAT(80A)
      READ(88,1)DUM
      WRITE(*,*)DUM
      READ(88,*)NCRACK
      WRITE(*,*)NCRACK
      READ(88,1)DUM
      DO 60 I=1,NCRACK
      READ(88,*)(CRACKK(I,J),J=1,6),(ENDKOD(I,J),J=1,2),
     2          B(I),X(I,1),W(I)
60    CONTINUE
      READ(88,1)DUM
      WRITE(*,*)DUM
      READ(88,*) NBOUND
      WRITE(*,*) NBOUND
      READ(88,1)DUM
      WRITE(*,*)DUM
      READ(88,*)ISYS
      WRITE(*,*)ISYS
      READ(88,1)DUM
      WRITE(*,*)DUM
      READ(88,*)(BPRESS(I),I=1,NBOUND)
      READ(88,1)DUM
      WRITE(*,*)DUM
      READ(88,*)(TZERO(I),I=1,3)
      WRITE(*,*)(TZERO(I),I=1,3)
      READ(88,1)DUM
      WRITE(*,*)DUM
      READ(88,*)(VISCON(I),I=1,3)
      WRITE(*,*)(VISCON(I),I=1,3)
      READ(88,1) DUM
      WRITE(*,*)DUM
      READ(88,*) NUMSTA
      WRITE(*,*)NUMSTA
      READ(88,1)DUM
      WRITE(*,*)DUM
      READ(88,*)(ISTART(I),I=1,NUMSTA)
      WRITE(*,*)(ISTART(I),I=1,NUMSTA)
      READ(88,1)DUM
      WRITE(*,*)DUM
      READ(88,*) NPCHANG
      WRITE(*,*)NPCHANG
      READ(88,1)DUM
      WRITE(*,*)DUM
      READ(88,*)(PCHANG(I,1),PCHANG(I,2),I=1,NPCHANG)
      WRITE(*,*)(PCHANG(I,1),PCHANG(I,2),I=1,NPCHANG)
      READ(88,1)DUM
      WRITE(*,*)DUM
      DO 91 I=1,ISYS
        READ(88,*)(INS(I,J),J=1,5)
91    CONTINUE
      READ(88,1)DUM
      WRITE(*,*)DUM
      READ(88,*) NCL
      WRITE(*,*)NCL
      READ(88,1)DUM
      WRITE(*,*)DUM
      READ(88,*) NEPS
      WRITE(*,*)NEPS
      READ(88,1) DUM
      WRITE(*,*)DUM
```

```
      READ(88,*) NROM
      WRITE(*,*)NROM
      DO 100,I=1,NROM
        READ(88,*) ROM(I)
        WRITE(*,*)ROM(I)
100   CONTINUE
      READ(88,1) DUM
      WRITE(*,*)DUM
      READ(88,*) NBREAK
      WRITE(*,*)NBREAK
      DO 101,I=1,NBREAK
        READ(88,*) BREAK(I)
        WRITE(*,*)BREAK(I)
101   CONTINUE
      READ(88,1) DUM
      READ(88,*)DENS
      END

      SUBROUTINE GETMAXA
      INTEGER*2 I,J,ITOP(1000),NOD2
      INCLUDE 'thecommonb'
      DO 10 I=1,ISYS
10        ITOP(I)=0
      DO 20 I=1,ISYS
        DO 30 J=1,5
          ICRACK=INS(I,J)
          IF (ICRACK.EQ.0) GOTO 30
          IF (ENDKOD(ICRACK,1).EQ.I) THEN
            NOD2=ENDKOD(ICRACK,2)
            IF (NOD2.GT.ISYS) GOTO 30
            IF (ITOP(NOD2).LT.NOD2-I) ITOP(NOD2)=NOD2-I
          ENDIF
30      CONTINUE
20    CONTINUE
      MAXA(1)=1
      MAXA(2)=2
      DO 40 I=2,ISYS
40        MAXA(I+1)=ITOP(I)+MAXA(I)+1
      END

      SUBROUTINE COLSOL(A,V,MAXA,NN,NWK,KKK,FAIL)
C
C     STOLEN FROM JOBFEM AND BATHE WITH ACCEPTANCE OF FREDRIKSSON
C     SOME MINOR CHANGES
C
      IMPLICIT EXTENDED (A-E,O-Z)
      IMPLICIT INTEGER (I-N)
      LOGICAL FAIL
C
      DIMENSION A(NWK),V(NN),MAXA(NN+1)
C
C     PERFORM L*D*L(T) FACTORIZATION OF STIFFNESS MATRIX
C
      FAIL=.FALSE.
      IF(KKK-2)40,150,150
 40   DO 140 N=1,NN
      KN=MAXA(N)
      KL=KN+1
      KU=MAXA(N+1)-1
      KH=KU-KL
      IF(KH)110,90,50
 50   K=N-KH
      IO=0
      KLT=KU
      DO 80 J=1,KH
      IO=IO+1
      KLT=KLT-1
      KI=MAXA(K)
      ND=MAXA(K+1)-KI-1
      IF(ND) 80,80,60
```

```
 60   KK=MIN0(IO,ND)
      C=0.
      DO 70 L=1,KK
 70   C=C+A(KI+L)*A(KLT+L)
      A(KLT)=A(KLT)-C
 80   K=K+1
 90   K=N
      B=0.
      DO 100 KK=KL,KU
      K=K-1
      KI=MAXA(K)
      C=A(KK)/A(KI)
      B=B+C*A(KK)
 100  A(KK)=C
      A(KN)=A(KN)-B
 110  IF(A(KN))120,120,140
 120  WRITE(*,2000) N,A(KN)
      FAIL=.TRUE.
      NN=N
      RETURN
 140  CONTINUE
      RETURN
C
C     REDUCE RIGHT-HAND-SIDE LOAD VECTOR
C
 150  DO 180 N=1,NN
      KL=MAXA(N)+1
      KU=MAXA(N+1)-1
      IF(KU-KL)180,160,160
 160  K=N
      C=0.
      DO 170 KK=KL,KU
      K=K-1
 170  C=C+A(KK)*V(K)
      V(N)=V(N)-C
 180  CONTINUE
C
C     BACK-SUBSTITUTE
C
      DO 200 N=1,NN
      K=MAXA(N)
 200  V(N)=V(N)/A(K)
      IF(NN.EQ.1) RETURN
      N=NN
      DO 230 L=2,NN
      KL=MAXA(N)+1
      KU=MAXA(N+1)-1
      IF(KU-KL)230,210,210
 210  K=N
      DO 220 KK=KL,KU
      K=K-1
 220  V(K)=V(K)-A(KK)*V(N)
 230  N=N-1
      RETURN
 2000 FORMAT(//' STOP-STIFFNESS MATRIX NOT POSITIVE DEFINITE '//
     1' NONPOSITIVE PIVOT FOR EQUATION ',I4,//
     1' PIVOT = ',E20.1)
      END

      SUBROUTINE PRESSU
      EXTENDED   CONDT,P2
      EXTENDED A(20000),BB(1000)
      CHARACTER*3 COM
      INTEGER*2 I,J,K,N,ICRACK
      INTEGER NN,NWK,KKK
      LOGICAL FAIL
      INCLUDE 'thecommonb'
C-----INITIATE. BOUNDARY-ARRAY AND MATRIXMIDDLE MUST BE ZEROED
      DO 1 I=1,ISYS
        BB(I)=0.
```

```
1     CONTINUE
      DO 2 I=1,MAXA(ISYS+1)-1
2       A(I)=0
C-----LOOK FOR ZERO DIAGONALS
      DO 11 I=1,ISYS
        CONDT=0
        DO 12 J=1,5
          ICRACK=INS(I,J)
          IF (ICRACK.EQ.0) GOTO 12
          CONDT=CONDT+COND(ICRACK)
12      CONTINUE
        IF (CONDT.LE.0) THEN
          COM='ER1'
          K=3
          CALL OUT(COM,K,K,I)
        ENDIF
11    CONTINUE
      DO 10 I=1,ISYS
        K=MAXA(I)
        DO 20 J=1,5
          ICRACK=INS(I,J)
          IF (ICRACK.EQ.0) GOTO 20
          CONDT=COND(ICRACK)
          IF (CONDT.LE.0.) GOTO 20
          A(K)=A(K)+CONDT
          IF (ENDKOD(ICRACK,2).GT.ISYS) THEN
            BB(I)=BB(I)+CONDT*BPRESS(ENDKOD(ICRACK,2)-ISYS)
          ELSEIF (ENDKOD(ICRACK,1).EQ.I) THEN
            N=ENDKOD(ICRACK,2)
            A(MAXA(N)+N-I)=-CONDT
          ENDIF
          IF (ENDKOD(ICRACK,1).EQ.I) THEN
            BB(I)=BB(I)-TILT(ICRACK)
          ELSE
            BB(I)=BB(I)+TILT(ICRACK)
          ENDIF
20      CONTINUE
10    CONTINUE
      NWK=MAXA(ISYS+1)-1
      NN=ISYS
      KKK=1
      CALL COLSOL(A,BB,MAXA,NN,NWK,KKK,FAIL)
      IF (FAIL) THEN
        NCL=NCL*2
        COM='CER'
        J=0
        I=NN
        CALL OUT(COM,J,ICRACK,I)
        ITER=.TRUE.
        DO 50 J=1,5
          ICRACK=INS(I,J)
          IF (ICRACK.EQ.0) GOTO 50
          WRITE(*,*)'ICRACK=',ICRACK,' COND=',
     2    COND(ICRACK),' TILT=',TILT(ICRACK)
50      CONTINUE
        RETURN
      ENDIF
      KKK=2
      CALL COLSOL(A,BB,MAXA,NN,NWK,KKK,FAIL)
      NPRESSU=NPRESSU+1
      DO 25 I=1,ISYS
        SPRESS(I)=BB(I)
25    CONTINUE
      DO 40 I=1,NCRACK
        IF (ENDKOD(I,2).GT.ISYS) THEN
          P2=BPRESS(ENDKOD(I,2)-ISYS)
        ELSE
          P2=SPRESS(ENDKOD(I,2))
        ENDIF
        P2=SPRESS(ENDKOD(I,1))-P2
```

```
        DP(I)=P2
        SPEED(I)=(P2*COND(I)+TILT(I))/
     2           B(I)/W(I)
40    CONTINUE
      END

      SUBROUTINE SETNODDIL
      EXTENDED XSPEED,VOLT,VOLTT,VOLG
      INTEGER*2 I,J,ICRACK,NOD,IWRITE
      CHARACTER*3 COM
      INCLUDE 'thecommonb'
C-----GO THROUGH ALL NODES UNDER INJEKTION.
      DO 10 I=1,NNOINJ
        NOD=NODINJ(I)
C
C-----  SET NODDIL.
        VOLT=0
        VOLG=0
        DO 20 J=1,5
          ICRACK=INS(NOD,J)
          IF (ICRACK.EQ.0) GOTO 20
          XSPEED=(SPEED(ICRACK)+OSPEED(ICRACK))/2
          IF (ENDKOD(ICRACK,1).EQ.NOD) THEN
            IF (XSPEED.GE.0.) GOTO 20
C-----      OK FLOW FROM NODE TO CRACK.
C
            VOLTT=-XSPEED*W(ICRACK)*B(ICRACK)
            VOLG=VOLG+VOLTT*CRDIL(ICRACK,NCRBAT(ICRACK))/MAXBAT
            VOLT=VOLT+VOLTT
          ELSEIF (ENDKOD(ICRACK,2).EQ.NOD) THEN
            IF (XSPEED.LE.0.) GOTO 20
C-----      OK FLOW FROM NODE TO CRACK.
C
            VOLTT=XSPEED*W(ICRACK)*B(ICRACK)
            VOLG=VOLG+VOLTT*CRDIL(ICRACK,1)/MAXBAT
            VOLT=VOLT+VOLTT
          ELSE
            COM='ER2'
            IWRITE=3
            CALL OUT(COM,IWRITE,ICRACK,NOD)
          ENDIF
20      CONTINUE
        IF (VOLT.GT.0) THEN
          NODDIL(NOD)=NINT(MAXBAT*VOLG/VOLT)
        ENDIF
C-----TURN ON IF NO MIXING ALLOUD AS IN THE PREVIOUS VERSION
C       IF (NODDIL(NOD).LT.0.99) NODDIL(NOD)=0
10    CONTINUE
      END

      SUBROUTINE DELTAX
      EXTENDED    DT,XTOGO,TOLD,XSPEED,DXX,CL,TT
      INTEGER*2 JCRINV,I,ICRACK,INNOD,ICRCRI,II,INDIL,J
      CHARACTER*3 COM
      INCLUDE 'thecommonb'
      IF (NCL/NCLB.GT.128) THEN
         COM='D-1'
         CALL NEOFEX(COM)
      ENDIF
      TOLD=50000
C-----TOLD IS STARTVALUE WHEN CALCULATING WHICH CRACK THATS
C     MOST CRITICAL.
C
      NDELTAX=NDELTAX+1
      CALL SETNODDIL
      JCRINV=NCRINV
      NCRINV=0
      ICRCRI=0
C
C-----GO THRUE ALL CRACKS WITH GROUT IN THEM.
```

```
      DO 30 I=1,NCRINJ
        ICRACK=CRINJ(I)
        XSPEED=(OSPEED(ICRACK)+SPEED(ICRACK))/2.
        IF (XSPEED.EQ.0) THEN
          DX(ICRACK)=0
          GOTO 30
        ENDIF
        CL=X(ICRACK,1)
        IF (XSPEED.GT.0.) THEN
          INNOD=ENDKOD(ICRACK,1)
          IF ((NCRBAT(ICRACK).EQ.1).AND.
     2         (CRDIL(ICRACK,1).EQ.NODDIL(INNOD))) GOTO 30
C-----          CRACK IS FILLED AND NOT CHANGED. TAKE NEXT CRACK.
C
C-----    FIND SUFFICIENT LONG BATCH!!
          DO 70 J=2,NCRBAT(ICRACK)
            XTOGO=CL-X(ICRACK,J)
            IF (XTOGO.GE.CL/NCLB/NEPS/100) GOTO 80
70        CONTINUE
          XTOGO=CL
80        CONTINUE
        ELSE
          INNOD=ENDKOD(ICRACK,2)
          IF (INNOD.GT.ISYS) THEN
            DO 40 J=1,NUMSTA
              IF (INNOD.EQ.ISTART(J)) THEN
                INDIL=MAXBAT
                GOTO 50
              ENDIF
40          CONTINUE
            INDIL=0
50          CONTINUE
          ELSE
            INDIL=NODDIL(INNOD)
          ENDIF
          IF ((NCRBAT(ICRACK).EQ.1).AND.
     2         (CRDIL(ICRACK,1).EQ.INDIL)) GOTO 30
C-----          CRACK IS FILLED AND NOT CHANGED. TAKE NEXT CRACK.
C
C-----    FIND SUFFICIENT LONG BATCH!!
          DO 100 J=NCRBAT(ICRACK),2,-1
            XTOGO=X(ICRACK,J)
            IF (XTOGO.GE.CL/NCLB/NEPS/100) GOTO 110
100       CONTINUE
          XTOGO=CL
110       CONTINUE
        ENDIF
        IF (XTOGO.GT.CL/NCL) XTOGO=CL/NCL
        DT=XTOGO/ABS(XSPEED)
        IF (DT.LT.TOLD) THEN
          TOLD=DT
          ICRCRI=ICRACK
        ENDIF
90      CONTINUE
        NCRINV=NCRINV+1
        CRINV(NCRINV)=ICRACK
30    CONTINUE
      DT=TOLD
C-----DT IS NOW SHORTEST CRITICAL TIME.
C     VEKTOR NCRINV CONTAINS CRACKS WITH FRONTS INSIDE
C
      IF (TOLD.GE.3600) THEN
        IF (NCRINV.GT.0.) THEN
          COM='D1'
          II=0
          DT=DT/2
          NCL=NCL*2
          CALL OUT(COM,II,ICRCRI,INNOD)
          ITER=.TRUE.
        ELSE
```

```
          COM='D2'
          CALL NEOFEX(COM)
        ENDIF
      ENDIF
      IF (NCRINV.NE.JCRINV) THEN
        ITER=.TRUE.
        CRITER=.TRUE.
      ENDIF
      IF (ABS(DT-TIME(2)).GT.DT/NEPS) THEN
        ITER=.TRUE.
        DTITER=.TRUE.
        TT=TIME(2)
      ENDIF
      J=0
      DO 60 I=1,NCRINV
        ICRACK=CRINV(I)
        XTOGO=(OSPEED(ICRACK)+SPEED(ICRACK))/2.*DT
        DXX=ABS(XTOGO-DX(ICRACK))
        IF ((DXX.GT.ABS(XTOGO)/NEPS).AND.
     2      (XTOGO.GT.X(ICRACK,1)/NCLB/NEPS/100)) THEN
          ITER=.TRUE.
          DXITER=.TRUE.
          J=J+1
        ENDIF
          DX(ICRACK)=XTOGO
60    CONTINUE
      TIME(2)=DT
      IF (DTITER.AND.DOWR) WRITE(*,*)'DTITER DT=',DT,' TIME=',TT
      IF (DXITER.AND.DOWR) WRITE(*,*)
     2'DXITER ANTAL=',J,' ICRCRI=',ICRCRI,' DX=',DX(ICRCRI)
      END



      SUBROUTINE ZPLUG
      EXTENDED TZ,VISC,XT(11),
     2    BB,WW,DXX,TZEROF,VISCF
      EXTENDED XX,CL,MICOND,MINK1
      EXTENDED SUMZ,SUMD,K1,XSPEED,PI,Z2,VISCD,TZD,DENSD
      INTEGER*2 I,J,K,ICRACK,NBAT,NOD,DILT(11),ZITER
      CHARACTER*3 COM
      PARAMETER (PI=3.1415926536)
      INCLUDE 'thecommonb'
      SAVE MICOND
      SAVE MINK1
      DATA MICOND/100./
      DATA MINK1/100./
      TZ=TZEROF(TIME(1)+TIME(2),TZERO)
      VISC=VISCF(TIME(1)+TIME(2),VISCON)
      ZITER=0
      DO 10 I=1,NCRINJ
        ICRACK=CRINJ(I)
2002        XSPEED=ABS(SPEED(ICRACK))
        CL=X(ICRACK,1)
        DXX=DX(ICRACK)+CL
        DXX=DXX-CL
        BB=B(ICRACK)
        WW=W(ICRACK)
        IF (XSPEED.GT.0) THEN
          NBAT=NCRBAT(ICRACK)
          XT(1)=CL
          IF (DXX.GT.0) THEN
            DILT(1)=CRDIL(ICRACK,1)
            DO 12 J=2,NBAT
              XX=X(ICRACK,J)+DXX
              IF (XX.GT.CL) XX=CL
              XT(J)=XX
12            DILT(J)=CRDIL(ICRACK,J)
            J=NBAT
            DILT(J+1)=NODDIL(ENDKOD(ICRACK,1))
```

```
            XT(J+1)=DXX
          ELSEIF (DXX.LT.0) THEN
            NOD=ENDKOD(ICRACK,2)
            IF (NOD.GT.ISYS) THEN
              DO 13 J=1,NUMSTA
                IF (NOD.EQ.ISTART(J)) THEN
                  DILT(1)=MAXBAT
                  GOTO 17
                ENDIF
13            CONTINUE
              DILT(1)=0
17            CONTINUE
            ELSE
              DILT(1)=NODDIL(ENDKOD(ICRACK,2))
            ENDIF
            DO 14 J=1,NBAT
              XT(J+1)=X(ICRACK,J)+DXX
              IF (XT(J+1).LT.0) XT(J+1)=0
14            DILT(J+1)=CRDIL(ICRACK,J)
            J=NBAT
          ELSE
            DO 15 J=1,NCRBAT(ICRACK)
              XT(J)=X(ICRACK,J)
15            DILT(J)=CRDIL(ICRACK,J)
            J=NBAT-1
          ENDIF
2001      CONTINUE
          SUMZ=0
          SUMD=0
          DO 16 K=1,J
            XX=XT(K)-XT(K+1)
            IF (XX.LE.0) GOTO 16
            VISCD=0.001+(VISC-0.001)*DILT(K)/MAXBAT
            DENSD=1+(DENS-1)*DILT(K)/MAXBAT
            TZD=TZ*DILT(K)/MAXBAT
            IF (TZD.GT.0) THEN
              K1=SQRT(XSPEED*VISCD/TZD/BB+0.25)
              IF (K1.LE.0.5) THEN
                K1=MINK1
              ENDIF
              Z2=2*K1*COS(PI/3+ACOS(1/K1/K1/K1/8)/3)
              IF ((Z2.GT.0).AND.(Z2.LT.0.5)) THEN
                IF (MINK1.GT.K1) MINK1=K1
              ELSE
                K1=MINK1
                Z2=2*K1*COS(PI/3+ACOS(1/K1/K1/K1/8)/3)
              ENDIF
              Z2=1-3*Z2+4*Z2*Z2*Z2
            ELSE
              Z2=1
            ENDIF
            SUMZ=SUMZ+XX*VISCD/Z2
            SUMD=SUMD+XX*(DENSD-1)
16        CONTINUE
          K=J+1
          XX=XT(K)
          IF (XX.LE.0) GOTO 18
          VISCD=0.001+(VISC-0.001)*DILT(K)/MAXBAT
          DENSD=1+(DENS-1)*DILT(K)/MAXBAT
          TZD=TZ*DILT(K)/MAXBAT
          IF (TZD.GT.0) THEN
            K1=SQRT(XSPEED*VISCD/TZD/BB+0.25)
            IF (K1.LE.0.5) THEN
              K1=MINK1
            ENDIF
            Z2=2*K1*COS(PI/3+ACOS(1/K1/K1/K1/8)/3)
            IF ((Z2.GT.0).AND.(Z2.LT.0.5)) THEN
              IF (MINK1.GT.K1) MINK1=K1
            ELSE
              K1=MINK1
```

```
              Z2=2*K1*COS(PI/3+ACOS(1/K1/K1/K1/8)/3)
            ENDIF
            Z2=1-3*Z2+4*Z2*Z2*Z2
          ELSE
            Z2=1
          ENDIF
          SUMZ=SUMZ+XX*VISCD/Z2
          SUMD=SUMD+XX*(DENSD-1)
18        CONTINUE
          XX=817.5*BB*BB/SUMZ
          IF (XX.GT.0) THEN
            XSPEED=XX*DP(ICRACK)+
     2        (CRACKK(ICRACK,3)-CRACKK(ICRACK,6))/
     2        XT(1)*SUMD*XX
            IF ((ABS(SPEED(ICRACK)-XSPEED).GT.ABS(XSPEED)/NEPS).AND.
     2        (CL/NCLB/ABS(XSPEED).LT.3600).AND.
     3        (NITER.LT.NCLB*NEPS)) THEN
              SPITER=.TRUE.
              ZITER=ZITER+1
C ------------CAN BE IMPROVED
            ENDIF
            XX=XX*WW*BB
            IF (MICOND.GT.XX) MICOND=XX
            TILT(ICRACK)=(CRACKK(ICRACK,3)-CRACKK(ICRACK,6))/
     2        XT(1)*SUMD*XX
          ELSE
            XX=MICOND
            TILT(ICRACK)=(CRACKK(ICRACK,3)-CRACKK(ICRACK,6))/
     2        XT(1)*SUMD*XX
          ENDIF
          COND(ICRACK)=XX
          IF (SPITER) ITER=.TRUE.
        ENDIF
10    CONTINUE
      RETURN
      END


      EXTENDED FUNCTION VISCF(T,A)
      EXTENDED T,A(3)
      VISCF=A(1)+A(2)*T**A(3)
      END

      EXTENDED FUNCTION TZEROF(T,A)
      EXTENDED T,A(3)
      TZEROF=A(1)+A(2)*T**A(3)
      END

      SUBROUTINE NEWST
      EXTENDED    VOL,DXX,XSPEED,CL,OPRTME
      INTEGER*2 AKTIV(1000),DEAKT(1000),INNOD,I,J,K,L,IWRITE,NAKTIV,
     2        NDEAKT,NOD,ICRACK,INDIL
      CHARACTER*3 COM
      INCLUDE 'thecommonb'
      SAVE OPRTME
      DATA OPRTME/0./
      NNEWST=NNEWST+1
      IWRITE=0
      NAKTIV=0
      NDEAKT=0
C-----ACCUMULATE FLOWN VOLYME IN BOUNDARY NODES!!!!
369   FORMAT(G10.4,A1,$)
      IF (TIME(1)+TIME(2)-OPRTME.GT.1) THEN
        OPRTME=TIME(1)+TIME(2)
        WRITE(76,369) TIME(1)+TIME(2),CHAR(9)
C-----  CAN BE IMPROVED!!!!
        DO 370 I=1,NCRACK
          IF (ENDKOD(I,2).GT.ISYS) THEN
            NOD=ENDKOD(I,2)
            DO 371 J=1,NUMSTA
```

```
              IF (NOD.EQ.ISTART(J)) THEN
                WRITE(76,369) -SPEED(I)*B(I)*W(I)*6.E4,CHAR(9)
                GOTO 370
              ENDIF
371         CONTINUE
          ENDIF
370     CONTINUE
        WRITE(76,*)
      ENDIF
      DO 1 I=1,NCRACK
        IF (ENDKOD(I,2).GT.ISYS) THEN
          NOD=ENDKOD(I,2)
          XSPEED=(SPEED(I)+OSPEED(I))/2
          IF (XSPEED.EQ.0) GOTO 1
          VOL=XSPEED*TIME(2)*B(I)*W(I)
          IF (XSPEED.GT.0) THEN
            IF (CRDIL(I,1).GT.0) THEN
              ACK(NOD,1)=ACK(NOD,1)+VOL*CRDIL(I,1)/MAXBAT
              ACK(NOD,2)=ACK(NOD,2)+VOL*(MAXBAT-CRDIL(I,1))/MAXBAT
            ELSE
              ACK(NOD,2)=ACK(NOD,2)+VOL
            ENDIF
          ELSE
            DO 2 J=1,NUMSTA
              IF (NOD.EQ.ISTART(J)) THEN
                ACK(NOD,1)=ACK(NOD,1)+VOL
                GOTO 1
              ENDIF
2           CONTINUE
            ACK(NOD,2)=ACK(NOD,2)+VOL
          ENDIF
        ENDIF
1     CONTINUE
      DO 3 I=1,NNOINJ
        NOD=NODINJ(I)
        ACK(NOD,2)=0
        DO 4 J=1,5
          K=INS(NOD,J)
          IF (K.EQ.0) GOTO 4
          DXX=DX(K)
          VOL=ABS(DXX)*B(K)*W(K)
          IF (ENDKOD(K,1).EQ.NOD) THEN
            IF (DXX.GE.0) GOTO 4
            IF (CRDIL(K,1).EQ.MAXBAT) GOTO 4
            ACK(NOD,1)=ACK(NOD,1)+VOL*CRDIL(K,1)/MAXBAT
          ELSE
            IF (DXX.LE.0.) GOTO 4
            IF (CRDIL(K,NCRBAT(K)).EQ.MAXBAT) GOTO 4
            ACK(NOD,1)=ACK(NOD,1)+VOL*CRDIL(K,NCRBAT(K))/MAXBAT
          ENDIF
4       CONTINUE
3     CONTINUE
C
C-----START LOOPING!
      DO 10 I=1,NCRINV
        ICRACK=CRINV(I)
        CL=X(ICRACK,1)
        DXX=DX(ICRACK)+CL
        DXX=DXX-CL
        IF (DXX.GT.0.) THEN
C-----    FLOW FROM LOWER NODE NUMBER
          INNOD=ENDKOD(ICRACK,1)
          L=1
          K=0
          DO 101 J=2,NCRBAT(ICRACK)
            X(ICRACK,J-K)=X(ICRACK,J-K)+DXX
            IF (CL-X(ICRACK,J-K).LE.CL/NCLB/NEPS/NEPS) THEN
C-----        FRONT AT OUTNODE
C-----        UPDATE CHANNEL SEGMENTS
              X(ICRACK,J-K)=CL
```

```
                DO 103 M=J-K-1,NCRBAT(ICRACK)-K-1
                  X(ICRACK,M)=X(ICRACK,M+1)
                  CRDIL(ICRACK,M)=CRDIL(ICRACK,M+1)
103             CONTINUE
                M=NCRBAT(ICRACK)-K
                X(ICRACK,M)=0
                CRDIL(ICRACK,M)=0
                K=K+1
                GOTO 101
              ENDIF
              L=L+1
101         CONTINUE
            J=L
            IF (NODDIL(INNOD).NE.CRDIL(ICRACK,J)) THEN
              IF (J.EQ.MAXBAT) THEN
                CRDIL(ICRACK,J-1)=
     2            NINT(((X(ICRACK,J)-DXX)*CRDIL(ICRACK,J)+
     3            (X(ICRACK,J-1)-X(ICRACK,J))*CRDIL(ICRACK,J-1))/
     4            (X(ICRACK,J-1)-DXX))
                X(ICRACK,J-1)=X(ICRACK,J)
                J=J-1
              ENDIF
              J=J+1
              X(ICRACK,J)=DXX
              CRDIL(ICRACK,J)=NODDIL(INNOD)
            ENDIF
            NCRBAT(ICRACK)=J
          ENDIF
          IF (DXX.LT.0) THEN
C-----      FLOW FROM HIGHER NODE NUMBER
            INNOD=ENDKOD(ICRACK,2)
            IF (INNOD.GT.ISYS) THEN
              DO 105 J=1,NUMSTA
                IF (ISTART(J).EQ.INNOD) THEN
C-----            INNODE IS INJEKTIONNODE.
                  INDIL=MAXBAT
                  GOTO 106
                ENDIF
105           CONTINUE
              INDIL=0
106           CONTINUE
            ELSE
              INDIL=NODDIL(INNOD)
            ENDIF
            L=1
            K=0
            DO 107 J=2,NCRBAT(ICRACK)
              X(ICRACK,J)=X(ICRACK,J)+DXX
              L=L+1
              IF (X(ICRACK,J).LE.CL/NCLB/NEPS/NEPS) THEN
C-----          X(J) AT OUTNODE
                CRDIL(ICRACK,J)=0
                X(ICRACK,J)=0
                K=K+1
              ENDIF
107         CONTINUE
            J=L-K
            IF (INDIL.NE.CRDIL(ICRACK,1)) THEN
              IF (J.EQ.MAXBAT) THEN
                CRDIL(ICRACK,1)=
     2            NINT(((X(ICRACK,1)-X(ICRACK,2)+DXX)*CRDIL(ICRACK,1)+
     3            (X(ICRACK,2)-X(ICRACK,3))*CRDIL(ICRACK,2))/
     4            (X(ICRACK,1)-X(ICRACK,3)+DXX))
                DO 108 K=2,J-1
                  CRDIL(ICRACK,K)=CRDIL(ICRACK,K+1)
108               X(ICRACK,K)=X(ICRACK,K+1)
                J=J-1
              ENDIF
              DO 109 K=J,2,-1
                X(ICRACK,K+1)=X(ICRACK,K)
```

```
              CRDIL(ICRACK,K+1)=CRDIL(ICRACK,K)
109           CONTINUE
              J=J+1
              X(ICRACK,2)=X(ICRACK,1)+DXX
              CRDIL(ICRACK,2)=CRDIL(ICRACK,1)
              CRDIL(ICRACK,1)=INDIL
            ENDIF
            NCRBAT(ICRACK)=J
          ENDIF
10      CONTINUE
C-----THE FOLLOWING CAN BE IMPROVED
        DO 20 I=1,NCRINJ
          ICRACK=CRINJ(I)
          IF (CRDIL(ICRACK,1).GT.0)
     2      CALL AKTIVAT(ISYS,NAKTIV,AKTIV,ENDKOD(ICRACK,2))
          IF (CRDIL(ICRACK,NCRBAT(ICRACK)).GT.0)
     2      CALL AKTIVAT(ISYS,NAKTIV,AKTIV,ENDKOD(ICRACK,1))
20        CONTINUE
        DO 30 I=1,NCRINV
          ICRACK=CRINV(I)
          IF (CRDIL(ICRACK,1).EQ.0)
     2      CALL DEAKTIV(NDEAKT,DEAKT,NNOINJ,
     2                   NODINJ,ENDKOD(ICRACK,2),NAKTIV,AKTIV)
          IF (CRDIL(ICRACK,NCRBAT(ICRACK)).EQ.0)
     2      CALL DEAKTIV(NDEAKT,DEAKT,NNOINJ,
     2                   NODINJ,ENDKOD(ICRACK,1),NAKTIV,AKTIV)
30      CONTINUE
        DO 400 I=1,NDEAKT
          DO 410 J=1,NNOINJ
            IF (NODINJ(J).EQ.DEAKT(I)) THEN
              DO 420 K=J,NNOINJ-1
                NODINJ(K)=NODINJ(K+1)
420           CONTINUE
              NNOINJ=NNOINJ-1
              GOTO 400
            ENDIF
410       CONTINUE
400     CONTINUE
        DO 500 I=1,NAKTIV
          DO 505 J=1,NNOINJ
            IF (AKTIV(I).EQ.NODINJ(J)) GOTO 500
505       CONTINUE
          NNOINJ=NNOINJ+1
          NODINJ(NNOINJ)=AKTIV(I)
          DO 510 J=1,5
            ICRACK=INS(AKTIV(I),J)
            IF (ICRACK.EQ.0) GOTO 510
            DO 520 K=1,NCRINJ
              IF (CRINJ(K).EQ.ICRACK) GOTO 510
520         CONTINUE
            NCRINJ=NCRINJ+1
            CRINJ(NCRINJ)=ICRACK
            COM='N1'
            CALL OUT(COM,IWRITE,ICRACK,AKTIV(I))
510       CONTINUE
500     CONTINUE
        DO 600 I=1,NDEAKT
          COM='NDE'
          J=1
          CALL OUT(COM,IWRITE,J,DEAKT(I))
          DO 610 J=1,5
            ICRACK=INS(DEAKT(I),J)
            IF (ICRACK.EQ.0) GOTO 610
            IF ((NCRBAT(ICRACK).EQ.1).AND.(CRDIL(ICRACK,1).EQ.0)) THEN
              IF (ENDKOD(ICRACK,1).EQ.DEAKT(I)) THEN
                NOD=ENDKOD(ICRACK,2)
              ELSE
                NOD=ENDKOD(ICRACK,1)
              ENDIF
              IF (NOD.GT.ISYS) THEN
```

```
            DO 506 K=1,NUMSTA
506               IF (ISTART(K).EQ.NOD) GOTO 610
          ELSE
            DO 620 K=1,NNOINJ
620           IF (NOD.EQ.NODINJ(K)) GOTO 610
          ENDIF
          DO 630 K=1,NCRINJ
            IF (CRINJ(K).EQ.ICRACK) THEN
              DO 640 L=K,NCRINJ-1
640             CRINJ(L)=CRINJ(L+1)
              NCRINJ=NCRINJ-1
              COM='N2'
              CALL OUT(COM,IWRITE,ICRACK,DEAKT(I))
              GOTO 610
            ENDIF
630       CONTINUE
          COM='?N3'
          CALL OUT(COM,IWRITE,ICRACK,DEAKT(I))
        ENDIF
610   CONTINUE
600   CONTINUE
      DO 700 I=1,NCRACK
        OSPEED(I)=SPEED(I)
        DX(I)=0.
700   CONTINUE
      ITER=.FALSE.
      DO 710 J=1,NCRINV
        I=CRINV(J)
        IF (X(ICRACK,1)/NCLB/ABS(SPEED(I)).LT.7200) THEN
          ITER=.TRUE.
          GOTO 720
        ENDIF
710   CONTINUE
720   TIME(1)=TIME(1)+TIME(2)
      TIME(2)=0.
      IF (.NOT.ITER) THEN
         COM='NST'
         CALL NEOFEX(COM)
      ENDIF
      ITER=.FALSE.
      END

      SUBROUTINE AKTIVAT(ISYS,NAKTIV,AKTIV,NOD)
      INTEGER*2 NAKTIV,NOD,AKTIV(1000),ISYS,I
      IF (ISYS.LT.NOD) GOTO 20
      DO 10 I=1,NAKTIV
        IF(AKTIV(I).EQ.NOD) GOTO 20
10    CONTINUE
      NAKTIV=NAKTIV+1
      AKTIV(NAKTIV)=NOD
20    CONTINUE
      END

      SUBROUTINE DEAKTIV(NDEAKT,DEAKT,NNOINJ,
     2                   NODINJ,NOD,NAKTIV,AKTIV)
      INTEGER*2 NDEAKT,DEAKT(1000),NNOINJ,I,
     2    NODINJ(1000),NOD,NAKTIV,AKTIV(1000)
      DO 10 I=1,NDEAKT
        IF (DEAKT(I).EQ.NOD) GOTO 20
10    CONTINUE
      DO 12 I=1,NAKTIV
12        IF (AKTIV(I).EQ.NOD) GOTO 20
      DO 15 I=1,NNOINJ
        IF (NODINJ(I).EQ.NOD) THEN
          NDEAKT=NDEAKT+1
          DEAKT(NDEAKT)=NOD
          GOTO 20
        ENDIF
15    CONTINUE
20    CONTINUE
```

```
      END

      SUBROUTINE NEOFEX(COM)
      INTEGER*2 II,L,K,I
      CHARACTER*3 COM
      INCLUDE 'thecommonb'
      II=4
      CALL OUT(COM,II,II,II)
      CALL WPLDAT
      CALL CHANGP(NPCHANG,PCHANG,BPRESS,ISYS)
      DO 864 L=1,NCRINJ
        K=CRINJ(L)
        DO 865 I=1,NCRBAT(K)
          IF (CRDIL(K,I).EQ.MAXBAT) THEN
            GOTO 864
          ENDIF
865     CONTINUE
        COND(K)=817.5*B(K)**3*W(K)/X(K,1)/.001
864   CONTINUE
      CALL PRESSU
      CALL FLOW
      STOP
      END

      SUBROUTINE OUT(COM,IWRITE,ICRACK,NOD)
      INCLUDE 'thecommonb'
      EXTENDED    SUM,SUM1,SUM2,SUM3
      EXTENDED XX,P
      CHARACTER*3 COM
      INTEGER*2 I,J,ICRACK,NOD,IWRITE
C-----SPECIAL MAC FORTRAN
          INTEGER*4 TickCount
          INLINE(TickCount=z'a975')
C-----END MAC
      J=NCRBAT(ICRACK)
      WRITE(77,10)
     1 ICRACK,NOD,COM,TIME(1),TIME(2),NCRBAT(ICRACK),X(ICRACK,J),
     2  CRDIL(ICRACK,J),DX(ICRACK),X(ICRACK,1),SPEED(ICRACK),
     3  NNEWST,NPRESSU,NDELTAX
      IF (IWRITE.GT.2) GOTO 123
10    FORMAT(I3,TR1,I3,TR1,A,TR1,F8.1,TR1,F6.1,TR1,I2,TR1,
     1       F5.2,TR1,I2,TR1,F5.3,TR1,F5.2,TR1,E9.3,TR1,3I6)
      RETURN
123   CONTINUE
      IF (IWRITE.EQ.3) THEN
      WRITE(77,*)'GROUTING ENDED DUE TO ERROR'
      WRITE(77,*)' '
      GOTO 223
      ENDIF
      WRITE(77,*)'GROUTING ENDED. NORMAL END OF EXECUTION.'
      WRITE(77,*)' '
223   CONTINUE
C-----SPECIAL MACINTOSH
      WRITE(77,*)'EXECUTION TIME SEC ',FLOAT(TickCount()-EXECTIME)/60
C-----END MAC SPECIAL
      WRITE(77,*)'DTITER=',NDTIT,' DXITER=',NDXIT,' SPITER=',NSPIT
      WRITE(77,*)'CNR NB  X(M)    DX(MM) CL(M)',
     1           ' B(MM)    TLIT(M) SPEED(M/S)     P(M)      COND'
      SUM1=0.
      DO 50 I=1,NCRACK
        XX=0
        DO 52 J=1,NCRBAT(I)-1
52          IF (CRDIL(I,J).EQ.MAXBAT) XX=XX+X(I,J)-X(I,J+1)
        IF (CRDIL(I,NCRBAT(I)).EQ.MAXBAT) XX=XX+X(I,NCRBAT(I))
        SUM1=SUM1+XX*B(I)*W(I)
        IF (ENDKOD(I,2).GT.ISYS) THEN
          P=BPRESS(ENDKOD(I,2)-ISYS)
        ELSE
          P=SPRESS(ENDKOD(I,2))
        ENDIF
```

```
        P=SPRESS(ENDKOD(I,1))-P
        WRITE(77,11)
     1  I,NCRBAT(I),XX,
     2  DX(I)*1000,X(I,1),B(I)*1000.,
     3  TILT(I),SPEED(I),P,COND(I)
11      FORMAT(I3,TR1,I2,TR1,F5.2,TR1,F8.4,TR1,F5.2,TR1,F5.2,
     1  TR1,E9.3,TR1,E9.3,TR1,E9.3,TR1,E9.3)
50    CONTINUE
      WRITE(77,*)' '
      WRITE(77,*)'NODE  PRESSURE  WVOL L  GVOL L'
      SUM=0.
      SUM2=0.
      SUM3=0.
      DO 3 I=ISYS+1,ISYS+NBOUND
        WRITE(77,12) I,BPRESS(I-ISYS),ACK(I,2)*1000.,
     2    ACK(I,1)*1000.
12      FORMAT(I3,TR4,F5.1,TR2,F6.3,TR2,G10.4)
        SUM=SUM+ACK(I,1)+ACK(I,2)
        IF (ACK(I,1).LT.0) SUM2=SUM2+ACK(I,1)
        IF (ACK(I,1).GT.0) SUM3=SUM3+ACK(I,1)
3     CONTINUE
      WRITE(77,*)'ERROR=',SUM*1000.
      WRITE(77,*)' '
      SUM=0.
      DO 2 I=1,ISYS
        IF (ACK(I,1).NE.0.) THEN
          WRITE(77,*)'DILLUTED VOLUME IN NOD ',I,' IS ',
     2        ACK(I,1)*1000.
          SUM=SUM+ACK(I,1)
        ENDIF
2     CONTINUE
      WRITE(77,*)'VOLUME INJEKTED GROUT  [L]=',-SUM2*1000.
      WRITE(77,*)'VOLUME OUTFLOWN GROUT  [L]=',SUM3*1000.
      WRITE(77,*)'VOLUME INTACT IN MODEL [L]=',SUM1*1000.
      WRITE(77,*)'VOLUME DILLUTED GROUT 1[L]=',SUM*1000.
      WRITE(77,*)'VOLUME DILLUTED GROUT 2[L]=',
     2 (-SUM2-SUM3-SUM1)*1000.
      IF (IWRITE.EQ.3) THEN
        CALL WALLDAT
      ENDIF
      RETURN
      END

      SUBROUTINE FLOW
      EXTENDED ORINFL,GINFL,SINFL,RINFL,ROUTFL,
     2          GOUTFL,SOUTFL,Q,ERROR
      INTEGER*2 I,J,NOD
      INCLUDE 'thecommonb'
      SAVE ORINFL
      DATA ORINFL/0./
      RINFL=0.
      GINFL=0.
      SINFL=0.
      ROUTFL=0.
      GOUTFL=0.
      SOUTFL=0.
      WRITE(77,*)' '
      DO 10 I=1,NCRACK
        IF (ENDKOD(I,2).GT.ISYS) THEN
          NOD=ENDKOD(I,2)
          Q=SPEED(I)*B(I)*W(I)*1000
          IF (CRDIL(I,1).EQ.MAXBAT) THEN
            IF (Q.GT.0) THEN
              GOUTFL=GOUTFL+Q
            ELSE
              GINFL=GINFL+Q
            ENDIF
            GOTO 10
          ELSE
            DO 20 J=1,NROM
```

```
            IF (ROM(J).EQ.NOD) GOTO 30
20          CONTINUE
            GOTO 40
30          CONTINUE
            IF (Q.GE.0.) THEN
              RINFL=RINFL+Q
              WRITE(77,*)'NOD=',NOD,' Q IN TO ROOM IS  ',Q
            ELSE
              WRITE(77,*)' '
              WRITE(77,*)'AIR FLOWING IN TO CHAN-SYSTEM. NOD=',NOD,
     2                   ' Q=',Q
              WRITE(77,*)' '
            ENDIF
            GOTO 10
40          CONTINUE
            IF (Q.GE.0.) THEN
              SOUTFL=SOUTFL+Q
              WRITE(77,*)'NOD=',NOD,' Q OUT TO ROCK IS ',Q
            ELSE
              SINFL=SINFL+Q
              WRITE(77,*)'NOD=',NOD,' Q IN TO SYSTEM=  ',Q
            ENDIF
          ENDIF
        ENDIF
10      CONTINUE
        ERROR=RINFL+SINFL+SOUTFL
        WRITE(77,*)'  '
        WRITE(77,*)'WATERVOLUME FLOWING IN TO ROOM-----',RINFL
        WRITE(77,*)'WATERVOLUME FLOWING IN TO ROCK-----',SINFL
        WRITE(77,*)'WATERVOLYME FL. OUT TO SUR. ROCK---',SOUTFL
        WRITE(77,*)'ERROR IN CALC IS ------------------',ERROR
        WRITE(77,*)'FLOW OF GROUT IS IN TO DOMAIN------',GINFL
        WRITE(77,*)'FLOW OF GROUT OUT OF DOMAIN IS-----',GOUTFL
        WRITE(77,*)' '
        IF (ORINFL.NE.0.) THEN
          WRITE(77,*)'INITIAL INFLOW IN L/MIN IS ',ORINFL*60
          WRITE(77,*)'AFTER GROUTING ',RINFL*60
          WRITE(77,*)'REDUCING FACTOR ',ORINFL/RINFL
        ELSE
          ORINFL=RINFL
        ENDIF
        END

        SUBROUTINE CHANGP(NPCHANG,PCHANG,BPRESS,ISYS)
        INTEGER*2 NPCHANG,ISYS
        EXTENDED BPRESS(1000),PNY,POLD
        REAL PCHANG(1000,2)
        INTEGER*2 I,NOD
        DO 10 I=1,NPCHANG
          NOD=NINT(PCHANG(I,1))
          PNY=PCHANG(I,2)
          POLD=BPRESS(NOD-ISYS)
          PCHANG(I,2)=POLD
          BPRESS(NOD-ISYS)=PNY
10      CONTINUE
        END

        SUBROUTINE GETLUG(VALUE)
        EXTENDED VALUE,Q,QTOT
        INTEGER*2 I,J
        INCLUDE 'thecommonb'
        DO 20 J=1,NUMSTA
          BPRESS(ISTART(J)-ISYS)=BPRESS(ISTART(J)-ISYS)+100
20      CONTINUE
        CALL PRESSU
        WRITE(77,*)'WATERLOSS UNDER TEN BAR OVERPRESSURE (100 M)'
        WRITE(77,*)'INJNOD     FLOW L/MIN    BPRESS'
        QTOT=0
        WRITE(76,3692)'TIME(1)+TIME(2)',CHAR(9)
3692            FORMAT(A15,A1,$)
```

```
      DO 21 I=1,NCRACK
        IF (ENDKOD(I,2).GT.ISYS) THEN
          DO 22 J=1,NUMSTA
            IF (ISTART(J).EQ.ENDKOD(I,2)) THEN
                  Q=-SPEED(I)*B(I)*W(I)*6.E4
                QTOT=QTOT+Q
            WRITE(77,*) ISTART(J),Q,BPRESS(ISTART(J)-ISYS)
            WRITE(76,370) 'NOD',ISTART(J),CHAR(9)
370            FORMAT(A3,I3,A1,$)
            BPRESS(ISTART(J)-ISYS)=BPRESS(ISTART(J)-ISYS)-100
                GOTO 21
            ENDIF
22        CONTINUE
        ENDIF
21    CONTINUE
      WRITE(76,*)
      WRITE(77,*)'TOTAL LOSS L/MIN/10BAR (LAMINAR FLOW)',QTOT
      WRITE(77,*)
      END
```

Till programmet hör följande fil (thecommonb) med "COMMON"-deklarerade variabler:

```
      INTEGER*2 INS(1000,5),ISTART(1000),NROM,ENDKOD(2000,2),
     1         NCL,NEPS,NODINJ(1000),CRINJ(2000),CRINV(2000),
     2         ROM(1000),NCRACK,NBOUND,ISYS,NUMSTA,NNOINJ,NCLB,BW,
     3      NCRINJ,NCRINV,NPCHANG,NBREAK,NITER
     4       ,NCRBAT(2000),MAXBAT,CRDIL(2000,10),NODDIL(1000)
      INTEGER MAXA(1000+1)
      EXTENDED DENS,
     2        TZERO(3),VISCON(3),BPRESS(1000),DP(2000),
     3        SPRESS(1000),
     4        TIME(2),COND(2000),TILT(2000),DX(2000),SPEED(2000),
     5        B(2000),W(2000),X(2000,10),OSPEED(2000)
      REAL ACK(2000,2),PCHANG(1000,2),CRACKK(2000,6),BREAK(71)
      LOGICAL ITER,DXITER,DTITER,SPITER,CRITER,DOWR
      INTEGER*4 EXECTIME,NDELTAX,NNEWST,NPRESSU,NSPIT,NDXIT,NDTIT
      COMMON/GEODAT/ROM,INS,ISTART,ENDKOD,NCRACK,NROM,
     2        NBOUND,ISYS,NUMSTA,NPCHANG,PCHANG,B,W,
     3        CRACKK,TZERO,VISCON,BPRESS,NCL,NEPS,BREAK,DENS,NBREAK
      COMMON/BFLOW/HEAD,TIME,SPEED,SPRESS,OSPEED,CRDIL,X,DX,COND,DP,
     2        TILT,CRINJ,CRINV,ACK,NNOINJ,NCRINJ,NCRINV,BW,NDELTAX,
     3        NODINJ,NNEWST,NPRESSU,ITER,NCLB,NCRBAT,
     4        NODDIL,EXECTIME,MAXBAT,MAXA,NSPIT,NDXIT,NDTIT,NITER,
     5        DXITER,DTITER,SPITER,CRITER,DOWR
```

A.4.2 Pascaldel för öppning av filer

Följande fil benämnd getinputfile.p används för att använda macintosh-gränsnitt vid öppning av indatafilen:

```
Unit getinputFile;
INTERFACE
   USES
          types,QuickDraw,Textedit,Menus,Events,OSEvents,
          Packages,PasLibIntf,PrintTraps,Fonts,desk,ToolUtils,Memory;
   TYPE PSTRING6=PACKED ARRAY[1..6] OF CHAR;

   PROCEDURE READCALCIN(VAR STR6:PSTRING6);

IMPLEMENTATION
   Type
          StandardType=(StandardGet,StandardPut);
{$S getinFile}
   function StandardFile(opCode: StandardType;oldName:Str255;
                         NUMTYPES:INTEGER;TypeLIST:SFTYPELIST;
                                          var vRef:integer):Str255;
   var
          Where:Point;
          Reply:SFReply;
   Begin
          Where.h:=80;
          Where.v:=55;
          if opCode=StandardGet Then
                SFGetFile(Where,'',NIL,NUMTYPES,TypeList,NIL,Reply)
          else
                SFPutFile(Where,'',oldName,Nil,Reply);
          with Reply do
                if not good then
                      StandardFile:=''
                else
                      begin
                            StandardFile:=fName;
                            Vref:=vRefNum
                      end
   end;

   PROCEDURE READCALCIN(VAR STR6:PSTRING6);
          VAR
                Filename: STR255;
                textstr:string;
                i,j,vref: integer;
                TheErr:OSerr;
                TypeList:SFTypeList;
                TheFile:Text;

   BEGIN
          Typelist[0]:='TEXT';
          FileName:= StandardFile(StandardGet,'',1,Typelist,vRef);
          IF Filename <> '' THEN
                TheErr:=SetVol(nil,vref)
          else exittoshell;
          i:=Length(Filename);
          IF i>6 THEN i:=6;
          FOR j:=1 TO i DO
                STR6[j]:=Filename[j];
          for j:=i+1 to 6 do
                STR6[j]:=' ';
   end;
END.
```

A.4.3 MAKEFILE för kompilering av Macintosh-version

Vid kompileringen och länkningen av Macintosh-versionen under MPW används exempelvis följande MAKE-file:

```
#    File:        NFLOW71.make
#    Target:      NFLOW71
#    Sources:     NFLOW71m.f getinputFile.p
#    Created:     måndag 2 september 1990 16.27.38

NFLOW71m.f.o ƒ NFLOW71.make NFLOW71m.f
   F77 -B -g -i -Z -A -autoseg -b 2048 NFLOW71m.f
getinputFile.p.o ƒ NFLOW71.make getinputFile.p
    Pascal -r -n -m -mc68020 -mc68881 -d Elems881=true getinputFile.p

SOURCES = NFLOW71m.f getinputFile.p
OBJECTS = NFLOW71m.f.o getinputFile.p.o ttyio.f.o

NFLOW71 ƒƒ NFLOW71.make {OBJECTS}
   Link -f -sym on -srt -p -mf -SS 1200000 -t APPL -c 'FLOW' ∂
          {OBJECTS} ∂
          "{Libraries}"Runtime.o ∂
          "{Libraries}"Interface.o ∂
          "{FLibraries}"frt0.o ∂
          "{FLibraries}"f77math.o ∂
          "{FLibraries}"f77io.o ∂
          "{PLibraries}"PasLib.o ∂
          -o NFLOW71
```