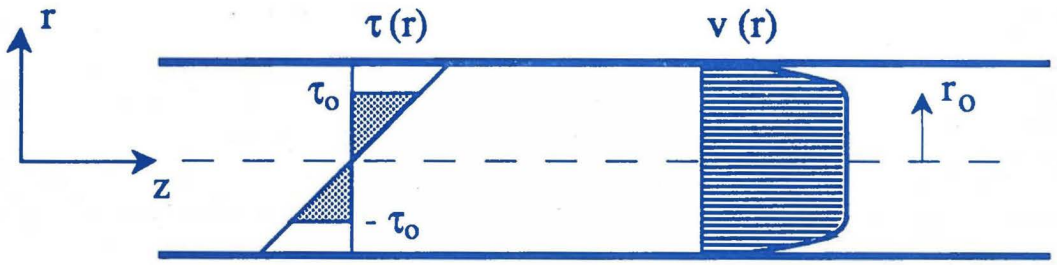
BeFo



Mätmetodik för injekterings-medels reologiska egenskaper

Ulf Håkansson, Lars Hässler, Håkan Stille
Inst för Jord- och Bergmekanik, KTH

Stiftelsen Bergteknisk Forskning – BeFo
Swedish Rock Engineering Research Foundation

BeFo 241:1/91

Mätmetodik för injekteringsmedels reologiska egenskaper

A Technique for Measuring the Rheological Properties of Injected Grout

Ulf Håkansson, Lars Hässler, Håkan Stille
Inst för Jord- och Bergmekanik, KTH

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

ISRN BEFO--91/241-1--SE

FÖRORD

Injekteringens styrmekanismer är ett 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. Föreliggande rapport redovisar undersökningar av olika typer av injekteringsmedel och en utvecklad mätmetodik för att bestämma olika egenskaper.

Parallellt med detta arbete har simuleringsmodeller för strömning i sprickor vidareutvecklats och ett förslag till klassificeringsteknik tagits fram, vilket redovisas i en separat rapport (nr 241:2/91). 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 delvis prövats i praktisk tillämpning.

I referensgruppen 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 erkänns tacksamt och vi planerar att inom samma grupp diskutera lämplig fortsättning av utvecklingsarbetet på injekteringsområdet.

Stockholm i mars 1991

Tomas Franzén

Innehållsförteckning

Författarförord i

Sammanfattning ii

Summary iv

Inledning 1

1. Grundläggande begrepp 2

1.1. Allmänt 2

1.2. Reologiska modeller 5

1.3. Matematisk behandling av vätskeströmning 8

2. Binghammodellen 12

2.1. Allmänt 12

2.2. Rörströmning 14

3. Rotationsviskometri 25

3.1. Allmänt, utrustning 25

3.2. Matematiska samband 30

4. Utvärdering av reologiska parametrar 39

4.1. Utvärdering vid strömning i hela kärlet 39

4.2. Utvärdering vid strömning i endast en del av kärlet 44

4.2.1. Metod I (direkt metod) 45

4.2.2. Metod II (Iterativ metod) 49

5. Speciella problem 54

5.1. Sedimentation 54

5.2. Tixotropi 56

5.3. Förstörande provning 58

6. Exempel på tillämpning av metoden 59

6.1. Effekten av varierande vct 60

6.2. Effekten av tillsats av bentonit 62

6.3. Effekten av tillsats av flytmedel 64

6.4. Kemiska injekteringsmedel 66

7. Fältutrustning 68

8. Diskussion 72

Referenser 74

Författarförord

Syftet med föreliggande rapport är att beskriva teorin bakom och utvecklingen av, den mätmetodik för injekteringsmedels egenskaper som har tagits fram inom BeFo projekt 241, "injekteringens styrmekanismer". Mätmetodiken ingår som en viktig del i projektet vars huvudmålsättning är att förbättra möjligheterna till att optimera en injektering samt öka förståelsen för grundläggande samband och på vilket sätt dessa påverkar ett injekteringsresultat.

Projektet har hittills avrapporterats i BeFo rapport 105:1/85: Injekteringens styrmekanismer, "Etapp I - Grundläggande samband". Föredrag har hållits på vattenbyggnad, KTH: "Teoretiska aspekter på berginjektering", seminarium om dammar, 1986. Vidare har en artikel publicerats i Montreal 1987 på 6 th International Congress on Rock Mechanics, "Simulation of grouting in jointed rock". Resultat från preliminära mätningar finns med från bergmekanikdagen 1989, "Injektering i modell och verklighet". Dessutom har tre examensarbeten, på inst. för Jord- och Bergmekanik, gjorts inom projektet.

Innehållet i denna rapport skall ses som en grundläggande metodik inför en systematisk undersökning av vanliga injekteringsmedel. Projektet bedrivs på inst. för Jord-och Bergmekanik på KTH med undertecknade som aktörer. Lars Hässler har gjort den grundläggande utvecklingen av metodiken och Ulf Håkansson har vidareutvecklat den till att även omfatta omrörning och stora mätkärl samt författat denna rapport. Professor Håkan Stille är och har varit handledare under projektet.

Stockholm 1991

Ulf Håkansson Lars Hässler

Sammanfattning

Kapitel 1 innehåller en allmän orientering om matematisk beskrivning av vätskeströmning. Här introduceras begreppet viskositet samt konstitutiva samband (reologiska modeller) för olika vätsketyper. Metodik för att teoretiskt beskriva en vätskeströmning visas tillsammans med vanligen förekommande randvillkor. Viskositetens inverkan på hastighetsprofilen beskrivs genom strömning i ett cirkulärt rör.

I kapitel 2 behandlas Binghammodellen mer ingående. Modellen har visat sig representera partikelsuspensioner, t ex cementbaserasde medel, väl. Den fullständiga matematiska beskrivningen görs för strömning av en Binghamvätska i ett cirkulärt rör och effekten av skjuvhållfastheten i vätskan redovisas.

I kapitel 3 visas den utrustning som används för att utvärdera egenskaperna. Här genomgås kommunikationen mellan de olika datoriserade enheterna samt filosofin bakom mätmetodiken. En matematisk härledning görs för en Newtonsk vätska med den geometri och randvillkor som rotationsviskometern ger upphov till och utrycket jämförs med motsvarande för Binghammodellen.

Kapitel 4 innehåller tre olika metoder att utvärdera egenskaperna för en Binghamvätska. När egenskaperna har erhållits från respektive modell kontrolleras vilken av metoderna som ger den bästa anpassningen till mätdata.

I kapitel 5 genomgås speciella problem som kan uppstå vid mätning med metoden och förslag ges hur problemen skall minimeras.

Kapitel 6 innehåller resultat från gjorda mätningar. Resultaten skall främst ses som en kvalitativ jämförelse av effekterna av olika tillsatser på injekteringsmedlen.

I kapitel 7 visas förslag på hur egenskaperna kan mätas med enkla medel i fält.

Kapitel 8 innehåller en kort diskussion om metodikens tillämpbarhet och fördelar.

Summary

This report presents theory and development of a measuring technique for evaluation of the rheological properties of grouts. The technique is based on rotational viscometry with concentric cylinders.

The report is part of a project, "fundamentals of grouting", which is sponsored by the Swedish Rock Engineering Research Foundation, BeFo. The content should be seen as a basic technique prior to a systematic investigation of rheological properties of grouts. The overall aim of the whole project is to increase the knowledge of fundamental relationships and how they influence the grouting procedure.

The first chapter deals with a general mathematical formulation of fluid flow. The term viscosity is introduced and different rheological models and properties are illustrated. The effect on the velocity profile by a Newtonian fluid's viscosity is shown for flow in a circular pipe.

In the second chapter the Bingham model is treated in detail. It is well known that this model is appropriate for flow of suspensions. The mathematical formulation for Bingham flow in a circular pipe and the influence of the shear strength (yield value) is shown.

Chapter 3 describes the equipment that is used (rotational viscometer) to evaluate the rheological properties. The communication between the different computerized units is treated. The mathematical formulation for this equipment and geometry is made for a Newtonian fluid and it is compared with the equation for a Bingham fluid.

Chapter 4 deals with three different methods to evaluate the properties from viscometer data. After the properties have

been evaluated from each method they are compared with the measured data.

In chapter five special problems that can arise with this equipment are discussed (e g thixotropy, sedimentation, hardening).

Chapter 6 illustrates some results from measurements that have been done on cement suspensions and chemical grouts. The effect of additives and admixtures on cementbased grouts are shown.

Chapter 7 introduces a method to evaluate the shear strength by the use of a simple devise for field conditions.

In the last chapter the performance and advantages of the method are briefly summarized.

The main advantages are:

* the equipment measures the properties continously for a choosen period of time, which means that the time-dependency of the properties can be evaluated.

* the effect of different additives and admixtures can be seen which means that the properties can be controlled and "designed" for varying conditions and applications.

* the whole measurement is fully automatic and computerized and thereby effects from "human errors" are minimized.

Inledning

Att mäta en vätskas kraft - deformationssamband är nödvändigt för att kunna bestämma och uttrycka dess konstitutiva samband (reologiska modell) och däri ingående reologiska parametrar. Det konstitutiva sambandet tillsammans med randvillkor utgör sedan basen för en teoretisk beskrivning av vätskeströmning. De reologiska parametrarna påverkar vätskans hastighetsprofil under strömning och därmed, för injektering, viktiga egenskaper såsom flöde och inträngningsförmåga.

Den mätmetodik som beskrivs baseras på rotationsviskometri, dvs mätningen sker kontinuerligt med en roterande cylindrisk mätkropp nedsänkt i vätskan. Mätningen är helt automatiserad samt har en mycket god upplösning vilket medför att även små förändringar av egenskaperna registreras.

Alla injekteringsmedel måste på något sätt ändra sina egenskaper efter det att medlet har trängt ut i sprickor eller porer. För att kunna få medlet på plats krävs ett vätskeliknande uppträdande medan det skall ha hög hållfasthet, dvs ett fast ämnes egenskaper (härda), då det väl är på plats. Egenskapsändringen påverkar ett injekteringsresultat och därför är det viktigt att känna till hur och när förändringen sker. Genom att kontinuerligt mäta egenskaperna under en längre tidsperiod kan man med denna metod följa härdningsförloppet, dvs hur egenskaperna ändras med tiden.

Med denna mätmetod kan man även se vad olika tillsatsmedel har för kvantitativ effekt på egenskaperna och därigenom "skräddarsy" sitt medel för varierande situationer och syfte.

1. Grundläggande begrepp

1.1. Allmänt

Definitionsmässigt skiljer sig en vätska från ett fast ämne genom att vätskan kontinuerligt deformeras (strömmar) då den utsätts för en skjuvspänning (oavsett hur liten denna är). Allmänt gäller att hastighetsgradienten (den relativa hastigheten mellan intilliggande vätskeskikt), dv/dz, är en funktion, ζ, av skjuvspänningen som verkar på vätskan

$$\frac{dv}{dz} = \zeta(\tau) \tag{1.1}$$

I ekvation 1.1 kan dv/dz ses som en "deformationshastighet" dvs en ändring i skjuvspänning förändrar den hastighet som vätskeskikten rör sig med, i förhållanden till varandra. Detta till skillnad från en ändrad finit skjuvdeformation som skulle vara fallet för ett fast ämne.

Ovanstående utgör den fundamentala skillnaden mellan vätske- respektive fast fas.

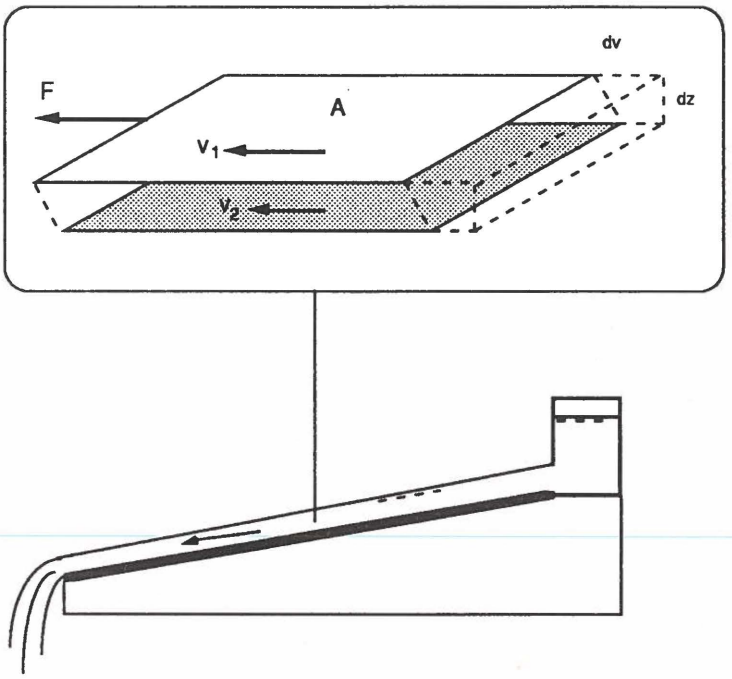
Samband av den typ som visas i ekvation 1.1 utgör en vätskas konstitutiva samband eller sk reologiska modell. Den mest kända vätskemodellen är Newtons viskositetslag, (I. Newton, 1687), som tecknas (se även figur 1.1)

$$\tau = \frac{F}{A} = -\mu \frac{dv}{dz} \tag{1.2}$$

minustecknet kommer här av teckenkonventionen för skjuvspänningar, dvs dv/dz är negativ då skjuvspänningen (definitionsmässigt) är positiv och vice versa.

Proportionalitetskonstanten, μ, benämns viskositetskoefficient och definieras som förhållandet mellan hastighetsgradienten och den skjuvspänning som krävs för att upprätthålla gradienten.

Ekvation 1.2 kan åskådliggöras genom att betrakta modellen i figur 1.1 där två vätskelameller under laminär strömning har den relativa hastigheten $dv = (v_1 - v_2)$.



Figur 1.1 Laminär strömning utmed ett lutande plan. Förstorat visas hur två vätskelameller med inbördes avstånd, dz, strömmar med den relativa hastigheten $dv = v_1 - v_2$.

Newtonmodellen är en en-parameter modell dvs det krävs endast en materialegenskap, μ, för att beskriva vätskan ur strömningssynpunkt.

Vätskor som följer ekvation 1.2 kallas Newtonska och till dessa hör t ex vanligt vatten.

Viskositetskoefficienten (viskositeten) är ett mått på vätskans inre friktion och anger m a o hur trög vätskan är mot formförändring. Ju högre viskositet ju trögare är vätskan (paraffinolja har t ex högre viskositet än vatten).

Viskositeten är ofta temperaturberoende där en ökning av temperaturen för de flesta vätskor medför en minskning av viskositet och vice versa.

SI enheten för viskositet är "Pascalsekunder", [Pa s], men även enheten [Pois] förekommer och förhållandet mellan dessa enheter är

1 Pa s = 10 Pois

dvs

1 mPa s = 1 cPois

Uttrycket kinematisk viskositet används ofta vid t ex rörströmning och betecknas, ν. Den kinematiska viskositeten är den ovan nämnda viskositet dividerat med vätskans densitet enligt

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \tag{1.3}$$

SI enheten för den kinematiska viskositeten är [m^2/s] men även enheten [stoke] förekommer.

1.2. Reologiska modeller

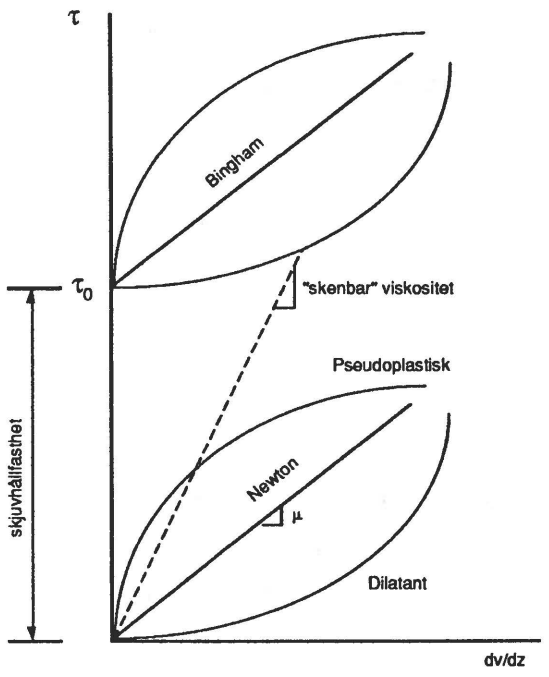
Även om Newtonmodellen är enkel och vanlig vid all strömning som har med vatten att göra, är det mer regel än undantag att ett injekteringsmedel (och många andra vätskor) följer ett mer komplicerat konstitutivt samband. Sambandet kan därför i en mer allmän form skrivas

$$\tau = -\eta \frac{dv}{dz} \tag{1.4}$$

där η utgör lutningen på en kurva mellan skjuvspänning och hastighetsgradient.

Vätskor som inte är Newtonska, dvs där η ej är konstant eller där en kurva mellan τ och dv/dz ej börjar i origo, sorterar under samlingsnamnet icke-Newtonska. Bland icke-Newtonska ingår t ex pseudoplastiska och dilatanta vätskor.

En pseudoplastisk vätska karakteriseras av att η minskar vid ökad hastighetsgradient, se figur 1.2.



Figur 1.2 Exempel på olika reologiska modeller.

Om i stället η ökar vid ökad hastighetsgradient kallas vätskan dilatant. Det bör i sammanhanget nämnas att namngivningen härrör sig från ett historiskt misstag, dvs det behöver inte finnas något "pseudoplastiskt" respektive "dilatant" över dessa vätskor, (Van Wazer et al, 1963).

Vid icke-linjära samband förekommer det att man anger viskositeten som lutningen på en linje mellan origo och en viss punkt på den icke-linjära kurvan, den benämns då "skenbar" viskositet (eng. apparent viscosity), se figur 1.2. Den "skenbara" viskositeten anger viskositeten för en motsvarande Newtonsk vätska (linjär kurva med början i origo) vid en viss skjuvspänning och motsvarande hastighetsgradient. I många enkla viskometrar är det just den "skenbara" viskositeten som mäts.

Vissa vätskor kan även ha en mer eller mindre utpräglad skjuvhållfasthet, kohesion (Lombardi, 1985), som brukar

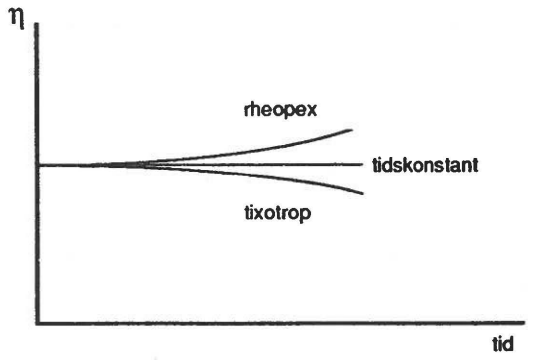
kallas flytgräns (eng. yield value) och betecknas τ_o. Skjuvhållfastheten medför att strömning inte sker förrän denna har överskridits. Innan vätskan strömmar uppträder den i en fast fas och kan därmed inte i strikt mening kallas för vätska (τ_o kan ses som den skjuvspänning vid vilken den fasta fasen övergår i en vätskefas). En reologisk modell som tar hänsyn till skjuvhållfastheten är Binghammodellen. Även pseudoplastiska och dilatanta vätskor kan ha en skjuvhållfasthet, se figur 1.2.

Förutom ovanstående reologiska modeller existerar det en handfull empiriska samband som t.ex Ostwald-de Waele,Eyring, Ellis, Reiner-Philippoff m.fl alla för att så bra som möjligt anpassa mätvärden till en teoretisk modell (Bird et al, 1960).

En vätska kan även ha tidsberoende egenskaper dvs under stationära förhållanden (t ex omrörning med konstant hastighet) kan η öka eller minska med tiden. Ökar η kallas vätskan för rheopex (skjuv-tjocknande) och minskar η kallas den för tixotrop (skjuv-tunnande), se figur 1.3.

Många målarfärger är tixotropa vilket innebär att det blir lättare och lättare att röra om färgen ju längre tid man håller på. Om färgen däremot målas på en vägg och därmed får vila återfår den en högre viskositet/hållfasthet dvs det tixotropa förloppet är reversibelt.

Det finns anledning att återkomma till tixotropa egenskaper längre fram i rapporten (kap 5, speciella problem). Ovannämnda tidsberoende skall inte förväxlas med härdning och gelning som är ett annat fenomen (kemisk reaktion).



Figur 1.3 Vissa vätskor har tidsberoende egenskaper

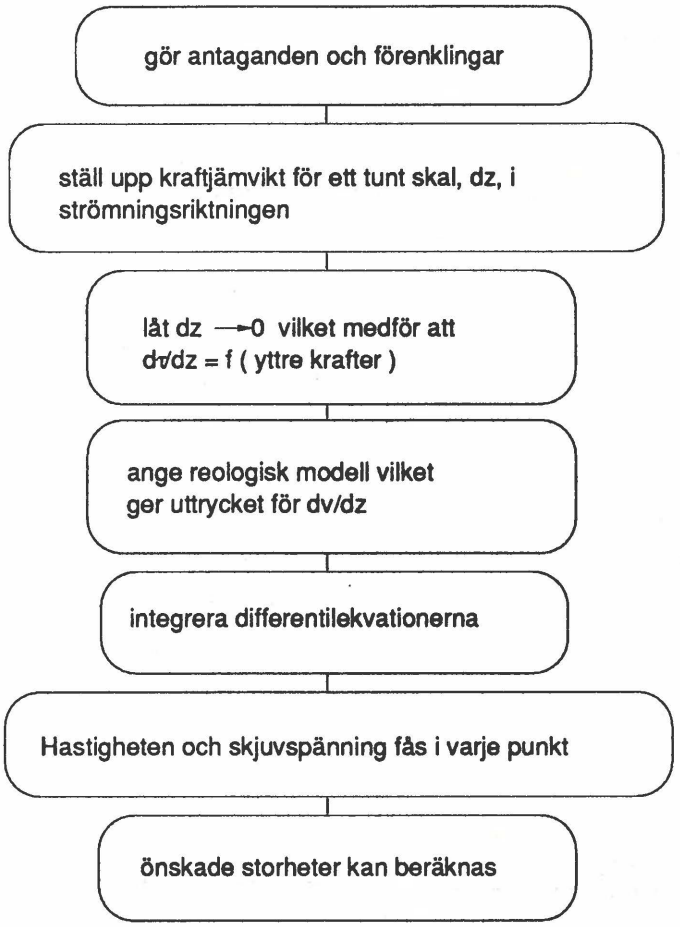
1.3. Matematisk behandling av vätskeströmning

För att erhålla generella matematiska uttryck för stationär laminär strömning kan man använda sig av följande metodik (Bird et al, 1960):

- ställ upp kraftjämvikt för ett litet element med finit tjocklek, Δt
- låt Δt "gå" mot noll vilket leder till den differentialekvation som beskriver skjuvspänningsfördelningen
- insätt lämplig reologisk modell vilket ger differentialekvationen som beskriver hastighetsfördelningen.

Integration av ovannämnda differentialekvationer tillsammans med relevanta randvillkor ger skjuvspänning- respektive hastighetsfunktionen över tvärsnittet. När funktionerna är kända kan kvantiteter som medelhastighet, maxhastighet, flöde, tryckgradient och

krafter på ränderna beräknas. Metodiken kan beskrivas med följande flödesschema:



Figur 1.4 Generell metodik för att matematiskt beskriva laminär vätskeströmning.

För att lösa differentialekvationerna krävs olika randvillkor och vanligen använda randvillkor vid laminär vätskeströmning är att:

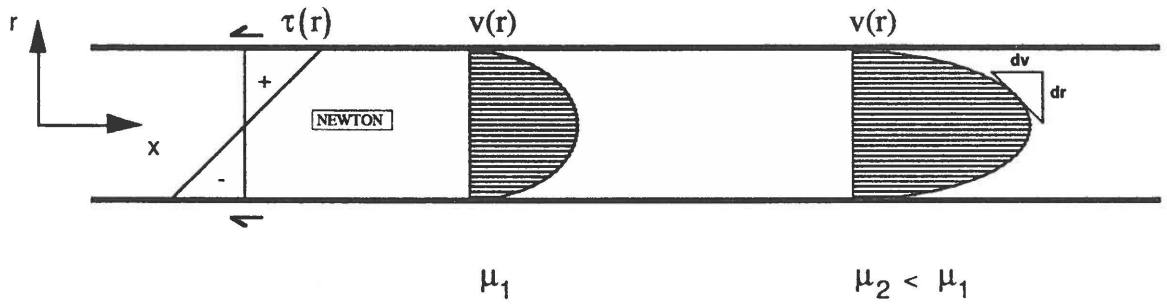
- vid en fast begränsningsyta har vätskan samma hastighet som ytan (sk No-slip condition).

- i gränsskiktet mellan vätska och gas är hastighetsgradienten noll.

- i gränsskiktet mellan två icke-blandbara vätskor är hastighetsfunktionen kontinuerlig.

En vätskas reologiska egenskaper har en avgörande betydelse för hur strömningen sker i och med att egenskaperna påverkar vätskans hastighetsprofil. Hastighetsprofilens utseende i sin tur har sedan direkt betydelse för medelhastighet, maxhastighet, etc.

Hastighetsprofilen i ett rör för en Newtonsk vätska med olika viskositet visas i figur 1.5 (vid samma tryck och samma geometri). Man kan här se att medelhastigheten är mindre för vätskan med den högre viskositeten eftersom den står i relation till integralen (ytan) av hastighetsfunktionen.



Figur 1.5 Vätskor med olika viskositet får olika hastighetsprofiler (här visat i ett rör).

Skjuvspänningsfördelningen är lika för de bägge vätskorna i figur 1.5 eftersom den beror på yttre krafter och geometrin, dvs

$$\mu_1 \left(\frac{dv}{dr}\right)_1 = \mu_2 \left(\frac{dv}{dr}\right)_2 \tag{1.5}$$

vilket medför att

$$\frac{\mu_1}{\mu_2} = \frac{\left(\frac{dv}{dr}\right)_2}{\left(\frac{dv}{dr}\right)_1} \tag{1.6}$$

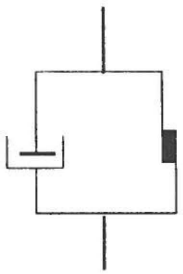
Hastighetsgradienten är alltså större för vätskan med den lägre viskositeten, se figur 1.5.

Praktiskt innebär olika viskositet att om man önskar samma flöde i ett rör av en viss dimension så krävs det en högre tryckgradient mellan rörets ändar för en vätska med högre viskositet. Skjuvhållfastheten påverkar också hastighetsprofilen och detta visas i kapitel 2 som behandlar Binghammodellen mer utförligt.

2. Binghammodellen

2.1. Allmänt

Binghammodellen liknar Newtonmodellen i det att η ej ändras med hastighetsgradienten utan är konstant. Skillnaden mellan de båda är att i Binghammodellen ingår en term som tar hänsyn till den skjuvhållfasthet (kohesion) som vätskan har. Binghammodellen är en två-parameter modell dvs det krävs två materialegenskaper för att kunna beskriva strömningsförloppet. Binghammodellen kan illustreras med följande mekaniska modell:



Figur 2.1 Mekanisk modell för en Binghamvätska

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 (jmf 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 medlets vätskefas som bestämmer hur medlet strömmar (Van Wazer et al, 1963).

Eftersom cementbaserade injekteringsmedel till sin natur är partikelsuspensioner och faktumet att det mellan cementkornen finns bindningar gör att Binghammodellen har visats sig vara lämplig för dessa typer av medel (Wallner, 1976), (Littlejohn, 1982), (Lombardi, 1985), (Deere et al, 1985). I litteraturen finns det dessutom uppgifter om bra resultat med Binghammodellen för andra suspensioner och pastor (Bird et al, 1960), (Sellgren, 1983).

Binghammodellen kommer i fortsättningen av denna rapport att beskrivas för några olika situationer och en jämförelse med Newtonmodellen kommer att göras för att se effekten av skjuvhållfastheten.

Binghammodellen har det konstitutiva sambandet

$$\tau = -\mu_B \frac{dv}{dz} + \tau_o \qquad (2.1)$$

index B står för "Bingham viskositeten" (eller plastisk viskositet), τ_o utgör skjuvhållfastheten och dv/dz är hastighetsgradienten. Trots att modellen vid första anblicken ser ganska oskyldig ut ställer τ_o till problem i den matematiska formuleringen vilket kommer att framgå nedan.

För att erhålla teoretiska uttryck som beskriver hastighetsprofilen för en Binghamvätska används den generella metodik som beskrevs av flödesschemat i kapitel 1 (figur 1.4). Slutna matematiska lösningar kan endast erhållas vid enkla geometrier och nedan redovisas dessa vid

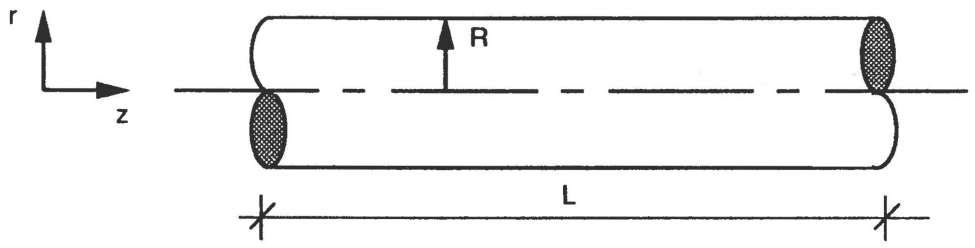
laminär strömning i ett cirkulärt rör. För en mer detaljerad genomgång och andra geometriska problem hänvisas till Bird et al, 1960.

2.2. Rörströmning

Följande initiella antaganden görs:

- inkompressibel vätska, ρ = konstant
- stationära förhållanden råder (inga tidsderivator förekommer)
- inga radiella eller tangentiella hastighetskomponenter
- läminärt flöde, låga hastigheter
- långt rör, randeffekter kan försummas
- no-slip vid fasta begränsningsytor
- isotermt system

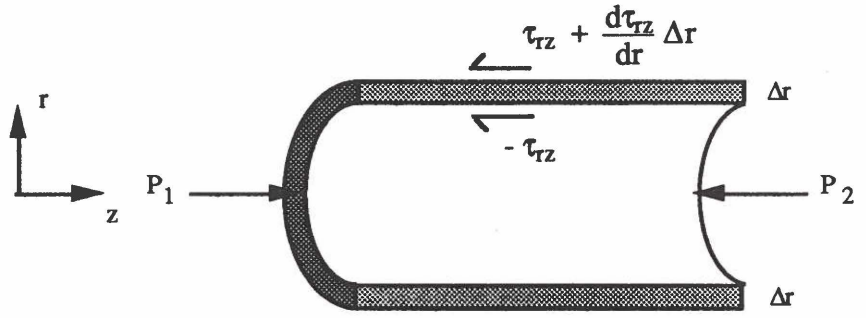
Betrakta en sektion av ett cirkulärt rör med sektionslängden L och radien R, se figur 2.2.



Figur 2.2 Rörsektion med längden, L, och radien, R.

Sektionen är tillräckligt långt ifrån ändarna av röret för att eliminera effekten av krökta strömlinjer vid in- och uttag och för att fullt utbildad strömning skall råda.

Tar man ut ett tunt cylindriskt "skal" från vätskan i röret med tjockleken Δr och ställer upp en kraftjämvikt i strömningsriktningen (positiv z - led), se figur 2.3.



Figur 2.3 Kraftjämvikt ställs upp för ett cylindriskt skal med tjockleken Δr (endast halva cylindern är medtagen)

fås följande

$$\rightarrow: \quad \Delta P 2\pi r \Delta r + \tau_{rz} 2\pi r L - \left(\tau_{rz} + \frac{d\tau_{rz}}{dr}\Delta r\right) 2\pi \left(r + \Delta r\right) L = 0 \qquad (2.2)$$

där $\Delta P = P_1 - P_2$, $(P_1 > P_2)$ är tryckskillnaden mellan ändytorna på sektionen. Vid lutande rör innehåller ΔP även en gravitationsterm, dvs $\Delta P = (P_1 + rgh_1) - (P_2 + rgh_2)$, där h utgör höjdkoordinaten ovanför en viss referensnivå.

Uttrycket förenklas till

$$\frac{\Delta P\, r}{L} = \tau_{rz} + \frac{d\,\tau_{rz}}{dr} r + \frac{d\,\tau_{rz}}{dr} \Delta r \qquad (2.3)$$

sista termen i högerledet försummas eftersom "skalet" är "oändligt" tunt och man får

$$\frac{\Delta P\, r}{L} = \frac{d(\tau_{rz}\, r)}{dr} \qquad (2.4)$$

ekvationen integreras varvid man erhåller

$$\tau_{rz} = \frac{\Delta P\, r}{2\, L} + \frac{C_1}{r} \qquad (2.5)$$

där C_1 är en integrationskonstant som måste vara noll för att skjuvspänningen inte skall bli oändligt stor i mitten av röret (r = 0). Slutligen erhålles följande uttryck för skjuvspänningsfördelningen som funktion av radien

$$\tau_{rz} = \frac{\Delta P}{2L} r \qquad (2.6)$$

Ovanstående uttryck är allmänt och är giltigt för ett cirkulärt rör oavsett vilken reologisk modell som gäller för den vätska som strömmar i röret. Spänningsfördelningen är med andra ord oberoende av materialegenskaperna.

I ekvation 2.6 insättes vätskans konstitutiva samband som i cylinderkoordinater för Binghammodellen skrivs

$$\tau_{rz} = -\mu_B \frac{dv}{dr} + \tau_o \qquad (2.7)$$

Ekvation 2.6 och 2.7 ger sedan

$$\tau_o - \mu_B \frac{dv_z}{dr} = \frac{\Delta P}{2L} r \qquad (2.8)$$

Denna differentialekvation kan integreras direkt vilket leder till

$$v_z = -\frac{\Delta P}{4\mu_B L} r^2 + \frac{\tau_o}{\mu_B} r + C_1 \qquad (2.9)$$

C_1 är en ny integrationskonstant som bestäms genom randvillkoret att hastigheten är noll vid en fast begränsningsyta, dvs

$$\begin{cases} r = R \\ v_z = 0 \end{cases}$$

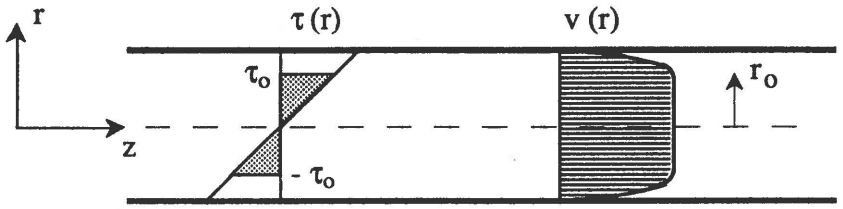
och man erhåller

$$\begin{aligned} 0 &= -\frac{\Delta P}{4\mu_B L} R^2 + \frac{\tau_o}{\mu_B} R + C_1 \quad \Rightarrow \\ C_1 &= \frac{R}{\mu_B}\left[\frac{\Delta P}{4L} R - \tau_o\right] \end{aligned} \qquad (2.10)$$

varvid hastigheten som funktion av radien kan uttryckas

$$v_z = -\frac{\Delta P}{4\mu_B L} r^2 + \frac{\tau_o}{\mu_B} r + \frac{R}{\mu_B}\left[\frac{\Delta P}{4L} R - \tau_o\right] =$$
$$= \frac{\Delta P R^2}{4\mu_B L}\left[1 - \frac{r^2}{R^2}\right] - \frac{\tau_o R}{\mu_B}\left[1 - \frac{r}{R}\right] \qquad (2.11)$$

I den del (från centrum och utåt) av röret där skjuvspänningen är mindre än skjuvhållfastheten, τ_o, kommer det inte att uppstå någon hastighetsgradient utan en plugg, dvs skikten inom radien r_o, rör sig där med samma hastighet, se figur 2.4.



Figur 2.4 I det område där skjuvspänningen är mindre än skjuvhållfastheten bildas en plugg inom vilken skikten har samma hastighet

Pluggens radie är direkt beroende av skjuvhållfastheten (och tryckgradienten, $\Delta P/L$) och ges av uttrycket

$$r_o = \frac{2\tau_o L}{\Delta P} \qquad (2.12)$$

Pluggens konstanta hastighet fås genom att sätta in r_o resp $\tau_o = \Delta P r_o/2L$ i ekvation 2.11 varvid man erhåller

$$v_z = \frac{\Delta P}{4\mu_B L}(R^2 - r_o^2) + \frac{\Delta P}{2\mu_B L}(r_o^2 - r_o R) \qquad r \le r_o \tag{2.13}$$

som förenklat kan skrivas

$$v_z = \frac{\Delta P R^2}{4\mu_B L}\left[1 - \frac{r_o}{R}\right]^2 \qquad r \le r_o \tag{2.14}$$

Medelhastigheten erhålles genom att summera samtliga hastigheter över tvärsnittet och dividera med tvärsnittsarean

$$\bar{v}_z = \frac{v_z \int_o^{2\pi} d\theta \int_o^{r_o} r\,dr + \int_o^{2\pi} d\theta \int_{r_o}^{R} v_z\, r\,dr}{\int_o^{2\pi} d\theta \int_o^{R} r\,dr} \tag{2.15}$$

Tvärsnittsarean, dvs nämnaren, är πR^2, och första termen i täljaren dividerat med arean blir

$$\frac{\Delta P r_o^2}{4\mu_B L}\left[1 - \frac{r_o}{R}\right]^2 = \frac{\Delta P R^2}{8\mu_B L}\left[2\left(\frac{r_o}{R}\right)^2 - 4\left(\frac{r_o}{R}\right)^3 + 2\left(\frac{r_o}{R}\right)^4\right] \tag{2.16}$$

och andra termen dividerat med arean blir

$$\frac{\Delta P R^2}{8\mu_B L}\left[\left(1 - 2\left(\frac{r_o}{R}\right)^2 + \left(\frac{r_o}{R}\right)^4\right) - \left(\frac{4}{3}\left(\frac{r_o}{R}\right) - 4\left(\frac{r_o}{R}\right)^3 + \frac{8}{3}\left(\frac{r_o}{R}\right)^4\right)\right] \qquad (2.17)$$

slutligen erhålls följande uttryck för medelhastigheten, dvs summan av ekvation 2.16 och 2.17

$$\bar{v}_z = \frac{\Delta P R^2}{8\mu_B L}\left[1 - \frac{4\,r_o}{3\,R} + \frac{1}{3}\left(\frac{r_o}{R}\right)^4\right] \qquad (2.18)$$

När medelhastigheten är känd kan flödet bestämmas genom att multiplicera medelhastigheten med tvärsnittsarean

$$Q = \frac{\pi \Delta P R^4}{8\mu_B L}\left[1 - \frac{4\,r_o}{3\,R} + \frac{1}{3}\left(\frac{r_o}{R}\right)^4\right] \qquad (2.19)$$

Detta uttryck är känt som *Buckingham-Reiners* ekvation.

Då

$$r_o \rightarrow R$$

medför detta att

$$Q \rightarrow 0$$

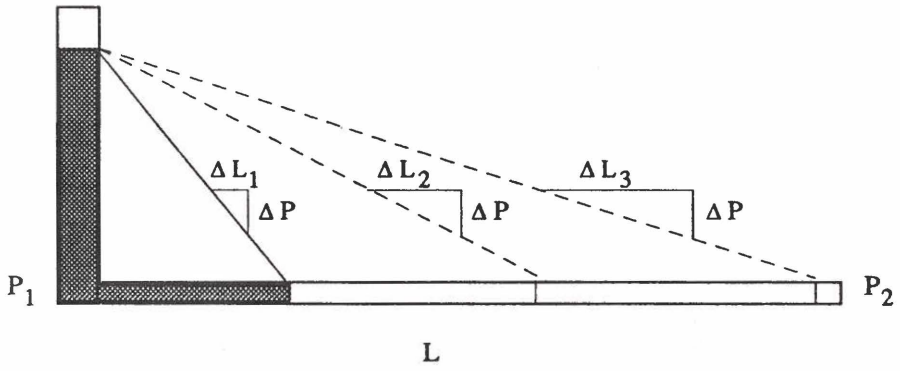
dvs flödet upphör då pluggen fyller hela röret, situationen kan då jämföras med ett rör fyllt med ett fast ämne som har en skjuvhållfasthet (t ex en lera).

Betraktar man ekvation 2.12 ser man att r_o ökar om antingen tryckgradienten, $\Delta P/\Delta L$, minskar eller om skjuvhållfastheten, τ_o, ökar. Ovanstående faktum är mycket viktigt eftersom det avgör hur långt man kan nå med en injekteringsfront.

Tryckgradienten minskar kontinuerligt ju längre vätskan tränger in i t ex en spricka och vid en viss gradient fyller pluggen hela öppningen och fronten stannar, se figur 2.5.

Ovanstående betyder även att fronten når olika långt beroende på vilken öppning som sprickan har. Inträngningen beror sammanfattningsvis på:

- tryckgradienten
- skjuvhållfastheten
- sprick/por geometrin



Figur 2.5 Tryckgradienten minskar med inträngningen

Ekvation 2.19 kan alternativt skrivas

$$Q = \frac{\pi \Delta P R^4}{8 \mu_B L}\left[1 - \frac{4\,\tau_o}{3\,\tau_R} + \frac{1}{3}\left(\frac{\tau_o}{\tau_R}\right)^4\right] \qquad (2.20)$$

eftersom (se ekvation 2.6)

$$\frac{r_o}{R} = \frac{\tau_o}{\tau_R} \tag{2.21}$$

där τ_R är skjuvspänningen vid rörväggen (r = R).

Genom att sätta $r_o = 0$ i ekvation 2.19 (alt $\tau_o = 0$ i ekvation 2.20) erhålls motsvarande medelhastighet och flöde för en Newtonsk vätska

$$\bar{v}_z = \frac{\Delta P R^2}{8\mu L} \tag{2.22}$$

$$Q = \frac{\pi \Delta P R^4}{8\mu L} \tag{2.23}$$

Ovanstående är det välbekanta sk *Hagen-Poiseuille* flödet som b la används vid utvärdering av viskositeten för Newtonska vätskor i kapillära viskometrar.

ekvation 2.22 kan, då ΔP uttrycks som en "tryckhöjd", skrivas som

$$\Delta P = \rho g h_f$$
$$h_f = \frac{8\mu}{\rho g R^2} \bar{v}_z L = \frac{32\nu}{gD^2} \bar{v}_z L \tag{2.24}$$

där h_f utgör energiförlusten , dvs värmeenergi pga den inre friktionen i meter vätskepelare, ν är den kinematiska viskositeten och D är diametern på röret. Ekvation 2.24

används inom hydrauliken för att beräkna friktionsförluster vid laminär strömning i rörsystem.

Vid rektangulärt tvärsnitt , med öppning b och bredd w, är tillvägagångssättet likadant som ovan visade och för Binghammodellen erhålles följande uttryck (Hässler et al, 1986)

$$Q = \frac{\Delta P b^3 w}{12 \mu_B L}\left[1 - 3\frac{z_o}{b} + 4\left(\frac{z_o}{b}\right)^3\right] \qquad (2.25)$$

där z_o är halva plugghöjden.

För en Newtonsk vätska, där $z_o = 0$ erhålls

$$Q = \frac{\Delta P b^3 w}{12 \mu L} \qquad (2.26)$$

vilket är sk *Hele-Shaw* flöde som ofta utnyttjas vid modellering av vattenströmning i ett diskret sprickigt medium. Man kan här se att flödet är proportionellt till spricköppningen i kubik (cubic law) vilket är ett mycket viktigt faktum och har stor betydelse för strömning i t ex en bergmassa.

Ekvation 2.22 kan jämföras med Darcys lag

$$\bar{v}_z = \frac{\Delta P R^2}{8 \mu L} = \frac{\rho g h R^2}{8 \mu L} = k i \qquad (2.27)$$

där

$$\frac{\rho g R^2}{8 \mu} = k \tag{2.28}$$

är den s k hydrauliska konduktiviteten, där

$$\frac{R^2}{8}$$

utgör permeabiliteten som alltså endast är beroende av geometrin i det medium där strömningen sker. I detta enkla fall kan den hydrauliska konduktiviteten beräknas, om man känner vätskans (Newtonsk) viskositet och rörets geometri, något som oftast inte låter sig göras i ett geologiskt medium, med komplicerad geometri, utan måste bestämmas experimentellt.

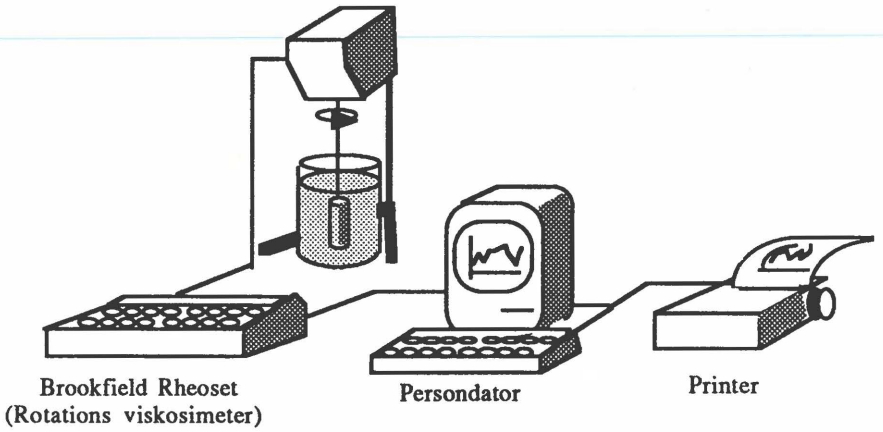
Ovanstående beräkningsgång har medtagits som ett exempel på den metodik som används för att teoretiskt beskriva stationär laminär strömning av en Binghamvätska. Metodiken är generell och det som kan försvåra eller omöjliggöra en analytisk lösning beror på andra antaganden, för komplicerad geometri eller invecklade reologiska modeller och randvillkor.

3. Rotationsviskometri

3.1. Allmänt, utrustning

För att mäta injekteringsmedels reologiska egenskaper används en datoriserad Brookfield Rheoset rotationsviskometer. Viskometern mäter det vridmoment som krävs för att rotera en cylinderformad mätprob, nedsänkt i det aktuella medlet, vid en given rotationshastighet. Viskometern är ansluten till en mikrodator som behandlar mätdata, ritar diagram över förloppen samt utvärderar de reologiska parametrarna och deras variation med tiden, se figur 3.1.

Den stora fördelen med att använda en rotationsviskometer är att man kontinuerligt kan mäta egenskaperna under en lång tidsperiod. Ett injekteringsmedel måste ändra sina egenskaper (härda) för att kunna motstå det vattentryck som verkar på medlet då injekteringstrycket avtar och följdaktligen är detta ett lämpligt instrument vid bestämning av de reologiska egenskaperna och deras tidsberoende.

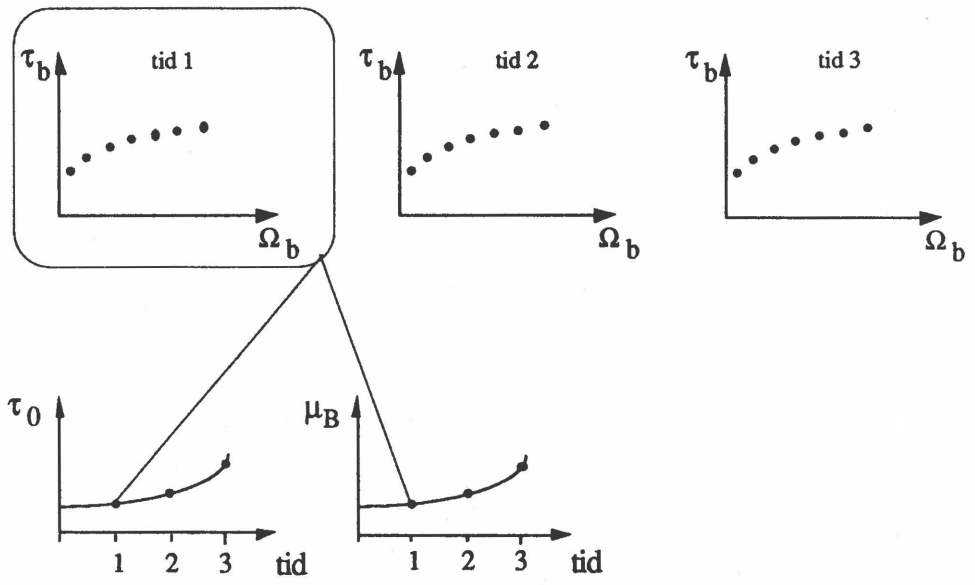


Figur 3.1 Utrustning för bestämning av reologiska egenskaper

Mätinstrumentet är känsligt så till vida att även mycket små förändringar av egenskaperna registreras, vilket inte är fallet vid mer primitiva bestämningsmetoder. Detta medför att man noggrant kan se när en härdning(gelning) startar, vilket kan vara avgörande vid t ex en injektering med kemiska medel. Mätförfarandet gör även att man lätt kan se effekten av olika tillsatsmedel (acceleratorer, flytmedel mm). Eftersom vätskor ofta är temperaturberoende är även en givare kopplad till viskosimetern som kontinuerligt mäter temperaturen under försökets gång.

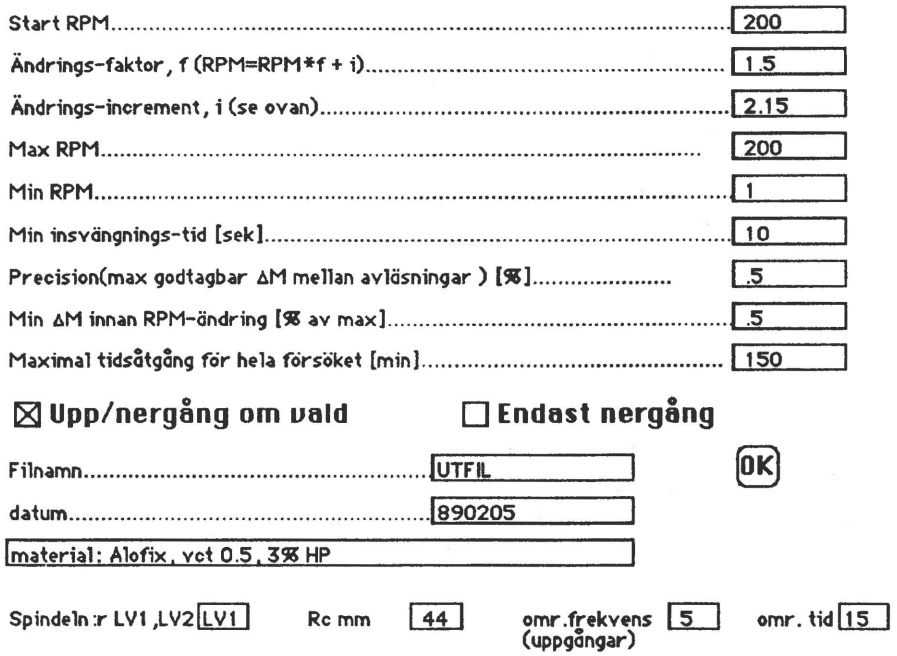
Utvärderingen av egenskaperna är uppdelad i ett antal mätsekvenser under vilken rotationshastigheten ändras, antingen från lågt RPM till högt eller tvärtom. Under den korta tid (ca 5 min) som en sekvens varar antas egenskaperna vara tidskonstanta. Ett helt försök kan pågå i ett par timmar och består av ett stort antal sekvenser. Efter varje sekvens utvärderas och lagras värden på egenskaperna så att man efter hela försöket kan erhålla deras utveckling med tiden, se figur 3.2.

Tre olika utvärderingsmetoder används, se vidare i kapitel 4, och den metod som ger den bästa anpassningen till mätdata väljs för att ange det slutliga värdet på de olika reologiska parametrarna.



Figur 3.2 I varje sekvens (tid 1, tid 2, osv) utvärderas och lagras egenskaperna och därmed kan utvecklingen med tiden erhållas.

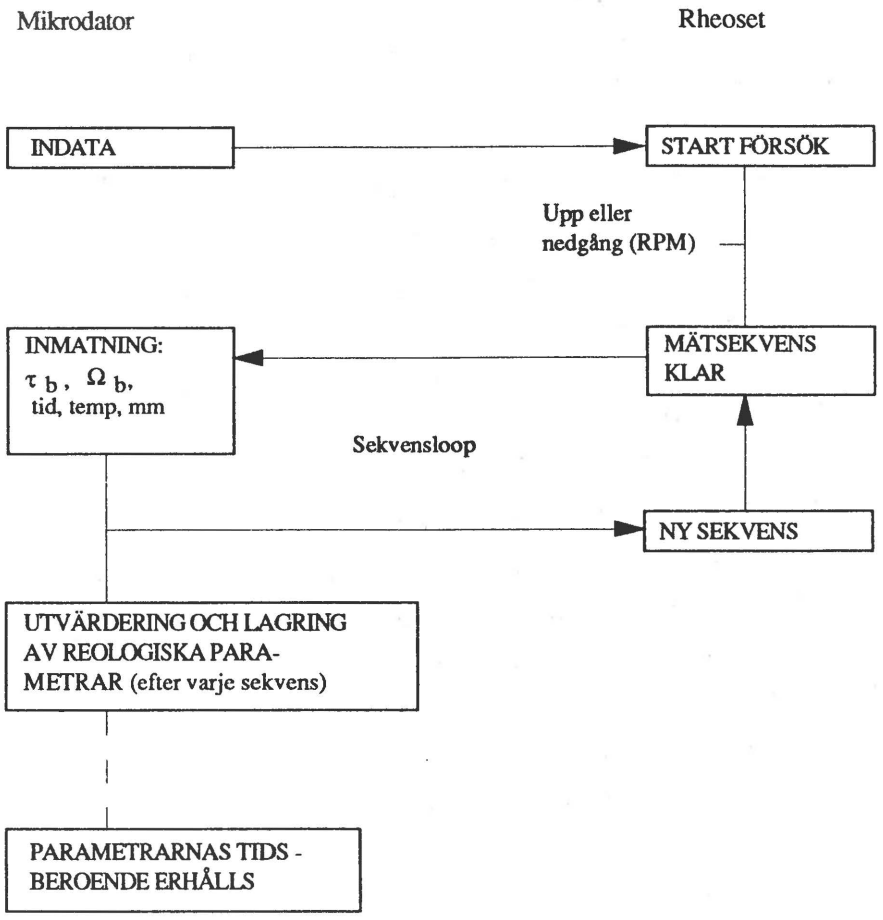
Nödvändiga indata för att starta försöket matas in i mikrodatorn och innehåller följande:



Figur 3.3 Indata till försök i mikrodatorn

Start RPM - är den rotationshastighet som försöket skall startas med.
Ändringsfaktor resp. inkrement - anger hur rotationshastigheten skall varieras (ökning resp. minskning).
Max RPM - är den maximala rotationshastigheten under försöket.
Min RPM - är den minsta rotationshastigheten under försöket.
Min insvängningstid - den minimum tid som instrumentet roterar med samma hastighet för att kunna stabilisera sig efter en ändring av RPM.
Precision - anger hur stor skillnad som kan accepteras mellan två vridmomentsavläsningar vid samma RPM.
Min ΔM innan RPM ändring - om två accepterade vridmomentvärden vid olika RPM är $<\Delta M$ hoppas det ena över.
Max tidsåtgång - anger hur lång tid hela försöket skall vara.
Upp/nergång - val kan göras om en ökning av rotationshastigheten skall följas av en minskning eller om endast nergång (start med max ned till min) önskas.
Filnamn - den fil där resultatet lagras, innehåller företrädesvis information om typ av medel, koncentrationen tillsatsmedel mm i namnet.
datum - försöksdatum
Material - detaljerad beskrivning om alla ingående material och blandningsförhållanden.
Spindle nr. - anger vilken mätkropp (prob) som används.
Rc - anger radien på det kärl som används.
Omrörnings frekvens - anger efter hur många sekvenser som omrörning (se kap. 5) skall ske.
Omrörningstid - anger hur länge en omrörning skall ske.

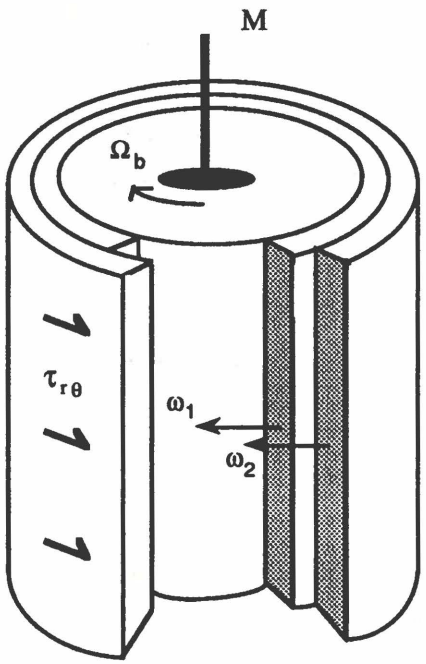
Samverkan mellan de båda enheterna, mikrodatorn och viskometern, sker enligt flödesschemat i figur 3.4.



Figur 3.4 Samverkan mellan mikrodatorn och viskometern

3.2. Matematiska samband

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 mellan vätskelammellerna i rörelse pga den inre friktionen, se figur 3.5.



Figur 3.5 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

$$\tau_{r\theta} = \frac{M}{2\pi r^2 L} \tag{3.1}$$

där M utgör det konstanta vridmomentet vid stationära förhållanden, och L är mätkroppens längd som är korrigerad för att ta hänsyn till effekten av ändytorna. Ekvation 3.1 är, i likhet med ekvation 2.6, allmängiltigt dvs skjuvspänningens fördelning över gapet är inte beroende av

vätskans reologiska egenskaper utan är endast i denna geometri en funktion av radien i kvadrat. Ekvation 3.1 kan användas för att bestämma skjuvspänningen vid respektive begränsningsyta genom att sätta in gällande värden på radien (R_b resp. R_c).

För att erhålla fundamentala ekvationer och samband för utvärderingen måste följande antaganden göras:

- vätskan är inkompresibel
- strömningen är laminär
- ingen radiell resp axiell hastighetskomponenet, dvs $v_r = 0$ och $v_z = 0$
- stationära förhållanden råder (alla tidsderivator = 0)
- det förekommer ingen relativ hastighet mellan vätskan och fasta begränsningsytor (sk No-slip condition)
- rörelsen är tvådimensionell dvs effekterna från mätkroppens ändytor försummas
  (detta korrigeras i stället genom att öka mätkroppens längd)
- systemet är isotermt

Deformationshastigheten uttrycks, vid dessa geometrier, lämpligen i cylinderkordinater och eftersom ($v = r\omega$) fås

$$\frac{dv}{dr} = r\frac{d\omega}{dr} \qquad (3.2)$$

Det konstitutiva sambandet för en Newtonsk vätska kan därefter uttryckas

$$\tau_{r\theta} = -\mu r \frac{d\omega}{dr} \tag{3.3}$$

vilket tillsammans med ekvation 3.1 ger

$$-d\omega = \frac{M}{2\pi L\mu}\frac{1}{r^3}dr \tag{3.4}$$

Hastigheten vid kärlväggen ($r = R_c$) är noll och vid mätproben ($r = R_b$) den kända hastigheten Ω_b, dvs kända randvillkor är

$$\begin{cases} r = R_b \\ \omega = \Omega_b \end{cases} \tag{3.5}$$

respektive

$$\begin{cases} r = R_c \\ \omega = 0 \end{cases} \tag{3.6}$$

som leder till att

$$\Omega_b = \frac{M}{4\pi L\mu}\left[\frac{1}{R_b^2} - \frac{1}{R_c^2}\right] \tag{3.7}$$

Ekvation 3.7 är känd som *Margules* ekvation.

Vridmomentet, M, kan uttryckas i den skjuvspänning som verkar utmed mätprobens mantelyta, τ_b

$$M = \tau_b 2\pi R_b^2 L \tag{3.8}$$

vilket insatt i ekvation 3.7 medför att

$$\begin{aligned} \Omega_b &= \frac{\tau_b R_b^2}{2\mu}\left[\frac{1}{R_b^2} - \frac{1}{R_c^2}\right] = \\ &= \frac{\tau_b}{2\mu}\left[\frac{R_c^2 - R_b^2}{R_c^2}\right] \end{aligned} \tag{3.9}$$

och efter omflyttning fås

$$\tau_b = 2\mu\Omega_b\left[\frac{R_c^2}{R_c^2 - R_b^2}\right] \Leftrightarrow \tag{3.10}$$

$$\tau_b - \tau_c = 2\mu\Omega_b \tag{3.11}$$

τ_c är skjuvspänningen vid kärlets vägg.

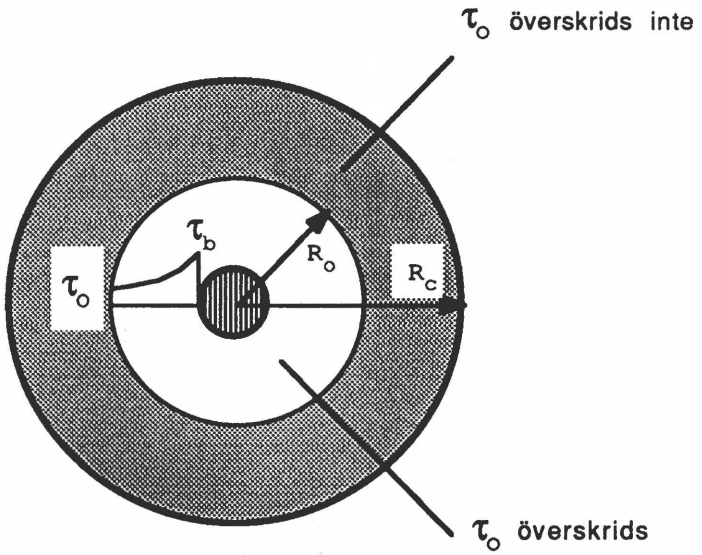
Ekvation 3.10 alternativt 3.11 utnyttjas för att bestämma viskositeten vid känt vridmoment (rotationshastighet) samt känd geometri för en Newtonsk vätska under stationära förhållanden.

Vid mätning av en vätska av Binghamtyp, där det krävs en skjuvspänning som är större än skjuvhållfastheten, τ_o, innan strömning sker, 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 3.6. Detta motsvarar pluggflödet vid rörströmning.



Figur 3.6 Strömning sker endast inom ett visst gap i mätkärlet

Ekvation 3.9 för en Newtonsk vätska motsvaras i Bingham modellen av följande samband

$$\Omega_b = \frac{M}{4\pi L \mu_B}\left[\frac{1}{R_b^2} - \frac{1}{R_c^2}\right] + \frac{\tau_o}{\mu_B} \ln \frac{R_b}{R_c} \qquad (3.12)$$

Ekvation 3.12 är känd som *Reiner-Riwlins* ekvation.

Om strömning sker inom hela mätkärlet dvs enligt fall 2 fås skjuvspänningen utmed mätproben enligt

$$\tau_b = \left(2\mu_B\Omega_b - 2\tau_o \ln\frac{R_b}{R_c}\right)\left[\frac{R_c^2}{R_c^2 - R_b^2}\right] \quad \Leftrightarrow \tag{3.13}$$

$$\tau_b - \tau_c = 2\tau_o \ln\frac{R_c}{R_b} + 2\mu_B\Omega_b \tag{3.14}$$

Ekvationen är ett linjärt samband mellan skjuvspänning och rotationshastighet och sambandet kan direkt användas för utvärdering av viskositet och skjuvhållfasthet ur mätresultat. Dock krävs 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

$$\tau_c = \tau_b\frac{R_b^2}{R_c^2} \geq \tau_o \quad \Rightarrow$$

$$\tau_{b,\,min} = \tau_o\frac{R_c^2}{R_b^2} \tag{3.15}$$

Endast då skjuvspänningen utmed mätproben är större än $\tau_{b,min}$ kan ekvation 3.14 användas.

I fall 3 då τ_o endast överskrids inom en del av mätkärlet, se figur 3.6, fås ett "effektivt" kärl som är mindre än det ursprungliga mätkärlet. Det "effektiva" kärlets varierande radie, R_o, bestäms som funktion av τ_b och τ_o enligt

$$R_o = R_b \sqrt{\frac{\tau_b}{\tau_o}} \tag{3.16}$$

eftersom man från ekvation 3.1 får

$$\frac{\tau_o}{\tau_b} = \frac{R_b^2}{R_o^2} \tag{3.17}$$

R_o är det "effektiva" kärlets radie och därför insättes R_o i ekvation 3.13 i stället för R_c vilket leder till att

$$\tau_b = \left(2\mu_B\Omega_b - 2\tau_o \ln\frac{R_b}{R_o}\right)\left[\frac{R_o^2}{R_o^2 - R_b^2}\right] \tag{3.18}$$

som kan skrivas

$$\tau_b\left(1 - \frac{R_b^2}{R_o^2}\right) = 2\mu_B\Omega_b - \tau_o \ln\frac{\tau_o}{\tau_b} \tag{3.19}$$

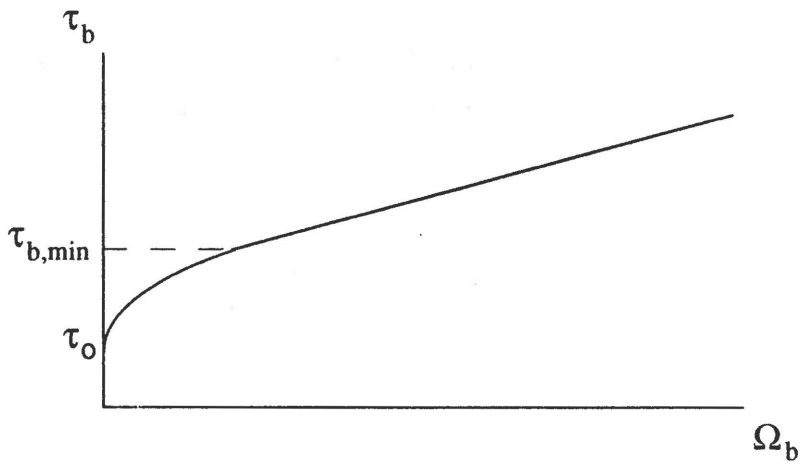
eller tillsammans med ekvation 3.16 som

$$\tau_b - \tau_o = 2\mu_B\Omega_b - \tau_o \ln\frac{\tau_o}{\tau_b} \tag{3.20}$$

Eftersom radien på det "effektiva" kärlet varierar beroende på mätprobens rotationshastighet och därmed vridmomentet fås ett icke-linjärt samband som slutligen kan uttryckas

$$\tau_b = \tau_o\left(1 + ln\frac{\tau_b}{\tau_o}\right) + 2\mu_B\Omega_b \qquad (3.21)$$

Grafiskt visas fall 2 och 3 dvs ekvation 3.14 respektive ekvation 3.21 i figur 3.7. Det bör observeras att den icke-linjära delen på kurvan endast är resultatet av ändrad geometri i mätkärlet p ga skjuvhållfastheten.



Figur 3.7 Vid mätning av en Binghamvätska fås en icke-linjär och en linjär kurva.

4. Utvärdering av reologiska parametrar

Nedan beskrivs tre olika metoder för att utvärdera de reologiska egenskaperna hos en Binghamvätska med hjälp av mätresultat från viskometern. 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 t ex minsta-kvadrat metoden. Därefter följer två olika metoder då endast en del av vätskan i kärlet strömmar dvs man har egentligen ett mindre mätkärl än det ursprungliga. Detta "effektiva" mätkärl har dessutom inte konstant radie utan denna 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. Det bör här observeras att representativa värden kan komma från olika utvärderingsmetoder i den slutliga sammanställningen över tidsberoendet.

4.1. Utvärdering vid strömning i hela kärlet

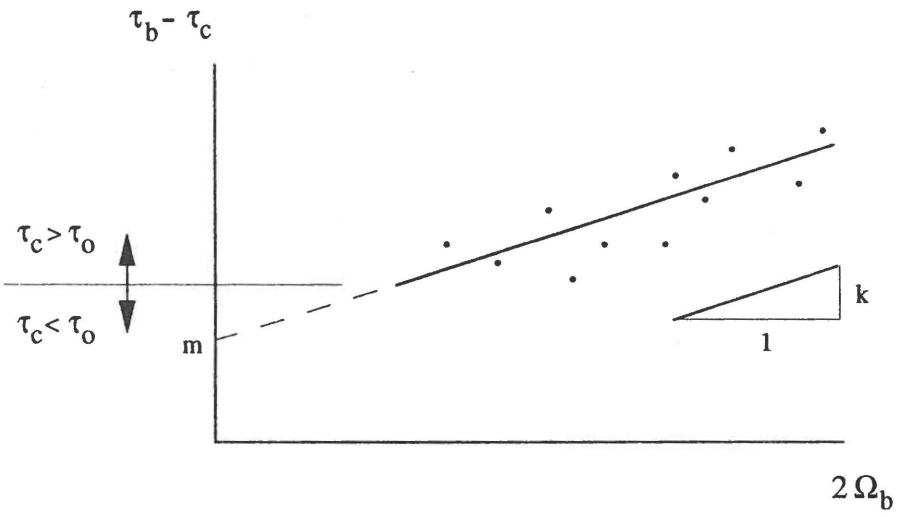
Då skjuvspänningen utmed mätkärlets vägg överskrider flytspänningen, $\tau_c > \tau_o$ (kan även uttryckas som $R_o > R_c$, se figur 3.6), strömmar medlet inom hela kärlet. För att detta skall inträffa måste skjuvspänningen utmed mätprobens mantelyta, τ_b, vara större än $\tau_{b,min}$ (se ekvation 3.15). Om detta villkor är uppfyllt så erhålls τ_b ur det linjära sambandet i ekvation 3.14 dvs

$$\tau_b - \tau_c = 2\tau_o \ln\frac{R_c}{R_b} + 2\mu_B\Omega_b \qquad , \tau_b > \tau_{b,min} \tag{4.1}$$

där vänsterledet även kan skrivas

$$\tau_b - \tau_c = \tau_b\left(1 - \frac{R_b^2}{R_c^2}\right) \tag{4.2}$$

Till de mätvärden som erhålls från viskometern skall anpassas en rät linje (ekvation 4.1), se figur 4.1.



Figur 4.1 Principen för linjär anpassning med minsta kvadrat metoden till ekvation 4.1

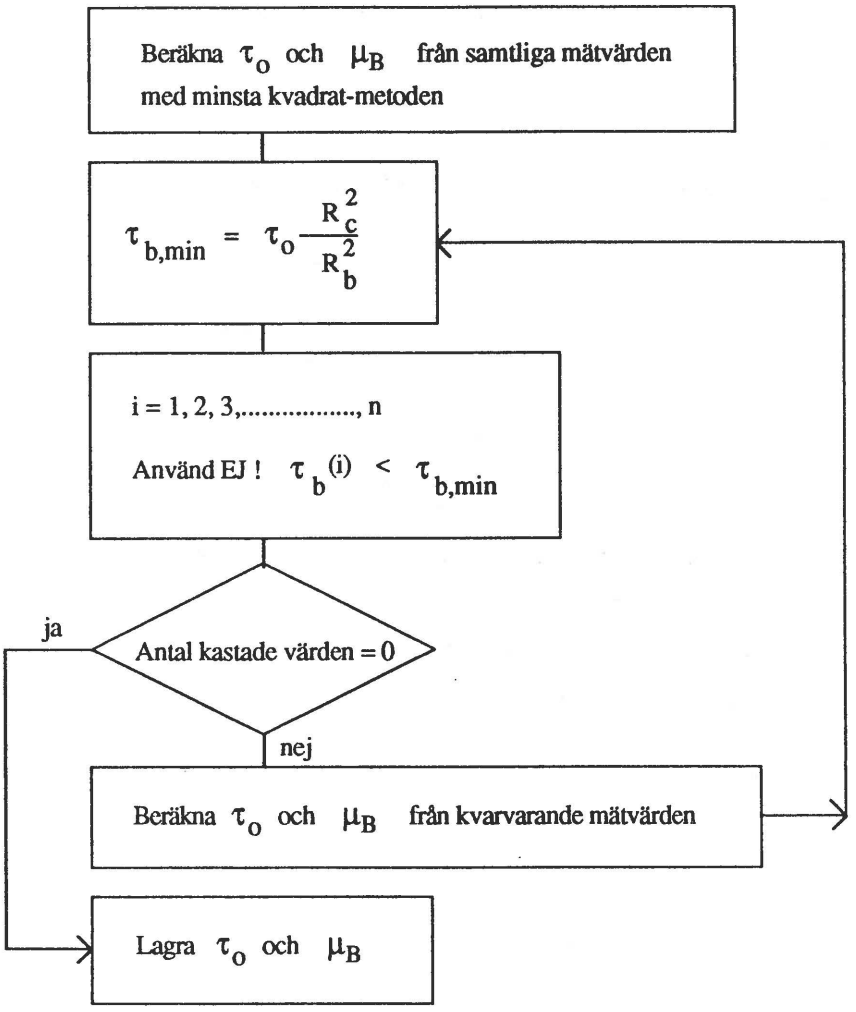
Anpassningen görs lämpligen med minsta kvadratmetoden där skärningspunkten med ordinatan, m ,och lutningen, k, ges av ekvationssystemet

$$\begin{pmatrix} n & \Sigma x \\ \Sigma x & \Sigma x^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} m \\ k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Sigma y \\ \Sigma y^2 \end{pmatrix} \tag{4.3}$$

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

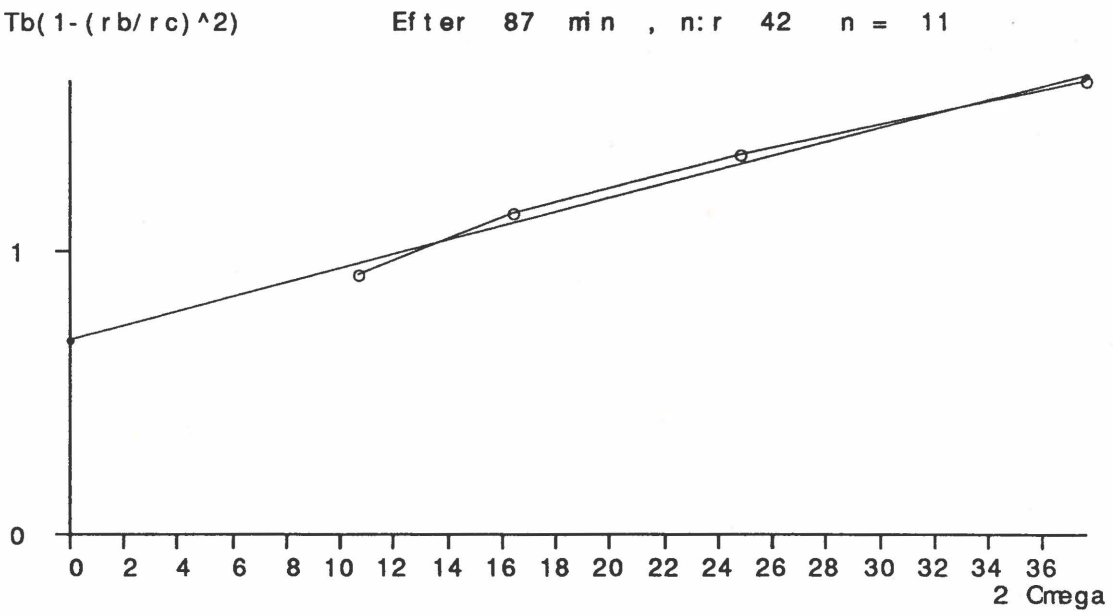
$$\tau_o = m\left(2 \ln \frac{R_c}{R_b}\right)^{-1} \tag{4.4}$$

$\tau_{b,min}$ som erhålls ur ekvation 3.15 utgör ett kriterium för att kunna skilja mellan vilka mätvärden som kan användas i den linjära respektive icke-linjära utvärderingen av de reologiska parametrarna. Särskiljningen och utvärderingen sker iterativt enligt följande flödesschema:



Figur 4.2 Flödesschema för utvärdering enligt ekvation 4.1

I figur 4.3 visas ett exempel från ett försök tillsammans med den linjära anpassningen. I utdata skrivs även ut hur lång tid som försöket pågått, vilken sekvens det är, antal mätningar i sekvensen samt τ_o, μ_B och $\tau_{b,min}$



Tnoll (linear) = 1.451451 μ = 2.490631E-02 Tbmin= 2.332024

Figur 4.3 Linjär anpassning till mätdata.

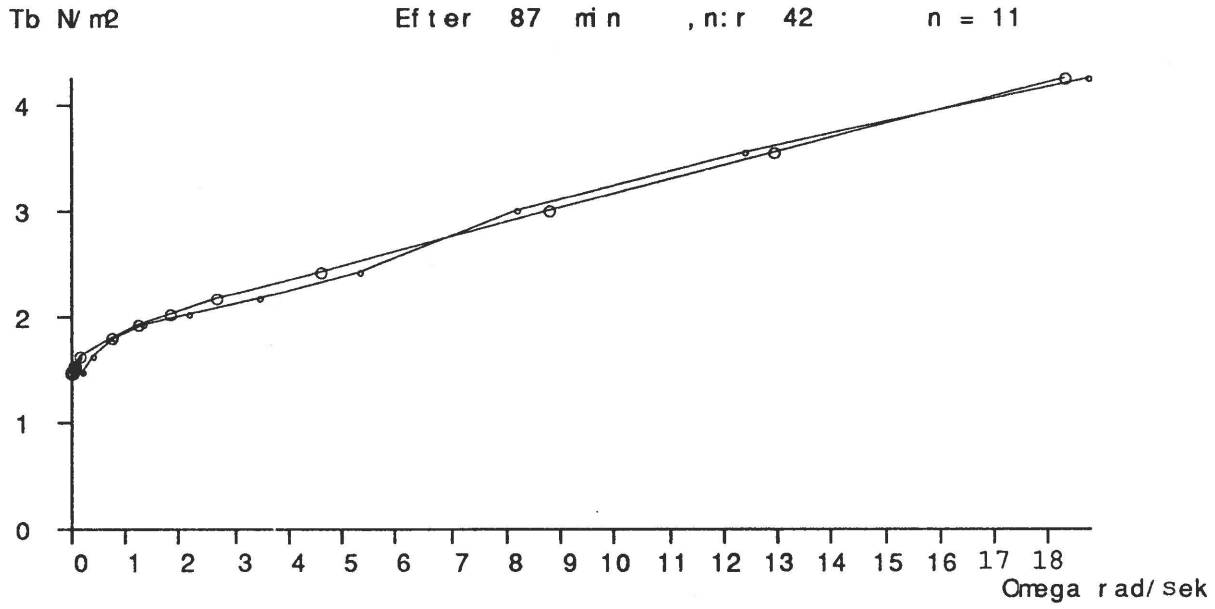
När parametrarna är utvärderade sätts de och τ_b in i ekvation 3.14 som kan skrivas

$$\Omega_b = \frac{1}{2\mu_B}\left(\tau_b\left(1 - \frac{R_b^2}{R_c^2}\right) - 2\tau_o \ln\frac{R_c}{R_b}\right) \qquad , \tau_b > \tau_{b,min} \tag{4.5}$$

för den linjära delen, respektive i ekvation 3.21

$$\Omega_b = \frac{1}{2\mu_B}\left(\tau_b - \tau_o\left(1 + \ln\frac{\tau_b}{\tau_o}\right)\right) \qquad , \tau_b < \tau_{b,min} \tag{4.6}$$

för den icke-linjära delen. En jämförelse görs sedan mellan mätdata (små ringar) och den teoretiska kurvan (stora ringar), se figur 4.4.



Figur 4.4 Jämförelse mellan mätdata och motsvarande teoretiska kurva

4.2. Utvärdering vid strömning i endast en del av kärlet

När skjuvspänningen utmed mätkärlets vägg och en bit in i kärlet är mindre än skjuvhållfastheten, dvs $\tau_c < \tau_o$ ($R_o < R_c$) kommer det där att finnas en zon där medlet kvarstår i en fast fas, se figur 3.6. Inom denna zon, mellan R_o och R_c, är skjuvspänningen överallt mindre än skjuvhållfastheten vilket medför att ingen strömning sker.

Medlet strömmar endast inom ett "effektivt" kärl vars radie, R_o, varierar med τ_b enligt ekvation 3.16. Eftersom det "effektiva kärlets" storlek varierar uppkommer en icke-

linjär effekt vilket försvårar utvärderingen avsevärt. Det är viktigt att poängtera att den icke-linjära effekten endast är geometriskt betingad. Effekten är visserligen resultatet av skjuvhållfastheten men har annars inte med de reologiska egenskaperna att göra.

Följande samband gäller i detta fall (ekvation 3.21)

$$\tau_b = \tau_o\left(1 + ln\frac{\tau_b}{\tau_o}\right) + 2\Omega_b\mu_B \qquad (4.7)$$

som kan omskrivas till

$$\Omega_b = \frac{1}{2\mu_B}\left(\tau_b - \tau_o\left(1 + ln\frac{\tau_b}{\tau_o}\right)\right) \qquad (4.8)$$

Med utgångspunkt från ekvation 4.7 (4.8) har två olika metoder utvecklats för att lösa det icke-linjära sambandet, en direkt och en iterativ metod.

4.2.1. Metod I (direkt metod)

Deriveras ekvation 4.8 med avseende på τ_b erhålles följande

$$\frac{d\Omega_b}{d\tau_b} = \frac{1}{2\mu_B}\left(1 - \tau_o\frac{d\,ln\,\tau_b}{d\,\tau_b}\right) = \frac{1}{2\mu_B}\left(1 - \frac{\tau_o}{\tau_b}\right) \qquad (4.9)$$

Det visar sig att om derivatan multipliceras med τ_b erhålls ett linjärt uttryck med vars hjälp viskositeten och skjuvhållfastheten kan utvärderas

$$\tau_b \frac{d\Omega_b}{d\tau_b} = \frac{1}{2\mu_B}(\tau_b - \tau_o) \tag{4.10}$$

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

$$\frac{d\Omega_b}{d\tau_b} \approx \frac{\Delta\Omega_b}{\Delta\tau_b} = \frac{\Omega_b^{(i+1)} - \Omega_b^{(i)}}{\tau_b^{(i+1)} - \tau_b^{(i)}} \tag{4.11}$$

och medelvärdet mellan två skjuvspänningsmätningar används, dvs

$$\tau_b^* = \tau_b^{(i)} + \frac{\Delta\tau_b}{2} \tag{4.12}$$

varvid vänsterledet i ekvation 4.10 kan skrivas

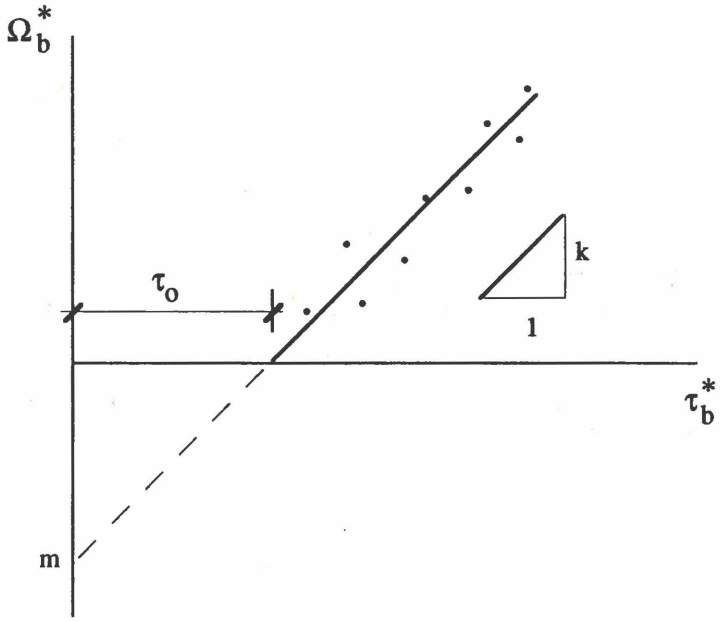
$$\tau_b \frac{d\Omega_b}{d\tau_b} = \Omega_b^* = \left(\tau_b^{(i)} + \frac{\Delta\tau_b}{2}\right)\left(\frac{\Omega_b^{(i+1)} - \Omega_b^{(i)}}{\tau_b^{(i+1)} - \tau_b^{(i)}}\right) \tag{4.13}$$

och slutligen fås

$$\Omega_b^* = \frac{1}{2\mu_B}(\tau_b^* - \tau_o) \tag{4.14}$$

som är ett linjärt samband som anpassas till de modifierade (*) mätvärdena m h a minsta kvadratmetoden, se ekvation 4.3,

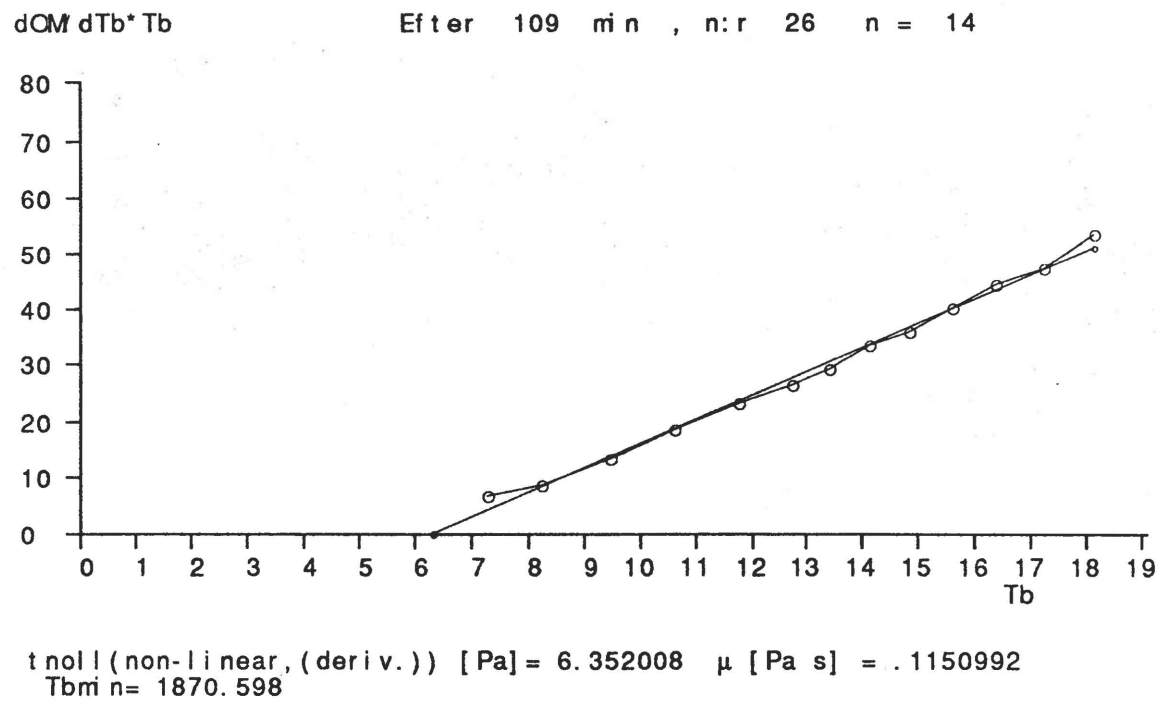
där i detta fall y = Ω^* och x = τ^*. Skjuvhållfastheten ges av τ_o = - m/k och viskositeten ges av μ_B = 1/2k, se figur 4.5.



Figur 4.5 Principen för linjär anpassning med minsta kvadrat metoden till ekvation 4.14

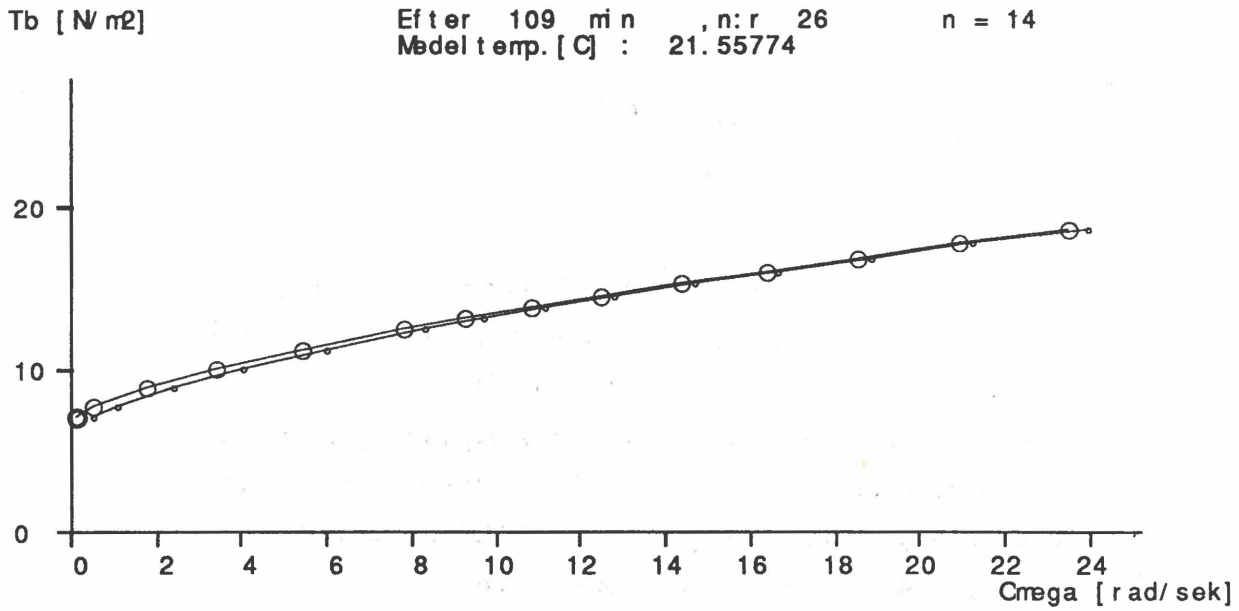
Som i föregående kapitel används $\tau_{b,min}$ här som kriterium för vilka värden som skall medtagas och särskiljningen och utvärderingen sker iterativt enligt flödesschemat i figur 4.2 med den skillnaden att nu används de värden som kastades i den förra metoden (kap 4.1).

I figur 4.6 visas ett exempel från ett försök med värden enl ekvation 4.14 och motsvarande linjära anpassning.



Figur 4.6 Exempel på linjär anpassning från mätdata

När parametrarna är utvärderade sätts de på motsvarande sätt som i föregående avsnitt in i ekvation 4.5 resp ekvation 4.6 och en jämförelse görs mellan mätdata (små ringar) och den teoretiska kurvan (stora ringar), se figur 4.7



Figur 4.7 Jämförelse mellan mätdata och motsvarande teoretiska kurva (direkt metod)

4.2.2. Metod II (Iterativ metod)

Det visar sig att den ovan redovisade metoden med en direkt bestämning av Binghamegenskaperna inte alltid ger ett tillfredställande resultat, dvs man erhåller ej en god överenstämmelse mellan mätvärden och utvärderade parametrar. Av den orsaken har en iterativ metod utvecklats enligt nedan.

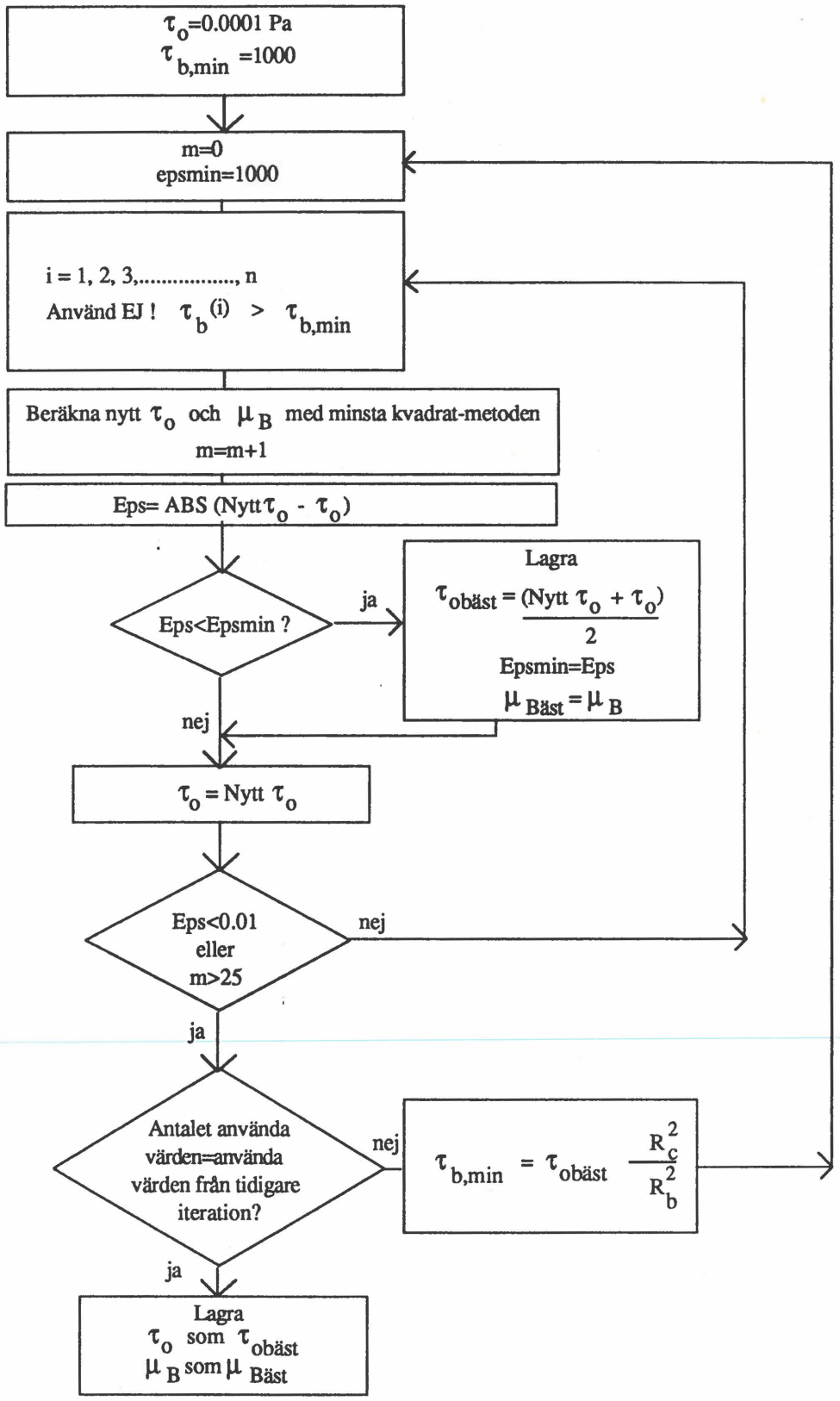
Ekvation 4.7 kan omskrivas till

$$\tau_b - \tau_o \ln \frac{\tau_b}{\tau_o} = \mu_B 2\Omega_b + \tau_o \qquad (4.15)$$

och om

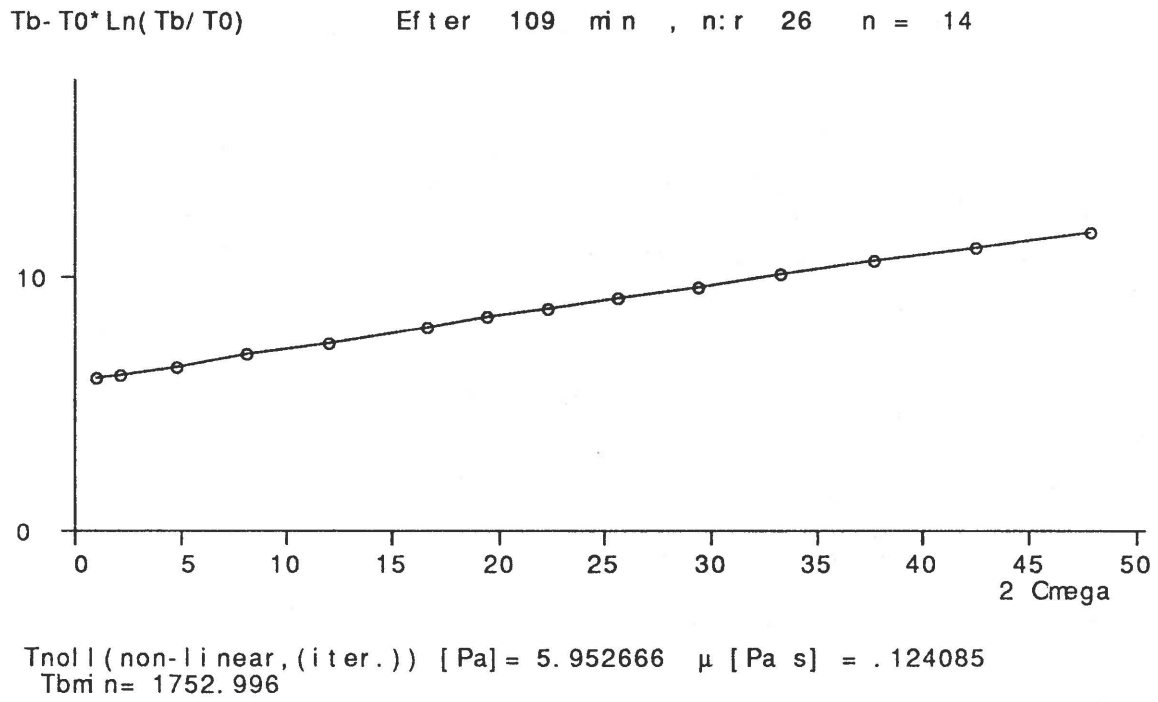
$$\tau_b - \tau_o \ln \frac{\tau_b}{\tau_o}$$

plottas som funktion av $2\Omega_b$ 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 är därför ej direkt bestämbar. Här utvecklad metodik bygger på att iterativt prova olika τ_o tills τ_o från framräknat intercept överenstämmer med det provade. Flödesschemat för utvärderingen framgår av figur 4.8.



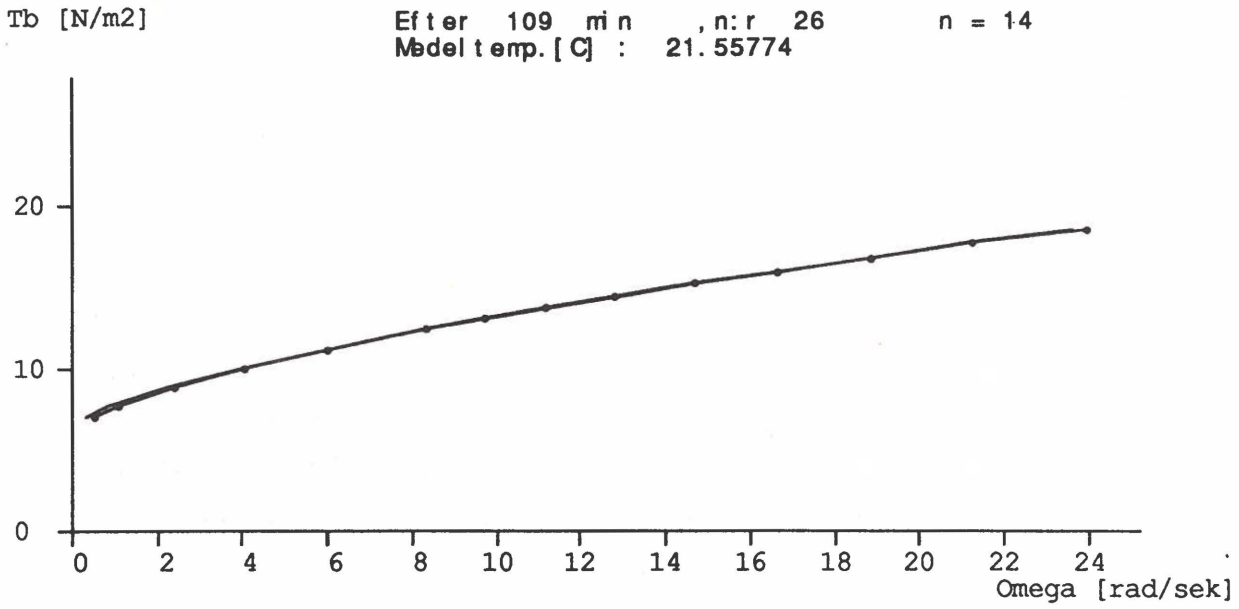
Figur 4.8 Principiellt flödesschema för iterativ beräkning av Binghamparametrar ur ickelinjär kurvdel.

I figur 4.9 visas mätvärden som iterativt har tagits fram och till vilka en rät linje skall anpassas för att kunna utvärdera viskositeten och skjuvhållfastheten enligt ekvation 4.14.



Figur 4.9 Värden till vilka en rät linje anpassas med minsta kvadrat metoden

När parametrarna är utvärderade sätts de enligt föregående metoder in i ekvation 4.5 respektive ekvation 4.6 och en jämförelse görs mellan mätdata (små ringar) och den teoretiska kurvan (heldragen linje), se figur 4.10.



Figur 4.10 Jämförelse mellan mätdata och motsvarande teoretiska kurva (iterativ metod)

5. Speciella problem

5.1. Sedimentation

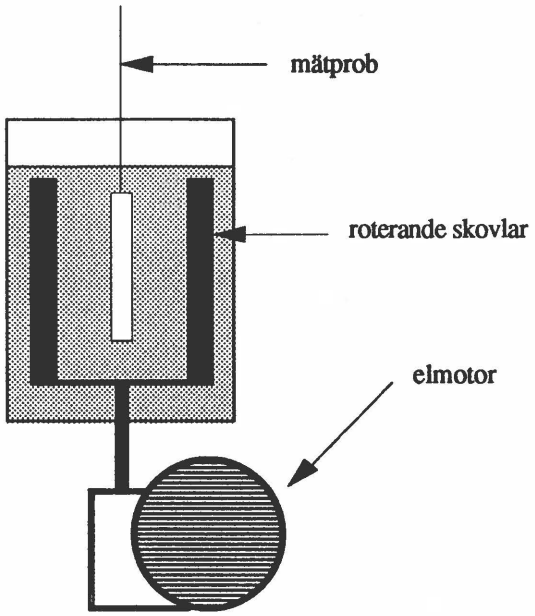
Vid injektering med framförallt suspensioner t ex cementbaserade medel är det viktigt att erhålla en stabil blandning, dvs partiklarna måste hållas "svävande". Om blandningen inte är stabil kommer de enskilda partiklarna att sedimentera pga av sin egenvikt och därmed blockera och omöjliggöra ytterligare injektering i ett spricksystem. Ett cementbaserat injekteringsmedel kan fås stabilt genom att använda ett lågt vatten-cement tal (vct) eller med hjälp av ett lämpligt tillsatsmedel, t ex bentonit. Viktigt är även att blandningen rörs om ordentligt, med t ex en kolloidkvarn, före injekteringen så att inte partiklar klumpas samman i tyngre fraktioner.

Suspensioner orsaker även problem i samband med mätning av de reologiska egenskaperna med rotationsviskometern. Om alltför många partiklar sjunker till botten av mätkärlet eller om partiklarna slungas ut från mätproben, pga rotationen vid höga RPM, kommer mätningen att ske i en förtunnad blandning som inte är representativ för injekteringsmedlet.

För att råda bot på ovannämnda problem, med cementbaserade medel, har en omrörare anslutits till mätkärlet, se figur 5.1. Efter en mätsekvens sätts omröraren igång och pressar medlet in mot mätproben som därmed får "färskt" material att mäta i. Omrörningens varaktighet och efter hur många sekvenser som den skall starta regleras i indata till mikrodatorn, se kapitel 3.

Sedimentationen mot botten minskas även genom att använda en industriell blandare som med hög hastighet noggrant finfördelar suspensionen innan själva mätningen börjar.

Försiktighet måste dock iaktagas vid höghastighetsblandning eftersom temperaturen stiger pga av friktionen i vätskan vilket kan påverka egenskaperna avsevärt.



Figur 5.1 Anordning för omrörning för att minska effekten av sedimentation

En annan viktig sak att tänka på vid mätning av suspensioner är att det ej uppstår en relativ rörelse (slip) mellan mätproben och det närmast intilliggande vätskeskiktet. Teorin bygger på att vätskan intill en fast begränsningsyta skall ha samma hastighet som ytan och detta har lösts genom att ett tunt lager fin sand har limats fast på mätproben.

5.2. Tixotropi

Vissa injekteringsmedel är tixotropa dvs egenskaperna förändras med tiden beroende på vilka skjuvkrafter som vätskan har varit utsatt för tidigare och hur länge dessa skjuvkrafter har verkat. 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 och återgå till de ursprungliga (reversibel process).

Tixotropin ställer till problem då det gäller tolkning av resultaten som erhålls från rotationsviskometern eftersom man erhåller olika resultat (hysteres) 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).

På grund av skjuvhållfastheten hos medlet kommer det att under vissa förhållanden att finns en zon i mätkärlet där vätskan inte skjuvas, se kapitel 3, och detta medför att vätskan i den stillastående zonen får "vila" vilket kommer att påverka resultatet. Motsvarande fenomen uppträder om man väntar för länge mellan tillblandning av suspensionen och tills dess attt mätningen startar.

Framförallt tillsats av bentonit i ett cementbaserat injekteringsmedel gör att medlet får tixotropa egenskaper (Wallner, 1976). Bentonitpartiklarna bildar en gel, mellan cementpartiklarna, som bryts vid hög rotationshastighet och som växer till i styrka när vätskan är stilla.

Effekten av tixotropin kan ses i resultaten i kap 6 där 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 den tixotropa effekten.

Tixotropin påverkar 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 mindre och mindre skjuvspänning i takt med att tryckgradienten minskar ju längre medlet har nått. Detta innebär att en mätning bör påbörjas med ett högt RPM och därefter minskas.

5.3. Förstörande provning

Vid mätning av framförallt kemiska injekteringsmedel, som gelar på kort tid, uppstår problem i och med att mätproben under sin rotation förstör de bindningar som skett i den kemiska processen. Så länge som medlet är i vätskefas 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, se figur 6.8 och 6.9.

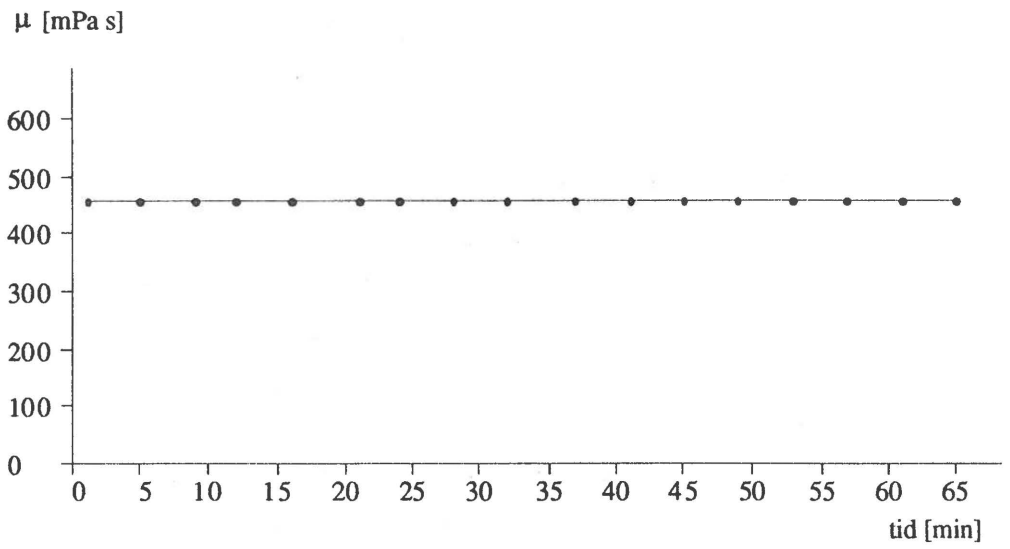
Det har även, i vissa fall, visat sig att om medlet störs under själva gelningsprocessen så kommer det ej att erhålla den sluthållfasthet som annars skulle ha varit fallet. Detta är ett mycket viktigt konstaterande och har en avgörande betydelse för resultatet av en verklig injektering. Det är alltså av stor vikt vid en kemisk injektering att noggrant känna till geltiden, något som inte låter sig göras med en alltför primitiv utrustning.

Ovanstående problem har minskats genom att utveckla en speciell programvara för medel med en hastig gelning. Ökningen av rotationshastigheten sker här långsamt tills eventuella bindningar bryts. Därefter stoppas mätproben och högsta skjuvhållfastheten avläses och mätningen får vila ett förutbestämt tidsintervall. Metoden ger endast skjuvhållfasthet och inte viskositet.

6. Exempel på tillämpning av metodiken

Den i rapporten beskrivna mätmetodiken har hittills använts för att utvärdera egenskaperna på kemiska (silikatbaserade) - men framförallt på cementbaserade injekteringsmedel. För de cementbaserade medlen har det varit av intresse att kontrollera effekten av varierande vatten/cementtal (vct), tillsats av lermineral (bentonit) samt tillsats av flytmedel (superplastizicers). Ovanstående tillsatser påverkar de reologiska egenskaperna och det är önskvärt att kunna kvantifiera effekterna för att därigenom kunna "skräddarsy" sitt medel för olika situationer och målsättning. De här medtagna resultaten är dock preliminära och har medtagits främst för att ge en kvalitativ bild av effekterna av olika blandningar. Resultaten redovisas i form av skjuvhållfasthet respektive viskositet och hur dessa egenskaper varierar som funktion av tiden.

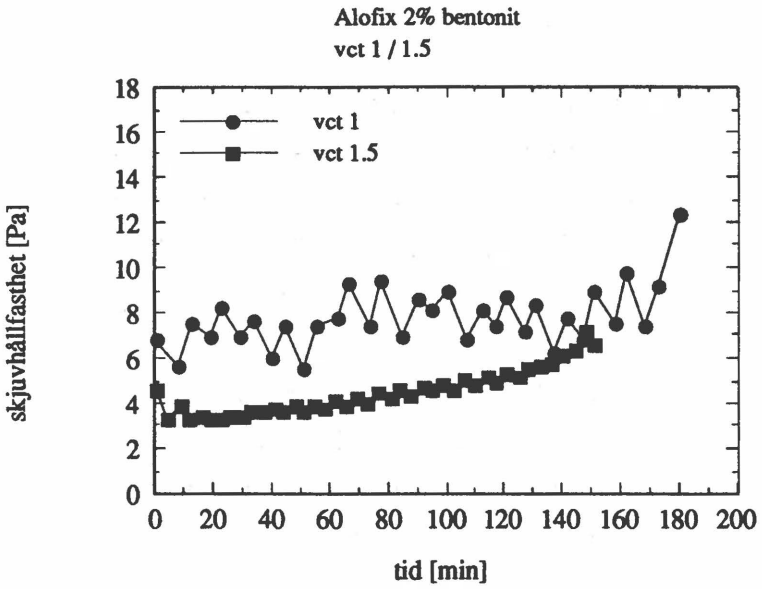
Mätmetodiken har kontrollerats genom mätning av en Newtonsk "kalibreringsvätska" med känd viskositet (462 cPoise (mPa s) vid 25° C) med god överenstämmelse, se figur 6.1. Det är naturligtvis även önskvärt med en kalibreringsvätska av Binghamtyp men detta går dessvärre inte att uppbringa på marknaden.



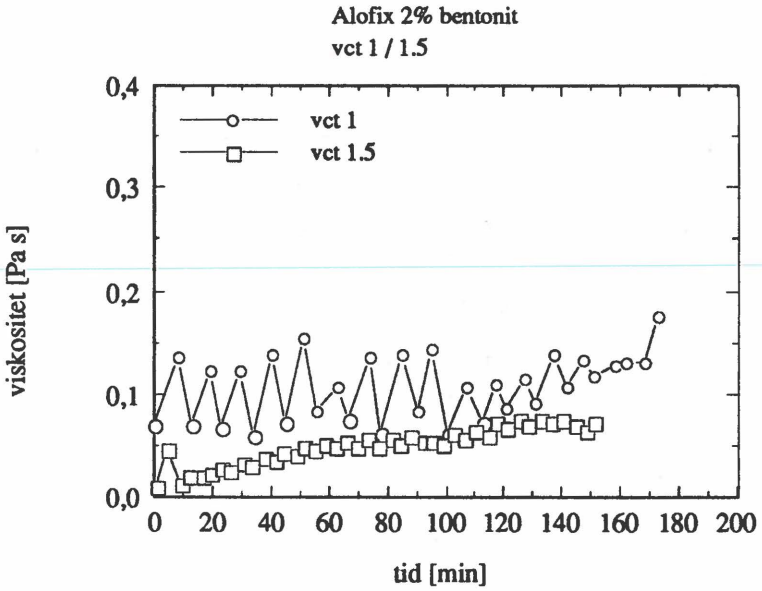
Figur 6.1 Resultat från mätning av en Newtonsk kalibreringsvätska med en viskositet på 462 cPoise vid 25° C

6.1. Effekten av varierande vct

Vid cementinjektering är det ofta önskvärt att ha ett så lågt vct som möjligt. Ett lågt vct minskar risken för separation (sedimentation) samt ger ett tätare och mer hållfast injekteringsbruk. Priset man får betala för att erhålla dessa positiva effekter av ett lågt vct är en högre skjuvhållfasthet samt högre viskositet. Högre värden på de reologiska parametrarna betyder som nämnts tidigare att det behövs högre tryck för att pumpa medlet samt att det blir svårare att få medlet att tränga ut i finare sprickor och porer. Nedan visas försök gjorda med ett sk mikrocement med 2% bentonit (av vattnets vikt) och vct 1 resp vct 1.5.



Figur 6.2 Effekten av varierande vct på skjuvhållfastheten

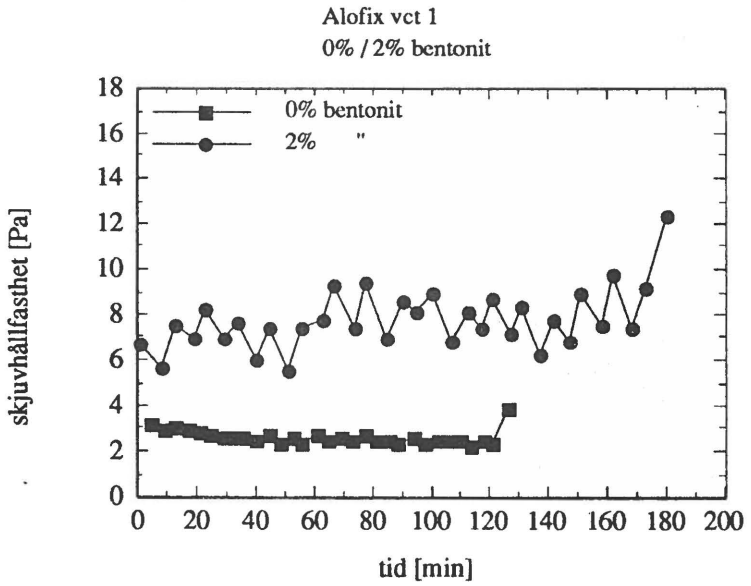


Figur 6.3 Effekten av varierande vct på viskositeten

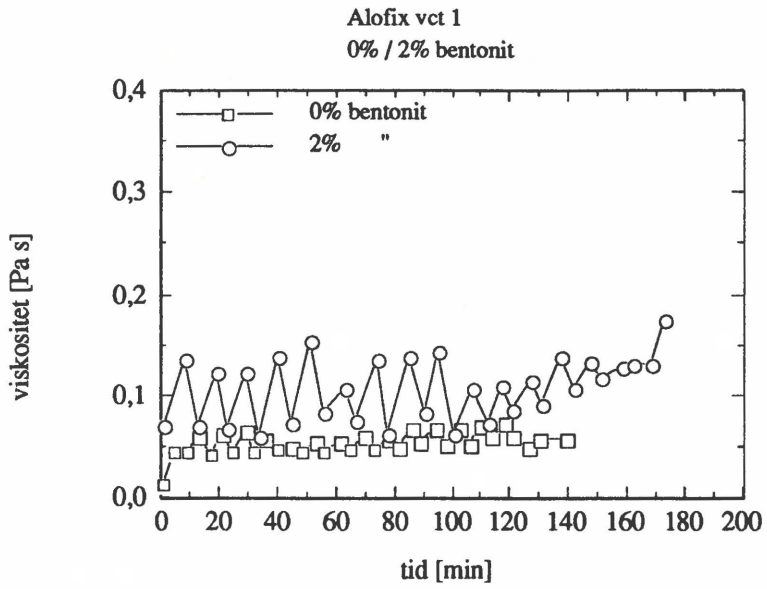
6.2. Effekten av tillsats av bentonit

Bentonit är en lermineral som används som tillsats vid cementinjektering för att förhindra att cementpartiklarna separerar och sjunker p ga gravitationen. Bentoniten bildar en gel som gör att cementpartiklarna hålls "svävande" i injekteringsbruket. Bentonittillsatsen har dock den negativa effekten att skjuvhållfastheten ökar pga de bindningar som finns mellan bentonitpartiklarna. Bentoniten bidrar även till en ökad tixotropi i blandningen (Wallner, 1976) vilket framgår av det taggiga utseendet i figur 6.4 och 6.5. Taggigheten beror på att man erhåller olika värden på egenskaperna beroende på om viskometern startar från ett lågt RPM och ökar eller från ett högt RPM och minskar. I nedanstående mätning startar varannan sekvens med ett lågt RPM.

Nedan visas försök gjorda med ett mikrocement, vct 1, och 0% resp 2% bentonit (av vattnets vikt).



Figur 6.4 Effekten av bentonit på skjuvhållfastheten



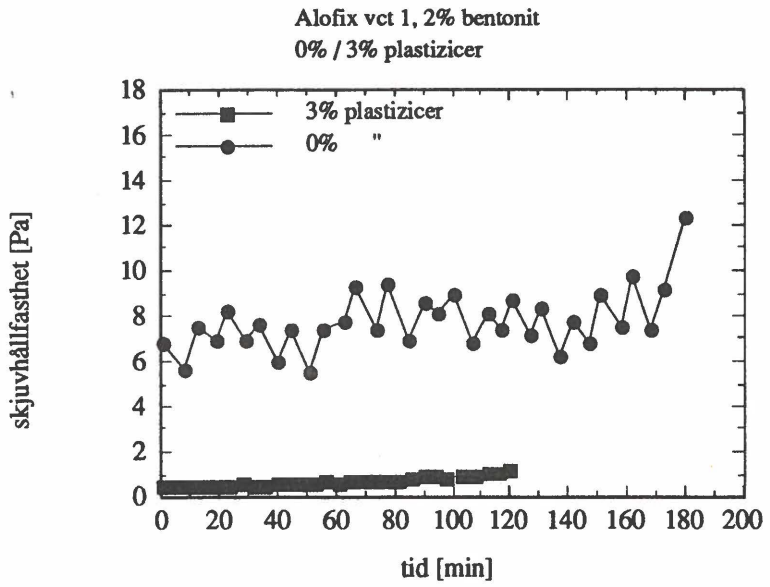
Figur 6.5 Effekten av bentonit på viskositeten

6.3. Effekten av tillsats av flytmedel

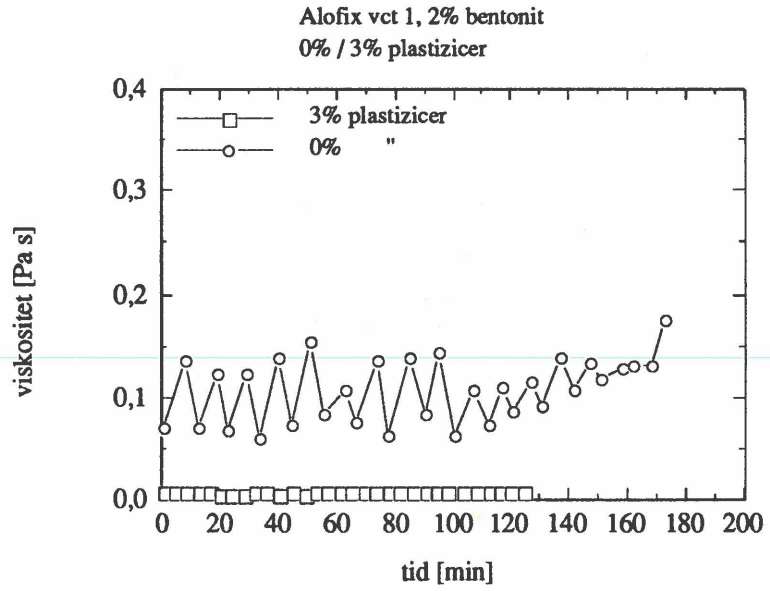
Flytmedel (plasticizers) påverkar egenskaperna främst genom att dispergera de enskilda cement/ler partiklar som kan ha klumpat ihop sig till agglomerat. Dispersionen innebär att mer vatten kan tränga in mellan kornen vilket leder till att hydratationsgraden ökar. De enskilda partiklarna blir även negativt laddade vilket innebär att de repellerar varandra. Effekten av bindningar mellan kornen kan varieras med mängden flytmedel och detta påverkar skjuvhållfastheten respektive viskositeten, se figur 6.6 och 6.7. Man kan även observera att den tixotropa effekten har minskat vilket märks genom att kurvorna inte är lika taggiga som medlet utan flyttillsats. Den gynnsamma effekten av flytmedel gäller dock endast under en begränsad tidsrymd vilket kan observeras vid mätning under längre tidsperioder.

Med hjälp av flytmedel kan ett cementbaserat injekteringsmedel ha ett lågt vct samt innehålla t ex bentonit och ändå vara injekterbart i små sprickor och porer.

Nedan visas resultat med mikrocement och 0% resp 3% flytmedel (av cementvikten).



Figur 6.6 Effekten av tillsatt flytmedel på skjuvhållfastheten

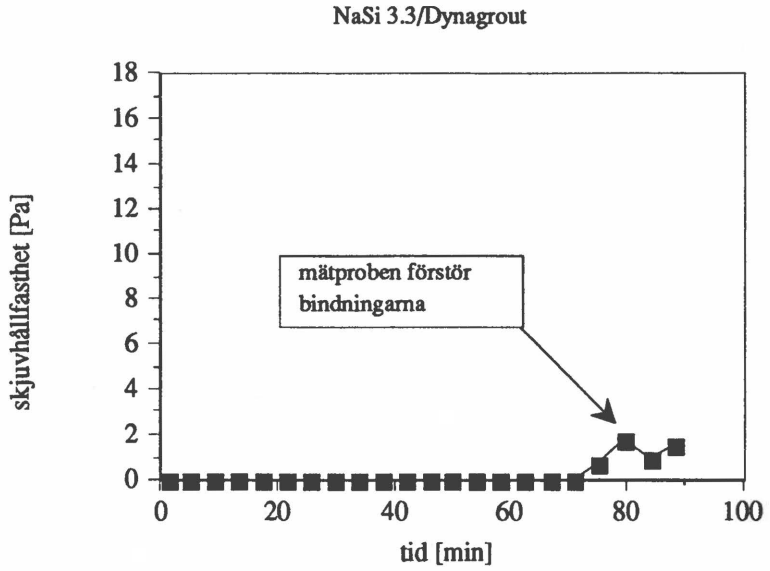


Figur 6.7 Effekten av tillsatt flytmedel på viskositeten

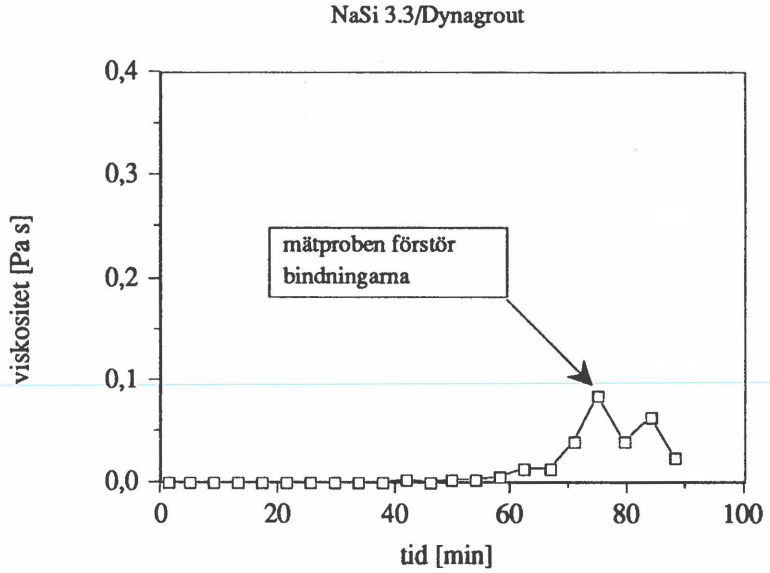
6.4. Kemiska injekteringsmedel

Kemiska injekteringsmedel karakteriseras av att de har obefintlig eller mycket liten skjuvhållfasthet samt en viskositet i vattens storleksordning. Detta faktum och att de inte innehåller några suspenderade korn gör att kemiska medel lämpar sig bra för injektering av fina sprickor och i porösa medier. Kemiska medel har en tendens att bilda gel på kort tid (jämfört med cementbaserade medel), dvs hållfastheten växer till hastigt när väl gelningen har satt igång. I och med att gelningen sker hastigt uppkommer en del problem med rotationsviskometern vilket har nämnts i föregående kapitel.

När man använder kemiska medel är det viktigt att injekteringen är slutförd innan gelningen har börjat, annars finns det risk för att vissa medel (t ex silikater) ej uppnår den rätta sluthållfastheten. Ovanstående innebär m a o att det är viktigt att ta reda på och känna till när egenskaperna börjar förändras. Med den i rapporten beskrivna metodiken kan man mycket noggrant se en förrändring av egenskaperna, se figur 6.8 och 6.9, något som inte skulle vara fallet vid en okulärbesiktning eller skakning av medlet. I figurerna visas resultat från mätningar av ett natriumsilikat (ratio 3.3) med härdare i form av Dynagrout T.



Figur 6.8 Skjuvhållfastheten för ett silikatbaserat medel

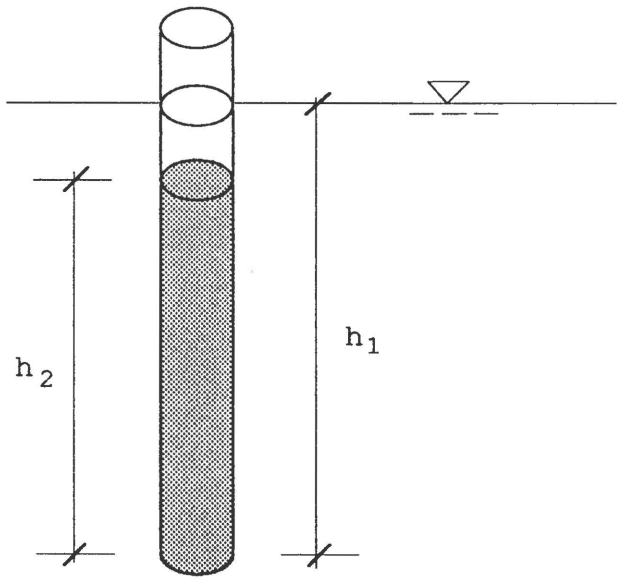


Figur 6.9 Viskositeten för ett silikatbaserat medel

7. Fältutrustning

Skjuvhållfastheten för en Binghamvätska kan bestämmas med relativt enkla medel genom att utnyttja det faktum att vätskan ej strömmar då aktuell skjuvspänning är mindre än skjuvhållfastheten. Detta har använts av Lombardi, 1985, där han genom att doppa ett plåtbleck med rå yta i vätskan, väga det före och efter, kan utvärdera skjuvhållfastheten. Metoden fungerar enligt principen att ju högre skjuvhållfastheten är ju tjockare skikt fastnar på blecket.

En alternativ metod, som enkelt låter sig beskrivas matematiskt, är att föra ner ett rör i vätskan till en viss nivå (h_1) och se hur högt vätskan når på insidan av röret (h_2), se figur 7.1.



Figur 7.1 Princip för mätning av skjuvhållfastheten i ett nedsänkt rör

När vätskan inuti röret stannar har "pluggen" vuxit och når ut till rörväggen där skjuvspänningen i det skedet är lika stor som skjuvhållfastheten vilket medför att strömningen upphör.

Matematiskt kan metoden beskrivas genom att ställa upp en kraftjämvikt i vertikalled. Då vätskan stannar råder jämvikt mellan egenvikten å ena sidan och trycket i botten på röret samt skjuvhållfastheten å andra sidan.

En jämviktsbetraktelse i vertikalled tecknas enligt nedan

$$\uparrow: \quad \rho g\, h_1 \pi R^2 - \rho g\, h_2 \pi R^2 - \tau_0\, 2\pi R\, h_2 = 0 \tag{7.1}$$

där

ρ	är vätskans densitet
g	är tyngdaccelerationen
h_1	är den sträcka som röret förs ned i vätskan, se fig 7.1
h_2	är den sträcka som vätskan når inuti röret, se fig 7.1
R	är rörets radie
τ_o	är vätskans skjuvhållfasthet

varur skjuvhållfastheten kan skrivas

$$\tau_0 = \frac{\rho g R}{2}\left(\frac{h_1}{h_2} - 1\right) \tag{7.2}$$

Man kan här notera att om

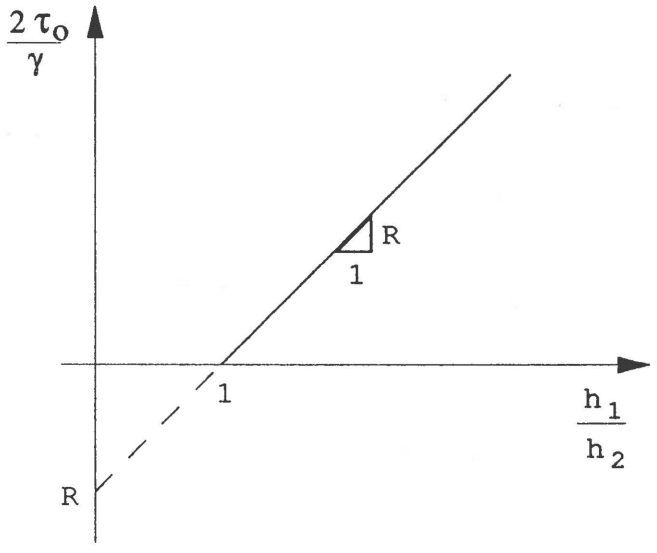
$$\left.\begin{aligned} h_2 &\to h_1 \\ \tau_0 &\to 0 \end{aligned}\right\}$$

dvs om vätskan når lika högt inuti röret som nivån utanför är skjuvhållfastheten noll (jmf vatten). Vidare gäller naturligtvis att ju kortare sträcka som vätskan når inuti röret ju högre är skjuvhållfastheten.

Ekvation (7.2) kan skrivas ($\rho g = \gamma$)

$$\frac{2\tau_0}{\gamma} = R\frac{h_1}{h_2} - R \tag{7.3}$$

vilket grafiskt kan åskådliggöras, se figur 7.2.



Figur 7.2 Skjuvhållfastheten som funktion av inträngd sträcka

Man kan här se att precissionen kan ökas genom att använda ett längre rör (ökning av h_1) eller genom att använda ett rör med mindre radie vilket medför en flackare lutning på kurvan. En flack kurva är att föredra eftersom en "felavläsning" av h_2 medför ett mindre "fel" i uppskattningen av skjuvhållfastheten. Blir radien för liten kommer dock ytspänningsfenomen att störa förloppet.

Ovanstående metod kan användas tillsammans med t ex en Marshkon (vanlig inom petroleumindustrin) för att i fält uppskatta skjuvhållfasthet och viskositet (Lombardi, 1985).

8. Diskussion

Att bestämma en vätskas reologiska samband är nödvändigt för att kunna uppskatta och beräkna ett strömningsförlopp. När vätskan väl kan beskrivas med ett visst samband måste de ingående reologiska parametrarna kvantifieras för att därigenom kunna beräkna relationen mellan tryck och flöde samt inträngningen för en given geometri.

Hookes lag är ett reologiskt samband och E-modulen en reologisk parameter för ett linjärelastiskt material. För att kunna beräkna sambandet mellan kraft och deformation för ett visst material måste det först konstateras om materialet följer Hookes lag. Skall sedan deformationens storlek bestämmas vid en viss belastning måste E-modulen kvantifieras. Det är m a o lika självklart att känna till en vätskas egenskaper vid injektering som att känna till stålets E-modul och sträckgräns vid t ex bultförstärkning av berg.

Den metodik som beskrivs i denna rapport visar sig fungera väl för injekteringsmedel med beaktande av de speciella problem som har tagits upp tidigare. En mycket stor fördel är att mätningsförloppet pågår mer eller mindre kontinuerligt under en lång tidsperiod, vilket möjliggör en bestämning av egenskapernas tidsberoende. Detta innebär att man direkt kan se vid vilken tidpunkt egenskaperna förändras vilket t ex sker vid härdning/gelning.

Denna typ av utrustning behövs även för att se effekten på egenskaperna av olika härdare, koncentrationer, tillsatser etc. Genom att kunna variera egenskaperna på ett kontrollerat sätt kan man "designa" sitt injekteringsmedel för ett visst syfte och målsättning. Exempelvis för att tränga in i mycket små porer (finsand) krävs vattenlika egenskaper (låg viskositet, ingen skjuvhållfasthet) och för

att inte nå alltför långt i en spricka behövs en hög skjuvhållfasthet.

En annan viktig sak är att mätningen är automatiserad vilket minimerar mätfel på grund av den mänskliga faktorn. Trots många fördelar är dock utrustningen mest lämpad för laboratorie bruk och det är därför även önskvärt med en utrustning som är enklare och mer fältmässig. Laboratorie utrustning av denna typ kommer dock alltid att vara nödvändig för att kunna verifiera en mätning med fältutrustning.

Referenser

Bird R.B, Stewart W.E, Lightfoot E.N. Transport Phenomena. Wiley and sons, New York, 1960.

Deere D.U., Lombardi G. Grout slurries - thick or thin ?. Issues in dam grouting, ASCE, New York, N.Y., 156-164. 1985.

Frölander B., Jonsson P-A. Injekteringsmedels strömningsegenskaper, Rotationsviskometri - fysikaliska modellförsök. Examensarbete No. 7:87, Inst. för Jord och Bergmekanik, KTH. Stockholm, 1987.

Houlsby A. C. Cement grouting: water minimizing practices. Issues in dam grouting, ASCE, New York, N.Y., 34-75. 1985.

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

Hässler L. Teoretiska aspekter på berginjektering.Seminarium om dammar, 20-21 november 1986, Inst. för vattenbyggnad, KTH.

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

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, 1987.

Hässler L, Håkansson U. Injektering i modell och verklighet.Stiftelsen bergteknisk forskning, BeFo,Bergmekanikdagen 1989.

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.

Sellgren A. Icke-Newtonsk strömning i bergsprickor - förstudie.Report series A no 126. Vattenteknik, högskolan i Luleå, 1983.

Striebig X. Propriétés rhéologiques de micro-ciments avec différent additifs. Examensarbete No. 1:90, Inst. för Jord och Bergmekanik, KTH. Stockholm, 1990.

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, BRD, 1976.