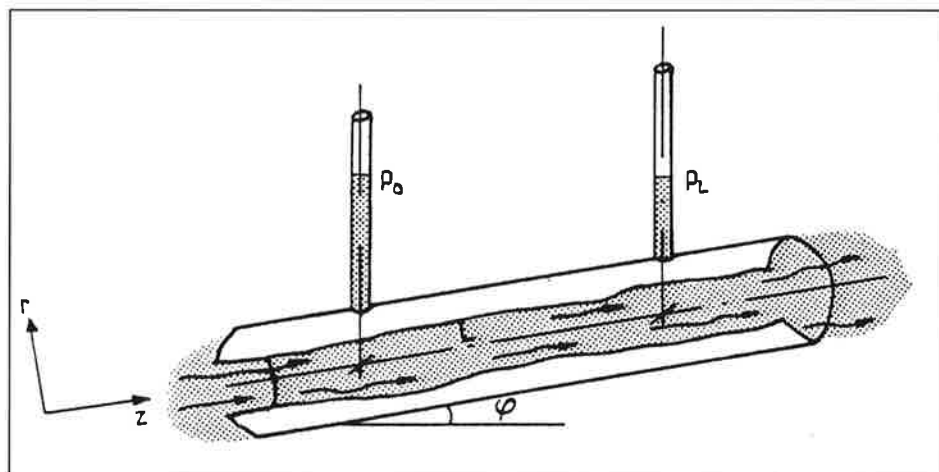




INJEKTERINGSMEDELS STRÖMNINGSEGENSKAPER

Ulf Håkansson

STIFTELSEN SVENSK BERGTEKNISK FORSKNING
SWEDISH ROCK ENGINEERING RESEARCH
SveBeFo Rapport 15

**INJEKTERINGSMEDELS
STRÖMNINGSEGENSKAPER**
Rheology of Fresh Cement-Based Grouts

Ulf Håkansson
Avd för Jord- och Bergmekanik, KTH

Förord

SveBeFo:s forskning inom injekteringstekniken syftar till bättre kunskaper om injekteringsmedels verkan för att täta bergsprickor i tunnlar. Tidigare utvecklade modeller för att matematiskt simulera injekteringens flöde i sprickorna har i föreliggande projekt kompletterats med omfattande undersökningar av olika injekteringsmedels egenskaper. Provningsmetoder för laboratorie- och fältbruk har tagits fram, och typiska egenskaper för några olika medel har provats i ett antal försöksserier. Arbetet har utförts av Ulf Håkansson vid avdelningen för Jord- och bergmekanik, KTH och resulterat i en doktorsavhandling med titeln "Rheology of Fresh Cement-Based Grouts", utgiven av KTH 1993.

Forskningsresultaten har bland annat kommit till användning i samband med passagen av en svår vattenförande zon vid SKB:s berglaboratorium på Äspö, där man hade stora krav på att stoppa inflödet av vatten och samtidigt begränsa injekteringszonens utbredning omkring tunneln. För att få en bredare spridning av projektets resultat har avhandlingen översatts till svenska i en något förkortad version, som härmed föreligger och samtidigt utgör slutredovisning av forskningsprojektet.

Arbetet har följts av en referensgrupp bestående av Ture Nilsson, Stabilator, Per Fjellström, BESAB, Jan Alemo, Vattenfall, Anders Heiner, VBB VIAK, Lars Hässler, Golder Associates, Håkan Stille, KTH och Gunnar Gustafson, CTH samt undertecknad.

Ett fortsättningsprojekt har påbörjats av Thomas Jansson, KTH, som också deltagit i redigeringsarbetet med den svenska rapporten. Den fortsatta forskningen syftar till en vidareutveckling och ytterligare anpassning av framtagna modeller till praktisk användning vid tunneltätning.

Stockholm september 1994

Tomas Franzén

SAMMANFATTNING

Rapporten behandlar bestämningen av cementbaserade injekteringsmedels reologiska (strömnings)egenskaper före hydratisering, dvs då medlet är i ett vätskeliknande tillstånd.

Cementbaserade medel är suspensioner och då de används vid injektering kommer de suspenderade partiklarna att spela en betydande roll för inträngningsförmågan och strömningsegenskaperna. Partiklarnas storlek kommer att utgöra en fysisk begränsning för vilka öppningar som kan penetreras. Partiklarna kommer också att påverka reologin genom att inter-partikulära bindningar leder till icke-Newtonska egenskaper samt en skjuvhållfasthet (flytgräns) i suspensionen. Dessutom kan en separation, pga av en tryckgradient eller sedimentation, mellan den fasta fasen (partiklarna) och vätskefasen (vattnet) leda till en otillräcklig utfyllnad av hålrum och sprickor.

De reologiska egenskaperna hos en vätska bestämmer sambandet mellan tryck och flöde vid olika geometrier, och spelar därför en fundamental roll vid en teoretisk betraktelse och modellering av vätskeströmning.

De olika mätmetoder som har behandlas i detta arbete är :

rotationsviskosimeter (Brookfield Rheoset) som har används tillsammans med koncentrisk cylindrar och med sk vinge.

Marsh-konen, för vilket en teoriutveckling av strömning i koner har gjorts.

Stigröret, som har utvecklats inom detta arbete, för att bestämma flytgränsen hos injekteringsmedel i fält.

För enkelhetens skull och att geometrin på sprickor och porer är relativt okända kan Binghammodellen med fördel användas. Modellen innehåller de fundamentala reologiska egenskaperna, flytgräns och viskositet, och lämpar sig bra för att undersöka effekten av olika faktorer och tillsatser, vid val av injekteringsmedel.

Påverkande faktorer är blandningsprocedur, vattencementtal (vct), cement karakteristik, tid och temperatur. Använda tillsatser är superplastizer, bentonit, silikastoft, natriumsilikat och kalciumklorid.

Mätresultaten tyder på två olika, historieberoende, flytgränsnivåer :

- * en "statisk" flytgräns, efter det att vätskan varit i vila
- * en "dynamisk" flytgräns, efter det att vätskan efter störning uppnått ett fullständigt omrört tillstånd

Fenomenet med de olika nivåerna härrör från vätskans tixotropi, dvs egenskaper förändras med tiden beroende på tidigare skjuvkrafter. Den statiska flytgränsen har en viktig praktisk betydelse eftersom den bestämmer vilket vattentryck som bruket kan motstå efter att ha fyllt ett hålrum. Den dynamiska flytgränsen däremot, påverkar strömningsegenskaperna under större delen av injekteringsförloppet.

Flytgränsen har även den mycket viktiga inverkan att den begränsar inträngningslängden och därigenom storleken på maximal injekteringsvolym. Mätningarna antyder att det är den statiska flytgränsen som har störst inverkan utav de två vad gäller inträngningslängd. Av ovanstående framkommer att det är viktigt att känna till och kunna kvantifiera bägge nivåerna.

Efter antagande att Binghammodellen är giltig kan följande slutsatser dras, med hjälp av rotationsviskosimeter (med koncentrisk cylindrar) :

- * den enskilt viktigaste faktorn vad beträffar reologin hos cementbaserade injekteringsmedel är vattencementtalet (v_{ct}).
- * bland tillsatser erhålls den mest signifikanta förändringen av reologin genom tillsats av superplastizicers. Dock måste poängteras att verkningstiden är begränsad.
- * den dynamiska flytgränsen är i stort sett konstant tills den initiella härdningen börjar då en hastig ökning sker. Storleksordningen för den dynamiska flytgränsen är 0.5 - 25 Pa.
- * viskositeten ökar kontinuerligt från start tills en "platå" nås där den förblir konstant fram till den initiella härdningen. Storleksordningen för den initiella viskositeten är 10 - 250 mPa s.

Nyckelord : Reologi, Cementbaserade injekteringsmedel, Bingham, Flytgräns, Rotationsviskosimeter, Ving metoden, Relaxation metoden, Stigröret, Marsh-kon.

SUMMARY

The present research work concerns the assessment of the rheological behaviour of fresh cement based grouts. The word "fresh" refers to the fluid-like properties, i.e. before the grout turns into a solid state in the course of hydration.

The rheological behaviour of a grout has a significant influence in grouting practice, since it determines the relationship between pressure and flow rate and also the maximum penetration length (and thereby volume) that can be reached.

Due to ease of preparation and use, wide availability and a relatively low cost, cement is today the most commonly used material for grouting. In the cement suspension the particles will have a significant influence on the rheological behaviour of the grout. This is due to interactions between the two phases and between the particles themselves, leading to non-Newtonian behaviour, thixotropy and the existence of a yield stress. In the study three different micro-cements have been used, Cementa Degerhamn (portland), Mikrodur P (portland) and Spinor A (slag).

Different measuring methods have been utilised in the study, comprising :

a rotational viscometer (Brookfield Rheoset). The viscometer has been used together with concentric cylinders and with a vane.

a Marsh-Cone for which a theoretical development also has been made.

a Raise-Pipe, especially developed in this study to estimate the yield stress of grouts insitu.

For simplicity and due to the fact that the geometry of the conduits in grouting is little known, the Bingham model has been chosen to investigate the effect of various factors and additives on the yield stress and plastic viscosity.

Factors of influence are experimental procedure, mixing procedure, water/cement ratio, cement characteristics, time and temperature.

Used additives incorporates superplasticizer, bentonite, silica fume, sodium silicate and calcium chloride.

The main conclusions from the study are :

The rheological behaviour changes with time during the course of hydration.

The measurements show that the rheological behaviour is of a non-linear shear-thinning (i.e. pseudo plastic) type, and that the grouts possess a yield stress.

The measurements verify the existence of two different, history dependent, yield stress levels :

- * a static yield stress, appearing when the grout has been at rest, that must be overcome in order to initiate flow.
- * a dynamic yield stress, lower than the former, appearing when the grout structure by disturbance is in a fully broken down state.

The phenomenon with two different yield stress levels is attributed to the thixotropy of the grouts. Physical model tests suggest that, of the two yield stress levels, it is the static yield stress that gives the greatest impact on the maximum penetration length that can be achieved.

The Bingham model, being the simplest approximation of yield stress fluids, can be used considering the following :

- * in grouting practice the geometry of the void space that is to be grouted is little known. This implies that there is no improvement in applying over-sophisticated rheological models since the geometry is still the decisive factor.
- * the linear regression involved in the Bingham approximation must be made within a relevant range of shear rates, i.e. the shear rates that are expected to appear in the application at hand.
- * the Bingham model will always overestimate the dynamic yield stress (if the real behaviour is yield-pseudoplastic).

Assuming that the Bingham model is appropriate, the following main conclusions from measurements with the viscometer (using concentric cylinders) can be made :

- * the dynamic yield stress remains constant with time until the setting starts. The magnitude is found to be in the range 0.5 - 25 Pa.
- * the plastic viscosity increases continuously from start, levels off and then increases again when the setting starts. The magnitude is found to be in the range 10 - 250 mPa s.

- * the water/cement ratio (i.e. concentration) has a major influence on the rheology.
- * the most important additive is the superplasticizer, which will decrease both the yield stress and the plastic viscosity. However it is very important to note that the effect is time dependent.
- * when grouts are based on micro cement, silica fume should be used to alter the rheology instead of bentonite.
- * the addition of sodium silicate is an effective way of instantaneously increasing the yield stress.

Key words : Rheology, Cement-based grout, Bingham, Yield stress, Rotational viscometer, Shear-vane, Stress-relaxation, Raise-pipe, Marsh-cone.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

FÖRORD	iii
SAMMANFATTNING	iv
SUMMARY	vi
INNEHÅLLSFÖRTECKNING	ix
NOMENKLATUR	xii
1 INLEDNING	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Målsättning	2
2 REOLOGI	4
2.1 Introduktion	4
2.2 Viskositet	4
2.3 Flytgräns	8
2.4 Reologiska modeller	8
2.4.1 Newton modellen	8
2.4.2 Bingham modellen	9
2.4.3 Skenbar viskositet	9
2.5 Tidsberoende egenskaper - tixotropi	10
3 TEORI - VÄTSKESTRÖMNING	11
3.1 Introduktion	11
3.1.1 Kontinuitetsekvationen	11
3.1.2 Rörelseekvationen	12
3.2 Rörströmning	12
3.2.1 Allmänna fallet	14

3.2.2	Newton modellen	14
3.2.3	Bingham modellen	15
3.3	Rotationsviskosimetri	16
3.3.1	Introduktion	16
3.3.2	Newton modellen	17
3.3.3	Bingham modellen	17
4	CEMENT OCH TILLSATSER	18
4.1	Portlandcement	18
4.2	Övriga cementsorter	20
4.2.1	Slaggcement	20
4.2.2	Aluminatcement	20
4.3	Mineral tillsatser	21
4.3.1	Allmänt	21
4.3.2	Naturliga mineraler	21
4.3.3	Masungsslag	22
4.3.4	Flygaska	22
4.3.5	Silikastoft	22
4.4	Acceleratorer och retardatorer	23
4.5	Vattenreducerare/Superplasticizers	23
5	CEMENTSUSPENSIONERS REOLOGI - LITTERATURSTUDIE	25
5.1	Inledning	25
5.1.1	Mätprocedur	26
5.1.2	Blandningsförfarande	28
5.1.3	Vattencementtal	29
5.1.4	Cement karakteristik	32
5.1.5	Tillsatser	33
5.1.6	Ålder	35
5.1.7	Temperatur	35
5.1.8	Vibration	36
6	MÄTMETODER	37
6.1	Rotationsviskosimeter	37
6.1.1	Relaxations metoden	37
6.1.2	Ving metoden	38
6.2	Stigröret	40
6.3	Marsh-kon	42
6.4	Utvärdering av flytgränsen	44
6.4.1	Indirekta metoder	44
6.4.2	Direkta metoder	47
6.4.3	Jämförelse mellan de olika metoderna	49

6.5	Utvärdering av viskositeten	49
6.5.1	Rotationsviskosimeter	50
6.5.2	Marsh-kon	51
6.6	Diskussion	53
7	MÄTRESULTAT	56
7.1	Inledning	56
7.2	Cementsorter och karakteristik	56
7.3	Tillsatser	59
7.4	Mätprocedur	60
7.5	Reologiska egenskaper	60
7.5.1	Referens blandningar	61
7.5.2	Effekt av vattencementtal	61
7.5.3	Effekt av specifik yta	62
7.5.4	Effekt av superplasticizer	62
7.5.5	Effekt av bentonit	62
7.5.6	Effekt av Silikastoft	62
7.5.7	Effekt av Natriumsilikat	62
7.5.8	Effekt av Kalciumklorid	63
7.5.9	Effekt av temperatur	63
8	SLUTSATSER	64
8.1	Allmänt	64
8.2	Viskosimeter mätningar	65

REFERENSER

BILAGA I

NOMENKLATUR

b	kanalöppning	[m]
D	diameter	[m]
g	gravitations accelerationen	[m/s ²]
H	höjd, vinge	[m]
h_b	mätkroppens (cylindern) höjd i viskosimetern	[m]
h_o	höjd i Marsh-konen	[m]
h_1	höjd i Stigröret	[m]
h_2	höjd i Stigröret	[m]
Δh	höjdskillnad i Stigröret	[-]
L	längd	[m]
$L_{\max}$	maximal inträngningslängd	[m]
M	vridmoment	[Nm]
P_0	tryck vid $z = 0$	[Pa]
P_L	tryck vid $z = L$	[Pa]
ΔP	tryckskillnad	[Pa]
Q	flödet	[m ³ /s]
r	radie	[m]
R	rörradie	[m]
R_b	mätkroppens radie för viskosimetern	[m]
R_c	mätkärlsradien för viskosimetern	[m]
R_o	plugg radie	[m]
t	tid	[s]
$\vec{v}$	hastighets vektor	[m/s]
u	hastigheten i x-led	[m/s]
v	hastigheten i y-led	[m/s]
w	hastigheten i z-led	[m/s]
v_z	axiella hastighets komponenten	[m/s]
$\bar{v}_z$	medel axiell hastighet	[m/s]

v_z^N	medel axiell hastighet (Newton modell)	[m/s]
v_z^B	medel axiell hastighet (Bingham modell)	[m/s]
x	rums kordinat	[m]
y	rums kordinat	[m]
z	rums kordinat	[m]
$\dot{\gamma}$	töjningshastigheten	[1/s]
ϵ_0	relativa plugg radien, R_o/R	[-]
η_A	skenbar viskositet	[Pas]
η	viskositet, töjningshastighets beroende	[Pas]
κ	R_c/R_b	[-]
μ	koefficient för viskositet	[Pas]
μ_N	viskositet (Newton modell)	[Pas]
μ_B	plastisk viskositet (Bingham modell)	[Pas]
ρ	densitet	[kg/m ³]
τ	skjuvspänning	[Pa]
τ_{rz}	skjuvspänning	[Pa]
$\tau_{r\theta}$	skjuvspänning	[Pa]
τ_b	skjuvspänning vid mätkroppen (cylindern) för viskosimetern	[Pa]
τ_c	skjuvspänning vid mätkärlet för viskosimetern	[Pa]
τ_o	flytgräns	[Pa]
τ_r	skjuvspänning i ett cirkulärt rör, vid strömning	[Pa]
τ_R	skjuvspänning vid innerytan i ett cirkulärt rör, vid strömning	[Pa]
φ	vinkel	[rad]
Ω	vinkelhastighet	[1/s]

1 INLEDNING

1.1 Bakgrund

Injektering används för att ändra eller förbättra fysikaliska egenskaper, t ex permeabilitet, hållfasthet eller deformationsegenskaper, hos ett materia. Inom det geotekniska området omfattar injektering en rad olika metoder och material för varierande syften. En av de vanligaste metoderna är permeationsinjektering, där injekteringsmedlet med hjälp av övertryck pressas in i sprickor och hålrum hos en geologisk formation. Andra metoder, för andra syften och förhållanden, är t ex uppspräckande injektering (fracture grouting), kompakteringsinjektering (compaction grouting) samt jet-injektering (replacement grouting).

Permeationsinjektering används vanligtvis för att täta eller förstärka ett geologiskt medium såsom jord och berg. Tätning mot ett grundvattenflöde är viktigt i konstruktioner som dammar, tunnlar och bergrum eller i samband med lagring av kärnbränsle. Förstärkning av fundament och andra konstruktioner är nödvändigt då materialet har låg hållfasthet eller då en högre deformationsmodul är önskvärd. Cementbaserade injekteringsmedel är idag det vanligaste materialet vid permeationsinjektering. Detta beror på faktorer såsom användarvänlighet och lättåtkomlighet i kombination med ett relativt lågt pris.

Föreliggande rapport behandlar bestämningen av cementbaserade injekteringsmedels reologiska (strömnings) egenskaper. Rapporten omfattar endast egenskaperna före hydratisering, dvs så medlet är i ett vätskeliknande tillstånd.

Cementbaserade medel är suspensioner och då de används vid permeationsinjektering kommer de suspenderade partiklarna att spela en betydande roll för inträngningsförmågan och strömningsegenskaperna. Partiklarnas storlek kommer att utgöra en fysisk begränsning för vilka öppningar som kan penetreras. Partiklarna kommer också att påverka reologin genom att inter-partikulära bindningar leder till icke-Newtonska egenskaper samt en skjuvhållfasthet (flytgräns) i suspensionen. Dessutom kan en separation, pga av en tryckgradient eller sedimentation, mellan den fasta fasen (partiklarna) och vätskefasen (vattnet) leda till en otillräcklig utfyllnad av hålrum och sprickor.

De reologiska egenskaperna hos en vätska bestämmer sambandet mellan tryck och

flöde vid olika geometrier, och spelar därför en fundamental roll vid en teoretisk betraktelse och modellering av vätskeströmning. Att förstå och kunna kontrollera reologin hos de använda injekteringsmedlen är viktigt för att uppnå ett fullgott resultat vid praktisk tillämpning (t ex val av tryck och för att uppskatta inträngningslängden och därmed volymsåtgången). Genom att mäta de reologiska egenskaperna och känna till hur olika faktorer påverkar (koncentration, tillsatser etc), kan ett medel "skraddarsys" för en speciell applikation och målsättning. Mätningar är också nödvändiga för att optimera blandningen med avseende på de två, sinsemellan motarbetande, mekanismerna stabilitet (separation) och gynnsamma strömningsegenskaper. Det måste dock understrykas att naturens variationsrikedom och geometriska komplexitet, är en faktor som ändå gör injekteringsprocessen ytterst svår att bestämma och förutsäga (Hässler, 1991).

Mycket lite forskning finns utförd och avrapporterad avseende reologiska egenskaper hos cementbaserade injekteringsmedel. Däremot har man inom betongindustrin forskat på cementpasta de senaste tjugo åren (Shaugnessy III and Clark, 1988), (Banfill, 1990). Även om många likheter finns så är dessa blandningar generellt sett mer koncentrerade (dvs har lägre vct) än de blandningar som används vid injektering.

Ett annat område med intresse för cement suspensions reologi är oljeindustrin. För att få en optimal placering av cementslurry runt foderrör under extraordinära förhållanden (höga tryck och höga temperaturer), krävs en detaljerad kunskap om reologin hos de använda medlen (Haimoni & Hannant, 1988), (Kitching, 1989), (Keating & Hannant, 1990), (Kellingray et al, 1990).

Även då det gäller slurry-teknik är det mycket viktigt att känna till reologin hos de suspensioner som skall transporteras för rör- och pump design (Sellgren, 1982), (Nguyen, 1983).

1.2 Målsättning

Målsättningen inom detta arbete har varit följande:

(1) att undersöka (Mikro)cementbaserade injekteringsmedels reologiska egenskaper, (2) att ta fram mättekniker med vars hjälp de reologiska egenskaperna kan bestämmas både i laboratorium och i fält och (3) att visa hur olika faktorer (koncentration, tillsatser etc) påverkar de reologiska egenskaperna.

Rapporten omfattar följande avsnitt:

Kapitel 1 : Introduktion av rapporten.

Kapitel 2 : Beskrivning av konceptet reologi.

- Kapitel 3 : Kortfattat om teorierna för vätskeströmning
- Kapitel 4 : Introduktion till området "cement" och beskrivning av de viktigaste tillsatsmedlen.
- Kapitel 5 : Litteraturstudie av reologin för cement.
- Kapitel 6 : Beskrivning av olika mätmetoder för egenskapsbestämning av injekteringsbruk och utvärdering av mätningarna.
- Kapitel 7 : Resultat av egenskapsmätningar för olika sk referensbruk.
- Kapitel 8 : Slutsatser och förslag till vidare arbete.

2 REOLOGI

2.1 Introduktion

Reologi är "läran om deformation och strömning av materia" och innefattar området från Newtonsk vätskeströmning till Hooke's elasticitet samband. I praktiken behandlar reologi material med deformations- och strömningsbeteende som skiljer sig från enkla vätskor såsom vatten eller idealelastiska kroppar.

Per definition kommer en vätska, till skillnad från en fast kropp, att deformeras kontinuerligt så länge som en yttre kraft (skjuvspänning) verkar på vätskan. För en vätska är det inte själva deformationen som utgör kriteriet för kraftjämvikt utan hastigheten som deformationen sker med, dvs töjningshastigheten. Allmänt gäller att töjningshastigheten, dv/dz , är en funktion av skjuvspänningen, τ , som verkar på vätskan :

$$-\frac{dv}{dz} \equiv \dot{\gamma} = f(\tau) \quad (2.1)$$

2.2 Viskositet

Alla vätskor har ett inre motstånd mot formförändring, men motståndet existerar endast så länge vätskan är i rörelse. Motståndet beror på vätskans viskositet, även benämnd "inre friktion".

Den mest kända vätskemodellen är Newtons viskositetslag, som uttrycks :

$$\tau = \mu \dot{\gamma} \quad (2.2)$$

där proportionalitetskonstanten, μ , är den tidigare nämnda viskositeten.

Vätskor som följer ekvation 2.2 kallas Newtonska och till dessa hör exempelvis vatten.

SI enheten för viskositet är pascal sekund [Pa s].

Vätskor som ej följer detta samband sorterar under samlingsnamnet "icke-Newtonska".

Tabell 2.1 visar storleken på viskositeten för några vanliga Newtonska material vid rumstemperatur och normalt tryck (Barnes et al., 1989).

Tabell 2.1 Viskositet för olika material vid rumstemperatur och tryck (Barnes et al., 1989)

Material	Viskositet [Pa s]
Glas	10^{40}
Smält glas (500 °C)	10^{12}
Bitumen	10^8
Smälta polymerer	10^3
Sirap	10^2
Flytande honung	10^1
Glycerol	10^0
Oliv olja	10^{-1}
Cykel olja	10^{-2}
Vatten	10^{-3}
Luft	10^{-5}

Många vätskor, inklusive cementbaserade injekteringsmedel, är icke-Newtonska, dvs viskositeten är inte konstant utan varierar med töjningshastigheten. Detta kan allmänt uttryckas som :

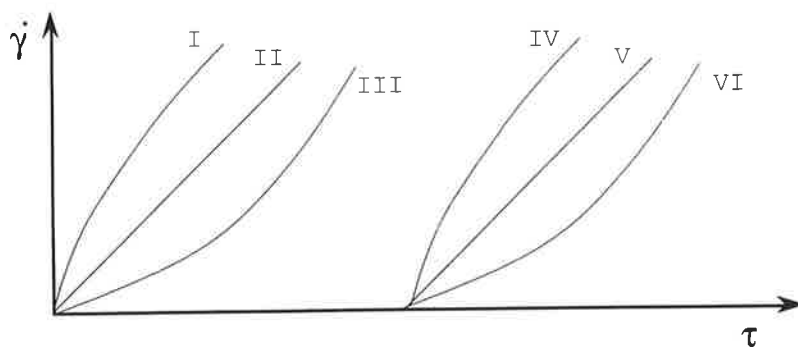
$$\tau = \eta(\dot{\gamma}) \dot{\gamma} \quad (2.3)$$

Där $\eta(\dot{\gamma})$ är den variabla "viskositeten". Vid mätning av en icke-Newtonsk vätska är det viktigt att göra mätningen i samma töjningshastighetsintervall som kommer att gälla vid den praktiska tillämpning av vätskan. Tabell 2.2 visar typiska töjningshastigheter för olika material och situationer.

Tabell 2.2 Typiska töjningshastigheter för olika material och situationer (Barnes et al., 1989)

Situation	Shear rate	Application
Sedimentation of fine powders in a suspending liquid	10^{-6} - 10^{-4}	Medicines, paints
Levelling due to surface tension	10^{-2} - 10^{-1}	Paints, printing inks
Draining under gravity	10^{-1} - 10^1	Painting and coating. Toilet bleaches.
Extruders	10^0 - 10^2	Polymers
Chewing and swallowing	10^1 - 10^2	Foods
Dip coating	10^1 - 10^2	Paints, confectionery
Mixing and stirring	10^1 - 10^3	Manufacturing liquids
Pipe flow	10^0 - 10^3	Pumping. Blood flow
Spraying and brushing	10^3 - 10^4	Spray-drying, painting, fuel atomisation
Rubbing	10^4 - 10^5	Application of creams and lotions to the skin
Milling pigments in fluid bases	10^3 - 10^5	Paints, printing inks
High speed coating	10^5 - 10^6	Paper
Lubrication	10^3 - 10^7	Gasoline engines

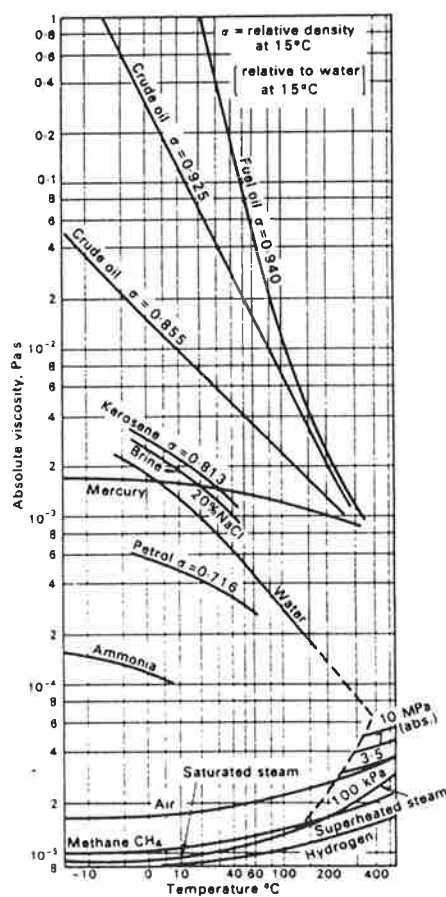
Om η minskar med ökad töjningshastighet kallas vätskan pseudoplatisk och om η ökar kallas den dilatant, se figur 2.1 (I,III).



Figur 2.1 Exempel på olika reologiskt beteende

I:	Dilatant	II:	Newtonian
III:	Pseudoplastic	IV:	Yield dilatant
V:	Bingham	VI:	Yield pseudoplastic

Viskositeten är temperaturberoende, och en ökning av temperaturen innebär i allmänhet en minskning av viskositeten, se figur 2.2.



Figur 2.2 Viskositetens temperaturberoende för olika vätskor (Massey, 1979)

Som en konsekvens av temperaturberoendet måste vätskors egenskaper mätas vid samma temperatur som vätskan skall används i. Det gäller att vara uppmärksam på faktorer som kan medföra en temperaturförändring, såsom blandningsutrustning, yttre temperatur, mätinstrument m m.

2.3 Flytgräns

Attraktionskrafter mellan partiklarna i en suspension medför att vätskan erhåller en skjuvhållfasthet som måste överskridas innan vätskan strömmar. Denna skjuvhållfasthet brukar även kallas flytgräns. Flytgränsen kan anses som den materialegenskap som definierar övergången från ett "fast" medium till en vätska (Keating och Hannant, 1989). En reologisk modell som tar hänsyn till flytgränsen är Bingham modellen (se figur 2.1).

Många suspensioner har inte endast ett flytgränsvärde, utan oftast en "statisk" flytgräns vid töjnings-hastigheten noll (dvs vid vila) och en "dynamisk" flytgräns (lägre än den statiska) efter omrörning av suspensionen (Haimoni och Hannant, 1988), (Keating och Hannant, 1989), (Keating och Hannant, 1990).

2.4 Reologiska modeller

Olika reologiska modeller används för att beskriva förhållandet mellan skjuvspänning och töjningshastighet. Två av de mest använda modellerna (Newton och Bingham) inom suspensionsreologi beskrivs här kortfattat. För flera modellbeskrivningar se Håkansson, (1993).

2.4.1 Newton modellen

Den Newtonska modellen kännetecknas av en konstant viskositet, μ_N , som är oberoende av töjningshastigheten :

$$\tau = \mu_N \dot{\gamma} \quad (2.4)$$

Newtonskt beteende är endast gällande för mycket utspädda suspensioner (Barnes et al., 1989) med isometrisk, bindningssvaga, partiklar suspenderade i en Newtonsk vätska (tex vatten). Partiklarna innebär en ökad viskositet hos blandningen i förhållande till det suspenderade mediet. Vid en ökad volymkoncentration av fasta partiklar, ökar viskositeten tills bindningar mellan partiklarna orsakar ett icke-Newtonskt beteende (Nguyen, 1983).

2.4.2 Bingham modellen

Bingham (1922) föreslog följande empiriska ekvation för en vätska, med en flytgräns :

$$\tau = \tau_o + \mu_B \dot{\gamma} \quad (2.5)$$

μ_B står för plastisk viskositet (konstant).

Vätskan (suspensionen) förutsätter en skjuvspänning som överstiger flytgränsen innan någon strömning kan ske. Binghammodellen anger ett linjärt förhållande mellan skjuvspänningen och töjningshastigheten när flytgränsen, τ_o , har överskridits. Binghammodellen representerar ett idealfall där en momentan nedbrytning sker när flytgränsen har överskridits. I de flesta suspensioner sker normalt nedbrytningen gradvis och endast vid mycket höga skjuvspänningar kan en fullständig splittring av strukturen ske (Nguyen, 1983).

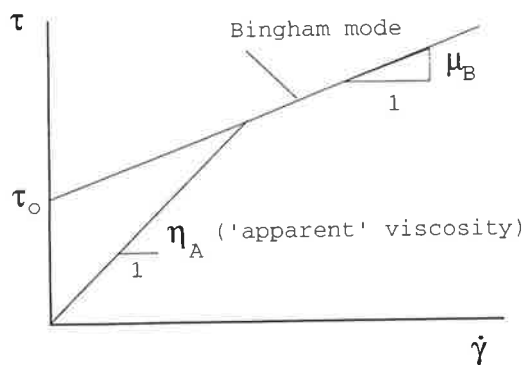
2.4.3 Skenbar viskositet

Tyvärr är den "skenbara" viskositeten den enda parameter som redovisas i många rapporter. Den "skenbara" viskositeten utgör en kombination av de riktiga reologiska parametrarna och kan därför endast användas för en kvalitativ jämförelse. Som exempel kan den "skenbara" viskositeten för en Binghamvätska uttryckas som (se även figur 2.3)

$$\eta_A = \mu_B + \frac{\tau_o}{\dot{\gamma}} \quad (2.6)$$

Det är uppenbart att om en Binghamvätska har en högre "skenbar" viskositet än en annan så kan detta bero på att den har en högre viskositet eller en högre flytgräns, se ekvation (2.6).

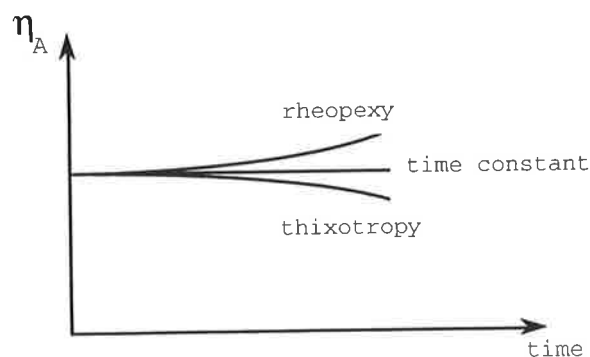
Den "skenbara" viskositeten kan inte användas för teoretisk betraktelse om inte en av parametrarna och töjningshastigheten (vid vilken mätningen gjordes) är känd, se figur 2.3.



Figur 2.3 Bingham modellen tillsammans med den "skenbara" viskositeten

2.5 Tidsberoende egenskaper - tixotropi

Många partikelsuspensioner är tixotropa dvs egenskaperna förändras med tiden beroende på vilka skjuvkrafter som vätskan har varit utsatt för tidigare och hur länge dessa krafter har verkat. När en mätning sker med konstant töjningshastighet minskar den skenbara viskositeten med tiden för ett tixotropt material (tex målarfärg). Om istället viskositeten ökar kallas detta för anti-tixotropi eller reopexi, se figur 2.4.

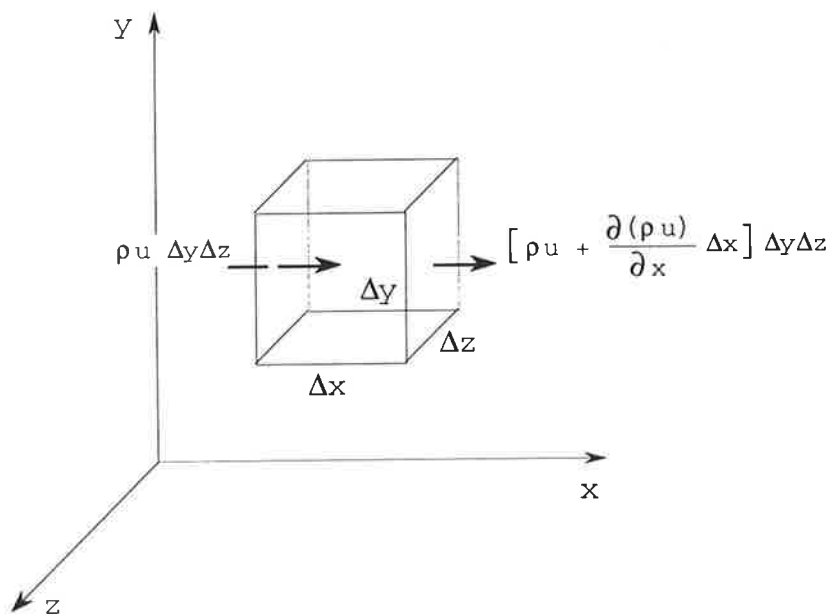


Figur 2.4 Tixotropi och reopexi

3 TEORI - VÄTSKESTRÖMNING

3.1 Introduktion

Två grundläggande samband förekommer inom strömningsmekaniken, kontinuitetsekvationen (principen om oförändrad massa) och rörelseekvationen. Dessa ekvationer kan erhållas (Bird et al., 1960) genom att studera en kontrollvolym, $\Delta x \Delta y \Delta z$, i vilket vätskan strömmar, se figur 3.1.



Figur 3.1 Flöde i x-led genom en kontroll volym

3.1.1 Kontinuitetsekvationen

Genom att ställa upp en massbalans för flödet genom kontrollvolymen, dvs :

$$[\text{ackumulerad massa}] = [\text{massa in}] - [\text{massa ut}]$$

erhålls efter utveckling och antagande om inkompressibilitet slutligen följande samband (Bird et al., 1960):

$$\frac{D\rho}{Dt} = -\rho \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) = 0 \quad (3.1)$$

3.1.2 Rörelseekvationen

Rörelseekvationen erhålls med hjälp av en jämvikts betraktelse för rörelsemängden i kontrollvolymen, enligt följande :

[netto rörelsemängd] = [rörelsemängd in] - [rörelsemängd ut] + [krafter som verkar på kontrollvolymen]

Efter utveckling och förenkling fås följande samband (Bird et al., 1960):

$$\rho \frac{D\vec{v}}{Dt} = -\nabla p - [\nabla \cdot \tau] + \rho g \quad (3.2)$$

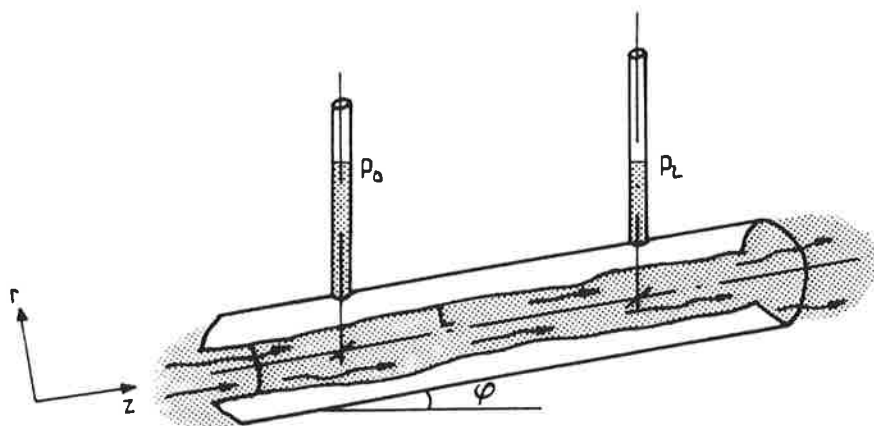
Ekvationens vänster led anger massans acceleration per volymenhet. Den första termen på höger sida är "tryckkraften", den andra termen "viskositetskraften" och den tredje "gravitationskraften", samtliga per volymenhet. Uttrycket utgör basen för den välkända Navier-Stokes ekvation.

3.2 Rörströmning

Nedan redovisas de slutliga och viktiga sambanden och ekvationerna för rörströmning. För en mer utförlig presentation hänvisas till Håkansson (1993).

Betrakta strömning i ett långt cirkulärt rör, se figur 3.2, och gör följande antagande :

- 1 inkompressibel vätska
- 2 laminär strömning
- 3 stationära förhållande
- 4 flöde endast i z-led
- 5 "no-slip" vid fasta begränsningsytor



Figur 3.2 Strömning i ett cirkulärt rör

Utnyttjande av ekvation (3.1), förenkling av ekvation (3.2) samt ovanstående antaganden för det cirkulära röret, medför att följande uttryck erhålls för medlets spänningsfördelningen längs röret (Håkansson, 1993):

$$\tau_{rz} = \left(\frac{\Delta P}{L} \right) \frac{r}{2} \quad (3.3)$$

där $\Delta P = \left((P_o - P_L) - \rho g L \sin \phi \right)$, se figur 3.2.

Sambandet är allmänt och gäller för ett cirkulärt rör oavsett reologi hos vätskan, dvs spänningsfördelningen är oberoende av materialegenskaperna. Ur uttrycket (3.3) fås att skjuvspänningen vid rörväggen ($r=R$) är :

$$\tau_R = \left(\frac{\Delta P}{L} \right) \frac{R}{2} \quad (3.4)$$

3.2.1 Allmänna fallet

Ett allmänt samband för flödet, Q , som funktion av den reologiska modellen $\dot{\gamma} = f(\tau)$ fås enligt (Håkansson, 1993) :

$$Q = \frac{\pi R^3}{\tau_R^3} \int_0^{\tau_R} \tau^2 \dot{\gamma} d\tau \quad (3.5)$$

där τ_R är skjuvspänningen vid rörväggen, τ skjuvspänningen och $\dot{\gamma} = f(\tau)$ är den reologiska modellen.

3.2.2 Newton modellen

För att kunna beskriva flödet av en Newtonsk vätska, insättes först ekvation (2.4) i ekvation (3.5), vilket tillsammans med ekvation (3.4) ger följande :

$$Q = \frac{\pi R^3}{\tau_R^3} \int_0^{\tau_R} \tau^2 \frac{\tau}{\mu} d\tau = \frac{\pi \Delta P R^4}{8\mu L} \quad (3.6)$$

Uttrycket är även känt som Hagen-Poiseuille's ekvation.

Medelhastigheten fås genom att dividera ovanstående med tvärsnittsarean vilket leder till :

$$\bar{v}_z^N = \frac{\Delta P R^2}{8\mu L} \quad (3.7)$$

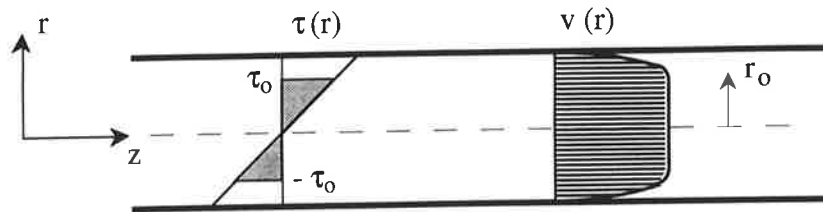
Motsvarande uttryck för en rektangulär kanal, med öppningen b , blir (Bird et al., 1960) :

$$\bar{v}_x^N = \frac{\Delta P b^2}{12\mu L} \quad (3.8)$$

Vilket även är känt som Hele-Shaw strömning.

3.2.3 Bingham modellen

För en vätska med en flytgräns finns det alltid en stel plugg i mitten av röret. Så länge flytgränsen inte överskrids är töjningshastigheten i pluggen noll. När skjuvspänningen vid rörväggen minskar (vilket sker under inträngning i röret) växer pluggen och når så småningom ut till rörväggen, se figur 3.3. När pluggen har nått rörväggen upphör strömningen (Wallner, 1976), (Lombardi, 1985), (Håkansson, 1991), (Hässler, 1991), (Stille et al, 1993), dvs skjuvspänningen utmed väggen är lika med flytgränsen.



Figur 3.3 Hastighetsprofilen för en Bingham vätska i ett cirkulärt rör

Pluggradien kan uttryckas med hjälp av ekvation (3.3) som :

$$R_o = \frac{2\tau_o L}{\Delta P} \quad (3.9:a)$$

Vilket även innebär att maximal inträngningslängd erhålls genom :

$$L_{\max} = \frac{\Delta P R}{2 \tau_o} \quad (3.9:b)$$

Bingham modellen uttrycks, se ekvation 2.5 :

$$\dot{\gamma} = \frac{1}{\mu_B} (\tau - \tau_o) \quad , \tau > \tau_o \quad (3.10:a)$$

$$\dot{\gamma} = 0 \quad , \tau < \tau_o \quad (3.10:b)$$

Strömningens medelhastigheten kan uttryckas med hjälp av Binghammodellen insatt i ekvation (3.5) och observera att den undre gränsen i integralen skall vara τ_o . Detta ger följande samband :

$$\bar{v}_z^B = \frac{\Delta P R^2}{8\mu_B L} \left[1 - \frac{4}{3}\epsilon_o + \frac{1}{3}\epsilon_o^4 \right] \quad (3.11)$$

där den relativa pluggradien, ϵ_o , defineras som :

$$\varepsilon_o = \frac{R_o}{R} = \frac{2\tau_o L}{R\Delta P} = \frac{\tau_o}{\tau_R} \quad (3.12)$$

Ekvation (3.11) är känt som Buckingham-Reiners ekvation.

3.3 Rotationsviskosimetri

3.3.1 Introduktion

Nedan redovisas de slutliga och viktigaste sambanden och ekvationerna för rotationsviskosimetri. För en mer utförlig teoretisk presentation hänvisas till tidigare rapporter (Håkansson et al., 1991), (Hässler, 1991) samt Håkansson (1993).

Följande antagande görs vid mätning med viskosimeter, bestående av en inre roterande mätcylinder, med radien R_b , i ett mätkärl med radien R_c :

- 1 inkompressibel vätska
- 2 laminär strömning
- 3 ingen radiell respektive axiell strömningshastighet
- 4 stationära förhållande
- 5 "no-slip" vid begränsningsytorna
- 6 effekter av mätcylinderns ändtor försummas

Följande allmänna uttryck är giltigt för vinkelhastigheten, Ω , på mätcylindern :

$$\Omega = \int_{\tau_c}^{\tau_b} \gamma \frac{\partial \tau}{2\tau} \quad (3.13)$$

Vridmomentet, M , som erfordras för att rotera cylindern med en konstant vinkelhastighet, Ω , kan allmänt uttryckas som :

$$M = \tau_{r\theta} 2\pi r^2 h_b \quad (3.14)$$

Stationära förhållanden inträffar när vridmomentet är konstant vilket innebär att relationen mellan skjuvspänningen och radie kan uttryckas :

$$\frac{\tau_b}{\tau_c} = \frac{R_c^2}{R_b^2} = \kappa^2 \quad (3.15)$$

där R_b är den roterande cylinderns radie och R_c kärlets radie.

3.3.2 Newton modellen

Insättning av Newton modellen i ekvation (3.13) tillsammans med ekvation (3.14) ger slutligen följande samband :

$$\Omega = \frac{M}{4\pi h_b \mu_N} \left(\frac{1}{R_b^2} - \frac{1}{R_c^2} \right) \quad (3.16)$$

vilket är känt som Margules ekvation.

3.3.3 Bingham modellen

Insättning av Binghammodellen i ekvation (3.13) tillsammans med ekvation (3.14) och (3.15) ger slutligen följande samband :

$$\Omega = \frac{M}{4\pi h_b \mu_B} \left(\frac{1}{R_b^2} - \frac{1}{R_c^2} \right) + \frac{\tau_o}{\mu_B} \ln \kappa^{-1} \quad (3.17)$$

vilket är känt som Reiner-Riwlin's ekvation.

4 CEMENT OCH TILLSATSER

4.1 Portlandcement

Den vanligaste cementsorten är Portlandcement. Namnet härstammar från likheter med en bergart från Portland halvön. Dess viktigaste beståndsdelar är oxider av Kalcium (CaO), Kisel (SiO_2), Järn (Fe_2O_3) och Aluminium (Al_2O_3). Råmaterialet utgörs av jord- och bergarter som genom upphettning bildar de eftersökta oxiderna.

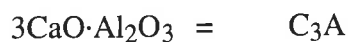
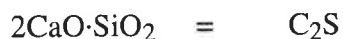
Typiska värden på oxidinnehåll i Portlandcement visas i tabell 4.1, Tattersall & Banfill (1983).

Tabell 4.1 Oxidinhåll för Portland cement (%)

Oxid	Ordinär	Långsamt härdande	Sulfat resistent	Låg alkalisk
Kalcium, CaO	63	62	62	64
Kisel, SiO_2	20	23	24	19
Aluminium, Al_2O_3	6	5	2	6
Järn, Fe_2O_3	3	4	3	4
Natrium, Na_2O	0.4	0.5	0.4	0.1
Kalium, K_2O	0.9	0.8	0.7	0.5
Magnesium, MgO	1.5	1.2	2.3	2.7
Svavel, SO_3	2.3	2.4	2.3	2.5
Other	2.9	1.1	3.3	3.7

De huvudsakliga klinkerkomponenterna i Portlandcement utgörs av trikalسيوم silikat ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$), dikalcium silikat ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$), trikalسيوم aluminat ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$) samt ett aluminat med sammansättning $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$.

Inom den cementkemiska nomenklaturen förkortas komponenterna vanligen :



De olika komponenterna kan approximativt beräknas utifrån oxidinnehållet med följande samband (ASTM C-150) :

$$\text{C}_3\text{S} = 4,071 \cdot \text{CaO} - (7,6 \cdot \text{SiO}_2 + 6,718 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 + 1,43 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 + 2,852 \cdot \text{SO}_3)$$

$$\text{C}_2\text{S} = 2,867 \cdot \text{SiO}_2 - 0,7544 \cdot \text{C}_3\text{S}$$

$$\text{C}_3\text{A} = 2,65 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 - 1,692 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$$

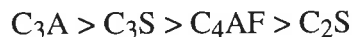
$$\text{C}_4\text{AF} = 3,043 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$$

Enligt ASTM C-150 klassas Portlandcement in i fem huvudtyper (Typ I-V), se tabell 4.2.

Tabell 4.2 ASTM C-150 klassificering av Portlandcement

Typ	ASTM Beskrivning	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
I	Standard	42-67	8-31	5-14	6-12
II	Måttlig sulfat-resistens och värmeutveckling	37-55	19-39	4-8	6-16
III	Snabb härdande	34-70	0-38	7-17	6-10
IV	Långsamt härdande	21-44	34-57	3-7	6-18
V	Sulfat resistent	35-54	23-49	1-5	6-15

Samtliga komponenter reagerar med vatten, men reaktions hastigheten avtar enligt:



Trikalcium aluminat (C_3A) - reagerar hastigt med vatten och har därför en betydande inverkan på den "unga" cementens egenskaper. Hydratationen av C_3A kontrolleras genom tillsats av gips ($CaSO_4$) vilket medför att en omedelbar härdning hindras. Mängden (C_3A) bör hållas på en låg nivå och för sulfatresistent cement skall den ej överstiga 5 % (se tabell 4.2).

Trikalcium silikat (C_3S) - är i huvudsak ansvarig för den tidiga hållfasthetsutvecklingen (hos den fasta fasen). Den har även en betydelse för begynnelsen av hydratationen.

Aluminat (C_4AF) - antas uppträda på samma sätt som (C_3A) men i långsammare takt.

Dikalcium silikat (C_2S) - är mycket mindre reaktivt än (C_3S) och reaktionen är mycket långsam (upp till veckor innan en betydande del av hydratationen har ägt rum).

4.2 Övriga cementsorter

4.2.1 Slaggcement

Slaggcement är en blandning av Portlandcement, masugnsslagg och gips. En typisk sammansättning av de vanligaste oxiderna är :

CaO :	30-45 %
SiO_2 :	~20 %
Al_2O_3 :	8-18 %

Reaktionshastigheten hos slaggcement är vanligtvis långsammare än hos vanlig Portlandcement, trots att förloppet är detsamma. Slaggcement är mer känslig för låga temperaturer som medför en försenad hydratation. Eftersom den innehåller mindre mängd kalciumhydroxid ($Ca(OH)_2$) är den allmänna uppfattningen att slaggcement är mindre påverkad av kemiska angrepp än vanlig Portlandcement.

4.2.2 Aluminatcement

Aluminatcement tillverkas av Bauxit och utvald kalksten. En typisk sammansättning av de vanligaste oxiderna är:

CaO:	35-44 %
SiO ₂ :	3-11 %
Al ₂ O ₃ :	35-44 %
Fe ₂ O ₃ :	4-12 %
FeO:	0-10 %

Hydratationen av aluminatcement sker mycket snabbare än vanlig Portlandcement och sluthållfastheten nås redan efter ca 24 timmar. Eftersom aluminat cement saknar kalciumhydroxid ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) är den mindre känslig för kemiska angrepp. En blandning av aluminatcement och Portlandcement (kalciumhydroxid) har en mycket kort härdningstid, vilket kan vara av betydelse vid vissa applikationer. Dock blir sluthållfastheten lägre än var komponent för sig.

4.3 Mineraltillsatser

4.3.1 Allmänt

Mineraltillsatser är finfördelat material vilket blandas i Portlandcement i relativt stora mängder, vanligtvis i storleksordningen 20% till 100% av cementvikten. Materialet är antingen naturliga eller industriella biprodukter (masugnsslagg, flygaska, silika stoft etc). Vissa mineral tillsatser är pozzolana.

När en pozzolan används tillsammans med Portlandcement, utgör cementen källan till den kalciumhydroxid som reagerar med aluminiumsilikatet och tillsammans bildar en hållfast slutprodukt. Vissa industriella biprodukter innehåller tillräckligt mycket kalcium för att bilda en cementliknande produkt utan inblandning av vanlig cement.

Tekniska fördelar med användandet av mineraltillsatser innefattar : lägre permeabilitet, bättre kemisk beständighet, bättre motstånd mot bildandet av värmesprickor samt en högre sluthållfasthet.

4.3.2 Naturliga mineraler

De flesta naturliga pozzolaner har sitt ursprung i vulkaniska bergarter och mineral. Vissa behöver ett högt energi tillskott för att vara användbara och har därför blivit oekonomiska jämfört med de industriella biprodukterna.

4.3.3 Masugnsslagg

Masugnsslagg är en biprodukt från framställningen av tackjärn. Materialet är nära besläktat med Portlandcement men med ett lägre kalcium innehåll och utan järnoxid. Det icke-processade materialet är av sandstorlek och måste därför malas till en partikelstorlek av ca 45 μm (400-600 m^2/kg Blaine), innan det kan användas som tillsats. Slaggen i sig reagerar mycket långsamt med vatten men i närvaro av kalciumhydroxid sker reaktionen som för Portlandcement, dock långsammare. På grund av det långsammare reaktionsförloppet måste materialet malas till finare partiklar än Portlandcement, vilket påskyndar reaktionen. Partiklarna har en rå yta.

Slaggcement är en finmald blandning mellan Portlandcement och masugnsslagg tillsammans med en viss mängd gips.

4.3.4 Flygaska

Flygaska är en biprodukt från eldning i moderna kolkraftverk. Vid de höga temperaturer som ingår i processen kommer föroreningar i kolet i form av lera, kvarts och fältspat, att förgasas. Det förgasade materialet (flygaska) separeras sedan från gasen i en elektrostatisk process.

Flygaska kan indelas i två kategorier, kalcium fattig flygaska (< 5% CaO) och kalcium rik flygaska (15-35% CaO). I båda typer är ca 15-35% av partiklarna större än 45 μm (vanligen 200-300 m^2/kg Blaine). De flesta partiklar är sfäriska med en medel diameter på 20 μm . Den kalciumrika flygaskan är mest reaktiv av de två.

Mineralogiskt sett är det stora likheter mellan flygaska och masugnsslagg. Den stora skillnaden är partiklarnas storlek och form. Flygaskans partiklar är sfäriska med en jämn yta emedan slaggen har en rå kantig yta.

4.3.5 Silikastoft

Silikastoft är en biprodukt från framställning av silikon och silikonlegeringar. I processen från kvarts till silikon bildas SiO-gas vilken transporteras till lägre temperatur och genom kondensering bildar icke kristalin silika. Materialet som är extremt finfördelat filtreras sedan ut från gasen. Silikastoft är högreaktivt beroende på de små partiklarna vilka har en mycket hög specifik yta (20-23 000 m^2/kg).

I likhet med flygaska är partiklarna sfäriska med en medel diameter på endast 0,1 μm (d_{50}).

Silikastoft används vid framställning av höghållfasthets betong och då låg permeabilitet (t ex vattentät betong och vid kärnavfallshantering) är av stor vikt (Onofrei et al., 1989, 1992).

4.4 Acceleratorer och retardatorer

Den vanligaste acceleratoren inom betong industrin är kalciumklorid, CaCl_2 . Saltet används på grund av dess lättillgänglighet, låga pris, förutsägbara uppträdande och framgångsrika användande sedan årtionden. Kalciumklorid har dock nackdelar i form av att tillsatsen medför en krympning av betongen samt att höga doser har en korrosiv inverkan på armeringsjärnen. Det skall även nämnas att små mängder har en motsatt effekt, dvs fungerar som en retarder. Den optimala mängden är ett kontroversiellt ämne men anges att vara i storleksordningen 1-4 % av cementvikten. Beroende på korrosionsrisken tillåts oftast endast 1% inom betongindustrin.

Tillsats av kalciumklorid har bäst effekt tillsammans med Portlandcement och vid låga temperaturer fås en dålig accelererande effekt tillsammans med slaggcement. Kalciumklorid bör dessutom ej användas tillsammans med aluminatcement.

Generellt för acceleratorer gäller att, emedan härdningsförloppet påskyndas, så erhålls vanligtvis en lägre sluthållfasthet.

Retardatorer används då ett långsamt härdningsförlopp eftersträvas. Många vattenreducerande medel (plastizicers) har en retarderande effekt men även organiska ämnen såsom socker och oorganiska ämnen som olika fosfater.

4.5 Vattenreducerare/Superplasticizers

Vattenreducerande tillsatsmedel används för att erhålla en lättbearbetad cementpasta trots användandet av (mycket) låga vattencementtal. Alltsedan tidigt 1940-tal har lignosulfonater utgjort basen för vattenreducerande tillsatsmedel. I början på 1960-talet ledde sedermera forskning i Japan och Tyskland fram till vad som idag benämns som superplasticizers (dvs kraftigt vattenreducerande tillsatsmedel). I Japan gjorde Hattori och medarbetare (1979) ett pionjärarbete vid framtagandet av ett naftalen-baserat medel med huvudsyftet att erhålla en höghållfast betong. I Tyskland däremot utvecklades ett melamin-baserat medel för att skapa en pumpbar betong (Aignesberger et al., 1981)

Superplasticizers kan klassificeras i följande fyra klasser (Malhotra, 1989) :

- 1) Melamin-baserade (SMF)
- 2) Naftalen-baserade (SNF)

- 3) Modifierade lignosulfonater
- 4) Övriga superplasticizers (t ex ester-baserade)

Det är allmänt accepterat (Malhotra, 1989) att den främsta orsaken till medlens verkan är att de adsorberas på ytan av cementpartiklarna och skapar där en elektrostatisk repulsion mellan dessa. Repulsionen medför en separation av cementpartiklarna vilket har en drastisk effekt på den skenbara viskositeten hos blandningen. En annan effekt är att plastizicers minskar ytspänningen samt smörjer partikelytorna.

Härdningstiden förlängs något vid användandet av plastizicers, särskilt lignosulfonat. Naftalenbaserade medel är svagt retarderande medan melaminbaserade medel knappt påverkar härdningstiden.

Plastizicers har en begränsad tid som de är "aktiva" på grund av metalljoner som bildas vid hydratiseringen. Jonerna neutraliserar den negativa laddningen på partiklarna vilket innebär att repulsionen upphör. Den aktiva tidsperioden är ganska kort, i storleksordningen 30-60 minuter. Tiden kan dock förlängas genom upprepad tillsättning eller genom att använda vissa typer med längre verkningstid.

5 CEMENTSUSPENSIONERS REOLOGI - LITTERATURSTUDIE

5.1 Inledning

Mycket lite forskning har utförts beträffande cementsuspensioners reologi. Däremot har cementpasta (en tjock suspension) erhållit en betydande uppmärksamhet de senaste två decennierna (Banfill, 1990). Även om koncentrationen hos pastan är högre än i ett injekteringsbruk kan det förväntas många likheter mellan dem.

Allmänt sett är suspensionsreologi mycket komplex (Nguyen, 1985), vilket beror på ett fysikaliskt och kemist samspel mellan partiklarna och vätskefasen. Koncentrationen, partikelkaraktäristiken samt vätskefasens egenskaper har en betydande inverkan (Nguyen, 1983). När koncentrationen ökar kommer samverkan mellan partiklarna att medföra att suspensionen blir icke-Newtonska, tixotrop samt erhåller en flytgräns.

Cementpasta (eller injekteringsbruk) är inte bara en suspension, det kan även förväntas att de reologiska egenskaperna påverkas av de kemiska reaktioner som äger rum under hydratiseringen av cementen. Utan tvekan kommer hydratiseringen att medföra ett tidsberoende när blandningen går från en vätskefas till fast fas.

Sammanfattningsvis innebär ovanstående att cementreologi är svårt att entydigt bestämma och reproducera (Shaugnessy III and Clark, 1988).

Reologiska mätningar görs med olika typer av viskosimetrar med syfte att erhålla strömningsdata utifrån vilka det reologiska beteendet kan bestämmas.

Cementsuspensioners reologi påverkas av en rad olika faktorer. Vom Berg (1979), Tattersall and Banfill (1983) och Lapasin et al. (1983) har summerat de viktigaste påverkande faktorerna att vara :

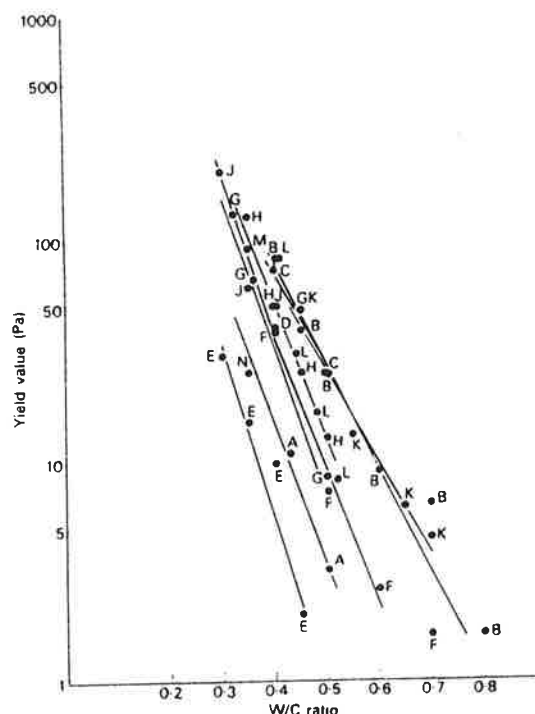
- * mätprocedur
- * blandningsförfarande (tid och intensitet)
- * vattencementtal (vct)

- * cement karakteristik (kemisk komposition, specifik yta, partikel storleksfördelning, partikel form)
- * tillsatser
- * ålder (dvs. tidsberoende pga hydratisering)
- * temperatur
- * vibration

5.1.1 Mätprocedur

När forskningsresultat, beträffande reologin hos cementsuspensioner, redovisas är det av yttersta vikt att mätproceduren beskrivs i detalj. Tattersall och Banfill (1983) menar att mycket av skillnaderna i resultat från olika forskare beror på bristande information vilket gör det omöjligt att göra jämförelser.

Ett stort problem vid mätningarna är den bristande reproducerbarheten. En sammanställning av resultat från 13 forskare (se figur 5.1:a och 5.1:b) visade att flytgränsen hade en spridning med en faktor 20 och viskositeten en faktor 50, vid samma vattencementtal (Tattersall and Banfill, 1983).

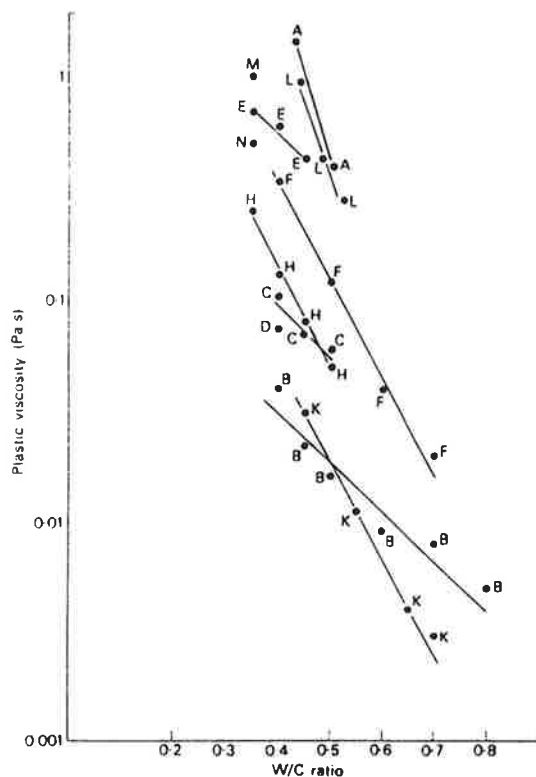


Figur 5.1:a Effekten av vct på flytgränsen

Banfill (1990) anser att spridningen beror på variationer i mättekniken eftersom cementsorterna är tämligen lika och endast kan medföra en variation av de reologiska egenskaperna med en faktor av 2-3.

Andra experimentella problem orsakas av glidning vid fasta begränsningsytor och separation pga sedimentation eller yttre krafter (t ex centrifugal kraft).

Glidning vid väggarna på en viskosimeter är ett vanligt fenomen vid mätning av suspensioner då en jämn yta föreligger. Mannheimer (1983) anser att glidning kan innebära att flytgränsen och viskositeten underskattas ner till endast ca 15% av deras rätta värden, vid mätning i rotationsviskosimeter med koncentrisk cylindrar. Haimoni & Hannant (1988) menar att den uppmätta flytgränsen kan utgöra endast 50% av dess rätta värde. Många forskare skapar en rå yta på mätutrustningen för att undvika glidning och Banfill & Kitching (1990) har visat att en rå yta verkligen har en effekt, men att det är svårt att säga till vilken grad.



Figur 5.1:b Effekt av vct på viskositeten

När blandningar med låg koncentration (dvs höga vct) används kan sedimentation leda till att det uppstår en koncentrationsgradient i mätkärl. Även gradienter pga centrifugal kraft kan uppstå i rotationsviskosimetrar (Banfill, 1990). Bhatti & Banfill (1982) visade att ett vct på 0.4 och lägre, måste användas för att hålla mätfele inom 10%. Detta gäller dock vanlig cement, och högre vct kan tillåtas vid användning av Mikrocement vilka har en högre specifik yta och därmed är mer stabila.

5.1.2 Blandningsförfarande

Roy & Asaga (1979) and Banfill (1981) bekräftar att en kraftig omrörning under en längre tid reducerar både flytgräns och viskositet till konstanta värden. Vid jämvikt är antingen partiklarna helt dispergerade eller så råder det likhet mellan de nedbrytande krafterna och uppbyggande under hydratiseringen (Bhatti och Banfill, 1984). Roy & Asaga (1979) har även funnit att blandningsproceduren har större effekt på flytgränsen än på viskositeten.

Det arbete som sker under blandning kan kvantifieras utifrån moment och deformationshastighet, med en enskild parameter, den specifika skjuvenergin (Orban et al, 1986). Författarna har även funnit att en höghastighetsblandare för labbrationsbruk

ger upp till 10 gånger högre energi än motsvarande fullskaleblandare.

5.1.3 Vattencementtal

Vattencementtalet är den viktigaste faktorn beträffande reologin hos cementbaserade injekteringsmedel (Littlejohn, 1982). Mängden vatten i suspensionen avgör sedimentation, strömningsegenskaper, beständighet och hållfasthet på det härdade materialet.

Det är allmänt accepterat att både flytgräns och viskositet är exponentiella funktioner av vattencementtalet (Littlejohn, 1982), (Tattersall and Banfill, 1983), (Ziming et al, 1990).

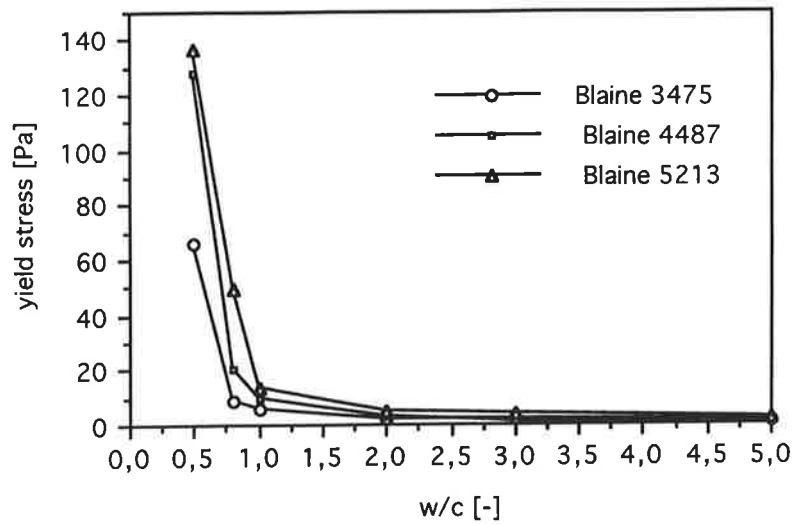
Typiska värden på flytgräns och viskositet som funktion av vct visas i tabell 5.1, (Littlejohn, 1982).

Tabell 5.1 Flytgräns och viskositet som funktion av vct (Littlejohn, 1982).

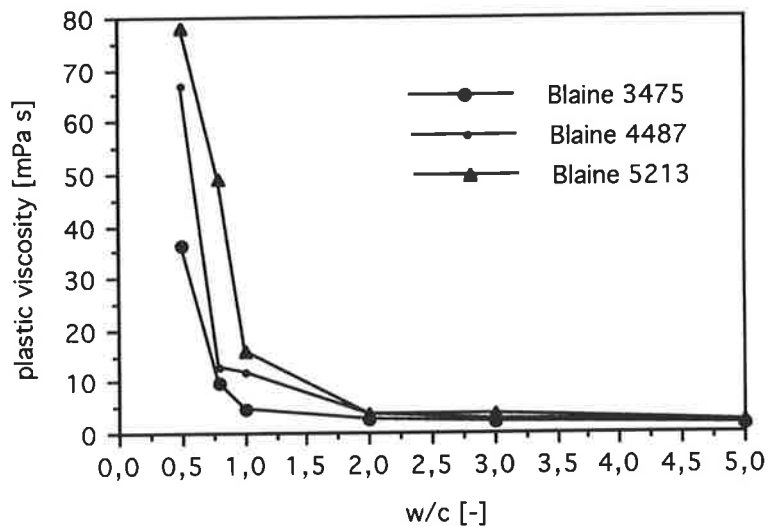
vct [-]	Flytgräns [Pa]	Viskositet [mPa s]
0.3	384	403
0.4	67	90
0.5	23	37
0.6	12	20
0.7	7	13
1.0	2.9	6
2.0	1.0	2.5
5.0	0.53	1.4
10	0.43	1.2
20	0.39	1.1

Det bör noteras att värdena i tabell 5.1 kommer att variera för olika cementsorter och blandningsförfaranden och därför endast bör ses som ett exempel.

Ziming et al., (1990) studerade effekten av vct på de reologiska egenskaperna för olika specifik yta på cementen, se figur 5.2 and 5.3. Som framgår råder ett exponentiellt samband både för flytgräns och viskositet, för alla cementsorter.



Figur 5.2 Flytgräns som funktion av vct vid olika specifik yta [cm^2/g] (Ziming et al., 1990).



Figur 5.3 Viskositet som funktion av vct vid olika specifik yta [cm^2/g] (Ziming et al., 1990).

Värdena i figur 5.2 och 5.3 verkar vara högre än vad som kan förväntas vid dessa nivåer på specifik yta. Orsaken till detta är svår att finna då det inte finns en detaljerad beskrivning av mätproceduren.

Lapasin et al, (1983) har även funnit att vid lägre vct fås en mer markerad tixotropisk nedbrytning, dvs större skillnad mellan egenskaperna i vila och i fullt omrört tillstånd.

5.1.4 Cement karakteristik

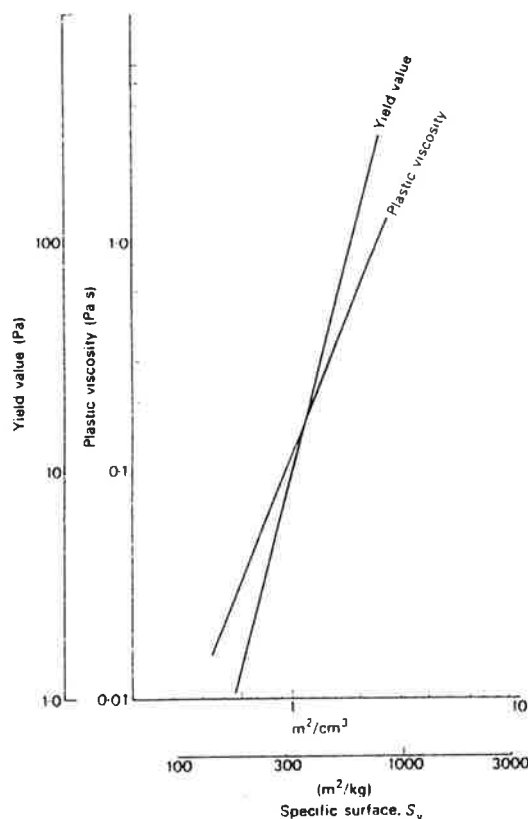
En annan viktig påverkande faktor är cementens malningsgrad (Shaugnessy III and Clark, 1988). Malningsgraden beskrivs ofta med dess specifika yta, dvs ytarea per viktenhet och mäts vanligen enligt Blaine metoden.

I figur 5.4 visas flytgräns vid olika specifik yta och vid ett vct på 0.5 (Tattersall & Banfill, 1983).

Även här är det klart att värdena kommer att variera för olika cement och blandningsprocedur, men i princip kan detta förlopp förväntas (Shaugnessy III and Clark, 1988).

I likhet med vad som var fallet med vct har Lapasin et al., (1983) funnit att en högre specifik yta medför en mer markant tixotropisk nedbrytning.

Annan cement karakteristik såsom kemisk sammansättning har ej samma påverkan som specifik yta. Banfill (1990) menar att cementsammansättningen som mest kan påverka de reologiska egenskaperna med en faktor 2-3.



Figur 5.4 Variation på flytgräns och viskositet som funktion av specifik yta vid $v_{ct} = 0.5$ (Tattersall & Banfill, 1983)

5.1.5 Tillsatser

Superplasticizers

Superplasticizers har en signifikant inverkan på cementreologin och reducerar både flytgräns och viskositet (Asaga and Roy, 1980), (Banfill, 1981), (Ziming et al., 1990).

Banfill (1981) har funnit att flytgränsens känslighet mot tillsats av superplasticizers varierar beroende på cementsammansättning och typ av tillsats. Viskositeten är t ex mer känslig för melamin-baserade än naftalen-baserade medel.

Retarders

Bhatty and Banfill (1984) visade att retarders såsom socker glykos, maltos och sukros kommer att förlänga perioden fram till den initiala härdningen av cementen.

Bentonit

Bentonit är en vulkanisk lera (montmorillonit) som karakteriseras av dess ypperliga förmåga att absorbera vatten.

Bentoniten blandas vanligen först med vatten under en viss tid innan cement tillsätts och anses som inert, dvs den deltar ej i de kemiska reaktionerna under hydratiseringen. Bentonit har använts flitigt i injekteringssammanhang för att erhålla en stabil suspension (Houlsby, 1990), (Weaver, 1991). Men alltsedan Mikrocement har introducerats har dess nytta minskat eftersom dessa cement är stabila i sig vid måttliga vct och då höghastighetsblandare används. Dessutom är bentonitpartiklarna ofta större än Mikrocementens partiklar vilket innebär att de ej bör användas tillsammans om Mikrocementens maximala penetrationsförmåga skall utnyttjas.

Tillsats av bentonit innebär en skenbar sänkning av vct eftersom det finns mindre vatten att tillgå för cementhydratiseringen. Detta påverkar oundvikligen de reologiska egenskaperna genom en ökning av både flytgräns och viskositet. Bentonit bör endast användas för att uppnå en begränsad inträngning genom att höja flytgränsen (Deere & Lombardi, 1985), vilket är motsatsen till "smörjning" som ibland påstås.

Bentonit innebär även att blandningen blir mer tixotrop.

Silikastoft

Silikastoft har samma stabiliserande effekt som bentonit, ökar den "skenbara" viskositeten samt gör blandningen mer tixotrop (Aitcin et al., 1984). På grund av de små partiklarna kan silikastoft även användas tillsammans med Mikrocement. Silikastoft gör även slutprodukten tätare vilket medför en ökad beständighet mot kemiska angrepp. Silikastoft används även som tillsats i sprutbetong.

Natriumsilikat

När natriumsilikat (vattenglss) tillsätts i en cementblandning kommer silikatet att reagera med det kalcium som finns tillgängligt i form av kalciumhydroxid, Ca(OH)_2 , som bildas under hydratiseringen. Silikat-kalciumreaktionen är momentan och bildar en gelstruktur i cementbruket. Beroende på vilken mängd och koncentration som tillsätts kan gelstyrkan varieras inom vida gränser (Stille et al., 1993). Gelstrukturen som medför en drastisk ökning av flytgränsen har en viktig funktion inom injektering, eftersom blandningen direkt kan motstå ett vattentryck vilket innebär att sprängningsarbeten kan påbörjas kort efter injekteringen. Föfarandet har använts med lyckat resultat av Stabilator AB genom det sk "Bolmen bruket".

Tillsats av natriumsilikat kommer även att förkorta härdningstiden något men den kan ej klassas som accelerator (Stille et al., 1993).

Kalciumklorid

Kalciumklorid är den vanligaste acceleratoren för cementbaserade injekteringsmedel. Försök vid Teton dammen visade att vid mer än 6% av cementvikten erhöles inga fördelar (Weaver, 1991). Dock har försök gjorda vid Äspö Hard Rock Laboratory i Oskarshamn visat att en så stor mängd som 15% av cementvikten medfört ett lyckat resultat och har använts inom stora områden (Stille et al., 1993).

5.1.6 Ålder

Det är naturligt att förvänta sig en förändring av de reologiska egenskaperna med tiden, eftersom det sker en övergång från flytande till fast fas under härdningen. Bhatti and Banfill (1984) har funnit att det sker en ökning av "skenbar" viskositet med tiden vilket kan bero antingen på en ökning av flytgräns eller viskositet. Författarna har funnit tre olika faser: en initiell uppbyggnadsfas med avtagande ökning, en intermediär fas med i stort sett konstanta egenskaper samt en slutfas med en kontinuerlig ökning till slutet av mätningen. Beteendet visar stora likheter med kalorimetriska mätningar (värmeutveckling) samt den sk Vicat metoden. Bhatti and Banfill (1984) menar att den första fasen framförallt är fysikalisk beroende på flockning av partiklar emedan de två senare faserna beror på kemiska processer.

Domone and Thurairatnam (1990) har utfört långtgående försök beträffande det initiella skedet hos cement. En mängd olika metoder har använts för att finna den initiella härdningstiden. En karakteristisk tid har definierats vilken representerar antingen en signifikant fas i hydratiseringen eller en distinkt förändring i uppförande. Författarna har funnit en ökning av karakteristisk tid med ökat vct och en låg temperatur (8 °C). Man har funnit att en rotationsviskosimeter ger bra information om härdningsförloppet men att ultraljud är den bästa metoden.

5.1.7 Temperatur

Det är allmänt känt att en hög temperatur medför en minskad viskositet hos en Newtonvätska. Keating och Hannant (1990) har visat att en ökning av temperaturen medför en ökning av både den statiska och dynamiska flytgränsen. Det kan därför förväntas en ökning av viskositeten, men minskning av flytgräns, vid injektering av en bergformation med en låg temperatur.

En viktig faktor är även att en ökad temperatur påskyndar hydratiseringen (Onofrei et al., 1992) och därmed tiden som injekteringsmedlet kan pumpas.

5.1.8 *Vibration*

De reologiska egenskaperna kan även påverkas med vibrationer. I allmänhet kommer en cementsuspension att bli mer lättflytande (dvs erhåller en lägre "skenbar" viskositet) under påverkan av vibrationer (Börgesson & Fredriksson, 1990). Deras resultat visar att genom att vibrera blandningen erhålls ett linjärt samband mellan skjuvspänning och töjningshastighet. Författarna menar att genom att använda rätt kombination av frekvens och amplitud kan skjuvmotståndet i vätskan reduceras markant. De rekommenderar att använda frekvenser under 300 Hz för att uppnå maximal effekt. En förklaring till fenomenet är att vibrationerna minskar attraktionen mellan partiklarna vilket innebär en minskad flytgräns (Tattersall & Banfill, 1983). Effekten liknar den som uppnås vid tillsats av plastizicers. En fråga som måste besvaras är dock hur långt den "dynamiska pulsen" når in i berget vid en injektering?

6 MÄTMETODER

6.1 Rotationsviskosimeter

Reologiska egenskaper utvärderas med olika typer av viskosimetrar, vanligtvis av typen roterande mätkropp, kapilär rörströmning eller genom fallande objekt (Barnes et al., 1989). I detta arbete har en Brookfield, rotationsviskosimeter använts. Instrumentet mäter det vridmoment som krävs för att upprätthålla en viss rotationshastighet på en mätkropp nedsänkt i vätskan.

Rotationsviskosimetrar används ofta tillsammans med koncentrisk cylinder, där en inre cylinder roterar medan en yttre är stilla (eller vice versa). Trots att cylindrar är vanligast som mätkroppar, så förekommer andra geometrier såsom koner, skivor och vingar. I denna rapport har cylindrar och vinge använts. Metodiken har avrapporterats tidigare (Håkansson et al., 1991), (Hässler, 1991) och endast nyheter behandlas här.

6.1.1 Relaxations metoden

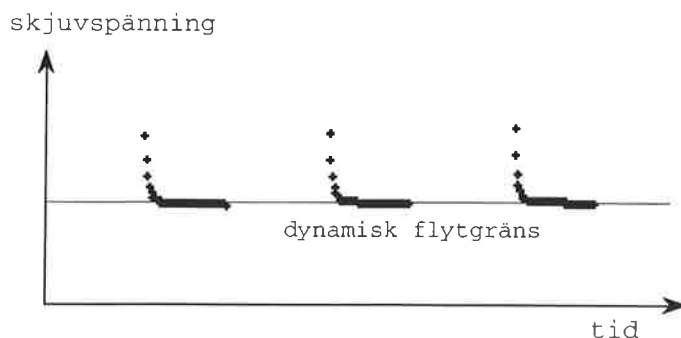
Relaxations metoden är en direkt metod för bestämning av (dynamisk) flytgräns. Samma rotationsviskosimeter som ovan med koncentrisk cylinder används.

Mätningarna görs enligt följande:

- 1) Bruket blandas 5 minuter i höghastighetsblandare och fylls sedan i mätkärlet.
- 2) Bruket blandas i 1 minut med den inbyggda omröraren.
- 3) Mätcylindern sänks ned i provet och roteras med konstant hastighet (10 RPM) under 1 minut.
- 4) Efter 1 minut sätts hastigheten till noll.

Om vätskan har en flytgräns kommer denna att medföra en mothållande spänning som hindrar mätkroppen från att återgå till sitt ursprungsläge (Nguyen & Boger, 1983). Momentet registreras kontinuerligt med tiden och typiska utdata från tre efterföljande

mätningar visas i figur 6.1. Den minsta kvarstående spänningen tolkas som den dynamiska flytgränsen och beräknas med hjälp av ekvation (3.14).



Figur 6.1 Typiska utdata från relaxations metoden. Minimivärdet tolkas som den dynamiska flytgränsen.

6.1.2 Ving metoden

Vingen är en metod för att direkt bestämma den statiska flytgränsen. Samma rotationsviskosimeter som ovan används men tillsammans med en vinge i stället för cylinder. En fyr-bladig vinge sänks ned i vätskan och roteras sedan mycket sakta med konstant rotationshastighet. Momentet registreras kontinuerligt och den statiska flytgränsen utvärderas från maximivärdet enligt ekvation (6.1).

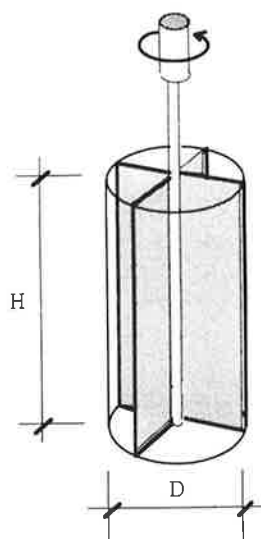
Utvärderingen kräver ett antagande om geometrin på den glidyta som bildas samt skjuvspänningsfördelningen utmed denna yta, då max moment har uppnåtts. Vanligtvis antas att en cylinderformad glidyta utbildas, se figur 6.2, och att skjuvspänningen är jämnt fördelad och lika med (statiska) flytgränsen utmed "cylindern". Med dessa antaganden kan flytgränsen bestämmas med följande samband (Nguyen & Boger, 1985)

$$\tau_o = \frac{2M}{\pi D^3 \left(\frac{H}{D} + \frac{1}{3} \right)} \quad (6.1)$$

vilket även kan skrivas

$$\tau_o = \frac{M}{K} \quad (6.2)$$

där K är en konstant som endast beror på dimensionerna hos vingen.



Figur 6.2 I ving metoden nedsänks en fyr-bladig vinge i vätskan och roteras med konstant hastighet

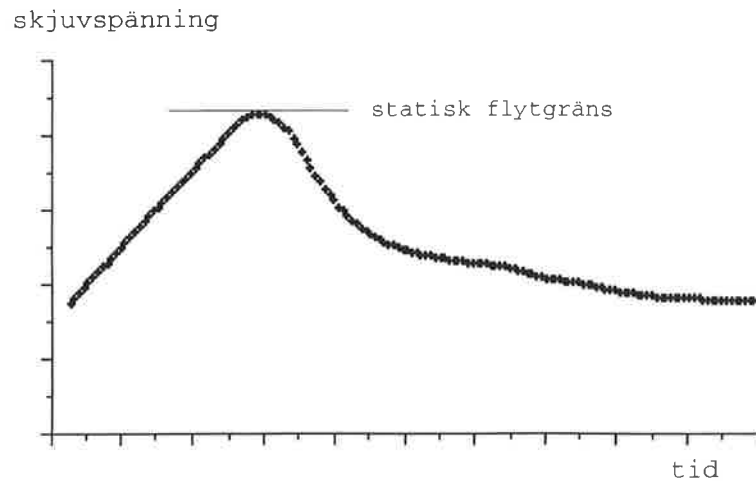
Dimensionerna på de vingar som används visas i tabell 6.1.

Tabell 6.1 Dimensioner på vingarna

Vinge No.	$D \times 10^{-3}$ [m]	$H \times 10^{-3}$ [m]	$K \times 10^{-6}$ [m ³]
1	20	60	41.888
2	10	30	5.236

Dimensionerna är i överensstämmelse med de rekommendationer som givits av Nguyen & Boger, (1985).

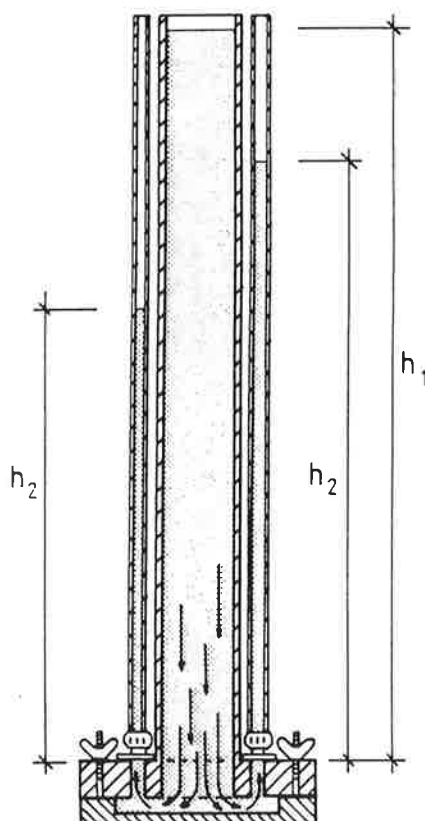
Rotationshastigheten har genomgående varit 0.1 RPM och samma kärl, med inbyggd omrörare, som beskrivits i Håkansson et al. (1991) har använts. Typiska utdata från försök med vingen visas i figur 6.3.



Figur 6.3 Typiska utdata från försök med ving metoden. Maximivärdet tolkas som den statiska flytgränsen.

6.2 Stigröret

Stigröret är ett enkelt instrument, som utvecklats inom detta arbete, för att bestämma flytgränsen hos injekteringsmedel i fält, se figur 6.4. Flytgränsen bestäms genom att utnyttja det faktum att strömningen upphör då den maximala skjuvspänningen (vid rör väggen) är mindre än flytgränsen.



Figur 6.4 Stigröret

Initiellt hålls vätskan i det relativt stora röret ($R=30$ mm) i mitten på instrumentet. När vätskan når botten strömmar den radiellt och sedan upp i de mindre rören ($R=2-4$ mm) vilka är placerade utmed periferin. Om vätskan har en flytgräns kommer den ej att nå upp till samma nivå i de mindre rören som röret i mitten, och ju mindre rördiameter ju kortare inträngning.

Genom att observera nivån som vätskan når i de små rören (h_2), se figur 6.4, kan flytgränsen uppskattas med följande samband

$$\rho g h_1 \pi R^2 - \rho g h_2 \pi R^2 - \tau_0 2\pi R h_2 = 0 \quad (6.3)$$

där ρ är vätskans densitet, R radien på de små rören, h_1 nivån i det stora röret och h_2 nivån i de små rören.

Genom att introducera $\Delta h = (h_1 - h_2)$ och förenkla fås :

$$\tau_0 = \frac{\gamma R}{2} \left(\frac{\Delta h}{h_1 - \Delta h} \right) \quad (6.4)$$

där γ är vätskans specifika vikt. Det kan noteras att om vätskan når lika högt i de små rören som i det stora ($\Delta h = 0$), så innebär detta att vätskan ej har någon flytgräns.

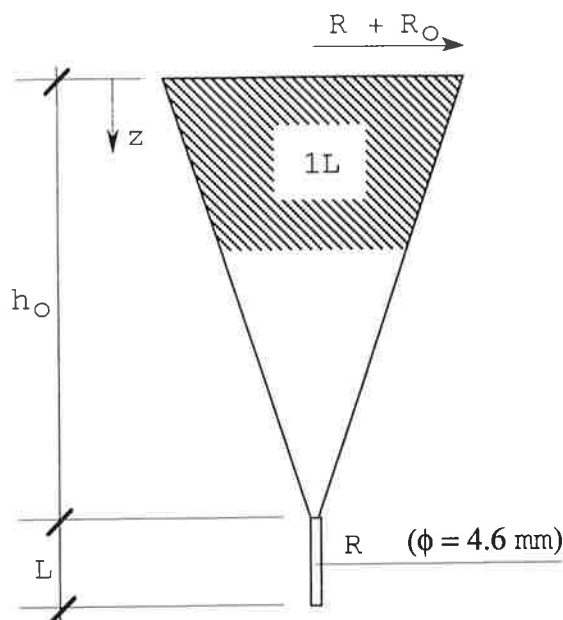
Densiteten som måste vara känd vid dessa försök kan med fördel bestämmas med en sk "mud-balance" vilket är ett vanligt och enkelt instrument inom oljeindustrin (Deere, 1982).

6.3 Marsh-kon

Olika typer av koner används allmänt för att bestämma "bulk"-reologin på injekteringsmedel. Benämningen "bulk" berättigas av att man med konerna mäter en kombinerad effekt av de riktiga reologiska egenskaperna (liknande begreppet skenbar viskositet som visades i kapitel 2). Tiden som det tar för en viss volym att strömma ut genom konen är den storhet som mäts. Tyvärr saknas det ännu en standard inom detta område och därför förekommer en mängd olika geometrier på koner, vilket försvårar jämförelser.

I detta arbete används en sk Marsh-kon vilket är ett vanligt instrument inom oljeindustrin för att uppskatta egenskaperna på borrhätskor. Initieellt fylls konen med 1.5 liter av vätskan och den tid det tar för 1.0 liter att strömma ut genom konen registreras.

En teoriutveckling av strömning i koner har gjorts (Håkansson, 1993) och beteckningarna från detta arbete visas i figur 6.5.



Figur 6.5 Beteckningar för teoriutvecklingen av strömning i koner

Den generella och styrande ekvationer för strömning genom en kon ges av (Håkansson, 1993)

$$T = \int_0^{z_1} \frac{\left(R + R_o \left[1 - \frac{z}{h_o} \right] \right)^2}{\bar{v}_z R^2} dz \quad (6.5)$$

där T är den tid det tar för vätskenivån att ändras från $z = 0$ till $z = z_1$.

En sluten lösning av ekvation (6.5) har erhållits för Newtonska vätskor och för Bingham modellen under förutsättning att fjärdegrads termen i ekvation (3.11) försummas. För det kompletta Bingham uttrycket och andra vätskemodeller krävs dock numeriska lösningar av ekvation (6.5), se Håkansson (1993).

När vätskan strömmar ut genom konen bär den med sig en icke försumbar mängd kinetisk energi vilket innebär att den ursprungliga potentiella energin omvandlas både till kinetisk energi och värme (energiförlust). Den kinetiska energin (och dess korrektionsfaktor) medför en del komplikationer i den teoretiska behandlingen (Håkansson, 1993).

6.4 Utvärdering av flytgränsen

En noggrann bestämning av flytgränsen har en mycket stor betydelse i injekteringssammanhang.

Den statiska flytgränsen och dess tillväxt, efter en lyckad injektering, avgör hur högt vattentryck medlet kan motstå och när injekteringsmanschetten kan tas bort. Den dynamiska flytgränsen har betydelse vid strömningen under inträngningsförloppet, det vill säga för sambandet mellan tryck och flöde.

Storleken på flytgränsen bestämmer inträngningslängden och därmed även injekteringsvolymen (Wallner, 1976), (Lombardi, 1985), (Håkansson et al., 1991), (Hässler, 1991) och (Stille et al., 1993).

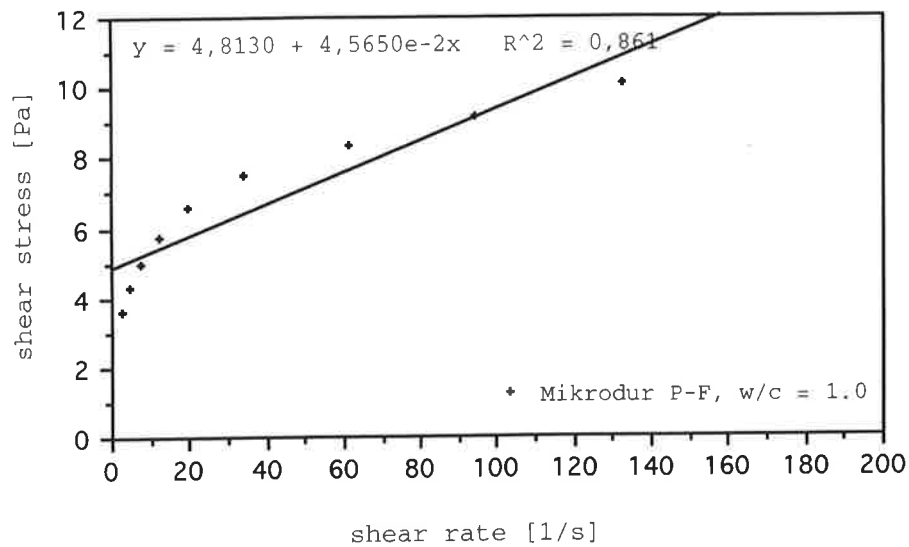
Dock är det för närvarande inte fullt klart vilken av de två flytgränserna (statisk eller dynamisk) som avgör vilken maximal inträngning som är möjlig. Eventuellt påverkar de båda flytgränserna inträngningen vid olika tidsskeden.

6.4.1 Indirekta metoder

Bestämningen av flytgränsen med hjälp av rotationsviskosimeter kan endast ske med indirekta metoder.

Den indirekta bestämningen sker genom kurvanpassning till mätdata och extrapolation ner till noll töjningshastighet. Det vanligaste sättet att extrapolera är med hjälp av en känd reologisk modell, exempelvis Bingham modellen. Noggrannheten av flytgränsbestämningen bestäms således utav strömningsdata skjuvspänning och töjningshastighet samt tillförlitligheten av den valda reologiska modellen (Nguyen, 1983). Detta till skillnad mot en direkt bestämning av den sökta storheten.

Flera olika reologiska modeller har undersökts (Håkansson 1993), med indirekta metoder och rotationsviskosimeter. Ett exempel visas i figur 6.6, där Bingham modeller har anpassats till mätdata från en av referensblandningarna i detta arbete.

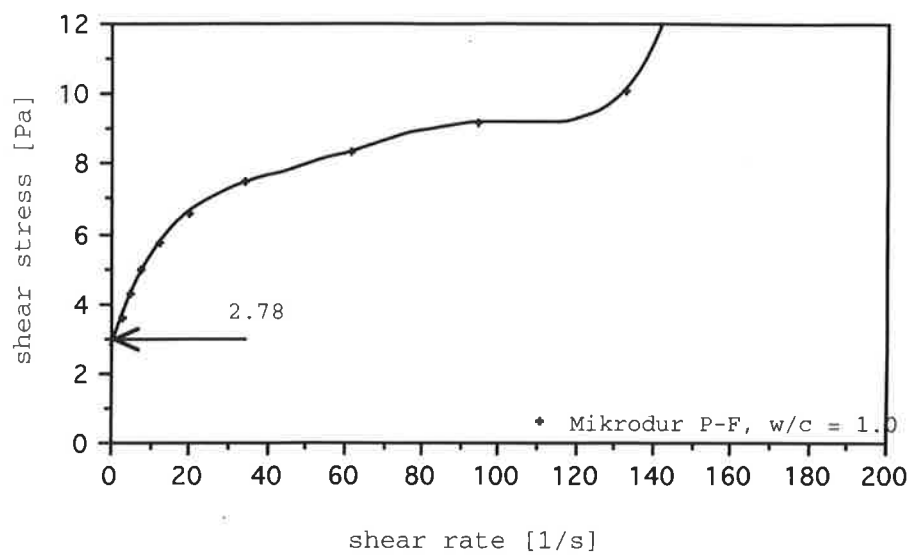


Figur 6.6 Referens medel : Mikrodur P-F cement vct 1.0, med Bingham modell

Bingham modellen antar ett linjärt förhållande mellan skjuvspänning och töjningshastighet. Men som syns i figur 6.6 är blandningen icke-linjär, och konkav mot töjningshastigheten. Detta medför att flytgränsbestämningen, i viskosimetern med Bingham approximation, ger ett högre värde än vid en direkt bestämning.

Direkt extrapolation

Vid direkt extrapolation anpassas ett polygon av femte ordningen till uppmätta data, se exempel figur 6.7. Flytgränsen bestäms av kurvans skärning med skjuvspänningsaxeln.



Figur 6.7 Exempel på direkt extrapolation. Anpassning av uppmätta data till ett femte ordningens polygom

Flytgränsresultat av referensblandningarna (se kapitel 7) med direkt extrapolation visas i tabell 6.2, under olika tidpunkter.

Tabell 6.2 Flytgränsresultat för referensblandningarna vid olika tidpunkter

MIKRODUR P-F (w/c = 1.0)		
Yield stress [Pa]		
tid [h]	B	Polynom.
0	4.81	2.78
1	5.32	2.91
2	4.66	2.73

Spinor A16 (w/c = 1.0)		
Yield stress [Pa]		
tid [h]	B	Polynom.
0	4.06	2.06
1	4.20	2.17
2	4.08	1.49

Degerhamn (w/c = 0.8)		
Yield stress [Pa]		
tid [h]	B	Polynom.
0	2.80	1.79
1	3.37	1.23
2	4.09	1.37

6.4.2 Direkta metoder

Med direkta metoder bestäms flytgränsen direkt från mättningsresultatet, utan omvägar genom kurvanpassning och extrapolation. Direkta metoder utgörs av mätningar med Vinge, Stress-Relaxation och Stigrör och resultat från dessa visas i tabell 6.3.

Tabell 6.3 Medel värden av flytgränsen från olika direkta metoder

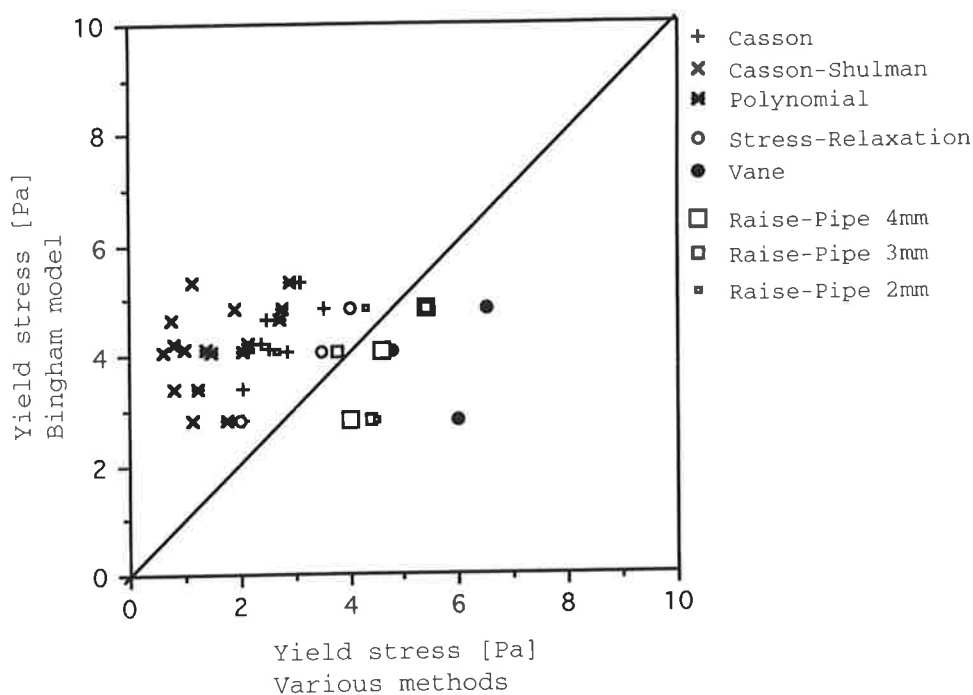
Cement type	Density [ton/m ³]	Shear-Vane [Pa]	Stress- Relaxation [Pa]	Raise-Pipe (*) [Pa]
Mikrodur (w/c 1.0)	1.42	6.52	4.08	5.4 5.4 4.3
Spinor (w/c 1.0)	1.43	4.81	3.54	4.6 3.8 2.7
Degerhamn (w/c 0.8)	1.61	6.04	2.03	4.0 4.4 4.5
Degerhamn (w/c 0.6)	1.75	10.12	8.55	13.3 16.5 16.7
Degerhamn (w/c 0.8 + 2% NaSiO ₂)	1.60	18.24	6.52	11.6 11.1 9.7
Degerhamn (w/c 0.8 + 10% SiO ₂)	1.63	35.45	12.25	18.2 19.9 18.2

* För Stigröret har tre olika rör radianer används för de smala rören, i tabellen uppifrån och ner 4mm, 3mm och 2mm

Vilken flytgräns (statisk eller dynamisk) som mäts med de direkta metoderna är olika beroende på mätinstrument och procedur. Det är uppenbart att med Vinge mäts den statiska och med Stress-Relaxation mäts den dynamiska flytgränsen. Däremot då det gäller Stigröret är det svårare att entydigt uttala sig om vilken flytgräns som mäts. Ett ytterligare faktum som försvårar bedömningen av flytgränsen från Stigröret är att de olika rördiametrarna ger olika resultatet (se diskussion i kapitel 6.6).

6.4.3 Jämförelse mellan de olika metoderna

Resultat från mätningar av flytgränsen med olika metoderna är jämförda i figur 6.8 (obs, även Casson modellen från Håkansson (1993) finns med i figuren). Jämförelserna är gjorda för de blandningarna som visas i tabell 6.3.



Figur 6.8 Flytgränsvärden med Bingham approximation jämförd med olika mätmetoder

Som syns i figur 6.8 ger alla de icke-linjära modellerna ett lägre flytgränsvärde än Bingham modellen. Det har sin naturliga orsak i att den linjära Bingham anpassningen ger ett högre värde på skärningen med spänningsaxeln, se figur 6.9. Det högsta flytgränsvärde fås av Vingen medan Stress-Relaxation ger ett lägre värde än Bingham modellen. Stigrörets värden ligger nära Bingham modellen trots en variation beroende på vilken diameter som använts.

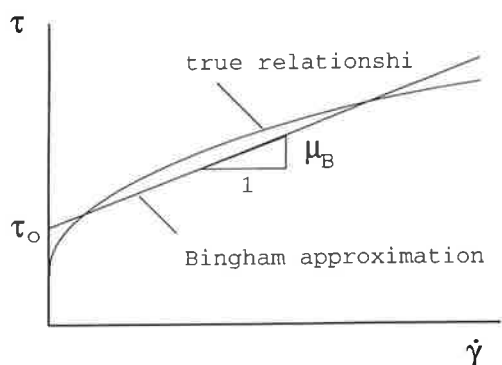
6.5 Utvärdering av viskositeten

Viskositeten är en viktig strömmningsegenskap som styr förhållandet mellan tryck och flöde. Ju högre viskositet ju mindre flöde vid en given geometri och tryck.

Viskositeten har i detta arbete undersöks med rotationsviskosimeter och Marsh-kon (Håkansson, 1993).

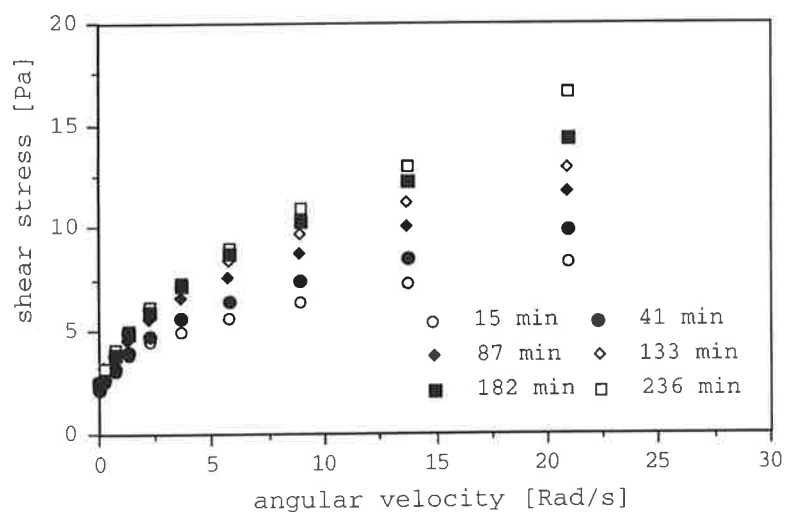
6.5.1 Rotationsviskosimeter

I likhet med flytgränsen sker utvärdering av viskositeten genom kurvanpassning av uppmätta data till en reologisk modell. Viskositeten motsvarar lutningen på den anpassade kurvan, se figur 6.9, för Bingham modellen. Anpassningen är beroende av vilket töjningshastighets intervall som mätningen sker i. Rotationsviskosimeters mätintervall är möjlig i storleksordningen 1 - 140 l/s.



Figur 6.9 Bingham approximation jämfört med sanna förloppet

Det är intressant att notera förändring i viskositet med tiden, se figur 6.10, medan flytgränsvärdet, under den första timmen, är i det närmaste oförändrat. Detta beteende har de flesta av de testade injektionsmedlen.



Figur 6.10 Mätdata från rotationsviskosimetern vid olika tider

6.5.2 Marsh-kon

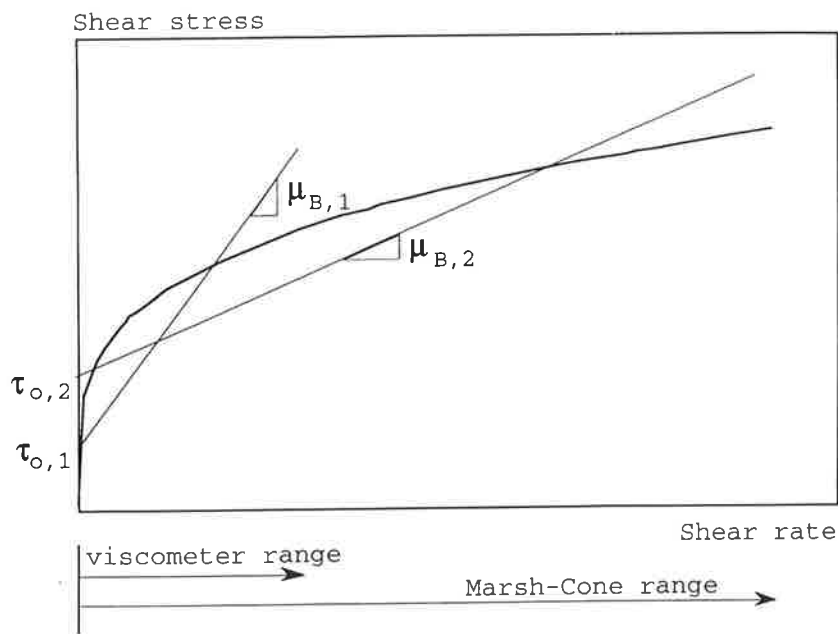
För Newtonvätskor med låg viskositet såsom kan man förvänta sig ett turbulent flöde i Marsh-konen. Men för vanliga injekteringsmedel vilka oftast har en viskositet högre än 10-15 mPas kan detta bortses ifrån. En teoriutveckling av strömning i Marsh-kon har skett inom ramen för detta arbete (Håkansson, 1993).

Flera olika blandningar har uppmätts i Marsh-konen och medelvärden på marsh-tid och densitet är sammanställd i tabell 6.4.

Tabell 6.4 Uppmätt marsh-tid med Marsh-konen för olika medel

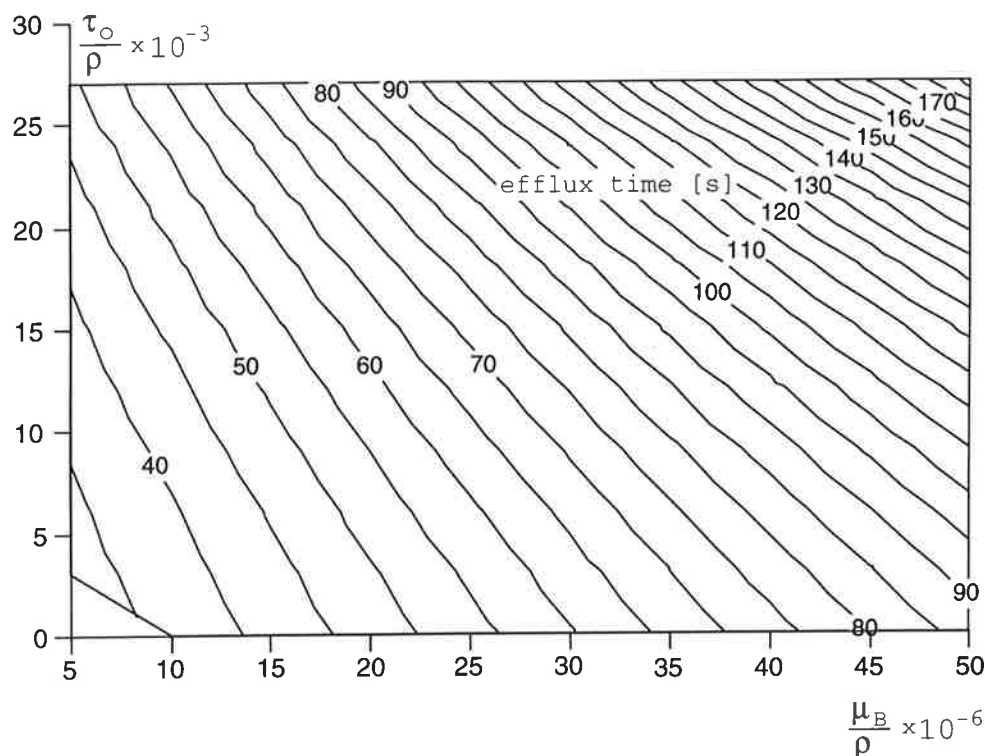
Cement type	w/c [-]	Efflux time [s]	Density [ton/m ³]	Remark
Mikrodur P-F	1.0	41.0	1.42	Ref
Spinor A16	1.0	36.0	1.43	Ref
Degerhamn	0.8	34.8	1.61	Ref
Degerhamn	0.6	43.0	1.75	low w/c
Degerhamn	0.8	40.7	1.60	2% NaSiO ₂
Degerhamn	0.8	61.2	1.63	10% SiO ₂

Som tidigare nämnts är töjningshastighetintervallet viktigt vid utvärdering av strömmningsegenskaperna. Marsh-konens mätintervall är större än viskosimetens, se figur 6.11. Detta ger därför olika resultat vid utvärderingen av egenskaperna i rotationsviskosimetern jämfört med Marsh-konen då Bingham modellen används.



Figur 6.11 Intervallen för töjningshastigheten i rotationsviskosimetern och Marsh-konen är olika och ger olika utvärderingsresultat

Genom att använda strömmningsteorin för Marsh-konen, Håkansson (1993), kan ett diagram tas fram (se figur 6.12), från vilket strömmningsegenskaperna kan utvärderas. För att kunna använda diagramet måste densiteten och antingen viskositeten eller flytgränsen vara känd.



Figur 6.12 Marsh-kon diagram för uppskattning av strömmningsegenskaperna med hjälp av Bingham modellen

6.6 Diskussion

Det är uppenbart att reologin för normala cementbaserade injekteringsmedel förändras med tiden på grund av cementshydratisering. Vid en praktisk injektering är det nödvändigt att känna till medlets egenskapsförändring med tiden. Den stora fördelen med rotationsviskosimetern är att mätningarna kan göras kontinuerligt och att egenskapsförändringar med tiden därmed kan följas. rotationsviskosimetern är även lätt att använda och endast en mindre testvolym behövs. Instrumentet kan även användas i fält, under förutsättning att det kan skyddas mot fukt och vatten.

För att utvärdera den statiska flytgränsen är de direkta mätmetoderna att föredra, på grund av att den sökta parametern mäts utan att gå omvägen via kurvanpassning och extrapolation. Det innebär att Vingen bör användas i viskosimetern och med en låg vinkelhastighet (0.1 rpm). En stor fördel med Vingen är att glidning (slip) i stort sett elimineras. En annan fördel med Vingen är att den är nerstucken i provet när mätningen börjar, vilket ger en minimal störning av provet. Observera att provet måste ha varit i vila innan mätningen kan starta.

Viskosimetern kan även användas för att bestämma den dynamiska flytgränsen genom att utnyttja Stress-Relaxion metoden. En viktig faktor vid användande av metoden är att minimera glidning mellan provcylindern och medlet, vilket kan ske genom att göra cylinderytan rå, med till exempel sand. Observera att provet måste ha varit stort innan själva mätningen startar.

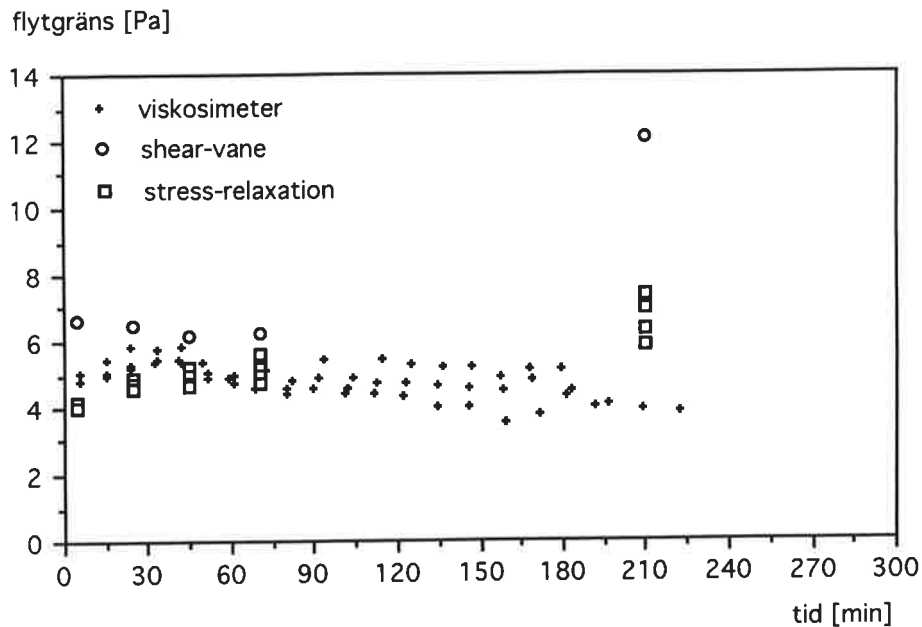
Stigröret är ett funktionellt och enkelt instrument för att bestämma flytgränsen i fält. Flytgränsvärdet som registreras ligger mellan den statiska och dynamiska från Vingen respektive Stress-Relaxion. Mätmetoden liknar bäst av alla metoder ett verkligt injekteringsförlopp, genom att strömmningen i rören avtar ju längre medlet kommer in. Rören måste vara råa på insidan för att undvika glidning. Ett problem med instrumentet är att de minsta rördiametrarna ger en relativt sett högre flytgräns. En tänkbar förklaring till detta kan vara att de högre töjningshastigheterna, i de mindre rören förekommer under en längre tidsperiod.

Marsh-konen är också ett enkelt och användbart instrument för fältmätning. Längden av utströmnings röret bör dock vara ca 50 gånger större än rördiametern för att fullt utbildad strömning skall ske (Massey, 1979). En väsentlig detalj är även att utströmningsröret är helt rengjort, eftersom marsh-tiden är starkt beroende av rördiametern.

Bingham modellen

Fördelen med Bingham modellen är dess enkelhet. Modellen inkluderar de grundläggande reologiska egenskaperna (flytgräns och viskositet) och är därför användbar för att på ett enkelt sätt se effekterna av olika manipulationer. Modellen är oftast tillräcklig eftersom geometrin hos det geologiska mediet, som injekteringen sker i, är mer eller mindre okänd och har en avgörande inverkan på injekteringen. Det är dock, som tidigare nämnts, viktigt att den linjära approximationen sker inom ett relevant intervall på töjningshastigheten.

Från mätningsresultatet av flytgränsen visar de sig att en Bingham approximation, gjord med rotationsviskosimeter, ligger mellan den statiska och dynamiska flytgränsen, se figur 6.13.



Figur 6.13 Jämförelse mellan statisk och dynamisk flytgräns, med en Bingham approximation, av medlet : Mikrodur P-F vct 1.0

Rekommenderad procedur

För praktiskt bruk där kunskapen om geologins geometri är begränsad rekommenderas följande :

- De reologiska egenskaperna utvärderas genom mätning med rotationsviskosimeter och antagande om Bingham modellen.
- Den statiska flytgränsen bestäms direkt med Vingen och den dynamiska med Stress-Relaxion.
- I fält kontrolleras egenskaperna med Stigrör och Marsh-kon.

7 MÄTRESULTAT

7.1 Inledning

En serie mätningar har utförts med rotationsviskosimeter tillsammans med koncentrisk cylindrar. Huvudsyftet med mätningarna har varit att utvärdera effekten av olika faktorer och tillsatser på reologin hos Mikrocement. Utvärderingen har utförts med Bingham modellen som linjär approximation till det "riktiga" reologiska beteendet. Antagandet om Bingham modellen medför att resultaten måste ses i relation till det som framkom i kapitel 6.

Mätningarna har utförts på tre olika Mikrocement. Mikrocement har ökat i popularitet som ett alternativ till kemiska injektionsmedel men endast begränsad forskning har hittills utförts på dessa produkter.

7.2 Cementsorter och karakteristik

Mikrodur

Mikrodur är ett Portlandcement tillverkat av Dyckerhoff, Tyskland. Två typer har använts Mikrodur P-F och Mikrodur P-U med olika kornstorlekar.

Tabell 7.1 Karakteristik, Mikrodur

Typ	Specifik yta	Karakteristisk kornstorlek
	[m ² /kg]	[µm]
Mikrodur P-F	1200	16 (D95)
Mikrodur P-U	1600	9,5 (D95)

Tabell 7.2 Sammansättning, Mikrodur (%)

Oxid	P-F	P-U
Kalcium, CaO	66.2	66.2
Kisel, SiO ₂	20.6	20.6
Aluminium, Al ₂ O ₃	4.3	4.3
Järn, Fe ₂ O ₃	3.2	3.2
Natrium, Na ₂ O	-	-
Kalium, K ₂ O	1.0	1.0
Magnesium, MgO	1.2	1.2
Svavel, SO ₃	2.9	2.9
Övrigt	0.6	0.6

Spinor A

Spinor A är en slaggcement tillverkat av Ciments d'Origny, Frankrike. Två typer har använts Spinor A 16 och Spinor A 12 med olika kornstorlekar.

Tabell 7.3 Karakteristik, Spinor A

Typ	Specifik yta [m ² /kg]	Karakteristisk kornstorle [µm]
Spinor A 16	1200	16 (D98)
Spinor A 12	1500	12 (D98)

Tabell 7.4 Sammansättning, Spinor A (%)

Oxid	A 16	A 12
Kalcium, CaO	45.8	45.7
Kisel, SiO ₂	30.5	30.8
Aluminium, Al ₂ O ₃	9.6	10.2
Järn, Fe ₂ O ₃	1.5	1.5
Natrium, Na ₂ O	-	-
Kalium, K ₂ O	-	-
Magnesium, MgO	-	-
Svavel, SO ₃	2.0	3.2
Övrigt	10.6	8.6

Degerhamn Injekteringscement

Degerhamn Injekteringscement är ett Portlandcement Tillverkat av CEMENTA AB, Sverige.

Tabell 7.5 Karakteristik, Degerhamn Injekteringscement

Typ	Specifik yta [m ² /kg]	Karakteristisk kornstorlek [µm]
Degerhamn	600	64 (D100)

Tabell 7.6 Sammansättning, Degerhamn Injekteringscement (%)

Oxid	
Kalcium, CaO	62
Kisel, SiO ₂	23
Aluminium, Al ₂ O ₃	5
Järn, Fe ₂ O ₃	4
Natrium, Na ₂ O	0.5
Kalium, K ₂ O	0.8
Magnesium, MgO	1.2
Svavel, SO ₃	2.4
Övrigt	1.1

7.3 Tillsatser

Följande tillsatser har använts i studien:

Bentonit: Brebent, Ca-bentonit från Ahlsell Mineral AB ($D_{\max}$ ca 150 μm). Mängden bentonit uttrycks som % av vattenvikten. Bentoniten blandas först med vattnet i ca 1 min innan cementen tillsätts (och blandas i ytterligare 4 min).

Silikastoft: Microsilika, från Elkem A/S ($D_{\max}$ ca 44 μm , Specifik yta ca 18-28 m^2/kg). Mängden Silikastoft uttrycks som % av vattenvikten. Tillsatsen sker på samma sätt som bentoniten (se ovan).

Superplasticizer: HP (naftalen baserat) från Rescon A/S (vätskeform, ca 35 vikts-% torr mtrl). Mängden flytmedel uttrycks som % vätska av cementvikten. Cement och vatten blandas först i 4 min därefter tillsätts flytmedlet (och ytterligare 1 min blandning).

Natriumsilikat (SiO₂): Stabilodur F1, specialtillverkat för injekteringsändamål och framställt av Stabilator AB. Mängden silikat uttrycks som % av vattenvolymen. Cement och vatten blandas först i 4 min därefter tillsätts silikatet (och ytterligare 1 min blandning).

Kalciumklorid (CaCl₂): vanligt vägsalt. Mängden salt uttrycks som % av cementvikten. Salt och vatten blandas först i ca 4 min innan cementen tillsätts (och ytterligare 1 min blandning).

7.4 Mätprocedur

Samtliga blandningar i studien är "stabila" enligt kriteriet: < 5 % fritt vatten på toppen av en 1000 ml mätcylinder, fylld med blandningen, efter 2 timmar.

Instabila blandningar medför en koncentrationsgradient i mätkärllet vilket ger en dålig reproducerbarhet vid mätningar med rotationsviskosimetern.

Varje prov blandas i ca 5 minuter i en höghastighetsblandare för att erhålla en maximal nedbrytning av bindningar mellan cementkornen.

Avjoniserat kranvatten (Stockholm) har använts i samtliga försök.

Mätningen fortgår i samma prov under 3-4 timmar och efter varje mätsekvens (vilken tar ca 5 minuter) omrörs provet med den inbyggda omröraren. Mätningen sker enligt den procedur som redovisats i BeFo rapport 241: 1/91 (Håkansson et al., 1991) och resultaten finns redovisade i BILAGA I.

7.5 Reologiska egenskaper

För samtliga tre cementsorter skapas en referensblandning vid ett visst vct och utan tillsatser. I resultat sammanställningen (BILAGA I) visas referensblandningen i varje diagram och effekten av olika faktorer och tillsatser jämförs med denna blandning.

Tabell 7.7 Olika faktorerers inverkan på de reologiska egenskaperna

Faktor/tillsats	Effekt på skjuvhållf. *)	Effekt på viskositeten *)	Effekt på härkningstid *)
minskt vattencement tal	+++	+++	-
ökad specifik yta	++	++	-
minskad temperatur	++	+	++
tillsats av bentonit	++	++	+-
tillsats av silika stoft	+++	++	-
tillsats av super- plasticizer	---	---	++
tillsats av natrium silikat	+++	+	-
tillsats av kalcium klorid	+	+	---
*)	+++ kraftig ökning ++ måttlig ökning + liten ökning +- oförändrat		
	--- kraftig minskning -- måttlig minskning - liten minskning		

7.5.1 Referensblandningar

Referensblandningen för Degerhamn injekteringscement baseras på vct 0.8 (vikts-%) och för Mikrodur och Spinor på vct 1.0 (vikts-%). Samtliga referensblandningar är utan tillsatser. För varje cementsort har tre oberoende försök utförts vid 20 °C.

Ett lägre vct för Degerhamn injekteringscement var nödvändigt för att erhålla en stabil blandning då denna cement har större korn och lägre specifik yta.

7.5.2 Effekt av vattencementtal

Vattencementtalet (vct), dvs koncentrationen, utgör den i särklass viktigaste påverkande faktorn på de reologiska egenskaperna. En minskning av vct innebär en exponentiell ökning av både flytgränsen och viskositeten.

7.5.3 Effekt av specifik yta

Den mest signifikanta karakteristiken hos cementen är dess specifika yta (ytarea/vikt), vilken vanligen mäts enligt Blaine metoden. En ökning av specifik yta, dvs. en tendens i riktning mot Mikrocement, leder till en markant ökning i flytgräns och viskositet.

7.5.4 Effekt av superplasticizer

Superplasticizers har en stor inverkan på reologin och minskar både flytgränsen och viskositeten. Det måste dock klart uttryckas att verkningstiden är begränsad (mellan 30-60 minuter) och effekten avtar kontinuerligt från det att medlet tillsats. Plasticizers verkar även svagt retarderande, dvs medför en något längre härdningstid.

7.5.5 Effekt av bentonit

Bentonit anses som inert, dvs. deltar inte i den kemiska reaktionen under cementhydratiseringen. Före introduktionen av Mikrocement användes bentonit som tillsats till vanlig cement för att erhålla en stabil blandning. I och med användandet av Mikrocement har bentonitens roll minskat i betydelse. Det bör även framhållas att kornstorleken hos bentonit ofta är större än hos Mikrocement vilket innebär att dessa ej bör användas tillsammans. Bentonit påverkar reologin genom att öka både flytgränsen och viskositeten. Tillsats av bentonit innebär även att blandningen blir mer tixotrop.

7.5.6 Effekt av Silikastoft

Silikastoft är en pozzolan vilket i likhet med bentonit förbättrar blandningens stabilitet. Silikastoftets partiklar är dock mycket mindre (0.1×10^{-6} m medel diameter) än bentonitens, och kan därför med fördel även användas tillsammans med Mikrocement. Tillsats av Silikastoft ökar både flytgräns och viskositet och medför en något förkortad härdningstid.

7.5.7 Effekt av Natriumsilikat

Tillsats av natriumsilikat medför en drastisk ökning av blandningens flytgräns. Silikatet reagerar med det Kalcium som finns tillgängligt i form av Kalciumhydroxid, Ca(OH)_2 , som bildas då cement och vatten kommer i kontakt med varandra. Silikat-Kalcium reaktionen är momentan och beroende på mängden Silikat kan flytgränsen varieras inom ett brett spann. Viskositeten påverkas också (ökar) men i mindre omfattning.

Tillsats av Silikat minskar även härdningstiden något men kan ej betraktas som en accelerator (se även Stille et al., 1993).

7.5.8 Effekt av Kalciumklorid

Kalciumklorid används främst som accelerator för att minska härdningstiden på blandningen. Beroende på mängden Kalciumklorid kan en stor variation erhållas, allt ifrån ett par minuter (15-20% av cementvikten) till timmar. Det måste dock understrykas att en liten mängd (< 1%) Kalciumklorid innebär en ökning av härdningstiden, dvs har en retarderande effekt. Reologin påverkas endast i en mindre omfattning och ger en liten ökning av flytgräns och viskositet.

7.5.9 Effekt av temperatur

Generellt innebär en minskning av temperaturen en ökning av viskositeten och vice versa (se kap. 2.2). Detta gäller även för cementbaserade injekteringsmedel och verkar också gälla flytgränsen. Mer forskning behövs dock för att verifiera temperaturens inverkan på flytgränsen.

8 SLUTSATSER

8.1 Allmänt

Mätningarna visar att cementbaserade injekterings medels reologiska beteende är icke-linjärt, pseudoplastiskt (skjuvförtunnande) och att medlen har en flytgräns.

Mätresultaten tyder även på att det existerar två olika, historieberoende, flytgränsnivåer :

- * en "statisk" flytgräns, som måste överskridas för att erhålla strömning efter det att vätskan varit i vila
- * en "dynamisk" flytgräns, mindre än den ovanstående, vilken förekommer efter det att vätskan efter störning uppnått ett fullständigt omrört tillstånd

Fenomenet med de olika nivåerna härrör från vätskans tixotropi. Den statiska flytgränsen har en viktig praktisk betydelse eftersom den bestämmer vilket vattentryck som bruket kan motstå efter att ha fyllt ett hålrum. Den dynamiska flytgränsen däremot, påverkar strömningsegenskaperna under större delen av injekteringsförloppet.

Flytgränsen har även den mycket viktiga inverkan att den begränsar inträngningslängden och därigenom storleken på maximal injekteringsvolym. Mätningarna antyder att det är den statiska flytgränsen som har störst inverkan utav de två vad gäller inträngningslängd. Av ovanstående framkommer att det är viktigt att känna till och kunna kvantifiera bägge nivåerna.

Binghammodellen, vilken är den enklaste för vätskor med flytgräns, kan med fördel användas beroende på följande omständigheter:

- * i praktiken är geometrin på sprickor och porer relativt lite känd. Detta innebär att det ej lönar sig att söka efter alltför sofistikerade modeller eftersom geometrin kommer att ha en avgörande betydelse.
- * den linjära approximationen måste göras över en representativ del av förloppet, dvs de deformationshastigheter som kommer att råda under den praktiska tillämpningen.

- * Binghammodellen kommer att överskatta den dynamiska flytgränsen om det verkliga förhållandet är pseudoplastiskt (vilket ofta är fallet för cementsuspensioner).

Binghammodellen har en stor fördel i att den är enkel att använda. Modellen innehåller de fundamentala reologiska egenskaperna, flytgräns och viskositet, och lämpar sig bra för att undersöka effekten av olika faktorer och tillsatser.

Övriga generella iakttagelser är:

Bentonit bör ej användas tillsammans med Mikrocement eftersom dessa är stabila i sig vid lämpliga vattencementtal. Dessutom är bentonitpartiklarna ofta större än cementkornen vilket innebär att den förbättrade inträngningsförmågan hos Mikrocement kan gå förlorad.

Silikastoft har en stor potential som tillsats till Mikrocement. Förutom att stabiliteten förbättras så medför tillsatsen att de reologiska egenskaperna kan varieras efter önskemål. Dessutom blir slutprodukten tätare och därigenom mera beständig.

Det är mycket viktigt att blanda suspensionen ordentligt särskilt då Mikrocement används. De finare partiklarna har en tendens att bilda flockar som måste brytas ned eftersom klumparna annars kan vara större än vanliga cementkorn.

De reologiska egenskaperna hos cementbaserade medel påverkas av blandnings- och mätförfarandet vilket medför att det är viktigt att mätstandard utvecklas för att kunna göra en vettig jämförelse av resultat.

Cementbaserade medel har ett komplext reologiskt uppförande vilket medför att det är lämpligt att använda flera olika mätmetoder för jämförelse innan egenskaperna utvärderas.

8.2 Viskosimeter mätningar

Genom att använda rotationsviskosimetern (med koncentrisk cylindrar) och antaga att Binghammodellen är giltig, kan följande slutsatser dras:

- * den enskilt viktigaste faktorn vad beträffar reologin hos cementbaserade injekteringsmedel är vattencementtalet (v_{ct}), dvs koncentrationen av fasta partiklar i cementsuspensionen.
- * en annan viktig faktor är den specifika ytan, dvs malningsgraden hos cementpartiklarna.

- * bland tillsatser erhålls den mest signifikanta förändringen av reologin genom tillsats av superplastizicers. Dock måste poängteras att verkningstiden är begränsad.
- * de reologiska egenskaperna är tidsberoende, dvs de förändras (ökar) under hydratationen.
- * den dynamiska flytgränsen är i stort sett konstant tills den initiella härdningen börjar då en hastig ökning sker.
- * viskositeten ökar kontinuerligt från start tills en "platå" nås där den förblir konstant fram till den initiella härdningen.
- * den dynamiska flytgränsen för Mikrocement (med tillsatser) är i storleksordningen 0.5 - 25 Pa.
- * den initiella viskositeten för Mikrocement (med tillsatser) är i storleksordningen 10 - 250 mPa s.

Det bör också nämnas att viskosimetern är ett ypperligt instrument för att bestämma den tidpunkt då härdningen börjar. Instrumentet är mycket känsligt och registrerar även små förändringar under hydratiseringen.

REFERENSER

Aignesberger, A., Kern, A. (1981). Use of melamine-based superplasticizer as a water reducer. ACI Special Publication SP-68.

Aitcin, P.C. Ballivy, G. Parizeau, R. (1984). The use of condensed silica fume in grouts. Innovative Cement Grouting. ACI Publication SP-83, Detroit.

Asaga, K. Roy, D.M. (1980). Rheological properties of cement mixes: IV Effects of superplasticizers on viscosity and yield stress. *Cement and Concrete Research*, Vol. 10, pp. 287-295.

Banfill, P.F.G. (1981). A viscometric study of cement pastes containing superplasticizers with a note on experimental techniques. *Magazine of Concrete Research*. Vol 33, No. 114. pp. 37-47.

Banfill, P.F.G, Kitching, D.R. (1990) Use of a controlled stress rheometer to study the yield stress of oilwell cement slurries. Banfill (ed), *Rheology of Fresh Cement and Concrete*. Proc. Int. Conf, Liverpool, UK.

Banfill, P.F.G. (1990). The Rheology of Cement Paste: Progress since 1973. RILEM.

Banfill, P.F.G. (Ed.) (1990). *Rheology of Fresh Cement and Concrete*. E.& F.N.Spon, London.

Barnes, H.A. Hutton, J.F. Walters, K. (1989). *An introduction to rheology*. Elsevier.

Barnes, H.A. Carnali, J.O. (1990). The vane-in-cup as a novel rheometer geometry for shear thinning and thixotropic materials. *Journal of Rheology*, 34(6), 841-866.

Bingham, E.C. (1922). *Fluidity and plasticity*. McGraw-Hill, New York.

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

Bhatty, J.I. Banfill, P.F.G. (1984). A viscometric method of monitoring the effect of retarding admixtures on the setting of cement paste. *Cement and Concrete Research*, Vol. 14, pp. 64-72.

Bhatty, J.I. Banfill, P.F.G. (1982). Sedimentation behaviour of cement pastes subject to continuous shear in rotational viscometers. *Cement and Concrete Research*, Vol. 12, pp. 69-78.

Börgesson, L. Fredriksson, A. (1990). Influence of vibrations on the rheological properties of cement. Banfill (ed), *Rheology of Fresh Cement and Concrete*. Proc. Int. Conf, Liverpool, UK.

Czernin (1959). "Cement Chemistry and Physics for Civil Engineers".

Deere, D.U. (1982). Cement-bentonite grouting for dams. Grouting in geotechnical engineering. Proceedings American Society of Civil Engineers, ASCE, New Orleans.

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

Domone, P.I. Thurairatnam, H (1990). The relationship between early age property measurements on cement pastes. Banfill (ed), *Rheology of Fresh Cement and Concrete*. Proc. Int. Conf, Liverpool, UK.

Fell, R. Hawkins, G. O'Keefe, L. (1989). Cement grout and permeability of dam foundations. ICSMFE, Rio de Janeiro.

Hattori, K. (1979). Experiences with mighty superplasticizers in Japan. ACI Special Publication SP-62.

Haimoni, A. Hannant, D.J. (1988). Developments in the shear vane test to measure the gel strength of oilwell cement slurry. *Advances in Cement Research*, Vol.1, No.4.

Houlsby, A.C. (1990). Construction and design of cement grouting - A guide to grouting in rock foundations. John Wiley & Sons, Inc.

Håkansson, U. Hässler, L. Stille, H. (1991). A Technique for Measuring the Rheological Properties of Injected Grout. Swedish Rock Engineering Research Foundation (BeFo), 241:1/91, Stockholm. (In Swedish).

Håkansson U, Hässler L, Stille H (1992). Rheological Properties of Microfine Cement Grouts with Additives. ASCE Specialty Conference on Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics, New Orleans 25-28 Feb.

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

Hässler, L. (1991) Grouting of Rock-Simulation and Classification. Ph D thesis, Dept. of Soil and Rock Mechanics, Royal Institute of Technology, Stockholm.

Keating, J. Hannant, D.J. (1990) The use of the shear vane to measure the gel strength and dynamic yield strength of oilwell cement slurries at high temperature and pressure. Banfill (ed), *Rheology of Fresh Cement and Concrete*. Proc. Int. Conf, Liverpool, UK.

Keating, J. Hannant, D.J. (1989) The effect of rotation rate on gel strength and dynamic yield strength of thixotropic oil well cements measured using a shear vane. *Journal of Rheology*, 33(7), 1011-1020.

Kellingray, D.S. Greaves, C. Dallimer, R.P. (1990). High temperature and high pressure rheology of oilwell cement slurries. Banfill (ed), *Rheology of Fresh Cement and Concrete*. Proc. Int. Conf, Liverpool, UK.

Kitching, D.R. (1989). Yield stress of an oilwell cement slurry using a controlled stress rheometer. Ph.D. Thesis, University of Liverpool, U.K.

Lapasin, R. Papo, A. Rajgelj, S. (1983). The phenomenological description of the thixotropic behaviour of fresh cement pastes. *Rheologica Acta*, 22:410-416.

Lapasin, R. Papo, A. Rajgelj, S. (1983). Flow behaviour of fresh cement pastes. A comparison of different rheological instruments and techniques. *Cement and Concrete Research*, Vol. 13, pp. 349-356.

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

Lombardi, G. (1985). The role of cohesion in cement grouting of rock. 15:e Congres des Grandes Barrage. Lausanne (ICOLD).

Malhotra, V.M. (1989). Superplasticizers: A global review with emphasis on durability and innovative concretes. ACI Special publication SP-119, Ottawa.

Mannheimer, R.J. (1990). Laminar and turbulent flow of cement slurries in large diameter pipe - a comparison with laboratory viscometers. Banfill (ed), *Rheology of Fresh Cement and Concrete*. Proc. Int. Conf, Liverpool, UK.

Mannheimer, R.J. (1983). Effect of slip on flow properties of cement slurries. *Oil and Gas J.*, Dec., 144-147.

Massey, B.S. (1979). Mechanics of fluids. 4th edition, Van Nostrand Reinhold, England.

Nguyen, Q.D. (1983). Rheology of concentrated bauxite residue suspensions. Ph.D thesis, Monash Univ. Australia.

Nguyen, Q.D. Boger, D.V (1983). Yield stress measurements for concentrated suspensions. *Journal of Rheology*, 27(4), 321-349.

Nguyen, Q.D. Boger, D.V (1985:a). Direct yield stress measurement with the vane method. *Journal of Rheology*, 29(3), 335-347.

Nguyen, Q.D. Boger, D.V (1985:b). Thixotropic behaviour of concentrated bauxite residue suspensions. *Rheologica Acta*, 24:427-437.

Nguyen, Q.D. Boger, D.V (1987). Characterization of yield stress fluids with concentric cylinder viscometers. *Rheologica Acta*, 26:508-515.

Orban, J.A. Parcevaux, P.A. Guillot, D.J. (1986). Specific mixing energy: a key factor for cement slurry quality. SPE 15578, in 61st Annual Conference of the Society of Petroleum Engineers, New Orleans 1-5.

Onofrei, M. Gray, M.N. Keil, L.D. Pusch, R. (1989). Studies of cement grouts and grouting techniques for sealing nuclear fuel waste repository. Mat.Res.Soc. Symp. Proc. 137, pp 349-358.

Onofrei, M. Gray, M. Pusch, R. Börjesson, L. Karnland, O. Shenton, B. Walker, B. (1992). Sealing properties of cement based grout materials. Stripa Project, Technical report 92-28, SKB, Stockholm, Sweden.

Ramachandran, V.S. (Ed). "Concrete Admixtures Handbook".

Roy, D.M. Asaga, K. (1979). Rheological properties of cement mixes: III Effects of mixing procedures on viscometric properties of mixes containing superplasticizers. *Cement and Concrete Research*, Vol. 9, pp. 731-739.

Sellgren, A. (1982). Rheological analysis of industrial slurries. Report, Series A:67, Dept. of Water Resources Engineering, University of Luleå.

Shaughnessy III, R. Clark, P.E. (1988) The rheological behaviour of cement pastes. *Cement and Concrete Research*, Vol. 18, pp. 327-341.

Stille, H. Gustafsson, G. Håkansson, U. Olsson, P. (1993). Experiences from the grouting of the section 1-1400 m of the Äspö-tunnel. Progress Report 25-92-19, SKB - Äspö Hard Rock Laboratory.

Tattersall, G.H. Banfill, P.F.G. (1983). The rheology of fresh concrete. Pitman.

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

Vom Berg, W. (1979). Influence of specific surface and concentration of solids upon the flow behaviour of cement pastes. *Magazine of Concrete Research*. Vol 31, No. 109. pp. 211-216.

Wallner, M. (1976). Propagation of sedimentation stable cement pastes in jointed rock. Rock Mechanics and Waterways Construction, University of Aachen, BRD.

Weaver, K. (1991). Dam foundation grouting. American Society of Civil Engineers, ASCE.

Ziming, W. Daneng, H. Yaosheng, X. (1990). Investigation of the rheological properties and groutability of fresh cement pastes. Banfill (ed), Rheology of Fresh Cement and Concrete. Proc. Int. Conf, Liverpool, UK.

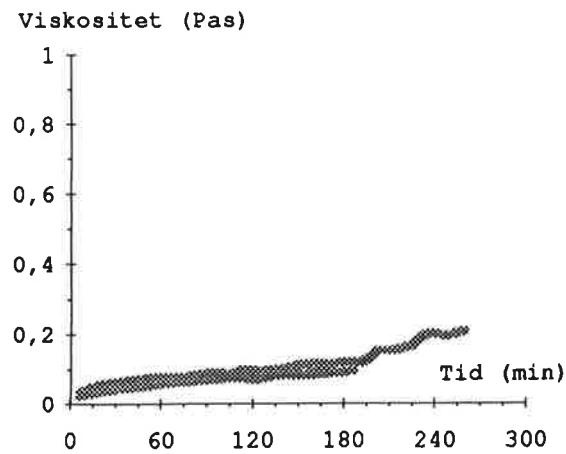
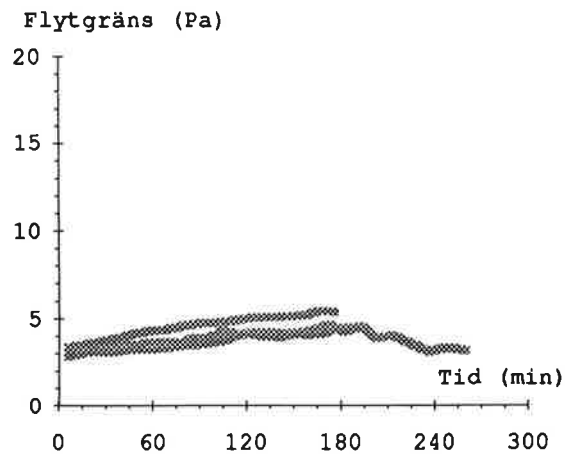
BILAGA 1

Resultat av viskosimeter-mätningar

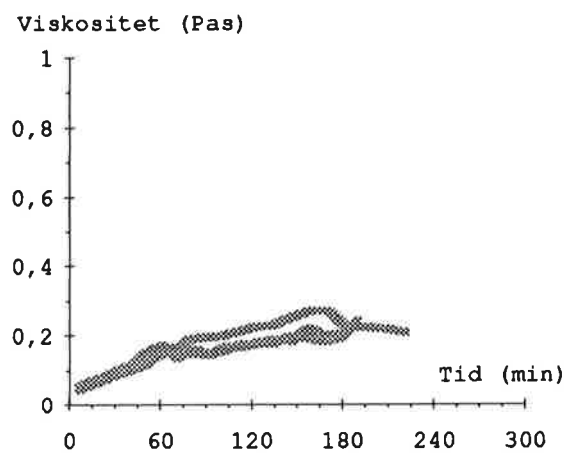
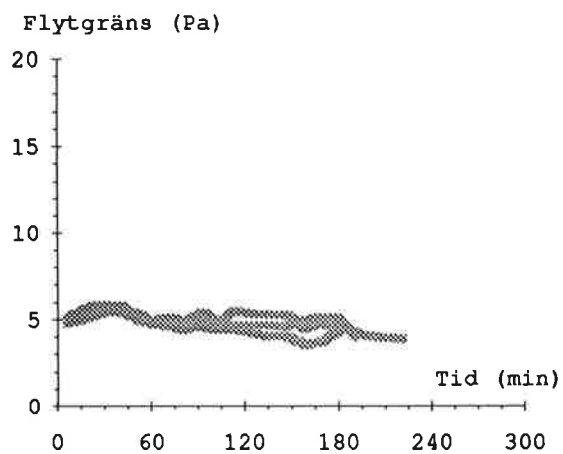
II:1	Referensbruk
II:2	Bruk med reducerat vct
II:3	Finkorniga bruk
II:4	Bruk med flytmedel
II:5	Bruk med reducerat vct och flytmedel
II:6	Bruk med bentonit
II:7	Bruk med silika-stoft
II:8	Bruk med vattenglas
II:9	Bruk med kalcium-klorid
II:10	Kylda bruk

II:1 - Referensbruk utan tillsatser

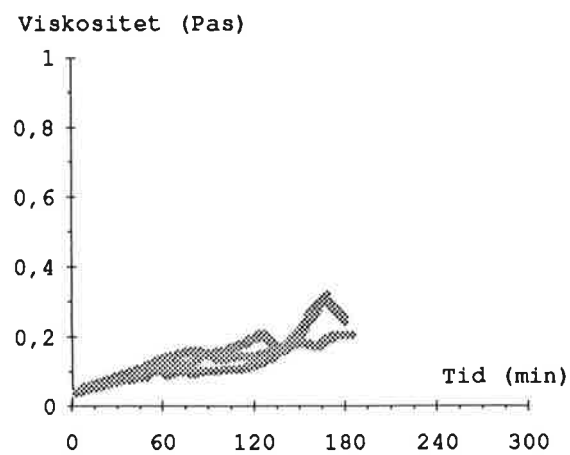
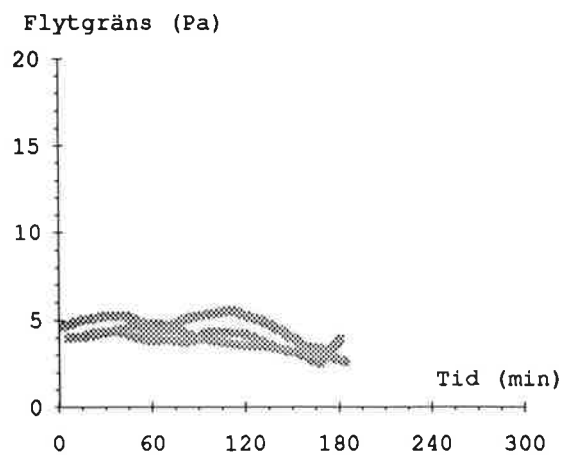
Cementa Degerhamn vct 0.8



Microdur P-F vct 1.0

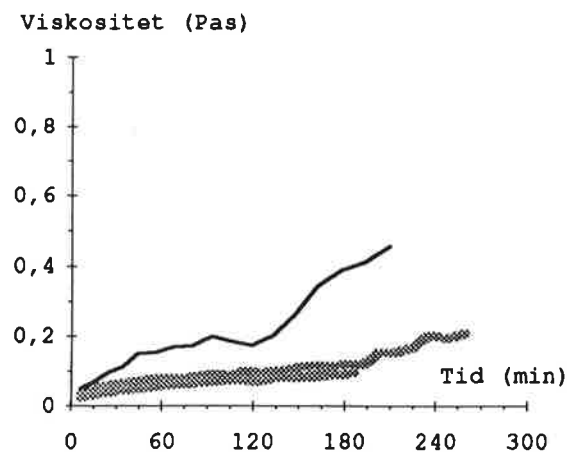
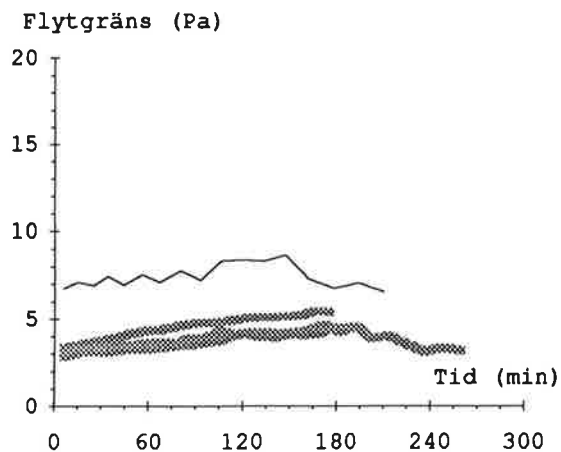


Spinor A16 vct 1.0

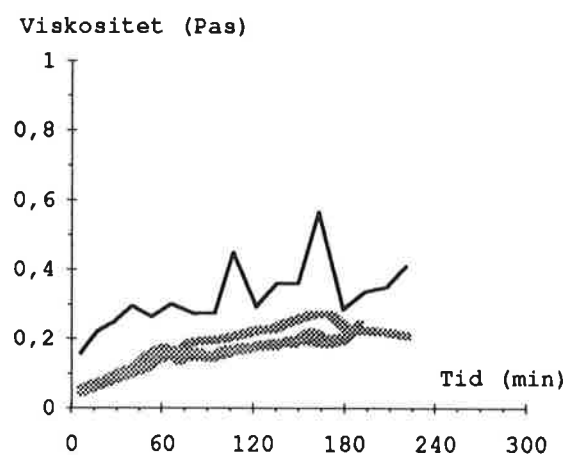
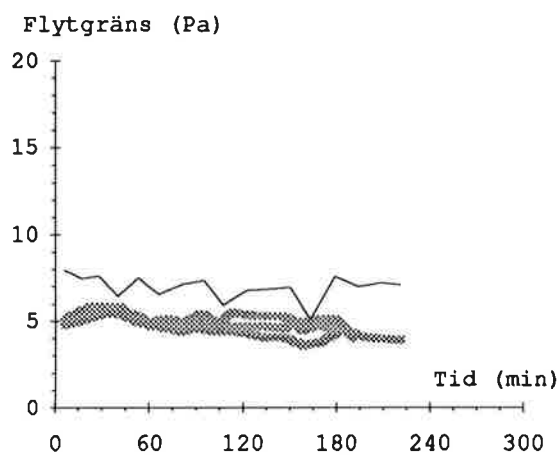


II:2 - Bruk med reducerat w/c samt referensbruk

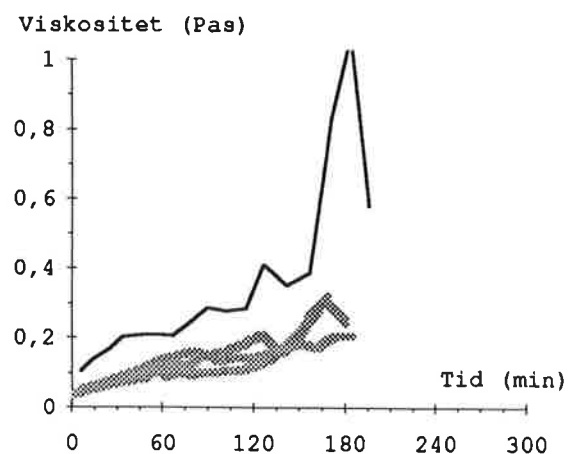
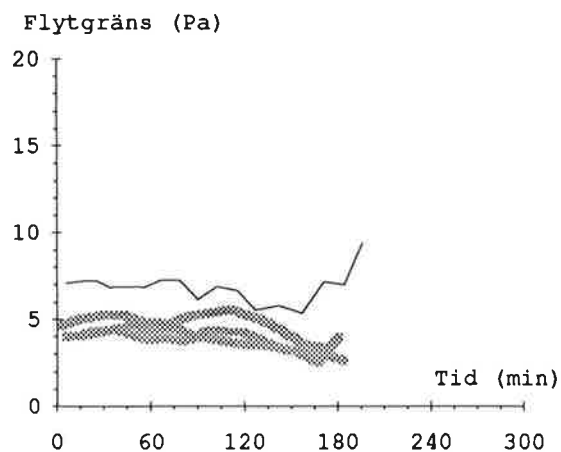
Cementa Degerhamn vct 0.6 (Referensblandning vct 0.8)



Microdur P-F vct 0.8 (Referensblandning P-F vct 1.0)

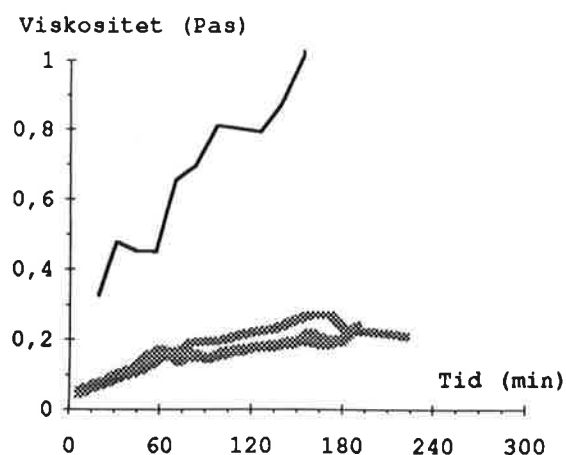
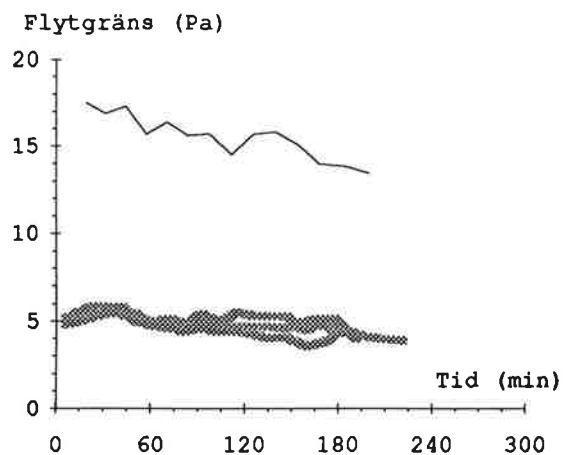


Spinor A16 vct 0.8 (Referensblandning A16 vct 1.0)

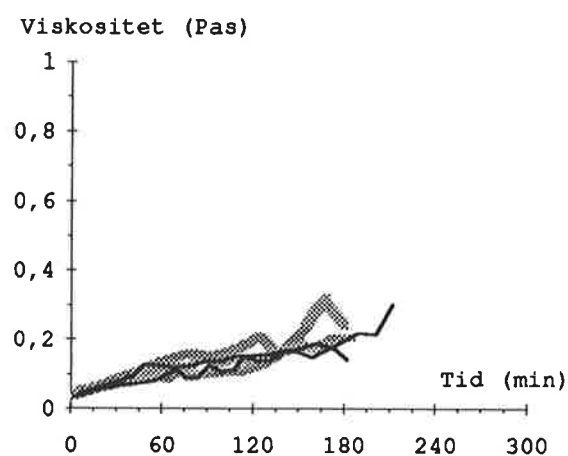
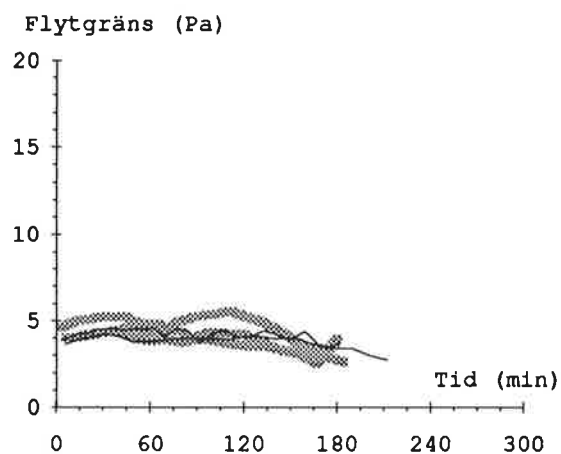


II:3 - Finkorniga bruk samt referensbruk

Microdur P-U (Extra finkornig) vct 1.0 (Referensblandning P-F vct 1.0)

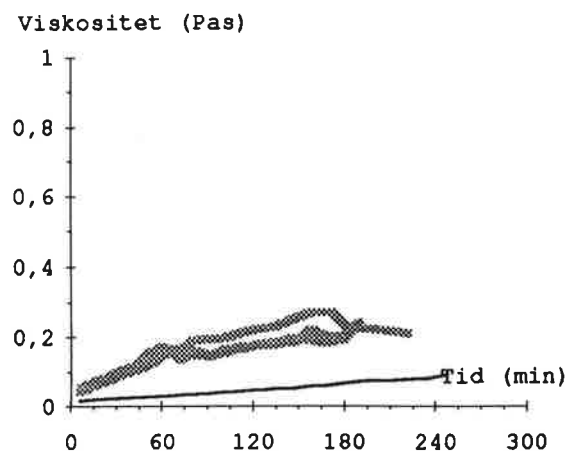
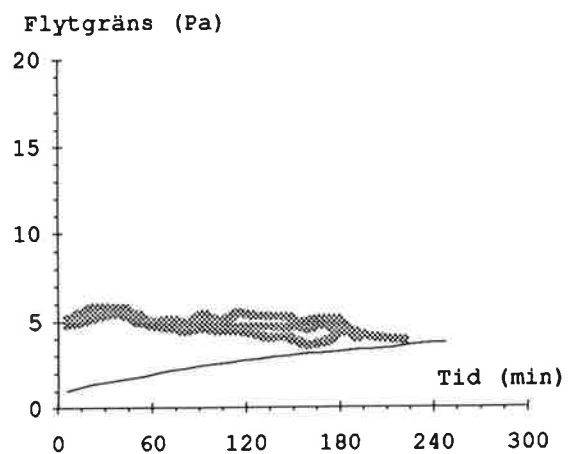


Spinor A12 (Finkornig) vct 1.0 (Referensblandning A16 vct 1.0)

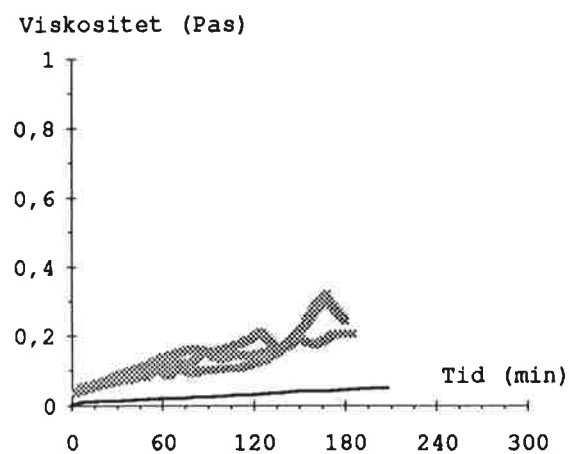
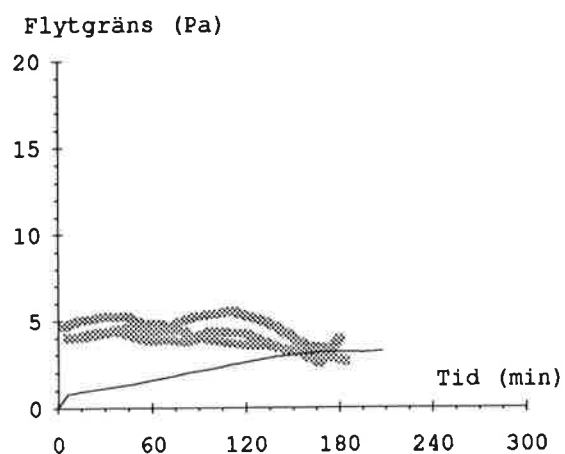


II:4 - Bruk med flytmedel i % av cementvikt samt referensbruk

Microdur P-F vct 1.0 och 1% flytmedel (Referensblandning P-F vct 1.0)

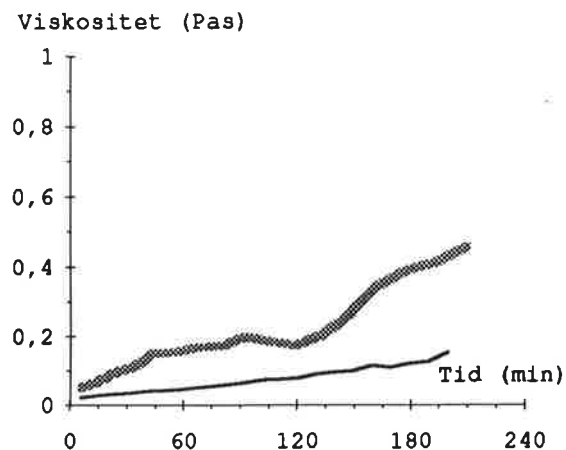
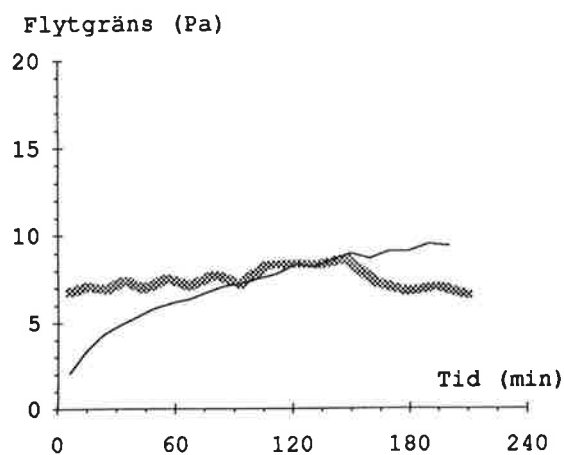


Spinor A16 vct 1.0 och 1% flytmedel (Referensblandning P-F vct 1.0)

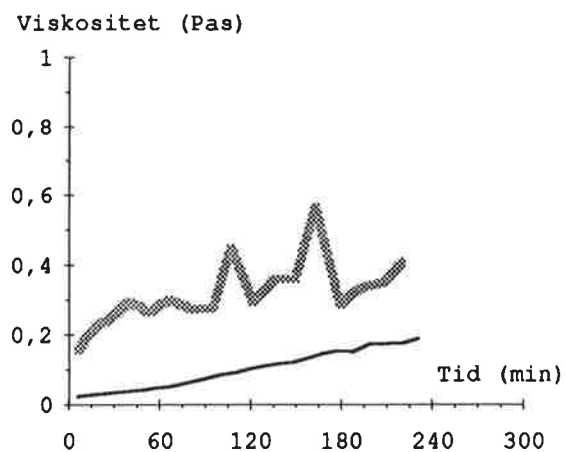
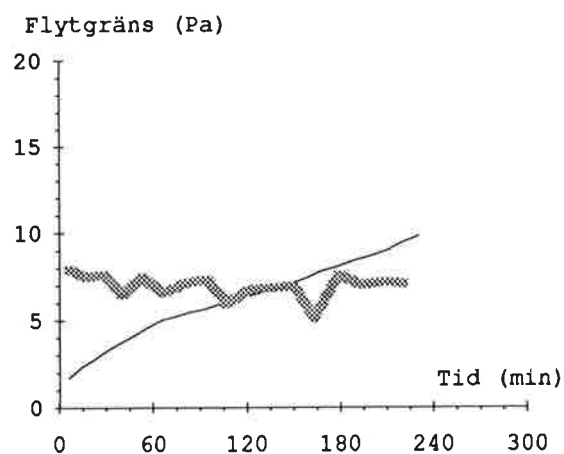


II:5 - Bruk med reducerat w/c och flytmedel i % av cementvikt
samt referensbruk

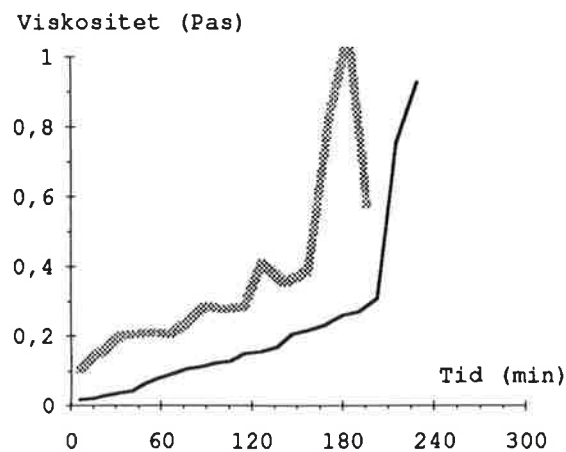
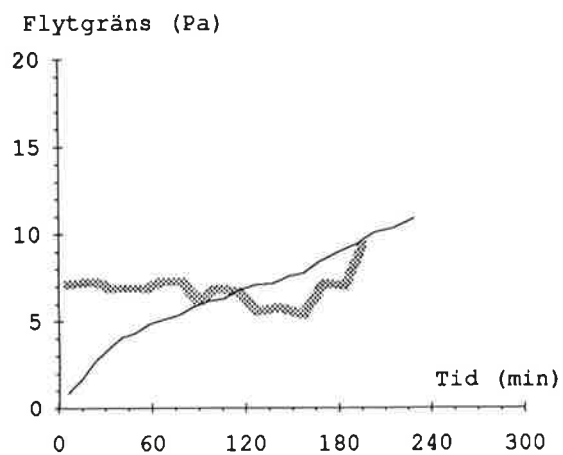
Cementa Degerhamn vct 0.6 och 1% flytmedel (Referensblandning vct 0.6)



Microdur P-F vct 0.8 och 1% flytmedel (Referensblandning P-F vct 0.8)

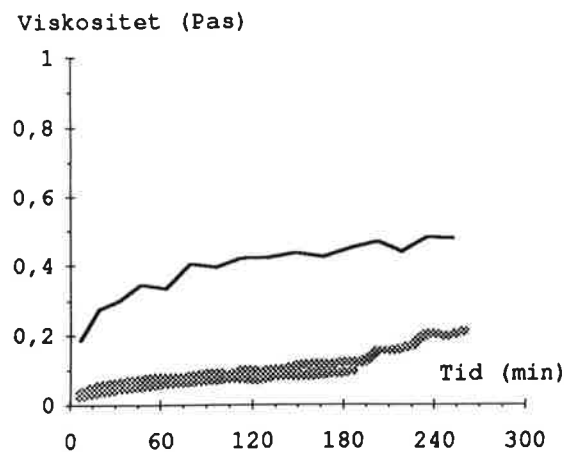
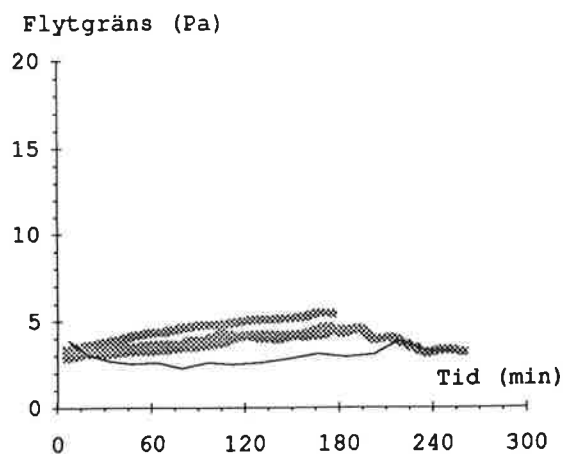


Spinor A16 vct 0.8 och 1% flytmedel (Referensblandning A16 vct 0.8)

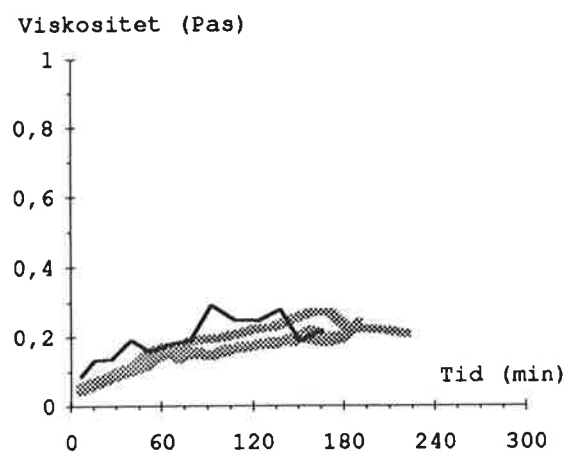
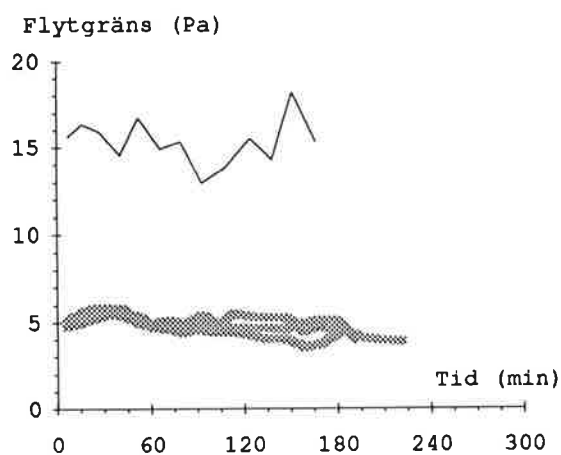


II:6 - Bruk med bentonit i % av vattenvikt samt
referensbruk

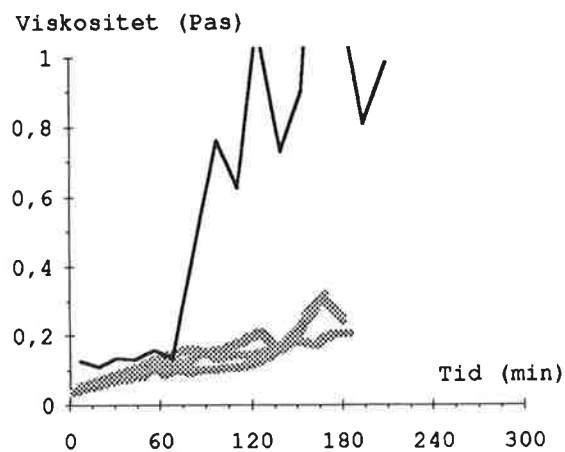
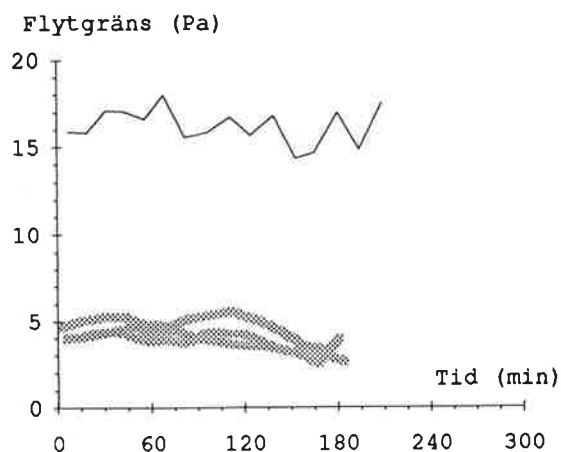
Cementa Degerhamn vct 0.8 och 1% bentonit (Referensblandning vct 0.8)



Microdur P-F vct 1.0 och 2% bentonit (Referensblandning P-F vct 1.0)

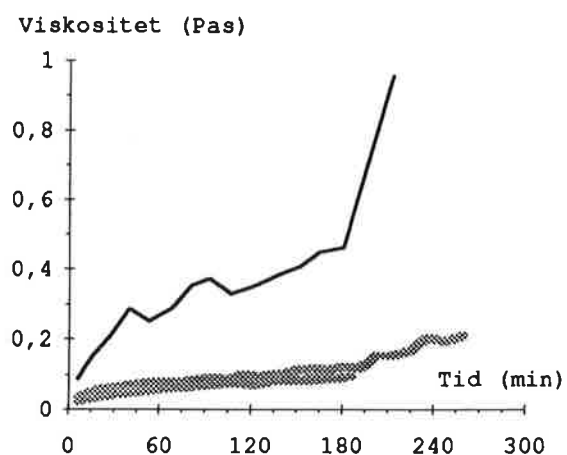
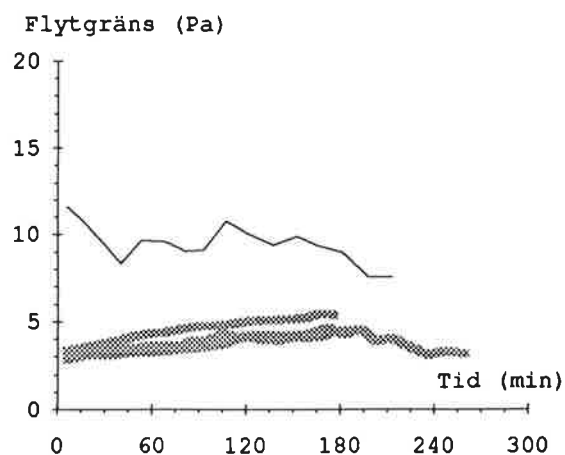


Spinor A16 vct 1.0 och 2% bentonit (Referensblandning A16 vct 1.0)

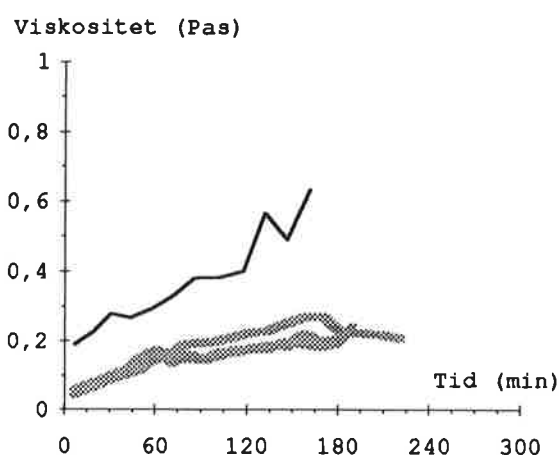
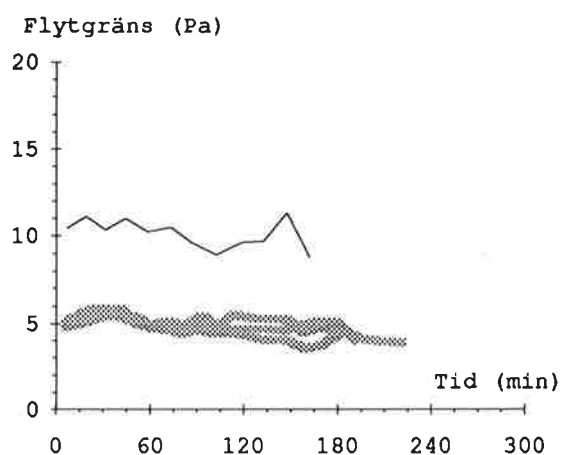


II:7 - Bruk med silika-stoft i % av vattenvikten samt referensbruk

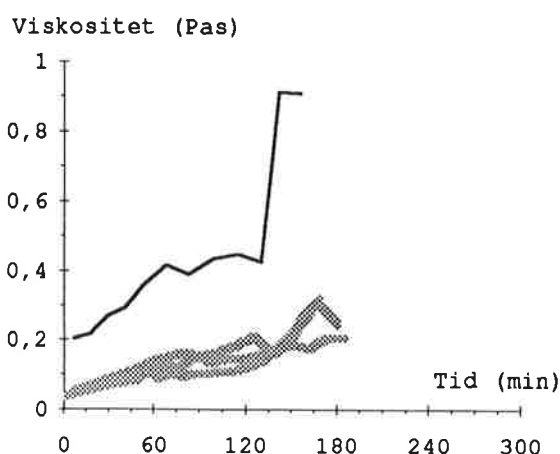
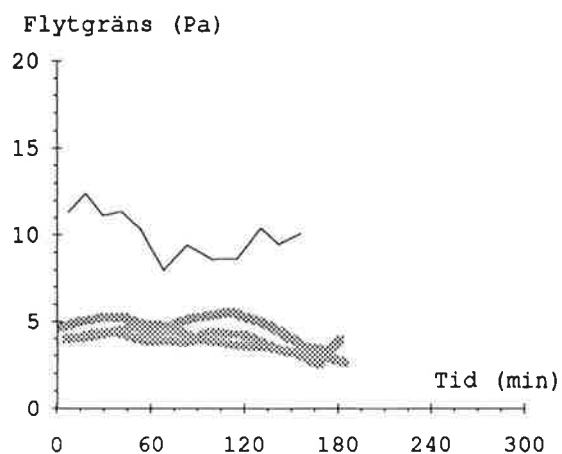
Cementa Degerhamn vct 0.8 och 10% silika-stoft (Referensblandning vct 0.8)



Microdur P-F vct 1.0 och 10% silika-stoft (Referensblandning P-F vct 1.0)

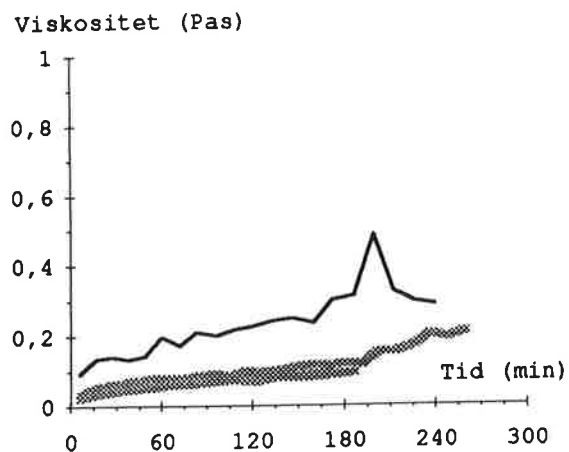
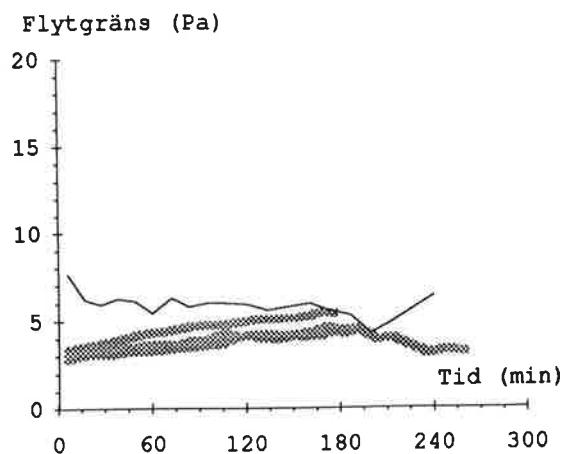


Spinor A16 vct 1.0 och 10% silika-stoft (Referensblandning A16 vct 1.0)

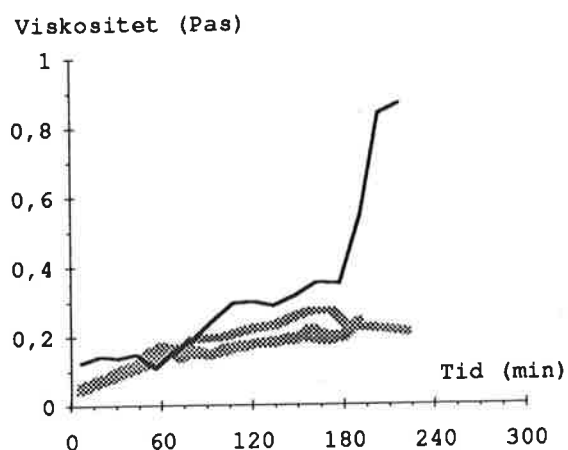
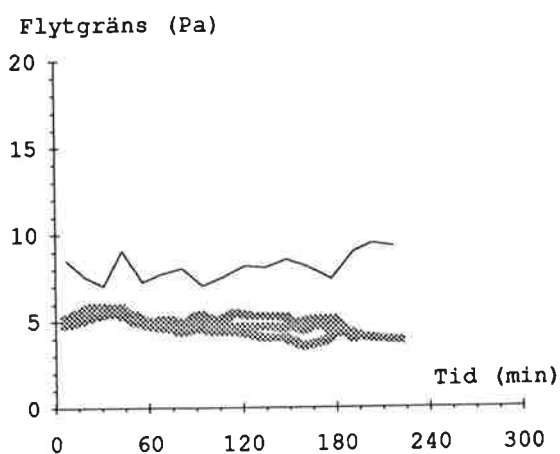


II:8 - Bruk med natriumsilikat i % av vattenvolymen samt referensbruk

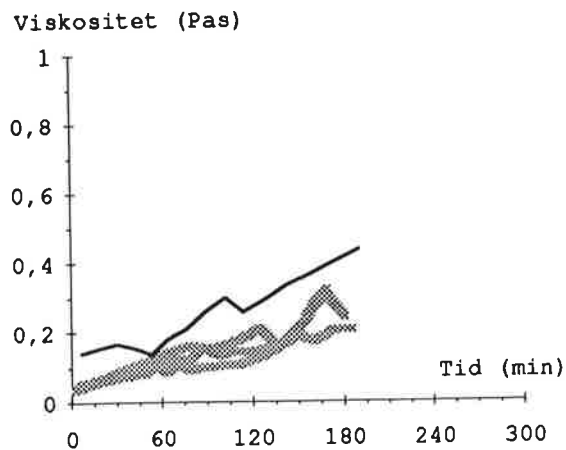
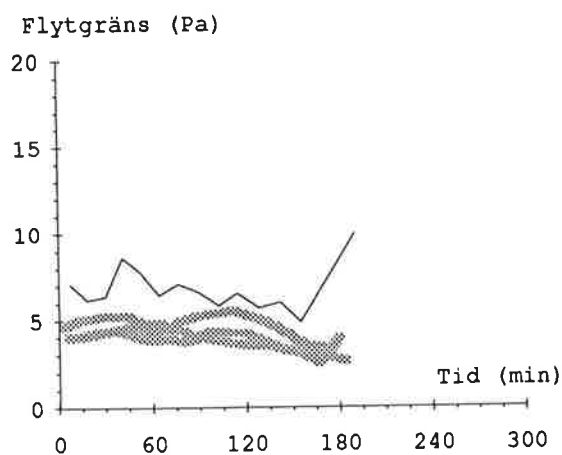
Cementa Degerhamn vct 0.8 och 2% vattenglas (Referensblandning vct 0.8)



Microdur P-F vct 1.0 och 2% vattenglas (Referensblandning P-F vct 1.0)

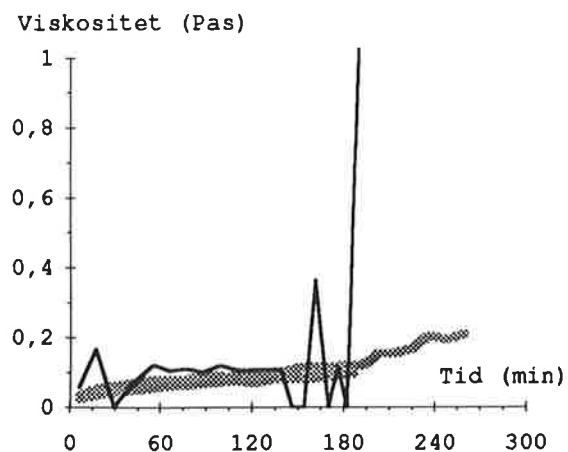
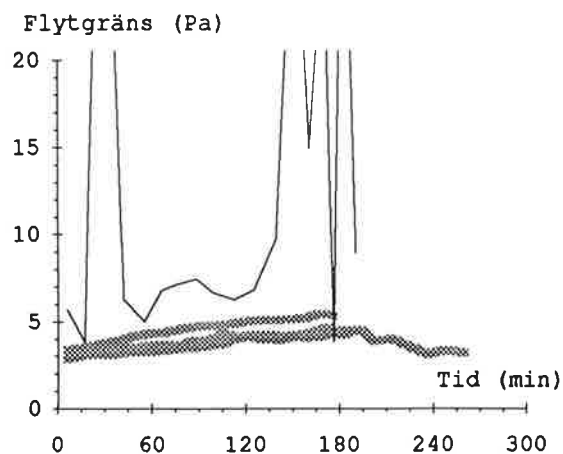


Spinor A16 vct 1.0 och 2% vattenglas (Referensblandning A16 vct 1.0)

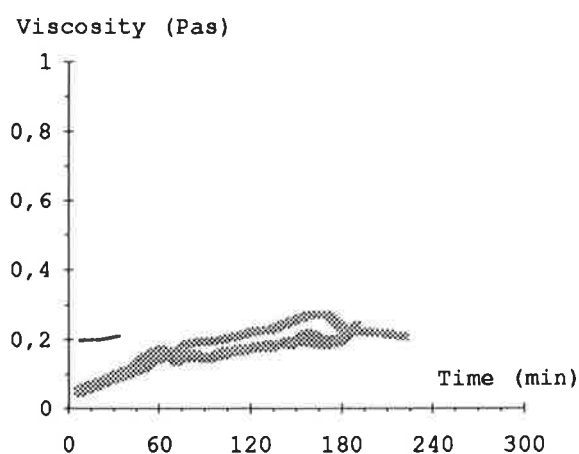
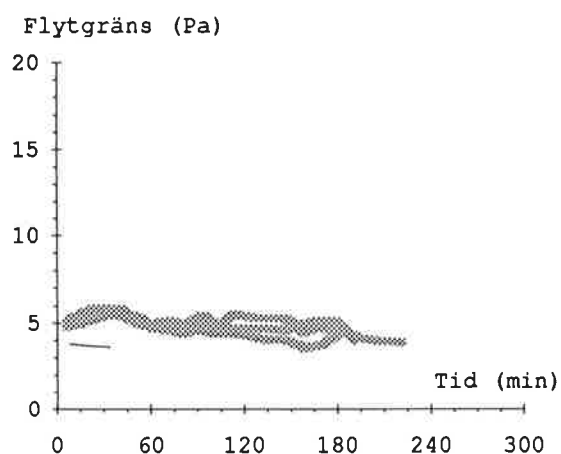


II:9 - Bruk med kalcium-klorid i % av cementvikt samt referensbruk

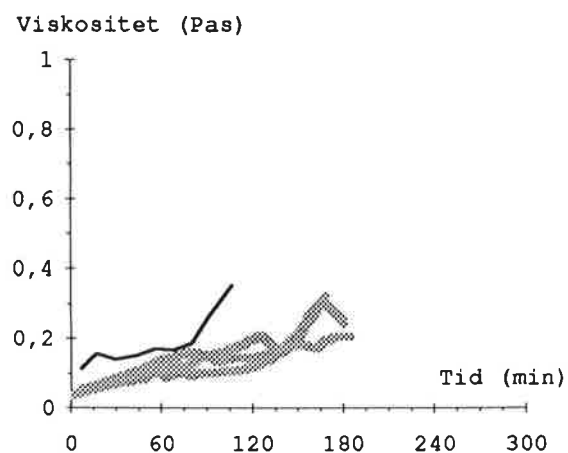
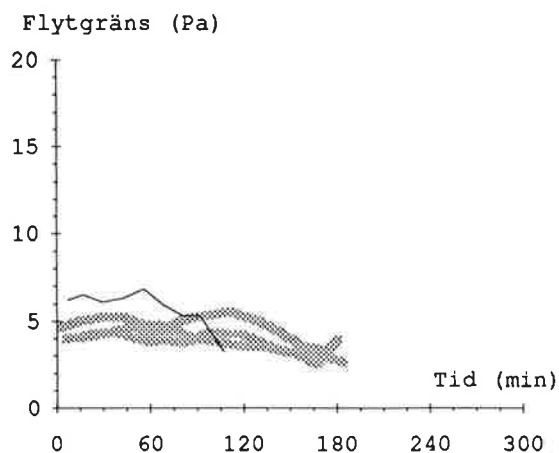
Cementa Degerhamn vct 0.8 och 10% kalcium-klorid (Referensblandning vct 0.



Microdur P-F vct 1.0 och 10% kalcium-klorid (Referensblandning P-F vct 1.0

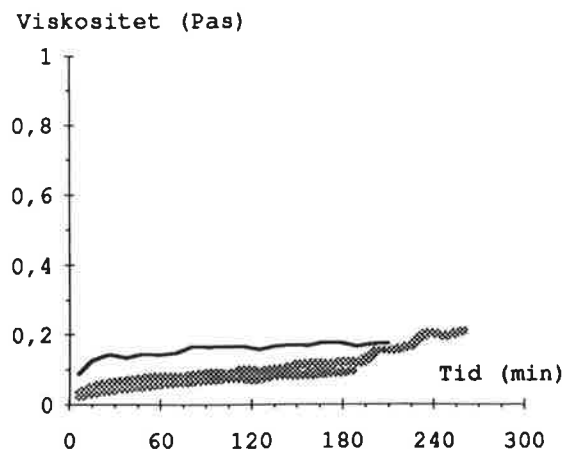
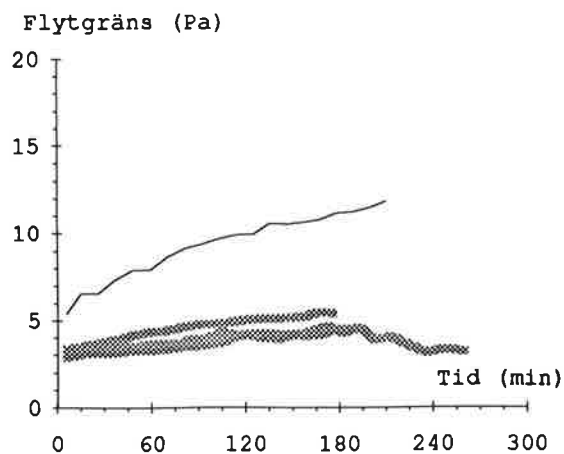


Spinor A16 vct 1.0 och 10% kalcium-klorid (Referensblandning A16 vct 1.0)

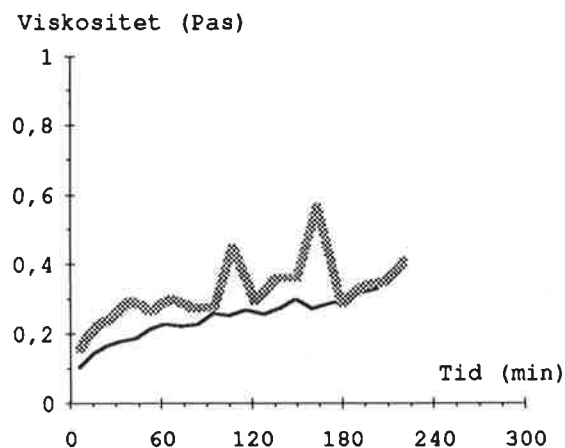
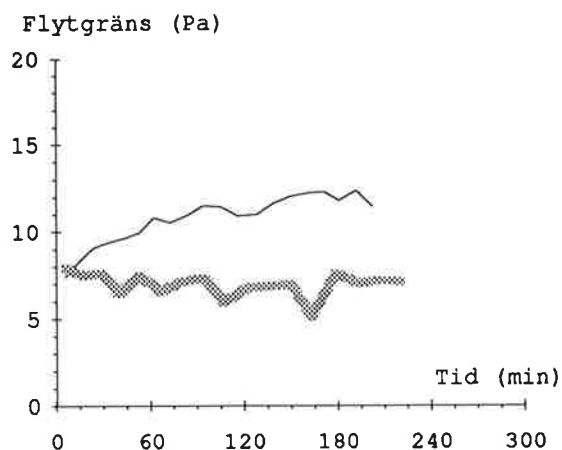


II:10 - Kyllda bruk med w/c 0.8 samt referensbruk

Cementa Degerhamn vct 0.8, 10°C (Referensblandning vct 0.8)



Microdur P-F vct 0.8, 10°C (Referensblandning P-F vct 0.8)



Spinor A16 vct 0.8, 10°C (Referensblandning A16 vct 0.8)

