

SKUMVÄTSKOR

VISKOSITET

OCH FLÖDESKARAKTÄRISTIK

RAPPORT RÄDDNINGSTJÄNSTAVDELNINGEN R53-168/96



**RÄDDNINGSG
VERKET**

SKUMVÄTSKOR VISKOSITET OCH FLÖDESKARAKTÄRISTIK

Rapporten har utarbetats av
Magnus Bobert, Henry Persson och Bror Persson
Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut, Borås

Författarna svara för innehållet i rapporten.

Räddningsverkets kontaktperson:
Sören Lundström, Enheten för metod och teknik
tfn dir 054-10 43 36, vx 054-10 40 00

1996 Statens räddningsverk, Karlstad
Räddningstjänstavdelningen
ISBN 91-88890-62-7

Beställningsnummer R53-168/96
1996 års utgåva

Foam concentrates- Viscosity and Flow Characteristics

Abstract

The main task with this project has been to establish a method to measure the flow characteristics of foam concentrates. The foam concentrates that are used today do not always have a constant viscosity but is rather dependent upon flow rate and the dimension of the suction hose, etc., i.e. they are non-Newtonian. This is a problem when it comes to dimensioning proportioning equipment and pipe systems.

The method presently used for measuring viscosity in the international standard for foam concentrates, ISO 7203, is not relevant when it comes to non-Newtonian liquids. The viscosity is measured indirectly by flowing the concentrate through a specified steel pipe. This represents only one point in a shear rate/shear stress diagram which is not enough for characterisation of a non-Newtonian liquid. The Cone and Plate viscometer, which is suggested to be used in the latest European draft standard, prEN 1568, is an apparatus in which it is possible to determine the viscosity at several shear rates and in the same working condition as in pipe flow.

Comparative tests with the Cone and Plate viscometer and flow tests in pipes show that it is possible to determine the so called rheological constants that fit an empiric model called the Herschel-Bulkley model in order to define the viscosity characteristics. The correlation between pressure drop calculations based on viscosity data from Cone and Plate and actual measured pressure drop in the pipes was very good.

Flow tests through orifices showed that test results with non-Newtonian liquids differ from tests with water, especially by a lower loss coefficient.

Similar flow tests through various components also showed a difference between non-Newtonian liquids and water but in this case the loss coefficient was higher.

By using the data, obtained from the Cone and Plate viscometer, to conduct some pressure drop calculations for some examples of application indicates the need of viscosity and flow characteristics for foam concentrates.

Key words: Foam concentrate, Proportioning equipment, Viscosity, non-Newtonian, Rheology

Innehållsförteckning

	Innehållsförteckning	3
	Sammanfattning	5
1	Introduktion och bakgrund	6
2	Teori	7
2.1	Viskositet	8
2.2	Rörströmning	8
2.3	Icke-Newtonska skumvätskor.....	9
2.4	Cone and Plate	10
2.5	Engångsmotstånd	11
3	Försöksutrustning	11
3.1	Cone and Plate viskosimeter	12
3.2	Rörströmningsutrustning	13
3.3	Utrustning för engångsmotstånd	13
3.4	Provade vätskor	15
4	Resultat	16
4.1	Resultat från Cone and Plate viskosimeter	16
4.2	Rörströmningsresultat	17
4.3	Jämförelse mellan Cone and Plate och rörströmning.....	18
4.4	Resultat från strypförsök	20
4.5	Resultat från försök med komponenter	22
5	Exempel på tillämpningar	28
6	Slutsatser och diskussion	35
	Teckenförklaring	37
	Referenser	38

Appendix A 39

Skumvätskor- Viskositet och flödeskaraktäristik

Sammanfattning

Alkoholresistenta (AR) skumvätskor som används idag har inte alltid en konstant viskositet utan den beror av flöde och ledningsdimension, dvs de är icke-Newtonska. Målet med detta projekt har varit att karaktärisera skumvätskornas strömningsegenskaper som grund för beräkning av flödeskaraktäristik och strömningsförluster.

Skumvätskornas icke-Newtonska egenskaper är ett problem när det gäller att dimensionera inblandningsutrustning och rörsystem. Föreslagna provningsmetoder för flödeskaraktäristik i t ex ISO 7203 ger inte relevant data.

Försök har i detta projekt utförts med en så kallad Cone and Plate viskosimeter och resultaten har sedan jämförts med resultat från försök med rörströmning. Vidare har försök med engångsmotstånd i rörsystem utförts för att påvisa eventuella skillnader i förluster jämfört med Newtonska vätskor. Engångsmotstånden delades upp i dels försök med olika strypningar och dels försök med krökar, T-rör och sätesventiler.

Korrelationen mellan Cone and Plate mätningar och rörströmningförsök var mycket god vilket betyder att denna typ av viskosimeter är relevant att använda för AR skumvätskor. Vätskornas flödeskaraktär kan bestämmas så att dessa data kan användas för beräkning av tryckförluster i skumvätskesystem.

Tryckfallsmätningar med AR-skumvätskor och vatten visade att skumvätskorna ger avsevärt lägre förluster över strypbrickor medan förhållandet för övriga komponenter mestadels blev det motsatta.

Ett antal exempel ges också på hur viskositetsdata kan användas vid dimensionering av rörsystem och riskerna med att utgå från data som gäller för t ex vatten och syntetskumvätskor.

Nyckelord: Skumvätska, inblandningsutrustning, viskositet, icke-Newtonsk

1 Introduktion och bakgrund

Alkoholbeständiga skumvätskor som används för släckning av brand i alkoholer eller andra polära produkter har oftast hög viskositet och har dessutom en icke-Newtonska karaktär. När dessa används i konventionell inblandningsutrustning fås i många fall ej den inblandning som önskas. Problemet är att man inte har grepp om strömningsegenskaperna i dessa fall. Skumvätskorna kan antingen vara syntet- eller proteinbaserade, men båda typer innehåller polymerer vilket ger vätskorna deras icke-Newtonska karaktär. Skumvätskor som saknar denna polymertillsats, t ex vanliga detergent eller AFFF-skumvätskor, har dock nästintill helt Newtonska egenskaper.

Den utrustning som ofta används i dagsläget för att bestämma viskositetsvärden på skumvätskorna är en s k Brookfield LVT viskosimeter. Denna arbetar med en cylinderformad kropp som man låter rotera i vätskan. Med kännedom om geometrin och vridmomentet på cylindern kan sedan viskositeten beräknas. Denna metod ger viskositetsvärden vid mycket små skjuvhastigheter ($<15 \text{ s}^{-1}$) som är av en helt annan storleksordning än vid rörströmning i t ex en sugslang. Vid rörströmning i detta projekt och vid praktisk användning handlar det om skjuvhastigheter från ca 50 s^{-1} till ca 1000 s^{-1} . Resultaten från en "Brookfieldmätning" kan därför endast användas som ett relativt mått men säger egentligen ingenting om strömningen i verkliga applikationer.

Ett annat problem är att det inte finns någon lämplig metod att bestämma "kritisk" viskositet hos en skumvätska. Att använda sig av Brookfieldmetoden är som nämnts inte relevant eftersom det inte säger något om flödet vid aktuella skjuvhastigheter. Den metod (UNI LUT) som nu ingår i ISO-standarden 7203 och också utgjort förslag till kommande EN-standard består av en trycktank med skumvätska och ett standardiserat rör där man låter vätskan flöda. Flödet, vid ett visst tryck och vid lägsta användningstemperatur (LUT), får då inte underskrida flödet hos en Newtonsk vätska med en kinematisk viskositet på $200 \text{ mm}^2/\text{s}$. Detta förfaringssätt är dock inte relevant då viskositeten, och därmed flödet, beror av skjuvhastigheten.

Den vanligaste inblandningsutrustningen för räddningstjänsten utgörs av skuminjektorer. Dessa består i princip av ett munstycke och en diffusor som är kopplad i serie med brandslangen. Vattenflödet skapar då ett undertryck i munstycket och detta undertryck suger upp skumvätska som på så sätt ger den inblandning som krävs. Energin som skapar detta undertryck tas från det tryckfall som uppstår över injektorn. Kravet är att inblandningen skall vara 3 % eller 6 % beroende på typ av brand. För att karaktärisera en injektor talar man om dess sugkaraktäristik. Med sugkaraktäristik menar man sambandet mellan alstrat undertryck och skumvätskeflödet. Ju mer skumvätska injektorn suger in desto mindre undertryck klarar den att upprätthålla [1].

För att få rätt inblandning används olika sugslangar med strypningar eller ventiler. Det gäller då att veta tryckfallet och flödet för en viss skumvätska och med en viss sugslang, så att man tillsammans med injektorn får rätt inblandning. Sugslangens karaktäristik kallas anläggningskaraktäristik och beskriver sambandet mellan tryckfallet och skumvätskeflödet. Tryckfallet är summan av tryckfallen p_g a friktion i röret, över strypningar och tryckfallet p_g a en eventuell höjdskillnad.

I vissa fall krävs det att skumvätskan måste ledas i ett rörsystem med ett antal s_k engångsmotstånd, dvs rörkrökar, T-kopplingar, area förändringar, ventiler mm, innan den når inblandningsstället. Ett exempel är den s_k ESS- mixern som består av en vattenmotor som drivs av släckvattnet [1]. Vattenmotorn driver i sin tur en eller två skumvätskepumpar som pumpar in skumvätskan i systemet. För att åstadkomma detta krävs ett rörsystem med ett antal engångsmotstånd. För att få rätt inblandning måste man känna till hur stora tryckförluster det aktuella rörsystemet ger och dimensionera efter detta. Ett annat exempel kan vara sprinklersystem där skumvätskan av praktiska skäl inte kan placeras nära inblandningsstället. Om sprinklerhuvudena har individuell utlösning blir flödet och därmed viskositeten beroende av hur många sprinkler som har löst ut. Ytterligare ett exempel på när skumvätskornas flödeskaraktäristik är av intresse är storskalig släckutrustning. I dessa fall handlar det om totalflöden på 10000 l/min vilket innebär stora skumvätskeförråd, som av praktiska skäl är uppdelade i mindre tankar. Det krävs då ett rörsystem som sammanbinder och transporterar skumvätskan till inblandningsutrustningen. Detta ger upphov till tryckfall som är beroende av skumvätskans flödeskaraktäristik.

Detta projekt har haft till syfte att testa metoder för att karaktärisera skumvätskors strömningsegenskaper, dels då det gäller dess viskösa egenskaper och dels när det gäller tryckförluster i s_k engångsmotstånd. I SP Rapport 1995:10 [2] redogjordes för en metod att bestämma viskositetsdata med hjälp av rörströmning. Där föreslogs även att en s_k Cone and Plate viskosimeter skulle kunna vara lämplig för att ta fram viskositetsdata. Dessa båda metoder har nu testats och jämförts. Resultaten är av intresse dels för pågående standardiseringsarbete och dels för tillverkare av såväl skumvätska som av inblandningsutrustning. Dessutom kan det behövas en viss förståelse för de problem som uppstår då AR skumvätskor används ute på fältet.

2 Teori

För att kunna förstå och utnyttja resultaten från detta arbete krävs en del teori som beskriver sambanden och de fenomen som skumvätskorna uppvisar. Dessutom är det vissa begrepp och definitioner som bör kännas till för att skumvätskornas flödesegenskaper skall kunna utvärderas [2,3,4,5]. I SP Arbetsrapport 1996:42 [11] finns en mer omfattande beskrivning av de teoretiska aspekterna.

2.1 Viskositet

Då det handlar om rörströmning och geometrier med utsträckning i flödesriktningen är viskositeten hos en vätska en viktig parameter. Viskositeten anger vätskans förmåga att motsätta sig skjuvspänning (t). Newton fann att skjuvspänningen i många fall är proportionell mot hastighetsgradienten vinkelrätt mot rörelseriktningen hos vätskan, dvs skjuvhastigheten. Alltså:

$$t = m\dot{\gamma} \text{ eller} \\ m = \frac{t}{\dot{\gamma}} \quad (1)$$

där m är den dynamiska viskositeten och $\dot{\gamma}$ är skjuvhastigheten.

Den dynamiska viskositeten har enheten kg/ms eller Pas. En annan enhet som ofta förekommer är cP (centipoise). Sambandet mellan dessa enheter är $1\text{cP}=1\cdot 10^{-3}\text{ Pas}$.

2.2 Rörströmning

Då det gäller rörströmning ger skjuvspänningen upphov till tryckfall i röret. Detta kan uttryckas med formeln

$$t_w = \frac{\Delta p R}{2L} \quad (2)$$

där Δp är tryckfallet, R är radien och L är längden. Skjuvhastigheten är beroende av flödet och dimensionen på röret enligt

$$\dot{\gamma}_w = \frac{4Q}{\pi R^3} \quad (3)$$

där Q är flödet

Man får alltså ett högre tryckfall ju högre skjuvspänningen är och en högre skjuvhastighet ju högre flödet är. Om tryckfallet (eller skjuvspänningen) plottas som funktion av flödet (eller skjuvhastigheten) får man en rät linje och förhållandet mellan dessa är konstant. De vätskor som följer detta samband kallas Newtonska vätskor. I många fall är sambandet inte så enkelt utan viskositeten, och därmed kurvans lutning, beror även av skjuvhastigheten. Dessa vätskor kallas följaktligen icke-Newtonska vätskor.

2.3 Icke-Newtonska skumvätskor

Som nämndes i kapitel 2.1 är viskositeten hos en vätska en parameter som beskriver vätskans flytegenskaper och enligt Newtons modell är denna en konstant. Nu är det emellertid så att detta inte gäller för alla vätskor utan viskositeten, dvs kvoten mellan skjuvspänningen och skjuvhastigheten, varierar med skjuvhastigheten (även temperatur och tryck). Dessa vätskor kallas icke-Newtonska och kan ha olika karaktäristik. I fallet med AR-skumvätskor har det visat sig [2] att sambandet mellan skjuvspänningen och skjuvhastigheten ofta kan beskrivas med en modell som kallas Herschel Bulkley [4]:

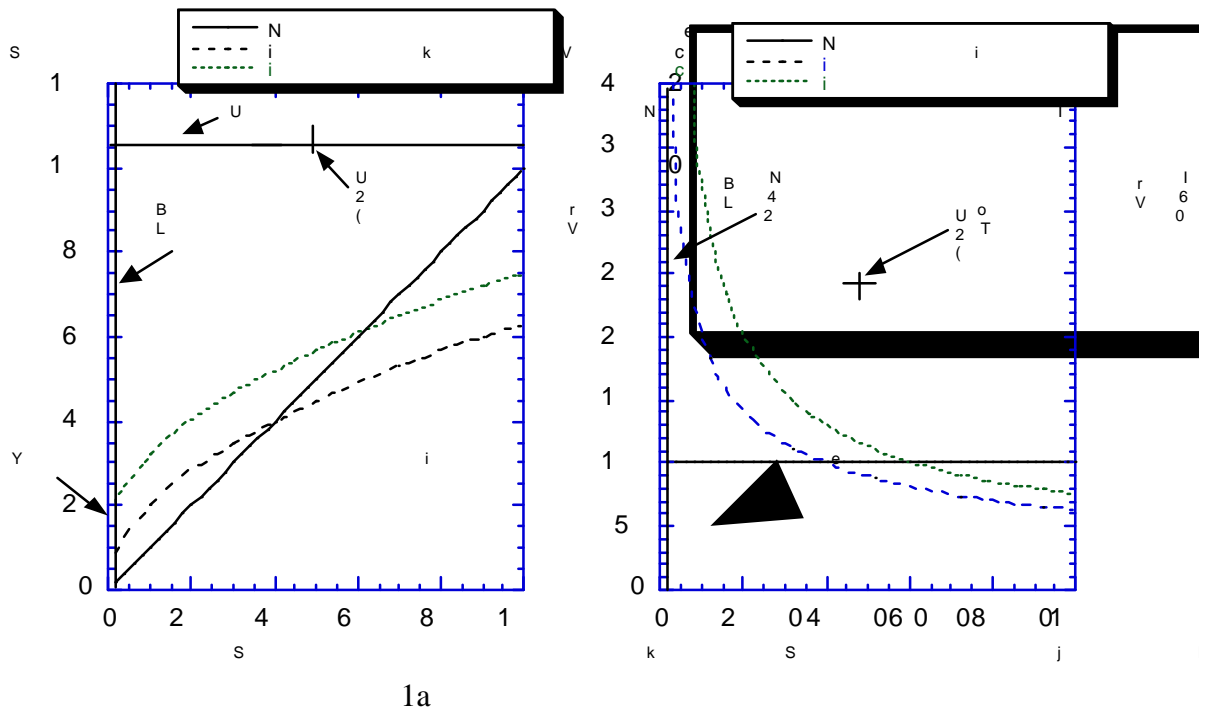
$$\tau = \tau_y + m\dot{\gamma}^n \quad (4)$$

där τ_y , m och n är så kallade rheologiska konstanter. n är mindre än 1 vilket innebär att viskositeten avtar med ökande skjuvhastighet. τ_y är ett yieldvärde (tröskelvärde) som anger att det krävs ett visst tryck för att få vätskan att flyta överhuvudtaget. m är en konstant som beskriver vätskans "konsistens". Om $\tau_y = 0$ och $n=1$ är m =viskositeten, dvs vätskan är Newtonsk. Noteras bör att för en icke-Newtonsk vätska (dvs AR-skumvätska) gäller inte det tidigare nämnda uttrycket för skjuvhastigheten (ekv. 3) utan man kallar då denna storhet för den skenbara skjuvhastigheten, q . Baserat på mätdata kan man dock få fram en korrektion mellan skjuvhastigheten och den skenbara skjuvhastigheten. Mer detaljerade uppgifter om detta finns att läsa i SP Arbetsrapport 1996:42 [11].

För att bestämma skumvätskornas flödeskaraktäristik kan man alltså mäta skjuvspänningen vid ett antal skjuvhastigheter och plotta sambandet. Resultatet kan se ut som i figur 1 a där tre olika typer av vätskor har plottats för att åskådliggöra skillnaden mellan dessa. Figur 1 b visar samma data men omräknat till viskositet. Ur diagram 1a är det också möjligt att bestämma de rheologiska konstanterna för att beskriva kurvan med Herschel Bulkley modellen. För en Newtonsk vätska blir sambandet en rät linje från origo och för en icke-Newtonsk minskar lutningen då skjuvhastigheten ökar. Förekommer det ett yield värde syns det i diagrammet på att kurvan ej går genom origo. I viskositetsdiagrammet kan man konstatera att de icke-Newtonska vätskorna har en mycket hög viskositet vid låga skjuvhastigheter och att den avtar då skjuvhastigheten (dvs flödet i rörströmning) ökar. Ofta är det en fördel att illustrera sambandet som i figur 1a eftersom detta illustrerar yieldvärdet på ett bättre sätt. Dessutom när det gäller rörströmning är det praktiskt att använda ett diagram där tryckfall (dvs skjuvspänning) och flöde (dvs skjuvhastighet) förekommer. Diagrammen visar också arbetsområdena för de metoder som ingår som förslag till standard. För

den tidigare nämnda "rörmetoden" (UNI LUT), som ingår i ISO-standard 7203, är arbetsområdet endast en linje vid en viss specificerad skjuvspänning som dessutom ligger betydligt högre än vad man kan förvänta sig av en AR-skumvätska. Brookfield LVT viskometern, som är vanligt förekommande för kvalitetskontroll mm, arbetar vid mycket låga skjuvhastigheter vilket ger data som inte representerar rörströmning.

Vad man skulle behöva är data vid skjuvhastigheter mellan ca 50 s^{-1} och ca 1000 s^{-1} .

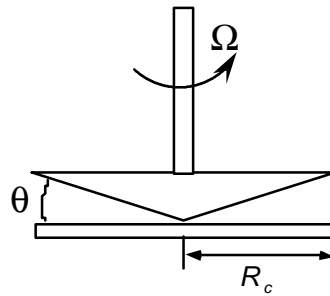


1b

Figur 1 Exempel på flödeskaraktäristik för tre olika typer av vätskor. 1a visar skjuvspänningen som funktion av skjuvhastigheten och 1b visar viskositeten som funktion av skjuvhastigheten.

2.4 Cone and Plate

Med en Cone and Plate viskosimeter är det möjligt att åstadkomma skjuvhastigheter som är av samma storleksordning som i rörströmning. Figur 2 visar principen för en Cone and Plate viskosimeter. Principen för denna typ av viskosimeter är att vätskan appliceras i gapet mellan konen och plattan och då konen roterar (⊂) skapas ett flöde (skjuvhastighet) relativt plattan vilket i sin tur ger ett visst vridmotstånd (skjuvspänning) i fjädern. Med kännedom om geometrin, rotationshastighet och det uppmätta vridmotståndet kan viskositeten beräknas.



Figur 2 Principen för en Cone and Plate viskosimeter. Vätskan skjivas mellan konen och plattan vilket skapar en skjuvhastighet och skjuvspänning som kan bestämmas med hjälp av geometrin, vinkelhastigheten och momentet.

2.5 Engångsmotstånd

I många tillämpningar inom strömningstekniken är det av intresse att känna till hur stora tryckförluster man får vid s k engångsmotstånd. Ett engångsmotstånd är en komponent i ett system där det uppstår en energiförlust vilket leder till ett tryckfall. Ibland är tryckförlusten önskvärd (strykning) och ibland är den av ondo (rörkrök etc). Det viktigaste är dock att man har kontroll över hur stora dessa tryckförluster är vid dimensionering av ett system. Detta gäller i högsta grad vid dimensionering av skumsläcksystem.

Det förekommer en mängd data om olika typer av engångsmotstånd som ofta används inom processindustrin. Dessa data är dock uppmätta med vatten som vätska och vatten har som bekant låg viskositet och är Newtonsk. Detta innebär dels att data är uppmätta vid turbulent strömning, och dels att ingen hänsyn har tagits vätskans karaktäristik. När det gäller AR skumvätskor vet vi att de ofta är trögflytande och icke-Newtonska. Detta faktum leder till att det är svårt att förutse hur stora tryckförluster som uppkommer i ett system med trögflytande icke-Newtonska skumvätskor. I SP Rapport 1995:10 [2] påvisades detta fenomen i försök med en strykning. För engångsförluster vid höga Reynolds tal kan man skriva

$$z = \frac{\Delta p}{r u^2 / 2} \quad (5)$$

där z är förlusttalet, Δp är tryckförlusten över motståndet, r är vätskans densitet och u är medelhastigheten i röret. (se Appendix A).

3 Försöksutrustning

Huvudsyftet med försöken var att prova metoder för att ta fram tekniskt underlag för beräkning av tryckförluster i rörsystem för AR -skum-

vätskor, speciellt skillnaden i förhållande till vatten och andra Newtonska vätskor. Försöken var uppdelade i tre huvuddelar:

-Cone and Plate försök

-Rörströmningsförsök

-Försök med engångsmotstånd

Syftet med Cone and Plate försöken var att kontrollera hur väl resultaten korrelerar med data från uppmätta tryckförluster i rör. Att mäta upp viskositets data med rörströmningsförsök är mycket omständigt och tidskrävande och det åtgår stora mängder skumvätska. Det skulle alltså vara en stor fördel om samma data kan tas fram med en Cone and Plate viskosimeter.

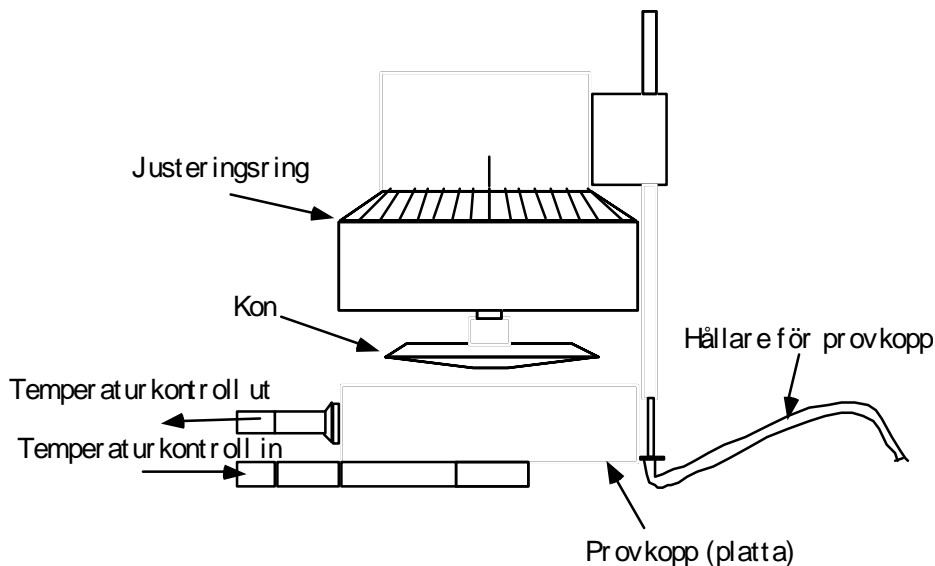
Försöken med engångsmotstånd syftade till att ta fram förlusttal för olika AR-skumvätskor och jämföra dessa med resultat uppmätta med vatten och en Newtonsk högviskös (130 mPas) glycerolvattenlösning.

3.1 Cone and Plate viskosimeter

När viskositeten på icke-Newtonska vätskor skall mätas är det nödvändigt att veta i vilket sammanhang vätskan skall användas och därmed vilka skjuvhastigheter som är aktuella. Dessutom är det ofta av intresse att veta vilka icke-Newtonska effekter som kan finnas hos vätskan och vad som kan påverka resultaten i en viss tillämpning. När det handlar om rörströmning i skumutrustning vet vi att skjuvhastigheterna är av storleksordningen $50\text{-}1000\text{ s}^{-1}$.

I försöken med Cone and Plate användes Brookfield Cone and Plate viskosimeter (se figur 3), model DV3, Serial HA, spindel CP-40, maximum shear stress $49,05\text{ Pa}$, maximum shear rate 1875 s^{-1} , konvinkel $0,8^\circ$, konradie $2,4\text{ cm}$ och provvolym $0,5\text{ ml}$.

Denna valdes med hänsyn till att resultaten skulle kunna jämföras med resultat från rörströmningsförsök.



Figur 3 Cone and Plate viskosimeter. Provvätskan ($0,5\text{ ml}$) appliceras i provkoppen.

Spindelns geometri och viskosimeterns fjäder, som känner av torsionsmomentet, är så anpassad att skjuvhastigheter och skjuvspänningar blir i samma storleksordning som vid rörströmning. Fjäderns belastning ger en utsignal ($0\text{-}1\text{ v}$) som visas i procent av maximalt utslag för den aktuella fjädern.

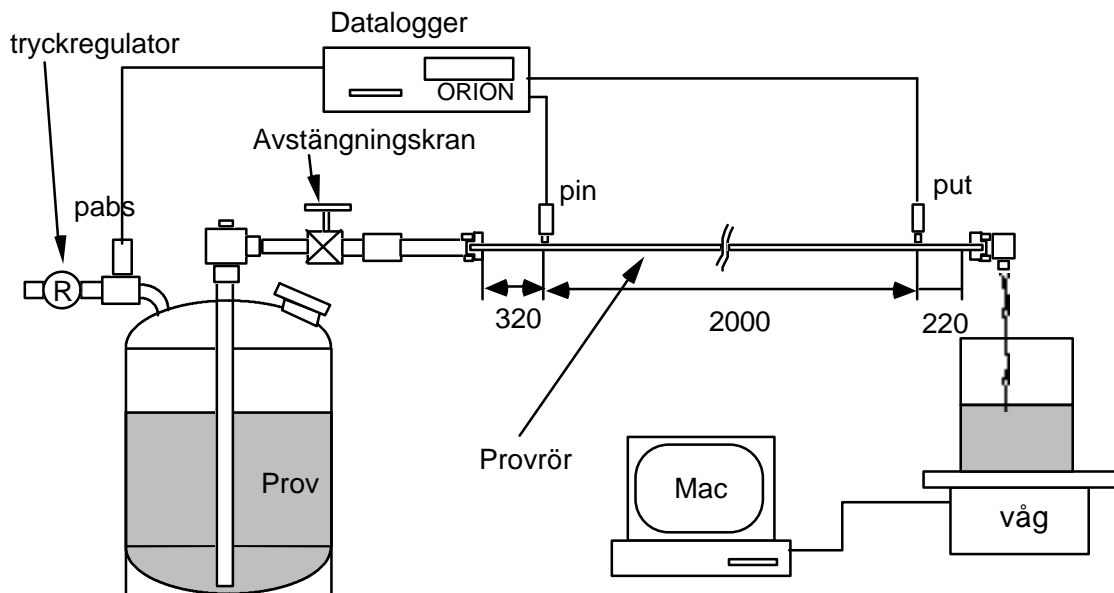
Konstant temperatur erhöles genom att vattennätet kopplades via slangar till provkoppens in och utgång och temperaturen mättes med tillhörande temperaturprob vid utgången. På detta sätt kunde temperaturen i de flesta fall hållas konstant inom intervallet $\pm 0,2\text{ }^\circ\text{C}$. Det bör nämnas att det finns ett temperaturlbad som tillhör till

viskosimetern (TC-500, -10 °C - $+130\text{ °C} \pm 0,03\text{ °C}$) men detta har ej används.

Till viskosimetern användes även ett PC program, Brookfield Rheocalc Software Version 1.2. Programmet gör det möjligt att på ett enkelt sätt köra olika sekvenser med varvtal och under olika tidsintervall. Genom att lägga in typ av Rheometer och vilken spindel som används kan programmet direkt redovisa resultaten. Då temperaturen var stabil och nödvändiga inställningar var gjorda applicerades vätskan i provkoppen (figur 3) och provkoppen sattes fast mot justeringsringen med hållaren. Därefter laddas ett körprogram och mätningen startas.

3.2 Rörströmningsutrustning

I rörströmningsförsöken användes samma utrustning som i SP Rapport 1995:10 [2] med den skillnaden att tryckgivare med mätområde 0-1 bar användes istället för 4 bars differenstryckgivare (se figur 4) vilket gav mycket mer stabila värden.



Figur 4 Försöksutrustning för rörströmningsförsök. Provvätskan fylls i trycktanken som trycksätts via tryckregulatorn. Vätskan strömmar genom provröret och tryckfallet registreras med dataloggern via tryckgivarna pin och put. Massflödet mäts med vågen och registreras av datorn.

Temperaturen mättes innan det aktuella försöket direkt i tanken och i samtliga försök var temperaturen $17 \pm 0,5$ °C respektive $19 \pm 0,5$ °C.

3.3 Utrustning för engångsmotstånd

Försöken med engångsmotstånd delades upp i två delar, strypförsök och försök med olika rörkomponenter.

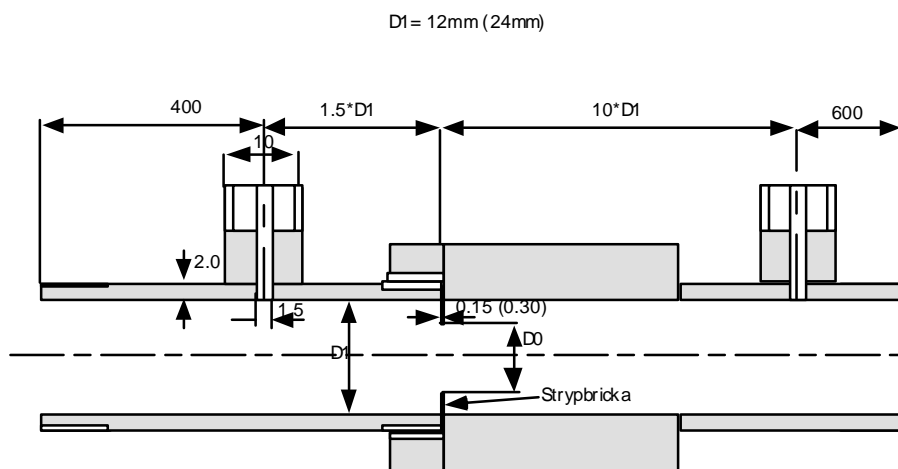
3.3.1 Utrustning för strypförsök

Ett sätt att reglera flödet är att montera en strypbricka i sugslangen eller i ett rörsystem. Försök har gjorts med olika dimensioner på strypningar och två olika dimensioner på rör. Syftet var att kontrollera hur

förlusterna beror på förhållandet mellan strypningsarea och rörarea och dels för att kontrollera om det är möjligt att jämföra liten skala med stor skala. Dessutom var skillnaden i tryckfall jämfört med vatten av intresse.

Figur 5 visar försöksanordningen. Försök gjordes med två olika dimensioner på rör, 12 mm respektive 24 mm. Till 12 mm röret användes 5 olika strypbrickor, diameter 3, 4, 5, 6, respektive 7 mm och till 24 mm röret användes 3 olika strypbrickor, diameter 6, 8, respektive 10 mm. Kringutrustningen var den samma som användes i rörströmning-försöken.

Trycket mättes 1,5 diameter uppströms och 10 diameterar nedströms. En del av det uppmätta tryckfallet kommer då från rörströmningförluster varför detta tillskott räknades bort vid utvärderingen.



Figur 5 Försöksmodul till strypförsök. Strypbrickan kan enkelt bytas ut. Observera att figuren ej är skalenlig.

3.3.2 Utrustning för komponenter

I ett verkligt system där skumvätskan skall transporteras i ett rörledningssystem måste det av praktiska skäl finnas ett antal komponenter. Den andra delen av försöken med engångsmotstånd gick ut på att testa förluster över vanligt förekommande komponenter i ett rörsystem. Komponenterna som valdes var följande: sätesventil (STAD gruppventil), rörkrök (VA vinkelkoppling), och T-rör (VA T-koppling). Som utgångspunkt för dimensioneringen av rörsystem användes en 1/2 tum respektive en 1 tum sätesventil. Till detta användes 18 respektive 28 mm klämringkopplingar och 18*1,5 respektive 28*1,5 mm rostfria rör. Dessa dimensioner kan anses vara rimliga i ett verkligt system för skumvätskor (ESS-mixer, fasta system mm) med skumvätskeflöden upp till ca 80 l/min. Tryckkuttagen placerades 10 diameterar före respektive efter varje komponent för att hastighetsfördelningen skall vara homogen. Rörsystemet delades upp i två delar med tre (resp fyra) tryckkuttag i varje delsystem:

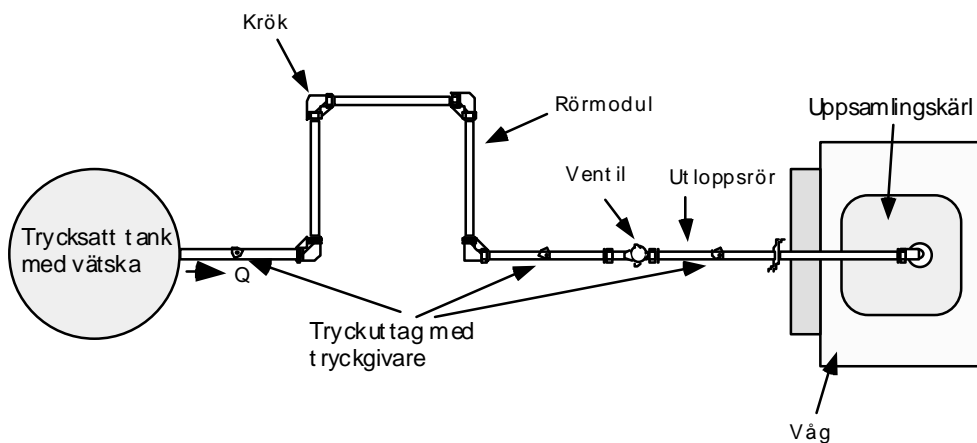
-Krökar och ventil

-T-rör (delning och återförening)

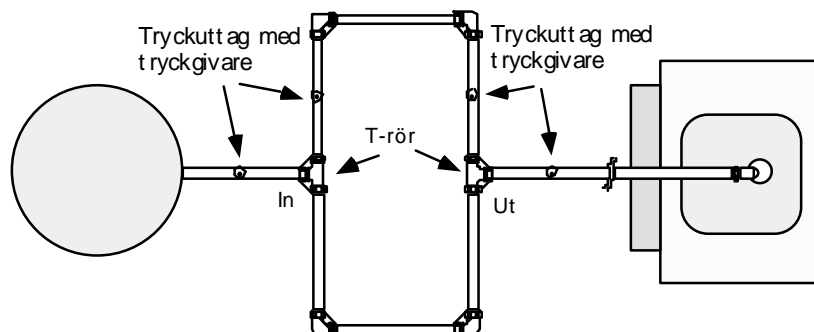
Figur 6-7 visar de två systemen. Eftersom man kunde förvänta sig relativt små tryckfall över en krök seriekopplades fyra krökar och totala tryckfallet mättes. T-rören kopplades så att flödet delades upp 50/50 och återförenades i ett nytt T-rör. Tryckuttag placerades både kring inlopp och utlopp för se skillnaden mellan strömningsriktning.

Till varje delsystem användes ett "utloppsrör" som var 50 diametrar för att trycket efter sista komponenten skulle kunna registreras och så att utloppseffekter ej skulle påverka resultaten.

Eftersom en ansevärd del av det uppmätta tryckfallet, speciellt för AR-skumvätskor, kan antas uppkomma p g a rörströmning räknades dessa förluster bort vid utvärderingen.



Figur 6 Försöksutrustning för mätning av förluster över krökar och sätesventil



Figur 7 Försöksutrustning för mätning av tryckfall över T-rör. Tryckfallet mättes både över T-röret som delar flödet (in) och T-röret som återförenar flödet (ut).

3.4 Provade vätskor

Som försöksvätskor användes två stycken AR skumvätskor, en specialtillverkad icke-Newtonsk vätska, vatten och en glycerollösning med viskositeten 130 mPas. Nedan följer en tabell på använda vätskor med dess benämningar och en beskrivning av egenskaperna:

Tabell 1 Provade vätskor

Benämning	Beskrivning
Koncentrat 1:	Syntetbaserad skumvätska, icke-Newtonsk, högviskös
Koncentrat 2:	Proteinbaserad skumvätska, icke-Newtonsk, högviskös
Koncentrat 3:	Syntetbaserad specialtillverkad skumvätska, icke-Newtonsk, mellanviskös
Glycerollösning:	Newtonsk, viskositet=130 mPas, högviskös
Vatten:	Newtonsk, viskositet=1,0 mPas, lågviskös

De tre icke-Newtonska vätskorna användes i försöken med Cone and Plate viskosimeter respektive rörströmning. I försöken med engångsmotstånd användes samtliga vätskor.

4 Resultat

Resultaten från försöken redovisas i huvudsak i diagramform. För mer ingående resultat och analyser hänvisas till SP Arbetsrapport 1996:42 [11].

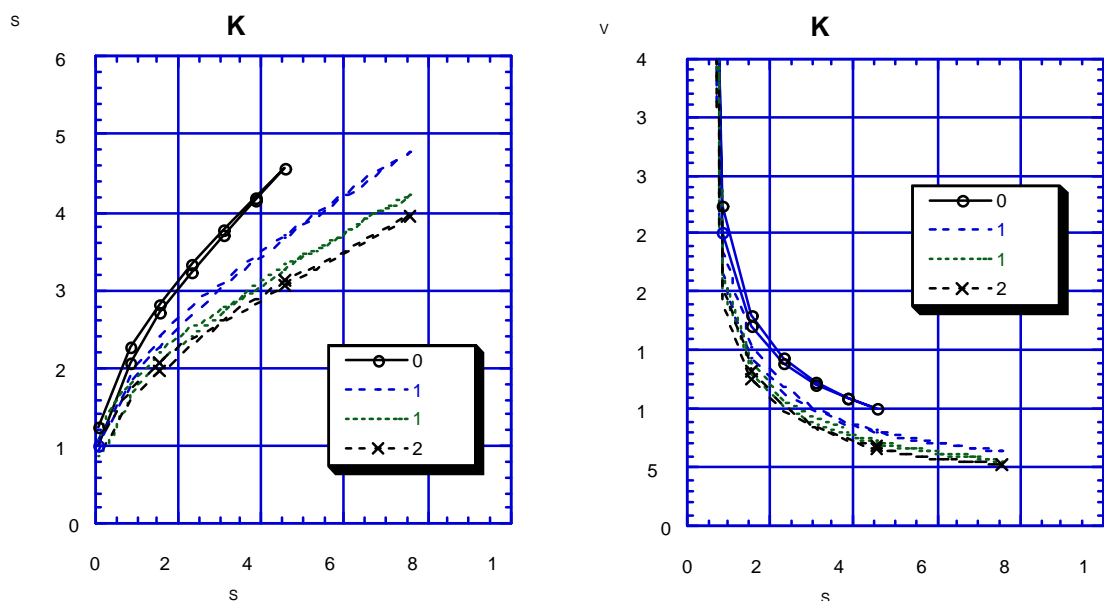
4.1 Resultat från Cone and Plate viskosimeter

Varje mätning startades vid 1 rpm ($=7,5 \text{ s}^{-1}$) och kördes sedan 30 sekunder i steg om 10 rpm till ett maxvärde som begränsades av fjädern.

Efter maxvärdet kördes samma sekvens igen fast med minskande hastigheter. Detta för att kontrollera om det förekommer någon hysteres.

De inledande försöken, som gjordes med koncentrat 1, visade på att det förekommer ett yieldvärde som det inte går att bortse ifrån. Det visade sig också att det förekommer en viss hysteres, d v s att viskositeten minskar något då vätskan har utsatts för skjuvning en längre tid.

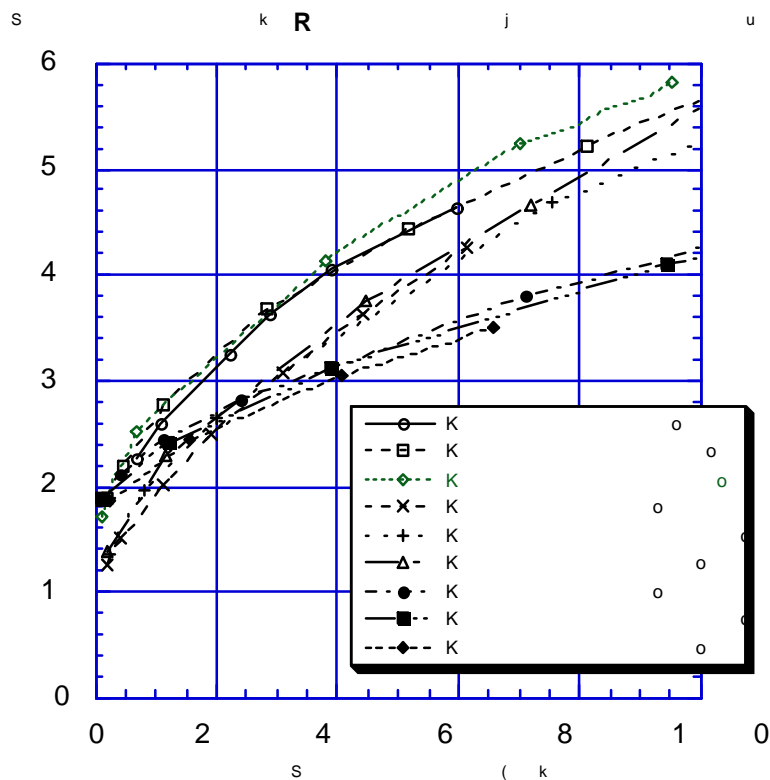
I figur 8 visas resultaten från koncentrat 2, dels i ett skjuvhastighet/skjuvspänningsdiagram och dels i ett viskositet/skjuvhastighetsdiagram. Man kan konstatera att det förekommer ett yield värde och en viss hysteres. Vätskorna kördes vid fyra olika temperaturer för att få en uppfattning om temperaturberoendet. Koncentrat 3 uppvisade i princip ingen hysteres.



Figur 8 Resultat från Cone and Plate körningar med koncentrat 2 vid fyra olika temperaturer. Vid varje temperatur har ett nytt prov tagits och kon-platta avståndet ställts in.

4.2 Rörströmningsresultat

De tre skumvätskorna kördes vid rumstemperatur, ca 17 °C för koncentrat 1 och koncentrat 2 och ca 19 °C för koncentrat 3, med tre olika dimensioner på rör. Rören som användes var de samma som användes i SP Rapport 1995:10 [2], dvs R=2mm, R=3,95mm och R=6,1mm. Resultaten presenteras i figur 9 där alla tre vätskorna plottats för respektive rördimension.



Figur 9 Resultat från försök med rörströmning. Diagrammet visar skjuvspänningen som funktion av skenbar skjuvhastighet för respektive vätska uppmätt med tre olika dimensioner på rör. Korrelationen mellan olika dimensioner är mycket god.

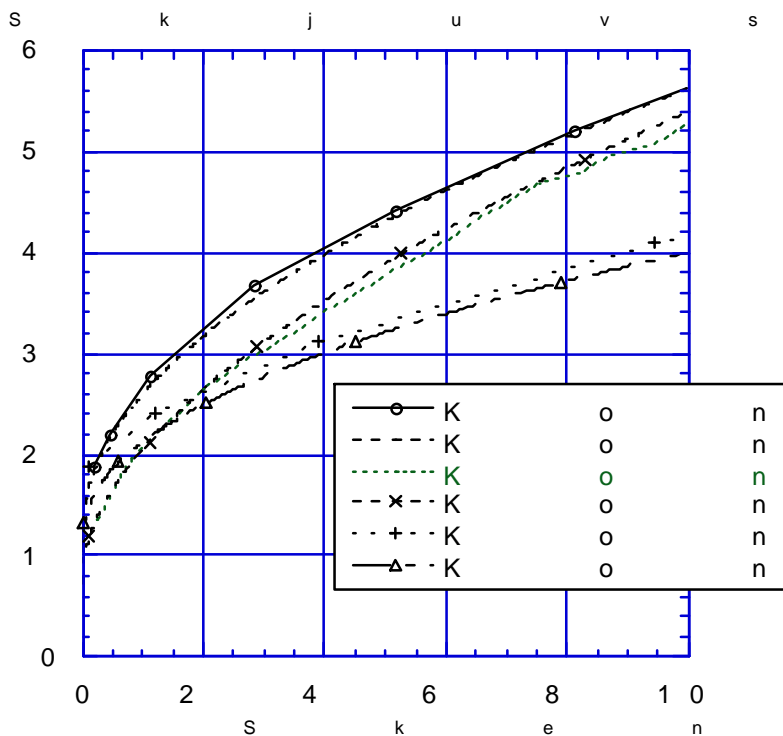
Man kan konstatera att kurvorna liknar Herschel-Bulkley (yield värde) modellen och att korrelationen mellan försök med olika rördimensioner är mycket god. Det sistnämnda är också vad man kan förvänta sig enligt teorin.

4.3 Jämförelse mellan Cone and Plate och rörströmning.

En viktig del i detta projekt var att undersöka hur pass väl resultat från en Cone and Plate mätning korrelerar med resultat från rörströmning. Enligt kapitel 2.3 är det inte den verkliga skjuvhastigheten man får fram vid rörströmning och alltså kan man inte jämföra resultaten direkt. Man måste ta med korrektionen. Som tidigare konstaterats är det Herschel-Bulkley modellen som passar bäst, vilket innebär att korrektionen ej är konstant. Det som är av störst intresse är att kunna bestämma viskositetsdata med Cone and Plate och sedan beräkna den teoretiska korrektionen så att det överensstämmer med rörströmningsdata.

Korrektionen kan beräknas om man tar fram de rheologiska konstanterna (t_y , m och n) utgående från Cone and Plate försöken och tillämpar sambandet för korrektionen mellan skenbar skjuvhastighet (rörströmning) och skjuvhastighet (Cone and Plate). Problemet måste lösas numeriskt och proceduren beskrivs närmare i SP Arbetsrapport 1996:42 [11].

Figur 10 visar den beräknade och korrigerade kurvan från Cone and Plate försök jämfört med data från rörströmning.



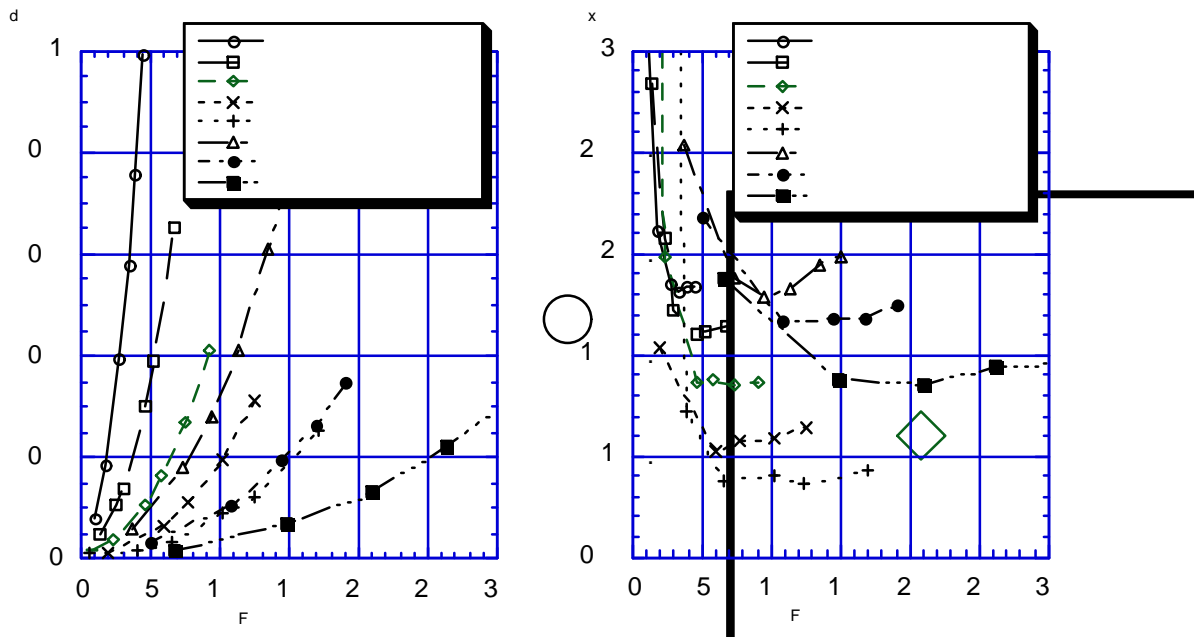
Figur 10 Beräknade kurvan från Cone and Plate försök jämfört med data från rörströmning.

Resultaten korrelerar mycket bra. För koncentrat 1 är kurvorna nästan identiska. Dock måste man här tänka på att det finns en skillnad i temperatur. De beräknade kurvorna borde ligga något under kurvorna från rörströmningsdata eftersom det skiljer 2 °C i temperatur. Detta borde gälla speciellt för koncentrat 2 eftersom denna vätska visade sig vara mest temperaturberoende. Data från försök med $R=3,95$ har använts i jämförelsen men som framgår av figur 9 ligger data från $R=6,1\text{mm}$ något högre och dessa data skulle alltså korrelera ännu bättre. Koncentrat 3 jämfördes med Cone and Plate körning med 20 °C eftersom temperaturen vid rörströmningsförsöket var 19 °C. Osäkerheten i dimensionen på rören kan spela in men sanningen torde ändå ligga någonstans inom intervallet med de tre rören.

Sammanfattningsvis kan man dra den slutsatsen att det är fullt möjligt att använda data från Cone and Plate och använda dessa för att beräkna tryckfall och flöden i rörströmning. Förutsättningen är givetvis att rören är väldefinierade och att det råder laminär strömning. Även med Cone and Plate viskosimetern erhöles ett yield värde och Herschel-Bulkley modellen är den som passar bäst. Detta medför, som tidigare nämnts att korrektionen mellan Cone and Plate och rörströmning ej blir konstant utan den varierar med skjuvhastigheten. För praktiskt bruk, inom ett visst intervall skjuvhastigheter (ca 50 s^{-1} - 1000 s^{-1}), kan det vara möjligt att bestämma ett medelvärde på korrektionen mellan skjuvhastighet och skenbar skjuvhastighet (mer om detta i SP Arbetsrapport 1996:42) [11].

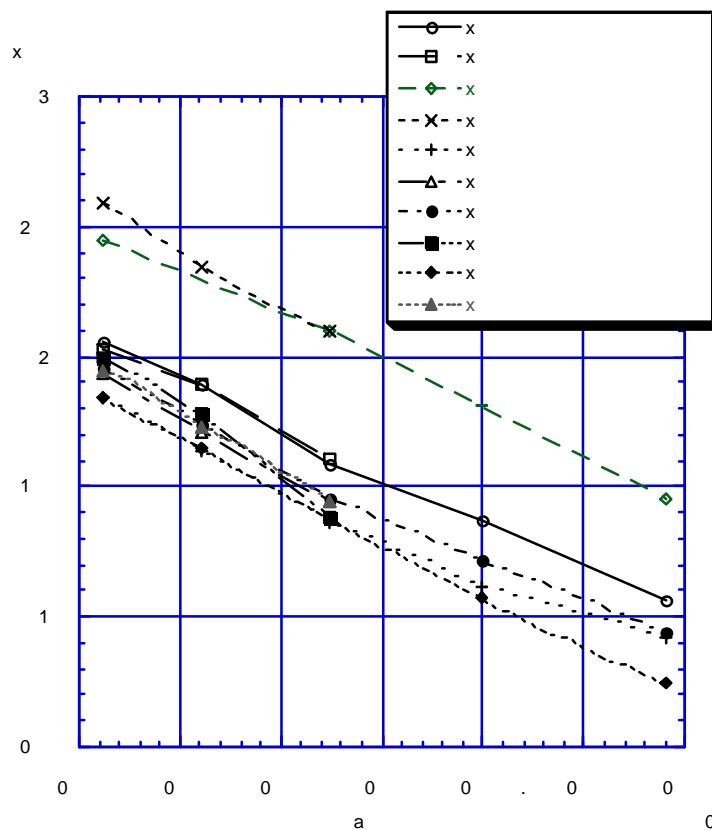
4.4 Resultat från strypförsök

Syftet var att dels jämföra olika vätskor och dels att få fram förlusttalets inverkan av förhållandet mellan stryparean och rörarean. I SP Arbetsrapport 1996:42 [11] finns mer utförliga resultat och utvärderingar. Här presenteras i första hand slutsatser och resultaten i generaliserad form. För att förlusten (Δp), som själva strypningen orsakar, skall kunna redovisas har det uppmätta tryckfallet reducerats med tryckfallet orsakat av rörströmningen från strypbrickan till tryckkuttagen ($10+1,5$ diametrar). Rörströmningsförlusten har beräknats utgående från de tidigare uppmätta viskositetsdata från Cone and Plate för respektive vätska. I Figur 11 visas resultatet för koncentrat 2. Det vänstra diagrammet visar tryckförlusterna (Δp) som funktion av flödet och det högra förlusttalet som funktion av flödet. Förlusttalet är beräknat utgående från hastigheten i strypningen (ekv. 5). Då det handlar om lågviskösa vätskor typ vatten får man turbulent flöde och tryckförlusten ökar kvadratisk med flödet. Diagrammen visar att detta antagande gäller rimligt även för övriga vätskor och en kvadratisk kurvanpassning har därför gjorts för att kunna beräkna ett förlusttal ($z = \xi$) för varje kombination av vätska, rör och strypning.



Figur 11 Tryckförlusterna (d_p) och förlusttalet (x_i) som funktion av flödet för koncentrat 2 med olika strypningar (D_0) i kombination med två olika rördimensioner (D_1). Tryckförlusterna antas öka kvadratisk med flödet.

I figur 12 visas förlusttalet som funktion av area förhållandet mellan strypningen och röret för alla provade vätskor.



Figur 12 Förlusttalet (ξ) som funktion av area förhållandet (a_0/a_1). Diagrammet visar resultat från alla vätskor och rördimension (12 respektive 24 mm). Resultaten visar på en markant skillnad mellan vatten och övriga vätskor.

Resultaten visar på att det är en väsentlig skillnad mellan vatten och övriga vätskor. Skillnaden mellan de olika skumvätskorna är också märkbar. Koncentrat 3, som hade de lägsta viskositetsvärdena, får de högsta förlusttalen medan koncentrat 2 får de lägsta.

Specialskumvätskan är alltså mer lättflytande och det blir mer turbulens kring strypningen vilket ger upphov till högre förluster. Om man studerar kurvan för koncentrat 2 (figur 10), jämfört med de andra skumvätskorna, kan man se att tendensen är att koncentrat 2 har den högsta skjuvspänningen (viskositeten) vid höga skjuvhastigheter (ca 2000 s^{-1}). I strypningen är skjuvhastigheten relativt stor vilket förklarar att koncentrat 2 får de lägsta förlusttalen.

De beräknade förlusttalen gäller då flödet är relativt stort. I figur 11 kan man se att förlusttalet blir stort vid låga flöden vilket beror på att viskositeten då är mycket stor. Dessutom är osäkerheten i tryckmätningen relativt stor och den beräknade rörströmningsförlusten är också behäftad med fel, speciellt vid låga flöden. Baserat på försöken kan man säga att förlusttalen gäller för flöden större än ca 5 l/min för 12 mm röret och 10 l/min för 24 mm röret. Med dessa begränsningar i

åtanke är diagrammet i figur 12 till stor nytta vid dimensionering av strypningar till ett skumvätskesystem.

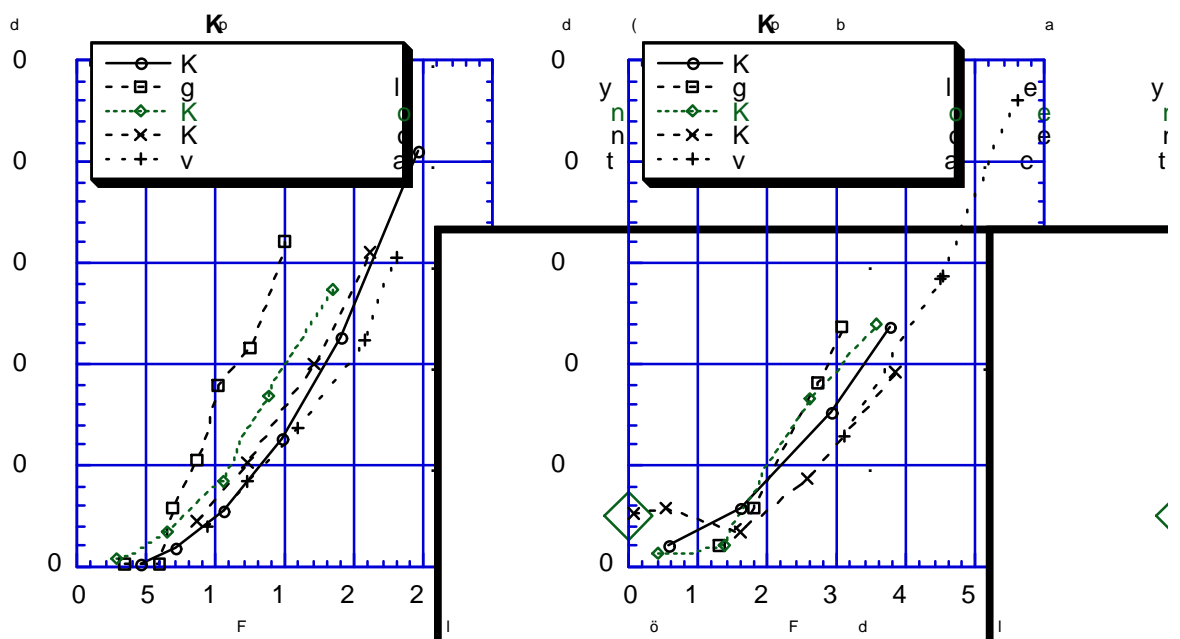
4.5 Resultat från försök med komponenter

Resultaten från försök med komponentmotstånd redovisas med tryckfallskurvor och förlusttal baserat på kvadratisk kurvanpassning.

Observera här att förlusttalet är baserat på hastigheten i röret vilket leder till att det inte går att jämföra direkt med strypförsöken. Det uppmätta tryckfallet för varje försök är kompenserat för rörströmningsdelen och när det gäller T-rör är hänsyn även tagen till att det är olika flöden vid respektive tryckuttag (se Appendix A).

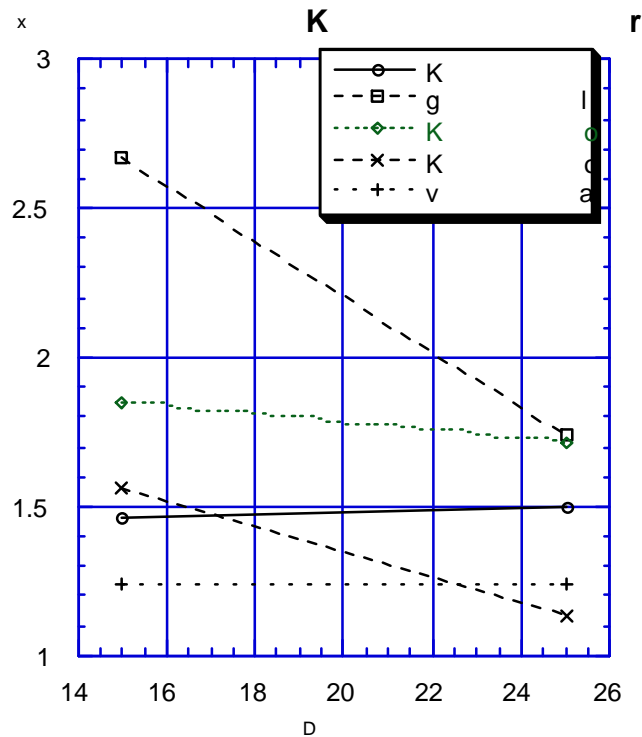
4.5.1 Krökar

För att få mätbara tryckfall seriekopplades fyra stycken krökar och tryckfallet mättes över alla fyra. I figur 13 visas tryckfallet per krök för de båda rördimensionerna. Man kan konstatera att tryckförlusterna är mycket små och därmed är mätosäkerheten relativt stor. Mätpunkterna vid låga flöden (ca 10 respektive ca 20 l/min) är därför mycket osäkra. Man kan ändå se vissa tendenser. Glycerollösningen ger störst förluster och vatten minst. Förhållandet är det omvända om man jämför med strypförsöken vilket beror på att engångsmotståndet, dvs kröken, i detta fall ger viskösa förluster p g a dess geometriska utsträckning i flödesriktningen.



Figur 13 Tryckförlusterna över en krök som funktion av flödet för ett 15 mm rör och ett 25 mm rör.

För att generalisera resultaten antas, på samma sätt som när det gällde strypningar, att sambandet är kvadratisk. Figur 14 visar resultaten av detta.

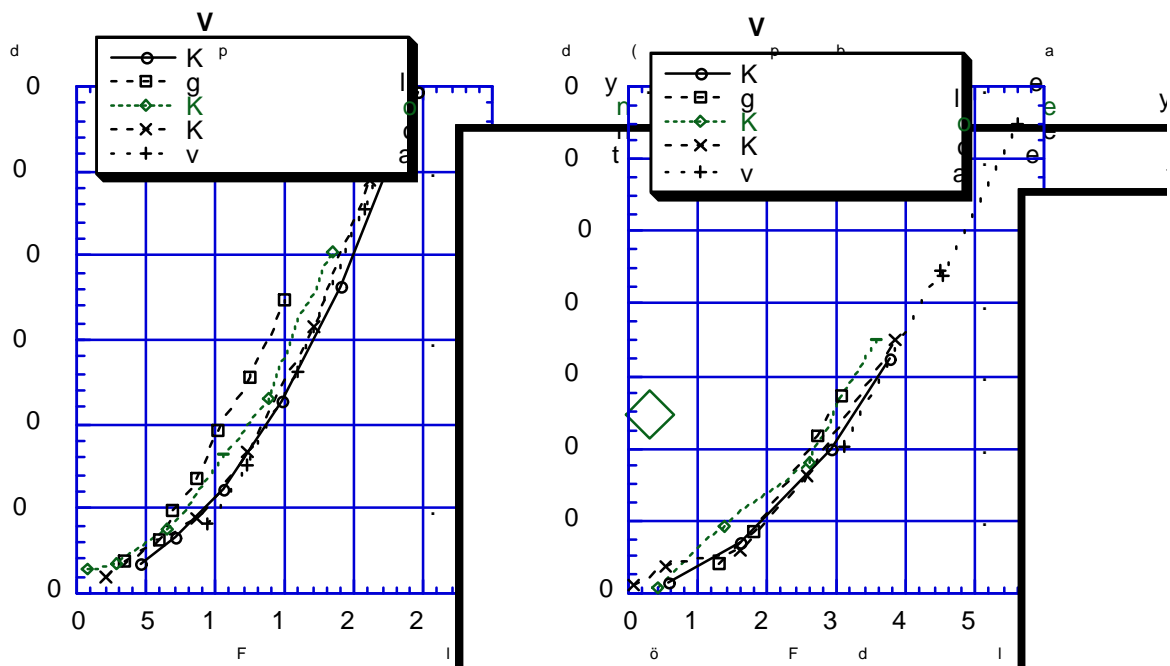


Figur 14 Förlusttalet som funktion av rörets diameter.

Korrelationen mellan rördimension är ganska god med undantag för glycerollösningen. Det finns en tendens att förlusttalet avtar med ökad diameter (D1) och förlusterna minskar med minskande viskositet.

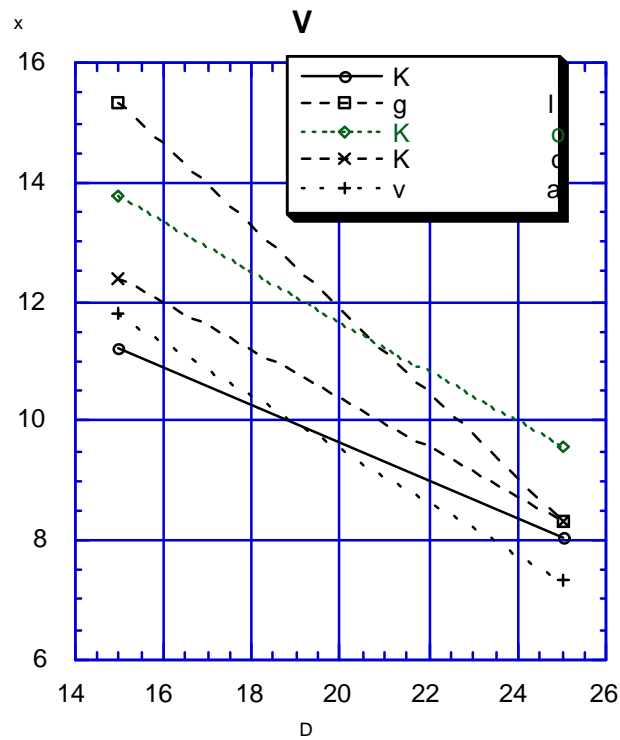
4.5.2 Sätessventil

I figur 15 visas resultatet från försöken med fullt öppen sätessventil. De absoluta tryckförlusterna är relativt stora om man jämför med en krök. Skillnaden mellan de olika vätskorna är relativt liten med en tendens åt att de högviskösa vätskorna ger något större förluster.



Figur 15 Tryckförlusten över en fullt öppen sätesventil, 1/2 tum respektive 1 tum.

Även i detta fall har en kvadratisk kurvanpassning gjorts för att få fram ett förlusttal, se figur 16. Observera här att förlusttalet är baserat på hastigheten i röret vilket leder till att det inte går att jämföra direkt med strypförsöken. Här kan man se en klar tendens till att förlusttalet minskar med ökad dimension och förlusterna är betydligt större än för en krök. I ett verkligt system finns det all anledning att ta hänsyn till dessa förluster vid dimensionering.

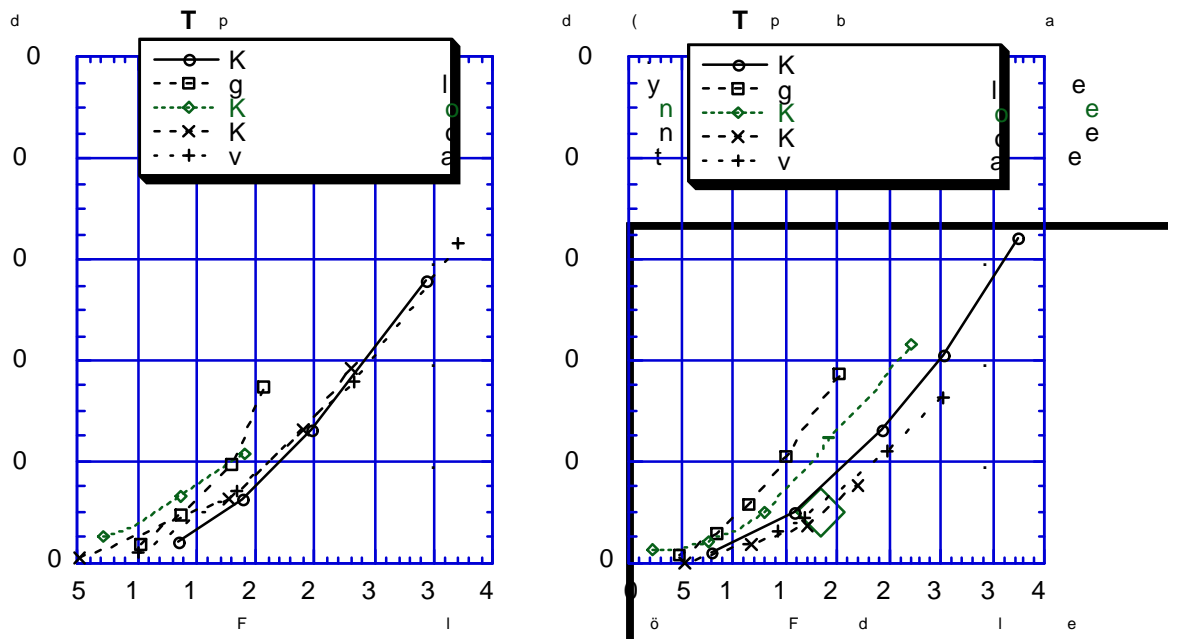


Figur 16 Förlusttalet som funktion av rördimension för helt öppen 1/2-tum respektive 1-tum sätesventil.

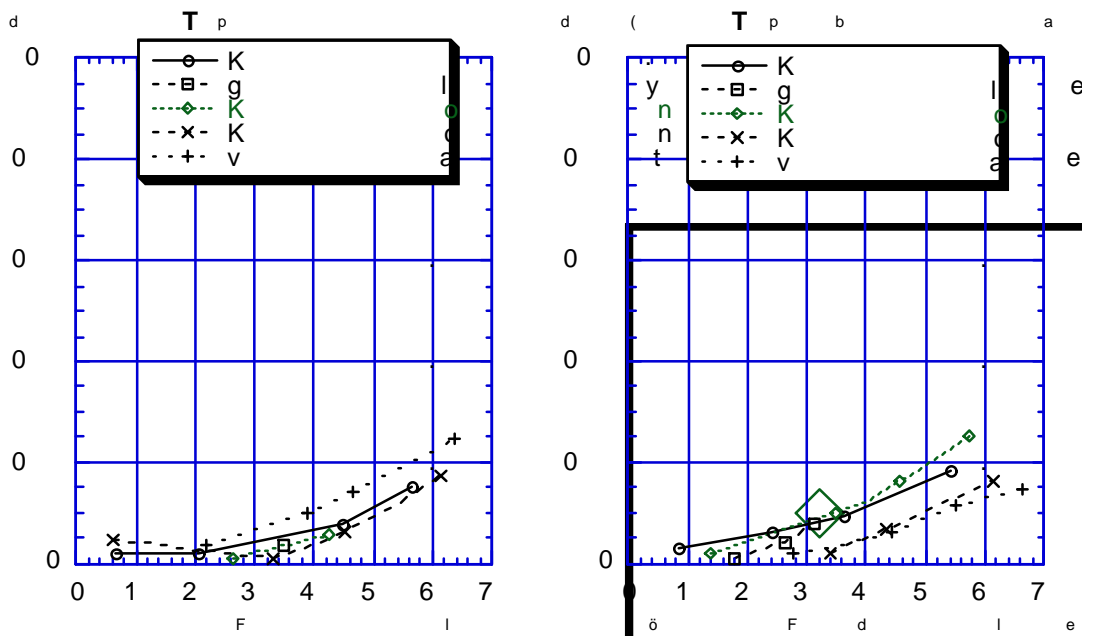
4.5.3 T-rör

Vid mätningarna med T-rör mättes förlusterna dels över T-rör som delar flödet och dels över T-rör som återförenar två flöden. Förlusttalet är baserat på hastigheten i röret före och efter T-rören.

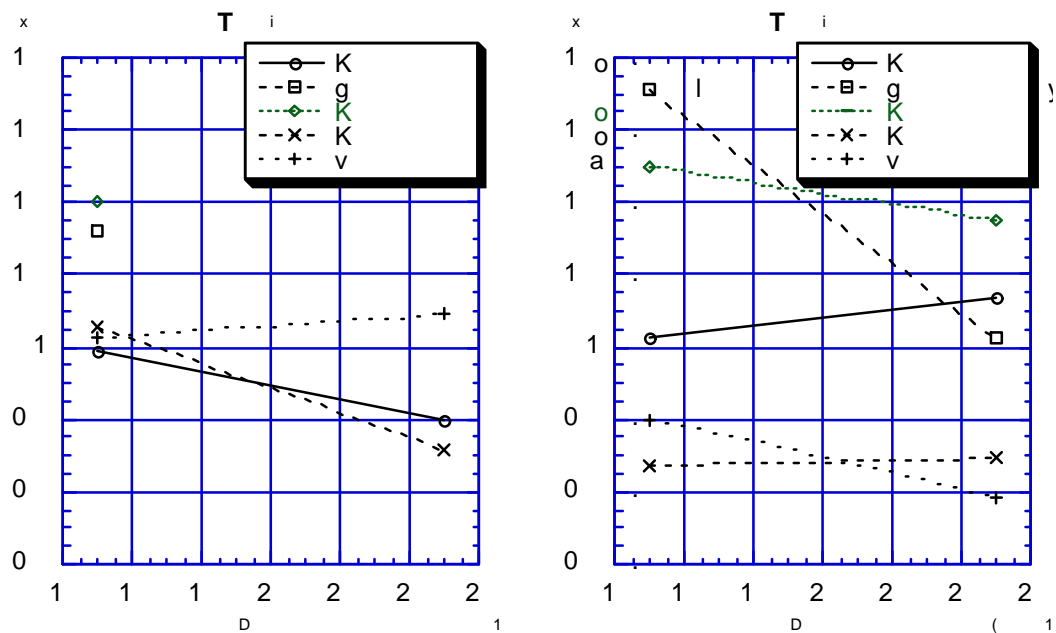
Figur 17-18 visar tryckförlusterna för ett T-rör som delar (in) respektive återförenar (ut) flödet. Dessutom redovisas resultaten från beräkningar med kvadratisk kurvanpassning (figur 19).



Figur 17 Tryckförlusten över ett T-rör ($D=15\text{ mm}$) som delar respektive återföreningar ett flöde.



Figur 18 Tryckförlusten över ett T-rör ($D=25\text{ mm}$) som delar respektive återföreningar ett flöde.



Figur 19 Förlusttalet som funktion av rördiametern för ett T-rör som delar respektive återförenar ett flöde.

Förlusterna för T-rör är något mindre än för krökar. Det skiljer ej nämnvärt mellan om det är ett T-rör som delar eller återförenar ett flöde.

Resultaten är mycket varierande och det är svårt att dra några slutsatser. De uppmätta tryckfallen är mycket små och felgränserna är därför stora. Då det gäller ett T-rör som återförenar ett flöde (T-rör ut) kan man se en tendens åt att de mest högvätskosa vätskorna ger ett större förlusttal på liknande sätt som för de andra komponenterna.

Sammanfattningsvis för engångsmotstånd har det alltså visat sig att det finns vissa skillnader mellan AR skumvätskor och lågvätskosa vätskor (vatten). När det gäller strypningar är förlusterna avsevärt mindre för AR skumvätskorna vid de försök som har gjorts. När det gäller komponenter är förhållandet mestadels det motsatta. Givetvis är det orimligt att testa alla kombinationer av skumvätska, komponenter och strömningsförhållanden men försöken visar vad man kan förvänta sig vid överslagsberäkningar. Uppskattningsvis kan man säga att för strypningar gäller resultaten med en noggrannhet på ca $\pm 10\%$ och för komponenter är osäkerheten betydligt större, på ca $\pm 50\%$. Som diskuterades tidigare finns det även vissa begränsningar i resultaten vid låga flöden. Slutsatsen är att tryckförluster som uppkommer på g a krökar och T-rör är mycket små jämfört med tryckförluster på g a rörströmning. Om rörsystemet är omfattande är det rimligt att räkna endast på rörströmning. För strypningar och ventiler bör man dock räkna tryckfallen speciellt.

5 Exempel på tillämpningar

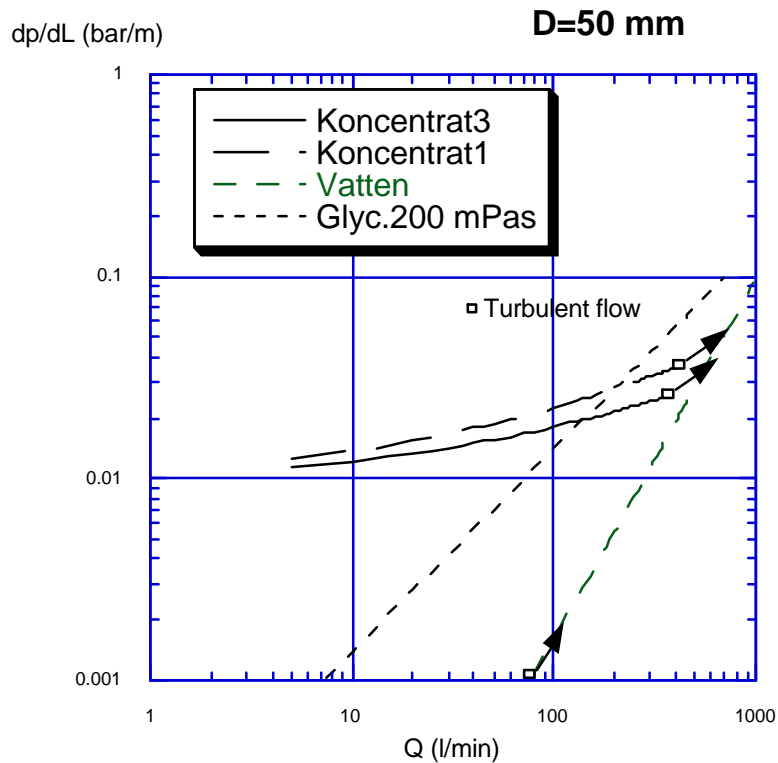
Det är allmänt känt att det ofta förekommer problem när AR skumvätskor används i konventionell utrustning, framför allt det faktum att inblandningen ofta blir för låg vilket innebär försämrad släckförmåga. Primärt handlar det om att man inte har grepp om skumvätskornas flytförmåga eftersom utrustningen fungerade med lättflytande Newtonska vätskor. Första steget är alltså att ta fram viskositetsdata. Här kan man genast avgöra grovt om vätskan är lämplig i en viss tillämpning och eventuellt göra någon modifiering.

Hos injektorer är det t ex anläggningskaraktäristiken som påverkas av skumvätskan, dvs vilka tryckfall man får i sugslangen. Dessa tryckfall måste vara exakt anpassade till tillgänglig sughöjd vid aktuell inblandning vilket har behandlats i SP Rapport 1995:10 [2] och SP Rapport 1995:18 [1].

I andra fall krävs det att skumvätskan skall transporteras i ett rörsystem fram till inblandningsstället och i vissa fall är variationen i flöde mycket stor. Exempel kan vara sprinklersystem, skumkanoner, mobil brandsläckutrustning.

Datablad

För den som skall dimensionera ett skumvätskesystem är det av intresse att få tillgång till datablad som gör det möjligt att beräkna tryckfall i rörledning. Detta bör vara ett krav man kan ställa till respektive skumtillverkare. Baserat på mätningar med Cone and plate är det möjligt att producera sådana, se figur 20.



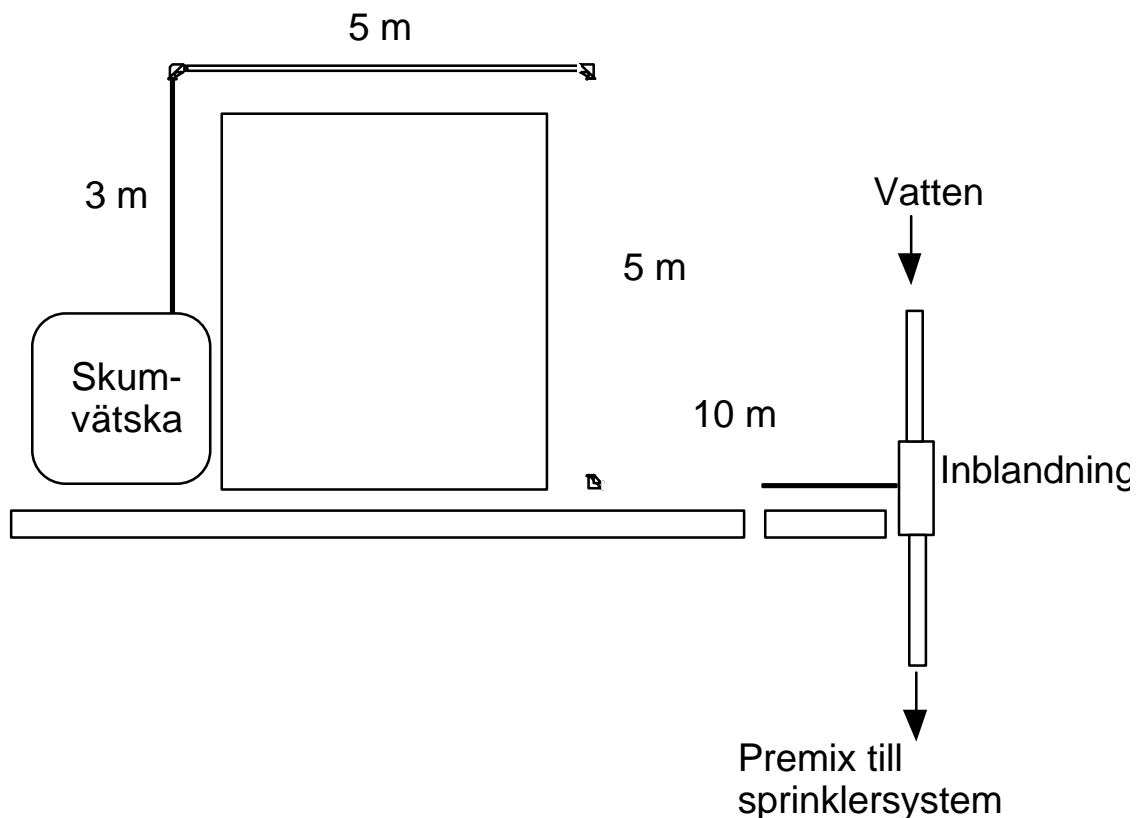
Figur 20 Tryckfallet i ett 50 mm rör som funktion av flödet för två AR-skumvätskor, en Newtonsk glycerolvattenblandning med viskositeten 200 mPas och vatten. Då flödet är mindre än ca 100 l/min ger den Newtonska vätskan ett mindre tryckfall än skumvätskorna men då flödet är över 100 l/min blir tryckfallet större.

I exemplet ovan har tryckfallet beräknats för en Newtonsk vätska med viskositeten 200 mPas, två skumvätskor med viskositetsdata uppmätt med Cone and Plate viskosimeter samt vatten. Karaktäristiken för den Newtonska vätskan och vatten skiljer sig mycket från skumvätskorna. Om flödet är mindre än ca 100 l/min ger den Newtonska vätskan ett mindre tryckfall än skumvätskorna men då flödet är över 100 l/min blir tryckfallet större. Jämfört med vatten blir tryckfallet för skumvätskorna mycket större vid små flöden men då flödet är ca 500 l/min (turbulent flöde) är tryckfallet i samma storleksordning som för vatten. Detta visar på hur viktigt det är att känna till flödeskaraktäristiken för skumvätskor. Dessutom kan man konstatera att flödet i ett rörsystem med skumvätskor är mycket känsligare för tryckändringar än om vätskan är Newtonsk. En liten ändring i tryck medför en relativt stor ändring i flöde. En annan viktig aspekt är att viskositetsdata gör det möjligt att avgöra om flödet är turbulent eller laminärt.

Sprinklersystem

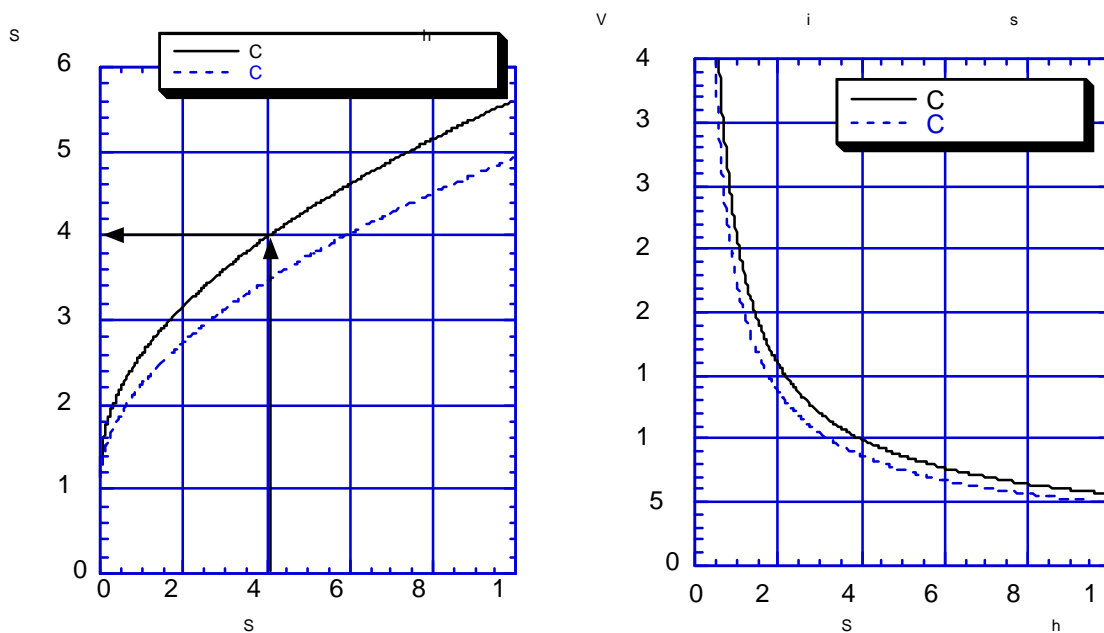
I anläggningar där skumvätskan måste transporteras i ett rörsystem för att nå inblandningsstället är det av stor betydelse att känna till förlusterna. Exempel på detta kan vara sprinklersystem med skumvätskeinblandning som börjar bli allt vanligare. I ett stort system med många sprinkler och med individuell aktivering har vätskans karaktär mycket stor betydelse. Beroende på hur många sprinkler som aktiveras kommer flödet variera kraftigt. Detta påverkar viskositeten avsevärt och därmed tryckfallen. Rörsystemet måste vara dimensionerat så att det klarar av det maximala flödet, dvs då alla sprinkler aktiveras. Om exempelvis en sprinkler aktiveras innebär detta att flödet i rörsystemet blir mycket litet, och därmed blir skjuvhastigheten låg och viskositeten mycket hög. Tryckfallet, som är proportionellt mot viskositeten, blir då förhållandevis stort om man jämför med en Newtonsk högviskös vätska. I värsta fall är skjuvspänningen (drivtrycket) mindre än yieldvärdet vilket innebär att vi inte får fram någon skumvätska alls då vätskan i praktiken uppför som en fast kropp. Det bästa är naturligtvis att placera inblandningsutrustningen så nära skumväsketanken som möjligt men detta är av praktiska och ekonomiska skäl inte alltid möjligt. I en industri vill man kanske skydda flera olika utrymmen och ha skumvätskan placerad centralt. Rördragningen för skumvätskan blir då omfattande och man måste ta hänsyn till dess flytegenskaper enligt ovan.

I figur 21 visas ett exempel på hur en sådan rördragning kan se ut i praktiken. Systemet innehåller 4 st rårördelar och tre rörkrökar. Rörrets innerdiameter antas vara 50 mm och skumvätskan är koncentrat 1 vid ca 15 °C. Vad krävs då för tryck för att övervinna de tryckfall som uppstår i rörsystemet innan inblandningen? Säg att vi har ett sprinkler system med 50 sprinklerhuvuden som vardera är dimensionerade att ge ett flöde av 200 l/min. Starkt förenklat innebär detta att maximala flödet är 10000 l/min och det minimala 200 l/min. Antag att man vill ha en skuminblandning på 3 % vilket innebär att skumvätskeflödet skall kunna variera mellan 6 l/min och 300 l/min. För att klara det maximala flödet krävs det rör i storleksordningen 2 tum (50 mm). Den skenbara skjuvhastigheten kommer då att variera från 8 s⁻¹ till 407 s⁻¹ vilket innebär att viskositeten på vätskan kommer att vara mycket hög vid det låga flödet och betydligt mindre vid det maximala flödet. En del av tryckfallet uppkommer i själva rören och en del förluster uppkommer i krökar.



Figur 21 Exempel på hur matningen av skumvätska kan se ut till ett sprinklersystem. Skumvätskan transporteras i ett rörsystem fram till inblandningsstället.

Antag att flödet, beroende på hur många sprinkler som är aktiverade, varierar mellan 6 och 300 l/min enligt resonemanget ovan. För att lösa problemet måste man veta skumvätskans viskösa egenskaper, dvs kurvan som beskriver skjuvspänningen som funktion av skjuvhastigheten (bestämd med Cone and Plate). Denna kurva kan korrigeras till rörströmning enligt kapitel 4.3. Genom att gå in i diagrammet i figur 22 vid aktuell skenbar skjuvhastighet och läsa av skjuvspänningen kan man beräkna tryckfallet för rårörslusterna. I detta exempel är den maximala skenbara skjuvhastigheten (alla sprinkler) 407 s^{-1} vilket ger en skjuvspänning på ca $\Delta p R / 2L = 40 \text{ Pa}$ (viskositet ca 98 mPas). Här är Δp det sökta tryckfallet: $\Delta p = 0,74 \text{ bar}$. Ett enklare alternativ är att gå in i data bladet i figur 20 och läsa av tryckfallet per meter vid flödet 300 l/min och multiplicera med rörlängden. Detta ger samma resultat.



Figur 22 Skjuvspänning respektive viskositet s.f.a. skjuvhastighet för koncentrat 1 vid ca 15 °C. Digrammen visar värden uppmätta med Cone and Plate (Cone Plate. 15 °C) och korrigerade värden (Cone Plate corrected. 15 °C) för rörströmning.

Det andra extremfallet är när endast en sprinkler är aktiverad vilket ger en skenbar skjuvhastighet på 8 s^{-1} . Enligt diagrammet är då skjuvspänningen ca 15 Pa vilket ger ett tryckfall på ca 0,28 bar. Problemet är att viskositeten är mycket hög (ca 1875 mPas) vid lågt flöde och skjuvspänningen ligger nära yieldvärdet. Detta kan mycket väl medföra att man inte får något flöde alls. I vilket fall som helst kommer skumvätskan att ha mycket svårt att "bestämma sig" om den skall bete sig som en flytande vätska eller en fast kropp som inte rör sig. Dessutom har vi förluster i tre stycken krökar. Dessa förluster är också i hög grad beroende av flödet och dimensionen på rören (krökarna), dvs Reynolds tal. Förlusttalet är enligt figur 14 ca 1,7 vilket ger ett tryckfall på ca 0,17 bar vid maximalt flöde (tre krökar). Totala tryckfallet vid maximalt flöde är alltså ca 0,91 bar. I detta fall kommer det alltså att krävas en skumpump av något slag för att transportera vätskan till inblandningsutrustningen. Vid det lägsta flödet ger krökförlusterna inget bidrag eftersom strömningen är laminär. Totala tryckfallet vid minsta flöde är alltså ca 0,28 bar vilket är mycket stort med tanke på det låga flödet (med vatten som vätska skulle tryckfallet i rokrörbiten vara ca 0,3 mbar).

Som jämförelse kan man göra en beräkning för systemet om vätskan är vatten (eller AFFF). Tryckfallet i rokrör delen vid högsta flödet blir då ca 0,23 bar och tryckfallet p g a krökarna blir ca 0,12 bar. Totala

tryckfallet blir alltså ca 0,35 bar vilket skall jämföras med 0,91 bar som man kan förvänta sig med koncentrat 1. Om man dimensionerat systemet för vatten skulle man endast få ett flöde på ca 20 l/min med koncentrat 1 istället för 300 l/min.

För att beräkna tryck och flöden är det alltså mycket väsentligt att man känner till viskositetsdata för den skumvätska man skall använda i systemet. Dessutom blir det problem då en skumvätska används i ett alltför stort rör då ett litet flöde erfordras. För att det skall fungera då endast en sprinkler är aktiverad krävs det ett klenare rörsystem så att skjuvhastigheten ökar och att därmed viskositeten minskar. Å andra sidan medför detta stora absoluta tryckförluster då alla sprinkler är aktiverade men skall man ha ett visst omfång i skumvätskeflöde krävs det kompromisslösningar. Det viktiga är dock att man vet förutsättningarna, bl a skumvätskans flödesegenskaper, för att systemet skall kunna dimensioneras.

Tunnlar

Även om sprinklersystemet är uppbyggt som ett grupputlösningssystem, dvs alla sprinkler aktiveras samtidigt, är det av intresse att veta skumvätskans viskösa egenskaper vid dimensioneringen. Exempel på detta kan vara då man dimensionerar sprinklersystem i tunnlar. Här handlar det om avstånd på upp till flera hundra meter. Ofta vill man lagra skumvätskan i en central tank, vilket innebär behov av att transportera skumvätskan i rörledningar till respektive inblandningsställe.

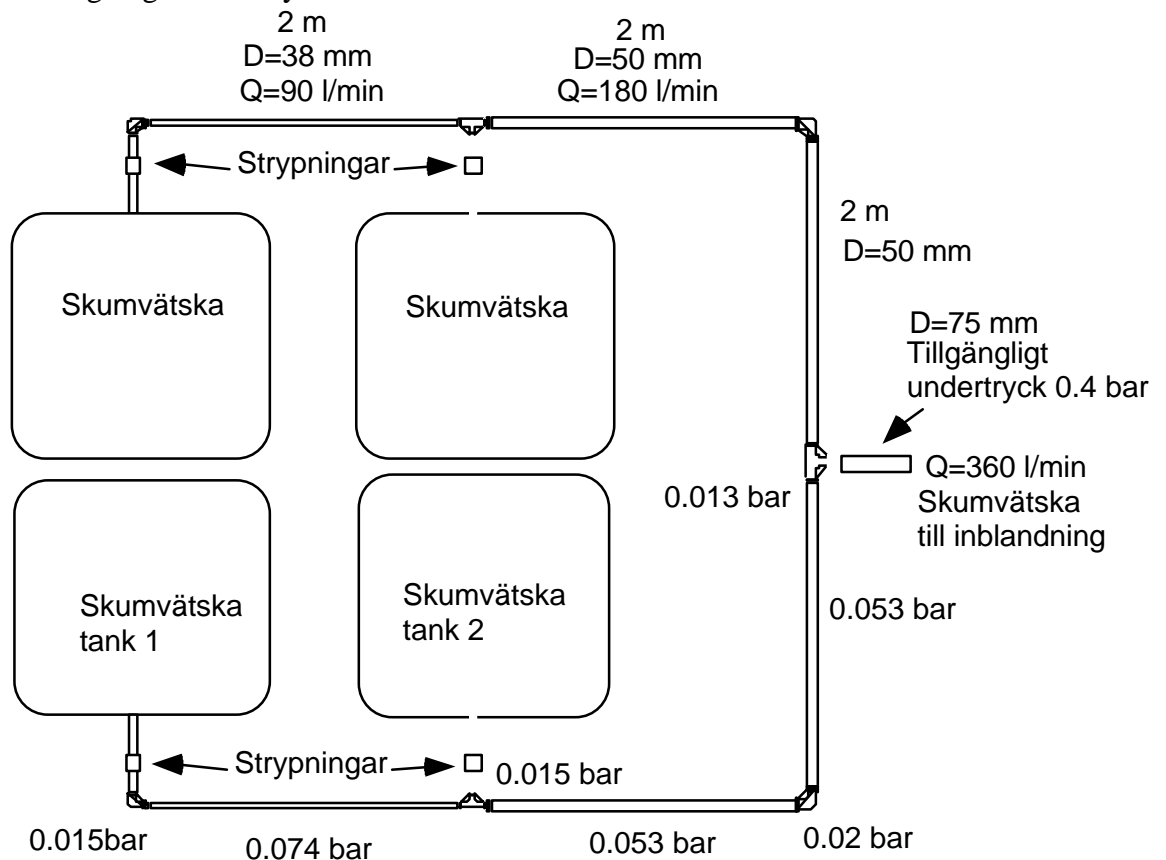
Ett exempel är sprinklersystemet i First Hill tunneln i Seattle. Tunneln är 870 m lång och sprinklersystemet är uppdelat i ca 20 sektioner. Totala flödet för en sådan sektion är ca 4500 l/min. Med 6% inblandning innebär det ett skumvätskeflöde på ca 270 l/min. Skum-inblandningsutrustningen, som finns vid varje sektion, matas med skumvätska via avtappning från en central huvudledning på 100 mm. Skumvätskan förvaras i tank och pumpas ut i huvudledningen. Antag att varje skumtank matar 3 sådana sektioner. Beroende på vilket system som löser ut får man olika strömningsförhållanden och tryckfall i huvudledningen. Viskositeten kommer vara ca 500 mPas då en sektion löst ut och ca 200 mPas då alla tre löst ut. Även här får man alltså problem om skumvätskan har icke-Newtonska egenskaper. En förutsättning för att lösa problemet är alltså att känna till skumvätskans viskositetsdata.

Matning till skumkanoner

Ett annat praktiskt exempel är matning av skumvätska till en stor skumkanon, t ex av den typ som nyligen anskaffats av Släckmedelscentralen (SMC) för skydd av större oljedepåer. Skumvätskan är här uppdelad i flera tankar som är förbundna med varandra via rör och kopplingar. Beroende på tankarnas placering och skillnaden i avstånd till injektorn kommer injektorn att suga vätska från den tank som ger det minsta motståndet. Detta skapar problem eftersom det blir en ojämn fördelning mellan tankarna. Med kändedom

om vätskans viskösa egenskaper är det dock möjligt att förutse denna ojäma fördelning och dimensionera rördragningen så att jämvikt uppnås.

Antag att systemet ser ut som i figur 23. Totala flödet skall vara 360 l/min (6% inblandning, 6000 l/min) vilket innebär att det skall strömma 90 l/min från varje tank. Rördimensionerna är valda så att rören blir grövre ju större flödet är. För att systemet skall vara balanserat, dvs att alla tankar ger lika flöde, måste man beräkna tryckfallen i rören och sedan reducera flödet från de tankar som ger för mycket flöde. Analysen kräver att man delar upp systemet i räckviddsdelar och engångsmotstånd. På liknande sätt som med exemplet med sprinklersystemet kan man med hjälp av skjuvhastighet/skjuvspänningsdiagram och diagram för engångsmotstånd beräkna de ungefärliga tryckfallen för de olika delarna. I figuren är dessa tryckfall markerade vid respektive rör eller komponent i den undre delen. Tillgängligt sugtryck antas vara ca 0,4 bar. Läger vi ihop tryckfallen till respektive tank får vi att tillgängligt sugtryck för tank 1 är ca 0,17 bar och för tank 2 ca 0,25 bar. Om utloppsrören är lika i bägge fallen innebär detta att flödet från tank 2 blir större. Risker är att vi inte får något flöde alls från tank 1 med tanke på att vätskan har ett yield värde och att det därför krävs ett visst tryck för att "få igång" vätskan. Om flödet skall bli lika från de båda tankarna krävs det att man ökar tryckfallet i utloppsröret i tank 2 med ca 0,08 bar (0,25-0,17 bar) exempelvis med en strypning eller gör om rördragningen så att symmetri mellan tank 1 och 2 erhålles.



Figur 23 Exempel på skumvätsketankar och rörsystem för matning av en skumkanon. För att skumvätskan skall flöda lika

mycket från varje tank krävs det att rörsystemet är balanserat.

I analysen har vi inte tagit hänsyn till det statiska trycket som höjdnivån i tankarna utgör men denna antas vara lika i alla tankar.

6 Slutsatser och diskussion

Målet med projektet har varit att utvärdera olika metoder för att karaktärisera skumvätskor och ta fram viskositetsdata för att med ledning av dessa kunna göra tryckfallsberäkningar. Av speciellt intresse är skillnaden i tryckförluster för AR-skumvätskor och lättflytande Newtonska vätskor som exempelvis vatten, detergentskum, och AFFF.

Det man konkret kan säga är att det krävs relevant viskositetsdata för att avgöra vätskornas strömningsegenskaper. Då kan man förutsäga om det föreligger några problem vid en viss tillämpning. I ett tidigare projekt (SP Rapport 1995:18) [1] har man kunnat konstatera att AR-skumvätskor ofta ger fel inblandning. Med viskositetsdata kan dessa problem förutsägas och åtgärdas. I vissa tillämpningar, såsom fasta installationer i t ex sprinklersystem, är tryckfallen i rörledningar av intresse och för att beräkna dessa krävs att man känner till viskositeten. Vid beräkning av tryckfall i rörsystem med begränsat antal engångsmotstånd är det rörströmningen som ger de största förlusterna p g a att AR skumvätskorna ofta är högvätskösa.

Viskositetsmätningarna har visat att det är möjligt att använda data från en sk Cone and Plate viskosimeter för beräkning av tryckfall i rörledningar. Att mäta upp viskositets data med rörströmningsförsök är mycket omständigt och tidskrävande och det åtgår stora mängder skumvätska.

Då det gäller tryckförluster som uppkommer p g a engångsmotstånd i ett system kan man konstatera att det är vissa skillnader mellan vatten och AR skumvätskor. I rena strypningar ger vatten upp till ca 50% större förluster än skumvätskor. Olika komponenter, t ex krökar T-rör, ventiler visar mestadels att vatten ger mindre förluster än AR skumvätskor vilket hänger ihop med AR skumvätskornas höga viskositet. Dessa olikheter i karaktär kan vara svårt att ta hänsyn till på fältet men användaren bör känna till problemet. Givetvis är målet att man tar hänsyn till vätskornas olika karaktär redan på konstruktionsstadiet för att uppnå de krav på inblandningsnoggrannhet som ställs på inblandningsutrustningen i olika standarder. Skumvätskans karaktär måste då beaktas eftersom funktionen är en samverkan mellan inblandningsutrustning och skumvätska.

Exempel på skumvätskeanläggningar som diskuterades i kapitel 5 illustrerade att det är nödvändigt med i första hand viskositetsdata för beräkning av rörströmningsförluster.

För injektorer är ett alternativ att använda kalibrerade strypbrickor på sugsidan. Försöken visar dock att vi får olika flöden beroende på vätska och att förlusterna är beroende av flödet och dimension på rör-system. Detta skulle betyda att vi i princip (lite överdrivet) måste ha en bricka för varje kombination av skumvätska, inblandningsutrustning, temperatur och inblandning. Vad kan man då göra? En del i det hela är att fastställa skumvätskans viskositet vid ett antal skjuvhastigheter genom en relevant viskositetsmätning, dvs med Cone and Plate viskosimeter. Resultatet ger möjlighet att beräkna tryckfall i slangar och ledningar och ger dessutom en fingervisning om tryckfall och förlusttal från engångsmotstånd.

Olika inblandningstrustningar är olika känsliga för förändringar anläggningskaraktäristik. Om injektorns sugkaraktäristik är brant vid aktuellt flöde spelar viskositetsdata inte lika stor roll men om man stryper flödet till mindre inblandning hamnar man på en flackare del av kurvan vilket innebär att strypningen måste vara exakt (jämför SP Rapport 1995:18) [1].

Rapporten ger inte konkreta svar på hur en inblandningsutrustning skall vara designad. Däremot visar den hur viktig viskositetsdata är för att konstruktören i varje enskilt fall skall kunna optimera utrustningen.

Rapporten visar att en Cone and Plate viskosimer ger relevant data och baserat på detta kan t ex respektive skumväsktillverkare ta fram förlustdiagram för varje skumvätska som är till stor hjälp.

Arbetet har också legat till grund för europaarbetet inom skumvätskor och Cone and Plate viskosimetern föreslås nu ingå i kommande EN-standard för skumvätskor [9,10].

Teckenförklaring

r	densitet (kg/m^3)
m	dynamisk viskositet ($\text{Pas}=\text{kg/ms}$)
$\dot{\gamma}$	skjuvhastighet (s^{-1})
$\dot{\gamma}_w$	skjuvhastighet vid väggen (s^{-1})
t	skjuvspänning (Pa)
t_w	skjuvspänning vid väggen (Pa)
D	dimeter hos ett rör (m)
L	längd hos ett rör (m)
m	rheologisk konstant (Pas^n)
n	rheologisk konstant (-)
dp	tryckfall (Pa)
$-\rho$	tryckfall (Pa)
Q	volymflöde (m^3/s)
q	skenbar skjuvhastighet (s^{-1})
R	radie hos ett rör (m)
u	hastighet (m/s)
z	förlusttal (-)
xi	förlusttal (-)

Referenser

- [1] Persson, Henry, Andersson, Ulf, *Funktionsprovning av skuminblandningsutrustning*, SP Rapport 1995:18, Borås, Sverige, 1995.
- [2] Bobert, Magnus, *Skumvätskor- Koppling mellan viskositetsdata och rörströmning*, SP Rapport 1995:10, Borås, Sverige, 1995.
- [3] Barnes, H.A., Hutton J., Walters, K., *An Introduction to Rheology*, Elsevier Science Publisher B.V, Netherlands, 1989.
- [4] Tanner, Roger I., *Engineering Rheology*, Oxford Engineering Science series 14, Oxford, USA, 1985.
- [5] Fried, Erwin, Idelchik, I.E., *Flow Resistance: A design guide for engineers*, Hemisphere Publishing Corporation, USA, 1989.
- [6] Goldstein, Richard J., *Fluid Mechanics Measurements*, Hemisphere Publishing Corporation, USA, 1983.
- [7] Gustavson, Bror-Arne, *Kompendium i strömningsmaskinteknik*, CTH, Göteborg Sverige, 1992.
- [8] Isaksson Ove, *Hydraulik*, second edition, Hydcon, Luleå, Sverige, 1989.
- [9] CEN/TC191/WG3 Doc N 108 "Comments and proposals to the viscosity/fluidity issue"1996-07.
- [10] Presentation av projektet vid möte i WG3 , Berlin 96-10-09
- [11] Bobert, Magnus, "*Skumvätskors viskositet och flödeskaraktäristik-Teori och försökdata*", SP Arbetsrapport 1996:42, Borås, Sverige, 1996

Appendix A

A.1 Strömningslära

Allmänt för fluider gäller Bernoullis ekvation:

$$p_1 + \frac{\rho u_1^2}{2} + \rho g z_1 = p_2 + \frac{\rho u_2^2}{2} + \rho g z_2 + dp \quad (1)$$

där p är det statiska trycket, u är hastigheten, ρ densiteten, z höjden refererat till en viss referensnivå och dp är summan av förlusterna. Index 1 och 2 anger två punkter längs en strömlinje. Vid rörströmning kan ekvationen tillämpas om man antar att index 1 och 2 anger tvärsnitt i röret och att medelvärden används. Om hastigheten är densamma vid punkt 1 och 2 och $z=0$ är skillnaden mellan p_1 och p_2 lika med förlusterna.

Ett annat viktigt uttryck i strömningsläran är Reynolds tal:

$$Re = \frac{\rho u L_k}{\mu} \quad (2)$$

där L_k är en karakteristisk längd, μ är den dynamiska viskositeten. Vid rörströmning gäller att det är turbulent strömning då $Re > 2300$.