

# Rotationsviskosimeter, RVB

Ett alternativ till konventionella metoder för viskositetsmätning på bitumen



LUNDS  
UNIVERSITET

Lunds Tekniska Högskola

LTH Ingenjörshögskolan vid Campus Helsingborg  
Instutionen för teknik och samhälle / Trafik och väg

Examensarbete:

Erik Nilsgart

Tobias Grybb



© Copyright Erik Nilsgart, Tobias Grybb

LTH Ingenjörshögskolan vid Campus Helsingborg  
Lunds universitet  
Box 882  
251 08 Helsingborg

LTH School of Engineering  
Lund University  
Box 882  
SE-251 08 Helsingborg

Sweden

Tryckt i Sverige

Media-Tryck

Biblioteksdirektionen

Lunds universitet

Lund 2014

## Sammanfattning

Bitumen är för de flesta ett okänt material samtidigt som det är den viktigaste beståndsdel i asfaltbeläggningar, något som alla känner till och använder sig av varje dag. Bara genom att destillera råolja framställs ett ämne med unika egenskaper och hållbarhet, som inte skulle kunna framställas på syntetisk väg, i varje fall inte i de volymer som används.

Helt enkel är inte framställningen och råvaran måste väljas med omsorg. Mjuka varianter är till för kalla klimat och de hårda för jordens varma områden. Detta för att bitumens styvhet beror på temperaturen.

Bitumen håller samman stenmaterialet och tillsammans bildar de beläggningmaterialet asfalt. För att önskad kvalitet ska åstadkommas måste asfalten blandas och läggas ut på bästa sätt. Ett styvt bitumen som ger en styv asfalt måste värmas mer än ett mjukt.

För att räkna ut vilken temperatur som krävs mäts bituminets viskositet, det vill säga hur trögflytande det är. Ämnets viskositet bestäms vid olika temperaturer och den temperatur väljs som ger asfalten den rätta konsistensen.

De senaste decennierna har nya mätmetoder för viskositetsbestämning utvecklats, som gör mätningarna mindre arbetsintensiva och mer produktiva. Problemet är att de gamla metoderna är inarbetade i regelverken och välkända bland de flesta aktörerna. Det skapar en tröghet mot förändringar. I ett försök att öka takten i förändringsarbetet lanserar detta examensarbete en ny gammal metod, rotationsviskosimeter av fabrikat Brookfield, RVB, som genomgått stora förbättringar de senaste åren.

För att visa RVB-teknikens användbarhet undersöktes tre olika typer av bitumen, 70/100 som är ett standardbitumen, Sas 85-3 som är ett bitumen innehållande vaxet Sasobit och PMB som är ett vanligt förekommande polymermodifierat bitumen. Viskositeten bestämdes i olika stadier, nyttillverkat, efter utläggning och i slutet av asfaltens funktionstid. De två senare stadierna simulerades med två värmemetoder, RTFOT och PAV. Bitumen och asfalt förändras med åren och förlorar till slut sin spänst och sammanhållande förmåga och måste repareras eller bytas ut. Man säger att beläggningen har åldrats. Dessa förlopp kan beskrivas med RVB och det ger underlag för vilka kvaliteter som ska väljas.

Resultaten måste presenteras på ett överskådligt och lättbegripligt sätt. För det syftet har ett annat nygammalt hjälpmedel tagits upp igen: Heukeloms BTDC, *Bitumen Test Data Chart*, som lanserades för mer än 40 år sedan. Resultaten av RVB-mätningarna passar utmärkt att presenteras i diagrammet, som nu har digitaliserats för modern sifferhantering. Denna synergi har utvecklats på LTH i Lund i fem examensarbeten sedan 2011, förutom i detta föreliggande arbete.

Undersökningen visar att RVB på ett trovärdigt sätt förmår mäta viskositeten hos tre reologiskt mycket olika bindemedel, så att deras egenskaper kan jämföras och värderas som komponenter i asfalt. Sasobitvax gör bindemedlet styvare när vaxet kristalliserar, samtidigt som det tillför icke-newtonska egenskaper och något försämrade lågtemperaturegenskaper. De goda egenskaperna i polymermodifierat bitumen kommer till priset av hög tillverknings temperatur, vilket framgår av viskositetsmätningarna.

Åldringsmetoden RTFOT överensstämmer bra med vad som uppmäts efter tillverkningen. I kombination med PAV återspeglas vad som uppmäts i gammal returafalt.

Precisionen i mättekniken är viktig och det studeras i ett av arbetets avsnitt. RVB-teknikens noggrannhet uppfyller i huvudsak kraven i amerikanska ASTM och understiger tillåtna värden i europeiska SS-EN. Detta konstateras efter att ha varierat tider, invägd provmängd och skjuvhastighet, några parametrar som kan påverka mätresultaten.

RVB-tekniken ersätter i en enda mätning tre normerade mätmetoder, Kula och Ring, dynamisk viskositet respektive kinematisk viskositet. Detta sparar mycket tid och pengar.

Tekniken är inte bara tillräcklig repeterbar utan tillför information utöver vad de gamla metoderna erbjuder, nämligen en samlad bild i Heukeloms diagram. Mätningarna kan dessutom övervakas och styras över internet, vilket ger möjlighet till tid- och kostnadsbesparande arbetsfördelning på laboratoriet.

Allt detta sammantaget bör räcka för att ge RVB-tekniken en central roll i framtida kvalitetsbedömning av bitumen och modifierade bindemedel för asfalt.

Nyckelord: Bitumen, viskositet, rotationsviskosimeter, Brookfield, Sasobit, polymermodifiering

## Abstract

To most people bitumen is an unknown material although it is the most important ingredient in asphalt pavements, something that everyone knows and uses every day. By merely distilling crude oil a substance is produced with unique properties and durability, which could not have been produced by synthetic means, at least not in those quantities used.

The production is not that simple and the raw material must be chosen carefully. Soft qualities are for cold climates and hard ones are for hot areas. This is due to the fact that the bitumen stiffness depends on the temperature.

Bitumen binds the aggregate together and jointly they constitute road asphalt pavements. To achieve the desired quality it must be mixed and laid down in the best way possible. Consequently, stiff bitumen resulting in hard asphalt pavements must be heated more than the soft qualities.

In order to figure out what temperature is required the viscosity of the bitumen is measured. It is determined at different temperatures and the one providing the right consistency of the asphalt mix is chosen.

In recent decades, new methods for measuring viscosity have been developed, which makes the measurements less labor intensive and more productive. The problem is that the old methods are incorporated in the regulations and are well-known to most operators. It creates an inertia to change. In an attempt to increase the pace of this transformation this thesis is launching an old-school method, called rotational viscometer, manufactured by Brookfield, RVB in short. The equipment has undergone major improvements in recent years.

To demonstrate the usefulness of this RVB-technique three different types of bitumen were investigated, 70/ 100 which is a bitumen of standard quality, Sas 85-3 which is a bitumen containing Sasobit wax and PMB, a widely used polymer modified bitumen. The viscosity was determined at various stages, virgin before mixing, after laying down on the road and at the end of the asphalt pavement life time. The latter two stages were simulated with two heating methods, RTFOT and PAV. Bitumen and asphalt change over the years and eventually loses its elasticity and cohesiveness and must be repaired or replaced. The expression is that the pavement has aged. These processes can be illustrated by RVB and it provides a basis for proper grades to be selected.

The results must be presented in a way easy to survey and understand. For this purpose, another old-school tool is taken up again: the Heukelom BTDC, Bitumen Test Data Chart, which was launched more than 40 years ago. The results of RVB measurements are ideal to be presented in the chart, which has now been digitized for modern numerical processing. This synergy has been

developed at Lund University in five theses since 2011, besides this present work.

The survey shows that RVB in a credible manner is capable of measuring the viscosity of three rheologically very different binders, so that their properties can be compared and evaluated as components of asphalt pavements. The Sasobit wax makes binder stiffer when it crystallizes, while it adds non-Newtonian properties and somewhat poorer low temperature properties. The suitable qualities of polymer modified bitumen come at the cost of high manufacture temperatures, as indicated by viscosity measurements.

The aging method RTFOT correlates well with what is measured in asphalt after being mixed and laid on the road. In combination with PAV it reflects what is found in old reclaimed asphalt.

The precision of the measurement technique is important and it is studied in one of the job sections. The accuracy of the RVB-method largely complies with the requirements of the American ASTM and keeps below the allowable values in European EN. This is concluded after having varied times, weighed amount of sample and shear rate, some parameters that might influence the results.

The RVB technology replaces in one single measurement three standardized methods, Ring and Ball, dynamic viscosity and kinematic viscosity. This saves a lot of time and money.

The technique is not only adequately repeatable but also adds information beyond what the old methods offer, namely an overall picture in the Heukelom chart. The measurements can also be monitored and controlled over the internet, which allows for time - and cost-saving labor division at the laboratory.

These findings should be sufficient to give the RVB technology a central role to play in future quality assessments of bitumen and modified binders for asphalt pavements.

Keywords: Bitumen, viscosity, rotational viscometer, Brookfield, Sasobit , polymer modification



## Förord

Detta examensarbete skrivs som en avslutande del i vår högskoleingenjörsutbildning inom väg och trafikteknik vid Campus Helsingborg, Lunds Tekniska Högskola.

Arbetet i rapporten har utförts till lika stor del av oss båda. Och vi har båda minst en gång provat på varje delmoment utförandet av en mätning.

Vi vill tacka vår examinator Ebrahim Parhamifar som ordnade så att vi fick kontakt med vår handledare Per Tyllgren. Ebrahim förtjänar även ett stort tack för att ha gjort sitt bästa för att det tillfälliga laboratoriet ska vara både trivsamt och ha bra arbetsmiljö

Vi vill rikta ett stort tack till vår handledare Per Tyllgren som har varit till stor hjälp under arbetets gång. De många kommentarer och tips han har gett oss har hjälpt arbetet i rätt riktning. Ett särskilt tack ges även för den hjälp med databehandling, diagram och tolkningar som getts under rapportskrivningen.

Vi vill även tacka Nynas AB som har hjälpt till med labbarbete, där de bland annat utfört RTFOT och PAV behandlingarna på det bitumen som använts i arbetet.

Helsingborg 2014

Erik Nilsgart

Tobias Grybb

<b>1 Inledning</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1 Bakgrund</b> .....	<b>1</b>
<b>1.2 Syfte</b> .....	<b>2</b>
<b>1.3 Avgränsningar</b> .....	<b>2</b>
<b>1.4 Metod</b> .....	<b>2</b>
<b>2 Grundläggande fakta</b> .....	<b>3</b>
<b>2.1 Reologi</b> .....	<b>3</b>
2.1.1 Historik .....	3
2.1.2 Definition .....	3
2.1.3 Viskositet .....	4
<b>2.2 Bitumen</b> .....	<b>4</b>
2.2.1 Råvaran, tillverkning, kvaliteter och benämningar.....	4
2.2.2 Polymermodifierade bitumen.....	5
2.2.3 Sasobit .....	5
<b>2.3 Åldringsmetoder</b> .....	<b>6</b>
2.3.1 RTFOT .....	6
2.3.2 PAV .....	7
<b>2.4 Heukeloms BTDC</b> .....	<b>8</b>
2.4.1 Historia .....	8
2.4.2 Konstruktionen av BTDC .....	8
2.4.3 Tillämpning .....	9
<b>3 Genomförande</b> .....	<b>10</b>
<b>3.1 Brookfields rotationsviskosimeter, RVB</b> .....	<b>10</b>
3.1.1 Historik .....	11
3.1.2 Spindel .....	11
3.1.3 Behållare .....	12
3.1.4 Tillverkning av prover .....	13
3.1.5 Programmerad körning.....	14
3.1.6 Fjärrstyrning .....	15
<b>4 Resultat</b> .....	<b>16</b>
<b>4.1 Bitumenstudier</b> .....	<b>16</b>
4.1.1 70/100 .....	17
4.1.2 Sas 85-3.....	18
4.1.3 PMB.....	20
4.1.4 Penetration och Fraass .....	23
<b>4.2 Variationsstudier av RVB-tekniken</b> .....	<b>24</b>
4.2.1 Olika spindlar.....	25
4.2.2 Mätningens varaktighet .....	25
4.2.3 Torsion/varvtal/skjuvspänning .....	26
4.2.4 Invägd provmängd.....	28
<b>5 Slutsatser och diskussion</b> .....	<b>30</b>
<b>5.1 RVB-tekniken</b> .....	<b>30</b>

<b>5.2 Jämförelsen mellan bitumensorter .....</b>	<b>30</b>
<b>5.3 Förslag till kommande arbeten.....</b>	<b>31</b>
<b>Referenslista.....</b>	<b>32</b>
<b>BILAGOR.....</b>	<b>35</b>
<b>Bilaga 1. Sifvertabeller över viskositetsmätningar med RVB .....</b>	<b>36</b>
<b>Bilaga 2. Heukelom BTDC över viskositetsmätningar med RVB..</b>	<b>40</b>
<b>Bilaga 3. Tabell med mätresultat från variation av torsionsvärde vid varje temperatur .....</b>	<b>44</b>



# 1 Inledning

## 1.1 Bakgrund

Asfalt är en välbekant benämning för det vi kör våra bilar på. Asfalt består huvudsakligen av två komponenter, bitumen och stenmaterial. Bitumen är den produkt i asfalt som håller ihop stenmaterialet och fungerar som ett klister. Bitumen framställs genom destillation av råolja. Beroende på råoljans kvalitet erhålls olika stora mängder bitumen med olika hårdheter som ger produkten termoplastiska egenskaper. Stenmaterialet värms för att bituminet ska bli tillräckligt lättflytande och blandas väl med stenmaterialet (Asphalt Institute, Eurobitume 2011).

Bitumen finns av olika typer och kvalitéer. För att mäta egenskaperna hos ett bitumen används flera mätmetoder. Penetration bestämmer hårdheten, Kula & Ring mäter mjukpunkten och kapillärviskosimeter mäter viskositeten på flytande bitumen. Beroende på varierande förutsättningar kring mätningarna kan olika metoder ge olika resultat. Det finns sedan gamla diagram som knyter samman resultaten. Den mest använda är Heukeloms BTDC, *Bitumen Test Data Chart* (Read&Whiteoak, 2003).

En mätmetod som inte används i samma utsträckning som de konventionella är rotationsviskosimetern. Tekniken har funnits i många år och har kommit att bli synonym med det vanligaste fabrikatet, Brookfield, därav den förkortade benämningen RVB på mättekniken. Den mäter dynamisk viskositet hos vätskor i allmänhet och därmed också i bitumen men har mestadels använts till att uppskatta ungefärliga mätvärden. Förbättringen av kringutrustningarna, bland annat med en elektrisk värmeenhet, och en mjukvara som gör det möjligt att styra maskinen via en dator, har i hög grad ökat precisionen och användbarheten av rotationsviskosimetern. Det är nu möjligt att ta fram flera mätpunkter i en mätomgång från 150 – 1 300 000 mPa·s med en och samma spindel. Med hjälp av Heukeloms diagram kan resultaten betraktas och utvärderas som en sammanhängande grafisk bild av bituminets reologiska egenskaper. Möjligheten att ersätta standardmätningarna samt att få resultaten i ett och samma diagram för jämförelser ökar väsentligt metodens användbarhet (Tyllgren, 2014).

## **1.2 Syfte**

Avsikten med arbetet är att visa användbarheten hos en teknik för viskositetsmätning som har praktiserats och utvecklats på LTH i flera examensarbeten sedan 2011. Det sker med en känslighetsundersökning och jämförelser med angivna gränsvärden i ASTM och SS-EN. Metodens förmåga att beskriva den viskösa karaktären hos bitumen provas i en jämförelse mellan vanligt standardbitumen och två förekommande modifierade sorter. Samtidigt tillförs nya erfarenheter och utveckling av arbetsmomenten.

## **1.3 Avgränsningar**

Studien är begränsad till tre bitumensorter 70/100, Sas 85-3 och PMB. Produkterna är typiska representanter för respektive bindemedelsslåg. Deras officiella produktnamn anges inte av sekretesskäl.

Resultaten på bitumensorterna från RVB-körningarna jämförs inte med konventionella metoder som Kula & Ring och kapillärviskosimetrar eftersom det inte var syftet med studien.

En mätserie skulle hinna avslutas inom 8 timmar, vilket begränsade antalet mätpunkter till maximalt tio stycken.

## **1.4 Metod**

För att få en grundläggande förståelse för ämnet som mätningarna handlar om genomfördes en litteraturstudie. Denna innehöll studier om bitumen, modifiering av bitumen och hur så kallad åldring kan simuleras på laboratorium. Dessutom behövdes kunskaper om mätinstrumentet och dess användningsområden. Detta innefattade studier av amerikanska och europeiska standarder för mätutrustningen men också tillverkarens hanteringsmanualer.

Mätinstrumentet har tidigare använts i en rad examensarbeten på LTH. Under dessa har en särskild metodik utvecklats för provtagning, programmering, presentation och utvärdering. Detta examensarbete har bidragit med ytterligare studier och förbättringar i detta fortgående utvecklingsarbete.

## 2 Grundläggande fakta

### 2.1 Reologi

#### 2.1.1 Historik

Långt tillbaka i tiden användes byggnadsmaterial som kunde hittas i naturen och användas i befintligt skick. Egenskaperna hos materialet var oförändrade när de användes som byggnadsmaterial, t.ex. sten eller trä. Materialläran var ganska enkel och baserad på *trial and error*. Men i takt med industrialiseringen behövde egenskaperna hos produkter som gummi, plast, målarfärg och oljeprodukter beskrivas närmare på ett enhetligt sätt. En av pionjärerna inom detta område var svensken Svante Arrhenius. I slutet av 1920-talet kom den amerikanske kemisten Bingham och hans team fram till ett gemensamt begrep för att beskriva flytande ämnens beteende, nämligen reologi. Ordet reologi härstammar från grekiskans "flyta" och "lära" (Nielsen, 1968).

#### 2.1.2 Definition

Reologi beskriver vätskors och fasta materials deformationsegenskaper beroende på tid, spännings- och töjningsförhållanden under en påtvingad rörelse. Genom matematisk modellering använder man sig av sambandet mellan belastning (spänning) och deformation (töjning), för att förutse deformationsförloppet hos ett material. Här bidrog Arrhenius med lanseringen av den så kallade skiffaktorn, som beskriver sambandet mellan tid och temperatur för polymera ämnen (Shodor 2014).

Olika ämnen beskrivs i huvudsak med begreppen elasticitet och viskositet. För fasta material anges elastisk deformation med *elasticitetsmodulen*  $E$  och för vätskor viskös deformation med *viskositeten*  $\eta$ . Genom att kombinera storheterna parallellt eller i serie kan alla materialtypers egenskaper beskrivas.

Viskoelastiska material visar prov på både viskösa och elastiska egenskaper. Temperatur och belastningstid eller frekvens spelar avgörande roller för när ett viskoelastiskt ämne domineras av det ena stadiet eller det andra. Därtill ändras egenskapen som sådan, till exempel att  $E$ -modulen och viskositeten minskar med ökande temperatur. Polymera ämnen som framställs ur petrokemiska råvaror har dessa egenskaper. Ett av dem är bitumen (NE 2014b).

### 2.1.3 Viskositet

Viskositet beskriver den inre friktionen i vätskor och gaser. Det finns två typer av viskositet, *dynamisk* från påtvingad rörelse och *kinematisk* med densiteten som påskjutande kraft. Viskositeten motverkar hastighetsförändringar mellan skikt i vätskan. Det medför att vätskor med hög inre friktion har högre viskositet än vätskor med låg inre friktion. Exempelvis har sirap högre inre friktion än vatten och har därför även högre viskositet. Viskositeten kan påverkas av omständigheter som temperatur eller den påförda skjuvspänningen (NE 2014b).

En vätska sägs vara newtonsk om viskositeten är oberoende av skjuvspänningen. En icke-newtonsk vätska ändrar viskositeten med skjuvspänningen. Ett populärt exempel på det är ketchup. Vanligt bitumen i uppvärmd flytande form uppträder som en newtonsk vätska medan ett modifierat bindemedel kan reagera som en icke-newtonsk vätska.

I asfalttillverkningen är viskositeten en viktig men ofta underskattad parameter. För att den färdiga asfalten ska få de avsedda egenskaperna måste tillverkningen lyckas i alla delar från blandning till komprimeringen på vägytan. Här spelar asfaltens konsistens en avgörande roll. Den enskilt starkaste faktorn som styr konsistensen är bindemedlets viskositet (Tyllgren 2014).

## 2.2 Bitumen

### 2.2.1 Råvaran, tillverkning, kvaliteter och benämningar

Petroleumbaserat bitumen framställs genom destillation av råolja. Destillationen sker vid undertryck och samtidigt med bitumen utvinns även andra petrokemiska oljeprodukter. Exempel på dessa är eldningsolja, bensin och naturgas.

Bitumen används främst som bindemedel i asfaltbeläggningar men har även andra användningsområden, till exempel i takpapp (Asphalt Institute, Eurobitume 2011).

Bitumen saknar smältpunkt och det är avgörande för funktionen som bindemedel i vägar. Det ger bland annat asfalten dess läkande förmåga. I avsaknad av smältpunkt anges istället ett övergångsstadium som kallas *mjukpunkt*. Den definieras som temperaturen vid den dynamiska viskositeten  $1\ 300\ 000\ \text{mPa}\cdot\text{s}$  eller ibland förkortat till  $1,3\ \text{kPa}\cdot\text{s}$  (Heukelom, 1973).



Bitumen brukar vanligen namnges och garderas efter följande egenskaper och information.

- Penetrationsbitumen
- Oxiderat bitumen
- Bitumenlösningar

(Read&Whiteoak, 2003).

Bitumen med olika egenskaper har olika användningsområden. Ett hårt bitumen är anpassat för varma klimat, ett mjukt bitumen fungerar bäst i kallare klimat (Tyllgren, 2014).

### 2.2.2 Polymermodifierade bitumen

Polymermodifierat bitumen eller PMB är bitumen som har modifierats genom tillsatser av någon sorts polymer. Dessa karakteriseras främst av att de har långa molekyllängder och är mycket sega. Syftet med den här typen av tillsatser är att ändra de reologiska egenskaperna hos bindemedlet för att i sin tur påverka asfaltens funktion under belastning. Ofta handlar det om att göra asfalten starkare och mindre benägen att deformeras. Polymermodifierat bitumen kräver ofta hög tillverkningstemperatur, vilket har flera negativa konsekvenser för arbetsmiljön och yttre miljön (Tyllgren, 2013).

Asfalt med PMB används särskilt på kritiska områden som brobeläggningar och områden med extra hög belastning som till exempel hamn- och lastområden. Det hävdas att polymermodifierade beläggningstyper håller längre på högtrafikerade vägar. Där kan det vara fördelaktigt med längre tidsintervall mellan lagnings och reparationsarbeten för att störa framkomligheten så lite som möjligt (Read&Whiteoak, 2003).

### 2.2.3 Sasobit

Sasobit är ett vax med många industriella tillämpningar och används bland annat som tillsatsmedel i bitumen för att ge asfalten goda egenskaper i flera avseenden. Vaxet tillverkas av företaget Sasol Limited, hemmahörande i Sydafrika, och framställs genom Fischer-Tropsch-processen från kol och naturgas.

Sasobit har en smältpunkt mellan 85-115°C. Vid temperaturer från 115°C och uppåt är vaxet helt löst i bituminet och bidrar till att sänka viskositeten. Beroende på mängden Sasobit som tillsätts kan tillverkningstemperaturen sänkas med 10-30°C. På så vis sänks energiåtgången och minskas utsläppen av miljöbelastande gaser vid tillverkning och utläggning av asfalt (Sasol 2014).

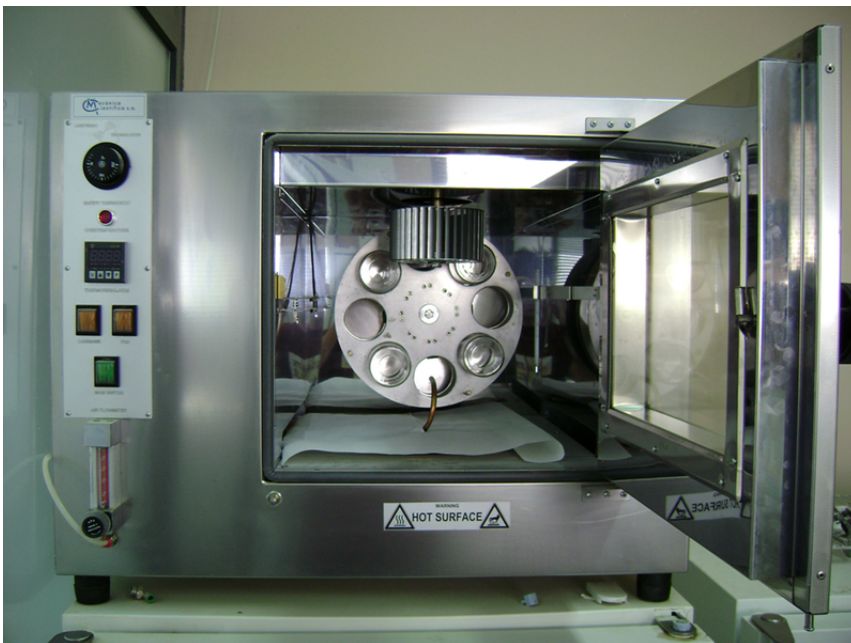
## 2.3 Åldringsmetoder

Egenskaperna hos bitumen och därmed asfalt ändras med åren ute på vägen som en effekt av oxidation, ultraviolettt strålning och annan kemisk påverkan förutom ren belastningsutmattning. Det kallas kort och gott för åldring. Effekten för bitumen och asfalt blir ett styvare och mindre eftergivligt material, som till slut spricker upp under belastningarna. Det är tecknet på att beläggningen måste repareras eller bytas ut och kan ta allt mellan 10 till 30 år beroende på omständigheterna. För att undvika att detta sker på grund av brister i materialen görs simulerade åldringstester på laboratorium innan man gör hållfasthetstester eller reologiska mätningar. Det sker genom att utsätta en tunn bitumenfilm för heta luftströmmar och undertryck enligt två metoder, RTFOT och PAV. Båda används i den här undersökningen för att undersöka effekten av dem.

RTFOT används i svenska regelverk medan PAV bara används i USA i dimensioneringskonceptet Superpave (Tyllgren 2014)

### 2.3.1 RTFOT

Korttidsåldring utförs med RTFOT (*Rolling Thin Film Oven Test*) och ska efterlikna uppstyvningen under processen vid tillverkning och utläggning av asfalt.



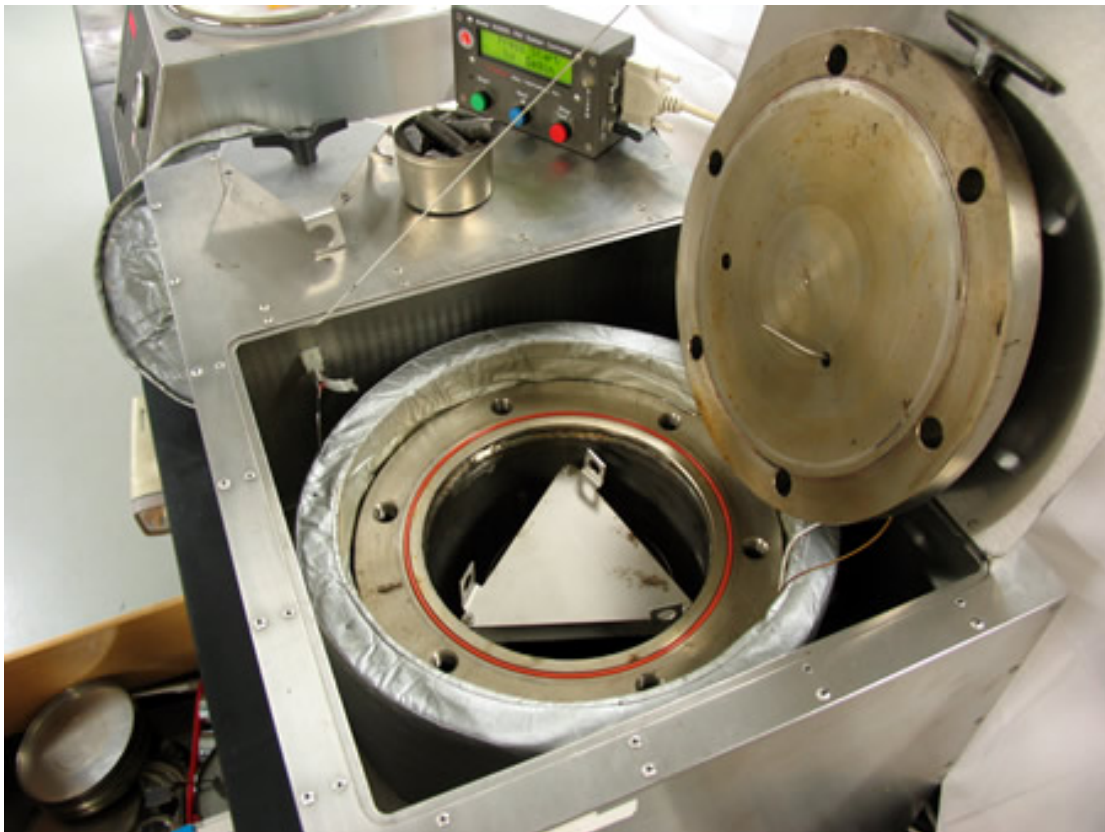
RTFOT består av en roterande skiva med ett eller flera prover ett värmeelement samt ett blåsmunstycke med tryckluft. Åldringen består av omrörning i kombination med att värme och syre tillförs (Read&Whiteoak, 2003).

Figur 1. RTFOT (Sorigue,2014)

### 2.3.2 PAV

Långtidsåldring görs med RTFOT och PAV (*Pressure Ageing Vessel*) och beskriver tillståndet i slutet av asfaltbeläggningens funktionstid. RTFOT utsätter först bituminet för åldringen vid tillverkning och utläggning och PAV tar sedan vid och utsätter bituminet för åldringen som kommer att ske ute på vägen (Tyllgren 2014).

Ett mycket tunt lager bitumen placeras på en platta i PAV-maskinen och utsätts därefter för ett tryck på 2070 kPa vid någon av temperaturerna 90, 100, 110 grader. En del kritik har riktats mot att temperaturen som bituminet utsätts för är mycket högre än i verkligheten. Själva idén med temperaturvalet är att accelerera och simulera åldringen, som annars hade tagit oerhört lång tid. Slutresultaten av både RTFOT och RTFOT+PAV kommer att bedömas i nedanstående resultatavsnitt (Read&Whiteoak, 2003).



Figur 2. PAV (Pavementinteractive,2011)

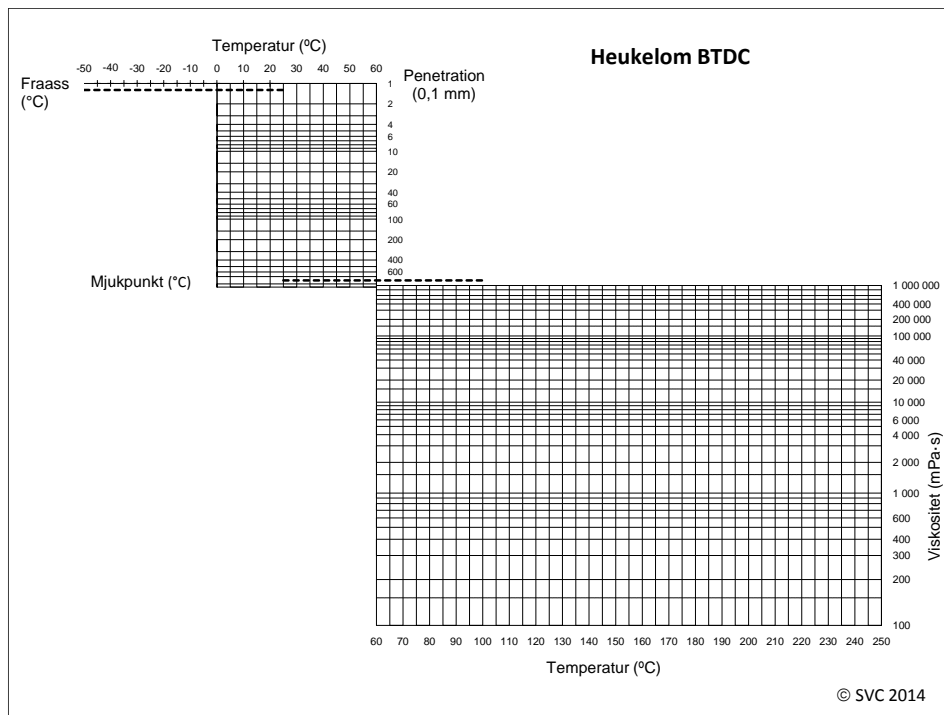
## 2.4 Heukeloms BTDC

### 2.4.1 Historia

*Fraass breaking point* är en mätmetod som anger vid vilken temperatur som bitumen blir så pass styvt att det spricker. Typiska värden är -10 till -30°C. *Penetration*, *mjukpunkt* och *viskositet* är konventionella och välkända mätmetoder för alla asfalttekniker. I slutet av 1960-talet gjorde Willem Heukelom vid holländska Shell i Amsterdam ett diagram där mätresultaten av alla dessa fyra mätmetoder på ett och samma bitumen visas grafiskt som funktion av temperaturen. Diagrammet presenterades i slutligt skick 1973 (Heukelom, 1973). Diagrammet har det officiella namnet *Bitumen Test Data Chart* eller *BTDC* (Read&Whiteoak, 2003) men har bland bitumentekniker i alla år gått under namnet *Heukelomdiagram*.

### 2.4.2 Konstruktionen av BTDC

Diagrammet är uppbyggt av en gemensam horisontell linjär temperaturskala och fyra presentationsdelar, en för varje mätmetod. Två av dem är 2-dimensionella diagram (viskositet, penetration) och två är horisontella linjer som är helt synkrona med temperaturskalan (Fraass, Mjukpunkt). Penetrationen avsätts med 10-logaritmen av mätvärdet vid undersökt temperatur medan viskositetens vertikalskala följer den så kallade WLF-formeln enligt Heukelom (Heukelom, 1973) (Read&Whiteoak, 2003) (Erlandsson, 2012).



Figur 3. Heukeloms BTDC

### 2.4.3 Tillämpning

BTDC-diagrammet är ett användbart verktyg för att ta reda på hur viskositet och temperatur förhåller sig till varandra, men även hur olika bitumen uppträder i samma temperaturområde. Att känna till viskositeten vid en viss temperatur är användbart bl.a. vid utläggning och blandning av bitumen. Om temperaturen är för hög eller för låg blir resultatet av blandningen med stenmaterialet och bitumen inte optimalt. (Tyllgren, 2013)

Eftersom sambandet mellan mätmetoderna är ungefär en rät linje mellan diagrammen för ett vanligt bitumen går det att inter- och extrapolera mätvärden längst linjen. Detta gör det möjligt att förutse hur viskositet och temperatur förhåller sig till varandra utöver de mätpunkter man tagit fram, vilket ger BTDC ett brett användningsområde (Read&Whiteoak, 2003).

Skalorna har ganska låg upplösning vilket gör det svårt att avläsa värden med någon större noggrannhet. Det är inte heller numera syftet utan grafiken ska bara illustrera förlopp eller förändringar och jämförelser och ge visuella bilder av resultaten. De exakta värdena vid sidan av mätpunkterna kan beräknas med formler baserade på WLF-sambandet (Erlandsson, 2012) (Thylander/Gustavsson 2013).

## 3 Genomförande

### 3.1 Brookfields rotationsviskosimeter, RVB



Figur 4. RVB med kringutrustning

Brookfields utrustningspaket består av mätenheten med roterande spindel, Thermosel värmeenhet, termisk styrenhet och PC med mjukvaran Rheocalc som styr processen. Instrumentet kan också styras med knappsatsen på instrumentet men det har aldrig tillämpats och får ses som en nödlösning.

Två spindeltyper användes i det här fallet. De har fast axel som fästs med en låskoppling vid instrumentets roterande del.

I det här arbetet har mätningar och avläsningar delvis skett via internet.

En sammanställning av utrustningspaketet ser ut på följande sätt:

- Brookfield Viscometer DV-II+ Pro EXTRA med stativ
- Brookfield Thermosel värmeenhet med tillhörande styrenhet.
- Dator med Rheocalc Programvara
- Våg med noggrannhet  $\leq 0,1\text{g}$
- 10 ml engångs plastsprutor
- Provbehållare med stativ
- Tång för hantering av provbehållare
- Spindel med fast axel SC4-27 (#27), SC4-29 (#29)

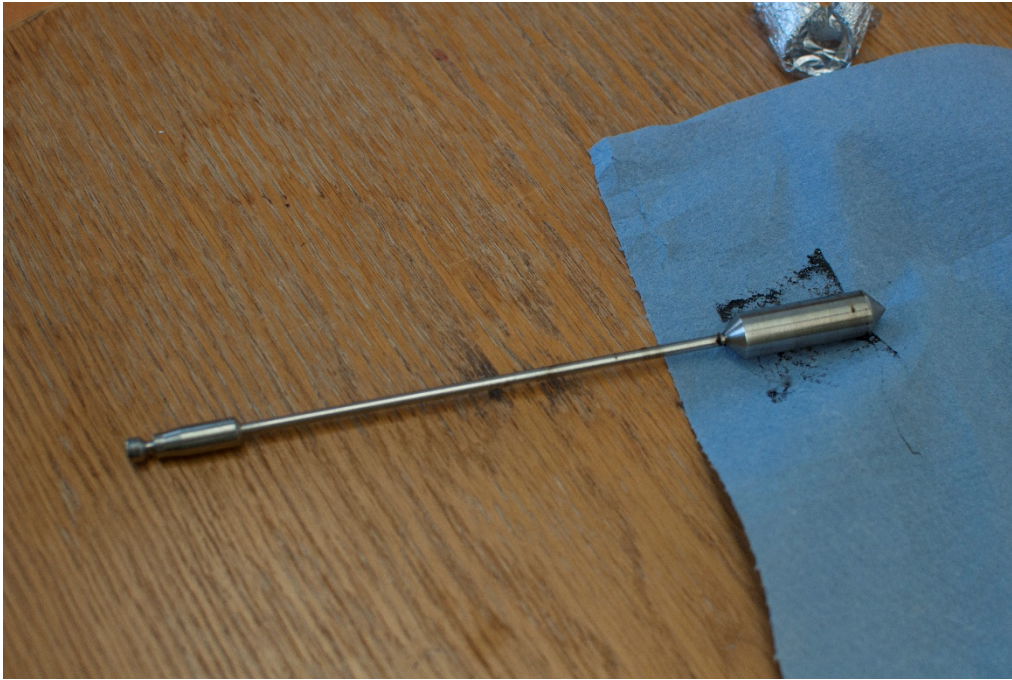
### 3.1.1 Historik

Don Brookfield skulle 1932 köpa en viskosimeter för att använda till att mäta vätskors fysiska egenskaper, när han kom fram till att han kunde bygga en bättre. Redan två år efter detta sålde han sin första viskosimeter. I samband med detta startade han, hans bröder och deras far familjeföretaget Brookfield Engineering. Efter att ha expanderat snabbt blev deras produkt en standard i hela världen. Brookfields viskosimeter har idag ett brett användningsområde och används bland annat för matindustrin, lacker och andra ytbeläggningar, lösningsmedel, lim, petroleumprodukter, plast, skönhetsprodukter och inom förpackningsindustrin (Brookfield 2014a).

### 3.1.2 Spindel

Mätningarna har genomförts med följande två spindlar, SC4-27 (#27) och SC4-29 (#29). Dessa har olika mätområden: 150-2 500 000 respektive 500-10 000 000 mPa·s. Utöver de spindlar som använts i mätningarna finns fler med andra mätområden.

Spindlarna kan ha en fast axel, som i det här fallet, eller hänga i en tråd. Fördelen med den senare är att spindeln är självcentrerande. Nackdelen med den fasta axeln är att den kan bli sned och börja ”wobbla”. Fördelen är att den klarar större vridmotstånd och passar därför speciell väl till mätning av mjukpunkten.



Figur 5. Spindel SC4-27

### 3.1.3 Behållare

Det finns provbehållare för engångsbruk och sådana som kan återanvändas. De senare kräver dock rengöring som sker med lösningsmedel. Det finns emellertid mindre skadliga lösningsmedel som kan deponeras utan problem.

Mängden bitumen som vägs upp i behållaren beror på vilken spindel som ska användas. I tabellen nedan anges den volym som respektive spindel behöver för att prestera korrekta mätvärden (Brookfield 2014b).

Tabell 1. Spindeldata

Spindel	Rekommenderad volym
SC4-27	10,5 ml
SC4-29	13 ml





Figur 6. Provbehållare

### 3.1.4 Tillverkning av prover

Bitumenproverna levererades i enlitersburkar. Dessa placerades i en ugn och värmdes innan de hälldes över i penetrationsbehållare. Temperaturen på ugnen varierar mellan 150 och 180 grader beroende på bitumensort. Den högre temperaturen krävdes för att PMB skulle bli smidigt att arbeta med. För övriga bitumen räckte det med 150 grader.

Bituminet som hållts i penetrationsburkarna förvarades för senare användning genom återuppvärmning eller användes direkt. Penetrationsburkarna möjliggör ett säkert och smidigt sätt att hantera bitumenprovet i måttlig mängd.

Dessutom går det betydligt snabbare att värma upp en mindre mängd bitumen.



Figur 7. Penetrationsburkar med bitumen, fr v 70/100, Sas 85-3 och PMB

Av uppvärmt bitumen togs provet för testning ut med en plasticspruta, som tömdes i provbehållare placerad i ett stativ på en våg. På så vis kontrollerades att rätt mängd fylldes på. Det slog sällan fel mer än någon tiondels gram.

Provet placerades i värmeenheten och värmdes upp så att spindeln kunde sänkas ned utan motstånd.

Spindeln fästs därefter i rotationsviskosimetern. Efter uppvärmning till 15 °C över starttemperaturen och avvaktan i ca 15 minuter var provet klart för mätning. Den började med att spindeln togs loss några sekunder medan mätutrustningen gjordes spänningslös. När detta var klart kunde spindeln fästas igen och sänkas ned i provet och den programmerade mätningen kunde börja.

### 3.1.5 Programmerad körning

I de första examensarbetena som gjordes på LTH 2011 styrdes mätningen manuellt direkt från programvaran för varje temperatur via så kallad "dash board" i det här examensarbetet användes programmerad mätning, som började tillämpas i examensarbetena 2012. Det innebar att en mätserie med fallande temperaturer programmeras i mjukvaran på datorn som är kopplad till mätinstrumentet. Programmet heter Rheocalc och ger utöver möjligheten till att styra instrumentet på samma sätt som vid manuell körning även möjlighet till att exportera mätvärden och analysera mätdata. Analysfunktionen med flera hjälpfunktioner i Rheocalc har inte utnyttjats. Varje mätomgång sparades i ett Excelblad, som sedan bearbetades med egna program och presentationsmallar.

Programmeringen bygger i huvudsak på instruktioner i form av temperatur, varvtal och tider. Endast temperaturen kan interaktivt styras av villkor. Allt annat körs enligt instruktion i den följd som programstegen anger och under angiven tid. Ett villkor är "Wait for Temperature", som innebär att när en viss temperatur är nådd går programmet vidare till nästa steg. Väntetiden är kortare vid höga temperaturer och längre vid låga temperaturer, vilket beror på att den enda kylfaktorn är omgivande luft vid rumstemperatur. Vid högre temperatur och lägre viskositet fördelas temperaturen snabbare genom vätskan och till spindeln, vilket också hjälper till.

Eftersom programvaran inte är helt interaktiv, dvs. läser av och korrigerar sig själv, måste resultatet antas i förväg, antingen genom förmätningar eller att ämnet är känt sedan tidigare. Felgissningar tas vanligtvis upp av torsionsfjäders maximala utslag. Om gissningarna överlag ger låga torsionsutslag erhålls ändå ett ganska bra underlag för en bättre omkörning. Om torsionsutslaget överskrider angivet maxvärde (normalt 90 %) avbryts registreringen på aktuell temperaturnivå och programmet går vidare till nästa

steg. I värsta fall fås inga mätdata alls och då får ett test med korrigerade värden startas på nytt, detta är dock mycket ovanligt.

Efter första examensarbetet bestämdes att temperaturerna vid en körning ska vara sjunkande, dvs. att testet börjar på den högsta temperaturen och går sedan nedåt. Det tar längre tid än att gå åt andra hållet men det blir säkrare mätningar och den riktningen efterliknar dessutom tillverkningsprocessen i det avseendet. För viss polymermodifierade bitumenslag är resultatet beroende av mätriktningen.

Det vore bra om mjukvaran kunde utvecklas så att den interaktivt kan upptäcka och korrigera avvikande torsionsvärden automatiskt. Ett önskemål för framtiden.

### 3.1.6 Fjärrstyrning

Vid testerna användes fjärrstyrning via internet. Det fungerar så att en dator eller smartphone länkas till labbdatorn som styr RVB. Därefter kan instrumentet och Rheocalc styras via labbdatorn. Fjärrstyrningen öppnar möjligheter för övervakning, justering och omstart av tester samt export av mätresultat. Detta innebär att mycket tid kan sparas och att tiden som måste tillbringas vid instrumentet minskar avsevärt.

Med övervakning och styrning via internet kan tiden på laboratoriet ägnas åt enbart byte av prov. Med lite vana och förberedelser kan tiden för laddning av prov begränsas till cirka 5 minuter. För att detta ska vara möjligt måste det gamla provet vara varmt och ett nytt prov förberett. Huvuddelen av de 5 minuterna går åt till att vänta på att bituminet som placerats i värmeenheten ska bli mjukt så att spindeln kan sänkas ned. Programmering och start av körningen görs sedan på distans.

Utöver skiftet av provet vid RVB tillkommer rengöring och påfyllning av provbehållare. Om det sker rationellt kan många behållare rengöras och många prover förberedas på en timme. Den sammantagna laboratorietiden per prov kan uppskattas till 15-30 minuter.

## 4 Resultat

### 4.1 Bitumenstudier

Syftet med bitumenstudien var att jämföra de reologiska profilerna för ett rent bitumen, 70/100, ett där 70/100 blandats med 3 vikt% Sasobit, Sas 85-3, och ett vanligt förekommande polymermodifierat bindemedel, PMB.

Varje mätning av viskositet är ett temperatursvep som börjar vid den temperatur som ger ca 200 mPa·s, går via 135 °C och 60 °C (som är normerade temperaturer) och slutar vid temperaturen som ger en viskositet strax över 1,3 kPa·s. Gränsen är vald för att den motsvarar mjukpunkten. Däremellan fylls på med fler mätpunkter för att kunna skatta ett matematiskt samband (gäller endast 70/100) respektive finna temperaturer där intressanta förändringar inträffar.

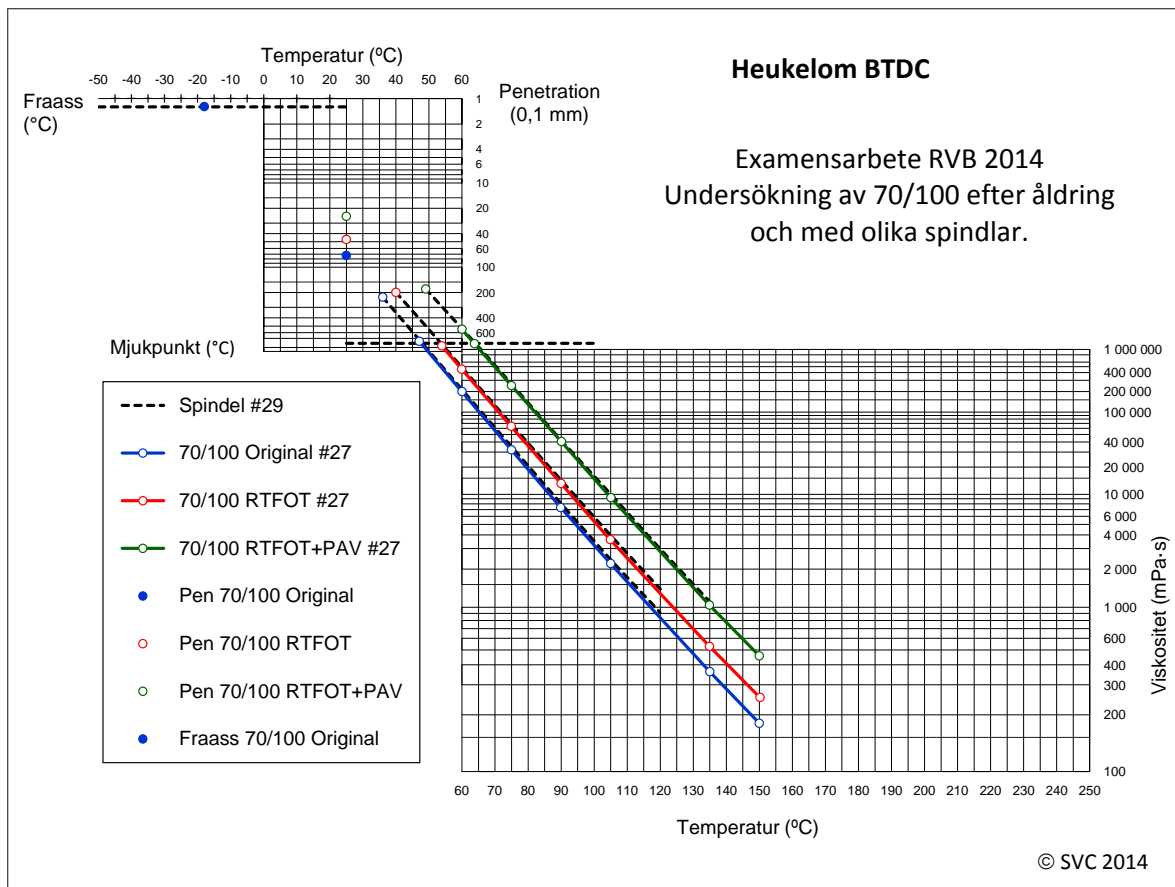
Huvudmätningarna gjordes med spindel #27, som har ett mätområde mellan 150-2 500 000 mPa·s. Detta kompletterades med mätning med spindel #29 som har mätområdet 500-10 000 000 mPa·s, dvs. spindlarna överlappar i ett brett mätområde och kompletterar varandra i ändarna.

Resultaten presenteras i bilagorna med sifvertabeller med alla registrerade parametrar vid valda temperaturer och dessutom grafiskt i Heukeloms BTDC, *Bitumen Test Data Chart*. Diagrammet är digitaliserat enligt Heukeloms ursprungliga skalor och återger därför punkternas placering på det sätt som upphovsmannen avsåg.

Vid sidan av viskositetsmätningarna mättes penetration på LTH och *Fraass breaking point* på Nynas laboratorium i Nynäshamn.

## 4.1.1 70/100

### Resultat



Figur 8. Heukelom BTDC för 70/100. Diagrammet visas i större format i Bilaga 2.

Punkterna i diagrammen representerar endast *ett* mätresultat. Inga ommätningar har förekommit eller strykningar av avvikande värden. Viskositeterna beskrivs med ett matematiskt samband enligt WLF-formeln (Williams-Landel-Ferry 1955):

$${}^{10}\log(\text{Viskositet}/1\,300\,000) = -C1(T-T_{\text{ref}})/(C2+(T-T_{\text{ref}})).$$

- $T_{\text{ref}}$ , referenstemperatur, motsvarar temperaturen vid 1 300 000 mPa·s, den skattade mjukpunkten
- C1 och C2 är WLF-konstanterna som erhålls genom passningsberäkning

Sambanden anges för mätningar med #27. Värdena i nedanstående tabell är hämtade ur bilagornas sifvertabeller.

Tabell 2. WLF-konstanter för 70/100

Bitumen	Värmebehandling	Tref	C1	C2
70/100	Original	47,6	7,83	105,2
	RTFOT	53,2	7,79	106,3
	RTFOT+PAV	64,0	8,23	119,0

### ***Kommentarer***

Avvikelsen mellan mätvärde och formelvärde kan i enstaka punkter uppgå till 3,8 % men är i medeltal 1,8 % på signifikansnivån 95 %. I ASTM accepteras differenser mellan upprepade mätningar på 3,5 % och i SS-EN på ca 10 %.

Sambanden används för att beräkna temperaturen för 1,3 kPa·s (skattad mjukpunkt). Vid övriga normerade temperaturer (60 och 135 °C) mäts viskositeten direkt i mätserien. Sambanden kan också användas för att ange temperaturen för en önskad viskositet, till exempel vid 500 cStoke, som en gång i tiden användes som kvalitetsbeteckning för dagens penetrationsbitumen. Andra intressanta temperaturer är för lämpliga viskositeter för blandning, utläggning och komprimering av asfaltbeläggningar.

Förändringen av skattad mjukpunkt efter RTFOT, 5,6 °C, är normal. Svenska anvisningar tillåter en höjning med 6 °C från depåtank till efter utläggning. Oftast ligger förändringen på 3-4 °C men det finns exempel på betydligt större förändringar efter ovarsam uppvärmning i asfaltverket (Tyllgren, 2011, 2013).

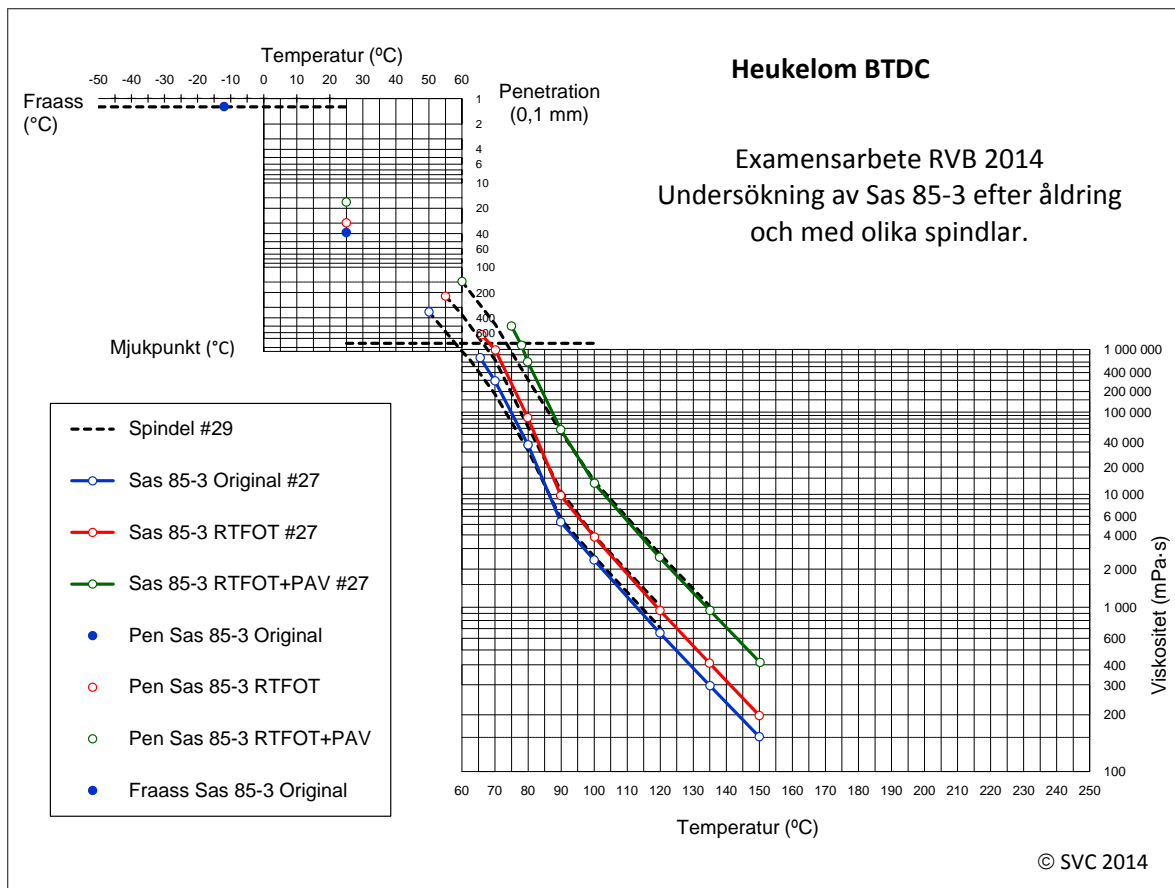
PAV är inte normerad i Sverige och därför finns få uppgifter om hur stor påverkan metoden har. Uppenbarligen är den mycket kraftig och nivån, 64 °C, stämmer bra med hur det ser ut i gammal returafalt (Tyllgren, 2011). PAV beskriver ur uppstyvningssynpunkt ganska väl vad som kan förväntas hända med bitumen i asfalt efter många år ute på vägen.

#### **4.1.2 Sas 85-3**

Sasobitinblandningens goda effekt intygas av många som har erfarenhet av den, bland andra före detta Skanska Asfalt i Danmark. Under många år tillverkades med framgång Sasobitasfalt för högtrafikerade motorvägar. Möjligheten att sänka tillverkningstemperaturen är omvittnad. Det föranledde två examensarbeten på LTH (Palmér/Žužo, 2011 och Kujundzic/Lund 2012), som visar effekter både på bindemedlet och den färdiga asfalten. Ganska mycket är alltså känt kring Sasobit men några områden inom reologin, bland annat viskositeten efter värmebehandling, återstår att studera. Den kraftiga ökningen av viskositeten under 90 °C har också väckt frågor huruvida detta

verkligen inträffar i verkligheten eller om effekten överdrivs i viskositetsmätningarna.

## Resultat



Figur 9. Heukelom BTDC för Sas 85-3. Diagrammet visas i större format i Bilaga 2.

Uppstyvningen under 90 °C har olika förlopp beroende på vilken spindel som används. Det kan enklast beskrivas med skattad mjukpunkt vid 1,3 kPa·s.

Tabell 3. Skattade mjukpunkter för Sas 85-3

		#27	#29
Bitumen	Värmebehandling	°C	
Sas 85-3	Original	60,0	56,5
	RTFOT	68,2	66,3
	RTFOT+PAV	77,7	73,3

## ***Kommentarer***

Det matematiska WLF-sambandet kan inte beräknas för hela mätserien eftersom Sasobitvaxet börjar kristallisera vid 90 °C eller strax över och slutar inte förrän vid ca 60 °C. Uppstyvningsprocessen följer inga kända reologiska samband utan är sin egen process. Runt 1,3 kPa·s kan ett lokalt samband beräknas med hjälp av WLF för att ta fram mjukpunkten. Resultatet är emellertid beroende av skjuvspänningen (orsakat av varvtalet och typ av spindel) under testet. Det visar att Sasobitblandningen uppträder icke-newtonskt i det här stadiet. Därmed är viskositeten och den beräknade mjukpunkten en variabel egenskap betingad av mätförhållandena (se variationsstudien nedan).

Kurvorna förskjuts i området över 90 °C och efter värmebehandlingarna på ett sätt som liknar 70/100. Efter kristalliseringen minskar differenserna. Frågan är hur mätpunkterna hade legat med avsevärt högre skjuvspänning, högre än vad RVB kan åstadkomma.

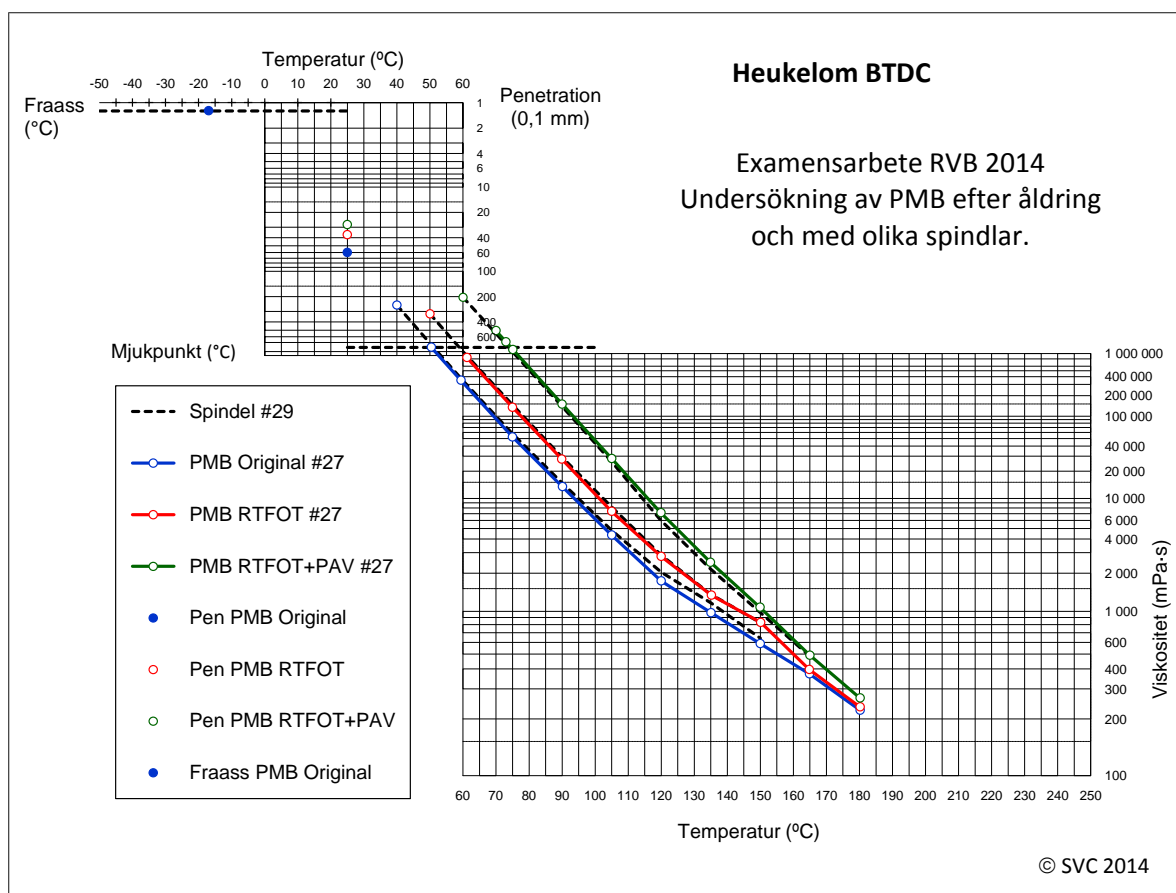
Över 90 °C förskjuts Sasobitblandningen ca 4 °C till vänster om 70/100 som en effekt av det smälta vaxets uppmjukning av bituminet. Det konstateras också i andra utredningar att denna måttliga uppmjukning *inte* förklarar hur tillverkningstemperaturen kan sänkas 25 °C, som hävdas från en del håll. Den frågan väntar fortfarande på en trovärdig förklaring.

### **4.1.3 PMB**

Polymermodifierat bitumen kommer från takpappindustrin och har ställt till det lite för de reologiska mätmetoderna, precis som Sasobitvax och andra främmande tillsatser med smältpunkter. En del av dem, t ex Kula & Ringmetoden för mjukpunktsbestämning, specialgjordes för bitumen för att definiera något som påminner om en smältpunkt, vilket bitumen inte har. Den fungerar bara för rent bitumen utan paraffin, vax eller andra polymerer. Detta visste redan Willem Heukelom och andra på 1960-talet. Han ville då ersätta metoden med penetrationsvärdet 800 1/10 mm. Det kan inte mätas direkt men kan skattas fram. Det slog inte igenom med påföljd att Kula & Ringmetoden med fel och brister har fått hänga med till våra dagar, i brist på alternativ. Kula & Ringvärdet för PMB finns alltså med i europeiska benämningar trots att det saknar reologisk betydelse. Mätvärdet tjänar bara som markör för att bituminet innehåller ett främmande ämne med avvikande reologi.



## Resultat



Figur 10. Heukelom BTDC för PMB. Diagrammet visas i större format i Bilaga 2.

Viskositeterna från mätningarna finns i siffror och grafisk form i bilagorna. Från dem kan bland annat mjukpunkterna skattas från temperaturen vid 1,3 kPa·s.

Tabell 4. Skattade mjukpunkter för PMB

		#27	#29
Bitumen	Värmebehandling	°C	
PMB	Original	51,2	51,1
	RTFOT	58,4	59,0
	RTFOT+PAV	74,5	73,8

## ***Kommentarer***

Ett par inledande försök visade på vikten av att mäta under avsvälning och efter uppvärmning till 190 °C. Först då är polymerfibrerna helt frikopplade och kan röra sig fritt från varandra. Under temperaturstegring eller otillräcklig startvärme befinner sig fibrerna i olika stadier av sammanklumpningar som kan leda till variationer i mätresultaten, oftast uppåt i viskositeten. Vissa smärre avvikelser kan fortfarande inträffa men det hör till ämnets karaktär. Fibrerna kan ses för blotta ögat i ytan i en penetrationsburk.

Viskositetslinjen kan beskrivas med WLF-samband från 120 °C och nedåt och har använts för att skatta mjukpunkten vid 1,3 kPa·s. Konstanterna anges inte i sifvertabellerna eftersom de bara används för den lokala beräkningen av mjukpunkt.

Jämfört med den tydligt icke-newtonska reaktionen från Sasobitblandningen visar PMB inga sådana tecken, utan påminner under 120 °C om ett rent bitumen. Där sker ett första tydligt brott på linjen. Över 150 °C viker den av nedåt. Skillnaden mellan värmemetoderna börjar minska över 120 °C för att sedan nästan sammanfalla vid 180 °C. Detta förlopp kan kanske tillverkaren av polymertillsatsen förklara.

Effekten av den flacka linjen för PMB Original är bekant från verkligheten på asfaltverken. För att åstadkomma den viskositet som fordras för blandning, ca 200 mPa·s, måste asfalten värmas till 185 °C. Förklaringen visas i Heukeloms BTDC med PMB i bilagorna. Effekten på bituminet (ca 95 % av PMB) av sådana temperaturnivåer har belysts i en SBUF-rapport (Tyllgren, 2013) och tas upp i *Shell bitumen handbook* (Read&Whiteoak, 2003).

Överlag ser resultaten trovärdiga och repeterbara ut och PMB verkar inte alls omöjligt att mäta, som ibland hävdas. Blandningen kan uppträda som gummiband och minst av allt påminna om en vätska när den svalnar men siffrorna från mätningarna ger ett stabilt och repeterbart intryck.

#### 4.1.4 Penetration och Fraass

##### **Resultat**

Tabell 5 Penetrationsvärden och Fraass breaking point för alla undersökta bitumen.

Bitumen	Värmebehandling/ åldring	Penetration 1/10 mm	Fraass breaking point, °C
70/100	Original	73	-18
	RTFOT	47	-
	RTFOT+PAV	25	-
Sas 85-3	Original	39	-12
	RTFOT	30	-
	RTFOT+PAV	17	-
PMB	Original	60	-17
	RTFOT	37	-
	RTFOT+PAV	28	-

##### **Kommentarer**

Av Heukeloms BTDC framgår att värdena för Fraass, penetration och viskositetslinjen för 70/100 Original hänger ihop ganska bra. Det är själva idén med utformningen av Heukeloms diagram och det brukar stämma för vanligt bitumen. När det gäller Sas 85-3 är det mindre uppenbart av förklarliga skäl. Ämnet uppför sig inte som en newtonsk vätska, vilket diagrammet förutsätter.

För både Sas 85-3 och PMB gäller att de inte riktigt har förutsättningar att bli korrekt bedömda i *penetrationsmätningen*, ungefär som i fallet med Kula & Ring. Det är det uppenbart problematiskt att rigga mätningen och placera nålen som det är tänkt. Att mätningen ändå resulterar i tänkbara resultat känns mer som en slump. Själva grupperingen av värdena för Original, RTFOT och RTFOT+PAV placerar sig på trovärdiga nivåer för Sas 85-3 och PMB men mer än så ska inte uttolkas av de enskilda punkterna.

Fraasvärdena för alla sorterna verkar rimliga. Mätningarna gjordes på Nynas laboratorium i Nynäshamn av personer med stor vana vid metoden.

## 4.2 Variationsstudier av RVB-tekniken

I olika standarder anges gränsvärden för *repetierbarhet* och *reproducerbarhet*. Vanligtvis definieras begreppen som standardavvikelsen multiplicerad med 2,8. I det här fallet används för enkelhetens skull endast standardavvikelsen som jämförelsemått.

Tabell 6. Gränser för repetierbarhet och reproducerbarhet vid mätning med rotationsviskosimeter

	Repetierbarhet*	Reproducerbarhet**
Standard	Standardavvikelse för viskositet	
ASTM D4402/D3302M-13	1,2 %	4,3 %
SS-EN 13302-2010	1,8 %	5,4 %
	Standardavvikelse för mjukpunkt	
SS-EN 1427:1999	0,36 °C	0,71°C

\* Samma operatör, samma ämne

\*\* Olika laboratorier, samma ämne

Några andra precisionsmått som berör instrumentets funktion eller mättekniska moment anges inte. Av det skälet gjordes nedanstående studier för att bedöma inverkan av:

1. Olika spindlar
2. Mätningens varaktighet
3. Torsion/varvtal/skjuvspänning
4. Invägd provmängd.

#### 4.2.1 Olika spindlar

ASTM och SS-EN nämner inga krav på olika spindlars överensstämmelse. Inte heller lämnar tillverkaren några upplysningar eller utfästelser om den saken. Därför gjordes en jämförelse tagen från siffermaterialet i bilagorna.

#### **Resultat**

Tabell 7. Jämförelse av viskositetsvärden uppmätta med olika spindlar

Temp. °C	70/100						Avvikelse %
	Original		RTFOT		RTFOT+PAV		
	#27	#29	#27	#29	#27	#29	
	mPa·s						
105	2 223	2 381	3 600	3 913	9 196	9 947	8
90	7 295	7 934	13 047	14 114	40 391	42 400	7
75	31 829	34 400	63 590	68 243	245 192	255 882	6
60	199 265	214 583	451 923	486 538	2 395 000	-	7
1,3 kPa·s, °C:	47,6	48,0	53,2	53,6	63,6	64,0	0,4

#### **Kommentarer**

Värdena med spindel #29 ligger i medeltal 7 % över #27. Detta kan korrigeras med spindelkonstanten SMC, *Spindle Multiplier Constant*. SMC-Värdet för #29 är 100. Det kan ändras i mjukvaran för mätinstrumentet. Om det sänks till 93,1 hamnar värdena i genomsnitt på samma nivå för de båda spindlarna. Ändringen förutsätter att spindel #27 i det här fallet är den som undersöks vid återkommande kontroller. Den relativa standardavvikelsen för skillnaden mellan spindlarna blir efter justeringen 0,57 %. Det kan jämföras med gränsen i ASTM för mätning med samma spindel på 1,2 % och i SS-EN på 1,8 %.

Utan korrigering blir värdet för temperaturen vid 1,3 kPa·s (skattad mjukpunkt) 0,4 °C högre med #29. Med korrigering blir medelskillnaden -0,03 °C och den relativa standardavvikelsen 0,06°C. Detta kan jämföras med angiven gräns för repeterbarheten på 1 °C i SS-EN för Kula & Ring.

Det är alltså möjligt att få god överensstämmelse mellan spindlarna men det fordrar jämförande kontrollmätningar och korrigering av SMC i mjukvaran.

#### 4.2.2 Mätningens varaktighet

Bara SS-EN tar upp mätningens varaktighet och tillåter flera mätningar på samma prov förutsatt att de sker inom 4 timmar. LTHs mätningensprogram varierar från 5,5-8 timmar. Inga resultat har visat någon märkbar inverkan av detta i 5 examensarbeten sedan 2011. Många mätpunkter från samma uppställning är arbetsbesparande och ger mycket information, särskilt när

mätningen är programmerad. Det är alltså en viktig punkt att utreda för metodens framtid och för användarnas nytta av tekniken.

## Resultat

Tabell 8. Jämförelse av viskositeter efter ökande mättider

Temp. °C	70/100 RTFOT			Stdavv %
	Tid, h			
	0-5,5	5,5-11	11-16,5	
	mPa·s			
150	251	250	250	0,23
135	528	526	534	0,79
105	3 600	3 664	3 657	0,96
90	13 047	12 943	13 255	1,21
75	63 590	62 821	64 103	1,02
60	451 923	447 115	461 538	1,62
1,3 kPa·s, °C:	53,2	53,2	53,4	0,12

## Kommentarer

Alla värden på stdavv i % (repererbarhet), ligger på eller under gränserna enligt de strängaste kraven i ASTM (1,2%), utom ett, 60 °C, men ligger klart under de som anges i SS-EN (1,8 % respektive 1/2,8=0,36 °C)

Tiden har alltså mycket liten betydelse för ett vanligt bitumen. Förklaringen ligger i att provet är väl inneslutet i röret under lock med en mycket liten exponerad yta. Temperaturen befinner sig dessutom bara 1-2 timmar per mätomgång på nivåer som under fullt exponerade förhållanden skulle kunna ha påverkan.

### 4.2.3 Torsion/varvtal/skjuvspänning

För en given spindel ändras torsionsvärdet (% av maximalt utslag) och skjuvspänning (Pa) parallellt. Samma sak gäller varvtalet (rpm) och skjuvhastigheten (1/s). Förhållandet mellan parametrarna ändras med en annan spindel men de följs fortfarande åt på samma sätt. En mindre spindel måste rotera snabbare vid samma viskositet för att åstadkomma samma torsionsvärde. Det ökar skjuvspänningen och ökar skjuvhastigheten under mätningen. Vice versa för en större spindel. För vanligt bitumen har det ingen betydelse eftersom det inte påverkar newtonska vätskor. För icke- newtonska vätskor leder det till olika viskositetsvärden.

Under mätningarna med de tre bitumensorterna framgick efter upprepade mätningar med olika spindlar på 70/100 och PMB att de gav likartade resultat, med varierat torsionsvärde. Däremot varierade resultaten med Sas 85-3 från 90 °C och nedåt, dvs. då Sasobit börjar kristallisera. Som exempel på detta

fenomen valdes därför att jämföra varierade torsionsinställningar för 70/100 med Sas 85-3, som är 70/100 med 3 vikt% Sasobit.

Utvärderingen baserades på standardavvikelsen, stdavv, i % av medelvärdet, vilket också kallas *variationskoefficient*.

## Resultat

Tabell 9. Viskositetsmätning vid olika torsionsvärden med 70/100 Original

Temp. °C	70/100 Original					Stdavv %
	Torsion					
	15 %-1 *	75 %-2 *	50 %-3 *	15 % **	50 % **	
	mPa·s					
150	180	180	180	169	179	2,77
135	354	363	371	348	361	2,46
105	2 162	2 250	2 286	2 126	2 223	2,94
90	7 157	7 481	7 573	7 049	7 295	2,98
75	31 500	32 458	33 313	30 916	31 829	2,88
60	193 421	203 093	207 031	191 667	199 265	3,24
1,3 kPa·s, °C:	47,0	47,7	47,8	47,4	47,6	0,32

\* Samma rör

\*\* Olika rör

Tabell 10. Viskositetsmätning vid olika torsionsvärden med Sas 85-3 RTFOT

Temp. °C	Sas 85-3 RTFOT			Stdavv %
	Torsion/varvtal/skjuvspänning *			
	låg	medel	hög	
	mPa·s			
120	1 061	1 055	-	0,4
100	4 184	4 102	4 089	1,2
90	11 714	11 349	11 100	2,7
80	54 583	50 247	48 525	6,1
70	526 087	402 564	380 342	18,0
60	5 466 667	3 670 000	3 206 250	29,0
55	17 400 000	10 050 000	8 666 667	39,0
1,3 kPa·s, °C:	65,9	64,5	64,0	1,0

\* Varierat vid varje temperatur

## Kommentarer

I mätningen varierar inte bara torsion/varvtal/skjuvspänning utan i första tabellen även tiden för mätningen. Testerna 1, 2 och 3 utfördes direkt efter varandra. Varje test tog 5,5 timmar. Det kan ha ökat spridningsmättet men

förmodligen inte särskilt mycket, enligt föregående studie av mättidens betydelse.

Tabellerna visar inte bara spridningsmått för viskositeterna utan även för temperaturen vid den skattade mjukpunkten. Repeterbarheten för mjukpunkt enligt Kula & Ring får enligt SS-EN 1427:1999 vara högst 1 °C. Värdet för 70/100 är  $(0,32 \cdot 2,8 = 0,9 \text{ °C})$ .

Spridningarna för viskositet för 70/100 passerar gränsen i ASTM medan de har vissa möjligheter att klara gränsvärdena i SS-EN om tideffekten frånräknas. Fler mätningar fordras för säkra slutsatser men det kan finnas skäl att hålla torsionsvärdet på en något sänkt konstant nivå mitt på skalan, ca 50 %.

Stdavv %-värdena för Sas 85-3 illustrerar tydligt blandningens icke-newtonska egenskaper från 90 °C och nedåt. Det var nästan svårt att hålla viskositeten konstant vid ökad torsion, eftersom viskositeten minskade vartefter den skruvades upp. Känslan var att slutvärdet inte riktigt hade planat ut vid det höga torsionsvärdet. Den kraftiga stigningen i viskositet från 90 °C och nedåt är sannolikt en mätteknisk effekt, som kan påverkas med ändrade mättingsförhållanden. Frågan är om instrumentets mätområde omfattar de verkliga förhållandena eller om de ligger utanför instrumentets mätförmåga.

#### 4.2.4 Invägd provmängd

Eftersom spindlarnas cylindervolym varierar och vätskenivån ska ligga på en viss nivå över cylindern måste provmängden som fylls på röret anpassas. Spindel #27 (den vanligaste) kräver 10,5 ml och spindel #29 13 ml. Varken ASTM eller SS-EN eller instrumentets tillverkare tar upp toleranserna från dessa värden. För mycket prov skapar friktion mot axeln som cylindern hänger i. För lite riskerar att ytan hamnar under cylinderns översta koniska del, sannolikt med ett lägre vridmotstånd som följd. För att i någon mån ge svar på frågan hur känsligt resultatet är för varierad mängd ökades mängden över det rekommenderade värdet med 1 g (1 ml) och minskades i ett annat fall med 0,5 g (0,5 ml). Båda jämfördes med korrekt mängd. Som i de tidigare fallen beräknades standardavvikelsen i procent av medelvärdet (repeaterbarhet).



## Resultat

Tabell 11. Viskositetsmätning vid olika invägda provmängder

Temp. °C	70/100 Original						Stdavv %
	Invägd mängd						
	11,3 g		10,3 g		9,8 g		
Visk. mPa·s	Volym ml	Visk. mPa·s	Volym ml	Visk. mPa·s	Volym ml		
150	183	12,0	179	11,0	180	10,4	1,06
135	365	11,9	361	10,8	360	10,3	0,72
105	2 223	11,6	2 223	10,6	2 214	10,1	0,23
90	7 339	11,5	7 295	10,5	7 339	10,0	0,35
75	32 500	11,4	31 829	10,4	32 313	9,9	1,07
60	202 344	11,3	199 265	10,3	200 000	9,8	0,80
47,6 *	1 310 000	11,2	1 296 000	10,2	1 295 000	9,8	0,64

\* Skattad mjukpunkt

### Kommentarer

Alla spridningsvärden understiger ASTM- och SS-EN-gränserna. I det här fallet skattades inte temperaturen vid mjukpunkten 1,3 kPa·s utan istället viskositeten vid tidigare skattad mjukpunkt, 47,6 °C.

Volymen minskade med 0,6-0,8 ml genom ökande densitet från 150 till 50 °C. Det innebär att om vikten av korrekt doserad volym väljs till mitten av temperaturintervallet varierar volymen  $\pm 0,4$  ml, vilket är mindre än den undersökta variationen. Volymändringen under testet har alltså ingen betydelse för resultatet, förutsatt att provet är korrekt invägt från början.

## 5 Slutsatser och diskussion

### 5.1 RVB-tekniken

I Heukeloms BTDC hamnar resultaten från mätningar av Fraass, penetration, mjukpunkt och dynamisk viskositet utmed en rät linje. Willem Heukelom valde skalorna så att det skulle bli på det sättet. Det gjordes med vissa antagande som kanske inte riktigt stämmer, i varje fall inte idag jämfört med 1973, när diagrammet presenterades i sin slutliga form. Med hjälp av RVB har det framkommit att skalorna för viskositetsdiagrammet borde ha valts lite annorlunda för att linjerna ska räta upp sig en smula, men det betyder inte så mycket. Bara ett bitumen, med just diagrammets skalfaktor som WLF-formel, bildar en rät linje, alla andra skulle ändå bli krökta åt något håll.

WLF-sambandet beskriver ursprungligen den logaritmerade skiftfaktorn för masterkurvor till frekvens- och temperatursvep. Willem Heukelom visste att den också fungerar som modell för sambandet mellan temperatur och dynamisk viskositet och använde den som skalfaktor i sitt viskositetsdiagram. Resten av BTDC, penetrationen, Mjukpunkt och Fraass har kanske mest historiskt värde och bör finnas kvar så länge diagrammet återopas under namnet Heukelom BTDC. Den grafiska bilden är alltför grovskalig för att ge annat än en översiktlig bild, som sedan måste kompletteras med beräknade eller uppmätta siffror i tabellform.

RVB-teknikens förmåga att ta fram många mätvärden med begränsad arbetsinsats och Heukeloms diagram kombinerar modern mätteknik med pedagogisk presentation. Heukeloms bidrag på det området har varit epokgörande och är ett lysande föredöme för efterkommande generationer bitumentekniker, som vill göra reologin begriplig i vidare kretsar.

RVB ersätter inte bara kinematiska och dynamiska viskositetsmätningar utan löser också ett gammalt dilemma med en metod, Kula och Ring, som borde fasats ut för länge sedan. Mjukpunkten är ett inarbetat och välkänt begrepp och behövs fortfarande men bör omdefinieras som temperaturen vid den dynamiska viskositeten  $1,3 \text{ kPa}\cdot\text{s}$ .

### 5.2 Jämförelsen mellan bitumensorter

Undersökningen av 70/100 hade två syften: att påvisa trovärdigheten i RVB-mätningarna och att vara referens till två modifierade bitumensorter. Sas 85-3 och PMB är två intressanta alternativ från olika utgångspunkter. PMB är ett utpräglat val från väghållarens perspektiv medan valet av Sas 85-3 inrymmer behov som berör arbetsmiljö och yttre miljö. Det som saknas i det ena alternativet finns i det andra och vice versa.

PMB kräver hög tillverkningstemperatur men ger också asfalten unika viskoelastiska egenskaper. Sas 85-3 underlättar produktionen, minskar

energibehovet och ger asfaltbeläggningen viss stabilitet. RVB med Heukeloms BTDC förmår beskriva de reologiska tillstånden för de här mycket olika bindemedlen på ett illustrativt sätt och kan förklara vad som händer under hela tillverkningsförloppet. Detta hjälper tillverkningen att lyckas så bra som det är möjligt, vilket är förutsättningen för att de inneboende goda egenskaperna ska komma till sin rätt.

### 5.3 Förslag till kommande arbeten

Provberedning och praktiska förberedelser till RVB har stegvis blivit en välutvecklad teknik. Precisionen i de olika instrumentfunktionerna verkar fortfarande fungera bra efter sex examensarbeten med mellanliggande instrumentservice enligt tillverkarens anvisningar. Däremot behöver programvaran moderniseras och göras mer användarvänlig. Det gäller också efterhantering, presentation och utvärdering av mätresultaten. Ett särskilt önskemål är en interaktiv programvara som kan läsa av och korrigera sig själv, d v s automatiskt anpassa varvtalet så att vridmotståndet hamnar på ett förvalt torsionsvärde vid varje inställd temperatur. Det skulle avsevärt underlätta mätningens arbetet och kanske också förbättra kvaliteten på resultaten.

Kopplingen mellan viskositetsmätningar med RVB och viskoelastiska mätningar med DSR behöver klarläggas. Det stärker trovärdigheten hos respektive mätningar om de kan länkas samman. Komplex skjuvmodul från DSR-mätningar kan räknas om till komplex viskositet. Är det samma värde som mäts med RVB? Är *zero shear viscosity* detsamma som komplex viskositet? Har *loss modulus/viskö's skjuvmodul* samband med viskositet uppmätt med RVB? Det finns en rad kopplingsmöjligheter mellan DSR och RVB som väntar på att utredas.

Sasobitblandningarnas icke-newtonska uppträdande behöver studeras närmare för att öka förståelsen och nyttan av mätningarna.

Konsistenseffekten under tillverkning och utläggning av Sasobit i asfalt är en fråga som berörts i flera examensarbeten och som behöver klarläggas en gång för alla.

## Referenslista

### *Bok och rapport*

ASTM D4402/D3302M-13 Standard Test Method of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer

Erlandsson, I. (2012) Predikterad viskositet i blandningar av olika bitumensorter. Thesis 233. LTH, Lund

Heukelom, W. (1973) An improved method of characterizing asphaltic bitumens with the aid of their mechanical properties. Kloninklijke/Shell-Laboratorium, Amsterdam. Proc Assoc Asph Pav Tech, vol 42, pp 62-98, 1973. Association of Asphalt Paving Technologies, Seattle.

Kujundzic, A., Lund, J. (2012) Optimal Tempererad Asphalt - OTA - en undersökning av asfalt med Sasobit. LTH, Lund

Palmér, J., Žužo, E. (2011) Faktorer som påverkar hanterbarheten hos asfalt. LTH, Lund

Read&Whiteoak (2003) The Shell Bitumen Handbook, fifth edition. Thomas Telford Publishing, London.

SS-EN 1427:1999 Bitumen och bituminösa bindemedel – Bestämning av mjukpunkt – Kula och Ring-metoden

SS-EN 13302-2010 Bitumen och bituminösa bindemedel - Bestämning av bituminösa bindemedels dynamiska viskositet med hjälp av rotationsviskosimeter.

Tyllgren, P. (2011) Föryngrad returafalt för ökad återvinning. VTI Transportforum, session 28.

Tyllgren, P. (2013) Optimal temperatur vid varmblandad asfalttillverkning, OTA. SBUF 12331

Tyllgren, P. (2014) Samtal och intervjuer under januari till maj 2014.

Thylander, R., Gustavsson, N. (2013) Metod för bestämning av mängd föryngringsmedel till returafalt. LTH, Lund

Williams, M.L., Landel, R.F., Ferry, J.D. (1955) The temperature dependence of relaxation mechanisms in amorphous polymers and other glass-forming liquids. Dept of Chemistry, Univ. of Wisconsin. Journal of American Chemistry Society, vol 77, p 3701, July 20, 1955.

Nielsen, A (1968). Byggnadsmaterials reologi, Lund.

SS-EN 1427:1999 Bitumen och bituminösa bindemedel – Bestämning av mjukpunkt – Kula och Ring-metoden

Asphalt Institute Inc., European Bitumen Association-Eurobitume. (2011) The Bitumen industry – A global perspective, Second edition. USA

### *Intervjuer*

Tyllgren, P. (2014) Samtal och intervjuer under januari till maj 2014.

### *Internetkällor*

NE (2014a) Reologi.

<http://www.ne.se/reologi>. Nedladdat: 2014-05-07

NE (2014b) Viskositet.

<http://www.ne.se/viskositet>. Nedladdat: 2014-05-11

Shodor 2014 Reologi

<http://www.shodor.org/unchem/advanced/kin/arrhenius.html>.

Nedladdat: 2014-05-19

Sasol (2004) The bitumen additive for highly stable easily compactible asphalts

<http://www.sasolwax.com/sasolwaxmedia/Downloads/Bitumen+Modification/Sasobit+since+1997.pdf> Nedladdad 2014-05-18

Brookfield (2014a) Historik.

<http://www.brookfieldengineering.com/company/company-history.asp>.

Nedladdat: 2014-05-03

Brookfield (2014B) Spindeldata

[http://www.brookfieldengineering.com/products/accessories/spindles/thermosel\\_spindles\\_chambers.asp](http://www.brookfieldengineering.com/products/accessories/spindles/thermosel_spindles_chambers.asp)

*Bilder*

Sorgie 2014

<http://www.sorigue.com/uploads/pics/4.-EQUIP-D -ENVELLIMENT-RTFOT.jpg>

Pavementinteractive 2011

[http://www.pavementinteractive.org/wp-content/uploads/2011/04/Pav\\_top.jpg](http://www.pavementinteractive.org/wp-content/uploads/2011/04/Pav_top.jpg)

# BILAGOR

## **Bilaga 1. Sifvertabeller över viskositetsmätningar med RVB**



Bitumen: 70/100 Original				Spindel: 27				Bitumen: 70/100 Original				Spindel: 29						
Viskositet	Temp °C	Torsion %	Skjuvsp. Pa	Skjuvhast. 1/s	Rotation rpm	Viskositet mPa·s	Temp °C	Torsion %	Skjuvsp. Pa	Skjuvhast. 1/s	Rotation rpm	Viskositet mPa·s	Temp °C	Torsion %	Skjuvsp. Pa	Skjuvhast. 1/s	Rotation rpm	
179	150,1	14	12	68	200	920	119,9	18	46	50	200	2381	105,1	47	117	49	197	
361	135,0	29	25	68	200	7934	90,1	48	121	15	61	34400	75,1	52	129	3,8	15,0	
2223	105,0	49	42	19	55	214583	60,0	51	129	0,60	2,40	1696667	46,4	51	127	0,08	0,30	
7295	89,9	50	42	5,8	17,1	11725000	36,0	47	117	0,01	0,04	1300000	48,0	C1: 7,98	C2: 109,9			
31829	75,1	52	44	1,39	4,10													
199265	60,0	54	46	0,23	0,68													
1412500	47,1	56	48	0,03	0,10													
1300000:	47,6	C1: 7,83	C2: 105,2															
Bitumen: 70/100 RTFOT				Spindel: 27				Bitumen: 70/100 RTFOT				Spindel: 29						
Viskositet	Temp °C	Torsion %	Skjuvsp. Pa	Skjuvhast. 1/s	Rotation rpm	Viskositet mPa·s	Temp °C	Torsion %	Skjuvsp. Pa	Skjuvhast. 1/s	Rotation rpm	Viskositet mPa·s	Temp °C	Torsion %	Skjuvsp. Pa	Skjuvhast. 1/s	Rotation rpm	
251	150,2	20	17	68	200	1380	120,0	28	69	50	200	3913	105,1	49	123	32	126	
528	134,9	42	36	68	200	14114	90,1	49	124	9	35	68243	74,9	50	126	1,9	7,4	
3600	104,9	50	43	12	35	486538	60,0	51	127	0,26	1,04	2380952	50,0	50	125	0,05	0,21	
13047	90,0	50	42	3,3	9,6	15166667	40,0	45	114	0,01	0,03	1300000	53,6	C1: 8,12	C2: 114,7			
63590	74,9	49	42	0,66	1,95													
451923	59,9	47	40	0,03	0,26													
1152500	53,9	46	39	0,03	0,10													
1300000:	53,2	C1: 7,79	C2: 106,3															
Bitumen: 70/100 RTFOT+PAV				Spindel: 29				Bitumen: 70/100 RTFOT+PAV				Spindel: 27						
Viskositet	Temp °C	Torsion %	Skjuvsp. Pa	Skjuvhast. 1/s	Rotation rpm	Viskositet mPa·s	Temp °C	Torsion %	Skjuvsp. Pa	Skjuvhast. 1/s	Rotation rpm	Viskositet mPa·s	Temp °C	Torsion %	Skjuvsp. Pa	Skjuvhast. 1/s	Rotation rpm	
1100	135,0	22	55	50	200	456	150,0	36	31	68	200	1035	134,9	50	42	41	120	
2959	120,1	36	90	30	121	9196	105,1	51	44	5	14	40391	90,1	52	44	1,1	3,2	
9947	105,1	38	95	10	38	245192	75,0	51	43	0,18	0,52	1267500	63,8	51	43	0,03	0,10	
42400	89,9	42	106	2,5	10,0	2395000	60,0	48	41	0,02	0,05	1300000	63,6	C1: 7,95	C2: 112,0			
255882	75,1	43	109	0,43	1,70													
1279487	64,1	50	125	0,10	0,39													
12533333	49,0	38	94	0,01	0,03													
1300000:	64,0	C1: 8,23	C2: 119,0															

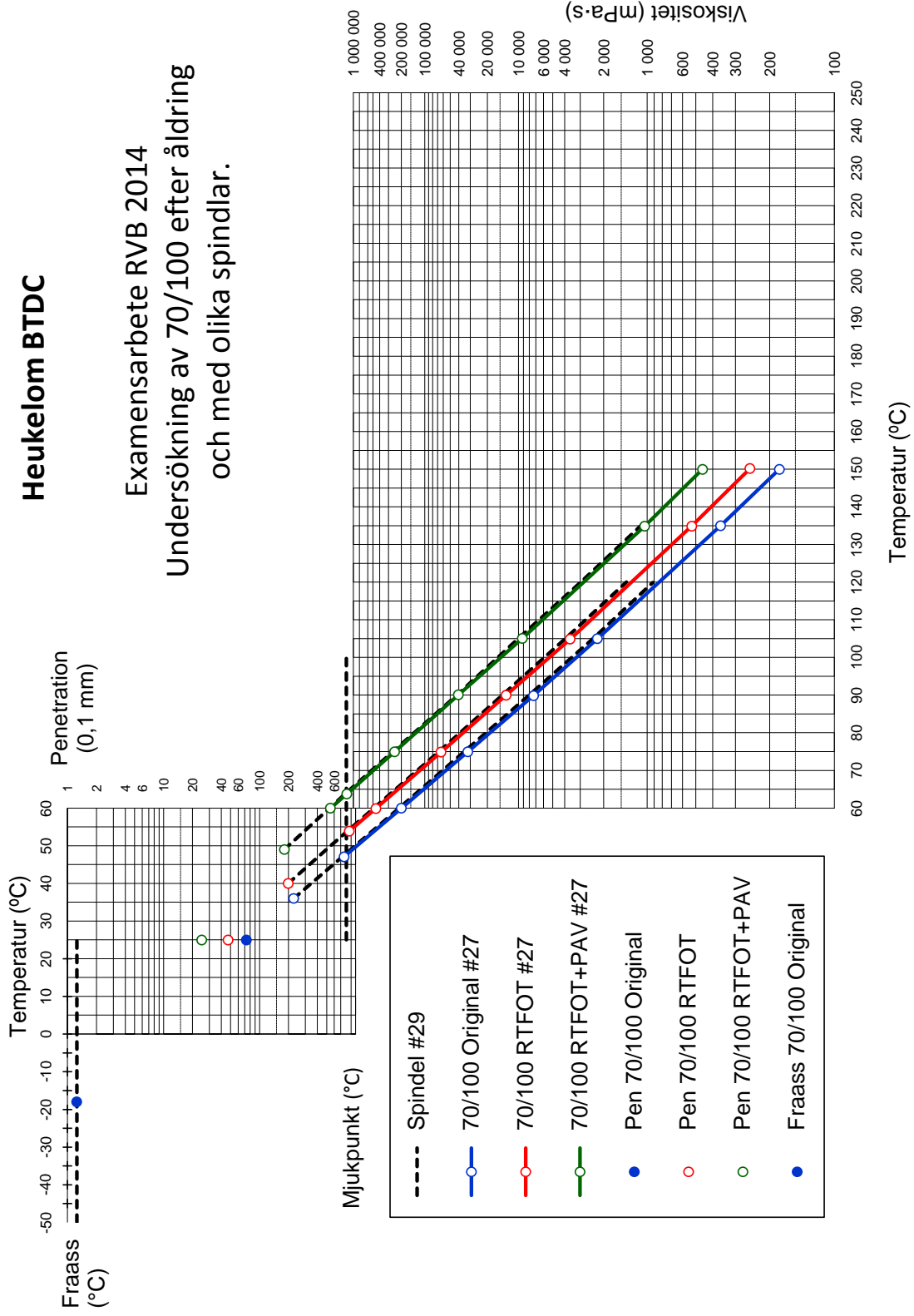
Bitumen: Sas 85-3 Original					Spindel: 27	
Viskositet	Temp	Torsion	Skjuvsp.	Skjuvhast.	Rotation	
mPa·s	°C	%	Pa	1/s	rpm	
151	150,0	12	10	68	200	
295	135,1	24	20	68	200	
651	119,9	52	44	68	200	
2382	100,0	50	43	18	53	
5266	89,9	51	44	8,3	24,4	
36671	80,0	55	47	1,28	3,77	
292308	70,0	46	39	0,13	0,39	
710000	65,5	28	24	0,03	0,10	
<b>1300000:</b>	<b>60,0</b>		<b>C1: -</b>		<b>C2: -</b>	
Bitumen: Sas 85-3 RTFOT					Spindel: 27	
Viskositet	Temp	Torsion	Skjuvsp.	Skjuvhast.	Rotation	
mPa·s	°C	%	Pa	1/s	rpm	
198	150,0	16	13	68	31	
409	134,9	33	28	68	200	
946	119,9	47	40	43	125	
3806	100,1	47	40	11	31	
9721	89,9	51	44	4,7	13,9	
83734	79,9	53	45	0,53	1,56	
971875	70,1	63	53	0,05	0,16	
1865000	66,0	75	63	0,03	0,10	
<b>1300000:</b>	<b>68,2</b>		<b>C1: -</b>		<b>C2: -</b>	
Bitumen: Sas 85-3 RTFOT+PAV					Spindel: 27	
Viskositet	Temp	Torsion	Skjuvsp.	Skjuvhast.	Rotation	
mPa·s	°C	%	Pa	1/s	rpm	
414	150,2	33	28	68	200	
945	135,1	50	42	45	132	
2513	119,8	50	43	17	50	
13099	100,1	50	43	3	10	
57600	89,9	28	24	0,4	1,3	
602500	79,9	24	20	0,03	0,10	
1187500	78,0	19	16	0,01	0,04	
2762500	75,1	22	19	0,01	0,02	
<b>1300000:</b>	<b>77,7</b>		<b>C1: -</b>		<b>C2: -</b>	
Bitumen: Sas 85-3 Original					Spindel: 29	
Viskositet	Temp	Torsion	Skjuvsp.	Skjuvhast.	Rotation	
mPa·s	°C	%	Pa	1/s	rpm	
710	119,9	14	36	50	200	
2555	100,0	51	128	50	200	
5611	90,0	53	133	24	95	
30714	80,1	43	108	4	14	
181176	70,0	31	77	0,4	1,7	
643590	62,5	25	63	0,10	0,39	
940000	60,0	24	59	0,06	0,25	
5500000	50,0	33	83	0,02	0,06	
<b>1300000:</b>	<b>56,6</b>		<b>C1: -</b>		<b>C2: -</b>	
Bitumen: Sas 85-3 RTFOT					Spindel: 29	
Viskositet	Temp	Torsion	Skjuvsp.	Skjuvhast.	Rotation	
mPa·s	°C	%	Pa	1/s	rpm	
1020	119,9	20	51	50	200	
3936	99,9	49	123	31	125	
10360	90,1	52	130	13	50	
61429	80,1	39	97	1,6	6,3	
644000	70,1	32	81	0,13	0,50	
4790000	60,0	48	120	0,03	0,10	
12350000	55,0	49	124	0,01	0,04	
<b>1300000:</b>	<b>66,3</b>		<b>C1: -</b>		<b>C2: -</b>	
Bitumen: Sas 85-3 RTFOT+PAV					Spindel: 29	
Viskositet	Temp	Torsion	Skjuvsp.	Skjuvhast.	Rotation	
mPa·s	°C	%	Pa	1/s	rpm	
1030	134,8	21	52	50	200	
2690	119,9	53	133	49	197	
13974	100,0	53	133	10	38	
52967	90,1	48	121	2	9	
310000	79,9	40	101	0,3	1,3	
889130	75,0	41	102	0,12	0,46	
3000000	70,1	39	98	0,03	0,13	
27833333	60,0	83	209	0,01	0,03	
<b>1300000:</b>	<b>73,3</b>		<b>C1: -</b>		<b>C2: -</b>	

Bitumen: PMB Original				Spindel: 27				Bitumen: PMB Original				Spindel: 29									
Viskositet mPa·s	Temp °C	Torsion %	Skjuvsp. Pa	Skjuvhast. 1/s	Rotation rpm	Viskositet mPa·s	Temp °C	Torsion %	Skjuvsp. Pa	Skjuvhast. 1/s	Rotation rpm	Viskositet mPa·s	Temp °C	Torsion %	Skjuvsp. Pa	Skjuvhast. 1/s	Rotation rpm				
231	179,9	19	16	68	200	640	150,0	13	32	50	200	1165	134,9	23	58	50	200				
369	164,8	30	25	68	200	2035	120,0	41	102	50	200	4776	105,1	55	139	29	116				
599	150,2	48	41	68	200	14676	90,0	54	136	9	37	58182	74,9	51	128	2,2	8,8				
1026	135,1	52	44	43	127	342857	60,0	50	126	0,37	1,47	1550000	50,0	50	124	0,08	0,32				
1789	120,1	46	39	22	64	9600000	40,0	48	120	0,01	0,05	<b>1300000:</b>	<b>51,1</b>	<b>C1: -</b>	<b>C2: -</b>						
4304	105,1	48	41	10	28	<b>Bitumen: PMB RTFOT</b>				<b>Spindel: 27</b>				<b>Bitumen: PMB RTFOT</b>				<b>Spindel: 29</b>			
13675	90,1	55	46	3,4	10,0	Viskositet mPa·s	Temp °C	Torsion %	Skjuvsp. Pa	Skjuvhast. 1/s	Rotation rpm	Viskositet mPa·s	Temp °C	Torsion %	Skjuvsp. Pa	Skjuvhast. 1/s	Rotation rpm				
56757	75,0	59	50	0,88	2,59	830	149,9	17	42	50	200	1360	134,8	27	68	50	200				
340698	60,0	59	50	0,15	0,43	2856	120,0	48	119	42	167	8079	105,1	51	127	16	63				
1480000	50,4	59	50	0,03	0,10	28882	90,1	49	123	4,3	17,0	145509	75,0	49	122	0,84	3,34				
<b>1300000:</b>	<b>51,2</b>	<b>C1: -</b>	<b>C2: -</b>			1090000	60,0	54	136	0,13	0,50	6122222	50,0	55	138	0,02	0,09				
<b>Bitumen: PMB RTFOT+PAV</b>				<b>Spindel: 27</b>				<b>Bitumen: PMB RTFOT+PAV</b>				<b>Spindel: 29</b>									
Viskositet mPa·s	Temp °C	Torsion %	Skjuvsp. Pa	Skjuvhast. 1/s	Rotation rpm	Viskositet mPa·s	Temp °C	Torsion %	Skjuvsp. Pa	Skjuvhast. 1/s	Rotation rpm	Viskositet mPa·s	Temp °C	Torsion %	Skjuvsp. Pa	Skjuvhast. 1/s	Rotation rpm				
264	180,2	21	18	68	200	485	164,9	10	24	50	200	970	150,2	19	49	50	200				
490	165,0	39	33	68	200	2185	134,8	44	109	50	200	6057	119,8	42	106	18	70				
1072	149,9	52	44	41	122	25787	105,0	46	115	4,5	17,8	137941	90,0	47	117	0,85	3,40				
2472	134,9	53	45	18	54	1093023	74,9	47	118	0,11	0,43	14466667	60,0	43	109	0,01	0,03				
7118	119,9	54	46	6	19	<b>1300000:</b>	<b>73,8</b>	<b>C1: -</b>	<b>C2: -</b>												
28100	105,0	56	48	2	5	<b>Bitumen: PMB RTFOT+PAV</b>				<b>Spindel: 27</b>				<b>Bitumen: PMB RTFOT+PAV</b>				<b>Spindel: 29</b>			
149000	90,0	60	51	0,3	1,0	Viskositet mPa·s	Temp °C	Torsion %	Skjuvsp. Pa	Skjuvhast. 1/s	Rotation rpm	Viskositet mPa·s	Temp °C	Torsion %	Skjuvsp. Pa	Skjuvhast. 1/s	Rotation rpm				
1178571	75,1	66	56	0,05	0,14	264	180,2	21	18	68	200	490	165,0	39	33	68	200				
1642500	73,0	66	56	0,03	0,10	1072	149,9	52	44	41	122	2472	134,9	53	45	18	54				
2712500	70,0	43	37	0,01	0,04	7118	119,9	54	46	6	19	28100	105,0	56	48	2	5				
<b>1300000:</b>	<b>74,5</b>	<b>C1: -</b>	<b>C2: -</b>			149000	90,0	60	51	0,3	1,0	1178571	75,1	66	56	0,05	0,14				
<b>Bitumen: PMB RTFOT+PAV</b>				<b>Spindel: 27</b>				<b>Bitumen: PMB RTFOT+PAV</b>				<b>Spindel: 29</b>									

## **Bilaga 2. Heukelom BTDC över viskositetsmätningar med RVB**

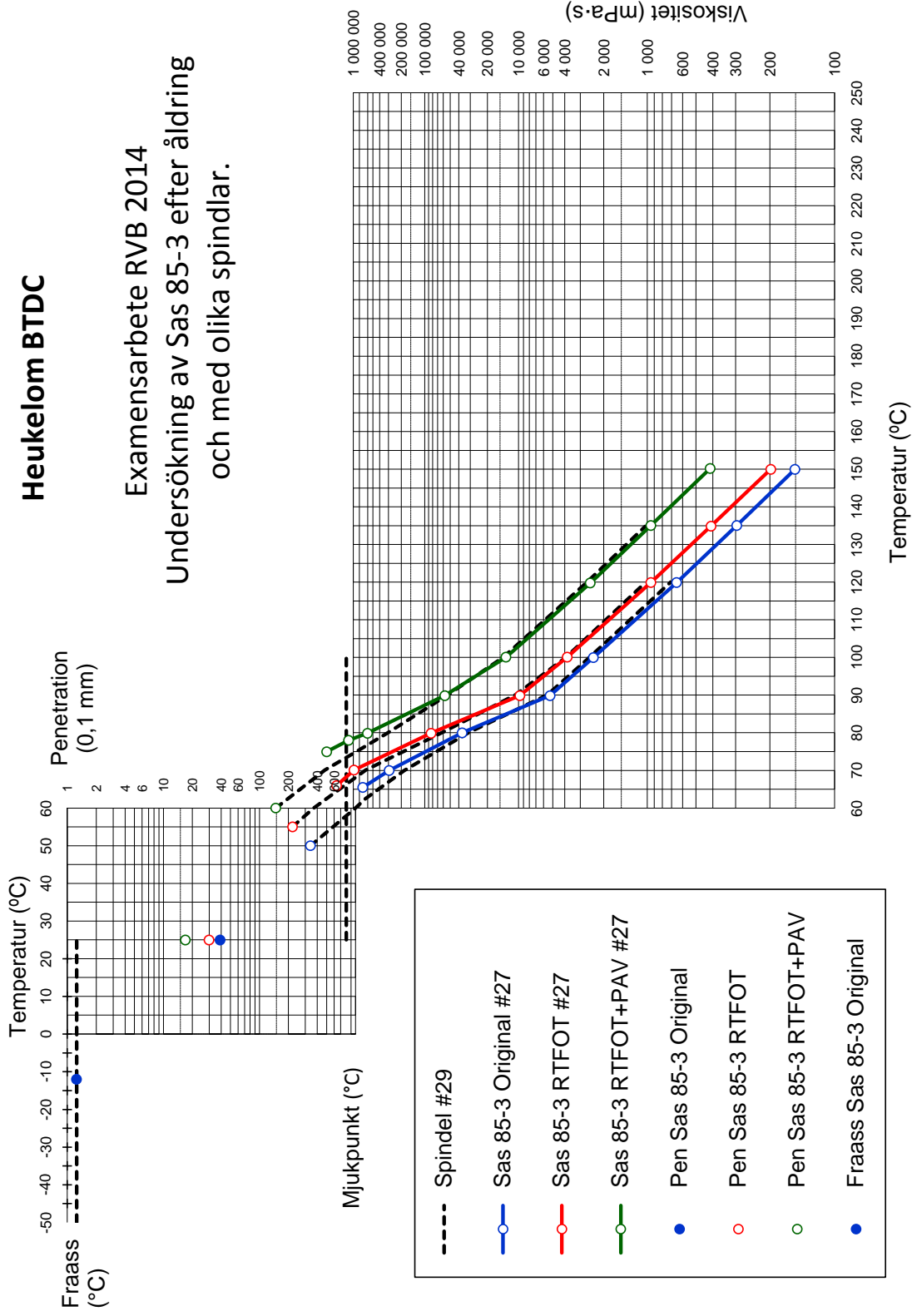
# Heukelom BTDC

Examensarbete RVB 2014  
 Undersökning av 70/100 efter åldring  
 och med olika spindlar.



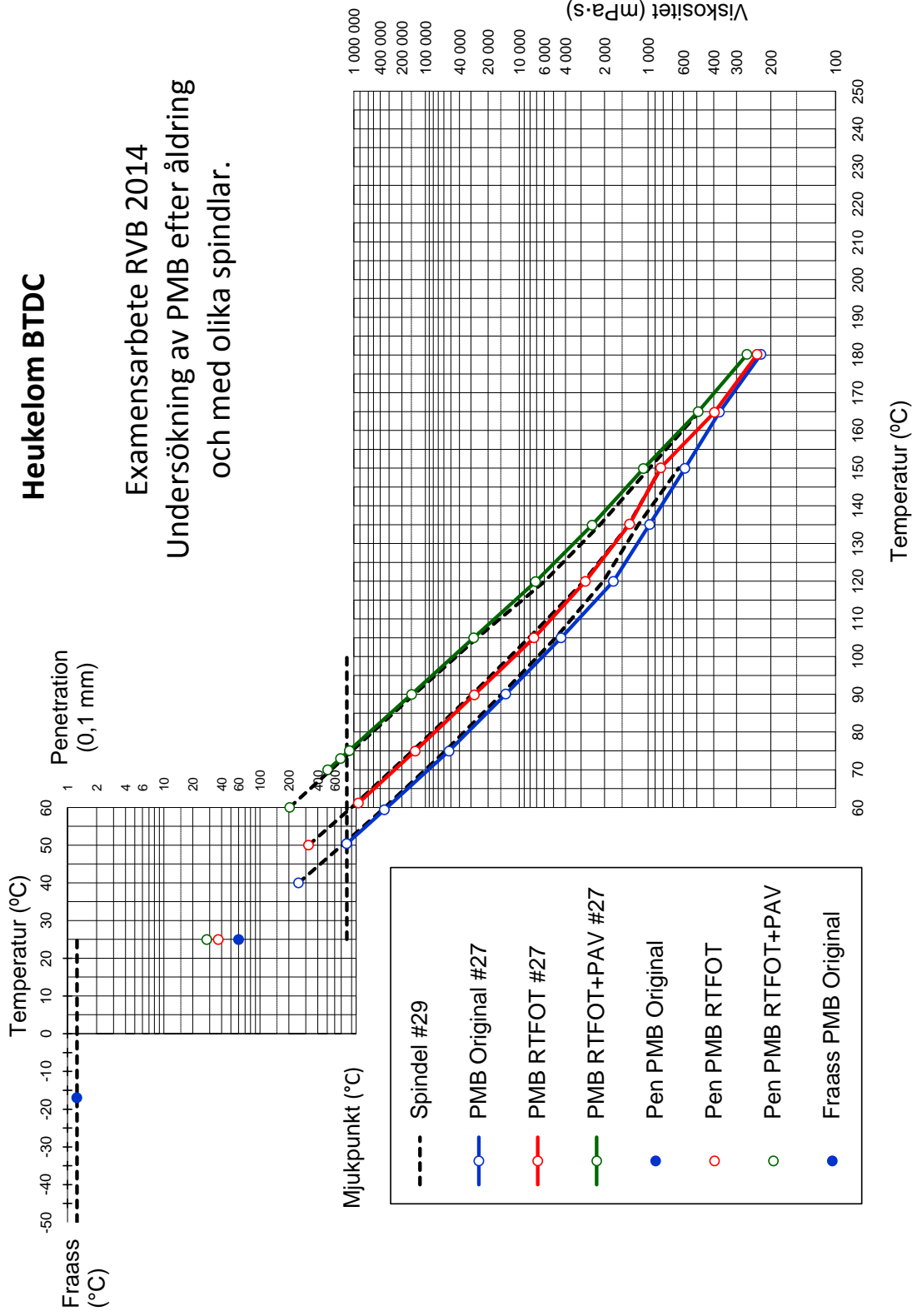
# Heukelom BTDC

Examensarbete RVB 2014  
 Undersökning av Sas 85-3 efter åldring  
 och med olika spindlar.



# Heukelom BTDC

Examensarbete RVB 2014  
Undersökning av PMB efter åldring  
och med olika spindlar.



### Bilaga 3. Tabell med mätresultat från variation av torsionsvärde vid varje temperatur

Variation av torque med #29 för Sas 85-3 RTFOT					
temp.	torque	rpm	skj.sp.	skj.hast.	visk.
°C	%	v/min	Pa	1/s	mPa·s
120	21	200	53	50	1,06E+03
	16	147	39	37	1,06E+03
100	78	190	194	48	4,09E+03
	52	127	130	32	4,10E+03
	16	38	40	10	4,18E+03
90	78	70	194	18	1,11E+04
	53	47	133	12	1,13E+04
	16	14	41	3,5	1,17E+04
80	59	12	148	3,1	4,85E+04
	41	8,1	102	2,0	5,02E+04
	13	2,4	33	0,60	5,46E+04
70	44	1,2	111	0,29	3,80E+05
	31	0,8	79	0,20	4,03E+05
	12	0,23	30	0,06	5,26E+05
60	51	0,16	128	0,040	3,21E+06
	37	0,10	92	0,025	3,67E+06
	16	0,03	41	0,008	5,47E+06
55	52	0,06	130	0,015	8,67E+06
	40	0,04	101	0,010	1,01E+07
	17	0,01	44	0,003	1,74E+07