

# Metod för bestämning av mängd föryngringsmedel till returafalt

- En ny modell för beräknade resultat i det viskösa området



LUNDS  
UNIVERSITET

Lunds Tekniska Högskola

LTH Ingenjörshögskolan vid Campus Helsingborg  
Teknik och samhälle/Trafik och väg

Examensarbete:  
Niclas Gustavsson  
Robert Thylander



© Copyright Niclas Gustavsson, Robert Thylander

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 2013



## Förord

Detta är den avslutande delen på vår tre år långa högskoleingenjörsutbildning inom Byggteknik med inriktning väg och trafikteknik.

Examensarbete är fördelat på 22,5 högskolepoäng och är utfört på uppdrag från Nynas AB.

Vi skulle först vilja tacka vår utmärkta handledare Per Tyllgren som hjälpt oss under examensarbetets gång med allt från support, feedback och sammanställning av figurer och diagram.

Ett stort tack ska även våran uppdragsgivare Niclas Krona från Nynas ha, där vi fått vårt material ifrån i form av returbitumen samt föryngringsolja.

En som vi verkligen inte får glömma att tacka är vår examinator Ebrahim Pahamifar som kopplat ihop oss med vår handledare Per Tyllgren och uppdragivare Niclas Krona.

Ett stort tack ska även Azur Kujundzic ha för hjälpen och inläringen av rotationsviskosimetern, Brookfield.

Skulle även vilja tacka Lunds Tekniska Högskola som tillät oss ha tillgång till asfaltdlabbet där alla mätningar gjorts. Ett sista tack till våra respektive familjer som ställt upp för oss under hela arbetets gång.

Niclas Gustavsson  
Robert Thylander

## Sammanfattning

Asfalt anses vara en lättåtervunnen produkt och representerar stora miljömässiga och ekonomiska värden. Efter många år på vägarna har emellertid asfalten åldrats och förlorat sina goda egenskaper.

För att fungera på nytt måste egenskaperna återskapas. Ett nygammalt sätt som fått chans till omstart med miljöanpassade tillsatsmedel är så kallad förnygring. Det innebär inblandning av en uppmjukande olja. Företaget Nynas AB har en förnygringsolja med arbetsnamnet XP 12-1, som uppfyller höga miljökrav och kan hanteras med normal försiktighet.

Uppbruten retur-asfalt befinner sig i olika stadier av åldring, vilket innebär att mängden förnygringsolja som behövs varierar. Det finns ungefärliga sätt att beräkna mängden men hittills inget som har kunnat förutsäga behövlig mängd och slutresultatet på ett korrekt sätt.

Som resultat av flera examensarbeten på LTH med rotationsviskosimeter har en metod arbetats fram som förutsäger resulterande blandningsresultat av olika bitumensorter. Detta sker med hjälp av en välkänd formel av Williams-Landel-Ferry och ett diagram av Willem Heukelom, BTDC (Bitumen Test Data Chart). Digitaliseringen av BTDC var genombrottet som gjorde detta möjligt, förutom gedigna insatser av en rad examensarbetare.

Eftersom XP 12-1 har samma ursprung som bitumen lanserades hypotesen att den skulle kunna beskrivas på samma sätt. Om det skulle lyckas fanns en möjlighet att göra på samma sätt som med bitumenblandningar.

En försöksserie lades upp där återvunnet returbitumen från uppbruten asfalt blandades med olika mängder XP 12-1. Komponenternas och blandningarnas viskositet över mjukpunkten mättes i täta temperatursteg och deras WLF-formler beräknades.

Det visade sig att XP 12-1 kunde beskrivas som ett bitumen med en predikterad mjukpunkt på  $-26\text{ °C}$ , som kan jämföras med returbitumenets mjukpunkt på  $65\text{ °C}$ . Precisionen i beräkningsmodellen var uppmuntrande men det krävs verifierande kontrollmätningar innan den kan börja tillämpas. Nästa steg är att göra motsvarande studier med hjälp av funktionella provningar i en dynamisk skjuvreometer, DSR.

Nyckelord: Bitumen, Förnygring, Återvinning, Asfalt, Viskositet, WLF, Heukelom

## Abstract

Asphalt is considered to be easy to recycle and represents major environmental and economic values. After many years on the road, however, the asphalt has aged and lost its good properties.

In order to work again those asphalt properties must be restored. A well-known way which has been given a chance for a restart with environmentally friendly additives is rejuvenation. It implies the mixing of a softening oil. The company of Nynas AB has developed a rejuvenating oil temporarily named XP 12-1, meeting high environmental standards and which can be handled with normal care.

Reclaimed asphalt is in different stages of aging, which means that the need for rejuvenation varies. There are approximate ways to get a rough estimate of the amount needed, but so far no one has been able to predict the actual amount required and the end result in a correct way.

Based on several theses from Lund University using rotational viscometer a method has been developed that predicts the resulting mixtures of different bitumen grades. This is accomplished by using the well known formula of Williams-Landel-Ferry, and a chart of Willem Heukelom, the BTDC (Bitumen Test Data Chart). The digitization of the BTDC was the breakthrough that made this possible, besides genuine efforts by a number of students.

Since XP 12-1 has the same origin as bitumen the assumption was that it could be described in the same way. If so it would be possible to regard this mixture in the same way as the ones of ordinary bitumen.

A series of experiments were posted, where bitumen extracted from reclaimed asphalt was mixed with different amounts of XP 12-1. The viscosity of the components and the mixing results were measured from the softening point and upwards in short temperature steps and their WLF-formulas were calculated.

It turned out that XP 12-1 could be described as any ordinary bitumen with a predicted softening point at  $-26^{\circ}\text{C}$ , to be compared with the measured softening point of the reclaimed bitumen at  $65^{\circ}\text{C}$ . The precision of this combined mathematical/testing prediction model was encouraging but it will take some check measurements before it can be used. The next step is to make similar studies using functional tests with a dynamic shear rheometer, DSR.

**Keywords:** Bitumen, Rejuvenation, Recycling, Asphalt, Viscosity, WLF, Heukelom

# Innehållsförteckning

<b>1 Inledning</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1 Bakgrund</b> .....	<b>1</b>
<b>1.2 Syfte</b> .....	<b>1</b>
<b>1.3 Metod</b> .....	<b>1</b>
<b>1.4 Avgränsning</b> .....	<b>2</b>
<b>2 Grundläggande fakta</b> .....	<b>2</b>
<b>2.1 Reologi</b> .....	<b>2</b>
2.1.1 Historia .....	2
2.1.2 Definition .....	2
<b>2.2 Viskositet</b> .....	<b>3</b>
2.2.1 Definitioner och enheter .....	3
2.2.2 Newtonska och icke-newtonska vätskor .....	4
<b>2.3 Bitumen</b> .....	<b>5</b>
2.3.1 Användningsområde .....	5
2.3.2 Framställning .....	5
2.3.3 Egenskaper och beteckningar .....	6
<b>2.4 Föryngringsmedel</b> .....	<b>7</b>
<b>2.5 Återvinning av bitumen från returafalt</b> .....	<b>7</b>
2.5.1 Diklormetan .....	7
2.5.2 Metod .....	7
<b>2.6 Heukeloms BTDC-diagram</b> .....	<b>7</b>
<b>2.7 WLF- ekvationen för viskositet</b> .....	<b>9</b>
<b>3 Metod</b> .....	<b>10</b>
<b>3.1 Rotationsviskosimeter</b> .....	<b>10</b>
3.1.1 Avläsning av mätvärde och val av varvtal .....	11
3.1.2 .....	12
3.1.3 Provberedning .....	12
3.1.4 Förstudie .....	13
3.1.5 Huvudförsök .....	13
<b>3.2 Brookfield UL-Adapter</b> .....	<b>13</b>
3.2.1 Förberedelser .....	14
3.2.2 Mätning på föryngringsolja XP 12-1 .....	15
<b>3.3 Metod för beräkning av WLF-samband</b> .....	<b>15</b>
<b>4 Resultat</b> .....	<b>16</b>
<b>4.1 Bakgrund till bestämning av komponenters och blandningars dynamiska viskositet</b> .....	<b>16</b>
<b>4.2 Mätresultat</b> .....	<b>17</b>
<b>4.3 Beräkning av WLF-samband för uppmätta värden</b> .....	<b>18</b>
<b>4.4 WLF-konstanter justerade mot recept</b> .....	<b>19</b>
<b>4.6 Jämförelser mellan uppmätta och beräknade viskositeter</b> .	<b>21</b>



<b>5 Slutsatser .....</b>	<b>23</b>
<b>6 Referenslista .....</b>	<b>25</b>
<b>Bilagor .....</b>	<b>27</b>



# 1 Inledning

## 1.1 Bakgrund

Bitumen som finns i returafalt åldras efter varit ute på vägen och är därför styvare än sitt ursprung. Asfalten har därmed förlorat sina ursprungliga egenskaper som vägbeläggning. Om returafalten blandas in med ny asfalt i befintligt skick riskerar blandprodukten få en kortare livslängd. För att återskapa de ursprungliga egenskaperna finns ett sätt att mjuka upp returafalten med en oljeprodukt, kallad föryngringsmedel.

Metoden med inblandning av föryngringsolja har använts länge men det är först under senare år som oljor med accepterad miljöprofil kommit ut på marknaden. I ett SBUF-projekt redovisades försök av en vald olja och några produktionsstekniska alternativ. Detta projekt var mer inriktat på att ta fram lämpliga arbetssätt i tillverkningsprocessen än de bästa recepten eller ett passande föryngringsmedel. (Tyllgren, P. 2010).

En försöksväg inom projektet följdes upp på uppdrag av Nynas AB för att undersöka föryngringseffektens beständighet (Tyllgren, P. 2011).

Det återstår därför att fördjupa kunskapen kring valet av lämplig föryngringsolja med behövlig mängd. Beroende på returafaltens ingående bitumen behövs olika mängd olja. Det kan likaså handla om olika inblandningar beroende på vad asfalten ska användas till.

## 1.2 Syfte

Målet med detta arbete är att med hjälp av Brookfield rotationsviskosimeter få fram de viskösa egenskaperna hos återvunnet bitumen med olika mängd av utvald föryngringsolja. I Heukeloms BTCD-diagram och med WLF-formler redovisas viskositeten för de nya blandningarna. Beräknade viskositeter jämförs med uppmätta värden.

## 1.3 Metod

Första steget var att inhämta och studera litteratur om returbitumen, viskositet, föryngringsolja med mera. Andra examensarbeten inom samma område lästes för att få en större kunskap om ämnet.

Arbetet baseras på laborationer med mätinstrumentet Brookfield Viscometer och därför behövdes en allmän genomgång och testkörningar med instrumentet.

Returbitumen samt föryngringsolja som erhållits från Nynas AB och blandades samman med olika andelar i olika numrerade testburkar.

Viskositeten för föryngringsoljan Nynas XP 12-1 provades med hjälp av en specielltillsats för lågviskösa oljor, en UL-adapter kopplad till Brookfield-instrumentet, som tempererades med hjälp av ett vattenbad.

Skattningarna av WLF-formlerna och ingående konstanter genomfördes med vanliga statistiska passningsräkningar av SVC (Svenskt VägCentrum), som också tog fram Heukelomdiagrammen med hjälp av företagets digitala version av BTDC.

## **1.4 Avgränsning**

Mätningarna utfördes på material från Nynas AB i form av returbitumen, bitumensorterna 50/70 och 160/220 samt föryngringsolja XP 12-1. Endast en typ av returbitumen provades, vilken togs fram av Nynas AB i Nynäshamn från uppbruten asfalt på orten. Blandningarna testades sedan i Brookfield-instrumentet, där viskositeten mättes från mjukpunkten och uppåt. XP 12-1 provades från 5 till 60 °C.

## **2 Grundläggande fakta**

### **2.1 Reologi**

#### **2.1.1 Historia**

Under slutet av 20-talet uppstod begreppet reologi, som kommer från grekiskans ord för ”lära” och ”flyta”, då en grupp amerikanska kemister skulle beskriva deformationsegenskaper hos olika materialgrupper. Till en början användes begreppet bara i den kemiska industrin men med åren har ordet och definitionen utökats och uppmärksammats av andra industrier, som geologi, vattenbyggnad, livsmedelsproduktion, plastindustri, färgindustri och medicin (Nielsen, A 1968).

#### **2.1.2 Definition**

Vetenskapen kring reologi definieras som vätskors och fasta materials tidsberoende deformationsegenskaper. Reologin beskriver förhållandet mellan spänning och töjning för olika material både i fast och visköst tillstånd.

Inom reologin används tre grundläggande egenskaper: viskositet, elasticitet och plasticitet. För att beskriva olika materials egenskaper används begreppen var för sig eller i kombination för att framhålla olika karaktärer t.ex. viskoelastiska eller viskoplastiska egenskaper. Med viskoelastiska egenskaper

menas att materialet har både viskösa och elastiska egenskaper och på motsvarande sätt har viskoplastiska materialet både viskösa och plastiska beteenden (NE 2013).

## 2.2 Viskositet

### 2.2.1 Definitioner och enheter

Viskositet är ett mått på hur trögflytande en vätska är, alltså hur stort motstånd vätskan gör mot en rörelse. Det kan även beskrivas med den inre friktion som vätskan ger upphov till. Friktionen uppstår när ett skikt förskjuts i förhållande till ett intilliggande skikt. Kraften som krävs för att utföra en rörelse och överkomma friktionen kallas skjuvspänning.

Vatten är en vätska med mycket låg viskositet, ca 1 mPa·s, vilket innebär att den inre friktionen är mycket låg jämfört med t.ex. en olja med högre viskositet och därmed högre inre friktion.

Det finns två sorters viskositet beroende på hur de mäts:

- Dynamisk viskositet, uttryckt i mPa·s
- Kinematisk viskositet, uttryckt i mm<sup>2</sup>/s

Dynamisk viskositet är vätskans motstånd mot en påtvingad yttre kraft medan kinematisk viskositet är motståndet när vätskan bara skjuts på av egenvikten, d.v.s. gravitationskraften.

Det finns ett matematiskt samband mellan viskositeterna:

$$\eta_{\text{dyn}} = \eta_{\text{kin}} * \rho \quad (\text{ekv.1})$$

där  $\rho$  är vätskans densitet.

I den här studien handlar det enbart om dynamisk viskositet, eftersom en rotationsviskosimeter bara mäter den egenskapen. Nyckelbegreppen förklaras nedan.

*Viskositet*

$$\eta = \tau/\gamma \quad (\text{ekv. 2})$$

där

$\eta$	Viskositet (mPa·s)
$\tau$	Skjuvspänning (N/m <sup>2</sup> )
$\gamma$	Skjuvhastighet (1/sek)

SI-enheten för dynamisk viskositet är  $\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ , vilken räknas om till  $\text{mPa}\cdot\text{s}$  för att stämma med gamla enheten cPoise. Vattens viskositet är  $1,025 \text{ mPa}\cdot\text{s}$  (Wikipedia 2013).

### Skjuvspänning

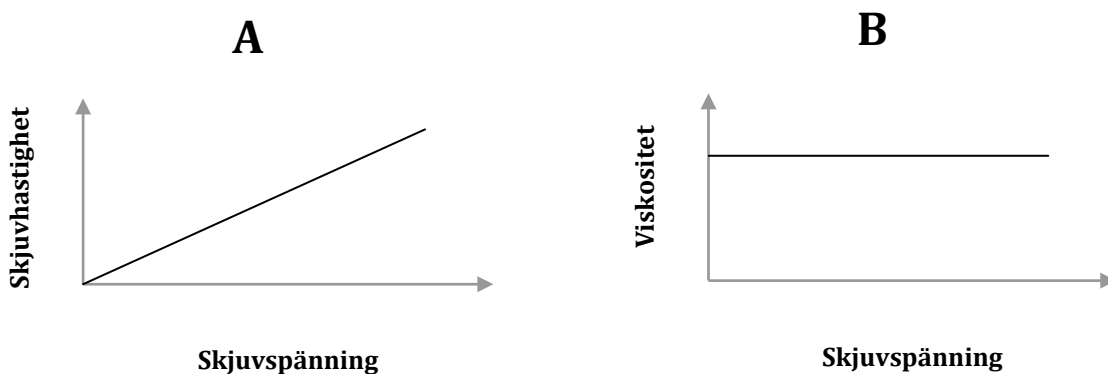
$$\tau = F / A \quad (\text{ekv. 3})$$

där

$\tau$	Skjuvspänning ( $\text{N}/\text{m}^2$ )
F	Skjuvkraft (N)
A	Area ( $\text{m}^2$ )

### 2.2.2 Newtonska och icke-newtonska vätskor

I Newtonska vätskor är skjuvspänningen  $\tau$  proportionell mot skjuvhastigheten  $\gamma$  (A i nedanstående figur). Det betyder att kraften fördubblas om rotations-spindeln rör sig dubbelt så fort medan viskositeten är konstant (B). Exempel på newtonska vätskor är vatten och bitumen över mjukpunkten.



Figur 2-1. Newtonska egenskaper

Ketchup är en populärt exempel på en vätska som inte är newtonsk. Den har en fastare form i vila och blir mer lättflytande vid omrörning. En icke newtonsk vätska ändrar alltså sin viskositet med ändrad hastighet och därmed skjuvspänning. Denna egenskap kallas ibland tixotrop eller skjuvtunnande (Brookfield).

## 2.3 Bitumen

### 2.3.1 Användningsområde

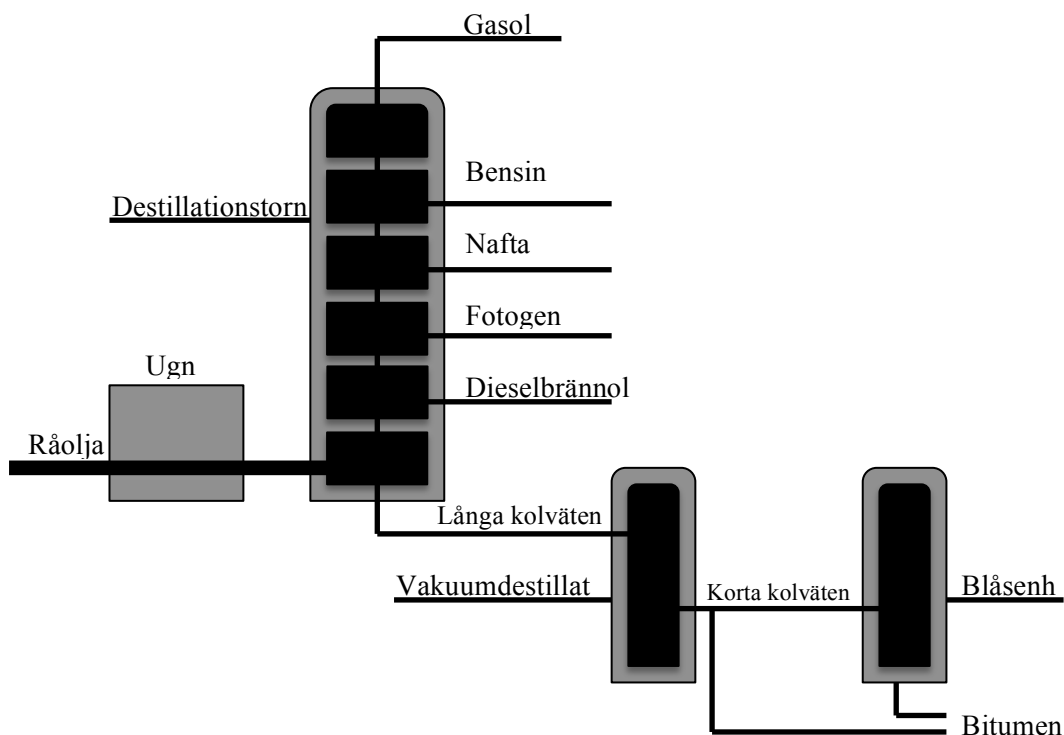
Bitumen har ett brett användningsområde och har använts som sammanhållande och tätande material i tusentals år. Volymproducerad asfalt började tillverkas för ca hundra år sedan i takt med den växande bilismens ökande behov av dammfria och jämna vägar.

Bitumen fungerar som smörjmedel för asfalt under blandning och utläggning för att sedan hålla samman stenmaterialet när det svalnat. Bitumenkvalitéerna anpassas efter trafikbelastningar och olika avsedda funktioner.

### 2.3.2 Framställning

Bitumen destilleras vanligtvis från råolja och är en mycket komplex blandning av olika kolväten, som ger materialet dess unika karaktär. Bitumen finns även i så kallade asfaltsjöar men är då uppblandat med fint stenmaterial.

Vid destillationen värms råoljan upp till mellan 350 – 380 °C. I ett destillationstorn avskiljs olika produkter efter deras kokpunkt. Högst upp finns de lättaste vätskorna och längs ner återfinns tunga destillat med de långa kolvätemolekylerna. Nästa steg är vakuumdestillation vid en temperatur på 350 - 425 °C och vid ett tryck av 10 – 100 mmHg.



Figur 2-2. Exempel på framställning av bitumen. (Read & Whiteoak, 2003)

Bitumensorterna med kortare kolvätekedjor från vakuumdestillationen används för att finjustera slutkvaliteterna. Nästa anhalt i tillverkningsprocessen är oxidation, där varm luft mellan 240 – 320 °C blåses över resterna. Det förstyrkar bitumenet som resulterar i ökad mjukpunkt och minskad penetration (Read & Whiteoak 2003). De slutliga kvaliteterna blandas fram av mjuka och styva komponenter.

### 2.3.3 Egenskaper och beteckningar

Bitumens mest karakteristiska egenskaper som är anledningen till bitumenets framgång som samhällsnyttig produkt är

- **Vidhäftningsförmåga** – Förmågan att binda till sig annat material t.ex. stenmaterial vid asfaltstillverkning.
- **Motstånd mot vatten** – Bitumen är inte vattenlösligt och kan sägas vara vattentätt men det kan däremot emulgeras i vatten.
- **Resistens mot kemikalier** – Står emot de flesta baser, syror och salter i måttliga koncentrationer men vätskor som bensin och diesel löser upp bitumen.
- **Klimatisk resistens** – Klarar av olika klimat i form av värme, kyla, regn och luft.
- **Hållbarhet** - tål oändligt många belastningar och har förmåga att läka igen sprickor.
- **Återvinningsbart** – med rätt teknik och kunskap är bitumen återvinningsbar till nästan ursprunglig kvalitet.

Fram till 1980 benämndes bitumenkvaliteter efter bitumenets temperatur vid viskositeten 500 cStoke ( $\text{mm/s}^2$ ), vilket ungefär motsvarar 470 mPa·s, med ett "A" framför, t ex A120 och A135. Då byttes namn på ämnet från "asfalt" till bitumen. I USA kallas ämnet fortfarande "asphalt", vilket ibland är en källa till missförstånd. Samtidigt byttes benämningen till bitumenets penetrationsvärde vid 25 °C med ett B framför, t ex B180 och B85. I slutet av 1990-talet harmoniserades benämningarna i Europa till penetrationsvärdets acceptansintervall utan förstavelse, t ex 160/220 och 70/100. (Tyllgren, P. 2013).

Penetrationstestet är den vertikala inträngningen av en spetsig nål belastad med 100 g i en bitumenfylld burk, normalt vid 25 °C. Inträngningsdjupet efter 5 sekunder, uttryckt i 1/10 mm eller dmm, utgör penetrationsvärdet.

Bitumenkvalitet kan enkelt uttryckt beskrivas med styvhet. I kallare klimat väljs generellt sett mjukare kvaliteter och i varmare lite styvare. Detta görs för att asfalten ska vara tillräckligt stabil när det är som varmast och samtidigt tillräckligt eftergivlig när det är som kallast. Det innebär att det är stora skill-



nader mellan norra och södra Sverige i valet av bitumensorter, dels av trafikskäl men också av klimat och geotekniska orsaker (Agardh & Parhamifar. 2012).

## **2.4 Föryngringsmedel**

Användning av föryngringsoljor för återvinning av asfalt är en nygamal metod. Det är först under senare år som miljövänliga oljor kommit ut på marknaden. Ofta har mjukt bitumen blandats in med returbitumen men denna metod ger en seg asfaltmassa. Det har visat sig att inblandning av en uppmjukande föryngringsolja till returafalten ger bättre utmattningssegenskaper på asfalt (Svensk Byggtjänst 2011).

Det använda föryngringsmedlet tillverkas av Nynas AB och har arbetsnamnet XP 12-1. Föryngringsmedlet är en naftenisk, hydrerad, högraffinerad mineralolja. Oljan är så pass ren att det inte krävs någon speciell miljömässig märkning (Tyllgren, P. 2010).

## **2.5 Återvinning av bitumen från returafalt**

### **2.5.1 Diklormetan**

Diklormetan (metylenklorid) är ett tungt lösningsmedel med kokpunkt vid 40 °C som används för återvinning (extraktion) av bitumen från returafalten. Diklormetan är klassat som ett hälsofarligt ämne, som bara får användas på laboratorier med tillstånd och måste hanteras i en sluten process (FAS, metod 2002).

### **2.5.2 Metod**

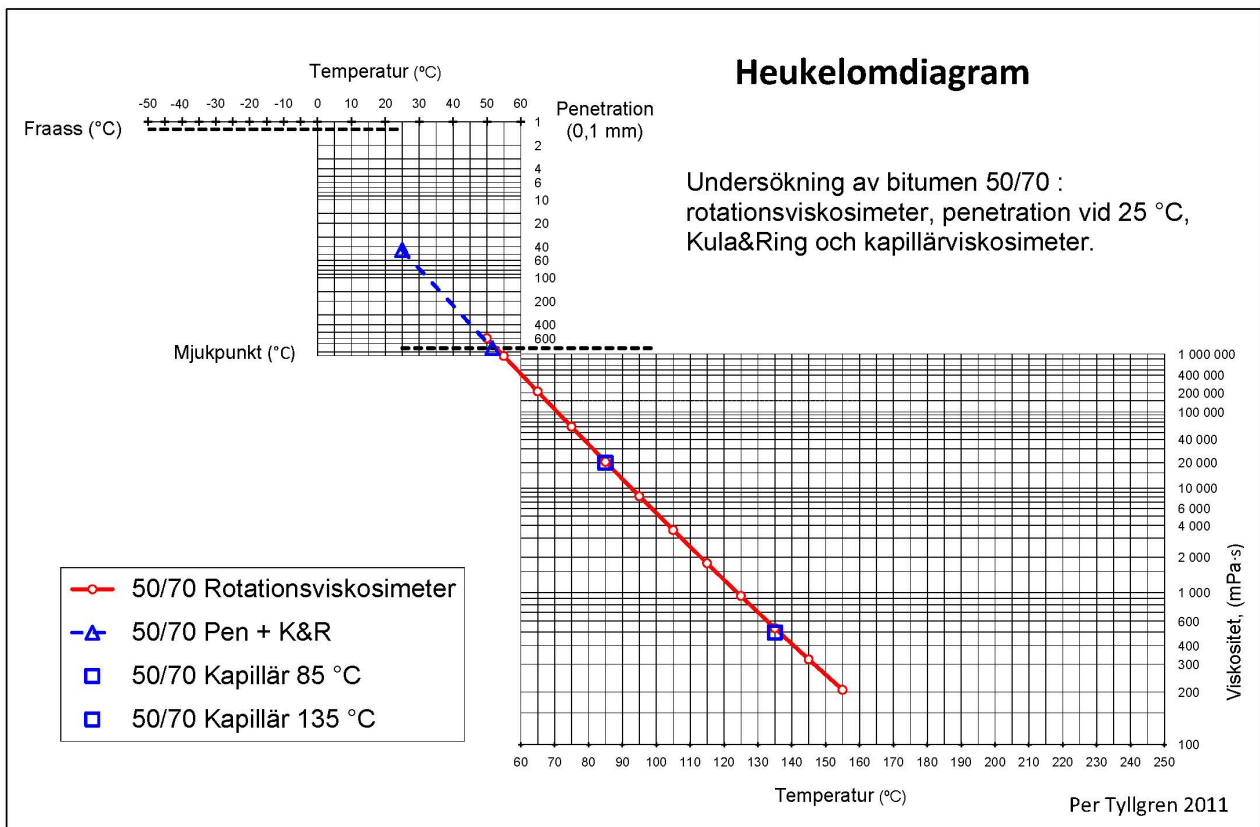
Återvinningen (extraktionen) av bitumen sker i en automatisk ”tvättmaskin”, som sprejar lösningsmedlet över provet i en roterande nätkorg. Upplöst bitumen med stenmjöl passerar en hastigt roterande centrifug som fångar alla fasta partiklar. Den rena lösningen samlas upp och hålls över i en indunstningsapparat, där allt lösningsmedel dunstat bort och återförs till tvättmaskinen. Kvar blir bitumenet som sedan kan undersökas med olika reologiska metoder. I det här fallet bestämdes viskositeten före och efter inblandning av olika mängder föryngringsolja (Pedersen, J 2009).

## **2.6 Heukeloms BTDC-diagram**

Heukelomdiagrammet presenterades 1973 av Willem Heukelom vid holländska Shell som ett sätt att grafiskt beskriva bitumens egenskaper som funktion av temperaturen. Diagrammet bygger på resultaten från fyra olika tester: penetration, mjukpunkt, viskositet och Fraass breaking point. Fraass breaking point visar vid vilken temperatur ett bitumen spricker efter sänkning till allt lägre

temperatur. Dessa fyra tester presenteras grafiskt i ett och samma diagram (Bitumen Test Data Chart, BTDC).

Diagrammet har en horisontell linjär temperaturskala, som är gemensam för de fyra mätmetoderna. Resultaten av Fraass och mjukpunkt utgörs av ett temperaturvärde, som avsätts utmed horisontella, linjära skalor parallella med temperaturskalan. Penetrationsvärdet visas i ett diagram med logaritmisk vertikal-skala. Viskositeten har en egen vertikalskala från en särskild formel för att punkterna från olika tester ska hamna utmed en rät linje. Linjen kan sedan användas för att inter- och extrapolera värden i och mellan respektive diagram. Varje bitumensort har en karakteristisk linje som inte alltid är rät (Read & Whiteoak 2003).



Figur 2-3. Exempel på presentation i ett digitalt BTDC med jämförelser mellan resultat från standardmetoder och en rotationsviskosimeter.

Diagrammet har fallit lite i glömska i takt med att nya mätmetoder har introducerats men det har fortfarande stort pedagogiskt värde när det gäller att framställa ett bitumens reologiska profil. Diagrammet användes från början bara grafiskt men finns numera i digitaliserad form.

Ett rent bitumen beskrivs vanligtvis med en rak linje från det övre vänstra hörnet till det nedre högra hörnet. Heukelom diagram är användbart för att avläsa viskositeten för ett visst bitumen vid valfri temperatur. Man kan även jämföra olika bitumensorter där ett mjukare bitumen placerar sig lägre än de styvare bitumensorterna men ofta utmed parallella linjer (Tyllgren, P. 2010).

## 2.7 WLF- ekvationen för viskositet

1953 presenterade M. L. Williams, R. F. Landel och J. D. Ferry en ekvation för den så kallade skiftfaktorn,  $a_T$ , för polymera ämnen:

$$\log a_T = \frac{-c_1 * (T - T_{ref})}{c_2 + (T - T_{ref})} \quad (\text{ekv.4})$$

där

$T$  är temperaturen i °C

$T_{ref}$  är referenstemperaturen i °C

För bitumen över mjukpunkten gäller:

$$a_T = \frac{\eta}{\eta_{ref}} \quad (\text{ekv.5})$$

(Heukelom, W. 1973)

där

$\eta$  är aktuell viskositet i mPa·s

$\eta_{ref}$  är referensviskositeten i mPa·s.

$c_1$  och  $c_2$  i ekv.4 är konstanter som är olika för varje ämne och de numeriska värdena beror på referenstemperaturen i ekv.4 och referensviskositeten i ekv.5. Vanliga värden för  $c_1$  är ca 7,8 och för  $c_2$  runt 105.

Den vanliga referenstemperaturen är mjukpunkten som motsvarar 1 300 000 mPa·s (Heukelom, W. 1973).

## 3 Metod

### 3.1 Rotationsviskosimeter



En vanlig metod för mätning av flytande ämnens viskositet är med en rotationsviskosimeter, i det här fallet av fabrikat Brookfield med modellbeteckning Viscometer DV-II Pro Extra (se bild). Instrument används inom många industriella områden t.ex. livsmedel, läkemedel och färgtillverkning.

*Figur 3-1: Brookfield rotationsviskosimeter med provrör och spindel*

Utrustningens viktigaste komponenter är följande:

- Spindel (rotationscylinder, modell SC4-27) med stel axel och EZ-låsning
- Rotationsviskosimeter med torsionsmätning
- Thermosel (Elektrisk värmemantel)
- Termostat
- Styr dator
- Provrör av aluminium

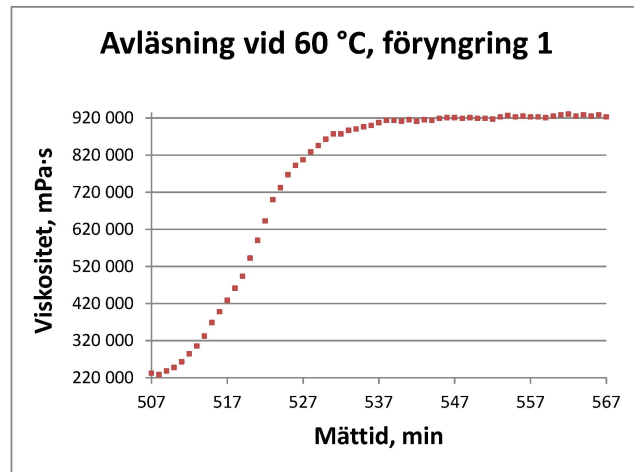
Proceduren börjar med att 10,5 ml av provet hälls ner i provröret som sedan placeras i Thermoselenheten. Provet värms upp till 15 °C över första mättemperaturen och så snart bitumenet är tillräckligt mjukt sänks spindeln ned i röret och fästs i upphängningen med EZ-låsningen. Efter nollställning av viskosimetern justeras placeringen av Thermosel och viskosimetern så att allt står i plan och att spindeln är väl centrerad i provröret.

Efter minst 10 minuters inledande temperering sänks temperaturen till första mätnivån och mätproceduren tar sin början manuellt eller enligt programmerad körning. Temperaturstegen är 150 °C ned till 120 °C, därefter 10 °C ned till strax under mjukpunkten vid 1 300 000 mPa·s.

Körning och övervakning sker med en styrdator och datorprogrammet Rheocalc V 3.2, där temperatur, spindelns rotationshastighet och tider ställs in. Hastighetsintervallet ligger mellan 200 ner till 0,01 RPM (varv per minut). Instrumentet registrerar vridmotståndet (torque), som räknas om till skjuvspänning (shear stress), skjuvhastighet (shear rate) och viskositet en gång per minut.

### 3.1.1 Avläsning av mätvärde och val av varvtal

Vid mätning på bitumen behövs en stabiliseringstid för att ge provet och spindeln en chans att tempereras. Denna tid varierar beroende på spindel och temperaturnivå. Vid låga temperaturer och högre viskositet krävs längre tid medan lägre viskositeter vid högre temperaturer stabiliserar sig snabbare. Mättiden för en punkt varierar från 40 minuter upp till 60 minuter. Instrumentet indikerar uppnådd temperatur redan efter 10-15 minuter, vilket alltså inte räcker eftersom spindeln fortfarande inte är helt tempererad. Efter att mätvärdena börjar plana ut bildas medianvärdet för 20 mätningar, vilket tar 20 minuter. Slutvärdet beräknas som medianvärdet av dessa mätningar. Medianvärdet används för att ta bort inverkan av en staka avvikande värden ("spikar") (Tyllgren, P. 2013). Samtliga mätvärden har genomgått denna okulära kontroll.



Figur 3-2. Grafisk kontroll av mätvärdets stabilisering med en rotationsviskosimeter.

Mätvärden anges av tillverkaren vara korrekta inom intervallet 10-90 % av torsionsmätarens mätområde. För att ha största möjliga marginal för felgissningar under en programmerad mätserie siktas på 50 %. Detta åstadkoms genom att välja lämplig spindelhastighet, RPM. Vid låga viskositeter behövs högre varvtal och vice versa. Varje spindel har ett eget samband mellan lämpligt varvtal och vätskans viskositet.

Efter några förberedande provkörningar fås riktvärden på viskositet och vridmotstånd. Inför den programmerade körningsomgången justeras varvtalet så att Torque-värdet skulle hamna på 50 %:

$$\text{Nytt RPM} = \frac{50\% \text{ vridmotstånd}}{\text{Uppmätt vridmotstånd}} \cdot \text{Använt RPM} \quad (\text{ekv. 6})$$

Temperatur	Varvtal	Torque	Temperatur	Varvtal	Torque
°C	RPM	%	°C	RPM	%
135	200	17,5	135	200	17,6
120	200	37,6	120	200	38,0
110	167	57,1	110	146,23	50,4
100	87	58,5	100	74,36	50,3
90	41	59,8	90	34,28	50,0
80	17,3	61,5	80	14,07	50,1
70	6,41	63,7	70	5,03	50,1
60	2,00	67,2	60	1,49	50,2
50	0,50	69,0	50	0,36	50,1
40	0,09	66,3	40	0,07	50,9

Tabell 3-1. Exempel på justering av RPM för programmerad körning.

De antagna varvtalen läggs därefter in tillsammans med temperaturer och tider i datorprogrammet Rheocalc V 3.2. Efter genomförd mätomgång kan samtliga mätpunkter plockas fram och överförs till en grafisk redovisning.

### 3.1.2

### 3.1.3 Provberedning

För att ge provningen en verklighetsförankring bestämdes att bitumenet som skulle föryngras skulle komma från ett verkligt material. På Nynas laboratorium i Nynäshamn anskaffades uppbruten asfalt från vilken returbitumen återvanns (extraherades) till mätserien. Arbetsmomentet är tidsödande och ger ganska liten mängd i utbyte. Det resulterade i ca 500 ml vilket skulle räcka till alla mätningarna. Volymen delades upp i 10 penetrationsburkar för inblandning med olika mängd föryngringsolja.

Burk Nummer	Burk Vikt (g)	Bitumen Vikt (g)	Summa Vikt (g)
1	26,6	51,6	78,2
2	27,6	46,2	73,8
3	27,2	48,3	75,5
4	27,3	46,8	74,1
5	26,6	46,8	73,4
6	27,0	48,5	75,5
7	27,9	48,2	76,1
8	27,4	48,2	75,6
9	27,3	49,5	76,8
10	27,3	47,7	75,0

Tabell 3-2. Uppvägning av returbitumen



Figur 3-3. Testburkar

### 3.1.4 Förstudie

I en förberedande mätomgång tillfördes fyra ökande mängder av XP 12-1 med hjälp av en pipett. Burkarna värmdes i 150 °C i 10 minuter innan innehållen rördes om. Provrör fylldes på från respektive burk och mätserien genomfördes. Resultaten finns i siffror i bilagorna.

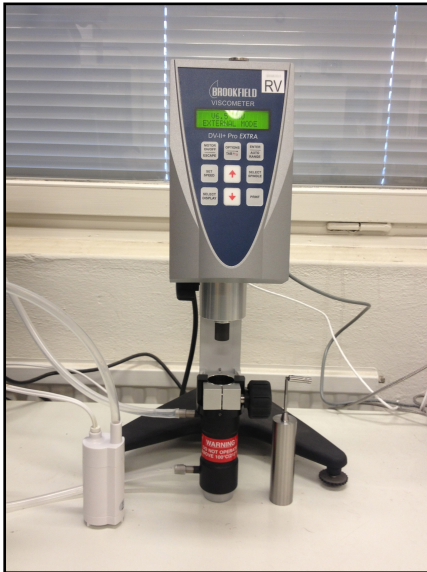
De visade sig i en översiktlig utvärdering av resultaten att homogeniseringen av XP 12-1 kanske inte varit tillräcklig eller kanske att uppvägningen inte lyckats pricka önskad mängd. Den verkliga förklaringen är att delproverna helt enkelt var för små. Man beslöt därför att välja ett annat förfarande i huvudförsöket.

### 3.1.5 Huvudförsök

Resterande mängd returbitumen slogs samman till ett prov. I fyra efterföljande steg tillfördes XP 12-1. Efter varje tillsats värmdes provet i 30 minuter och homogeniserades varefter ett provrör fylldes. Varje omgång vägdes och tillförd mängd olja noterades omsorgsfullt. Detta upprepades fyra gånger. Metoden kändes betydligt mer under kontroll vad gällde homogenisering och mängd, vilket slutresultatet så småningom också skulle visa. Siffervärdena finns redovisade i bilagorna. Resultaten i kapitel 4 bygger på dessa siffror.

## 3.2 Brookfield UL-Adapter

Låga viskositeter brukar mätas med utströmningsmätare, som finns i en rad varianter. Till rotationsviskosimetern finns ett tillbehör benämnt UL-Adapter som mäter låga dynamiska viskositeter som skulle passa mätningen på XP 12-1.



Tillbehören består av:

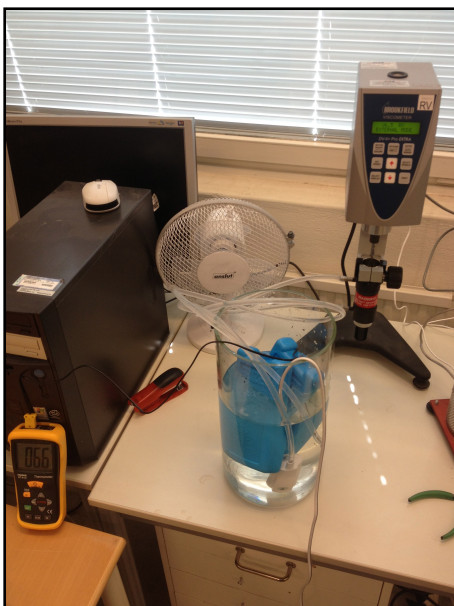
- UL-Adapter (tempererad hållare
- med provrör)
- Specialspindel till UL-Adapter
- Slangar
- Vattenpump
- Tempererat vattenbad
- Termometer.

*Figur 3-4: Tillbehöret UL-Adapter framför rotationsviskosimetern.*

UL-Adaptorns provrör fylls med 16 ml provvätska med en pipett. Tempereringen sker med genomströmmande vatten från ett vattenbad med hjälp av en fristående pump. Spindeln förs ner i provröret som bara är några mm större och därför räcker 16 ml för att täcka spindeln. Den fria upphängningen hjälper spindeln att centreras i det minimala utrymmet.

### 3.2.1 Förberedelser

Innan mätningarna påbörjades gjordes test-mätningar för att se hur UL-Adaptorn fungerande och hur snabbt mätvärdena stabiliserade sig efter en temperaturförändring.



*Figur 3-5. UL-Adapter under kylning*

För att få ett så brett uppmätt område som möjligt för skattningen av ett eventuellt WLF-samband och kunna prediktera mjukpunkten valdes intervallet 5 till 60 °C. 25 – 60 °C klarades utan problem med vattenbadet som bara kunde värmas. Temperaturer under 25 °C ordnades med kylklappar och is. Det fungerade ned till 6 °C och med bra kapacitet på vatten-pumpen hölls temperaturen oförändrad till-räckligt länge för att ett konstant mätvärde skulle erhållas.



### 3.2.2 Mätning på föryngringsolja XP 12-1

Den första mätningen på oljan gjordes i rumstemperatur med varierande varvtal från 2-17 RPM motsvarade 10 – 90 % torsionsbelastning. Detta gjordes för att se efter om vätskan var newtonsk och om avläst värde var känsligt för torsionsbelastningen. Mycket små skillnader noterades. Den lilla avvikelser vid 2 RPM kan vara en fingervisning om att inte ligga för lågt i belastningen.

Varvtal	Torque	Viskositet
RPM	%	mPa·s
2	10,6	339,2
5	25,3	323,8
7	35,7	326,4
9	45,2	321,4
11	55,9	325,2
14	71,0	324,6
17	85,8	323,0

Tabell 3-3. Olja rumstemperatur

Alla mätningar gjordes manuellt och rotationshastigheten valdes så att torsionsbelastningen skulle ligga på ca 50 %. Mätvärdenas stabiliseringstid var ca 10 minuter och för att vara på säkra sidan gjordes avläsningarna efter 15 minuter. Under stabiliseringstiden justerades hastigheten så att torsionsbelastningen hamnade så nära 50 % som möjligt.

Mätningarna började på 5 °C för att sedan höjas i steg om 5 °C upp till 30 °C och därefter i steg om 10 °C upp till 60 °C. När oljan hade stabiliserat sig antecknades 10 mätpunkter, en mätpunkt per minut. Detta genomfördes totalt 9 gånger på alla valda temperaturer där medianvärdet beräknades som slutvärde.

Med spindeln nedstoppad i provröret kunde temperaturen inte mätas under mätningförloppet. Eftersom oljans temperatur tidigare visat samma värde som ingående cirkulationsvatten mättes den temperaturen före och efter mätserien. Medelvärde fick sedan representera oljans temperatur under mätningförloppet. Mätresultaten redovisas i siffror i bilagorna och grafiskt i kapitel 4.

### 3.3 Metod för beräkning av WLF-samband

Med tillräckligt många mätpunkter jämnt fördelade utmed det viskositetsområde som ska beskrivas beräknas konstanterna C1 och C2 med hjälp av minsta-kvadrat-metoden. Referensviskositeten måste vara densamma om konstanterna ska användas för beräkningar eller jämförelser. En annan vald referensviskositet ger andra värden på konstanterna. I det här fallet används viskositetsvärdet 1 300 000 mPa·s.  $T_{ref}$  är temperaturen vid denna viskositet.

Den här temperaturen kan också kallas *mjukpunkten* och kan jämföras med Kula&Ring-värdet så länge det rör sig om rent bitumen utan tillsatser. Kula&Ring-metoden reagerar på modifieringar på ett sätt som inte speglar den verkliga reologiska responsen, vilket Willem Heukelom också konstaterade redan 1973. Han ville istället ersätta Kula&Ring-metoden med temperatur-

värdet när penetrationsvärdet är 800 1/10 mm, vilket inte kan mätas direkt utan måste predikteras från flera lägre mätvärden.

I flera examensarbeten på LTH har istället en *rotationsviskosimeter* av modernt snitt visat sig kunna bestämma mjukpunktstemperaturen med hög noggrannhet och repeterbarhet. Detta instrument och Heukeloms presentations-teknik är, tillsammans med välkända passningsberäkningar från statistiken, de huvudsakliga verktygen i detta examensarbete.

## 4 Resultat

### 4.1 Bakgrund till bestämning av komponenters och blandningars dynamiska viskositet

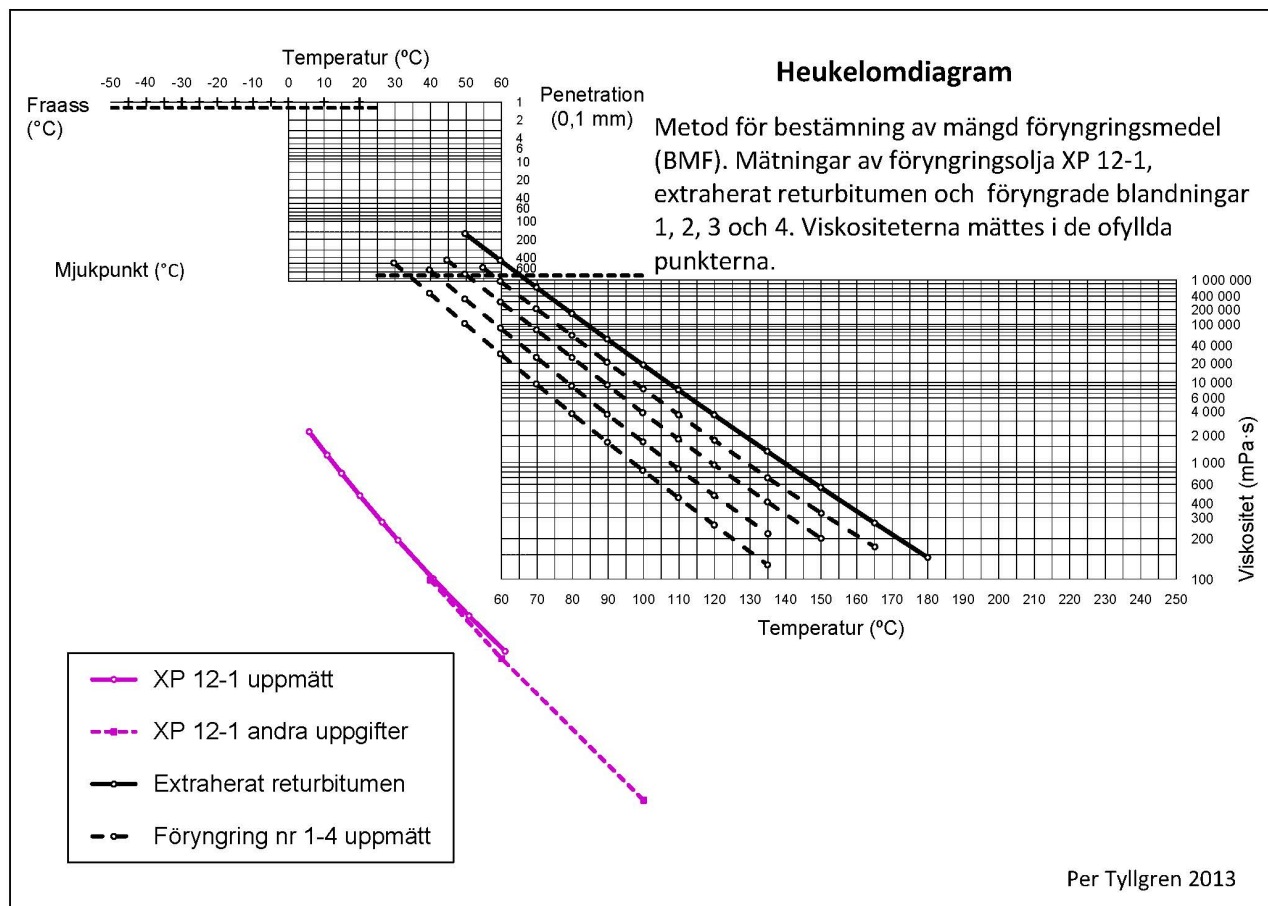
I tre tidigare examensarbeten har LTH utvecklat en metodik för mätning av viskositet med rotationsviskosimeter. Den bygger på stegvis minskande temperatur från den som ger ca 200 mPa·s till strax över 1 300 000 mPa·s. Under 120 °C är stegen 10 °C och däröver 15 °C. Viskositeten uppskattas efter några manuella förmätningar. Därefter programmeras hela mätserien och körs utan manuell övervakning, ofta nattetid. Varje mätpunkt tar ca en timme att genomföra och studeras grafiskt för att säkerställa att ett konstant och trovärdigt mätvärde har uppnåtts. Det innebär att en mätserie tar 10-12 timmar, vilket kan tyckas vara en lång tid. Med andra metoder hade en motsvarande mätserie knappast varit genomförbar. Dessutom ersätter mätserien tre andra vanligt förekommande mätningar på bitumen: Kula&Ring, dynamisk viskositet vid 60 °C och kinematisk viskositet vid 135 °C. Med ett standardbitumen av normal-kvalitet kan dessutom penetrationsvärdet extrapoleras med god noggrannhet.

I ett tidigare examensarbete (Erlandsson, I., 2012) visades att blandningar av ett lättflytande och ett styvt bitumen kan beräknas genom att utgå från komponenternas WLF-samband. Med utgångspunkt från viktandelarna beräknades blandningarnas WLF-samband.

Föreliggande examensarbete bygger på antagandet att föryngringsoljan XP 12-1 kan beskrivas på samma sätt som ett bitumen, alltså med ett WLF-samband. Eftersom UL- adaptern för mätning av lågviskösa vätskor tempereras med vatten begränsades det mätbara temperaturintervallet och följdfrågan var om detta skulle räcka till för en skattning av konstanterna och en extrapolering av mjukpunkten.

## 4.2 Mätresultat

I följande diagram redovisas samtliga mätvärden från undersökningen av komponenterna och 4 blandningar. Siffermaterialet finns bilagt.



Figur 4-1. Heukelomdiagram över analysdata.

### Kommentarer

Den grafiska versionen av Heukelomdiagrammet är inte avsedd för lättflytande oljor motsvarande XP 12-1. Diagrammets underliggande koordinatsystem kan emellertid hantera punkternas placering utanför det linjerade området. Denna digitaliserade version av BTDC-diagrammet används i första hand inte för grafisk avläsning utan för att ge en illustration av kurvskarornas läge och form.

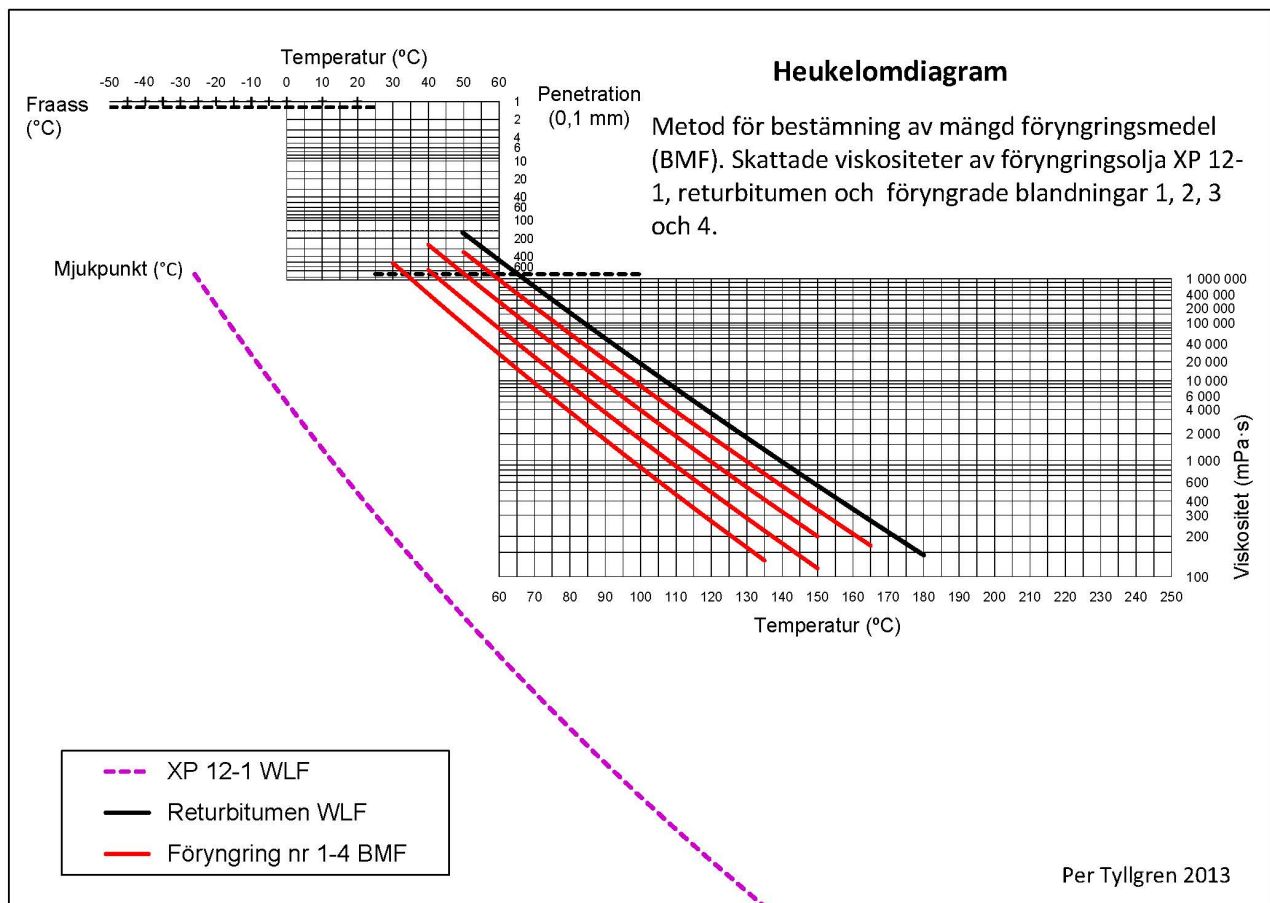
Från andra källor inhämtades uppgifter på viskositeten vid 40 °C, 60 °C och 100 °C, som användes som kontrollpunkter och komplettering vid nedanstående WLF-beräkningar.

### 4.3 Beräkning av WLF-samband för uppmätta värden

I följande tabell redovisas resultatet av WLF-konstanterna, som framräknats ur datamaterialet från viskositetsmätningarna. I efterföljande diagram visas de skattade linjerna från mjukpunkten och uppåt.

	Blandning nr					
	XP 12-1	Returbitumen	1	2	3	4
$T_{ref}, ^\circ\text{C}$	-26,0	65,0	57,5	50,0	41,5	33,7
C1	7,56	7,85	7,65	7,79	7,79	7,81
C2	55,2	113,1	104,2	104,1	99,1	95,7

Tabell 4-1. WLF-konstanter för uppmätta värden



Figur 4-2. Heukelomdiagram med WLF-skattade viskositeter.

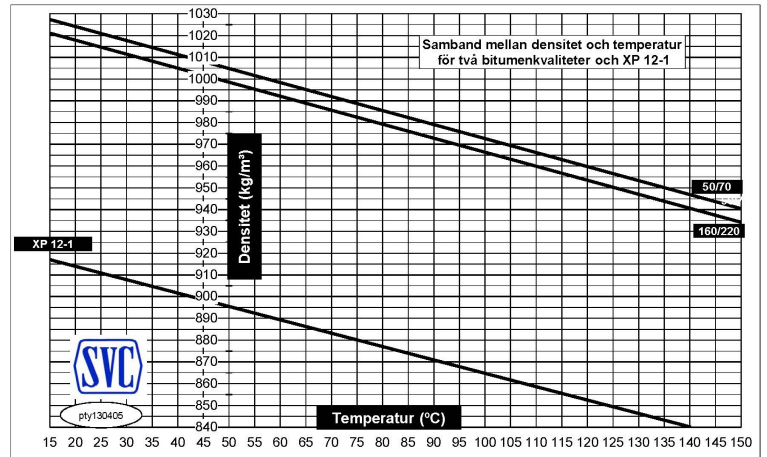
### Kommentarer

Den starkaste faktorn som avgör linjens placering är  $T_{ref}$  eller *mjukpunkten*. Därefter kommer C2 som representerar lutningen och slutligen C1 som anger linjens kurvatur. Det finns en viss samverkan mellan C1 och C2 som gör att

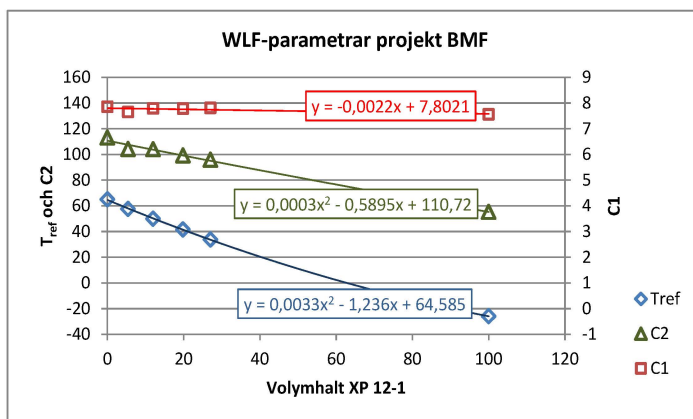
små förändringar av linjen kan förskjuta värdena sinsemellan. Det kan märkas när C1 och C2 samtidigt uppvisar små avvikelser från ett funnet samband.

#### 4.4 WLF-konstanter justerade mot recept

Skillnaden i densitet är mycket liten mellan näraliggande bitumenkvaliteter. Då har det mindre betydelse om andelarna anges i vikt eller volym. Om skillnaden är relativt stor, som i fallet med föryngringsolja och hårt bitumen, bör andelarna anges i volymandel och uttryckas i *volym%*.



Figur 4-3. Diagram över densiteter för bitumen och XP 12-1.



Figur 4-4. Samband mellan WLF-konstanter och volym% XP 12-1

WLF-konstanternas förändring som effekt av ökande volymhalt XP 12-1 ses i diagrammet tillsammans med matematiskt samband i form av polynom. Med formlernas hjälp kan resultatet av valfria volymhalter föryngringsmedel beräknas, från 0 till 100 vol%. Detta är examensarbetets slutresultat i koncentrat.

Mängden XP 12-1 som behövs utgår från formeln för resulterande mjukpunkt:

$$\text{Vald mjukpunkt } ^\circ\text{C} (T_{\text{ref}}) = 0,0033(\text{volym}\%)^2 - 1,236(\text{volym}\%) + 64,59 \quad (\text{ekv.7})$$

Därefter beräknas C1 och C2 med hjälp av framräknad mängd föryngringsmedel enligt formlerna:

$$C1 = -0,0022(\text{vol}\%) + 7,80 \quad (\text{ekv.8})$$

$$C2 = 0,0003(\text{vol}\%)^2 - 0,5895(\text{vol}\%) + 110,72 \quad (\text{ekv.9})$$

Som framgår är sambandet för C1 är det nära nog konstant och för C2 nära linjärt, i varje fall för normala tillsatser. Konstanterna i formlerna motsvarar ungefär WLF-konstanterna för returbitumenet. Anledningen till att de skiljer sig lite åt är att sambandslinjerna skattas med samma viktning för varje ingående punkt, alltså även för returbitumenet. Avvikelserna ger en uppfattning om BMF-skattningens precision.

När alla konstanter beräknats kan den resulterande viskositetslinjen ritas upp i ett Heukelomdiagram och till exempel dynamisk viskositet vid 60 °C och kinematisk viskositet vid 135 °C beräknas.

Exempel:

Önskad mjukpunkt på föryngrat bitumen är 46 °C ( $T_{\text{ref}}$ ).

Detta åstadkoms med 15,7 volym% XP 12-1 enligt (ekv. 7).  $C1 = 7,83$  enligt (ekv. 8) och  $C2 = 101,5$  enligt (ekv. 9).

WLF-formeln blir:

$$\eta = 1300000 \cdot 10^{((-7,83 \cdot (T-46))/(101,5+(T-46)))} \text{ mPa} \cdot \text{s}.$$

Vid 60 °C är *dynamiska* viskositeten 146 168 mPa·s.

Vid 135 °C är den *kinematiska* viskositeten  $286/0,946 = 302 \text{ mm}^2/\text{s}$ .

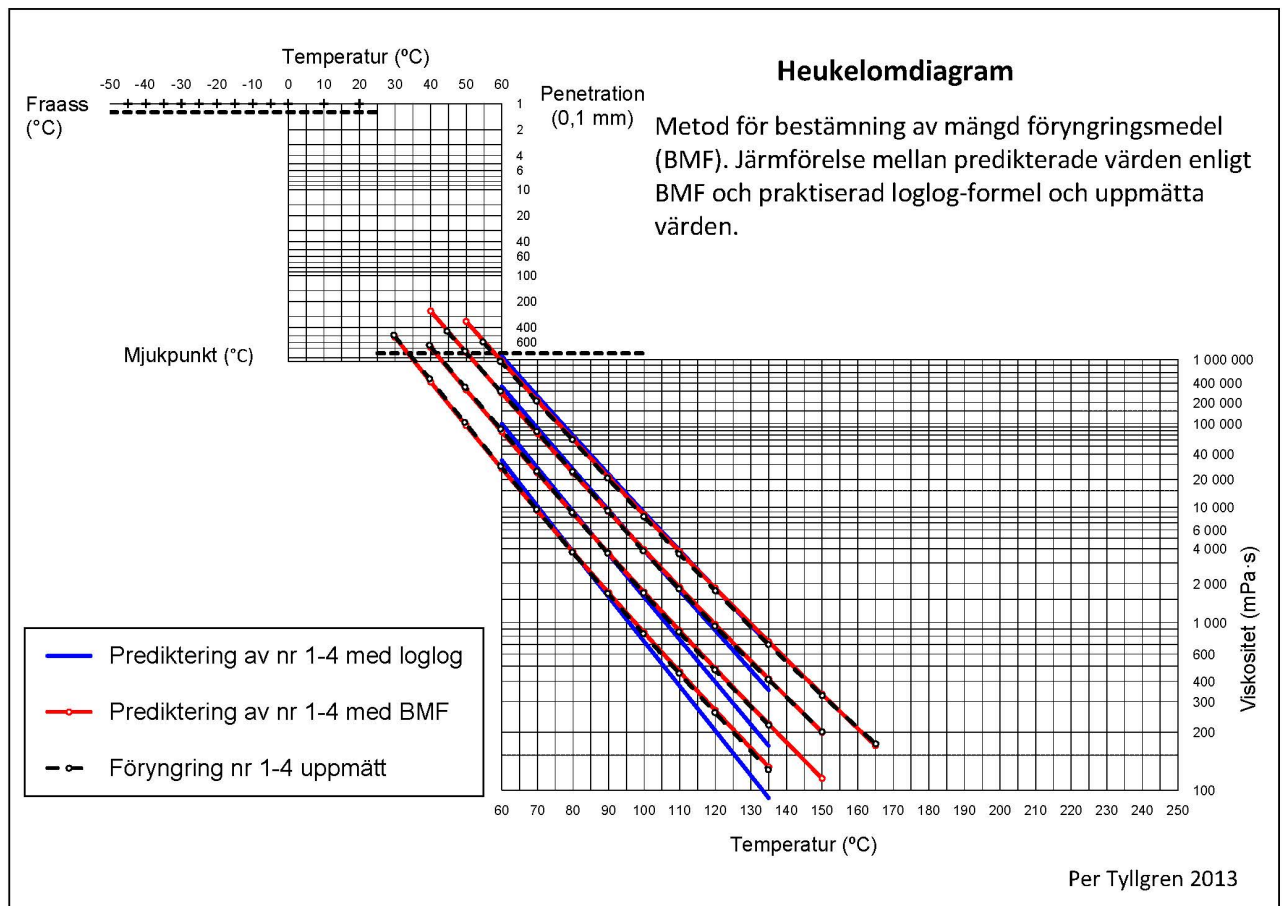
## 4.6 Jämförelser mellan uppmätta och beräknade viskositeter

Med hjälp av formlerna för WLF-faktorerna beräknades viskositetslinjerna för de valda recepten i jämförelse med uppmätta värden. Resultaten visas i tabeller i bilagorna och grafiskt i nedanstående diagram. I diagrammet visas också resultaten av en ofta använd formel för beräkning av resulterande viskositet i en blandning av ett bitumen och ett lösningsmedel:

$$\log(\log(\text{resulterad viskositet})) = a \cdot \log(\log(\text{viskositet lösningsmedel})) + (1-a) \cdot \log(\log(\text{viskositet bitumen})) \quad (\text{ekv. 10})$$

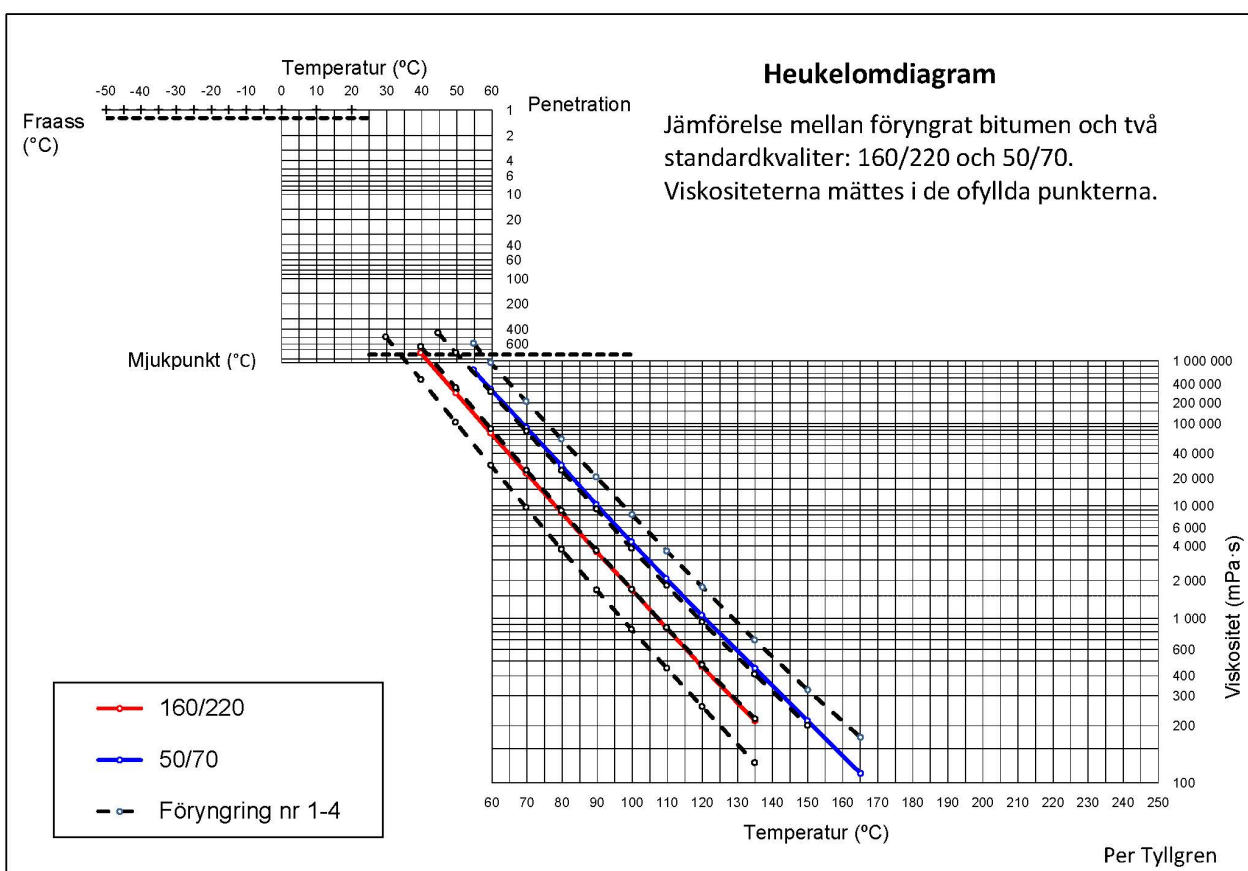
där

$a$  är viktandelen av lösningsmedlet.



Figur 4-5. Jämförelser mellan två olika predikteringar och uppmätta resultat.

Slutligen, för att bedöma utfallet av föryngringen i det viskösa området jämförs de uppmätta värdena för fyra blandningar med två standardkvaliteter, 160/220 och 50/70.



Figur 4-6. Jämförelser mellan föryngrat bitumen och två standardkvaliteter.

### Kommentarer

BMF-predikteringen av blandningarna stämmer bra med uppmätta värden, okulärt betraktat. Det är inte så konstigt eftersom modellen bygger på konstaterade resultat. Provet på modellens duglighet kommer när en ny studie genomförs med nya material och andra recept. Detta fanns det varken tid eller material till inom ramen för examensarbetet. En upprepning bör därför göras i en kompletterande undersökning.

Precisionen kan bara bedömas om den ställs mot krav som baseras på ett konstaterat behov. För att i någon mån relatera träffsäkerheten till något annat jämfördes BMF-resultaten med en ofta använd beräkning, nämligen loglog-formeln (ekv. 10). Som framgår av diagrammet avviker loglog-beräkningarna från uppmätta värden, framförallt vid låga viskositeter. Loglog-beräkningen kan inte heller avgöra förskjutningen av mjukpunkt och inskränker sig oftast



till temperaturområdet 60-100 °C eftersom ingångsdata saknas utanför det intervallet.

Standardkvaliteterna 160/220 och 50/70 har tagits från laboratoriets förråd och representerar kanske inte full ut nyttillverkat bitumen. Däremot stämmer linjernas lutning och kurvations med tidigare mätningar av motsvarande kvaliteter. Dessutom är linjerna hyggligt parallella med mätvärden på returbitumen som blandats med föryngringsoljan XP 12-1. Slutsatsen av detta är att viskositeten hos returbitumen som föryngrats med den provade oljan liknar standardbitumen över mjukpunkten. Övriga reologiska egenskaper och beständighet mot åldring bör undersökas i kommande arbeten.

## 5 Slutsatser

Beräkningsmodellen för det här examensarbetet utgår från sambandet för polymera ämnen som Williams-Landel-Ferry publicerade 1953 och i BTDC-diagrammet presenterat av Willem Heukelom i slutlig form 1973. Heukeloms diagram byggde på reologiska samband för polymera ämnen, som var allmänt kända bland specialister vid den tidpunkten. Hans tillskott var att hitta en grafisk lösning för att samtidigt presentera fyra olika mätmetoder, som spände över ett brett temperaturområde, från den kallaste vägtemperaturen till blandningstemperaturen för asfalt. Det var ett pedagogiskt grepp som än idag är oöverträffat i begriplighet och praktisk användbarhet för forskare, bitumenproducenter och vägbyggare. Det var först med Superpave som ett liknande samlat grepp lanserades men det konceptet saknar ännu Heukelomdiagrammets pedagogiska kvaliteter.

Kunskapen om att reologin för rent bitumen kan beskrivas med matematiska samband är alltså gammal. Det är emellertid först nu med dagens digitala hjälpmedel för grafisk framställning och statistiska verktyg som det är möjligt för gemene man att göra beräkningar och presentationer, som för bara ett par decennier sedan krävde omfattande arbete och stor kunskap. Beräkningsmodellen BMF är möjlig tack vare detta och det är forskarinsatser gjorda för många år sedan som utgör grunden.

Examensarbetet har visat att behövlig mängd föryngringsmedel och slutresultatet kan beräknas med acceptabel precision. I och med detta underlättas recepten för återvunnen retur-asfalt, eftersom kvaliteten på ingående returbitumen kan bestämmas. Tillfört bitumen behöver inte väljas med utgångspunkt från returbitumenets skiftande kvalitet från gång till annan utan kan väljas det samma som för en asfaltprodukt utan retur-asfalt. Detta förenklar produktionsprocessen, som kan ske med eller utan retur-asfalt utan att produktionen eller produktkvaliteten påverkas.

Beräkningsmodellen behöver kontrolleras ytterligare innan den kan anses verifierad och klar för tillämpning i produktionen. Den beskriver dessutom bara hälften av det reologiska området. Nästa steg blir att ta fram en liknande beräkningsmodell för funktionella egenskaper i temperaturområdet under mjukpunkten med hjälp av en dynamisk skjuvreometer, DSR.

## 6 Referenslista

### *Bok och Rapport*

Tyllgren, P. (2010). Föryngrad returafalt med miljöanpassande tillsatsmedel. Projektnummer SBUF 12230, Malmö.

Tyllgren, P. (2011). Uppföljning av försök med föryngringsmedel i returafalt i Falkenberg 2009-2011. Projektnummer ra111111b, Malmö

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

Brookfield. More solutions to sticky problems. Brookfield, Middleboro.

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

Agardh & Parhamifar (2012). Kompendium i vägbyggnad. LTH, Lund.

Pedersen, J. (2009) Sänkt tillverkningstemperatur i varmtillverkad asfaltsmassa. Examensarbete, LTH Ingenjörsskolan vid Campus Helsingborg, Teknik och Samhälle, Trafik och Väg.

Erlandsson, Isabell (2012) Predikterad viskositet i blandningar av olika bitumensorter. Thesis 233. Lunds Tekniska Högskola

FAS, metod (2002). Bestämning av bindemedelshalt. Metodnummer 401.

Heukelom, W. (1973). An improved method of characterizing asphaltic bitumens with the aid of their mechanical properties.

### *Intervjuer*

Tyllgren, P. (2013). Januari-Juni 2013, Lund.

### *Internetkällor*

Wikipedia (2013). Viskositet.  
<http://sv.wikipedia.org/wiki/Viskositet>  
Nerladdad 2013-02-21

Svenskbyggjtjänst (2011). Ökat intresse för grön asfalt.  
<http://omvarldsbevakning.byggjtjanst.se/sv/Start/Artiklar/2011/mars/Mer-om-gron-asfalt/>  
Nerladdad 2013-04-20

NE (2013). Reologi.  
<http://ne.se/lang/reologi>  
Nerladdad 2013-02-21

## Bilagor

Mätdata från *för-försök* med föryngrat returbitumen.

Referensbitumen

Brookfield Spindel 27	Speed	Speed	Torque	Shear Stress	Shear Rate	Viscosity	Viscosity	Temp.
Referens Inställt	Rpm Antaget	Rpm Justerat	%	N/m <sup>2</sup>	1/sec	mPa*s Antaget	mPa*s Uppmätt	C Avläst
165	200		22				275	165,05
150	200		44,3				554	149,9
135	86		44,1				1282	134,8
120	33		46,3				3508	119,9
110	15		46,3				7717	109,8
100	6,1		46,3				18975	99,9
90	2,59		55,2				53282	89,7
80	0,8		55,6				173750	79,8
70	0,2		54,9				686250	69,8
60	0,04		54,5				3406250	59,6
55	0,01		84				2,17E+07	49,7

Test med 7,3 vol%

Brookfield Spindel 27	Speed	Speed	Torque	Shear Stress	Shear Rate	Viscosity	Viscosity	Temp.
Referens Inställt	Rpm Antaget	Rpm Justerat	%	N/m <sup>2</sup>	1/sec	mPa*s Antaget	mPa*s Uppmätt	C Avläst
165	200	200	12,4	10,54	68	201	155	165,1
150	200	200	23	19,55	68	395	288	149,9
135	148	200	49,2	41,8	68	865	615	135,1
120	59	85	51,8	44,03	28,9	2172	1524	119,6
110	29	42,15	52,1	44,29	14,3	4409	3090	109,6
100	13	18,7	52,1	44,29	6,36	9787	6965	99,7
90	5,2	7,6	53,0	45,05	2,6	24490	17434	89,8
80	1,8	2,6	53,3	45,31	0,88	70102	51250	79,8
70	0,53	0,77	53,5	45,48	0,26	239835	173701	69,7
60	0,13	0,19	54,4	46,24	0,06	1006343	715790	59,6
55	0,05	0,08	52,3	44,46	0,03	2291307	1634375	54,6

Test med 11,9 vol%

Brookfield Spindel 27	Speed	Speed	Torque	Shear Stress	Shera Rate	Viscosity	Viscosity	Temp.
Referens Inställt	Rpm	Rpm	%	N/m <sup>2</sup>	1/sec	mPa*s	mPa*s	C
	Antaget	Justerat				Antaget	Uppmätt	Avläst
150	200	200	16,2	13,77	68	177	203	149,7
135	200	200	33	28,05	68	365	413	134,7
120	149	129,57	49,8	42,33	43,86	859	965	119,7
110	77	67,31	49,9	42,42	22,78	1658	1862	109,6
100	37	32,01	50,2	42,67	10,9	3492	3922	99,8
90	16	13,56	49,6	42,16	4,59	8168	9185	89,7
80	5,9	5,02	49,6	42,16	1,7	21736	24800	79,7
70	1,9	1,59	49,8	42,33	0,54	67936	77813	69,7
60	0,49	0,42	49,2	41,82	0,14	260402	292857	59,6
50	0,1	0,09	50,2	42,67	0,03	1300000	1394444	49,5
47	0,06	0,05	47,3	40,21	0,02	2244013	2365000	46,5

Test med 17,6 vol%

Brookfield Spindel 27	Speed	Speed	Torque	Shear Stress	Shera Rate	Viscosity	Viscosity	Temp.
Referens Inställt	Rpm	Rpm	%	N/m <sup>2</sup>	1/sec	mPa*s	mPa*s	C
	Antaget	Justerat				Antaget	Uppmätt	Avläst
150	200	200	9,5	8,07	68	142	119	149,7
135	200	200	17,9	15,22	68	282	224	134,9
120	200	200	39	33,15	68	629	488	119,6
110	110	153,63	54,6	46,41	52,23	1162	889	109,9
100	55	78,35	54,9	46,67	26,64	2317	1752	99,7
90	25	36,55	55,6	47,26	12,43	5067	3803	89,7
80	10,3	15,01	55,7	47,35	5,1	12396	9277	79,8
70	3,6	5,28	54,9	46,67	1,8	34825	25994	69,8
60	1,09	1,6	56,5	48,03	0,54	116299	88281	59,7
50	0,26	0,4	58,4	49,64	0,14	484063	365000	49,6
42	0,07	0,11	54,7	46,5	0,02	1854510	1953571	39,7

Test med 23,9 vol%

Brookfield Spindel 27	Speed	Speed	Torque	Shear Stress	Shera Rate	Viscosity	Viscosity	Temp.
Referens Inställt	Rpm	Rpm	%	N/m <sup>2</sup>	1/sec	mPa*s	mPa*s	C
	Antaget	Justerat				Antaget	Uppmätt	Avläst
135	200	200	12,8	10,88	68	103	160	135,0
120	200	200	25,1	21,34	68	213	314	119,7
110	200	200	43,7	37,15	68	370	546	109,7
100	187	125	50,9	43,27	42,5	687	1018	99,7
90	93	61	51	43,35	20,74	1379	2090	89,9
80	42	27	52,3	44,46	9,18	3047	4843	79,7
70	16,9	10,4	52,8	44,88	3,54	7562	12692	69,7
60	5,9	3,38	52,7	44,8	1,15	21685	38979	59,6
50	1,7	0,89	51,3	43,61	0,3	74570	144101	49,6
40	0,39	0,18	49,8	42,33	0,06	323720	691667	39,7
30	0,07	0,07	47,3	40,21	0,02	1908139	1689286	34,7

Mätdata från *huvudförsök* med föryngrat returbitumen.

Referensbitumen

Brookfield Spindel 27	Speed	Speed	Torque	Shear Stress	Shear Rate	Viscosity	Viscosity	Temp.
Referens Inställt	Rpm	Rpm	%	N/m <sup>2</sup>	1/sec	mPa*s	mPa*s	C
	Antaget	Justerat				Antaget	Uppmätt	Avläst
180	200						143	180
165	200						269	165,05
150	200						561	149,9
135	97						1320	134,8
120	36						6574	119,9
110	16						7816	109,8
100	7						18671	99,9
90	2,4						52223	89,7
80	0,8						165893	79,8
70	0,19						649862	69,8
60	0,04						3401425	59,6
55	0,01						23632221	49,7

Test med blandning 1,  
5,4 vol% (4,9 vikt%)

Brookfield Spindel 27	Speed	Speed	Torque	Shear Stress	Shear Rate	Viscosity	Viscosity	Temp.
Referens Inställt	Rpm	Rpm	%	N/m <sup>2</sup>	1/sec	mPa*s	mPa*s	C
	Antaget	Justerat				Antaget	Uppmätt	Avläst
165	200		13,8	11,73	68	171	173	165,2
150	200		26,1	22,19	68	336	326	149,8
135	173		48,3	41,06	58,82	741	698	134,9
120	68		47,7	40,55	23,12	1874	1754	119,9
110	33		47,4	40,29	11,22	3833	3591	109,8
100	14,8		48	40,8	5,03	8630	8108	100,0
90	5,83		48,4	41,14	1,98	21820	20755	89,7
80	1,99		48,6	41,31	0,68	63658	61055	79,8
70	0,57		47,6	40,46	0,19	222107	208772	69,7
60	0,130		47,8	40,63	0,04	973295	919231	59,8
55	0,056		50,4	42,84	0,02	2264982	2100000	54,7



Test med blandning 2,  
12,0 vol% (10,8 vikt%)

Brookfield Spindel 27	Speed	Speed	Torque	Shear Stress	Shera Rate	Viscosity	Viscosity	Temp.
Referens Inställt	Rpm	Rpm	%	N/m <sup>2</sup>	1/sec	mPa*s	mPa*s	C
	Antaget	Justerat				Antaget	Uppmätt	Avläst
150	200		16,1	136,85	68	191	201	150,0
135	200		32,9	279,65	68	393	411	135,1
120	140		52,9	449,65	47,6	916	945	119,9
110	73		53,0	450,5	24,82	1756	1815	109,7
100	35		53,3	453,05	11,9	3664	3807	99,7
90	15,0		55,4	470,9	5,1	8477	9233	89,8
80	5,72		56,4	479,4	1,94	22252	24650	79,8
70	1,86		58,0	493	0,63	68357	77957	69,8
60	0,49		57,8	491,3	0,17	256238	294898	59,7
50	0,102		56,4	479,4	0,03	1242183	1410000	49,7
45	0,059		82,5	701,25	0,02	2121511	3437500	44,5

Test med blandning 3,  
19,8 vol% (18,0 vikt%)

Brookfield Spindel 27	Speed	Speed	Torque	Shear Stress	Shera Rate	Viscosity	Viscosity	Temp.
Referens Inställt	Rpm	Rpm	%	N/m <sup>2</sup>	1/sec	mPa*s	mPa*s	C
	Antaget	Justerat				Antaget	Uppmätt	Avläst
135	200	200	17,6	149,6	68	200	220	135,0
120	200	200	38,0	323	68	428	475	120,0
110	167	146,23	50,4	428,4	49,72	766	862	109,9
100	87	74,36	50,3	427,55	25,28	1478	1691	99,8
90	41	34,28	50,0	425	11,66	3121	3646	89,8
80	17,3	14,07	50,1	425,85	4,78	7354	8902	79,9
70	6,41	5,03	50,1	425,85	1,71	19851	24901	69,8
60	2,00	1,49	50,2	426,7	0,51	63575	84228	59,6
50	0,50	0,36	50,1	425,85	0,12	253541	347917	49,7
40	0,093	0,07	50,9	432,65	0,02	1348291	1817857	39,7

Test med blandning 4,  
27,0 vol% (24,8 vikt%)

Brookfield Spindel 27	Speed	Speed	Torque	Shear Stress	Shear Rate	Viscosity	Viscosity	Temp.
Referens Inställt	Rpm	Rpm	%	N/m <sup>2</sup>	1/sec	mPa*s	mPa*s	C
	Antaget	Justerat				Antaget	Uppmätt	Avläst
135	200	200	10,2	8,67	68	114	128	135,1
120	200	200	20,8	17,68	68	228	260	119,8
110	200	200	36,1	30,69	68	386	451	109,9
100	183	148	49,7	42,25	50,32	699	840	99,9
90	93	75,00	50,4	42,84	25,5	1372	1680	89,9
80	43,1	34,76	52,7	44,8	11,82	2965	3790	79,8
70	17,65	13,27	51,3	43,61	4,51	7224	9665	69,7
60	6,22	4,45	51,5	43,87	1,51	20442	28933	59,6
50	1,81	1,22	51,3	43,61	0,41	70009	105123	49,6
40	0,411	0,27	52,0	44,2	0,09	307485	481481	39,7
30	0,067	0,04	46,7	39,7	0,01	1883485	2918750	29,7

Mätdata referensbitumen 50/70 och 160/220.

Test med 50/70

Brookfield Spindel 27	Speed	Speed	Torque	Shear Stress	Shera Rate	Viscosity	Viscosity	Temp.
Referens Inställt	Rpm	Rpm	%	N/m <sup>2</sup>	1/sec	mPa*s	mPa*s	C
	Antaget	Justerat				Antaget	Uppmätt	Avläst
165	200		8,9	75,65	68		111	164,9
150	200		17,1	145,35	68		214	150,1
135	200		35,8	304,3	68		448	135,1
120	85		35,9	305,15	28,9		1056	119,9
110	42,15		34,7	294,95	14,33		2058	109,7
100	18,7		32,6	277,1	6,36		4358	99,8
90	7,6		31,2	265,2	2,58		10263	89,8
80	2,6		29,3	249,05	0,88		28173	79,8
70	0,77		26,9	228,65	0,26		87338	69,8
60	0,19		24,6	209,1	0,06		323684	59,6
55	0,08		21,9	186,15	0,03		684375	54,7

Test med 160/220

Brookfield Spindel 27	Speed	Speed	Torque	Shear Stress	Shera Rate	Viscosity	Viscosity	Temp.
Referens Inställt	Rpm	Rpm	%	N/m <sup>2</sup>	1/sec	mPa*s	mPa*s	C
	Antaget	Justerat				Antaget	Uppmätt	Avläst
135	200		17,1	145,35	68		214	135,1
120	200		36,9	313,65	68		461	120,0
110	167		57,1	485,35	56,78		855	109,6
100	87		57,9	492,15	29,58		1664	99,9
90	41		57,9	492,15	13,94		3530	89,8
80	17,3		58,2	494,7	5,88		8410	79,8
70	6,41		58,7	498,95	2,18		22894	69,8
60	2		58,8	499,8	0,68		73500	59,6
50	0,65		73,8	627,3	0,22		283846	49,7
40	0,09		49,9	424,15	0,03		1386111	39,7

Mätdata för viskositeten hos föryngringsoljan XP 12-1.

Brookfield Spindel ULA	Speed	Torque	Shear Stress	Shera Rate	Viscosity	Temp.
Vald	Rpm	%	N/m <sup>2</sup>	1/sec	mPa*s	C
temperatur	Antaget				Uppmätt	Avläst
5	1,5	52,0	40,74	1,83	2221	5,85
10	2,5	45,9	35,97	3,06	1176	10,90
15	4,5	53,1	41,6	5,5	756	14,95
20	8,0	58,4	45,71	9,78	467	20,10
25	12,0	52,2	40,90	14,7	279	26,4
30	16,5	51,0	39,92	20,18	198	30,9
40	32,0	50,9	39,84	39,14	102	40,7
50	56,0	50,3	39,41	68,49	58	50,9
60	92,0	50,4	39,45	112,52	35	61,0

Mätning innan	Mätning efter
5,7	6,0
10,8	11,0
15,0	14,9
20,0	20,2
26,6	26,2
30,8	30,9
40,6	40,8
50,8	50,9
61,0	61,0