

Faktorer som påverkar hanterbarheten hos asfalt



**LUNDS
UNIVERSITET**

Lunds Tekniska Högskola

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

Examensarbete:
Jesper Palmér
Elmer Žužo

© Copyright Jesper Palmér, Elmer Žužo,

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 2011

Sammanfattning

Hanterbarhet är ett begrepp som beskriver med vilken lätthet en asfaltsmassa kan arbetas med, i form av blandning, utläggning och packning. De faktorer som har störst påverkan på hanterbarheten vid de olika procedurerna är temperatur och bindemedlets egenskaper, enligt en studerad rapport från National Center for Asphalt Technology.

Examensarbetet syftar till att undersöka hur bindemedlet påverkas av kvalitet, temperatur och tillsatsmedel. För att undersöka bitumens egenskaper har de vanligaste metoderna använts; penetrationstest och mjukpunktstest. Även en tredje metod (viskosimeter) har använts, som i dagsläget inte är en standardmetod för testning av bitumen.

Det centrala begreppet genom hela arbetets gång är *viskositet*, vilket är ett mått på en vätskas inre friktion. För att mäta den har vi använt oss av en viskosimeter av märket Brookfield. Utrustningen är av typen *rotationsviskosimeter*, vilken mäter viskositeten genom att låta en cylinder rotera i en vätskefylld behållare och läsa av det uppkomna vridmomentet. Utrustningen kan temperera proverna från rumstemperatur upp till 300 °C.

Till följd av höga temperaturer för vissa bitumen uppstår bl.a. skadlig rök och höga kostnader, vilka skulle kunna minskas genom olika tillsatsmedel. Höga temperaturer kan även skada bitumenets egenskaper.

Fokus i rapporten har lagts på undersökning av två penetrationsbitumen (50/70 och 160/220) med olika tillsatser av vaxet Sasobit från tillverkaren Sasol. Resultatet av mätningar med Brookfield viskosimeter redovisas i ett *Heukelomdiagram*. I diagrammet redovisas också mätpunkter för *mjukpunktsvärde*, *penetrationsvärde* och *kinematisk viskositet* (avläst från kapillärviskosimeter). De sistnämnda är alla tre kända metoder, och har i rapporten använts som referenspunkter för att visa rotationsviskosimeterns korrekthet.

Bland slutsatserna är att mjukpunktsvärdet kan bestämmas med rotationsviskosimeter istället för den vanligare Kula & Ring-utrustningen. Uppmätt resultat för bitumensorterna 50/70 respektive 160/220 visar på ett helt överensstämmande resultat mellan Brookfield och K & R. Slutsatsen gäller dock inte för vaxinblandat och polymermodifierat bitumen. I de fallen är resultaten från K & R ej pålitliga. Vid användning av tillsatsmedlet Sasobit kan tillverkningstemperaturen sänkas, medan det motsatta förhållandet gäller för polymermodifierat. Det är känt sen tidigare, men med viskosimeterns hjälp kan det nu också visas ”på papper”.

Då kunskapen om hur viskosimetern fungerade med bitumen var mycket begränsad, kom en stor del av arbetet att handla om att utveckla en bra metod för trovärdiga och korrekta mätningar. Med manuell körning krävdes minst 7 timmar per mätserie, vilket självklart är alltför tidskrävande. Därför måste körningarna i fortsättningen automatiseras, vilket kommer att kräva en del provningar först. Några enstaka försök gjordes med avsvälning istället för uppvärmning för att jämföra bindemedlets beteende. I fallet med tillsatsmedel blev resultaten annorlunda vilket borde föranleda till fortsatta studier.

Nyckelord: hanterbarhet, bitumen, viskositet, vax, polymermodifierat, viskosimeter

Abstract

Workability is a description of what ease an asphalt can be worked with during mixing, laying and compaction. The main impacting factors on the workability during the different stages are temperature and the binder properties, a studied report from Nation Center for Asphalt Technology states.

This thesis aims to examine how the binder is affected by quality, temperature and additives. To investigate the bitumen properties the most common methods have been used; penetration test and softening point test. A third method was used, which not yet is a standard method for testing of bitumen.

The central term throughout all stages is *viscosity*, which is a measure of a fluid's internal friction. To measure it we used a *viscometer*, by the brand Brookfield. The equipment is a of the type *dynamic rotational viscometer*, *DRV*, which measures the viscosity by letting an inner cylinder rotate inside of an outer fluid filled container and reading the resulting torque. The equipment may temper the samples from room temperature up to 300 °C.

As an effect of the high temperatures for some kinds of bitumen, hazardous fumes are emitted and higher costs arise, which both could be reduced by the use of various additives. Also, the properties of the bitumen could be changed by high temperatures.

The main focus in the report is the examination of two types of penetration grade bitumen (50/70 and 160/220), with different additions of the wax-additive Sasobit, from the manufacturer Sasol. By the use of Heukelom diagrams, the viscosity is reported, along with the result of penetration, softening point and kinematic viscosity (read from a capillary viscometer). The latter ones are all known methods, and have in this report been used as reference points to verify the DRV.

Among the conclusion is that the softening point can be determined by the DRV, instead of the more frequently used Ring&Ball (R & B) method. The results for pen.bitumen 50/70 and 160/220 shows completely consistent results. That conclusion does not apply when measuring Sasobit or polymer modified bitumen. In those cases, the results from R & B are not trustworthy. When using the additive Sasobit the production temperature can be lowered, while the opposite goes for the polymer modified case. It is known from the field before but with the viscometer results its now also "on paper".

The level of knowledge concerning the operation of the DRV was very restricted, when the project started. Thus, a large portion of the work came to circle around finding a good method to record reliable and correct readings.

The final method resulted in seven hours of measuring, for each set of measuring. That is, as it implies, highly time consuming, and is a suitable subject for automation in the future. A few trials were performed with reversed direction of measurement (cooling). The results differed from previous ones, and are therefore a suitable subject for further studies.

Keywords: workability, bitumen, viscosity, wax, polymer modified, viscometer

Förord

Denna rapport framkom som ett examensarbete för högskoleingenjörsutbildningen inom väg- och trafikteknik vid Campus Helsingborg, Lunds tekniska högskola. Arbetet utfördes på uppdrag av Skanska.

Vi vill börja med att tacka vår handledare på Skanska, Per Tyllgren för hans stora engagemang och passion för arbetet, samt all den feedback och support vi kontinuerligt fått under hela arbetets gång.

Vidare vill vi också tacka vår examinator på LTH, universitetsadjunkt Ebrahim Parhamifar, för att han sammanförde oss med Per Tyllgren och på så sätt la grunden för examensarbetet. Vi vill också tacka Ebrahim för all support gällande material, lokaler och övriga praktiska detaljer nödvändiga för att utföra arbetet.

Slutligen vill vi också visa vår uppskattning för de foton och värdefulla synpunkter Tord Ottosson-Löf gett oss genom arbetets gång.

Arbetsinsatsen har i möjligaste mån varit jämnt fördelad. Elmer har i rapporten arbetat med, i huvudsak, resultatdelen. Jesper har lagt större fokus på grundläggande fakta. Övriga kapitel är skrivna gemensamt. Det ska också påpekas att all bearbetning, så som korrekturläsning m.m., har utförts gemensamt. Det gäller även alla laborationer.

Lund, juni 2011
Jesper Palmér
Elmer Žužo

Innehållsförteckning

1 Inledning	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte	2
1.3 Avgränsningar	2
1.4 Metod	2
2 Grundläggande fakta	3
2.1 Bitumen	3
2.1.1 Framställning	3
2.1.2 Gradering och namngivning	4
2.2 Sasobit	5
2.3 Polymermodifierat bitumen	6
2.4 Viskositet	6
2.4.1 Dynamisk viskositet	7
2.4.2 Kinematisk viskositet	7
2.4.3 Newtonska och icke-newtonska vätskor	7
2.4.4 Enheter	8
2.4.5 Viskositetsberäkning i rotationsviskosimeter.....	8
2.5 Heukelomdiagram	9
2.6 Viskositet och hanterbarhet	10
2.7 Kapillärviskosimeter	11
3 Genomförande av mätningar	13
3.1 Brookfield viskosimeter	13
3.1.1 Stabilisering	15
3.1.2 Mätriktning.....	15
3.2 Penetrationstest	16
3.3 Mjukpunktstest	18
4 Resultat och analys	20
4.1 Sammanställning av resultat	20
4.1.1 Viskositetsmätningar	20
4.1.2 Mjukpunkt.....	21
4.1.3 Penetrationsvärde.....	21
4.1.4 Analys	22
4.2 50/70 och 50/70 + 1	23
4.2.1 50/70	25
4.2.2 50/70 + 1.....	25
4.2.3 Analys av 50/70 och 50/70 + 1	25
4.3 50/70 + 2	26

4.3.1 Analys av 50/70 + 2.....	27
4.4 50/70 + 3.....	28
4.4.1 Analys av 50/70 + 3.....	29
4.5 160/220 och 160/220 + 1	31
4.5.1 160/220.....	33
4.5.2 160/220 + 1.....	33
4.5.3 Analys av 160/220 och 160/220 + 1	33
4.6 160/220 + 2.....	34
4.6.1 Analys av 160/220 + 2.....	35
4.7 160/220 + 3.....	36
4.7.1 Analys av 160/220 + 3.....	37
4.8 PMB 1 och 2	38
4.8.1 PMB 1.....	39
4.8.2 PMB 2.....	39
4.8.3 Analys.....	39
4.9 Mjukpunktstester.....	40
4.10 Jämförelser	41
4.10.1 50/70, 50/70 + 3 och PMB 1	41
4.10.2 Spindeltyp	42
4.10.3 Mättriiktning	43
4.10.4 Stabiliseringstid vid olika mättriiktning	44
4.10.5 Kapillär- och rotationsviskosimeter	45
4.11 Jämförelse av Sasols uppgifter och eget uppmätta	46
5 Diskussion och förslag till fortsättning	47
Referenslista	49
Förteckning bilagor.....	51
Bilaga 1	52
Bilaga 2	63
Bilaga 3	70
Bilaga 4.....	74
Bilaga 5.....	78
Bilaga 6.....	80
Bilaga 7.....	81
Bilaga 8.....	82

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Begreppet hanterbarhet står för hur lätt eller trögt en asfaltmassa blandas, läggs ut och packas. En undersökning i ämnet från National Center for Asphalt Technology (NCAT) studerades för att få reda på vilka faktorer som har störst betydelse. Studien redovisade och värderade en rad faktorer, så som stenegenskaper (typ, storlek, form), temperatur och bindemedelstyp.

Hanterbarheten testades genom att låta olika bindemedel och stenkombinationer vid varierande temperatur blandas i en modifierad laboratorieblandare för asfalt. Blandaraxelns vridmoment kunde avläsas och representerade blandningens hanterbarhet. Ju högre vridmoment, desto mindre hanterbar ansågs blandningen vara och vice versa (Gudimettla, J. et al 2003. s.50).

Bland slutsatserna av testerna finns följande:

- Typ av grus har viss betydelse. Kubiskt formad granit var mer svårhanterad än motsvarande krossad
- Största nominella storlek (NMA_S) har en viss påverkan. Vid ökning av NMA_S, vid konstant stentyp och form samt bindemedel minskade hanterbarheten
- Stenens form påverkade ej i någon större omfattning

Störst inverkan på hanterbarheten hade emellertid två andra faktorer; **bindemedelstyp och temperatur**. För en given temperatur gav olika bindemedel avsevärt stora skillnader i hanterbarhet. I rapporten beskrivs också hur mycket varierande temperatur påverkade hanterbarheten.

Baserat på NCAT-rapporten lades därför fokus i examensarbetet på studier av olika bindemedel vid olika temperaturer. En hög temperatur är dock inte alltid önskvärd, eftersom det kan förstöra bitumenets goda egenskaper, ökar energiförbrukningen och rökutvecklingen samt utsläppen av flyktiga organiska ämnen (Gudimettla et al., 2003. s.51). Prover genomfördes med ett tillsatsmedel som anses förbättra hanterbarheten, Sasobit, men även polymermodifierat bitumen, som är kända för att göra asfaltmassor svårhanterliga (Tyllgren, 2011b).

Bitumens viskositet har betydelse för hanterbarheten genom alla steg i tillverkningsprocessen. Vid blandning får den inte vara för låg, eftersom det kan leda till dålig vidhäftning mot stenar och dålig fördelning. Är den för hög finns risk för alltför tunna hinnor på stenarna, förutom risken för att bitumenet

förstörs. Vid packning finns också gränser uppåt och nedåt. Är viskositeten för låg blir massan för lös och pressas isär. Om den är för trög arbetad blir packningen otillräcklig. Vid utläggning är man beroende av en viss konsistens i massan för att få en jämn yta (Read&Whiteoak, 2003. s131).

1.2 Syfte

Undersökningen ska belysa bindemedelsviskositetens betydelse för en asfaltmassas hanterbarhet samt redovisa faktorer som påverkar den. Det ska ske genom mätning av bindemedlets reologiska egenskaper med konventionella mätmetoder och med en dynamisk rotationsviskosimeter.

- Hur påverkas bitumens viskositet av vaxinblandning med olika koncentration?

1.3 Avgränsningar

Studien gäller varmblandad asfaltmassa av konventionellt slag. Testerna avgränsas till penetrationsbitumen 50/70 och 160/220, med inblandning av ett beprövat vax, Sasobit.

1.4 Metod

För att kunna genomföra nödvändiga undersökningar krävdes kunskap om de metoder och mätutrustningar som användes. Genom litteraturstudier inhämtades information om bland annat bitumen och dess egenskaper och de metoder som normalt används för att mäta med. En del inkörningsförsök fordrades för att lära känna teknikerna. Inte minst gällde det den helt nyinförskaffade Brookfield viskosimetern. Efter utförandet av mätningar analyserades resultaten och jämförande studier gjordes.

Eftersom LTHs laboratorium flyttades samtidigt kunde inte alla moment utföras där. Bitumenblandningar med vax och många prepareringar gjordes därför på Skanska VTC i Malmö, som också bistod med annan hjälp.

2 Grundläggande fakta

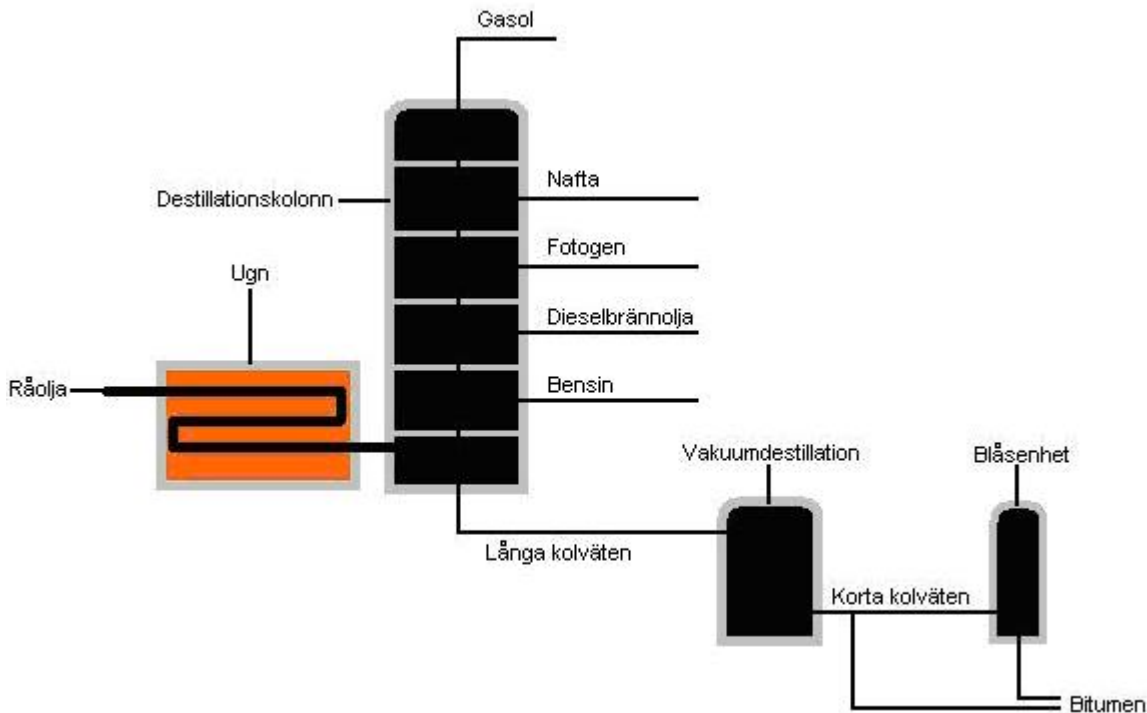
2.1 Bitumen

2.1.1 Framställning

Bitumen utvinns ur råolja, vilken måste genomgå ett flertal processer innan en färdig produkt kan erhållas. Första steget sker i ett raffinaderi där oljan värms upp i en ugn till en temperatur mellan 350-380 °C. Efter upphettningen leds oljan till en så kallad destillationskolonn med olika fack, där den delas upp i olika fraktioner, under påverkan av atmosfärstryck. Dessa fraktioner är antingen i vätske- eller ångform (hög respektive låg kokpunkt). Fraktionerna stiger och lägger sig i olika fack beroende på vilken kokpunkt de har (lägst kokpunkt högst upp). Figur 1 illustrerar förloppet (Read&Whiteoak. 2003. s.11).

Längst ner i kolonnen finns facket med destillationsrester av långa kolväten, varifrån bitumen kan utvinnas. För att utvinna bitumen ur dessa rester måste man destillera på nytt. Denna destillation sker i vakuum med ett tryck på 10-100 mmHg (millimeter kvicksilver) vid 350-425 °C. Erhållna produkter är gasolja, destillat och rester med korta kolväten. De korta resterna är råmaterialet till framställningen av 20 olika bitumensorter (Read&Whiteoak. 2003. s.11-12).

Det bitumen som framställs från korta rester har ett penetrationsvärde mellan 35-300 dmm (decimillimeter), beroende på råoljans ursprung. Vidare kan man ändra de fysiska egenskaperna för de korta resterna genom att blåsa luft igenom dem i en temperatur mellan 240-320 °C. Metoden kallas för oxidation, och sker antingen i sats eller i en kontinuerlig ström av luft. Den görs bl.a. för att minska penetrationen, öka mjukpunkten och för att få en lägre temperaturkänslighet för bitumen (Read&Whiteoak. 2003. s.12-13).



Figur 1. Framställning av bitumen (Efter Read&Whiteoak, 2003. s.11-13)

2.1.2 Gradering och namngivning

Vilket namn en bitumenkvalitet får beror på ett antal olika faktorer. Dessa varierar beroende på typ. Read&Whiteoak (2003) specificerar följande fyra typer som de vanligaste i dagsläget:

- Penetration grade
- Hard och oxidised grade
- Cutback

För användning inom vägbyggnad är det främst penetration grade bitumen (sv. penetrationsbitumen) som används. Även cutback bitumen, som är en blandning av bitumen och fotogen, förekommer inom vägbyggnad. Oxidised och hard grade bitumen används främst inom industrin, ofta som en komponent av takpapp.

Benämningarna bygger dels på vilken typ av bitumen det är, dels vilken kvalitet det håller. För penetrationsbitumen sker det genom bestämning av penetrationsvärde, vilket är ett värde på bitumenets konsistens. Ju lägre värde, desto styvare är det (Read&Whiteoak, 2003. s.120). I specifikationerna av det aktuella bitumenet anges även mjukpunkten. Tabell 1 visar de bitumenkvaliteter som är behandlade i denna rapport.

Tabell 1. Specifikation för de två behandlade typerna av penetrationsbitumen (Read&Whiteoak, 2003. s.44)

Typ	Penetrationsvärde (dmm)	Mjukpunkt (°C)
50/70	50-70	46-54
160/220	160-220	35-43

För närmare beskrivning och bestämning av penetrationsvärde och mjukpunkt, se kapitel 3.2 respektive 3.3.

2.2 Sasobit

Sasobit är ett vax bestående av en blandning av långkedjiga kolväten, vilka har en längd mellan 40 till över 115 kolatomer. Vaxet framställs genom en Fischer-Tropsch-syntes¹. Sasobit har en smältpunkt mellan 85-115 °C, och är enligt Sasol fullt lösligt i bitumen vid temperaturer över 115 °C. En blandning av vax med bitumen ger en homogen lösning, vilket ger en minskning av viskositeten för bitumen (Sasol, 2004). Detta möjliggör, enligt Sasol, en sänkning av temperaturen med 10-30 °C vid blandning och utläggning av asfalt (Sasol, 2004. s.1). Erfarenheter från Danmark bekräftar också de uppgifterna (Tyllgren, 2011b).



Figur 2. Närbild på Sasobit i fast form

Sasol (2004) anger att mjukpunkt för 50/70 + 3 (dvs. 3 % vax) ska vara mellan 75-85 °C, vid användning av Kula & Ring –metoden (K&R). Penetrationen anges till 30-50 dmm. Detta, tillsammans med övriga specificerade värden, illustreras i tabell 2 nedan.

Tabell 2. Av Sasol angivna värden för SmB 35 (50/70 + 3) (Sasol, 2004. s.2).

Namn	SmB 35
Basbitumen	50/70
Sasobit-innehåll (%)	3
Mjukpunkt K & R (°C)	75-85
Penetrationsvärde (dmm)	30-50
Fraass brytpunkt (°C)	-8

¹*Fischer-Tropsch-Syntes: Process som producerar långkedjiga ekologiska produktföreningar, genom hydrering av kolmonoxid på metalliska föreningar (van Steen&Claeys, 2008. s.1).*

2.3 Polymermodifierat bitumen

En metod för att ändra bitumens egenskaper är polymermodifiering. Polymererna, vilka kan beskrivas som långa molekyllängder, modifieras genom tillsatsmedel så att egenskaperna förändras till önskat resultat (NE, 2011). Exempel på sådana tillsatsmedel är det plastiska polymeret *etylvinylacetat* och det elastiska *styren-butadien-syrentermoelast* (Nynäs, 2003).

2.4 Viskositet

En gas eller vätskas viskositet är ett mått på hur stor dess inre motstånd, eller friktion, är. Det kan också beskrivas som en vätskas trögflytenhet. Viskositet kan definieras genom att en vätska placeras mellan två parallella plattor. Därefter sätts den ena plattan i rörelse, med en konstant skjuvkraft. Genom utläsning av skjuvspänning och skjuvhastighet fås den dynamiska viskositeten, i form av ekvationen nedan (Brookfield. s.15):

$$\eta = \frac{\tau}{\gamma} \quad (1.0)$$

där

η viskositet
 τ skjuvspänning
 γ skjuvhastighet

Skjuvspänningen är ett mått på skjuvkraft per area, d.v.s:

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (1.1)$$

där

6

F	skjuvkraft
A	area

2.4.1 Dynamisk viskositet

Dynamisk, även kallad absolut viskositet är den storhet som huvudsakligen anges i denna rapport. Bestämning av den dynamiska viskositeten kan göras genom flertalet metoder; exempelvis *sliding plate viscometer* eller *rotationsviskosimeter* (Read&Whiteoak, 2003. s.125-128).

Tillämpning av viskositetens definition kan göras genom ovan nämnda *sliding plate viscometer*, enligt Read&Whiteoak (2003), genom att en tunn film (5-50 μm) placeras mellan plattorna. Metoden är dock inte undersökt i det här fallet.

Den metod som istället används i vår undersökning är rotationsviskosimeter. Grundprincipen är att vridmomentet från en roterande cylinder i en temperaturkontrollerad bitumenbehållare läses av (Read&Whiteoak, 2003. s.126). För utförligare beskrivning av metoden, se kap 3.1.

2.4.2 Kinematisk viskositet

En annan typ av viskositet är den kinematiska, vilken exempelvis kan bestämmas med en så kallad kapillärviskosimeter. Metoden går ut på att en bestämd mängd vätska rinner igenom en förträngd passage (en kapillär) i ett provrör under mätning av tid (Read&Whiteoak, 2003. s.126).

Read&Whiteoak (2003) beskriver sambandet mellan dynamisk och kinematisk viskositet enligt formeln:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1.2)$$

respektive

$$\mu = \nu \times \rho \quad (1.3)$$

där

μ	dynamisk viskositet
ν	kinematisk viskositet
ρ	densitet.

2.4.3 Newtonska och icke-newtonska vätskor

Förhållandet mellan en vätskas skjuvspänning och skjuvhastighet delar upp vätskor i två grupper: *newtonska* och *icke-newtonska*. I en newtonsk vätska är

förhållandet mellan applicerad skjuvhastighet och resulterande skjuvspänning konstant, det vill säga att viskositeten är oberoende av hastigheten. Exempel på en newtonsk vätska är vatten och flytande bitumen. Icke-newtonska vätskors viskositet är på något sätt beroende av skjuvhastigheten, vilket gör resultatet av viskositetsmätningarna mer metodberoende (Brookfield. s.15).

2.4.4 Enheter

Dynamisk viskositet mäts i SI-enheten $\text{Pa} \times \text{s}$, dvs. Pascalsekund (Jönsson, G., 1998). För den här rapporten används centiPoise (cP), som enhet vid mätning av dynamisk viskositet. SI-enheten för kinematisk viskositet är m^2/s . Det kan också uttryckas i centiStoke (cSt) (Read&Whiteoak, 2003. s.125). Se tabell 3 nedan för omvandling av enheter. Om inget annat anges åsyftas dynamisk viskositet.

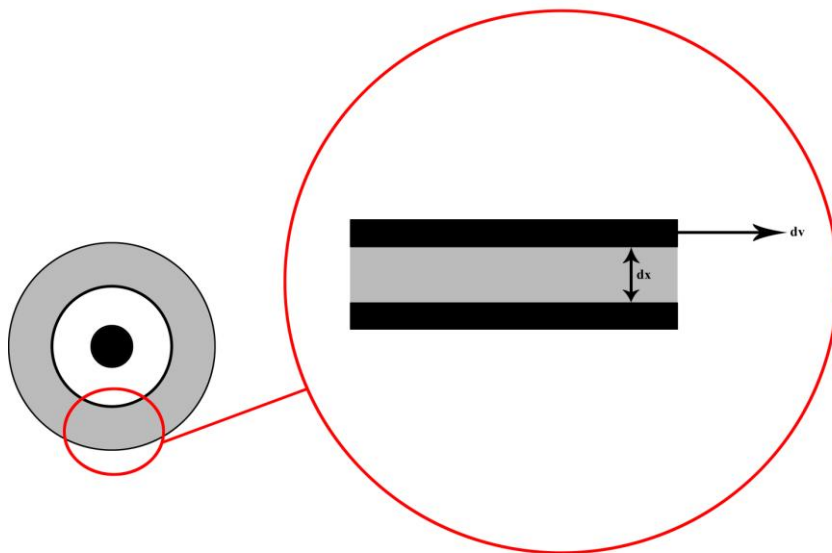
Tabell 3. Omvandling av viskositet (Efter Read&Whiteoak, 2003. s. 125)

Typ	Omvandling
Dynamisk	$1 \text{ kg}/(\text{m} \times \text{s}) = 1 \text{ Pa} \times \text{s} = 1000 \text{ cP}$ ($1 \text{ cP} = 1 \text{ mPa} \times \text{s}$)
Kinematisk	$1 \text{ m}^2/\text{s} = 1000000 \text{ mm}^2/\text{s} = 1 \text{ cSt}$

Som exempel kan nämnas att vatten, vid temperaturen $20 \text{ }^\circ\text{C}$, har viskositeten 1,0020 cP.

2.4.5 Viskositetsberäkning i rotationsviskosimeter

Som beskrivet i kap 2.4, kan viskositet genom att låta två plattor, inneslutande en vätska, förflytta sig. Från det kan viskositeten avläsas. Mätning med Brookfield viskosimeter är en tillämpning av det; en roterande cylinder i en vätskefylld behållare. Figur 3 illustrerar utformningen.

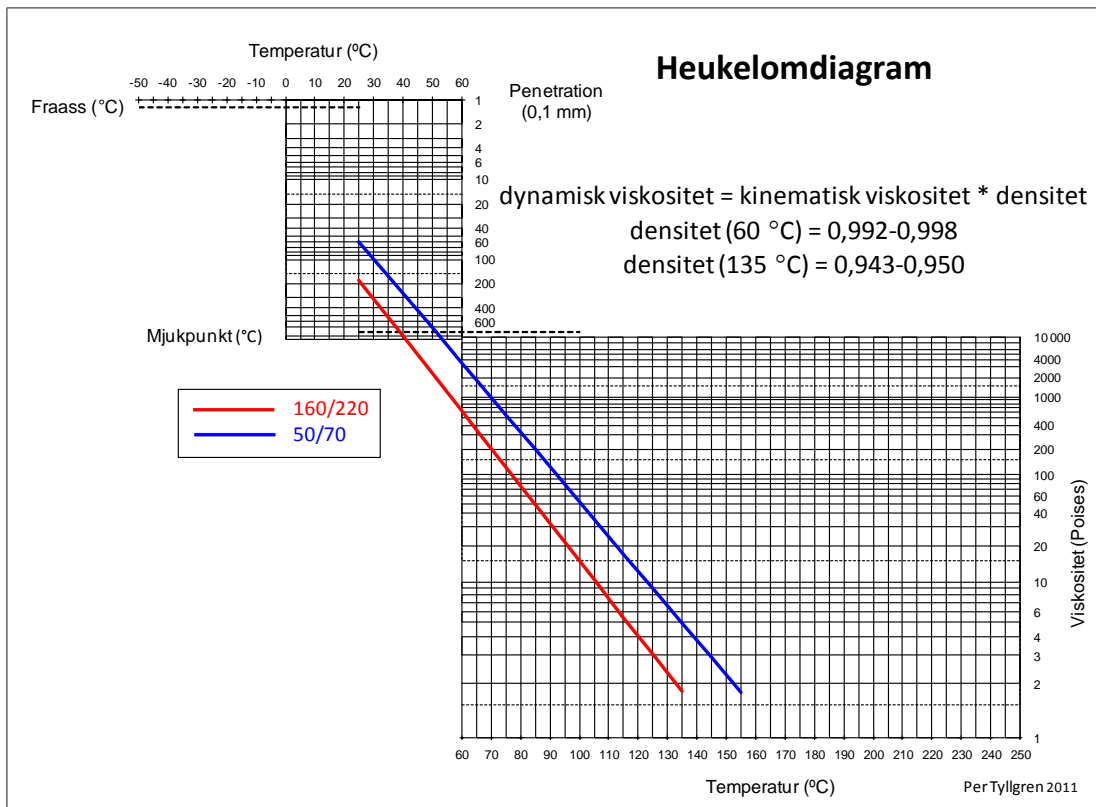


Figur 3. Principiell utformning av Brookfield viskosimeter (Efter Brookfield. s.15)

2.5 Heukelomdiagram

En metod för att beskriva bitumens viskositet vid olika temperaturer är genom ett så kallat *bitumen test data chart* (BTDC), också benämnt *Heukelomdiagram* efter sin skapare Willem Heukelom, en gång verksam på oljeföretaget Shell och framstående auktoritet i bitumenfrågor. I diagrammet går det att utläsa *viskositeten* i det flytande registret såväl som *penetrationsvärde*, *mjukpunktsvärde* samt *Fraass breaking point* (Enligt Read&Whiteoak (2003) ett test vid temperaturer under 0 °C för att undersöka när bitumenet spricker) . Dessa fyra parametrar visas tillsammans som funktion av temperaturen (Read&Whiteoak, 2003. s.131).

BTDC är uppbyggt av fyra diagram: två endimensionella för Fraass brytpunkt och K & R och två tvådimensionella för penetrationsvärde och viskositet. De endimensionella diagrammen och temperaturskalan har linjära och sammanfallande skalor. Penetrationsdiagrammets y-värde är dubbellogaritmiskt medan viskositeten följer en särskild formel. Tillsammans har de utformats och placerats så att inmatade värden bildar en rät linje för de flesta penetrationsbitumen. För de bitumensorterna kan man interpolera och extrapolera värden med en viss precision. För att vara säker måste mätningarna emellertid utföras men man kan skaffa sig en ungefärlig uppfattning om till exempel viskositeten vid en given temperatur bara med hjälp av penetrationsvärde och mjukpunktsvärde (Read&Whiteoak, 2003. s.131).

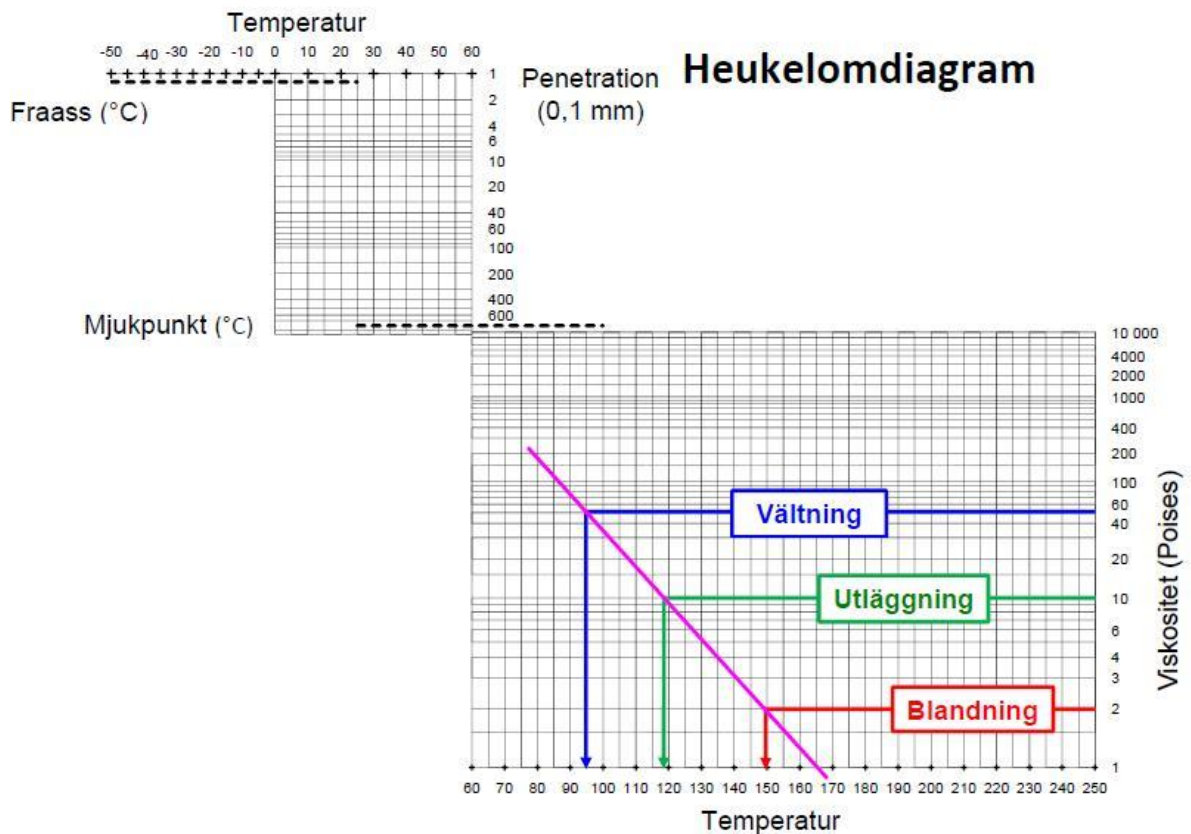


Figur 4. Bitumen test data chart, med värden för bitumen 50/70 och 160/220 (Tyllgren, 2011c).

2.6 Viskositet och hanterbarhet

Som tidigare beskrivet finns ett samband mellan bitumens viskositet och hanterbarhet. Därmed finns också optimala viskositetsnivåer för de olika processerna (blandning, utläggning och packning). Figur 5 åskådliggör sambandet mellan temperatur och viskositet vid de olika stegen.

Vid packning (vältning) bör viskositeten vara ungefär 5000 cP. För optimal utläggning och blandning bör viskositeten vara ungefär 1000 cP respektive 200 cP (Tyllgren, 2010. s.32).

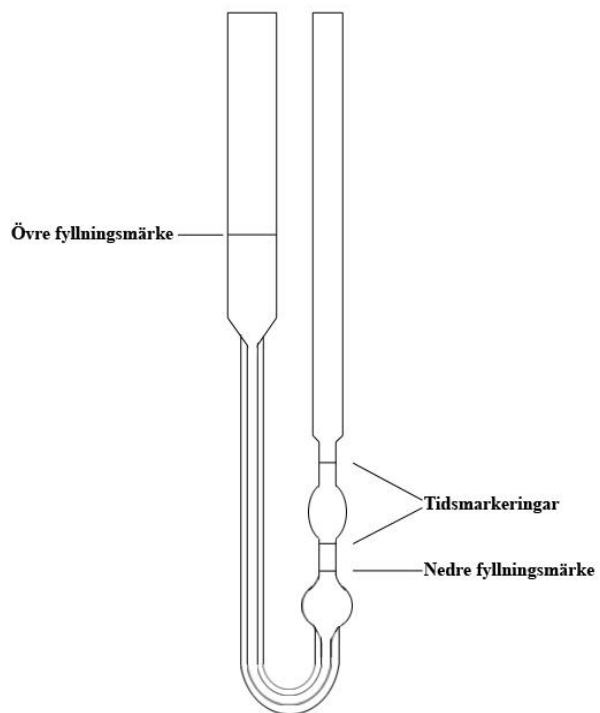


Figur 5. Optimala viskositetsnivåer för olika steg (Tyllgren, 2011a).

2.7 Kapillärviskosimeter

En vanlig metod för att mäta bitumens viskositet är kapillärviskosimetern, i vilken man kan mäta kinematisk viskositet.

Principen är att bitumen får flyta genom provrör, vilket är utformat med omväxlande smala (kapillärer) och breda passager (figur 6). Bitumen passerar mellan två markeringar, och tidsåtgången mäts. Varje viskosimeter har genom kalibrering en given faktor, vilken multipliceras med flödestiden. Produkten av dem ges i form av den kinematiska viskositeten. Efter mätning av flera temperaturer kan informationen konverteras till dynamisk viskositet, och därefter presenteras i ett Heukelomdiagram (Read&Whiteoak., 2003. s.126).



Figur 6. Kapillärviskosimeter (Read&Whiteoak, 2003)

3 Genomförande av mätningar



Figur 7. Burkar med 50/70-bitumen. Från vänster: 50/70, + 1, + 2, + 3. Notera skillnad i glans

För att genomföra försöken krävdes kunskap om de olika mätutrustningar och metoder som skulle användas. I de flesta fallen saknades detta så arbetet började med informationsinhämtning och förberedande mätningar. Metoderna beskrivs i det efterföljande. Manual för Brookfield viskosimeter finns som bilaga 8. De provade bitumensorterna var

- 50/70 med 0, 1, 2 och 3 % Sasobit
- 160/220 med 0, 1, 2 och 3 % Sasobit
- polymermodifierat bitumen typ 1 och typ 2.

De polymermodifierade bitumen är av okänd typ, och har därför angetts som typ 1 och 2.

Resultaten presenteras i kapitel 4 både som grafiska jämförelser och siffror i tabeller. I bilagorna finns all rådata både direkt från mätningarna och i överskådliga sammanställningar.

3.1 Brookfield viskosimeter

Viskosimetern för mätningarna av bitumen i flytande form är av märket BROOKFIELD VISCOMETER DV-II+ Pro EXTRA (figur 8). I utrustningen ingår också en ugn, spindlar (de roterande cylindrarna, se figur 9), temperaturindikator och teströr. Mätningen går kort ut på att spindeln fästs i maskinen, som sedan sänks ned och centreras i det tempererade teströret med bindemedel. Resultatet visas på datorskärm och kan antingen lagras eller skrivas ut av programmet Rheocalc V3.2.



Figur 8. BROOKFIELD VISCOMETER DV-II+ Pro EXTRA

För ett pålitligt resultat är det viktigt att provningen hinner stabiliseras och det tar en viss tid. Stabiliseringstiden förlängs vid låga temperaturer och låga hastigheter. Se kapitel 3.1.1 för ytterligare beskrivning av stabiliseringstid. Lämplig spindelhastighet beror på vridmomentet, som är en reaktion på ämnets viskositet, som i sin tur kommer av temperaturen och provets egenskaper. Om vridmomentet överstiger 100 % levereras inte något resultat. Procenttalet är kvoten mellan uppmätt viskositet och maxviskositet (spindelns kapacitet för mätning vid en viss hastighet).

De använda spindlarna har beteckningarna SC4-21 och SC4-27 (figur 9). De ska klara viskositeter mellan 25–500 000 cP, respektive 125–250 000 cP, enligt specifikation. Temperaturen för mätningarna ligger i intervallet 37 och 225 °C. Starttemperaturen varierade men målet var att starta strax över mjukpunktsvärdet, som anses ligga på 1,3 miljoner cP (Tyllgren, 2011b).



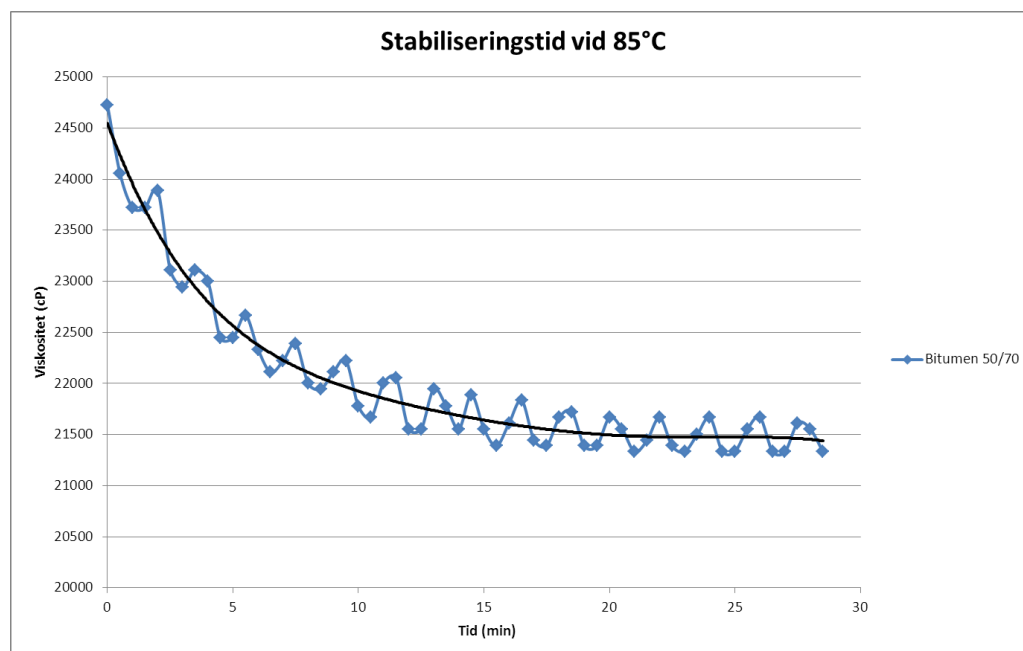
Figur 9. De två använda spindel-typerna (SC4-27 resp. SC4-21).

Innan mätningarna med Brookfield gick igång hade den kinematiska viskositeten vid 85 °C och 135 °C mätts med kapillärviskosimeter för att ha som kontrollvärde inför intrimningen av mätmetodiken. Temperaturintervallet för mätningarna började strax under förväntat K & R-värde och gick upp till ungefärlig viskositet för blandning, som anses ligga på ca 200 cP. Det innebär en temperatur mellan 155 och 175 °C för de valda bitumensorterna. Eftersom mätmetoden medgav det, valdes relativt täta temperatursteg (var 10:e grad).

3.1.1 Stabilisering

Den tid det tar för mätningen att stabiliseras benämns *stabiliseringstid*. Därefter är värdet oförändrat. Det var till en början inte lätt att avgöra när det hade inträffat. Tiden kunde också variera och som nämndes tidigare beror det på en rad faktorer, som viskositet, spindelhastighet och temperatur. Det beror också på vilken mätriktning som tillämpas, om man värmer provet eller låter det svalna. Om provet får svalna förkortas stabiliseringstiden något.

Som exempel på hur viskositeten varierar under stabiliseringstiden visas nedan ett diagram, där förändringen i viskositet för penetrationsbitumen är uppmätt. Grafen visar exempel på när en utjämning av viskositetsnivån inträffar. För den här typen av bitumen vid 85 °C krävdes det cirka 30 minuter för provet att stabilisera sig, i det här fallet vid uppvärmning.



Figur 10. Förändring i viskositet för penetrationsbitumen 50/70

3.1.2 Mätriktning

Rotationsviskosimeterns ugn kan alltså ändra temperatur i båda riktningarna, dvs. antingen en uppvärmande eller avsväljande process. Det är ett vanligt fenomen bland ämnen och vätskor att man får olika resultat beroende på

riktningen. Det kallas *hysteresiseffekt* och handlar om att vissa ämnen ”minns” tidigare tillstånd. För newtonska vätskor och ämnen ska det inte skilja någonting. Av tidsskäl mättes merparten i uppvärmd riktning. Några få kompletterande tester gjorde i avsvalnande riktning för att påvisa effekterna (Brookfield. s.20).

3.2 Penetrationstest

En etablerad metod för att ta reda på bitumens konsistens är att göra ett så kallat penetrationstest (figur 11). Resultatet används för övrigt för att benämna bitumensorter. Därav beteckningen *penetrationsbitumen*. I testet görs en mätning under givna förutsättningar, för att undersöka hur långt en nål tränger in i bitumen i en provkopp. Genom att kontrollera förutsättningarna ger det en möjlighet till att göra precisa återupprepningar och därigenom bekräfta eller falsifiera resultaten. British Standards Institution (BSI), samt American Society for Testing and Materials (ASTM) har gjort gällande följande förutsättningar:

- Nålen ska ha specifika dimensioner
- Nålen ska penetrera provkroppen under 5 sekunder, under en last av 100 gram.
- Temperaturen ska vara 25 °C, med $\pm 0,1$ °C noggrannhet.

För att kunna garantera ovanstående måste utrustningen kontrolleras regelbundet, bland annat nålens renhet och form. Som ett Heukelomdiagram antyder kan penetrationen mätas vid andra temperaturer om det går och behövs (lägre temperatur för mjuka bitumensorter, högre för styva) men 25 °C är vanligast förekommande. Om inget anges antas att den temperaturen gäller (Tyllgren, 2011b).

För att kunna upprätthålla korrekt temperatur genom hela testet, sätts provkroppen fast i en öppen behållare vilken därefter sänks ner i ett vattenbad, vilket håller temperaturen 25 °C. Tempereringstiden anges i normen till 3 timmar.

För att öka precisionen i mätningen görs tre mätningar per prov. Efter varje mätning byts nål, alternativt kan den rengöras och återanvändas. Medelvärdet av testerna avrundas till närmaste heltal. Det är även viktigt att penetrationerna görs på ytor med tillräckligt avstånd emellan, så att tidigare penetration ej påverkar den mätningen. Det är särskilt viktigt då nålen dras ut från provet efter genomförd mätning, då en förhöjning av ytan kan ske. Det här är särskilt tydligt med mjukare bitumen (Read&Whiteoak., 2003. s.120).



Figur 11. Utrustning för penetrationstest

Under hela mätserien hålls behållaren fylld med vatten som täcker provkoppen för att hålla rätt temperatur under hela mätförloppet, som kan ta upp till två minuter.

Gällande enhet för penetrationsvärde är decimillimeter (0,1 mm, 1/10 mm, dmm). Enligt SS-EN 1426 får enskilda mätvärden respektive angivna resultat mellan mätningar på samma labb respektive en annan person i ett annat labb inte överstiga tabellvärdena för ett godkänt resultat.

Tabell 4. Krav vid mätning av penetration (Tyllgren, 2011b)

Penetration	Tillåten avvikelse mellan varje mätpunkt	
	Penetration <50 dmm	2 dmm
Penetration 50-149 dmm	4 dmm	
Penetration 150-249 dmm	6 dmm	
Penetration	Tillåten avvikelse mellan medelvärden	
	Samma laboratorium	Annat laboratorium
	Penetration <50 dmm	2 dmm
Penetration ≥50 dmm	4 % av medelvärdet	5 % av medelvärdet

3.3 Mjukpunktstest

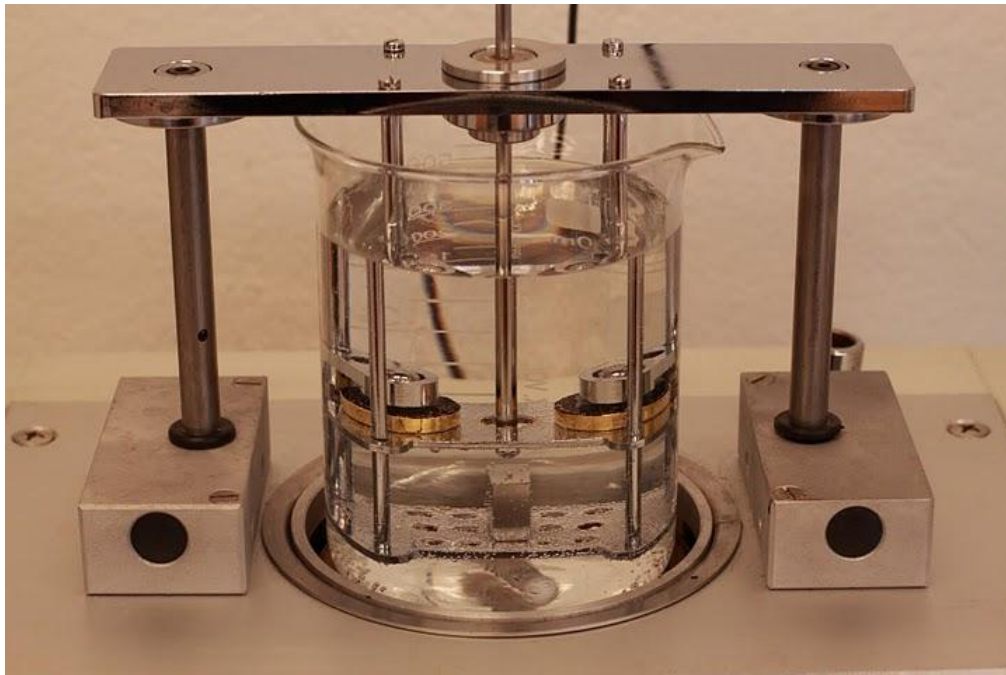


Figur 12. Upphällning av ringar till mjukpunktstester

Ett annat väl beprövat test som finns angivet i nästan alla specifikationer för bitumen är ett så kallat mjukpunktstest eller Kula & Ring, K & R (eng. *softening point test, Ring & Ball, R & B*). Figur 12 visar de bitumenfyllda ringarna. Syftet med testet är att undersöka vid vilken temperatur en kula faller igenom en ring med bitumen. Testet beskrivs i SS-EN 1427. I beskrivningen anges bland annat att:

- Stålkulan ska väga 3,5 gram
- Vid förväntad mjukpunkt under 80 °C ska testvätskan vara vatten, respektive glycerin vid mätning över 80 °C.

Vid mätningens början ska utrustningen (bägare, vatten, hållare, kulor, ringar, bitumen) vara kylda till ungefär 6-7 °C.



Figur 13. Utförande av mjukpunktstest

Testet utförs genom att stålkulorna placeras i hållaren, ovanpå vardera bitumenring. Därefter placeras hela utrustningen i vattenbägaren, och testet påbörjas (figur 13). Temperaturen höjs med 5 °C per minut. Då någon av stålkulorna faller igenom bitumenringen, och når plattan 25mm nedanför, stoppas mätningen på den sidan. När även den andra kulan faller ner är testet klart och båda sidors temperatur antecknas. Medelvärde av de bägge mätningarna avrundas till närmaste 0,2 °C (för penetrationsbitumen). För att testet ska vara godkänt får temperaturskillnaden ej överstiga 1 °C. Likt penetrationstestet gäller även här vissa krav för acceptabel återupprepning. De aktuella kraven för bitumen i vatten är (specificerat i acceptabel differens) (SS-EN 1427):

Tabell 5. Krav vid återupprepning av mjukpunktstest

Penetration	Samma laborationssal	Annan laborationssal
Omodifierat bitumen	1 °C	2 °C
Modifierat bitumen	1,5 °C	3,5 °C

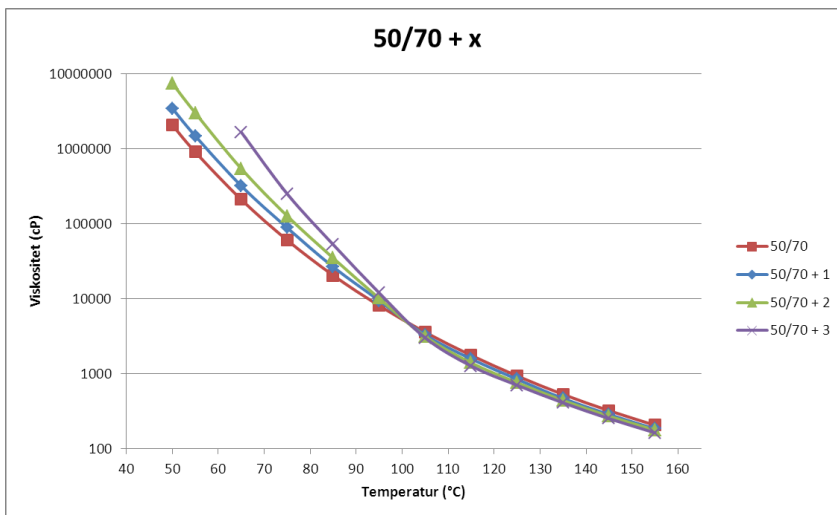
4 Resultat och analys

4.1 Sammanställning av resultat

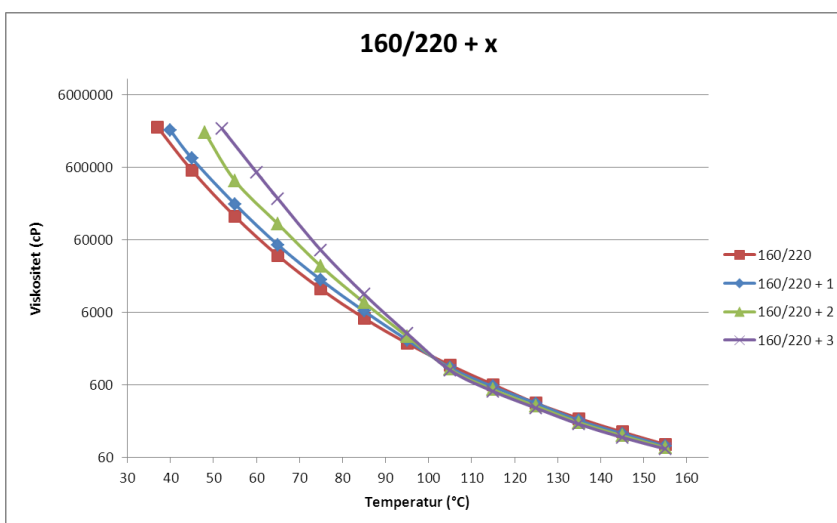
Nedan följer resultatet i sammanställd form, för att lättare få en överblick över hur bitumen reagerar vid olika vaxinnehåll. Linjerna/staplarna i diagrammen nedan samt Heukelomdiagrammen representerar varje enskild mätning.

4.1.1 Viskositetsmätningar

Mätningar nedan presenteras som jämförelse mellan respektive bitumenkvalitet och vaxinnehåll. Detta illustreras i figur 14 och 15. Genomgående resultat för vaxblandat 50/70 och 160/220 är att de är styvare än standardbitumen (utan vaxinnehåll) vid temperaturer under vaxets smältpunkt, och därefter mjukare. Ju högre vaxinnehåll, desto tydligare är ”vaxeffekten”.



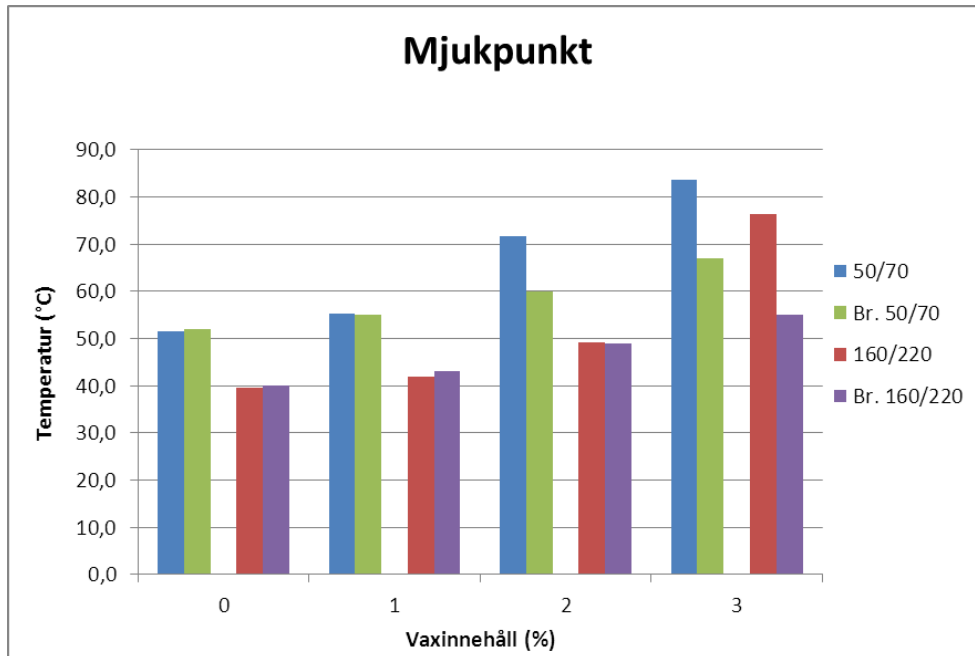
Figur 14. Förändring i viskositet för pen.bitumen 50/70 med olika vaxinblandning



Figur 15. Förändring i viskositet för pen.bitumen 160/220 med olika vaxinblandning

4.1.2 Mjukpunkt

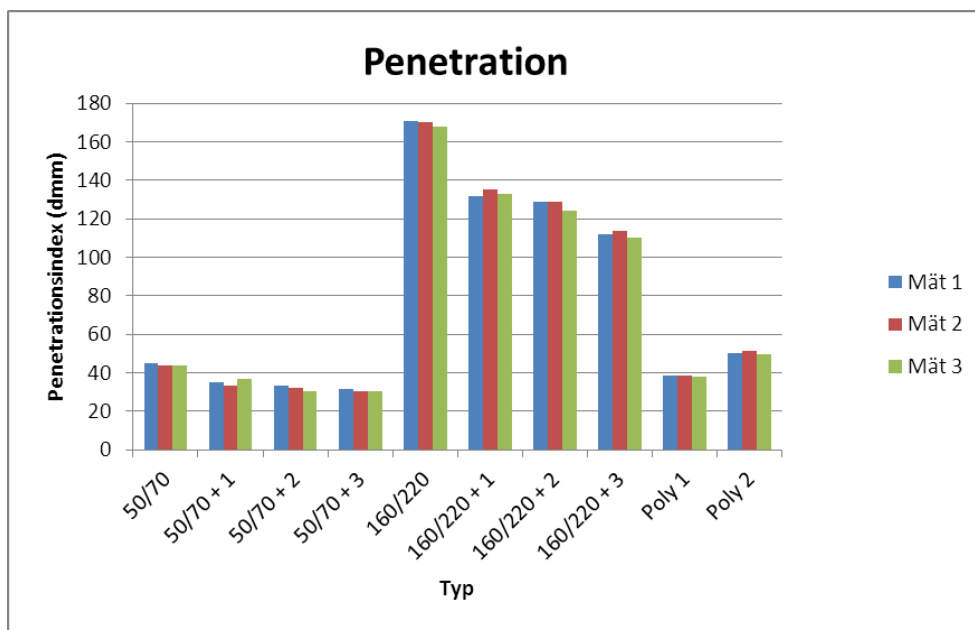
Mätningar för mjukpunkt har genomförts med K & R, samt Brookfield viskosimeter. Nedan visas resultatet för 50/70, 160/220 samt polymermodifierat bitumen i figur 16.



Figur 16. Jämförelse av mjukpunkt mellan K & R och Brookfield

4.1.3 Penetrationsvärde

Figur 17 illustrerar penetrationsvärden för de olika testade bitumenkvaliteter. Eftersom alla tre mätvärden per bitumentyp tagits med kan också variansen mellan mätningarna ses.

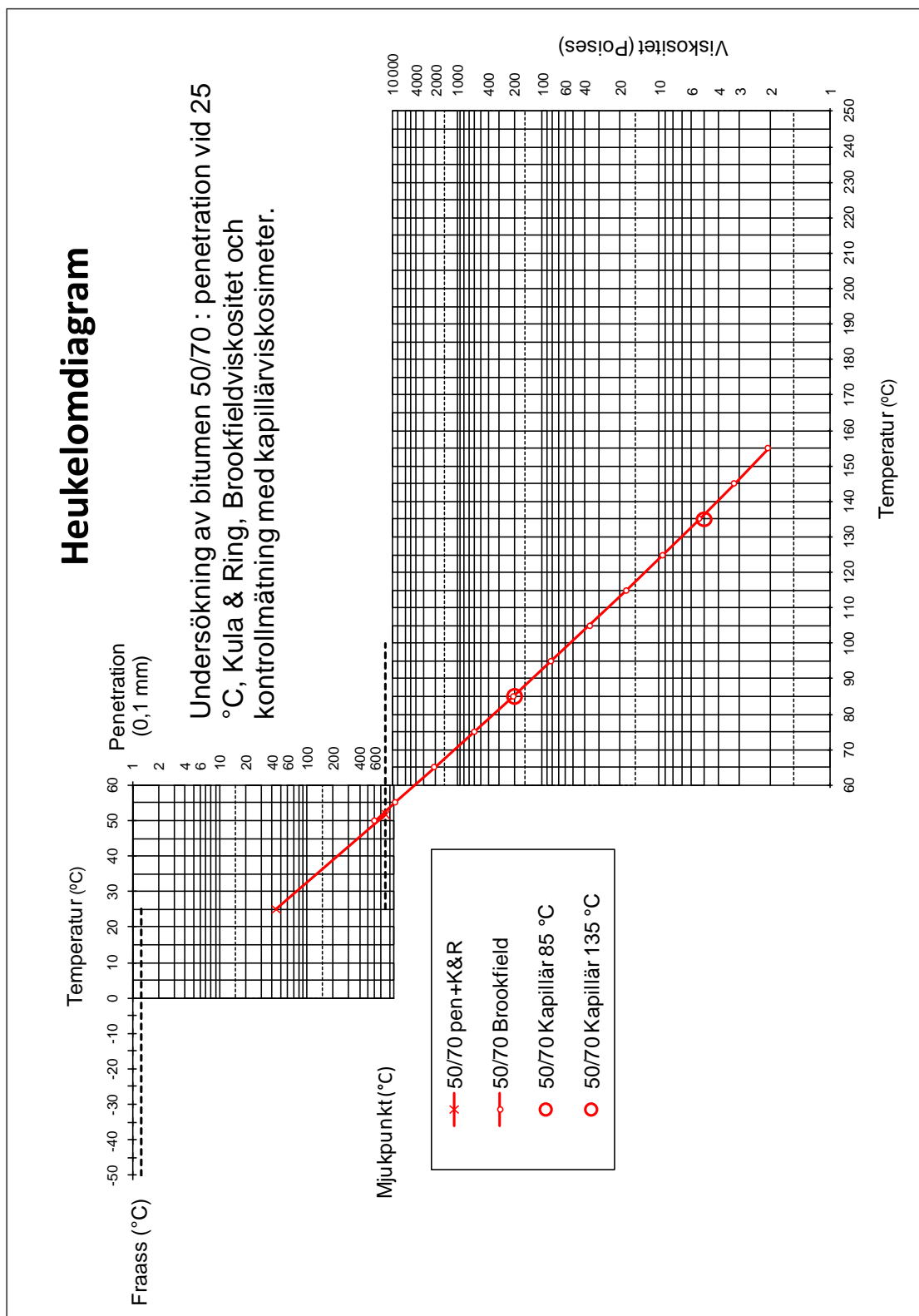


Figur 17. Mätvärden för penetrationstester

4.1.4 Analys

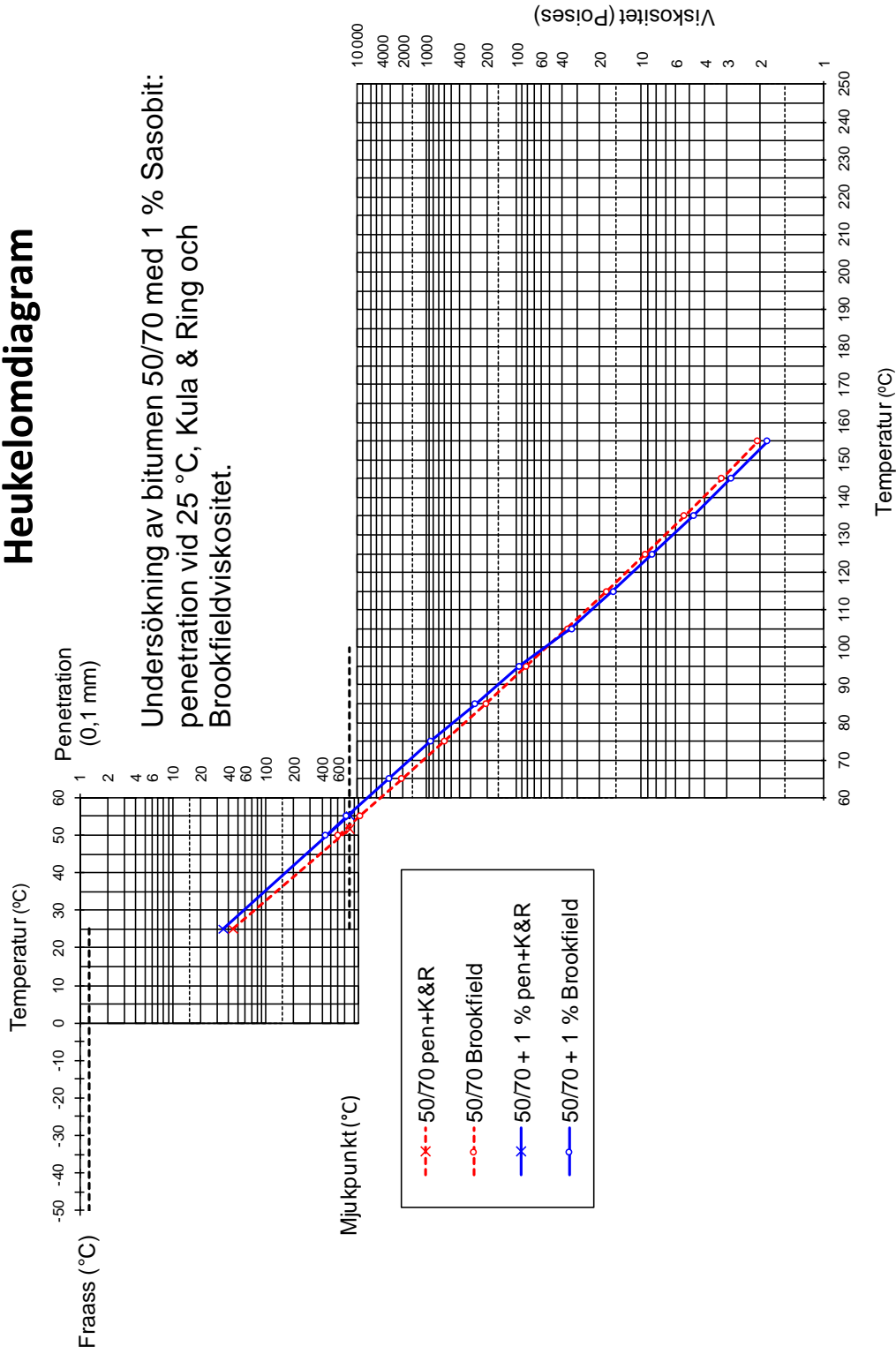
Enligt Sasol (2004) höjs viskositeten med inblandning av Sasobit vid temperaturer under vaxets smältpunkt, för att sedan minska vid temperaturer över smältpunkten vilket ses i figur 14 och 15. Även penetrationsvärdet ska minska. Resultaten har visat att så är fallet. K & R-maskinen har inte visat de förväntade resultaten för mjukpunkt i vissa fall där bitumen blandats med vax. Detta kan förklaras med teorin i kapitel 4.9. Mer ingående analys för varje mätning finns nedan under respektive rubrik.

4.2 50/70 och 50/70 + 1



Figur 18. 50/70 inklusive punkter för kapillär mätning

Heukelomdiagram



Figur 19. 50/70 och 50/70 + 1

4.2.1 50/70

Linjen i figur 18 representerar mätningar av vanligt 50/70-bitumen, gjorda med Brookfield viskosimeter. Linjen ligger ganska nära punkterna för de kapillära mätningarna. Skillnaden i viskositet mellan de två metoderna är 586 cP vid 85 °C, och 33 cP vid 135 °C, vilket uttryckt i temperatur motsvarar 0,4 respektive 1,5 °C. Mjukpunkten utläst från Heukelomdiagrammet är 52,8 °C, vilket är en skillnad på 1,2 °C jämfört med uppmätt K & R.

4.2.2 50/70 + 1

Viskositetslinjen (figur 19) ändras efter tillsatser av Sasobit men endast marginellt. Viskositeten ligger över 50/70 fram till 100-105 °C för att sedan ligga under. Det beror på att vaxet smälter. Skillnaderna i viskositet mellan vanligt 50/70 och 50/70 + 1, vid temperaturerna 85 °C, 135 °C och 155 °C, är + 6078 cP, -63 cP, respektive -21 cP. Mjukpunkterna ändrar sig 3,6 °C enligt K & R och 3,0 °C enligt Heukelomdiagrammet. Penetrationsvärdet har reducerats med -9 dmm. De nya värdena ges i tabell 6.

Tabell 6. Värden för 50/70 och 50/70 + 1

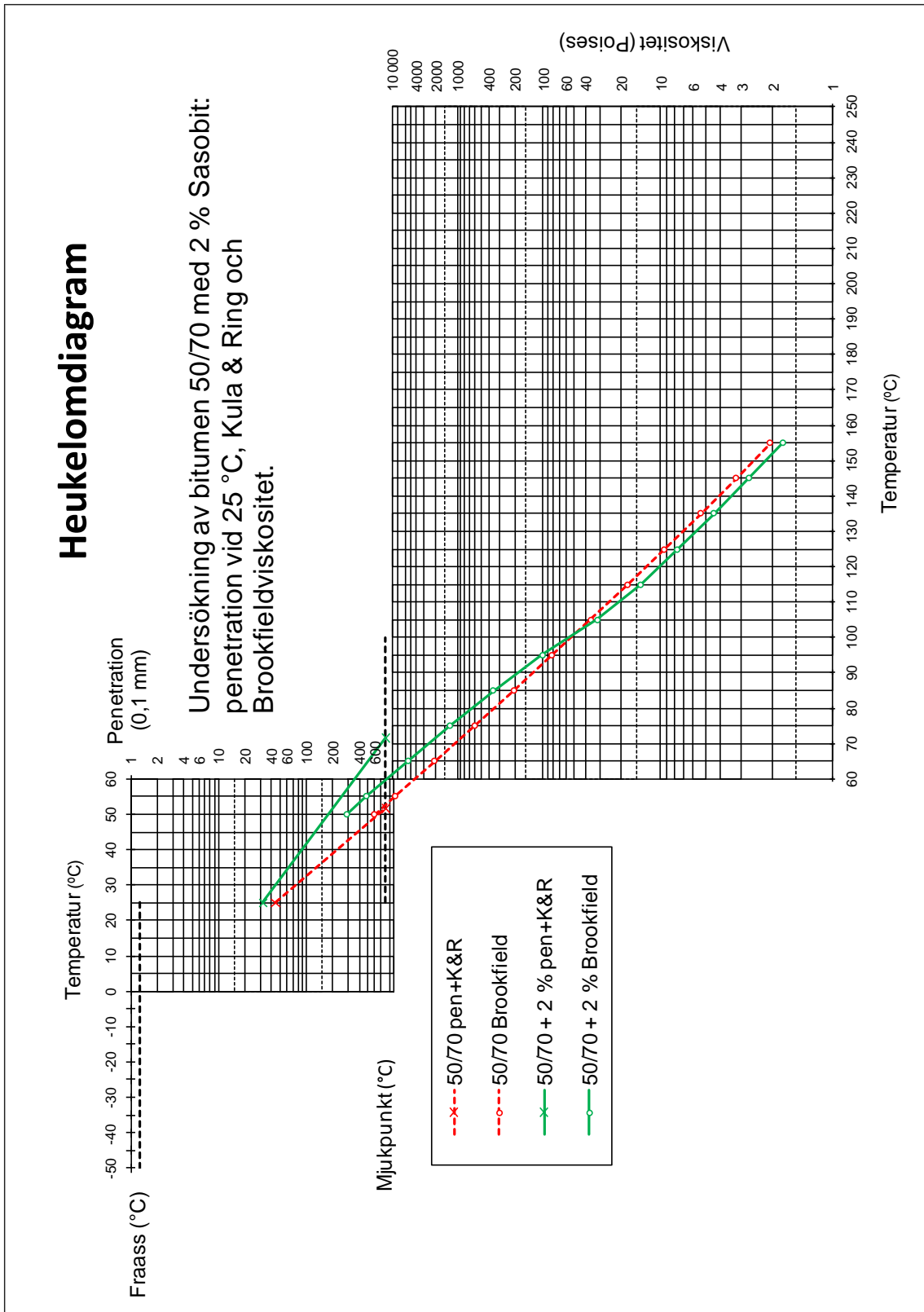
Test	50/70	50/70 + 1
Penetrationsvärde (dmm)	44	35
Mjukpunkt K & R (°C)	51,6	55,2
Mjukpunkt Heuk. (°C)	52,8	55,8
Viskositet 85 °C (cP)	20586	26664
Viskositet 135 °C (cP)	533	470
Viskositet 155 °C (cP)	206	185

4.2.3 Analys av 50/70 och 50/70 + 1

Brookfieldvärdena och kapillärvärdena för 50/70 vid 85 °C respektive 135 °C ligger tillräckligt nära varandra för att påstå att de ger likvärdiga resultat. Skillnaden vid mjukpunktsnivån kan lika gärna hänföras till K & R-metoden som till Brookfieldmätningen, då skillnaden metoderna emellan är liten.

Vaxets effekt är måttlig vid 1 %. Bitumenets egenskaper dominerar blandningen, även om förskjutningarna är tydliga och konsekventa. Skiftningen av läge när vaxet smälter är också tydlig och sker strax under smältpunkten om vaxet smälts för sig. Resultatet för mjukpunkten från Brookfielden är pålitligt, vilket man ser på den marginella skillnaden mellan metoderna. K & R och penetrationsvärdet ökar respektive minskar proportionellt.

4.3 50/70 + 2



Figur 20. 50/70 och 50/70 + 2

Skillnaderna i viskositet ökar med mer tillsatser av Sasobit (figur 20). Framförallt är det uppmätt K & R som drar iväg. Differensen mellan 50/70 och 50/70 + 2 har ökat, till +14423 cP vid 85 °C, -91 cP vid 135°C, samt -28 cP vid 155 °C. Ändringen av uppmätt mjukpunkt är 20,0 °C medan beräknad stannar vid 6,9 °C. Penetrationsvärdet har minskat med -12 dmm. Värdena har beräknats utifrån tabell 7.

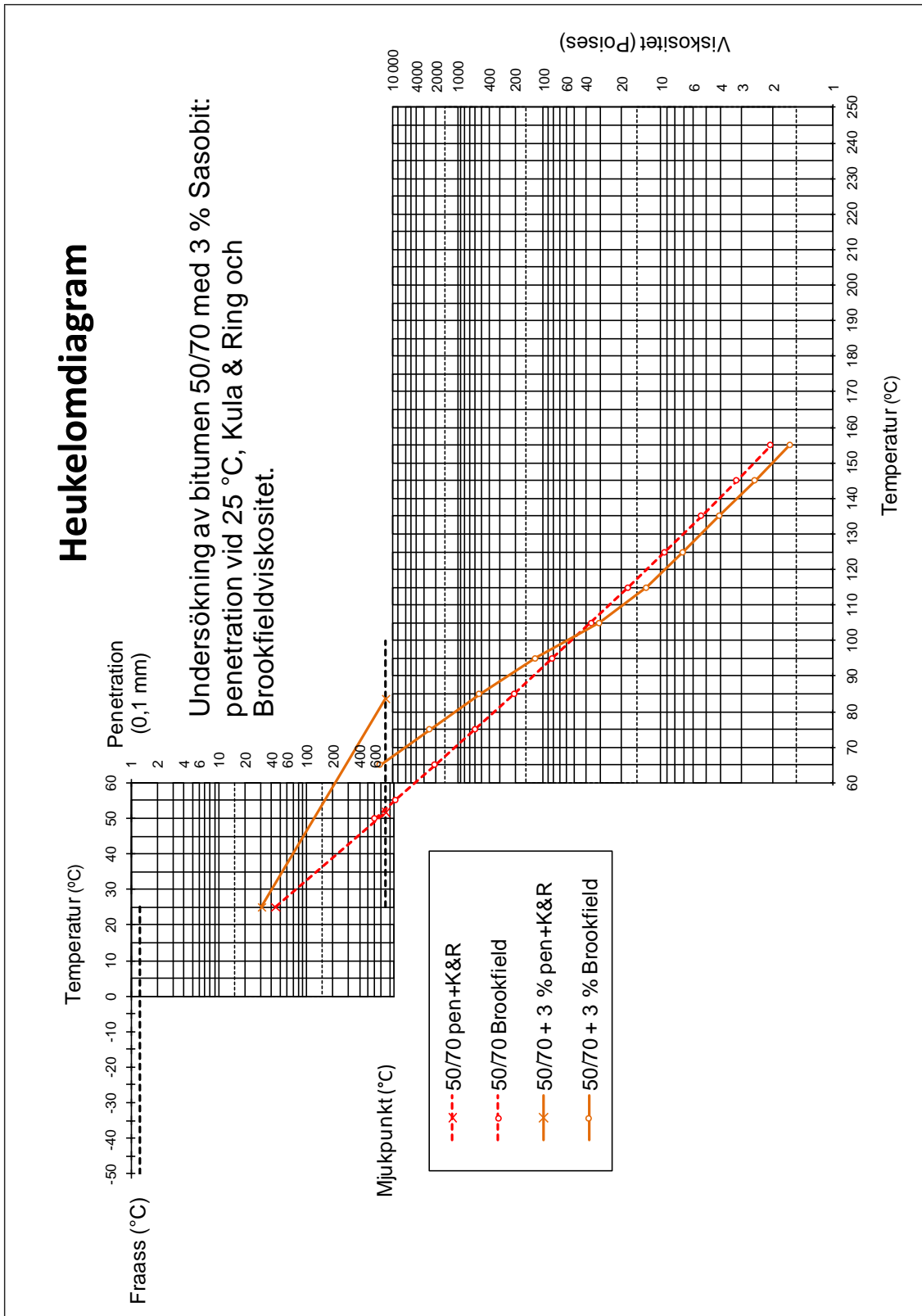
Tabell 7. Värden för 50/70 och 50/70 + 2

Test	50/70	50/70 + 2
Penetrationsvärde (dmm)	44	32
Mjukpunkt K & R (°C)	51,6	71,6
Mjukpunkt Heuk. (°C)	52,8	59,7
Viskositet 85 °C (cP)	20586	35009
Viskositet 135 °C (cP)	533	442
Viskositet 155 °C (cP)	206	178

4.3.1 Analys av 50/70 + 2

Effekten av vaxinblandningen ökar jämfört med 1 % och fördubblas utom i ett avseende. Uppmätt K & R ökar markant och värdet kan ifrågasättas ur methodsynpunkt. Tänkbara förklaringar tas upp i kapitel 4.11 om mjukpunktstestet. Penetrationen bekräftar också att blandningen är styvare än blandningen med 1 % Sasobit. Viskositeten vid de högre temperaturerna har också minskat, vilket är själva syftet med inblandning av Sasobit.

4.4 50/70 + 3



Figur 21. 50/70 och 50/70 + 3

Linjen för det vaxblandade bitumenet i figur 21 följer samma tendens som tidigare, d.v.s. att intervallet mellan linjerna ökar. Det ger differensen -32379 cP vid 85 °C, -122 cP vid 135 °C, -42 cP vid 155 °C. Uppmätt mjukpunkt ökar +32,0 °C medan beräknat värde från Brookfieldmätningarna ökar 13,4 °C. Penetrationsvärdet minskar med -13 dmm. Se tabell 8 för nya värden.

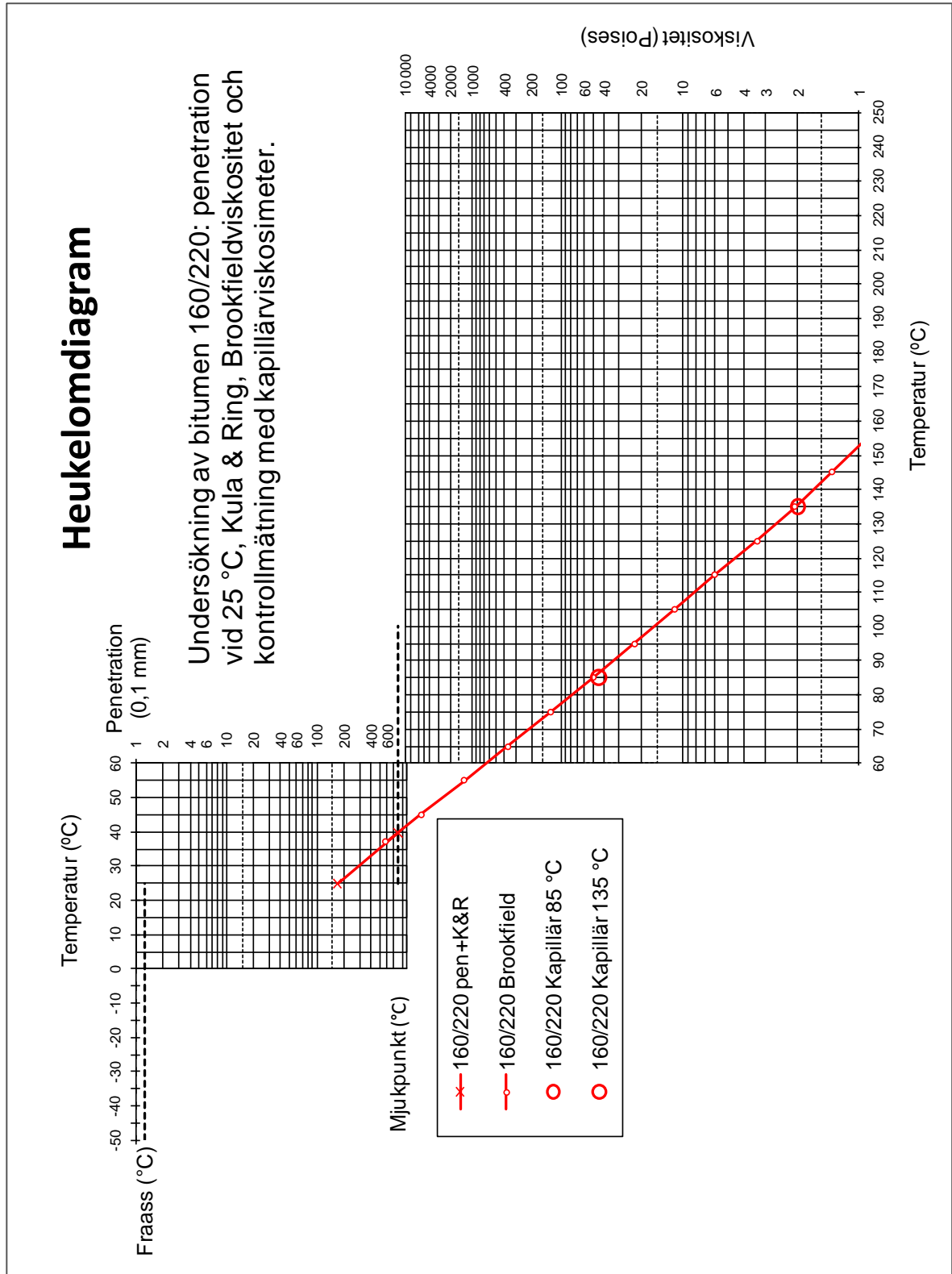
Tabell 8. Värden för 50/70 och 50/70 + 3

Test	50/70	50/70 + 3
Penetrationsvärde (dmm)	44	31
Mjukpunkt K & R (°C)	51,6	83,6
Mjukpunkt Heuk. (°C)	52,8	66,2
Viskositet 85 °C (cP)	20586	52965
Viskositet 135 °C (cP)	533	411
Viskositet 155 °C (cP)	206	164

4.4.1 Analys av 50/70 + 3

Mängden vax är större vilket gör att 50/70 + 3-linjen ökar avvikelserna från referenslinjen 50/70 jämfört med de lägre inblandningarna. Viskositeten är ca 2,5 gånger högre än vanligt 50/70 vid 85 °C. Vid temperaturen 135 °C, och 155 °C har viskositeten däremot minskat, ungefär 5 °C för samma viskositet. Syftet med den här typen av vax är att sänka viskositeten, vilket det också gör men uttryckt i temperatur är skillnaden ganska liten. Uppmätt K & R-värde ligger nu på en nivå som inte verkar trolig vid jämförelse med Brookfieldmätningarna. Här visar K & R-metoden sin begränsning när det gäller att bedöma bindemedel som inte enbart består av bitumen. Frågan tas upp i kapitel 4.1 om mjukpunktmetoden.

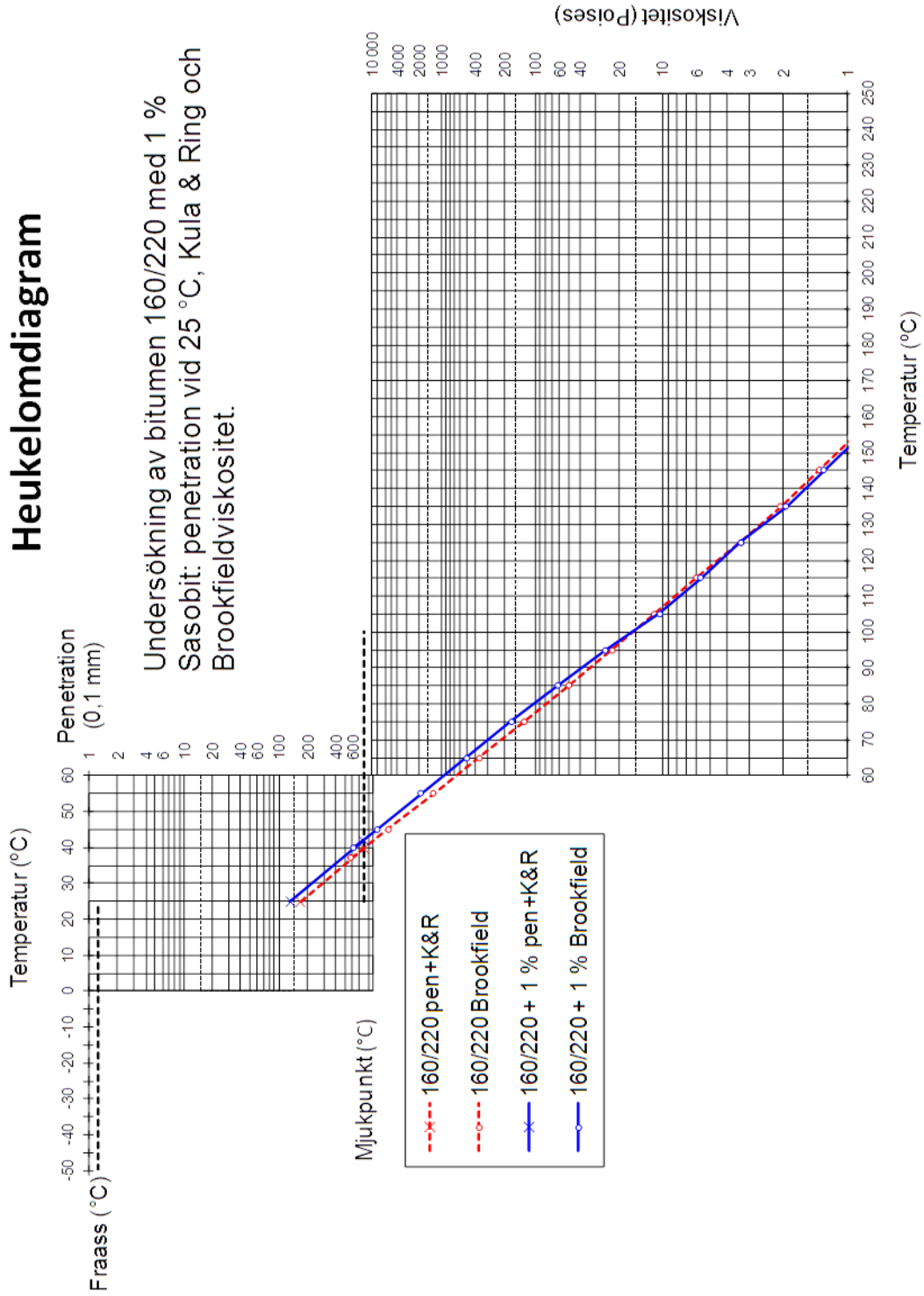
4.5 160/220 och 160/220 + 1



Figur 22. 160/220 inklusive punkter för kapillär mätning

Heukelomdiagram

Undersökning av bitumen 160/220 med 1 % Sasobit: penetration vid 25 °C, Kula & Ring och Brookfieldviskositet.



Figur 23. 160/220 och 160/220 + 1

4.5.1 160/220

Heldragen linje i figur 22 representerar vanligt 160/220, och skillnaderna mellan kapillär- och rotationsmetoden är 499 cP vid 85 °C, samt 6 cP vid 135 °C. De uppmätta mjukpunkterna och de enligt Heukelomdiagrammet bestämda skiljer försumbart.

4.5.2 160/220 + 1

Linjen i figur 23 följer 160/220 ganska nära men skiftar plats när vaxet smälter. Skillnaden för viskositeten vid temperaturerna 85 °C, 135 °C och 155 °C, är +1252 cP, -12 cP, samt -5 cP. Mjukpunkten ändrades +2,2 °C uppmätt och +2,5 °C beräknat. Penetrationsvärdet minskade med -37 dmm. De nya värdena kan avläsas i tabell 9.

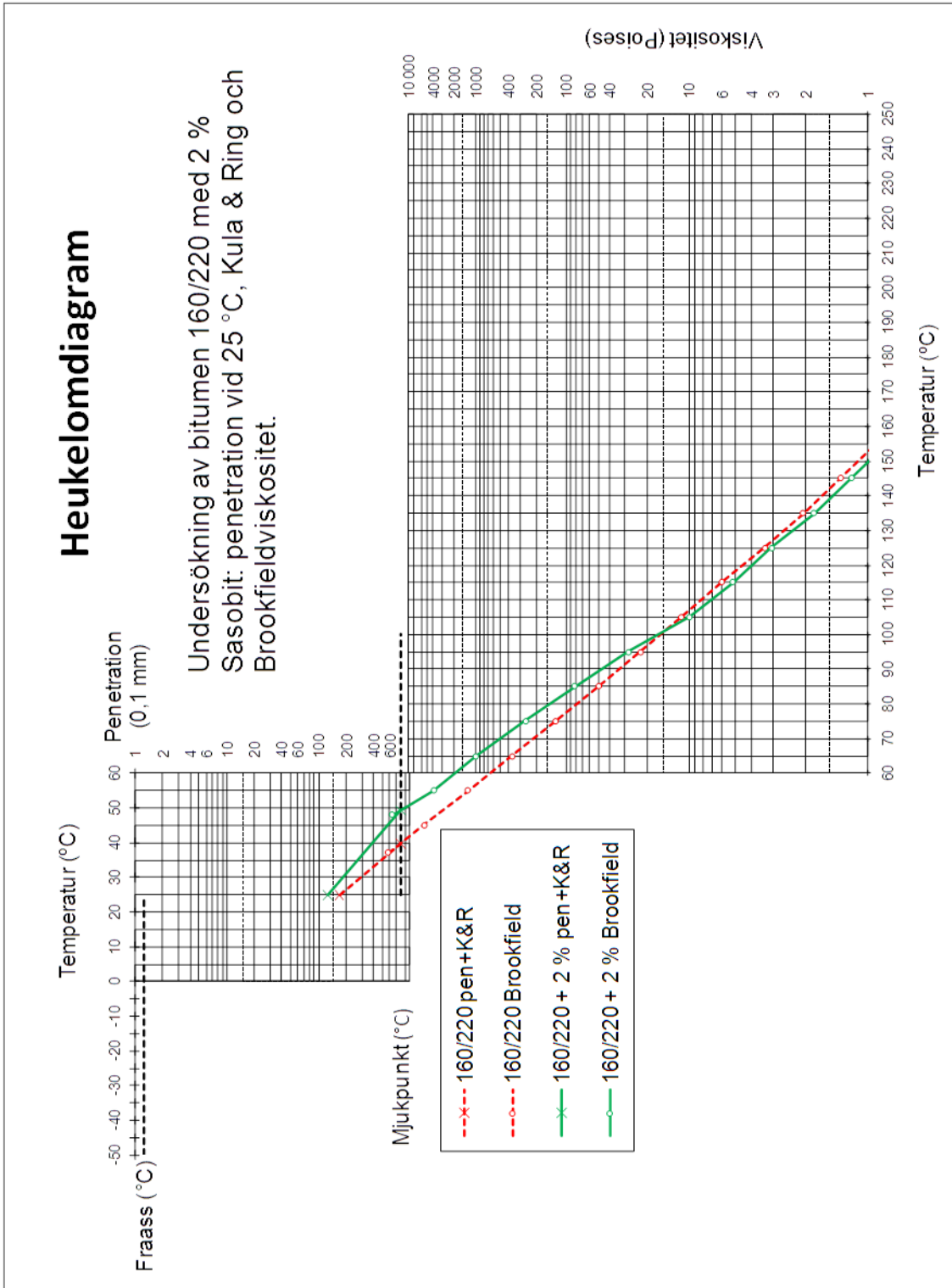
Test	160/220	160/220 + 1
Penetrationsvärde (dmm)	170	133
Mjukpunkt K & R (°C)	39,7	41,9
Mjukpunkt Heuk. (°C)	39,9	42,4
Viskositet 85 °C (cP)	4999	6251
Viskositet 135 °C (cP)	206	194
Viskositet 155 °C (cP)	91	86

Tabell 9. Värden för 160/220 och 160/220 + 1

4.5.3 Analys av 160/220 och 160/220 + 1

Tillsatsen av 1 % Sasobit har inte en stor betydelse på mätvärdena, även om det märks till exempel när vaxet smälter. Mjukpunktsdifferensen har inte heller här en stor avvikelse, vilket har samma förklaring som för 50/70 + 1. Den siffermässigt största förändringen ses i penetrationsvärdet, -37 dmm, men som framgår av Heukelomdiagrammet (figur 23) är den inte så stor i praktiken.

4.6 160/220 + 2



Figur 24. 160/220 och 160/220 + 2

Viskositeten för 160/220 + 2 har ökat med +3219 cP vid 85 °C, och minskat till -25 cP och -9 cP vid temperaturerna 135 °C, respektive 155 °C (figur 24 och tabell 10). Skillnaden mellan de uppmätta mjukpunkterna är 9,6 °C. Mjukpunkten har ökat med 9,6 °C för 160/220 +2 enligt Heukelomdiagrammet. Skillnaden i penetrationvärde är -58 dmm. Tabell 10 visar de nya värdena

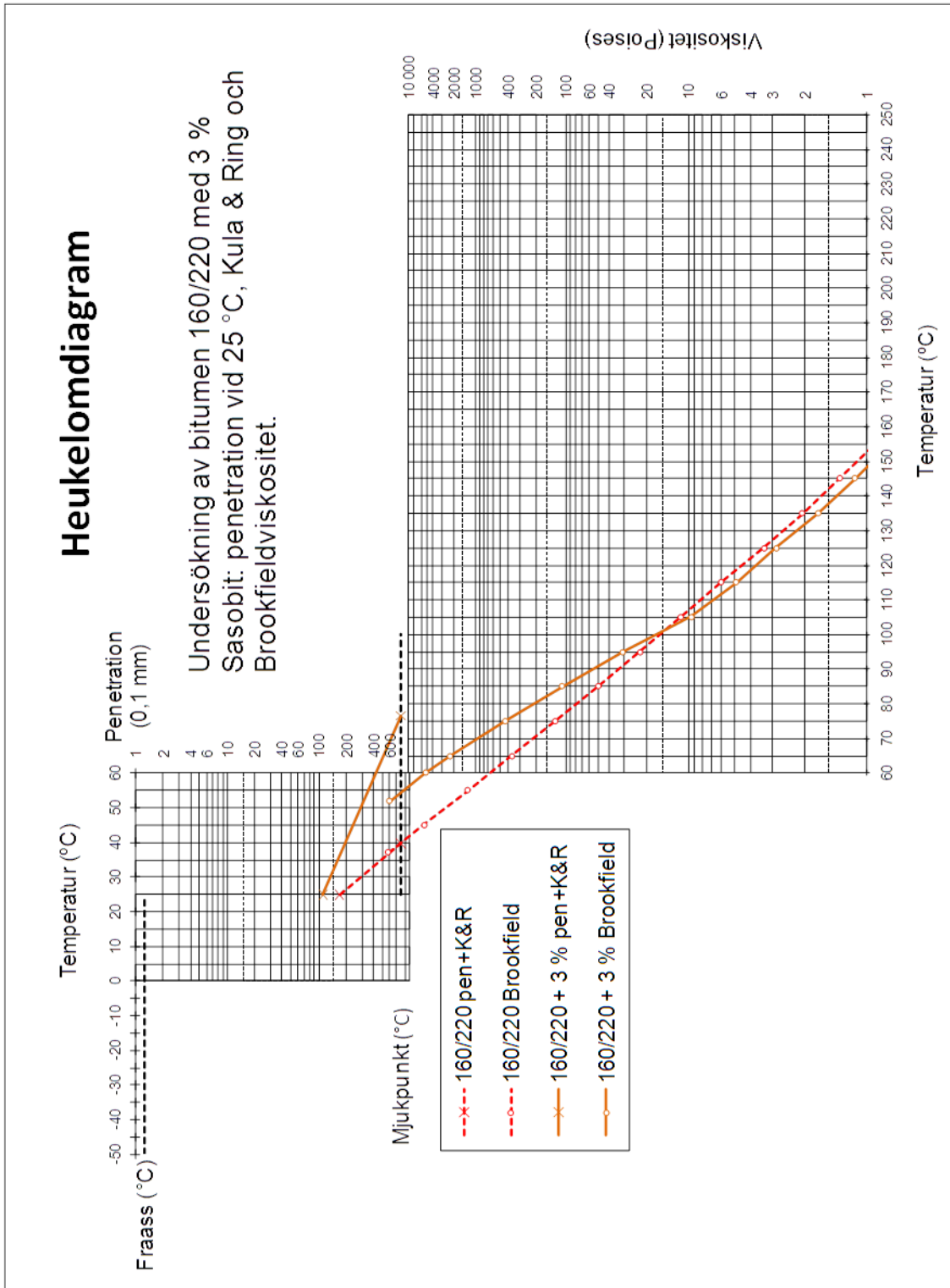
Tabell 10. Värden för 160/220 och 160/220 + 2

Test	160/220	160/220+2
Penetrationsvärde (dmm)	170	127
Mjukpunkt K & R (°C)	39,7	49,3
Mjukpunkt Heuk. (°C)	39,9	49,5
Viskositet 85 °C (cP)	4999	8218
Viskositet 135 °C (cP)	206	181
Viskositet 155 °C (cP)	91	82

4.6.1 Analys av 160/220 + 2

Differensen mellan mjukpunkterna för de två använda metoderna är mycket liten. Det finns ett frågetecken angående mätresultaten med Brookfield runt mjukpunktsnivån. Linjen följer inte de andra (se bilaga med alla värden inlagda). Det finns en möjlighet att vaxet inte hade lösts upp ordentligt, vilket påverkar K & R-värdet i båda mätningarna men inte vid mätningarna över smältpunkten. Tiden medgav inte ny preparering och omkörning av testet. Vaxets effekt på det uppmätta mjukpunktstestet har i det här fallet i alla fall inte riktigt slagit till som vid 3 % för 160/220 (se kapitel 4.8) och 2 % för 50/70 (se kapitel 4.3).

4.7 160/220 + 3



Figur 25. 160/220 och 160/220 + 3

3 % Sasobit i bitumen ger de största skillnaderna i viskositet vilket ses i resultatet av mätningarna (figur 25). Vid 85 °C skiljer viskositeten +5748 cP, -34 cP vid 135 °C, och -12 cP vid 155 °C. Skillnaden mellan de uppmätta mjukpunkterna är 26,8 °C. Mjukpunkten har ökat med 14,5 °C för 160/220 +3 enligt Heukelomdiagrammet. Skillnaden i penetrationvärde är -58 dmm. Tabell 11 visar de nya värdena.

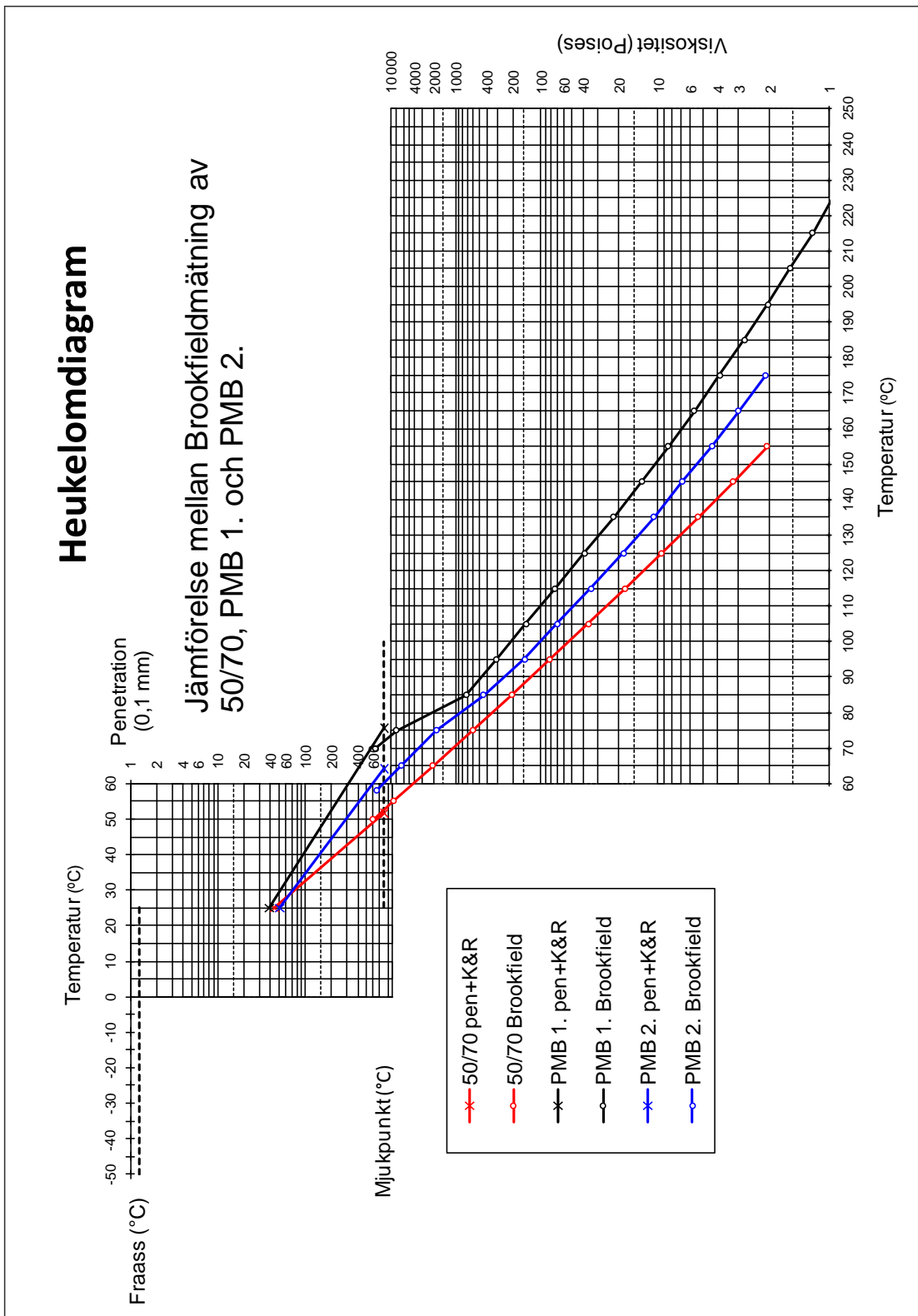
Tabell 11. Värden för 160/220 och 160/220 + 3

Test	160/220	160/220 + 3
Penetrationsvärde (dmm)	170	112
Mjukpunkt K & R (°C)	39,7	76,5
Mjukpunkt Heuk. (°C)	39,9	54,5
Viskositet 85 °C (cP)	4999	10747
Viskositet 135 °C (cP)	206	172
Viskositet 155 °C (cP)	91	79

4.7.1 Analys av 160/220 + 3

3 % vax ger den största förändringen. Viskositetsresultaten följer fortfarande sin ”bana”, och det ses i resultaten. Jämfört med 160/220 + 2, har mjukpunkten nu fått två relativt olika resultat, vilket också kan förklaras med att vaxet tydligare förändrar bitumenets egenskaper vid 3 %.

4.8 PMB 1 och 2



Figur 26. PMB 1 och 2

4.8.1 PMB 1

Mellan 50/70 och PMB 1 skiljer viskositeten +52910 cP vid 85 °C, 1670cP vid 135 °C och +641 cP vid 155 °C. Uppmätt mjukpunkt skiljer +24,1 °C medan beräknad ur Heukelomdiagrammet (figur 26) skiljer +18,6 °C. Penetrationsvärdet skiljer -6 dmm. I tabell 12 kan de nya värdena avläsas.

Tabell 12. Värden för 50/70 och PMB 1.

Test	50/70	PMB 1.
Penetrationsvärde (dmm)	44	38
Mjukpunkt K & R (°C)	51.6	75.7
Mjukpunkt Heuk. (°C)	52,8	71,4
Viskositet 85 °C (cP)	20586	73496
Viskositet 135 °C (cP)	533	2203
Viskositet 155 °C (cP)	206	847

4.8.2 PMB 2.

I tabell 12 kan en skillnad i viskositet mellan 50/70 och PMB 2 ses på +23062 cP vid 85 °C, +542 cP vid 135 °C och +231 cP vid 155 °C. Uppmätt mjukpunkt skiljer +12,6 °C medan beräknad ur Heukelomdiagrammet (figur 26) skiljer +7,4 °C. Penetrationsvärdet skiljer +7 dmm.

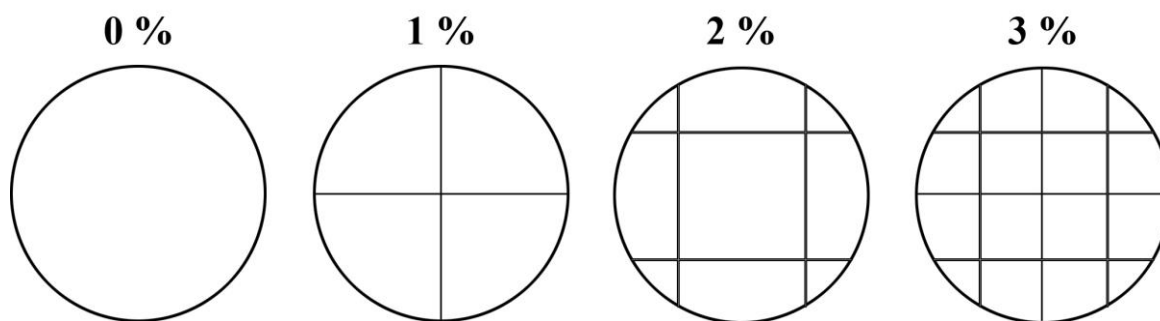
Tabell 13. Värden för 50/70 och PMB 2.

Test	50/70	PMB 2.
Penetrationsvärde (dmm)	44	51
Mjukpunkt K & R (°C)	51.6	64.2
Mjukpunkt Heuk. (°C)	52,8	60,2
Viskositet 85 °C (cP)	20586	43648
Viskositet 135 °C (cP)	533	1075
Viskositet 155 °C (cP)	206	437

4.8.3 Analys

PMB 1 och 2 är modifierade med samma mängd av samma polymer medan basbitumenet är 50/70 för 1 och 70/100 för 2. PMB 2 är alltså en "light"-version av PMB 1. Gemensamt för båda är att deras viskositetslinje planar ut i det flytande intervallet. Det krävs alltså mycket värme för att blanda och lägga ut asfalt med PMB. Ett av skälen till det högre värmebehovet skulle vara att polymeren behöver smältas ut ordentligt. För att undersöka detta ökades temperaturen till 225 °C, långt över en rimlig blandningstemperatur. Någon smältning, som borde visa sig som en sänkning av viskositeten, kunde inte upptäckas. Avvikelsen mellan uppmätt K & R och Heukelom finns också hos båda PMB men är betydligt mindre än i vaxfallet.

4.9 Mjukpunktstester



Figur 27. Illustration av bitumen blandat med Sasobit i ring

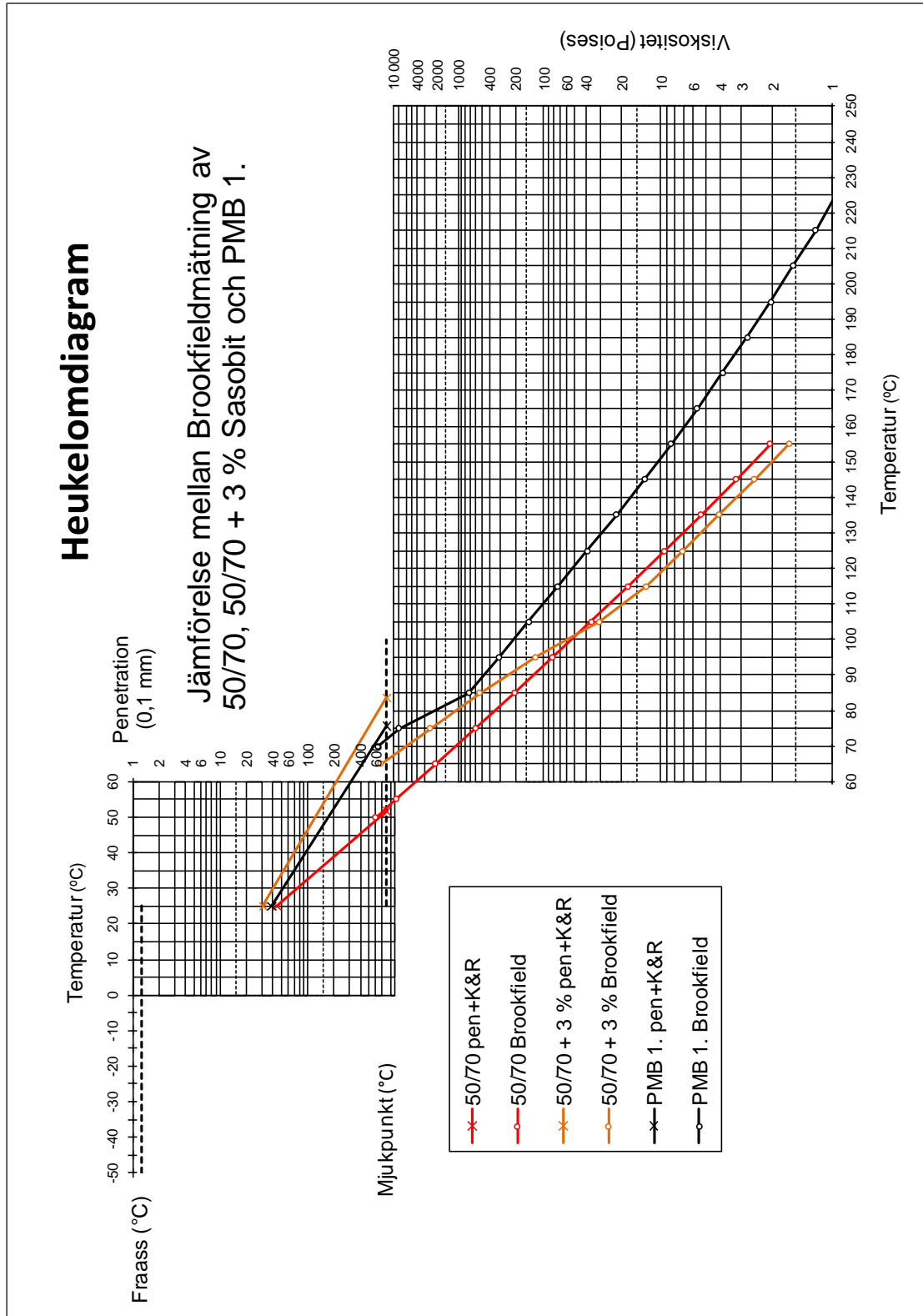
Kapitlet, inklusive figur 27, är endast en pedagogisk förklaring av beteendet för bitumen med vax i K & R-tester.

Enligt vår mätning för mjukpunkten av bitumen med graderingen 50/70 och 160/220, visar resultatet av Brookfielden ett överrenstämmande resultat med K & R-metoden. Däremot skiljer resultatet när vax tillsätts och till viss del också för PMB.

Vår teori är att vaxet kan ses som ett ”nät” i ringen, vilket hindrar kulan att tränga igenom. Högre koncentration av Sasobit resulterar i att det håller tillbaka bitumenet från att falla ned, även om bitumenet nått sin mjukpunkt. När vaxet blivit tillräckligt varmt och inte orkar hålla emot längre faller kulan igenom. Detta ger ett felaktigt intryck av styvhet om man jämför med vanligt bitumen. Det finns anledning att anta att Brookfield ger en riktigare bild av viskositeten med tanke på det sätt den arbetar. Vid mätningar av 160/220 bitumen med vaxinnehåll är resultatet likartat med undantag av 160/220 + 2, som kan ha en förklaring i utförandet. Resultaten från inblandning av 3 % vax är emellertid entydigt. Uppmätt K & R-värde kan i det fallet inte motsvara verkligheten utan har med själva testet att göra. Bitumen med vax förefaller påverka bitumenets vanliga beteende som K & R-testet helt och hållet bygger på. Resultaten från Brookfieldmätningarna ser betydligt mer trovärdiga ut. Samtliga resultat stöttar varandra och radar upp sig i en logisk ordning.

4.10 Jämförelser

4.10.1 50/70, 50/70 + 3 och PMB 1



Figur 28. Jämförelse av 50/70, 50/70 + 3 och PMB 1

50/70 med 3 % Sasobit och PMB 1 är två likvärdiga alternativ när de används i vägbeläggningar som kräver hög stabilitet, till exempel på högtrafikerade vägar. Erfarenheterna från fältet säger att inblandning av vax möjliggör sänkning av temperaturen medan det motsatta gäller för PMB. Det krävs 40 °C mer för att göra PMB 1 lika lättflytande som 50/70 och 45 °C jämfört med bitumen med 3 % vax (figur 28). Det här intygas också från produktionen att PMB i allmänhet och i synnerhet PMB 1 är mycket svårhanterligt och värmekrävande. Förespråkare för PMB menar att det är värt priset för den högre kvalitet som uppnås. Andra hävdar att det finns alternativ som ger tillräckligt bra kvalitet, till exempel Sasobit, men som är betydligt mindre värmekrävande (Tyllgren. 2011b). Tabell 14 sammanställer temperaturer vid olika moment.

Tabell 14. Sammanställning av temperaturer vid olika steg

Viskositet (cP)	Temperatur (°C)		
	50/70	50/70 + 3	PMB 1.
200 (blandning)	155*	150	195
1000 (utläggning)	125	120	150
5000 (packning)	100	100	120

*: Extrapolerat värde från Heukelomdiagram

4.10.2 Spindeltyp

För att säkerställa vilka faktorer som påverkar resultatet gjordes en jämförelse av de variabler som går att påverka, så som spindel-typ och varvtal (och därmed indirekt även torque och shear rate). Jämförelsen har gjorts med penetrationsbitumen av kvalitet 160/220, (utan vaxinnehåll) vid tre temperaturer (115 °C, 125 °C och 135 °C). I tabell 15 visas resultatet av mätningarna.

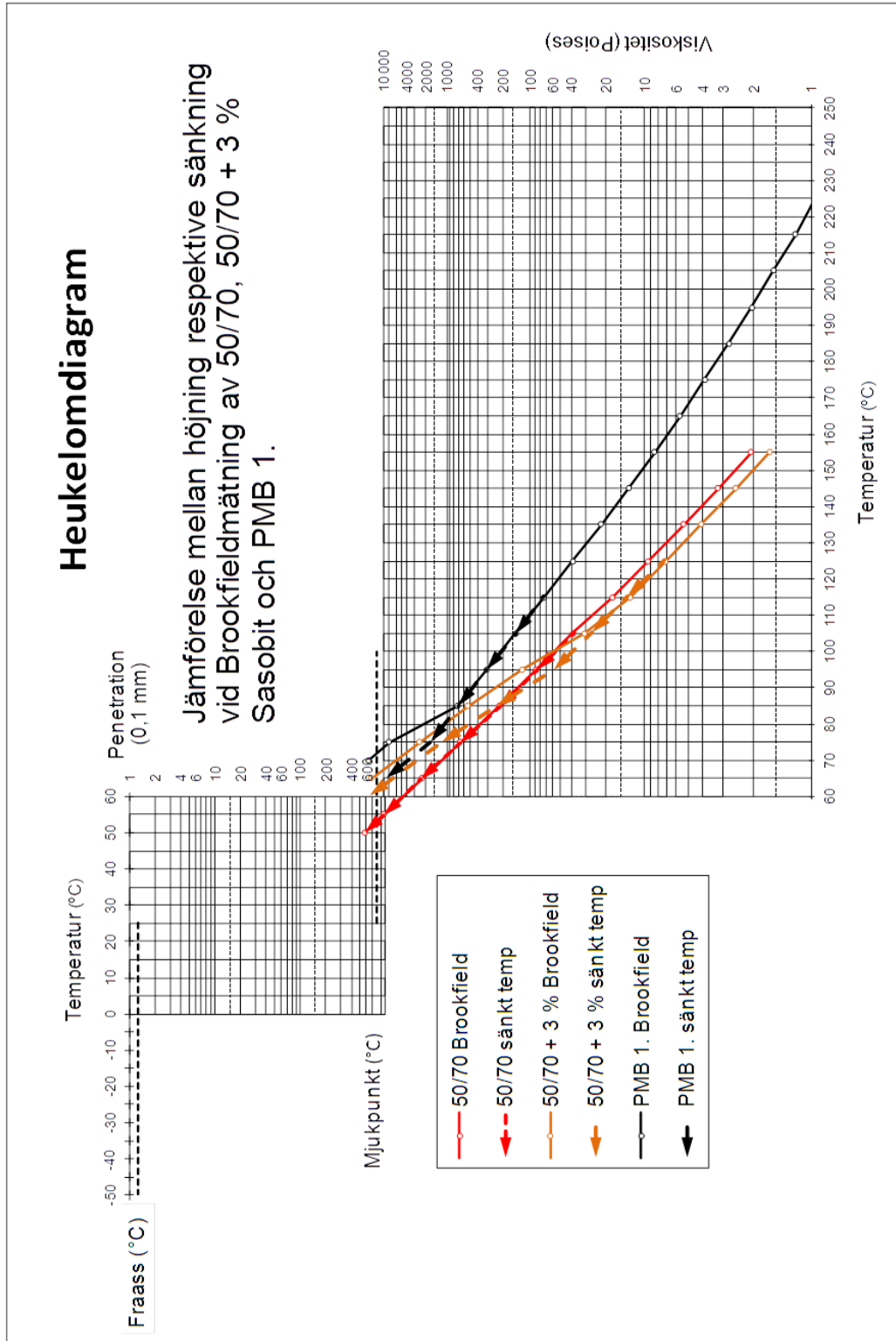
Som tabell 15 åskådliggör uppvisas inte någon stor skillnad i viskositet, utan värdena visar istället på en relativ likhet. Då bitumen vid de här temperaturerna beter sig som en newtonsk vätska är resultatet inte oväntat.

Tabell 15. Mätning med olika spindeltyper

Temperatur (°C)	115	125	135	115	125	135
RPM	87	150	200	200	200	200
Viskositet (cP)	560	326	201	605	353	220
Spindel	21	21	21	27	27	27
Bitumenkvalitet	160/220					

4.10.3 Mätriktning

Mätningar genomfördes i huvudsak genom uppvärmande mätning. Kompletterande tester gjordes också för att se om resultatet blev detsamma i motsatt riktning.

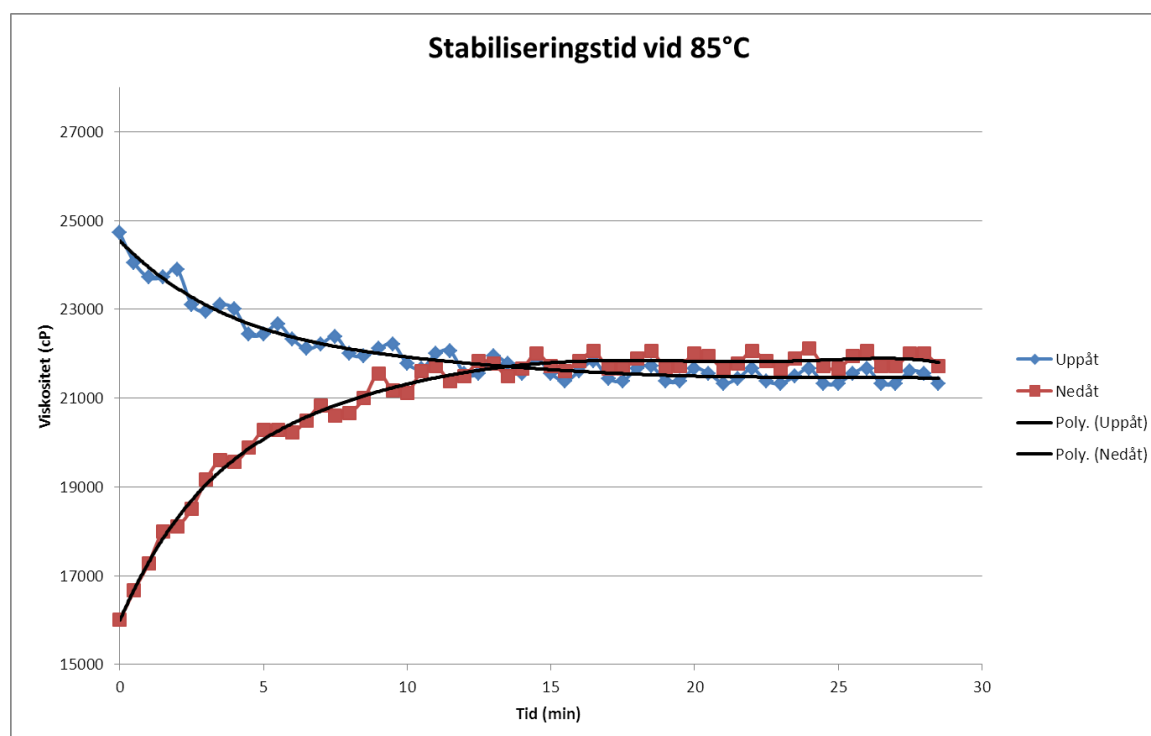


Figur 29. Olika mätning

I temperaturintervallet där alla komponenter är lättflytande och tillståndet kan kallas ”newtonskt” tycks mätriktningen inte ha någon inverkan på resultaten. Detta illustreras i figur 29. Rent bitumen tycks inte påverkas alls ned till mjukpunktsnivån. Vaxblandningen fortsätter en bit till innan den viker av uppåt som effekt av att vaxet stelnar. Det skiljer 5-6 °C som mest för att minska till 3-4 °C mot slutet av mätningen, alltså vid mjukpunkten. PMB som alltså inte har någon komponent med smältpunkt liknande vaxet fortsätter sin kurva på ett kontinuerligt sätt utan hopp ner mot mjukpunkten, som ligger ungefär 13 °C under den uppmätta och 8 °C under Brookfieldvärdet vid uppvärmning. Antingen handlar det om hysteresiseffekt eller så har det med sättet att hantera Brookfieldutrustningen att göra. Det finns skäl att överväga om inte mätriktningen alltid borde vara i sänkriktningen eftersom tillverkningsprocessen av asfalt är ett avsvalnade förlopp.

4.10.4 Stabiliseringstid vid olika mätriktning

Figur 30 visar stabiliseringstiden för penetrationsbitumen 50/70 vid en konstant temperatur (85 °C), vid två olika mätriktningar. För att ytterligare visa sambandet, illustreras också processen med trendlinjer. Resultatet uppvisar ett i det närmaste oberoende av mätriktning. Vid stabilt tillstånd är skillnaden endast cirka 2 %

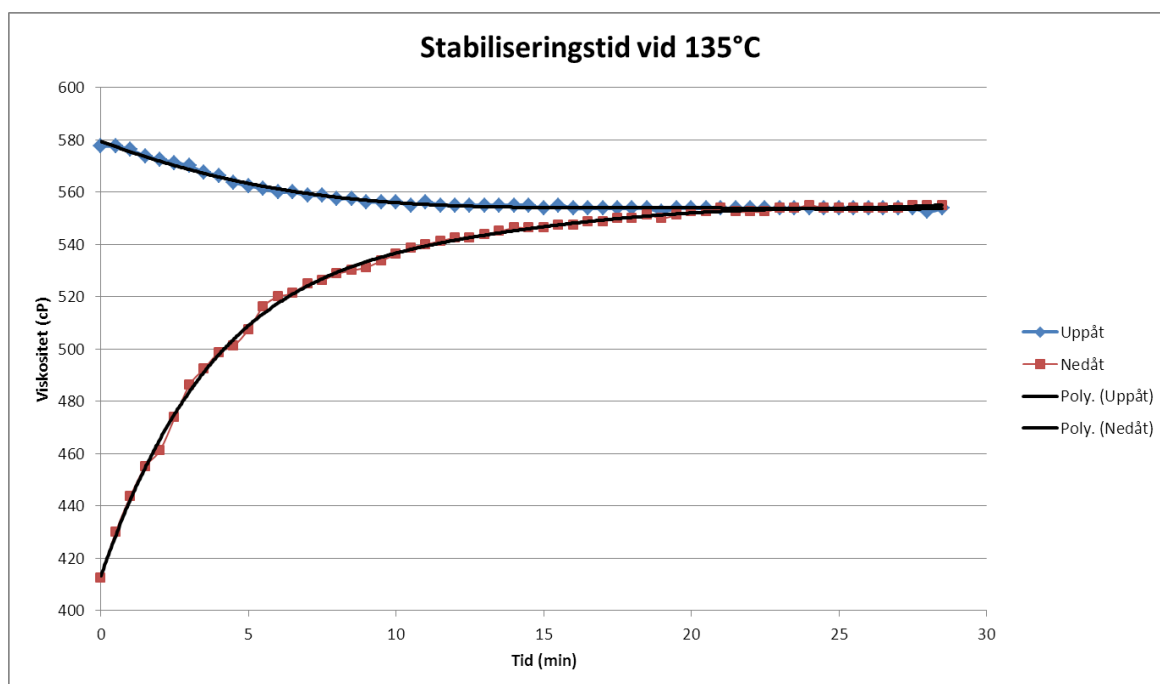


Figur 30. Stabiliseringstid penetrationsbitumen 50/70 vid olika mätriktning

Mätning gjordes också vid 135 °C, vilket figur 31 illustrerar. I likhet med föregående mätning uppvisas också här en ytterst marginell avvikelse i

viskositet, vid olika mätriktning. Skillnaden, vilken är mindre än 1 % vid stabilt tillstånd, kan anses vara försumbar.

Resultatet vid 135 °C skiljer dock något från mätning vid 85 °C, i form av utplaning. Då uppvärmade riktning tillämpades, uppvisades en något flackare kurva under stabiliseringstiden. Bitumenet närmade sig den slutgiltiga viskositeten relativt tidigt, för att sedan genomgå en betydligt långsammare stabiliseringsprocess. Vid avsvalnande mätriktning påvisades en högre kontinuitet, samt en något kortare period vid stabilt tillstånd.



Figur 31. Stabiliseringstid för penetrationsbitumen 50/70 vid olika mätriktning

4.10.5 Kapillär- och rotationsviskosimeter

Viskositetsmätningar vid två givna temperaturer har även gjorts med kapillärviskosimeter, för att kunna jämföras med resultat från rotationsviskosimetern. Nedan presenteras mätningar (tabell 16) för penetrationsbitumen 50/70 och 160/220, vid 85 °C och 135 °C.

Den största relativa skillnaden går att finna i mätning av 160/220 vid 85 °C; cirka 10 %. I övriga mätningar är skillnaden endast cirka 3-6 %. Det motsvarar en temperaturändring på 1,4 °C.

Tabell 16. Jämförelse av kapillär- och rotationsviskosimeter

Bitumenkvalitet	Kapillär (cP)		Brookfield (cP)	
	Viskositet 85 °C	Viskositet 135 °C	Viskositet 85 °C	Viskositet 135 °C
50/70	20000	500	20586	533
160/220	4500	200	4999	206

4.11 Jämförelse av Sasols uppgifter och eget uppmätta

Nedanstående värden är de som Sasol själva anger, för penetrationsbitumen 50/70 samt motsvarande med 3 % Sasobit-inblandning. I tabellen presenteras också resultatet av egna mätningar av samma bitumentyper. Mjukpunkter har angetts både i mätningar med K & R, samt som mätning med Brookfield viskosimeter med avläsning i Heukelomdiagram.

Tabell 17. Jämförelse av tillverkarens angivna uppgifter och uppmätta värden (Sasol)

Namn	SmB 35	B50/70	Egen 50/70 + 3	Egen 50/70
Basbitumen	50/70	50/70	50/70	50/70
Sasobit-innehåll (%)	3	0	3	0
Penetration (dmm)	30-50	50-70	31	44
Mjukpunkt K & R (°C)	75-85	48-54	83,5	51,6
Mjukpunkt Heuk. (°C)	-	-	66	52,8

Sasol's angivna penetrationsvärde för SmB 35 stämmer relativt bra överens med de värden vi själva har mätt upp för 50/70 + 3. Däremot finns en viss skillnad i specificerat och uppmätt värde. Det beror på att bitumenprovet från tillverkaren helt enkelt var hårdare än normalt.

Sasol anger mjukpunkten, med K & R-metoden, för det vaxblandade bitumenet till 75-85 °C, vilken också kan bekräftas genom våra egna mätningar. Det blir ett annorlunda resultat med Brookfieldviskosimeter i temperaturintervallet 65-155 °C inlagt i ett Heukelomdiagram. Mjukpunkten anses motsvara ungefär 1,3 miljoner cP. Det avlästa ur diagrammet blir istället cirka 66 °C. Att det skiljer nästan 18 °C beror på att K & R och Brookfield mäter under helt olika förhållanden. Brookfield är en dynamisk metod medan K & R är statisk, vilket gör den känslig för egenskaper som avviker från bitumen, till exempel ämnen med smältpunkt (se kap 4.9).

Med bitumen utan inblandning av vax eller andra ämnen får man samma eller mycket näraliggande resultat med K & R respektive med Brookfield på nivån 1,3 miljoner cP. Skillnader på 0,5-1,5 °C är försumbara med tanke på acceptabel precision i K & R och kan förklaras genom exempelvis olika handhavande eller olika prov (se tabell 5)

5 Diskussion och förslag till fortsättning

Vid examensarbetets början var tanken att studien skulle utreda ett flertal viktiga faktorer i hanterbarheten av asfalt. Arbetet kom till största delen att handla om bindemedlets och olika bitumenblandningars viskositet vid olika temperaturer. Det fanns planer på undersökning av asfaltmassa både på laboratorium och i full skala. Att arbetet riktades så mycket på just bindemedlet baserades på rapporten från NCAT, där bindemedlet och temperaturen angavs som de mest påverkande faktorerna för hanterbarheten.

Första steget i examensarbetet, vilket var att lära sig hantera Brookfield-maskinen på ett korrekt sätt, var betydligt mer tidskrävande än väntat. Det tog åtskilliga dagar och försök att komma underfund med ett korrekt handhavande. Det var emellertid en lärorik process och förbättringsarbetet pågick hela tiden till den handledning som bifogas examensarbetet. Det ingick egentligen inte i det ursprungliga examensarbetet men kom med ”på köpet” som en bonus.

Något som ytterligare försenade arbetsgången var en felaktig leverans av en spindel. En av de två spindlarna som skulle användas i försöken var av fel typ, vilket gjorde att tid gick förlorad i starten. Den andra spindeln var å andra sidan av ett slag som normalt inte används för bitumen, vilket gjorde att man kunde mäta styva ämnen på K & R-nivån. De senare var ett stort genombrott för mätmetoden.

Automatisering av mätprocessen diskuterades och undersöktes eftersom mätningarna var mycket tidsödande. Problemet är att bitumen behöver tid för att stabilisera sig efter varje inställt varvtal och den processen gick inte att automatisera med tillgänglig programvara. En enstaka temperaturnivå kan automatiseras, som i studien av stabiliseringstiden, men inte en serie av temperaturer. En automatisering skulle minska behovet av övervakning. Det är därför ett ämne som lämpar sig för fortsatta studier.

Olika typer av bitumen visade sig vara olika tidskrävande för stabilisering. Exempelvis polymermodifierat bitumen var betydligt mer tidskrävande, jämfört med vanligt 50/70-bitumen. Att tiden skilde markant försvarade tidsplaneringen.

En stor fördel med Brookfield viskosimeter var mängden information som varje mätserie producerade. Fler mätningar kunde trots allt utföras under kortare tid jämfört med till exempel en kapillärviskosimeter, vilket gjorde det möjligt att mäta med korta temperatursteg. En annan fördel var att

mätningarna var enkla att förbereda. Det enda som behövdes var ett teströr med ca 10 ml bitumen.

Metoden gav direkt trovärdiga resultat som stämde med andra mätmetoder. Resultaten av tillsatsmedlet visade på förväntad effekt. Vid projektets start antogs en lägre viskositet vid inblandning av vax, vilket också har visat sig stämma väl överens med uppmätt resultat. Det är ett positivt resultat eftersom vaxets viktigaste syfte är att sänka viskositeten, vilket kan leda till att temperaturen kan sänkas vid exempelvis blandning och utläggning. Om det gäller i praktiken har inte kunnat fastställas i det här examensarbetet. Effekterna på hållfastheten återstår också att undersökas.

Enligt mätningarna av viskositet kan temperaturen sänkas med ungefär 5 °C som effekt av inblandat vax. Företaget Sasol som tillverkar Sasobit och erfarenheter från Danmark nämner sänkningar på 20-30 °C. Det verkar alltså finnas andra faktorer som påverkar hanterbarheten, vid inblandning av vax. Även det lämpar sig för fortsatta studier.

Brookfield viskosimeter och resultaten presenterade i ett Heukelom-diagram kan ersätta K & R-metoden, som visat sig opålitlig med bindemedel som inte enbart består av bitumen.

Utan någon egentlig eftertanke genomfördes mätningar med ökande temperatur. Begränsade försök gjordes med sjunkande temperatur. Med rent bitumen sågs ingen skillnad men med vax och PMB fick man olika resultat i det lägre temperaturregistret. Eftersom asfalttillverkning sker under avsvälning kanske mätningarna ska ske i den riktningen. Det är något som fortsatta studier kan ägna sig åt. Betydelsen av varvtal och vridmoment borde också undersökas närmare.

Brookfieldmätarens viskositetsvärden stämmer väl överens med kapillärmätningarna och andra uppgifter, särskilt med tanke på att varje mätvärde bara gjordes en gång utan upprepningar eller styrkningar av avvikande resultat. Tiden medgav inte detta men visar samtidigt på en relativt god precision och reproducerbarhet. Det är något som borde tas upp i fortsatta studier. Valet av spindel tycks inte vara avgörande så länge man håller sig inom spindelns kapacitetsområde.

Identifierade felkällor är främst rena handhavandefel, som mätning innan tillståndet stabiliserats, fel i temperaturregleringen och fel volym i teströret. Dessa felkällor kan minimeras med tydliga anvisningar och automatisering.

Referenslista

Bok och rapport

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

Jönsson, G. (1998) Grundläggande fysik – om gaser och vätskor. Studentlitteratur, Lund.

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

Tyllgren, P. (2010) Föryngring av returafalt med miljöanpassade tillsatsmedel. Projektnummer SBUF 12230.

Intervjuer

Tyllgren (2011b) Februari-juni 2011

Internetkällor

Gudimettla m.fl. (2003) Gudimettla, J; Cooley, L; Brown, E. Workability of hot mix asphalt.

<http://www.eng.auburn.edu/files/centers/ncat/reports/2003/rep03-03.pdf>.

Nedladdad 2011-05-30

NE (2011) Polymer

<http://www.ne.se/lang/polymer>. Nedladdad 2011-05-30.

NVF (2009) Miljöanpassade beläggningar

<http://www.tankgruppen.nu/getfile.ashx?cid=57568&cc=3&refid=2>

Nedladdad 2011-06-07

Nynäs (2003) Nynäs guide till polymermodifierat bitumen

http://www.nynas.com/templates/Page____10427.aspx?epslanguage=SV.

Nedladdad 2011-05-30

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

<http://www.sasolwax.com/sasolwaxmedia/Downloads/Bitumen+Modification/Sasobit+since+1997.pdf>. Nedladdad 2011-05-30

Tyllgren, P. (2011c) Föryngrad returafalt för ökad återvinning.
Transportforum, VTI, Linköping.
http://www.vti.se/templates/Page_____15460.aspx Nedladdad 2011-06-08.

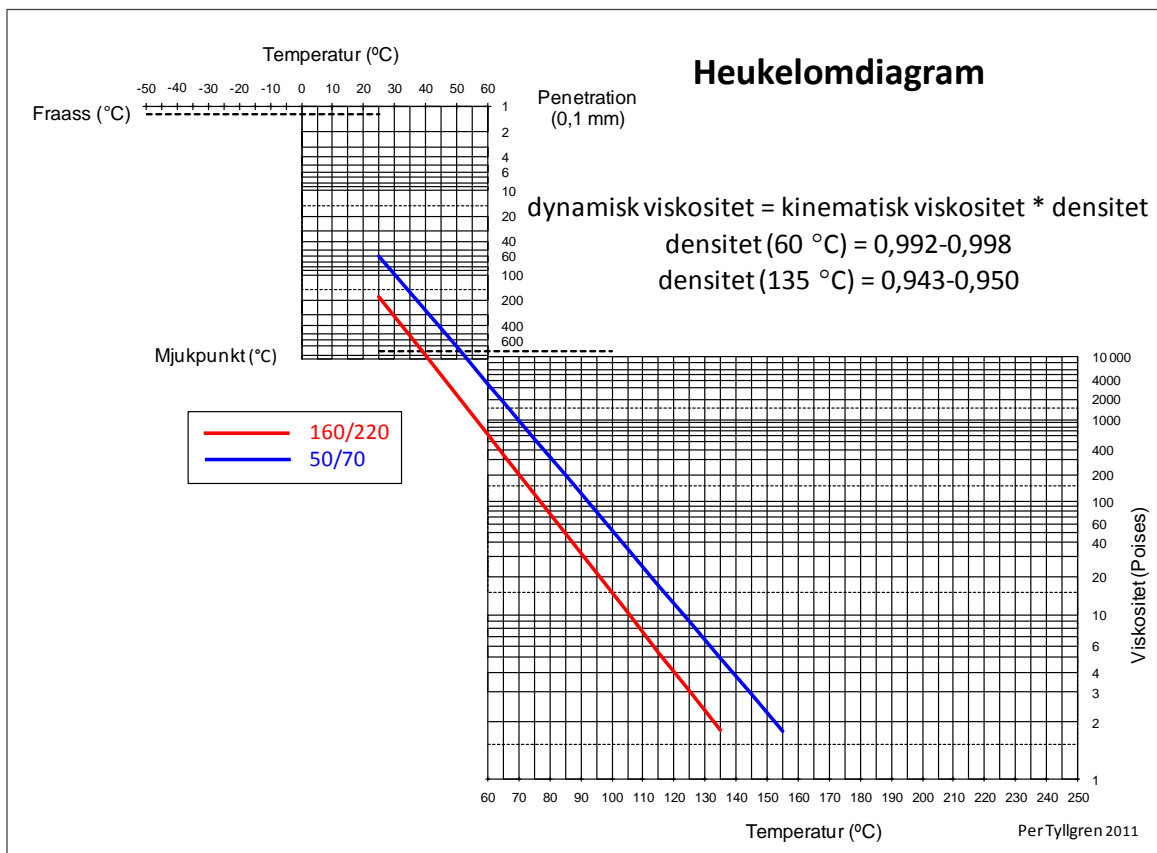
Vetenskaplig artikel

van Steen&Claeys (2008) Fischer-Tropsch Catalysts for the Biomass-to-liquid
Process
<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ceat.200800067/pdf>. Nedladdad
2011-06-02.

Förteckning bilagor

- Bilaga 1 Sammanställning av rådata (inkl. Heukelom-diagram)
- Bilaga 2 Rådata 50/70
- Bilaga 3 Rådata 160/220
- Bilaga 4 Rådata Polymermodifierat
- Bilaga 5 Rådata Stabiliseringstid vid uppvärmning och avsvälning
- Bilaga 6 Rådata mjukpunkts- och penetrationstest
- Bilaga 7 Rådata jämförelse av spindlar
- Bilaga 8 Manual Brookfield viskosimeter

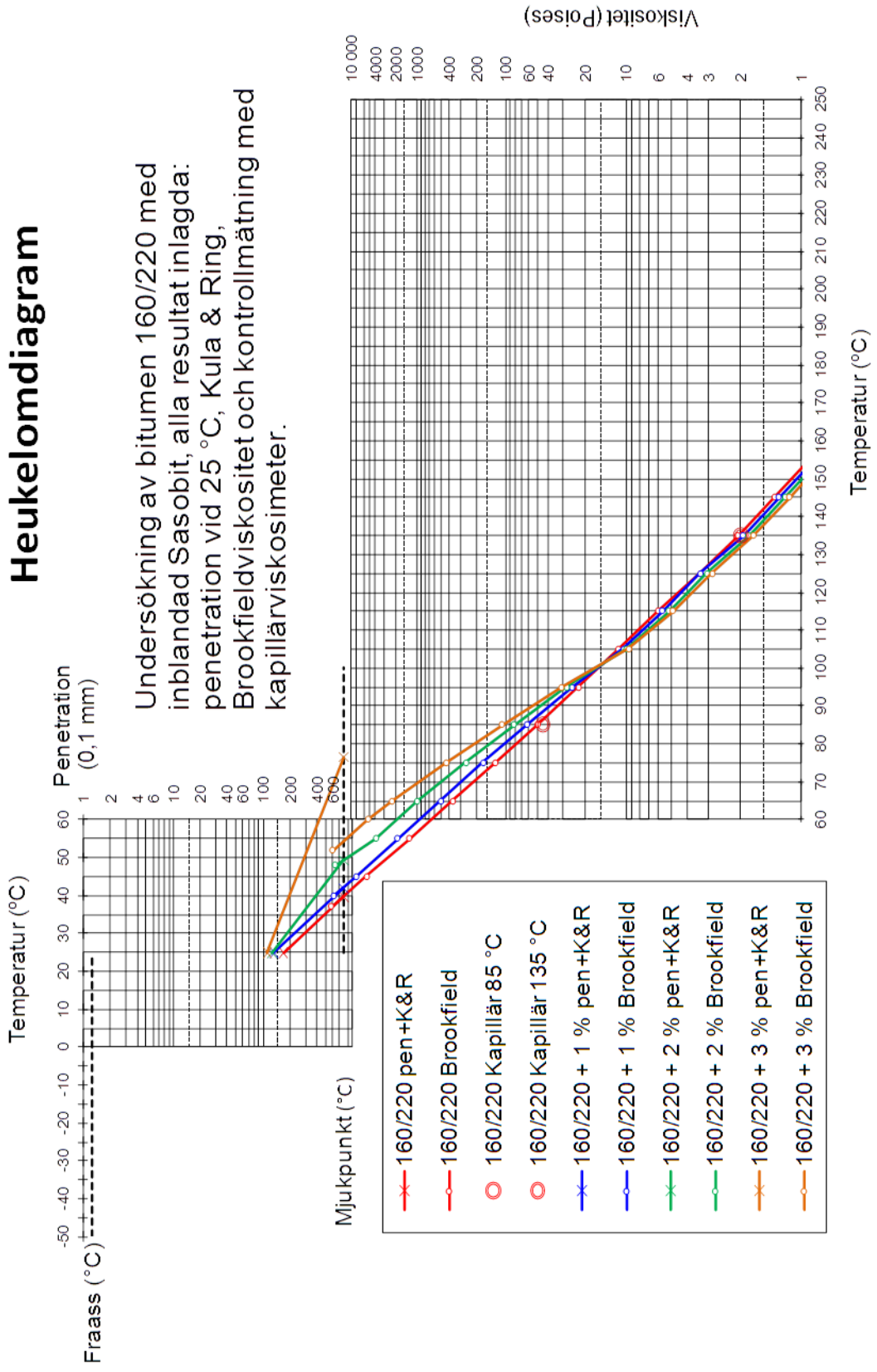
Bilaga 1



		Normala mätvärden	
Test		160/220	50/70
Penetration, 0,1 mm		180	60
Kula & Ring, °C		39	51
Viskositet, cPoise	60 °C	63000	350000
	65 °C	35000	181000
	75 °C	12250	55500
	85 °C	4850	19700
	95 °C	2150	7900
	105 °C	1045	3500
	115 °C	545	1700
	125 °C	305	890
	135 °C	180	496
	145 °C	-	290
155 °C	-	178	

Heukelomdiagram

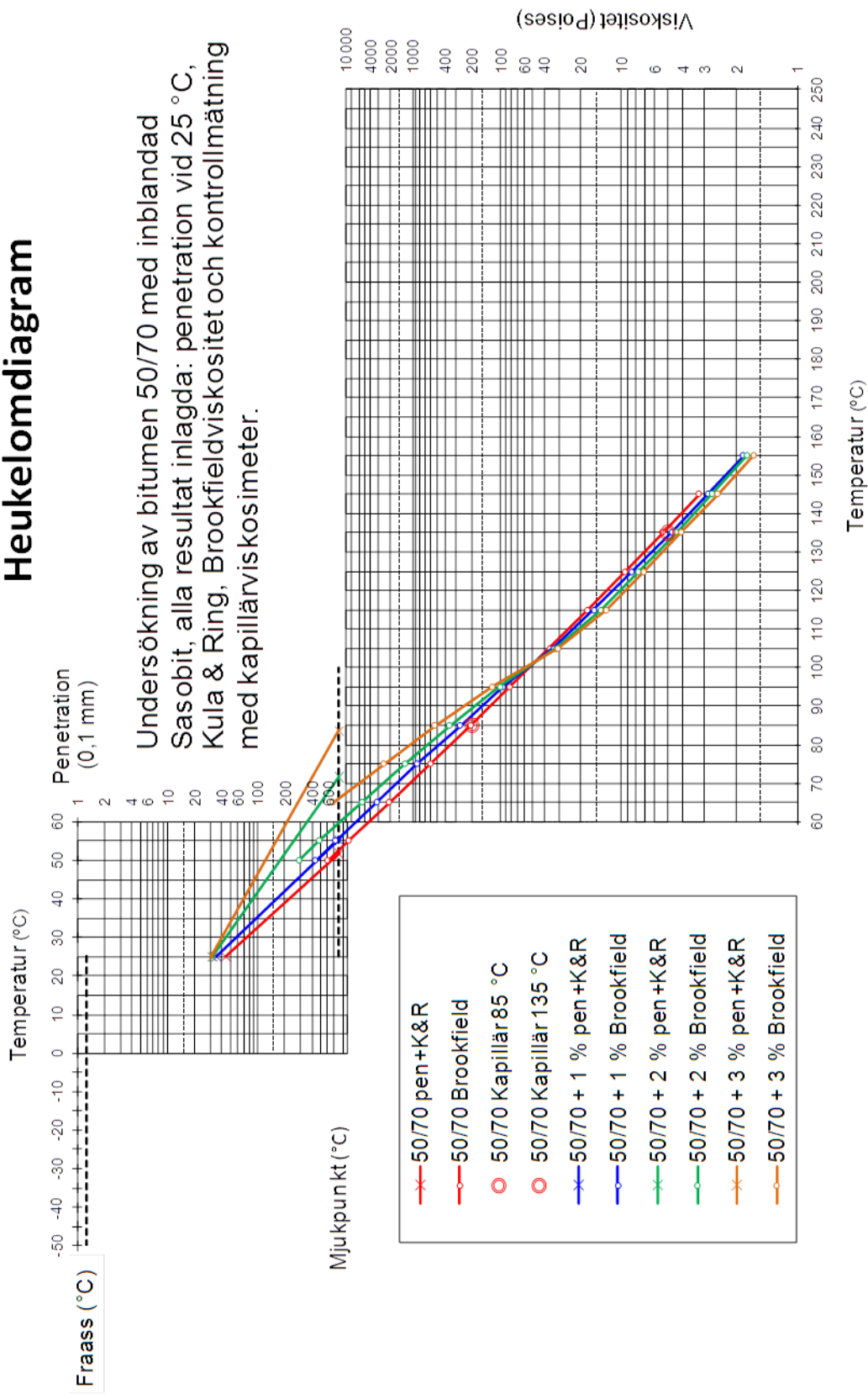
Undersökning av bitumen 160/220 med inblandad Sasobit, alla resultat inlagda: penetration vid 25 °C, Kula & Ring, Brookfieldviskositet och kontrollmätning med kapillärviskosimeter.



		Mätvärden			
Test		160/220	+ 1 %	+ 2 %	+ 3 %
Penetration 25 °C, 0,1 mm		170	133	127	112
Kula & Ring, °C		39,7	41,9	49,3	76,5
Brookfieldviskositet, cPoise	Brookfield K&R, °C	39,9 ^{*)}	42,4 ^{*)}	49,5 ^{*)}	54,5 ^{*)}
	Starttemperatur °C	37	40	48	52
	Startvärde, cPoise	217000 0	195000 0	1830000	206000 0
	45 °C	547000	805000	-	-
	55 °C	127000	187000	395000	-
	60 °C	66500 ^{*)}	95500 ^{*)}	194000 [*])	517000
	65 °C	36500	61300	99900	223000
	75 °C	12600	16900	26000	43200
	85 °C	5000	6250	8200	10700
	95 °C	2250	2510	2800	3090
	105 °C	1120	1040	985	958
	115 °C	607	567	516	489
	125 °C	335	333	305	287
	135 °C	206	194	181	172
	145 °C	135	128	119	113
155 °C	91	86	82	79	
Kapillärvisko sitet, cPoise	85 °C	4470	-	-	-
	135 °C	200	-	-	-

^{*)} Skattat värde från Brookfieldmätning.

Heukelomdiagram

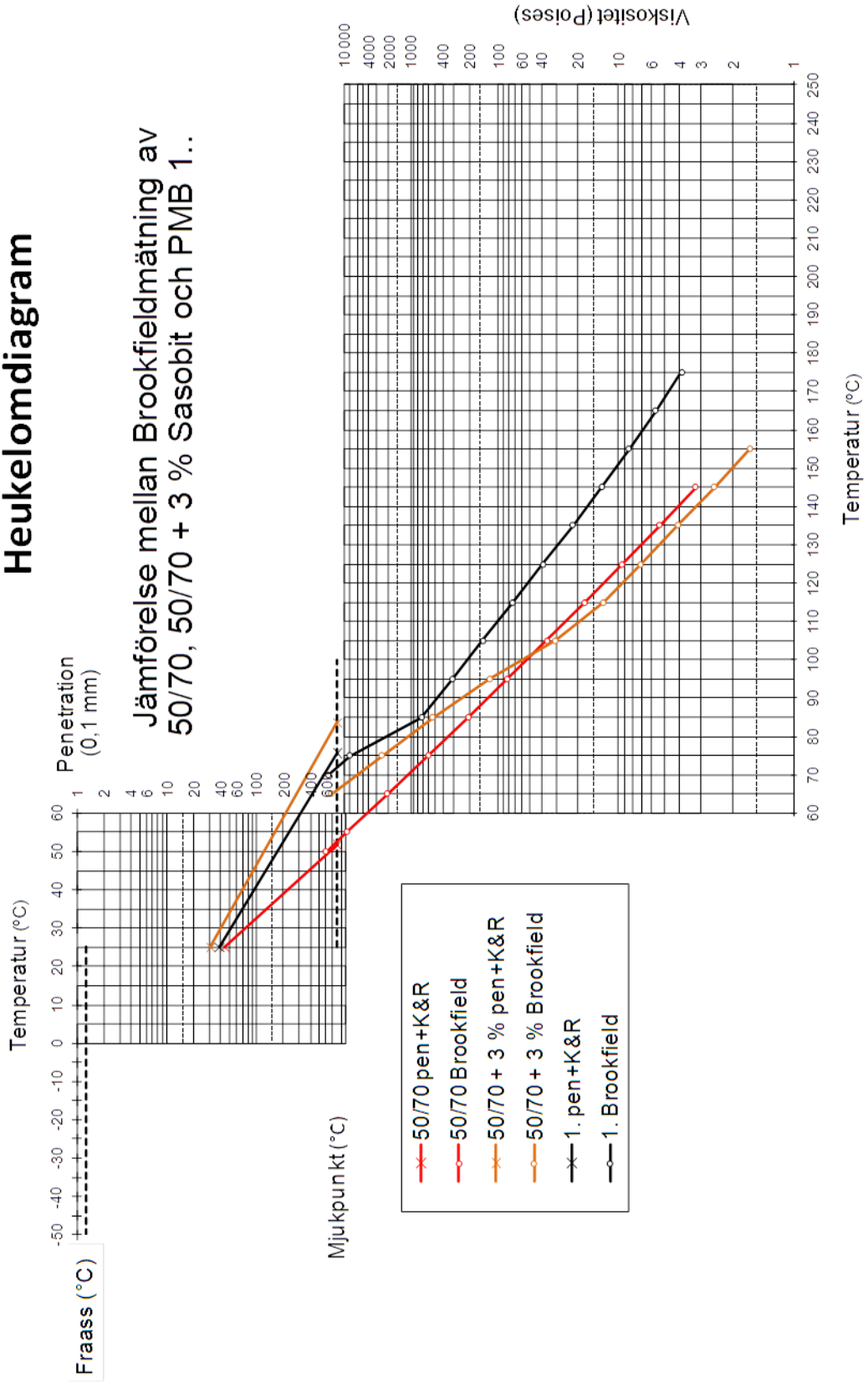


		Mätvärden			
Test		50/70	+ 1 %	+ 2 %	+ 3 %
Penetration 25 °C, 0,1 mm		44	35	32	31
Kula & Ring, °C		51,6	55,2	71,6	83,6
Brookfieldviskositet, cPoise	Brookfield K&R, °C	52,8 ^{*)}	55,8 ^{*)}	59,7 ^{*)}	66,2 ^{*)}
	Starttemperatur °C	50	50	50	65
	Startvärde, cPoise	208000 0	348000 0	7510000	167000 0
	45 °C	-	-	-	-
	55 °C	907576	149000 0	3020000	-
	60 °C	427000 [*])	675000 [*])	1230000 [*])	-
	65 °C	211000	321000	546000	-
	75 °C	60600	88600	127000	251000
	85 °C	20600	26700	35000	52970
	95 °C	8120	9480	10200	12000
	105 °C	3590	3310	3150	3030
	115 °C	1770	1590	1400	1270
	125 °C	938	848	764	705
	135 °C	533	470	442	411
	145 °C	323	287	273	253
155 °C	206	185	178	164	
Kapillärviskositet, cPoise	85 °C	20000	-	-	-
	135 °C	496	452	426	387

^{*)} Skattat värde från Brookfieldmätning.

Heukelomdiagram

Jämförelse mellan Brookfieldmätning av 50/70, 50/70 + 3 % Sasobit och PMB 1..

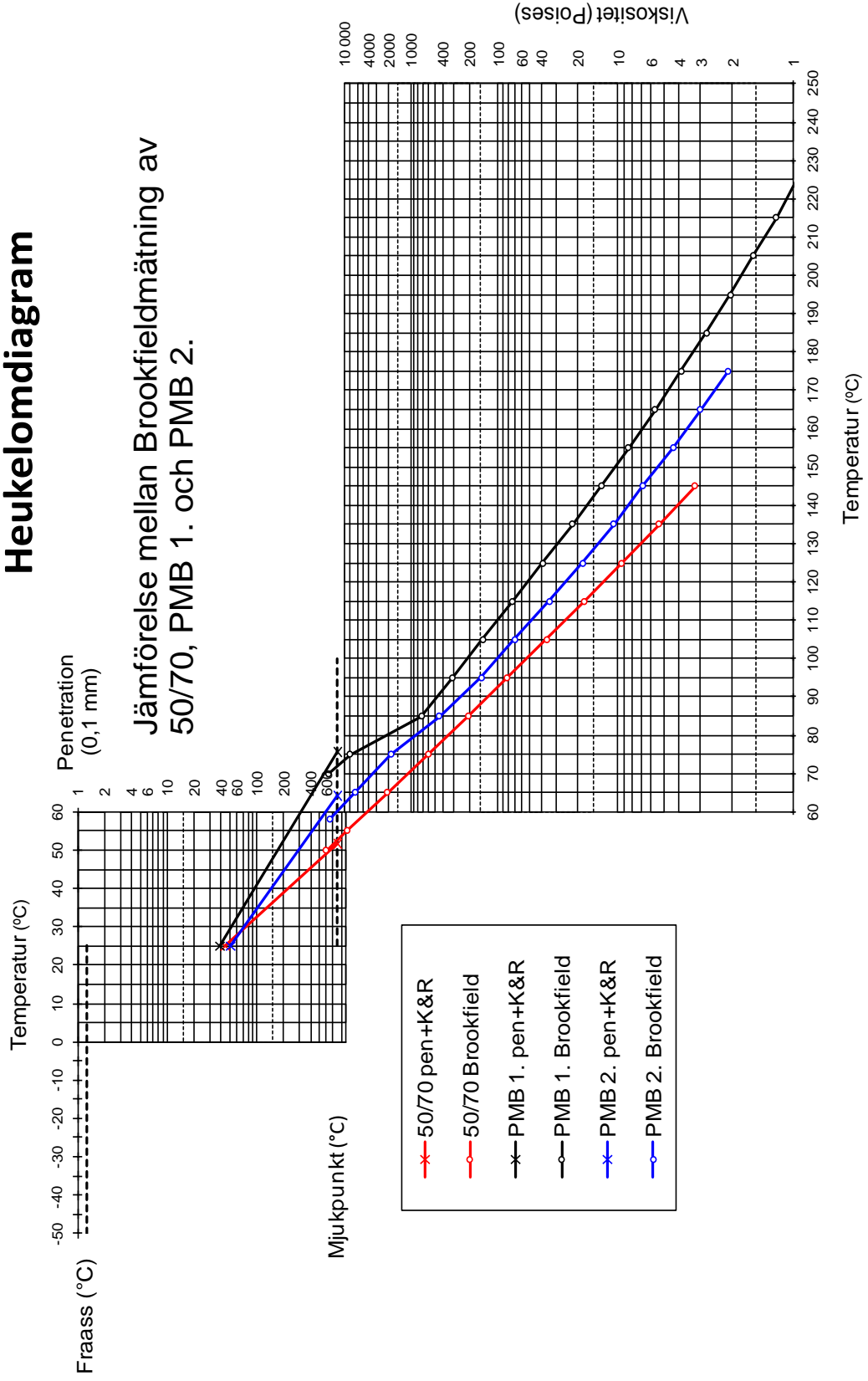


Test		Mätvärden		
		50/70	50/70 + 3 %	PMB 1.
Penetration 25 °C, 0,1 mm		44	31	38
Kula & Ring, °C		51,6	83,6	75,7
Brookfieldviskositet, cPoise	Brookfield K&R, °C	52,8 ^{*)}	66,2 ^{*)}	71,4 ^{*)}
	Starttemperatur °C	50	65	70
	Startvärde, cPoise	2080000	1670000	1870000
	45 °C	-	-	-
	55 °C	907576	-	-
	60 °C	427000 ^{*)}	-	-
	65 °C	211000	-	-
	75 °C	60600	251000	793000
	85 °C	20600	52970	73500
	95 °C	8120	12000	30700
	105 °C	3590	3030	14500
	115 °C	1770	1270	7250
	125 °C	938	705	3880
	135 °C	533	411	2200
	145 °C	323	253	1320
	155 °C	206	164	847
165 °C	-	-	566	
175 °C	-	-	390	
Kapillärviskositet, cPoise	85 °C	20000	-	-
	135 °C	496	387	-

^{*)} Skattat värde från Brookfieldmätning

Heukelomdiagram

Jämförelse mellan Brookfieldmätning av 50/70, PMB 1. och PMB 2.

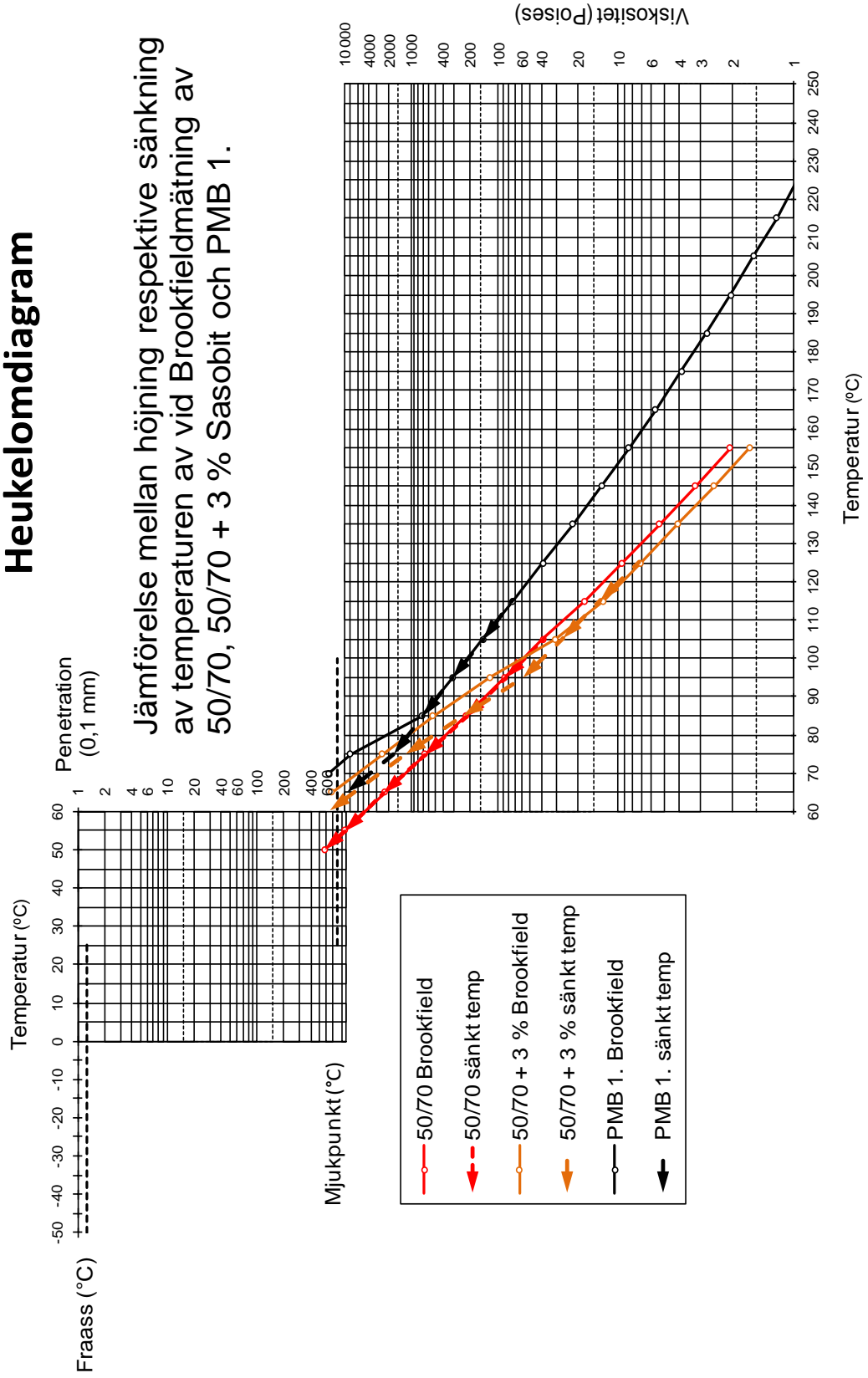


		Mätvärden		
Test		50/70	PMB 1.	PMB 2.
Penetration 25 °C, 0,1 mm		44	38	51
Kula & Ring, °C		51,6	75,7	64,2
Brookfieldviskositet, cPoise	Brookfield K&R, °C	52,8 ^{*)}	71,4 ^{*)}	60,2 ^{*)}
	Starttemperatur °C	50	70	58
	Startvärde, cPoise	2080000	1870000	1810000
	45 °C	-	-	-
	55 °C	907576	-	-
	60 °C	427000 ^{*)}	-	-
	65 °C	211000	-	662000
	75 °C	60600	793000	187000
	85 °C	20600	73500	43600
	95 °C	8120	30700	14900
	105 °C	3590	14500	6920
	115 °C	1770	7250	3420
	125 °C	938	3880	1840
	135 °C	533	2200	1080
	145 °C	323	1320	680
	155 °C	206	847	437
	165 °C	-	566	300
	175 °C	-	390	210
	185 °C	-	277	-
	195 °C	-	204	-
205 °C	-	156	-	
215 °C	-	120	-	
225 °C	-	96	-	
Kapillärviskositet, cPoise	85 °C	20000	-	-
	135 °C	496	-	-

^{*)} Skattat värde från Brookfieldmätning

Heukelomdiagram

Jämförelse mellan höjning respektive sänkning av temperaturen av vid Brookfieldmätning av 50/70, 50/70 + 3 % Sasobit och PMB 1.



Test		Mätvärden					
		50/70		50/70 + 3 %		PMB 1.	
Temperering		Höjning	Sänknin g	Höjning	Sänknin g	Höjning	Sänknin g
Brookfieldviskositet, cPoise	Brookfield K&R, °C	53,4 ^{*)}	53,5 ^{*)}	66,2 ^{*)}	61,5 ^{*)}	71,4 ^{*)}	63,2 ^{*)}
	Starttemperatur °C	50	50	65	-	70	-
	Startvärde cPoise	229000 0	230000 0	167000 0	-	187000 0	-
	55 °C	992000	994000	-	-	-	-
	65 °C	229000	240000	-	-	-	922000
	75 °C	65600	65800	251000	115000	793000	169000
	85 °C	22200	22000	52970	23200	73500	69400
	95 °C	8710	8580	12000	5740	30700	30700
	105 °C	3890	3780	3030	2630	14500	14600
	115 °C	1770	-	1270	1330	7250	7370
	125 °C	938	-	705	731	3880	-
	135 °C	533	-	411	-	2200	-
	145 °C	323	-	253	-	1320	-
	155 °C	206	-	164	-	847	-
	165 °C	-	-	-	-	566	-
	175 °C	-	-	-	-	390	-
	185 °C	-	-	-	-	277	-
	195 °C	-	-	-	-	204	-
205 °C	-	-	-	-	156	-	
215 °C	-	-	-	-	120	-	
225 °C	-	-	-	-	96	-	

^{*)} Skattat värde från Brookfieldmätning

Bilaga 2

Viskositet (cP)													
	2081818	912037	211111	60625	20583	8133	3596	1774	940	532,5	323,8	206,3	
	2084091	910015	211111	60563	20583	8125	3596	1772	940	532,5	323,8	206,3	
	2084091	910185	211068	60563	20604	8117	3596	1772	937,5	532,5	323,8	206,3	
	2084091	907407	211325	60688	20563	8125	3592	1765	938,8	532,5	322,5	206,3	
	2084091	904630	210684	60525	20583	8117	3592	1765	937,5	532,5	322,5	206,3	
	2086364	902277	210897	60688	20583	8108	3592	1763	937,5	532,5	322,5	206,3	
	2086364	906481	211325	60750	20604	8117	3588	1759	937,5	532,5	322,5	206,3	
	2084416	907576	211074	60629	20586	8120	3593	1767	938	533	323	206	
Medelvärde													
Temp (°C)	50	55	65	75	85	95	105	115	125	135	145	155	
RPM	0,11	0,27	1,17	4	12	30	65	135	200	200	200	200	
Shear rate (1/s)	0,04	0,09	0,4	1,36	4,08	10,2	22,1	45,9	68	68	68	68	
Shear stress (N/m ²)	78,03	83,56	83,73	82,54	83,98	82,62	79,31	80,75	63,67	36,21	21,93	14,03	
Torque (%)	91,7	98,5	98,4	97,2	98,8	97,3	93,3	95	75	42,6	22	16,5	
Spindle	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	

50/70

Viskositet (cP)												
	3475000	1485938	322039	88519	27174	9520	3318	1584	848,8	470,5	287,6	184,8
	3475000	1489063	321053	88519	27120	9500	3307	1584	847,5	470	287,6	185
	3475000	1489063	321053	88426	27120	9471	3314	1585	847,5	470,5	287,1	184,8
	3475000	1490625	321071	88704	24092	9461	3311	1585	847,5	469	287,6	184,8
	3475000	1489063	321711	88611	27038	9451	3304	1585	847,5	469,5	287,4	184,8
	3475000	1485938	320724	88704	27065	9461	3314	1587	847,5	470	286,1	184,5
	3475000	1484375	321053	88796	27038	9461	3307	1585	847,5	468,1	287,4	184,8
	3475000	1487724	321243	88611	26664	9475	3311	1585	848	470	287	185
Medelvärde	50	55	65	75	85	95	105	115	125	135	145	155
Temp (°C)	0,07	0,16	0,76	2,7	9,2	25,5	74	155	200	105	170	200
RPM	0,02	0,05	0,26	0,92	3,13	8,67	25,16	52,7	68	97,65	158,1	186
Shear rate (1/s)	82,62	80,5	82,88	81,35	84,58	81,94	83,39	83,64	57,63	45,85	45,34	34,36
Shear stress (N/m ²)	97,2	94,7	97,5	95,3	99,7	96,3	97,9	98,3	67,8	98,6	97,5	73,8
Torque (%)	27	27	27	27	27	27	27	27	27	21	21	21
Spindle												

50/70 + 1

Viskositet (cP)												
	7525000	3018750	547093	127432	35000	10198	3157	1403	765	442,5	273,8	177,5
	7516667	3018750	546512	127703	35000	10167	3153	1403	763,8	442,5	272,5	177,5
	7508333	3015625	544767	127432	35000	10167	3157	1403	763,8	442,5	272,5	177,5
	7508333	3015625	544767	127297	35000	10177	3153	1401	763,8	442,5	272,5	177,5
	7500000	3015625	544767	127703	35038	10156	3150	1403	762,5	441,3	272,5	177,5
	7500000	3012500	545349	127297	35038	10156	3153	1403	763,8	441,3	272,5	177,5
	7500000	3009375	546512	127297	34985	10167	3150	1403	762,5	441,3	272,5	177,5
Medelvärde	7508333	3015179	545681	127452	35009	10170	3153	1403	764	442	273	178
Temp (°C)	50	55	65	75	85	95	105	115	125	135	145	155
RPM	0,03	0,08	0,43	1,85	6,5	24	75	175	200	200	200	200
Shear rate (1/s)	0,01	0,03	0,15	0,63	2,21	8,16	25,5	59,5	68	68	68	68
Shear stress (N/m ²)	76,42	81,77	79,9	79,99	77,44	82,71	80,33	83,47	51,85	30	18,53	11,99
Torque (%)	89,9	96,3	94	94,6	91	97,5	94,6	98,2	61	35,3	21,8	14,2
Spindle	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27

50/70 + 2

Viskositet (cP)													
	0	0	1672917	252500	53125	12069	3033	1274	706,3	411,3	253,8	163,8	
	0	0	1670833	251944	53188	12042	3033	1274	705	411,3	253,8	163,8	
	0	0	1670833	252222	53063	12014	3033	1274	705	411,3	253,8	163,8	
	0	0	1670833	251944	52938	12000	3030	1274	705	411,3	252,5	163,8	
	0	0	1670833	250278	53000	11986	3027	1273	703,8	410	252,5	162,5	
	0	0	1672917	250556	52813	11986	3027	1274	703,8	410	252,5	163,8	
	0	0	1675000	250000	52625	11958	3023	1274	703,8	410	251,3	163,8	
Medelvärde	0	0	1672024	251349	52965	12008	3029	1274	705	411	253	164	
Temp (°C)	50	55	65	75	85	95	105	115	125	135	145	155	
RPM	-	-	0,12	0,9	4	18	75	185	200	200	200	200	
Shear rate (1/s)	-	-	0,04	0,31	1,36	6,12	25,5	62,9	68	68	68	68	
Shear stress (N/m²)	-	-	68,35	76,5	71,66	73,19	77,1	80,16	47,77	27,88	17,09	11,14	
Torque (%)	-	-	80,4	90	84,3	86,1	90,7	94,3	56,2	32,9	20,3	13	
Spindle	-	-	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	

50/70 + 3

Viskositet (cP)										
	1852500	115750	23125	5750	2631	1327	731,3			
	1805000	116000	23250	5736	2628	1327	731,3			
	1805000	115125	23175	5736	2631	1327	731,3			
	1807500	115625	23250	5750	2631	1328	731,3			
	1807500	115750	23250	5736	2628	1327	731,3			
	1807500	114750	23150	5736	2631	1328	731,3			
	1807500	115250	23175	5736	2633	1328	731,3			
	1813214	115464	23196	5740	2630	1327	731			
Medelvärde										
Temp (°C)	60	75	85	95	105	115	125			
RPM	0,1	2	10	42	90	185	200			
Shear rate (1/s)	0,03	0,68	3,4	14,28	30,6	62,9	68			
Shear stress (N/m ²)	64,46	77,78	78,46	82,96	80,5	83,56	49,64			
Torque (%)	72,3	92,1	92,4	96,4	94,6	98,2	58,5			
Spindle	27	27	27	27	27	27	27			
Skillnad (%)	8,4	-54,1	-56,2	-52,2	-13,2	4,2	3,8			

50/70+3,v2

Viskositet (cP)									
	2285000	994565	229048	65743	22182	8712			3895
	2287500	992391	229286	65608	22182	8712			3891
	2287500	992391	228810	65608	22182	8702			3891
	2287500	991304	228810	65676	22159	8702			3883
	2287500	991304	229048	65608	22159	8702			3879
	2287500	990217	228810	65473	22182	8702			3879
	2287500	989130	228810	65405	22182	8702			3875
Medelvärde	2287143	991615	228946	65589	22175	8705			3885
Temp (°C)	50	55	65	75	85	95			105
RPM	0,1	0,23	1,05	3,7	11	26			62
Shear rate (1/s)	0,03	0,08	0,36	1,26	3,74	8,84			21,08
Shear stress (N/m²)	77,78	77,69	81,69	82,45	82,88	76,93			81,6
Torque (%)	91,5	91,4	96,1	96,9	97,5	90,5			96,1
Spindle	27	27	27	27	27	27			27

50/70, v3

50/70,v4

Viskositet (cP)										
	3774	8577	22000	65811	241316	991304	2310000			
	3774	8567	22023	65811	240000	992391	2307500			
	3778	8577	21977	65811	240000	995652	2307500			
	3782	8577	22000	65676	240000	995652	2307500			
	3782	8577	22045	65811	238947	995652	2307500			
	3782	8577	22023	65878	239211	995652	2307500			
	3778	8577	22023	65743	239737	992391	2307500			
Medelvärde	3779	8576	22013	65792	239887	994099	2307857			
Temp (°C)	105	95	85	75	65	55	50			
RPM	92	26	11	3,7	0,95	0,23	0,1			
Shear rate (1/s)	21,08	8,84	3,74	1,26	0,32	0,08	0,03			
Shear stress (N/m²)	79,65	75,82	82,28	82,79	77,18	77,52	78,46			
Torque (%)	93,7	89,2	97	97,5	90,7	91,2	92,3			
Spindle	27	27	27	27	27	27	27			

Bilaga 3

Viskositet (cP)													
	2175000	547500	127083	36542	12605	4995	2255	1123	607,5	335,2	206,3	135	90,75
	2172500	547500	127083	36542	12592	5000	2255	1123	607,5	335,2	206,8	134,5	90,75
	2167500	547500	127083	36542	12592	5000	2255	1123	606,3	335,9	206,8	134,8	90,75
	2170000	547500	127083	36542	12605	5000	2255	1121	607,5	334,8	206,3	134,5	90,75
	2170000	546875	127083	36500	12592	5000	2255	1123	606,3	335,5	206,5	134,5	90,75
	2167500	547500	126944	36500	12579	5000	2253	1120	606,3	335,5	206,3	134,5	90,75
	2167500	547500	126944	36500	12592	5000	2255	1120	606,3	334,8	206	134,3	90,75
	2170000	547411	127043	36524	12594	4999	2255	1122	607	335	206	135	91
Medelvärde													
Temp (°C)	37	45	55	65	75	85	95	105	115	125	135	145	155
RPM	0,1	0,4	1,8	6	19	48	100	200	200	145	200	200	200
Shear rate (1/s)	0,03	0,14	0,61	2,04	6,46	16,32	34	68	68	134,9	186	186	186
Shear stress (N/m ²)	73,7	74,38	77,69	74,38	51,35	81,6	76,59	76,16	41,23	45,2	38,41	24,97	16,88
Torque (%)	86,7	87,5	91,4	87,5	95,7	96	90,2	89,7	48,5	97,1	82,6	53,7	36,3
Spindle	27	27	27	27	27	27	27	27	27	21	21	21	21

160/220

160/220+1													
Viskositet (cP)													
	1954545	806034	187500	51500	16875	6250	2506	1043	568,8	335	193,8	127,8	86
	1954545	805172	187500	51500	16839	6263	2514	1041	567,5	335	193,8	127,8	86,25
	1952273	806034	187500	51222	16875	6263	2511	1038	567,5	333,8	194	127,8	86
	1952273	804310	187083	51333	16893	6263	2503	1038	566,3	333,8	193,5	127,3	86
	1952273	804310	187292	51222	16839	6244	2511	1039	566,3	332,5	193,5	127,3	86
	1952273	803448	186878	51444	16893	6237	2511	1035	566,3	332,5	193,8	127,3	86
	1952273	802586	186667	51222	16839	6237	2506	1033	566,3	331,3	193,8	127,3	86
	1952922	804556	187203	51349	16865	6251	2509	1038	567	333	194	128	86
Medelvärde													
Temp (°C)	40	45	55	65	75	85	95	105	115	125	135	145	155
RPM	0,11	0,29	1,2	4,5	14	39	90	200	200	200	200	200	200
Shear rate (1/s)	0,04	0,1	0,41	1,53	4,76	13,26	30,6	68	68	68	186	186	186
Shear stress (N/m ²)	73,1	79,22	76,16	78,54	80,16	82,45	76,84	70,21	38,42	22,53	36,04	23,67	16
Torque (%)	86	93,2	89,6	92,3	94	97,2	90,2	82,8	45,2	26,5	77,5	50,9	34,4
Spindle	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	21	21	21

Viskositet (cP)													
	0	1832500	395000	100116	26028	8223	2825	986,3	517,5	306,3	181,5	119,5	81,75
	0	1832500	395417	100233	26028	8232	2819	986,3	517,5	306,3	181,3	119,3	81,75
	0	1830000	395000	99884	26028	8223	2819	985	516,3	305	181,5	119,3	81,75
	0	1830000	394167	99767	26000	8223	2819	986,3	516,3	305	181,5	119,3	81,75
	0	1830000	394583	100000	26028	8214	2813	985	516,3	305	181,3	119	81,5
	0	1830000	395000	99884	26000	8205	2809	983,8	515	303,8	181,3	119	81,75
	0	1827500	395417	99535	26000	8205	2806	983,8	515	303,8	181,3	119	81,75
Medelvärde	0	1830357	394941	99917	26016	8218	2816	985	516	305	181	119	82
Temp (°C)	45	48	55	65	75	85	95	105	115	125	135	145	155
RPM		0,1	0,6	2,15	9	28	80	200	200	200	200	200	200
Shear rate (1/s)		0,03	0,2	0,73	3,06	9,52	27,2	68	68	68	186	186	186
Shear stress (N/m²)		62,14	80,58	73,1	79,56	77,95	76,25	66,9	35,02	20,66	33,71	22,13	15,16
Torque (%)		73,1	94,9	86	93,3	91,5	89,7	78,7	41,2	24,2	72,5	47,6	32,6
Spindle		27	27	27	27	27	27	27	27	27	21	21	21

160/220 + 2

Viskositet (cP)													
	0	2061364	517262	224318	43455	10725	3096	958,8	490	287,5	172,3	113,3	78,75
	0	2063636	519643	222273	43409	10775	3089	957,5	490	287,5	172,3	113,3	78,75
	0	2063636	519048	222955	43455	10738	3089	958,5	490	287,5	171,8	113,3	78,75
	0	2063636	517262	222955	43000	10738	3086	957,5	488,8	286,3	172	113	78,75
	0	2059091	516071	221136	42818	10750	3079	957,5	488,8	286,3	171,8	113,3	78,5
	0	2054545	514286	222955	43182	10750	3082	957,5	487,5	286,3	171,3	113	78,5
	0	2050000	514881	221136	43227	10750	3079	956,3	487,5	286,3	171,5	113	78,5
Medelvärde	0	2059415	516922	222533	43221	10747	3086	958	489	287	172	113	79
Temp (°C)	45	52	60	65	75	85	95	105	115	125	135	145	155
RPM		0,11	0,42	1,1	5,5	20	73	200	200	200	200	200	200
Shear rate (1/s)		0,04	0,14	0,37	1,87	6,8	24,82	68	68	68	186	186	186
Shear stress (N/m ²)		76,5	73,61	82,45	80,07	72,85	76,25	65,03	33,15	19,47	31,85	21,02	14,6
Torque (%)		89,9	86,7	97,8	94	86	89,9	76,5	39	22,9	68,5	45,2	31,4
Spindle		27	27	27	27	27	27	27	27	27	21	21	21

160/220 + 3

Bilaga 4

Viskositet (cP)												
18668750	792500	73712	30688	14469	7250	3881	2202	1324	847,5	566,3	391,3	
18668750	790833	73561	30844	14469	7250	3881	2205	1323	847,5	566,3	390	
18668750	792500	73561	30688	14469	7250	3881	2202	1324	846,3	566,3	390	
1870833	792500	73485	30656	14500	7242	3881	2202	1324	846,3	566,3	390	
1870833	793333	73409	30750	14453	7250	3877	2205	1324	846,3	566,3	390	
18668750	794167	73182	30688	14484	7242	3881	2202	1324	846,3	566,3	390	
18668750	795000	73561	30625	14500	7250	3881	2205	1323	846,3	566,3	390	
Medelvärde												
1869345	792976	73496	30706	14478	7248	3880	2203	1324	847	566	390	
Temp (°C)	70	75	85	95	105	115	125	135	145	155	165	175
RPM	0,12	0,3	3,3	8	16	33	63	110	175	200	200	200
Shear rate (1/s)	0,04	0,1	1,12	2,72	5,44	11,22	21,42	37,4	59,5	68	68	68
Shear stress (N/m ²)	76,25	81,09	82,37	83,3	78,63	81,35	83,13	82,45	78,71	57,55	38,51	26,52
Torque (%)	89,7	95,2	96,4	98,7	92,7	95,6	97,7	97	92,6	67,7	45,3	31,2
Spindle	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27

1

2

Viskositet (cP)													
	1809615	666429	187800	43521	15000	6924	3425	1840	1075	681,3	437,5	300	210
	1807692	665000	186000	43640	14922	6917	3421	1840	1076	680	437,5	300	210
	1805769	662857	187400	43640	14969	6909	3414	1840	1076	680	436,3	300	210
	1803846	660717	186400	43684	14984	6932	3421	1838	1074	680	436,3	300	210
	1803846	658571	186800	43772	14969	6924	3418	1840	1075	678,8	436,3	300	210
	1803846	660000	187400	43684	14500	6924	3414	1838	1074	678,8	436,3	300	210
	1805769	662143	186000	43596	15000	6924	3418	1840	1074	678,8	436,3	298,8	210
Medelvärde	1805769	662245	186829	43648	14906	6922	3419	1839	1075	680	437	300	210
Temp (°C)	58	65	75	85	95	105	115	125	135	145	155	165	175
RPM	0,13	0,35	1,25	5,7	16	33	70	130	200	200	200	200	200
Shear rate (1/s)	0,04	0,12	0,43	1,94	5,44	11,22	23,8	44,2	68	68	68	68	68
Shear stress (N/m ²)	79,82	78,8	79,56	84,66	81,69	77,52	81,26	81,35	73,02	46,07	29,75	20,32	14,28
Torque (%)	93,8	92,8	93,6	99,5	95,8	91	95,6	95,7	86	54,3	35	23,9	16,8
Spindle	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27

		Viskositet (cP)							
		925000	168393	69500	30688	14559	7371		
		922000	168392	69643	30655	14559	7379		
		920000	168929	69286	30719	14544	7356		
		919000	170109	68929	30750	14544	7371		
		920000	168750	69357	30688	14559	7364		
		925000	170536	69429	30565	14559	7371		
		926000	168292	69571	30719	14559	7371		
	Medelvärde	922429	169057	69388	30683	14555	7369		
	Temp (°C)	65	75	85	95	105	115		
	RPM	0,25	1,4	3,5	8	17	33		
	Shear rate (1/s)	0,09	0,48	1,19	2,72	5,78	11,22		
	Shear stress (N/m ²)	78,8	80,75	92,11	83,64	84,24	81,79		
	Torque (%)	92,8	95	97,2	97,6	98,9	97,4		
	Spindle	27	27	27	27	27	27		

1, V2

1, V3

Viskositet (cP)										
	846,6	562,9	388,4	277,4	204,3	156	119,8	96		
	845,7	562,4	388,4	277,1	204,3	155,8	120	95,75		
	847,4	561,2	388	277,7	204,3	156	119,8	95,75		
	845,7	562,9	388,4	277,1	204,5	155,5	120	95,75		
	845,7	560,6	388,4	277,4	204,5	155,5	120	95,5		
	846,6	560,6	388	277,7	204,3	155,5	119,8	95,75		
	844,8	561,8	388,4	277,1	204,5	155,3	120,3	95,75		
Medelvärde	846	562	388	277	204	156	120	96		
Temp (°C)	155	165	175	185	195	205	215	225		
RPM	58	85	125	175	200	200	200	200		
Shear rate (1/s)	53,94	79,05	116,3	162,8	186	186	186	186		
Shear stress (N/m ²)	45,62	44,36	45,11	45,15	38,04	28,88	22,37	17,86		
Torque (%)	98,1	95,3	97	97,1	81,7	62,1	48,1	38,3		
Spindle	21	21	21	21	21	21	21	21		

Bilaga 5

Λ	Tid (min)	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5
	Viskositet 85°C (cP)	24722	24055	23722	23722	23888	23111	22944	23111	23000	22444	22444	22666	22333	22111	22222	22388
	Viskositet 135°C (cP)	578	578	576	574	573	571	570	568	566	564	563	561	560	560	559	559
Λ	Tid (min)	8	8,5	9	9,5	10	10,5	11	11,5	12	12,5	13	13,5	14	14,5	15	15,5
	Viskositet 85°C (cP)	22000	21944	22111	22222	21777	21666	22000	22055	21555	21555	21944	21777	21555	21888	21555	21388
	Viskositet 135°C (cP)	558	558	556	556	556	555	556	555	555	555	555	555	555	555	554	555
Λ	Tid (min)	16	16,5	17	17,5	18	18,5	19	19,5	20	20,5	21	21,5	22	22,5	23	23,5
	Viskositet 85°C (cP)	21611	21833	21444	21388	21666	21722	21388	21388	21666	21555	21333	21444	21666	21388	21333	21500
	Viskositet 135°C (cP)	554	554	554	554	554	554	553	554	554	554	554	554	554	554	554	554
Λ	Tid (min)	24	24,5	25	25,5	26	26,5	27	27,5	28	28,5						
	Viskositet 85°C (cP)	21666	21333	21333	21555	21666	21333	21333	21611	21555	21333						
	Viskositet 135°C (cP)	554	554	554	554	554	554	554	554	553	554						

∇: Uppvärmade process

V	Tid (min)	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5
	Viskositet 85°C (cP)	16000	16667	17278	18000	18111	18500	19167	19611	19556	19889	20278	20278	20222	20500	20833	20611
	Viskositet 135°C (cP)	413	430	444	455	461	474	486	493	499	501	508	516	520	521	525	526
V	Tid (min)	8	8,5	9	9,5	10	10,5	11	11,5	12	12,5	13	13,5	14	14,5	15	15,5
	Viskositet 85°C (cP)	20667	21000	21556	21167	21111	21611	21722	21389	21500	21833	21778	21500	21667	22000	21722	21611
	Viskositet 135°C (cP)	529	530	531	534	536	539	540	541	543	543	544	545	546	546	546	548
V	Tid (min)	16	16,5	17	17,5	18	18,5	19	19,5	20	20,5	21	21,5	22	22,5	23	23,5
	Viskositet 85°C (cP)	21833	22056	21667	21667	21889	22056	21667	21722	22000	21944	21667	21778	22056	21833	21667	21889
	Viskositet 135°C (cP)	548	549	549	550	550	551	551	551	553	553	554	553	553	553	554	554
V	Tid (min)	24	24,5	25	25,5	26	26,5	27	27,5	28	28,5						
	Viskositet 85°C (cP)	22111	21722	21667	21944	22056	21722	21722	22000	22000	21722						
	Viskositet 135°C (cP)	555	554	554	554	554	554	554	555	555	555						

V: Avsvältnande process

Bilaga 6

Penetrationstest			
Bitumen	Mät 1 (dmm)	Mät 2 (dmm)	Mät 3 (dmm)
50/70	45	44	43,8
50/70 + 1	35,1	33,4	37,1
50/70 + 2	33,2	32,2	30,5
50/70 + 3	31,8	30,7	30,5
160/220	171	170	168
160/220 + 1	132	135	133
160/220 + 2	129	129	124
160/220 + 3	112	114	110
Poly 1	38,6	38,5	38,2
Poly 2	50,5	51,2	49,8

Mjukpunktstest			
Kvalitet:	50/70		
Sasobit (%)	Vänster	Höger	Medel
0	51,4	51,8	51,6
1	55,3	55,1	55,2
2	71,5	71,7	71,6
3	84	83,1	83,6
Kvalitet:	160/220		
Sasobit (%)	Vänster	Höger	Medel
0	39,7	39,7	39,7
1	41,9	41,9	41,9
2	48,8	49,7	49,3
3	74,4	78,5	76,5
Kvalitet:	Poly-modifierat		
Typ	Vänster	Höger	Medel
1	75,5	75,9	75,7
2	65,3	63,1	64,2

Bilaga 7

Spindle: 27KBS					
Temp (°C)	Viskositet (cP)	RPM	Shear rate (1/s)	Shear stress (N/m ²)	Torque (%)
55	830833	0,3	0,1	84,8	99,7
65	197133	1,25	0,43	83,9	98,7
75	57385	4,3	1,46	83,98	98,8
85	20167	12	4,08	82,2	97,3
95	7884	31,5	10,71	84,5	99,4
105	3526	69	23,46	82,7	97,4
115	1756	135	45,9	81,2	94,8
125	924	200	68	62,8	73,8
135	524	200	68	35,5	41,8
145	324	200	68	21,8	25,7
155	207	200	68	14,0	16,5

Spindle: 21					
Temp (°C)	Viskositet (cP)	RPM	Shear rate (1/s)	Shear stress (N/m ²)	Torque (%)
115	1746	27	25,11	43,9	94,4
125	927	53	49,29	45,62	98,2
135	528	93	86,49	45,62	98,2
145	318	155	144,2	45,85	98,7
155	204	200	186	37,94	81,6

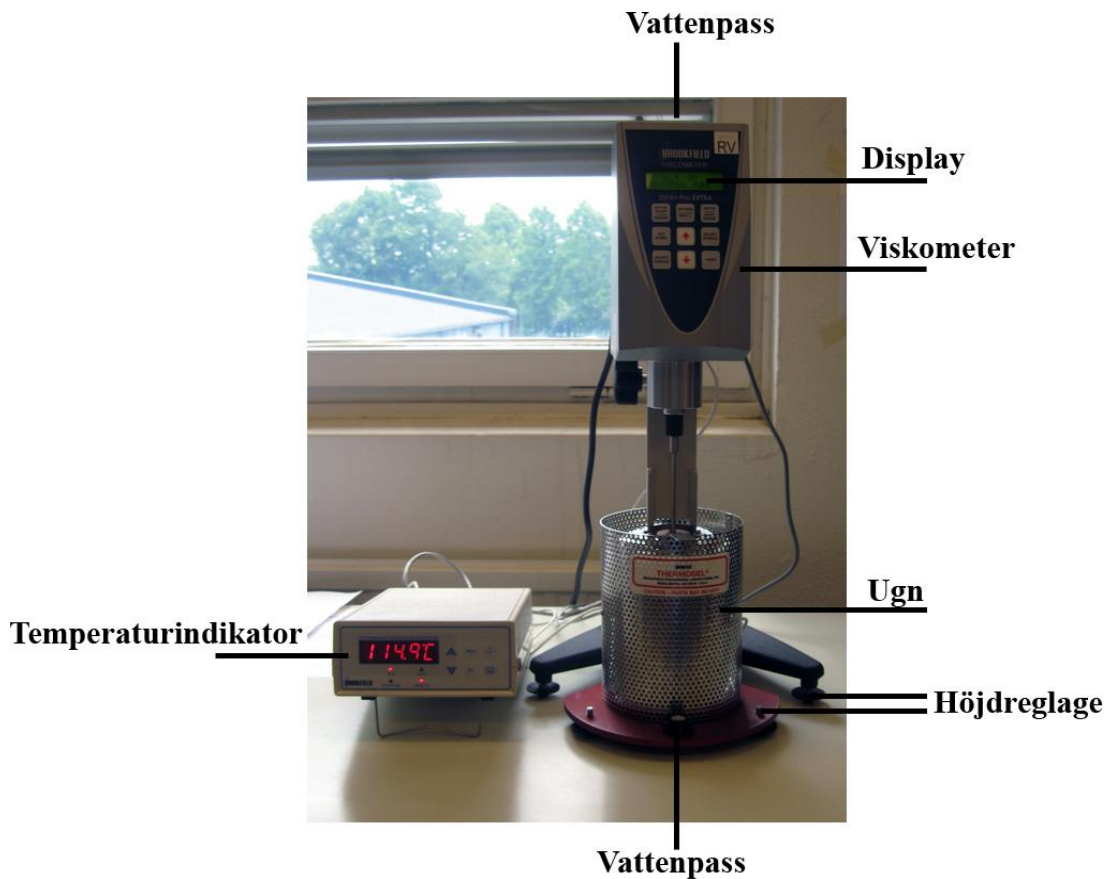
Bilaga 8

Manual för Brookfield-viskosimeter modell DV-II +Pro Extra med Thermosel värmemantel - Manuell styrning

Brookfield viscometer mäter ett ämnes viskositet, vilket är ett mått på den inre friktionen. Den kan mätas med många olika metoder, varav mätning med Brookfield är en. Utrustningstypen kallas allmänt *dynamisk rotationsviskosimeter*.

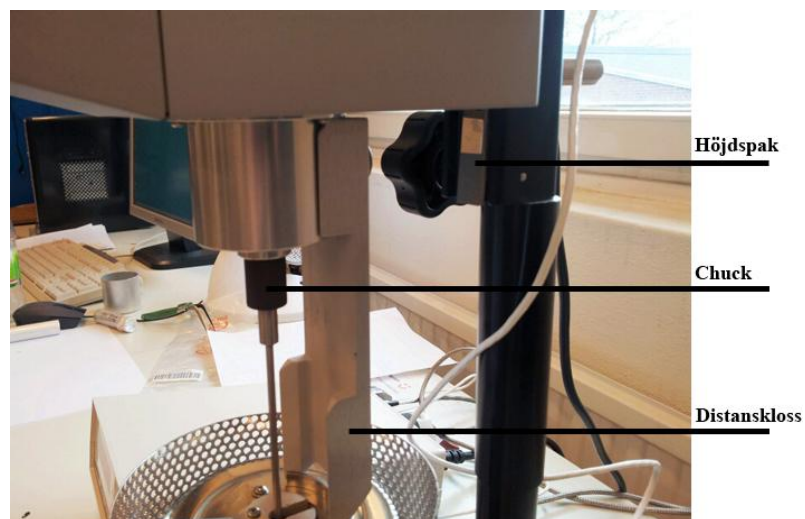
Den används för alla slag av ämnen med en viskös karaktär, däribland bitumen i flytande tillstånd. För olika viskositetsintervall finns anpassade *spindeltyper*. Viskosimetern klarar av mätningar i temperaturer upp till 300°C, med varvtal mellan 0,01-200 RPM.

Viskositetsmätningar av bitumen har i denna undersökning genomförts i temperaturintervallet 37-225°C utan problem. Referensmätningar för bitumen med rekommenderade varvtal finns i tabell 20 och 21, sist i manualen. Ytterligare mätningar finns tillgängliga i bilaga 2, 3 och 4.



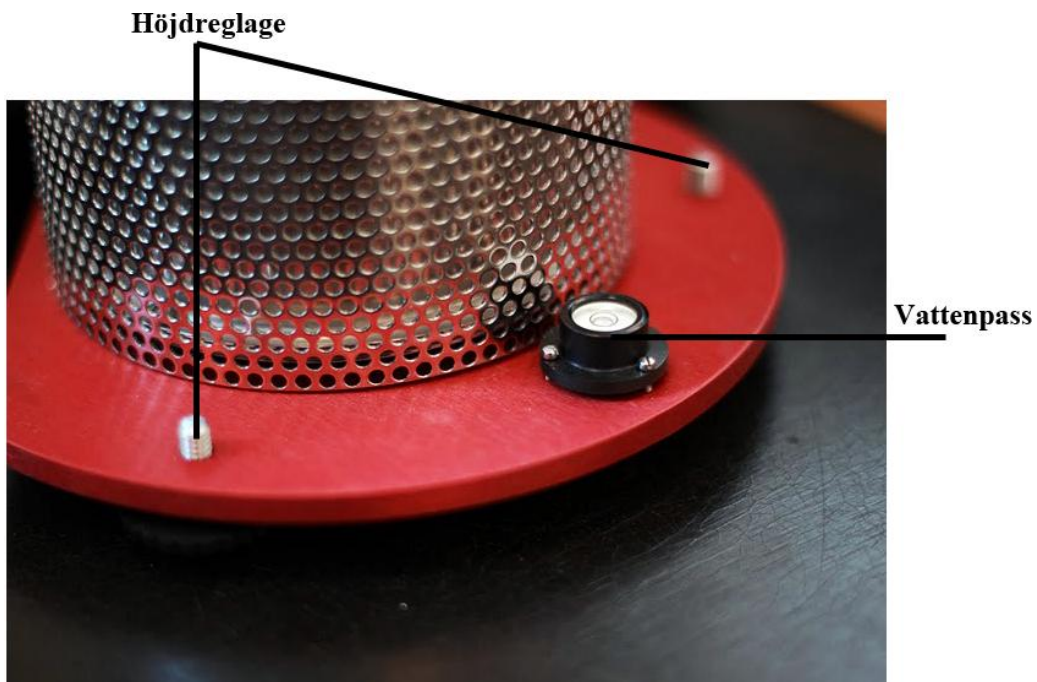
Figur 32. Brookfield viscometer

1. Börja med att läsa igenom **hela** manualen.
2. Placera ugnen i läge, dvs. under viskosimetern (figur 1). Centrera ugnen genom att föra ner viskosimetern med hjälp av höjdspaken. Distansklossen som sitter på viskosimetern (figur 2) ska då nudda ugnen.



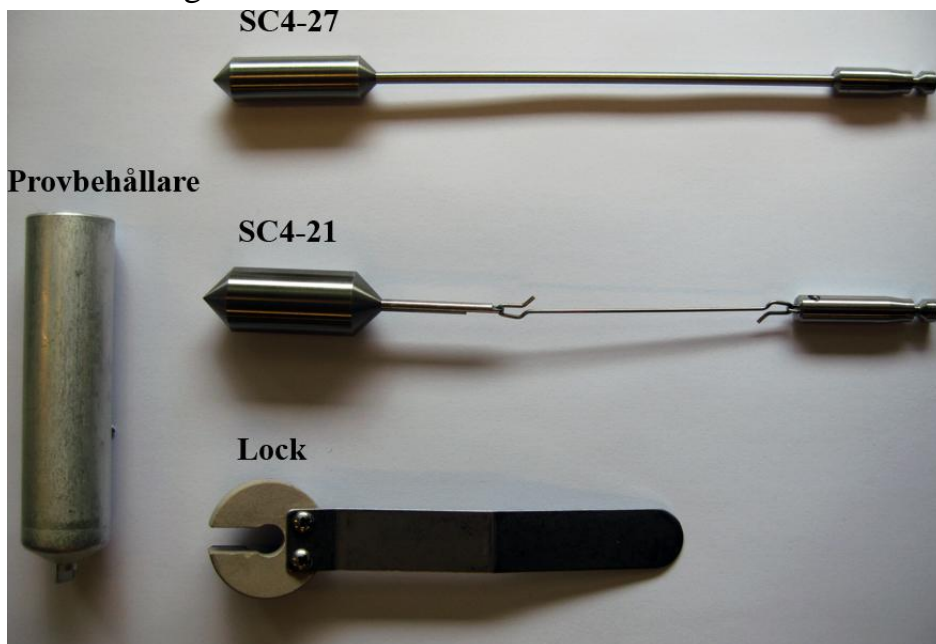
Figur 33. Höjdspak, chuck och höjdreglage

3. Justera viskosimetern och ugnen så att bägge vattenpassen står rätt (figur 3).



Figur 34. Ugnens höjdreglage och vattenpass

4. För upp viskosimetern.
5. Placera den bitumenfyllda provbehållaren (figur 4) i ugnen (se tabell 1 för mängd). Snurra på provbehållaren lite försiktigt med en tång så att den trillar i läge.



Figur 35. Utrustning

- Sätt på temperaturindikatorn och viskosimetern. Tryck på pil upp (↑) på viskosimetern för att välja External Mode (figur 5).



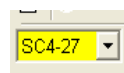
Pil uppåt

Figur 36. Viskosimeterens display

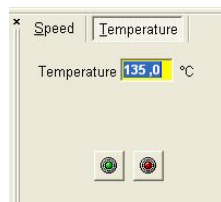
- Starta programmet Rheocalc på datorn.
- Nollställ viskosimetern genom att trycka på Auto Zero under fliken Instrumentation i programmet.



- För upp den svarta chucken och för in spindel (figur 2). Spindel väljs utifrån vilken viskositet som förväntas. **Kolla tabell!**
- Ange spindel i programmet.



11. Ställ in den temperatur som ska mätas i rutan till höger. Tryck på grön knapp.

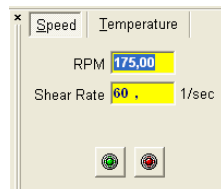


12. Låt ugnen komma upp i rätt temperatur (locket till ugnen ska vara på under uppvärmningen).

13. Ta av lock och för ner spindeln i provkroppen, så att distansklossen tar emot, genom att sänka viskosimetern.

14. Ställ in rätt varvtal för mätningen i rutan till höger i Rheocalc. Tryck på grön knapp. OBS! Välj inte ett för högt varvtal (se tabell på sista sidan).

15.



16. Mätningen har nu startat. Det kan ta lite tid (15-20min) innan provet stabiliserats. Resultatet visas i fönstret för "Viscosity". Observera att viskositeten först kommer att anges för högt, för att sedan sjunka långsamt nedåt under stabiliseringstiden. När viskositeten inte längre sjunker kan provet anses vara stabilt. Tiden för stabilisering är längre vid hög viskositet. **Var därför noga med att inte göra en avläsning för tidigt.**



OBS! För högt varvtal vid för låg temperatur kan leda till att spindeln knäcks eller att viskosimetern går sönder. Kolla därför noga på vilket maxvarvtal och spindel som får användas vid varje temperatur i tabellen på nästa sida.

Tabell 18. Mängd bitumen beroende på spindeltyp

Spindle	Volym/vikt
21	8 ml / 7,6g
27	10,5 ml / 10g

Tabell 19. RPM, spindle samt förväntad viskositet för 50/ 70-bitumen

	Temp	-	50	55	65	75	85	95	105	115	125	135	145	155
50/70	ung. viskositet (mPas)	-	2084416	907576	211074	60629	20586	8120	3593	1767	938	533	323	206
	RPM	-	0,11	0,27	1,17	4	12	30	65	135	200	200	200	200
	Spindle	-	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27

Tabell 20. RPM, spindle samt förväntad viskositet för 160/220-bitumen

	Temp	37	45	55	65	75	85	95	105	115	125	135	145	155
160/220	ung. viskositet (mPas)	2170000	547411	127043	36524	12594	4999	2255	1122	607	335	206	135	91
	RPM	0,1	0,4	1,8	6	19	48	100	200	200	145	200	200	200
	Spindle	27	27	27	27	27	27	27	27	27	21	21	21	21