

Dynamisk skjuvreometer och kompletterande metoder för bitumenundersökningar



LUNDS
UNIVERSITET

Lunds Tekniska Högskola

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

Examensarbete 2014:
Henrik Jakobsson
Khalid Kamil

© Copyright Henrik Jakobsson, Khalid Kamil

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

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

Tryckt i Sverige
Media-Tryck
Biblioteksdirektionen
Lunds universitet
Lund 2014

Förord

Denna rapport är ett examensarbete skriver som en del av högskoleingenjörsutbildningen inom Väg- och Trafikteknik vid Campus Helsingborg, Lunds Tekniska Högskola. Rapporten framkom efter önskemål från Lunds Tekniska Högskola där den är en del av utvecklingen med deras nyligen inskaffade mätinstrument, Dynamisk Skjuvreometer, DSR.

Vi vill börja med att tacka vår handledare, Per Tyllgren, på Svenskt VägCentrum, för all hjälp och feedback som vi fått under arbetets gång. Utöver detta har han även hjälpt till med analysering av mätresultat. Han har varit tillgänglig när vi än behövt hjälp och vi är därför väldigt tacksamma att han varit vår handledare.

Vi vill även tacka vår examinator Ebrahim Parhamifar som gav oss förtroendet och möjligheten att utföra detta arbete. Vi vill även tacka för de resurser han tillhandahållit.

Nynas AB och personalen skall även ha ett stort tack för tillhandahållande av bitumen och annat material tillhörande DSR. De har möjliggjort tester på åldrad bitumen eftersom åldring inte är något vi kunnat utföra på Lunds Tekniska Högskola, utan fått skickat till oss.

Vi vill tacka Petri Uhlbäck på Nynas AB för feedback på resultat och för svar på frågor angående DSR.

Ett stort tack till Markus Linder från Anton Paar som har hjälpt oss när DSR strulat. Från Anton Paar vill vi även tacka Hans Strinsjö för tillhandahållande av utbildningsmaterial för DSR.

Arbetsinsatsen har vi försökt fördela så jämt som möjligt. En större del av litteraturstudien är skriven av Khalid medan Henrik lade ett större fokus på utföring av mätningar. Korrekturläsning, resultatsammanfattning och analys har skett gemensamt.

Lund, 2014

Henrik Jakobsson

Khalid Kamil

Sammanfattning

Med allt tyngre trafik på vägarna ökar kraven på asfaltsblandningar och i synnerhet bindemedlet i den belagda vägen. Bituminets motstånd mot spårbildning och andra deformationer är under konstant utveckling. Som ett steg i utvecklingen har vaxmodifierade och polymermodifierade varianter tagits fram. Klassificeringen av dessa är inte längre möjligt med traditionella mätmetoder utan det kräver ny mätteknik och nya kriterier.

Med en Dynamisk skjuvreometer, DSR, undviks mättekniska problem med bindemedel som har avvikande reologiska egenskaper och de kan trots detta klassificeras för vägtekniska ändamål efter funktionella kriterier. Lunds Tekniska Högskola, avdelningen för Teknik och Samhälle införskaffade 2013 en Dynamisk skjuvreometer för användning i undervisning, utveckling och forskning. Med hjälp av DSR kan de reologiska egenskaperna hos bindemedel mätas med tester som utvärderar ämnets viskoelastiska karaktär vid olika temperaturer och frekvenser.

Detta examensarbete fortsätter en lång rad av utvecklingsarbeten med reologiska mätmetoderna på Lunds Tekniska Högskola för att finna lösningar på problem och behov. Oscillerande sveptest utfördes tillsammans med kryptest enligt *Multiple Stress Creep Recovery*, MSCR. Detta kompletterades med lågtemperaturmätningar, *Bending Beam Rheometer*, *Fraass Breaking Point* och *Fracture Toughness Test*, som används för fullständig bedömning av ett bitumen för vägändamål. De senare mätningarna genomfördes, tillsammans med RTFOT och PAV, av Nynas AB.

Mätningar gjordes på tre bitumentyper, 70/100, Sas 85-3 (med 3 % Sasobit) och PMB, som alla även behandlades med korttidsåldring i form av RTFOT samt långtidsåldring med RTFOT+PAV. Detta gav oss sammanlagt nio bitumensorter som olika tester utfördes på.

Mätningarna som utfördes på det omodifierade 70/100 fungerade som referens mot de vax- och polymermodifierade varianterna. Resultaten efter RTFOT och RTFOT+PAV motsvarade förväntat utfall med olika grad av åldring. Dessvärre måste de oscillerande mätningarna vid 10-20 °C strykas på grund av maskinfel. Detta påverkade emellertid inte slutresultaten.

Det gjordes tyvärr inga framsteg med PP8, mätplattan för låga temperaturer, och slutsatsen med dessa mätningar blev att tillverkningen av provkroppar kräver förbättringar för att resultaten ska bli acceptabla.

Det vaxinblandade bindemedlet Sas 85-3 visar i ett Blackdiagram ett annorlunda samband mellan komplex skjuvmodul och fasvinkel, som förklaras av förekomsten av vaxkristaller. Vinkelfrekvensen minskar med minskande belastningsfrekvens istället för att öka, som fallet är med vanligt bitumen. Blandningen kan också karakteriseras som icke Newtonsk. Efter RTFOT +

PAV förloras de speciella egenskaperna som vaxet tillför och uppför sig därefter mer likt ett vanligt, åldrat bitumen.

Den polymermodifierade blandningen, PMB, visar också i Blackdiagrammet ett annorlunda utseende jämfört med rent bitumen. Allmänt sett är bindemedlet styvare än 70/100 men sambandet med fasvinklarna formerar sig annorlunda. Även detta speciella utseende jämnas ut efter RTFOT+PAV. Det behövs fler mätningar med andra polymermodifierade varianter, framförallt vid låga temperaturer, för lära känna den speciella karaktären hos polymermodifierade bitumenblandningar. Med PP8 hade man kunnat mäta ned till -30 °C.

Vid kryptesterna enligt MSCR uppvisar 70/100 närmast ingen elastisk återgång men klarar ändå krypkriteriet vid 64 °C. I många år har det varit känt och visats empiriskt att Sasobit ökar spårstabiliteten och här illustreras det med förbättrade krypegenskaper, även om förbättringen jämfört med 70/100 är måttlig. Något förvånande uppstår en märkbar elastisk återgång, som annars brukar förbehållas polymera modifieringar. PMB visar upp alla förväntade egenskaper i form av kraftig elastisk återgång och goda krypegenskaper vid så hög temperatur som 76 °C.

Enligt traditionell Superpave Performance Grading baserad på G^* och $\sin(\delta)$, klarar samtliga bindemedel utmattningskriterierna. 70/100 hamnar i PG-klass 64-22, Sas 85-3 i PG 70-22 och PMB i PG 76-22. Fraass-värdena för 70/100 och PMB på -18 °C respektive -17 °C klarar de svenska bindemedelskriterierna med god marginal, medan Sas 85-3 ligger mitt på gränsvärdet, -12 °C. Fracture Toughness är ett nytt test för lågtemperaturtestning av bitumen, som saknar gränsvärden i regelverken och har få referenser. 70/100 ligger inom förväntat intervall med -8 °C medan PMB ligger långt under de övriga två på -30 °C. Sas 85-3 hamnar på +2,5 °C. Resultaten antyder strukturella skillnader mellan bindemedlen men bedömningen av resultatens betydelse får anstå.

Förbättrad provkroppstillverkning för PP8, programmallar för LVE-kontroller och MSCR-svep och kontrollprogram för konstanta mätvärden står högt på önskelistan över framtida examensarbeten, vid sidan av rutiner för att undvika instrumentkomplians.

Nyckelord: DSR, Dynamisk skjuvreometer, Bitumen, Sasobit, Polymermodifierat, MSCR, Kryptest, Reologi, Superpave

Abstract

Increasing heavy traffic on the roads raises demands on pavements and especially the binder of the pavements. The rutting and other deformations resistances are constantly improved. As a part of the development wax mixes and polymer modified variants are produced. These products are not anymore possible to classify with traditional test methods, requiring new measurement technique and new criteria.

A Dynamic Shear Rheometer, DSR, avoids measurement problems with additives having different rheological properties and mixes can nevertheless be classified for pavement purposes by functional criteria. The Lund Institute of Technology, School of Technology and Society, acquired in 2013 a DSR for use in teaching, development and research. Using a DSR the rheological properties of the binders could be measured with tests that assess the viscoelastic character at different temperatures and frequencies.

This thesis continues a long series of development work with rheological measurement methods at the Faculty of Engineering to find solutions to problems and needs. Oscillating sweep test was conducted together with creep test under the *Multiple Stress Creep Recovery*, MSCR. This was supplemented with low temperature measurements, *Bending Beam Rheometer*, *Fraass Breaking Point and Fracture Toughness Testing*, used for full assessment of the bitumen for pavement applications. The latter measurements were conducted along with RTFOT and PAV by Nynas AB.

Measurements were made using three types of bitumen, 70/100 Sas 85-3 (with 3 % Sasobit) and PMB, all of which also dealt with short-term aging in the form of RTFOT and long-term aging with RTFOT + PAV. This gave a total of nine different bitumen varieties to test.

The measurements were conducted on the unmodified 70/100 acting as the reference to the wax and polymer modified variants. The results after RTFOT and RTFOT + PAV corresponded to the expected outcome with different degrees of aging. Unfortunately, the oscillatory measurements at 10-20 °C had to be deleted due to machine mishap. This did not affect the final results.

There was unfortunately no progress with PP8, measurement platform for low temperatures, and in conclusion the manufacturing of test specimens require improvements for the results to be acceptable.

Sas 85-3 displays in a Black chart an unusual connection between the complex shear modulus and phase angle, which is explained by the presence of wax crystals. Angular frequency decreases with decreasing strain rate instead of increasing, as is the case of ordinary bitumen. The mixture can also be characterized as non-Newtonian. After RTFOT + PAV it loses the special

properties of Sasobit and behaves accordingly more like a normal, aged bitumen.

The polymer-modified mixture, PMB, appears also in a Black chart differently compared to unmodified bitumen. Generally, the binder is stiffer than 70/100 but the correlation with the phase angles form themselves differently. This particular look is smoothed out after RTFOT + PAV. We need more measurements with other polymer-modified variants, particularly at low temperatures to get to know the specific nature of polymer modified bitumen blends. With PP8 we would have been able to measure down to -30 °C.

At the creep tests under MSCR 70/100 exhibits almost no elastic recovery but still manages creep criterion at 64 °C. For many years it has been known and shown empirically that Sasobit increases wheel track stability and this is illustrated by the improved creep capacity, although improvement compared to 70/100 is moderate. Somewhat surprisingly, there is an appreciable elastic recovery, which otherwise is usually reserved for polymer modifications. PMB displays all the expected characteristics in terms of strong elastic recovery and good creep properties at as high a temperature as 76 °C.

According to traditional Superpave Performance Grading based on G^* and $\sin(\delta)$ all of the binders meet respective fatigue criteria. 70/100 lands in PG-class 64-22, Sas 85-3 in PG 70-22 and PMB in PG 76-22. Fraass values of 70/100 and PMB at -18 °C and -17 °C meet the Swedish binder criteria with a good margin, while Sas 85-3 lands spot on the limit value, -12 °C. Fracture Toughness is a new test for low temperature testing of bitumen, which has no limits in the regulations and has few references. 70/100 is within the expected range at -8 °C, while the PMB is far below the other two at -30 °C. Sas 85-3 parks at +2.5 °C. The results suggest structural differences between the binders but the assessment of the impact of these results must wait.

Improved specimen manufacturing for PP8, program templates for LVE controls and MSCR temperature sweeps and checking for constant readings are high on the wish list of future theses, besides procedures to avoid instrument compliance.

Keywords: DSR, Dynamic Shear Rheometer, Bitumen, Sasobit, Polymer modified, MSCR, Creep test, Rheology, Superpave

Innehållsförteckning

1 Inledning	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte	1
1.3 Avgränsning	2
1.4 Metoder	2
2 Litteraturstudie	3
2.1 Reologi	3
2.1.1 Viskositet	3
2.1.2 Elasticitet	4
2.1.3 Viskoelasticitet.....	4
2.2 Dynamisk skjuvreometer, DSR	4
2.2.1 Oscillering och krypning	5
2.2.2 Applicerade variabler (amplitud/skjuvtöjning, skjuvspänning, frekvens/vinkelhastighet, temperatur).....	7
2.2.3 Uppmätta egenskaper (komplex skjuvmodul och fasvinkel)..	8
2.2.4 Beräknade egenskaper (elastisk och viskös modul)	9
2.2.6 Linjärviskoelastiskt område, LVE.....	10
2.3 Åldring	11
2.3.1 RTFOT	11
2.3.2 PAV	12
2.4 Andra mättekniker och instrument	12
2.4.1 Penetration	12
2.4.2 Mjukpunkt	13
2.4.3 Rotationsviskosimeter	14
2.4.4 BBR	14
2.4.5 Fraass breaking point test	15
2.4.6 Fracture Toughness	16
2.5 Bindemedel för asfalt	17
2.5.1 Bitumen	17
2.5.2 Sasobit	18
2.5.3 PMB, polymermodifierat bitumen	18
3 Metodbeskrivningar	20
3.1 Sharp/Superpave	20
3.2 ASTM och SS-EN (likheter och skillnader)	22
3.3 Programmering	23
3.4 Tider och jämvikt	23
3.5 Sveptester	24
3.6 MSCR test	26
4 Mätningar med olika bitumensorter	27
4.1 Tillverkning av provkroppar	27
4.1.1 Uppvärmning och tillverkning	27

4.1.2 Tider.....	29
4.1.3 Applicering och trimning.....	30
4.2 Resultat	32
4.2.1 PP8	32
4.2.2 Oscillerande sveptest.....	32
<i>Resultat</i>	33
<i>Kommentarer</i>	34
4.2.3 MSCR	36
<i>Resultat</i>	36
<i>Kommentarer</i>	38
4.2.4 PG-klassning enligt Superpave.....	38
<i>Resultat</i>	38
<i>Kommentarer</i>	39
5 Slutsatser och diskussion.....	41
5.1 Bitumenstudien	41
5.2 Felkällor och svårigheter	41
5.3 Behov av fortsatta studier	41
6 Referenser	43
6.1 Bilder	44
Bilaga 1 – Amplituder	46
Bilaga 2 – Komplex skjuvmodul och fasvinkel från oscillerande mätning	48
Bilaga 3 – Blackdiagram.....	58
Bilaga 4 – Komplex skjuvmodul	63
Bilaga 5 – Fasvinkel	67
Bilaga 6 – MSCR resultat.....	71
Bilaga 7 – MSCR diagram.....	75

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Kvalitetsbestämning av bitumen för vägändamål har länge gjorts med grundläggande reologiska mätningar men också med särskilt utformade mätmetoder såsom Kula- och Ring-metoden, penetration etcetera. De särskilt utformade mätmetoderna har stämts av mot empiriska erfarenheter och fungerar bra så länge bitumen inte modifierats med tillsatser som har annat ursprung än petroleumoljor. Med tillsatserna är säkerheten i resultaten inte lika bra som den är med rent bitumen. Detta eftersom tillsatserna har en smältpunkt, något som rent bitumen inte har. Det har lett till en minskad användning av de förenklade mätmetoderna medan de grundläggande reologiska mätningarna har ökat eftersom dess resultat är säkrare och därmed ger bättre möjlighet att förutsäga de vägtekniska egenskaperna.

Superpave, ett amerikanskt vägbyggnadskoncept, använder sig av en Dynamisk skjuvreometer, DSR, för att beskriva bituminets egenskaper. Efter 20 års tillämpning står konceptet inför stora förändringar men DSR kommer fortfarande att spela en stor roll i bedömningen av egenskaperna hos bitumen. DSR användningen ökar internationellt med, inte bara inom väghållning utan även annan produktion då instrumentet kan användas för andra ämnen än bara bitumen (Tyllgren, 2014).

Lunds Tekniska Högskola bestämde sig för att införskaffa en DSR 2013 för användning inom undervisning, forskning och för utveckling tillsammans med andra institutioner och företag. Hittills har det skrivits två examensarbeten om DSR på LTH, första examensarbetet handlade om att sätta ihop maskinen och ta fram en elevmanual medan den andra handlade om att ta fram lämpliga körsätt för bitumen samt undersöka återvunnen asfalt.

1.2 Syfte

Arbetet syftar till att beskriva skillnaderna mellan standardbitumen och modifierade varianter med PMB och Sasobit. Det sker med utvärdering enligt Superpave och jämförelser mellan DSR-mätningar och andra mätmetoder som Fraass, Fracture Toughness och Bending Beam Rheometer. Förutom oscillerande mätningar görs även kryptest enligt MSCR.

Manualen till DSR skall uppdateras så gott det går, främst det praktiska. Denna manual skall inte ses som den slutliga utan för varje examensarbete bör den uppdateras då förbättringar kan göras.

Ett annat mål med examensarbetet är att finna ett samband mellan etablerade provningar i den svenska bitumenbranschen och i Superpave, med hjälp av DSR och RVB, rotationsviskosimeter Brookfield.

Bland annat ska följande frågor bevaras:

- Är det möjligt att trimma provet till PP8 med nuvarande teknik?
- Hur står sig polymermodifierat bitumen samt vaxmodifierat bitumen i jämförelse med omodifierat bitumen

1.3 Avgränsning

LTH har inte utrustning för att åldra bitumen med RTFOT samt PAV och där har vi fått hjälp av Nynas AB som skickade bitumen behandlat enligt RTFOT samt RTFOT+PAV till oss.

Uppdateringen av manualen gäller främst den praktiska delen. Detta eftersom vi på grund av tidsbegränsning ej har möjlighet att undersöka och uppdatera vad gäller mjukvara och programvaran Rheoplus.

Den uppdaterade manualen är menad för LTHs framtida studier med DSR och kommer ej att inkluderas som bilaga. Önskas tillgång till manual hänvisar vi till Ebrahim Parhamifar.

Mätningar med Bending Beam Rheometer, Fraass, och Fracture Toughness genomfördes av Nynas AB bitumenlaboratorium i Nynäshamn.

1.4 Metoder

Inledningen av examensarbetet handlade mest att bekanta sig med mätinstrumentet, Dynamisk skjuvreometer, med hjälp av en manual som tagits fram av tidigare LTH elever samt med hjälp från tidigare elever som jobbat med samma instrument. Med DSR, Dynamisk skjuvreometer, gjordes mätningar där ett referenstest kördes för att kontrollera att instrumentet fungerade korrekt och resulterade i korrekta värden.

För att öka förståelsen kring DSR bestod nästa del av arbetet att inhämta kunskap om bitumen, reologi samt andra mätmetoder som används än idag i bitumenbranschen.

Mätningar utfördes på ett antal bitumentyper, ett 70/100 bitumen, en variant av 70/100 som är blandad med vax (Sas 85 3) samt ett polymermodifierat bitumen (PMB). Samtliga av dessa tre bitumensorter har sedan ålderbehandlats dels med RTFOT och dels med RTFOT+PAV, detta ger nio stycken bitumentyper som har testats.

Tidigare examensarbete har visat att trimning på PP8 är besvärlig och därför har resultaten inte varit trovärdiga nog för att dra slutsatser, men i detta examensarbete används en ny metod för att forma provkropparna och som förhoppningsvis minskar behovet av trimning.

2 Litteraturstudie

2.1 Reologi

Eftersom en Dynamisk skjuvreometer används för att bestämma de reologiska egenskaperna hos bland annat bitumen, kan det vara bra för läsaren att få lite bakgrundsfakta om reologin och för att öka läsarens förståelse om reologin finns en kort sammanfattning nedan, innan läsaren fortsätter.

Ordet reologi härstammar från grekiskans *rhe'os* 'ström, flöde och *logia* som betyder lära, vetenskap. Reologi är alltså en sammansättning av ovanstående ord och innebär läran om vätskors och fasta materials tidsberoende deformationsegenskaper (NE, 2014). Vid mätning av de fysiska egenskaperna hos bitumen läggs stor vikt vid att karakterisera hur de reologiska egenskaperna beter sig (Airey, 97).

Hur de reologiska egenskaperna beter sig beror på en mängd olika faktorer, dock är nedanstående faktorer extra viktiga att ta hänsyn till (Mezger, 2011, s. 19):

- ”Type of loading (preset of deformation, velocity or force; or shear strain, shear rate or shear stress, respectively)
- Degree of loading (low-shear or high-shear conditions)
- Duration of loading (the periods of time under load at rest)
- Temperature”

2.1.1 Viskositet

För samtliga vätskor finns det ett samband mellan den inre friktionen och viskositeten, då vätskor är i rörelse uppstår det ett motstånd i vätskan och detta motstånd benämns till viskositet. Viskositeten talar alltså om hur trögt ett visst ämne är, detta kan experimenteras med ett enkelt test. Genom att röra runt i en behållare och jämföra motståndet hos olivolja mot vatten märker du enkelt att motståndet hos olivoljan är större, detta förklaras med att olivoljan har högre viskositet än vattnet (Mezger, 2011).

Enheten för viskositet är Pascalsekunder, $[Pa \cdot s]$, och kan räknas ut på två olika sätt. Dels den *dynamiska viskositeten*, enligt första ekvation nedan samt den *kinematiska viskositeten* enligt den andra ekvationen nedan (Mezger, 2011).

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$$

(Ekv. 1)

där

$\dot{\gamma}$ = skjuvhastighet, $[s^{-1}]$

η = dynamisk viskositet, $[Pa \cdot s]$

τ = skjuvspänning, $[Pa]$

$$v = \frac{\eta}{\rho}$$

(Ekv. 2)

där

v = kinematisk viskositet, $\left[\frac{m^2}{s}\right]$

ρ = densitet, $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$

2.1.2 Elasticitet

Om ett visst ämne belastas kommer ämnet att deformeras, om ämnet återtar sin ursprungliga form när belastningen tas bort är ämnet helt elastiskt. Ämnet har förmågan att återta sin ursprungliga form så länge spänningen inte överskrider det linjärelastiska området. Om spänningen är utanför det linjärelastiska området kan ämnet antingen lagra energin, vilket gör att ämnet inte återgår till sin ursprungliga form eller så kan brott ske (Mezger, 2011).

2.1.3 Viskoelasticitet

Material som uppvisar *både* viskösa och elastiska egenskaper kallas för viskoelastiska ämnen. Bitumen är ett sådant ämne. Vid låga temperaturer eller under kort belastningstid uppvisar bitumen *elastiska* egenskaper och vid höga temperaturer eller under lång belastningstid uppvisar bitumen viskösa egenskaper. Bitumens reaktion under en belastning är alltså beroende av både temperaturen samt belastningstiden och därför definieras bitumens reologi av belastning-töjning-tid-temperatur (*stress-strain-time-temperature*) (Airey, 97).

Efter en belastning så kan ena delen av ämnet återgå till sin ursprungliga form, denna del representerar den elastiska delen och den andra delen av ämnet kan få permanent deformationen och denna del representerar den viskösa delen av ämnet (Mezger, 2011).

2.2 Dynamisk skjuvreometer, DSR

Dynamisk skjuvreometer, eller DSR, är ett mätinstrument som används för att mäta de reologiska egenskaperna hos viskösa, elastiska och viskoelastiska ämnen. Den komplexa skjuvmodulen, G^* , och fasvinkeln, δ , är de egenskaper som primärt registreras vid oscillerande mätningar med variation av temperatur och belastningsfrekvens. Dessa värden används sedan för att få en bild av hur den elastiska och viskösa delen av bitumen beter sig vid olika temperaturer (Asphalt, 2007).

DSR använder sig av en bottenplatta respektive ett mät huvud för att utföra testerna. Dessa har för vårt arbete varit antingen 8 mm eller 25 mm i diameter. 8 mm plattorna, från och med nu också kallad PP8 (Parallel-Plate) har använts för tester mellan 30 °C och -30 °C och 25 mm, från och med nu också kallad PP25, för tester mellan 100 °C och 10 °C (Asphalt, 2007).



Figur 1 DSR

2.2.1 Oscillering och krypning

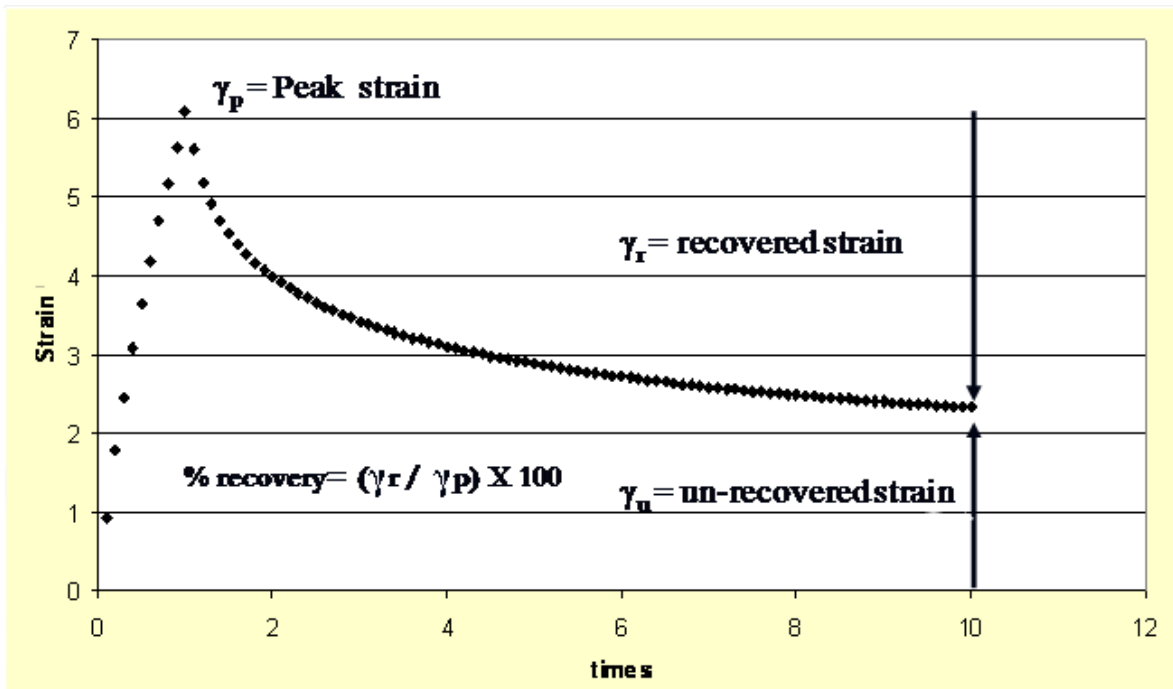
Tester med DSR kan utföras med ett antal olika metoder men eftersom det endast var två metoder som användes för detta arbete så är det endast dessa vi kommer att fördjupa oss i.

Den primära mätmetoden var sveptester med oscillation. Oscillerande tester utförs på det sätt att provkroppen periodiskt får ett vridmoment applicerat på sig från den övre mätplattan vilken rör sig fram och tillbaka med bestämd hastighet. Utöver frekvensen spelar även amplituden in på oscillerande tester.

Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) är ett kryptest och är det senaste tillägget i det amerikanska Superpaveprojektet vad gäller prestanda-karakterisering av bindemedel. MSCR beskriver bland annat motstånd mot

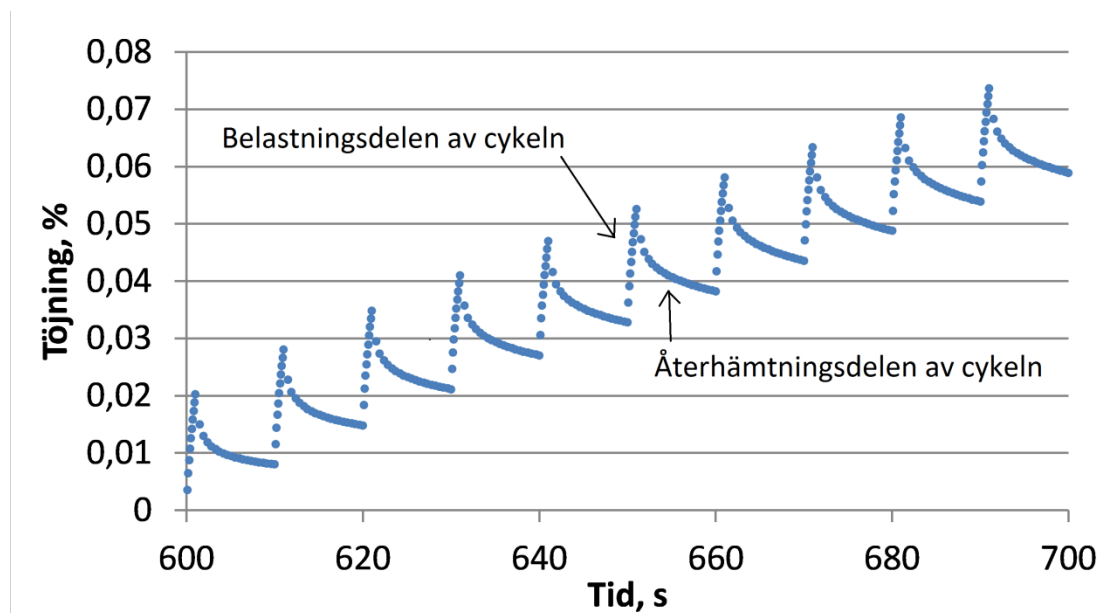
spårbildning vid högre temperaturer och ska ersätta nuvarande parameter $G^*/\sin(\delta)$. Andra fördelar med MSCR-testet är att det ersätter tester som elastisk återhämtning, seghet, uthållighet och duktilitet. Testet ger informationer både om bituminets prestanda och struktur (FHWA, 2014).

Genom att vrida mät huvudet på DSR med en viss spänning och därefter låta provet återhämta sig fås mått på elastisk återhämtning, R (eng. *recovery*), och plastisk deformation, J_{nr} (eng. *non recoverable creep compliance*).



Figur 2 En period av MSCR (FHWA, 2014)

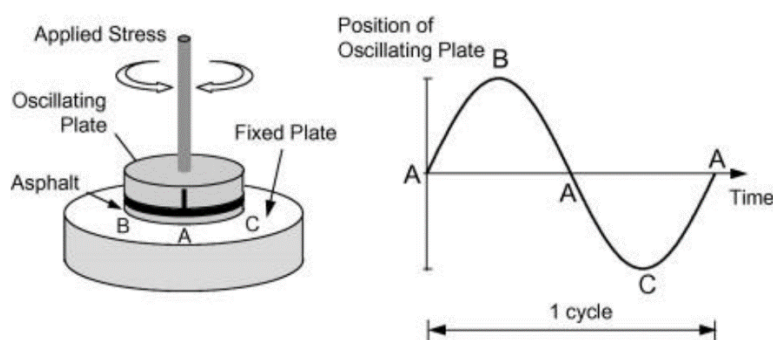
Testet utförs genom att belasta bindemedlet under en sekunds krypning, efter det tillåts bindemedlet att återhämta sig i nio sekunder. Efter återhämtningen har det gått en cykel (FHWA, 2014). Testet belastas bara med 100 Pa från början och denna belastning upprepas under 10 cykler, därefter höjs belastningen till 3200 Pa under ytterligare 10 cykler och efter detta är mätningen klar (ASTM, 2010).



Figur 3 Ett typiskt resultat från MSCR test av polymermodifierat bitumen

2.2.2 Applicerade variabler (amplitud/skjuvtöjning, skjuvspänning, frekvens/vinkelhastighet, temperatur)

Amplituden för en oscillation kan beskrivas som vinkeln mellan punkt A i figur 4 och punkt B respektive C som den oscillerande mätplattan rör sig emellan. Mätplattan börjar vid A, rör sig till B, vänder tillbaka och rör sig mot C där den passerar A, sedan tillbaka till A. Detta är en fullständig oscillation och kallas även för en period. Frekvensen är måttet på hur snabbt dessa perioder genomförs och med DSR mäts detta i radianer per sekund (rad/s) (Mezger, 2011).



Figur 4 Oscillation samt period (cycle) (Airey, 1997)

Vid oscillation uppstår skjuvtöjning samt skjuvspänning, dessa används sedan för att beräkna G^* . Skjuvtöjning, γ , beskriver sambandet mellan höjden (h) samt förskjutningen av plattan (s) och är ett mått på mängden pålagd deformation. Skjuvtöjning ökar med amplituden och mäts från den övre

mätplattans yttre kant. Det anges i procent och fås genom formel (Mezger, 2011):

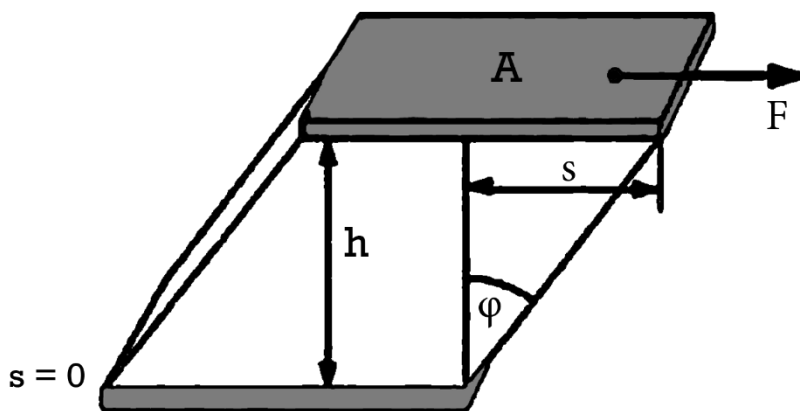
$$\gamma = \frac{s}{h} = \frac{m}{m} = \%$$

(Ekv. 3)

Där skjuvspänning, τ , är belastningen per ytenhet och betecknas med Pascal, och beräknas med följande formel (Mezger, 2011):

$$\tau = \frac{F}{A} = \frac{N}{m^2} = Pa$$

(Ekv. 4)



Figur 5 Skjuvtöjning (Mezger, 2011)

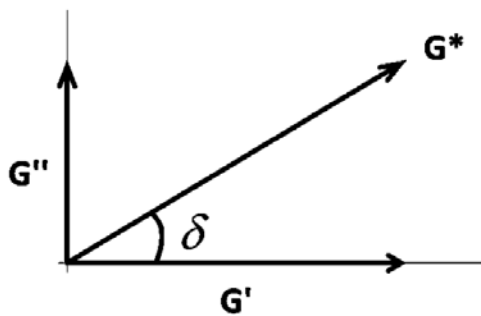
2.2.3 Uppmätta egenskaper (komplex skjuvmodul och fasvinkel)

Den komplexa skjuvmodulen, G^* beskriver hur materialet klarar av att motstå deformation som uppstår när det belastas med skjuvspänningslast. G^* bestäms med skjuvtöjning samt skjuvspänning enligt formel:

$$G^* = \frac{\tau}{\gamma} = \frac{Pa}{\%} = Pa$$

(Ekv. 5)

Där G^* innefattar två stycken komponenter, elasticitetsmodulen G' samt viskositetsmodulen G'' . Dessa beskriver hur visköst eller elastiskt ett ämne är. Fasvinkeln δ anger andelen av vardera. Fasvinkeln sträcker sig mellan 0° och 90° . Med δ över 45° betyder det att materialet är mer visköst än elastiskt och under 45° att materialet är mer elastiskt än visköst. Exakt 45° innebär lika stor viskös del som elastisk del (Mezger, 2011).



Figur 6 Fasvinkel (Mezger, 2011)

Fasvinkelns ekvation:

$$\delta = \tan^{-1} \left(\frac{G''}{G'} \right)$$

(Ekv. 6)

där

δ = Fasvinkeln [$^{\circ}$]

G'' = Viskositetsmodulen

G' = Elasticitetsmodulen

(Mezger, 2011)

Det är viktigt att både δ och G^* används för att dra slutsatser om materialets egenskaper eftersom två olika ämnen med samma G^* kan ha olika egenskaper för elasticitet och viskositet (Asphalt, 2007).

2.2.4 Beräknade egenskaper (elastisk och viskös modul)

Elasticitetsmodulen, också kallad lagringsmodulen beskriver mängden energi som ett ämne lagrar vid den oscillerande delen av en mätning.

Vid oscillerande tester lagrar bitumen en viss del av energin som läggs på provkroppen, denna andel kallas för elasticitetsmodulen, eller lagringsmodulen. Den beskriver mängden energi som bindemedlet sedan kan använda för att återgå mot sin tidigare form. G' används för att beteckna denna mängd och beräknas med följande formel:

$$G' = \left(\frac{\tau_A}{\gamma_A} \right) \times \cos \delta$$

(Ekv. 7)

där

τ_A = amplituden för skjuvspänningen

γ_A = amplituden för skjuvtöjningen

Den resterade energin från den pålagda lasten går förlorad när bindemedlet deformeras och denna mängd kallas för viskositetsmodulen, eller förlustmodulen. Den betecknas med G'' och beräknas med följande formel (Mezger, 2011):

$$G'' = \left(\frac{\tau_A}{\gamma_A} \right) \times \sin \delta$$

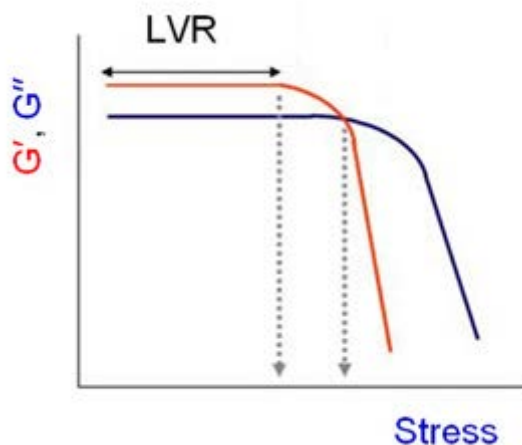
(Ekv. 8)

2.2.6 Linjärviskoelastiskt område, LVE

Inom det linjärviskoelastiska området, LVE, gäller Newtons och Hookes lagar där den viskösa delen beter sig enligt Newtons lag medan den elastiska delen beter sig enligt Hookes lag. Så länge LVE gränsen inte överskrids påverkas inte strukturen hos bindemedlet, detta är väldigt viktigt just på grund av att DSR maskinen mäter de reologiska egenskaperna och om strukturen hos bindemedlet bryts är det inte längre möjligt att dra slutsatser (Mezger, 2011).

För att försäkra sig att mätningen sker inom LVE-området kan amplitudsvep köras för att bestämma exakt var LVE gränsen ligger. Då LVE-området skiljer sig mellan olika bindemedel bör amplitudsvep köras på nya ämnen.

Amplitudsvep är en oscillerande test, där frekvensen och temperaturen hölls konstanta medan amplituden växer med tiden. Så länge grafen är konstant ligger mätningen inom LVE-området, men så fort grafen gör en avvikelse har LVE-området överskrids. Eftersom G' -kurvans avvikelse kommer före bland annat G'' -kurvan så bestäms LVE-området i de flesta fall av G' -funktionen, figur 7 nedan illustrerar detta (Mezger, 2011).



Figur 7 LVE-området (American Laboratory, 2012)

2.3 Åldring

Bitumen åldras med tiden. Det innebär att bituminet omvandlas och hårdnar. Samtidigt förlorar bindemedlet sina flexibla egenskaper. Förmågan att ge efter för rörelser som kommer av temperaturförändringar försämras också. Detta leder så småningom till att beläggningen spricker och faller sönder. (Agardh & Parhamifar, 2014).

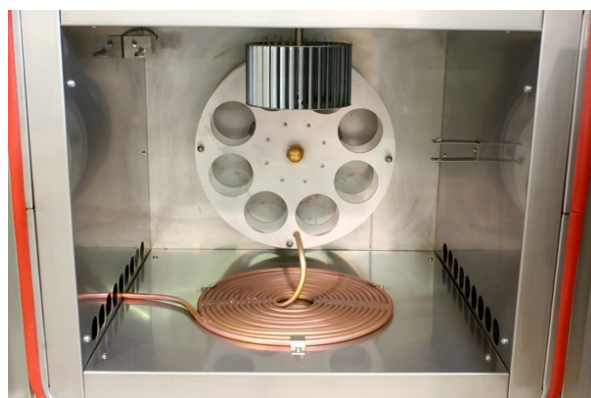
Bindemedlet åldras hela tiden, alltså även vid blandning, utläggning och vid lagring. De faktorer som påverkar åldringen mest är följande fyra (VTI, 2004, s. 48):

- *”Reaction with atmospheric oxygen*
- *Evaporation of volatiles*
- *Phase separation in connection to porous aggregates, exudation*
- *Physical hardening due to altering the molecular configuration”*

Åldringen kan delas in i två delar, korttidsåldring och långtidsåldring. Korttidsåldringen är relaterad till oxidation och avdunstningen av flyktiga ämnen medan långtidsåldringen är relaterad till den fysiska hårdningen men även oxidation. Vid oxidation förstyrkas bindemedlet eftersom mängden polära molekyler ökar, temperaturen har stor inverkan på hur stor oxidationen blir och därmed spelar tillverkningstemperaturen även en avgörande roll i hur styvt bindemedlet kan bli (VTI, 2004). Det finns sätt att motverka förhårdningen med tillsatsmedel och optimal tillverkningstemperatur (Tyllgren, 2013).

För att undersöka åldringen hos bitumen tillämpas två tester: Rolling Thin Film Oven Test, RTFOT, för korttidsåldring samt Pressure Ageing Vessel, PAV, för långtidsåldring (Whiteoak, 1990).

2.3.1 RTFOT

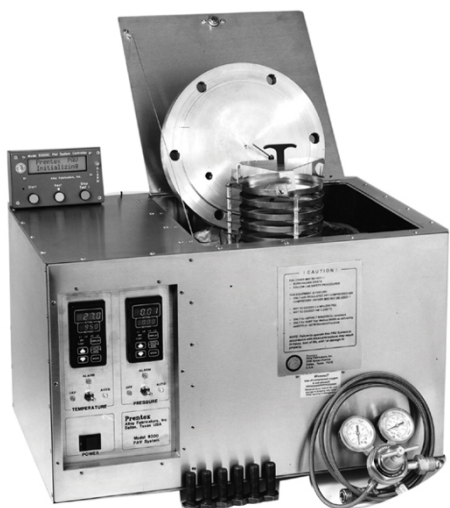


Figur 8 RTFOT-ugn (Controls Group, 2014)

RTFOT testet ser till att bindemedlet hårdnar, där bindemedlet åldras genom oxidation och avdunstning. Testet går till genom att bindemedlet placeras i en behållare, behållaren placeras i sin tur på ett roterande hjul i en special ugn. Under testet roterar hjulet konstant och på så sätt har bindemedlet ingen chans att bilda ett skikt som skyddar undre lagren mot lufttillförseln och på så sätt fås ett

homogent åldrats bitumen. Mängden bitumen i behållare skall vara 35 gram, testet pågår sedan i 75 minuter där temperaturen normalt är 163°C. Även om testet inte påminner om det verkliga åldrandet som bindemedlet får genomgå så har det visats empiriskt att åldringen med RTFOT påminner om verkliga åldrandet (Whiteoak, 1990).

2.3.2 PAV



Figur 9 PAV, Pressure Aging Vessel, (Forney, 2014)

För att PAV-testet skall kunna genomföras krävs det att bindemedlet har åldrats först genom RTFOT, alltså är PAV en fortsättning efter att bitumen har korttidsåldrats. I PAV placeras 50 gram av bitumen i ett skål i ett tryckkärl. Behandlingen pågår i 20 timmar, där provet utsätts för ett lufttryck på 2.1 MPa med en temperatur mellan 90 till 110 °C. Eftersom åldringen hos bindemedlet påverkas av klimatet så skiljer det sig mellan olika regioner och därför bestäms temperaturen hos PAV testet genom Strategic Highway Research Program (SHRP) specifikationerna för bitumen. Resultatet redovisas i form av

åldringsindex, där kvoten är mellan åldrat och icke åldrat bitumen. Egenskaper som kan användas för att få ut kvoten kan vara att jämföra penetrationstal eller mjukpunkt (Airey, 97).

2.4 Andra mättekniker och instrument

2.4.1 Penetration

För att kunna utföra penetrationstestet krävs att bituminet är i penetrationsburkar, se figur 9. En nål fästes på den övre delen av en penetrometern, rakt ovanför penetrationsburken, nålens och hållarens totala vikt skall vara exakt 100 gram. Nålen sänks sedan ända ner tills att den precis nuddar bitumenytan innan testet påbörjas. Penetrometern släpper sedan ner nålen så att den kan tränga ner i bindemedlet under 5 sekunder.

Inträngningsdjupet beskriver penetrationstalet för bindemedlet. Vanligtvis upprepas detta tre gånger för samma sort bitumen där medelvärdet av samtliga tre mätningar ger det slutliga värdet. Under dessa tre mätningar måste nålen bytas ut samt att penetrationsburken roteras så att mätningen täcker större del av bindemedlet (Whiteoak, 1990). Penetrationstalet talar om hårdheten hos bindemedlet och enheten anges i tiondels mm (mm^{-1}). Penetrationstalet används i Europa som kvalitetsbeteckning, exempelvis skall bitumen 50/70 ha

ett penetrationstal på 60 ± 10 vid $25\text{ }^\circ\text{C}$. Desto högre penetrationstalet är desto mjukare är bindemedlet (Agardh & Parhamifar, 2014).



Figur 10 Penetrometer (Controls Group, 2014a)

2.4.2 Mjukpunkt

Den ursprungliga metoden för att bestämma mjukpunkten hos bitumen är Kula- och Ring-metoden. Mjukpunkten är vid den temperatur där bituminet anses bli flytande. Anledningen till att mjukpunkten mäts är att bituminet saknar smältpunkt (Andersson & Sulejmani, 2013). Metoden går till så att bituminet gjuts in i en metallring, som placeras i ett vattenbad. På bituminet läggs en stålkula med en vikt på 3,5 gram. Temperaturen höjs med $5\text{ }^\circ\text{C}/\text{minut}$ tills stålkulan tänjer bituminet till ett djup av 25,4 mm. Med Kula- och Ring-metoden skall det vid upprepade försök ej skilja sig mer $1\text{ }^\circ\text{C}$ (Agardh & Parhamifar, 2014). Problemet med Kula- och Ring-metoden är att den bara fungerar för rent bitumen, inte om det innehåller andra ämnen (Tyllgren, 2014).

2.4.3 Rotationsviskosimeter

Det finns ett mätinstrument som funnits i många år och används överallt där det är viktigt att känna till och påverka konsistensen. Den använder sig av rotation för att mäta viskositeten med hjälp av vridmotståndet och kallas därför för rotationsviskosimeter (Mezger, 2011). Ett vanligt fabrikat är Brookfield, som blivit närmast synonymt med tekniken. Med rätt tillbehör kan rotationsviskositet också mätas med en DSR.

En rotationsviskosimeter består av två delar, huvud där motorn är samt mätspindel som roterar med hjälp av motorn. Spindeln samlar data när den väl roterar i bindemedlet, det är motståndet mot rotationen som mäts, alltså trögheten i bindemedlet. Mätutrustningen kan även användas för att mäta viskositeten hos icke-Newtonska som Newtonska vätskor. Newtonska vätskor är vätskor som enbart påverkas av temperaturen medan icke-Newtonska vätskor också påverkas av skjuvspänningen (Tecmos, 2006).

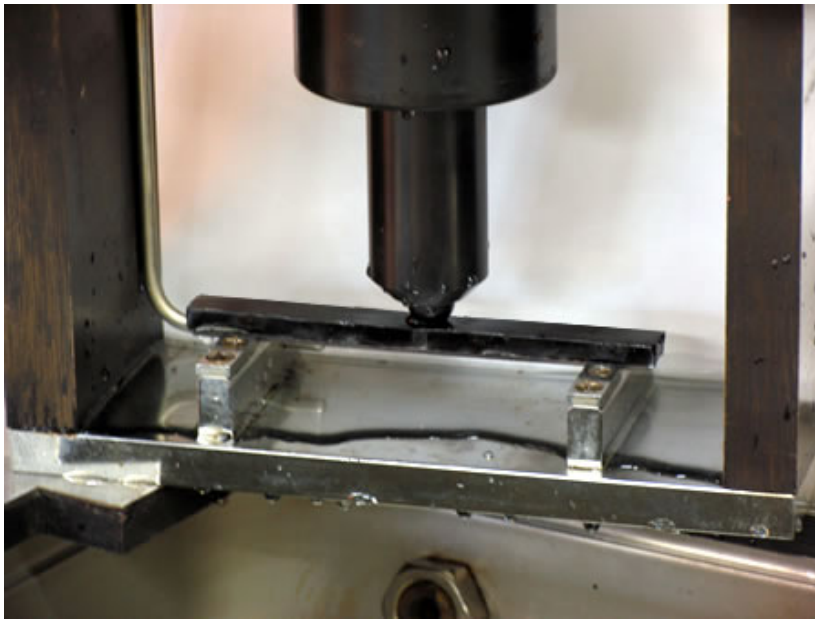
För att få pålitliga mätvärden från rotationsviskosimetern är det viktigt att låta bindemedlet få stabiliseras när temperaturen sänks eller höjs.

Stabiliseringstiden kan variera mellan olika temperaturer, vid lägre temperaturer krävs det längre stabiliseringstid (Palmér & Žužo, 2011)

2.4.4 BBR

BBR står för Bending Beam Rheometer och är ett test för att undersöka hur bitumen beter sig vid låga temperaturer. Den mäter bland annat styvheten och egenskaper hos bindemedlet med betydelse för sprickbildning vid låga temperaturer, som uppkommer genom krympning. Precis som PAV-testet bestäms temperaturen under mätningen beroende på var bindemedlet skall läggas och bindemedlet måste ha åldrats med PAV innan testet (Pavement Interactive, 2011).

En liten balk gjord av bitumen belastas i mittpunkten enligt nedanstående bild, där nedböjningen på balken mäts över tiden. Bindemedlets styvhet beräknas med hjälp av avböjningen kontra egenskaperna hos en standard balk gjord av bitumen. Tillsammans med DTT, Direct Tension Test, klassificeras bindemedlet och används som nedre benämningstemperatur i Superpaves klassificering av bitumensorter, enbart för bruk inom USA (Pavement Interactive, 2011).

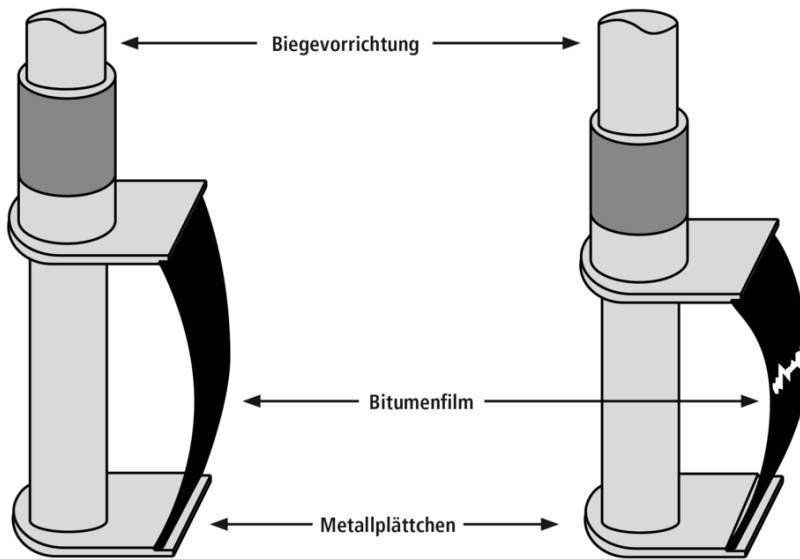


Figur 11 Bending Beam Rheometer (Pavement Interactive, 2011)

2.4.5 Fraass breaking point test

Fraass breaking point-testet används för att beskriva egenskaperna hos bindemedlet vid låga temperaturer, så lågt som $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Syftet med mätningen är att bestämma vid vilken temperatur bindemedlet spricker. Länder där vintern är lite mer extrem har krav på när bindemedlet får spricka enligt *Fraass breaking point*-testet, varav Sverige är ett av dessa länder (Whiteoak, 1990).

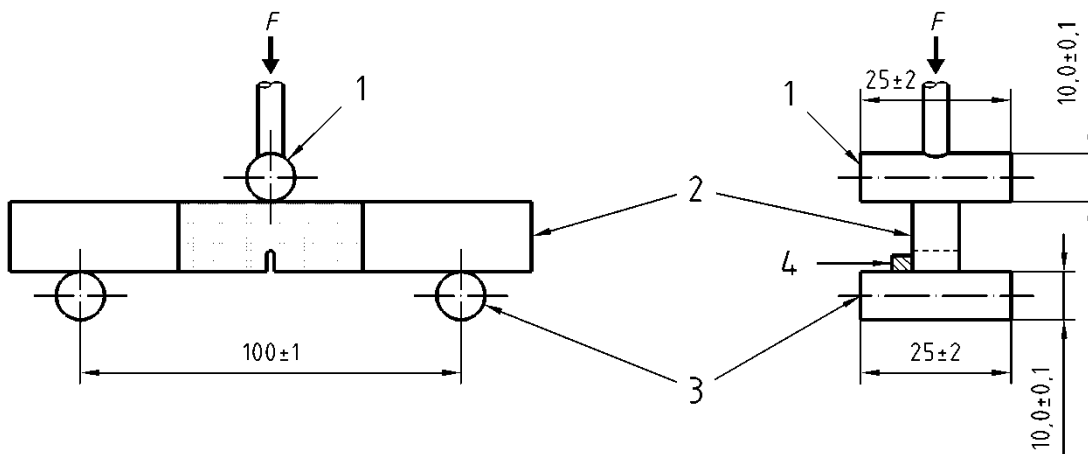
En film med 0.5 mm bitumen målas på ett rektangulärt tunt, plåtbleck på 41x20 mm. Blecket böjs sakta och släpps. Temperaturen sänks med $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ per minut och detta pågår tills bindemedlet spricker. När väl bindemedlet spricker noteras temperaturen som blir *Fraass breaking point*. För att bekräfta värdet kan tester med penetration och mjukpunkt genomföras och plottas i ett så kallat Heukelom-diagram eller BTDC, Bitumen Test Data Chart. Anledningen till detta är att värdet från *Fraass breaking point* motsvarar samma temperatur som bitumen har vid penetration 1,25 1/10 mm (Whiteoak, 1990).



Figur 12 Fraass test, observera, Biegevorrichtung = böjningsanordningen (ARBIT, 2014)

2.4.6 Fracture Toughness

Metoden beskrivs i en provisorisk europeisk standard (FprCEN/TS 1593).



Figur 13 Fracture Toughness test. (FprCEN/TS 1593)

Brottseghet är ett materials förmåga att belastas utan att brott sker även om det existerar fel hos materialets inre struktur, felen kan vara små sprickor. Eftersom ett material kan ha brister så har brottseghetsgränsen tagits ut med hjälp av den linjärelastiska brottmekaniken. Där tas hänsyn till bland annat felets storlek, geometri men även materialets egenskaper för att räkna ut gränsen då brott sker. Temperaturen vid brott för ett givet kriterium är resultatet av mätningen (NDT, 2014).

Spänningsintensiteten, K_{IC} , används för att beräkna då spricktillväxten sker, vilket är då spänningsintensiteten överstiger brottsegheten, K_C . Spänningsintensiteten räknas ut enligt följande formel (NDT, 2014):

$$K_{IC} = \sigma \times \sqrt{\pi\alpha\beta}$$

(Ekv. 9)

där

σ = spänning i $Pa \times \sqrt{m}$

α = sprickans längd i meter

β = materialberoende

2.5 Bindemedel för asfalt

För att få en bättre förståelse av bitumen kan det vara bra att gå igenom bindemedlets funktion i en belagd väg. I Sverige är det vanligaste beläggningen en bituminös beläggning, vilket innebär att stenmaterialet som består av olika kornstorlekar hålls samman av ett bindemedel, som utgörs av bitumen (Agardh & Parhamifar, 2014).

Rent bitumen som bindemedel fungerar bra i de flesta fallen. I särskilt krävande belastningsfall ställs högre krav på bindemedlet. För att uppfylla dessa krav har polymermodifierat bitumen och andra tillsatsmedel tagits fram. Tillsatserna anses öka tiden mellan underhållsåtgärderna, vilket underlättar för trafiken där framkomligheten är begränsad (Whiteoak, 1990).

Bindemedlets funktion i en asfaltbeläggning (Agardh & Parhamifar, 2014, s. 57).

- ”Fungera som smörjmedel vid utläggning och packning, så att stenaggregatet lätt kan få en tät och stabil uppbyggnad
- Fungera som kitt i stenmaterialet
- Skydda stenmaterialet från krossning och påverkan från klimatet
- Ge beläggningen lastfördelande förmåga
- Ge beläggningen förmåga att utan brott forma sig efter de långsamma rörelser som uppkommer i underlaget beroende på ändringar i temperatur och fuktighet, det vill säga ge beläggningen flexibilitet”

2.5.1 Bitumen

Bitumen har länge använts av människan, långt innan det hamnade på vägarna. Studier har visat att Sumerna redan 3800 f.kr använde sig av bitumen, antingen för binda samman eller att för att täta. Bitumen finns naturligt men det mesta som används idag framställs genom raffinering av petroleumolja (Whiteoak, 1990).

Trots det breda användningsområdet som bitumen kan användas till, täcker vägsidan tillsammans med flygplatser ungefär 85 % av den totala konsumtionen av bitumen. Framställningen av bitumen kräver processer som destillation och syretillförsel och vidarebehandling genom blandning. Råoljan består av många olika kolväten med en stor varierande längd på dessa kolväten. Destillationen delar upp råoljan efter deras komponenter, bland annat bestäms denna uppdelning genom deras kokpunkt. Processen delar råoljan i olika fraktioner och därmed separeras gas, bensin, fotogen och långa kolväten. Dessa långa och tunga kolväten destilleras än en gång för att få ut kortare och lättare kolväten under vakuum vid 350-450 °C. Dessa kan i sin tur användas för att framställa olika sorters bitumen (Airey, 1997).

2.5.2 Sasobit

Sasobit även känd som vax, framställs av naturgas med hjälp av Fischer-Tropsch-processen. Sasobit finns tillgängligt i fast form, i tre olika former. Två av dessa former är som små kulor, en med 5 mm i diameter och den andra med 1 mm i diameter medan den sista är platt (Shaw, 2007).

Smältpunkten för Sasobit är 100-115 °C och är fullständigt löslig vid en temperatur över 140 °C tillsammans med bitumen. Vid blandning med rent bitumen reduceras viskositeten (Sasolwax 1a, 2014). Sasobit ökar motståndet mot deformation, såsom spårbildning. Sasobit minskar även behovet av värme vid tillverkning och utläggning av asfaltmassa med upp till 20-30 °C med många fördelar, bland annat minskade koldioxidutsläpp (Sasolwax 1b, 2014)(Tyllgren, 2013).

2.5.3 PMB, polymermodifierat bitumen

Användning av polymermodifierat bitumen förutsätter lönsamhet och praktisk hanterbarhet, det vill säga följande krav bör uppfyllas (Whiteoak, 1990, s. 151):

- *”Be readily available*
- *Resist degradation at asphalt mixing temperatures*
- *Blend with bitumen*
- *Improve resistance to flow at high road temperatures without making the bitumen too viscous at mixing and laying temperatures or too stiff or brittle at low road temperatures*
- *Be cost effective”*

Utöver ovanstående krav får tillsatsmedel användas om de kan hanteras säkert och användas med miljöhänsyn. Tillsatserna får inte påverka återvinning, deponering eller destruktions negativt. Före användning skall all påverkan på

beläggnings, arbetsmiljö och yttre miljö beskrivas och styrkas med godkänd provning i officiella dokument (Vägverket, 2005).

För att det ska vara ekonomiskt lönsamt med polymermodifierat bitumen så måste hela livslängden betraktas. Anledningen till att det är ekonomiskt lönsamt över hela livslängden är att underhållet minskar. Vägar med hög trafikbelastning eller där underhåll stör trafiken kan gynnas av polymermodifierat bitumen (Airey, 1997).

3 Metodbeskrivningar

3.1 Sharp/Superpave

Mellan åren 1987-1993 utförde Amerikanska *Strategic Highway Research Program*, SHRP, omfattande forskning där slutresultatet presenterades i Superpave. I Superpave finns specifikationer för bindemedlet, metod asfaltsblandning och även tester och simuleringsprogram som kan användas för att bland annat bedöma kvaliteten hos asfaltsblandningen. Målet med forskningen var att förbättra hållbarheten, prestandan och säkerheten på vägarna (Pavement Interactive, 1a, 2008).

Superpave står för *SUPERior PERforming asphalt PAVements*. Här konstaterade SHRP att det krävdes nya metoder, mätutrustningar och ny klassificering för bland annat bitumen (Pavement Interactive, 1b, 2008).

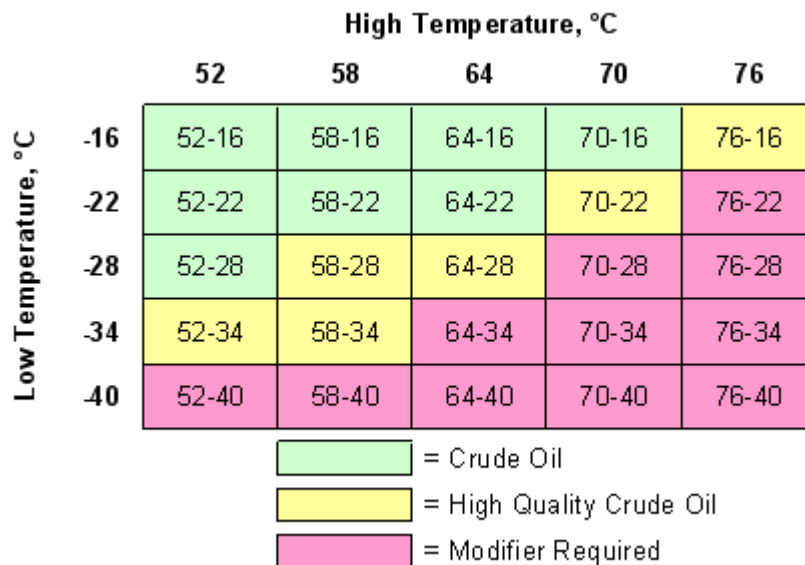
Anledningen till att det krävdes nya specifikationer var att penetrationstalet och viskositetsmätningarna inte räckte till för karakteriseringen vid *HMA*-belagda vägar (HotMixAsphalt). Den nya specifikationen PG i Superpave, *performance grading*, är mer lämpad och har bättre inriktning på spårbildning, utmattningssprickor och termiska sprickor. Grundtanken med PG är att valet av bindemedlet utgår från klimatiska ingångsparametrar. PG utgår alltså från klimatet på platsen innan alla andra kravparametrar formuleras (Pavement Interactive, 1b, 2008).

För att gradera bindemedlet enligt Superpave krävs följande tester (Pavement Interactive, 1b, 2008). Testerna beskrivs i det föregående.

- Rolling Thin Film Oven Test, RTFOT
- Pressure Aging Vessel, PAV
- Rotationiskosimeter, RV
- Dynamisk skjuvreometer, DSR
- Bending Beam Rheometer, BBR
- Direct Tension Test, DTT

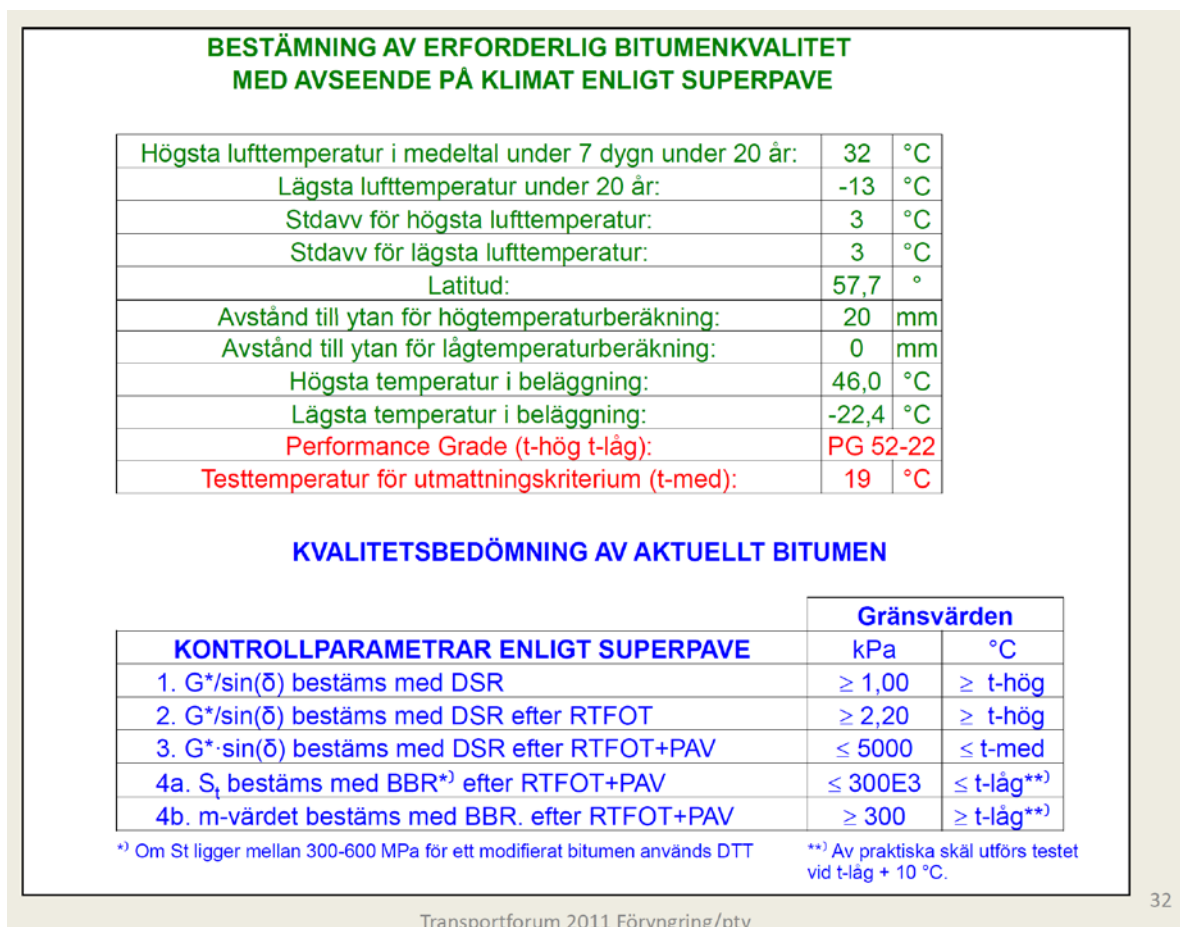
PG systemet använder sig av två temperaturer för att ange bindemedlets egenskaper, PG 52-22 °C, där den första representerar genomsnittstemperaturen i 7 varmaste dagarna medan den andra representerar förväntade minimum temperaturen som vägen kommer att utstå för. Om ett bindemedel förväntas utsättas för minimumtemperatur -20 °C och maximumtemperatur 50 °C krävs klassen 52-22. Det är viktigt att poängtera att dessa temperaturer är vad den belagda vägen kommer ha och inte luft temperaturen (Pavement Interactive, 1b, 2008).

Det finns ett antal klasser som synes i nedanstående figur.



Figur 14 Olika PG Klasser i Superpave (Pavement Interactive, 2008)

Nedanstående snabbguider visar hur krav på PG-klass beräknas från klimatdata och hur PG-klassen för ett bitumen bedöms (Tyllgren (2011)).



Figur 15 Performance Grading (Tyllgren, 2011)

3.2 ASTM och SS-EN (likheter och skillnader)

ASTM D7175-08 och SS-EN 14770:2012 är standarder från amerikanska respektive europeiska institut gällande mätningar med DSR. Dessa har en del skillnader men även vissa likheter, de mest relevanta för arbetet går genom här.

ASTM och SS-EN rekommenderar samma storlekar på spindlarna, 25 mm och 8 mm och 1 respektive 2 mm tjocka provkroppar (ASTM D7175-08 & SS-EN 14770:2012).

Båda innehåller även information om preparering av provkroppar med formar. Måtten finns med i ASTM men utelämnas i SS-EN. För 25 mm-plattan behövs en form med ett djup på 2 mm och en diameter på 18 mm. För 8 mm-plattan behöver provet en 2,5 mm djup form med en diameter på 8 mm. Utöver formar rekommenderar båda standarderna att provkroppar även kan hållas direkt på mätplattorna från en penetrationsburk eller liknande (ASTM D7175-08 & SS-EN 14770:2012).

Enligt ASTM är bitumen väldigt känsligt för upprepade uppvärmningar och därför rekommenderas att bituminet endast värms upp en gång efter att det kommit från raffinaderiet (ASTM D7175-08). SS-EN är däremot inte lika strikt och enligt denna kan bituminet delas upp i penetrationsburkar som sedan för sig kan värmas upp två gånger (SS-EN 14770:2012).

Förvaring av bitumen är en punkt som skiljer rätt rejält mellan de båda. Enligt ASTM skall tester köras så fort som möjligt efter att provkropp skapats (ASTM D7175-08). SS-EN menar istället att en provkropp med omodifierat bitumen skall få vila minst två timmar innan ett test utförs. För polymermodifierat bitumen skall det istället vila i minst tolv timmar. För alla bitumen gäller dock att provkroppar får förvaras i maximalt tre dagar innan ett test utförs, om förvaring skett i kyl skall provkroppen få ligga i rumstemperatur i minst 30 minuter innan test påbörjas (SS-EN 14770:2012).

ASTM anger testtemperaturen för applicering av ämnet på PP25 och ett temperaturintervall, 36-46 °C, för PP8 (ASTM D7175-08). SS-EN rekommenderar mjukpunkten ökad med 20 °C (± 5), högst 90 °C (± 5) (SS-EN 14770:2012). Den senare beräkningen valdes för detta arbete.

För trimning av provkroppar rekommenderar ASTM att mät huvudet sätts till den önskade testhöjden + 0.05 mm (för 25 mm plattan, för 8 mm gäller +0.1 mm). När provet har trimmats sänks mät huvudet till den önskad testhöjd vid aktuell temperatur. Denna metod skall ge tillräcklig utbuktning (ASTM D7175-08).

SS-EN beskriver inte detta steg lika ingående. Här nämns istället en extra höjd på mellan +0.025 mm och +0.05 mm utan att detaljera för vilken mätplatta,

däremot nämns att provkroppen bör få vara orörd under 5 minuter vid den extra höjden innan den sänks till testhöjden ± 0.1 mm (SS-EN 14770:2012).

För att koppla samman resultat från olika mätplattor nämner SS-EN en del gränsvärden. Vid samma temperatur och frekvens får skillnaderna i värden för G^* mellan de olika plattorna inte skilja sig mer än 15 %, och för δ är gränsen 3° (SS-EN 14770:2012).

ASTM rekommenderar att sveptester med PP25 startas vid den lägsta temperaturen för att sedan jobba sig uppåt samt att med PP8 starta på den högsta temperaturen och jobba sig nedåt (ASTM D7175-08). SS-EN nämner inget gällande riktning av temperatursteg.

Både ASTM och SS-EN anger att tester som kör mätningar vid ett flertal frekvenser skall starta mätningarna vid den lägsta frekvensen för att sedan sluta på den högsta (ASTM D7175-08 & SS-EN 14770:2012).

3.3 Programmering

Programvaran som utvecklats av Anton Paar för DSR-mätningar heter Rheoplus. Här kontrolleras i stort sett hela operationen. Ett fåtal saker som transportsäkring måste göras manuellt på maskinen. Rheoplus installeras på en Windows-dator och kommunicerar med DSR antingen via USB eller en crossover RJ45 kabel.

I Rheoplus finns en central kontrollpanel där de flesta inställningar görs utanför testerna. Detta är bland annat kalibrering av instrumentet och inställning av temperatur och höjd. För mätningar används mallar (*templates*) i filformatet .ort. I dessa anges vad som ska mätas, antal mätpunkter, temperaturer, höjder, med mera.

Templates använder sig av intervall för inmatning av inställningar. En typiskt template som använts i detta arbete har till exempel använt sig av tjugo intervall där hälften består av vänteperioder som används för att låta temperaturen uppnås i hela provet innan mätning utförs, och resterande tio intervall är de faktiska mätningarna vid vardera temperaturen.

3.4 Tider och jämvikt

Inför en mätning vid en viss temperatur är det viktigt att provkroppens temperatur har stabiliserat sig, därför används som tidigare nämnts vänteperioder mellan varje mätintervall. Dessa väntetider beror på vilken temperatur och generellt blir väntetiden högre desto lägre temperaturen blir.

Den template som används för MSCR inkluderar exempelvis endast en lång väntetid på 10 minuter innan mätningarna utförs eftersom ett MSCR test endast utförs på en temperatur åt gången. Samtliga stabiliseringstider som

använts för mätningar vid detta examensarbete är tillhandahållna av Nynas AB.

3.5 Sveptester

De oscillerande sveptesterna som körts har använt en templates tillhandahållna av Nynas AB. Dessa består av ett antal intervall där en vänteperiod följs av en mängd mätningar för varje temperatursteg.

	1 220 Pts. ⌚ 1 s	2 10 Pts.	3 245 Pts. ⌚ 1 s	4 10 Pts.
Rotation $\dot{\gamma}, n, \phi, \gamma$				
Rotation τ, M				
Oscillation ϕ, γ		γ 20.33..2.44 % ω 0.1..100 rad/s		γ 14.12..1.694% ω 0.1..100 rad/s
Oscillation τ, M				
F_N				
d, v, d/d	d 1.039 mm	d 1.039 mm	d 1.033 mm	d 1.033 mm
Accessory1 T	T 100 °C	T 100 °C	T 90 °C	T 90 °C

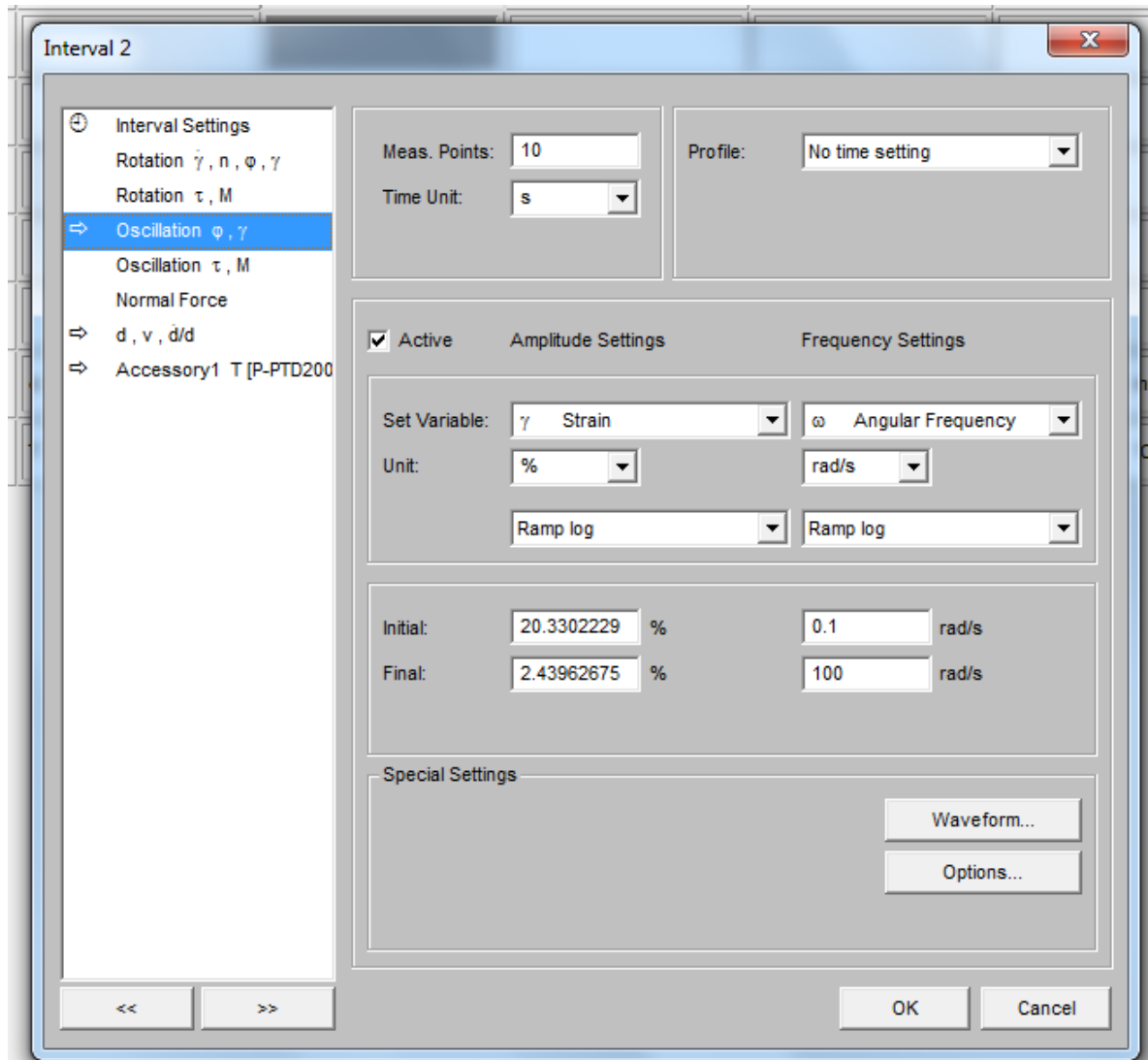
Figur 16 Fyra intervall vid sveptest (Rheoplus)

För samtliga intervall anges höjden samt temperaturen som DSR skall ställas till. För vänteperioderna anges utöver det endast tiden som maskinen DSR skall vänta. Vid mätningarna har belastning angetts med procentuellt Strain samt frekvens med rad/s. Vad gäller frekvensen och antalet mätpunkter så sker för varje temperatur tio stycken mätningar mellan 0.1 och 100 rad/s.

Belastningen varierar med höjden och minskar därmed allteftersom testet genomförs. Belastningen varierar även vid varje mättemperatur och börjar med en hög belastning vid en låg frekvens och slutar med en låg belastning vid hög frekvens. Detta synes i figur 15 ovan.

Sveptester med PP25 körs mellan 100 °C och 10 °C, lägre än 10 °C ger PP25 inte längre säkra resultat. Areal av provkroppen vid denna temperatur skapar problem eftersom den är alldeles för styv. Detta är anledningen till varför PP8 tar över vid 10 °C. Den mindre arean och större höjden möjliggör helt enkelt mätningar även vid minusgrader. PP8 körs därför mellan +30 °C och -30 °C. Något smidigare hade varit om tester med PP8 hade kunnat köras även upp till

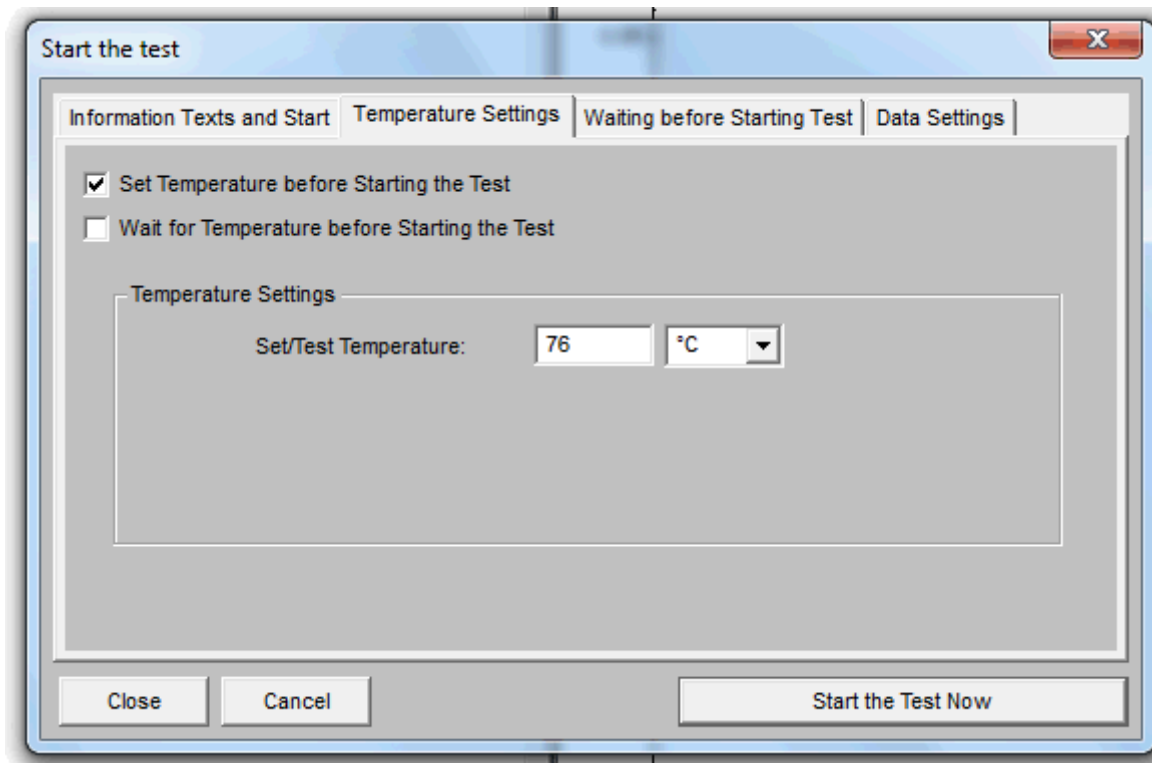
100 °C men här är provkroppens effekt omvänd, eftersom PP8 använder höga och smala provkroppar så skulle högre temperaturer resulterat i att provkroppen i stort sett runnit av provplattan.



Figur 17 Indata för oscillationsintervall

3.6 MSCR test

Template för MSCR tillhandahölls också av Nynas AB. MSCR-testet består av färre intervall och körs endast på en temperatur som sätts innan testet startas. Denna temperatur anges dock inte på samma sätt som för de oscillerande sveptesterna inuti template utan anges först när man startar testet.



Figur 18 Temperaturinställning MSCR

Testet inleds med en vänteperiod på tio minuter för utjämning av temperatur sedan körs tjugo stycken cykler med belastning och återhämtning som nämnts tidigare i kapitel 2.2.2.

4 Mätningar med olika bitumensorter

För examensarbetet har mätningar utförts på tre olika bitumen. Vardera har värmebehandlats i två steg, dels endast RTFOT och dels RTFOT samt PAV. Detta resulterade i nio stycken olika bitumensorter.

Sasobitblandningen benämns Sas 85-3, där 85 relaterar till penetrationstalet i utgångsbituminet och 3 till mängden vax, 3 %. PMB är ett polymermodifierat bitumen som finns på marknaden.

Tabell 1 Olika bitumensorter

70/100	Sas 85-3	PMB
70/100 RTFOT	Sas 85-3 RTFOT	PMB RTFOT
70/100 RTFOT+PAV	Sas 85-3 RTFOT+PAV	PMB RTFOT+PAV

4.1 Tillverkning av provkroppar

4.1.1 Uppvärmning och tillverkning

Först delades enlitersburkar upp i ett antal penetrationsburkar. Det underlättade fortsatt hantering och uttag av prover för test. Varje penetrationsburk värmdes därefter upp maximalt två gånger. En hel enlitersburk hade annars varit förbrukad efter bara två uppvärmningar.



Figur 19 Ytan på de olika bitumen, från vänster, 70/100, Sas 85-3, PMB (Nilsgart, 2014)

Uppvärmningen av penetrationsburkarna gjordes i en ugn vid 150 °C. 70/100 och Sas 85-3 värmdes i en timme innan provkroppar kunde göras. PMB tog

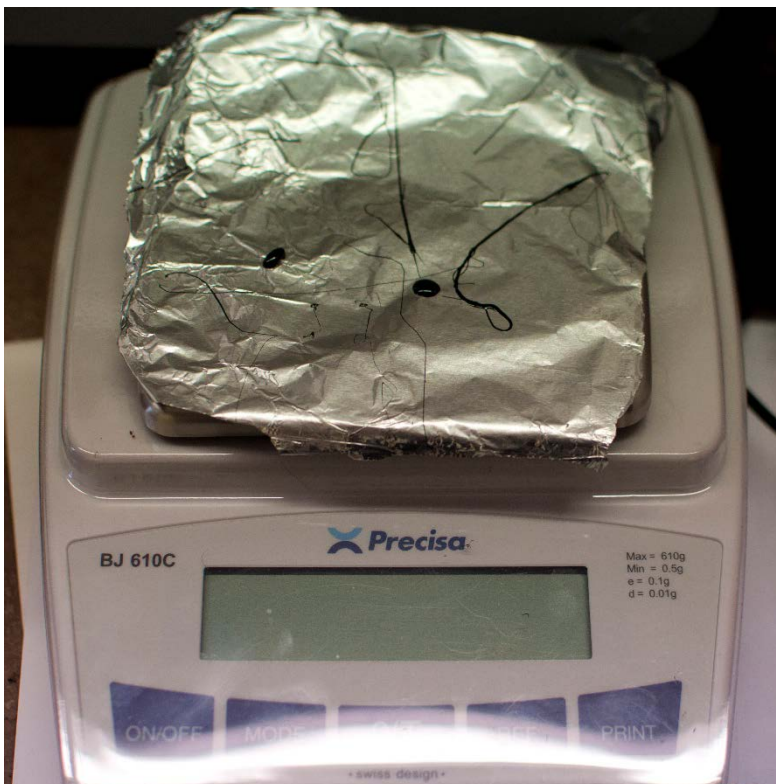
längre tid, närmare två timmar vid 170 °C innan det var möjligt, även med omrörning under uppvärmningen.



Figur 20 Penetrationsburk i ugn

När bindemedlet var tillräckligt varmt användes en spruta för att överföra en liten mängd bitumen till formar av silikon, som anskaffats från Anton Paar.

Utöver formen används en våg för att väga upp provkropparna. För PP25 ska provet väga 0.50 gram \pm 0.05 gram. För PP8 gäller 0.10 gram \pm 0.01 gram. Det visade sig under arbetet vara bättre att sikta på den övre delen av marginalen och sedan trimma bort överflödande mängder vid applicering.



Figur 21 Våg för skapande av provkroppar

Detta är en relativt enkel procedur med 70/100 och Sas 85-3. Med PMB var det mer problematiskt på grund av polymeren som bildar långa, elastiska trådar så fort ämnet svalnar. Något som skapade problem för samtliga bitumensorter var luftbubblor som kom från sprutorna, vilket gjorde att ett antal provkroppar fick kasseras och göras om.



Figur 22 Färdig provkropp för 25mm i form

4.1.2 Tider

Detta examensarbete följde till största delen tiderna som anges i SS-EN vad gäller förvaring och vila efter provtillverkning. ASTM har ett tätare tidsschema som kräver att provkroppar görs och provas direkt, vilket omöjliggör förvaring. Detta skulle förlänga arbetet. Dessutom ligger SS-EN närmare till hands eftersom det är en europeisk standard och mer relevant för svenskt vidkommande.

Provkroppar för 70/100 och Sas 85-3 har därför testats tidigast två timmar efter att de tillverkats och senast efter tre dygns förvaring i kyl. Den enda skillnaden för PMB är att dessa provkroppar fått vänta minst tolv timmar efter tillverkning.

Samtliga provkroppar som förvarats i kyl har legat i rumstemperatur minst trettio minuter innan de test utfördes.

Mätplattan värmdes till appliceringstemperatur i minst femton minuter innan provkroppen applicerades.

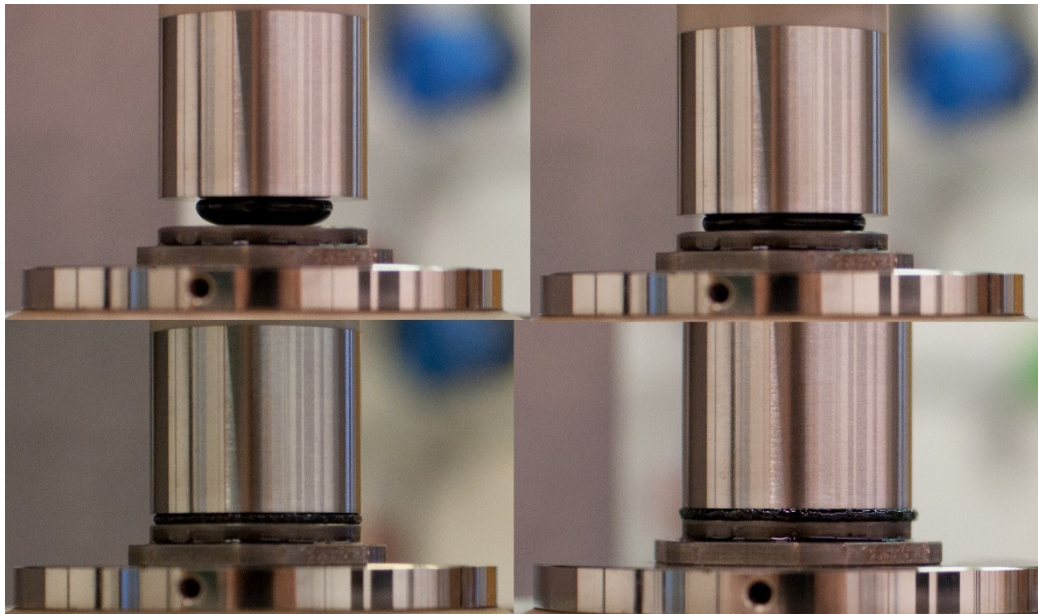
4.1.3 Applicering och trimning

Provkropparna applicerades på det övre mät huvudet, som tagits loss efter *zero-gap setting*. Det är viktigt att provkroppen placeras mitt på mät huvudet, särskilt när det gäller PMB, som är ett svårtrimmat ämne.



Figur 23 Provkropp applicerad på PP25 mät huvud

Efter att provkroppen applicerats monteras mät huvudet åter på DSR, varpå det sänks till strax över testhöjd. För PP25 sänks mät huvudet från 80 mm till 2 mm i ett steg och sedan 0.1 mm åt gången tills en utbuktning börjar visa sig på någon sida., se figur 23.



Figur 24 Sänkning av mät huvud med PMB provkropp

Om provet hamnat precis i mitten och har en jämn form behövs ingen trimning utan utbuktningen kommer jämnt runt om. Det här är särskilt viktigt med PMB, som bildar gummiartade trådar som riskera att dra ut delar av provet och förstöra mätningen om det trimmas. 70/100 och Sas 85-3 har inte det här problemet utan trimning är fullt möjligt.

Som det beskrivs i 3.1.1 rekommenderar både ASTM och SS-EN att en provkropp trimmas klart för att sedan sänkas ytterligare 0.05 mm för PP25 och 0.1 mm för PP8. På så vis åstadkoms den önskade utbuktningen, som säkerställer att plattornas ytor har full kontakt med ämnet.

Nästa steg är att sänka ned kåpan för temperaturkontroll och beräkna höjderna för samtliga temperaturnivåer med hjälp av ett Excelblad. Höjder läggs in i respektive template. Därefter kan mätningen påbörjas.

Tabell 2 Beräkning av höjder

Trimtemperatur:	67	°C	8 mm		25 mm	
Trimmat gap med bula:	2,001	mm	Temp., °C	Gap, mm	Temp., °C	Gap, mm
Starttemperatur:	30	°C	30	1,957	10	1,935
Startgap:	1,957	mm	20	1,946	20	1,946
Mellangap:	1,979	mm	10	1,935	30	1,957
			0	1,923	40	1,969
			-10	1,912	50	1,981
			-20	1,901	60	1,993
			-30	1,891	70	2,005
					80	2,017
					90	2,029
					100	2,042

4.2 Resultat

4.2.1 PP8

Eftersom mätningen med PP8 hade misslyckats i föregående examensarbete föreslogs att nästa arbete skulle ta upp saken och få mättekniken att fungera. Problemet bestod i svårigheter med tillverkning av provkroppen och appliceringen på mätplattan. Sannolikt hade man inte full kontakt vilket ledde till genomgående för låga skjuvmodulvärden jämfört med PP25 vid samma temperaturer.

Den här gången hade en silikonform införskaffats, 8 mm bred och 2,5 mm djup. Själva uppvägningen och ingjutningen var inget större problem. Svårigheterna uppstod vid appliceringen på mätplattan. Tidigare hade all applicering gjorts på den övre mätplattan medan den var monterad i apparaten, efter *zero-gap setting*. Efter information från Nynas om att man kan ta loss mätplattan efter *zero-gap setting* utan att det rubbar inställningarna, underlättades appliceringen mitt på plattan avsevärt, både för PP8 och PP25.

Problemet uppstod när gapet skulle slutas till mät höjden, cirka 2 mm. Genom uppvärmningen och gravitationen började provet rinna ut ur gapet i takt med att gapet minskades utan att kontaktytan uppåt fick full anliggning. Provet sökte sig ut ur gapet snabbare än det hann sluta sig. Vissa mätningar såg bra ut, andra inte. I det här skedet rådfrågades Nynas, som använder en alternativ teknik, som nämns i ASTM. Bindemedlet hålls i flytande form direkt på den losstagna och uppåtvända mätplattan, som omges av en uppstickande krage av silikon. Djupet är precis 2 mm. Efter en stunds placering i en kyl tas kragen av och provningen kan förberedas och genomföras.

Den här tekniken var känd sedan tidigare men eftersom tips och standarder gav andra möjligheter provades de först. Det krävs nämligen två specialhjälpmedel: en eluppvärmd skopa och en specialgjord silikonkrage. Den senare hade Nynas varit vänliga nog att förse LTH med men ingen förstod hur den skulle användas. Det berodde på att DSR på Nynas och LTH har olika utformade mätplattor, trots att apparaterna är av samma fabrikat och modell. Kragen passade inte på LTHs mätplatta. I det här läget hade för lång tid förflutit för att hinna anskaffa och specialtillverka nödvändiga hjälpmedel. Därför beslöts att avbryta momentet med PP8 och föreslå ett nytt försök i kommande examensarbete.

4.2.2 Oscillerande sveptest

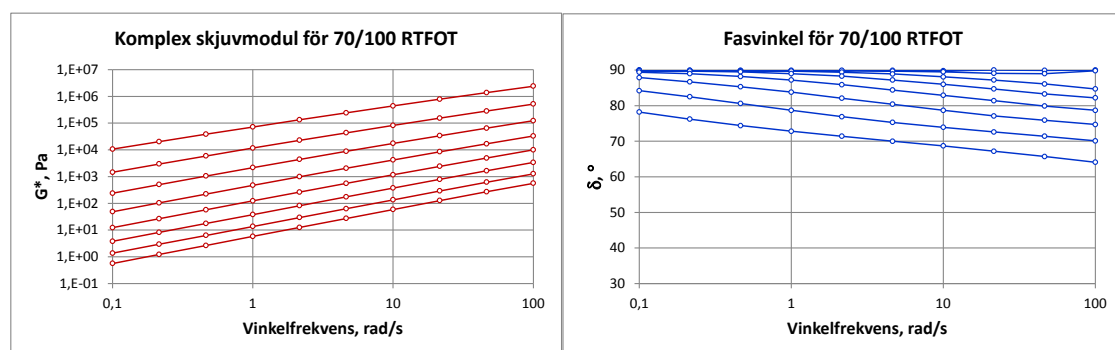
ASTM och SS-EN ger olika rekommendationer om mätriktningar för temperatur och frekvens. Det är upp till var och en att välja och sedan tolka resultaten och se efter huruvida något annat upplägg bör provas. Eftersom detta arbete handlar om att jämföra olika bindemedel valdes ett standardupplägg som provats med framgång i tidigare examensarbeten. De

oscillerande sveptesten varierade temperaturen från 100 till 10°C och vinkelfrekvensen från 100 till 0,1 rad/s. Det gjordes med templates som erhöles från Nynas, som också innehöll färdiguträknade amplituder, samma för samtliga ämnen. Eftersom de tagits fram för vanligt bitumen motsvarande 70/100 antogs att de skulle vara tillräckligt små för att befinna sig inom LVE-området för de båda övriga bitumensorterna. Egentligen borde saken ha undersökts närmare men tiden medgav inte detta. Se tabell i bilaga. Från mätningarna skrivs ett antal parameterkolumner ut. Två är uppmätta, skjuvmodulen G^* och fasvinkeln δ . Frekvensen, amplitud (töjning) och temperatur är inställda och styrda. De elastiska och viskösa skjuvmodulerna beräknas.

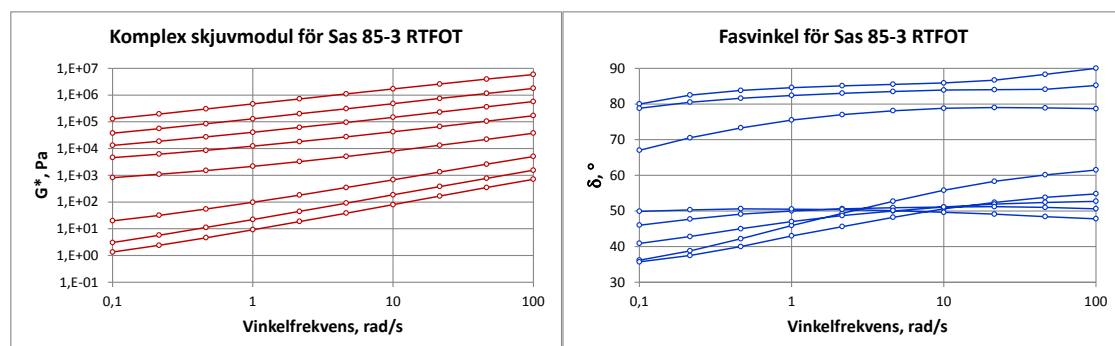
Resultat

Samtliga mätresultat presenteras i bilagorna i form av tabeller och grafik. Skjuvmodulerna G^* och fasvinklarna δ visas som funktion av vinkelfrekvenserna.

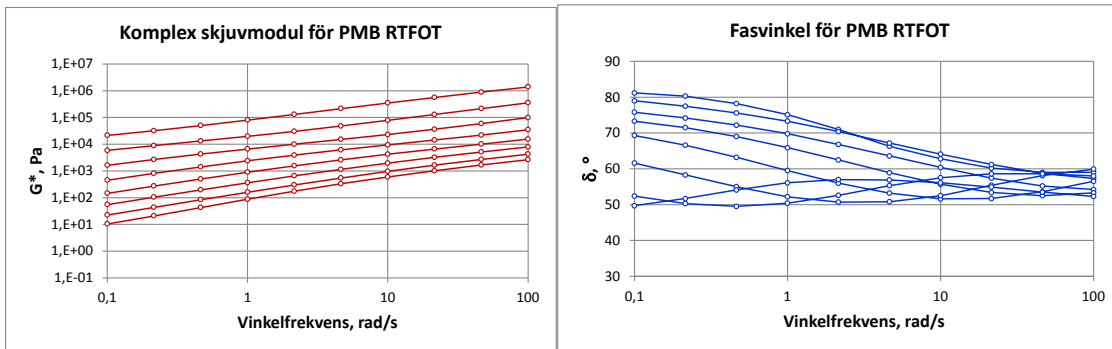
Varje temperaturnivå har sammanbundits med linjer i form av isotermer. De högre temperaturerna placerar sig överst för fasvinklarna och nederst för G^* . Det är lätt att räkna sig fram till sökt temperaturnivå.



Figur 25 Exempel på diagram över skjuvmoduler och tillhörande fasvinklar utmed isotermer för 70/100.

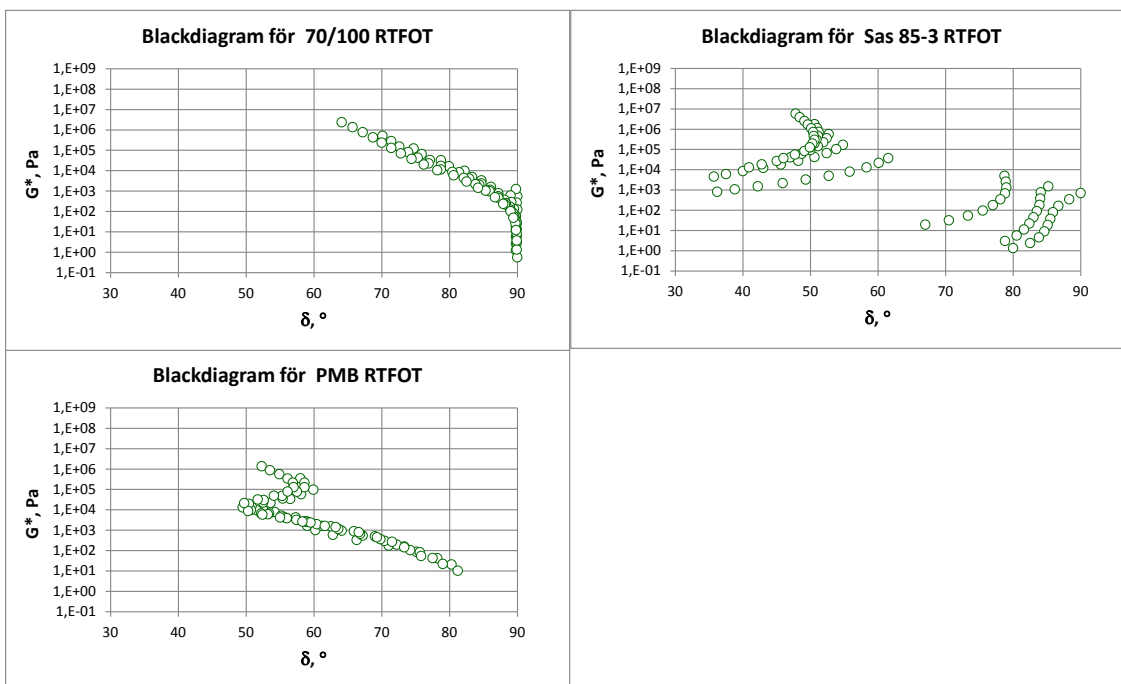


Figur 26 Exempel på diagram över skjuvmoduler och tillhörande fasvinklar utmed isotermer för Sas 85-3.



Figur 27 Exempel på diagram över skjuvmoduler och tillhörande fasvinklar utmed isotermer för PMB.

Utöver dessa visas samband mellan G^* och δ i ett så kallat Blackdiagram. Diagrammet är vanligt för att visa polymera ämnens reologiska karaktär. Varje ämne har ett karakteristiskt samband, också kallad Blackkurva. Ändringar i ämnets egenskaper visar sig med ändringar i kurvan. Ämnen som inte har typiska polymera egenskaper uppvisar olika avvikelser från de vanliga Blackkurvorna. En tränad bedömare kan utläsa förekomst av främmande ämnen eller effekter av yttre påverkan.



Figur 28 Exempel på Blackdiagram och skillnader mellan olika bitumen efter RTFOT.

Kommentarer

När de första diagrammen togs fram efter avslutade mätningar upptäcktes avvikelser på temperaturnivåerna 10 och 20 °C. Utan förvarning hade instrumentet drabbats av vad som kallas ”*instrument compliance*”, en effekt där instrumentets egen eftergivlighet och respons tillskrivs det mätta ämnet. Det är en effekt som, när den upptäcks, kan korrigeras bort. Dessvärre fanns

inte tid att göra om mätningarna för 10 och 20 °C. Därför togs beslutet att stryka resultaten från de mätningarna. Det ger resultaten ett något rumphugget intryck men det har inte påverkat eller ändrar nedanstående slutsatser.

70/100 fungerar som undersöknings referens och uppvisade normala värden för alla parametrarna jämfört med tidigare mätningar av motsvarande ämne. Ändringarna efter RTFOT respektive RTFOT+PAV är också logiska och rimliga. Blackkurvorna ändrar form efter värmebehandlingarna. När ämnet förstyvas som en effekt av uppvärmningen ökar G^* medan δ sjunker, precis som förväntat. En given skjuvspänning motsvaras efter värmebehandling, eller simulerad åldring, av en minskande fasvinkel, vilket innebär ökad styvhet.

Sas 85-3 undersöktes i ett tidigare examensarbete. Blackkurvan har samma utseende nu som då. Den ser slumpmässig och oordnad ut men kommer av en repeterbar och precis respons hos ämnet. Den förklaras av att det smälta Sasobitvaxet kristalliserar i ökande grad med start ungefär vid 90 °C och slut vid 60 °C. Det framgår av diagrammet G^* gentemot vinkelfrekvens. Blackkurvan har ”omvänt” förhållande mellan temperatur och frekvens mot vad som är normalt för ett polymert ämne. Det beror på att Sas 85-3 är en blandning av bitumen, som saknar smältpunkt, och ett ämne, Sasobit, som smälter respektive kristalliserar. Det medför en tydlig reologisk förändring i övergången mellan stadierna. Detta påverkar blandningen som får ett till synes oordnat reologiskt uppträdande. Så är inte fallet utan responsen är bara annorlunda men typisk för ämnet och fullt repeterbar. Blandningen har emellertid en egenskap som skiljer sig från rent bitumen, den är icke Newtonsk. Det betyder bland annat att styvheten kan öka (minskad fasvinkel) när vinkelfrekvensen minskar. Detta kan utläsas av Blackdiagrammet och diagrammet δ gentemot vinkelfrekvens. Den typiska Blackkurvan bibehålls bara något förändrad efter RTFOT, som alltså ska simulera värmepåverkan under tillverkningen. Däremot inträffar en tydlig förändring efter RTFOT+PAV, som ska simulera åldringen mot slutet av beläggningens livslängd. Det innebär, om detta beskriver verklig åldring, att de egenskaper som är typiska för Sas 85-3 kommer att klinga av.

PMB har det gemensamt med Sas 85-3 att det är en blandning av bitumen och ett annat ämne. Det som sker vid olika temperaturer är emellertid mer komplext. Tillsatsämnet är små polymera fibrer som samverkar i bituminet på olika sätt beroende på temperaturen. Vid hög temperatur, över 180 °C, verkar de vara i smält form, för att sedan flätas samman på olika temperaturnivåer. När ämnet är mätbart i DSR, vid 100 °C och nedåt, uppträder ämnet som gummiband. Det komplicerar provningen och kräver erfarna operatörer. Märkligt nog påverkar detta inte G^* gentemot vinkelfrekvens på annat sätt än att temperaturnivåerna (isotermerna) förskjuts uppåt jämfört med 70/100. Blackkurvan har en nivåförändring vid 40-60 °C, som inte direkt motsvaras av

en förändring av G^* , som i faller med Sasobit-85-3. Diagrammet δ gentemot vinkelfrekvens genomgår stora förändringar mellan isotermerna. För att kunna tolka orsakerna krävs mer kännedom om det polymera tillsatsämnet. Blandningen är vare sig typiskt Newtonsk eller icke Newtonsk. Huruvida kurvorna reproduceras vid upprepade provning kan inte avgöras här eftersom det är första gången ämnet undersöks på LTH. Utgångspunkten för nedanstående slutsatser är emellertid att så är fallet. Likheten med Sasobit 85-3 avseende inverkan av RTFOT respektive RTFOT+PAV är tydlig. Den senare innebär stor förändring av den reologiska responsen. Frågan är vad det innebär för funktionen i vägbeläggningen.

4.2.3 MSCR

Multiple Stress Creep (and) Recovery är ett vanligt test för polymera ämnen och började introduceras i Superpave ungefär 2010. Allt fler stater i USA börjar tillämpa mättekniken som ett sätt att påvisa och bedöma effekterna av polymermodifiering. Samtidigt har kriterier tagits fram för att ersätta spårbildningstemperaturen, den som anges först i PG-klassningen, och som fortfarande provas med parametern $G^*/\sin(\delta)$.

Metoden beskrivs i standardserien ASTM (ASTM 2010) och snart även i den europeiska motsvarigheten SS-EN (CEN/TC 336). I avsaknad av europeiska erfarenheter används kriterierna i Superpave. Det innebär att resultaten uttolkas efter det amerikanska klassificeringssystemet. För specialister är det inget större problem men för generalister inom den svenska vägbranschen kan kanske resultaten vara svåra att tillgodogöra sig.

Det är fortfarande oklart hur varje MSCR-parameter ska användas och bedömas. Den senaste informationen var en presentation av Mike Anderson på *Asphalt Institute* i december 2013. Nedanstående utvärdering och slutsatser görs med reservation för att informationen misstolkats eller att annan information framkommer efter detta arbete. Jämförelsen mellan de tre ämnena i denna studie bör emellertid bestå även om vissa uttolkningar kommer att ändras.

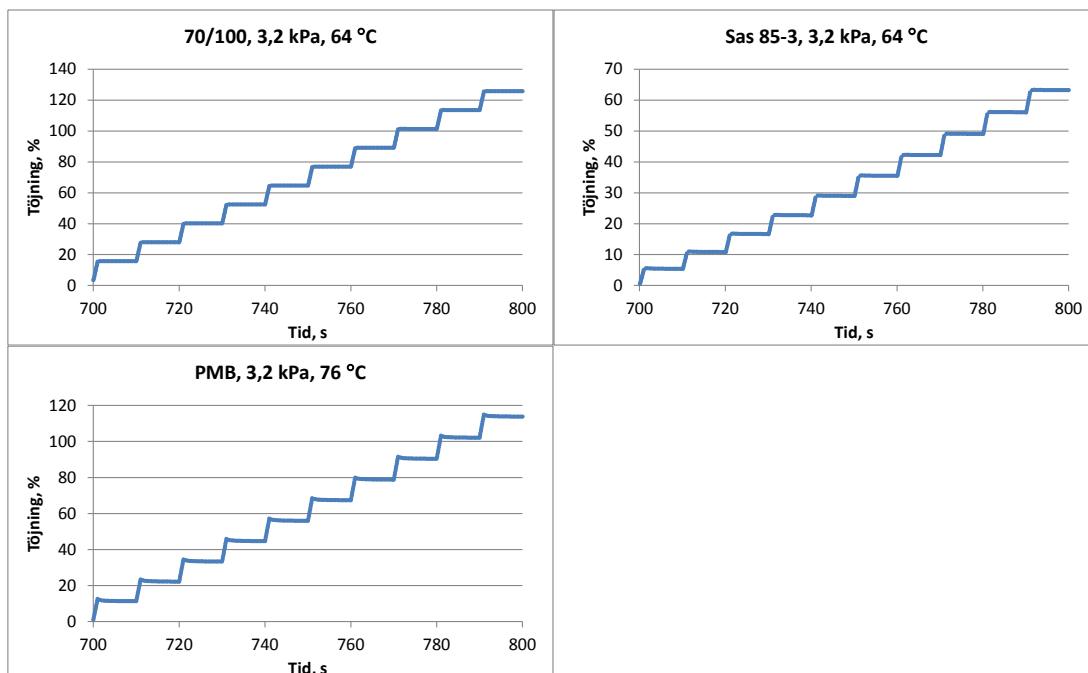
Resultat

Parametrarna R_{100} , R_{3200} , J_{nr100} och J_{nr3200} redovisas i siffror och grafiskt i bilagorna. Siffrorna ses sammanställda i följande tabell:

Tabell 3 MSCR resultat

	Temp. °C	R 100 %	R 3200 %	J_{nr} 100 kPa ⁻¹	J_{nr} 3200 kPa ⁻¹
70/100	52	8,1	5,3	0,6	0,6
	64	1,2	0,1	3,5	3,8
	76	0,4	0,0	16,9	18,6
Sas 85-3	52	64,5	30,4	0,1	0,2
	64	41,8	2,0	0,6	2,0
	76	23,1	0,1	3,6	14,8
PMB	52	70,5	64,6	0,1	0,1
	64	74,9	42,9	0,2	0,6
	76	54,0	9,4	1,1	3,5

Utvärderingen utgår från bedömning av $J_{nr}3200$ och gränsvärdet 4,0 kPa⁻¹. Det gäller för normal trafik. Därunder finns i fallande skala gränser relaterade till trafikvolymen. Några gränser för $J_{nr}100$ har inte hittats. Det finns minimigränser för $R3200$ beroende på värdet av $J_{nr}3200$. Slutligen finns en maximigräns för skillnaden mellan $J_{nr}100$ och $J_{nr}3200$ på 75 %. Den passeras utom i fallet med 70/100. Det är möjligt att den bara gäller PMB. Saken får anstå att bedöma eftersom kunskap om betydelsen saknas.



Figur 29 MSCR-resultat till grund för PG-klassificering.

Kommentarer

70/100 tycks sakna elastisk, återgående förmåga. Däremot klaras krypkriteriet på en nivå som verkar trovärdig, 64 °C.

Sas 85-3 är inte polymermodifierat enligt gängse synsätt men uppvisar ändå en viss elasticitet. Krypförmågan förbättras jämfört med 70/100, som utgör 97 % av blandningen. Det är uppenbart att Sasobit-inblandningen har effekt. Det har visats empiriskt i många år men veterligen ännu inte med hjälp av MSCR. Visserligen räcker inte förbättringen i den här bedömningen till att lyfta blandningen till nästa nivå men i alla fall till en högre trafikklass (*heavy traffic*).

PMB visar alla tecken på en polymermodifierat bitumensort. Bindemedlet klarar klassgränsen för 76 °C, vilket troligen är avsikten med modifieringen. R100 vid 52 °C kan tyckas borde vara högre än vid 64 °C men det kan också finnas andra mekanismer som påverkar resultatet.

4.2.4 PG-klassning enligt Superpave

Mallen för klassificering enligt Superpave av behövlig bitumenkvalitet som visades i det föregående gäller bara klimatiska förhållanden. Därefter justeras valet efter trafikbelastning och vägtyp. Detta är bara det första steget i valet av asfaltbeläggning men det viktigaste. Bituminets egenskaper är den enskilt starkaste förklaringsfaktorn när det gäller asfaltens egenskaper. Ett dåligt val går aldrig att kompensera i efterhand.

Sedan mer än 20 år har det amerikanska klassificeringssystemet för bedömning av ett bindemedel tillämpats och baserats på mätningar med DSR. Till detta har lågtemperaturegenskaperna undersökts med BBR. Introduktionen av polymermodifierat bitumen, som kommer från takpappindustrin, föranledde behov av kompletterande mätningar. PMB föll ofta på lågtemperaturkriteriet med BBR. Därför mätte man också med DTT. Resultaten sammanvägdes och ett nytt kriterium togs fram. Detta gjordes för att bättre återspegla de empiriska erfarenheterna. Metoden DTT utförs inte i Sverige. Därför har den bedömningen utelämnats. Det innebär att PMB inte kan bedömas helt enligt Superpave när det gäller lågtemperaturegenskaperna.

Resultat

Nedanstående tabell innehåller bedömningarna som avgör PG-klassning enligt Superpave. Den innehåller också en välbeprövad metod för låga temperaturer, *Fraass breaking point*, och en som kanske kommer, *Fracture Toughness*. De senare mättes liksom BBR på Nynas laboratorium i Nynäshamn.

Tabell 4 Klassificeringsvärden enligt Superpave

		Temperatur vid krav enligt Superpave, °C					Fraass breaking point °C	Fracture tough- ness °C
		DSR			BBR			
		$G^*/\sin(\delta)$	$G^*/\sin(\delta)$	$G^*\sin(\delta)$	S_t	m-value		
		kPa						
		≥ 1,000	≥ 2,200	≤ 5000	≤ 300·10 ³	≥ 300		
70/100	Original	64,9	-	-	-	-	-18	-8
	RTFOT	-	65,1	-	-	-	-	-
	RTFOT+PAV	-	-	20,0 *	-16,5 **	-19,4 **	-	-
Sas 85-3	Original	75,7	-	-	-	-	-12	2,5
	RTFOT	-	75,6	-	-	-	-	-
	RTFOT+PAV	-	-	22,6 *	-15,1 **	-13,7 **	-	-
PMB	Original	75,7	-	-	-	-	-17	-31
	RTFOT	-	80,3	-	-	-	-	-
	RTFOT+PAV	-	-	17,9 *	-19,6 **	-14,4 **	-	-

* Maximala värden pga tekniskt fel på utrutsning; aktuella värden är lägre.

** För klassificering sänks värdet med 10 °C

Parametrarna $G^*/\sin(\delta)$ och $G^* \cdot \sin(\delta)$ är hämtade från sifvertabellerna i bilagorna. I brist på masterkurvor för fasvinkel i Sas 85-3 och PMB (som inte kan beräknas med det här materialet) har värdena tagits direkt ur tabellerna. Därför gjordes samma sak med 70/100 för att ge jämförelserna samma förutsättningar. Angivna värden är temperaturen för själva kriteriet. Metoden användes i en SBUF-rapport om förnygrad returafalt (Tyllgren, 2011). Om temperaturen är densamma eller högre än klassificeringsgränsen anses bindemedlet tillhöra klassen. Den exakta temperaturen beräknas genom logaritmering av parametern för omgivande isotermer.

Kommentarer

Utmattningskriterierna, $G^* \cdot \sin(\delta)$, beräknas som $(PG(\text{hög}) - PG(\text{låg}))/2 + 4$ °C. Lägsta temperaturgräns (beroende på klassificeringen) för att klara kriterierna är 25 °C för 70/100 och 28 °C för de andra två. Eftersom felmätningen vid 10 och 20 °C överskattar aktuellt värde ligger de verkliga talen lägre än vad som anges i tabellen. Bindemedlen klarar därmed gränserna med god marginal.

70/100 tillhör klassen PG 64-22. Med välvillig tolkning motsvarar Sas 85-3 PG 76-22, annars PG 70-22. PMB kan också med välvillig tolkning kallas PG 76-22, annars PG 70-22.

Fraass-värdena uppfyller med råge kriterierna för 70/100 och PMB i Sverige. Sas 85-3 ligger precis på Fraass-gränsen för PMB.

Vanliga värden på Fracture Toughness för 70/100 ligger mellan -5 och -10 °C. Mätmetoden ska vara särskilt känslig för strukturen i ämnet. Värdet för PMB illustrerar gummibandseffekten. Sasobit anses göra ämnet lite poröst och skört vid låg temperatur, därav den märkbart högre brottemperaturen.

(Tyllgren, 2014)

5 Slutsatser och diskussion

5.1 Bitumenstudien

Resultaten ser trovärdiga ut och rangordnar materialen på ett logiskt sätt. 70/100 och PMB uppträder enligt tidigare känt mönster.

En nyhet är Sas 85-3 som inte har presenterats på det här sättet förut. Den elastiska responsen i MSCR-testet är inte tidigare rapporterad. Den icke Newtonska karaktären är också en nyhet. Resultaten kompletterar slutsatserna i ett tidigare examensarbete på LTH om viskösa effekter på bindemedlet och inverkan på asfaltens hållfasthet av Sasobit (Kujundzic, 2012).

MSCR-studien bekräftar i stort den traditionella Superpaveklassificeringen. Sas 85-3 placeras visserligen i en lägre klass enligt MSCR, samma som 70/100, men är samtidigt mer lämpad för större trafikmängder.

Blackkurvorna kan se oordnade och slumpartade ut för Sas 85-3, och till viss del även för PMB, men är precisa beskrivningar av ämnesspecifika reologiska egenskaper. Det kanske stör att mönstren inte låter sig beskrivas med traditionella matematiska modeller för masterkurvor. Möjligen pekar det på ett behov av utveckling på det området.

5.2 Felkällor och svårigheter

Flera moment i processen, från tillverkning av provkroppar till kvalitetskontroll av resultat, har luckor i beskrivningarna. Varje operatör tycks skapa sina egna lösningar. Det innebär att DSR-hanteringen fortfarande är mycket av en konst, där resultatet är beroende av operatörens skicklighet. Så är det i alla mättningsprocesser men i ovanligt hög grad i fallet med DSR. En fullständig beskrivning av allt som måste tänkas på och tas i beaktande skulle bli oläslig och omöjlig att ta in. ASTM och SS-EN gör lovvärda försök att göra begripliga beskrivningar men lämnar samtidigt informationsluckor kvar efter sig.

Det mättekniska missödet med instrumentkompliansen får tillskrivas bristande erfarenhet och ska inte inträffa.

Provkropparna kan vara svåra att göra, men vi har försökt vara konsekventa. Det gäller speciellt PMB och i särskilt hög grad när det ska göras prover till PP8 eftersom felmarginalen är mycket mindre än i fallet med PP25.

5.3 Behov av fortsatta studier

Mjukvaran Rheoplus behöver en mer utvecklad template-katalog med bland annat val av tider för amplitudsvep, framtagning av LVE-områden och avläsning av konstanta mätvärden efter uppnådd temperatur.

Mätning med MSCR vid flera temperaturer skulle underlättas om det kan göras som temperatursvep. Möjligheten till detta bör undersökas.

Provkropparna till mätplatta PP8 behöver en bättre framtagningsmetod som är mer konsekvent och som möjliggör att provkropparna inte behöver trimmas. Nynas arbetssätt ska tas som förebild och eventuellt utvecklas.

När väl provkropparna till PP8 tillverkas på ett godtagbart sätt görs mätserier tillsammans med PP25. Först därefter är det dags för nya materialtekniska studier.

6 Referenser

Airey, G.D (1997) Rheological Characteristics of Polymer Modified and Aged Bitumens. PhD Thesis, the University of Nottingham.

Agardh, S. & Parhamifar, E. (2014) Vägbyggnad. Lund, Liber

Anderson, M. (2013) Introduction to the Multiple-Stress Creep-Recovery (MSCR). Test and its Use in the PG Binder Specification. Asphalt Institute

Andersson, C. & Sulejmani, P. (2013) Undersökning av bitumen från asfalt med hjälp av dynamisk skjuvreometer, DSR. Lund

Asphalt Institute (2007) The Asphalt Handbook. USA

ASTM (2010) D7405-10a Standard Test Method for Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR) of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer

ASTM D7175-08 Standard Test Method for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer

CEN/TC 336 Draft prEN Bitumen and Bituminous Binders- Multiple Stress Creep and Recovery Test (MSCRT)

FHWA (2014) MSCR. Hämtad 2014/01/23

<http://www.fhwa.dot.gov/pavement/materials/pubs/hif11038/tb00.cfm>

FprCEN/TS 15963 Bitumen and bituminous binders - Determination of the fracture toughness temperature by a three point bending test on a notched specimen

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

Mezger, T. (2011) - The rheology handbook: for users of rotational and oscillatory rheometers. 3. rev. ed. Hannover: Vincentz Network.

NDT, Fracture Toughness. Hämtad 2014/04/23

<http://www.ndt->

[ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Materials/Mechanical/FractureToughness.htm](http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Materials/Mechanical/FractureToughness.htm)

NE (2014) Reologi. Hämtad 2014/05/07, <http://www.ne.se/reologi>

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

Pavement Interactive (2011) Bending Beam Rheometer. Hämtad 2014/04/22
<http://www.pavementinteractive.org/article/bending-beam-rheometer/>

Pavement Interactive, 1a (2008) PG, performance grading. Hämtad 2014/04/24

<http://www.pavementinteractive.org/article/Superpave-performance-grading/>

Pavement Interactive, 1b (2008) Superpave. Hämtad 2014/04/24
<http://www.pavementinteractive.org/article/Superpave-overview/>

Sasolwax 1a (2014). Hämtad 2014/04/15
<http://www.sasolwax.com/en/Applications/Bitumen+Modification/Europe/Sasobit+Technology.html>

Sasolwax 1b (2014). Hämtad 2014/04/15
<http://www.sasolwax.com/en/Applications/Bitumen+Modification/Europe/Sasobit+Technology/Rolled+Asphalt.html>

Shaw, J. (Sasol Wax) (2007) TWG-Warm Mix Asphalt, Hunt Valley.

SS-EN 14770:2012 Bitumen and bituminous binders – Determination of complex shear modulus and phase angle – Dynamic Shear Rheometer (DSR)

Tecmos (2006), Rotationsviskosimeter. Hämtad 2014/04/22
<http://www.tecmos.com/carga/empresas/archivos/7dd1730c32c4bae7b973aaeff7e9279.pdf>

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

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

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

VTI (2004) Väg- och transportforsningsinstitutet. VTI Beständighet hos beläggningar. State of the art. Publikationsnummer: VTI 60761; NI 03014. Linköping

Vägverket (2005) Kapitel F Bitumenbudna lager. Publikation 2005:112

Whiteoak, D. (1990) The Shell Bitumen Handbook, Fourth edition. Surrey, Cherstey.

6.1 Bilder

Airey, G.D (1997) Rheological Characteristics of Polymer Modified and Aged Bitumens. PhD Thesis, the University of Nottingham.

American Laboratory (2014). Hämtad 2014/05/07
<http://www.americanlaboratory.com/914-Application-Notes/117719-Ask-the-Expert-Using-Rheology-to-Design-Better-Products-Yield-Stress-and-How-to-Measure-It/>

ARBIT (2014) Arbeitsgemeinschaft der Bitumen-Industrie. Hämtad 2014/05/14
<http://www.arbit.de/alles-ueber-bitumen/pruefverfahren/>

Controls Group (2014a). Hämtad 2014/05/07

<http://www.controls-group.com/eng/bitumen-testing-equipment/standard-penetrometers.php#.U2ouTxCY18F>

Controls Group (2014b). Hämtad 2014/05/19

<http://www.controls-group.com/eng/bitumen-testing-equipment/pavelab-rtfot-asphalt-ovens.php#.U3nJ6BB7p3s>

FHWA (2014) MSCR. Hämtad 2014/01/23

<http://www.fhwa.dot.gov/pavement/materials/pubs/hif11038/tb00.cfm>

Mezger, T. (2011) The rheology handbook: for users of rotational and oscillatory rheometers. 3. rev. ed. Hannover: Vincentz Network.

Nilsgart, E. (2014). Fotad personligen

Pavement Interactive (2008). Hämtad 2014/05/19

<http://www.pavementinteractive.org/article/superpave-performance-grading/>

Pavement Interactive (2011). Hämtad 2014/04/22

<http://www.pavementinteractive.org/article/bending-beam-rheometer/>

Bilaga 1 – Amplituder

Amplituder	Temperatur, °C									
	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10
Vinkelfrekvens	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10
rad/s	%									
100	2,44	1,69	1,16	0,79	0,53	0,35	0,23	0,15	0,10	0,06
46,4	3,09	2,14	1,47	1,00	0,67	0,45	0,29	0,19	0,12	0,08
21,5	3,91	2,71	1,87	1,27	0,85	0,57	0,37	0,24	0,15	0,10
10	4,94	3,43	2,36	1,61	1,08	0,72	0,47	0,30	0,19	0,12
4,64	6,25	4,35	2,99	2,03	1,37	0,91	0,60	0,39	0,25	0,15
2,15	7,92	5,50	3,79	2,58	1,73	1,15	0,75	0,49	0,31	0,20
1	10,00	6,96	4,80	3,26	2,19	1,46	0,96	0,62	0,39	0,25
0,464	12,70	8,82	6,07	4,13	2,78	1,84	1,21	0,78	0,50	0,31
0,215	16,10	11,20	7,68	5,22	3,52	2,33	1,54	0,99	0,63	0,40
0,1	20,30	14,10	9,72	6,63	4,45	2,95	1,95	1,25	0,80	0,50

Bilaga 2 – Komplex skjuvmodul och fasvinkel från oscillerande mätning

70/100 Original	Temperatur, °C									
	100	90	80	70	60	50	40	30		
Vinkelfrekvens rad/s	Komplex skjuvmodul, G*, Pa									
100	2,86E+02	6,66E+02	1,73E+03	4,92E+03	1,59E+04	5,93E+04	2,60E+05	1,30E+06		
46,4	1,46E+02	3,26E+02	8,33E+02	2,38E+03	7,82E+03	2,99E+04	1,35E+05	7,05E+05		
21,5	6,89E+01	1,53E+02	3,93E+02	1,14E+03	3,81E+03	1,49E+04	6,94E+04	3,78E+05		
10	3,22E+01	7,14E+01	1,83E+02	5,38E+02	1,83E+03	7,35E+03	3,54E+04	1,99E+05		
4,64	1,50E+01	3,32E+01	8,52E+01	2,52E+02	8,74E+02	3,58E+03	1,78E+04	1,04E+05		
2,15	6,93E+00	1,55E+01	3,97E+01	1,18E+02	4,13E+02	1,73E+03	8,86E+03	5,39E+04		
1	3,22E+00	7,19E+00	1,85E+01	5,47E+01	1,93E+02	8,27E+02	4,35E+03	2,76E+04		
0,464	1,49E+00	3,35E+00	8,59E+00	2,55E+01	9,01E+01	3,91E+02	2,11E+03	1,39E+04		
0,215	6,94E-01	1,56E+00	4,00E+00	1,18E+01	4,19E+01	1,84E+02	1,01E+03	6,97E+03		
0,1	3,23E-01	7,29E-01	1,86E+00	5,52E+00	1,95E+01	8,58E+01	4,80E+02	3,43E+03		
	Fasvinkel, δ, °									
100	90,0	89,6	89,5	84,3	82,6	79,9	76,1	70,5		
46,4	90,0	90,0	88,7	86,1	84,0	81,1	77,4	72,2		
21,5	90,0	90,0	88,9	87,3	85,2	82,3	78,7	73,8		
10	89,9	89,7	89,3	88,3	86,3	83,6	79,9	75,3		
4,64	89,7	89,6	89,5	89,0	87,4	84,9	81,2	76,7		
2,15	89,5	89,6	89,6	89,4	88,3	86,1	82,6	78,1		
1	89,3	89,5	89,6	89,6	89,0	87,2	84,0	79,5		
0,464	89,0	89,3	89,5	89,6	89,4	88,2	85,4	80,9		
0,215	88,3	88,9	89,4	89,6	89,6	88,9	86,6	82,5		
0,1	87,1	88,2	89,0	89,5	89,7	89,3	87,7	84,0		

70/100 RTFOT	Temperatur, °C									
	100	90	80	70	60	50	40	30		
Vinkelfrekvens	100	90	80	70	60	50	40	30		
rad/s	Komplex skjvmodul, G*, Pa									
100	5,60E+02	1,27E+03	3,38E+03	9,97E+03	3,29E+04	1,23E+05	5,16E+05	2,40E+06		
46,4	2,70E+02	6,15E+02	1,64E+03	4,94E+03	1,68E+04	6,46E+04	2,82E+05	1,38E+06		
21,5	1,26E+02	2,90E+02	7,87E+02	2,41E+03	8,44E+03	3,37E+04	1,53E+05	7,82E+05		
10	5,87E+01	1,35E+02	3,72E+02	1,16E+03	4,19E+03	1,74E+04	8,17E+04	4,38E+05		
4,64	2,71E+01	6,31E+01	1,74E+02	5,55E+02	2,05E+03	8,81E+03	4,33E+04	2,42E+05		
2,15	1,25E+01	2,93E+01	8,14E+01	2,62E+02	9,88E+02	4,40E+03	2,27E+04	1,33E+05		
1	5,77E+00	1,36E+01	3,78E+01	1,23E+02	4,72E+02	2,17E+03	1,17E+04	7,17E+04		
0,464	2,65E+00	6,32E+00	1,76E+01	5,71E+01	2,23E+02	1,05E+03	5,92E+03	3,84E+04		
0,215	1,22E+00	2,95E+00	8,16E+00	2,65E+01	1,04E+02	5,03E+02	2,95E+03	2,03E+04		
0,1	5,64E-01	1,37E+00	3,80E+00	1,23E+01	4,86E+01	2,38E+02	1,45E+03	1,06E+04		
	Fasvinkel, δ, °									
100	90,0	89,8	84,7	82,2	78,7	74,7	70,1	64,1		
46,4	89,9	89,0	86,1	83,3	79,9	75,9	71,4	65,7		
21,5	90,0	89,1	87,2	84,7	81,4	77,1	72,6	67,2		
10	89,8	89,5	88,1	86,0	82,9	78,7	73,9	68,7		
4,64	89,9	89,7	88,9	87,2	84,4	80,4	75,3	70,0		
2,15	89,8	89,9	89,4	88,3	85,9	82,1	76,9	71,4		
1	89,8	89,9	89,7	89,0	87,2	83,8	78,7	72,8		
0,464	89,8	89,9	89,8	89,5	88,2	85,3	80,6	74,4		
0,215	89,8	89,9	89,9	89,7	89,0	86,7	82,5	76,2		
0,1	90,0	89,9	89,9	89,8	89,4	87,9	84,2	78,2		

70/100 RTFOT+PAV	Temperatur, °C									
	100	90	80	70	60	50	40	30		
Vinkelfrekvens rad/s	Komplex skjuvmodul, G*, Pa									
100	1,45E+03	2,63E+03	7,27E+03	2,91E+04	9,65E+04	3,51E+05	1,35E+06	5,46E+06		
46,4	7,04E+02	1,43E+03	4,13E+03	1,54E+04	5,29E+04	2,00E+05	8,00E+05	3,42E+06		
21,5	3,33E+02	7,67E+02	2,28E+03	7,98E+03	2,87E+04	1,13E+05	4,70E+05	2,12E+06		
10	1,56E+02	3,96E+02	1,20E+03	4,07E+03	1,53E+04	6,27E+04	2,73E+05	1,30E+06		
4,64	7,22E+01	1,87E+02	5,80E+02	2,03E+03	8,02E+03	3,45E+04	1,58E+05	7,86E+05		
2,15	3,33E+01	8,75E+01	2,76E+02	9,99E+02	4,12E+03	1,87E+04	9,00E+04	4,69E+05		
1	1,53E+01	4,08E+01	1,30E+02	4,83E+02	2,07E+03	9,95E+03	5,07E+04	2,78E+05		
0,464	7,03E+00	1,90E+01	6,10E+01	2,31E+02	1,03E+03	5,19E+03	2,82E+04	1,62E+05		
0,215	3,24E+00	8,85E+00	2,84E+01	1,09E+02	4,99E+02	2,66E+03	1,54E+04	9,41E+04		
0,1	1,51E+00	4,12E+00	1,32E+01	5,11E+01	2,40E+02	1,33E+03	8,30E+03	5,39E+04		
	Fasvinkel, δ, °									
100	87,6	82,8	78,8	74,7	70,3	65,8	60,6	54,9		
46,4	87,4	84,5	80,8	76,4	71,6	66,8	61,7	55,7		
21,5	88,1	85,7	82,5	78,3	73,2	68,0	62,9	57,0		
10	88,8	87,1	84,3	80,3	75,0	69,4	64,1	58,4		
4,64	89,3	88,2	85,8	82,2	77,1	71,0	65,4	59,7		
2,15	89,6	88,9	87,2	84,0	79,3	73,0	66,8	61,0		
1	89,7	89,3	88,3	85,7	81,4	75,2	68,4	62,3		
0,464	89,6	89,5	89,0	87,1	83,4	77,6	70,3	63,8		
0,215	89,5	89,6	89,3	88,3	85,2	79,9	72,5	65,3		
0,1	88,9	89,6	89,5	89,0	86,7	82,1	74,9	67,0		

Sas 85-3	Temperatur, °C									
	Original									
	Vinkelfrekvens	100	90	80	70	60	50	40	30	
rad/s	Komplex skjvmodul, G*, Pa									
100	3,99E+02	8,78E+02	2,36E+03	1,67E+04	7,46E+04	2,55E+05	8,55E+05	3,10E+06		
46,4	2,11E+02	4,54E+02	1,21E+03	9,72E+03	4,54E+04	1,57E+05	5,25E+05	1,95E+06		
21,5	1,06E+02	2,29E+02	6,23E+02	5,77E+03	2,83E+04	9,74E+04	3,23E+05	1,21E+06		
10	5,36E+01	1,16E+02	3,21E+02	3,54E+03	1,81E+04	6,15E+04	2,00E+05	7,54E+05		
4,64	2,72E+01	5,92E+01	1,67E+02	2,26E+03	1,20E+04	3,97E+04	1,26E+05	4,67E+05		
2,15	1,40E+01	3,07E+01	8,91E+01	1,51E+03	8,19E+03	2,62E+04	7,99E+04	2,91E+05		
1	7,36E+00	1,61E+01	4,88E+01	1,05E+03	5,82E+03	1,78E+04	5,18E+04	1,83E+05		
0,464	3,99E+00	8,68E+00	2,77E+01	7,77E+02	4,33E+03	1,25E+04	3,44E+04	1,16E+05		
0,215	2,27E+00	4,84E+00	1,65E+01	5,98E+02	3,32E+03	9,16E+03	2,36E+04	7,51E+04		
0,1	1,40E+00	2,85E+00	1,06E+01	4,75E+02	2,57E+03	6,98E+03	1,68E+04	4,97E+04		
	Fasvinkel, δ , °									
100	87,8	83,5	78,7	64,1	57,9	57,1	56,8	54,5		
46,4	83,8	82,3	78,9	61,6	55,7	55,8	56,5	55,0		
21,5	81,7	80,7	78,2	58,4	52,9	54,0	55,8	55,4		
10	80,4	79,3	77,0	54,4	49,5	51,7	54,7	55,5		
4,64	78,9	77,9	75,4	49,8	45,5	49,0	53,1	55,3		
2,15	77,3	76,4	73,3	44,8	41,4	45,8	51,2	54,6		
1	75,5	74,5	70,9	40,3	37,4	42,4	48,9	53,5		
0,464	73,3	72,1	68,1	36,1	34,1	39,1	46,2	52,1		
0,215	70,8	69,0	64,9	33,5	32,7	36,1	43,1	50,2		
0,1	67,8	65,1	61,6	33,7	35,0	34,4	39,9	47,9		

Sas 85-3 RTFOT	Temperatur, °C									
	100	90	80	70	60	50	40	30		
	Komplex skjuvmodul, G*, Pa									
Vinkelfrekvens rad/s	100	90	80	70	60	50	40	30		
100	7,08E+02	1,54E+03	5,03E+03	3,75E+04	1,69E+05	5,72E+05	1,78E+06	5,89E+06		
46,4	3,48E+02	7,71E+02	2,59E+03	2,21E+04	1,05E+05	3,62E+05	1,15E+06	3,93E+06		
21,5	1,66E+02	3,78E+02	1,33E+03	1,32E+04	6,64E+04	2,30E+05	7,45E+05	2,59E+06		
10	7,94E+01	1,85E+02	6,78E+02	8,08E+03	4,23E+04	1,47E+05	4,79E+05	1,70E+06		
4,64	3,83E+01	9,06E+01	3,49E+02	5,06E+03	2,75E+04	9,46E+04	3,09E+05	1,11E+06		
2,15	1,86E+01	4,46E+01	1,82E+02	3,26E+03	1,82E+04	6,15E+04	2,00E+05	7,21E+05		
1	9,18E+00	2,22E+01	9,74E+01	2,17E+03	1,23E+04	4,04E+04	1,29E+05	4,66E+05		
0,464	4,61E+00	1,12E+01	5,44E+01	1,51E+03	8,57E+03	2,72E+04	8,44E+04	3,02E+05		
0,215	2,41E+00	5,73E+00	3,18E+01	1,09E+03	6,17E+03	1,87E+04	5,58E+04	1,96E+05		
0,1	1,35E+00	3,04E+00	1,98E+01	8,19E+02	4,58E+03	1,31E+04	3,77E+04	1,29E+05		
									Fasvinkel, δ, °	
100	90,0	85,2	78,7	61,5	54,8	52,7	50,6	47,8		
46,4	88,3	84,1	78,9	60,1	53,8	52,4	51,0	48,4		
21,5	86,7	84,0	79,0	58,3	52,4	51,9	51,2	49,1		
10	85,9	83,9	78,8	55,8	50,6	51,1	51,1	49,6		
4,64	85,5	83,5	78,1	52,7	48,2	50,0	50,9	50,1		
2,15	85,1	83,0	77,0	49,3	45,6	48,7	50,6	50,4		
1	84,6	82,4	75,5	45,9	43,0	47,0	50,0	50,5		
0,464	83,8	81,6	73,3	42,2	40,0	45,0	49,1	50,6		
0,215	82,5	80,5	70,5	38,8	37,5	42,8	47,7	50,3		
0,1	80,0	78,8	67,0	36,2	35,7	40,9	46,0	49,9		

Sas 85-3 RTFOT+PAV	Temperatur, °C									
	100	90	80	70	60	50	40	30		
Vinkelfrekvens rad/s	Komplex skjuvmodul, G*, Pa									
100	1,71E+03	3,81E+03	1,26E+04	5,88E+04	2,57E+05	9,05E+05	2,87E+06	9,02E+06		
46,4	8,41E+02	1,93E+03	6,67E+03	3,38E+04	1,57E+05	5,78E+05	1,90E+06	6,27E+06		
21,5	4,02E+02	9,57E+02	3,45E+03	1,92E+04	9,59E+04	3,68E+05	1,25E+06	4,31E+06		
10	1,90E+02	4,67E+02	1,75E+03	1,08E+04	5,82E+04	2,33E+05	8,20E+05	2,94E+06		
4,64	8,88E+01	2,25E+02	8,78E+02	6,07E+03	3,51E+04	1,46E+05	5,34E+05	1,98E+06		
2,15	4,12E+01	1,07E+02	4,34E+02	3,39E+03	2,11E+04	9,13E+04	3,46E+05	1,33E+06		
1	1,89E+01	5,06E+01	2,12E+02	1,89E+03	1,26E+04	5,66E+04	2,22E+05	8,82E+05		
0,464	8,70E+00	2,39E+01	1,03E+02	1,06E+03	7,50E+03	3,49E+04	1,42E+05	5,81E+05		
0,215	4,04E+00	1,13E+01	5,02E+01	6,06E+02	4,50E+03	2,14E+04	8,97E+04	3,81E+05		
0,1	1,92E+00	5,36E+00	2,46E+01	3,53E+02	2,74E+03	1,32E+04	5,65E+04	2,49E+05		
Fasvinkel, δ, °										
100	87,6	81,6	75,5	64,8	56,9	52,0	47,9	43,3		
46,4	86,3	82,3	76,8	65,8	57,4	52,6	48,6	44,1		
21,5	86,7	83,6	78,5	66,8	58,0	53,1	49,4	45,0		
10	87,5	85,0	80,2	67,7	58,7	53,8	50,1	45,9		
4,64	88,2	86,2	81,9	68,5	59,4	54,5	50,8	46,8		
2,15	88,7	87,3	83,4	69,0	60,1	55,4	51,7	47,7		
1	88,9	87,9	84,6	69,4	60,6	56,3	52,6	48,6		
0,464	89,0	88,3	85,5	69,4	60,7	57,1	53,6	49,6		
0,215	89,0	88,4	86,0	69,2	60,6	57,8	54,7	50,7		
0,1	88,8	88,4	86,1	68,4	60,1	58,2	55,8	51,7		

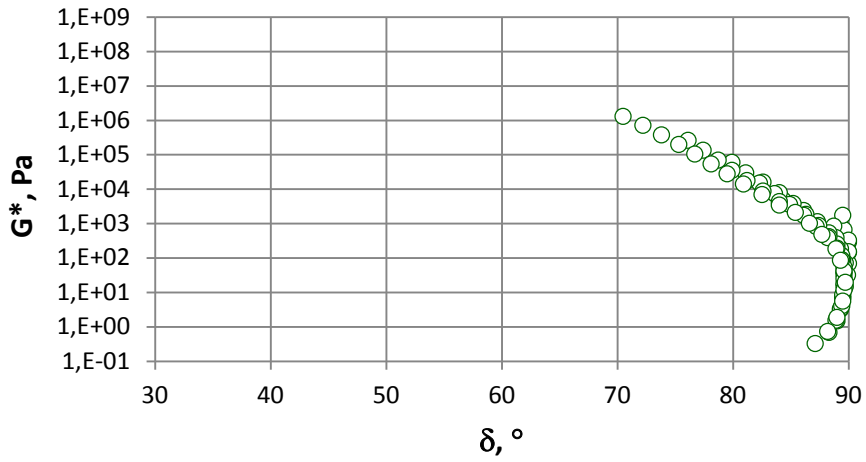
PMB Original	Temperatur, °C																			
	100	90	80	70	60	50	40	30												
Vinkelfrekvens rad/s																				
	Komplex skjuvmodul, G*, Pa																			
100	1,03E+03	1,86E+03	3,82E+03	8,16E+03	1,89E+04	5,36E+04	2,06E+05	9,27E+05												
46,4	5,81E+02	1,05E+03	2,18E+03	4,84E+03	1,14E+04	3,07E+04	1,16E+05	5,47E+05												
21,5	3,12E+02	5,67E+02	1,21E+03	2,79E+03	6,84E+03	1,82E+04	6,57E+04	3,19E+05												
10	1,65E+02	3,02E+02	6,53E+02	1,56E+03	4,02E+03	1,10E+04	3,79E+04	1,84E+05												
4,64	8,57E+01	1,60E+02	3,47E+02	8,47E+02	2,29E+03	6,65E+03	2,25E+04	1,05E+05												
2,15	4,38E+01	8,38E+01	1,83E+02	4,54E+02	1,27E+03	3,91E+03	1,37E+04	6,06E+04												
1	2,19E+01	4,35E+01	9,65E+01	2,41E+02	6,86E+02	2,23E+03	8,43E+03	3,57E+04												
0,464	1,09E+01	2,25E+01	5,05E+01	1,27E+02	3,66E+02	1,24E+03	5,09E+03	2,16E+04												
0,215	5,46E+00	1,16E+01	2,64E+01	6,70E+01	1,94E+02	6,76E+02	3,00E+03	1,35E+04												
0,1	2,83E+00	6,05E+00	1,38E+01	3,52E+01	1,03E+02	3,69E+02	1,72E+03	8,43E+03												
	Fasvinkel, δ, °																			
100	75,3	70,8	65,7	63,0	62,6	66,2	66,0	61,1												
46,4	73,0	71,8	68,6	64,6	61,8	63,7	66,0	62,4												
21,5	73,7	73,0	70,8	67,0	62,7	61,6	65,0	63,6												
10	74,7	74,0	72,5	69,5	64,9	61,0	63,0	64,3												
4,64	75,9	74,9	73,7	71,6	67,6	62,2	60,8	64,3												
2,15	77,6	75,9	74,6	73,1	70,1	64,7	59,7	63,1												
1	79,4	77,0	75,4	74,0	72,1	67,5	60,5	61,1												
0,464	80,8	78,1	76,2	74,7	73,4	70,1	62,6	59,2												
0,215	81,7	79,1	77,0	75,2	74,1	71,9	65,3	58,5												
0,1	82,1	79,9	77,5	75,8	74,6	73,0	67,9	59,4												

PMB RTFOT	Temperatur, °C									
	100	90	80	70	60	50	40	30		
Vinkelfrekvens	100	90	80	70	60	50	40	30		
rad/s	Komplex skjuvmodul, G*, Pa									
100	2,66E+03	4,26E+03	7,91E+03	1,55E+04	3,47E+04	9,84E+04	3,54E+05	1,39E+06		
46,4	1,67E+03	2,70E+03	5,13E+03	1,01E+04	2,19E+04	5,89E+04	2,15E+05	8,89E+05		
21,5	1,01E+03	1,64E+03	3,22E+03	6,61E+03	1,43E+04	3,62E+04	1,29E+05	5,60E+05		
10	5,91E+02	9,61E+02	1,96E+03	4,21E+03	9,39E+03	2,30E+04	7,81E+04	3,48E+05		
4,64	3,33E+02	5,45E+02	1,15E+03	2,60E+03	6,12E+03	1,51E+04	4,79E+04	2,14E+05		
2,15	1,75E+02	2,99E+02	6,57E+02	1,55E+03	3,89E+03	1,00E+04	3,03E+04	1,30E+05		
1	8,75E+01	1,60E+02	3,63E+02	8,95E+02	2,39E+03	6,61E+03	1,98E+04	7,98E+04		
0,464	4,27E+01	8,40E+01	1,96E+02	5,00E+02	1,42E+03	4,27E+03	1,32E+04	4,98E+04		
0,215	2,08E+01	4,36E+01	1,05E+02	2,72E+02	8,10E+02	2,68E+03	8,84E+03	3,20E+04		
0,1	1,04E+01	2,25E+01	5,49E+01	1,46E+02	4,50E+02	1,63E+03	5,86E+03	2,13E+04		
	Fasvinkel, δ, °									
100	59,0	57,3	54,2	53,3	56,5	59,9	58,0	52,3		
46,4	59,0	58,7	55,2	52,5	53,6	58,1	58,6	53,5		
21,5	60,2	61,2	57,4	53,4	51,7	55,4	58,6	54,9		
10	62,8	64,1	60,4	55,7	51,6	52,5	57,5	56,1		
4,64	66,3	67,2	63,6	58,9	53,2	50,8	55,3	56,9		
2,15	71,0	70,4	66,8	62,5	56,0	50,7	52,6	57,0		
1	75,1	73,3	69,8	65,9	59,5	52,2	50,4	56,1		
0,464	78,2	75,6	72,2	69,0	63,2	55,0	49,5	54,1		
0,215	80,3	77,5	74,2	71,5	66,6	58,3	50,3	51,7		
0,1	81,2	79,0	75,8	73,3	69,3	61,6	52,4	49,7		

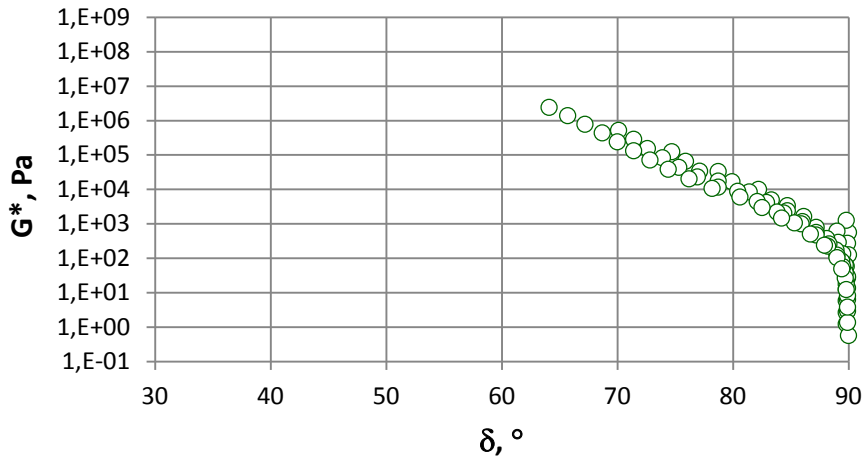
PMB RTFOT+PAV	Temperatur, °C									
	100	90	80	70	60	50	40	30		
	Komplex skjuvmodul, G*, Pa									
Vinkelfrekvens rad/s	100	90	80	70	60	50	40	30		
100	4,09E+03	7,92E+03	1,89E+04	4,96E+04	1,46E+05	4,75E+05	1,58E+06	5,13E+06		
46,4	2,28E+03	4,60E+03	1,13E+04	2,97E+04	8,86E+04	2,99E+05	1,05E+06	3,61E+06		
21,5	1,23E+03	2,58E+03	6,64E+03	1,79E+04	5,36E+04	1,86E+05	6,86E+05	2,51E+06		
10	6,43E+02	1,40E+03	3,81E+03	1,07E+04	3,25E+04	1,15E+05	4,43E+05	1,72E+06		
4,64	3,31E+02	7,45E+02	2,12E+03	6,36E+03	1,97E+04	7,08E+04	2,82E+05	1,17E+06		
2,15	1,66E+02	3,87E+02	1,15E+03	3,66E+03	1,19E+04	4,34E+04	1,78E+05	7,81E+05		
1	8,08E+01	1,97E+02	6,03E+02	2,04E+03	7,14E+03	2,67E+04	1,12E+05	5,16E+05		
0,464	3,85E+01	9,92E+01	3,11E+02	1,10E+03	4,16E+03	1,64E+04	6,97E+04	3,36E+05		
0,215	1,82E+01	4,94E+01	1,58E+02	5,82E+02	2,35E+03	1,00E+04	4,34E+04	2,17E+05		
0,1	8,71E+00	2,43E+01	7,92E+01	3,01E+02	1,29E+03	6,02E+03	2,71E+04	1,40E+05		
									Fasvinkel, δ, °	
100	69,9	65,8	62,4	60,8	58,5	53,9	47,9	41,4		
46,4	71,2	67,5	63,0	60,6	58,8	55,0	49,2	42,6		
21,5	73,3	70,0	64,7	60,8	59,0	55,9	50,5	43,8		
10	75,2	72,7	67,4	61,9	59,0	56,6	51,9	45,2		
4,64	77,0	75,1	70,5	64,1	59,5	57,2	53,2	46,8		
2,15	78,8	77,2	73,4	67,1	60,7	57,6	54,4	48,4		
1	80,5	79,0	76,0	70,4	63,0	58,1	55,4	50,0		
0,464	82,1	80,4	78,0	73,4	66,1	59,1	56,2	51,6		
0,215	83,3	81,6	79,7	76,0	69,4	61,0	57,0	53,1		
0,1	83,9	82,5	80,8	78,0	72,5	63,6	57,8	54,4		

Bilaga 3 – Blackdiagram

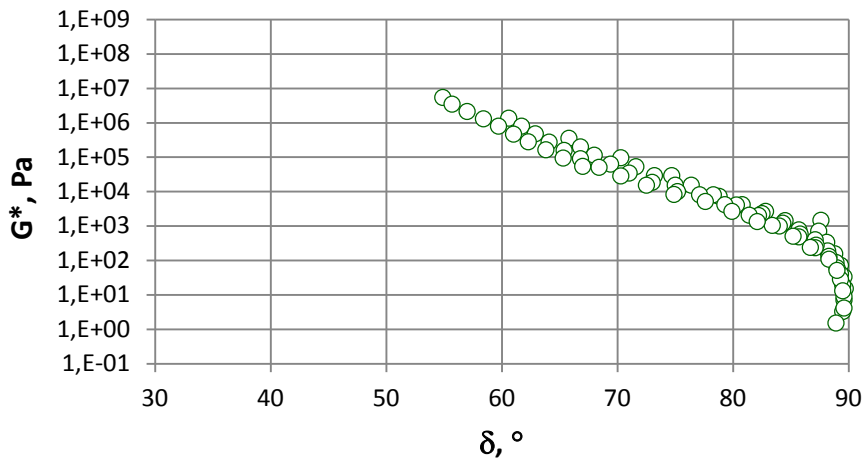
Blackdiagram för 70/100 Original



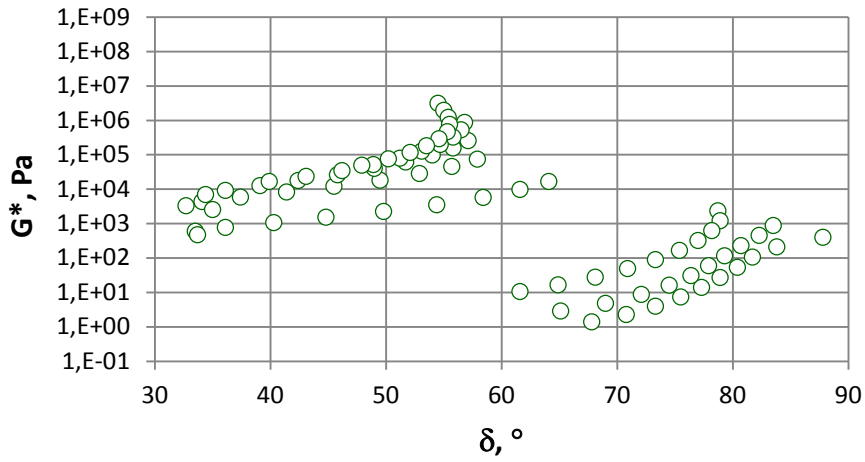
Blackdiagram för 70/100 RTFOT



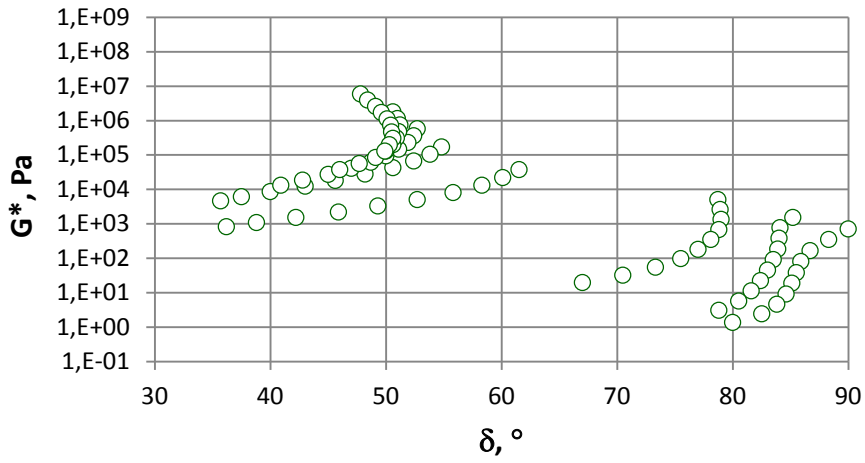
Blackdiagram för 70/00 RTFOT+PAV



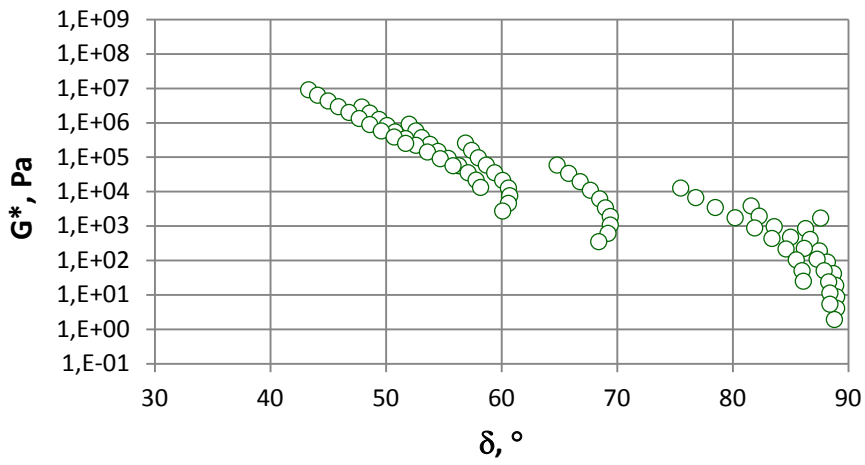
Blackdiagram för Sas 85-3 Original

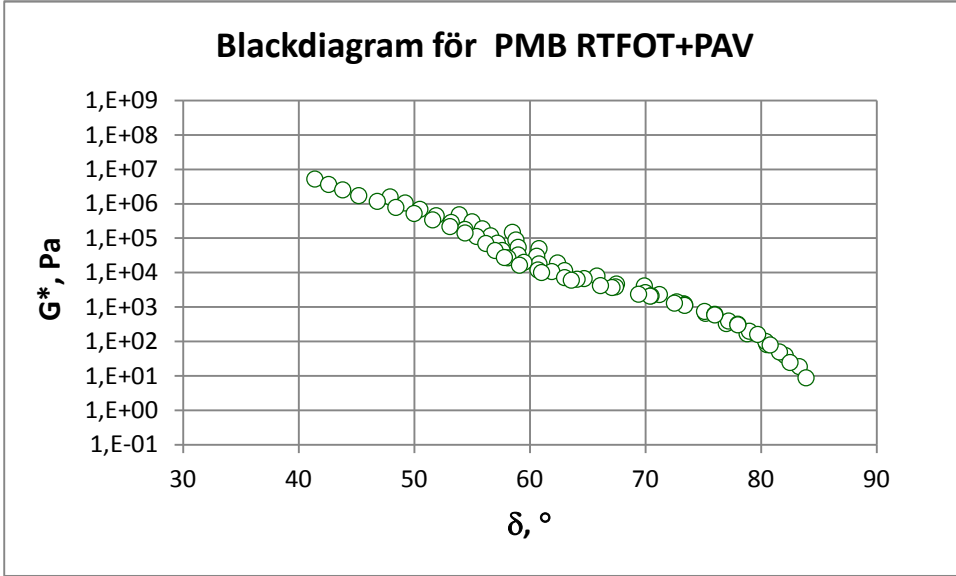
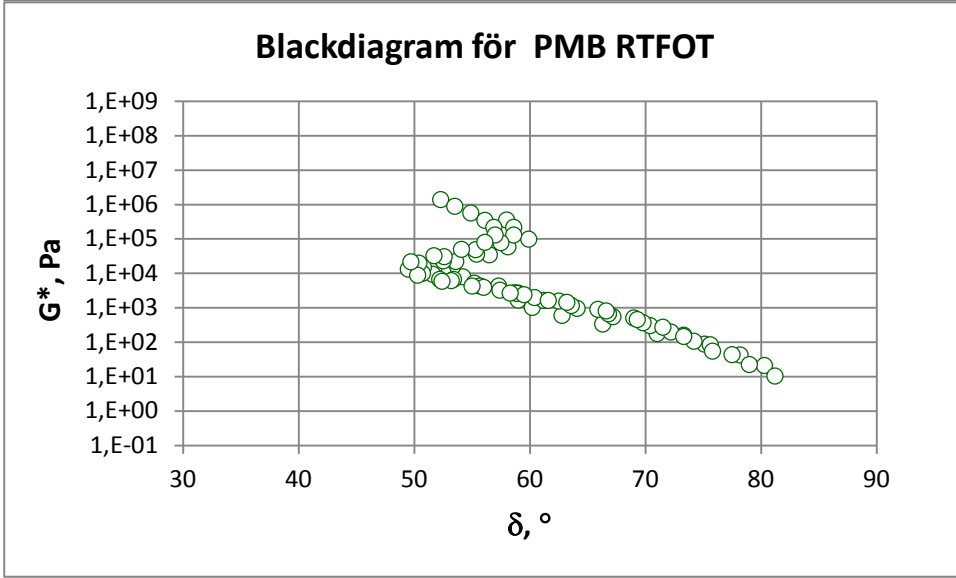
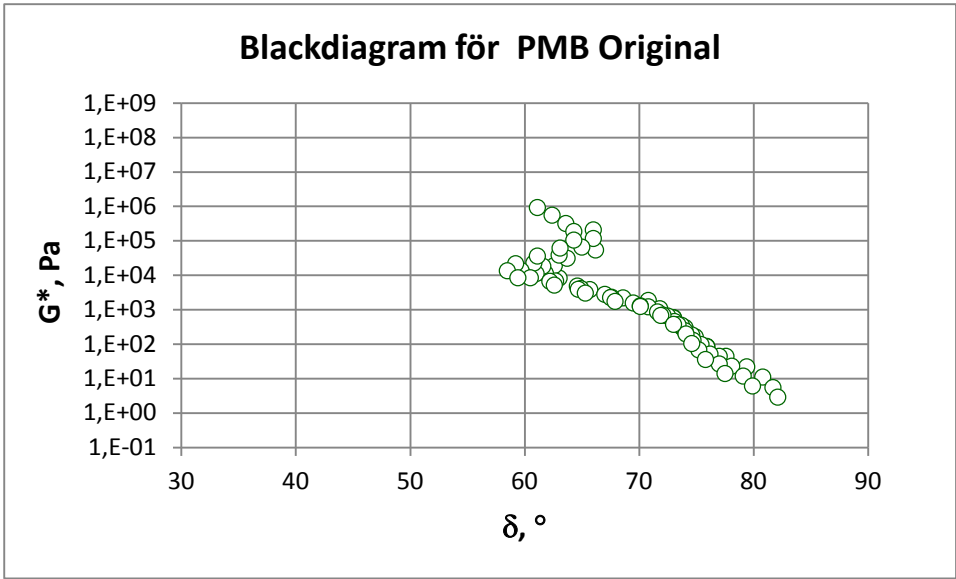


Blackdiagram för Sas 85-3 RTFOT



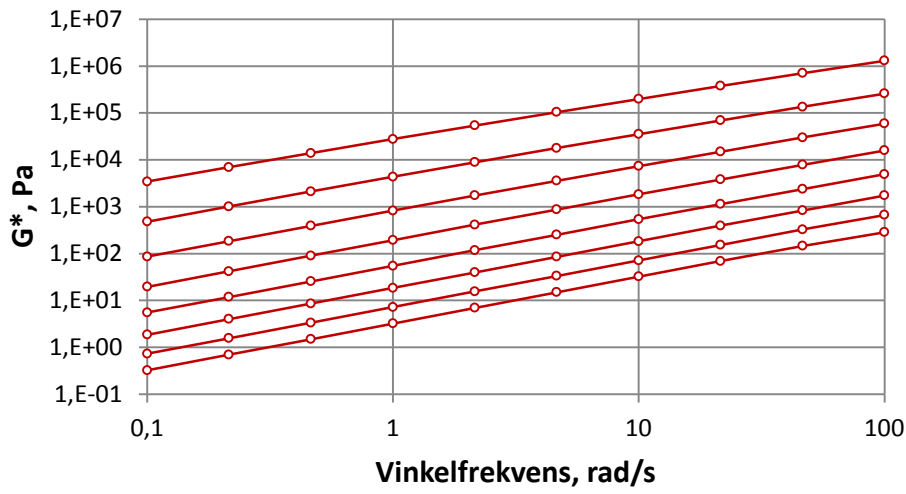
Blackdiagram för Sas 85-3 RTFOT+PAV



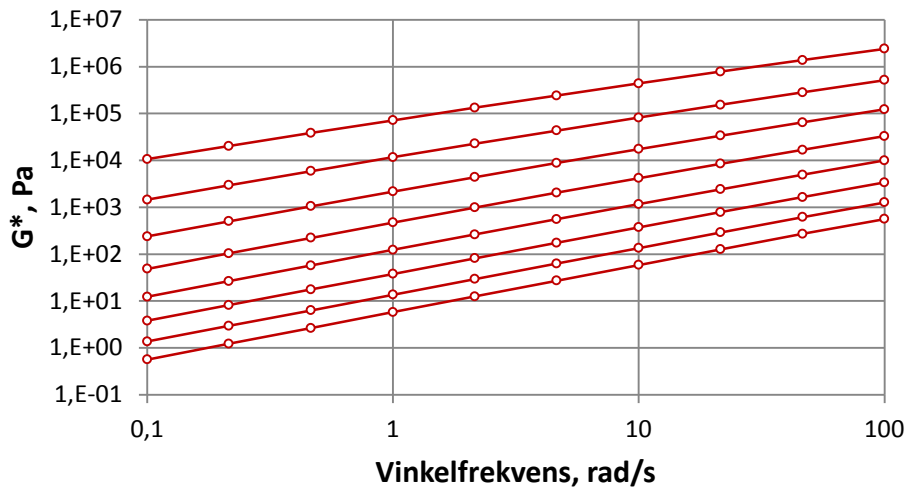


Bilaga 4 – Komplex skjuvmodul

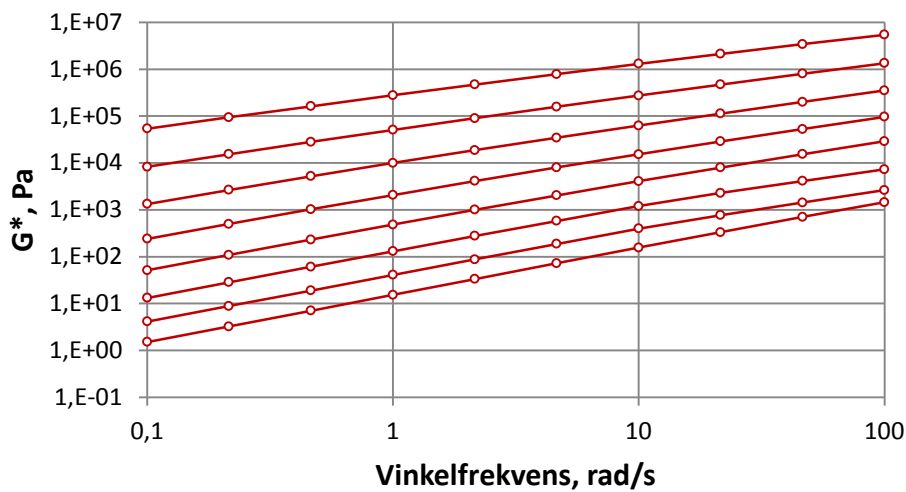
Komplex skjuvmodul för 70/100 Original



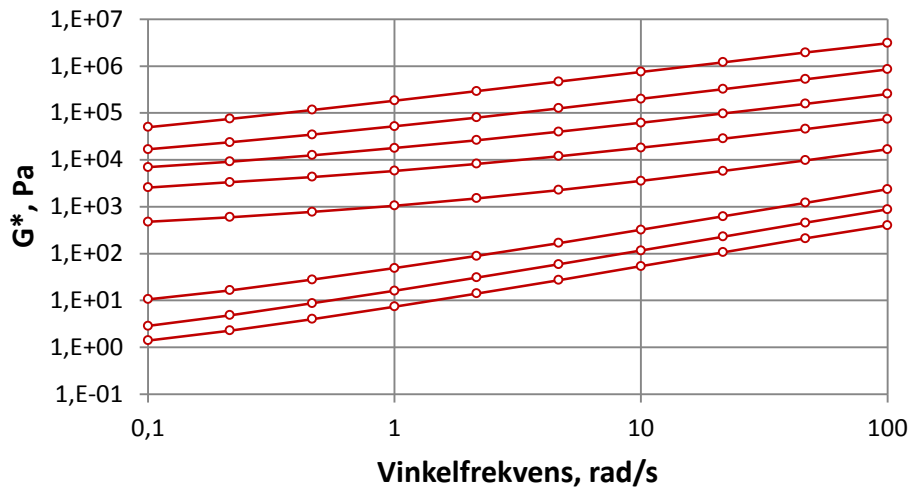
Komplex skjuvmodul för 70/100 RTFOT



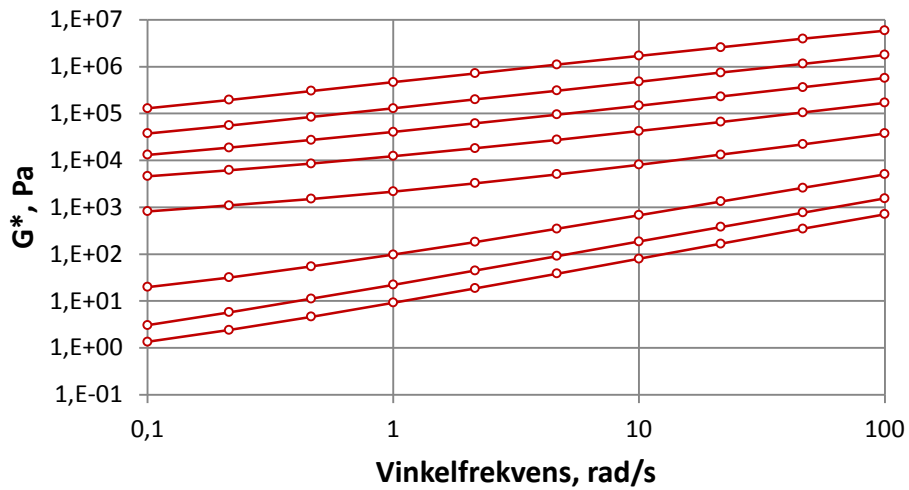
Komplex skjuvmodul för 70/100 RTFOT+PAV



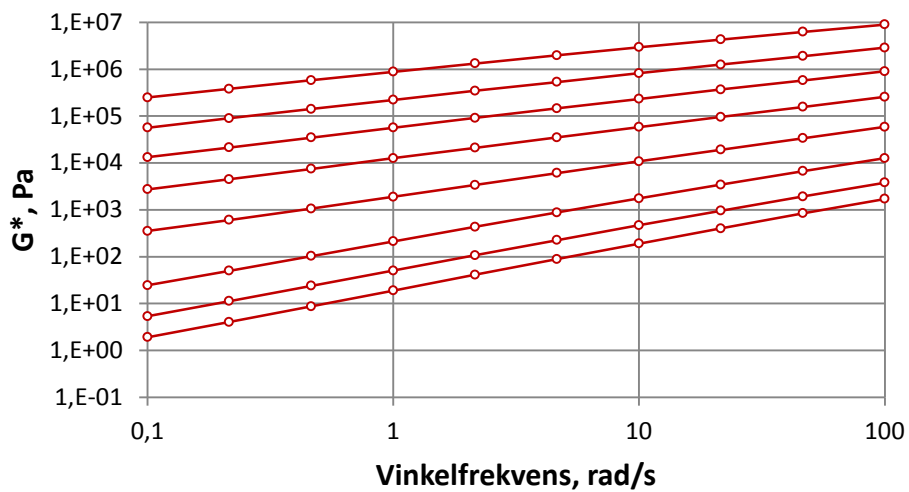
Komplex skjuvmodul för Sas 85-3 Original



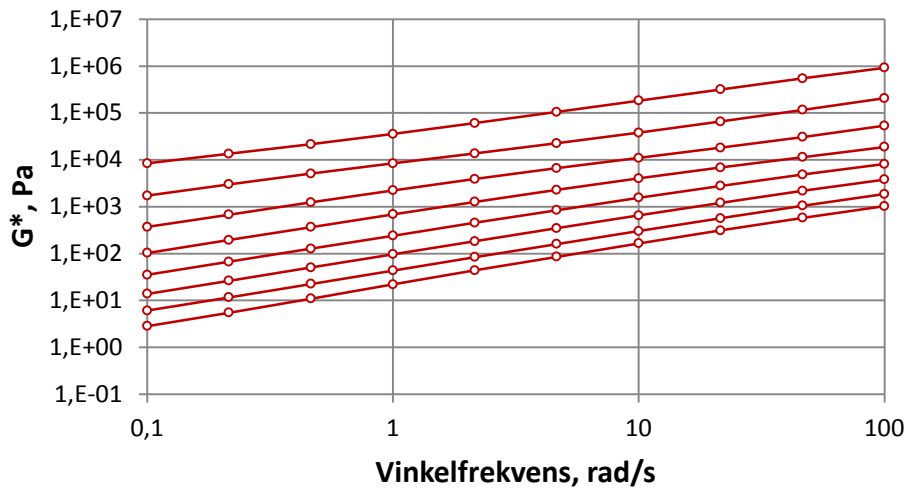
Komplex skjuvmodul för Sas 85-3 RTFOT



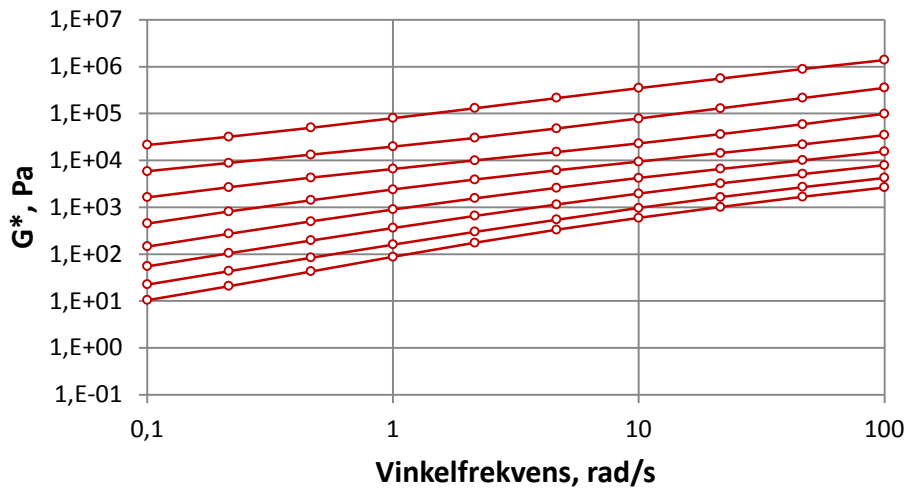
Komplex skjuvmodul för Sas 85-3 RTFOT+PAV



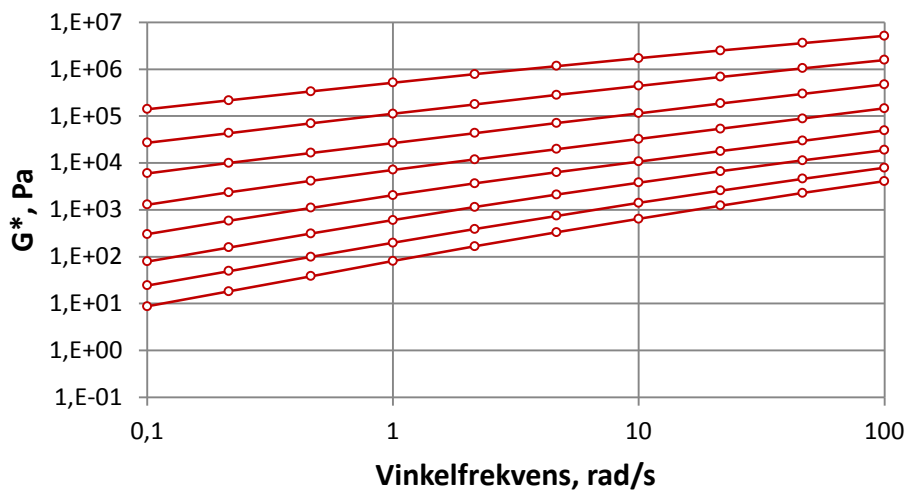
Komplex skjuvmodul för PMB Original



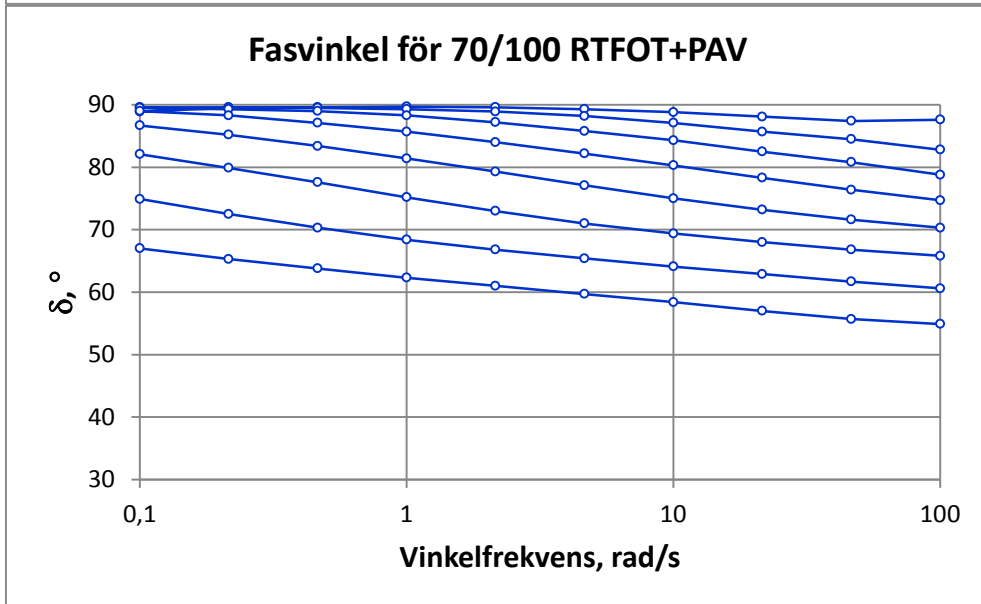
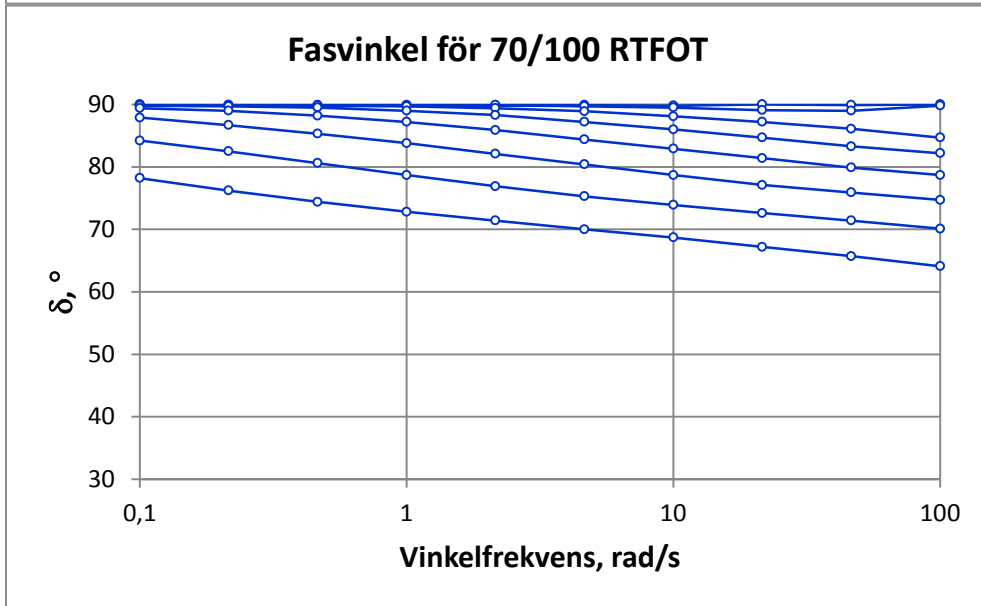
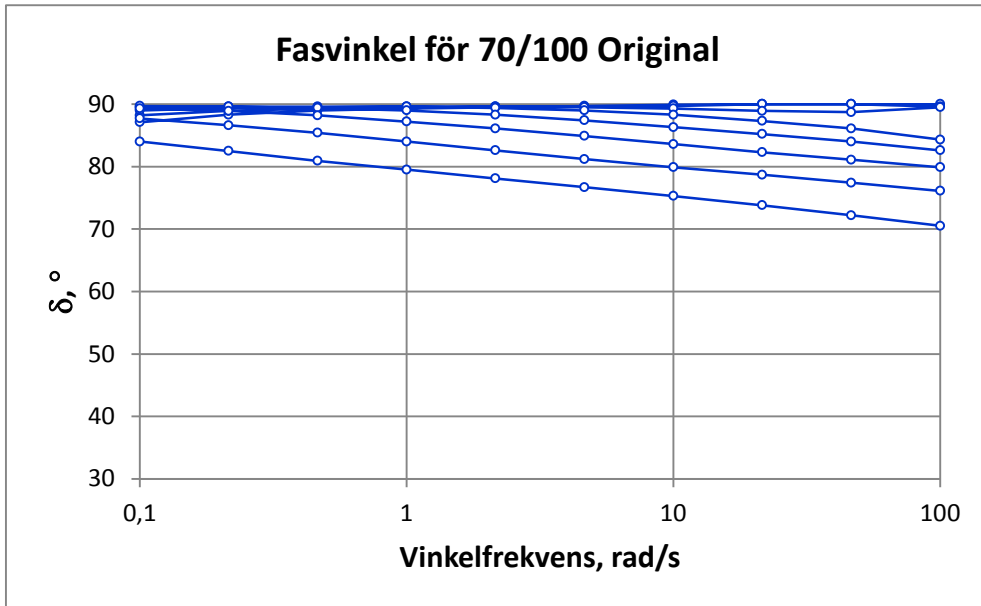
Komplex skjuvmodul för PMB RTFOT

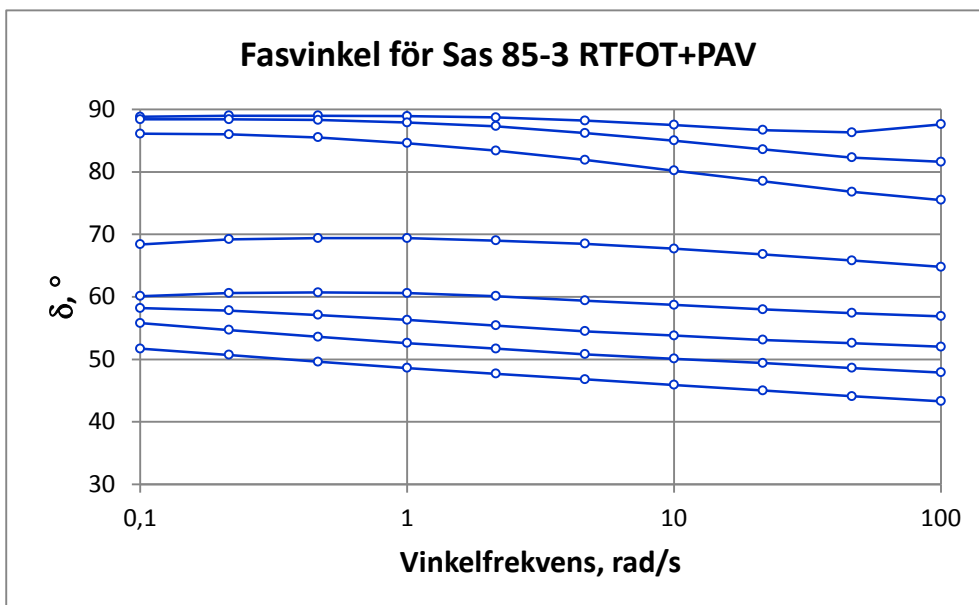
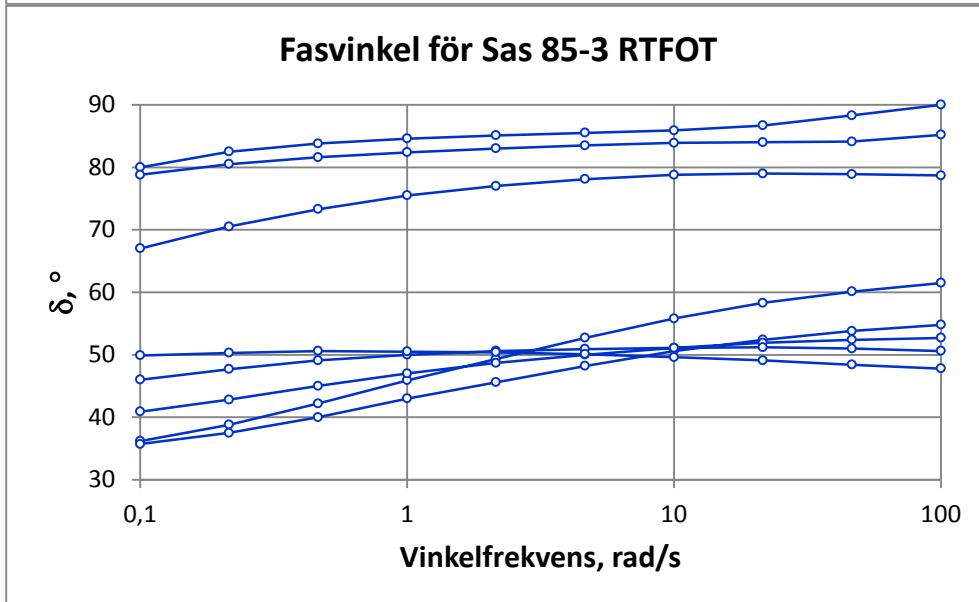
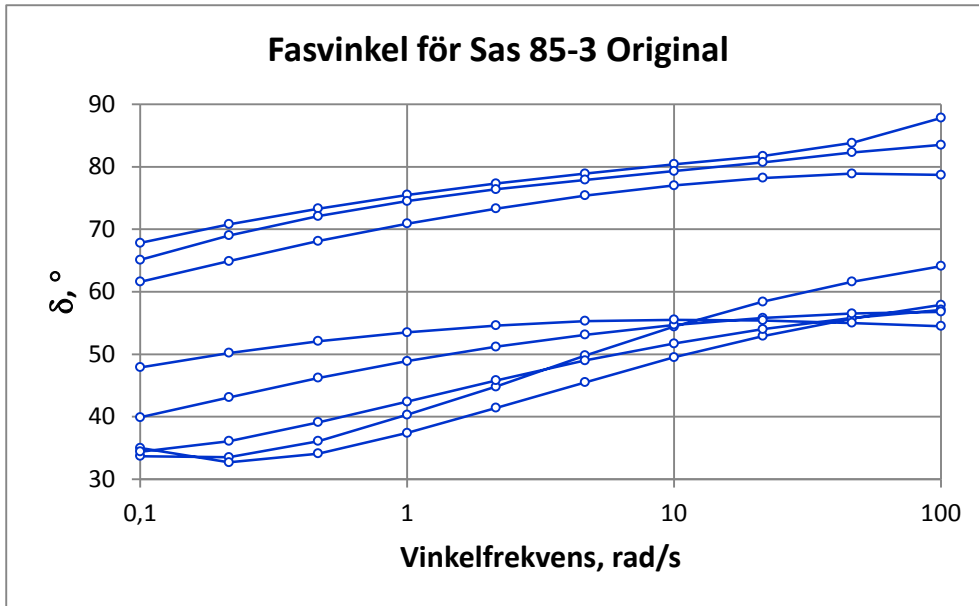


Komplex skjuvmodul för PMB RTFOT+PAV

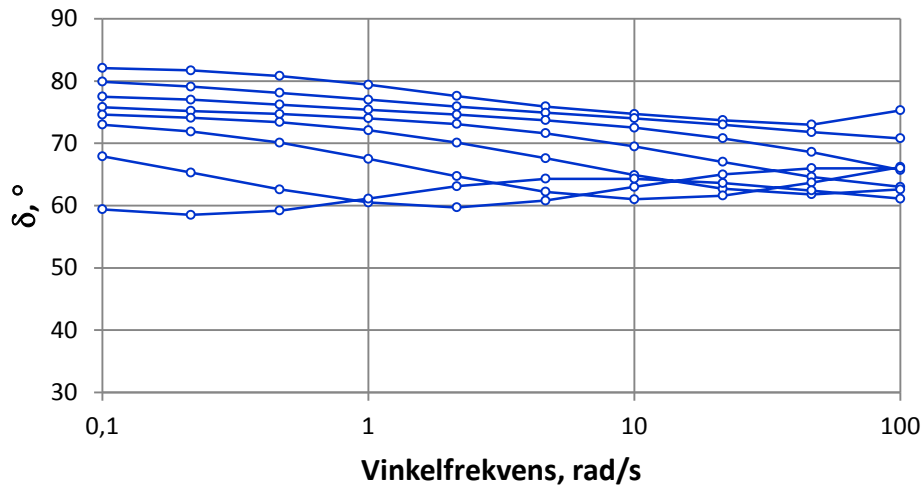


Bilaga 5 – Fasvinkel

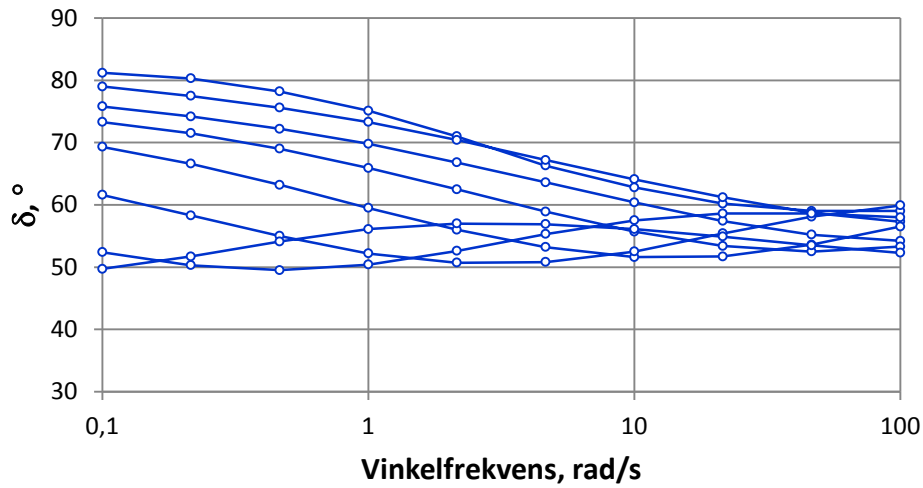




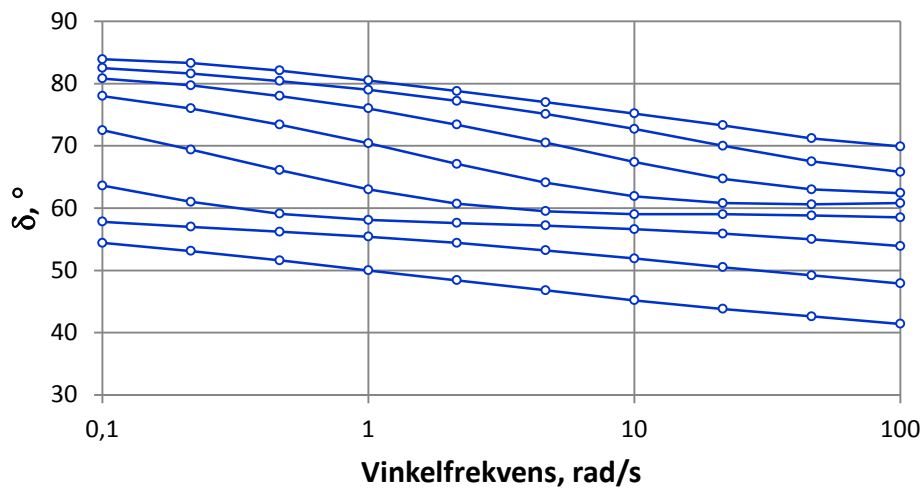
Fasvinkel för PMB Original



Fasvinkel för PMB RTFOT



Fasvinkel för PMB RTFOT+PAV



Bilaga 6 – MSCR resultat

MSCR				MSCR				MSCR			
Bitumen: 70/100 RTFOT Temp.: 52 °C				Bitumen: 70/100 RTFOT Temp.: 64 °C				Bitumen: 70/100 RTFOT Temp.: 76 °C			
Skjuvning Pa	Töjning %	Deformation		Skjuvning Pa	Töjning %	Deformation		Skjuvning Pa	Töjning %	Deformation	
		Belastn.	Återg.			Belastn.	Återg.			Belastn.	Återg.
100	0,060	0,060		100	0,354	0,354		100	1,695	1,695	
0	0,055		0,0047	0	0,349		0,0044	0	1,691		0,0034
100	0,115	0,060		100	0,703	0,353		100	3,386	1,695	
0	0,111		0,0048	0	0,698		0,0044	0	3,379		0,0071
100	0,171	0,060		100	1,051	0,353		100	5,071	1,692	
0	0,166		0,0048	0	1,047		0,0044	0	5,062		0,0091
100	0,226	0,060		100	1,400	0,354		100	6,753	1,691	
0	0,221		0,0049	0	1,396		0,0044	0	6,745		0,0082
100	0,281	0,060		100	1,750	0,354		100	8,441	1,696	
0	0,276		0,0049	0	1,746		0,0042	0	8,434		0,0063
100	0,336	0,060		100	2,100	0,354		100	10,133	1,698	
0	0,331		0,0050	0	2,096		0,0042	0	10,129		0,0035
100	0,391	0,060		100	2,450	0,354		100	11,825	1,696	
0	0,386		0,0049	0	2,446		0,0041	0	11,823		0,0022
100	0,446	0,060		100	2,801	0,354		100	13,517	1,694	
0	0,441		0,0049	0	2,797		0,0041	0	13,513		0,0038
100	0,501	0,060		100	3,151	0,355		100	15,211	1,698	
0	0,496		0,0049	0	3,147		0,0040	0	15,204		0,0070
100	0,556	0,060		100	3,502	0,355		100	16,903	1,700	
0	0,551		0,0049	0	3,498		0,0038	0	16,894		0,0099
3200	2,504	1,953		3200	15,742	12,244		3200	76,023	59,129	
0	2,400		0,1046	0	15,727		0,0149	0	76,020		0,0025
3200	4,355	1,956		3200	27,982	12,255		3200	135,304	59,284	
0	4,251		0,1040	0	27,967		0,0148	0	135,307		-0,0030
3200	6,204	1,953		3200	40,219	12,252		3200	194,640	59,333	
0	6,101		0,1035	0	40,205		0,0138	0	194,634		0,0060
3200	8,057	1,957		3200	52,464	12,259		3200	254,013	59,379	
0	7,954		0,1033	0	52,452		0,0125	0	254,003		0,0100
3200	9,914	1,960		3200	64,704	12,252		3200	313,422	59,419	
0	9,810		0,1033	0	64,690		0,0135	0	313,427		-0,0050
3200	11,765	1,954		3200	76,948	12,258		3200	372,934	59,507	
0	11,662		0,1028	0	76,933		0,0152	0	372,934		0,0000
3200	13,615	1,953		3200	89,197	12,264		3200	432,484	59,550	
0	13,512		0,1033	0	89,182		0,0147	0	432,472		0,0120
3200	15,470	1,958		3200	101,429	12,247		3200	492,075	59,603	
0	15,366		0,1035	0	101,416		0,0130	0	492,076		-0,0010
3200	17,323	1,956		3200	113,667	12,251		3200	551,695	59,619	
0	17,219		0,1036	0	113,653		0,0140	0	551,697		-0,0020
3200	19,174	1,955		3200	125,904	12,251		3200	611,335	59,638	
0	19,070		0,1037	0	125,890		0,0140	0	611,325		0,0100
<i>R</i> 100	8,1	%		<i>R</i> 100	1,2	%		<i>R</i> 100	0,4	%	
<i>R</i> 3200	5,3	%		<i>R</i> 3200	0,1	%		<i>R</i> 3200	0,0	%	
<i>J_{nr}</i> 100	0,6	kPa ⁻¹		<i>J_{nr}</i> 100	3,5	kPa ⁻¹		<i>J_{nr}</i> 100	16,9	kPa ⁻¹	
<i>J_{nr}</i> 3200	0,6	kPa ⁻¹		<i>J_{nr}</i> 3200	3,8	kPa ⁻¹		<i>J_{nr}</i> 3200	18,6	kPa ⁻¹	

MSCR				MSCR				MSCR			
Bitumen: Sas 85-3 RTFOT Temp.: 52 °C				Bitumen: Sas 85-3 RTFOT Temp.: 64 °C				Bitumen: Sas 85-3 RTFOT Temp.: 76 °C			
Skjuvning Pa	Töjning %	Deformation		Skjuvning Pa	Töjning %	Deformation		Skjuvning Pa	Töjning %	Deformation	
		Belastn.	Återg.			Belastn.	Återg.			Belastn.	Återg.
100	0,016	0,016		100	0,097	0,097		100	0,451	0,451	
0	0,007		0,0085	0	0,064		0,0331	0	0,363		0,0884
100	0,023	0,016		100	0,164	0,100		100	0,837	0,474	
0	0,014		0,0094	0	0,126		0,0376	0	0,736		0,1011
100	0,030	0,016		100	0,227	0,101		100	1,211	0,475	
0	0,020		0,0099	0	0,187		0,0399	0	1,104		0,1071
100	0,036	0,016		100	0,288	0,101		100	1,578	0,474	
0	0,026		0,0103	0	0,247		0,0413	0	1,467		0,1106
100	0,042	0,016		100	0,347	0,101		100	1,941	0,474	
0	0,031		0,0105	0	0,305		0,0424	0	1,828		0,1128
100	0,047	0,016		100	0,405	0,100		100	2,302	0,473	
0	0,037		0,0106	0	0,362		0,0433	0	2,188		0,1140
100	0,053	0,016		100	0,462	0,100		100	2,661	0,474	
0	0,042		0,0108	0	0,418		0,0439	0	2,547		0,1147
100	0,058	0,016		100	0,517	0,100		100	3,022	0,475	
0	0,047		0,0109	0	0,473		0,0445	0	2,907		0,1149
100	0,063	0,016		100	0,572	0,099		100	3,384	0,477	
0	0,052		0,0109	0	0,527		0,0451	0	3,269		0,1147
100	0,068	0,016		100	0,626	0,099		100	3,749	0,480	
0	0,057		0,0111	0	0,581		0,0454	0	3,635		0,1143
3200	0,800	0,744		3200	5,570	4,989		3200	40,199	36,564	
0	0,599		0,2009	0	5,398		0,1726	0	40,141		0,0587
3200	1,354	0,755		3200	10,996	5,599		3200	82,942	42,802	
0	1,131		0,2237	0	10,838		0,1580	0	82,906		0,0369
3200	1,884	0,754		3200	16,816	5,978		3200	128,491	45,586	
0	1,653		0,2318	0	16,668		0,1478	0	128,463		0,0280
3200	2,404	0,751		3200	22,874	6,206		3200	175,733	47,270	
0	2,169		0,2346	0	22,736		0,1387	0	175,710		0,0230
3200	2,918	0,749		3200	29,158	6,422		3200	224,201	48,491	
0	2,683		0,2351	0	29,028		0,1295	0	224,177		0,0240
3200	3,430	0,748		3200	35,660	6,632		3200	273,530	49,353	
0	3,196		0,2344	0	35,539		0,1213	0	273,517		0,0130
3200	3,945	0,749		3200	42,346	6,808		3200	323,572	50,055	
0	3,711		0,2333	0	42,231		0,1150	0	323,550		0,0220
3200	4,463	0,752		3200	49,211	6,979		3200	374,131	50,581	
0	4,231		0,2321	0	49,103		0,1081	0	374,119		0,0120
3200	4,986	0,756		3200	56,218	7,115		3200	425,211	51,092	
0	4,755		0,2310	0	56,114		0,1034	0	425,197		0,0140
3200	5,516	0,760		3200	63,375	7,261		3200	476,767	51,570	
0	5,286		0,2299	0	63,278		0,0974	0	476,745		0,0220
<i>R</i> 100	64,5	%		<i>R</i> 100	41,8	%		<i>R</i> 100	23,1	%	
<i>R</i> 3200	30,4	%		<i>R</i> 3200	2,0	%		<i>R</i> 3200	0,1	%	
<i>J_{nr}</i> 100	0,1	kPa ⁻¹		<i>J_{nr}</i> 100	0,6	kPa ⁻¹		<i>J_{nr}</i> 100	3,6	kPa ⁻¹	
<i>J_{nr}</i> 3200	0,2	kPa ⁻¹		<i>J_{nr}</i> 3200	2,0	kPa ⁻¹		<i>J_{nr}</i> 3200	14,8	kPa ⁻¹	

MSCR				MSCR				MSCR			
Bitumen: PMB RTFOT Temp.: 52 °C				Bitumen: PMB RTFOT Temp.: 64 °C				Bitumen: PMB RTFOT Temp.: 76 °C			
Skjuvning Pa	Töjning %	Deformation		Skjuvning Pa	Töjning %	Deformation		Skjuvning Pa	Töjning %	Deformation	
		Belastn.	Återg.			Belastn.	Återg.			Belastn.	Återg.
100	0,020	0,020		100	0,086	0,086		100	0,234	0,234	
0	0,008		0,0123	0	0,033		0,0530	0	0,105		0,1290
100	0,028	0,020		100	0,118	0,085		100	0,342	0,238	
0	0,015		0,0133	0	0,059		0,0591	0	0,211		0,1308
100	0,035	0,020		100	0,143	0,084		100	0,451	0,240	
0	0,021		0,0137	0	0,082		0,0618	0	0,321		0,1305
100	0,041	0,020		100	0,166	0,084		100	0,562	0,241	
0	0,027		0,0140	0	0,102		0,0633	0	0,431		0,1304
100	0,047	0,020		100	0,187	0,084		100	0,674	0,242	
0	0,033		0,0142	0	0,122		0,0645	0	0,543		0,1305
100	0,053	0,020		100	0,206	0,084		100	0,786	0,243	
0	0,038		0,0144	0	0,141		0,0651	0	0,656		0,1304
100	0,058	0,020		100	0,225	0,084		100	0,900	0,244	
0	0,044		0,0146	0	0,159		0,0655	0	0,770		0,1304
100	0,063	0,020		100	0,243	0,084		100	1,014	0,245	
0	0,049		0,0146	0	0,177		0,0661	0	0,883		0,1308
100	0,069	0,020		100	0,261	0,084		100	1,128	0,245	
0	0,054		0,0147	0	0,195		0,0664	0	0,997		0,1310
100	0,074	0,020		100	0,278	0,084		100	1,243	0,245	
0	0,059		0,0148	0	0,212		0,0667	0	1,112		0,1312
3200	0,713	0,654		3200	3,262	3,050		3200	12,624	11,513	
0	0,325		0,3882	0	1,935		1,3271	0	11,338		1,2864
3200	0,976	0,651		3200	5,021	3,086		3200	23,414	12,076	
0	0,566		0,4101	0	3,692		1,3289	0	22,199		1,2151
3200	1,216	0,650		3200	6,780	3,088		3200	34,537	12,338	
0	0,798		0,4179	0	5,454		1,3265	0	33,335		1,2013
3200	1,449	0,651		3200	8,552	3,098		3200	45,876	12,540	
0	1,027		0,4220	0	7,230		1,3219	0	44,670		1,2060
3200	1,679	0,652		3200	10,335	3,105		3200	57,169	12,499	
0	1,254		0,4249	0	9,010		1,3247	0	55,971		1,1977
3200	1,907	0,653		3200	12,111	3,100		3200	68,525	12,554	
0	1,480		0,4273	0	10,783		1,3281	0	67,394		1,1303
3200	2,133	0,653		3200	13,893	3,111		3200	79,952	12,558	
0	1,704		0,4293	0	12,559		1,3346	0	78,846		1,1066
3200	2,357	0,654		3200	15,681	3,122		3200	91,530	12,685	
0	1,926		0,4307	0	14,344		1,3366	0	90,423		1,1076
3200	2,580	0,654		3200	17,470	3,125		3200	103,204	12,782	
0	2,148		0,4322	0	16,129		1,3408	0	102,121		1,0830
3200	2,802	0,654		3200	19,270	3,141		3200	114,941	12,820	
0	2,369		0,4334	0	17,921		1,3497	0	113,830		1,1110
<i>R</i> 100	70,5	%		<i>R</i> 100	74,9	%		<i>R</i> 100	54,0	%	
<i>R</i> 3200	64,6	%		<i>R</i> 3200	42,9	%		<i>R</i> 3200	9,4	%	
<i>J_{nr}</i> 100	0,1	kPa ⁻¹		<i>J_{nr}</i> 100	0,2	kPa ⁻¹		<i>J_{nr}</i> 100	1,1	kPa ⁻¹	
<i>J_{nr}</i> 3200	0,1	kPa ⁻¹		<i>J_{nr}</i> 3200	0,6	kPa ⁻¹		<i>J_{nr}</i> 3200	3,5	kPa ⁻¹	

Bilaga 7 – MSCR diagram

