

# Undersökning av bitumen från asfalt med hjälp av dynamisk skjuvreometer, DSR

- Utveckling av mätteknik och jämförande bitumenstudier

---

CHRISTOFFER ANDERSSON-PAJTIM SULEJMANI | TEKNIK OCH SAMHÄLLE | LTH |  
LUNDS UNIVERSITET



Thesis 251

# UNDERSÖKNING AV BITUMEN FRÅN ASFALT MED HJÄLP AV DYNAMISK SKJUVREOMETER, DSR

- Utveckling av mätteknik och jämförande bitumenstudier

Christoffer Andersson

Pajtim Sulejmani

Trafik och Väg  
Institutionen för Teknik och Samhälle  
Lunds Tekniska Högskola  
Lunds Universitet



Copyright © Christoffer Andersson, Pajtim Sulejmani

LTH, Institutionen för Teknik och samhälle  
CODEN: LUTVDG/(TVTT-5217)/1-114/2014  
ISSN 1653-1922

Tryckt i Sverige av Media-Tryck, Lunds universitet  
Lund 2014

Authors: Christoffer Andersson  
Pajtim Sulejmani

Title: Undersökning av bitumen från asfalt med Dynamisk Skjuvreometer, DSR – Utveckling av mätteknik och jämförande bitumenstudier

English title: EXAMINATION OF BITUMEN FROM ASPHALT USING DYNAMIC SKJUVREOMETER DSR  
- Development of measurement technology and comparative studies of bitumen

Language: Swedish

Year: 2014

Keywords: (5-6 st) Dynamisk Sjuvreometer, DSR; Bitumen; Reologi; Komplex modul; Favinkel; Masterkurva;

Citation: Andersson, Christoffer & Sulejmani, Pajtim, Undersökning av bitumen från asfalt med Dynamisk Skjuvreometer, DSR – Utveckling av mätteknik och jämförande bitumenstudier. Lund, Lunds universitet, LTH, Institutionen för Teknik och samhälle. Trafik och väg 2014. Thesis. 251

## Abstract:

Sustainable development is a comprehensive goal of the community.. Asphalt pavements consisting of binder (bitumen) and aggregates are two finite natural resources that are recyclable. In the last two decades the recycling of asphalt has increased considerably and today it has become a normal existence in the manufacturing of asphalt and widely accepted in maintenance. Despite the increased recycling, there are still questions concerning the selection of recycling method and especially questions regarding the quality and durability of the final product. Teknik och Samhälle at LTH acquired in 2013, a DSR (Dynamic Shear Rheometer), to be used in education and research. The United States uses DSR in an appropriate way to describe bitumen properties and categorize bitumen grades for its domestic market. The intention of the thesis was to show that results of measurements with DSR are comparable with measurements from traditional methods such as the Ring & Ball softening test and the penetration test.

# Innehållsförteckning

Förord	1
Sammanfattning	2
Summary	4
1 Inledning	6
1.1 Bakgrund	6
1.2 Syfte	7
1.3 Metod	7
1.4 Avgränsningar	8
2 Litteraturstudie	9
2.1 Vägkroppen	9
2.1.1 Flexibel överbyggnad	9
2.2 Återvinning av asfalt	10
2.2.1 Rivning av asfalt	10
2.2.2 Efterbehandling och mellanlagring av asfalt	11
2.2.3 Återvinningsmetoder	11
2.2.4 Återvinning i verk	12
2.2.5 Återvinning på plats	13
2.2.6 Krav på inblandning och asfaltgranulat	15
2.2.7 Hantering av tjärhaltiga beläggningar	15
2.3 Bitumen	16
2.3.1 Framställning	17
2.3.2 Bitumens kemiska egenskaper	17
2.3.3 Bitumens fysiska egenskaper	19
2.3.4 Användningsområde	19
2.3.5 Alternativa föryngringsmedel	20
2.3.6 Modifierade bitumen	21
2.4 Reologi	23
2.4.1 Viskositet	24
2.4.2 Elasticitet	24

2.4.3	Viskoelasticitet	25
2.4.4	Newtonsk och icke newtonsk vätska	25
2.4.5	Bitumen som ett viskoelastiskt material	26
2.4.6	Heukelomdiagrammet	27
2.5	Europeisk klassificering av bitumen	29
2.5.1	Empiriska tester	29
2.6	Amerikansk klassificering av bitumen	32
2.6.1	Superpave	32
2.7	Dynamisk Skjuvreometer (DSR)	34
2.7.1	Oscillation	34
2.7.2	Skjuvspänning och skjuvtöjning	35
2.7.3	$G^*$ , $G'$ , $G''$ och fasvinkeln $\delta$	37
2.7.4	Komplex viskositet	38
2.7.5	Linjärviskoelastiskt område	38
2.8	Åldring av bitumen	39
2.8.1	RTFOT	39
2.8.2	PAV-test	40
2.9	Mätning av bitumens lågtemperaturregenskaper	40
2.10	Glaspunkten	41
2.11	Blackdiagram	42
2.12	Masterkurva	43
2.12.1	Williams, Landel och Ferry (WLF) ekvationen	44
2.12.2	Sigmoidalmodellen	44
3	Metodbeskrivning	45
3.1	Utförda mätningar	45
3.2	Extrahering av bitumen	46
3.3	Provförberedelser	48
3.3.1	Uppvärmning av bitumen	48
3.3.2	Tillverkning av provkroppar	48
3.4	Mätinställningar	49
3.4.1	Amplitudsvep	49
3.4.2	Frekvenssvep	50
3.4.3	Höjdinställningar	50
3.4.4	Stabiliseringstid	51

3.5	Provutförande	51
3.6	DSR – komponenter	52
4	Resultat	53
4.1	Sammanställning resultat	53
4.2	Blackdiagram	54
4.3	Masterkurvor	56
4.3.1	Validering av masterkurva	57
4.4	Kvalitetssäkring av 25 mm platta	58
4.4.1	Jämförelse mjukpunkt Kula & Ring och komplex viskositet	58
4.4.2	Jämförelse vid 60°C mellan DSR och RVB	59
4.4.3	Kommentarer	59
4.5	Jämförelse mellan 8 mm och 25 mm plattan	59
4.6	Effekt av RTFOT	61
4.7	Återvinningsförsök	62
4.7.1	Försöksomgång 1	62
4.7.2	Försöksomgång 2	63
4.7.3	Kommentarer	64
5	Diskussion och slutsatser	65
5.1	Resultatdiskussion	65
5.2	Metoddiskussion	66
5.3	Slutsatser	66
5.3.1	Rekommendationer	67
6	Referenser	68
	Bilaga 1 - Mätresultat, komplex modul och fasvinkel	70
	Bilaga 2 – Blackdiagram	93
	Bilaga 3 – Masterkurvor, komplex modul och fasvinkel	99
	Bilaga 4 – Sigmoidalparametrar	105

# Förord

Detta examensarbete är skrivet som en avslutande del på Civilingenjörsprogrammet Väg – och Vattenbyggnad, institutionen för Teknik och Samhälle. Arbetet som påbörjades hösten 2013 och avslutades i januari 2014 har skrivits i samarbete med Nynas AB och Skanska Sverige. Arbetet har genomförts efter önskemål om kvalitetsprovning av bindemedel från återvunnen asfalt.

Först och främst vill tacka våra två handledare, Ebrahim Parhamifar och Per Tyllgren, för all konstruktiv kritik, handledning, stöd och svar på alla frågor under dygnets alla timmar. Vi vill tacka Ebrahim specifikt för resurser han gett oss under arbetets gång. Vi är mycket tacksamma med att Per har hjälpt oss med både analysering och presentation av mätresultaten.

För utförda mätningar med Brookfield rotationsviskosimeter som möjliggjort våra jämförelser i examensarbetet, vill vi rikta ett tack till Per Tyllgren och Azur Kujundzic.

Vi vill tacka personalen på Skanska VTC Syd som har låtit oss vara en del av gemenskapen på arbetsplatsen och bistått med både teoretisk och praktisk kunskap. Ert trevliga bemötande har gjort det roligt att komma till labbet varje dag. Tack Torbjörn Lundberg, Richard Nilsson, Bo Hansson, Katarina Ekblad, Henrik Persson och Mathias Lindhe.

Ett stort tack riktas till Nynas AB, som med sin expertis av mätutrustningen och åldrigen av bitumen verksamt bidragit till arbetet. Leverantören av utrustningen, Anton Paar Nordic i Malmö ska tackas för information och utbildning av utrustningen. Anders Emanuelson och Andreas Jansson som i föregående arbete tagit fram en elevmanual och hjälpt oss med praktisk handledning av utrustningen, vilket vi är väldigt tacksamma för.

Slutligen vill vi tacka våra familjer och vänner.

Litteraturstudie och mätningar är genomförda gemensamt.

Christoffer Andersson & Pajtim Sulejmani

Lund, januari 2014



# Sammanfattning

Hållbar utveckling är ett övergripande mål i samhället. En viktig aspekt i ett hållbart samhälle är att materialanvändningen kretsloppsloppsanpassas. Asfaltbeläggningar som består av bindemedel (bitumen) och stenmaterial är två ändliga naturresurser som är återvinningsbara. De senaste två decennierna har återvinningen av asfalt ökat kraftigt och börjat idag bli en normal företeelse vid tillverkning av asfalt och allmänt accepterat vid underhåll. Trots återvinningens stora frammarsch finns det fortfarande frågor kring val av återvinningsteknik och framförallt frågor kring kvalitén och hållbarheten kring slutprodukten.

Eftersom bitumen har en komplicerad kemisk sammansättning har kvalitetsbestämning av bitumen för vägändamål därför länge gjorts med särskilt utformade mätmetoder, exempelvis Kula & Ring, penetration, etcetera. De här metoderna har senare stämts av mot empiriska erfarenheter och fungerat bra tills bitumen började modifieras med ämnen som har annat ursprung än petroleumoljor. En viktig skillnad med dessa tillsatsämnen är att de till skillnad från bitumen har en smältpunkt, vilket har minskat användbarheten av de förenklade och empiriskt avstämda metoderna.

Teknik och Samhälle på LTH införskaffade år 2013 en DSR, Dynamisk Skjuvreometer, för användning vid undervisning och forskning. I USA används DSR för att på ett funktionsinriktat sätt beskriva bitumens egenskaper och kategorisera bitumenkvaliteter för sin hemmamarknad. DSR studerar de reologiska egenskaperna hos ett material vilket innebär att flödet och permanentdeformation utvärderas vid olika temperaturer och frekvenser. Eftersom bitumen är ett material som är både temperatur- och frekvensberoende så har de reologiska grundparametrarna i det här fallet större möjlighet att förutsäga de vägtekniska egenskaperna och därmed leda utvecklingen framåt med större träffsäkerhet.

Bitumen bör vara mjukt och flexibelt för att kunna motstå påfrestningar från trafiken och klimatet, men dessa egenskaper ändras då bitumen förhårdnas, först under tillverkning av asfaltmassan och därefter under tiden det ligger ute på vägen till följd av miljöns påverkan. För att återvinnas behöver bitumen återfå de egenskaperna som det hade i början av sin dimensioneringstid. Det finns två sätt att återvinna bitumen, det ena är att blanda in mjukare bitumen för att mjuka upp det hårda bitumen i returafalten så att asfalten blir hanterbar igen. Det andra alternativet är att tillsätta uppmjukande olja till returafalten. Denna teknik är gammal men slutade användas då tillsatsmedlen inte var miljövänliga. På senare år har miljövänliga oljor blivit tillgängliga på marknaden och gett denna teknik möjligheten till omstart. Nynas AB som tillverkar dessa föryngringsoljor och Skanska Sverige som återvinner asfalt dagligen genom att sätta till mjukare bitumen har föreslagit utvecklad kvalitetsprovning av bindemedel med DSR applicerad på återvunnen asfalt.

Syftet med examensarbete var att visa att mätningar med DSR ger resultat som stämmer överens med mätvärden från traditionella metoder som Kula & Ring samt penetrationstest. Jämförelse gjordes även mot mätningar utförda med dynamisk rotationsviskosimeter som använts vid ett flertal tidigare examensarbete och har uppvisat säkra mätvärden. Tester utfördes på olika återvunna bitumensorten och dessa jämfördes därefter med bitumen från referensmassan.

Mätningar med DSR utfördes på 22 olika bitumensorter, där vissa bitumensorter åldrades med RTFOT, som ska simulera bitumens egenskaper efter utläggning av asfaltmassan på vägen. För samtliga bindemedel genomfördes två frekvenssvep. Målet med frekvenssvep

är att mäta vilka effekter temperatur och frekvens har på bitumens egenskaper. Provstycken av bitumen belastades under varierande temperatur och tid. Frekvenssvepen utfördes med en 25 mm platta för höga temperaturer och med en 8 mm platta för låga temperaturer, eftersom vridmomentet blir för stort för 25 mm plattan då bitumens styvhet ökar med sjunkande temperatur.

För samtliga testade bitumensorter togs en så kallad masterkurva fram med hjälp av skiftfaktorformeln WLF och den matematiska modellen Sigmoidal. En masterkurva beskriver mätvärden med ett samband, ur vilket styvhet och fasvinkel kan beräknas vid valfri temperatur och frekvens. Masterkurvan för 25 mm plattan visade en stark korrelation med den framtagna masterkurvan medan 8 mm plattans korrelation var svag.

Mätningarna på mjukpunkt med Kula & Ring samt med dynamisk rotationsviskosimeter visade en stark korrelation mellan mätvärdena utförda med 25 mm plattan, vilket styrker resultaten från DSR. När 25 mm plattan jämfördes mot 8 mm plattan i de temperaturintervall de överlappade visade resultaten att trovärdigheten för 8 mm var låg då det inte fanns något tydligt samband mellan resultaten för de olika bitumensorterna. För vidare jämförelse i examensarbetet användes därefter endast resultaten mätta med 25 mm plattan.

Resultaten visade att bindemedel behandlade med RTFOT var styvare än de obehandlade bindemedlen av samma kvalité, vilket stämmer överens med det förväntade utslaget. Mätserierna med de återvunna bitumensorterna visade att samtliga testade blandningar visade på styvare egenskaper än bitumen från referensmassan.

Slutligen kan det konstateras att mätningarna med 25 mm plattan gav trovärdiga resultat medan mätningar med 8 mm plattan behöver ytterligare undersökningar. Anledningar till att resultaten för 8 mm inte kunde styrkas kan bero på att tillverkningen av provkropparna och appliceringen vid mättillfället var svårare än för 25 mm plattan.

# Summary

Sustainable development is a comprehensive goal of the community. An important aspect of a sustainable society is recycling of materials. Asphalt pavements consisting of binder (bitumen) and aggregates are two finite natural resources that are recyclable. In the last two decades the recycling of asphalt has increased considerably and today it has become a normal existence in the manufacturing of asphalt and widely accepted in maintenance. Despite the increased recycling, there are still questions concerning the selection of recycling method and especially questions regarding the quality and durability of the final product.

Because of the complex chemical composition of bitumen, the properties of the binder have been measured with methods such as the Ring & Ball softening point test and the penetration test. These methods were later compared with empirical tests and have worked until the bitumen was modified with substances with an origin other than petroleum oils. An important difference with these additives is that they, unlike the bitumen have a melting point, which has reduced the utility of the simple and empirically tuned methods.

Technology and Society at Lund University (LTH) acquired in 2013, a DSR (Dynamic Shear Rheometer), to be used in education and research. The United States uses DSR in an appropriate way to describe bitumen properties and categorize bitumen grades for its domestic market. DSR studying the rheological properties of a material, which means that, the flow and permanent deformation are evaluated at various temperatures and frequencies. Since bitumen is a material that is both temperature and frequency dependent, it means that the rheological basic parameters in this case have a greater opportunity to predict the road engineering properties.

Bitumen should be soft and flexible enough to withstand the stresses caused by traffic and climate, but the properties of the binder change when the stiffness increase, first under the production of the asphalt and then while it is out on the road as a result of environmental influences. To be recycled, bitumen needs to regain the properties it had in the beginning of its lifetime. There are two ways to recycle bitumen, one is to mix softer bitumen to soften the hard bitumen from the old asphalt so that the asphalt becomes manageable again. The other option is to add emollient oil to the old asphalt. This technique is old but was ceased to be used because the additives were harmful to the environment. In recent years, environmentally friendly oils have become available on the market and given this technology a restart. Nynas AB, which makes these rejuvenation oils and Skanska Sweden that recycle asphalt daily by adding softer bitumen has proposed developed quality testing of binders with DSR applied to the recycled asphalt.

The intention of the thesis was to show that results of measurements with DSR are comparable with measurements from traditional methods such as the Ring & Ball softening test and the penetration test. Comparison was also made to the measurements made with dynamic rotational viscometer used in several previous works and proven to be an accurate instrument. Tests were conducted at various recycled bitumen resort and these were then compared with the bitumen from the reference mass.

Measurements by DSR were conducted on 22 bitumen of different character, where some bitumen were aged with RTFOT, which will simulate the properties of bitumen after production and placement of the asphalt. For all binders two frequency sweeps were conducted. The objective of the frequency sweep was to measure the effects temperature and frequency has on properties of bitumen. Frequency sweeps were performed with a 25 mm plate for high temperatures and with an 8 mm plate for low temperatures, since the

torque becomes too high for the 25 mm plate when the binders stiffness increases with decreasing temperature.

For all tested bitumen a so called master curve was derived using the WLF shift factor formula and the Sigmoidal model. A master curve gives the ability to compile readings to a curve at a chosen reference temperature within the measurement interval. Master curve for the 25 mm plate showed a strong correlation with the developed master curve while the 8 mm plate's correlation was low.

The measurements with Ring & Ball and with the dynamic rotational viscometer showed a strong correlation between the measurements made with the 25 mm plate, which corroborates the results from DSR. When the 25 mm plate was compared to the 8 mm plate, the results showed that the credibility of 8 mm was low because there was no clear correlation between the results. The only results therefore further on in the thesis, were the measurements with the 25 mm plate.

The results showed that the binder treated with RTFOT was stiffer than the untreated binders of the same quality, which is consistent with the expected verdict. The measurement series with the recovered bitumen showed that all tested mixtures showed stiffer properties than the bitumen from the reference mass.

Finally it can be noted that the measurements with 25 mm plate gave credible results while measurements with the 8 mm plate requires further measurements. The mounting and manufacture of test specimens of 8 mm plate was perceived as more difficult than for 25 mm plate and can be a source of error to the readings for 8 mm plate.

# 1 Inledning

## 1.1 Bakgrund

Regeringens övergripande mål inom alla områden är hållbar utveckling, vilket innebär att i alla beslut som tas beaktas konsekvenserna ur ett miljömässigt, ekonomiskt och socialt perspektiv. Detta skall leda till en god miljö för både denna och kommande generation. I en hållbar utveckling ligger vikten i att skydda miljön genom att effektivt utnyttja och kretsloppsanpassa de begränsade naturresurserna. Att återvinna asfalt ligger i linje med såväl de transportpolitiska som miljöpolitiska målen eftersom man minskar deponeringen och hushåller med naturresurser. Det är viktigt att beläggningsmassor inte ses som ett avfall utan som en värdefull resurs (Regeringen, 2003).

Varje år använder vägsektorn miljontals ton ballast till de bundna och obundna lagren i vägöverbyggnader och cirka 400 000 ton bitumen till asfaltbeläggningar. Detta är stora mängder ändliga naturresurser som förbrukas varje år. Det finns möjligheter inom vägsektorn att hushålla med dessa resurser, bland annat genom att återvinna gamla asfaltbeläggningar. Asfaltbeläggningar är relativt enkelt att återvinna. De tekniska förutsättningarna är idag gynnsamma för att på ett enkelt sätt fräsa bort, gräva upp, sönderdela och återvinna gamla asfaltbeläggningar såväl på plats som på asfaltverk. Återvinning in situ kräver mindre transporter, vilket är positivt ur miljösynpunkt (Vägverket, 2004a).

Bitumen i en beläggning åldras med tiden ute på vägen och blir styvare då det oxiderar med syret i omgivningen. Asfaltens egenskaper ändras med tiden och får andra egenskaper efter sin tid ute på vägen. Sammanfattningsvis handlar det om att den lättflytande oljan i bitumen, maltén, minskar i förhållande till den trögflytande delen i bitumen, asfaltén, vilket gör bitumen mer trögflytande. Det finns olika åsikter om vad som händer med beläggningen när bitumen med olika ursprung blandas. Kompabilitet, ämnens samhörighet och molekylärstabilitet, är en faktor som kan leda till att komponenterna av olika ursprung separerar från varandra eller att beläggningen mjuknar upp där den tidigare varit stabil (Karlsson, 2002).

Efter många års trevande börjar inblandning av retur-asfalt bli en normal företeelse vid tillverkning av asfalt, men står fortfarande för en liten men ekonomiskt betydande del för den totala nyproduktionen. Tveksamheten har varit förståelig eftersom det handlar om relativt stora maskininvesteringar. Frågor kring försörjningen med retur-asfalt, val av återvinningsteknik och kvaliteten hos slutprodukterna har först behövt en ordentlig genomlysning. Just kvalitetsfrågan har återstående frågetecken, inte minst när det gäller hållbarheten.

Teknik och Samhälle på LTH införskaffade 2013 en DSR, Dynamisk Skjuvreometer, för användning inom undervisning och forskning samt för utveckling tillsammans med andra institutioner och företag. I ett första examensarbete sattes utrustningen i stand, det togs fram en elevmanual och gjordes en rad mätningar av olika bitumensorter.

DSR har en central roll i det amerikanska vägbyggnadskonceptet, Superpave (Superior Performing Asphalt Pavements) och används för att på ett funktionellt sätt beskriva bitumens egenskaper och för att kategorisera bitumenkvaliteter för hemmamarknaden. Efter 20 års tillämpning står konceptet inför förändringar men DSR-instrumentet kommer

fortfarande att spela en helt central roll. Synsättet har anammats av den internationella forskarvärlden och sprids sakta men säkert även inom väghållning och produktion.

## 1.2 Syfte

Ett tidigare examensarbete på LTH har genomförts med Dynamisk Skjuvreometer (DSR). Detta examensarbete syftar till att fortsätta med mätningar på bitumen och genom jämförelse med rotationsviskosimeter och traditionella mätmetoder visa att DSR-mätningarna visar trovärdiga resultat.

Mätningar görs också på bitumen som extraherats från återvunna asfaltmassor för att jämföra egenskaperna med ett bitumen extraherat från en referensmassa. Syftet med de mätningarna är att kontrollera två olika typer av återvinningsmetoder med olika stor del procentuell inblandning av asfaltgranulat och jämföra med egenskaperna i referensmassans bitumen.

Examensarbetet ska också belysa frågeställningar om lämpligt genomförande av mätningar med DSR. Det handlar om att fastställa tidsscheman, mätningsriktningar för temperatur och val av frekvenser och töjningar samt spänningar. Under arbetets gång ska lågtemperaturmätningar ner till  $-30^{\circ}\text{C}$  genomföras för att testa hur mätutrustningen hanterar detta.

Följande frågeställningar ska besvaras:

- Hur står sig DSR-mätningar jämfört med mjukpunktsvärden mätta med Kula & Ring?
- Hur står sig DSR-mätningarna jämfört med resultaten från rotationsviskosimetern?
- Visar bitumen åldrat med RTFOT styvare egenskaper än det jungfruliga bitumen inom samma kvalitet?
- Hur är egenskaperna på bitumen från de återvunna massorna jämförda med bitumen från referensmassan?
- Ger mätningar utförda med 8 mm plattan vid låga mättemperaturer trovärdiga mätresultat?

## 1.3 Metod

Inledningen av examensarbetet bestod av en omfattande litteraturstudie för att insamla betydande kunskaper om återvinning av asfalt, bitumen och reologi. Denna kunskap låg sedan till grund för förståelsen av mätinstrumentet och betydelsen av resultaten från mätningarna.

Till mätningarna användes Dynamisk Skjuvreometer (DSR), där de första veckorna på arbetet bestod i att bekanta sig med mätinstrumentet. Ett examensarbete har tidigare gjorts på LTH med DSR där en användarmanual upprättades, vilken användes under introduktionsveckorna. Kontrollmätningar gjordes mot föregående examensarbete vilka i sin tur hade kontrollerat sina mätningar med personal från Nynas AB. Vidare införskaffades kunskap om mätinstrumentet genom kontakt med Nynas AB och leverantören Anton Paar.

Bo Hansson, Skanska VTC Syd utförde Kula & Ring samt penetrationstest på 13 stycken av de testade bitumensorterna. Per Tyllgren, SVC (Svenskt VägCentrum) och Azur Kujundzic, LTH utförde mätningarna med Brookfield rotationsviskosimeter. Resultaten från



de här mätningarna användes till att jämföra med resultatet från DSR för att kvalitetssäkra mätningarna.

För beräkningar har WLF (Williams - Landel - Ferrys ekvation) tillsammans med Sigmoidal modellen används för att skapa masterkurvor. Dessa kurvor illustrerar bitumens styvhet som funktion av reducerad frekvens i ett diagram där båda axlarna är logaritmerade. Masterkurvorna ligger till grund för framtagandet av värden för jämförelse med traditionella metoder och rotationsviskometern samt för jämförelse mellan olika bitumensorter.

## 1.4 Avgränsningar

De testade bitumensorterna namnges med siffrorna 1-22 för att inte röja sekretessbelagda uppgifter. Varm återvinning är återvinningsmetoden som använts för de testade bitumensorterna. Procentandelen asfaltgranulat som blandats i massorna och mer exakta metoder som använts vid återvinningen beskrivs inte i arbetet efter önskemål från Skanska VTC Syd och Nynas AB.

Mätningar kommer inte att göras på bitumen med tillsatsmedel som PMB- och vaxblandningar. Det linjärviskoelastiska området tas inte fram för alla bitumensorterna då det skulle bli en alldeles för utdragen process. Det anses vara tillräckligt att kontrollera att ett par sorter ligger inom gränserna för de valda töjningarna till mätningarna som Nynas AB tillhandhållit.

Stabiliseringstiden mellan olika temperaturer beräknas inte på egen hand utan hämtas ifrån Nynas AB.

Åldring har genomförts med metoden RTFOT (korttidsåldring) men inte med PAV (simulerar långtidsåldring). Mätningar av lågtemperaturregenskaper med BBR (Bending Beam Rheometer) och DDR (Direct Tension Test) har inte genomförts.

Examensarbetet kommer inte beskriva alla olika typer av överbyggnader som finns, då mätningar utförs på bindemedel som kommer från flexibla överbyggnader. Av de olika återvinningsmetoderna beskrivs varm återvinning mer utförligt i examensarbetet då det är metoden som använts på de testade bitumensorterna. Övriga återvinningsmetoder beskrivs endast kortfattat. De krav som ställs på återvinningen av asfalt redovisas endast för varm återvinning och inte för halvvarm eller kall återvinning.

I examensarbetet görs inga tester på innehållet i asfaltgranulatet för att kontrollera tjärhalten, men en del i litteraturstudien behandlar ändå detta ämne då det anses vara en viktig del i processen med återvinning.

## 2 Litteraturstudie

Litteraturstudie görs för att samla information om återvinning av asfalt, reologi och bitumen. I litteraturstudien beskrivs även de matematiska modeller som används i arbetet för att sammanställa mätresultaten.

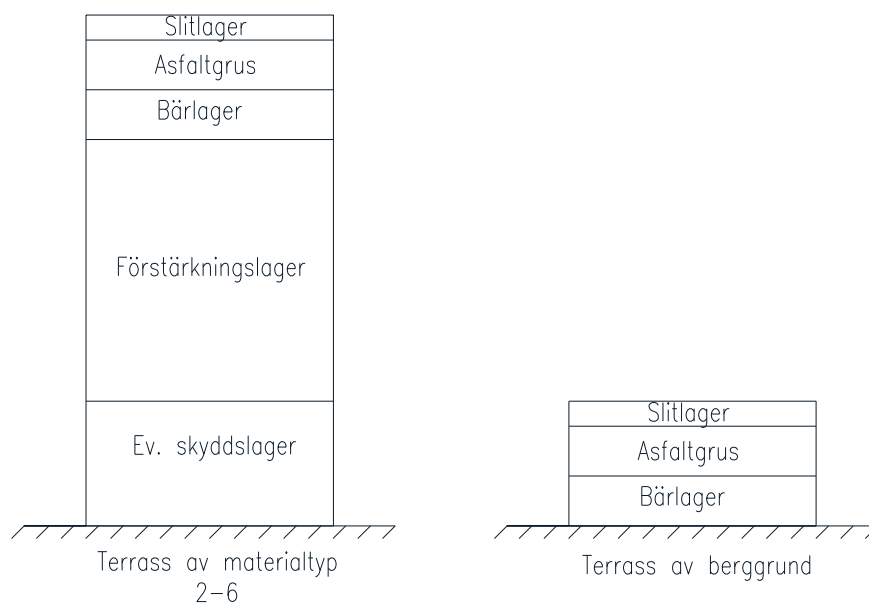
### 2.1 Vägkroppen

En vägs uppbyggnad kan se ut på många olika sätt, det finns vägar av asfalt, betong, och grus. En väg belagd med till exempel asfalt består inte enbart av delar med bunden beläggning utan även lager av obundna material ingår i det som kallas överbyggnad. Beroende på vilket material terrassen består av, varierar innehållet i överbyggnaden. Består terrassen av berg behöver inte överbyggnaden vara lika tjock som om terrassen består av lera eller sand. Överbyggnaden kan delas in i tre olika huvudtyper:

- Flexibel överbyggnad
- Beläggning av asfalt
- Styv överbyggnad
- Betongvägar
- Halvstyv överbyggnad
- Kombination mellan asfaltbeläggning och cementbundna lager.

#### 2.1.1 Flexibel överbyggnad

Den flexibla överbyggnaden har en beläggning av asfaltmassa och obundna lager av bärlager, förstärkningslager och skyddslager. Figur 2-1 visar hur en flexibel överbyggnad kan se ut. Den vänstra figuren visar en överbyggnad på terrassmaterial som exempelvis lera och sand medan den högra figuren visar en överbyggnad på en berggrund.



**Figur 2-1: Exempel på hur lagerna på en flexibel överbyggnad ser ut beroende på terrasstyp (Trafikverket, 2011)**



Skyddslagret består av stenmaterial i storleken 0-200 mm och används i de fall det behövs isolering och skydd mot tjäle. Det hindrar undergrundsmaterialet att tränga upp i förstärkningslagret.

Förstärkningslagret stenstorlek är mellan 0-90 mm och dess funktion är att fördela lasten över stora ytor och vara dränerande.

Bärlagrets funktion är att fördela lasterna nedåt i konstruktionen och består vanligtvis av krossat bergmaterial med stenstorleken 0-40 mm.

Det bitumenbundna bärlagret, även kallat asfaltgrus (AG) upptar och fördelar belastningarna från trafiken till underliggande lager. Största storleken på stenarna varierar mellan 16, 22 och 32 mm. Dimensionering av detta lager görs med avseende på den tunga trafiken. Ibland utförs den övre delen av AG-lagret som ett bindlager. Bindlagrets främsta uppgift är att fungera som en övergång mellan AG-lagret och slitlagret, samt ta upp de skjuvkrafter som uppstår i beläggningen.

Slitlagret är det översta lagret och skall uppfylla krav på trafiksäkerhet, transportekonomi och komfort. Lagret kan bestå av stenstorlekar mellan 4, 6, 8, 11, 16 och 22 mm beroende vilken belastning vägen kommer att utsättas för.

Vid nybyggnationer av vägar krävs det en hel del material, framförallt i form av ballast, både till de obundna och bundna lagren, vilket ställer krav på tillgång till material. För att spara in material går det att återvinna befintliga asfaltlager, både till nya obundna lager samt till nya asfaltbeläggningar (Agardh & Parhamifar, 2012).

## 2.2 Återvinning av asfalt

I samband med att vägar byggs och underhålls används stora mängder ändliga naturresurser. Varje år produceras mellan 7-8 miljoner ton asfalt, där endast 1,5-2 miljoner ton av den nyproducerade asfalten är återvunnen. För att återvinna asfalt används olika återvinningsmetoder för att på bästa sätt uppfylla de krav som ställs på vägen som ska anläggas. Kraven varierar beroende på typ av väg och vilket lager på konstruktionen som ska återvinnas, där till exempel lågtrafikerade vägar har lägre krav än högtrafikerade vägar och slitlager har hårdare krav än bundet bärlager. Genom de olika återvinningsmetoderna är målet att minska användandet av jungfruligt material och användandet av bitumen. Återvinning av asfalt kategoriseras i tre olika processer, där första steget är att riva bort eller fräsa ner asfaltbeläggningen, i det andra steget lagras och behandlas asfalten inför det sista steget där själva återvinningen sker. Återvinning av asfalt kan göras med tre olika tekniker, kall, halvvarm eller varm och kan antingen göras på ett verk eller direkt på plats. Återvinningsmetod väljs beroende på vilken kvalitet som vill uppnås, där massor med varm återvinning visat samma goda egenskaper som nytillverkad asfalt under förutsättning att återvinningen sker på korrekt sätt (Vägverket, 2004a).

### 2.2.1 Rivning av asfalt

Borttagningen är det första steget i återvinningsprocessen som har stor betydelse för slutprodukten. Det ska redan i detta steg vara känt hur asfalten ska återvinnas, annars kan ett billigt borttagningsförfarande leda till att efterbehandlingen blir för dyr eller att den önskvärda återvinningen blir omöjlig att utföra. För att ta bort asfalten används två metoder, grävning och fräsning, där metod bestäms av hur det är tänkt att den upptagna asfalten ska återvinnas.

Vid grävning av asfalt river en grävmaskin upp asfaltkakor i en passande storlek som underlättar efterbehandlingen. Asfalten transporteras till en mellanlagringsplats, en

återvinningsterminal, ett asfaltverk eller ett annat projekt. Nackdelen med grävning är att det finns risk med att man kan få med sig för mycket av närliggande material, som jord och växter men även obundet bärlager, vilket kan försvåra efterbehandlingsprocess. En annan nackdel är att transportkostnaderna kan bli höga om inte asfaltverken ligger i närheten av platsen där uppgrävningen sker.

Ett alternativ till grävning för borttagning av asfalt är fräsning, som även har andra användningsområden till skillnad mot grävning. Asfaltfräsar finns i olika storlekar vilket ger möjligheten att fräsa från tjocklekar på några millimeter till hela beläggningar. Fräsningen ger även möjlighet till att fräsa i skikt, där man tar tillvara på olika fraktioner och dess egenskaper för de olika lagren i konstruktionen. I massor som innehåller tjära kan de återvunna massorna separeras från tjära, vilket underlättar efterbehandlingen. Ett annat alternativ är djupfräsning, där fräst asfalt blandas med underliggande bärlager och bildar ett nytt bärlager med en tjockare konstruktion som följd (Svenska kommunförbundet, 2004).

### 2.2.2 Efterbehandling och mellanlagring av asfalt

Massor av asfaltbeläggningen som rivs upp eller fräses bort kan delas in i två kategorier, returafalt och asfaltgranulat. Returafalt är den massa som grävts eller rivits upp men fortfarande inte bearbetats för återvinning utan består av grövre asfaltkakor, där andelen finare partiklar är låg. För att asfaltmassorna ska kunna återvinnas måste de först krossas till den grad att önskade fraktioner uppstår för att därefter sorteras efter användningsområde.

Asfaltbeläggning som krossats eller frästs upp benämns som asfaltgranulat och består till största del av asfaltklumpar av bindemedel men även av stenmaterial i varierande storlek och ibland av rent stenmaterial. Asfaltgranulatet delas in i krossade schaktmassor och fräsmassor av asfalt. De krossade massorna har lågt bindemedelsinnehåll och hög andel av obundet stenmaterial, därför lämpar sig krossade schaktmassor mer för återvinning till obundna lager. Fräsmassor har relativt högt bindemedelsinnehåll men låg andel av obundet material och ska därför i första hand användas till asfaltåtervinning. I ett sista steg för att underlätta återvinningsprocessen är det fördelaktigt att dela in materialet efter ursprung och fraktioner och på så sätt ta fram material för givet önskemål.

För att optimera återvinningen av asfalt mellanlagras asfaltmassor i avvaktan på lämpliga objekt. Asfaltmassor, som ska återvinnas eller behandlas, kan som längst lagras i tre år innan de beskattas som massor som läggs på deponi. Mellanlagring kan ske på två olika typer av upplagsplatser, antingen på en tillfälligt iordninggjord plats, i allmänhet i närheten av vägobjektet eller på en permanent iordninggjord plats. Platsen för mellanlagringen bör placeras utifrån transportsträcka men även utifrån hydrogeologi och intilliggande brunnar (Svenska kommunförbundet, 2004).

### 2.2.3 Återvinningsmetoder

De metoder som finns för återvinning kan delas in i två huvudgrupper, inblandning av returafalt när asfaltmassa tillverkas i blandningsverk och återvinning av asfaltlagret direkt på plats. Återvinningsprocessen för båda fallen kan vara av varm, halvvarm eller kall karaktär. Skillnaden mellan återvinningsprinciperna beror på vilken temperatur materialet upphettas till vid tillverkningen. Vid varm återvinning är temperaturen högre än 120°C, för halvvarm återvinning 50-120°C och för kall återvinning lägre än 50°C (Vägverket, 2004a).

## 2.2.4 Återvinning i verk

Val av återvinningsmetod beror på typ av väg som ska beläggas och trafikmängd som förväntas på vägen. I Tabell 2-1 finns de tre olika metoderna som används för återvinning i verk.

Tabell 2-1: I tabellen beskrivs metoder för återvinning i verk (Vägverket, 2004a)

Metod	Användning	Tillsatt bindemedel	Normal andel returafalt
Varm återvinning i verk.	För slit-bind- och samtliga bärlager i samtliga trafikklasser och vägtyper.	Bitumen	Mellan 5 och 30 % beroende på returafalt, process, typ av verk och lagertyp.
Halvvarm återvinning i verk	För slit- och bärlager, oftast i något lägre trafikklasser.	Mjukbitumen	Mer än 80 %.
Kall återvinning i verk	För slit- och bärlager, oftast i något lägre trafikklasser.	Bitumenemulsion, mjukbitumen eller bitumenskum.	Mer än 80 %

### 2.2.4.1 Varm återvinning i verk

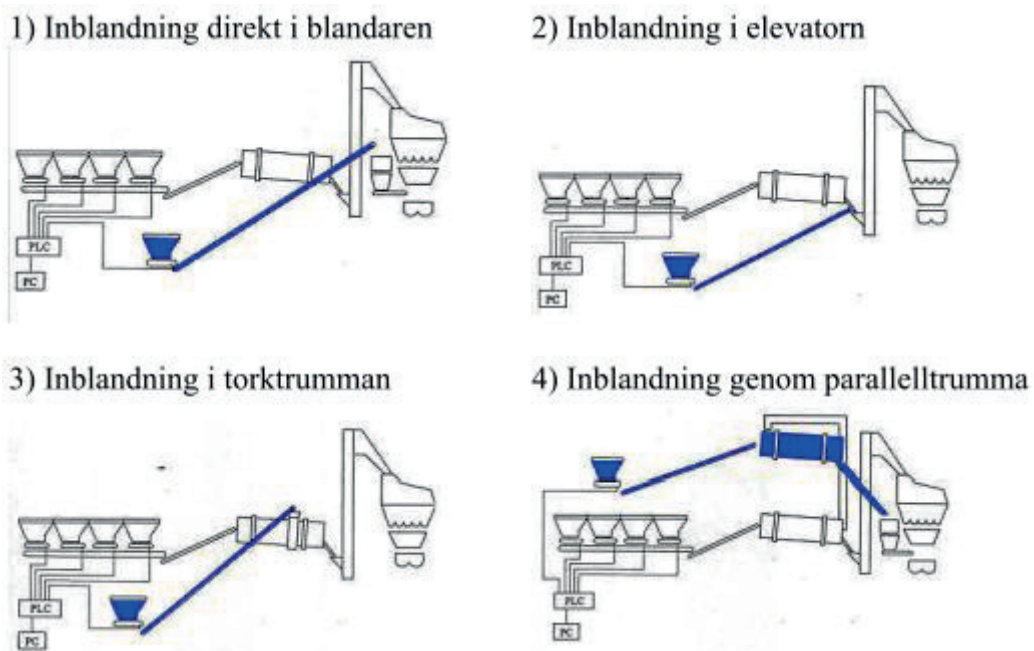
Varmblandningen kan ske i två olika typer av verk, trumblandningsverk och satsblandningsverk. I trumblandningsverket används samma trumma för uppvärmning av stenmaterial och inblandning av bitumen. I det sistnämnda värms stenmaterialet i en torktrumma för att sedan blandas med bitumen.

I satsblandningsverk kan asfaltgranulatet tillsättas på fyra olika sätt (se Figur 2-2):

1. Inblandningen sker direkt i blandaren – asfaltgranulatet värms upp av den varma massan.
2. Inblandningen sker i elevatoren - det varma stenmaterialet blandas med asfaltgranulatet och värmer därmed upp asfaltgranulatet innan bitumen tillsätts.
3. Inblandning i torktrumman - asfaltgranulatet och stenmaterialet värms upp tillsammans.
4. Inblandning via parallelltrumma - via en separat trumma värms asfaltgranulatet till en temperatur som vanligtvis understiger önskad sluttemperatur, därefter blandas asfaltgranulaten in i blandaren (Vägverket, 2004a).

Gemensamt för tre första metoderna är att stenmaterial måste överhettas för att den färdiga asfaltmassan ska få tillräckligt hög temperatur, vilket kan medföra att en förhårdning av såväl det nya som det gamla bindemedlet. Beroende på inmatad mängd returafalt från parallelltrumman behöver stenmaterialet ibland lika mycket övervärme som med kalldoserat material (Tyllgren, 2013a).

Vid metod fyra, där parallelltrumma används, behöver inte stenmaterialet överhettas då asfaltgranulatet värms upp separat. En annan fördel med att använda parallelltrumma är att rökgaserna från parallelltrumman förbränns i den ordinarie trumman och därmed minskar utsläppen. När metod 1-3 används blandas normalt cirka 5-20 % granulat in, om större mängd blandas in kan det uppstå problem med bland annat masstemperatur och ångbildning. Vid uppvärmning genom parallelltrumma kan större mängd granulat blandas in.



Figur 2-2: Skiss över hur asfaltgranulat blandas in i satsblandningsverk, där det blåmarkerade visar vart granulatet tillsätts i processen (Vägverket, 2004a)

I ett trumblandningsverk sker alla stegen i en roterande trumma, torkning, värmning och blandning. Asfaltgranulatet tillsätts efter att det nya stenmaterialet torkats och värmts upp. I en variant av trumblandaren, som kallas trumma i trumma, värms asfaltgranulatet upp i en annan trumma innan det blandas in (Vägverket, 2004a).

#### 2.2.4.2 Halvvarm återvinning i verk

Vid halvvarm återvinning ligger temperaturen mellan 50 och 120°C. Till skillnad mot varm återvinning används mjukbitumen i halvvarm återvinning. Mjukbitumen har den egenskapen att efter den blandats med en mjukgörare så kan den användas vid lägre temperaturer. Då verken är lätta att flytta innebär detta att verken kan etableras, även vid tillverkning av mindre mängder asfalt. Halvvarm återvinning kan med fördel användas där en flexibel asfaltmassa önskas, det vill säga i ett kyligare klimat, med låg andel tung och inte allt för intensiv trafik då det kan orsaka spårbildning (Vägverket, 2004a).

#### 2.2.4.3 Kall återvinning i verk

Verken för kall återvinning är lätta att flytta och är därför lämpliga för mindre etableringar. På vägar och gator där kall återvinning används överstiger sällan ÅDT (årsmedeldygnstrafik) 1500 fordon. Stenmaterialet och den granulerade asfaltmassan blandas i en kontinuerlig blandare i uppvärmt tillstånd, där även bindemedel tillsätts. Vid den här typen av återvinning är det endast bindemedlet som värms och kan vara i form av mjukbitumen, bitumenemulsion eller bitumenscum (Vägverket, 2004a).

#### 2.2.5 Återvinning på plats

Återvinning på plats börjar med att den befintliga asfalten kan värmas upp. Den uppvärmda eller uppvärmda asfalten sönderdelas och återvinns genom tillsättning av bindemedel, stenmaterial eller bådadera. Allt detta sker i ett sammanhängande moment med en utrustning som är självgående. Metoder för återvinning på plats är lämpliga för vägar med homogena slitlager, vägar med avnötningsspår från dubbtrafiken samt flerfältsvägar där endast exempelvis ett körfält ska åtgärdas. Dessa metoder är inte

lämpliga för vägar med plastiska deformationer i beläggningen, beläggningar som åldrats eller ytor som lagats då det kan vara svårt att anpassa tillsattmassan (Vägverket, 2004a).

Vid varmåtervinning på plats används tre varianter som kan ses i Tabell 2-2, repaving, remixing och remixing plus, dessa varianter förtydligas nedan:

1. Repaving går ut på att den befintliga asfaltbeläggningen värms, fräses upp och omfördelas för att läggas ut på nytt. Därefter läggs ett nytt lager asfaltmassa ovanpå.
2. Remixing innebär att en maskinenhet värmer och river upp den befintliga beläggningen och blandar in ny tillverkad asfaltmassa, men även nytt bindemedel och mjukgörare kan tillsättas. Asfaltmassan läggs därefter ut i en ny tjocklek på cirka 30-40 mm.
3. Remixing plus är en kombination av remixing och repaving där beläggningen värms, fräses upp, blandas med ny tillverkad asfaltmassa och läggs ut. Därefter läggs ett nytt lager ovanpå det remixade lagret (Svenska kommunförbundet, 2004).

**Tabell 2-2: Metoder vid återvinning på plats (Vägverket, 2004a)**

Metod	Användning	Tillsatt bindemedel	Tillsatt asfaltmassa
Varm återvinning på plats (repaving)	För slitlager i samtliga trafikklasser och vägtyper.		40-60 kg/m <sup>2</sup> ny asfaltmassa läggs ovanpå det rivna och utjämnade befintliga asfaltlagret.
Varm återvinning på plats (remixing)	För slitlager i samtliga trafikklasser och vägtyper.	Bitumen eller speciell mjukgörare kan tillsättas.	15-30 kg/m <sup>2</sup> ny asfaltmassa tillsätts och blandas med asfaltgranulat från befintligt asfaltlager.
Varm återvinning på plats (remixing plus)	För slitlager i samtliga trafikklasser och vägtyper.	Bitumen eller speciell mjukgörare kan tillsättas.	Ca 40 kg/m <sup>2</sup> ny massa läggs ovanpå det remixade lagret.
Halvvarm återvinning på plats (halvvarm remixing)	För slitlager i trafikklasser under medel.		15-25 kg/m <sup>2</sup> ny asfaltmassa tillsätts och blandas med asfaltgranulat från befintligt asfaltlager.
Kall återvinning på plats (kall remixing)	För slit- och bärlager, oftast i något lägre trafikklasser.	Bitumenemulsion eller bitumen som skummas.	Tillsats av bindemedel och stenmaterial upp till ca 20 %.
Kall inblandning på plats (stabilisering)	För bärlager, oftast i något lägre trafikklasser.	Bitumenemulsion och ev. cement.	Tillsats av bindemedel och stenmaterial normalt upp till ca 50 %.



Kall inblandning på plats (djupfräsning)	För bärlager, oftast i något lägre trafikklasser.		Eventuell tillsats av stenmaterial.
--	---	--	-------------------------------------

### 2.2.6 Krav på inblandning och asfaltgranulat

Beroende på verkens utrustning varierar mängden returafalt som kan tillsättas mellan 5-80 %, där siffrorna är lägre i satsverk än i trumblandningsverk. Mängden returafalt som kan tillsättas beror förutom på processutrustningen även på returafaltens egenskaper och de krav som ställs på den färdiga produkten.

Vid varm återvinning används en relativt låg inblandning av returafalt, 5-30 %, jämfört för halvvarm och kall återvinning i verk där det är vanligt med att 80 % av returafalten används. Trafikverket (2010) ställer följande krav på inblandning av varmverksblandat asfaltgranulat:

- *”Det accepteras en iblandning av asfaltgranulat på högst 20 % för slitlager och högst 30 % för bind- och bärlager.*
- *Inblandning av asfaltgranulat accepteras inte för PMB-beläggningar.*
- *Tillsatt bindemedel får högst vara en penetrationsklass mjukare än beställt bindemedel. När mjukpunktsförändringen beräknas utgår man då ifrån mjukpunkterna hos det tillsatta bindemedlet och det återvunna bindemedlet.*
- *Mjukpunkt i extraherat bindemedel från använt asfaltgranulat ska redovisas i arbetsreceptet liksom mängd inblandat granulat.*
- *Vid tillsats av återvinningsmassor accepteras en mjukpunktsförändring på max 8°C efter utläggning.*
- *Vid inblandning av asfaltgranulat i slitlager med trafik  $\text{ÅDT}_k \geq 1\,500$  fordon ska kulkvarnsvärdet för extraherad ballast från granulatet provas.*
- *Asfaltgranulat ska tillsättas i konstant mängd. Vid förändringar i tillsatt mängd asfaltgranulat ska nytt arbetsrecept upprättas om den varaktiga förändringen överstiger  $\pm 2$  viktprocentenheter.”*

Om den varma återvunna asfalten uppfyller dessa krav anses den vara likvärdig med motsvarande massor som tillverkats med nytt material (Vägverket, 2009b).

### 2.2.7 Hantering av tjärhaltiga beläggningar

I enlighet med de transport- och miljöpolitiska målen om minskad deponering, återvinning och resurshushållning så ligger det i vägsektorns intresse att se uppbrutna beläggningmassor som en värdefull resurs och inte som ett avfall. Men det finns ett hot mot att återvinna asfaltbeläggningar i full utsträckning och det största hotet är stenkoltjära, som användes i vägbeläggningar fram till början av 1970-talet, då det på den tiden ansågs vara ett lämpligt bindemedel i vägbeläggningar. Det var även vanligt att ytbehandla och lägga indränkt makadam på grusvägar efter att de hade belagts med dammbindande lager. Vägtjära har använts över hela landet på de olika lagren i vägbeläggningar. Karakteristiskt för tjärhaltiga beläggningar idag är att när de förekommer så påträffas de lägre ner i beläggningskonstruktionen, bland de understa lagren. Vid normalt vägunderhåll där man till exempel fräser bort ytlagret och lägger på ett nytt slitlager utgör sällan tjäran något problem. Det är först när djupfräsning sker av

beläggningsen eller när beläggningsen ska tas bort som det finns risk för att de tjärhaltiga lagren kommer med (Lindahl & Ulmgren, 2003).

Sedan januari 2002 klassas upprivna och borttagna beläggningar som innehåller stenkoltjära som farligt avfall enligt avfallsförordningen (SFS 2001:1 063), detta på grund av att stenkoltjära innehåller höga halter av cancerogena PAH, polycykliska aromatiska kolväten. Rent bitumen som har framställts genom destillation av råolja innehåller låga halter av ämnesgruppen 16-PAH, i regel 10-100 ppm, medan ren stenkoltjära kan innehålla över 100 000 ppm 16-PAH.

Det har sedan användningen av tjärbeläggningar upphört gjorts en rad studier för att se vilka hot som finns för återvinning av asfaltbeläggningar som innehåller stenkoltjära. I undersökningar som har utförts för att fastställa halten av 16-PAH i tjärhaltiga beläggningmaterial varierar resultaten i hög grad, eftersom olika asfaltlager med varierande ursprung har använts. Resultaten varierar dessutom om proven av tjärasfalten är tagna i vägen eller om proven är tagna på upplag av krossade och sorterade asfaltmassor (asfaltgranulat), där halterna är lägre i upplagen eftersom massorna blir omblandade och homogena efter alla processer i återvinningen. I en studie om föroreningar kan läcka ut från tjärasfalt så indikerar studien på att vid lägre halter av 16-PAH (< 300 ppm) så bedöms risken för miljöpåverkan vara liten.

När arbetsmiljöpåverkan från hantering av asfaltbeläggning som innehåller tjära undersöktes konstaterades det att ingen ökad miljörisk finns vid innehåll av tjära, 100-600 ppm av 16-PAH, för asfaltpersonal. I en annan omfattande svensk undersökning visades att arbetare från asfaltindustrin verksamma mellan 1950 och 1990 har samma hälsoläge som jämförbara grupper i samhället när det kommer till lungcancer. Anledningen till att studien omfattar målpopulation beror på att det var under denna tid som tjärbeläggningar tillverkades och lades ut (Vägverket, 2004b).

#### *2.2.7.1 Identifiering av tjära i asfaltsbeläggningar*

Vid exempelvis vägunderhåll, ledningsarbeten eller ombyggnad tas äldre asfaltbeläggningar bort, men först måste asfaltlagren kontrolleras om de innehåller tjära. Identifieringen kan göras med hjälp av beläggningssluggare, är inte det möjligt kan tjärasfalten upptäckas snabbt via lukten eller identifieras på ett snabbt och enkelt sätt med hjälp av ett färgtest. På de platser där man identifierat tjära med spraytest, UV-lampa eller lukt tas prover på vägen från provkärnor eller krossat material. För att exakt bestämma halten av PAH så analyseras provet på ett kemiskt analyslaboratorium (Vägverket, 2004b).

#### *2.2.7.2 Riktvärden*

År 2002 enades de lokala väghållarna och miljömyndigheterna i de tre stora storstadskommunerna om gemensamma rutiner och riktlinjer för hur asfalthanteringen ska ske vid innehåll av stenkoltjära i äldre beläggningar. Denna överenskommelse kom i avvaktan på centrala riktvärden. Två år senare, 2004, kom dåvarande Vägverket med en publikation om hantering av tjärhaltiga beläggningar som har liknande riktlinjer som de tre storstadskommunerna kom överens om (Vägverket 2004b) (Lundin, 2002). För ytterligare fördjupning finns rutiner och riktlinjer för asfalthantering av stenkoltjära i Vägverket (2004b) och Lundin (2002).

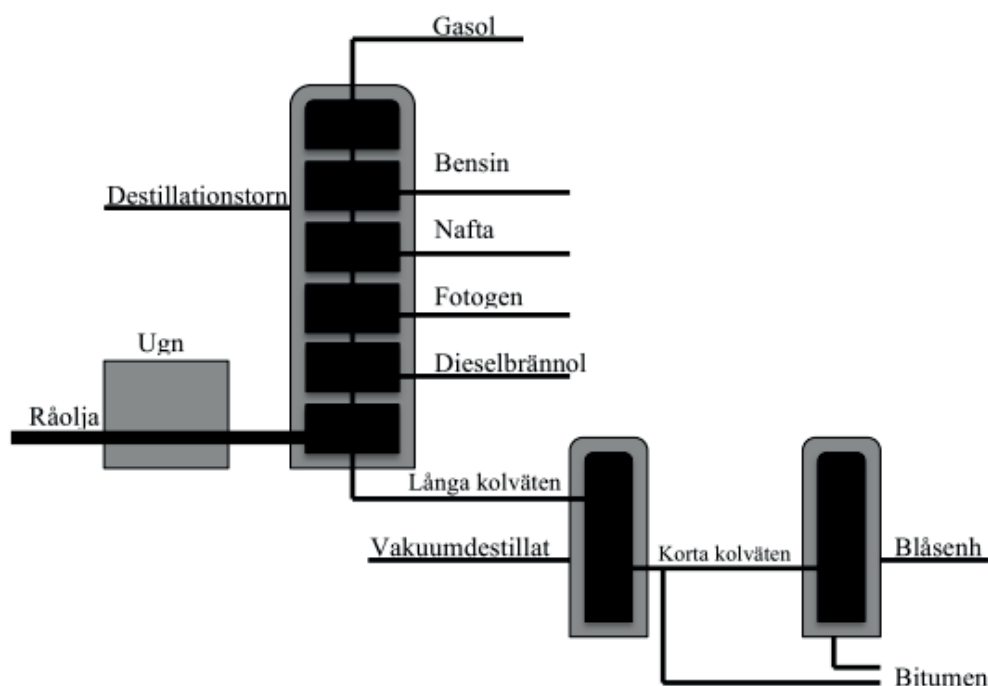
## **2.3 Bitumen**

En asfaltmassa består av stenaggregat, hålrum och bindemedel, där det sista materialet benämns som bitumen. Bitumen är det svarta materialet som finns i asfalten och som håller

ihop stenarna i en asfaltmassa. Bitumen är ett material som är mycket användbart i vägkonstruktioner i och med sin mångsidighet, då det har god vidhäftning mot stenar, är mycket vattentät och slitstark samt motståndskraftigt mot de flesta syror och salter (Minnesota Asphalt Pavement Association, 2003).

### 2.3.1 Framställning

Bitumen är en blandning av kolväten som kan påträffas i naturen som naturasfalt men det vanligaste är att det framställs på kemiskt vis genom raffinering av petroleum (Trafikverket, 2010). För att erhålla en färdig produkt måste råolja genomgå en rad processer. Råoljan separeras till olika komponenter via destillation där oljan först värms upp en i ugn som leds vidare till en destillationskolonn bestående av olika fack där oljan senare kan tas ut från. Fraktionerna lägger sig i olika fack beroende på vilken kokpunkt de har, där fraktioner med lägst kokpunkt hamnar högst upp. I facket längst ner finns de fraktioner av tunga kolväten med höga kokpunkter. Vid ytterligare en destillation av de tunga kolvätena erhålls gasolja, destillat och rester med korta kolväten. De korta kolväten används som råmaterial för att framställa olika bitumensorter med olika egenskaper. Beroende på råoljans ursprung varierar bitumens egenskaper, där penetrationsvärdet kan anta värden mellan 35- 300 dmm. De fysiska egenskaperna kan ändras genom oxidation, det vill säga att man blåser in luft antingen genom en kontinuerlig ström av luft eller i sats. Med oxidation kan man framställa ett mindre temperaturkänsligt bitumen, minska penetrationen och öka mjukpunkten (Read & Whiteoak, 2003). Figur 2-3 visar en schematisk bild på framställning av bitumen.



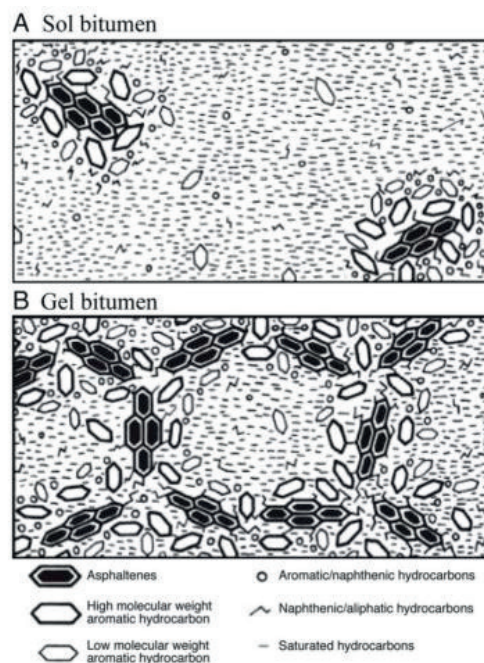
Figur 2-3: Framställning av bitumen (Read & Whiteoak, 2003. bearbetad av Gustavsson & Thylander, 2013)

### 2.3.2 Bitumens kemiska egenskaper



Bitumen består till stor del av kolväten, men det finns även spår av funktionella grupper som innehåller svavel, kväve och syre. Ämnen som järn, magnesium, nickel och kalcium kan också förekomma i bitumen i form av oorganiska salter och oxider. Innehållet varierar i ringa mängd beroende på råoljans innehåll. Den kemiska sammansättningen av bitumen är väldigt komplext och en analys av bitumen skulle resultera i stora mängder data där det skulle vara svårt, om inte omöjligt att hitta värden som korrelerar mot reologiska egenskaper. Man delar därför in bitumen i tre huvuddelar: oljor, asfaltener (partiklar av kolföreningar som varar i oljorna) och maltener som vidare kan delas upp i fettsyror, aromater och hartser (lättflytande kolväten som omger partiklarna som en hinna) (Read & Whiteoak, 2003). Asfaltenerna har stor effekt på hur bitumen motstår flytning och deformation. En ökning av asfaltener leder generellt till ett styvare bitumen med lägre penetration, högre mjukpunkt och höge viskositet (Scholz, 1995). Hartserna fungerar som ett dispergeringsmedel (ett medel som åstadkommer finfördelning av partiklarna i vätskan) och har därmed stor betydelse för karaktären av bitumen. Asfaltens sammansättning ändras med tiden och får andra egenskaper efter sin tid ute på vägen. I korthet handlar det om att andelen maltener minskar i förhållande till den trögflytande delen i bitumen, asfaltenerna, vilket leder till att bitumen blir mer trögflyttande och styvare (Read & Whiteoak, 2003).

När det gäller struktur så kan traditionellt bitumen beaktas som en kolloid, ett system där ett ämne (asfaltener) är finfördelat i ett annat ämne (oljan). Det finns ett index för kolloidal stabilitet (CI) som definieras som förhållandet mellan mängden asfaltener och mängden hartser och aromater, som har för avsikt att beskriva stabiliteten hos den kolloidala strukturen. Ju lägre värde på CI desto stabilare kolloidal struktur anses bitumen inneha eftersom bitumen då har tillräckliga mängder aromater och hartser som med deras lösningsförmåga ser till att det inte bildas stora föreningar av asfaltener (Read & Whiteoak, 2003). Om värdet på CI är lågt ser strukturen ut som på den övre av bilderna i Figur 2-4, SOL-bitumen och om värdet är högt på CI ser strukturen (Gel-typen) ut som på den nedre bilden i Figur 2-4.



**Figur 2-4: Schematisk bild som beskriver bitumens struktur beroende på förhållandet mellan asfaltener och hartser och aromater (Read & Whiteoak, 2003)**

Avsikten med att beskriva bitumen i strukturella modeller är att försöka upprätta ett samband mellan den kemiska sammansättningen och de fysikaliska egenskaperna i bitumen.

### 2.3.3 Bitumens fysiska egenskaper

De fysikaliska egenskaperna hos ett bitumen är komplexa och för att beskriva dess egenskaper över ett stort spektrum krävs normalt ett stort antal tester. För att undvika detta har man genom historien använt sig av huvudsakligen två tester för att klassificera bitumen, penetrationstest och mjukpunktstest (Kula & Ring). Dessa två test ska tillsammans tillhandahålla en indikation av bitumens konsistens (hårdhet) utan att vidare karakterisera andra egenskaper (Airey, 2009).

Bitumen är ett termoelastiskt material vilket innebär att material har olika egenskaper vid varierande temperaturer. Det är denna egenskap som har gjort att bitumen kan användas i vägbeläggningar i nästan alla delar av världen. Bitumens fysiska egenskaper kan också beskrivas med hjälp av viskositet, som definieras som det interna motståndet mot flöde. Bitumens viskositet beror i hög grad på temperaturen. När bitumen värms upp minskar dess viskositet och bitumen blir mer lättflytande och kan lättare vidhäfta med andra material som stenaggregat vid asfaltbeläggning. När bitumen svalnar övergår materialet från att vara visköst till att vara viskoelastiskt, eftersom sammanhållningen mellan molekylerna förstärks vid avsvälning. Vid låga temperaturer blir bitumen hårt och sprött. Materialet blir också hårt och sprött i kontakt med syre som en följd av att det oxiderar. När bitumens flexibilitet minskar utvecklas lättare termiska sprickor, tvärgående sprickor på asfaltsbeläggningen, till följd av asfaltsbeläggningen inte kan motstå belastningen från miljön. Dessa sprickor kan självlåka vid höga temperaturer då materialet återfår sina flytande egenskaper (Read & Whiteoak, 2003).

Bitumens konsistens påverkar hanterbarheten. Vid bearbetning och utläggning av bitumen finns det därför optimala viskositetsnivåer för de olika processerna i vägbyggnad som är blandning, utläggning och packning (Read & Whiteoak, 2003). I Tabell 2-3 redovisas viskositetsnivåerna för respektive moment vid utläggning av asfaltmassan. Tabellen visar att vid blandning måste bitumen vara lättflytande och ha låg viskositet och när beläggningen ska packas ska bitumen vara mer trögflytande.

Tabell 2-3: Viskositetsnivåer för olika moment vid utläggning av asfalt (Tyllgren, 2013b)

Moment	Viskositet [mPa·s]
Blandning	200
Utläggning	1000
Packning	5000

Vilken temperatur som bitumen behöver värmas upp till för att få lättflytande egenskaper beror på kvaliteten hos bitumen. Denna temperatur kan sänkas med tillsatser av vaxer, som möjliggör att asfaltmassorna kan läggas ut vid en lägre temperatur. Eftersom höga temperaturer påverkar både avdunstning och oxidation av bitumen, kan bindemedlet förstöras vid allt för höga temperaturer, därför är det av fördel att kunna sänka temperaturen vid blandning av bitumen och stenaggregat (Tyllgren, 2013a).

### 2.3.4 Användningsområde

Bitumen används som bindemedel i asfaltbeläggningar och blandas ihop med stenaggregat för att bilda en asfaltbeläggning. När asfaltmassan ska läggas ut och packas värms bitumen upp så att det lättare vidhäftar mot stenaggregatet för att sedan fortsätta behålla sin goda vidhäftningsförmåga även vid avsvälning. Vidhäftningen mellan stenaggregaten har stor betydelse för beläggningens livslängd. Bitumen har även bra motstånd mot vatten då de inte löser sig och kan anses vara vattentätt. Förutom dessa goda egenskaper motstår bitumen angrepp från kemikalier och klimatförändringar, vilket har lett till dess stora användning i asfaltbeläggningar (Agardh & Parhamifar, 2012). Asfaltbeläggningens huvudsakliga funktion är att sprida lasten över de obundna lagren, där bitumen ger asfaltblandningen styvhet och bärförmåga.

Vid val av bitumen tas hänsyn till klimat, underlag och den trafikbelastning som råder på den sträckan asfaltbeläggningen ska läggas. Vid val av bitumensort sker oftast en avvägning mellan att ha ett mjukt bitumen som bättre motstår termiska sprickor eller ett styvare bitumen som bättre motstår spårbildning. Styvare bitumen används på vägar med stora belastningar då det är mer trögflytande än ett mjukt bitumen, vilket medför att det krävs mer kraft för att tränga bort bindemedlet från stenyrtorna. I områden med kallt klimat är det lämpligt att använda ett mjukare bitumen då risken annars är stor för att termiska sprickor uppkommer. I ett varmare klimat används ett styvare bitumen då det bättre motstår att vägbeläggningen deformeras eller blöder till följd av värmens verkan (Agardh & Parhamifar, 2012).

### 2.3.5 Alternativa förnygringsmedel

Bitumen förhårdnas först under tillverkning av asfaltmassan och därefter under tiden det ligger ute på vägen till följd av yttre påverkningar. För att bitumen ska kunna återvinnas behöver det återfå egenskaperna som det hade i början av sin dimensioneringstid. Ett mer populärt uttryck för denna process är att förnygra bitumen, vilket kan göras på olika sätt. Ett sätt är att blanda in mjukare bitumen i förväntan att det mjuka bitumen ska mjuka upp det hårda bitumen i returafalten så att asfalten blir smidig och läggbar igen. Idag finns det inga bevis för att det sker. Om tillsatserna av returafalten är små i storleksordningen, 5-10 %, är denna process fullt lämpad för sitt syfte. Utläggarna upplever en annan konsistens av massan när returafalt blandas i på detta sätt vilket leder till att asfaltmassan kan behöva övertempereras, för att det ska vara möjligt att handskas med massan. Konsekvensen av övertemperering är att beläggningens livslängd förkortas, att arbetsmiljön försämras för utläggarna och miljön tar skada till följd av ökat utsläpp av emissioner (Tyllgren, 2013a).

Varje bitumensort har unik sammansättning och när bitumen från olika råoljekällor blandas kan det förekomma problem med stabiliteten. I en studie gjord av Karlsson (2002) redovisas att stabiliteten hos blandningarna är beroende av andelen bindemedel som blandas in och bitumens kompatibilitet, som betyder ämnens samhörighet och molekylär stabilitet. Det observerades under denna studie att komponenterna från de olika källorna har tendens till att separera, även efter en längre tid. Detta kan enligt Karlsson (2002) bero på att andelen inkompatibla bindemedel ökar med tiden i takt med att de polära komponenterna som är svårslösliga i en opolär vätska ökar. Följden av denna utveckling är att delar av beläggningen som tidigare varit stabil kan mjukas upp.

Ett alternativ till inblandning av mjukare bitumen är att sätta till uppmjukande olja till returafalten. Denna teknik är gammal men tillsatsmedlen var förr inte miljövänliga eftersom de innehöll aromatiska kolväten och slutade därför användas. På senare år har högraffinerade petroleumoljor, som kan jämföras med naturolja, blivit tillgängliga på marknaden och gett denna teknik möjligheten till omstart (Tyllgren, 2010). Enligt Karlsson (2002) definieras två olika varianter av förnygringsolja:

- Mjukgörare som ska ersätta den reologiska funktion som maltenerna uppfyller, dock återställer inte denna föryngningsolja de kemiska komponenterna.
- Återställare av bitumens kemiska sammansättning. Denna föryngningsolja som egentligen borde heta mjukgörare, för tillbaka de ursprungliga maltenkomponenterna genom att sätta till ett mjukare bitumen, vilket är det enda sättet för att återställa bitumens kemiska sammansättning. Dessa ämnen accepteras inte idag av miljöskäl.

I tester som gjordes år 2010 konstaterades att fördelarna med föryngrad returafalt genom föryngningsolja jämfört med att sätta till mjukare bitumen är att asfalten liknar mer nytillverkad massa ur hanteringssynpunkt och att massan inte behöver övertempereras. Dessutom får returafalt med föryngningsoljor bättre utmattningsförmåga jämfört med nytillverkad asfalt (Tyllgren, 2010).

### 2.3.6 Modifierade bitumen

På senare år har belastningen på vägarna ökat successivt i form av mer trafik samt större andel tung trafik. För att vägarna ska vara funktionella under hela sin livslängd krävs det att konstruktionen har förmåga att kunna motstå (Nynas, 2013):

- Permanent deformation
- Åldring, utmattning och nötning
- Lågtemperatursprickor
- Vattenkänslighet

Utöver dessa krav som ställs på konstruktionen ställs det också krav på bitumen, för det första måste bitumen vara tillräckligt visköst vid temperaturer för bearbetning och utläggning av asfaltmassor, 150-165 grader. För det andra ska bitumen vara tillräckligt styvt vid högsta temperatur (cirka 60°C) på asfaltbeläggningen för att motstå spårbildning och slutligen måste det vara tillräckligt mjukt i låga temperaturer (ner till -20°C) för att motstå att termiska sprickor bildas. Det är svårt att erhålla ett bitumen som klarar av samtliga krav, därför har det blivit vanligare på senare tid att använda vaxmodifierade bitumen och polymermodifierade bitumen (PMB) (Read & Whiteoak, 2003).

#### 2.3.6.1 Polymermodifierat bitumen

Genom att använda ett lämpligt PMB kan man förbättra prestandan på vägarna. Syftet med tillsättning av PMB är att förbättra funktionen och öka livslängden.

Polymera material kan tillsättas i bitumen för att modifiera bitumen och kallas för PMB, polymermodifierade bitumen. Genom att tillsätta polymerer kan asfaltbeläggningsars funktionella egenskaper ändras där val av polymerer görs efter vilken funktionell egenskap som man önskar att ändra. Genom ersättning av penetrationsklassat (konventionellt) bindemedel med PMB går det enligt Trafikverket (2011) att:

- *”Öka andelen elastisk deformation vid höga temperaturer med avsikt att förbättra beläggningslagrets stabilitet*
- *Öka andelen viskös deformation vid låga temperaturer med avsikt att undvika lågtemperatursprickor*
- *Öka elasticiteten hos bindemedlet med avsikt att ge en följsam beläggning i samband med rörelser i vägkonstruktionen*
- *Minska risken för fukt- eller kemikalierelaterade skador”*

### 2.3.6.2 Vaxmodifierat bitumen

Vax är ett tillsatsmedel som kan modifiera bitumens egenskaper så att utläggning av asfalt sker vid lägre temperaturer. En av vaxprodukterna är Sasobit. Vaxet består av längre kedjor av kolväten än bitumen, vilket ger andra fysiska egenskaper med en smältpunkt för Sasobit mellan 85-115°C (Sasol, 2004).

Vid temperaturer över smältpunkten har vaxmodifierat bitumen betydligt lägre viskositet än konventionell bitumen, vilket medför att temperaturen för blandning och utläggning av asfalt sänks med 10-30°C. En sänkning av utläggningstemperaturen ger lägre värmekostnader och minskade utsläpp av CO<sub>2</sub>. Enligt Sasol (2004) kan temperaturen vid blandning och utläggning sänkas med upp till 50°C vid användning av vaxmodifierat bitumen istället för konventionellt bitumen.

Sasobit är lösligt med bitumen i temperaturer över 115°C och är dessutom stabil under lagring i höga temperaturer och visar ingen tendens till fassetparation. I temperaturer under smältpunkten kristalliseras vaxet i en gitter struktur som har till följd att styvheten ökar i bindemedlet (Sasol, 2004).

I Tabell 2-4, som är resultat av tester från Sasol (2004), syns att i bindemedlets brytpunkt har tillsatser av vaxet ingen signifikant verkan på beläggningslagrets tvärgående sprickor.

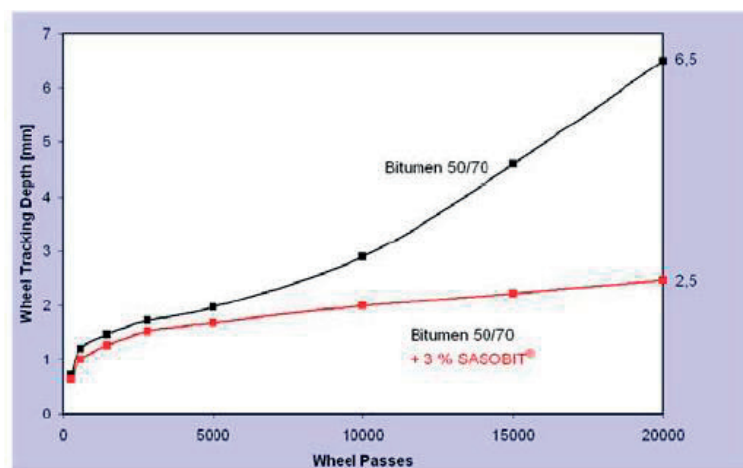
Tabell 2-4: Resultat av Sasobit (Sasol, 2004)

	<b>B 50/70</b>	<b>SmB 35</b>	<b>B70/100</b>	<b>SmB 45</b>
<b>Basbitumen</b>		50/70		70/100
<b>Andel bitumen (%)</b>	100	97	100	97
<b>Andel Sasobit (%)</b>	-	3	-	3
<b>Mjukpunkt (°C)</b>	48-54	75-85	43-49	70-80
<b>Penetration vid 25°C</b>	50-70	30-50	70-100	35-55
<b>Fraas brytpunkt (°C, max)</b>	-8	-8	-10	-10

Genom utvärdering av användandet av vaxmodifierat bitumen har Sasol (2004) kommit fram till att ur ekonomisk och effektivitetssynpunkt ska andelen vax i blandningen vara 3 %. Sasobit kan också kombineras med polymermodifierat bitumen som är elastiskt. Denna kombination som ger synergieffekter är fördelaktig när beläggningar med styvt bitumen eftersöks. Föreningen av vax och polymer förbättrar också stabiliteten under höga temperaturer.

I en undersökningar gjord av Sasol (2004) har man visat att Sasobit modifierad asfalt visar ett ökat motstånd mot permanent deformation (Figur 2-5). Enligt Read & Whiteoak (2003) ökar motståndet mot permanent deformation då styvheten ökar i temperaturer under smältpunkten.





Figur 2-5: Illustrerar skillnaden i spårdjup mellan en traditionell beläggning med bitumen 50/70 och beläggning med bitumen 50/70 + 3 % Sasobit (Sasol, 2004)

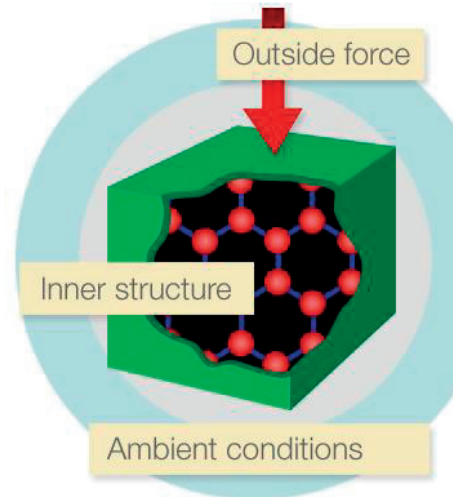
## 2.4 Reologi

Att studera de reologiska egenskaperna innebär att flöde och permanent deformation utvärderas för ett material vars egenskaper är temperatur- och frekvensberoende, så som bitumen. Därför är det lämpligt att studera bitumens reologiska egenskaper för att senare kunna stämma av dessa egenskaper med de vägtekniska egenskaperna. De grundläggande reologiska egenskaperna av bitumen mäts normalt med hjälp av en Dynamisk Skjuvreometer (DSR). För ökad förståelse av hur DSR fungerar i allmänhet och tillvägagångssättet för mätningarna i synnerhet krävs det grundläggande kunskaper inom reologi. Därför följer nedan en kort presentation om reologi som ska upplysa den läsare som inte är förtrogen med ämnet.

Ordet reologi kommer från grekiskans rhe'os (flöde, ström) och logia (läran) och är vetenskapen om vätskors flödesbeteende samt fasta materials deformationsegenskaper (Mezger, 2011). Reologi beskriver förhållandet mellan spänning och töjning hos olika material som till exempel asfalt, färger, plast- och gummimaterial. Storheter som används inom reologin är viskositet, elasticitet och plasticitet (NE, 2013).

Ett material som belastas av en utomstående kraft kommer att reagera och uppvisa en viss deformation och flödesbeteende. Hur materialet reagerar beror på tre huvudsakliga faktorer, se Figur 2-6 (Anton Paar, 2008):

- Materialets inre struktur, hur materialet är uppbyggt.
- Den yttre kraft som påverkar materialet.
- Omgivande faktorer, främst temperaturen.



Figur 2-6: De tre huvudsakliga faktorerna som påverkar ett material (Anton Paar, 2008)

### 2.4.1 Viskositet

En vätskas inre friktion, även kallat viskositet betecknar hur trögflytande en vätska är i rörelse. Ju mindre motstånd en vätska gör när den strömmar desto lägre är viskositeten, till exempel har vatten lägre viskositet än olja (Jönsson, 2007). Viskositeten beskriver sambandet mellan ett materials skjuvspänning och skjuvhastighet enligt ekvation (2-1) och har enheten Pascalsekunder (Pa·s) (Mezger, 2011). Tidigare användes enheten centipoise (cP), motsvarande 1000 mPa·s.

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \text{ [Pa} \cdot \text{s]} \quad (2-1)$$

$\eta$  dynamisk viskositet [Pa·s]  
 $\tau$  skjuvspänning [Pa]  
 $\dot{\gamma}$  skjuvhastighet [ $\text{s}^{-1}$ ]

Det finns två sätt att mäta viskositet, den precis beskrivna, även kallad dynamisk viskositet samt kinematisk viskositet. Kinematisk viskositet beräknas enligt ekvation (2-2) och testerna utförs med en kapillärviskosimeter där man mäter den tid det tar för en vätska att rinna genom en kapillär vid en given temperatur (Read & Whiteoak, 2003).

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \text{ [m}^2/\text{s]} \quad (2-2)$$

$\nu$  kinematisk viskositet [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]  
 $\rho$  densitet [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

### 2.4.2 Elasticitet

Elastiska material kan bli belastade av en kraft och bli uttöjda för att sedan återgå till sin ursprungliga form när belastningen tas bort. Inom det område där materialet kan återgå är förhållandet mellan spänning och töjning konstant, vilket kallas det linjärelastiska området. Exempel på detta är en fjäder som belastas med en tyngd och töjs ut för att sedan återgå när tyngden tas bort. Blir belastningen för stor bryts dock materialets inre struktur och därmed

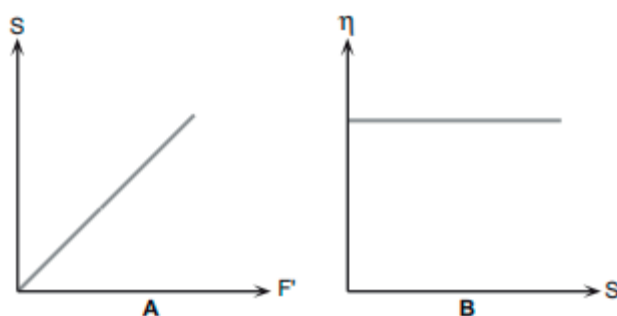
försvinner också materialets förmåga att återgå till sin ursprungliga form, materialet antingen plasticeras eller går till brott (Mezger, 2011).

### 2.4.3 Viskoelasticitet

Viskoelastiska material visar alltid både visköst och elastiskt beteende samtidigt. De flesta material är viskoelastiska. Beroende om materialet är till störst del visköst eller elastiskt kallas det antingen viskoelastisk vätska eller viskoelastisk fast material (Mezger, 2011). När en viskoelastisk vätska belastas flyter den, vilket innebär att dess form ändras. Den del av vätskan som är elastisk vill dock behålla sin ursprungliga form och det är detta som ger en viskoelastisk vätska styvhet. För ett viskoelastiskt fast material som belastas av en viss kraft ändras materialets inre struktur beroende på hur stor del av materialet som är visköst. Beteendet benämns av forskare som komplext flödesbeteende (Anton Paar, 2008).

### 2.4.4 Newtonsk och icke newtonsk vätska

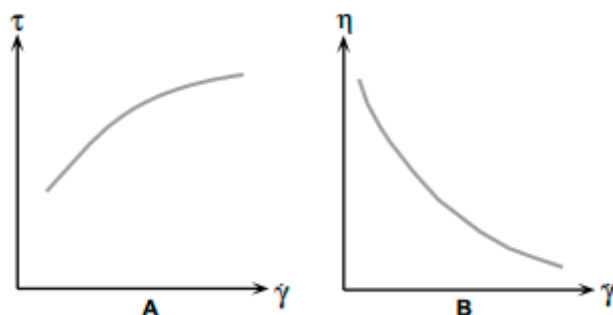
En idealisk vätska, även kallad en newtonsk vätska (efter Isaac Newton) kommer att vid en given temperatur, oberoende av skjuvhastigheten ha samma viskositet. Detta innebär att förhållandet mellan skjuvspänningen och skjuvhastigheten är konstant. Figur 2-7 visar sambandet mellan skjuvspänning ( $F'$ ) och skjuvhastighet ( $S$ ) samt viskositet ( $\eta$ ) och skjuvhastighet ( $S$ ) (Brookfield). Exempel på newtonska vätskor är vatten och flytande rent bitumen vid tillräckligt höga temperaturer ( $>60^\circ$ ) (Mezger, 2011).



**Figur 2-7: Vänstra figuren visar sambandet mellan skjuvspänning ( $F'$ ) och skjuvhastighet ( $S$ ). Den högra figuren visar sambandet mellan viskositet ( $\eta$ ) och skjuvhastighet ( $S$ ). Figurerna visar sambandet för en newtonsk vätska (Brookfield)**

I en icke newtonsk vätska är inte förhållandet mellan skjuvspänning och skjuvhastighet konstant, vilket innebär att viskositeten kommer att variera vid förändrad skjuvhastighet. Figur 2-8 visar ett exempel på hur skjuvspänningen samt viskositeten kan förändras med skjuvhastigheten. Exempel på icke newtonska vätskor är målarfärg och tomatketchup (Brookfield).



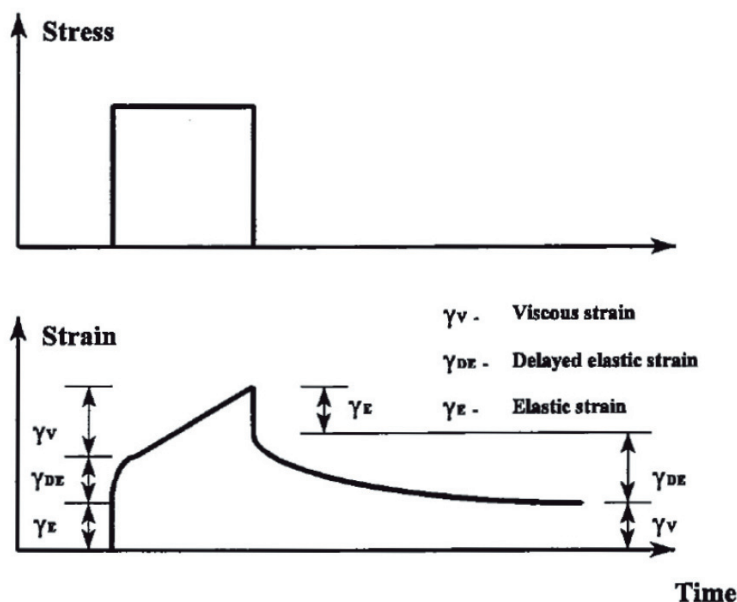


Figur 2-8: Förhållande mellan skjuvspänning och skjuvhastighet (vänstra figuren) samt viskositet och skjuvhastighet (högra figuren). Figurerna visar sambandet för en icke newtonsk vätska (Brookfield)

#### 2.4.5 Bitumen som ett viskoelastiskt material

Bitumen är ett viskoelastiskt material vars reologiska egenskaper varierar beroende på temperatur och den tid som materialet belastas. De elastiska egenskaperna dominerar vid låga temperaturer och/eller under korta belastningstider. Vid höga temperaturer och/eller under långa belastningstider beter sig bitumen som en vätska med flödesegenskaper som newtonska vätskor. Den tid som en vägbeläggning normalt belastas av trafiken och det temperaturspann som råder på en vägbeläggning är vanligtvis det område där bitumen uppvisar viskoelastiska egenskaper (Dukatz & Andersson, 1980).

Ett sätt att illustrera det viskoelastiska beteendet hos bitumen visas i Figur 2-9. Deformationen (töjningen) hos bitumen som belastas kan delas in i tre kategorier, beroende på dess respons: elastisk-, fördröjd elastisk- och viskös respons. Efter avlastning återgår den elastiska deformationen fullständigt medan den viskösa deformationen kvarstår. Det finns även fördröjd elastisk deformation, också kallad krypning, som uppstår om lasten får verka under lång tid (Burström, 2007).



Figur 2-9: Viskoelastiskt uppträdande vid kryptest (Airey, 1997)

Den viskösa delen återgår inte till sin ursprungliga struktur efter avlastning, vilket den elastiska och fördröjda elastiska delen gör. Både formen och storleken på kurvan i Figur

2-9 ändrar utseende beroende på belastningstiden och temperaturen. Vid längre belastning och högre temperaturer dominerar den viskösa och fördröjda elastiska deformation hos bitumen. Figur 2-9 visar ett kryptest med en icke linjär respons som är svårt att karaktärisera i laboratorium och modeller. Av denna anledning begränsas modeller inom det linjärviskoelastiska området (LVE-området). För att säkerställa att man förblir inom LVE-området så bestäms området genom ett så kallat amplitudsvep (Anderson, et al., 1994).

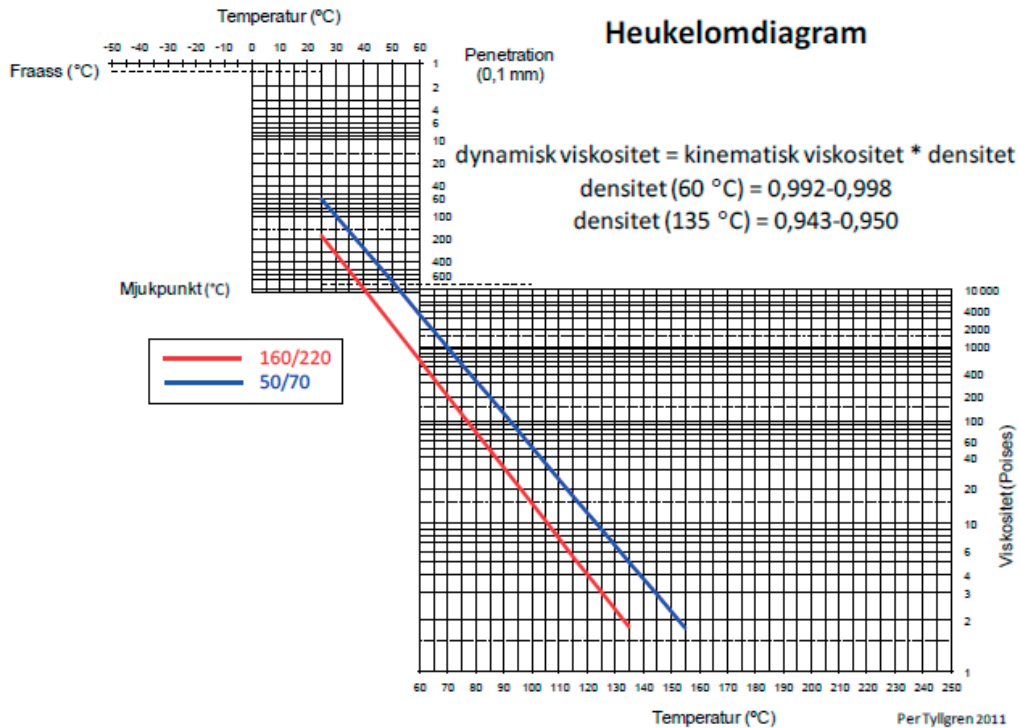
#### 2.4.6 Heukelomdiagrammet

1969 och 1973 presenterade Willem Heukelom ett system som beskriver hur bitumens viskositet varierar beroende på temperatur. Detta system som går under namnet BTDC, Bitumen Test Data Chart, är en produkt av resultat uppmätta från olika tester av viskositet, penetration, mjukpunkt och Fraas brytpunkt (ett test vid låg temperatur när en tunn bitumenhinna spricker under töjning). Resultaten från de fyra testerna sammanställs i ett diagram, kallat Heukelomdiagram.

Heukelomdiagrammet består av en horisontell skala för temperatur och två vertikala skalor, den nedersta är för viskositet och den översta är för penetration. Skalan för temperatur är linjär, skalan för penetration är logaritmisk medan skalan för viskositet följer en särskild formel så att de uppmätta värdena från de olika testerna bildar en rät linje över de båda diagrammen. Diagrammet gäller för penetrationsbitumen som beskrivs av den räta linjen. Mjukt bitumen placeras lägre än styvt bitumen, vilket kan ses i Figur 2-10 där B160/220 hamnar under B50/70. Modifierat bitumen har karakteristiska avvikelser från linjen.

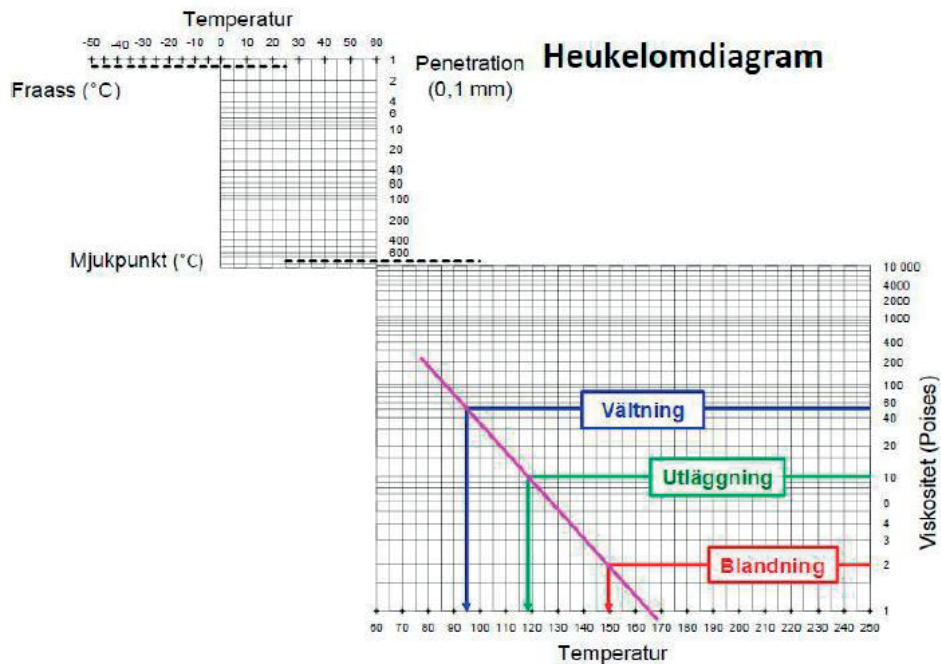
Det är möjligt att både interpolera och extrapolera längs med linjen med en bra precision efter att exempelvis infört mätvärden från penetrationstest och mjukpunkt (Read & Whiteoak, 2003).

Enligt Heukelom (1973) kan mjukpunkten för ett bitumen bestämmas när viskositeten är 1 300 000 cP (1,3 kPa·s)



Figur 2-10: Heukelomdiagram med värden för 50/70 och 160/220 (bearbetad av Tyllgren, 2011)

I Tabell 2-3 presenterades optimala viskositetsnivåer för de olika processerna: blandning (200 cP), utläggning (1000 cP) och packning (5000 cP). Inom Heukelomdiagrammet går det att förutsäga hur temperatur och viskositet förhåller sig till varandra, detta leder till att det går att tydliggöra vid vilka temperaturer bitumen behöver värmas upp till för de olika stegen i processen för asfalttillverkning och utläggning, se Figur 2-11.



Figur 2-11: Optimala viskositetsnivåer för olika steg vid utläggningsprocessen (bearbetad av Tyllgren, 2013b)

## 2.5 Europeisk klassificering av bitumen

Kvalitetsbestämning av bitumen för vägändamål har länge gjorts med grundläggande mätningar av praktiska skäl med särskilt utformade mätmetoder på styvheten med hjälp av penetrationstest och ett mjukpunktstest med Kula & Ring. De senare har stämts av mot empiriska erfarenheter och har fungerat bra tills bitumen började modifieras med tillsatser av annat ursprung än petroleumolja. En viktig skillnad har varit att tillsatserna har en smältpunkt, vilket inte bitumen har. Detta har minskat användbarheten av de förenklade och empiriskt avstämda metoderna. De reologiska grundparametrarna har i det fallet större möjlighet att förutsäga vägtekniska egenskaper och därmed lotsa utvecklingen framåt med större träffsäkerhet (Tyllgren, 2013a).

### 2.5.1 Empiriska tester

I den europeiska klassificeringen av bitumen används följande testmetoder:

1. Penetration EN 1426
2. Mjukpunkt EN 1427
3. Viskositet EN 12595
4. Brytpunkt EN 12593
5. RTOFT EN 12607-1
6. Flampunkt EN 22592
7. Löslighet EN 12592

Nedan följer en kortare beskrivning av hur de fyra första mätmetoderna utförs och vad som är avsikten att mäta. Punkt 5 beskrivs senare i arbetet (2.8.1) medan punkterna 6 och 7 inte beskrivs då dessa inte berörs ytterligare i det här examensarbetet (Nordtest, 2002).

#### 2.5.1.1 Penetrationstest

Penetrationstestet kan indirekt ses som en metod att mäta viskositet på bitumen vid 25°C, men avsikten är att klassificera bitumen med avseende på dess styvhet. I penetrationstestet låter man en nål med vikten 100 gram sjunka in i ett materialprov under 5 sekunder. Penetrationen definieras som det avstånd som nålen sjunker ner i provet. Avståndet uttrycks i penetrationstalet och anges i tiondels millimeter 1/10 mm eller decimillimeter (dmm). Kvaliteten på bindemedlet anges oftast som ett intervall, till exempel 70/100 betyder att penetrationstalet varierar mellan 70 och 100 dmm. Ju mjukare bitumen är desto högre är penetrationstalet. Generellt gäller det att bitumen med ett penetrationstal under 30 dmm anses vara ett hårt bitumen och bitumen med penetrationstal över 100 dmm anses vara ett mjukt bitumen (Airey, 2009). Figur 2-12 visar testapparat för genomförandet av penetrationstest.



Figur 2-12: Visar en testapparat för penetrationstal (Read & Whiteoak, 2003)

### 2.5.1.2 Mjukpunktstest

Eftersom bitumen inte har någon smältpunkt används istället mjukpunkten för att karakterisera övergång från viskoelastiskt till viskös respons. För att mäta mjukpunkten används mest Kula & Ring- metoden (Figur 2-13). Mjukpunkten definieras som den temperatur vid vilken en stålkula sjunker igenom ett bindemedelskikt, som är ingjuten i en ring. Metoden i stora drag går ut på att man placerar en stålkula på en bitumenfylld mässingsring och som värms upp av ett vattenbad tills kulan sjunker igenom. Temperaturen vid vilken detta händelseförlopp sker rapporteras och benämns som mjukpunkt.



Figur 2-13: Mjukpunktstest med Kula & Ringmetoden

För varje bitumensort anges mjukpunkten i ett intervall (Read & Whiteoak, 2003). Tabell 2-5 visar penetrationstal och mjukpunkt för de vanligaste bitumenkvaliteterna.

Tabell 2-5: Penetration och mjukpunkt för fyra bitumenkvaliteter (Read & Whiteoak, 2003)

Benämning	Kvalitet			
	50/70	70/100	100/150	160/220
Penetration vid 25 (dmm)	50-70	70-100	100-150	160-220
Mjukpunkt (°C)	46-54	43-51	39-47	35-43

### 2.5.1.3 Viskositetstest

Viskositet är ett mått på strömningsmotståndet hos en vätska och definieras som förhållandet mellan skjuvspänningen och skjuvhastigheten som anges i enheten (Pa·s). Genom att känna till strömningsmotståndet i bitumen går det att bestämma hur materialet kommer att uppföra sig vid en given temperatur och över ett temperaturområde. Viskositet kan mätas på olika sätt men det test som för närvarande anses vara det mest praktiska är rotationsviskosimeter (Rotationsviskosimeter, Brookfield, RVB.). Med hjälp av Brookfields rotationsviskosimeter (Figur 2-14) är det möjligt att mäta över ett brett temperaturspann, ända ner till mjukpunkten, som inträffar vid 1 300 000 mPa·s (Airey, 2009).

Genomförandet av mätningarna med RVB börjar först med att bitumen värms upp till över dess mjukpunkt, därefter hålls cirka 10 gram flytande bitumen (varierar beroende på spindelstorleken) upp i speciella behållare som är utformade för viskosimetern. Följande utrustning krävs för mätning:

- Rotationsviskosimeter
- Thermosel, för uppvärmning av bitumenprov
- Spindel
- Bitumenhållare
- Styr dator

I den bitumenfyllda behållaren roterar en spindel. Vridmomentet på den roterande cylindern används för att mäta det relativa motståndet mot rotation av bitumen vid en viss temperatur och skjuvhastighet (Airey, 2009).

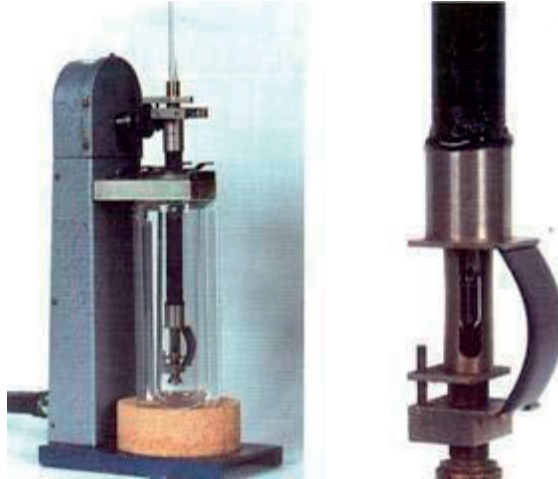




**Figur 2-14: Rotationsviskosimeter**

#### 2.5.1.4 Fraas brytpunktstest

Fraas är ett test av empirisk karaktär för att mäta bitumens lågtemperaturegenskaper och erhålla en uppskattning av vid vilken temperatur som bitumen kan spricka. I testet (se Figur 2-15) böjs ett bleck vid minskande temperatur tills bitumenfilmen spricker. Den temperatur vid vilken provet spricker benämns för Fraas brytpunkt.



**Figur 2-15: Fraas brytpunktstest (Read & Whiteoak, 2003)**

Bindemedlets brytpunkt motsvarar den temperatur där tvärgående temperatursprickor bildas från beläggningens ovansida. Lågtemperatursprickor bildas från beläggningens undersida. PMB anses förbättra lågtemperaturegenskaperna (Read & Whiteoak, 2003).

## 2.6 Amerikansk klassificering av bitumen

Testmetoder som används i den nuvarande europeiska specifikationen är av empirisk karaktär till skillnad mot den amerikanska klassificeringen där krav ställs på de tekniska egenskaperna som kan erhållas vid mätning med DSR tack vare att bitumen kan mätas vid kontrollerad hastighet och temperatur. Så länge man håller sig till rent bitumen kan säljaren definiera produkten som köparen förväntar sig, men vid PMB räcker inte klassificering av bitumen genom penetrationstal och mjukpunkt, då polymermodifierat bitumen ställer högre krav på mätmetoder än de traditionella (Nordtest, 2002).

Klassificering av bitumen är under förändring och syftet med den nya specifikationen är att säkerställa att bitumen klarar av de påfrestningarna som kommer från trafiken och miljön på den aktuella platsen. En utveckling där krav ställs på att klassificera bitumen efter deras tekniska egenskaper, som i den amerikanska klassificeringen, skulle underlätta för samtliga parter i anläggningsbranschen (Yusoff, 2012).

### 2.6.1 Superpave

Asfaltsbeläggningar är inte lätta att känneteckna med tekniska egenskaper då beläggningen utsätts för påfrestningar från både miljö och laster, som varierar mellan platser. Då det inte går att känneteckna modifierat bitumen med hjälp av empiriska egenskaper så undersökte

Amerikanska Strategic Highway Research Program (SHRP) i ett forskningsprojekt som de kallade för Superpave (Superior Performing Pavements), alla aspekter av de fysiska testerna som gjordes på bitumen. Projektet var i full gång mellan åren 1987 och 1993 och målet med projektet var att ta fram en ny metod för klassificering av bitumen, som på ett tydligare sätt kunde beskriva hur bindemedlet uppför sig i en vägbeläggning (Nordtest, 2002). Resultatet av testerna var att nya metoder behövdes för klassificering av bitumen, som skulle ersätta de dåvarande metoderna, penetrationsmätning vid 25° C och viskositetsmätning >60° C. De två mätmetoderna beskriver endast bitumen vid medelhöga och höga temperaturer vilket inte ger information om hur bitumen kommer att reagera vid lägre temperaturer (McGennis et al., 1994).

För att mäta bitumens fysikaliska egenskaper med Superpave behövs fem olika mätutrustningar (McGennis et al., 1994):

1. Dynamisk Skjuvreometer (DSR), mäter bitumens viskoelastiska egenskaper.
2. Bending Beam Rheometer (BBR), mäter bitumens styvhet vid låga temperaturer.
3. Direct Tension Test (DTT), mäter bitumens draghållfasthet vid låga temperaturer.
4. Rolling Thin Film Oven Test (RTFOT) simulerar bindemedlets härdning vid blandning och utläggning.
5. Pressure Ageing Vessel Test (PAV) simulera bindemedlets långtidsåldring.

Dessa fem metoder, som beskrivs mer utförligt senare i arbetet, ska tillsammans kunna simulera vilken påverkan åldring och påfrestning som kommer från miljön och belastningar har på vägbeläggningen.

Superpave benämner mellan vilka temperaturer bindemedlet har de önskvärda egenskaperna istället för att ange konsistensen på bindemedlet vid en viss temperatur. De fem olika mätmetoderna resulterar i PG-gradering som är unik för varje bitumen. PG64-22 är en benämning på ett bitumen som visar upp de efterfrågade egenskaperna för temperaturer mellan 64°C och -22°C. I detta exempel står 64°C för vilken temperatur som beläggningen kan motstå spårbildning under de i genomsnitt 7 varmaste dagarna. -22°C står för vid vilken temperatur i luften som det uppstår termiska sprickor på beläggningen. Fördelen med att gradera beläggningen i temperaturer är att det är en enhet som det är enkelt att förhålla sig till.

I samband med Superpaveprojektet påbörjades även undersökningar av bitumens reologiska egenskaper med hjälp av DSR. DSR beskriver hur bitumens egenskaper varierar med temperatur och frekvens. DSR erbjuder också bra indikation på spårdeformation under varmt klimat.

Ett av målen med den nya specifikationen är att kunna fokusera på de olika klimatförhållandena på den plats där bitumen ska användas. Vid en jämförelse mellan uppmätta värden av DSR och skadeutvecklingen från verkligheten har man kunnat hitta samband och gränsvärden för olika parametrar. Parametrar finns för klimatiskt område och typ av beläggning, som är väsentliga i valet av bitumen (Nordtest, 2002).

Mätningar med DSR vid Superpave utförs med en konstant frekvens på 10 rad/s (1,59 Hz) och ett temperaturspann mellan 10 och 100°C. Dimensionerande temperaturer tas fram för spårbildning i nylagd, senare spårbildning samt utmattningssprickor i beläggningen. Simulering av effekten för senare spårbildning sker efter RTFOT och simuleringen för utmattningssprickor sker efter RTFOT och PAV. Beräkningen utförs genom att antingen ta kvoten eller produkten mellan  $G^*$  och  $\sin(\delta)$  och jämföra med empiriskt valda riktvärden (Tyllgren, 2010). Valet av dimensionerande temperatur för södra Sverige togs fram av Tyllgren (2010) med Varberg som utgångspunkt, se Tabell 2-6.



Tabell 2-6: Beräkningar och kravparametrar för bestämning av dimensionerande temperatur samt temperatur gällande södra Sverige.

Mätmetod:	DSR		
Kontrollparametrar vid 10 rad/s (kPa)	$G^*/\sin(\delta) \geq 1,0$	$G^*/\sin(\delta) \geq 2,2$	$G^*\sin(\delta) \leq 5000$
Föreskriven behandling	-	RTFOT	RTFOT + PAV
Kontrollsyfte	Spårbildning i nylagt	Senare spårbildning	Utmattningssprickor
Dimensionerande temp. i södra Sverige (°C)	$\geq 52$		$\leq 19$

## 2.7 Dynamisk Skjuvreometer (DSR)

Dynamisk Skjuvreometer (DSR) används för att bestämma elastiska, viskoelastiska och viskösa egenskaper hos olika material, däribland bitumen, vid olika temperaturer och frekvenser (Yusoff, 2012).

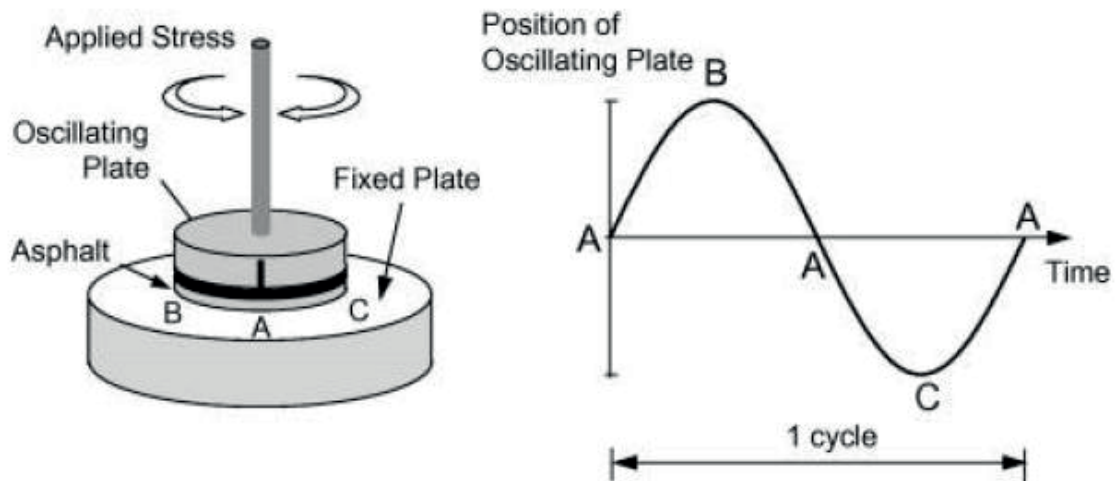
Mätningar med DSR kan utföras antingen med kontrollerad skjuvspänning eller med kontrollerad skjuvtöjning. Vid mätningar med kontrollerad skjuvspänning appliceras ett bestämt vridmoment och den resulterande rotationen mäts. Ur detta kan skjuvtöjningen beräknas. När skjuvtöjningen är kontrollerad anges storleken på spindelns rotation (amplituden) och det vridmoment som behövs för att uppnå den inställda rotationen mäts. Skjuvspänningen beräknas utifrån det uppmätta vridmomentet (Yusoff, 2012).

Med DSR går det att mäta ett materials egenskaper både genom rotation och genom oscillation.

### 2.7.1 Oscillation

Oscillationstester används till undersökningar för alla typer av viskoelastiska material, från lågviskösa vätskor till styva fasta material (Mezger, 2011). Den oscillerade rörelsen gör att materialens inre struktur bibehålls, till skillnad mot en roterande rörelse (Anton Paar, 2008).

Oscillation är en rörelse som går fram och tillbaka i en periodisk rörelse, se Figur 2-16. Starten sker i punkt A, för att sedan gå ut till punkt B, tillbaka till punkt A sedan till punkt C, innan rörelsen avslutas i punkt A. När dessa steg utförts har mätningen gått det som kallas en period och uttrycks i sekunder (s) (Read & Whiteoak, 2003).



Figur 2-16: Oscillerande rörelse (Airey, 1997)

Perioden i sin tur är uppbyggd av två delar, amplitud och frekvens. Amplituden är en vinkel ( $\phi$ ), enklare uttryckt längden på den oscillerande rörelsen och kan ses ovanifrån i Figur 2-17. Enheten som oftast används för amplituden är radianer (rad).



Figur 2-17: Oscillerande rörelse, sedd ovanifrån (Mezger, 2011)

Frekvensen, den andra delen av perioden är ett mått på hur många oscillerande rörelser som sker under ett givet tidsintervall. Enheten för frekvens anges i radianer per sekund (rad/s) eller i Hertz (Hz). Omvandlingen mellan rad/s och Hertz ses i ekvation (2-3).

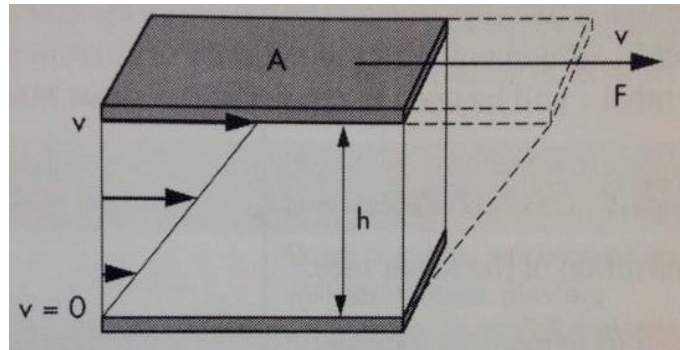
$$\omega = 2\pi \cdot f \leftrightarrow f = \frac{\omega}{2\pi} \quad (2-3)$$

$\omega$  vinkelfrekvensen [rad/s]

f frekvensen [Hz]

### 2.7.2 Skjuvspänning och skjuvtöjning

För att bestämma de fundamentala reologiska egenskaperna för ett material används tvåplattsmodellen. Den består av två plattor med ett avstånd  $h$  mellan varandra. Den undre plattan är fast ( $v=0$  m/s) medan den övre plattan med hjälp utav en kraft  $F$  sätts i rörelse och därigenom kan den resulterande hastigheten  $v$  beräknas (Mezger, 2011).



Figur 2-18: Two-platesmodellen (Mezger, 2011)

Skjuvspänning beräknas enligt ekvation (2-4) och är skjuvkraft per ytenhet.

$$\tau = \frac{F}{A} \text{ [Pa]} \quad (2-4)$$

$\tau$  skjuvspänning [Pa]  
 $F$  skjuvkraft [N]  
 $A$  area [ $\text{m}^2$ ]

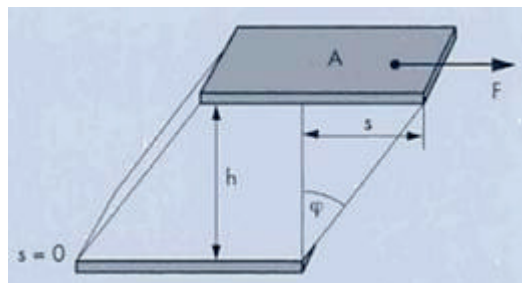
Skjuvhastighet beräknas enligt ekvation (2-5) och är en hastighetsgradient med avseende på hastighet och avstånd mellan de två plattorna (Brookfield) (Mezger, 2011).

$$\dot{\gamma} = \frac{v}{h} \text{ [s}^{-1}\text{]} \quad (2-5)$$

$\dot{\gamma}$  skjuvhastighet  
 $v$  hastighet [m/s]  
 $h$  höjd [m]

Skjuvtöjningen beräknas enligt ekvation (2-6) och är ett mått på sambandet mellan den oscillerande plattans förskjutning i längsled och höjden på provmaterialet, vilket illustreras i Figur 2-19.

$$\gamma = \frac{s}{h} \left[ \frac{\text{m}}{\text{m}} \right] = \% \quad (2-6)$$



Figur 2-19: Platta A förskjuts i längsled med kraften F. Skjuvtöjningen bestäms med avseende på hur lång förskjutningen (s) är i förhållande till höjden (h) (Mezger, 2011)

### 2.7.3 $G^*$ , $G'$ , $G''$ och fasvinkeln $\delta$

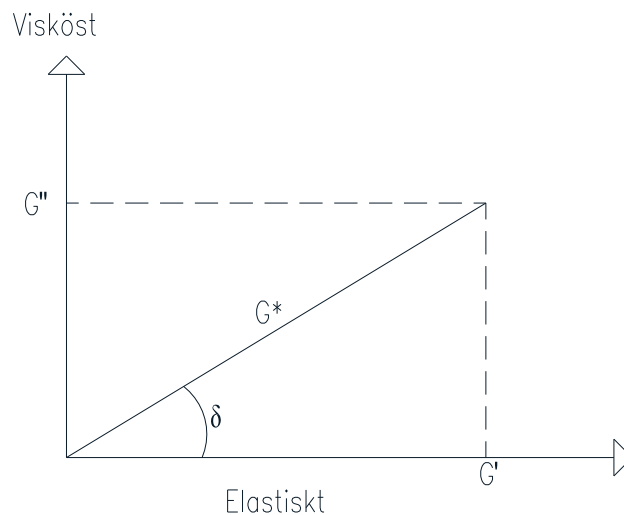
Den komplexa skjuvmodulen,  $G^*$  är förhållandet mellan skjuvspänningen och skjuvtöjningen enligt ekvation (2-7). Ett materials komplexa skjuvmodul ökar ju starkare dess inre struktur är.

$$G^* = \frac{\tau}{\gamma} = \frac{\text{Pa}}{\%} \quad [\text{Pa}] \quad (2-7)$$

Lagringsmodulen  $G'$  beskriver hur stor del av materialets energi som lagras vid varje oscillation.  $G'$  kan även kallas den elastiska modulen eller den elastiska komponenten av den komplexa modulen  $G^*$ . Den andra komponenten av  $G^*$  är den viskösa delen av materialet, även kallad förlustmodulen  $G''$  (Yusoff, 2012). Storleken på  $G^*$  kan beräknas med information om  $G'$  och  $G''$  enligt ekvation (2-8).

$$|G^*| = \sqrt{G'^2 + G''^2} \quad (2-8)$$

Fasvinkeln  $\delta$  (Figur 2-20) beskriver förhållandet mellan de viskösa delarna ( $G''$ ) och elastiska delarna ( $G'$ ) i ett material. För idealiskt elastiska material är  $\delta=0^\circ$ , för idealiskt viskösa vätskor är  $\delta=90^\circ$  och för viskoelastiska material är  $0^\circ < \delta < 90^\circ$  (Mezger, 2011). Ekvation (2-9) visar hur fasvinkeln  $\delta$  beräknas.



Figur 2-20: Förhållandet mellan  $G'$ ,  $G''$ ,  $G^*$  och fasvinkeln  $\delta$

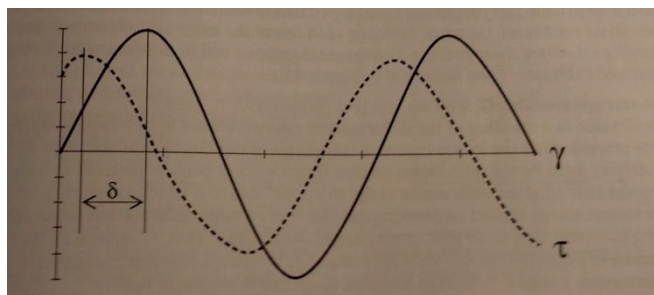
$$\delta = \tan^{-1} \left( \frac{G''}{G'} \right) \quad (2-9)$$

$\delta < 45^\circ$ , materialet är mer elastiskt än visköst.

$\delta = 45^\circ$ , materialet innehåller lika stor del viskösa delar som elastiska delar.

$\delta > 45^\circ$ , materialet är mer visköst än elastiskt.

Fasvinkeln kan även beskrivas med sinuskurvor där storleken på vinkeln är skillnaden mellan den förinställda och uppmätta kurvan. Figur 2-21 visar två sinuskurvor där den streckade kurvan är responsen till den heldragna kurvan och skillnaden mellan deras extremvärden är fasvinkeln  $\delta$  (Mezger, 2011).



**Figur 2-21: Den streckade kurvan visar responsen från den inställda heldragna kurvan, där  $\delta$  är förskjutningen mellan kurvorna (Mezger, 2011)**

I en DSR utrustning placeras en bitumenkropp mellan två cirkulära metallplattor, där den undre plattan är fast och den övre plattan roterar kring sin egen axel, denna rörelse skapar skjvutöjning. DSR mäter fasvinkeln genom att registrera responsen vid den oscillerande rörelsen i förhållande till den inställda frekvensen.

#### 2.7.4 Komplex viskositet

Komplex viskositet,  $\eta^*$ , beräknas enligt ekvation (2-10) och kan jämföras med viskositet som tas fram genom rotationstester. Om materialets elastiska del dominerar över den viskösa delen ( $G' > G''$ ) finns det ingen praktisk nytta att använda komplex viskositet utan då bör materialet i det intervall  $G' > G''$  beskrivas med  $G^*$  eller fasvinkeln  $\delta$ . Det motsatta gäller också när  $G'' > G'$ ; det finns ingen anledning att tala om  $G^*$  och fasvinkel i det viskösa stadiet (Mezger, 2011).

$$\eta^* = \frac{G^*}{\omega} [\text{Pa} \cdot \text{s}] \quad (2-10)$$

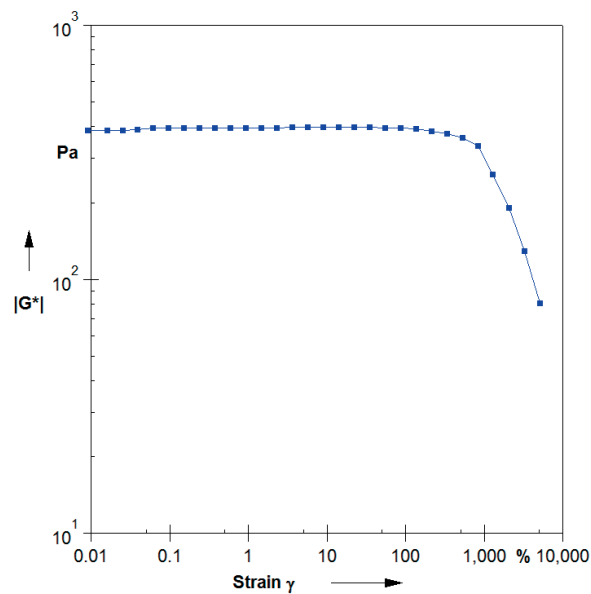
$\eta^*$	komplex viskositet [Pa·s]
$G^*$	komplex modul [Pa]
$\omega$	vinkelfrekvens [rad/s]

Då  $G^*$  består av lagringsmodulen  $G'$  och förlustmodulen  $G''$  kan den komplexa viskositeten delas upp i  $\eta'$  och  $\eta''$  genom att dividera  $G'$  respektive  $G''$  med vinkelfrekvensen  $\omega$  (Yusoff, 2012).

#### 2.7.5 Linjärviskoelastiskt område

Inom det linjärviskoelastiska området (LVE-området) är  $G^*$  och  $\delta$  konstanta vilket innebär att Hookes lag kan användas och materialet uppvisar en konstant styvhet. När materialet är utanför LVE-området bryts dess inre struktur och materialet deformeras.

LVE-området är definierat vid den punkt där  $G^*$  har minskat till 95 % av sitt ursprungliga värde. Är inte LVE-området för ett material känt måste mätningar utföras för att bestämma LVE-området. Vid bestämning av LVE-området görs mätningar vid konstant temperatur och frekvens med en varierande amplitud för att bestämma vid vilken töjning materialets inre struktur bryts. Figur 2-22 visar ett exempel på ett utförd amplitudsvep där  $G^*$  är konstant fram tills en töjning på ungefär 200 %. För att vara säker på att mätningar som utförs är inom LVE-området bör töjningen bestämmas till 10 % av den töjning när  $G^*$  minskat till 95 % av sitt ursprungliga värde. I Figur 2-22 där LVE-området slutar vid 200 % bör således töjningen 20 % användas vid vidare mätningar (Yusoff, 2012).



Figur 2-22: Exempel på amplitudsvep,  $G^*$  på y-axeln och töjningen på x-axeln

## 2.8 Åldring av bitumen

Bitumen bör vara mjukt och flexibelt för att kunna motstå påfrestningar från trafiken och klimatet, men dessa egenskaper ändras med tiden då bitumen påverkas av syre, UV-strålning och temperaturändringar. Detta fenomen kallas åldring och förändrar bitumens kemiska sammansättning. Åldrandet förknippas med att andelen flyktiga komponenter i bindemedlet (hartser) minskar, vilket medför att bitumens reologiska och kemiska egenskaper förändras. Åldring kan delas in i två delar, korttidsåldring och långtidsåldring. Med korttidsåldring menas den oxidation som sker i samband med blandning och utläggning av asfalt, då dessa moment sker under höga temperaturer. Med långtidsåldring menas oxidation som sker på asfaltbeläggningen under dimensioneringstiden. Båda typerna av åldring ökar bitumens viskositet (ökar styvheten) vilket i sin tur leder till att asfaltmassans styvhet ökar (Yusoff, 2012). Åldring vid en lagom nivå kan accepteras då det gör att asfaltmassans styvhet ökar, vilket ger konstruktionen en ökad styrka. Vid ökad styvhet minskar dock asfaltens flexibilitet och när åldringen gått för långt och styvheten blivit för hög försämras vidhäftningen mellan bitumen och stenmaterial kraftig vilket leder till försämrade förmåga hos asfalten att stå emot sprickbildning under återkommande belastning (Airey, 2009). Således är spårbildning ett problem i början av vägens livslängd och termiska och utmattningssprickor är ett problem som uppkommer i slutet av vägens livslängd.

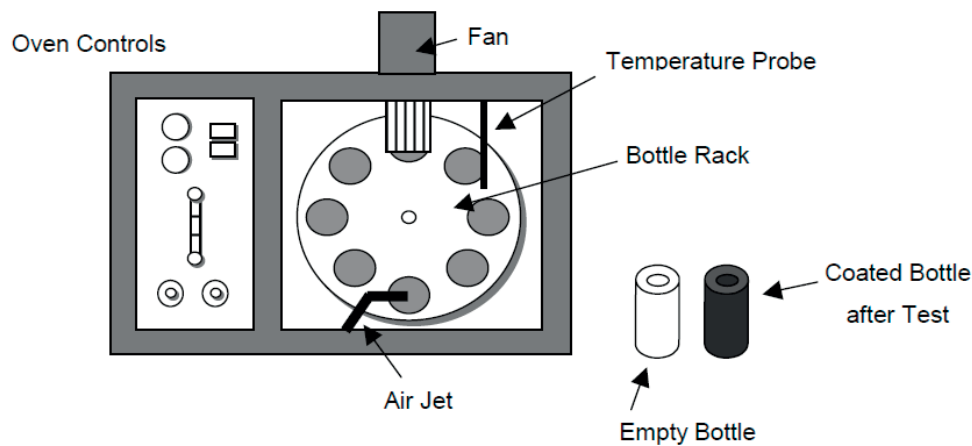
Test som är relaterade till åldring av bitumen kan delas in i två kategorier, RTFOT ett test som ska simulera kortsiktig härdning i samband med blandning och utläggning samt PAV-test som ska simulera den långsiktiga härdningen som sker ute på vägen.

### 2.8.1 RTFOT

Egenskaperna hos ett bindemedel ändras snabbt vid förhöjda temperaturer. Korttidsåldring med Rolling thin film test (RTFOT) genomförs för att simulera i stora drag det som händer med bitumen från blandning till två år efter utläggningen av asfaltmassan.

RTFOT utförs vid 163°C under 75 minuter. Testet består av prover av bitumen som hålls upp i specialdesignade flaskor. Flaskorna placeras i ett roterande rack. En gång under varje

rotation öppnas flaskorna för att en luftstråle skall kunna rensa de ackumulerade ångorna från flaskan och utsätta bitumen för extra luft som ska intensifiera den åldrande effekten. Figur 2-23 visar en schematisk bild på hur RTFOT-test utförs. Det som är kvar av provet från detta försök testas därefter för effekterna av åldrande (Yusoff, 2012).



Figur 2-23: Schematisk bild över RTFOT- test (Yusoff, 2012)

### 2.8.2 PAV-test

Bitumens egenskaper ändras gradvis under sin livslängd och för att simulera långtidsåldringen, grovt uppskattat 7 år och framåt, används Pressure ageing vessel test (PAV). Efter att bitumen har åldrats i RTFOT, åldras det i ett PAV-test. Det åldrade provet på 50 gram bitumen placeras i en kastrull i ett tryckkärl. Testet utförs under ett tryck på 2,1 MPa, under 20 timmar med temperaturerna 90°C, 100°C samt 110°C. Temperaturen kan varieras beroende på vilket klimat som bindemedlet ska användas i (Harrigan et al., 1994 ). Det bitumen som återstår efter åldring med PAV testas senare i en DSR respektive BBR. DSR-test används för att utvärdera bindemedlets förmåga att motstå spårbildning och kan ske på vanligt bindemedel, RFTOT behandlat bindemedel och PAV behandlat bindemedel för att undersöka hur bindemedlet motstår utmattningssprickor under hela sin livslängd (Nordtest, 2002).

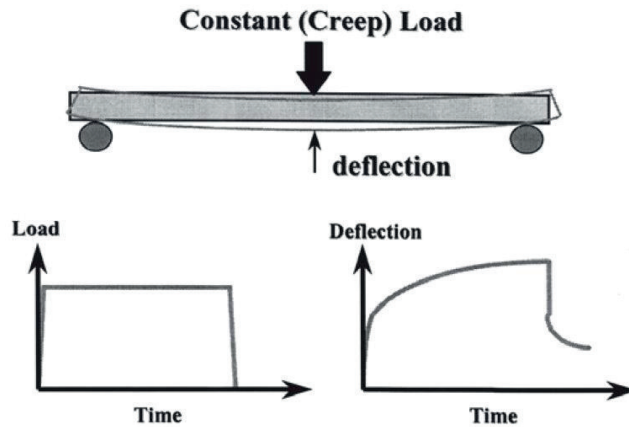
## 2.9 Mätning av bitumens lågtemperaturegenskaper

Bitumen behöver vara mjukt för att kunna motstå termiska sprickor och därför används tester, BBR (Bending Beam Rheometer) och DTT (Direct Tension Test) för att undersöka bitumens lågtemperaturegenskaper.

Polymerer anses tillföra goda lastfördelande egenskaper och motverka sprickbildning trots höga styvhetsvärden. Om polymermodifierat bitumen uppvisar höga styvhetsvärden som skulle underkännas om det vore ett vanligt bitumen utförs också mätning med DTT för klassificering av bitumen. I DTT belastas ett benliknande provexemplar tills det spricker (Nordtest, 2002).

BBR mäter lågtemperaturegenskaper och används i Superpave. Det är en balk av bitumen som böjs vid minskande temperatur tills det går av. I testet belastas en prismatisk bitumenbalk med måtten 125x12,5x6,25 mm i dess mittpunkt, se schematisk illustration i Figur 2-24.

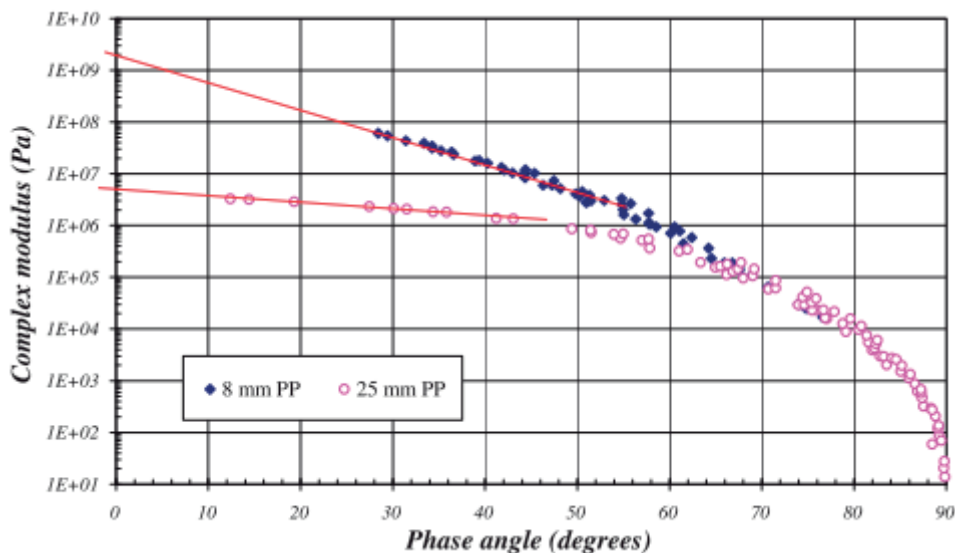




Figur 2-24: Bending Beam Rheometer (Rowe et al., 2011)

## 2.10 Glaspunkten

Enligt Airey (1997) sammanfaller modellkurvor för olika bitumensorter vid låga temperaturer och höga frekvenser till en övre gräns för styvheten, som kallas för glaspunkten,  $G_g$ . Styvheten för glaspunkten är cirka  $10^9$  Pa och är den maximala styvheten som bitumen kan anta. Vid denna punkt är rörelsen mellan molekylerna mycket begränsad och kan ur den synvinkeln jämföras med fryspunkt för andra material. Fasvinkeln vid denna temperatur är  $0^\circ$ , materialet är fullständigt elastiskt. Inblandning av polymer i bitumen uppvisar samma beteende som ett styvt material, därför är den maximala styvheten lika för alla bitumensorter (Mezger, 2011). Det är svårt att ta fram  $G_g$  experimentellt eftersom bitumen blir mycket sprött vid låga temperaturer. I frånvaro av data vid låga temperaturer används blackdiagram för att ta fram glaspunkten, där extrapolering sker till y-axeln från mätdata. Airey (1997) gjorde experiment där han extrapolerade mätdata till y-axeln. Både 8 mm och 25 mm plattan från mätningar med DSR användes, se Figur 2-25.

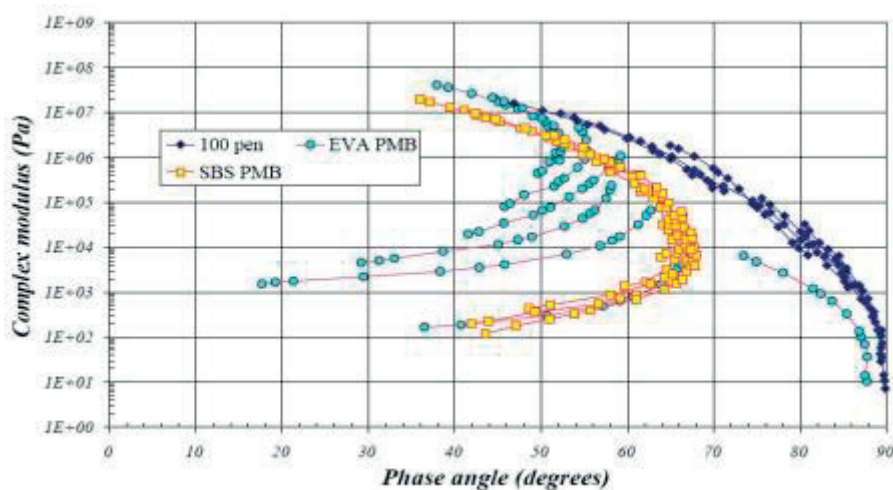


Figur 2-25: Visar hur fryspunkten kan väljas utifrån mätdata som fås fram genom DSR-mätningar för spindlar och plattor med storleken 8mm respektive 25mm (Airey, 1997)

Extrapolering av mätdata från 25 mm plattan visar att den övre gränsen för styvheten är cirka  $5 \times 10^6$  Pa, vilket är betydligt lägre än glaspunkten och därmed en indikation på att mätdata från 25 mm plattan för låga temperaturer inte är tillförlitliga. Genom att extrapolera från mätdata som kommer från 8 mm, sammanfaller det övre gränsvärdet nästan med glaspunkten vilket indikerar att mätdata från 8 mm är tillförlitligt. Temperaturspannet vid frekvenssvop är mycket brett och därför behövs båda mätplattorna för tillförlitliga mätningar. Med hjälp av blackdiagram går det att ta fram vid vilken temperatur mätdata för de olika spindlarna ska överlappas. I Figur 2-25 överlappas mätningarna vid  $5 \times 10^5$  Pa som motsvarar temperaturen 35 °C och hög frekvens (Airey, 1997).

## 2.11 Blackdiagram

Frekvenssvop kan redovisas i ett blackdiagram, vilket beskriver sambandet mellan storleken på den komplexa skjuvmodulen  $G^*$  och fasvinkeln  $\delta$  (Eurobitume, 1996). För rent penetrationsbitumen orienteras linjerna i parabelliknande form tills fasvinkeln kommit fram till 90°, där den sedan avtar lodrät neråt eftersom bitumen vid 90° är en vätska och förlorar sin styvhet. En välformad kurva kan ses som en bekräftelse på att man har mätt rätt när det handlar om rent bitumen eller om återvunnet bitumen. Om bitumen modifieras med polymer, vax eller något annat ämne som har en smältpunkt, orienterar sig linjerna i tabellen på ett annat sätt beroende på ämnets reologiska karaktär. Typisk form för polymermodifierat bitumen är att den vid en bestämd fasvinkel bryter den parabelliknande formen och börjar istället vinkla inåt, dvs. att styvheten minskar trots att materialet övergår till att vara mer elastiskt, se Figur 2-26 (Yusoff, 2012).



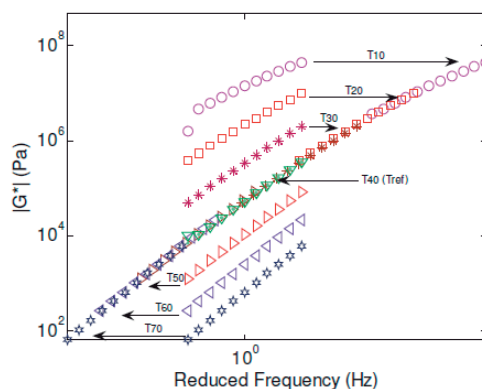
Figur 2-26: Visar penetrationsbitumen parabelliknande form och modifierad bitumens karaktäristiska form i ett blackdiagram, där X-axeln visar fasvinkeln mellan 0-90 ° och Y-axeln visar styvhetsmodulen i Pa (Airey, 1997)

## 2.12 Masterkurva

Bitumen är ett viskoelastiskt material som är beroende av belastningstiden och temperaturen. Flödet för ett bitumen under 1 timme vid 60°C kan till exempel vara lika med flödet för samma bitumen under 10 timmar vid 25°C. Det innebär att tiden och temperaturen är beroende av varandra vid mätningar av flödesegenskaperna i ett bindemedel. Därmed kan ett bindemedel vid hög temperatur som belastas under en kort tid ha samma flöde som ett bindemedel vid låg temperatur men med längre belastningstid. Detta kallas även tid-temperatur superposition (Asphalt Institute, 2007).

Den komplexa skjuvmodulen,  $G^*$ , kan mätas över ett brett temperaturspann. Undersökningar gjorda av skilda forskare har visat att det finns ett samband mellan temperatur och frekvens eller närmare bestämt ett samband mellan temperatur och tid för belastning av ett provmaterial. Genom användning av skiftfaktorer går det att passa in temperaturer i en sammanhängande kurva för varierande frekvens, där kurvan är till stor användning vid lägre frekvenser där mätinstrumenten kan ha svårt att mäta. Kurvan, som kallas för masterkurva, beskriver bitumens egenskaper för en viss temperatur över ett brett frekvensområde, där principen för att rita kurvan går ut på att en viss temperatur omvärderas till motsvarande frekvens. En annan fördel med masterkurvan är det finns möjlighet att jämföra resultat mellan olika laboratorier som använder sig av olika inställningar på temperatur och frekvens (Yusoff, 2012).

Masterkurvor är ett bra redskap för att minimera antalet mätserier, då det är möjligt att approximera mätdata till en funktion, där styvhet och fasvinkel kan ges för valfria värden på temperatur och frekvens. För att göra en masterkurva behövs ett antal frekvenssvep vid olika temperaturer som sedan ställs samman till en kurva. Sammanställningen görs genom att de olika kurvorna flyttas antingen åt vänster eller åt höger i förhållande till en referenstemperatur (Mezger, 2011). Figur 2-27 visar en masterkurva med referenstemperaturen 40°C, där temperaturerna 10, 20 samt 30°C flyttas horisontellt till höger och temperaturerna 50, 60 samt 70°C flyttas horisontellt till vänster.



Figur 2-27: Masterkurva med referenstemperatur 40°C (Yusoff, 2012)

På x-axeln i en masterkurva används en frekvensskala, kallad reducerad frekvens som definieras enligt följande ekvation (2-11).

$$\log f_r = \log f + \log a_T \quad (2-11)$$

$f_r$  reducerad frekvens (Hz)

$f$  frekvens (Hz)

$a_T$  skiftfaktor

### 2.12.1 Williams, Landel och Ferry (WLF) ekvationen

För att bestämma hur mycket de olika kurvorna ska flyttas i horisontalled kan WLF-ekvationen, som namngetts efter skaparna Williams, Landel och Ferry användas. Ekvationen ses i (2-12) och består av tre konstanter,  $C_1$ ,  $C_2$  och  $T_{ref}$ . Referenstemperaturen  $T_{ref}$  kan väljas till valfri temperatur medan  $C_1$  och  $C_2$  beräknas utifrån den valda referenstemperaturen i samband med en vald matematisk modell.

$$\log a_T = \frac{-C_1(T - T_{ref})}{C_2 + (T - T_{ref})} \quad (2-12)$$

$a_T$	skiftfaktor
$C_1$ och $C_2$	konstanter
$T$	temperatur ( $^{\circ}\text{C}$ )
$T_{ref}$	referenstemperatur ( $^{\circ}\text{C}$ )

Om temperaturen ökar från  $T$  till  $T_{ref}$  minskar viskositeten med faktorn  $a_T$  och frekvensen  $\log a_T$  blir negativ. Vid minskad temperatur jämfört med  $T_{ref}$  blir skiftfaktorn positiv istället (Yusoff, 2012).

### 2.12.2 Sigmoidalmodellen

För att konstruera masterkurvan behövs en matematisk modell. I detta examensarbete används Sigmoidalmodellen enligt ekvation (2-13) tillsammans med WLF-ekvationen för att beräkna masterkurvorna för de olika bitumensorterna. Modellen innehåller fyra stycken konstanter,  $v$  (lägre asymptoten),  $\alpha$  (skillnaden mellan övre och lägre asymptoten),  $\beta$  och  $\gamma$  (definierar formen mellan asymptoterna och läget för inflektionspunkten). Inflektionspunkten är den punkten på en kurva där den övergår från konkav till konvex eller från konvex till konkav.

$$\log|G^*| = v + \frac{\alpha}{\left(1 + e^{(\beta + \gamma(\log(\omega)))}\right)} \quad (2-13)$$

$G^*$	komplex skjuvmodul
$\omega$	reducerad frekvens
$v$	lägre asymptoten
$\alpha$	skillnaden mellan övre och lägre asymptoten
$\beta$ & $\gamma$	anger läget för kurvans inflektionspunkt

Ett alternativ till Sigmoidalmodellen är den generaliserade logistiska Sigmoidalmodellen. Modellen utgår från ekvation (2-13) med skillnaden att ytterligare en parameter ( $\lambda$ ) tillkommer för att möjliggöra att masterkurvan tar en icke symmetrisk form, se ekvation (2-14). I de fall  $\lambda=1$  får masterkurvan gjord med den generaliserade Sigmoidalmodellen samma utseende som Sigmoidalmodellen (Yusoff, 2012).

$$\log|G^*| = v + \frac{\alpha}{\left(1 + \lambda e^{(\beta + \gamma(\log(\omega)))}\right)^{1/\lambda}} \quad (2-14)$$

## 3 Metodbeskrivning

### 3.1 Utförda mätningar

Totalt utfördes mätningar på 22 bitumensorter med DSR och RVB. På fyra bitumensorter gjordes dubbelmätningar med 25 mm plattan där medelvärdet valdes vid sammanställningen av mätningarna. För Kula & Ring genomfördes mätningar på 13 bitumensorter. Översikt av mätningarna finns i Tabell 3-1 där mätningar markerat med \* är jungfruligt bitumen medan \*\* är bitumen behandlat med RTFOT. Till exempel är 1\* och 2\*\* samma bitumenkvalité som senare i resultatdelen jämfördes med varandra. Tabellen visar även vilka mätningar som gjordes på respektive bitumen.

Tabell 3-1: Översikt av utförda mätningar. \* Original, \*\* RTFOT

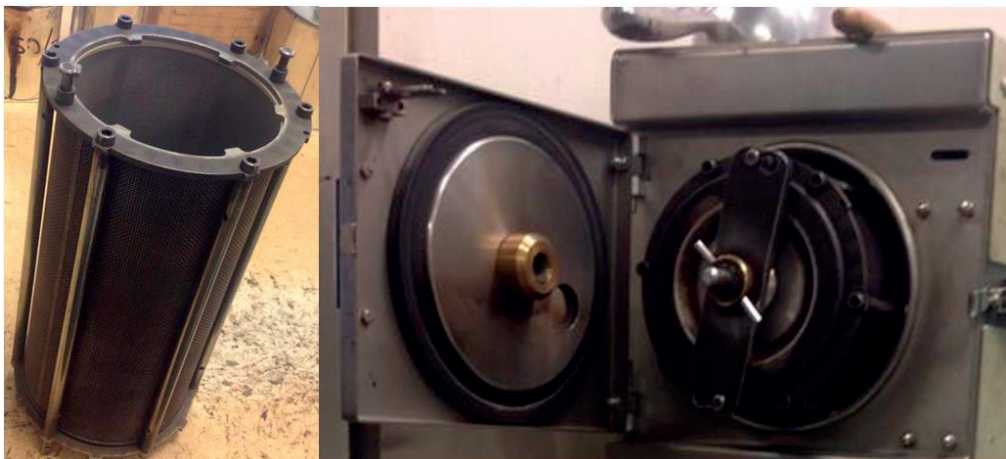
Bitumen nr:	25 mm		8 mm		K & R, penetration	RVB
	Mätning 1	Mätning 2	Mätning 1	Mätning 2		
1*	X	X	X	X	X	X
2**	X		X			X
3	X		X		X	X
4*	X	X	X	X	X	X
5**	X		X			X
6*	X		X		X	X
7**	X		X			X
8	X		X		X	X
9	X		X		X	X
10	X	X	X		X	X
11	X		X		X	X
12	X		X		X	X
13	X		X		X	X
14	X		X		X	X
15	X		X		X	X
16	X		X		X	X
17*	X		X			X
18**	X		X			X
19*	X	X	X			X
20**	X		X			X
21*	X		X			X
22**	X		X			X

## 3.2 Extrahering av bitumen

Personal på Skanska VTC Syd i Fosie har extraherat bindemedlet från de nya asfaltmassorna som tillverkats med olika delar mängd asfaltgranulat samt returbitumen från asfaltgranulatet.

Vid utvinning av bitumen från asfaltmassor behövs ett antal steg genomföras. Beroende på vad bitumen ska användas till behövs olika mängd bindemedel. Ska endast ett mjukpunktstest göras behövs det inte lika mycket bitumen som vid ett penetrationstest. Ungefär 3 kg asfaltmassa behövs för att få tillräckligt med bitumen för att kunna genomföra både mjukpunktstest och penetrationstest. Asfaltmassans innehåll påverkar hur mycket bitumen som går att utvinna per kg massa. Bitumenrika asfaltmassor ger mer bitumen per kg massa än asfaltmassor med mindre procentandel bindemedel.

Utvinningen delas in i två delar, den första där bitumen tvättas ut från asfaltmassan och den andra där bindemedlet separeras från det tillsatta lösningsmedlet. Ungefär 3 kg asfaltmassa stoppas i cylindern till vänster i Figur 3-1. Cylindern består runt om av ett finmaskigt nät med storleken 0,063 mm och stoppas in i trumman till höger i Figur 3-1. När trumman startats sprutas ett lösningsmedel in i trumman för att tvätta ur bindemedlet från asfaltmassan (Hansson, 2014). Vid extraktionerna har lösningsmedlet diklormetan (tidigare benämning metylenklorid) som har en kokpunkt på 40°C använts (FAS, 2002). När bitumen släpper från stenaggregatet rinner det ut genom det finmaskiga nätet medan de olika fraktionerna av stenar stannar kvar. Det som förs vidare i processen förutom bitumen och lösningsmedlet är fillret som även det går igenom nätet.



**Figur 3-1:** Till vänster, cylindern där asfaltmassan läggs i. Till höger, trumman där cylindern stoppas in i

För att separera fillret från bindemedlet och lösningsmedlet centrifugeras det återstående materialet (fillret fastnar i sidorna vid centrifugeringen), vilket sker i 1 i Figur 3-2. Det kvarvarande bindemedlet och lösningsmedlet rinner vidare och tappas sedan ut vid 2 i Figur 3-2.





**Figur 3-2: Separering av filler vid 1 och uttagning av återvunnet bitumen samt diklormetan vid 2**

Det sista steget innan bitumen blivit extraherat är att få bort diklormetan från blandningen. Figur 3-3 visar samtliga steg för extraktionen. Från 1 sugts bitumen och diklormetanen in i behållaren i 2. Behållaren hänger över ett oljebad vars temperatur är cirka 150°C. Då diklormetan har en kokpunkt på 40°C förångas medlet och kvar blir det rena bindemedlet i behållaren. Diklormetanen förångas upp till 3 där det kyls ner av det kalla vatten som strömmar inuti de små rören. Slutligen när diklormetanen kylts ner under sin kokpunkt återtar det vätskeform och hamnar i behållaren i 4 och kan sedan återanvändas till nästa extraktion (Hansson, 2014).



**Figur 3-3: Avdunstning av diklormetan där bitumen som återvunnits samlas i behållaren i 2**



### 3.3 Provförberedelser

Två olika typer av provkroppar med diametern 8 mm respektive 25 mm användes till mätningarna. 8 mm kroppen användes för att göra lågtemperaturmätningarna (30°C – (-) 30°C) medan 25 mm plattan användes vid mätningarna mellan 100°C och 10°C. Vid lågtemperaturmätningar går det inte att använda 25 mm plattan då vridmomentet blir för stort när bitumens styvhet ökar med sjunkande temperatur.

#### 3.3.1 Uppvärmning av bitumen

Innan provkropparna kunde tillverkas värmdes bindemedlet upp till önskad temperatur. Enligt SS-EN 14770-2012 ska bindemedlet värmas upp till 85°C ( $\pm 5^\circ\text{C}$ ) över sin mjukpunkt eller maximalt 180°C. Tabell 3-2 visar en sammanställning av olika bitumensorter och deras förväntade mjukpunkt enligt *TRVKB 10 Bitumenbunda lager* samt den temperatur respektive bindemedel bör värmas upp till. Rekommendationerna från Nordtest (2002) gällande vilken temperatur olika bitumenkvaliteter ska värmas upp till redovisas i Tabell 3-3.

Tabell 3-2: Temperering av bitumen enligt SS-EN 14770-2012 och TRVKB Bitumenbundna lager

Bitumenkvalitet	Mjukpunkt (°C)	Temperatur ugn (°C)
50/70	46-54	131-139
70/100	43-51	128-136
100/150	39-47	124-132
160/220	35-43	120-128

Tabell 3-3. Temperering av bitumen enligt Nordtest (2012)

Bitumenkvalitet	Temperatur i ugn (°C)
Polymermodifierade bitumen	150-170
Bitumen <100	130-150
Bitumen 100-430	115-130

#### 3.3.2 Tillverkning av provkroppar

Sprutor av storleken 2 ml användes för att dosera bindemedlet. För tillverkning av provkroppen till 25 mm plattan vägdes cirka 0,55 gram bitumen upp på silikonplattan i Figur 3-4.



**Figur 3-4: Provkropp till 25 mm platta**

För 8 mm plattan användes en cylinder med ett hål med diametern 8 mm med en skruv i botten för att kunna justera höjden på provkroppen, se Figur 3-5. Höjden som eftersträvats på provkroppen är 2 mm. Undantag gjordes för de bitumenprov som på grund av sin låga mjukpunkt behövde förvaras i frysskåp för att kunna bearbetas.

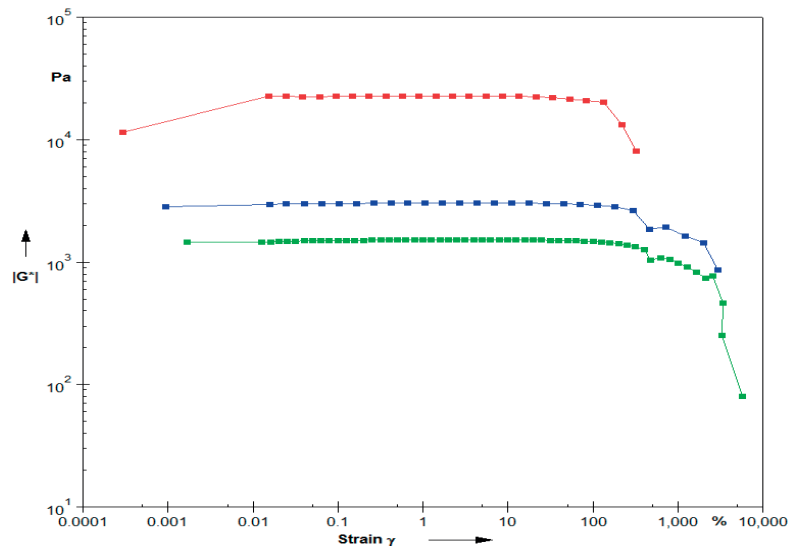


**Figur 3-5: Tillverkning av provkropp för 8 mm platta**

## 3.4 Mätinställningar

### 3.4.1 Amplitudsvep

Amplitudsvep gjordes på en del av bitumensorterna för att jämföra med de värden på töjningar som Nynas AB bistått med och kontrollera att töjningarna höll sig inom LVE-området. Att genomföra svep för samtliga prover var inte möjligt på grund av den tidskrävande process det skulle innebära. Figur 3-6 visar ett amplitudsvep för tre olika bitumensorter som genomfördes. Töjningarna som Nynas AB gav var betydligt lägre än de maximala töjningar som amplitudsvepet visade. Detta resultat ansågs ge en tillräcklig säkerhet för att använda töjningarna givna av Nynas AB.



Figur 3-6: Amplitudsvep vid 30°C och 0,1 rad/s för tre av de testade bitumensorterna

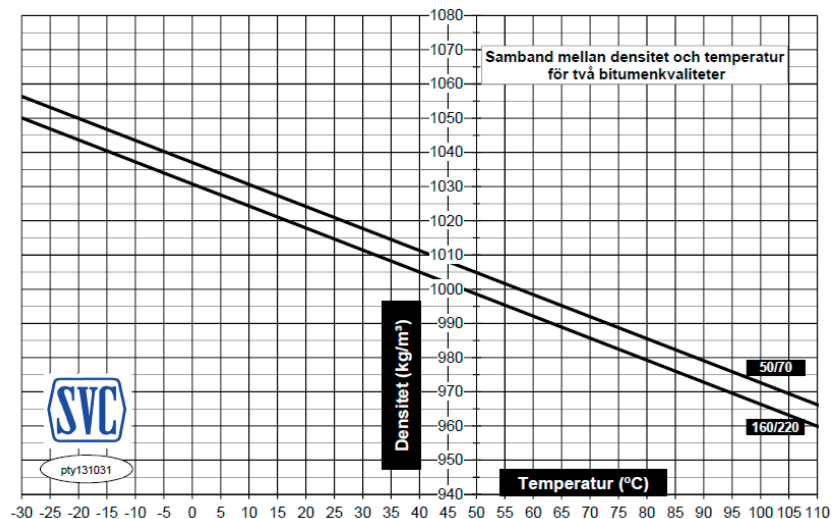
### 3.4.2 Frekvenssvep

För samtliga bindemedel genomfördes två stycken (för en del sorter fler) frekvenssvep, ett med 25 mm platta från 100°C till 10°C, med ett intervall på 10°C samt ett med 8 mm från 30°C till -30°C, även här med ett intervall på 10°C. Genom att välja att gå ner till 10°C med 25 mm plattan och börja på 30°C med 8 mm plattan blev det överlappande värden på temperaturerna 30°C, 20°C och 10°C. Detta gav möjligheten att jämföra 25 mm och 8 mm plattan mot varandra och se om det blev skillnad mellan de olika plattorna vid samma mätinställning.

Frekvensen vid lågtemperaturmätningarna startade på 100 rad/s (15,9 Hz) och slutade på 0,1 rad/s (0,0159 Hz). Försök gjordes att starta mätningarna på 0,1 rad/s men problem uppstod då vid de lägsta temperaturerna (-20°C och -30°C) vid det första mätvärdet. I mätningarna mellan 100°C och 10°C användes båda mätriktningarna, men i största del den omvända riktningen, med start på 0,1 rad/s och slut på 100 rad/s. Anledningen till att mätningar gjordes i olika riktningar var att se om det gav någon påverkan på resultatet.

### 3.4.3 Höjdinställningar

För plattorna på 8 respektive 25 mm finns det rekommenderade inställningar på höjden mellan mätplattorna. Enligt SS-EN 14770:2012 ska höjden mellan mätplattorna vara 2 mm vid mätning med 8 mm platta och 1 mm vid mätning med 25 mm platta. Då densiteten för bitumen ändras med temperaturen (Figur 3-7) behövdes höjden mellan mätplattorna korrigeras under mätningarna. Utgångspunkten vid varje mätning blev att sträva efter att ligga kring en höjd på 2 mm för 8 mm platta och 1 mm för 25 mm platta. Höjderna kom att variera lite beroende på den valda starttemperaturen som påverkas av bitumens hårdhet.



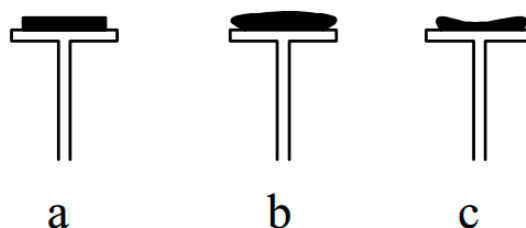
Figur 3-7. Densitet för bitumen 50/70 och 160/220 (Tyllgren, 2013b)

### 3.4.4 Stabiliseringstid

Vid frekvenssvep görs mätningar vid olika temperaturer och innan resultaten kan samlas in på den nya temperaturen behöver bitumen stabilisera sig vid den nya temperaturen. Stabiliseringstiden ökar när temperaturen sjunker. Den valda stabiliseringstiden till mätningarna har tillhandahållits av Nynas AB och varierade mellan 4 och 10 minuter beroende på temperatur. Stabiliseringstiden kan tas fram med hjälp av standarden ASTM D7175-08.

## 3.5 Provutförande

När testet prepareras är det viktigt att bitumen anläggs på hela mätplattans yta. Mätplattorna (undre och övre) värms upp till önskad temperatur för att mjuka upp bindemedlet och möjliggöra testprepareringen. Provkroppen sätts på den övre mätplattan enligt a och b i Figur 3-8. Risken finns för luftbubblor mellan provkroppen och den undre mätplattan om prepareringen ser ut enligt c i Figur 3-8, vilket leder till felaktiga resultat.



Figur 3-8: Anläggning av provkropp, a och b visar hur prepareringen ska se ut. Provkroppen på c illustrerar en anläggning som riskerar luftbubblor mellan provkroppen och den undre mätplattan, vilket leder till felaktiga resultat (Nordtest, 2002)

När provkroppen som fästs på den övre mätplattan sänks ner till önskad höjd och anläggs mot den undre mätplattan kan provet behöva trimmas längs med kanterna för att få provkroppen att se ut som i Figur 3-9. Innan mätningen påbörjas sänks den övre mätplattan ytterligare cirka 0,05 mm för att få en utbuckling på provkroppen för att säkerhetsställa att mätplattorna har fullständig kontakt med bitumen (Nordtest, 2002).



Figur 3-9: Provkropp efter trimning (a) samt efter sänkning till mätthöjd (Nordtest, 2002)

### 3.6 DSR – komponenter

DSR (se Figur 3-10) består av löstagbara komponenter. Det svarta höljet som syns i Figur 3-10 kopplas till ett vattenbad som ger en extern kylning vid mätningar. Till utrustningen finns ett antal löstagbara mätplattor för att möjliggöra mätserier vid olika temperaturer och styvheter. Figur 3-11 visar två olika mätplattor, 8 mm (till vänster) och 25 mm (till höger), med både den övre mätplattan och den undre. Till mätningarna används en övre mätplatta som sätts fast med ett snabbblås för att enkelt kunna ta loss när provkroppen ska appliceras före mätningens start. Det är också den övre mätplattan som utför den oscillerande rörelsen medan den undre mätplattan spänns fast med en skruvnyckel.



Figur 3-10: Dynamisk Skjuvreometer



Figur 3-11: Mätplattor för 8 mm respektive 25 mm

## 4 Resultat

Resultatdelen består först av att visa korrelations sambandet mellan masterkurvor och avlästa värden för att kunna bevisa att masterkurvorna var användbara vid framtagandet av efterfrågade resultat. De framplockade resultaten ur masterkurvorna jämfördes sedan med andra mätmetoder för att säkerhetsställa att mätvärdena var trovärdiga. Jämförelse mellan 8 mm och 25 mm plattan gjordes för de temperaturerna där överlappande mätvärden fanns (10, 20 och 30°C). Slutligen jämfördes utförda mätningar med varandra för att se om de förväntade eller önskade resultaten uppfyllts. I Bilaga 1 finns samtliga uppmätta värden på komplex modul och fasvinkel för 8 mm och 25 mm plattan.

### 4.1 Sammanställning resultat

Värden framtagna för 25 mm plattan från masterkurvan sammanställs i Tabell 4-1 tillsammans med värdena för den dynamiska viskositeten mätt med RVB. Med i tabellen finns även mjukpunkts- och penetrationsvärde för 13 av de testade bitumensorterna. Komplex viskositet vid 1,3 kPa jämförs med uppmätta mjukpunktsvärden från Kula & Ring. Den komplexa viskositeten vid 60°C jämförs med den dynamiska viskositeten vid samma temperatur.

Tabell 4-1: Sammanställning över resultat. Värden från DSR, RVB samt Kula & Ring och penetrationstest

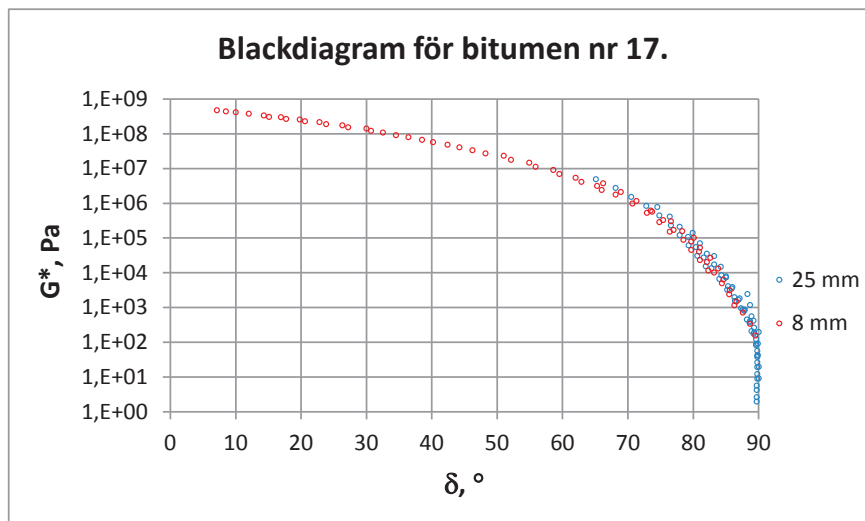
Bitumen nr:	DSR-mätningar				RVB	Standardmetoder		
	G*/sinδ	G*/sinδ	G*/sinδ	Komplex visk.	Dynvisk	K&R	Pen	
	5 MPa	2,2 kPa	1 kPa	1,3 kPa	60 °C			
	°C			°C	Pa·s	Pa·s	°C	mm <sup>-1</sup>
	< 19 <sup>1)</sup>	> 52 <sup>1)</sup>						
1*	13,8	57,0	62,8	45,8	161	156	47,0	79
2**	15,9	62,0	68,1	50,7	311	313	-	-
3	14,9	60,6	66,7	49,3	258	247	49,8	52
4*	12,4	54,1	59,9	43,3	110	92	44,0	113
5**	14,1	57,7	63,6	46,6	166	176	-	-
6*	22,8	78,3	84,9	66,8	3940	3331	66,2	14
7**	22,3	81,1	87,7	69,8	6289	6822	-	-
8	15,4	61,2	67,3	50,0	276	263	50,8	48
9	15,1	62,8	69,0	51,5	348	314	52,2	46
10	17,4	67,7	74,0	56,4	748	693	56,8	32
11	16,0	63,8	69,9	52,5	406	372	53,2	40
12	3,5	42,9	47,6	36,2	22	19	38,4	341
13	15,7	62,2	68,4	50,5	308	310	51,2	49
14	15,7	65,3	71,6	53,9	518	471	53,6	39
15	14,2	63,3	69,6	52,0	390	345	51,4	50
16	13,7	64,2	70,6	53,1	464	411	52,3	45
17*	1,8	43,3	49,1	32,6	27	26	-	-
18**	3,3	48,1	54,0	37,3	50	48	-	-
19*	14,9	61,5	67,6	49,9	296	294	-	-
20**	16,6	67,4	73,7	55,7	679	652	-	-
21*	-4,7	45,3	51,2	32,9	36	30	-	-
22**	1,6	50,4	55,7	41,7	63	62	-	-

\* Original, \*\* RTFOT, <sup>1)</sup> Enligt Superpave

De grönmarkerade rutorna anger temperaturerna för dimensioneringsparametrarna enligt Superpave. Den första kolumnen kontrolleras för utmattningssprickor medan andra och tredje kolumnen kontrolleras med avseende på spårbildning. De blåmarkerade rutorna är värden från bitumensorterna som inte klarade gränsvärdena. De testade bitumenkvaliteterna behandlades inte med PAV, som ska simulera långtidseffekterna, men en sådan behandling skulle öka temperaturerna för  $G \cdot \sin(\delta)$  med cirka 2-3 °C, vilket innebär att de gulmarkerade värdena skulle hamna över gränsvärdet för utmattning (Tyllgren, 2013b). Enligt Tyllgren (2010) visade det sig att kravet för utmattningssprickor är ganska generöst satt, där många bitumenkvaliteter som klarar utmattningskriteriet inte klarar kriteriet för lågtemperatursprickor, som utförs med BBR mätning.

## 4.2 Blackdiagram

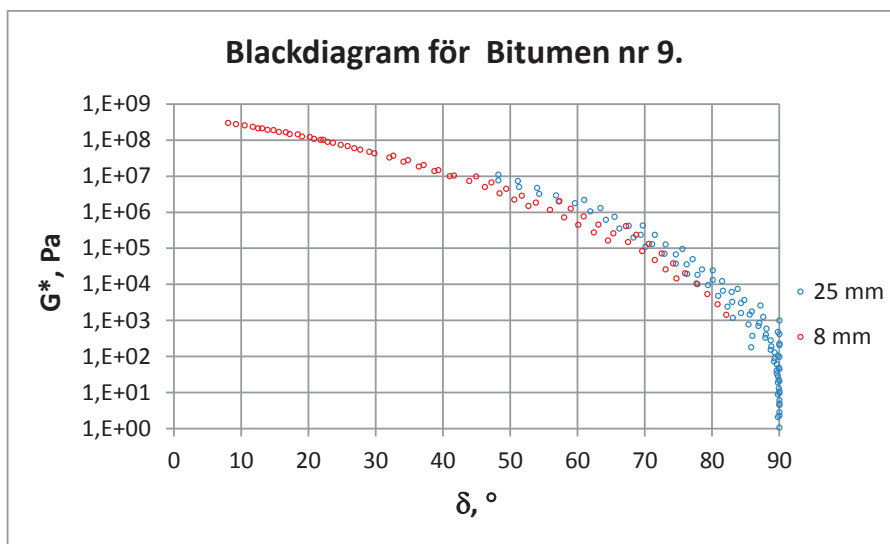
Blackdiagram togs fram för samtliga bitumensorter och finns redovisade i Bilaga 2. I resultatdelen tas tre olika blackdiagram med för att visa på den skillnad som blev vid mätningarna. Figur 4-1 visar blackdiagrammet för bitumen nr. 17 där  $G^*$  syftar mot  $10^9$  Pa, motsvarande glaspunkten, vilket är precis som förväntat. Överlappningen mellan 8 mm och 25 mm plattan är bra för detta bindemedel.



Figur 4-1: Blackdiagram för bitumen nr. 17 som uppvisar ett bra förhållande mellan 8 mm och 25 mm mätningarna

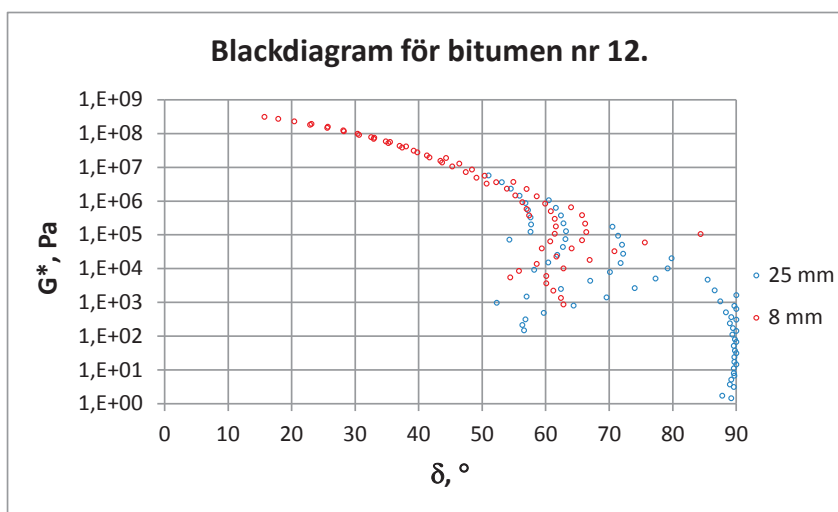
Blackdiagrammet för bitumen nr. 9 i Figur 4-2 har inte den överlappningen mellan 8 mm och 25 mm plattan som bitumen nr. 17. Syftningen mot  $10^9$  är inte heller den lika bra som föregående bitumen.





**Figur 4-2: Blackdiagrammet för bitumen nr. 9 uppvisar inte överlappande värden för 8 mm och 25 mm plattan**

I Figur 4-3 redovisas blackdiagrammet för bitumen nr. 12 där det tydligt syns att det inte är ett helt rent bindemedel då förhållandet mellan  $G^*$  och fasvinkeln inte följer det förväntade mönstret för ett rent bitumen, som är en parabelliknande form tills fasvinkeln blir  $90^\circ$ . Avvikelserna tyder på att det förekommer paraffin eller motsvarande med en smältpunkt kring 45 grader.



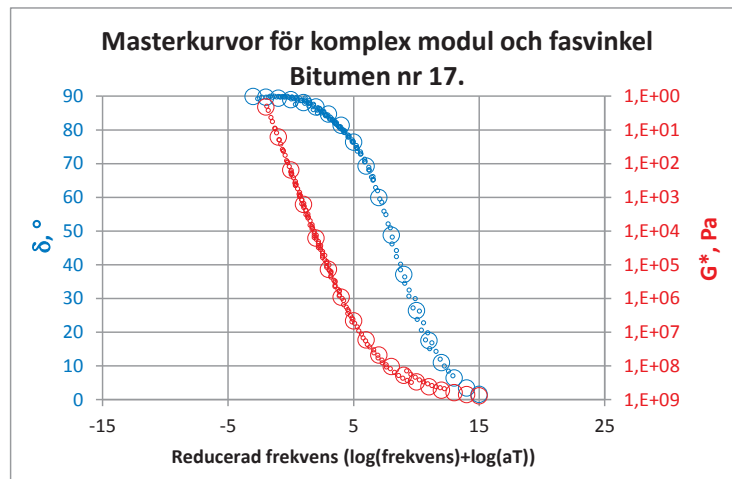
**Figur 4-3: Blackdiagrammet för bitumen nr. 12 som visar på att något annat finns inblandat i bindemedlet då kurvan inte följer det förväntade mönstret för ett rent bitumen**

Nyttan av ett blackdiagram visas med bitumen nr. 12 där information fås av att bindemedlet har andra reologiska egenskaper än förväntat på grund av förekommande förorening.

### 4.3 Masterkurvor

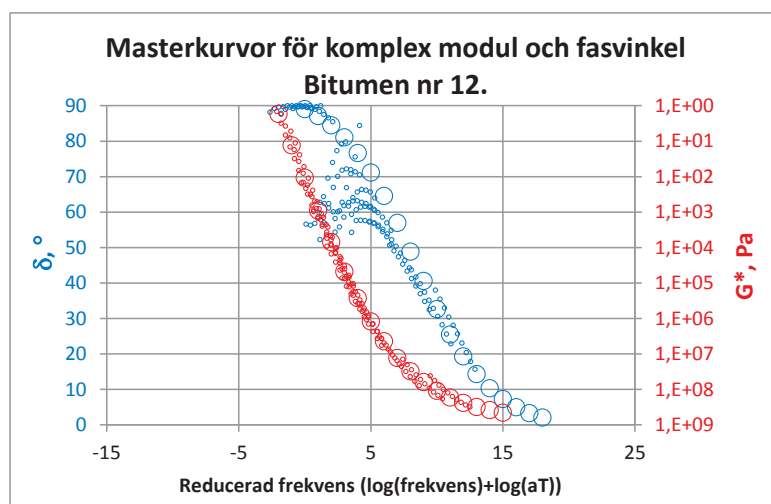
Masterkurvor togs fram för samtliga testade bitumensorter och finns redovisade i Bilaga 3, både för komplex modul och fasvinkel (redovisas i samma diagram). I kurvan presenteras  $G^*$  och  $\delta$  som funktion av frekvensen. Masterkurvorna som redovisas är framtagna med mätvärden från både 8 mm och 25 mm plattorna.

Masterkurvorna för bitumen nr. 17 visas i Figur 4-4 där uppmätta värden för komplex modul och fasvinkel stämmer bra överens med den konstruerade masterkurvan.



**Figur 4-4: Masterkurva för komplex modul (blå) och fasvinkel (röd), bitumen nr. 17. Både den komplexa modulens och fasvinkeln uppmätta värden visar en bra passning mot uppförda masterkurvor**

För bitumen nr. 12 i Figur 4-5 stämmer masterkurvan för den komplexa modulen bra överens med de uppmätta värdena. För fasvinkeln visar inte masterkurvan samma överensstämmelse vilket beror på att bitumen innehåller paraffin eller något liknande som även kunde ses i blackdiagrammet för detta bitumenprov (Figur 4-3). Här ger fasvinkeln en bra indikation på att något är inblandat i bindemedlet, något som inte hade setts om masterkurvan endast konstruerats för den komplexa modulen.

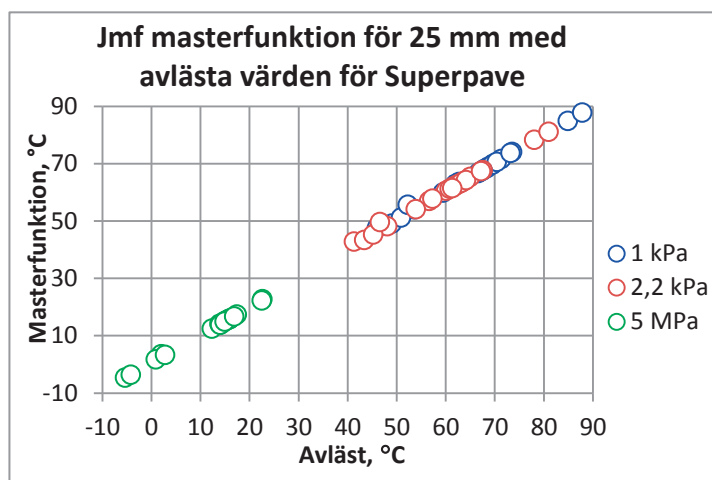


**Figur 4-5: Masterkurva för komplex modul (blå) och fasvinkel (röd), bitumen nr. 12. De mätta värdena för den komplexa modulen har en bra passning mot masterkurvan medan fasvinkeln inte passar mot masterkurvan**

### 4.3.1 Validering av masterkurva

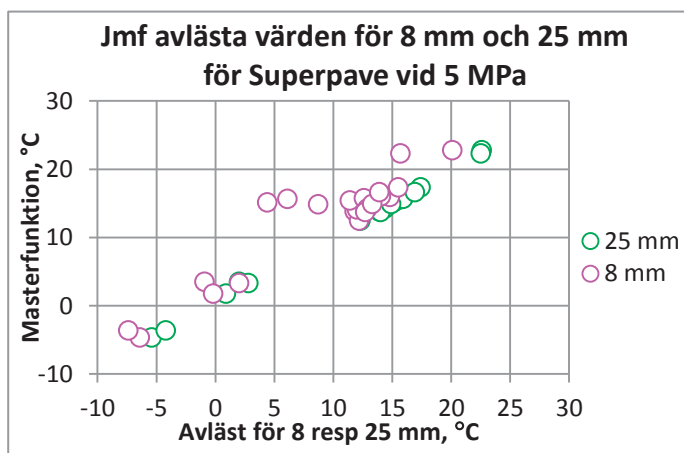
För att säkerställa masterkurvans giltighet för 8 mm och 25 mm plattorna gjordes jämförelser mellan avlästa temperaturer från mätningar och temperaturer framtagna från masterkurvorna för respektive bitumen. Jämförelsen gjordes utifrån Superpaves kontrollparametrar. De avlästa värdena togs fram genom interpolation mellan de temperaturerna som låg närmast eftersökt styvhet. De eftersökta temperaturerna från masterkurvan togs fram genom iteration som utfördes med problemlösaren i Excel. De framtagna parametrarna för Sigmoidalmodellen finns sammanställda i Bilaga 4.

25 mm plattans mätintervall innehöll samtliga tre kontrollparametrar från Superpave och jämförelsen redovisas i Figur 4-6. Resultatet visar att temperaturerna från masterkurvorna och från de avlästa mätningarna korrelerar med varandra (temperaturerna ligger på en rät linje) vilket indikerar att de skapade masterkurvorna är tillförlitliga.



Figur 4-6: Jämförelse mellan avlästa temperaturer och framtagna temperaturer från masterkurvor

För 8 mm plattan täckte mätintervallet endast in kontrollparametern vid 5 MPa då de andra två låg vid temperaturer utanför mätintervallet. I Figur 4-7 redovisas temperaturerna för 8 mm och 25 mm plattan, med jämförelse mellan masterkurvor och mätningar. 8 mm plattan uppvisar svagt korrelationssamband mellan masterkurvor och avlästa temperaturer vilket gör att masterkurvorna framtagna för mätningar med plattan för 8 mm inte är tillräckligt tillförlitliga för användning.



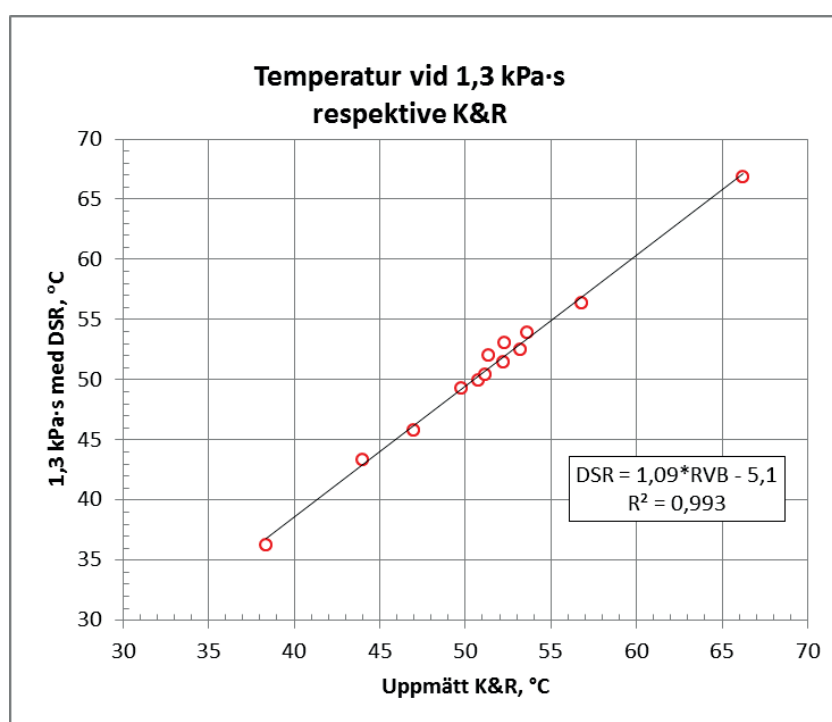
Figur 4-7: Avlästa temperaturer samt temperaturer från masterkurvor vid kontrollparametern 5 MPa för 8 mm och 25 mm platta.

## 4.4 Kvalitetssäkring av 25 mm platta

För att kontrollera trovärdigheten i mätningarna med 25 mm plattan gjordes två olika jämförelser, en mot mjukpunktstestet Kula & Ring och en mot mätningarna utförda med dynamisk rotationsviskosimeter (RVB).

### 4.4.1 Jämförelse mjukpunkt Kula & Ring och komplex viskositet

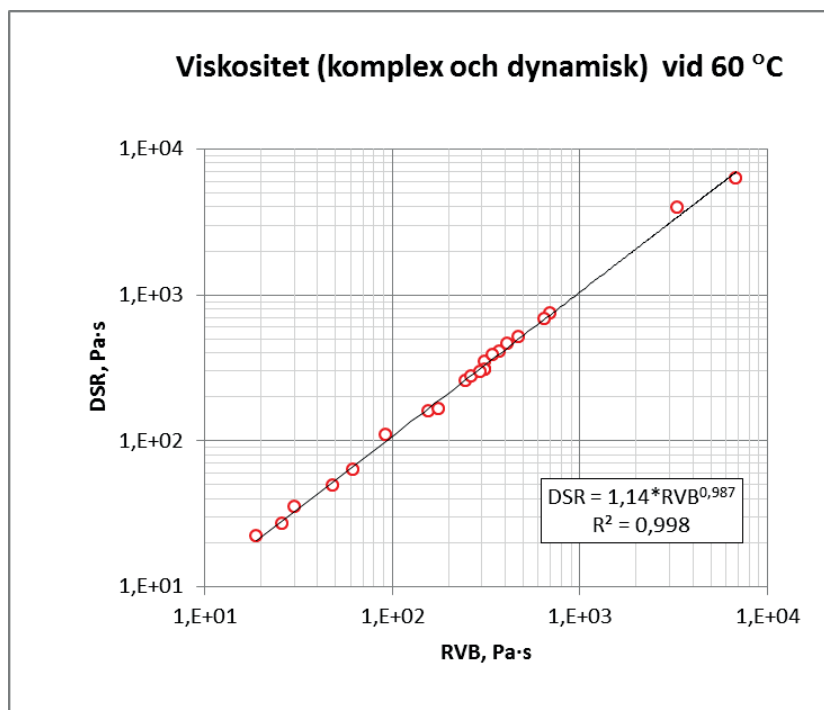
Mjukpunktstestet Kula & Ring genomfördes på 13 av bitumensorterna. Den komplexa viskositeten beräknades vid 0,1 rad/s (0,0159 Hz). Temperaturerna för de olika bindemedlen beräknades när den komplexa viskositeten var 1,3 kPa·s, vilket är viskositeten vid mjukpunkten, och jämfördes sedan med värdena från Kula & Ring. I Figur 4-8 redovisas sambandet mellan den komplexa viskositeten och Kula & Ring där resultatet visar på en stark korrelation mellan de två mätmetoderna där förklaringsgraden  $R^2$  var 0,993.



Figur 4-8: Jämförelse mellan komplex viskositet vid 1,3 kPa·s och uppmätta Kula & Ring-temperaturer

#### 4.4.2 Jämförelse vid 60°C mellan DSR och RVB

Komplex viskositet (DSR) och dynamisk viskositet (RVB) jämfördes med varandra vid 60°C. Den komplexa viskositeten beräknades vid en frekvens på 0,025 rad/s (0,004 Hz). Korrelationen mellan mätningarna med DSR och RVB korrelerar starkt med varandra vilket kan ses i Figur 4-9.



Figur 4-9: Jämförelse av viskositeten vid 60°C, mellan DSR och RVB

#### 4.4.3 Kommentarer

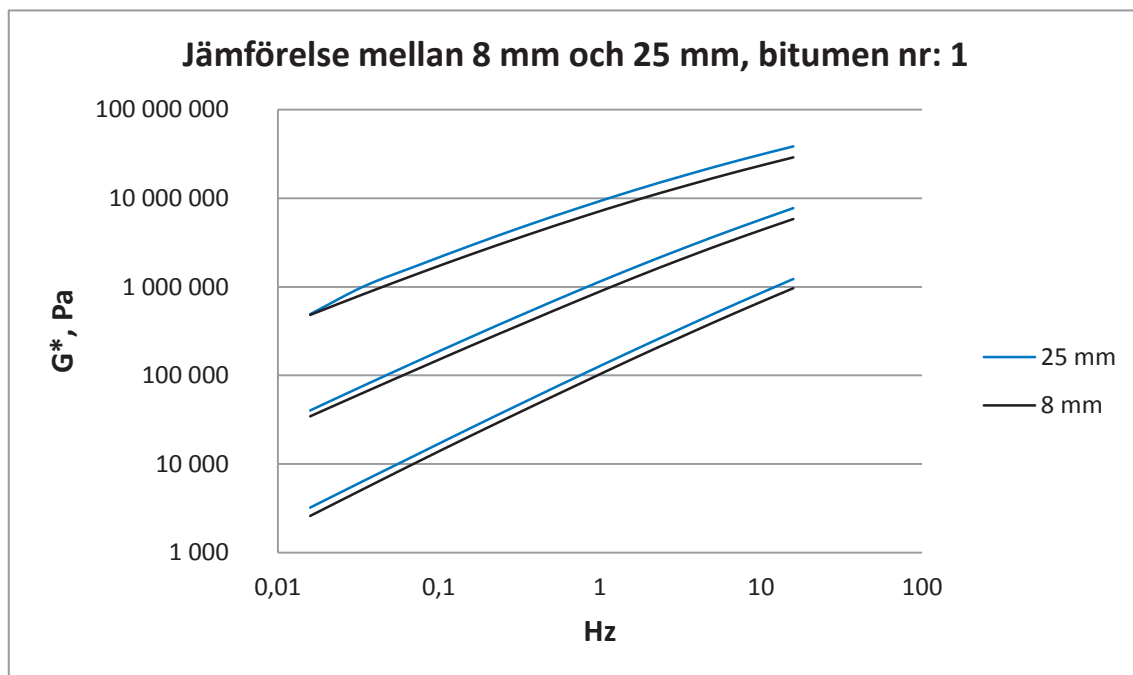
De två jämförelserna som gjordes visade på ett starkt korrelations samband mellan DSR och Kula & Ring respektive DSR och RVB. Detta samband gör att mätningarna med 25 mm plattan anses uppvisa trovärdiga resultat. Jämförelse med Kula & Ring och RVB var inte möjligt att göra mot 8 mm plattan då dess mätningar utfördes vid temperaturer utanför mätmetodernas användningsområde.

### 4.5 Jämförelse mellan 8 mm och 25 mm plattan

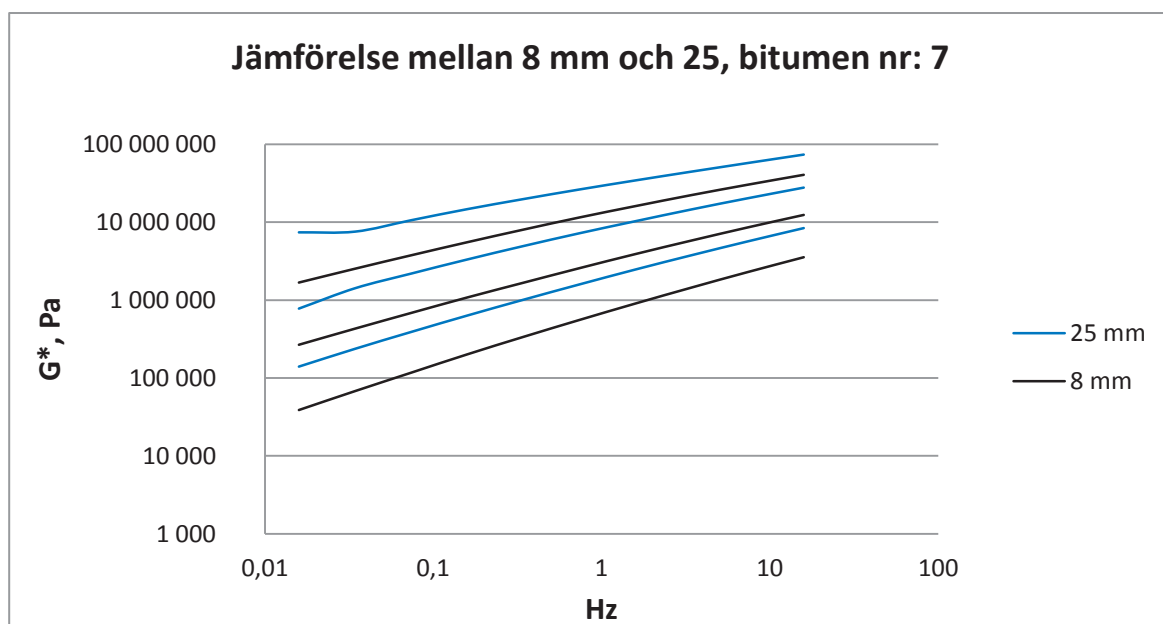
Mätningarna på de två plattorna utfördes med tre överlappande temperaturer, 10, 20 och 30°C. Detta gav möjligheten att jämföra plattorna mot varandra och bekräfta 8 mm plattans mätvärden i de fall 25 mm plattan visat kongruens med Kula & Ring samt RVB.

Resultaten varierade när jämförelsen mellan 8 mm och 25 mm plattorna gjordes med avseende på den komplexa styvhetsmodulen  $G^*$ . Jämförelse med tre olika bitumensorter redovisas. För bitumen nr 1. (se Figur 4-10) hade 25 mm plattan en högre  $G^*$  än 8 mm plattan för samtliga överlappande temperaturer. Förhållandet mellan plattorna är likadant för bitumen nr. 7 (se Figur 4-11), dock är skillnaden mellan plattorna mer signifikant för detta bitumen. Bitumen nr. 4 (se Figur 4-12) uppvisar ett förhållande motsatt nr. 1 och nr. 7, där 8 mm plattans  $G^*$  har ett högre värde än 25 mm plattans. För de flesta av de testade bitumensorterna visar 25 mm plattan en högre  $G^*$  än 8 mm plattan men avvikelser i mönstret finns, som Figur 4-12 visar. Då 25 mm plattan anses ha trovärdiga mätvärden

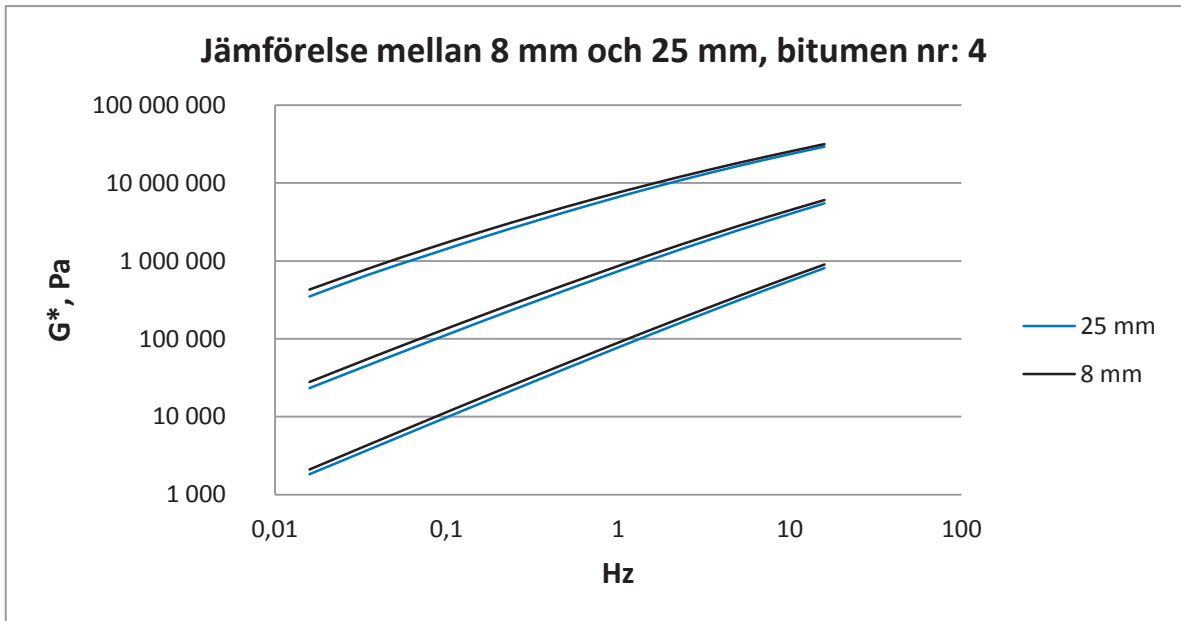
visar jämförelsen att mätningarna på 8 mm plattan inte kan anses vara pålitliga och därför behandlas inte resultat mätta med 8 mm plattan vidare i resterande resultatdel.



**Figur 4-10: Jämförelse mellan  $G^*$  för 8 mm och 25 mm plattan vid temperaturerna 10, 20 och 30°C. För bitumen nr. 1 var mätvärdena för 25 mm plattan styvare än mätvärdena för 8 mm plattan**



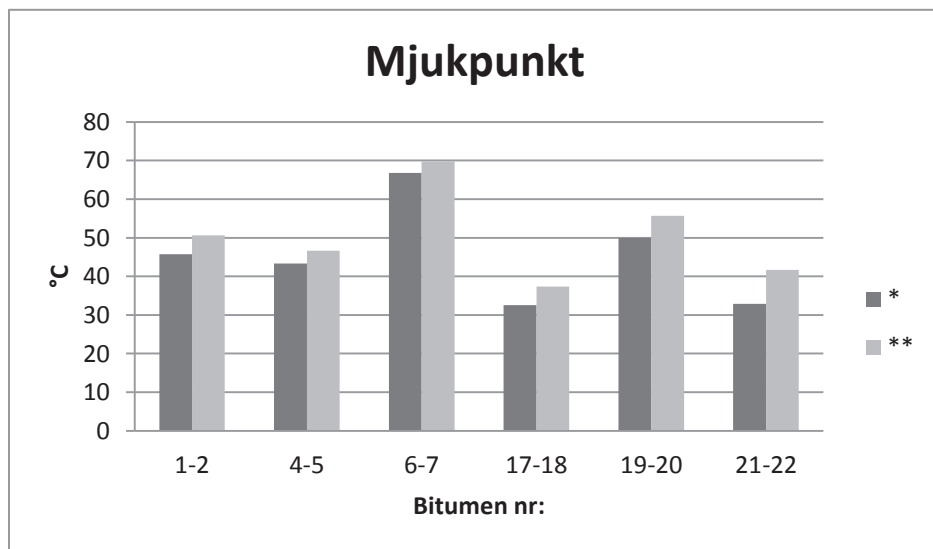
**Figur 4-11: Jämförelse mellan  $G^*$  för 8 mm och 25 mm plattan vid temperaturerna 10, 20 och 30°C. För bitumen nr. 7 var mätvärdena för 25 mm plattan betydligt styvare än mätvärdena för 8 mm plattan**



Figur 4-12: Jämförelse mellan  $G^*$  för 8 mm och 25 mm plattan vid temperaturerna 10, 20 och 30°C. För bitumen nr. 4 var mätvärdena för 8 mm plattan styvare än mätvärdena för 25 mm plattan

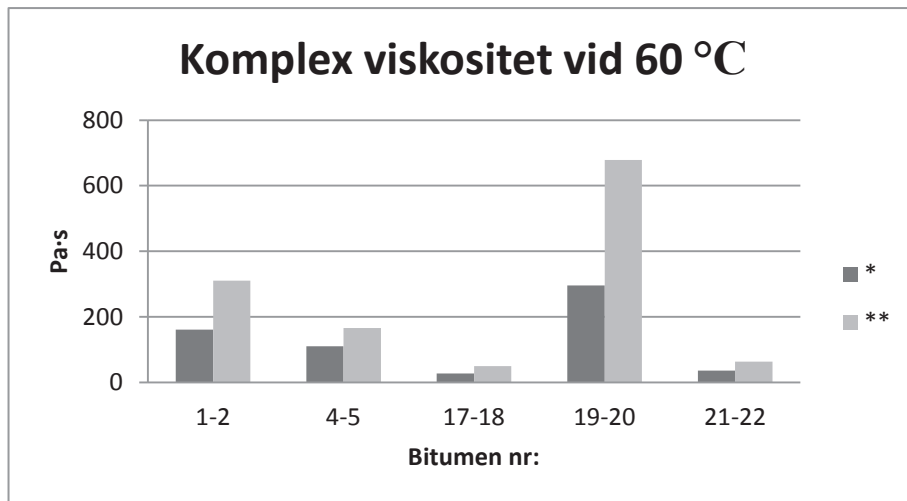
#### 4.6 Effekt av RTFOT

Bitumen åldras och hårdas med en ugnshandling, kallad RTFOT så att bitumen oxiderar i den grad att det ska kunna simulera de effekter som råder efter utläggningen av asfaltmassan. I teorin ska bitumen som behandlats med RTFOT vara styvare än det jungfruliga bitumen då maltenerna, de komponenterna som bidrar till bitumens mjukhet, minskar till följd av oxidation med omgivningen. Figur 4-13 och Figur 4-14 visar mjukpunkt respektive komplex viskositet för det jungfruliga och åldrade bitumen, där resultaten visar att behandlingen med RTFOT gjort de testade proverna styvare, precis som förväntat.



Figur 4-13: Jämförelse i mjukpunkt mellan jungfruligt bitumen (\*) och RTFOT behandlat bitumen (\*\*)





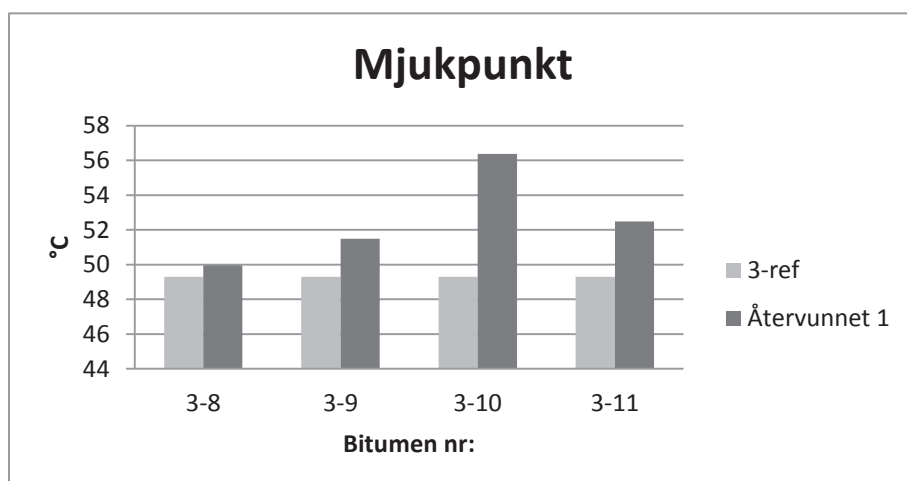
Figur 4-14: Jämförelse i komplex viskositet mellan jungfruligt bitumen (\*) och RTFOT behandlat bitumen (\*\*)

## 4.7 Återvinningsförsök

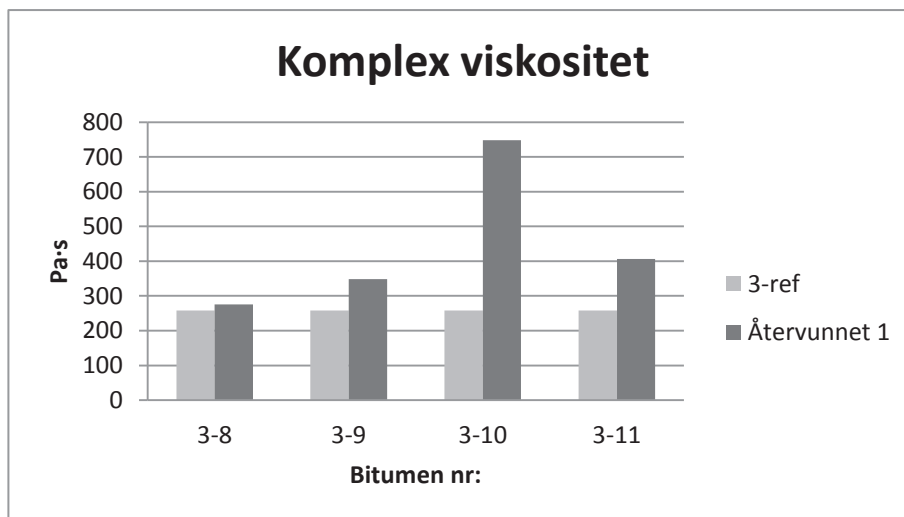
Bindemedel från asfaltmassor med olika stor andel återvunnet granulat jämfördes mot bitumen från en referensmassa i två omgångar. Målet med denna jämförelse var att kontrollera om de återvunna massorna kunde uppvisa samma egenskaper som bindemedlet från referensmassan.

### 4.7.1 Försöksomgång 1

Första återvinningsomgången innehöll fyra olika återvinningsmassor. Bitumen nr. 8 var den blandningen som var närmast referensmassan (cirka 1°C skillnad i mjukpunkt) medan bitumen nr. 10 hade en beräknad mjukpunkt ungefär 7°C högre än referensen. Figur 4-15 visar jämförelsen mellan mjukpunkten och Figur 4-16 visar jämförelsen mellan den komplexa viskositeten för de olika bindemedlen.



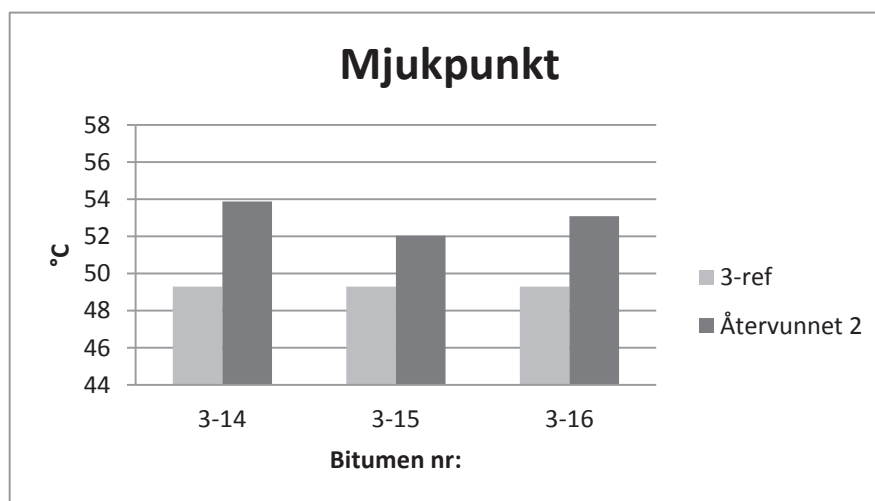
Figur 4-15: Jämförelse i mjukpunkt mellan återvunnen asfalt och referensmassa i det första återvinningsförsöket



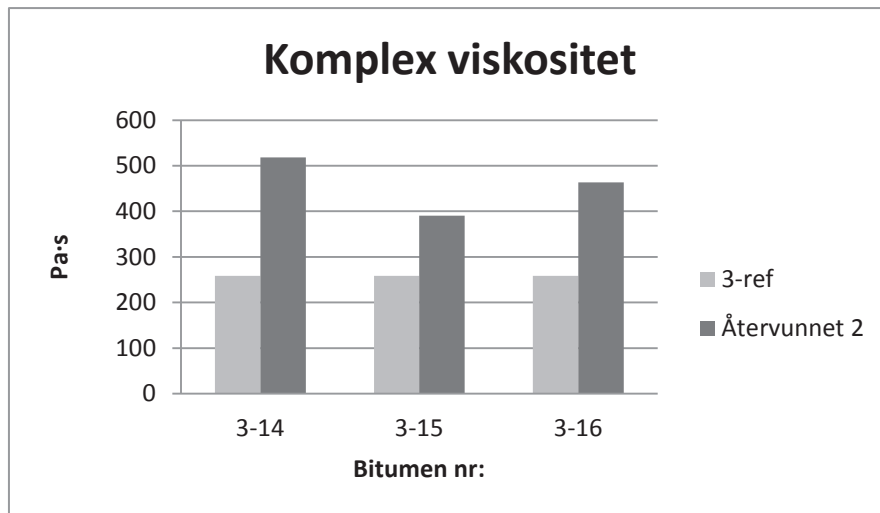
**Figur 4-16: Jämförelse i viskositet mellan återvunnen asfalt och referensmassa i det första återvinningsförsöket.**

#### 4.7.2 Försöksomgång 2

För den andra försöksomgången genomfördes mätningar på bitumen från tre olika återvinningsmassor. Samtliga av de testade proverna var styvare än referensen vilket kan ses i Figur 4-18 och Figur 4-17. Mjukpunktsvärdena skiljde sig cirka 2°C mellan de olika återvunna bitumensorterna och mellan 3-5°C mot referensbitumen.



**Figur 4-17: Jämförelse i mjukpunkt mellan återvunnen asfalt och referensmassa i det andra återvinningsförsöket**



**Figur 4-18: Jämförelse i viskositet mellan återvunnen asfalt och referensmassa i det andra återvinningsförsöket**

#### 4.7.3 Kommentarer

Varken det första eller andra återvinningsförsöket lyckades återskapa de egenskaperna som bitumen från referensmassan hade. Försöksomgång 1 kom närmst med bitumen nr. 8 men spridningen mellan de olika bitumensorterna var större än vid försöksomgång 2 där värdena låg mer samlat.

## 5 Diskussion och slutsatser

På grund av de många olika bitumensorterna som skulle testas i detta examensarbete fanns det inte tid att undersöka effekterna av olika inställningar och körscheman. Reologiska egenskaper undersöktes för 22 bitumensorter med två olika mätplattor, 8mm och 25mm mätplattor. I det här kapitlet följer diskussion kring resultaten i förhållande till syftet och befintlig kunskap, kritisk granskning av resultat och metod följt av slutsatser och rekommendationer för kommande examensarbete.

### 5.1 Resultatdiskussion

DSR är en ovanlig utrustning inom vägbyggnadsbranschen. För att öka utrustningens popularitet måste den i framtiden kunna ersätta eller komplettera andra mätutrustningar som rotationsviskosimeter och Kula & Ring. Mätningar gjordes därför för att undersöka hur DSR stod sig jämfört med resultaten från övriga mätmetoder och se om det fanns något korrelationssamband. Resultaten visade att determinationskoefficienten,  $R^2$ , var nästan 1, vilket tyder på att nästan samtliga mätvärden från Kula & Ring och mätvärden från rotationsviskosimetern kan förklaras med hjälp av värdena från DSR. Dessa resultat för tekniken framåt genom att visa att gamla mätutrustningar kan ersättas med DSR.

Ett av målen med examensarbetet var att mäta med DSR vid låga temperaturer, med 8 mm plattan. I ett första försök undersöktes möjligheten att mäta vid minusgrader och om plattorna klarar av att registrera värden när styvheten är så hög. Mätplattorna klarade av att mäta vid låga temperaturer samtidigt som det mätte vid höga frekvenser. Efter en jämförelse med mätvärdena för 8 mm och 25 mm vid överlappande temperaturer sammanfaller inte mätvärdena. Eftersom värdena från 25 mm plattan kan styrkas med värden från andra testmetoder så gjordes valet att se 25 mm mätningarna som trovärdiga och inte använda resultaten från 8 mm mätningarna.

Bitumen kan åldras och hårdas med en ugnshandling, kallat för RTFOT- behandling, för att simulera de effekter som råder på bitumen efter utläggningen av asfaltmassan. I teorin ska det bitumen som behandlats med RTFOT vara styvare än det jungfruliga bitumen då maltenerna i bitumen, de komponenterna i bitumen som bidrar till bitumens mjukhet, minskar till följd av oxidation med omgivning. I våra tester visar det sig att bitumen som åldrats med RTFOT blir styvare för samtliga kvaliteter som undersöks. Detta visar förutom en överensstämmelse med teorin också att det är en indikation på att våra mätningar är rätt utförda.

Resultatdelen begränsas aningen eftersom proverna avidentifierats efter önskemål från beställarna. Jämförelse har endast gjorts mellan referensmassan och bitumenkvaliteterna från den återvunna asfalten som gjordes i två försöksomgångar, där resultaten visade att de återvunna asfaltmassorna var styvare. Skillnaden mellan de olika försöksomgångarna kan förklaras med att olika återvinningsmetoder använts.

## 5.2 Metoddiskussion

Från resultatdelen drogs slutsatsen att mätningarna med 25 mm plattorna var tillförlitliga efter att bland annat kontrollerat dessa mot andra testmetoder. Då 8 mm plattan inte visade den tillförlitligheten tas en del möjliga felkällor med avseende på detta upp.

DSR är en utrustning som mäter med hög noggrannhet och där elevmanualen som tillhandahållits varit till stor hjälp för tillvägagångssättet av mätningarna. Eftersom DSR mäter med så stor noggrannhet medför det att den är känslig mot yttre faktorer så som tillverkningen och preparering av provkropparna. För att minska inverkan av yttre faktorer är det därför viktigt att stegen görs efter en förbestämd manual eller att studier genomförs om olika faktorer inverkan på resultaten. I praktiken har det varit svårt att göra alla stegen likadant för alla bitumensorter på grund av tidsbristen. Tiden som bitumen ska värmas upp eller tiden som bitumensorterna förvaras i kylskåpet varierade mellan de olika bitumensorterna. Mycket mjuka bitumensorter förvarades i frysskåp för att det ens skulle vara möjligt att tillverka provkropparna. Vilken effekt de här variationerna i tillverkningen har haft på provkropparna och slutresultatet går inte att svara på men denna variation gjordes på både 8 mm och 25 mm provkropparna och ter sig inte vara förklaringen till att värdena inte överlappar.

För tillverkning av 25 mm provkroppen användes en silikonplatta med en grop och för framställning av 8 mm provkroppen användes en silikoncylinder med hål som hade diametern 8 mm. Såväl framställningen som prepareringen av 25 mm provkroppen var enkla moment vilket kan förklara dessa värdenas goda kongruens med mätvärden från andra utrustningar. Framställning av 8 mm provkroppar var betydligt svårare där bitumen från silikoncylindern blev som en lång bitumencylinder som skulle delas i mindre delar med en kniv för att provkroppen skulle passa in utrustningen. Delningen var ett svårt delmoment, där styva bitumensorter gick sönder och mjuka bitumensorter inte gick att dela i tillfredställande bitar. Resultatet blev mycket petande och pillande som sedan ledde till mycket trimning vid preparering av provkroppen. Trimning av provkroppen rekommenderas inte, utan det är mer fördelaktigt att anpassa mätinställningen efter provkroppen. Det senare förslaget var inget alternativt då ett mätschema gjorts i förväg och en förändring av starthöjden skulle innebära en kedjeeffekt där resterande förinställda höjder hade behövts ändras. Detta anses som den troliga felkällan och rekommendationen för vidare mätningar är att tillverka nya silikonplattor som underlättar tillverkningen och prepareringen av provkropparna.

## 5.3 Slutsatser

DSR spelar en stor roll när det kommer till klassificeringen av bitumen i USA, dock så har den inte fått genomslagskraft i Europa än. På senare år har det blivit allt vanligare med att bitumen modifieras, vilket har minskat användningen för de empiriska metoder som används i Europa för kategorisering av bitumen, därför ligger framtiden hos DSR eller andra instrument som på ett bättre sätt beskriver bitumens och asfaltens viskoelastiska egenskaper. En anledning till trögheten i portgången bland europeiska företag och myndigheter kan vara en relativt stor investering och kravet på kunnig personal. Med DSR finns det möjligheter att främja väghållningen då det är den enda utrustningen som kan mäta och bedöma bitumen som modifierats med tillsatserna. Klassificering med hjälp av DSR underlättar för såväl beställaren som för säljaren att definiera bitumen som klarar av de påfrestningar som kommer från trafiken och miljön. Detta examensarbete och kommande examensarbete med DSR syftar därför till att popularisera beskrivningen och användningen av tekniken för vägbelägningsbranschen och stimulera utvecklingen kring bitumens reologiska egenskaper, matematiska modeller och utveckling av mätinstrumentet.

Trots att återvinning av asfalt har blivit allt vanligare de senaste två decennierna finns det fortfarande frågor kring hållbarhet och återvinningsteknik. Genom fortsatta studier om vilka egenskaper bitumen eller asfaltsbeläggningen får efter inblandning av asfaltgranulat kan frågorna och osäkerheten kring återvinningen reduceras och leda till att det i framtiden används i större utsträckning än idag.

### 5.3.1 Rekommendationer

I detta examensarbete har kvalitetsprovning utförts på bitumen, vilket har fungerat framgångsrikt med 25 mm plattan men inte lika bra med 8 mm plattan och det är främst med 8 mm plattan som mättekniken kan förfinas och utvecklas. Till fortsatta studier rekommenderas därför förbättring av tillverkning och preparering av 8 mm provkroppar tills dess att mätresultaten kan överlappas med resultaten från 25 mm plattan.

DSR är en utrustning som med hög noggrannhet och precision kan mäta över ett brett temperaturspann vid olika frekvenser. I det här examensarbetet undersöktes möjligheten med att mäta vid låga temperaturer,  $-30^{\circ}\text{C}$ , vilket fungerade bra. Fortsatta lågtemperaturmätningar föreslås, vilka senare kan stämmas av mot empiriska erfarenheter eller med andra mätningar som idag görs för att beskriva bitumens egenskaper vid låga temperaturer, som BBR och Fraas brytpunkt. Om DSR hade kunnat ersätta andra lågtemperaturmätningar hade möjligheten att mäta egenskaper för ett bitumen från höga ner till låga temperaturer med endast ett mätinstrument varit möjligt.

På senare tid har det visat sig att Superpaves metod med att prediktera spår djup genom parametern  $G^*/\sin\delta$  inte varit så effektiv, speciellt för polymermodifierat bitumen. Andra mätmetoder visat sig ha högre precision när det kommer till prediktering av spår djup, som ZSV (Zero shear viscosity) eller LSV (Low shear viscosity). MSCR- test (Multiple Stress Creep Recovery) registrerar resistens mot spår bildning och är den senaste förbättringen i Superpaves bindemedelsklassificering vars funktion är att indikera för vilken temperatur som spår bildas. Kunskapen om prediktering av spår bildning är mycket eftertraktat, främst i södra Europa där spår bildning är ett stort problem, därför föreslås mer studier kring dessa mätmetoder.

Olika forskare har de senaste årtionden använt sig av olika matematiska modeller och formler för att få en masterkurva som passar in med de uppmätta resultaten. För beräkningar har WLF (Williams - Landel - Ferrys ekvation) tillsammans med Sigmoidal modellen använts för att skapa masterkurvor, som passade väl för 25 mm plattan. I framtida studier bör man se över möjligheten att använda andra matematiska formler och modeller, som kanske bättre beskriver mätresultaten.

Det finns olika matematiska modeller för prediktering av beläggningens styvhetsmodul, bland de mest kända hör Witzak's modeller och Hirsch's modell till. Mer insikt i dessa modeller kan vara till stor användning i arbete med den komplexa skjuvmodulen, därför rekommenderas kommande examensarbetare att fortsätta studera matematiska modeller.

## 6 Referenser

- Agardh, S. & Parhamifar, E. (2012)** - Kompendium Vägbyggnad. Lund
- Airey, G.D (1997)** - Rheological Characteristics of Polymer Modified and Aged Bitumens. PhD Thesis, the University of Nottingham.
- Airey, G.D (2009)** - Chapter 23: Bitumen Properties and Test Methods. ICE Manual of Construction Materials, Institution of Civil Engineers.
- Anderson D.A., Christensen D.W., Bahia H.U, Dongré, R., Sharma M.G, Antle C.E & Button, J (1994)** - Binder Characterization and Evaluation. Volume 3: Physical Characterization. SHRP-A-369. National Research Council, Washington D.C. Brookfield.
- Anton Paar (2008)** - Virtuellt inlärningskiva
- Asphalt Institute (2007)** - The Asphalt Handbook. USA.
- ASTM 7175** - Standard Test Method for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer
- Brookfield** - More solutions to sticky problems. Brookfield, Middleboro.
- Burström, P. (2007)** - Byggnadsmaterial : uppbyggnad, tillverkning och egenskaper. 2. uppl. Lund: Studentlitteratur.
- Dukatz, E.L. & Anderson, D.A. (1980)** - The Effect of Various Fillers on the Mechanical Behaviour of Asphalt and Asphalt Concrete. Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists. Vol. 49, pp. 530 – 549.
- Gustavsson, N. & Thylander, R. (2013)** - Metod för bestämning av mängd föryngringsmedel till retur-asfalt: en ny modell för beräknade resultat i det viskösa området. Helsingborg: LTH Ingenjörshögskolan vid Campus Helsingborg, Lunds universitet.
- Harrigan, E.T., Leahy, R.B. & Youtcheff, J.S (1994)** - The SUPERPAVE Mix Design System Manual of Specifications, Test Methods and Practices, SHRP-A-379, Strategic Highways Research Program, National Research Council, Washington D.C.
- Hansson, B (2014)** – Muntl. 2014-01-10
- Heukelom, W. (1973)** - An improved method of characterizing asphaltic bitumens with the aid of their mechanical properties.
- Jönsson, G. (2007)** - Fysik i vätskor och gaser. 6. uppl. Lund: Teach Support.
- Karlsson, R. (2002)** - Undersökning av bindemedelsföryngring med relevans vid asfaltåtervinning. Doktorsavhandling. Vägteknik. Kth. Stockholm. 2002.
- Lindahl, T. & Ulmgren, N. (2003)** - Återvinning av asfaltmassor innehållande stenkolsstjära. Rapport 2003-9.
- Lundin, C. (2002)** - Att hantera stenkolsstjära – storstädernas överenskommelse. Publikation 2002:00.
- McGennis, R., Anderson M., Kennedy, T. & Solaimanian, M. (1994)** - Background of SUPERPAVE asphalt mixture design and analysis. Washington, D.C: Federal Highway Administration
- Minnesota Asphalt Pavement Association (2003)** - ASPHALT PAVING design guide. New Brighton.
- Mezger, T. (2011)** - The rheology handbook : for users of rotational and oscillatory rheometers. 3. rev. ed. Hannover: Vincentz Network.



- NE (2012a) Reologi** - <http://www.ne.se/reologi>. Nedladdat: 2013-12-28
- Nordtest (2002)** - Superpave test methods for asphalt - Procedure for DSR testing. NORDTEST project number: 1535-01
- Nynas (2013)** - Polymermodifera mera – ökad hållbarhet och mindre underhåll. Hämtat 2013-10-08 från <http://www.nynas.com/sv/Segment/Bitumen-for-vagbelagging/Sverige/Bitumen-for-Vagbelagging/Nyheter-och-event/Polymermodifiera-mera--okad-hallbarhet-och-mindre-underhall/>
- Read & Whiteoak (2003)** - The Shell Bitumen Handbook, fifth edition. Thomas Telford Publishing, London.
- Regeringen (2003)** - En svensk strategi för hållbar utveckling – ekonomisk, social och miljömässig. Regeringens skrivelse 2003 / 04:129.
- Rowe, G.M. & Sharrock, M.J (2011)** - Alternate Shift Factor Relationship for Describing the Temperature Dependency of the Visco-elastic Behaviour of Asphalt Materials. Transportation Research Board Annual Meeting, Washington, DC,
- Rowe, G.M., Sharrock, M.J., Bouldin, M.G. & Bouldin, R.N (2001)** - Advanced Techniques to Develop Asphalt Master Curve from the Bending Beam Rheometer. Petroleum and Coal, Vol. 43 (1): s. 54–59.
- Scholz, (1995)** - T.V. Durability of Bituminous Paving Mixtures. PhD Thesis, the University of Nottingham.
- Sasol (2004)** - The Bitumen Additive for Highly Stable Easily Compactible Asphalts. Product Information 124
- Svenska kommunförbundet. (2004)** - På väg igen: vägen tillbaka för återvunnen asfalt. Stockholm: EO Print Stockholm- Hammarby.
- Trafikverket (2010)** - TRVKB. Bitumenbundna lager- Trafikverkets Krav Beskrivningstexter för Bitumenbundna lager i vägkonstruktioner. Publikationsnummer: TRV 2011:082
- Trafikverket (2011)** - TRVR Väg -Trafikverkets tekniska råd Vägkonstruktion. Publikationsnummer: TRV 2011:073
- Tyllgren, P. (2010)** - Föryngrad returafalt med miljöanpassande tillsatsmedel. Projektnummer SBUF 12230, Malmö
- Tyllgren, P. (2011)** - Heukelomdiagram.
- Tyllgren, P. (2013a)** - Optimal temperatur vid varmblandad asfalttillverkning, OTA. SBUF 12331. Malmö
- Tyllgren, P. (2013b)** - Muntl. 2013-09-01–2014-01-15.
- Vägverket (2004a)** - Handbok för återvinning av asfalt. Borlänge: Vägverket Publikation 2004:91.
- Vägverket (2004b)** - Hantering av tjärhaltiga beläggningar. Publikation 2004:90.
- Vägverket (2008)** - VVTBT Bitumenbunda lager. Publikation 2008:113
- Vägverket (2009a)** - VVK Väg. Publikation 2009:120.
- Vägverket (2009b)** - VVTBT 2009 Bitumenbundna lager 09 rev1 publikation 2009:140
- Yusoff, N. (2012)** - Modelling the Linear Viscoelastic Rheological Properties of Bituminous Binders. Thesis submitted to the University of Nottingham. For the degree of Doctor of Philosophy.

# Bilaga 1 - Mätresultat, komplex modul och fasvinkel

## Bitumen nr: 1

Komplex modul										
°C / Hz	0,0159	0,0343	0,0739	0,159	0,343	0,739	1,59	3,43	7,39	15,9
100	0,297	0,620	1,31	2,77	5,93	12,7	27,2	57,9	122	233
90	0,65	1,37	2,88	6,10	13,0	27,8	59,8	128	270	555
80	1,54	3,25	6,91	14,8	31,6	67,8	146	312	660	1377
70	4,20	8,96	19,2	41,1	88,2	189	405	860	1817	3 783
60	13,8	29,5	63,2	135	290	617	1303	2 743	5 713	11800
50	63,2	135	284	600	1257	2 633	5 463	11200	22 900	46 033
40	373	775	1610	3 320	6 797	13 867	27 833	55 400	109 000	212 333
30	3 230	6 490	12 933	25 700	50 500	98 467	189 000	3,59E+05	6,70E+05	1,23E+06
20	40 300	77 100	145 667	272 333	5,02E+05	9,11E+05	1,62E+06	2,80E+06	4,71E+06	7,73E+06
10	4,92E+05	1,01E+06	1,74E+06	2,94E+06	4,85E+06	7,76E+06	1,21E+07	1,83E+07	2,69E+07	3,85E+07
°C / Hz	0,0159	0,0343	0,0739	0,159	0,343	0,739	1,59	3,43	7,39	15,9
30	2 600	5 270	10 600	21000	41100	79 600	153 000	288 000	534 000	9,65E+05
20	34 600	64 350	118 500	217 000	392 500	705 500	1,25E+06	2,15E+06	3,59E+06	5,83E+06
10	482 500	831000	1,41E+06	2,33E+06	3,78E+06	5,99E+06	9,25E+06	1,39E+07	2,03E+07	2,89E+07
0	5,35E+06	8,16E+06	1,21E+07	1,76E+07	2,48E+07	3,45E+07	4,68E+07	6,20E+07	8,01E+07	1,01E+08
-10	3,94E+07	5,13E+07	6,68E+07	8,53E+07	1,07E+08	1,31E+08	1,58E+08	1,86E+08	2,14E+08	2,43E+08
-20	1,50E+08	1,92E+08	2,20E+08	2,49E+08	2,78E+08	3,08E+08	3,34E+08	3,60E+08	3,84E+08	4,05E+08
-30	1,92E+08	3,45E+08	3,72E+08	3,97E+08	4,20E+08	4,41E+08	4,58E+08	4,76E+08	4,91E+08	5,02E+08
Fasvinkel										
°C / Hz	0,0159	0,0343	0,0739	0,159	0,343	0,739	1,59	3,43	7,39	15,9
100	88,3	88,4	88,9	89,4	89,6	89,9	90,0	90,0	90,0	90,0
90	86,8	88,0	88,5	89,2	89,6	89,8	90,0	90,0	90,0	90,0
80	89,6	89,6	89,6	89,4	89,5	89,6	89,5	89,4	89,4	90,0
70	89,3	89,5	89,4	89,3	89,4	89,1	88,7	88,3	88,0	88,4
60	89,6	89,6	89,4	89,2	88,7	88,1	87,3	86,5	85,6	84,8
50	89,1	88,7	88,1	87,5	86,7	85,8	84,9	83,8	82,7	81,7
40	86,7	86,2	85,5	84,6	83,6	82,4	81,2	79,8	78,5	76,9
30	83,1	82,2	81,1	79,9	78,5	77,0	75,4	73,6	71,4	69,1
20	77,5	76,0	74,3	72,4	70,3	67,8	65,2	62,5	59,5	56,9
10	69,7	65,9	63,0	60,0	57,1	54,2	51,6	49,6	47,9	47,0
°C / Hz	0,0159	0,0343	0,0739	0,159	0,343	0,739	1,59	3,43	7,39	15,9
30	83,6	82,8	82,0	81,0	80,1	78,8	77,4	75,9	74,4	72,2
20	76,9	75,5	74,0	72,3	70,4	68,1	65,4	62,5	59,3	56,1
10	67,8	65,4	62,7	59,7	56,5	53,2	49,9	46,7	43,6	40,6
0	53,3	49,9	46,7	43,6	40,5	37,6	34,7	31,9	29,2	26,6
-10	29,9	33,8	31,0	28,3	25,6	23,0	20,7	18,4	16,3	14,4
-20	21,5	18,8	16,8	14,7	12,9	11,2	9,7	8,4	7,2	6,3
-30	12,1	10,3	8,9	7,6	6,4	5,4	4,5	3,9	3,4	2,9

## Bitumen nr: 2

<b>Komplex modul</b>										
°C / Hz	0,0159	0,0343	0,0739	0,159	0,343	0,739	1,59	3,43	7,39	15,9
100	0,456	0,961	2,040	4,370	9,390	20,2	43,4	93,0	197	402
90	1,03	2,20	4,70	10,1	21,7	46,6	100	215	456	944
80	2,66	5,69	12,2	26,3	56,5	121	260	553	1170	2 420
70	8,0	17,2	37,0	79,4	170	364	769	1610	3 350	6 890
60	29,4	63,5	136	291	616	1290	2 690	5 540	11300	22 600
50	153	323	678	1410	2 910	5 950	12 000	23 800	46 700	90 700
40	990	2 030	4 120	8 290	16 400	32 100	61800	118 000	221000	410 000
30	8 950	17 700	34 200	65 100	122 000	226 000	411000	736 000	1,30E+06	2,23E+06
20	104 000	194 000	351000	623 000	1,08E+06	1,85E+06	3,07E+06	4,98E+06	7,89E+06	1,22E+07
10	1,68E+06	2,03E+06	3,33E+06	5,31E+06	8,24E+06	1,25E+07	1,83E+07	2,64E+07	3,71E+07	5,12E+07
°C / Hz	0,0159	0,0343	0,0739	0,159	0,343	0,739	1,59	3,43	7,39	15,9
30	7 930	15 300	29 200	55 500	104 000	193 000	355 000	640 000	1,14E+06	1,97E+06
20	95 700	168 000	292 000	508 000	877 000	1,49E+06	2,50E+06	4,09E+06	6,51E+06	1,01E+07
10	1,12E+06	1,78E+06	2,81E+06	4,40E+06	6,77E+06	1,02E+07	1,52E+07	2,19E+07	3,10E+07	4,28E+07
0	9,68E+06	1,38E+07	1,96E+07	2,73E+07	3,76E+07	5,07E+07	6,71E+07	8,69E+07	1,10E+08	1,37E+08
-10	5,61E+07	7,25E+07	9,25E+07	1,16E+08	1,44E+08	1,74E+08	2,07E+08	2,42E+08	2,78E+08	3,14E+08
-20	2,13E+08	2,46E+08	2,80E+08	3,17E+08	3,53E+08	3,90E+08	4,24E+08	4,58E+08	4,86E+08	5,15E+08
-30	3,96E+08	4,30E+08	4,63E+08	4,95E+08	5,25E+08	5,55E+08	5,76E+08	5,97E+08	6,18E+08	6,31E+08
<b>Fasvinkel</b>										
°C / Hz	0,0159	0,0343	0,0739	0,159	0,343	0,739	1,59	3,43	7,39	15,9
100	84,3	86,2	87,6	88,6	89,4	89,9	90,0	90,0	90,0	90,0
90	86,3	87,8	88,8	89,3	89,6	89,7	89,7	89,9	90,0	90,0
80	88,6	89,2	89,4	89,6	89,5	89,3	88,8	88,4	87,9	87,6
70	89,3	89,4	89,5	89,3	88,8	88,2	87,4	86,5	85,7	85,2
60	89,4	89,2	88,8	88,2	87,2	86,2	85,1	83,9	82,7	81,5
50	87,5	87,0	86,2	85,2	84,0	82,7	81,3	79,9	78,5	77,1
40	83,9	83,2	82,1	80,8	79,3	77,8	76,3	74,8	73,2	71,4
30	79,0	77,7	76,1	74,5	72,8	71,0	69,2	67,2	64,9	62,5
20	71,7	69,8	67,8	65,6	63,3	60,9	58,2	55,7	53,2	51,0
10	0,0	58,8	55,9	53,0	50,3	47,9	45,5	43,6	42,0	41,2
°C / Hz	0,0159	0,0343	0,0739	0,159	0,343	0,739	1,59	3,43	7,39	15,9
30	80,2	78,7	77,1	75,4	73,8	72,1	70,2	68,3	66,1	63,8
20	72,1	70,5	68,7	66,8	64,6	62,1	59,4	56,5	53,5	50,6
10	61,7	59,3	56,7	53,8	50,9	48,0	45,1	42,4	39,7	37,2
0	47,5	44,8	42,1	39,4	36,8	34,2	31,8	29,4	27,0	24,8
-10	33,6	31,1	28,6	26,2	23,9	21,6	19,5	17,5	15,7	13,8
-20	20,2	18,1	16,2	14,3	12,6	11,1	9,7	8,4	7,3	6,3
-30	11,8	10,2	8,8	7,6	6,5	5,6	4,9	4,1	3,5	3,0

## Bitumen nr: 3

<b>Komplex modul</b>										
°C / Hz	0,0159	0,0343	0,0739	0,159	0,343	0,739	1,59	3,43	7,39	15,9
100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
90	0,899	1,92	4,12	8,85	19,0	40,9	88,0	189	403	831
80	2,30	4,92	10,6	22,8	48,9	105	226	481	1010	2 110
70	6,81	14,6	31,5	67,7	145	311	661	1390	2 910	5 980
60	24,1	52,0	112	239	508	1070	2 230	4 610	9 400	18 900
50	116	249	527	1 110	2 300	4 730	9 610	19 200	38 000	74 200
40	750	1 550	3 180	6 450	12 900	25 400	49 500	94 900	180 000	337 000
30	6 570	13 100	25 600	49 100	93 000	174 000	320 000	580 000	1,03E+06	1,81E+06
20	75 600	143 000	261 000	468 000	825 000	1,43E+06	2,41E+06	3,98E+06	6,40E+06	1,01E+07
10	1,33E+06	1,56E+06	2,61E+06	4,22E+06	6,65E+06	1,02E+07	1,54E+07	2,25E+07	3,25E+07	4,59E+07
°C / Hz	0,0159	0,0343	0,0739	0,159	0,343	0,739	1,59	3,43	7,39	15,9
30	1710	3 340	6 590	13 000	25 400	49 300	94 800	180 000	336 000	6,12E+05
20	20 400	37 100	67 500	123 000	222 000	400 000	7,09E+05	1,24E+06	2,12E+06	3,54E+06
10	255 000	4,29E+05	7,16E+05	1,19E+06	1,96E+06	3,19E+06	5,09E+06	7,96E+06	1,22E+07	1,81E+07
0	2,59E+06	3,96E+06	6,00E+06	9,01E+06	1,33E+07	1,94E+07	2,75E+07	3,83E+07	5,22E+07	6,96E+07
-10	1,88E+07	2,58E+07	3,53E+07	4,78E+07	6,35E+07	8,28E+07	1,06E+08	1,33E+08	1,62E+08	1,95E+08
-20	9,35E+07	1,16E+08	1,43E+08	1,74E+08	2,07E+08	2,42E+08	2,80E+08	3,18E+08	3,55E+08	3,91E+08
-30	2,04E+08	2,40E+08	2,78E+08	3,18E+08	3,58E+08	3,96E+08	4,32E+08	4,68E+08	4,98E+08	5,25E+08
<b>Fasvinkel</b>										
°C / Hz	0,0159	0,0343	0,0739	0,159	0,343	0,739	1,59	3,43	7,39	15,9
100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
90	87,8	88,8	89,3	89,6	89,8	89,9	90,0	90,0	90,0	90,0
80	88,3	89,0	89,3	89,5	89,6	89,4	89,0	88,5	88,5	88,7
70	89,1	89,4	89,5	89,4	89,1	88,5	87,7	86,9	86,4	86,1
60	89,5	89,4	89,1	88,5	87,7	86,6	85,6	84,4	83,1	82,0
50	88,7	88,1	87,2	86,1	84,9	83,5	82,2	80,7	79,3	78,0
40	84,8	84,1	83,0	81,8	80,3	78,7	77,3	75,7	74,1	72,5
30	80,1	78,8	77,2	75,6	74,0	72,4	70,5	68,5	66,4	64,1
20	72,9	71,2	69,3	67,2	65,0	62,5	60,1	57,4	54,8	52,5
10	40,8	60,6	57,7	54,9	52,1	49,7	47,3	45,3	43,7	42,8
°C / Hz	0,0159	0,0343	0,0739	0,159	0,343	0,739	1,59	3,43	7,39	15,9
30	83,8	82,9	81,8	80,6	79,2	77,7	76,1	74,4	72,6	70,7
20	75,9	75,0	73,8	72,3	70,6	68,8	66,7	64,5	62,1	59,4
10	66,5	65,0	63,1	61,1	58,8	56,4	53,9	51,3	48,5	45,7
0	55,2	53,1	50,8	48,2	45,7	43,0	40,3	37,7	35,1	32,6
-10	42,6	40,2	37,7	35,1	32,5	30,1	27,6	25,3	23,0	20,8
-20	29,4	27,1	24,8	22,5	20,3	18,1	16,1	14,2	12,4	10,8
-30	21,6	19,6	17,1	15,1	13,3	11,5	9,9	8,4	7,4	6,3

## Bitumen nr: 4

<b>Komplex modul</b>										
°C / Hz	0,0159	0,0343	0,0739	0,159	0,343	0,739	1,59	3,43	7,39	15,9
100	0,187	0,403	0,87	1,86	4,03	8,68	18,8	40,0	84,5	167
90	0,452	0,95	2,01	4,28	9,1	19,6	42,0	89,8	191	386
80	1,04	2,19	4,67	10,0	21,4	45,9	98,4	212	448	931
70	2,74	5,83	12,5	26,7	57,2	123	264	563	1193	2495
60	8,52	18,2	39,0	83,7	179	384	818	1733	3638	7570
50	38,6	81,8	173	366	774	1625	3400	7068	14575	29775
40	219	456	948	1973	4080	8403	17125	34725	69675	138250
30	1828	3690	7448	14950	29900	59275	116500	225750	431500	809250
20	23325	45175	86950	166250	312750	580250	106E+06	188E+06	3,26E+06	5,49E+06
10	349750	654000	1,15E+06	1,98E+06	3,34E+06	5,49E+06	8,76E+06	1,35E+07	2,02E+07	2,93E+07
°C / Hz	0,0159	0,0343	0,0739	0,159	0,343	0,739	1,59	3,43	7,39	15,9
30	2100	4280	8670	17450	34750	68500	133500	256500	485500	9,00E+05
20	27900	54550	105000	198500	371000	680500	1,23E+06	2,15E+06	3,66E+06	6,06E+06
10	429000	784000	1,39E+06	2,37E+06	3,92E+06	6,31E+06	9,83E+06	1,49E+07	2,20E+07	3,16E+07
0	5,13E+06	8,18E+06	1,25E+07	1,85E+07	2,65E+07	3,72E+07	5,10E+07	6,81E+07	8,89E+07	1,14E+08
-10	3,92E+07	5,35E+07	7,12E+07	9,24E+07	1,17E+08	1,45E+08	1,75E+08	2,09E+08	2,43E+08	2,78E+08
-20	1,67E+08	2,16E+08	2,52E+08	2,89E+08	3,25E+08	3,59E+08	3,93E+08	4,24E+08	4,52E+08	4,77E+08
-30	1,29E+08	4,01E+08	4,35E+08	4,65E+08	4,93E+08	5,18E+08	5,39E+08	5,57E+08	5,74E+08	5,86E+08
<b>Fasvinkel</b>										
°C / Hz	0,0159	0,0343	0,0739	0,159	0,343	0,739	1,59	3,43	7,39	15,9
100	87,0	88,4	89,2	89,6	90,0	90,0	90,0	90,0	90,0	90,0
90	87,8	88,2	88,7	89,0	89,4	89,7	89,6	90,0	90,0	90,0
80	86,6	89,0	88,4	89,4	89,4	89,5	89,7	89,7	88,7	85,3
70	88,9	89,2	89,3	89,4	89,4	89,3	89,0	88,3	87,2	85,1
60	88,9	89,2	88,7	88,9	88,9	88,6	88,0	87,3	86,6	86,0
50	88,7	88,5	88,2	87,8	87,3	86,6	85,9	85,0	83,9	82,7
40	87,3	86,8	86,3	85,6	84,8	83,8	82,7	81,5	80,2	78,6
30	84,3	83,5	82,5	81,4	80,2	78,8	77,3	75,5	73,5	71,1
20	79,0	77,6	76,0	74,2	72,2	69,8	67,2	64,4	61,2	58,1
10	70,0	67,5	64,5	61,5	58,2	54,7	51,2	47,8	44,7	42,0
°C / Hz	0,0159	0,0343	0,0739	0,159	0,343	0,739	1,59	3,43	7,39	15,9
30	84,1	83,1	82,3	81,3	80,1	78,8	77,3	75,6	73,6	71,3
20	77,7	76,5	75,2	73,6	71,7	69,5	66,9	64,0	60,7	57,3
10	69,1	66,5	63,7	60,6	57,3	53,9	50,5	47,3	44,2	41,2
0	54,7	50,9	47,4	44,2	41,1	38,2	35,4	32,6	29,9	27,2
-10	40,9	34,9	31,9	29,1	26,4	23,8	21,4	19,1	16,9	14,9
-20	9,6	19,4	17,1	14,9	13,0	11,3	9,8	8,4	7,2	6,3
-30	59,3	10,3	8,8	7,4	6,3	5,4	4,6	3,9	3,4	2,7

## Bitumen nr: 5

<b>Komplex modul</b>										
°C / Hz	0,0159	0,0343	0,0739	0,159	0,343	0,739	1,59	3,43	7,39	15,9
100	0,286	0,616	1,33	2,84	6,14	13,2	28,5	61,2	130,0	260
90	0,631	1,35	2,91	6,25	13,5	29,0	62,4	134	286	578
80	1,56	3,36	7,22	15,6	33,5	72	155	332	703	1460
70	4,47	9,60	20,7	44,5	95,8	206	439	931	1950	4 050
60	15,5	33,6	72,3	155	332	704	1480	3 090	6 390	13 100
50	76,3	163	346	728	1520	3 160	6 490	13 200	26 500	52 700
40	472	985	2 040	4 180	8 480	17 000	33 700	66 100	128 000	245 000
30	4 310	8 690	17 200	33 700	65 200	124 000	233 000	431 000	785 000	1,40E+06
20	54 600	104 000	195 000	357 000	640 000	1,12E+06	1,93E+06	3,25E+06	5,31E+06	8,52E+06
10	747 000	1,27E+06	2,15E+06	3,53E+06	5,65E+06	8,80E+06	1,34E+07	1,98E+07	2,89E+07	4,11E+07
°C / Hz	0,0159	0,0343	0,0739	0,159	0,343	0,739	1,59	3,43	7,39	15,9
30	3 420	6 780	13 400	26 100	50 500	96 500	182 000	338 000	618 000	1,11E+06
20	43 300	78 100	141 000	253 000	451 000	794 000	1,37E+06	2,32E+06	3,83E+06	6,14E+06
10	580 000	9,51E+05	1,55E+06	2,51E+06	4,00E+06	6,24E+06	9,51E+06	1,42E+07	2,06E+07	2,92E+07
0	5,77E+06	8,46E+06	1,23E+07	1,77E+07	2,49E+07	3,44E+07	4,66E+07	6,17E+07	8,01E+07	1,02E+08
-10	3,73E+07	4,97E+07	6,49E+07	8,33E+07	1,05E+08	1,30E+08	1,58E+08	1,88E+08	2,20E+08	2,52E+08
-20	1,60E+08	1,90E+08	2,22E+08	2,56E+08	2,90E+08	3,24E+08	3,56E+08	3,88E+08	4,18E+08	4,45E+08
-30	3,21E+08	3,57E+08	3,90E+08	4,21E+08	4,49E+08	4,77E+08	5,03E+08	5,25E+08	5,46E+08	5,63E+08
<b>Fasvinkel</b>										
°C / Hz	0,0159	0,0343	0,0739	0,159	0,343	0,739	1,59	3,43	7,39	15,9
100	90,0	90,0	90,0	90,0	90,0	90,0	90,0	90,0	90,0	90,0
90	88,8	89,0	89,4	89,6	89,7	89,8	89,7	89,5	89,2	90,0
80	90,0	90,0	90,0	89,9	89,8	89,6	89,4	88,9	88,6	87,5
70	90,0	89,9	89,8	89,7	89,5	89,1	88,4	87,5	86,6	85,4
60	89,9	89,7	89,4	89,0	88,4	87,6	86,6	85,7	84,5	83,3
50	88,6	88,1	87,5	86,8	85,9	84,9	83,7	82,5	81,3	79,9
40	86,0	85,3	84,4	83,4	82,2	80,9	79,5	78,0	76,5	75,0
30	81,6	80,5	79,2	77,7	76,2	74,6	72,9	70,9	68,8	66,6
20	74,8	73,2	71,3	69,3	67,1	64,7	62,2	59,5	57,0	54,8
10	84,7	62,4	59,4	56,6	53,8	51,3	48,7	46,8	45,3	44,6
°C / Hz	0,0159	0,0343	0,0739	0,159	0,343	0,739	1,59	3,43	7,39	15,9
30	81,8	80,8	79,5	78,2	76,7	75,1	73,4	71,6	69,4	66,5
20	74,8	73,4	71,9	70,1	68,1	65,8	63,2	60,4	57,4	54,3
10	64,9	62,7	60,2	57,4	54,4	51,4	48,4	45,5	42,8	40,2
0	50,8	47,9	45,1	42,3	39,6	37,0	34,5	32,1	29,7	27,2
-10	36,2	33,8	31,1	28,7	26,3	24,0	21,8	19,7	17,7	15,8
-20	22,4	20,2	17,9	15,9	14,2	12,5	10,9	9,5	8,4	7,4
-30	13,4	11,7	10,4	8,9	7,8	6,8	5,7	5,1	4,4	4,0



## Bitumen nr: 6

<b>Komplex modul</b>										
°C / Hz	0,0159	0,0343	0,0739	0,159	0,343	0,739	1,59	3,43	7,39	15,9
100	2,03	4,37	9,40	20,2	43,5	93,2	199	423	887	1810
90	5,80	12,50	26,9	57,7	123	262	554	1150	2370	4780
80	19,5	42,0	89,8	191	405	845	1740	3530	7050	13800
70	79,0	168	356	742	1520	3080	6130	12000	23000	43300
60	386	801	1640	3290	6490	12500	23800	44300	81200	147000
50	2290	4540	8820	16700	31100	56800	102000	181000	315000	543000
40	15500	28800	52200	92800	162000	280000	476000	796000	131E+06	2,13E+06
30	110000	192000	326000	544000	894000	1,45E+06	2,29E+06	3,58E+06	5,48E+06	8,24E+06
20	756000	1,30E+06	2,05E+06	3,17E+06	4,80E+06	7,11E+06	1,03E+07	1,47E+07	2,04E+07	2,77E+07
10	3,99E+06	7,63E+06	749	1,13E+07	140000					
°C / Hz	0,0159	0,0343	0,0739	0,159	0,343	0,739	1,59	3,43	7,39	15,9
30	77000	133000	227000	381000	631000	1,03E+06	1,64E+06	2,58E+06	3,97E+06	6,00E+06
20	578000	944000	1,43E+06	2,19E+06	3,34E+06	4,99E+06	7,32E+06	1,05E+07	1,49E+07	2,06E+07
10	3,91E+06	5,62E+06	8,04E+06	1,13E+07	1,57E+07	2,13E+07	2,86E+07	3,77E+07	4,89E+07	6,24E+07
0	2,01E+07	2,66E+07	3,48E+07	4,50E+07	5,72E+07	7,17E+07	8,85E+07	1,08E+08	1,29E+08	1,53E+08
-10	7,62E+07	9,33E+07	1,13E+08	1,34E+08	1,58E+08	1,83E+08	2,10E+08	2,37E+08	2,65E+08	2,93E+08
-20	1,63E+08	1,89E+08	2,16E+08	2,43E+08	2,72E+08	3,00E+08	3,28E+08	3,55E+08	3,81E+08	4,05E+08
-30	2,73E+08	3,01E+08	3,29E+08	3,57E+08	3,84E+08	4,09E+08	4,31E+08	4,54E+08	4,72E+08	4,90E+08
<b>Fasvinkel</b>										
°C / Hz	0,0159	0,0343	0,0739	0,159	0,343	0,739	1,59	3,43	7,39	15,9
100	90,0	90,0	89,8	89,6	89,4	89,0	88,5	87,7	87,1	86,4
90	89,8	89,7	89,4	89,1	88,6	87,8	86,6	85,3	83,8	82,7
80	89,5	89,2	88,6	87,8	86,7	85,3	83,7	82,0	80,2	78,6
70	88,6	87,7	86,5	85,1	83,4	81,5	79,5	77,5	75,6	73,9
60	86,1	84,4	82,6	80,5	78,3	76,2	74,1	72,2	70,4	68,8
50	81,0	78,7	76,3	74,0	71,8	69,8	67,9	66,2	64,6	63,0
40	73,5	71,0	68,7	66,7	64,8	63,1	61,3	59,5	57,7	55,9
30	65,3	63,1	61,1	59,2	57,2	55,3	53,3	51,2	49,1	47,1
20	63,8	54,6	52,3	50,1	47,8	45,8	43,5	41,5	39,6	38,1
10	90,0	44,1	72,1	28,4	64,0					
°C / Hz	0,0159	0,0343	0,0739	0,159	0,343	0,739	1,59	3,43	7,39	15,9
30	66,4	64,3	62,3	60,3	58,2	56,1	54,0	51,8	49,6	47,4
20	57,6	55,5	53,3	51,0	48,7	46,4	44,0	41,9	39,7	37,6
10	47,1	44,7	42,3	40,0	37,7	35,6	33,5	31,6	29,7	27,9
0	35,9	33,7	31,5	29,5	27,6	25,8	24,0	22,4	20,8	19,2
-10	25,8	23,9	21,9	20,3	18,6	17,1	15,6	14,1	12,7	11,5
-20	18,7	17,2	15,7	14,1	12,7	11,4	10,2	9,0	8,0	7,0
-30	13,7	12,1	10,7	9,5	8,3	7,2	6,3	5,4	4,9	4,2

## Bitumen nr: 7

<b>Komplex modul</b>										
°C / Hz	0,0159	0,0343	0,0739	0,159	0,343	0,739	1,59	3,43	7,39	15,9
100	2,82	6,0	12,9	27,8	59,7	128	271	570	1180	2390
90	8,32	17,9	38,5	82,5	176	371	772	1590	3200	6320
80	29,2	62,6	133	282	587	1210	2440	4840	9410	18000
70	123	259	538	1100	2220	4380	8470	16100	29900	54700
60	609	1240	2470	4830	9220	17300	31600	57000	101000	178000
50	3520	6760	12700	23200	41700	73500	128000	219000	371000	621000
40	22000	39500	69100	119000	202000	337000	556000	906000	145E+06	2,31E+06
30	140000	237000	390000	633000	1,01E+06	1,59E+06	2,47E+06	3,77E+06	5,67E+06	8,40E+06
20	778000	1,42E+06	2,19E+06	3,32E+06	4,94E+06	7,21E+06	1,03E+07	1,46E+07	2,03E+07	2,78E+07
10	7,41E+06	7,57E+06	1,06E+07	1,47E+07	1,98E+07	2,63E+07	3,44E+07	4,46E+07	5,75E+07	7,38E+07
°C / Hz	0,0159	0,0343	0,0739	0,159	0,343	0,739	1,59	3,43	7,39	15,9
30	38800	67900	117000	201000	337000	556000	904000	1,45E+06	2,29E+06	3,55E+06
20	267000	430000	684000	1,08E+06	1,67E+06	2,57E+06	3,90E+06	5,82E+06	8,57E+06	1,24E+07
10	1,68E+06	2,53E+06	3,76E+06	5,53E+06	8,03E+06	1,15E+07	1,61E+07	2,23E+07	3,03E+07	4,06E+07
0	9,11E+06	1,27E+07	1,75E+07	2,38E+07	3,18E+07	4,18E+07	5,43E+07	6,94E+07	8,74E+07	1,09E+08
-10	3,91E+07	5,05E+07	6,43E+07	8,10E+07	1,00E+08	1,23E+08	1,48E+08	1,76E+08	2,06E+08	2,39E+08
-20	1,31E+08	1,56E+08	1,85E+08	2,16E+08	2,48E+08	2,82E+08	3,17E+08	3,53E+08	3,88E+08	4,22E+08
-30	2,37E+08	2,72E+08	3,08E+08	3,45E+08	3,81E+08	4,17E+08	4,54E+08	4,87E+08	5,17E+08	5,46E+08
<b>Fasvinkel</b>										
°C / Hz	0,0159	0,0343	0,0739	0,159	0,343	0,739	1,59	3,43	7,39	15,9
100	90,0	89,9	89,7	89,5	89,1	88,5	87,5	86,5	85,1	84,0
90	89,5	89,4	89,1	88,6	87,7	86,5	85,0	83,4	81,6	80,1
80	89,1	88,6	87,7	86,5	85,0	83,2	81,3	79,3	77,3	75,4
70	87,5	86,2	84,6	82,7	80,7	78,5	76,3	74,2	72,3	70,6
60	83,8	81,8	79,5	77,2	74,8	72,5	70,4	68,6	66,9	65,5
50	77,6	75,0	72,4	70,0	67,9	66,0	64,3	62,7	61,3	59,8
40	69,4	66,9	64,8	62,9	61,1	59,5	58,0	56,4	54,8	53,2
30	61,4	59,4	57,5	55,8	54,1	52,3	50,6	48,9	47,1	45,5
20	56,1	51,6	49,5	47,6	45,7	43,8	42,1	40,4	39,1	37,8
10	0,0	42,5	40,5	38,7	37,2	35,7	34,8	34,2	33,4	33,8
°C / Hz	0,0159	0,0343	0,0739	0,159	0,343	0,739	1,59	3,43	7,39	15,9
30	69,6	67,2	64,8	62,5	60,3	58,3	56,3	54,5	52,8	50,9
20	60,4	58,2	56,1	54,1	52,2	50,3	48,4	46,5	44,5	42,6
10	51,5	49,5	47,4	45,3	43,2	41,2	39,1	37,2	35,3	33,5
0	42,4	40,1	37,9	35,8	33,7	31,8	29,9	28,0	26,3	24,6
-10	32,6	30,5	28,5	26,5	24,7	22,9	21,3	19,6	18,1	16,5
-20	23,1	21,2	19,5	17,9	16,2	14,8	13,3	11,9	10,6	9,5
-30	17,7	16,0	14,4	12,8	11,5	10,2	9,1	8,0	7,2	6,2

## Bitumen nr: 8

<b>Komplex modul</b>										
°C / Hz	0,0159	0,0343	0,0739	0,159	0,343	0,739	1,59	3,43	7,39	15,9
100	0,398	0,857	1,8	4,0	8,5	18,4	39,6	84,5	178,0	354
90	0,915	1,97	4,24	9,13	19,6	42,3	90,9	195	413	851
80	2,38	5,11	11,0	23,7	50,9	110	235	501	1050	2 190
70	7,15	15,4	33,1	71,2	153	326	693	1460	3 030	6 220
60	26	57	121	259	550	1160	2 410	4 960	10 100	20 300
50	131	280	594	1240	2 580	5 280	10 600	21200	41600	80 800
40	868	1800	3 680	7 430	14 800	28 900	55 800	106 000	200 000	370 000
30	8 140	16 000	30 900	58 700	110 000	203 000	369 000	6,59E+05	1,16E+06	2,01E+06
20	96 700	178 000	320 000	564 000	9,78E+05	1,66E+06	2,76E+06	4,48E+06	7,10E+06	1,10E+07
10	5,06E+05	1,90E+06	3,09E+06	4,90E+06	7,56E+06	1,14E+07	1,69E+07	2,45E+07	3,48E+07	4,92E+07
°C / Hz	0,0159	0,0343	0,0739	0,159	0,343	0,739	1,59	3,43	7,39	15,9
30	4 570	8 860	17 100	32 400	60 900	113 000	206 000	371000	656 000	1,13E+06
20	57 400	101000	175 000	304 000	521000	884 000	1,47E+06	2,40E+06	3,81E+06	5,90E+06
10	704 000	1,11E+06	1,73E+06	2,69E+06	4,10E+06	6,14E+06	9,02E+06	1,30E+07	1,82E+07	2,52E+07
0	5,84E+06	8,24E+06	1,16E+07	1,61E+07	2,19E+07	2,94E+07	3,88E+07	5,03E+07	6,40E+07	8,01E+07
-10	3,18E+07	4,14E+07	5,32E+07	6,72E+07	8,35E+07	1,02E+08	1,23E+08	1,45E+08	1,68E+08	1,92E+08
-20	1,24E+08	1,46E+08	1,69E+08	1,94E+08	2,18E+08	2,43E+08	2,67E+08	2,89E+08	3,10E+08	3,30E+08
-30	2,41E+08	2,65E+08	2,89E+08	3,12E+08	3,33E+08	3,54E+08	3,71E+08	3,87E+08	4,00E+08	4,13E+08
<b>Fasvinkel</b>										
°C / Hz	0,0159	0,0343	0,0739	0,159	0,343	0,739	1,59	3,43	7,39	15,9
100	89,2	88,8	89,2	89,6	89,8	89,7	89,9	90,0	89,6	89,4
90	88,9	89,4	89,6	89,8	89,8	89,8	89,7	89,7	89,8	90,0
80	89,6	89,8	89,8	89,8	89,7	89,4	89,0	88,2	87,5	86,7
70	89,8	89,8	89,7	89,4	89,0	88,4	87,5	86,5	85,5	84,3
60	89,7	89,4	89,0	88,4	87,5	86,4	85,2	84,0	82,7	81,5
50	88,7	88,0	87,0	85,8	84,4	83,0	81,5	80,1	78,6	77,2
40	85,4	84,2	82,8	81,2	79,6	78,0	76,4	74,8	73,2	71,5
30	79,3	77,7	76,0	74,3	72,6	70,9	69,0	67,1	65,0	62,7
20	70,9	69,1	67,2	65,1	62,9	60,6	58,2	55,7	53,3	51,4
10	90,0	58,1	55,4	52,7	50,1	47,9	45,9	44,4	43,4	43,2
°C / Hz	0,0159	0,0343	0,0739	0,159	0,343	0,739	1,59	3,43	7,39	15,9
30	80,1	78,5	76,8	75,0	73,3	71,5	69,7	67,7	65,6	63,4
20	70,9	69,3	67,6	65,6	63,5	61,2	58,7	56,0	53,2	50,5
10	59,7	57,5	55,1	52,4	49,6	46,9	44,2	41,7	39,2	36,8
0	45,9	43,4	40,9	38,5	36,2	33,9	31,7	29,6	27,5	25,4
-10	33,3	31,1	28,8	26,7	24,6	22,5	20,5	18,5	16,7	15,0
-20	21,2	19,2	17,2	15,3	13,5	11,9	10,4	9,1	8,0	7,0
-30	13,1	11,4	9,9	8,5	7,3	6,3	5,2	4,9	4,1	3,5

## Bitumen nr: 9

### Komplex modul

°C / Hz	0,0159	0,0343	0,0739	0,159	0,343	0,739	1,59	3,43	7,39	15,9
100	0,454	0,972	2,090	4,500	9,700	20,9	45,1	96,6	205	419
90	1,06	2,28	4,92	10,6	22,8	49,1	106	225	475	994
80	2,84	6,10	13,1	28,3	60,9	131	280	596	1250	2 590
70	8,86	19,1	41,1	88,2	189	403	850	1780	3 680	7 500
60	33,6	72,3	155	330	698	1460	3 010	6 140	12 400	24 600
50	180	375	781	1610	3 300	6 660	13 300	26 100	50 500	96 800
40	1 180	2 400	4 810	9 530	18 600	35 900	68 100	128 000	237 000	433 000
30	10 100	19 700	37 500	70 300	130 000	236 000	424 000	7,47E+05	1,30E+06	2,21E+06
20	109 000	200 000	355 000	622 000	1,07E+06	1,79E+06	2,94E+06	4,70E+06	7,33E+06	1,11E+07
10	1,68E+06	2,01E+06	3,25E+06	5,07E+06	7,67E+06	1,12E+07	1,57E+07	2,14E+07	2,84E+07	3,72E+07

°C / Hz	0,0159	0,0343	0,0739	0,159	0,343	0,739	1,59	3,43	7,39	15,9
30	1420	2 780	5 430	10 600	20 300	38 400	71800	132 000	238 000	4,15E+05
20	14 500	26 200	47 200	84 600	150 000	262 000	452 000	762 000	1,26E+06	2,05E+06
10	166 000	274 000	447 000	725 000	1,16E+06	1,84E+06	2,89E+06	4,44E+06	6,69E+06	9,86E+06
0	1,50E+06	2,26E+06	3,38E+06	5,01E+06	7,32E+06	1,05E+07	1,48E+07	2,05E+07	2,78E+07	3,69E+07
-10	1,00E+07	1,38E+07	1,87E+07	2,51E+07	3,31E+07	4,30E+07	5,49E+07	6,88E+07	8,49E+07	1,03E+08
-20	4,78E+07	5,98E+07	7,39E+07	8,98E+07	1,08E+08	1,27E+08	1,48E+08	1,70E+08	1,92E+08	2,14E+08
-30	1,03E+08	1,22E+08	1,44E+08	1,65E+08	1,88E+08	2,12E+08	2,35E+08	2,58E+08	2,79E+08	3,00E+08

### Fasvinkel

°C / Hz	0,0159	0,0343	0,0739	0,159	0,343	0,739	1,59	3,43	7,39	15,9
100	87,9	89,4	89,8	90,0	90,0	90,0	90,0	90,0	90,0	90,0
90	90,0	90,0	90,0	90,0	89,9	89,9	89,8	90,0	89,8	90,0
80	90,0	90,0	89,9	89,8	89,6	89,3	88,7	88,1	87,6	87,2
70	89,8	89,8	89,6	89,3	88,8	88,0	87,0	85,9	84,8	83,8
60	89,6	89,2	88,7	87,9	86,9	85,6	84,3	82,9	81,5	80,1
50	85,8	86,0	85,4	84,3	83,0	81,6	80,1	78,5	77,1	75,6
40	83,1	82,3	80,9	79,4	77,8	76,2	74,6	73,1	71,5	69,7
30	77,8	76,3	74,6	72,9	71,1	69,4	67,6	65,5	63,4	61,0
20	70,1	68,3	66,2	64,2	61,9	59,6	56,8	54,0	51,1	48,2
10	18,4	57,2	54,3	51,3	48,2	45,0	42,1	39,3	36,7	34,4

°C / Hz	0,0159	0,0343	0,0739	0,159	0,343	0,739	1,59	3,43	7,39	15,9
30	82,1	80,8	79,3	77,7	76,0	74,2	72,5	70,6	68,7	67,2
20	74,7	73,1	71,5	69,6	67,5	65,3	63,1	60,9	59,0	57,3
10	64,5	62,4	60,1	58,0	55,9	53,8	51,7	49,4	47,2	44,9
0	52,7	50,6	48,4	46,2	43,9	41,6	39,3	37,1	34,8	32,6
-10	41,0	38,7	36,4	34,1	32,0	29,8	27,7	25,8	23,6	21,8
-20	29,0	26,8	24,8	22,8	20,8	19,0	17,2	15,6	13,9	12,5
-30	22,2	20,2	18,4	16,6	14,8	13,1	11,7	10,5	9,2	8,0

## Bitumen nr: 10

<b>Komplex modul</b>										
°C / Hz	0,0159	0,0343	0,0739	0,159	0,343	0,739	1,59	3,43	7,39	15,9
100	0,734	1,560	3,340	7,160	15,350	33,0	70,8	152	322	656
90	1,81	3,87	8,29	17,8	38,2	82,0	176	374	786	1620
80	5,15	11,00	23,7	50,9	109,0	233	494	1035	2 145	4 370
70	17,3	37,3	79,9	171,0	363	761	1580	3 235	6 540	13 000
60	71,5	153,0	324	681	1410	2 880	5 810	11500	22 500	43 300
50	394	822	1690	3 420	6 810	13 350	25 600	48 550	90 700	167 500
40	2 670	5 335	10 450	20 000	37 650	69 800	127 500	230 000	408 500	716 500
30	21900	41050	75 100	135 500	239 500	418 500	719 000	1,22E+06	2,03E+06	3,31E+06
20	205 500	358 500	612 500	1025 000	1,69E+06	2,71E+06	4,29E+06	6,65E+06	1,01E+07	1,50E+07
10	1,28E+07	3,03E+06	4,71E+06	7,15E+06	1,06E+07	1,54E+07	2,18E+07	3,02E+07	4,11E+07	5,53E+07
°C / Hz	0,0159	0,0343	0,0739	0,159	0,343	0,739	1,59	3,43	7,39	15,9
30	17 600	32 400	59 200	107 000	190 000	333 000	576 000	979 000	1630 000	2,67E+06
20	171000	288 000	482 000	798 000	1300 000	2 100 000	3,32E+06	5,14E+06	7,80E+06	1,16E+07
10	1610 000	2,47E+06	3,74E+06	5,60E+06	8,28E+06	1,20E+07	1,70E+07	2,37E+07	3,24E+07	4,34E+07
0	1,11E+07	1,56E+07	2,15E+07	2,91E+07	3,89E+07	5,09E+07	6,56E+07	8,30E+07	1,03E+08	1,26E+08
-10	5,41E+07	6,89E+07	8,65E+07	1,07E+08	1,30E+08	1,56E+08	1,83E+08	2,12E+08	2,43E+08	2,73E+08
-20	1,81E+08	2,11E+08	2,41E+08	2,74E+08	3,05E+08	3,37E+08	3,66E+08	3,94E+08	4,20E+08	4,45E+08
-30	3,35E+08	3,65E+08	3,95E+08	4,24E+08	4,49E+08	4,74E+08	4,95E+08	5,14E+08	5,32E+08	5,45E+08
<b>Fasvinkel</b>										
°C / Hz	0,0159	0,0343	0,0739	0,159	0,343	0,739	1,59	3,43	7,39	15,9
100	89,9	90,0	89,9	89,8	89,9	89,9	89,9	89,8	89,9	90,0
90	90,0	90,0	90,0	89,8	89,6	89,4	89,0	88,4	87,9	87,9
80	89,9	89,8	89,6	89,4	89,0	88,3	87,3	86,3	85,0	83,7
70	89,7	89,4	88,9	88,3	87,4	86,2	84,8	83,3	81,8	80,2
60	88,9	88,2	87,2	85,9	84,5	82,9	81,2	79,5	77,9	76,4
50	86,5	85,0	83,4	81,6	79,7	77,8	76,0	74,3	72,7	71,2
40	81,6	79,5	77,4	75,3	73,4	71,6	69,9	68,3	66,7	64,9
30	74,0	71,8	69,9	68,0	66,2	64,4	62,6	60,6	58,7	56,5
20	67,0	63,4	61,3	59,3	57,1	54,9	52,6	50,3	48,3	46,2
10	84,2	53,0	50,5	48,0	45,6	43,5	41,4	39,6	38,2	37,7
°C / Hz	0,0159	0,0343	0,0739	0,159	0,343	0,739	1,59	3,43	7,39	15,9
30	56,9	59,0	61,1	63,1	65,1	66,9	68,8	70,7	72,6	74,7
20	45,4	47,8	50,3	52,9	55,3	57,6	59,8	61,9	63,8	65,7
10	33,6	35,7	37,9	40,3	42,8	45,3	47,8	50,4	52,9	55,2
0	22,8	24,8	26,8	28,8	30,9	33,0	35,3	37,6	40,0	42,6
-10	13,4	14,9	16,7	18,4	20,3	22,2	24,2	26,2	28,4	30,8
-20	6,4	7,3	8,2	9,5	10,7	12,3	13,8	15,5	17,5	19,4
-30	3,2	3,7	4,4	5,1	6,0	6,8	7,7	8,9	10,7	12,1

## Bitumen nr: 11

<b>Komplex modul</b>										
°C / Hz	0,0159	0,0343	0,0739	0,159	0,343	0,739	1,59	3,43	7,39	15,9
100	0,492	1,060	2,280	4,910	10,600	23	49	105	223	450
90	1,18	2,53	5,5	11,7	25,3	54,4	117	250	529	1090
80	3,18	6,86	14,8	31,8	68,3	147	314	664	1390	2 870
70	10,1	21,7	46,7	100,0	215	456	959	2 000	4 110	8 330
60	39,2	84,2	180	382	806	1680	3 450	7 000	14 000	27 600
50	203	431	902	1870	3 820	7 670	15 200	29 700	57 000	108 000
40	1350	2 760	5 570	11000	21500	41000	77 100	143 000	263 000	476 000
30	11800	23 000	43 600	81000	148 000	268 000	477 000	8,35E+05	1,43E+06	2,42E+06
20	129 000	230 000	404 000	699 000	1,19E+06	1,97E+06	3,20E+06	5,10E+06	7,90E+06	1,21E+07
10	1,15E+06	2,25E+06	3,59E+06	5,63E+06	8,58E+06	1,27E+07	1,86E+07	2,65E+07	3,71E+07	5,10E+07
°C / Hz	0,0159	0,0343	0,0739	0,159	0,343	0,739	1,59	3,43	7,39	15,9
30	9 400	17 900	33 700	62 600	115 000	207 000	369 000	646 000	1 110 000	1,87E+06
20	106 000	182 000	311 000	527 000	886 000	1470 000	2,39E+06	3,81E+06	5,92E+06	8,97E+06
10	1 160 000	1,81E+06	2,80E+06	4,27E+06	6,42E+06	9,47E+06	1,37E+07	1,94E+07	2,69E+07	3,65E+07
0	8,95E+06	1,25E+07	1,74E+07	2,39E+07	3,22E+07	4,27E+07	5,58E+07	7,44E+07	8,98E+07	1,11E+08
-10	4,60E+07	5,90E+07	7,46E+07	9,30E+07	1,14E+08	1,37E+08	1,62E+08	1,90E+08	2,19E+08	2,47E+08
-20	1,63E+08	1,89E+08	2,19E+08	2,48E+08	2,77E+08	3,05E+08	3,34E+08	3,60E+08	3,84E+08	4,06E+08
-30	3,04E+08	3,34E+08	3,59E+08	3,85E+08	4,09E+08	4,31E+08	4,52E+08	4,68E+08	4,81E+08	4,98E+08
<b>Fas vinkel</b>										
°C / Hz	0,0159	0,0343	0,0739	0,159	0,343	0,739	1,59	3,43	7,39	15,9
100	89,6	89,2	89,4	89,6	89,8	89,9	90,0	90,0	90,0	90,0
90	89,0	89,1	89,3	89,5	89,6	89,6	89,4	89,1	88,5	88,8
80	89,8	89,8	89,8	89,7	89,5	89,0	88,4	87,5	86,8	85,7
70	89,7	89,7	89,5	89,1	88,5	87,6	86,5	85,3	83,9	82,2
60	89,5	89,1	88,4	87,5	86,3	85,0	83,6	82,1	80,7	79,3
50	88,0	87,0	85,7	84,2	82,6	80,9	79,2	77,6	76,1	74,6
40	84,4	82,7	80,8	78,9	77,0	75,3	73,5	72,0	70,4	68,6
30	77,7	75,6	73,6	71,8	70,0	68,1	66,3	64,4	62,4	60,3
20	70,2	66,9	64,9	62,9	60,7	58,4	56,0	53,5	51,1	49,0
10	0,0	56,0	53,6	51,1	48,7	46,5	44,6	43,2	42,3	42,3
°C / Hz	0,0159	0,0343	0,0739	0,159	0,343	0,739	1,59	3,43	7,39	15,9
30	77,8	75,8	73,9	72,1	70,3	68,5	66,6	64,6	62,5	60,4
20	68,6	66,9	65,0	63,0	60,9	58,5	56,0	53,4	50,7	48,1
10	57,7	55,4	52,9	50,2	47,5	44,8	42,3	39,9	37,5	35,3
0	44,3	41,8	39,4	36,9	34,5	32,4	30,2	28,2	26,1	24,0
-10	31,7	29,6	27,4	25,2	23,2	21,2	19,4	17,4	15,6	14,2
-20	20,1	18,1	16,1	14,5	12,8	11,2	9,9	8,5	7,5	6,5
-30	12,4	10,9	9,3	8,3	7,0	5,9	4,8	4,2	4,0	3,1

## Bitumen nr: 12

<b>Komplex modul</b>										
°C / Hz	0,0159	0,0343	0,0739	0,159	0,343	0,739	1,59	3,43	7,39	15,9
100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
90	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
70	0,673	1,44	3,11	6,69	14,4	31,1	66,9	144	308	633
60	1,73	3,72	8,00	17,2	37,2	80,0	172	368	786	1630
50	5,18	11,2	24,1	51,8	111	240	511	1080	2 270	4 710
40	148	213	317	490	804	1410	2 630	5 090	10 100	20 100
30	966	1500	2 480	4 360	7 930	14 700	27 400	5,10E+04	9,42E+04	1,73E+05
20	9 140	15 100	25 500	43 400	74 300	127 000	219 000	374 000	636 000	1,07E+06
10	72 400	123 000	202 000	330 000	541 000	881 000	1 43E+06	2,31E+06	3,66E+06	5,70E+06
°C / Hz	0,0159	0,0343	0,0739	0,159	0,343	0,739	1,59	3,43	7,39	15,9
30	865	1360	2 220	3 650	6 060	10 200	18 100	33 000	59 900	1,05E+05
20	5 470	8 510	13 700	22 900	39 400	69 200	1,22E+05	2,17E+05	3,82E+05	6,58E+05
10	39 800	6,46E+04	1,07E+05	1,78E+05	3,00E+05	5,05E+05	8,44E+05	1,40E+06	2,30E+06	3,71E+06
0	3,76E+05	5,86E+05	9,24E+05	1,46E+06	2,32E+06	3,64E+06	5,64E+06	8,58E+06	1,28E+07	1,88E+07
-10	3,28E+06	4,89E+06	7,28E+06	1,07E+07	1,56E+07	2,23E+07	3,14E+07	4,34E+07	5,90E+07	7,86E+07
-20	1,40E+07	1,98E+07	2,77E+07	3,85E+07	5,23E+07	6,97E+07	9,16E+07	1,18E+08	1,48E+08	1,82E+08
-30	4,18E+07	5,63E+07	7,50E+07	9,82E+07	1,25E+08	1,58E+08	1,94E+08	2,32E+08	2,73E+08	3,13E+08
<b>Fasvinkel</b>										
°C / Hz	0,0159	0,0343	0,0739	0,159	0,343	0,739	1,59	3,43	7,39	15,9
100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
90	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
70	88,2	89,2	89,6	89,7	90,0	90,0	90,0	90,0	90,0	90,0
60	87,8	89,0	89,6	89,7	89,8	89,8	89,5	89,2	89,7	90,0
50	89,2	89,6	89,7	89,6	89,4	89,0	88,4	87,5	86,6	85,5
40	56,6	56,3	56,8	59,7	64,4	69,6	74,0	77,3	79,2	79,8
30	52,3	57,0	62,4	67,0	70,1	71,8	72,2	72,0	71,4	70,5
20	58,2	60,4	61,8	62,7	63,1	63,2	62,8	62,4	61,6	60,5
10	54,3	57,6	57,7	57,6	57,2	56,8	55,9	54,5	53,1	51,0
°C / Hz	0,0159	0,0343	0,0739	0,159	0,343	0,739	1,59	3,43	7,39	15,9
30	62,8	62,4	61,2	60,1	60,1	62,8	66,9	70,8	75,6	84,4
20	54,4	55,8	58,6	61,7	64,1	65,7	66,4	66,2	65,7	64,0
10	59,4	60,7	61,4	61,6	61,4	60,8	59,9	58,6	57,0	54,9
0	57,4	57,0	56,3	55,2	53,9	52,2	50,4	48,4	46,4	44,3
-10	50,7	49,1	47,4	45,3	43,4	41,3	39,2	37,0	34,8	32,5
-20	43,7	41,7	39,8	37,4	35,2	32,9	30,6	28,2	25,6	22,9
-30	38,0	35,5	33,0	30,4	28,1	25,7	23,1	20,4	17,9	15,7



## Bitumen nr: 13

<b>Komplex modul</b>										
°C / Hz	0,0159	0,0343	0,0739	0,159	0,343	0,739	1,59	3,43	7,39	15,9
100	0,455	0,979	2,11	4,53	9,76	21,0	45,3	97,2	207	414
90	1,05	2,26	4,9	10,5	22,6	48,7	105	224	477	988
80	2,75	5,92	12,7	27,4	59,1	127	272	580	1230	2 560
70	8,35	18,0	38,7	83,2	179	382	810	1700	3 550	7 300
60	30,2	65,0	140	298	633	1330	2 770	5 730	11 700	23 600
50	141	301	638	1340	2 780	5 700	11 600	23 200	46 100	90 300
40	906	1880	3 860	7 820	15 700	31 000	60 600	117 000	223 000	419 000
30	7 690	15 400	30 100	58 300	111 000	210 000	390 000	712 000	1,28E+06	2,24E+06
20	84 200	161 000	298 000	541 000	9,66E+05	1,69E+06	2,88E+06	4,79E+06	7,75E+06	1,22E+07
10	1,38E+06	1,77E+06	2,99E+06	4,90E+06	7,80E+06	1,20E+07	1,78E+07	2,58E+07	3,62E+07	4,95E+07
°C / Hz	0,0159	0,0343	0,0739	0,159	0,343	0,739	1,59	3,43	7,39	15,9
30	4 770	9 410	18 400	35 700	68 200	129 000	240 000	440 000	790 000	1,39E+06
20	52 300	94 800	171 000	307 000	545 000	954 000	1,63E+06	2,73E+06	4,43E+06	7,01E+06
10	634 000	1,05E+06	1,73E+06	2,81E+06	4,47E+06	6,95E+06	1,05E+07	1,55E+07	2,21E+07	3,08E+07
0	6,30E+06	9,33E+06	1,36E+07	1,94E+07	2,70E+07	3,67E+07	4,87E+07	6,32E+07	8,01E+07	9,93E+07
-10	4,07E+07	5,31E+07	6,80E+07	8,54E+07	1,05E+08	1,27E+08	1,50E+08	1,74E+08	1,99E+08	2,23E+08
-20	1,57E+08	1,81E+08	2,06E+08	2,31E+08	2,55E+08	2,79E+08	3,01E+08	3,22E+08	3,40E+08	3,57E+08
-30	2,84E+08	3,05E+08	3,27E+08	3,46E+08	3,64E+08	3,81E+08	3,97E+08	4,05E+08	4,09E+08	4,19E+08
<b>Fasvinkel</b>										
°C / Hz	0,0159	0,0343	0,0739	0,159	0,343	0,739	1,59	3,43	7,39	15,9
100	89,8	89,8	89,7	89,8	89,9	89,9	89,9	90,0	90,0	90,0
90	90,0	90,0	90,0	89,9	89,9	89,8	89,7	89,6	89,9	90,0
80	89,8	89,9	89,8	89,8	89,6	89,4	88,9	88,5	88,5	89,7
70	89,8	89,8	89,7	89,4	89,0	88,4	87,6	86,7	85,8	85,0
60	89,7	89,4	89,0	88,4	87,6	86,6	85,5	84,3	83,1	82,0
50	88,8	88,1	87,2	86,1	85,0	83,7	82,3	80,9	79,5	78,2
40	85,4	84,4	83,3	82,0	80,6	79,1	77,7	76,2	74,6	72,8
30	80,6	79,4	77,9	76,4	74,8	73,1	71,3	69,2	66,9	64,3
20	74,5	72,7	70,8	68,6	66,2	63,6	60,9	58,0	55,1	52,2
10	90,0	62,5	59,2	56,0	52,8	49,8	46,7	43,9	41,5	39,4
°C / Hz	0,0159	0,0343	0,0739	0,159	0,343	0,739	1,59	3,43	7,39	15,9
30	81,7	80,2	78,6	77,0	75,3	73,6	71,8	69,7	67,3	64,6
20	74,9	73,3	71,5	69,5	67,2	64,7	61,8	58,8	55,6	52,3
10	65,5	63,0	60,2	57,1	53,8	50,5	47,2	44,0	40,9	37,8
0	50,9	47,6	44,3	41,1	38,0	35,0	32,1	29,3	26,7	24,2
-10	34,5	31,5	28,6	25,9	23,3	21,0	18,7	16,7	14,8	13,0
-20	19,3	17,1	15,1	13,2	11,6	10,1	8,7	7,4	6,4	5,6
-30	10,9	9,5	8,1	6,9	5,8	5,0	4,3	3,6	3,0	39,0

## Bitumen nr: 14

<b>Komplex modul</b>										
°C / Hz	0,0159	0,0343	0,0739	0,159	0,343	0,739	1,59	3,43	7,39	15,9
100	0,607	1,31	2,82	6,06	13,0	28	60	129	276	556
90	1,45	3,13	6,7	14,5	31,3	67,4	145	308	651	1340
80	3,97	8,54	18,4	39,6	85,0	182	388	817	1700	3 470
70	12,6	27,2	58,5	126,0	268	566	1 180	2 430	4 960	9 950
60	48,5	104,0	222	469	979	2 020	4 100	8 210	16 200	31 500
50	241	508	1060	2 160	4 360	8 660	16 900	32 600	61 900	116 000
40	1720	3 370	6 600	12 800	24 300	45 700	84 700	155 000	281 000	502 000
30	14 800	28 100	51 900	94 700	170 000	302 000	527 000	9,08E+05	1,54E+06	2,56E+06
20	149 000	263 000	453 000	771 000	1,28E+06	2,10E+06	3,36E+06	5,26E+06	8,09E+06	1,22E+07
10	631 000	2,25E+06	3,55E+06	5,47E+06	8,21E+06	1,21E+07	1,73E+07	2,43E+07	3,36E+07	4,54E+07
°C / Hz	0,0159	0,0343	0,0739	0,159	0,343	0,739	1,59	3,43	7,39	15,9
30	2 210	4 320	8 390	16 100	30 500	56 800	104 000	188 000	332 000	5,83E+05
20	22 500	40 300	71 300	125 000	217 000	373 000	633 000	1,06E+06	1,74E+06	2,82E+06
10	221 000	362 000	588 000	949 000	1,52E+06	2,40E+06	3,74E+06	5,72E+06	8,59E+06	1,27E+07
0	1,80E+06	2,72E+06	4,08E+06	6,05E+06	8,84E+06	1,27E+07	1,80E+07	2,49E+07	3,40E+07	4,56E+07
-10	1,14E+07	1,58E+07	2,15E+07	2,90E+07	3,86E+07	5,06E+07	6,54E+07	8,31E+07	1,05E+08	1,29E+08
-20	5,31E+07	6,76E+07	8,50E+07	1,06E+08	1,29E+08	1,56E+08	1,86E+08	2,19E+08	2,52E+08	2,87E+08
-30	1,21E+08	1,45E+08	1,74E+08	2,05E+08	2,39E+08	2,73E+08	3,11E+08	3,48E+08	3,83E+08	4,15E+08
<b>Fasvinkel</b>										
°C / Hz	0,0159	0,0343	0,0739	0,159	0,343	0,739	1,59	3,43	7,39	15,9
100	90,0	89,9	89,8	89,9	89,8	89,8	89,6	89,4	89,3	90,0
90	90,0	90,0	89,9	89,9	89,7	89,6	89,1	88,5	87,9	87,7
80	89,7	89,8	89,7	89,6	89,2	88,7	87,8	86,8	85,4	83,5
70	89,8	89,6	89,3	88,8	88,0	86,9	85,6	84,2	82,7	80,9
60	89,3	88,7	87,9	86,8	85,4	84,0	82,4	80,7	79,1	77,4
50	87,4	86,1	84,7	83,1	81,3	79,6	77,8	76,1	74,5	73,1
40	78,6	78,7	77,7	76,3	74,8	73,3	71,7	70,3	68,8	67,2
30	74,2	72,7	71,1	69,4	67,8	66,2	64,4	62,6	60,6	58,6
20	66,6	64,7	62,7	60,8	58,7	56,3	54,1	51,8	49,7	47,8
10	49,5	54,5	51,8	49,3	46,9	44,7	42,8	41,0	39,8	39,2
°C / Hz	0,0159	0,0343	0,0739	0,159	0,343	0,739	1,59	3,43	7,39	15,9
30	82,2	80,5	78,5	76,4	74,3	72,3	70,3	68,5	66,4	63,4
20	73,3	71,3	69,4	67,3	65,4	63,5	61,6	59,7	57,8	55,4
10	63,1	61,2	59,3	57,3	55,3	53,3	51,2	49,0	46,8	44,6
0	52,8	50,7	48,5	46,3	44,1	41,9	39,7	37,6	35,6	33,6
-10	41,6	39,4	37,2	35,1	33,2	31,4	29,4	27,5	25,8	24,1
-20	31,0	29,0	27,2	25,2	23,4	21,7	19,8	17,9	16,3	14,7
-30	24,7	22,9	21,1	19,1	17,5	15,6	13,9	12,3	11,0	9,6

## Bitumen nr: 15

<b>Komplex modul</b>										
°C / Hz	0,0159	0,0343	0,0739	0,159	0,343	0,739	1,59	3,43	7,39	15,9
100	0,510	1,10	2,36	5,07	10,9	23,4	50,4	108	228	457
90	1,20	2,59	5,6	12,0	25,7	55,2	118	253	533	1100
80	3,22	6,91	14,9	31,9	68,6	147	313	661	1380	2830
70	10,0	21,5	46,2	99,2	212	448	938	1940	3960	7980
60	37,4	80,3	171	363	760	1570	3200	6440	12800	25000
50	179	378	789	1620	3280	6540	12900	24900	47600	89700
40	1160	2350	4670	9150	17600	33500	62700	116000	211000	380000
30	10300	19600	36600	67100	122000	217000	384000	6,68E+05	1,14E+06	1,93E+06
20	103000	185000	322000	551000	930000	1,54E+06	2,51E+06	4,01E+06	6,28E+06	9,63E+06
10	9,26E+05	1,63E+06	2,63E+06	4,10E+06	6,30E+06	9,43E+06	1,39E+07	2,00E+07	2,85E+07	3,98E+07
°C / Hz	0,0159	0,0343	0,0739	0,159	0,343	0,739	1,59	3,43	7,39	15,9
30	8150	15400	28900	53400	97400	175000	311000	546000	942000	1,59E+06
20	92300	157000	268000	452000	756000	1,25E+06	2,04E+06	3,26E+06	5,09E+06	7,78E+06
10	928000	1,45E+06	2,25E+06	3,45E+06	5,21E+06	7,76E+06	1,13E+07	1,62E+07	2,27E+07	3,13E+07
0	6,81E+06	9,67E+06	1,36E+07	1,89E+07	2,60E+07	3,50E+07	4,65E+07	6,08E+07	7,83E+07	9,90E+07
-10	3,56E+07	4,67E+07	6,04E+07	7,70E+07	9,68E+07	1,20E+08	1,46E+08	1,75E+08	2,06E+08	2,39E+08
-20	1,41E+08	1,69E+08	1,99E+08	2,31E+08	2,65E+08	2,99E+08	3,33E+08	3,67E+08	3,99E+08	4,29E+08
-30	2,90E+08	3,25E+08	3,61E+08	3,95E+08	4,27E+08	4,60E+08	4,86E+08	5,12E+08	5,35E+08	5,56E+08
<b>Fasvinkel</b>										
°C / Hz	0,0159	0,0343	0,0739	0,159	0,343	0,739	1,59	3,43	7,39	15,9
100	88,6	89,1	89,4	89,6	89,7	89,8	89,7	90,0	89,7	88,8
90	88,8	89,2	89,4	89,5	89,5	89,5	89,2	88,6	87,4	87,8
80	90,0	89,8	89,7	89,5	89,2	88,7	88,0	87,0	86,3	85,8
70	89,7	89,5	89,3	88,8	88,1	87,1	85,9	84,5	83,0	81,2
60	89,3	88,8	88,1	87,0	85,8	84,4	82,8	81,3	79,6	78,0
50	87,7	86,6	85,2	83,6	81,9	80,2	78,5	76,8	75,2	73,7
40	82,7	81,3	79,7	77,9	76,1	74,4	72,8	71,2	69,7	68,2
30	75,7	74,0	72,2	70,5	68,9	67,3	65,6	63,9	62,0	60,2
20	67,7	65,8	64,0	62,1	60,2	58,2	56,0	53,8	51,6	49,7
10	12,0	56,2	53,8	51,5	49,1	46,9	45,2	43,4	42,2	41,4
°C / Hz	0,0159	0,0343	0,0739	0,159	0,343	0,739	1,59	3,43	7,39	15,9
30	77,6	75,6	73,7	71,8	70,0	68,3	66,6	64,8	62,9	60,7
20	67,7	66,1	64,4	62,6	60,6	58,6	56,3	53,9	51,4	48,9
10	57,5	55,5	53,2	50,9	48,4	45,9	43,5	41,2	39,1	37,0
0	45,6	43,1	40,7	38,5	36,4	34,4	32,5	30,5	28,6	26,6
-10	34,1	32,0	30,1	28,1	26,1	24,1	22,2	20,4	18,5	16,7
-20	23,3	21,3	19,1	17,4	15,6	13,9	12,3	10,8	9,5	8,4
-30	14,9	13,2	11,9	10,2	8,8	7,7	6,6	5,7	4,9	4,4

## Bitumen nr: 16

<b>Komplex modul</b>										
°C / Hz	0,0159	0,0343	0,0739	0,159	0,343	0,739	1,59	3,43	7,39	15,9
100	0,568	1,190	2,540	5,410	11,600	25	53	114	242	485
90	1,32	2,82	6,0	12,9	27,6	59,2	127	272	572	1180
80	3,56	7,60	16,3	35,0	75,1	161	342	721	1500	3060
70	11,3	24,2	51,9	111,0	237	500	1050	2160	4370	8740
60	43,3	92,9	198	418	872	1790	3630	7240	14200	27500
50	211	444	921	1880	3790	7480	14500	27700	52200	96900
40	1390	2780	5480	10600	20100	37600	69100	125000	225000	399000
30	12000	22500	41300	74900	133000	234000	406000	6,94E+05	1,17E+06	1,95E+06
20	111000	195000	333000	564000	9,37E+05	1,53E+06	2,46E+06	3,88E+06	6,04E+06	9,17E+06
10	5,18E+05	1,58E+06	2,51E+06	3,90E+06	5,94E+06	8,84E+06	1,30E+07	1,87E+07	2,65E+07	3,72E+07
°C / Hz	0,0159	0,0343	0,0739	0,159	0,343	0,739	1,59	3,43	7,39	15,9
30	8310	15700	29200	53900	98100	176000	312000	545000	938000	1,58E+06
20	90400	154000	262000	441000	737000	1220000	1,98E+06	3,17E+06	4,95E+06	7,54E+06
10	905000	1,41E+06	2,18E+06	3,34E+06	5,04E+06	7,50E+06	1,09E+07	1,56E+07	2,19E+07	3,02E+07
0	6,60E+06	9,38E+06	1,32E+07	1,83E+07	2,50E+07	3,35E+07	4,43E+07	5,76E+07	7,37E+07	9,28E+07
-10	3,44E+07	4,48E+07	5,78E+07	7,34E+07	9,19E+07	1,14E+08	1,37E+08	1,64E+08	1,93E+08	2,23E+08
-20	1,32E+08	1,58E+08	1,86E+08	2,17E+08	2,48E+08	2,81E+08	3,12E+08	3,44E+08	3,74E+08	4,03E+08
-30	2,68E+08	3,01E+08	3,35E+08	3,66E+08	3,98E+08	4,28E+08	4,56E+08	4,82E+08	5,06E+08	5,30E+08
<b>Fasvinkel</b>										
°C / Hz	0,0159	0,0343	0,0739	0,159	0,343	0,739	1,59	3,43	7,39	15,9
100	85,0	86,6	87,8	88,5	89,1	89,2	89,4	89,6	89,5	89,5
90	87,3	88,0	88,7	89,1	89,3	89,2	88,9	88,5	88,1	85,9
80	88,3	88,9	89,2	89,2	89,0	88,6	87,7	86,7	85,3	83,8
70	89,0	89,1	89,1	88,6	87,8	86,7	85,4	84,0	82,5	81,0
60	89,0	88,6	87,7	86,6	85,1	83,6	81,9	80,2	78,5	76,9
50	87,3	86,0	84,5	82,7	80,8	78,9	77,0	75,3	73,6	72,1
40	81,6	80,1	78,3	76,4	74,4	72,6	71,0	69,4	67,9	66,4
30	74,0	72,3	70,5	68,7	67,0	65,4	63,7	62,2	60,5	58,6
20	65,6	64,2	62,2	60,5	58,6	56,6	54,6	52,6	50,6	48,7
10	1,6	55,0	52,7	50,6	48,4	46,2	44,5	43,1	41,9	41,3
°C / Hz	0,0159	0,0343	0,0739	0,159	0,343	0,739	1,59	3,43	7,39	15,9
30	77,0	75,2	73,3	71,5	69,7	68,0	66,3	64,5	62,5	60,3
20	67,7	66,1	64,3	62,5	60,6	58,5	56,2	53,8	51,4	49,0
10	57,5	55,4	53,2	50,8	48,3	45,9	43,5	41,2	39,0	36,9
0	45,5	43,1	40,7	38,4	36,3	34,2	32,2	30,2	28,2	26,2
-10	34,0	31,8	29,8	27,7	25,8	23,7	21,9	20,0	18,1	16,4
-20	22,8	20,9	19,0	17,1	15,4	13,9	12,3	10,8	9,6	8,4
-30	15,2	13,9	12,1	10,6	9,4	8,2	7,2	6,2	5,4	4,8

## Bitumen nr: 17

<b>Komplex modul</b>										
°C / Hz	0,0159	0,0343	0,0739	0,159	0,343	0,739	1,59	3,43	7,39	15,9
100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
90	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
70	0,923	1,98	4,28	9,20	19,9	42,6	91,9	198	419	865
60	2,63	5,67	12,2	26,3	56,6	122	262	560	1190	2470
50	8,96	19,3	41,5	89,4	192	411	874	1840	3860	7980
40	38,0	81,8	176	376	798	1680	3510	7290	15000	30600
30	210	449	950	1990	4140	8530	17400	3,52E+04	7,07E+04	1,40E+05
20	1560	3240	6670	13600	2,74E+04	5,48E+04	1,08E+05	2,12E+05	4,11E+05	7,85E+05
10	1,55E+04	3,10E+04	6,13E+04	1,20E+05	2,31E+05	4,43E+05	8,35E+05	1,54E+06	2,79E+06	4,93E+06
°C / Hz	0,0159	0,0343	0,0739	0,159	0,343	0,739	1,59	3,43	7,39	15,9
30	158	338	712	1500	3120	6460	13200	26800	53000	1,01E+05
20	1170	2420	4960	10100	20200	40400	8,00E+04	1,57E+05	3,03E+05	5,78E+05
10	11600	23100	45500	89000	172000	330000	625000	1,16E+06	2,12E+06	3,76E+06
0	151000	287000	536000	990000	1790000	3170000	5460000	9,14E+06	1,48E+07	2,33E+07
-10	2,40E+06	4,13E+06	6,92E+06	1,13E+07	1,79E+07	2,74E+07	4,06E+07	5,81E+07	8,06E+07	1,08E+08
-20	3,35E+07	4,84E+07	6,76E+07	9,20E+07	1,21E+08	1,54E+08	1,91E+08	2,30E+08	2,69E+08	3,09E+08
-30	1,41E+08	1,77E+08	2,17E+08	2,58E+08	2,99E+08	3,40E+08	3,79E+08	4,15E+08	4,44E+08	4,74E+08
<b>Fasvinkel</b>										
°C / Hz	0,0159	0,0343	0,0739	0,159	0,343	0,739	1,59	3,43	7,39	15,9
100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
90	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
70	89,3	89,7	89,7	90,0	90,0	89,9	89,9	90,0	89,2	87,6
60	89,7	89,7	89,8	89,8	89,8	89,6	89,3	88,9	88,7	88,3
50	89,8	89,8	89,8	89,6	89,3	88,7	87,9	87,1	86,0	85,0
40	89,8	89,6	89,2	88,6	87,8	86,9	85,9	85,0	84,2	83,2
30	88,9	88,2	87,3	86,3	85,3	84,3	83,2	82,1	81,0	79,9
20	86,4	85,2	84,0	82,8	81,6	80,4	79,2	77,9	76,4	74,5
10	81,9	80,6	79,3	77,9	76,6	74,8	72,8	70,5	68,1	65,1
°C / Hz	0,0159	0,0343	0,0739	0,159	0,343	0,739	1,59	3,43	7,39	15,9
30	89,5	88,7	87,6	86,6	85,6	84,6	83,8	82,6	81,0	80,1
20	86,3	85,5	84,4	83,2	82,1	80,9	79,7	78,3	76,6	73,7
10	82,3	81,0	79,7	78,5	77,0	75,4	73,5	71,3	68,9	66,2
0	76,4	74,8	72,9	70,7	68,1	65,3	62,0	58,6	54,9	51,0
-10	66,0	62,9	59,5	55,9	52,1	48,2	44,2	40,2	36,4	32,5
-20	46,2	42,4	38,5	34,5	30,7	27,2	23,8	20,6	17,7	15,1
-30	30,0	26,3	22,8	19,8	16,9	14,3	12,0	10,0	8,5	7,1

## Bitumen nr: 18

<b>Komplex modul</b>										
°C / Hz	0,0159	0,0343	0,0739	0,159	0,343	0,739	1,59	3,43	7,39	15,9
100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
90	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
70	1,59	3,41	7,33	15,8	34,1	73,3	157	340	715	1480
60	4,83	10,4	22,4	48,3	104	222	473	1000	2 090	4 290
50	17,9	38,5	83	178	380	802	1680	3 460	7 060	14 300
40	83,3	179	380	801	1670	3 440	6 990	14 000	27 900	54 800
30	500	1050	2 160	4 410	8 880	17 600	34 500	67 000	128 000	245 000
20	3 830	7 690	15 200	29 500	56 800	108 000	204 000	379 000	698 000	1,27E+06
10	33 200	68 300	128 000	239 000	437 000	791000	1,41E+06	2,47E+06	4,24E+06	7,12E+06
°C / Hz	0,0159	0,0343	0,0739	0,159	0,343	0,739	1,59	3,43	7,39	15,9
30	429	894	1850	3 770	7 600	15 100	29 700	57 800	109 000	2,03E+05
20	3 300	6 600	13 000	25 200	48 300	91900	173 000	323 000	597 000	1,07E+06
10	31300	59 200	111000	205 000	376 000	681000	1,21E+06	2,13E+06	3,66E+06	6,13E+06
0	353 000	631000	1,11E+06	1,92E+06	3,27E+06	5,44E+06	8,85E+06	1,40E+07	2,16E+07	3,24E+07
-10	4,38E+06	7,07E+06	1,12E+07	1,72E+07	2,59E+07	3,79E+07	5,39E+07	7,46E+07	1,00E+08	1,31E+08
-20	4,56E+07	6,37E+07	8,66E+07	1,14E+08	1,46E+08	1,83E+08	2,22E+08	2,64E+08	3,06E+08	3,48E+08
-30	1,70E+08	2,09E+08	2,52E+08	2,94E+08	3,39E+08	3,82E+08	4,23E+08	4,61E+08	4,94E+08	5,24E+08
<b>Fasvinkel</b>										
°C / Hz	0,0159	0,0343	0,0739	0,159	0,343	0,739	1,59	3,43	7,39	15,9
100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
90	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
70	90,0	90,0	89,8	90,0	89,9	89,9	89,7	88,7	88,0	87,4
60	90,0	90,0	89,9	89,6	89,3	88,9	87,9	86,9	85,9	84,4
50	89,9	89,7	89,4	88,8	87,9	86,9	85,8	84,6	83,5	82,5
40	89,2	88,6	87,6	86,5	85,2	83,9	82,5	81,2	80,1	79,0
30	86,9	85,6	84,2	82,7	81,1	79,7	78,3	77,1	75,9	74,8
20	82,3	80,6	78,9	77,4	76,0	74,7	73,4	72,1	70,4	68,7
10	67,8	74,2	73,0	71,6	70,1	68,4	66,5	64,4	62,1	59,7
°C / Hz	0,0159	0,0343	0,0739	0,159	0,343	0,739	1,59	3,43	7,39	15,9
30	86,4	85,5	84,3	82,9	81,6	80,1	79,0	78,1	77,8	79,5
20	82,6	81,0	79,4	77,9	76,5	75,2	73,9	72,4	70,9	69,1
10	76,3	74,8	73,4	72,0	70,5	68,7	66,7	64,5	62,1	59,5
0	69,5	67,7	65,7	63,4	61,0	58,2	55,3	52,3	49,1	45,8
-10	58,7	55,8	52,7	49,6	46,3	43,1	39,7	36,3	33,0	29,7
-20	41,5	38,1	34,7	31,5	28,2	24,9	22,0	19,1	16,5	14,1
-30	27,1	24,1	21,4	18,2	15,4	13,3	11,2	9,4	7,9	6,7

## Bitumen nr: 19

Komplex modul										
°C / Hz	0,0159	0,0343	0,0739	0,159	0,343	0,739	1,59	3,43	7,39	15,9
100	0,457	0,915	1,89	3,97	8,42	18,1	38,8	82,4	174	346
90	0,984	2,04	4	9	19,6	42,0	90,4	193	411	850
80	2,50	5,28	11,3	24,1	51,8	111	239	511	1080	2 240
70	7,56	16,2	34,7	74,5	160	343	729	1535	3 210	6 615
60	28,0	60,2	130	277	589	1240	2 590	5 355	10 950	22 200
50	131	280	594	1250	2 600	5 355	10 900	21950	43 700	86 150
40	786	1640	3 390	6 920	13 950	27 750	54 600	106 500	204 000	389 500
30	6 000	12 050	23 850	46 650	90 200	172 500	326 000	606 000	1,11E+06	2,00E+06
20	56 350	108 000	204 000	380 000	698 000	1,26E+06	2,22E+06	3,83E+06	6,42E+06	1,05E+07
10	640 000	1,14E+06	2,01E+06	3,44E+06	5,73E+06	9,29E+06	1,46E+07	2,21E+07	3,25E+07	4,62E+07
°C / Hz	0,0159	0,0343	0,0739	0,159	0,343	0,739	1,59	3,43	7,39	15,9
30	4 730	9 480	18 800	36 700	71 000	136 000	257 000	478 000	876 000	1,57E+06
20	45 100	85 500	160 000	295 000	538 000	967 000	1,70E+06	2,94E+06	4,92E+06	8,03E+06
10	514 000	914 000	1,59E+06	2,71E+06	4,50E+06	7,29E+06	1,15E+07	1,75E+07	2,59E+07	3,72E+07
0	5,94E+06	9,37E+06	1,44E+07	2,13E+07	3,08E+07	4,31E+07	5,88E+07	7,78E+07	1,00E+08	1,25E+08
-10	4,86E+07	6,52E+07	8,54E+07	1,09E+08	1,35E+08	1,64E+08	1,94E+08	2,25E+08	2,56E+08	2,85E+08
-20	2,09E+08	2,41E+08	2,73E+08	3,04E+08	3,34E+08	3,62E+08	3,87E+08	4,09E+08	4,28E+08	4,45E+08
-30	3,70E+08	3,95E+08	4,20E+08	4,42E+08	4,61E+08	4,78E+08	4,92E+08	5,05E+08	5,14E+08	5,24E+08
Fas vinkel										
°C / Hz	0,0159	0,0343	0,0739	0,159	0,343	0,739	1,59	3,43	7,39	15,9
100	81,3	83,3	85,5	87,2	88,4	89,1	89,6	90,0	90,0	90,0
90	83,7	85,5	87,2	88,3	88,9	89,4	89,6	89,7	89,9	90,0
80	86,3	87,7	88,5	89,1	89,3	89,4	89,1	88,6	87,9	86,8
70	88,2	88,9	89,2	89,3	89,1	88,6	87,8	86,9	86,1	85,3
60	89,2	89,3	89,1	88,6	87,8	86,8	85,7	84,6	83,4	82,4
50	88,9	88,4	87,5	86,4	85,3	83,9	82,7	81,4	80,2	79,0
40	86,8	85,6	84,3	82,9	81,4	80,1	78,7	77,4	76,0	74,4
30	82,6	81,0	79,5	78,0	76,5	75,1	73,5	71,7	69,7	67,3
20	76,7	75,2	73,6	71,8	69,9	67,5	65,0	62,3	59,2	56,4
10	52,2	67,0	64,3	61,5	58,4	55,3	52,2	49,1	46,6	45,1
°C / Hz	0,0159	0,0343	0,0739	0,159	0,343	0,739	1,59	3,43	7,39	15,9
30	82,7	81,2	79,6	78,2	76,7	75,2	73,6	71,7	69,5	67,0
20	76,8	75,3	73,7	72,0	70,0	67,7	65,1	62,2	59,1	55,8
10	69,3	67,0	64,4	61,5	58,3	54,9	51,5	47,9	44,4	40,9
0	55,9	52,4	48,8	45,2	41,6	38,2	34,8	31,5	28,4	25,3
-10	37,5	34,0	30,7	27,5	24,5	21,7	19,0	16,6	14,5	12,4
-20	19,1	17,1	14,5	12,5	10,7	9,1	7,5	6,5	5,8	4,6
-30	9,6	8,2	7,0	5,7	4,8	3,8	3,3	2,8	2,4	2,1



## Bitumen nr: 20

Komplex modul										
°C / Hz	0,0159	0,0343	0,0739	0,159	0,343	0,739	1,59	3,43	7,39	15,9
100	0,684	1,47	3,16	6,81	14,7	31,6	68,1	146	310	630
90	1,69	3,65	7,85	16,9	36,4	78,5	169	360	761	1570
80	4,83	10,4	22,4	48,3	104	223	474	998	2 080	4 250
70	16,3	35,1	75,5	162,0	345	729	1520	3 140	6 390	12 800
60	67,0	144,0	306	646	1350	2 770	5 620	11200	22 200	43 100
50	343	721	1500	3 060	6 170	12 200	23 800	45 900	87 400	164 000
40	2 170	4 390	8 720	17 000	32 600	61600	115 000	213 000	390 000	704 000
30	16 100	30 800	57 800	107 000	195 000	352 000	628 000	1,10E+06	1,90E+06	3,21E+06
20	134 000	245 000	436 000	762 000	1,31E+06	2,22E+06	3,65E+06	5,86E+06	9,10E+06	1,36E+07
10	2,00E+06	2,10E+06	3,44E+06	5,29E+06	8,33E+06	1,31E+07	1,98E+07	2,69E+07	3,76E+07	5,09E+07
°C / Hz	0,0159	0,0343	0,0739	0,159	0,343	0,739	1,59	3,43	7,39	15,9
30	12 800	24 400	46 000	85 600	157 000	286 000	513 000	907 000	1580 000	2,68E+06
20	109 000	196 000	347 000	609 000	1050 000	1790 000	2,99E+06	4,89E+06	7,79E+06	1,21E+07
10	1,02E+06	1,72E+06	2,82E+06	4,54E+06	7,15E+06	1,10E+07	1,65E+07	2,42E+07	3,46E+07	4,82E+07
0	9,11E+06	1,37E+07	2,01E+07	2,88E+07	4,03E+07	5,51E+07	7,35E+07	9,59E+07	1,22E+08	1,51E+08
-10	6,03E+07	7,92E+07	1,02E+08	1,28E+08	1,57E+08	1,89E+08	2,24E+08	2,59E+08	2,94E+08	3,28E+08
-20	2,40E+08	2,76E+08	3,12E+08	3,48E+08	3,82E+08	4,15E+08	4,44E+08	4,72E+08	4,95E+08	5,16E+08
-30	4,19E+08	4,50E+08	4,79E+08	5,06E+08	5,30E+08	5,48E+08	5,68E+08	5,83E+08	5,96E+08	6,08E+08
Fasvinkel										
°C / Hz	0,0159	0,0343	0,0739	0,159	0,343	0,739	1,59	3,43	7,39	15,9
100	90,0	89,9	89,9	89,8	89,9	89,9	89,8	89,7	90,0	90,0
90	89,5	89,7	89,8	89,8	89,8	89,7	89,2	88,8	88,0	88,0
80	89,7	89,8	89,8	89,6	89,3	88,7	87,8	86,8	85,6	84,4
70	89,8	89,7	89,4	88,8	87,9	86,8	85,5	84,1	82,7	81,4
60	89,3	88,7	87,8	86,6	85,2	83,7	82,2	80,6	79,1	77,7
50	87,3	86,0	84,6	82,9	81,1	79,4	77,7	76,3	74,9	73,6
40	83,2	81,3	79,4	77,5	75,7	74,2	72,7	71,3	69,8	68,2
30	76,7	74,7	73,0	71,4	69,9	68,4	66,6	64,6	62,4	59,8
20	69,8	68,1	66,3	64,5	62,3	60,0	57,2	54,1	50,5	47,1
10	90,0	59,1	56,9	55,7	50,5	51,7	47,7	42,4	40,2	38,2
°C / Hz	0,0159	0,0343	0,0739	0,159	0,343	0,739	1,59	3,43	7,39	15,9
30	77,5	75,6	73,9	72,3	70,8	69,2	67,5	65,6	63,4	61,1
20	70,6	69,0	67,3	65,5	63,5	61,2	58,7	56,1	53,4	50,6
10	62,6	60,3	57,8	55,1	52,3	49,4	46,4	43,5	40,5	37,6
0	50,3	47,3	44,2	41,3	38,3	35,3	32,5	29,6	26,8	24,2
-10	34,8	31,9	29,0	26,2	23,6	21,0	18,5	16,3	14,3	12,4
-20	19,0	16,7	14,5	12,5	10,8	9,1	7,7	6,5	5,6	4,7
-30	10,1	8,6	7,2	5,9	5,1	4,1	3,5	3,1	2,6	2,4

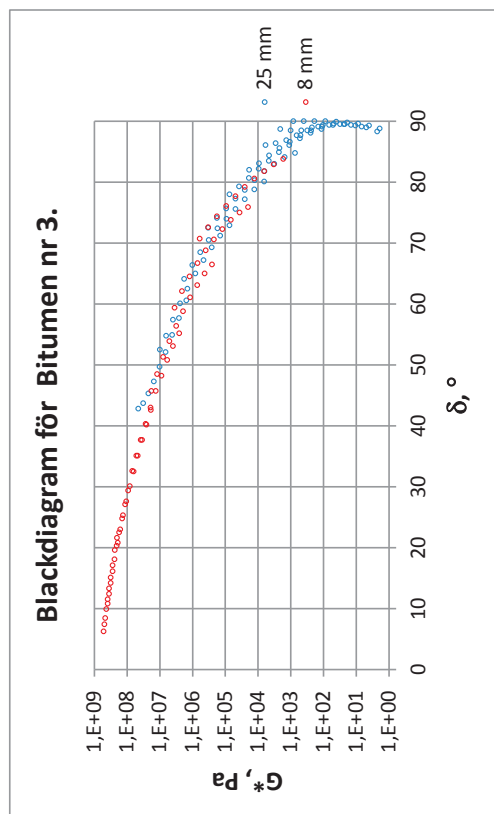
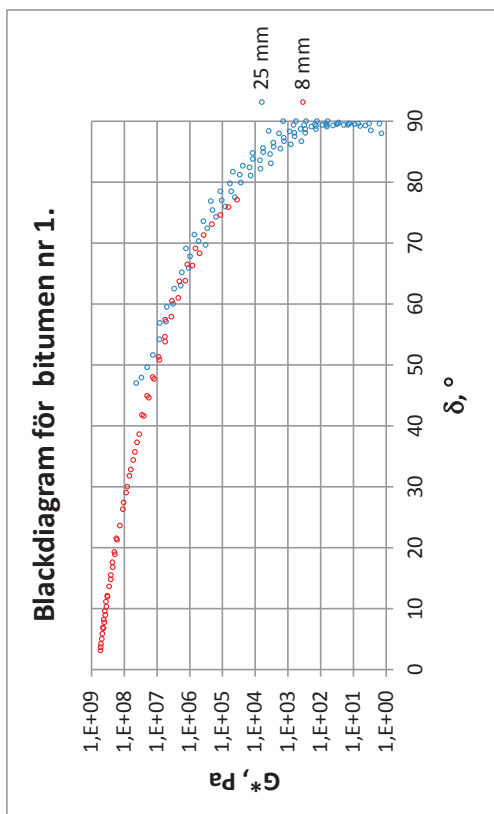
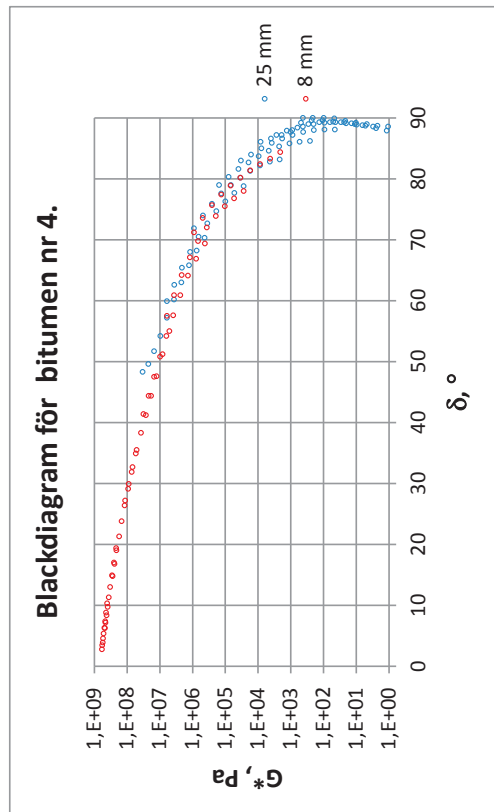
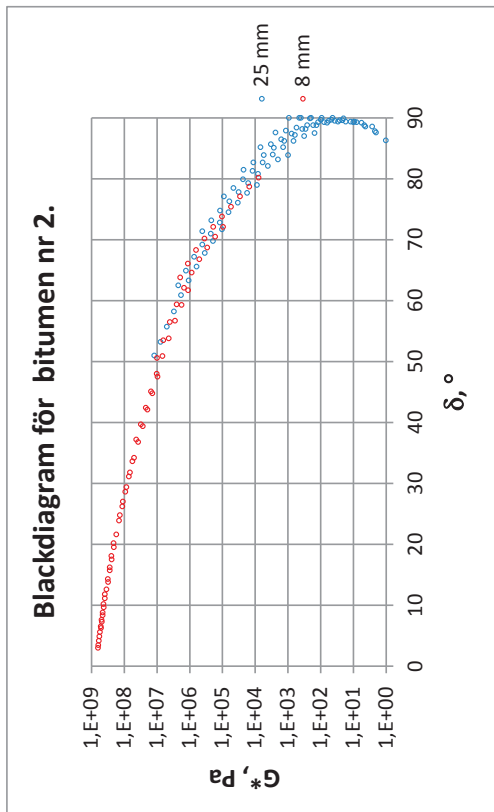
## Bitumen nr: 21

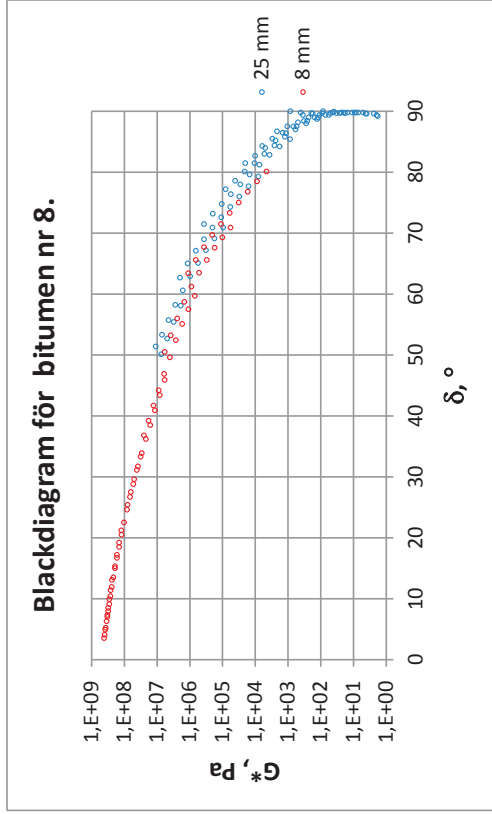
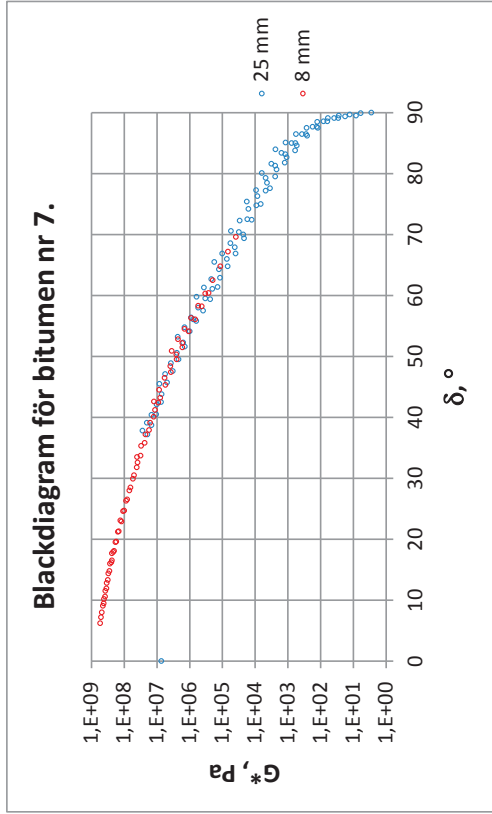
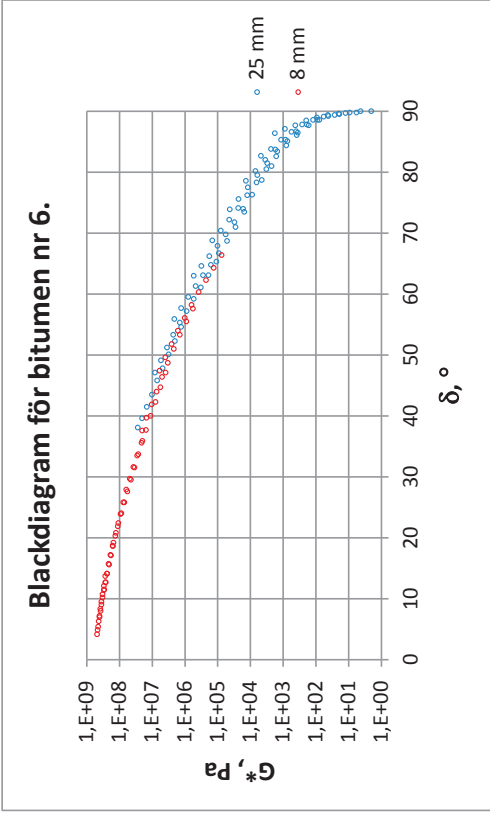
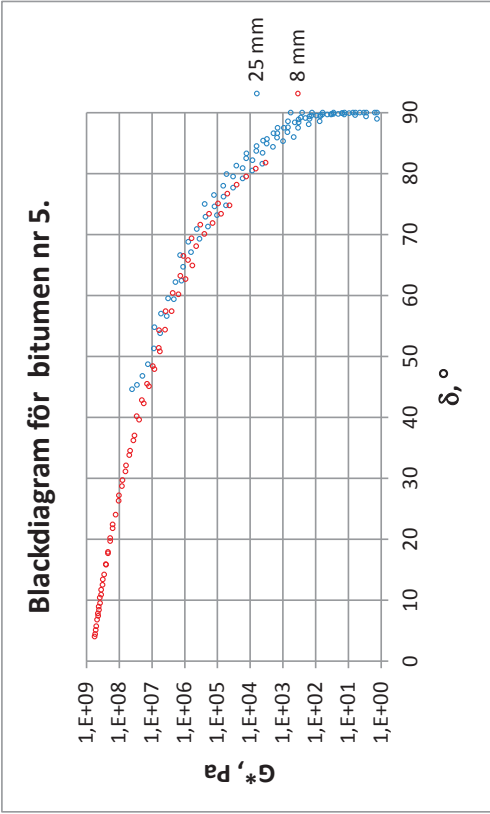
<b>Komplex modul</b>										
°C / Hz	0,0159	0,0343	0,0739	0,159	0,343	0,739	1,59	3,43	7,39	15,9
100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
90	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
70	1,15	2,47	5,30	11,4	24,4	52,4	112	237	502	993
60	3,49	7,51	16,1	34,6	74,0	158	331	691	1410	2 820
50	12,9	27,7	59,3	126	265	550	1 130	2 270	4 500	8 790
40	60,0	128	268	554	1 130	2 260	4 430	8 550	16 200	30 300
30	370	759	1530	3 010	5 830	11000	20 500	37 300	67 100	119 000
20	2 780	5 350	10 000	18 400	33 100	58 500	102 000	175 000	298 000	499 000
10	22 400	39 700	68 700	117 000	196 000	325 000	530 000	856 000	1,36E+06	2,12E+06
°C / Hz	0,0159	0,0343	0,0739	0,159	0,343	0,739	1,59	3,43	7,39	15,9
30	342	698	1400	2 780	5 390	10 300	19 100	35 100	61400	104 000
20	2 620	4 950	9 190	16 800	30 200	53 500	93 700	162 000	276 000	458 000
10	22 100	38 300	65 500	111000	186 000	307 000	505 000	819 000	1,31E+06	2,08E+06
0	178 000	285 000	455 000	719 000	1,13E+06	1,74E+06	2,67E+06	4,05E+06	6,05E+06	8,92E+06
-10	1,29E+06	1,93E+06	2,87E+06	4,23E+06	6,16E+06	8,88E+06	1,27E+07	1,79E+07	2,49E+07	3,43E+07
-20	8,32E+06	1,16E+07	1,62E+07	2,22E+07	3,01E+07	4,04E+07	5,38E+07	7,06E+07	9,44E+07	1,17E+08
-30	2,95E+07	3,91E+07	5,15E+07	6,72E+07	8,67E+07	1,11E+08	1,39E+08	1,73E+08	2,10E+08	2,52E+08
<b>Fasvinkel</b>										
°C / Hz	0,0159	0,0343	0,0739	0,159	0,343	0,739	1,59	3,43	7,39	15,9
100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
90	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
70	89,8	89,7	89,6	89,6	89,4	89,0	88,2	87,3	86,1	81,7
60	88,9	89,3	89,2	88,9	88,4	87,5	86,4	85,0	84,2	83,1
50	89,2	88,9	88,3	87,4	86,1	84,8	83,1	81,2	79,3	76,6
40	88,1	87,0	85,7	84,1	82,2	80,3	78,2	76,3	74,5	72,7
30	84,5	82,6	80,5	78,2	75,9	73,7	71,7	69,8	68,3	67,0
20	77,5	74,8	72,3	70,0	68,0	66,1	64,4	63,0	61,6	60,1
10	67,9	65,5	63,4	61,5	59,7	58,4	56,8	55,2	53,5	51,6
°C / Hz	0,0159	0,0343	0,0739	0,159	0,343	0,739	1,59	3,43	7,39	15,9
30	84,6	82,9	81,0	78,9	76,8	74,6	72,8	71,6	71,7	74,5
20	77,9	75,6	73,3	71,0	68,9	67,1	61,9	65,4	62,9	64,1
10	68,3	66,1	64,1	62,4	60,7	59,2	53,8	57,8	55,0	56,3
0	58,9	57,2	55,6	54,0	52,5	51,0	45,5	49,6	46,8	48,2
-10	50,2	48,6	46,9	45,5	43,9	42,5	37,0	41,0	38,4	39,7
-20	41,4	39,8	38,3	36,8	35,5	34,1	27,9	32,6	29,6	31,1
-30	35,3	33,7	32,3	30,8	29,3	27,5	20,2	25,9	22,1	24,1

## Bitumen nr: 22

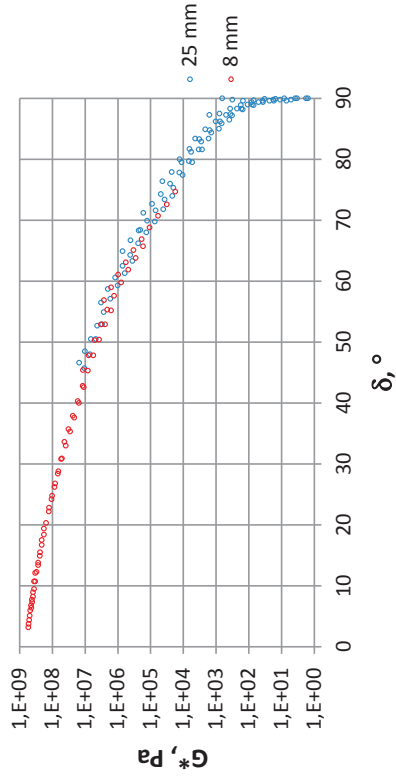
<b>Komplex modul</b>										
°C / Hz	0,0159	0,0343	0,0739	0,159	0,343	0,739	1,59	3,43	7,39	15,9
100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
90	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
70	1,92	4,14	8,91	19,1	41,0	87,6	185	389	794	1590
60	6,34	13,7	29,3	62,7	133	278	573	1170	2340	4560
50	25,8	55,1	116	244	502	1020	2020	3940	7540	14200
40	131	273	558	1120	2200	4240	7970	14700	26800	47900
30	827	1630	3140	5890	10800	19500	34400	60000	103000	177000
20	5890	10700	19000	33100	56500	95400	159000	262000	430000	698000
10	41900	69900	116000	188000	303000	482000	759000	1,19E+06	1,84E+06	2,84E+06
°C / Hz	0,0159	0,0343	0,0739	0,159	0,343	0,739	1,59	3,43	7,39	15,9
30	548	1090	2110	4000	7480	13600	24300	43000	74700	124000
20	4000	7190	12700	22200	38100	64700	109000	181000	297000	489000
10	30200	50000	81900	133000	214000	341000	540000	847000	1,32E+06	2,02E+06
0	209000	322000	493000	755000	1,14E+06	1,72E+06	2,56E+06	3,78E+06	5,52E+06	8,00E+06
-10	1,31E+06	1,91E+06	2,75E+06	3,96E+06	5,65E+06	7,97E+06	1,12E+07	1,55E+07	2,13E+07	2,90E+07
-20	7,45E+06	1,02E+07	1,39E+07	1,87E+07	2,50E+07	3,32E+07	4,39E+07	5,74E+07	7,41E+07	9,46E+07
-30	2,32E+07	3,06E+07	4,00E+07	5,22E+07	6,71E+07	8,55E+07	1,08E+08	1,35E+08	1,65E+08	2,00E+08
<b>Fasvinkel</b>										
°C / Hz	0,0159	0,0343	0,0739	0,159	0,343	0,739	1,59	3,43	7,39	15,9
100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
90	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
70	89,1	89,4	89,5	89,3	88,8	88,0	87,1	85,8	84,1	83,7
60	89,7	89,4	88,9	88,2	87,0	85,6	83,9	82,0	80,1	78,0
50	88,8	87,9	86,7	85,2	83,5	81,5	79,4	77,3	75,5	73,9
40	86,0	84,3	82,4	80,2	77,9	75,5	73,3	71,3	69,6	68,2
30	80,4	77,8	75,2	72,6	70,2	68,1	66,3	64,8	63,5	62,5
20	71,4	68,6	66,2	64,1	62,3	60,8	59,5	58,4	57,5	56,6
10	61,6	59,7	58,2	56,6	55,3	53,9	53,0	52,1	51,3	50,4
°C / Hz	0,0159	0,0343	0,0739	0,159	0,343	0,739	1,59	3,43	7,39	15,9
30	81,2	79,1	76,8	74,2	71,9	69,7	67,7	66,1	63,7	59,9
20	73,0	70,5	68,0	65,8	63,9	62,2	60,7	59,6	57,9	55,3
10	62,8	60,8	59,1	57,5	56,1	54,8	53,6	52,5	51,6	50,6
0	54,2	52,8	51,4	50,1	48,7	47,6	46,4	45,3	44,3	43,2
-10	46,6	45,2	43,9	42,6	41,4	40,2	39,1	38,0	37,0	35,9
-20	39,0	37,9	36,6	35,4	34,2	33,1	31,9	30,8	29,5	27,9
-30	34,1	32,9	31,8	30,4	29,2	27,6	26,4	24,9	23,1	21,2

# Bilaga 2 – Blackdiagram

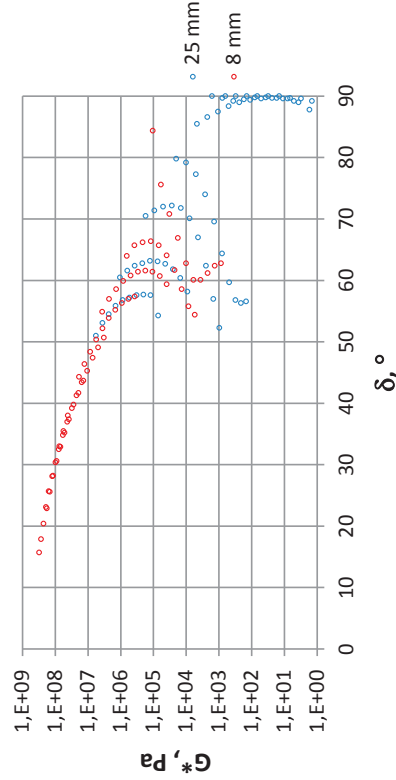




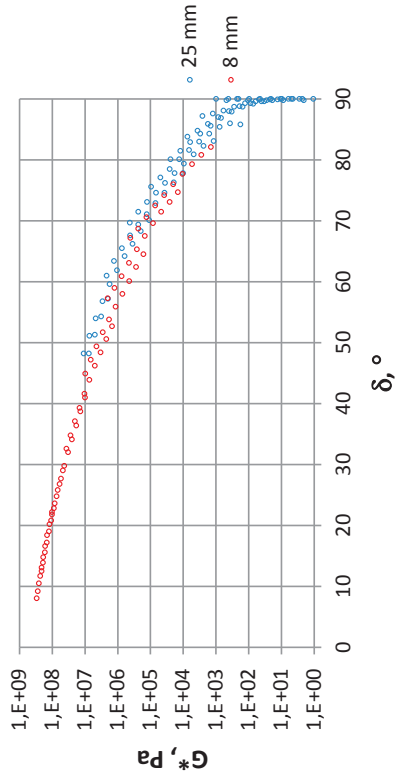
Blackdiagram för bitumen nr 10.



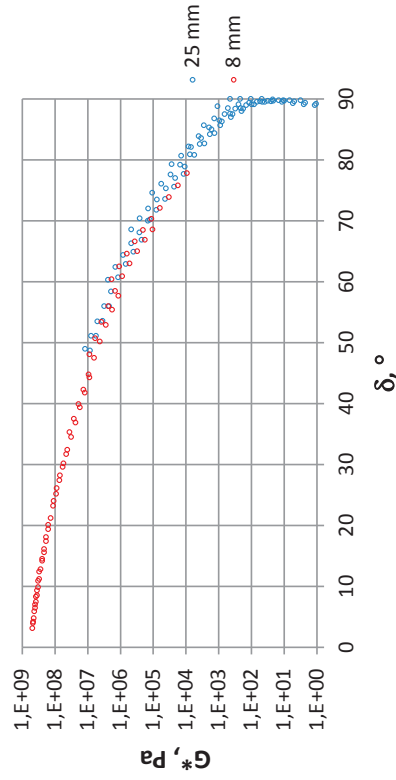
Blackdiagram för bitumen nr 12.

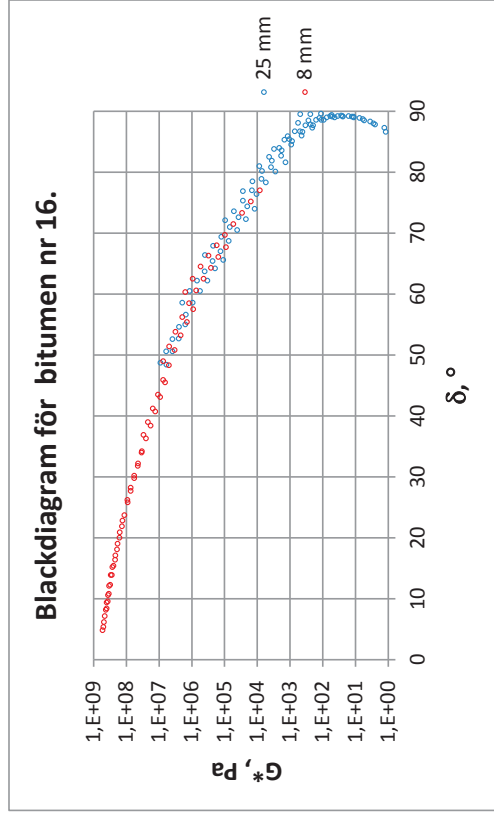
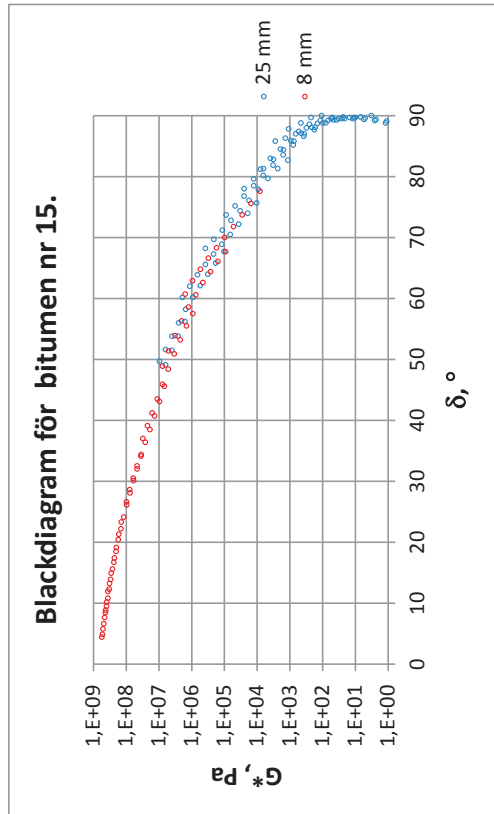
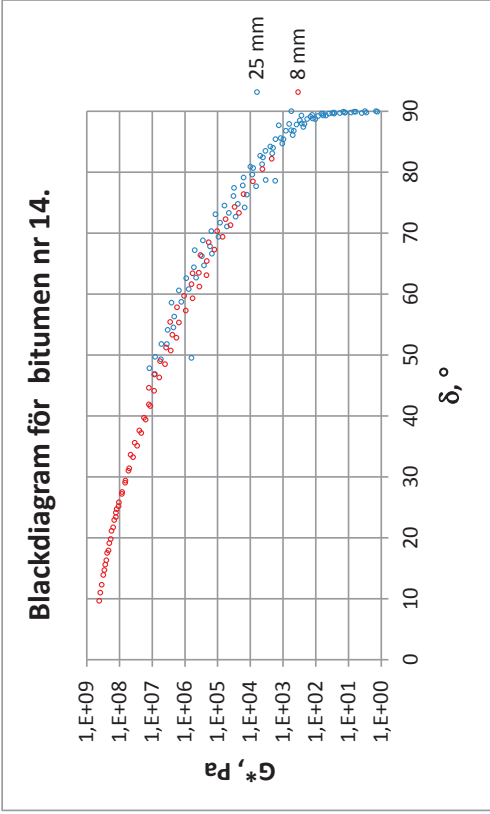
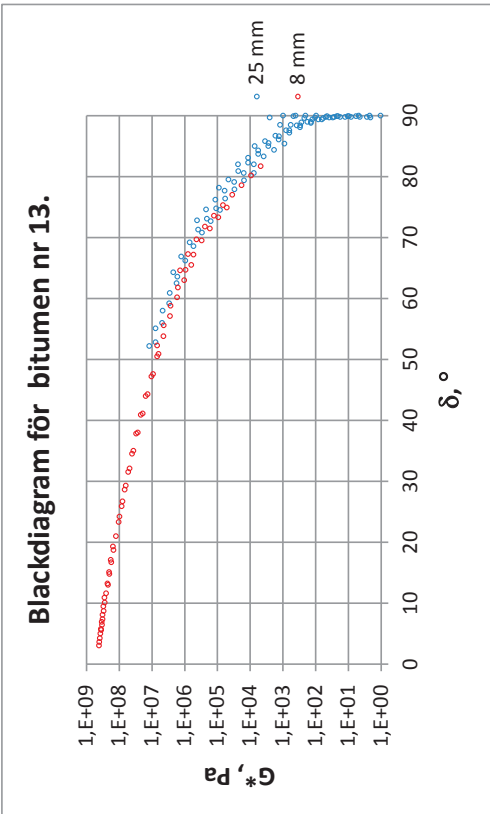


Blackdiagram för Bitumen nr 9.

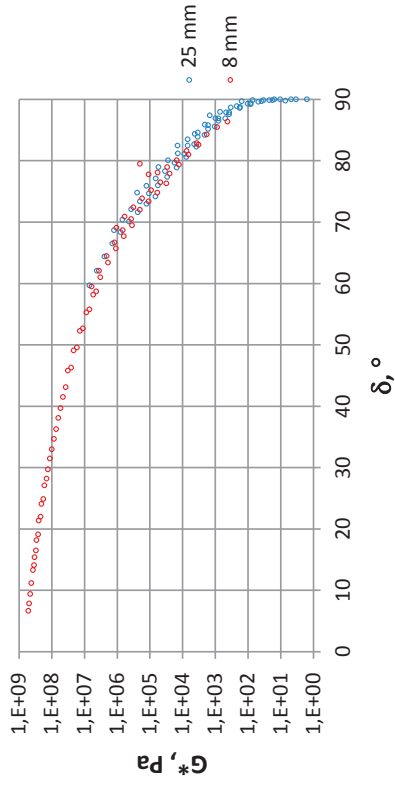


Blackdiagram för bitumen nr 11.

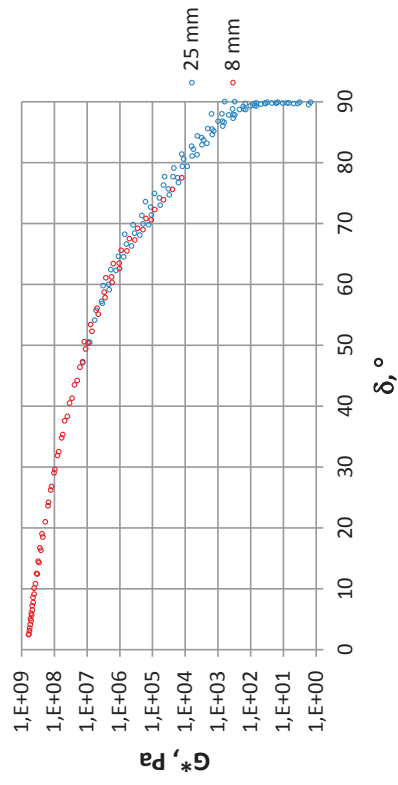




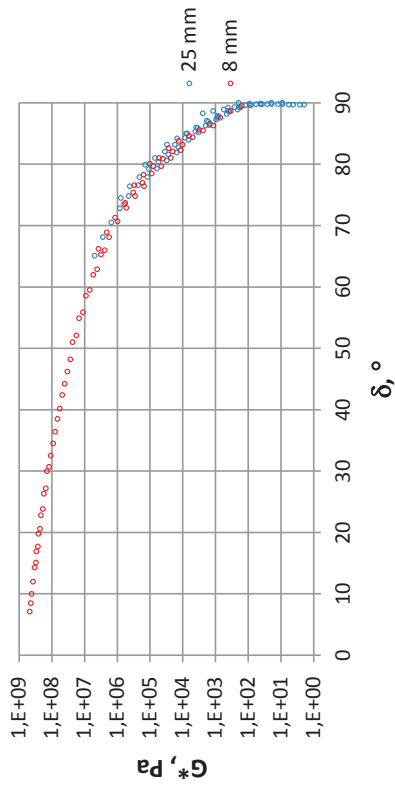
Blackdiagram för bitumen nr 18.



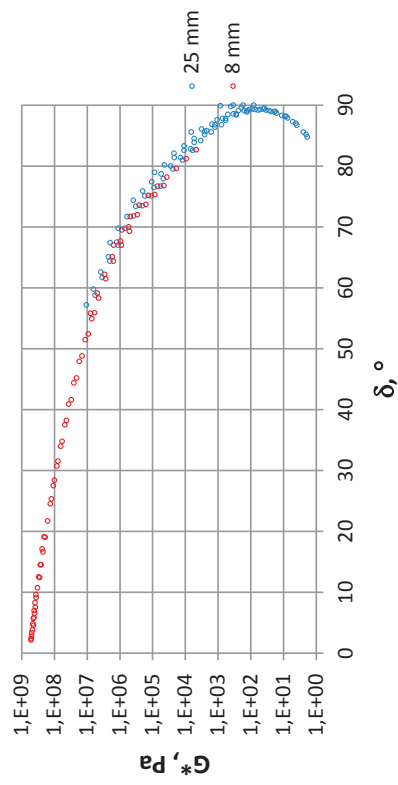
Blackdiagram för bitumen nr 20.



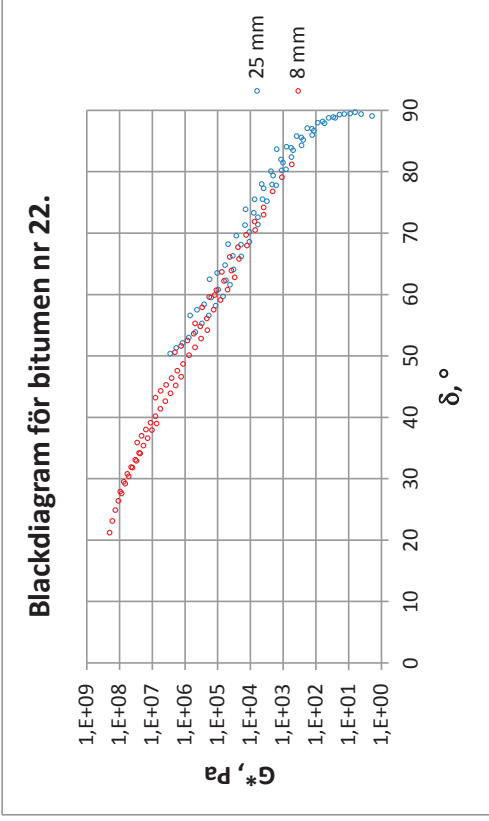
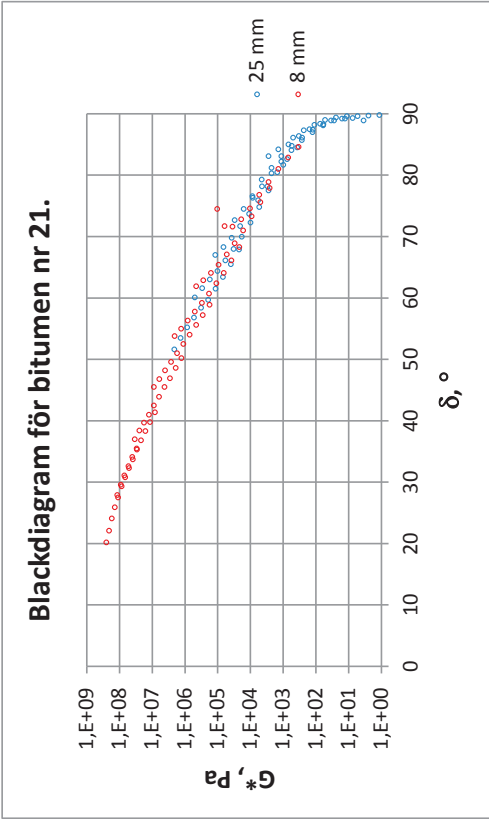
Blackdiagram för bitumen nr 17.



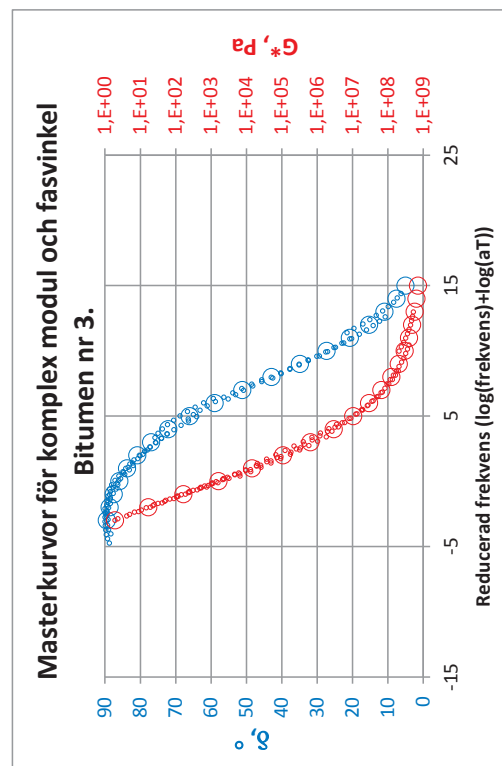
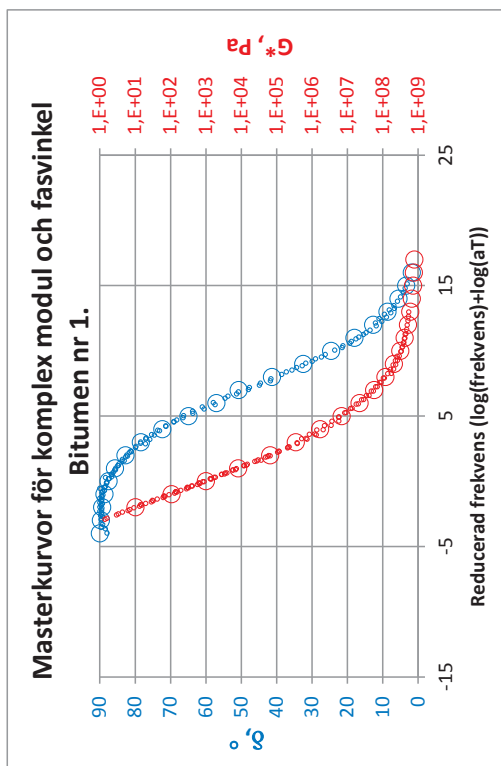
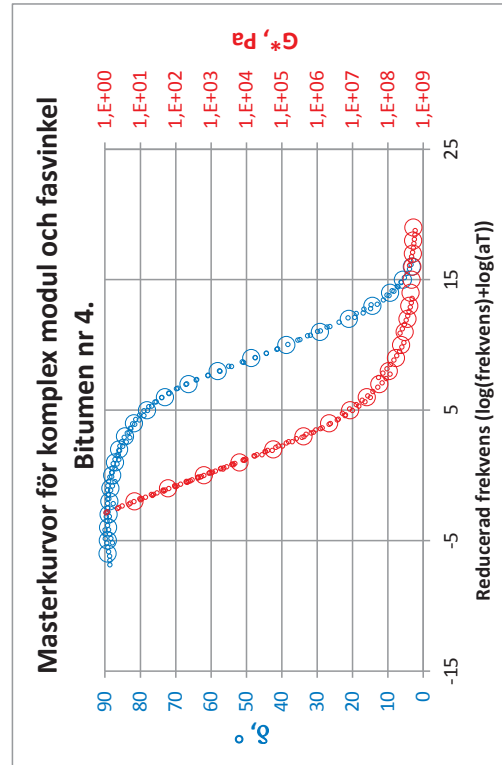
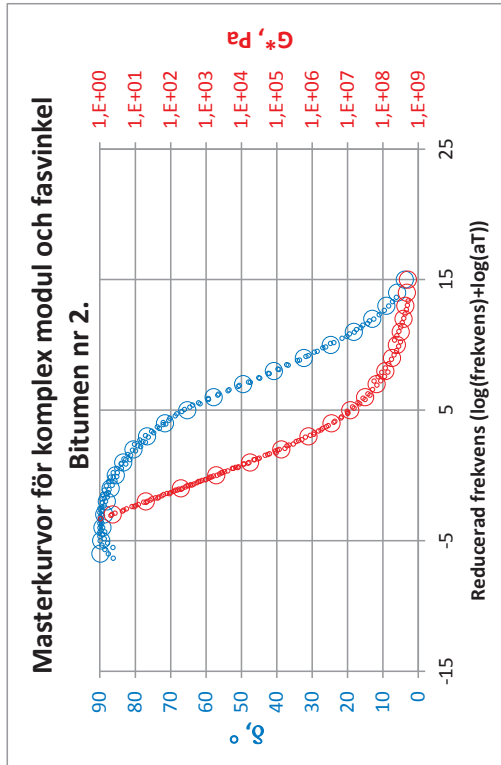
Blackdiagram för bitumen nr 19.

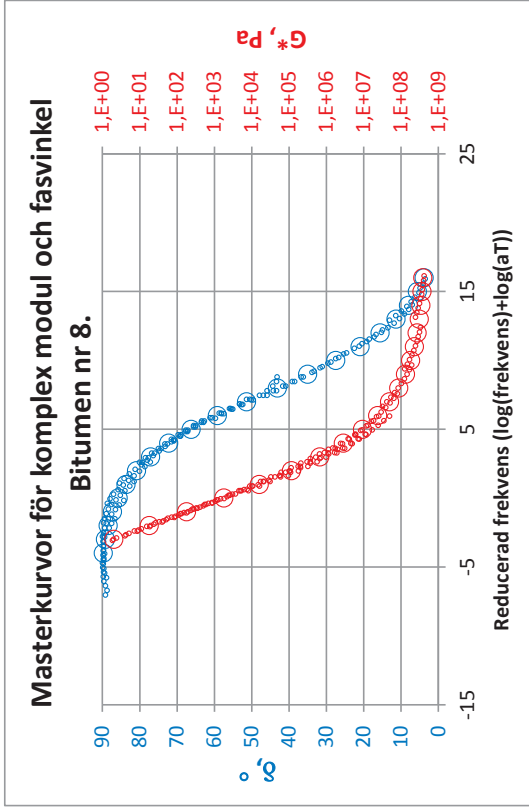
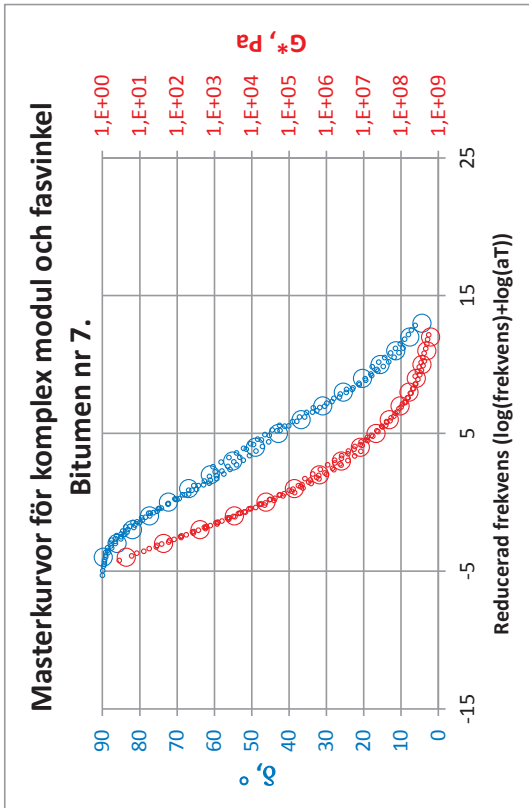
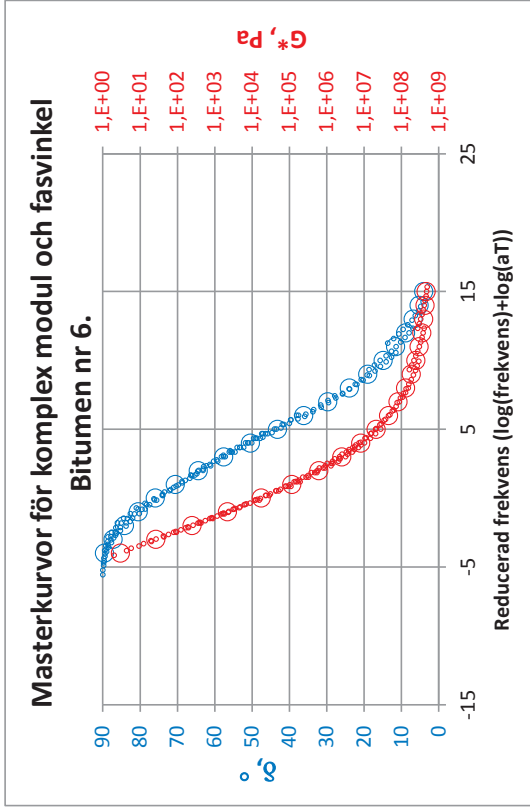
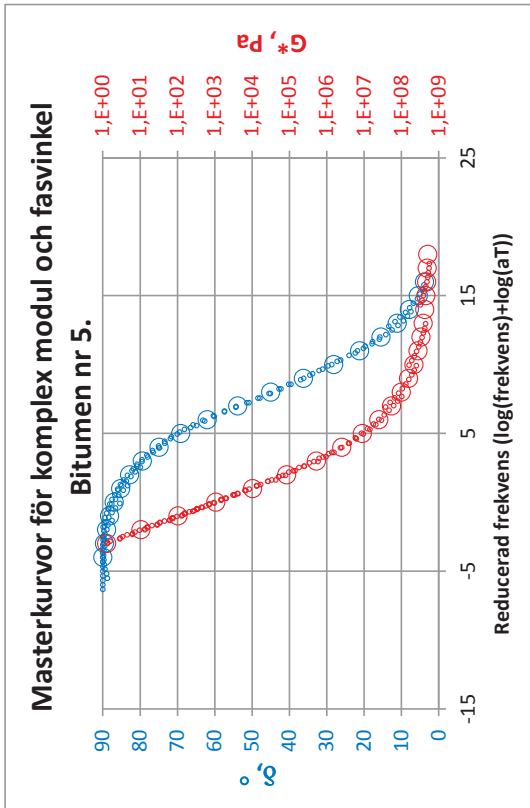


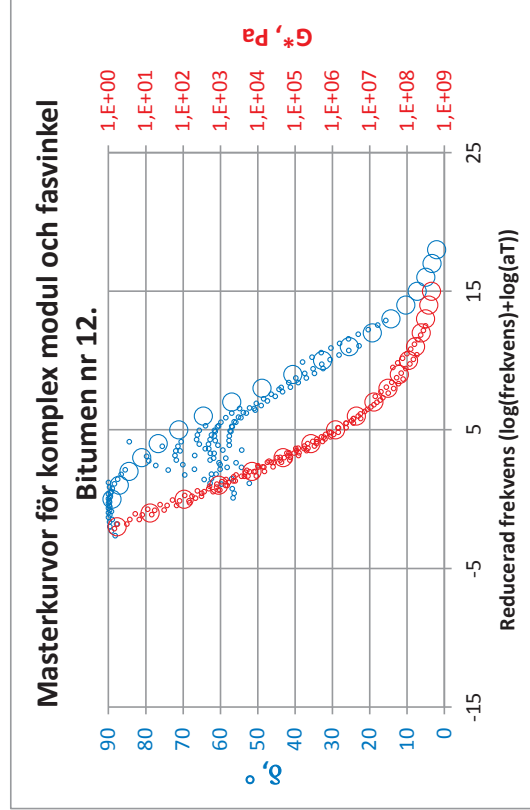
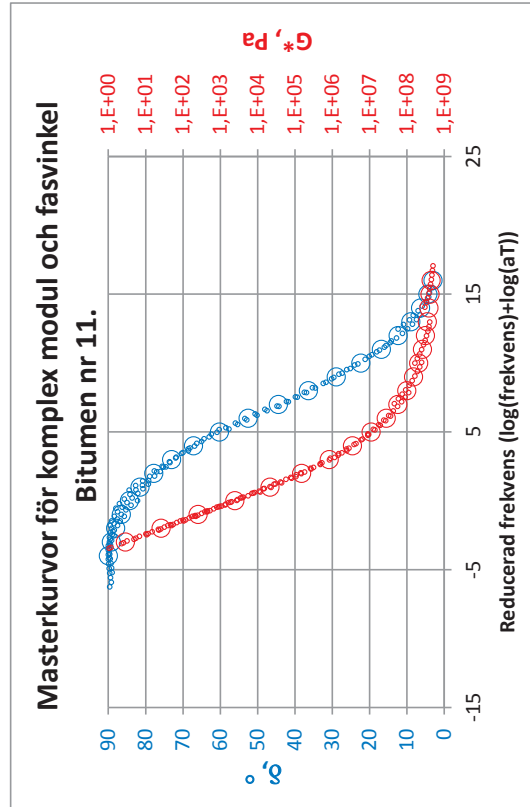
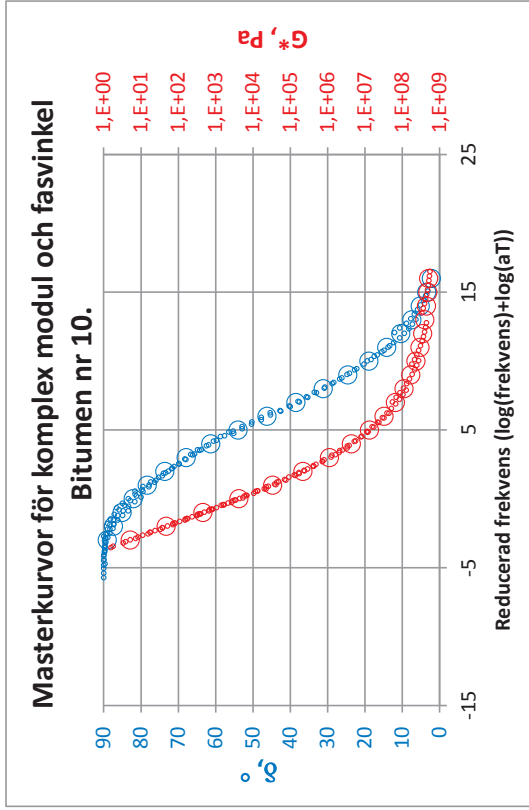
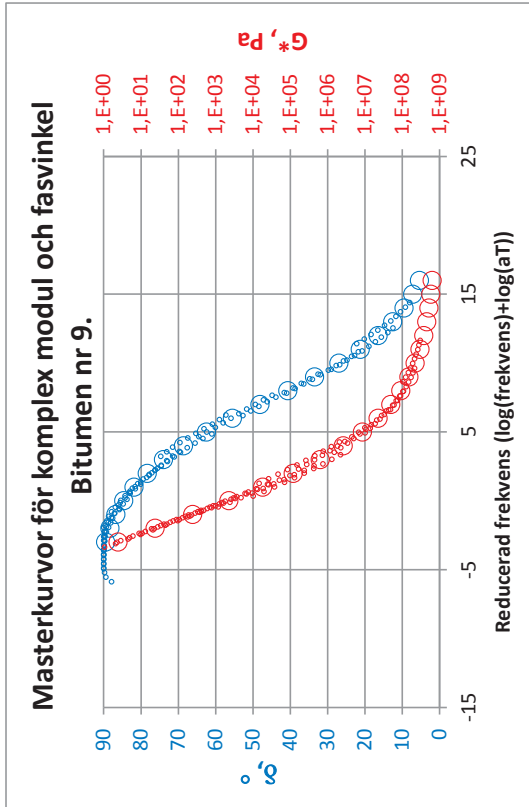


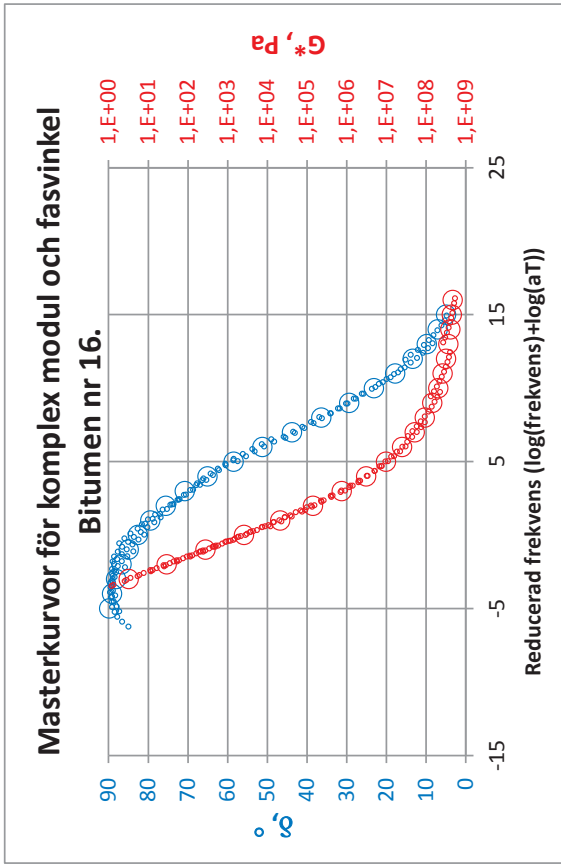
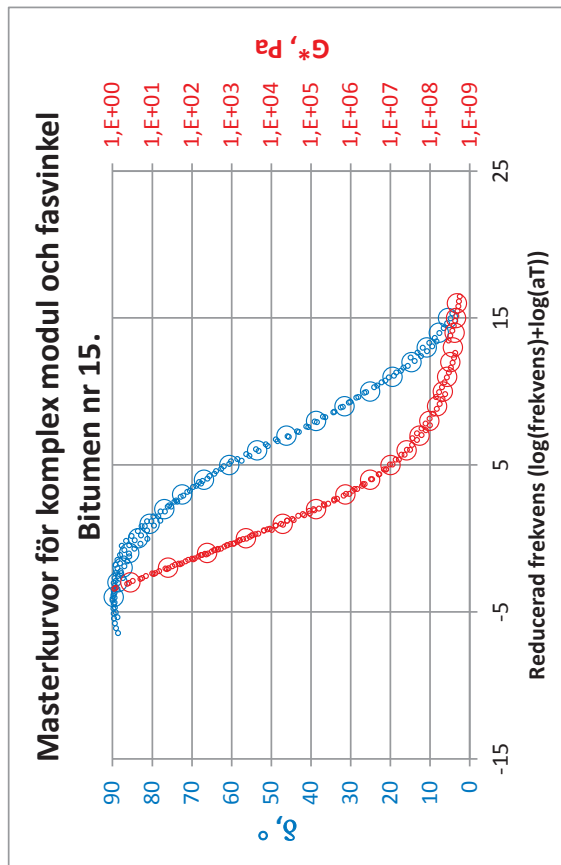
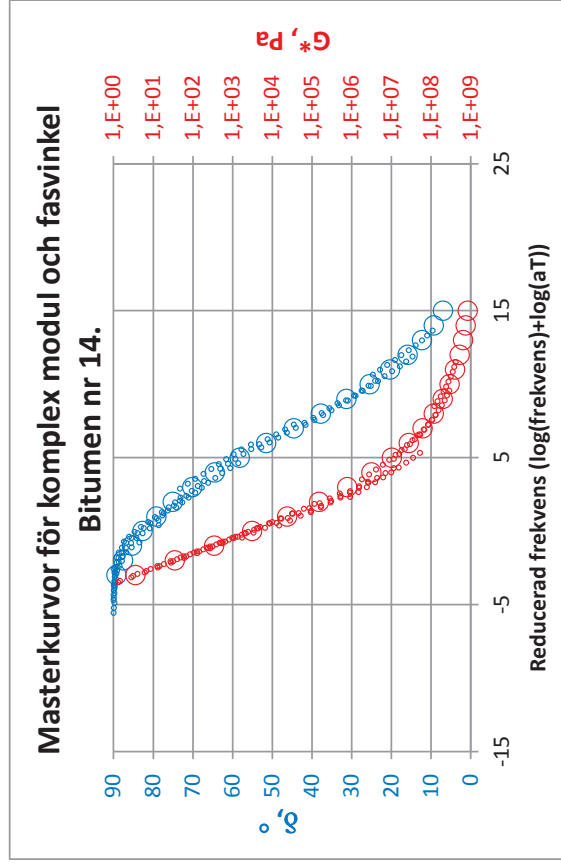
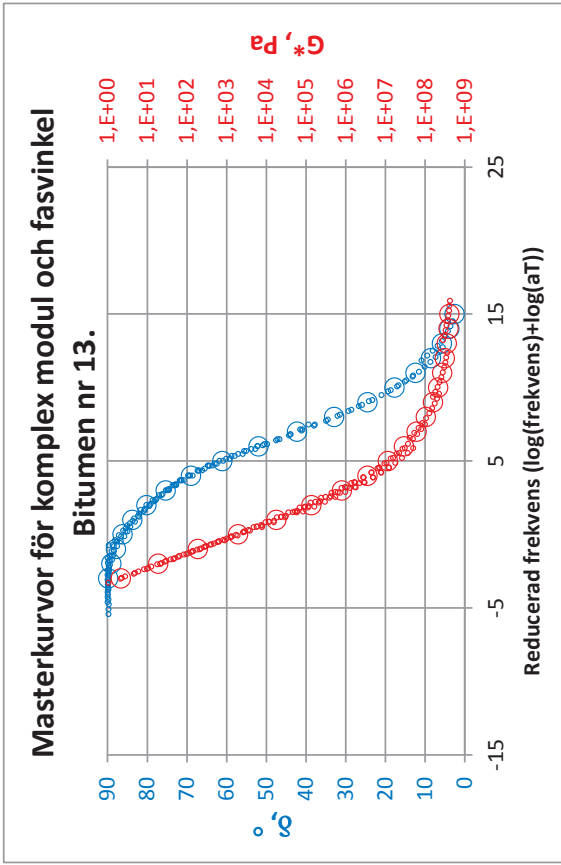


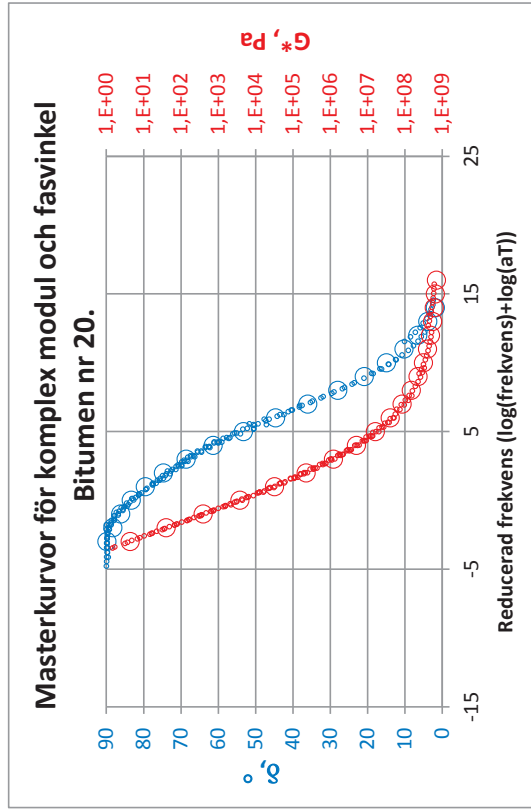
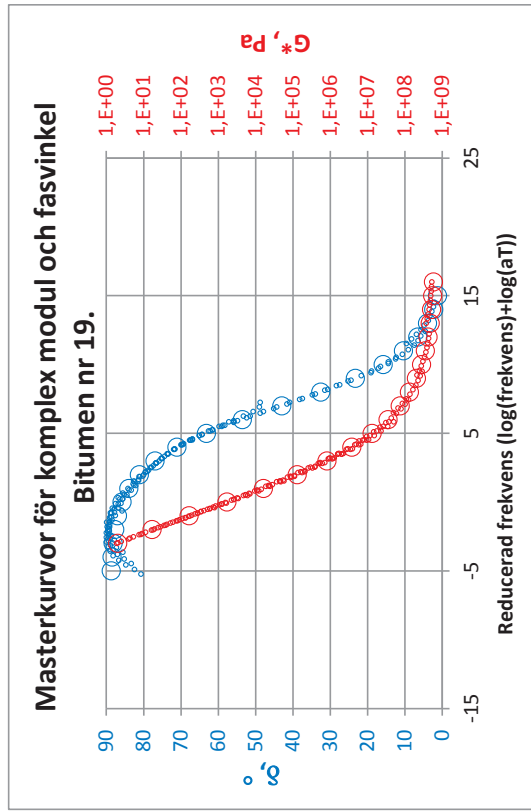
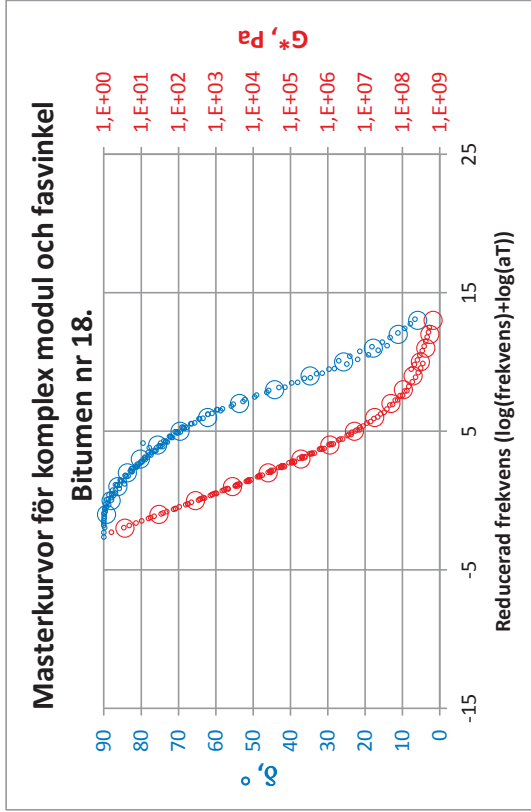
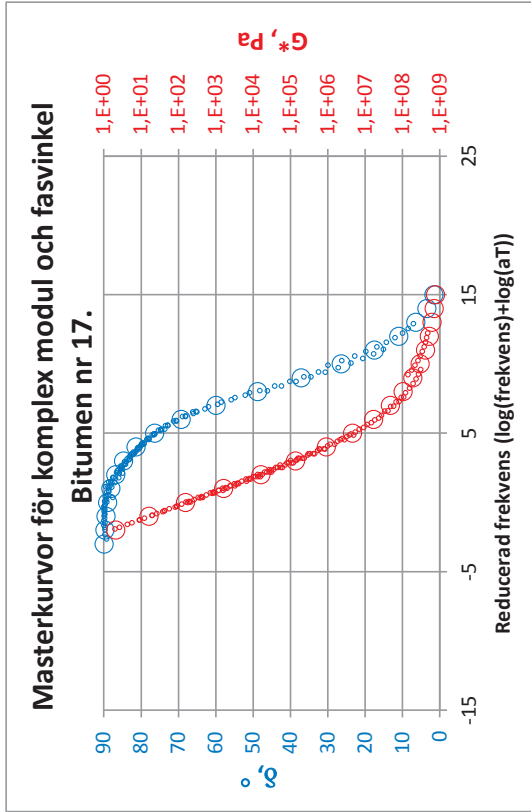
# Bilaga 3 – Masterkurvor, komplex modul och fasvinkel

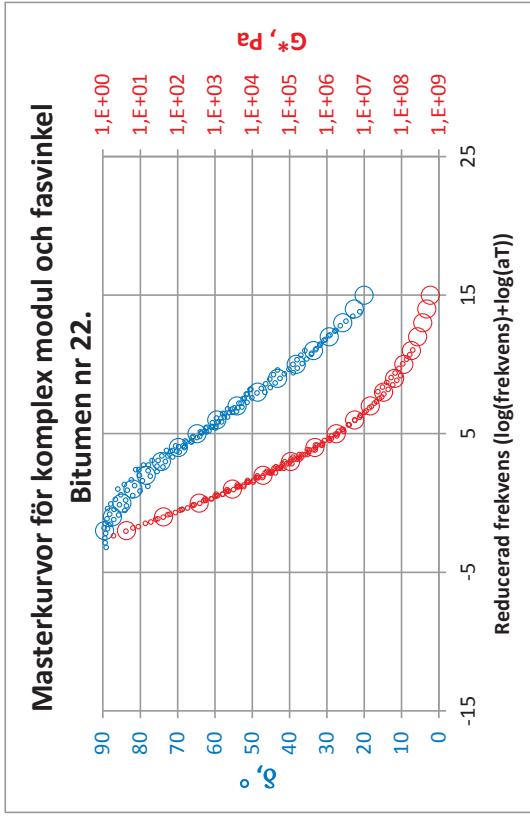
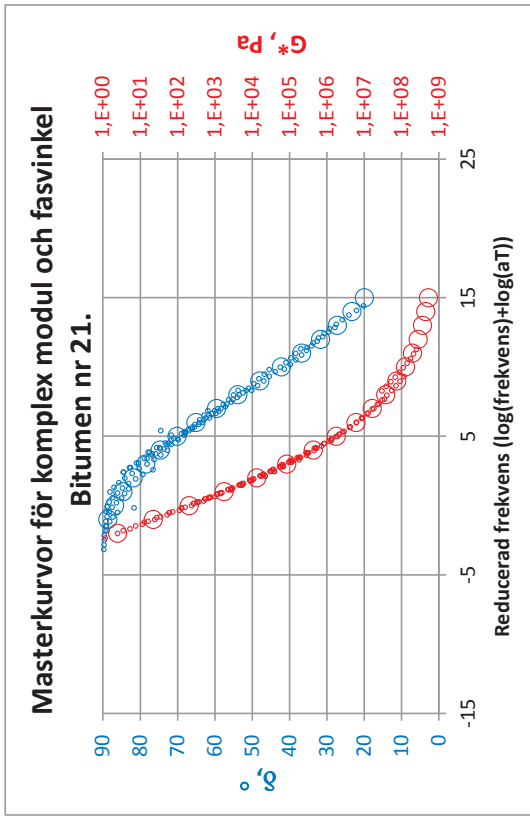












# Bilaga 4 – Sigmoidalparametrar

Bitumen nr:	Masterfunktion för oscillerande DSR-mätningar med temperatur- och frekvensvep													
	Komplex modul, G*							Fasvinkel, δ						
	Sigmoidalparametrar													
Tref	C1	C2	alfa	beta	gamma	delta	Tref'	C1'	C2'	alfa'	beta'	gamma'	delta'	
1	60	7,37	125,1	14,8	-0,167	-0,270	-5,03	60	33,5	296	60,9	-3,19	0,522	29,2
2	60	7,59	121,7	14,4	-0,358	-0,277	-5,23	60	1368	9224	69,2	-2,88	0,441	20,4
3	60	7,59	123,9	14,6	-0,322	-0,272	-5,30	60	26,7	245	65,0	-2,53	0,455	26,0
4	60	6,80	118,6	14,7	-0,158	-0,271	-5,14	60	232,0	1517	88,2	-3,92	0,431	1,4
5	60	7,16	119,4	14,8	-0,283	-0,271	-5,44	60	109,7	904	90,5	-3,12	0,437	0,2
6	60	10,50	142,2	16,2	-0,828	-0,247	-7,03	60	20,2	204	70,1	-0,96	0,387	25,4
7	60	11,44	152,6	16,6	-0,935	-0,242	-7,55	60	20,2	202	74,9	-0,61	0,339	24,2
8	60	7,55	121,4	14,6	-0,362	-0,274	-5,39	60	18,0	180	58,7	-2,31	0,482	32,5
9	60	7,88	124,5	14,1	-0,409	-0,283	-5,17	60	32,2	285	91,6	-2,48	0,372	0,4
10	60	8,84	132,9	15,1	-0,537	-0,262	-5,94	60	19,0	197	68,2	-1,64	0,408	25,1
11	60	8,08	126,4	15,0	-0,446	-0,265	-5,80	60	17,2	181	59,8	-1,99	0,475	31,9
12	60	6,11	111,1	11,4	0,032	-0,357	-3,56	60	24,1	275	95,0	-2,90	0,350	-1,0
13	60	7,67	125,6	14,9	-0,344	-0,269	-5,44	60	29,0	274	91,5	-2,75	0,402	0,1
14	60	8,44	132,0	15,1	-0,468	-0,263	-5,80	60	16,5	162	66,9	-1,70	0,372	26,6
15	60	7,97	127,2	15,4	-0,473	-0,258	-6,14	60	6,1	80	53,6	-1,40	0,394	40,9
16	60	8,58	135,0	15,6	-0,497	-0,254	-6,28	60	5,9	77	55,0	-1,24	0,374	40,4
17	60	7,15	143,1	20,1	-0,148	-0,199	-8,59	60	13,5	186	52,2	-3,19	0,508	39,0
18	60	7,92	148,6	19,1	-0,283	-0,209	-8,43	60	13,0	174	47,6	-2,19	0,451	45,4
19	60	8,53	139,6	15,6	-0,291	-0,255	-5,69	60	20421	161428	55,5	-3,20	0,561	32,9
20	60	9,33	144,2	15,7	-0,502	-0,254	-6,19	60	35,9	361	87,1	-2,08	0,372	5,9
21	60	7,87	146,6	15,6	-0,394	-0,257	-6,97	60	9,1	136	44,0	-1,87	0,609	48,4
22	60	8,88	142,5	17,4	-0,614	-0,236	-8,70	60	40986	356227	44,6	-1,92	0,600	46,6





**LUNDS**  
UNIVERSITET

Trafik och Väg  
Institutionen för Teknik och Samhälle  
Lunds Tekniska Högskola  
Lunds Universitet  
Tryckt hos Media-Tryck, Lund 2014