

Thesis 372

UNDERSÖKNING AV LÅGTEMPERATUREGENSKAPER HOS BITUMEN FÖR ASFALTBELÄGGNINGAR MED DYNAMISK SKJUVREOMETER (DSR).



Ahmad Altarmazwi

Magid Badran

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



Copyright © Ahmad Altarmazwi, Magid Badran

LTH, Institutionen för Teknik och samhälle
CODEN: LUTVDG/(TVTT-5339)/1-126/2022
ISSN 1653–1922

Tryckt i Sverige av Media-Tryck, Lunds universitet
Lund 2022

Examensarbete

CODEN: LUTVDG/(TVTT-5339)/1-126/2022

Thesis / Lunds Tekniska Högskola,
Institutionen för Teknik och samhälle,
Trafik och väg, 372

ISSN 1653–1922

Author(s): Magid Badran
Ahmad Altarmazwi

Title: Lågtemperaturegenskaper hos bitumen för asfaltbeläggningar med dynamisk skjuvreometer (DSR).

English title: Low temperature properties of bitumen for asphalt pavements with Dynamic Shear Rheometer (DSR).

Language: Swedish

Year: 2022

Keywords: Bitumen, DSR, lågtemperaturegenskaper, BBR, reologi

Citation: Ahmad Altarmazwi och Magid Badran, Lågtemperaturegenskaper hos bitumen för asfaltbeläggningar med dynamisk skjuvreometer (DSR). Lund, Lunds universitet, LTH, Institutionen för Teknik och samhälle. Trafik och väg 2022. Thesis. 372

Abstract:

The Dynamic Shear Rheometer, DSR, became central in connection with the launch of the Superpave methodology and is an instrument that can be used to assess asphalt properties. The instrument could at an early stage of the Superpave methodology not perform measurements at low temperatures and had to be supplemented with the device Bending Beam Rheometer, BBR, for that purpose. To obtain a more comprehensive overview of the properties of bitumen, it has in recent research been investigated whether it is possible to quantify these low-temperature properties with DSR. Through DSR measurements, a comparative study is therefore conducted with BBR, whose measurements are performed in parallel. In addition, the sensitivity and precision of DSR to changes are studied by examining the impact of aging on the studied bitumen types.

Analysis of the results showed that the low temperature properties are such that the resistance to low-temperature cracks decreases with aging of bitumen and that there is a clear statistically significant correlation between BBR and DSR. The conclusions are that DSR can replace BBR in the assessment of low-temperature properties of bitumen. In addition, the aging of bitumen exhibited a stepwise logical change with DSR, which proves the method's sensitivity to change and repeatability.

Trafik och väg
Institutionen för Teknik och samhälle
Lunds Tekniska Högskola, LTH
Lunds Universitet
Box 118, 221 00 LUND

Transport and Roads
Department of Technology and Society
Faculty of Engineering, LTH
Lund University
Box 118, SE-221 00 Lund, Sweden

Innehållsförteckning

Förord	2
Sammanfattning	4
Summary	7
1 Inledning	9
1.1 Bakgrund	9
1.2 Syfte	10
1.3 Metodbeskrivning	11
1.4 Avgränsningar	11
1.5 Rapportens disposition	12
2 Litteraturstudie	15
2.1 Asfalt	15
2.2.1 Stenmaterial	16
2.2.2 Filler	16
2.2.3 Bitumen	16
2.2.4 Asfaltbruk	19
2.3 Klassificering av bitumen	20
2.3.1 Superpave (USA)	20
2.3.2 Europeiskt klassificeringssystem	22
2.4 Reologi	24
2.4.1 Elasticitet	24
2.4.2 Viskositet	25
2.4.3 Newtonsk och icke newtonsk vätska	25
2.4.4 Viskoelasticitet	27
2.5 Åldring av bitumen	28
2.5.1 RTFOT-test	29
2.5.2 PAV-test	29
2.6 Dynamisk skjuvreometer (DSR)	29
2.6.1 Rotationstest	30
2.6.2 Oscillationstest	31

2.6.3	Komplex skjuvmodul	35
2.6.4	Amplitudsvep	36
2.6.5	Frekvenssvep	38
2.6.6	MSCR (Multiple Stress Creep Recovery test)	39
2.7	DSR:s andra potentiella användningsområden	40
2.7.1	Duktilitet	41
2.7.2	Bending Beam Rheometer (BBR)	42
2.7.3	Matematiska samband mellan BBR och DSR för t-låg	45
2.7.4	Påverkan på optimal korrelation mellan BBR och DSR	49
2.7.5	Modulus shift factor bT	50
2.8	Lågtemperaturegenskaper för bitumen	51
2.8.1	Funktionsegenskaper vid låga temperaturer hos afaltsbeläggning	51
2.8.2	Termisk sprickbildning	52
2.8.3	Molekylära strukturens effekt på lågtemperaturegenskaper	53
2.8.4	SARA-fraktioners effekt på lågtemperaturegenskaper	54
2.8.5	Inverkan av vax på lågtemperaturegenskaper	55
2.8.6	Lågtemperaturegenskaper via Molecular Dynamics (MD)	55
2.8.7	Inverkan av fysisk härdning på väghållfasthet	56
2.9	Metoder för redovisning av resultat	57
2.9.1	Masterkurva	57
2.9.2	Blackdiagram	62
3	Metod	64
3.1	Provserier	64
3.2	Tillvägagångssätt	66
3.2.1	Provberedning	66
3.2.2	Applicering av prov	70
3.3	Utförande av tester	74
3.3.1	Frekvenssveptest PP25 och PP08	74
3.3.2	Multiple Stress Creep Recovery Test (MSCR)	75
3.4	Framtagning av bedömningsparametrar	76
3.4.1	Masterkurva	76
3.4.2	Beräkning av t-hög, t-mellan och t-låg	76
3.4.3	Beräkning av duktilitet	77
3.4.4	Mjukpunkt	77

4	Resultat	79
	4.1 Mätningar med DSR och BBR	79
	4.1.1 Blackdiagram (PP08 och PP25)	80
	4.1.2 Spårbildningsresistens	80
	4.1.3 Resistens mot utmattningsprickor	82
	4.1.4 Mätning av t-låg (DSR)	82
	4.1.5 Duktilitet	83
	4.1.6 Mjukpunkt	84
	4.1.7 Jämförelse av t-låg med BBR	85
5	Diskussion och slutsatser	90
	5.1 Resultatdiskussion	90
	5.1.1 MSCR (t-hög)	90
	5.1.2 t-låg utifrån DSR-mätningar	90
	5.1.3 DSR vs BBR, Styvhet S(60)	91
	5.1.4 DSR vs BBR, m-värde m(60)	92
	5.1.5 Duktilitet	93
	5.1.6 Mjukpunkt	94
	5.1.7 Blackdiagram (PP08 och PP25)	94
	5.2 Metoddiskussion	95
	5.2.1 Hantering av provkroppar	95
	5.2.2 DSR	96
	5.2.3 BBR	96
	5.3 Slutsatser	97
	5.4 Rekommendationer till fortsatta studier	97
6	Referenser	99
7	Bilagor	106

Förord

Detta examensarbete har genomförts som en avslutning på Civilingenjörsprogrammet i Väg- och Vattenbyggnad vid Lunds Tekniska Högskola. Studien har skrivits av Ahmad Altarmazwi och Magid Badran under vårterminen 2022 i samarbete med Svenskt VägCentrum (SVC), på Institutionen för Teknik och Samhälle, Avdelningen Trafik och väg.

Till att börja med vill vi tacka vår externa experthandledare Per Tyllgren för sin handledning och stora engagemang kontinuerligt under hela processen. De nästintill dagliga konversationerna och instruktionerna gällande provmätningarna med DSR-maskinen och skrivprocessen i allmänhet har uppskattats då det har stöttat och inspirerat oss till att slutföra ett arbete av bra kvalitet.

Därtill vill vi även rikta stort tack till vår interna handlare Pajtim Sulejmani, som nästan veckovis lagt ner tid för att ge oss ovärderlig feedback och konstruktiv kritik, både muntligt och skriftligt. Samtidigt vill vi även tacka Luan Imeri och Nikola Maka som assisterade oss med DSR-maskinen vid uppstarten.

Sist men inte minst vill vi tacka våra familjer och vänner för allt stöd under dessa fantastiska samt lärorika år på Lunds Tekniska Högskola.

Lund, maj 2022

Ahmad Altarmazwi

Magid Badran

Sammanfattning

I samband med lanseringen av Superpave, ett klassificeringssystem för bitumen, för cirka 30 år sedan i USA kom instrumentet Dynamisk Skjuvreometer, DSR, som var central i denna metodik att användas vardagligen för mätning av viskoelastiska egenskaper hos bitumen. I ett tidigt stadium kunde inte DSR utföra mätningar vid låga temperatur som kan förekomma på en väg. DSR-mätningarna fick då kompletteras med apparaten Bending Beam Rheometer, BBR. Under det senaste decenniet har nya DSR utrustningens prestanda förbättrats och klarar idag utföra mätningar vid temperaturer ned till -40°C , dvs de lägsta temperaturerna som en väg kan utsättas för.

Trots det faktum att flertalet studier visar på att det skulle vara möjligt att ersätta BBR med DSR för lågtemperaturmätningar krävs ytterligare jämförande studier mellan de två apparaterna innan det kan säkerställas och realiseras. Syftet med studien har därför varit att testa ett mätförfarande med DSR för att undersöka ifall det är möjligt att ersätta BBR mätningar med DSR mätningar. Därtill undersöks även med DSR vilken inverkan åldring har på bitumensorterna som ska användas, i syfte att studera DSR-utrustningens känslighet och precision efter åldringsförändringar i bituminet.

Det som ska ligga till grund för jämförelser mellan BBR och DSR-mätningar är två bitumensorter som ska testas, nämligen bitumen 70/100 och polymermodifierad (PMB) bitumen, Nypol 73. DSR-mätningarna utförs i LTH:s reologiska laboratorium samtidigt som företaget Nynas AB parallellt utför BBR mätningarna. För att kunna jämföra mätningarna mellan de två apparaterna görs parallella mätserier. Samma prover som Nynas förbereder och genomför BBR-mätningar på, testas sedan med DSR-maskinen på LTH. Utförda mätningar med DSR-maskinen har utförts med frekvenssvep och kompletterats med MSCR-test (Multiple Stress Creep Recovery Test).

Från de utförda experimenten erhöles resultat på parametrar som användes till att utvärdera bituminets spårbildningsresistens, utmattningsresistens och lågtemperaturregenskaper. För bedömning av lågtemperaturregenskaperna beräknades fram två stycken t-låg parametrar, spänningen efter 60 sekunders belastning, $S(60)$, och gradienten efter 60 sekunder, m-värdet $m(60)$. Resultaten visade på att resistensen mot lågtemperatursprickor minskar med åldring av bitumen för de båda bitumensorterna då t-låg för $S(60)$ och $m(60)$ ökar efter åldringsbehandling, som utfördes i enlighet med Superpave standarden. Dessutom visade resultatet på en tydlig statistisk säkerställd korrelation mellan BBR $S(60)$ och DSR $S(60)$ för båda bitumensorterna. I jämförelse till $m(60)$, så är korrelationen mellan DSR och BBR svagare för båda bitumensorterna. Det visar på att det inte finns en statistisk säkerställd överensstämmelse mellan DSR och BBR när det gäller $m(60)$.

Slutsatserna är att DSR kan ersätta BBR i bedömningen av lågtemperaturregenskaper hos bitumen, och särskilt väl stämmer det för $S(60)$. Dessutom gäller att åldringen av bitumen visade på en stegvis logisk förändring med DSR, både för $S(60)$ och $m(60)$, vilket styrker metodens känslighet för förändringar och repeterbarhet.

Summary

In connection with the launch of Superpave, a bitumen classification system, about 30 years ago in the USA, the instrument Dynamic Shear rheometer, DSR, which was central to this methodology, was used daily for measuring the viscoelastic properties of bitumen. At an early stage, DSR could not perform low temperature measurements that may occur on a road. The DSR measurements then had to be supplemented with the device Bending Beam Rheometer, BBR. During the last decade, the performance of the new DSR equipment has improved and today it is able to perform measurements at temperatures down to $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, which is the lowest temperatures that a road can be exposed to.

Even though most studies show that it would be possible to replace BBR with DSR for low-temperature measurements, further comparative studies are required between the two devices before it can be secured and realized. The purpose of the study has therefore been to test a measurement procedure with DSR to investigate whether it is possible to replace BBR measurements with DSR measurements. In addition, an investigation with DSR on the impact of aging on the types of bitumen to be used is made, to study the sensitivity and precision of the DSR equipment after aging changes in bitumen.

The basis for comparisons between BBR and DSR measurements are two types of bitumen to be tested, namely bitumen 70/100 and polymer-modified (PMB) bitumen, Nypol 73. The DSR measurements are performed in LTH's rheology laboratory at the same time as the company Nynas AB performs the BBR measurements in parallel. In order to be able to compare the measurements between the two devices, parallel measurement series are made. The same samples that Nynas prepares and performs BBR measurements on, are then tested with the DSR machine at LTH. Measurements performed with the DSR machine have been performed with frequency sweep and supplemented with MSCR test (Multiple Stress Creep Recovery Test).

From the experiments performed, results were obtained on parameters used to evaluate the bitumen's rutting, fatigue resistance and low temperature properties. To assess the low-temperature properties, two t-low parameters were calculated, the stress after 60 seconds load, $S(60)$ and the gradient after 60 seconds, the m-value $m(60)$. The results showed that the resistance to low temperature cracks decreases with aging of bitumen for the two bitumen types as t-low for $S(60)$ and $m(60)$ increases after aging treatment, which was performed in accordance with the Superpave standard. In addition, the results showed a clear statistically significant correlation between BBR $S(60)$ and DSR $S(60)$ for both bitumen types. Compared to $m(60)$, the correlation between DSR and BBR is weaker for both bitumen types. This shows that there is no statistically significant agreement between DSR and BBR with regard to $m(60)$.

The conclusions are that DSR can replace BBR in the assessment of low-temperature properties of bitumen, and this is particularly true for $S(60)$. In addition, the aging of bitumen exhibited a stepwise logical change with DSR, both for $S(60)$ and $m(60)$, which proves the methods sensitivity to change and repeatability.

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Den äldsta infrastrukturen i Sverige utgörs av vägar vars utveckling från tidigt 1800-tal till slutet på 1900-talet har medfört en kraftig transportrevolution. Utvecklingen har gått från ett lokalt, självförsörjande jordbrukssamhälle där transporterna mellan olika aktiviteter dominerades av korta transporter till samhällets nutida krav på långa och tidseffektiva vägar. Ökningen av längden på det allmänna vägnätet hade en expansionstakt på cirka 0,5% från år 1841 fram till sekelskiftet 1900. Men efter bilens genomslag på 1920-talet skedde ett stort genombrott på så sätt att det allmänna vägnätet blev alltmer omfattande med en ökning på 40% mellan 1920 och 1940 (Potucek & Granlund, 2015).

Potucek och Granlund (2015) konstaterar att personbilen är det dominerande färdmedlet för både korta och långa avstånd där vägtransporter i Sverige står för 87% av alla persontransporter. Således utgör det befintliga vägnätet både nationellt och internationellt grunden i transportsystemet och därmed spelar vägkonstruktionens uppbyggnad en väsentlig roll för världens transportsystem. På grund av vägnätets enorma utbredning och funktionalitet i dagens moderna samhälle blir vägkonstruktionen med dess ingående komponenter viktiga parametrar att beakta då allt högre krav ställs på exempelvis miljö, hållbarhet och funktion. Genom att i tidigt stadium beakta och analysera beståndsdelarna i asfalt så kan vägkonstruktionen justeras för att uppnå den mest optimala asfaltbeläggningen (Trafikverket, 2016).

Egenskaperna hos asfalt och dess ingående komponenter, såsom bitumen, har under en lång period varit betydelsefulla parametrar i vägteknik. Däremot har forskare tidigare varit mer begränsade vad gäller undersökning och analys av asfalt jämfört med idag. Teknikerna för undersökning av materialkvaliteter har under den industriella utvecklingen av asfalttillverkning gått från empiriska till analytiska mätmetoder (Svenskt VägCentrum, 2021). Traditionellt sett har tester som mjukpunkt och penetrationstal använts för att analysera bitumens egenskaper. Genom empiri har sedan dessa egenskaper kopplats till en asfaltskonstruktions prestation. Begränsningen med dessa tester är att bitumens egenskaper endast kan kontrolleras vid en given tidpunkt, temperatur och belastning. För att kunna erhålla en mer omfattande bild av bitumens egenskaper har det undersökts om det går att kvantifiera dessa effekter med dynamisk skjuvreometer, DSR (Soenen & Teugels, 1999; Chen et. al., 2008; Liao et. al., 2013a; Liao et. al., 2013b).

För 30 år togs ett väsentligt steg i USA genom att Superpave, ett klassificeringssystem för bitumen, introducerades. Superpave är en analytisk metodik för val av bitumen och utgår från de förutsättningar klimatet ger (Svenskt VägCentrum, 2021). Centralt i denna metodik är instrumentet Dynamisk Skjuvreometer, DSR, som med lansering av Superpave kom att användas vardagligen för mätning av viskoelastiska egenskaper hos bitumen (Mahboub, 2004). Genom DSR undersöks egenskaper hos bitumen vid varierande temperaturer och

frekvenser. Baserat på mätningarna kan Masterkurvor erhållas för att sedan möjliggöra simulering av alla förhållanden, avseende temperatur och belastningstid, ute på en väg och sedan utgöra en grund för bedömning av bituminets funktionalitet (Svenskt VägCentrum, 2021).

Tidigare kunde inte DSR hantera de lägsta temperaturerna som kan förekomma på en väg, däribland t-låg som är den lägsta, passande temperaturen för att minimera risken för köldsprickor. Därmed fick mätningarna för den avsikten kompletteras med apparaten Bending Beam Rheometer, BBR. Med tiden har dock DSR-maskinernas prestanda förbättrats och klarar idag temperaturer ned till -40°C. Om alla undersökningar och analyser utgick från ett och samma instrument, DSR, skulle arbetet underlättas (Svenskt VägCentrum, 2021).

Fördelarna med ett enda instrument är att antalet faktorer som kan påverka mätningens resultat minimeras då samma bitumenprov kan användas för undersökning av olika egenskaper samtidigt som det blir mer effektivt kostnadsmässigt med en enda apparat. Det underlättar även vid klassificering av bitumen då klassificering till stor del bygger på parametrarna t-låg samt t-hög vid val av bitumen. Med DSR är det även lättare med provberedning, provtillverkning och dessutom kan det erhållas exakta värden på mått och vikt på bitumenproverna eftersom bitumen appliceras i silikonhållare så att bitumen tar sin form på ett smidigt sätt. Med BBR så krävs mätning vid minst två, helst tre temperaturer och motsvarande antal balkar och mätserier. Balkarna måste ha exakta mått vilket är mycket arbetskrävande och fordrar erfarna laboranter (Tyllgren, 2022).

Även fast ett flertal redan utförda studier, som bland annat framgår i avsnitt 2.7.3, visar på att det skulle vara möjligt att ersätta BBR med DSR för lågtemperaturmätningar krävs ytterligare jämförande studier mellan de två apparaterna innan det kan realiseras (Svenskt VägCentrum, 2021). Anledningen till att tidigare studier inte möjliggjort en fullständig övergång till DSR är att BBR under lång tid ansetts vara lämpligast vid undersökning av lågtemperaturregenskaper. Däremot finns stora förhoppningar bland asfalttekniker, framför allt i USA, att hitta ett enda instrument som kan beskriva alla grundegenskaperna hos bitumen i Superpave. Specifikt har man stor tro till användning av DSR då flera samband mellan oscillerande dynamisk skjuvning och BBR har tagits fram och provats (Tyllgren, 2022). Denna studie ämnar sig åt att vara en bidragande faktor till ett framtida beslut gällande huruvida mätningar med BBR kan ersättas med en metod och ett enda instrument, DSR.

1.2 Syfte

Syftet med studien är att välja och testa ett mätförfarande med dynamisk skjuvreometer (DSR) för att bestämma Superpaveparametern t-låg, som hittills endast bestämts med BBR. DSR-mätningar med ett PP08-sveptest ska ligga till grund för jämförelser med BBR. Det finns redan samband som använts på LTH i tidigare exjobb med DSR, men nu ska det genom egna försök på Nynas och LTH provas nya modeller. Därtill undersöks även med DSR vilken inverkan åldring har på bitumensorterna, i syfte att studera DSR-maskinens känslighet och precision för förändringar.

Frågeställningarna som studien ska försöka besvara är:

- Är det möjligt att ersätta BBR mätningar med DSR mätningar för superpaveparametern t-låg?
- Vilken inverkan har åldringen på bitumensorternas t-låg värden? Är förändringen logisk?

1.3 Metodbeskrivning

Inledningsvis genomförs en litteraturstudie i syfte att ge läsaren möjligheten att bekanta sig med kunskapsläget kring ämnet för att följaktligen kunna förstå resonemang och slutsatser kring resultaten från studien. I litteraturstudien genomgås och sammanställs fakta på relevanta ämnen, begrepp och metoder relaterade till studien.

De mätningar som genomförs i studien görs via dynamisk skjuvreometer, DSR, som finns i reologilaboratoriet på Lunds Tekniska Högskola. Parallellt som mätningar görs med DSR utför Nynas mätningar med BBR, då denna utrustning saknas på Lunds Tekniska Högskola. För att kunna jämföra mätningarna mellan de två apparaterna görs parallella mätserier. Samma prover som Nynas förbereder och genomför BBR-mätningar på, testas sedan med DSR-maskinen på LTH. En närmare beskrivning på metoden som används för alla mätningar i studien beskrivs i kapitel 3.

Slutsatser och de resonemang som förs i diskussionen grundar sig på erhållna mätningresultat, som redovisas i avsnittet resultat.

1.4 Avgränsningar

En statistiskt välgrundad jämförelse mellan BBR och DSR skulle kräva ett stort antal olika bitumensorter. Det skulle vara möjligt med DSR-metoden men inte med BBR i det här fallet. BBR-testet är mycket arbetskrävande och de resurserna saknas för den här studien. Det blir i detta fall endast en fråga om två bitumensorter, som dessutom är olika till sin karaktär. Resultaten blir en indikation på om det är meningsfullt att gå vidare med en bredare studie.

I studien används två olika typer av bitumen, standardiserad bitumen med penetrationstal 70/100 samt en bitumensort med benämning "Nypol 73". För varje bitumensort framställs två olika provkroppar med varierande storlek, en med diameter 8mm, PP08, respektive 25mm, PP25. För PP08 och PP25 genomförs sveptest, och utöver detta genomförs MSCR-test på PP25.

Samtliga prover som används utsätts för åldring för att simulera händelseförloppet för bituminet från att det är rent och nytt fram till en tidsperiod (kortsiktig eller långsiktig) längre fram, beroende på vilket av de två åldringstesterna RTFOT (Rolling Thin Film Oven Test) och RTFOT+PAV (Pressure Ageing Vessel) som används. Åldring innebär att man

värmebehandlar bitumenet så att det styvnar och genom att utsätta bitumen för åldring kan resultaten från mätningarna användas i dimensionerande syfte.

För varje sorts bitumen finns tre olika varianter, en original (ej åldrad) och två stycken åldrade med RTFOT samt RTFOT + PAV. Skillnaden mellan värmebehandlingen RTFOT och RTFOT + PAV är att provet i PAV värmebehandlas i en uppvärmd behållare under ett konstant tryck på 2,1 MPa.

För proven PP08 utförs sveptestet i temperaturintervallet -27,6 °C till 30 °C med de ingående temperaturerna 30 °C, 20 °C, 10 °C, 0 °C -9,6 °C, -18,9 °C och -27,6 °C. För PP25 används intervallet 20 °C till 80°C, med 10°C intervall. Frekvenserna som används för varje temperatur ligger inom intervallet 0,1 rad/s till 100 rad/s. För att arbetet inte ska ta alltför lång tid utförs inga mätningar för lägre frekvenser.

MSCR-test genomförs i tre olika temperaturer, exempelvis 48, 56 och 64 °C för jungfruligt 70/100. Dessa tre temperaturer är baserade på tidigare erfarenhet av respektive bitumen och förväntas täcka ett intervall som omfattar temperaturen t-hög vid olika trafikbelastningar.

I Tabell 1 nedan framgår en sammanställning på de prover och tester som ska genomföras för båda bitumensorterna. Själva DSR-testet körs enligt Superpave bara på RTFOT+PAV, precis som Nynas har gjort med BBR, men vi använder alla stegen för att visa på DSR:ens känslighet och precision. Masterkurvorna som skapas vid sveptesten med DSR-maskinen fås genom att använda sigmoidal-funktionen och Williams-Land-Ferry ekvationen som båda beskrivs i avsnitt 2.9.1.1 och 2.9.1.2.

Tabell 1 - beskrivning av prover och tester som ska utföras.

Bitumensort "70/100" & "Nypol 73"			
	Original	RTFOT	RTFOT + PAV
PP08	x	x*	x
PP25	x	x	x*
MSCR	x	x	x*
BBR			x

* Finns inte med i Superpave men genomförs för studie av åldringens inverkan.

1.5 Rapportens disposition

Rapporten delas in i fyra huvuddelar där första delen utgörs av en litteraturstudie som syftar till att ge läsaren en bra grund att stå på kunskapsmässigt kring området inför kommande analys av resultatet. Litteraturstudien innefattas av lämpliga och väsentliga

teorier som behövs för att skapa en bra beskrivning och förståelse av ämnet. Dessutom presenteras teori som berör de utförda mätningarna, principerna för hur apparaterna DSR och BBR fungerar samt metoder för redovisning av mätdata.

Nästa huvuddel av rapporten redogör för metoden och de undersökningar som har genomförts där en beskrivning av tillvägagångssättet för DSR-mätningarna görs. Därefter följer en redovisning av resultaten i form av diagram där uppmätta och beräknade värden/parametrar beskrivs och tolkas. Slutligen avslutas rapporten med en diskussion av resultatet och de metoder som har använts. Diskussionen kretsar huvudsakligen kring frågeställningen som presenterats i syftet och avslutas med rekommendationer för fortsatta studier.

2 Litteraturstudie

2.1 Asfalt

En vägkonstruktion består av ett antal olika materiallager där varje lager har sin specifika funktion. Lagrena ska tillsammans säkerställa en bärig, säker och beständig väg under en tillräckligt lång tidsperiod under påverkan av klimat och belastning från trafik. Generellt brukar man dela in vägkonstruktioner i tre olika kategorier: flexibla, styva och halvstyva konstruktioner. I den flexibla vägkonstruktionen är det bundna lagret bundet med bitumen (Wiman & Tholén, u.å). Dessutom är den flexibla överbyggnaden den vanligaste typen av överbyggnad i Sverige är. De ingående lagren i denna sorts överbyggnad uppifrån och ner är slitlager, bundet bärlager, obundet bärlager, förstärkningslager och slutligen ett eventuellt skyddslager (Agardh & Parhamifar, 2012), och illustreras i Figur 1 nedan.



Figur 1- Principiell uppbyggnad av en överbyggnad (Wiman & Tholén, u.å).

Det material som oftast används på trafikerade vägar och som bygger upp slitlagret är asfalt. Asfalt utgörs huvudsakligen av tre beståndsdelar: Filler, stenmaterial och bitumen. Genom att använda olika typer och mängder av filler eller bitumen och således justera i asfaltens blandning kan olika egenskaper erhållas i asfalten. Även olika slag av tillsatsmedel kan tillsättas för att åstadkomma en viss konsistens i asfalten (Granhage, 2009). Ordet asfalt är egentligen en förkortning av den korrekta benämningen asfaltbetong och skillnaden mellan cementbetong och asfaltbetong är bindemedlet, där asfaltbetong

innehåller bitumen. Bitumen skapar en viss flexibilitet i beläggningen. I cementbetong ingår bindemedlet cement, vilket medför en minskad flexibilitet och ökad styvhet. Fördelarna med asfaltbetong utöver flexibiliteten är att den är lätthanterlig och kostnadseffektiv (Asfaltskolan, 2020).

2.2.1 Stenmaterial

Stenmaterialet i asfalt utgörs antingen av natursten eller krossad sten. Eftersom natursten anses vara en ändlig produkt så brukar krossad sten vara det vanligast förekommande. I viktprocent består en asfaltbeläggning av 93–95% stenmaterial. Eftersom sten utgör en så stor andel av materialet i en asfaltmassa är asfaltens egenskaper starkt anknutet till egenskaperna i stenmaterialet. Främst har det inverkan på hållfastheten i asfalten (Agardh & Parhamifar, 2014).

Stenmaterialets beständighet beror på vilken sammansättning och beståndsdelar som bergarten består av. Om bergarten innehåller en hög halt av mineralen alkalihalt så medför det en försämrad vidhäftning till bitumen. Även trafikbelastning i kombination med saltlösning från halkbekämpning kan medföra nedbrytning av asfaltbeläggningen på kort tid om det råder ofördelaktiga förhållanden. Bergarter som innehåller sekundära mineral, alltså mineral som vanligtvis är mjuka, vattenhaltiga och ofta fibrösa, verkar försvagande och skapar ett vidhäftande damm under krossning som kan försvaga bindningen till bitumen (Höbeda & Bern, u.å).

2.2.2 Filler

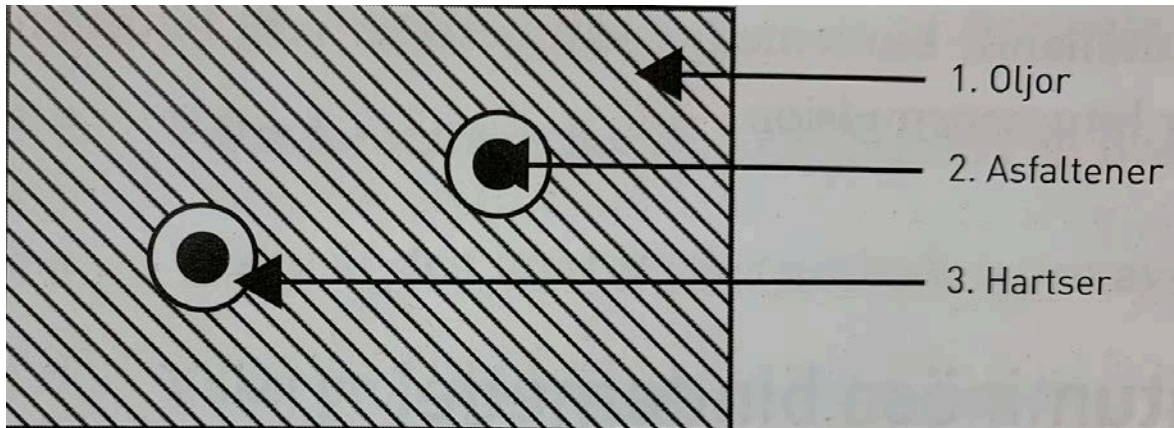
De allra minsta kornstorlekarna i stenmaterial kallas för filler. Höbeda och Bern (u.å) nämner att filler definieras som det stenmaterial som fullständigt passerar en 0,063 mm sikt. Dock kan denna siffra skilja sig åt beroende på land, eftersom Agardh och Parhamifar (2014) nämner att gränsen ligger på 0,075 mm och i vissa metodanvisningar anges 0,125 mm (Tyllgren, 2022). Filler har flera olika funktioner, men dess huvudsakliga uppgift är att tillsammans med bindemedlet bilda ett bruk som fyller ut hålrum som bildas mellan de större stenfraktionerna i asfaltbeläggningen och binder ihop de större stenfraktionerna. Detta medför en ökad hållfasthet och beständighet i asfaltbeläggningen. När filler blandas med bitumen fås ett asfaltbruk med högre viskositet jämfört med endast bitumen. Brukets volym är nästan dubbelt så stor jämfört med bitumen. En annan funktion som filler har är att minska risken för avrinning av bindemedlet vid framställning och utläggning av asfaltmassan. Filler har även förmågan att förbättra stabiliteten hos den färdiga beläggningen (Agardh och Parhamifar, 2014).

2.2.3 Bitumen

Bitumen är det material i asfaltmassan som håller ihop stenaggregatet i formen av ett asfaltbruk. Det är en mörkbrun till svart, flyktig fast till halvfast substans med bindningsförmåga. Bitumen finns i naturen som naturasfalt, men framställs vanligtvis

genom raffinering av petroleum. Bitumen består i huvudsak av tre beståndsdelar (Agardh & Parhamifar, 2014):

1. Oljor
2. Partiklar av kolföreningar (asfaltener) som svävar i oljorna.
3. Lättflytande kolväten (hartser) som omger partiklarna som ett skyddsskikt. Figur 2 nedan illustrerar de tre komponenterna.



Figur 2 - Bitumens beståndsdelar (Agardh & Parhamifar, 2014).

Bitumen är den viktigaste beståndsdel i asfalt då den ger materialet dess karaktär. Den typ av bitumen som väljs till asfaltbeläggningen måste väljas noggrant utifrån trafikbelastning och klimatförutsättningar. Bitumens främsta syfte är att skydda stenmaterialet från att krossas, ge konstruktionen viskösa, elastiska samt förbättrade lastfördelande egenskaper. De elastiska egenskaperna som bitumen tillför medför att konstruktionen får möjlighet att återhämta sig efter deformationer. De viskösa egenskaperna gör konstruktionen flexibel på så sätt att beläggningen får förmågan att forma sig efter rörelser utan att brott sker (Agardh & Parhamifar, 2014).

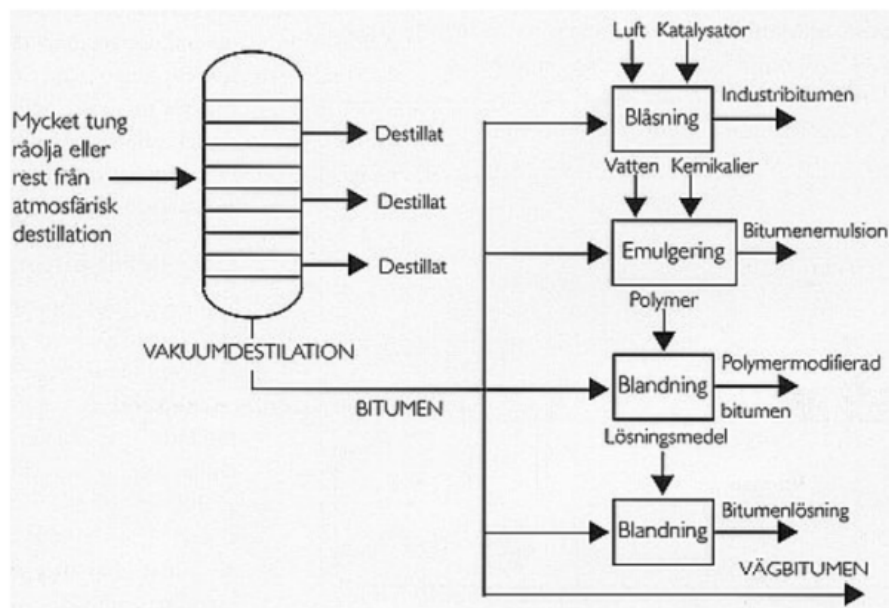
Bitumen är ett hydrofobt ämne och löser sig således inte i vatten. Bitumen är även viskoelastiskt vilket innebär att materialet vidtar olika fysikaliska former vid olika temperaturer. Bitumen stelnar när det kyls ner och under riktigt låga temperaturer blir det sprött. Vid högre temperaturer, mellan 100 °C och 200 °C, blir materialet flytande och kan därmed formas om och tillsättas med andra material (Self, 2015).

Vid bestämning av kvaliteten på bitumen mäts vanligtvis dess konsistens, det vill säga bindemedels viskositet. En vanlig beskrivning av bitumens kvalitet är penetrationen vid 25 °C. Penetration mäts genom att låta en nål med en viss vikt sjunka in i ett materialprov under en viss tid. Penetrationstalet anger hur många tiondels millimeter nålen sjunker ner i ett materialprov (Agardh & Parhamifar, 2014).

I denna studie kommer som tidigare nämnts bitumensorterna 70/100 och Nypol 73 att undersökas. Bitumen 70/100 (penetrationstal mellan 70 och 100 tiondels mm) är ett vanligt förekommande bindemedel på högtrafikerade gator i södra och Mellansverige (Wågberg, 2013). Nypol 73 är ett polymermodifierat bindemedel (PMB 40/100–75) med särskilt god beständighet mot permanent deformation och sprickbildning (Nynas AB, 2021).

När petroleum raffineras vid framställning av bitumen så sker det genom en destillationsprocess. Processen sker i en ugn där petroleum värms upp till temperaturer mellan 300 °C och 350 °C. När petroleum upphettas och förs in i ett så kallat destillationstorn så är dess fysikaliska form både i vätske- och gasform. Syftet med destillationen är att separera gasen och vätskan från varandra genom att gasen stiger uppåt i tornet medan vätskan sjunker. Resultatet av denna separering är att det bildas ett antal biprodukter och för att producera ett brukbart bitumen så destilleras de framtagna biprodukterna ytterligare. Till skillnad från den första destillationsprocessen som skedde under atmosfärstryck så sker denna destillation med undertryck. Anledningen till undertrycket är att minska kokpunkten hos biprodukterna. Om biprodukterna skulle värmts upp under atmosfärstryck skulle de förstöras då produkterna vanligtvis har hög kokpunkt (Redelius, u.å).

Sista delprocessen vid framställning av bitumen benämns vakuumdestillation och illustreras i Figur 3 nedan. I detta steg destilleras de återstående biprodukterna i vakuum för att sedan justeras och bearbetas fram till olika slag av bitumen. Vilken typ och kvalite på bitumen som fås i slutskedet beror på vilken temperatur och tryck som varit rådande under framställningsprocessen. Så genom att justera temperatur och tryck under destillationsprocessen kan önskade egenskaper hos bitumen produceras (Redelius, u.å).



Figur 3 - Process för framställning av bitumen (Redelius, u.å).

2.2.3.1 Bitumensammansättning och indelning

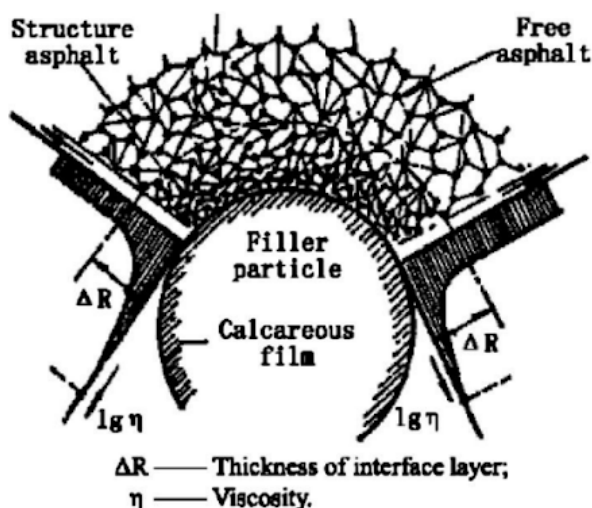
De kolvätekedjor som bitumen består av utgör ungefär 90–99% av massprocenten i bitumen. Utöver kolvätekedjor brukar bitumen även innehålla svavel, kväve och syre. Oftast brukar dessa ämnen kompletteras och tillsätts oorganiska salter och oxider såsom magnesium, järn, nickel och kalcium (Read & Whiteoak, 2015).

Att veta den exakta strukturen och ingående ämnen i bitumen är däremot inte helt enkelt eftersom den kemiska sammansättningen är komplex och beror på var råoljan (petroleum) härstammar ifrån. På grund av bitumensammansättningen komplexitet brukar det inte vara av intresse att genomföra en komplett kemisk analys, utan vanligtvis delas bitumen in i två bredare grupperingar: asfaltenes och maltenes (där maltenes delas in i ytterligare tre undergrupper). Viktigt att nämna här är att det förekommer överlapp mellan dessa två grupper och de är således inte helt väldefinierade. Syftet med denna indelning av bitumen är att förenkla materialets komplexitet och att placera bitumens olika reologiska egenskaper till större kemiska grupper (Hunter, et. al., 2015).

2.2.4 Asfaltbruk

Asfaltbruk kallas den blandning bestående av filler, bitumen och eventuella tillsatser. De komponenter som har störst påverkan på asfaltbrukets slutliga egenskaper är typ och mängd av filler och bitumen som används. Med egenskaper syftas i detta sammanhang på asfaltbrukets reologiska egenskaper, såsom viskositet, styvhet och mjukpunkt (Liao, et. al., 2012). En ytterligare faktor som påverkar asfaltmassans egenskaper är förhållandet mellan mängden filler och bitumen. Om asfaltbruket innehåller låga halter filler beter sig asfaltbruket och såväl bitumen som en newtonsk vätska vid hög temperatur, alltså ett material som oavsett förhållande har samma egenskaper. Ju högre andel filler som ingår i asfaltbruket desto mer beter sig asfaltbruket som en icke newtonsk vätska (Hesami, et. al., 2014).

Fillers påverkan på asfaltbrukets reologi beror till viss del på att fillern förändrar den kringliggande bitumens reologi när fillern binder till bitumen. Med andra ord innebär det att den bitumen som befinner sig omkring fillern kommer få ändrade egenskaper med avseende på exempelvis viskositet och styvhet. Hesami et. al. (2014) påstår att man genom att variera på fillermaterialets storlek och utformning kan manipulera de nya, förändrade egenskaperna hos bitumen. Den påverkan som filler har på bitumen beror däremot på avståndet mellan de två, där påverkan blir avtagande ju större avståndet mellan dem är. Illustration av detta resonemang framgår i Figur 4 nedan.



Figur 4 - Illustration över interaktionen mellan filler och bitumen (Hesami et. al. 2014).

Det som sker är att det blir ett om-arrangemang där de bitumenpartiklar som befinner sig alldeles intill i anslutning till fillerpartikeln bildar ett lager av diffusionslösningssmembran, som benämns strukturbitumen och framgår i Figur 4 som "Structure asphalt". De bitumenpartiklar som är längre ifrån fillerpartikeln och således inte ingår i membranet benämns fritt bitumen (Free asphalt). Interaktionen som sker mellan bitumen och filler på fillerpartiklarnas yta förorsakar en bindningssyrka som påverkar asfaltbrukets styvhet (Tan & Guo, 2014).

Tillsatsmedel som tillsätts i asfaltbruk används för att modifiera egenskaperna i asfaltbruket. De mest förekommande tillsatsmedlen är fibrer och polymerer (Lundström, 2021). Enligt en studie genomförd av Eriksson och Zia (2019) framkommer det att polymermodifierat asfaltbruk har kraftigare spårresistens jämfört med vanligt bruk. Fibrer krävs i stenrika asfalttyper av typ tunnskiktsbeläggningar, TSK. Annars skulle asfaltbruket rinna ut ur asfaltmassan under hanteringen.

2.3 Klassificering av bitumen

Vad gäller klassificering av bitumen så finns det inte ett likadant och gemensamt system som används världen över. USA och Europa har åtskilda klassificeringssystem med viss överlapp mellan dem då europeisk klassificering har nyttjat mätningssystem som haft det amerikanska klassificeringssystem som källa och ursprung.

2.3.1 Superpave (USA)

1987 startades i USA ett forskningsprojekt av ett forskningsprogram vid namnet Strategic Highway Research Programme (SHRP) som heter Superpave, som står för Superior performing pavements. Ett syfte med projektet var att skapa ett nytt klassificeringssystem för bindemedel. Bakgrunden till behovet av ett nytt system var att forskarna på forskningsprogrammet kom fram till att de traditionsenliga mätningssystemen som penetrationstal och mjukpunkt inte gav tillräckligt korrekt information gällande bindemedlets beteende ute på fält. Mätmetoder som varit godkända av European Committee Standardization (ECS) visade sig inte beskriva bitumens viskoelastiska egenskaper när man kontrollerade och stämde av dessa genom empiri (Bakløkk et al., 2002). I detta äldre system klassificerades materialet efter dess egenskaper vid en given temperatur, och utifrån detta antas sedan bituminets hög- och lågtemperaturogenskaper (Mahboub, 2004).

Genom mätmetoderna i Superpave blev det möjligt att under kontrollerad belastning och temperatur undersöka bitumens reologiska egenskaper och således kan systemet utgå från klimatiska förhållanden och trafikbelastningar (Bakløkk et al., 2002). Med Superpave undersöks bitumens egenskaper vid höga och låga temperaturer, som sedan även

kompletteras med krav på motståndskraft, deformation och åldringsegenskaper (Mahboub, 2004).

När man har jämfört resultat på olika bitumensorter från mätningar med Superpave med prestationsmätningar i färdiga asfaltbeläggningar har resultaten varit lika. Så till skillnad från de traditionella mätningsskallmetoderna som används i det europeiska systemet och som bygger på empiriska beräkningar så baseras Superpaves mätmetoder bland annat på det klimatförhållande som skall råda i den konstruktion där bitumen ska användas. Problemet med de europeiska metoderna är att de inte är särskilt användbara på modifierad bitumen, utan fungerar bra endast för kända bitumensorter. Orsaken är att vid tillägg av diverse tillsatser till bitumen så förändras de tekniska egenskaperna, vilket ställer högre krav på de vetenskapliga mätmetoderna som används till undersökning (Baklökk et al., 2002). De tester som genomförs enligt Superpave standarden för klassificering av bitumen genomförs med olika mätmetoder som sedan slutligen resulterar i en PG-gradering för bituminet. De mätmetoder som används i Superpave är följande (Baklökk et al., 2002):

- DSR (Dynamic Shear Rheometer) - Mäter viskoelastiska egenskaper, spårbildningsmotstånd.
- BBR (Bending Beam Rheometer) - Mäter bitumens styvhet vid låga temperaturer, sprickmotstånd.
- RTV (Rotational Viscometer) - Bitumens flytbarhet vid höga temperaturer.
- DTT (Direct Tension Test) - Egenskaper vid lågtemperaturer, sprickmotstånd.
- RTFOT (Rolling Thin Film Oven Test) - Simulerad åldring av prov vid produktion.
- PAVT (Pressure Aging Vessel Test) - Simulerad åldring under livstid.

Testerna ovan syftar främst till att undersöka tre egenskaper hos bindemedel: krackelering vid låg temperatur, utmattnings- och spårbildning vid hög temperatur. Genom utförande av flera reologiska tester, däribland med DSR, klassificeras bitumen utifrån dess bidrag till asfaltbeläggningens motståndskraft mot de tre nämnda typer av skador. Via testerna erhålls även de tre temperaturerna t-låg, t-mellan och t-hög. Det kategoriseringssystem som används för bitumen i Superpave heter Performance Grading (PG). Genom detta system graderas bitumen via två tal, alltså genom tekniska parametrar. Ett exempel på hur en klassificering av bitumen kan se ut är "PG 64–28". Innebörden av denna beteckning är att bindemedlet är lämpligt att användas i asfaltkonstruktioner där temperaturen inte överstiger 64°C eller understiger -28°C (Mahboub, 2004).

Värdena 64 och -28 är de temperaturer där t-hög respektive t-låg nås. T-hög och t-mellan testas båda genom sveptest med DSR där t-mellan är ett mått på motståndskraft mot krackelering och t-hög används för att kategorisera motståndet mot spårbildning under höga temperaturer. Parametern t-låg, som hittills främst har undersökts via BBR, beskriver bitumens möjlighet att motstå temperaturbetingad sprickbildning (Ibid.). T-låg anger den

temperatur då bitumen visar upp en styvhet på $S(t) = 300$ MPa eller $m = 0,300$ genom BBR-test (Hunter, et. al., 2015).

Ursprungligen handlade t-hög om att med PP25-svepet hitta temperaturen varvid $G^*/\sin(\delta) = 1$ kPa för ursprungligt bitumen eller $G^*/\sin(\delta) = 2,2$ kPa för RTFOT-behandlat bitumen. Den tekniken är dock på väg att ersättas av MSCR-testet, där man söker temperaturen då ett mått för krypning, J_{nr3200} , antar olika värden beroende på trafikvolymen (4, 2, 1 respektive 0,5 kPa⁻¹) (Tyllgren, 2022).

2.3.2 Europeiskt klassificeringssystem

Vid den tekniska klassificering av bitumen enligt det europeiska systemet används olika grundläggande provningsmetoder som i första hand används för att bestämma bitumenets konsistens under olika temperaturförhållanden. Det är European Committee for Standardization (CEN) med dess tekniska kommitte som arbetar med att bearbeta fram standarder som samordnar testmetoder och specifikationer. Som tidigare nämnts så används traditionella testmetoder för att undersöka de huvudsakliga egenskaperna hos bitumen. Testerna som använts har utvecklats och verifierats för icke modifierade bitumen (Eurobitume, 2021).

Eurobitume (2021) nämner även att de traditionella testmetoderna av praktiska skäl även har testats på polymermodifierade bindemedel. Samtidigt nämns att nyare testmetoder kan vara lämpligare och bättre för att beskriva egenskaperna hos modifierade bitumen. Men omodifierade bitumens egenskaper och användningsbeteende kan beskrivas på ett tillförlitligt sätt med de traditionella metoderna. De mest använda metoderna, som betecknas EN med efterföljande sifferkod, beskrivs kortfattat i Tabell 2 nedan (Eurobitume, 2021).

Tabell 2 - Mätmetoder enligt Europeisk standard för framtagande av bitumenegenskaper (Eurobitume, 2021)

Metod	Beteckning	Beskrivning
Mjukpunktstest	EN 1427	Detta test (Kula och ring metoden) används för att testa bitumens egenskaper vid förhöjda temperaturer. Temperaturen bestäms genom att ett lager av bitumen i en mässingring som värms kontinuerligt upplever en viss deformation under tyngden av en stålkula. I denna studie har Nypol 73 mjukpunkten 73 °C (därav benämningen) och bitumen 70/100 en mjukpunkt mellan 42–52 °C (Raha Group, 2016).
Fraass brytpunkt	EN 12593	Testet beskriver bindemedlets övergång från ett flexibelt till ett sprött tillstånd och ger den temperatur vid vilken ett tunt skikt av bitumen på en stålplåt spricker under likformig kylning. Testet visar på bitumenets beteende vid låga driftstemperaturer.
Penetration	EN 1426	Genom att mäta hur djupt en nål penetrerar genom ett bitumenprov bestäms hårdheten.
RTFOT (Rollin Thin Film Oven Test)	EN 12607-1	RTFOT simulerar de kombinerade effekterna av värme och luft på en tunn film bestående av bituminöst bindemedel. Metoden är avsedd att simulera den korttidsåldring som sker under blandning, transport och utläggning av bitumen.
PAV (Pressure Ageing Vessel)	EN 14769	En metod avsedd att ge information om bitumens långvariga åldrandemottaglighet. Testet simulerar en långtidsåldring under högt tryck (2,1 MPa) som sker under beläggnings livstid. Dock finns det fortfarande frågor om hur tillämpbar och trovärdig detta åldringsförfarande är.
Kinematisk viskositet	EN 12595	I metoden bestäms den tid det tar för en given volym bitumen att strömma genom en kapillär under gravitation.
Dynamisk viskositet	EN 12596	Den tid det tar för en given volym bitumen att flöda genom en kapillär under vakuum.
Komplex skjuvmodul och fasvinkel - DSR	EN 14770	DSR är ett instrument som används för att testa bitumenegenskaper under en mängd olika belastningsförhållanden och temperaturer. Instrumentet kan beräkna egenskaper såsom den komplexa skjuvmodulen (G^*) och fasvinkeln (δ) under varierande temperatur och frekvenser.
MSCR -test (Multiple Stress Creep Recovery Test)	EN 16659	Även detta test genomförs med DSR. Ett prov av bindemedel placeras mellan två parallella plattor och belastas med konstant spänning i 1,0 s, följt av 9,0 s utan belastning. Både den procentuella återhämtningen och den icke återhämtningsbara efterlevnaden av bindemedlet beräknas.
BBR (Bending Beam Rheometer)	EN 14771	Provet placeras under konstant belastning i ett vätskebad vid låg temperatur under en bestämd tid. Testet ger information om

		bindemedlets styvhet vid låga temperaturer och dess förmåga att klara uppkomna spänningar utan att spricka.
--	--	---

2.4 Reologi

Reologi är vetenskapen om fasta materials och vätskors deformationsegenskaper och tillhör facken fysik och kemifysik. Ursprungligen kommer begreppet från det grekiska ordet "rheia" som betyder "att strömma". Reologins användning är att kunna beskriva töjnings- och spänningsförhållanden för material som uppvisar elastiska och viskösa egenskaper (Mezger, 2014).

En grupp av material som kan uppvisa både viskösa och elastiska egenskaper kallas viskoelastiska. Bland dem finns bitumen. Under låga temperaturförhållanden har bitumen en solid elastisk form och under höga temperaturer när den utsätts för krafter som får verka under en längre tidsperiod uppvisas mer viskösa egenskaper (Taylor & Airey, 2015). Ett materials reaktion på den kraftpåverkan den utsätts för beror enligt företaget Anton Paar (2022a) på tre följande faktorer:

- Materialets inre struktur
- De yttre krafter som verkar på materialet
- Omgivande förutsättningar, såsom temperatur.

2.4.1 Elasticitet

Elastiska material är material som efter att de belastats och deformerats återgår till sin ursprungliga form. De flesta material har elastiska egenskaper genom att de på en relativt liten spänning svarar med en direktproportionell töjning. Bitumen är ett material som vid låga temperaturer visar på elasticitet (Hunter, et. al., 2015). Enligt elasticitetsteorin gäller att spänningen är direkt proportionell mot töjningen och linjärt elastiska material följer hookes lag som beskrivs i Ekvation 2.1 nedan (Agardh & Parhamifar, 2014).

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (2.1)$$

Där:

σ – spänning [Pa]

E – elasticitetsmodul [Pa]

ε – töjning [%]

De flesta sega materialen går att belasta med tillräckligt stor spänning att att spänning och töjning inte längre är proportionella mot varandra. Vid detta stadium, när den så

kallade elasticitetsgränsen är uppnådd, kommer materialet inte längre att återgå till sin ursprungliga form, deformationen som uppstår återgår inte (Hunter, et. al., 2015).

2.4.2 Viskositet

Viskositet är en egenskap hos gaser och vätskor som beskriver deras motstånd mot flöde. En vätska eller gas med hög viskositet kommer visa på större motstånd mot att strömma jämfört med en vätska med låg viskositet. Definitionen av viskositet är förhållandet mellan skjuvspänning och skjuvhastigheten och hos alla enkla vätskor, såsom bitumen, minskar viskositeten med ökad temperatur (Hunter, et. al., 2015).

Det finns två sätt att beskriva viskositet på: Dynamisk viskositet och kinematisk viskositet (Energihandboken, u.å). Definitionen av dynamisk viskositet är kvoten mellan skjuvspänningen och skjuvhastigheten i enheten Pascalsekund och beskrivs i Ekvation 2.2 nedan (Mezger, 2014).

$$\eta = \tau / \dot{\gamma} \quad [Pa \cdot s] \quad (2.2)$$

Där:

η – Dynamisk viskositet $[Pa \cdot s]$

τ – skjuvspänning $[Pa]$

$\dot{\gamma}$ – skjuvhastigheten $[S^{-1}]$

Hur fort en vätska rör sig i förhållande till dess massa anges av den kinematiska viskositeten. Den definieras som kvoten mellan dynamisk viskositet och materialets densitet och uttrycks i enheten $[mm^2/s = 10^{-6} m^2/s]$, och beskrivs i Ekvation 2.3 (Mezger, 2014).

$$\nu = \eta / \rho \quad [mm^2/s = 10^{-6} m^2/s] \quad (2.3)$$

Där:

ν – kinematisk viskositet

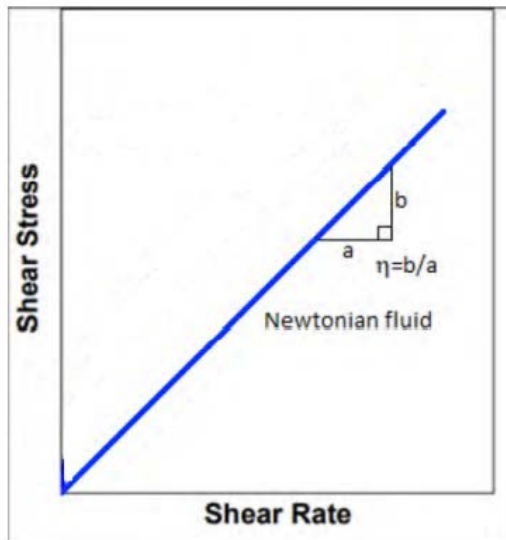
η – Dynamisk viskositet $[Pa \cdot s]$

ρ – densitet $[kg/s]$

2.4.3 Newtonsk och icke newtonsk vätska

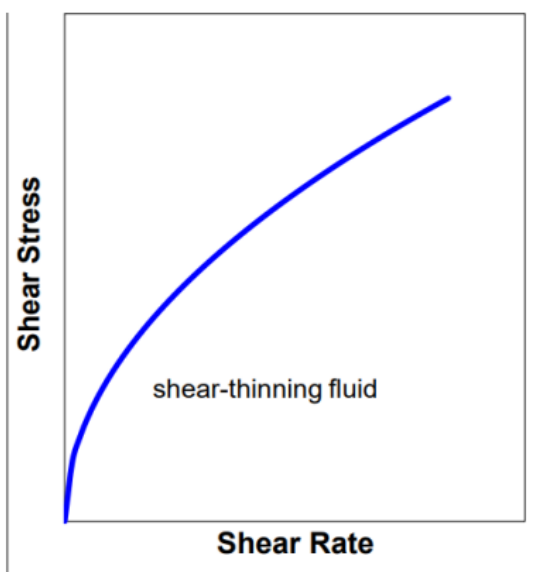
Definitionen av en newtonsk vätska är en vätska utan elasticitet som vid en given temperatur har en proportionalitet mellan skjuvspänningen och skjuvhastigheten. I ett diagram med skjuvhastighet på x-axeln och skjuvspänning på y-axeln, illustreras förhållandet med en rätlinje med start i origo, se Figur 5. Att linjen startar i origo

innebär att om det inte finns någon skjuvhastighet kommer det inte uppstå någon skjuvspänning. Den räta linjens lutning beror på vätskans viskositet (Subramanian, 2002).



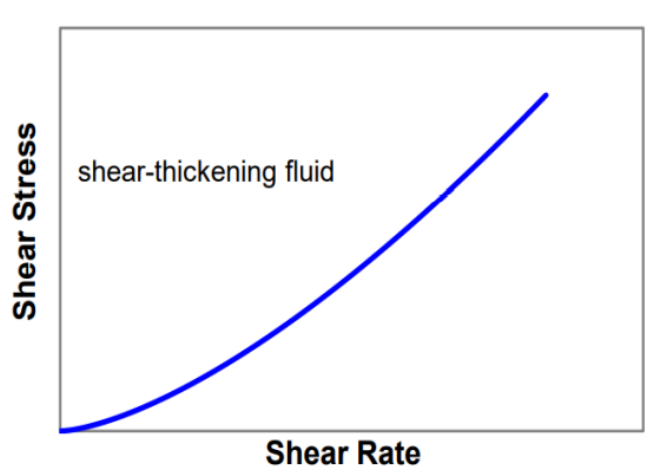
Figur 5 - Förhållandet mellan skjuvspänning och skjuvhastighet för en newtonsk vätska (Subramanian, 2002).

Ett annat fenomen som gäller för newtonska vätskor vid konstant tryck och temperatur är att de uppvisar konstant viskositet oavsett hur mycket skjuvhastigheten varierar (Brookfield engineering, 2017.). De vätskor som inte uppfyller kraven som nämns ovan för newtonska vätskor, benämns icke-newtonska vätskor. Vätskor med hög molekylvikt, vilket främst innefattas av polymerlösningar, är exempel på icke-newtonska vätskor. Vad gäller förhållandet mellan skjuvspänning och skjuvhastighet så är dessa inte längre proportionella för icke-newtonska vätskor (Subramanian, 2002), och illustreras i Figur 6. Precis som för newtonska vätskor börjar linjen i origo, men i takt med att skjuvhastigheten ökas så krökas linjen.



Figur 6 - Förhållandet mellan skjuvspänning och skjuvhastighet för en skjuvförtunnande (Subramanian, 2002).

I Figur 6 ovan står det "shear-thinning fluid" (Skjuvningsförtjockande vätska). Anledningen är att en vätska kan uppvisa skjuvningsförtjockande eller skjuvningsförtunnande egenskaper om viskositeten ökar eller minskar när skjuvhastigheten ökar för vätskan (Subramanian, 2002). I Figur 7 nedan illustreras samma fenomen som beskrivits ovan, men för en skjuvförtjockande icke-newtonsk vätska.



Figur 7 - Förhållande mellan skjuvspänning och skjuvhastighet för en skjuvförtjockande icke newtonsk vätska (Subramanian, 2002).

När det kommer till viskositeten så är den inte konstant för icke-newtonska vätskor, utan vid en viss temperatur och tryck varierar viskositeten när skjuvhastigheten ändras, se Figur 8 nedan.



Figur 8 – Viskositetens (y-axeln) variation i takt med skjuvhastighetens (x-axeln) ändring för icke-newtonsk vätska (Brookfield Engineering, 2017).

2.4.4 Viskoelasticitet

Material som har den fysikaliska egenskapen viskoelasticitet kan beroende på temperatur och belastning visa på både elastiska och viskösa egenskaper. För bitumen dominerar de elastiska egenskaperna vid låga temperaturer och korta belastningstider. Vid långa belastningstider i kombination med höga temperaturer dominerar de viskösa egenskaperna. Till skillnad från plastiska material som deformeras permanent så har viskoelastiska material förmågan att till viss del återgå till dess ursprungliga form efter avlastning. Bitumen uppvisar en blandning av plastiska och viskoelastiska egenskaper, vilket innebär att en del av deformationen förblir permanent och återhämtas inte efter avlastning samtidigt som det sker en försenad elastisk återhämtning för en annan del (Koenders, 2015).

Reologin hos omodiferat bitumen kan förenklat delas in i tre olika kategorier:

- Låg temperatur – Linjärelastiska förhållanden
- Mellanliggande temperaturer – Viskoelastiska förhållanden
- Hög temperatur – Viskösa förhållanden

När bitumen utsätts för temperaturer och lasttider under normala bruksförhållanden i asfaltmassor beter sig materialet viskoelastiskt. I Superpave är det dessa temperaturer och lasttider som man hänvisar till som t-mellan. För att beskriva och kvantifiera bitumens egenskaper vid brukstemperaturen t-mellan har det tidigare varit vanligt att använda mätmetoderna penetrationstal och mjukpunkt. Men eftersom dessa mätmetoder är empiriska kan de inte skildra bituminets viskoelastiska egenskaper. För att kunna beskriva de viskoelastiska egenskaperna har man på senare år börjat använda sig av DSR (Hunter, et. al., 2015; Hadzikadunic/Al-Sultani, 2020).

2.5 Åldring av bitumen

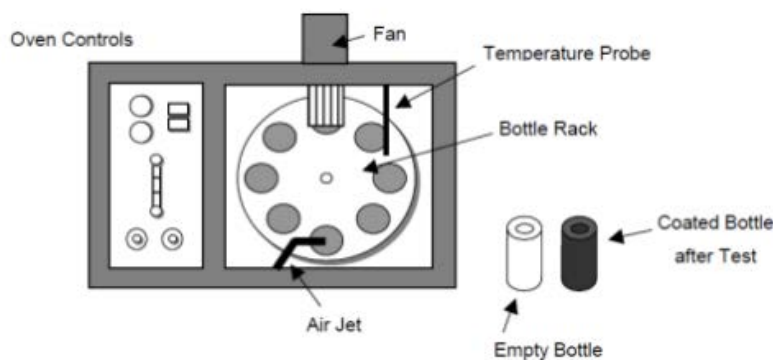
Fenomenet åldring orsakas och resulteras av en kombination av de yttre faktorerna syre, temperaturförändringar och ultraviokett strålning som påverkar bitumen. När bitumen utsätts för åldring förändras materialets kemiska sammansättning vilket sedan leder till att de reologiska egenskaperna ändras. Åldringen av bitumen delas in i två olika faser, där den första fasen kallas för kortsiktig åldring och påbörjas vid tillverkning och utläggning av asfaltmassan. Den andra fasen kallas för långsiktig åldring och sker gradvis under asfaltens livslängd (Yusoff, 2012).

Den egenskapen som förändras mest under åldring är viskositeten som ökar, vilket medför att bituminet blir styvare. Den komponent i bitumen som främst orsakar åldring är minskningen av de flyktiga beståndsdelarna, hartserna. Det är när hartserna utsätts för exponering av UV-ljus och oxidation som dessa minskar (Yusoff, 2012). Efter en längre tids åldring blir bituminet så pass styvt att vidhäftningen mellan stenmaterialet och bitumen försämras. Konsekvensen av detta blir en ökad risk för sprickbildning (Airey, 1997). När man utför åldringstest för bitumen finns två olika varianter, ett för kortsiktig åldring och ett för långsiktig åldring. Vid kortsiktig åldring simuleras åldringen, eller förhårdningen, under tillverkningen och utläggningen av materialet med hjälp av ett

RTFOT-test. Vid långsiktig åldring simuleras vägens långsiktiga förhållanden genom komplettering med ett så kallat PAV-test (Yusoff, 2012).

2.5.1 RTFOT-test

RTFOT, Rolling Thin Film Oven Test, utförs på bitumen och simulerar händelseförloppet för materialet från att det är rent bitumen upp till 2 år efter utläggning av asfaltsbeläggningen. Denna tidsperiod för simuleringen betraktas som en kortsiktig period. Metodiken för testet är att bitumen tillsätts i speciella flaskor och placeras på ett vertikalt roterande stativ i en ugn. Rotationstiden är 75 minuter och temperaturen i ugnen värms upp till 163°C. För att rensa bitumenprovet från de ångor som skapas i ugnen och för att skynda på oxidationsprocessen, alltså själva åldringen av bitumenet, utsätts provet för en luftstråle vid varje rotation. Figur 9 nedan åskådliggör de olika komponenterna som ingår i testet (Yusoff, 2012).



Figur 9- RTFOT-testets olika beståndsdelar (Yusoff, 2012).

2.5.2 PAV-test

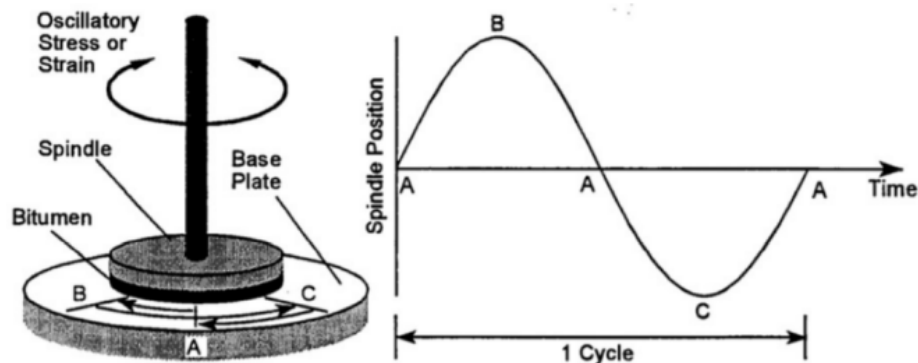
När långsiktig åldring av bitumen studeras används Pressure Ageing Vessel test, PAV-test. Med hjälp av PAV simuleras bitumenets fysiska och kemiska förändringar efter att det har utsatts för oxidation under lång tid. PAV-test utförs dock inte på ny, ren bitumen, utan testet genomförs på åldrad bitumen som tidigare har genomgått RTFOT-testet. Testet utförs i en uppvärmd behållare under ett tryck på 2,1 MPa där ett 50 grams bitumenprov ligger placerad i en panna. Tiden testet bevaras i ugnen är 20 timmar med temperatur på 90, 100 eller 110°C. Den temperatur som väljs beror på det rådande klimatet som bituminet ska användas i (Harrigan, 1994).

2.6 Dynamisk skjuvreometer (DSR)

Med en dynamisk skjuvreometer kan reologiska egenskaper, hos både fasta och flytande material, mätas och undersökas. Provkropparna som användes i mätinstrumentet utsätts för en rotationsrörelse eller oscillerande påkänning. Under tiden som provet körs med DSR kan parametrar såsom temperatur, frekvens och spänning varieras successivt. Resultatet från testerna är komplex skjuvmodul (G^*) och fasvinkel (δ) (Redelius, u.å.).

Det finns principiellt två olika tillvägagångssätt att utföra mätningar med dynamisk skjuvreometer på. Testet kan antingen utföras med en kontrollerad och förinställd skjuvspänning eller förinställd skjuvtöjning. Med inställningen kontrollerad skjuvspänning anger instrumentet resulterande skjuvtöjning orsakad av det vridmoment som appliceras på bitumenprovet. Om mätningen utförs med förinställd skjuvtöjning anges istället resulterande skjuvspänning från vridningen som krävs för att åstadkomma den förinställda rotationen (Yusoff, 2012).

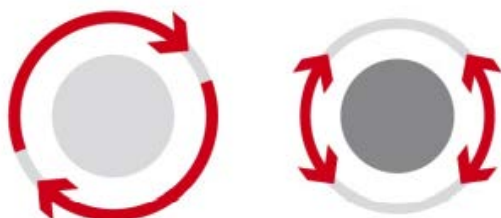
Metoden bakom den dynamiska skjureometers (DSR) funktionalitet åskådliggörs i Figur 11 nedan. Plattan som ligger underst är fixerad och det är den översta plattan som kan röra sig fritt och som det appliceras ett vridmoment på som medför att plattan börjar oscillera. Som Figur 10 visar med diagrammet till höger erhålls en fullständig cykel när den översta plattan rört sig från punkt A till punkt B, tillbaka förbi punkt A till punkt C och slutligen tillbaka till punkt A (Yusoff, 2012). När plattan har genomfört en cykel så deformeras provet då det utsätts för en skjuvtöjning (γ). Skillnaden mellan den applicerade skjuvspänningen (τ) och den uppmätta skjuvtöjningen (γ) resulterar i en fasvinkel (δ) (Mukandila, et. al., 2015).



Figur 10 - Uppsättning av DSR-maskinen vid genomförande av oscillationstest (Airey, 1997).

2.6.1 Rotationstest

DSR kan användas till både skjuvnings- och vridningstester samt rotationstester. Syftet med rotationstesterna är att undersöka vätskors viskositet. Skillnaden mellan rotationstest och oscillationstest är att i ett rotationstest så roterar provet och därmed plattan kontinuerligt åt samma håll. I ett oscillationstest sker endast små vridrörelser, se Figur 11 nedan för illustration.



Figur 11 - Rotationstest (vänster) med kontinuerlig rotation och ett oscillationstest (höger) (Paar, 2022a)

2.6.2 Oscillationstest

För att undersöka material med elastiska, viskösa och viskoelastiska egenskaper används vanligtvis oscillationstest. Generellt utförs dessa tester i det linjära viskoelastiska området (LVE-området). Bitumenprover som ligger placerade mellan två plattor utsätts för en oscillerande skjuvspänning och skjuvtöjning, där endast den övre plattan rör sig (oscillerar) (Airey, 2002). Oscillationstest kan beskrivas av en modell, två-platt modellen, där två plattor är placerade parallellt på ett avstånd h från varandra, se Figur 12 nedan. När den översta plattan utsätts för en kraft F samtidigt som den undre plattan är fast kommer den övre plattan, med beteckningen A, att förflyttas i sidled (Mezger, 2014).



Figur 12 - Illustration av två-platt modellen (Paar, 2022b).

Platta A:s rörelse i sidled resulterar i en skjuvtöjning för provkroppen och vinkeländringen som orsakas av skjuvtöjningen benämns skjuvvinkel. För att oscillationstestet ska kunna genomföra en mätning på de reologiska egenskaperna måste provkroppen vidhäftas mot båda plattorna samtidigt som provet deformeras homogent (Mezger, 2014).

För att beräkna skjuvspänningen som skapas i plattan divideras kraften F med övre plattans area A enligt ekvation 2.4 nedan (Mezger, 2014).

$$\tau = F/A \quad (2.4)$$

Där:

τ – Skjuvspänning [Pa]

F – Kraft [N]

A – Area [m^2]

Skjuvhastigheten beräknas genom att dividera hastigheten som erhålls av den framkallade kraften med avståndet h mellan plattorna enligt Ekvation 2.5 nedan (Mezger 2014).

$$\dot{\gamma} = v/h \quad (2.5)$$

Där:

$\dot{\gamma}$ – Skjuvhastighet [S^{-1}]

v – Hastighet [m/s]

h – Avstånd mellan plattorna [m]

2.6.2.1 Idealelastiskt beteende

När oscillationstest genomförs tillämpas olika lagar och formler beroende på de egenskaper som ett material uppvisar. För material som uppvisar idealelastiskt beteende kan sambandet mellan skjuvspänning $\tau(t)$ och skjuvtöjning $\gamma(t)$ beskrivas genom Hookes lag enligt Ekvation 2.6 (Mezger, 2014).

$$\tau(t) = G^* \cdot \gamma(t) \quad (2.6)$$

Där:

$\tau(t)$ – skjuvspänning [Pa]

G^* – komplex skjuvmodul [Pa]

$\gamma(t)$ – skjuvtöjning [%]

Parametern komplex skjuvmodul G^* som har ett konstant värde över tid är ett mått på styvheten hos materialet. Genom att skriva om Ekvation 2.6 ovan erhålls följande formel för den komplexa skjuvmodulen G^* , enligt Ekvation 2.7 (Ibid.).

$$G^* = \tau(t) / \gamma(t) = \text{konstant} \quad (2.7)$$

Både skjuvspänningen $\tau(t)$ och skjuvtöjning $\gamma(t)$ kan uttryckas med hjälp av en sinusfunktion då de enligt Ekvation 2.6 är tidsberoende. För idela elastiska material gäller att skjuvspänningskurvan och skjuvtöjningskurvan inträffar samtidigt med samma frekvens och fas i förhållande till varandra, se Figur 13 nedan. Den sinusformade funktionen framgår i Ekvation 2.8 (Ibid.).

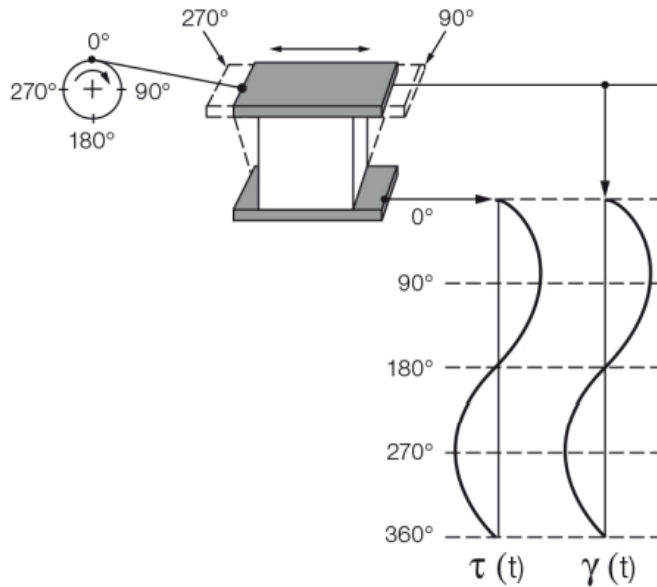
$$\gamma(t) = \gamma_A \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (2.8)$$

Där:

$\gamma(t)$ – sinusformad skjuvtöjningsfunktion

γ_A – skjuvtöjningsamplitud [%]

ω – vinkelfrekvens [rad/s]



Figur 13 – Förhållandet mellan skjuvspännings- och skjuvtöjningskurvan för idela elastiska material (Paar, 2022a).

2.6.2.2 Idealvisköst beteende

För material med idealvisköst beteende gäller Newtons lag som definieras i Ekvation 2.9 (Ibid.).

$$\tau(t) = \eta^* \cdot \dot{\gamma}(t) \quad (2.9)$$

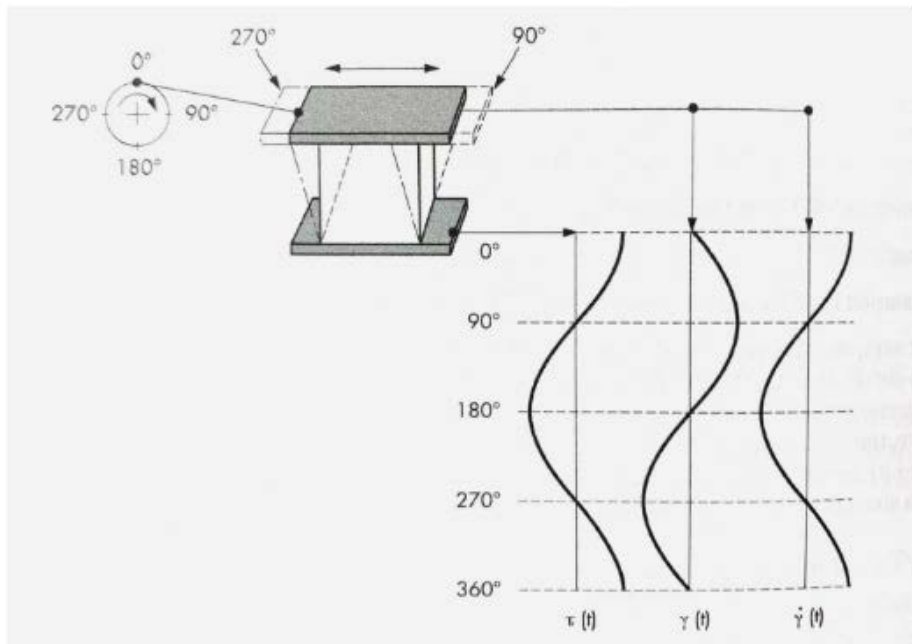
Där:

$\tau(t)$ – skjuvspänning [Pa]

η^* – komplex viskositet [Pa · s]

$\dot{\gamma}(t)$ – skjuvhastighet [%]

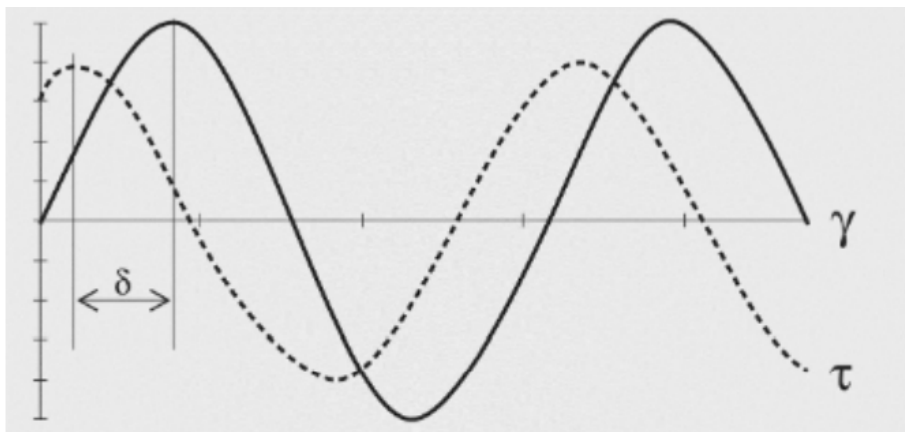
För idealviskösa material gäller att förhållandet mellan skjuvspänningskurvan och skjuvtöjningskurvan skiljer sig åt jämfört med idealelastiska material. Skillnaden mellan dessa material är att för idealviskösa material förekommer en fasförskjutning med fasvinkeln $\delta = 90^\circ$ mellan skjuvtöjningskurvan $\gamma(t)$ och skjuvspänningskurvan $\tau(t)$ enligt Figur 14 (Ibid.).



Figur 14 - Förhållandet mellan skjuvspännings- och skjuvtöjningskurvan för idela elastiska material (Mezger, 2014).

2.6.2.3 Viskoelastiskt beteende

För material med viskoelastiskt beteende kommer skjuvtöjningskurva $\gamma(t)$ vara förskjuten med en fasvinkel δ mellan 0° och 90° relativt skjuvspänningskurvan $\tau(t)$, dock med en liknande frekvens. Hur stor förskjutningen mellan kurvorna är beror på hur elastiskt eller visköst materialet är. När fasvinkeln ligger omkring 90° definieras det som en viskös vätska och material med fasvinkeln nära 0° anses vara elastiskt solida. I Figur 15 illustreras fasförskjutningen med fasvinkeln δ (Ibid.).



Figur 15 - Förskjutning av fasvinkeln mellan sinus kurvorna för viskoelastiska material (Mezger, 2014).

Skjuvtöjning med den fasförskjutna sinusfunktionen för viskoelastiska material framgår i Ekvation 2.10.

$$\gamma(t) = \gamma_A \cdot \sin(\omega \cdot t + \delta) \quad \text{för } 0^\circ \leq \delta \leq 90^\circ \quad (2.10)$$

Där:

$\gamma(t)$ – sinusformad skjuvtöjningsfunktion

γ_A – skjuvtöjningsamplitud [%]

ω – vinkelfrekvens [rad/s]

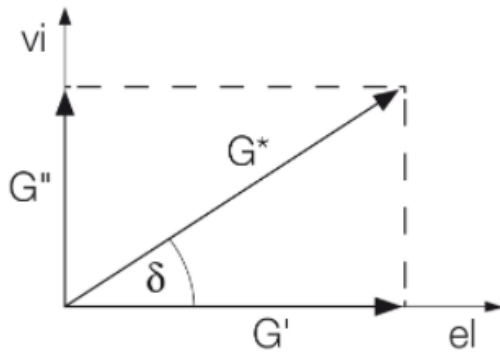
2.6.3 Komplex skjuvmodul

När ett oscillationstest utförs på prover med viskoelastiska egenskaper så utsätts proven för en skjuvkraft och skjuvspänning. Under testets gång så uppstår ett motstånd som motverkar deformationen som materialet utsätts för, som kallas för skjuvmotstånd G^* . Definitionen av den komplexa skjuvmodulen är det totala motståndet mot deformation under belastning av ett material. Ekvationen för den komplexa skjuvmodulen framgår i Ekvation 2.7 ovan. Den komplexa skjuvmodulen utgörs av två komponenter, en elastisk och en viskös som benämns lagringsmodul (G') respektive förlustmodul (G''). Det är via fasvinkeln δ , alltså fördröjningen mellan den applicerade skjuvspänningen och skjuvtöjningen, som komponenterna relateras till den komplexa skjuvmodulen (Airey, 2002).

Den elastiska delen av ett materials viskoelastiska beteende representeras av lagringsmodulen (G') och är ett mått lagrad mängd energi under skjuvprocessen. Denna lagrade energi är den som efter att belastningen som orsakat deformationen tas bort är pådrivande faktorn till att materialet ska återgå till sin ursprungliga form. De material som har förmågan att lagra denna energi under belastningstiden uppvisar ett reversibelt deformationsbeteende, alltså elastiskt material (Mezger, 2014).

Den viskösa delen av ett materials viskoelastiska beteende benämns som förlustmodulen G'' och är ett mått på den mängd energi som åtgår vid deformation av ett material under belastning. Energin i detta fall används för att förändra materialets struktur och viskösa material har ett irreversibelt deformationsbeteende (Mezger, 2014).

Utöver Ekvation 2.7 kan den komplexa skjuvmodulen G^* även beskrivas med hjälp av en vektor med två komponenter G' och G'' . Den elastiska delen av materialets viskoelastiska beteende, G' , utgör komponenten på x-axeln och den viskösa delen, G'' , är komponenten på y-axeln. I vektordiagrammet i Figur 16 visas sambandet mellan den komplexa skjuvmodulen, lagringsmodulen G' och förlustmodulen G'' . Även fasvinkeln, som bara kan växla mellan 0° och 90° , finns illustrerad i figuren, vars storlek avgör hur viskoelastiskt ett material är (Paar, 2022a).



Figur 16 - Illustration av förhållandet mellan skjuvmodulen, förlustmodulen, lagringsmodulen och fasvinkeln i ett vektordiagram (Paar, 2022a).

Genom trigonometri utifrån vektordiagrammet ovan kan fasvinkeln beräknas enligt Ekvation 2.11. Om fasvinkeln har ett värde under 45° så dominerar lagringsmodulen över förlustmodulen och således är materialet mer elastiskt än visköst. Om fasvinkeln däremot är större än 45° dominerar de viskösa egenskaperna i materialet. När lagrings- och förlustmodulen är lika stora dominerar varken de elastiska eller viskösa egenskaperna, utan då är de i balans. Detta sker då fasvinkeln är precis 45° (Mezger, 2014).

$$\tan \delta = G''/G' \quad (2.11)$$

Där:

δ – Fasvinkel [$^\circ$]

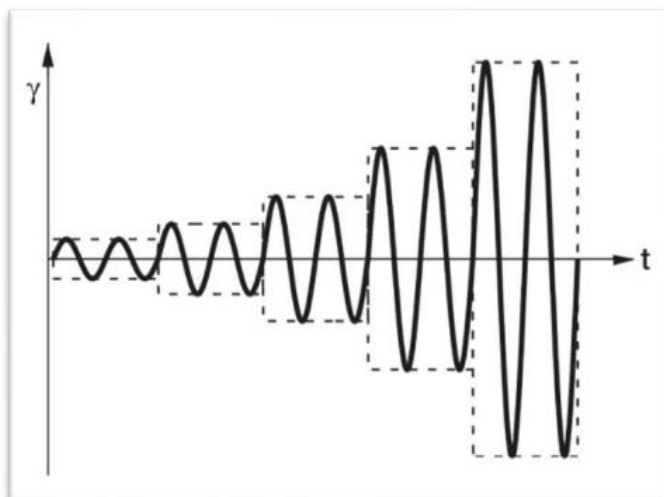
G' - Lagringsmodul [Pa]

G'' - Förlustmodul [Pa]

2.6.4 Amplitudsvep

Ett typ av oscillationstest är amplitudsvep. Vid detta test varierar amplituden samtidigt som frekvens och temperatur hålls konstanta. Vanligtvis genomförs testet med en vinkelfrekvens på $\omega = 10 \text{ rad/s}$ där frekvensen vid bitumenprov vanligtvis utgår ifrån Superpaves PG standard. Det finns två olika möjligheter att utföra testet på, antingen skjuvtöjningsamplituden $\gamma_A(t)$ som funktion av tiden (som i Figur 2.12) eller skjuvspänningsamplitud $\tau_A(t)$ som variation över tiden (Meger, 2014). Utöver vinkelfrekvensen 10 rad/s utsätts provet även för en töjning som vid en given temperatur

gradvis ökar från 0,01 till 100% (Yusoff, 2012). I Figur 17 visas ett amplitudsvep där skjuvningstöjningsamplituden varierar med tiden.

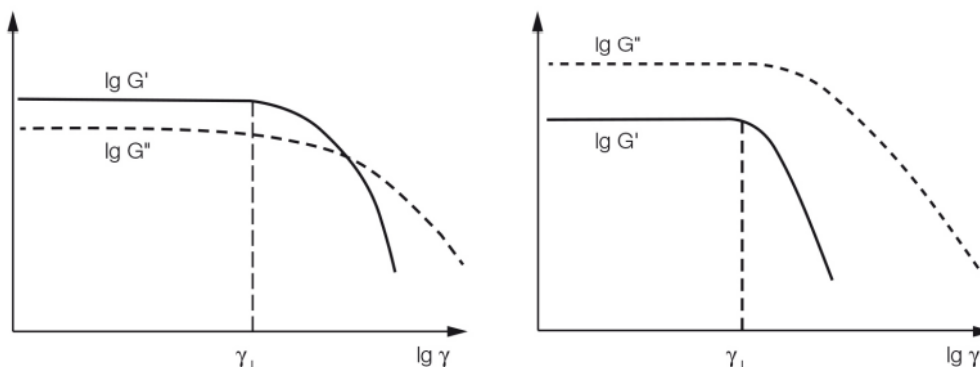


Figur 17- Amplitudsvep med varierande skjuvtöjningsamplitud (Paar, 2022a)

Syftet med amplitudsvep är i första hand att ta fram ett materials linjära viskoelastiska område, även kallat LVE-området. LVE-området är det område varvid amplitudsvepet kan genomföras utan att materialet utsätts för några större strukturella ändringar av materialets form och inre struktur. Således är materialets inre struktur fortfarande hel och intakt inom detta område. Men när materialet befinner sig utanför LVE-området rubbas dess inre struktur och det blir en ökad risk för irreversibla skador, såsom brott eller krypning. LVE-området innefattas oftast av att det är låga värden på töjningen (Paar, 2022c).

När LVE-området studeras är det vanligast att funktionskurvan för lagringsmodulen, G' -kurvan, som används och utgås ifrån eftersom den kurvan tenderar att gå utanför LVE-området först. LVE-områdets gräns definieras som det värde som uppfyller kravet $\log(G') > 0.95 \cdot \log(G'_0)$, alltså vid punkten då komplexa skjuvmodulen minskar till 95% av dess startvärde. I vissa fall kan ett värde på 90% av dess initiala värde accepteras, men för bitumenprov är det rekommenderas att utgå från 95% (Mezger, 2014).

Inom LVE-området är både lagringsmodulen G' och förlustmodulen G'' konstanta, vilket illustreras av att kurvorna i detta område utgörs av horisontella linjer, se Figur 18. Beroende på vilken av modulerna G' och G'' som är störst, alltså vilken av modulerna som ligger över den andra, frmgås om materialet som testas är visköst eller elastiskt. Om G'' -kurvan ligger över G' -kurvan domineras materialet av viskösa egenskaper, och tvärtom karaktiseras materialet av ett elastiskt fast material (Paar, 2022c).



Figur 18- Illustration av LVE-områdets gräns framtaget via amplitudsvep (Airey, 1997).

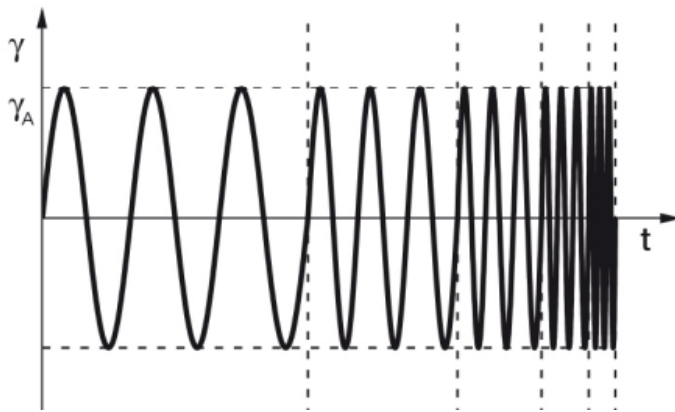
Det finns flera sätt att bestämma LVE-områdets gränser på. Utöver att logaritmera och rita ut modulerna så att de blir två horisontala linjer, en vid G'_0 och en vid $G' = 0.95 \cdot G'_0$ när de ritas mot $\log(\gamma)$, finns alternativa tillvägagångssätt. Ett sätt är att skriva ut alla mätvärden i tabellform med dess motsvarande skjuvspänning och sedan avvisa alla värden som är mindre än $0.95 \cdot G'_0$, alltså värden då komplexa skjuvmodulen är mindre än 95% av dess startvärde. Alternativt kan gränserna även bestämmas direkt via DSR-apparaten om det finns en mjukvara som tillåter det (Mezger, 2014).

För de material där LVE-området inte är känt är det av säkerhetsskäl rekommenderat att LVE-området undersöks och definieras, så att ingen irreversibel skada uppstår i materialet när det testas. En annan viktig anledning till att undersöka och hitta LVE-området är att Hooks lag och Newtons lag inte kan appliceras för att behandla mätdata om mätningarna sker utanför LVE-området. En viktig sak att ha i åtanke är att LVE-områdets gränsvärden endast gäller för den frekvens som provkroppen har mätts med. Så om man ska genomföra mätningar med flera olika frekvenser på en provkropp bör man genomföra LVE-mätningar för varje frekvens som ska användas. På så sätt blir LVE-området gränsvärden helt pålitliga för varje frekvens som används och således försäkras att området inte har förflyttat sig efter ändring av frekvens (Ibid.).

2.6.5 Frekvenssvep

Frekvenssvep är en annan typ av oscillationstest där temperaturen och amplituden hålls konstant med varierande frekvens, se Figur 19. Syftet med testet är att undersöka tidberoende deformationsegenskaper och för bitumen utförs vanligtvis testet med en konstant skjuvspänning och varierande vinkelfrekvens. För att inte orsaka permanenta skador på materialet som ska testas bör det i första hand innan frekvenssvepet utförs hämtas information kring vilka skjuvningar som är tillåtna på materialet, då skjuvningarnas (skjuvtöjningen och skjuvspänningen) amplitud måste befinna sig inom LVE-området. Informationen kan erhållas genom ett amplitudssvep på materialet eller genom att se tidigare undersökningar som utförts på samma material (Mezger, 2014).

Syftet med att variera frekvensen är att simulera olika typer av trafik under olika tidsintervall. När snabb trafik under korta tidsperioder undersöks används höga frekvenser, och för långsammare trafik under längre tidsperioder används låga frekvenser (Paar, 2022d). Vid frekvenssvep på bitumen används två mätplattor, en platta med diametern 8 mm som benämns PP08 och en platta med diametern 25 mm, PP25. För PP25 används intervallet 20 °C till 80 °C, med temperatursteg om 10 °C. För PP08 används temperatursintervallet -27,6 °C till 30 °C med ingående temperaturerna 30 °C, 20 °C, 10 °C, 0 °C -9,6 °C, -18,9 °C och -27,6 °C. Anledningen till att testet utförs med två olika mätplattor i två svepmätningar är för att den större plattan, PP25, blir för styv vid temperaturer lägre än 20 °C och således blir resultaten ej pålitliga vid lägre temperaturer.

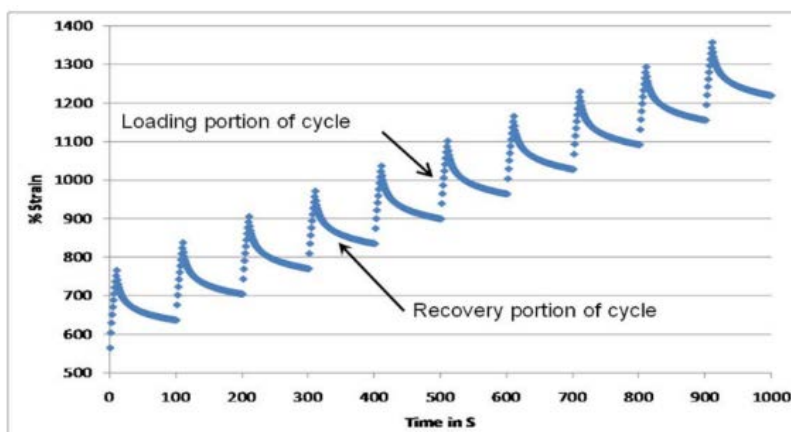


Figur 19 - Frekvenssvep med konstant skjuvspänning varierande frekvens (Paar, 2022d)

2.6.6 MSCR (Multiple Stress Creep Recovery test)

MSCR-test, som utförs med DSR, är den senaste upplagan av Superpaves graderingssystem av bitumen. Syftet med testet är att få uppfattning om asfaltens potentiella förmåga till återhämtning efter belastning, där bland annat asfaltens förmåga att motstå permanent deformation erhålls. Fördelen med MSCR-test är att man slipper göra enskilda tester på bland annat elastisk återhämtning, duktilitet, seghet och hållfasthet, utan med ett MSCR-test erhålls all denna information om bitumens egenskaper och kapacitet (Federal Highway federation, 2011).

Genomförandet av MSCR-test går till som så att provkroppen utsätts för konstant skjuvspänning under en sekund. Därefter avlägsnas lasten under nio sekunder där provkroppen får återhämta sig. Denna cykel upprepas tio gånger med en spänning på 0,1 kPa. Efter de tio första cyklerna körs ytterligare tio cyklar med med spänningen 3,2 kPa. Resultatet från testet är töjningsdeformationen med avseende på tiden och åskådliggörs i Figur 20 (Ibid.).



Figur 20-MSCR test som visar återhämtningsrespons för ett bitumen som utsätts för återkommande belastningar (10 lastupprepningar) med avseende på tiden (Federal Highway Administration, 2011).

Analysen från MSCR-testet görs genom att beräkna provets återgång, R (Recovery), uttryckt i procent genom att dividera elastisk töjning med maximal töjning, enligt Ekvation 2.12. Den plastiska deformationen γ_{nr} (nr som står för "non recovery") beräknas genom att subtrahera den maximala töjningen med den elastiska töjningen enligt Ekvation 2.13. Slutligen medförs att den kvarstående deformationen J_{nr} kan beräknas genom att dividera den plastiska deformationen med applicerad skjuvkraft, se Ekvation 2.14 (Ibid.).

$$R = \gamma_r / \gamma_p \quad (2.12)$$

Där:

R – Återgång [%]

γ_r – Elastisk töjning [%]

γ_p – Maximal töjning [%]

$$\gamma_{nr} = \gamma_p - \gamma_r \quad (2.13)$$

Där:

γ_{nr} – Plastisk deformation [%]

$$J_{nr} = \gamma_{nr} / \tau \quad (2.14)$$

Där:

τ – Skjuvkraft [kPa]

J_{nr} – Kvarstående deformation [kPa^{-1}]

Efter utförligt genomförda analyser har forskare visat på att parametern J_{nr} , den kvarstående deformationen, stämmer bra överens med den verkliga utvecklingen av spårbildning ute på asfaltsvägarna. Genomförda tester av Federal Highway Administration (FHWA) med Accelerated Loading Facility (ALF) på olika bindemedel har visat att MSCR-test är effektivare och således bättre än Superpaves PG-standard. MSCR-testen ger en mer exakt representation av verkliga förhållanden i asfaltbeläggningen samtidigt som det har kapaciteten att tillämpa högre spänning och töjning på bitumenproverna som undersöks (Ibid.).

2.7 DSR:s andra potentiella användningsområden

Ända sedan Superpave introducerades med instrumentet Dynamisk Skjuvreometer, DSR, som en central del i metodiken har det pågått undersökningar gällande om resultaten från ett frekvenssvep kan ersätta andra, mer komplicerade mättekniker. Två mätmetoder som bland annat har undersökts gällande dess möjlighet att ersättas med DSR är duktilitetstest och Bending Beam Rheometer (BBR). Studier som ämnat att undersöka detta har funnit ett samband mellan mätdata från frekvenssvep och resultatet från duktilitet-, styvhet- och m-värdemätningar. Nedan i detta kapitel beskrivs bland annat BBR och duktilitetstest samt dessa samband med DSR.

2.7.1 Duktilitet

Att hindra ytvatten från att tränga in och ner i underliggande obundna lager och försämra dess bärighet är en av asfaltkonstruktionens viktigaste uppgifter. Möjligheten att utföra denna uppgift har till stor del att göra med bindemedlets förmåga att binda stenmaterialet samtidigt som underlaget tillåts röra sig utan att asfalten spricker. Bindemedlet ska både vara tillräckligt styvt för att klara av trafiklasterna, samtidigt som det ska vara mjukt nog för att hantera de sammandragningar som sker vid sjunkande temperatur i vägkonstruktionen.

Vid temperaturförändringar i väggroppen påverkas inte stenmaterialet märkbart, men det gör å andra sidan bitumen där det skapas spänningar i materialet. Ifall spänningarna som uppstår överskrider bituminets maximala kapacitet kommer bituminet att släppa ifrån stenmaterialet, vilket leder till brott i asfalten. Brott kan medföra längsgående- och transversala sprickor i beläggningen samt, så småningom, krackelering av asfalten (Anderson et. al., 2011).

Enligt Anderson et. al. (2011) är orsaken till fenomenet krackelering inte last, utan tid och nedkylning. Man förklarar denna typ av brott som att bitumen på grund av åldring har förlorat sin duktilitet. Duktilitet just är ett materials förmåga att utstå plastiska deformationer utan att det uppstår sprickbildning (Redelius, u.å). Bitumens duktilitet undersöks genom att ett bitumenprov gjuts i en speciell form som sedan placeras i ett temperaturkontrollerat vattenbad. När stabil temperatur har uppnåtts töjs provet ut med en hastighet på 1cm/min. Förändringen av provets längd i cm efter utdragningen precis innan brott inträffar definieras som bitumens duktilitet (Hunter, et. al., 2015).

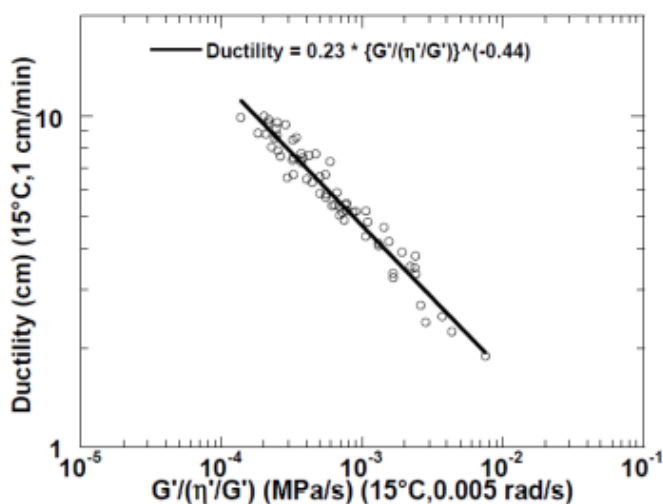
Metoden för att ta fram duktiliteten är relativt omständig samtidigt som maskinen som används är klumpig då den tar stor plats i anspråk. Därav intresset av att ersätta metoden med en annan enklare och smidigare metod. I en studie utförd av Glover et. al. (2005) undersöktes möjligheten att koppla samman bitumens krackeleringsskänslighet, duktilitet, till egenskaper som kan mätas genom DSR. Studien utgick ifrån en tidigare utförd studie av Kandhal (1977) som visade på att då bindemedlets duktilitet vid 15°C var $\leq 5\text{cm}$ började asfalten uppvisa tecken på krackelering. Dessutom definierade Kandhal (1977) en gräns att då bitumens duktilitet sjunker under 3 cm börjar asfaltmassan visa på betydande skador.

Baserat på dessa resultat gjorde Glover et. al. (2005) ett antagande att krackelering beror på dragspänningsbrott. Till detta togs det fram en formel, $G' / (\eta' / G')$, vars ingående storheter mäts i DSR vid 15°C med en frekvens på 0,005 rad/s. Mätningarna med DSR-maskinen har visat sig korrelera väl med duktilitetsmätningarna, främst för duktilitet under 10 cm. Genom omskrivning av förhållandet $G' / (\eta' / G')$ för att efterlikna de storheter som normalt tas fram vid DSR-körning och via omräkning kan formeln för duktilitet skrivas på två olika sätt enligt Glover et. al. (2005), se Ekvation (2.15) och Ekvation (2.16).

$$\text{Duktilitet} = 0,23 \cdot (G' / (\eta' / G'))^{-0,44} \quad [\text{cm}] \quad (2.15)$$

$$\text{Duktilitet} = 0,23 \cdot (G^* (\cos(\delta))^2 / (\sin(\delta)) \cdot 0,005)^{-0,44} \quad (2.16)$$

Korrelationen mellan formeln för duktilitet och parametrarna som mäts i DSR vid 15°C med en frekvens på 0,005 rad/s framgår i Figur 21.



Figur 21- Förhållandet mellan duktilitet och DSR parametrar (Glover et. al. 2005)

2.7.2 Bending Beam Rheometer (BBR)

Under 1970-talet introducerades två enheter för att mäta lågtemperaturregenskaper hos bindemedel: Schweyers forcerade kapillär-rheometer och glidplatta-rheometern utvecklad av Fenijin och Krooshof och senare modifierad av andra. Den första maskinen löste inte problemet eftersom dess intervall var begränsat till temperaturer typiskt över 0 grader, och den andra apparaten led av både praktiska problem vid beredning av prover och analytiska problem relaterade till laddningssättet under vilket proverna testades. Bending beam rheometern (BBR), som introducerades vid Pennsylvania State University som en del av ett projekt, löste många av problemen förknippade med de två

föregående enheterna och användes för att mäta reologiska egenskaper vid extremt låga temperaturer med en rimlig grad av precision (Bahia, et. al., 1992).

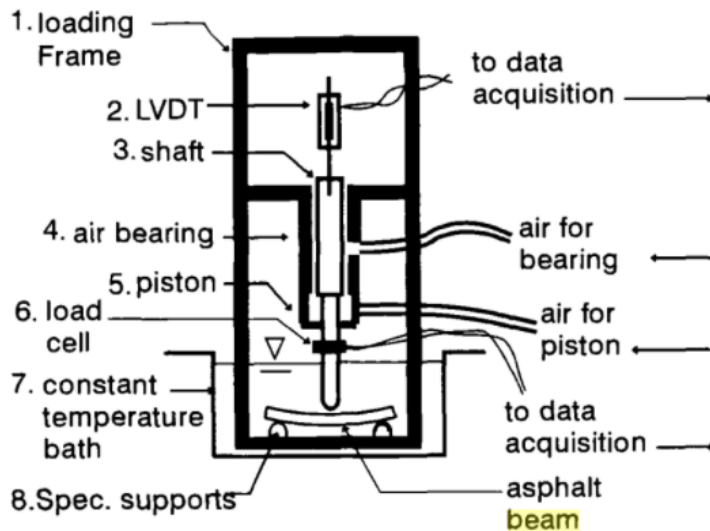
Som tidigare nämnt mäts vanligtvis lågtemperatüregenskaper för bitumen med just BBR. Syftet med testet är att mäta bituminets krypegenskaper och dess förmåga att koppla av från de spänningar som orsakas av den temperaturbetingade krympningen vid låga temperaturer (Hunter, et. al., 2015).

Metoden för testet går till som så att man tillverkar en liten balk av bitumen som läggs upp på två stöd och belastas i mitten av en konstant punktlast (100 g eller 0,98 N). Mätningen är förstörande vilket innebär att det går åt en balk per provad temperatur, alltså ganska arbetskrävande. Man mäter hur balkmitten sjunker under belastningen och det karaktäriserar bituminets relaxerande förmåga, dvs förmågan att ge efter utan att gå sönder. Tanken är att det ska visa förmågan att klara volymförändringar vid låg temperatur utan att spricka. När sprickan väl har inträffat menar man att den vidgas med tiden och slutar med att material lossnar från vägytan. Man beräknar två parametrar, spänningen efter 60 sekunders belastning, $S(60)$, och gradienten, dvs hastighetsförändringen, m -värdet, också efter 60 sekunder. Båda parametrarna jämförs med var sitt gränsvärde som då ger var sin temperatur, t -låg. Den högsta av de två temperaturerna blir den som gäller för ämnet (Tyllgren, 2022).

Rheometer systemet som används i BBR består huvudsakligen av tre komponenter: en testramsenhet, ett temperaturkontrollerat bad med cirkulator samt ett datainsamlingssystem som använder en dator. Testramenheten som åskådliggörs i Figur 22 består av en lastram "Loading frame", provstöd "Specimen support", ett luftlager och luftpumpad kolvlastningsenhet, "air for piston and bearing", samt ett lastschakt "loading schaft". Lastramen är gjord utav plastmaterial för att minimera ledning av låg temperatur som vanligtvis resulterar i kondensering av fukt och isbildning på de exponerade delarna av ramen (Bahia & Anderson, 1995).

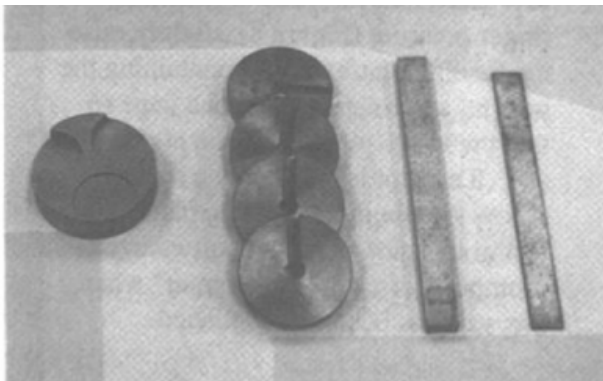
Under testet så sänks ramen ner i vätskebadet så att provtestet sänks ned i vätskan till ett djup på cirka 50 mm. Provstöden är fästa vid basen av ramen och är halvt rundformade och deras bredd är mindre än provets bredd för att undvika störning av provets kanter med korrekt placering av provet. Två vertikala stift finns på båda sidor om de två provstöden vars funktion är att hålla proven korrekt justerade och rätta under testet (Ibid.).

En väsentlig del av rheometern är lastelementet, "Load cell" i Figur 22. Den består av en kombination av lastaxel, luftlager och en luftpumpad kolv. Lastaxeln ("shaft" i Figur 22) i sin tur fyller tre funktioner: Dens egen vikt används för att applicera testbelastningen på provet som undersöks, den är fäst i sin övre ände till ett högprecisions verktyg som kallas LVDT (Linear Variable Differential Transformer) för att övervaka nedböjning som en funktion av tiden samt finns i lastaxelns nedre ände som är placerad ovanför vätskenivån, en lastcell som kontrollerar belastningen som appliceras på provet. Lastaxeln består av tre sektioner med cirkulära tvärsnitt. Ovandelen av lastaxeln som har en diameter på 19 mm är den del av luftlagret som ger inriktning utan friktion (Ibid.).



Figur 22- Schematisk bild över de olika komponenterna i BBR (Bahia & Anderson, 1995)

För att erhålla en korrekt karakterisering av ett materials egenskaper vid användning av BBR är kalibrering och testning av utrustningen väsentligt. BBR hårdvaran och mjukvaran utformades för att tillhandahålla enkla och exakta kalibreringsprocedurer som kan köras av rheometeroperatören på relativt kort tid. Kalibrering av rheometern innebär kallibrering av LVDT, lastelementet samt mätning av testramens överensstämmelse. Tillbehören som används vid kalibrering och som syns i Figur 23 består av en avböjningsmätare, fyra standard 100-grams vikter samt ett tjockt och tunnt stålbalksexemplar (Ibid.).



Figur 23- Tillbehör som används vid kalibrering av BBR ((Bahia & Anderson, 1995)

Kalibrering av LVDT görs via avböjningsmätaren som är en cirkulär skiva som är precisionsbearbetad för att generera fram fyra olika tjocklekar. Genom att flytta en referenskonsol som är fäst vid den övre delen av lastaxeln (Loading shaft) för att mäta de fyra tjocklekarna, kan kalibreringskonstanterna för LVDT beräknas fram genom datormjukvara. För att kalibrera lastelementet (Load cell) används det tjocka stålbalksprovet som placeras på stöden och lastaxeln belastas stegvis med de fyra

standardvikterna. Vid varje belastningssteg med de fyra vikterna registreras lastelement signalen (Load cell signal) av datormjukvaran. Kalibreringskonstanterna för lastelementet beräknas sedan genom att jämföra de registrerade signalerna med den ackumulerade belastningen vid varje steg (Ibid.).

Utöver kalibreringsstegen kan även en förtroendekontroll genomföras för att undersöka systemet som helhet. För att genomföra förtroendekontrollen används det tunna stålbalkprovet för att köra ett standardkryptest i 20 sekunder. Den beräknade styvheten jämförs med den kända modulen för stålprovet, där sedan ett meddelande på skärmdisplayen indikerar på rheometers prestation. Om den beräknade styvheten är inom angivna gränser hos det kända stålprovet blir förtroendekontrollen godkänd och testning med BBR kan påbörjas. Alla steg för kalibrering och förtroendekontroll kan genomföras genom att följa instruktioner som visas på datorskärmen i programvaran och hela proceduren tar inte mer än fyra minuter att genomföra (Ibid.).

2.7.3 Matematiska samband mellan BBR och DSR för t-låg

Det finns samband som har tagits fram i syfte att undvika att beräkna fram t-låg, alltså den temperatur vid vilken $S(t) \leq 300 \text{ MPa}$ och $m \geq 0,300 \text{ MPa}/^\circ\text{C}$, genom BBR-mätningar. I de tre kommande underkapitel kommer tre olika metoder, eller beräkningsmodeller, gällande samband mellan DSR och BBR vid beräkning av t-låg att tas upp. Den ena metoden är framtagen enligt undersökningar från Sui et. al. (2011), den andra av Rowe et. al. (2014) och den tredje beräkningsmodellen som denna studie kommer utgå ifrån är liknande Sui et. al. (2011) med skillnad att dessa bedömningar bygger på Nynas och denna studies resultat.

2.7.3.1 Metod 1

Genom undersökningar med plattor med 4 mm i diameter av Sui et. al. (2011) har det framkommit att en korrelation av de reologiska parametrarna vid låg temperatur, m-värde och krypstyvhet $S(t)$, kan uppskattas. Därmed har det påvisats att det är möjligt att ta fram dessa värden från mätningar med DSR, alltså att t-låg beräknas utifrån resultatet från DSR-mätningar. Under metodutveckling användes plattor med 4 mm i diameter, PP04, alltså en mindre spindel än den som användes i denna studie, PP08. Anledningen är att många har haft problem med vidhäftningen mellan provet och spindelytan med PP08, vilket dock aldrig har varit ett problem vid laborationer på LTH. Men det är ändå stor samstämmighet mellan resultaten med de båda spindelstorlekarna (Tyllgren, 2022).

Till en början genomförde Sui et. al. (2011) undersökningen genom att hitta korrelationen mellan lutningen och storleken på skjuvspänningsmodulens $G(t)$ Masterkurva vid 2 timmar och vid den verkliga låga PG-graderingstemperaturen med motsvarande $S(t)$ - och m -värden vid 60 sekunder och 10°C över den verkliga låga PG-graderingstemperaturen från BBR-mätningar. En stark linjär korrelation mellan BBR- och DSR-data observerades baserat på elva bindemedel. Därefter modifierades metoden genom att mäta $G(t)$ -lutningen och magnituden vid 60 sekunder och 10°C högre än PG-graderingen temperatur. Skälen till dessa modifieringar är att de avsevärt minskar testtiden samt att testtemperaturen är lättare att uppnå, vilket därmed minskar potentiella fel (Sui et. al., 2011). Tabell 3 nedan jämför detta nya, modifierade tillvägagångssättet

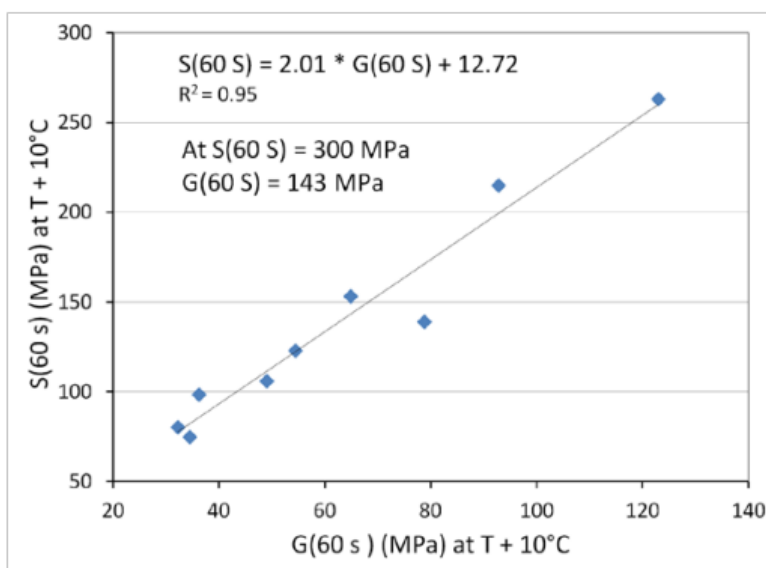
med den ursprungliga metoden där m_r är skjuvmodulslutningen via DSR och m_c motsvarar krypstyvhetsslutning erhållen via BBR.

Tabell 3 - Jämförelse mellan den ursprungliga och modifierade metodiken vid $T + 10^\circ\text{C}$ (Sui et. al., 2011).

Korrelationsmetod	$S(60\text{ s}) = 300\text{ MPa}$	Korrelationsmetod	$m_c = -0.30$
G(7200s) (MPa) vid PG-temperatur	162	m_r (7200s)	-0,26
G(60s) (MPa) vid PG temp $+10^\circ\text{C}$	143	m_r (60s)	-0,28

Gränsen för t-låg ska enligt författarna kunna sättas till

$G(60\text{s}) = 143\text{ MPa}$ motsvarande $S(t) = 300\text{ MPa}$ och $S(60\text{s})$ kan uttryckas som $S(60\text{s}) = 2,01 \cdot G(60\text{s}) + 12,72$. Stödet för denna omräkning illustreras i Figur 24 där man kan observera en tydlig korrelation mellan BBR $S(60\text{s})$ och 4-mm DSR $G(60\text{s})$. Förutsättningen för denna omskrivning är att mätningarna i DSR är utförda med frekvensen 0,0167 rad/s (Siu et. al., 2011).



Figur 24 - Korrelationen mellan BBR $S(60\text{s})$ och $G(60\text{s})$ (Sui et. al., 2011).

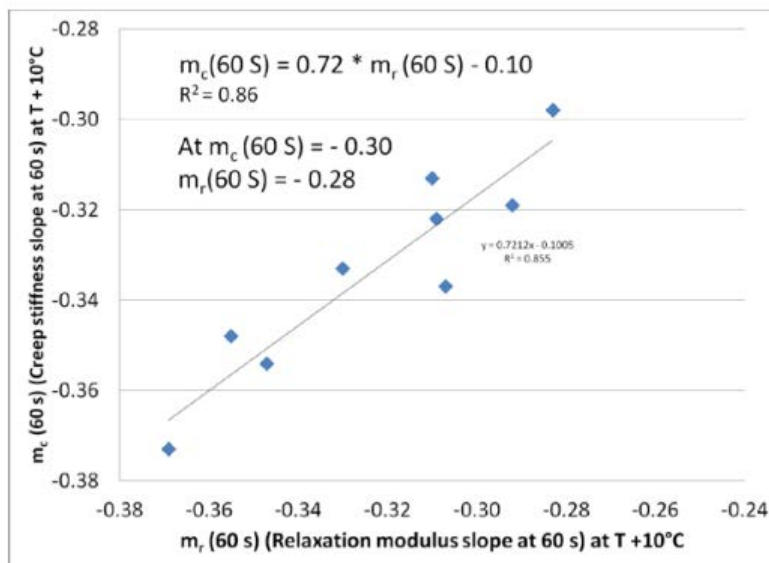
Vad gäller den andra parametern som beräknas fram i BBR, gradienten, dvs hastighetsförändringen (m-värdet), så har Siu et. al. (2011) funnit ett samband där m-värdet efter 60 sekunder kan skrivas enligt Ekvation (2.17) nedan. Figur 25 visar korrelationen mellan BBR $m_c(60\text{s})$ och 4-mm DSR $m_r(60\text{s})$.

$$m_c = 0,72 \cdot m_r(60\text{s}) - 0,10 \quad (2.17)$$

Där:

m_c – krypstyvhetsslutning vid 60 sekunder vid $+10^\circ\text{C}$ via BBR

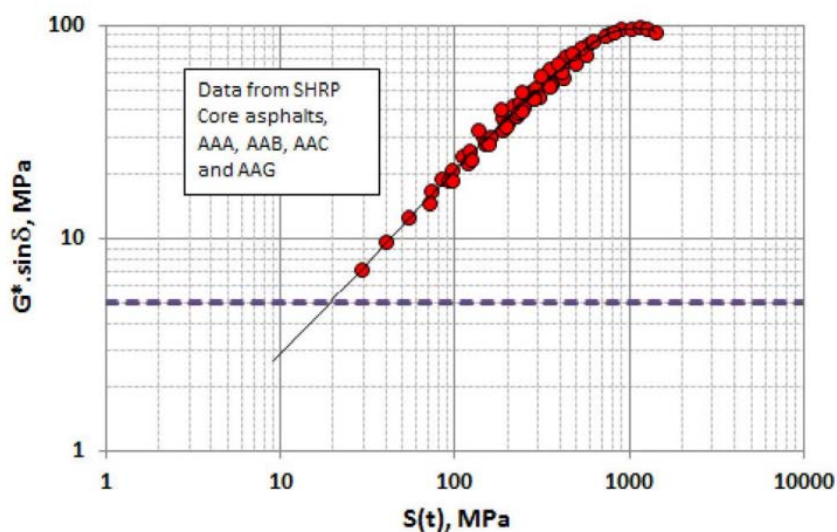
m_r – Skjuvmodulslutningen vid 60 sekunder vid +10 °C vid DSR



Figur 25 - korrelation mellan BBR $m_c(60s)$ och 4-mm DSR $m_r(60s)$ Sui et. al., 2011).

2.7.3.2 Metod 2

Undersökningar av Rowe et. al. (2014) har påvisat att det är möjligt att ta fram dessa värden från mätningar med DSR, alltså att t-låg beräknas utifrån resultatet från DSR-mätningar. Gränsen för t-låg ska enligt författarna kunna sättas till $G^* = 111 \text{ MPa}$ ($S(t) = 300 \text{ MPa}$) och $S(60)$ kan uttryckas som $G^* * \sin(\delta) = 46 \text{ MPa}$. Stödet för denna omräkning illustreras i Figur 26 där man kan observera en tydlig korrelation mellan $S(t)$ och $G^* * \sin(\delta)$. Förutsättningen för denna omskrivning är att mätningarna i DSR är utförda med frekvensen 0,0167 rad/s.



Figur 26 - Korrelationen mellan $S(t)$ och $G^* * \sin(\delta)$ (Rowe et. al., 2014).

En annan undersökning som gjorts med intentionen att finna ett samband där t-låg skulle kunna beräknas utifrån resultatet från ett DSR-test är en studie utförd av Anderson et. al. (1994). I studien där sambandet mellan styvhet och komplex styvmodul undersöktes kom de fram till att $S(t)$ kan beräknas enligt Ekvation 2.18.

$$S(t) = 3G^*(\omega) / [1 + 0,2 * \sin(2 * \delta)] \quad (2.18)$$

Där:

$S(t)$ – Styvhet vid tiden t [Pa]

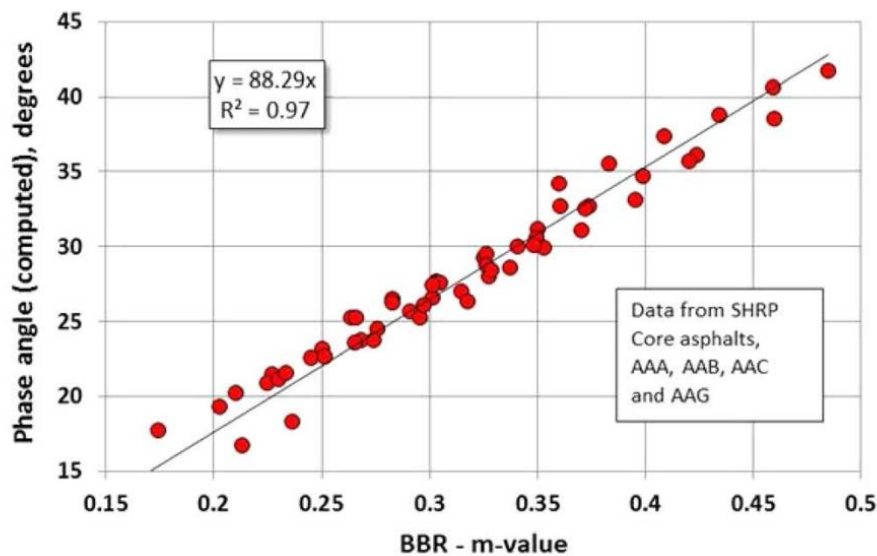
$G^*(\omega)$ – Komplexmodul vid frekvens ω [Pa]

δ – Fasvinkel vid frekvens ω [Grader]

Då värdet på styvheten $S(t)$ för bitumen främst är av intresse vid låga temperaturer kommer fasvinkeln vid mätningar i DSR, under låga temperaturer, att gå mot noll. Detta medför att nämnaren i Ekvation 2.18 ovan blir 1 och således kan ekvationen, vid låga temperaturer, skrivas om enligt Ekvation 2.19.

$$S(t) = 3G^*(\omega) / [1 + 0,2 * \sin(2 * \delta)] \rightarrow S(t) \approx 3 * G^*(\omega) \quad (2.19)$$

Vad gäller den andra parametern som beräknas fram i BBR, gradienten, dvs hastighetsförändringen (m-värdet), så har Rowe et. al. (2014) funnit ett samband mellan den och fasvinkeln. Förhållandet mellan de två parametrarna kan uttryckas som: $\text{Fasvinkel} = 88,29 * m - \text{värdet}$ och illustreras i Figur 27. Sambandet gäller vid mätningar med en frekvens på 0,1047 rad/s. Således kan gränsvärdet 0,3 för m-värdet enligt Superpave genom detta samband skrivas om som en fasvinkel på 26,2°.



Figur 27 - Förhållandet mellan Fasvinkel och m-värde (Rowe et. al., 2014).

2.7.3.3 Metod 3 (Studiens beräkningsmodell)

Beräkningsmodellen som används i denna studie har Tyllgren (2022) tagit fram med hjälp av Nynas bedömning. Skillanderna gentemot beräkningsmodellen från Sui et. al. (2011) är att de två t-låg-värdena beräknas för $G(60) = 100$ MPa respektive m-värde(60) = -0,300. Den skiljer sig alltså så till vida att $G(60)$ väljs till 100 MPa för att motsvara $S(60)=300$ MPa och m-värdet sätts till det som gäller för BBR, 0,300.

En serie av steg är involverade när BBR m-värdet $m_r(60s)$ och styvmodulen $G(60s)$ beräknas från dynamisk oscillerande skjuvningsdata med en referenstemperatur på PG +10 °C. Det första steget är att generera en $G'(\omega)$ Masterkurva vid en referenstemperatur på PG+10°C genom att använda PG +10 °C och PG +20 °C frekvenssvep. Nästa steg innebär att använda iterativ numerisk metod för att bestämma den horisontella skiftfaktorn (a_T) så att PG +20 °C frekvenssvepet överlappar PG +10 °C frekvenssvep. Styvmodulen $G(t)$ bestäms sedan genom interkonvertering av lagringsmodulen $G'(\omega)$ av det ungefärliga uttryck som utvecklats av Christensen [1982] enligt Ekvation 2.20 (Farrar et. al., 2015).

$$G(t) \approx G'(\omega) \quad (2.20)$$

Där:

Frekvensen $\omega = 2/(\pi t)$ (rad/s).

2.7.4 Påverkan på optimal korrelation mellan BBR och DSR

På senare tid har en ny metod baserad på DSR med en 4 mm parallellplåtsgeometri föreslagits av Western Research Institute (WRI) för att fastställa lågtemperaturegenskaperna hos asfaltbindemedel som ett alternativ till BBR. Flera uppföljningsstudier lyckades genomföra denna testmetod för att mäta lågtemperaturegenskaperna hos bindemedel, och för att fastställa korrelationer mellan DSR och BBR-resultat. Eftersom både 4 mm DSR (oscillation) och BBR (krypning) testerna mäter de linjära viskoelastiska egenskaperna hos asfaltbindemedel vid låg temperatur borde resultaten visa starka korrelationer. Dock observerades dålig korrelation, särskilt för de kritiska temperaturerna som bestäms av varje metod, i vissa fall med en maximal skillnad på 10°C (Wang et. al., 2020).

En rad forskningsinsatser visade att olika experimentella förhållanden mellan BBR och DSR, såsom termiska förhållanden, vilket inkluderar fysisk härdning vid mycket låga temperaturer, kylhastighet och kylmedier kan leda till olika reologiska mätningresultat vid låga temperaturer. Fysisk härdning är en process som asfaltbindemedel genomgår där materialet upplever betydande tidsberoende förstyvning vid förvaring i låga temperaturer, vilket i slutändan påverkar avspänningsegenskaperna hos bindemedlet i både laboriemiljö och ute i fält (Ibid).

Därutöver utförs BBR-tester i etanol, medan DSR provet utförs i luft. År 2012 var Cannone Falchetto et. al. (2012) den första att observera att krypstyvheten vid låga temperaturer erhållet med BBR är starkt beroende av kylmediet, och flera följande studier bekräftade detta resultat, i både asfaltbindemedel och asfaltblandning.

Bindemedlets styvhetsresultat mätt i luften är 20 % till 33 % högre än den som utförs i etanol. I två färskastudier fann man att när BBR-tester utförs i luft kan bättre korrelation hittas mellan BBR och DSR resultat. På senare tid har det observerats att kylningshastigheten kan också påverka BBR-resultatet. Alltså kan de dåliga korrelationerna mellan DSR och BBR resultaten hänföras till de olika experimentella förhållandena. Om och när de termiska förhållandena och kylningsmedier kan kontrolleras noggrant, kan mycket bättre korrelationer mellan BBR och DSR uppnås. I sådana fall kan således DSR bli ett likvärdigt alternativ som kan ersätta BBR vid undersökning av lågtemperaturegenskaperna hos bitumen (Wang et. al., 2020).

2.7.4.1 Inverkan av "glass transition temperature, T_g "

Utöver de kontrollerbara experimentella förhållandena, så kan förändringar i de reologiska egenskaperna hos bindemedel orsakat av "glass transition" (glasövergång) vid låga temperaturer vara den andra dominerande faktorn som påverkar korrelationen mellan BBR och DSR. Detta fenomen inträffar omedelbart när temperaturen går under "glass transition temperature" (glasövergångstemperaturen) T_g . Glasövergång kan definieras som det fenomen som uppstår när bindemedel genomgår övergången från det viskoelastiska tillståndet till det glasartade tillståndet. Under dessa förhållanden förändras bindemedlets optiska, termodynamiska och mekaniska egenskaper väsentligt (Ibid.).

Den fysiska betydelsen av detta fenomen när materialets övergång går från det viskoelastiska till det glasartade tillståndet kan beskrivas utifrån två olika skalor. På makroskalan blir bindemedlet glansigt till utseendet och extremt sprött och styvt, samtidigt som densiteten på bindemedlet ökar på grund av volymkontraktion, bindemedlet blir tätare. På mikronivå, är övergången förknippad med en avsevärt reducerad molekylär rörelse som så småningom blir försumbar över lång observationstid. Under dessa förhållanden kan molekyler antas befinna sig i ett glasartat tillstånd. Glasövergångstemperatur, T_g , är det karakteristiska värdet som valts för att representera temperaturen när en sådan övergång sker (Ibid.).

2.7.5 Modulus shift factor b_T

I tidigare undersökningar av bindemedel fokuserade de flesta studierna på samband mellan glasövergång och fysisk härdning eller på beräkningsmetoden för T_g . Endast ett begränsat antal studier tog hänsyn till den faktiska effekten av glasövergången på formen på masterkurvor och om den potentiellt tillämpliga korrigeringen för bituminösa material. För detta ändamål infördes en temperaturberoende parameter, modulkiftfaktor b_T , för att justera avvikelserna orsakad av glasövergång. Att notera är att denna parameter ursprungligen inte utvecklades för att mildra effekterna av glasövergången, utan mer allmänt betraktade effekten av förtätning för bindemedel vid mycket låga temperaturer (Ibid.).

Ett av skälen till att modulkiftfaktor b_T alltid ignoreras vid uppförande av masterkurvan är att effekten av glasövergång (förtätning) är begränsad till mycket låga temperaturer, och inte alla DSR-apparater har förmågan att testa prover vid så låga temperaturer. Endast en begränsad densitetsförändring kan observeras med DSR vid temperaturer över 0°C för bindemedel. När sedan masterkurvor genereras för att

utvärdera DSR-resultaten kan endast en måttligt ojämnhet observeras vid mycket höga frekvenser (låga temperaturer), orsakat av glasövergången. Generellt gäller att majoriteten av tidigare studier fokuserade på effekten av förtätning orsakad av glasövergång på polymer och polyolefiner material, istället för de bituminösa materialen (Ibid).

Vid undersökning av möjligheten att använda modulsjiftfaktor b_T för att ta hänsyn till avvikelserna från DSR-mätningar på bitumen vid mycket låga temperaturer, på grund av effekten av förtätningen orsakad av glasövergångsfenomenet, upptäcktes intressanta resultat. Modulsjiftfaktorn b_T kan användas för att mildra avvikelserna av förtätningen orsakad av glasövergångsfenomenet för bindemedel vid temperaturer under "glass transition temperature", T_g . Dessutom indikerar resultatet på att glasövergången har en betydande effekt på lågtemperaturregenskaperna hos omodifierade bindemedel, vilket bekräftar behovet av b_T för att undvika orealistiska materialegenskaper, såsom extremt hög dynamisk skjuvmodul (Ibid.).

De övergripande resultaten av den nuvarande forskningssatsningen stödjer att DSR-mätningar starkt påverkas av glasövergångsfenomenet vid låga temperaturer. Däremot kan modulförskjutningsfaktorn b_T användas för att minska och mildra denna avvikelse i den experimentella datan vid låga temperaturer (Ibid.).

2.8 Lågtemperaturregenskaper för bitumen

2.8.1 Funktionsegenskaper vid låga temperaturer hos afaltsbeläggning

Vanligen förknippas sprickbildning och nötning med stensläpp (dubbdäcksnötning) på en väg med lågtemperaturregenskaperna i en asfaltbeläggning. Studier på reologiska egenskaper för bitumen och asfalt har påvisat en direkt korrelation mellan sprickbildning/nötning och styvhetsmodulen. Sprickor uppstår i asfaltbeläggnings vid upprepade belastningar över en viss nivå i samband med att materialet tröttnar ut. De mest allvarliga konsekvenserna uppstår när belastningen är hög och snabb samt då bitumens styvhet är hög, vanligtvis i samband med låga temperaturer (Redelius, u.å).

När temperaturen sjunker så krymper asfalt vilket medför kraftiga dragpåkänningar i asfalten och om påkänningarna överskrider hållfastheten för asfalten uppstår tvärgående sprickor, så kallade temperatursprickor. Utifrån data på brotthållfasthet och styvhet på bitumen respektive asfalt kan det beräknas fram när dessa temperatursprickor förväntas uppstå. Studier har visat på att det är styvhetsmodulen hos bitumen vid låga temperaturer som är starkt relaterad till förekomst av sprickbildning. Även nötning med stensläpp (dubbdäcksnötning) vars orsak är en ständig förlust av finmaterial på grund av att de individuella stenarnas rörelse överskrider bindemedlets brotthållfasthet, inträffar vanligtvis på grund av att bitumens styvhet, vid låga temperaturer, samt vid korta belastningstider (Ibid.).

2.8.2 Termisk sprickbildning

Sprickbildning som härrör från extrem kyla hänvisas generellt som lågtemperatursprickning. Termisk sprickbildning är relaterat till koefficienten för termisk expansion samt avspänningsegenskaperna hos asfaltblandningen. Risken för termisk sprickbildning ökar med beläggningens ålder då bindemedlet härdar som ett resultat av oxidation eller tidsberoende fysisk härdning (Read & Whiteoak, 2003).

Det finns två olika termiska sprickningsmekanismer som kan inträffa. Vid låga temperaturer hos vägbeläggningen kan tvärgående sprickor som löper över hela beläggningens djup plötsligt uppstå. Generellt sätt måste beläggningstemperaturen gå under -30°C för att framkalla denna form av sprickbildning, som benämns "low-temperature cracking, eller "lågtemperatursprickning". För mildare förhållanden, utvecklas sprickor i en långsammare takt, och tar flera säsonger att fortplanta sig genom asfaltlagren. Denna form av sprickbildning initieras vid ytan och fortplantar sig långsamt med varje termisk cykel, och benämns "thermal fatigue cracking", eller termiska utmattningssprickor (Ibid).

2.8.2.1 Low-temperature cracking (lågtemperatursprickning)

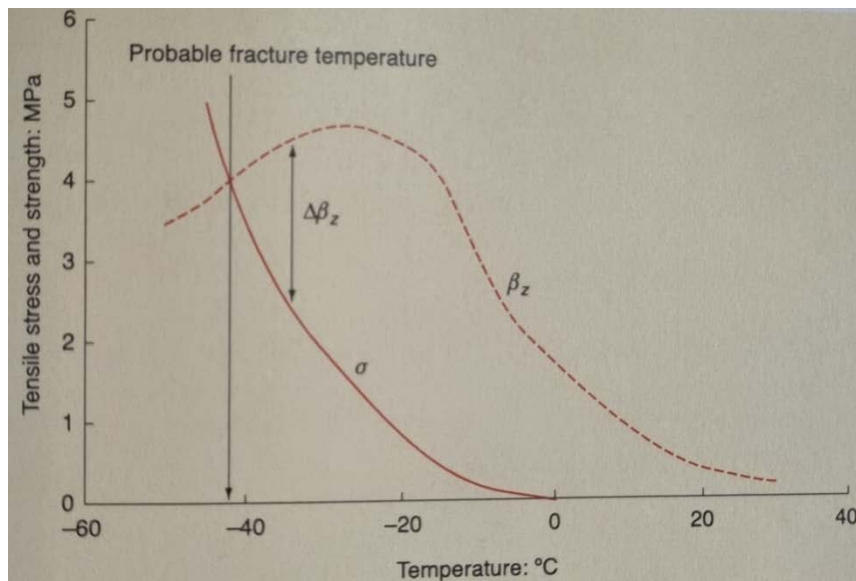
Lågtemperatursprickning är ett fenomen som uppstår vid enstaka event och är ett resultat av att asfaltens djup sätts i termisk spänning under förhållanden där spänningsrelaxation inte kan inträffa. Asfaltskiktet utsätts för en dragspänningsfördelning med djupet och illustreras i Figur 28.

Figur 28 - Mekanismen av lågtemperatursprickning (Read & Whiteoak, 2003).

De termiska spänningarna som åskådliggörs i Figur 28 ovan orsakas av asfaltens kontraktion när den svalnar och de är inte nödvändigtvis likformiga eftersom beläggningstemperaturen kan variera med djupet. Dessa spänningar kan orsaka att en spricka fortplantar sig ner från ytan (Ibid).

Det som sker vid sprickuppkomst vid ytan är att när asfalten blir kallare ökar inledningsvis dess draghållfasthet β_z för att sedan börja minska som ett resultat av de mikrosprickor som uppkommer i bindemedlet. Detta orsakas av skillnaden i kontraktion som är ett resultat av den stora skillnaden mellan koefficienterna för termisk expansion mellan ballastaggregaten och bitumen. Samtidigt så byggs den termiska spänningen σ upp under tiden som materialet förlorar sin avspänningsförmåga. Vid en viss tidpunkt kommer sedan den termiska spänningen överskrida materialets styrka, och detta moment definierar den troliga temperaturen för lågtemperatursprickning, som benämns

”probable fracture temperature” i Figur 29. Skillnaden mellan draghållfastheten β_z och lågtemperaturspänningen σ kallas för draghållfasthetsreserv $\Delta\beta_z$, vilket är den reserv som finns tillgänglig för att ta emot ytterligare överlagrade spänningar och åskådliggörs i Figur 29 (Ibid.).



Figur 29- Lågtemperaturspänning (σ) och asfaltens draghållfasthet β_z som en funktion av temperatur (Read & Whiteoak, 2003).

2.8.

3 Molekylära strukturens effekt på lågtemperaturegenskaper

Lågtemperatursprickor är en av de vanligaste skadorna nära det kommer till asfaltbeläggning och är nära relaterat till bitumens lågtemperaturegenskaper. Lågtemperatursprickor är vanligt förekommande och medför tidig försämring av asfaltbeläggningar i kalla regioner, vilket accelererar skadorna på vägstrukturen och reducerar vägens livslängd (Liu, et. al., 2021).

Den molekylära mekanismen för lågtemperaturegenskaper hos bitumen är tvetydig. Den främsta orsaken till lågtemperatursprickning på asfaltsbeläggning är att den ackumulerade termiska spänningen på grund av ökningen av styvhet och minskning av förmågan att relaxera från spänningar medför att draghållfastheten hos bitumen överskrids. Därför är styvhet och spänningsrelaxationshastighet de två egenskaper som främst används för att utvärdera och studera lågtemperaturegenskaper hos bitumen. Bitumen i sig har låg styvhet och stor spänningsrelaxationshastighet vilket kan minska den termiska spänningen och förbättra sprickmotståndet i asfaltsbeläggningar (Ibid.).

Lågtemperaturegenskaperna hos bitumen beror på materialets kemiska sammansättning och molekylstruktur. Den befintliga forskningen delar vanligtvis in bitumen i fraktionerna mättade ämnen (saturates), aromater (aromatics), hartser (resins) och asfalten (asphaltenes) (SARA, förkortningen som kommer användas för de fyra beståndsdelarna) för att studera effekten av sammansättning och struktur på lågtemperaturegenskaper. Men på grund av komplexiteten hos varje fraktion och den

stora skillnaden mellan de ingående SARA-fraktionerna i olika typer av bitumen, finns det vanligtvis motstridiga åsikter (Ibid.).

En syn är att asfaltenerna och hartserna är hårda fraktioner och förstärker bitumens styvhet. De ökade asfaltener förstärker den intermolekylära sammanslutningen och orsakar samtidigt att molekylerna förlorar tillräcklig mycket rörlighet under mekaniska och termiska belastningar, vilket resulterar i ökad styvhet och minskning av spänningsrelaxation. En annan syn är att saturates och aromater är mjuka fraktioner och minskar bitumens styvhet (Liu, et. al., 2021). Wang et. al (2019) fann att ökningen av asfaltener och minskningen av mättade ämnen (saturates) försvagar styvheten och förbättrar bitumens spänningsrelaxation. Även Michalica et. al. (2008) rapporterade att den låga asfaltenhalten gör bitumen hårdare och sprödare på grund av olika råoljekällor.

Studierna som nämnts ovan har olika uppfattningar om effekten av "SARA"-innehåll på lågtemperaturegenskaperna hos bitumen, och orsaken är försummelse av egenskaper hos komplexa molekyler som finns i varje fraktion i SARA. Därför är effekten av molekyllära egenskaper på lågtemperaturegenskaper hos bitumen nödvändiga att studera (Liu, et. al., 2021).

2.8.4 SARA-fraktioners effekt på lågtemperaturegenskaper

Eftersom lågtemperatursprickning av bindemedel är en av de huvudsakliga formerna av asfaltbeläggningsskador världen över är strävan efter att förbättra asfaltens resistens mot sprickbildning och utvärdera dess lågtemperaturegenskaper en del av dagens nyckelforskning (Ahmad & Khawaja, 2018). Då bindemedel som tidigare nämnt har en komplex kemisk sammansättning är det svårt att modellera den definitiva kemiska sammansättningen och dess samband med de tekniska egenskaperna, på grund av den mångfaldiga och komplexa strukturen hos molekylerna som bitumen består av. Ett mer praktiskt sätt att fastställa förhållandet mellan den kemiska sammansättningen av bitumen och de tekniska egenskaperna är att klassificera den kemiska sammansättningen av bindemedel baserat på olika egenskaper, snarare än att bestämma den exakta strukturen av molekyler i ett givet bindemedel (Sultana & Bhasin, 2014).

Samtidigt har förhållandet mellan SARA-fraktionerna av bindemedel och deras fysiska och tekniska egenskaper undersökts omfattande av många forskare under de senaste årtionden, vilket även framgår i förra avsnittet. I en studie av Wang et. al. (2019) där effekten av SARA-fraktioner på bindemedlets reologiska beteende vid låga temperaturer undersöktes genom användning av elva bindemedel kunde bland annat följande slutsatser dras:

- De fysikaliska och kemiska egenskaperna hos SARA-fraktioner var uppenbarligen olika för de 11 olika bindemedlen, vilket påverkade respektive bindemedles reologiska beteende.
- Modulen och fasvinkeln för bindemedlet var nära relaterad till förändringen av SARA-fraktionerna.

- Komplexmodulen för bituminet minskade med ökningen av I_c -värdet (kolloidala instabilitetsindexet som används för att bestämma kolloidal instabilitet hos asfaltbindemedel) vid låga temperaturer.
- Glasövergångstemperaturen (Se avsnitt 2.8.7.1) för asfaltbindemedel bestämdes huvudsakligen av "saturates" och aromatiska fraktioner, men ökade även vid ökning av asfaltenhalten.
- Dessutom fanns signifikanta samband mellan SARA-fraktioner och lågtemperaturparametrar för bindemedelsproverna, vilket indikerar att SARA-fraktionerna skulle ha betydande effekter på lågtemperaturregenskaperna hos bindemedel (Wang et. al., 2019).

2.8.5 Inverkan av vax på lågtemperaturregenskaper

En annan nyckelfaktor som påverkar bitumens lågtemperaturregenskaper är mängden och typen av vax i bindemedlet (Ibid.). Däremot har åsikterna kring vax i bitumen varierat under åren och resultat från olika studier har ibland även varit motsägelsefulla. Genom olika typer av fasövergång kan naturligt vax i bitumen möjligen påverka bindemedlets egenskaper i större eller mindre utsträckning. I vanliga fall anses vaxet kristallisera vid låga temperaturer och således skada lågtemperaturregenskaperna hos bitumen. Däremot finns det många forskare som rapporterat att molekyllära strukturer och kristallina former av vax spelar en viktig roll för lågtemperaturregenskaperna. Bituminet som innehåller mikrokristallint vax eller amorft vax har bättre lågtemperaturregenskaper än det som innehåller stort kristallint vax. Stort kristallint vax, makrokristallint vax, består främst av n-alkaner med låg polaritet och har en symmetrisk molekyllärstruktur som gör det mer sannolikt att kristallisera. Detta gör bituminet hårt och sprött, vilket resulterar i lågt sprickmotstånd och hög spricktemperatur (Edwards, 2005).

2.8.6 Lågtemperaturregenskaper via Molecular Dynamics (MD)

Molecular dynamics (MD) simulering är ett kraftfullt verktyg för att beskriva molekyllära beteenden. Grunden för MD-simulering är att etablera en bitumen molekyllär modell med rimlig kemisk sammansättning och molekyllär struktur. På grund av komplexiteten hos bitumen använder forskare vanligtvis en genomsnittlig/generell molekyllär modell för att representera helheten eller en fraktion av bitumen. Ett annat tillvägagångssätt är att blanda flera representativa molekyler av varje fraktion för att sedan fastställa den representativa molekyllära modellen för bitumen. Den vanliga, genomsnittliga molekyllära modellen kan förutsäga de övergripande egenskaperna hos bitumen, men den tar inte hänsyn till den kemiska sammansättningens variation. Däremot kan den representativa molekyllära modellen som erhålls från MD-simulering kompensera för det och därför har den representativa molekyllära modellen studerats och erkänts av många forskare (Liu, et. al., 2021).

MD-simulering har redan använts för att studera sambandet mellan kemisk sammansättning, molekyllärstruktur och makroskopiska egenskaper. Exempelvis har den använts i studier som kommit fram till att bituminets självdiffusivitet och självläkande egenskaper var mer utvecklade med en kedjelängdstillväxt och minskning av molekyllädkedjans förgrening samt att tillsats av bioolja mjukar upp styvheten av

bitumen. Dessa studier och många därutöver har bevisat att MD-simulering kan bestämma effekten av molekyllära strukturer på egenskaper, vilket ger en referens för att undersöka effekten av molekyllär struktur på lågtemperaturregenskaperna hos bitumen. Däremot är det fåtal studier som utförts för att utforska lågtemperaturregenskaperna hos bitumen av MD, i synnerhet studier på sambandet mellan molekyllstruktur och lågtemperaturregenskaper (Ibid.).

I studien utförd av Liu, et. al. (2021) där fyra sorters bitumen med olika penetration, mjukpunkt och duktilitet användes visade resultatet bland annat på att bituminet med lägre asfaltenaggregationsgrad har bättre lågtemperaturregenskaper. Dessutom visade resultatet på att bitumen med en högre genomsnittlig diffusionskoefficient har bättre lågtemperaturregenskaper eftersom ökande molekyllär diffusionskoefficient förbättrar den molekyllära rörligheten.

Därtill påvisades att bitumen som innehåller mer aromatiskt kol och mindre alkylkol har bättre lågtemperaturregenskaper. Ökande aromatiskt kol bildar några molekyler med stark diffusionsförmåga och minskar asfalten aggregationen genom att främja bildningen och dispergeringen av asfaltenhartsaggregat. Vidare konstateras att icke-bunden energi och valensenergi har ett positivt samband med lågtemperaturregenskaper, då ökande icke-bindande energi skulle förbättra den molekyllära bitumenrörligheten, och således förbättra lågtemperaturregenskaper hos bitumen. Baserat på resultaten kan det dras slutsatsen att lågtemperaturregenskaperna hos bitumen kan optimeras genom att öka harts och aromatiska innehåll, eller lägga till fler molekyler med mer aromatisk kolhalt och högre diffusionskoefficient (Liu, et. al., 2021).

2.8.7 Inverkan av fysisk härdning på väghållfasthet

Fysisk härdning av bitumen kan spela en stor roll vid termisk sprickbildning av flexibla vägbeläggningar. Ökningen i styvhet och minskningen av förmågan att avlasta från spänningar på grund av fysisk härdning kan främja uppbyggnaden av termiskt inducerad krympspänning i asfaltblandningar, vilket kan leda till ett tidigt haveri av asfaltbeläggningen. Effekten av fysisk härdning på bitumens reologiska egenskaper och brottegenskaper är väl dokumenterad, dock finns en begränsad information tillgänglig gällande den fysiska härdningens effekt på asfaltbeläggningars prestanda vid låga temperaturer (Baglieri et. al., 2012).

Genomförda studier baserade på belägningsprestanda som observerats i fält, såsom en studie utförd av Yee et. al., (2006) där sprickbildningsgraden i testbeläggningssktioner analyserats, fann att sektioner byggda med bitumen med hög känslighet för fysisk härdning sprack mer. Bitumens känslighet för fysisk härdning mättes med hjälp av en BBR och de kom fram till att fysisk härdning i kallt klimat kan leda till ett tidigt haveri av asfaltsbeläggningar. Andra laboratoriestudier har också visat att härdning av bitumen kan påverka härdningen och relaxation från spänning för asfaltblandningar. Det är därmed tydligt att fysisk härdning potentiellt avsevärt kan påverka väghållfastheten vid

låga temperaturer. Således kan en bättre förståelse för detta fenomen effektivt minska frekvensen av vägunderhåll, som ett resultat av att öka hållbarheten för vägar i kalla klimat (Baglieri et. al., 2012).

I en studie med syfte att undersöka om fysisk härdning av bitumen påverkar den termiska responsen hos asfaltblandningar och om det finns korrelation mellan de förändringar som observeras i egenskaperna hos asfaltblandningar med de som observeras i bitumen, framkom intressanta resultat. Resultaten indikerade att beroende på bitumentyp kan det ske en avsevärd minskning av glasövergångstemperatur T_g ("glass transition temperature") som övergår från bitumen till asfaltblandningen. Dessutom observerades att det finns en korrelation mellan härdningshastigheten för bitumen och asfaltblandningar, på så sätt att den ökande trenden av fysiska härdningshastigheter i bindemedlen resulterade i en observerad ökning av asfaltblandningens fysiska härdningshastighet. Men för att bekräfta resultaten från studien behövs datapunkter från ett större utbud av material, då endast fyra bitumentyper (tre rena och en polymermodifierad) och motsvarande asfaltblandningar testades (Ibid.).

2.9 Metoder för redovisning av resultat

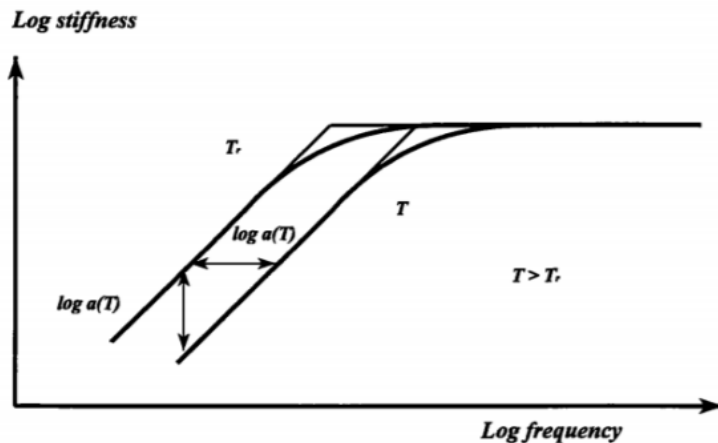
Vid redovisning av resultat från DSR-tester är den vanligaste formen via en Masterkurva, då den ger en tydligare analys och illustration av mätningarna. Resultatredovisning i form av ett så kallat Blackdiagram är också förekommande i dessa sammanhang som skapar en grafisk bild av sambandet mellan G^* och fasvinkel samt visar på om resultatet ansluter till kända mönster eller om det finns avvikande värden som behöver undersökas närmare. Nedan i detta delkapitel följer en beskrivning av bland annat de två nämnda redovisningsmetoderna.

2.9.1 Masterkurva

När det kommer till förståelse och redovisning gällande hur bitumentyp och dess kemiska uppbyggnad inverkar på de viskoelastiska egenskaperna är Masterkurvor ett effektivt verktyg att använda. Det som Masterkurvor möjliggör är att de underlättar mätning och hantering av mätdata på så sätt att man slipper mäta dynamiska data över ett stort frekvensspann, då det både är opraktiskt och komplicerat. Därmed slipper man mäta mycket och istället bidrar Masterkurvor till att komplettera den mätdata som väl mäts. Med Masterkurvor kan värden för bitumens egenskaper interpoleras vid ett större frekvensspann kombinerat med att flera temperaturer kan användas i det studerade området. En annan fördelaktig funktion vid användning av Masterkurvor är att man kan jämföra resultat av tester som har genomförts på olika laboratorier och som exempelvis har haft olika förutsättningar med avseende på temperatur och frekvens (Yusoff, 2012).

Då bitumen som tidigare nämnt är ett viskoelastiskt material så beror materialets egenskaper på belastningstid och temperatur samtidigt som det kan uppvisa samma egenskaper under olika förhållanden. Exempelvis kan ett bitumen som belastas under

lång tid vid lägre temperatur uppvisa samma egenskaper som ett bitumen som utsätts för korttidsbelastning under höga temperaturer. Detta fenomen som infinner sig hos bitumen kallas för "Tid-Temperatur Superpositionsprincipen" (TTSP) och illustreras i Figur 30. Dessutom gäller att masterkurvan bygger på TTSP (Yusoff, 2012).



Figur 30- Tid-temperatur superpositionsprincipen (TTSP) (Yusoff, 2012).

Skapandet av en Masterkurva sker genom att först köra ett flertal frekvenssvep med olika temperaturer där resultaten (utdatan) är den komplexa skjuvmodulen G^* vid en given temperatur samt frekvens. Resultaten med mätdatan sammanställs sedan i ett funktionssystem med *reducerad frekvens* på X-axeln och den komplexa skjuvmodulen på Y-axeln. För att skapa en sammanhängande Masterkurva utgås det från en referenstemperatur där mätdata förflyttas antingen till höger eller vänster om referenstemperaturen (Mezger, 2014). Med andra ord förflyttas antingen den komplexa skjuvmodulen eller fasvinkel mot frekvensen vid varierande temperaturer (Hunter, et. al., 2015).

Observera att reducerad frekvens som förekommer på X-axeln inte är samma sak som lastfrekvens, utan reducerad frekvens är en sammanvägning av frekvens och temperatur med en faktor som benämns skiftfaktor. Skiftfaktorn anger sambandet mellan temperatur och frekvens, och har samma påverkan på skjuvmodul respektive fasvinkel (Mezger, 2014). Genom att föra samman mätdata från olika temperaturer och frekvenser kan skiftfaktorn skapa en kontinuerlig kurva vid en reducerad frekvens. Den reducerade frekvensen kan beräknas enligt Ekvation 2.21 (Yusoff, 2012).

$$\log(f_r) = \log(f) + \log(a_T) \quad (2.21)$$

Där:

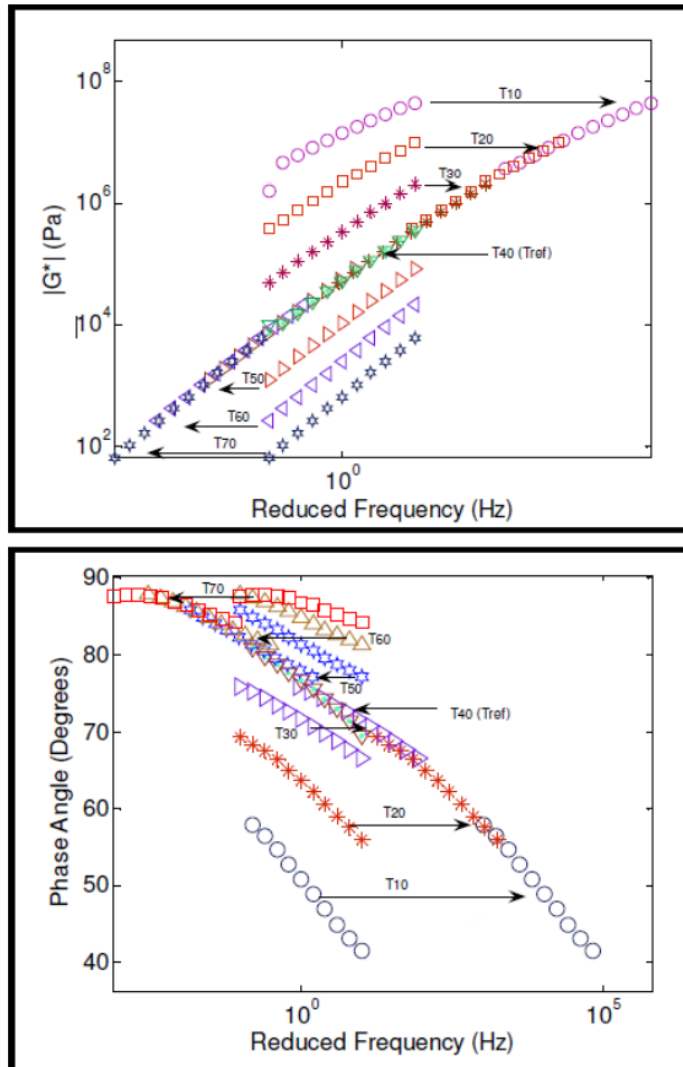
f_r - Reducerad frekvens [Hz]

f - Frekvens [Hz]

a_T - Skiftfaktor

I Figur 31 nedan visas två exempel på Masterkurvor, en för fasvinkel och en för komplex skjuvmodul, som har skapats med olika temperaturer och frekvenser. Utifrån mätningarna

har referenstemperaturen valts till 40 °C och för att skapa en kontinuerlig kurva (Masterkurvan) har skiftfaktorn bidragit till att resterande data med de olika temperaturerna har förflyttats i horisontalled vid sidan om referenstemperaturen (Yusoff, 2012).



Figur 31- Exempel på masterkurvor med fasvinkel och komplex skjuvmodul (Yusoff, 2012).

Något som kan vara viktigt att nämna är att en Masterkurva endast är fullständigt trovärdig vid den satta referenstemperaturen. Superpositioneringens tillämpning kan medföra att de mätpunkter som flyttas till vänster eller höger om referenstemperaturen inte är mer pålitliga än modellen eller ekvationen som användes för att möjliggöra förflyttningen. Det superpositioneringen medför är att de reologiska egenskaperna beräknas vid andra temperaturer än de som där värdena har mätts, och är något som man bör ha i åtanke (Hunter, et. al., 2015).

Förflyttningen som görs med hjälp av skiftfaktorn kan genomföras med olika tekniker och matematiska modeller, men i denna studie skapas masterkurvorna genom en kombination

av Williams-Land-Ferry (WLF)-ekvationen och Sigmoidal-modellen. Dessa två modeller förklaras mer ingående i nästkommande två avsnitt.

2.9.1.1 Williams-Land-Ferry (WLF) ekvationen

WLF-ekvationen är den vanligaste ekvationen för att beskriva förhållandet mellan skiftfaktorer, och således skiftfaktorn för bitumen, och temperatur. Enligt Yusoff (2012) har ekvationen funnits vara användningsbar på både bitumen och asfaltsbruk. Det som gör ekvationen praktisk vid hantering är att ekvationen utgår från temperaturskillnader (Hunter, et. al., 2015). Ekvationen baseras på tre konstanterna C_1 , C_2 och T_{ref} . Dessa konstanter styr skiftfaktorn där C_1 och C_2 varierar beroende på skillnaden mellan temperaturen och referenstemperaturen T_{ref} . Skiftfaktorn kan beräknas utifrån Ekvation 2.22, WFL-ekvationen (Williams et. al, 1955).

$$\log(a_T) = -C_1(T - T_{ref})/C_2(T - T_{ref}) \quad (2.22)$$

Där:

a_T – Skiftfaktor

C_1 och C_2 – konstanter

T_{ref} – Referenstemperatur [°C]

T – Temperatur [°C]

När det kommer till konstanterna C_1 och C_2 och förhållandet mellan T_{ref} och T finns det olika uppfattningar gällande vilka värden som är lämpligast att använda. Enligt Williams et. al. (1955) kan ekvationen användas för alla material om konstanterna C_1 och C_2 sätts till de universella värdena 8,86 respektive 101,6 samtidigt som T_{ref} väljs till ett lämpligt värde för det undersökta materialet. Däremot menar Brodnyan et. al. (1960) på att för bitumen kan de universella värdena endast användas ifall temperaturerna är mer än 20 °C lägre än T_{ref} , alltså då $T - T_{ref} > -20^\circ\text{C}$. Enligt Anderson et. al. (1991) bör konstanterna för bitumen sättas till $C_1 = 19$ och $C_2 = 92$. Yusoff (2012) å andra sidan förnekar att det finns en universell konstant som kan användas för bitumen och menar istället på att konstanterna bör beräknas för alla studier som genomförs på bitumen. Beräkning av konstanterna kan göras genom en enkel omskrivning av Ekvation 2.16 med förutsättning att referenstemperaturen är vald. I denna studie kommer referenstemperaturen väljas som $T_{ref} = 25$. På LTH behandlas C_1 och C_2 som matematiska variabler och får de värden som ger den bästa passningen mot Sigmoidalfunktionen.

Utöver WFL-ekvationen kan skiftfaktorn även beräknas med en annan ekvation som benämns Arrhenius ekvation. Denna ekvation baseras på två konstanter T_A och T_0 . Jämfört med WFL-ekvationen anses denna vara enklare vid användning, däremot förekommer en viss osäkerhet vid exploatering av temperaturer utanför mätområdet. I Arrhenius funktion som framgår i Ekvation 2.23 är T_0 en godtyckligt vald referenstemperatur och T_A är kurvans lutning som beror på aktivitetsenergi (Jones & David, 2001).

$$\log(a_T) = T_A (1/T - 1/T_0) \quad (2.23)$$

Där:

T_A – Kurvans lutning

T – Aktuell temperatur

a_T – Skiftkonstant

T_0 – Referenstemperatur

2.9.1.2 Sigmoidal-modell

Sigmoidal-modellen är den andra funktionen som bidrar till att ta fram Masterkurvan och det modellen beskriver är förhållandet mellan komplex skjuvmodul och den reducerade frekvensen. I Ekvation 2.24 framgår modellen.

$$\log|G^*| = \delta + \alpha / (1 + e^{(\beta + \gamma(\log(\omega)))}) \quad (2.24)$$

Där:

G^* – komplex skjuvmodul

ω – reducerad frekvens

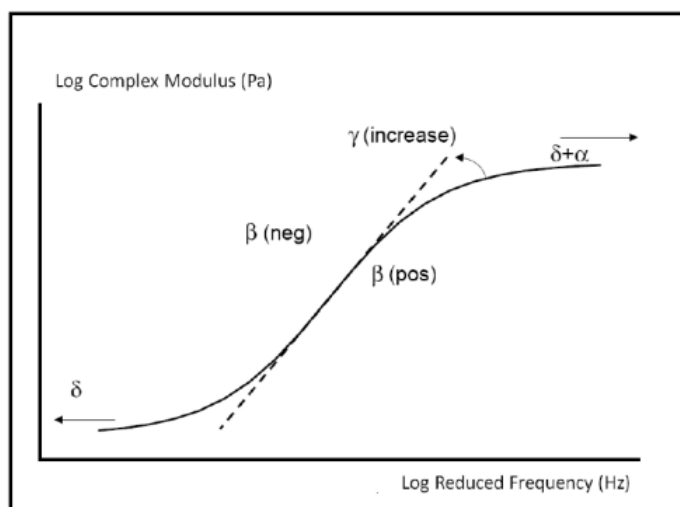
δ – lägre asymptoten

α – skillnaden mellan övre och undre asymptot

β & γ – anger läget för kurvans inflektionspunkt

$\log(\omega) = \log(f_r) + \log(a_T)$ (se formlerna 2.21 och 2.22)

β & γ är de konstanter som både definierar formen för asymptoten och placeringen av inflektionspunkten där inflektionspunkten beräknas fram som $10^{\beta/\gamma}$. δ anger den undre asymptoten och α anger differensen mellan den övre och undre asymptoten (Yusoff, 2012). Dessa fyra nämnda konstanterna illustreras i Figur 32.



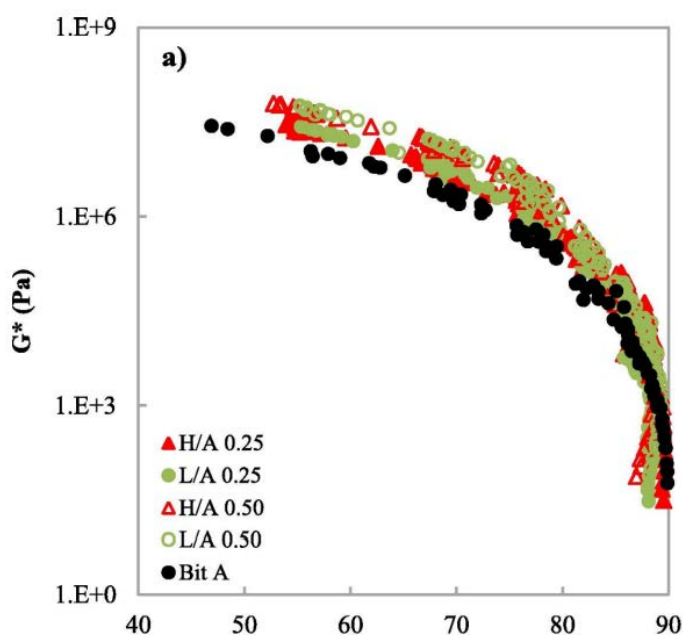
Figur 32- Definition av Sigmoidal -modellen (Yusoff, 2012).

Från början var syftet med skapandet och utvecklandet av Sigmoidal modellen att beskriva den komplexa modul-masterkurvan för asfaltsmassor. Men modellen har även visat sig fungera bra på rent bitumen, och är för detta avseende som modellen kommer användas i denna studie. Vid arbete med modellen görs inledningsvis en uppskattning på vilka värden variablerna δ , β & γ skulle kunna vara. Om det inte finns någonting att utgå ifrån, såsom en tidigare mätning, bör variablerna enligt Yusoff (2012) sättas till $\delta = 1$, $\beta = -1$ och $\gamma = 1$ som en första gissning. För att sedan optimera kurvans anpassning till de uppmätta värdena från frekvenssvepet används MS Excelverktyget "problemlösaren" som itererar fram värden enligt minsta kvadratmetoden (Yusoff, 2012).

2.9.2 Blackdiagram

Resultaten från DSR-tester kan även redovisas i ett Blackdiagram, som beskriver sambandet mellan den komplexa skjuvmodulen (G^*) på Y-axeln och fasvinkeln (δ) på X-axeln. Således tas ingen hänsyn till temperatur och frekvens i diagrammet. Anledningen till detta är att då slipper den rådata som anskaffats från mätningen att redigeras genom tid-temperatur superpositionering, och all data från testet kan därmed presenteras i ett enda diagram. Om kurvan i Blackdiagrammet är jämn och parabolliknande tyder det på en ekvivalens mellan temperatur och tid, en jämn skiftfaktor. Å andra sidan innebär en diskontinuerlig kurva, alltså en kurva med brott i, att det finns en avvikelse för sambandet temperatur och tid, en varierande skiftfaktor. Orsaken till detta kan vara innehåll av ämnen med andra egenskaper än bitumen, såsom vax eller polymermodifiering (Hunter, et. al., 2015).

I Figur 33 illustreras hur ett rent bitumens blackdiagram förändras beroende på mängden filler genom att när filler i bitumen ökar gör även den komplexa skjuvmodulen det. Asfaltsbruksblandningarna i Figur 24 är på 25% och 50%.



Figur 33 - Exempel på blackdiagram med varierande mängd filler (Micaelo, et. al., 2017).

Som Figur 33 ovan illustrerar går fasvinkeln mellan 0 och 90 grader och för bitumen så minskar den komplexa skjuvmodulen med ökande fasvinkel, vilket innebär att materialet blir mer visköst. Med hjälp av kurvans form i blackdiagram fås även en indikation om materialet har egenskaper av en newtonsk vätska eller icke newtonsk vätska eftersom kurvan för newtonska vätskor får en tilltagande krökt form. Utseende på kurvan för bitumen kännetecknas av en parabelliknande form som går asymptotiskt mot fasvinkeln 90°, vilket illustreras i Figur 33 (Yusoff, 2012).

Beteendet på kurvan för polymermodifierade bitumensorter är mer komplext där materialen kan uppvisa olika komplexa skjuvmodul vid samma fasvinkel. När kurvan krökar inåt och fasvinkeln minskar så minskar även komplexa skjuvmodulen. Orsaken till detta är att tillsatser som finns i polymermodifierade bitumensorter, såsom vax eller högt asfaltsinnehåll, har egna specifika smältpunkt som påverkar beteendet av prover (Ibid.).

Blackdiagram ser inte alltid helt perfekt ut i mätseriens ändpunkter beroende på mätningar i ytterkanten av instrumentets mätförmåga. En annan vanlig brist på överensstämmelse är överlappningen mellan PP08 och PP25. Provkropparnas form (geometrierna) är helt olika men resultaten för rent bitumen brukar stämma bra, vilket förklaras av den jämna skiftfaktor. En variabel skiftfaktor, som i fallet med polymermodifierat bitumen, brukar visa sig med kraftigt olika utseende. Mönstret är inte slumpmässigt utan upprepar sig lika dant vid ny mätning. En annan förekommande avvikelser kan orsakas av ovana vid instrumentet och provhanteringen och är ett vanligt test för nya laboranter innan de får påbörja sina mätserier (Tyllgren, 2022).

3 Metod

I detta kapitel följer en genomgång av hur bitumensorterna som undersökts har förberetts samt vilka tester som genomförts.

3.1 Provserier

De två olika bitumensorterna som undersöktes var Bitumen 70/100 och Nypol 73. Tabell 4 nedan visar vilka provserier som genomfördes med de olika mätningssmetoderna DSR och BBR för båda bitumensorterna. I efterföljande tabell, Tabell 5, visas de temperaturer och frekvenser som användes för respektive mätserie.

Tabell 4 - Sammanställning av testade provserier

Prover som har utförts med DSR vs BBR			
Åldring:	Original	RTFOT	RTFOT+PAV
70/100			
Svep PP08	x	x*	x
Svep PP25	x	x	x*
MSCR	x	x	x*
BBR			x
Nypol 73			
Svep PP08	x	x*	x
Svep PP25	x	x	x*
MSCR	x	x	x*
BBR			x

* Extra mätpunkter som inte ingår i Superpave

Tabell 5 - frekvenser och temperaturer för de olika mätmetoderna.

Svepkörning		
	temp, °C	rad/s
PP08	30 → -30	0,1 → 100
PP25	20 → 80	0,1 → 100
MSCR		
temp, °C	kryp	
t1*	≈ 0,5 kPa ⁻¹	
t2*	≈ 2 kPa ⁻¹	
t3*	≈ 4 kPa ⁻¹	
* Körs i en följd på samma prov		
BBR		
t-låg + 10	S(60)	m(60)
T1	< 300 MPa	> 0,300
T2	> 300 MPa	< 0,300
T3**	≈ 300 MPa	≈ 0,300
** Om T1/T2 missar målet		

Som Tabell 6 nedan visar utgjordes de två olika bitumensorterna som användes vardera av tre olika varianter med varierande styvhet. En av de tre varianterna åldrades inte (benämns Original i Tabell 4) och de två kvarvarande varianterna åldrades genom olika typer av värmebehandling, RTFOT respektive RTFOT+PAV. Åldringsmetoderna RTFOT och RTFOT+PAV användes för att simulera händelseförloppet för bitumenet kortsiktigt och långsiktigt. Provbarkarna med benämningarna 1A, 1B och 1C motsvarar i samma ordning originalbitumen O.B (ej åldrat), RTFOT-behandlat bitumen respektive RTFOT+PAV behandlat bitumen för bitumensort 70/100. För provbarkarna med benämningarna 2A, 2B och 2C gäller samma princip, fast för bitumensorten Nypol 73.

Tabell 6 – Tre varianter av respektive bitumensort

Bitumensort	Typ av bitumen
70/100	1A (Original bitumen)
	1B (RTFOT)
	1C (RTFOT+ PAV)
Nypol 73	2A (Original bitumen)
	2B (RTFOT)
	2C (RTFOT+ PAV)

3.2. Tillvägagångssätt

Figur 34 visar DSR-maskinen tillverkad av företaget Anton Paar och som användes vid utförandet av sveptesterna. DSR-maskinen finns på asfaltlaboratoriet på Lund Tekniska Högskola, där samtliga tester utfördes. För att kunna installera, kontrollera och skriva in olika data från de olika sveptesterna har en programvara som heter RheoCompass utvecklats av Anton Paar. Testerna som genomfördes med DSR-maskinen benämns PP08 respektive PP25, vilket innebär prover med 8 respektive 25 mm:s diameter. Utöver frekvenssveptesterna med PP08 och PP25 genomfördes även MSCR-tester för proverna med provdiameter 25 mm, PP25. I försökserien har det använts två olika typer av bitumen. Den ena bitumensorten har penetrationstal 70/100 enligt EN-standarderna och den andra bitumensorten är polymermodifierade Nypol med mjukpunkt 73, därav benämningen Nypol 73.



Figur 34 - Dynamisk skjuvreometer av märke Anton Paar modell MCR 302.

3.2.1 Provberedning

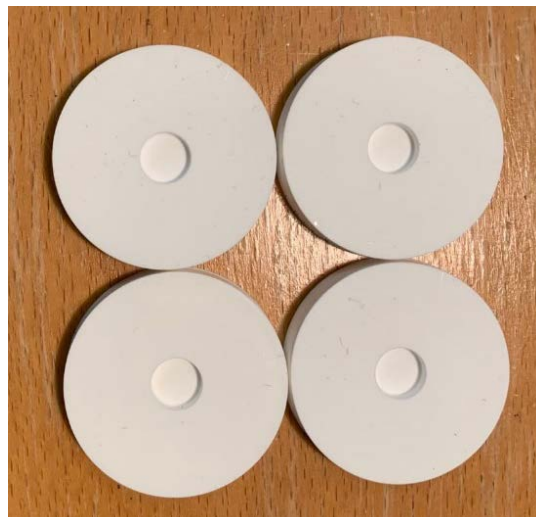
Utrustningen som användes för utförande av sveptesterna var enligt följande:

- Silikonformar för två olika diameterstorlekar, 8 mm respektive 25 mm. Se Figur 35 och Figur 36.
- Bitumen med penetrationstal 70/100 och bitumensorten Nypol med nominell Mjukpunkt 73 °C, vardera bitumensort bestående av tre varianter, se Figur 37.

- Aluminiumbehållare som används under blandning och uppvärmning av bitumen i ugnen, se Figur 38.
- En ugn för uppvärmning av bitumen, se Figur 39.
- Våg för att uppnå en viss önskad vikt på bitumenproverna inför sveptester, se Figur 40.
- Lödkolv som kan hållas förhand användes för att fylla silikonbehållarna med bitumen och för att bibehålla bitumens höga temperatur och således underlätta arbetet, se Figur 41.



Figur 36- Silikonhållare PP25



Figur 35- Silikonhållare PP08



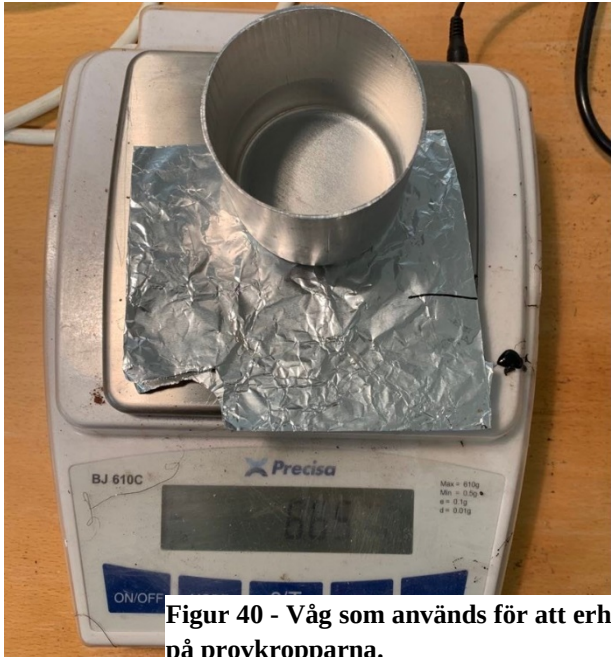
Figur 37- Tre varianter av respektive bitumensort (O.B originalbitumen, RTFOT, RTFOT+PAV), totalt 6 aluminiumbehållare.



Figur 38- Aluminiumbehållare med bitumen.



Figur 39- ugn för uppvärmning av bitumen



Figur 40 - Våg som används för att erhålla önskad vikt på provkropparna.



Figur 41 - Lödkolv som används för att hålla bitumen varmt vid fyllning av silikonformarna.

Under tillverkningsprocessen av testproverna värmdes bitumen som fanns i de sex aluminiumbehållarna upp till en viss temperatur under 30 minuter för att erhålla en flytande form. Bitumensorten 70/100 och Nypol 73 var nämligen båda i fast form vid rumstemperatur. Temperaturen som krävdes för att uppnå flytande form var olika för de sex olika aluminiumbehållarna (provbarkarna) eftersom dessa har olika styvhet. Vid flytande form blir bituminet mer lätthanterligt vilket möjliggör en mer verkningfull provproduktion. Tabell 7 nedan visar uppvärmningstemperaturer för respektive bitumenhårdhet (för varje provbark) samt arbetsmomenten som utfördes innan och efter testkörning av provkropparna.

Tabell 7 - Uppvärmningstemperaturer för resektive bitumenhårdhet och tider för de olika arbetsmomenten.

Moment	Prov	Temperatur, °C	Tid, minuter
Uppvärmning av provburk	1A	150	30
	1B	160	30
	1C	170	30
	2A	160	30
	2B	170	30
	2C	180	30
Väntetid på bord efter uppvägning	Alla	Rumstemperatur	10
Temperering i frys i silikonform	Alla	-15 °C	5
Förvaring i kyl av losstaget prov	Alla	7 °C	> 2 tim, <1 vecka
Applicering på uppvärmd övre spindel	Alla	Mjpkt+10 °C	0,5
Trimning	Alla	Mjpkt+10 °C	1
Gapavläsning, beräkningar, inmatning	Alla	Starttemperatur	0,5
Sänkning till starttemperatur	Alla	Starttemperatur	5
Visuell sista kontroll av prov	Alla	Starttemperatur	-
Uppvärmning efter test	Alla	Mjpkt+20 °C	10

Ju högre hårdhet som provkropparna hade desto högre blev uppvärmningstemperaturerna där uppvärmningen skedde successivt för att undvika att materialet brändes på grund av de höga temperaturerna som skulle uppnås. Efter uppvärmning blandades bitumensorterna i aluminiumbehållarna med en sked för att erhålla bättre konsistens. Innan bitumenet hälldes i silikonformarna tempererades de återigen i ugn i några minuter vid 150 °C. För att sedan applicera bitumenblandningarna i silikonformarna användes en lödkolv och en sked, vilket illustreras i Figur 42. I samband med applicering av bitumen i silikonformarna kontrollerades så att en på förhand beräknad vikt för de två provkropparna, 8 respektive 25 mm, uppnåddes. För provkropparna med diametern 8 mm blev vikten 0.11 gram med höjden 2 mm och för provkropparna med diametern 25mm blev vikten 0.52 gram med höjden 1 mm.

Efter applicering av bitumen i silikonformarna placerades en bordslampa i närheten av silikonformarna i 5 minuter för att bitumenet inte skulle stelna, då det är viktigt att bitumenet fyller ut formarna och får en slät överyta. Efter att bitumen hade tagit sin form i silikonformarna placerades de frysen i fem minuter. Slutligen lossades provkropparna från silikonformarna och lades i kylskåpet i väntan på testkörning med DSR-maskinen, se Figur 43 nedan.



Figur 42 - Hällning av bitumen med hjälp av sked och Lödkolv.



Figur 43 - Provkroppar med diameter 8 mm (PP08) och 25 mm (PP25).

3.2.2 Applicering av prov

För att placera provkropparna på ett korrekt sätt följdes instruktioner och rekommendationer från Tyllgren (2022) samt en manual som skrivits av Håkansson & Härstedt (2015). För att placeringen av provkropparna skulle vara korrekt behövde provkroppen först placeras på spindeln, då en felaktig placering medför ett felaktigt och icke användbart mättingsresultat. Därmed spelar kontakten mellan provkropp och spindeln stor vikt gällande huruvida resultatet som erhålls från mätningen kan användas eller inte. Nedan beskrivs utförandet av en DSR-mätning från början till slut:

- Först startades datorn, DSR-maskinen och kylaren. T1 valdes om PP25 eller MSCR test skulle köras och T2 om PP08 skulle köras.
- Den stora spindeln och plattan användes för testen PP25 och MSCR, se Figur 45, och den mindre spindeln och plattan för PP08-testen enligt Figur 44 nedan.



Figur 44 - Den mindre plattan och spindeln för PP08-test.



Figur 45 - Den större plattan och spindeln för PP25 och MSCR-test.

- Efter att mätplattan valdes beroende på typ av test monterades den fast på DSR-maskinen.
- Programvaran RheoCompass öppnades via datorn, där sedan typ av test valdes (PP08, PP25 eller MSCR).
- När rätt typ av test på programvara hade valts trycktes på knappen "Initialize".
- Några sekunder efter att spindeln monterats på DSR-maskinen hördes ett pipande ljud och då trycktes på knappen "Set Zero Gap" för att sänka ner spindeln till den underliggande mätplattan.
- När spindeln nått den underliggande plattan höjdes temperaturen med hjälp av programvaran och därefter sänktes den svarta värmekåpan ner, se Figur 46 nedan, för att behålla den önskade temperaturen mellan spindel och plattan, det vill säga temperaturen som behövs för att uppnå den uppskattade mjukpunkten.

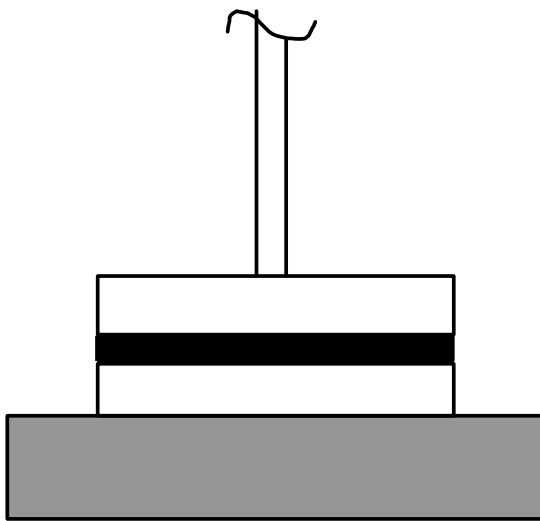


Figur 46 - värmekåpan precis innan den ska omsluta spindel och plattan.

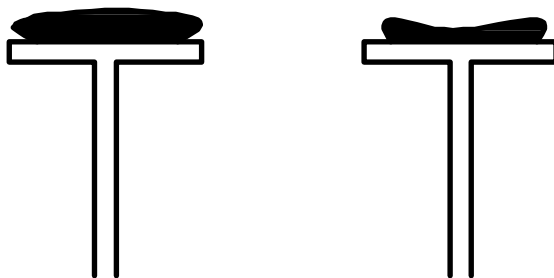
- För att uppnå den uppskattade mjukpunkten höjdes temperaturen till den så kallade trimningstemperaturen med hjälp av programvaran RheoCompas till 58 °C för bitumen 70/100 och 68 °C för Nypol 73. Därefter väntades i tio minuter innan provkroppen lades på spindeln för att vara säkerställa att spindeln hade blivit tillräckligt uppvärmd så att ett bra fäste mellan spindel och provkropp kunde uppnås.
- För testerna med PP25 och MSCR-testen behålls trimningstemperaturen som sattes i föregående steg. Men för testerna med PP08 sänktes trimningstemperaturen med 10 °C eftersom provets geometri i princip täckte hela spindelns yta, vilket medför en ökad risk för att provkroppen rinner ut vid placeringen av provkroppen om det är för hög temperatur.
- Efter tio minuters uppvärmning hämtades provkroppen från kylskåpet och värmekåpan och spindeln höjdes upp med hjälp av RheoCompas.
- När provkroppen hämtats demonterades spindeln och sedan placerades provkroppen på spindeln på ett sådant sätt att ungefär samma avstånd från provkroppens kant till spindelns kant uppnåddes, alltså en så central placering som möjligt på spindeln. En annan viktig detalj i samband med placering av provkroppen på spindeln var att den underliggande delen av bitumenprovkroppen, med slät undersida, placerades mot spindelns yta.
- Efter placering av provkropp på spindeln så monterades spindeln återigen på DSR-maskinen och sänktes sedan ner med hjälp av programvaran.
- Nedsänkningen av spindeln i detta skede gjordes för att bestämma den så kallade trimningshöjden, alltså det slutliga avståndet efter nedsenkning av spindeln mellan underliggande platta och provkropp.
- För PP08 gäller ett initialt gap på 2,3 mm (innan justering av höjden), och för PP25 gäller ett initialt gap på 1,3 mm.
- Provkropp PP25 var något mindre i diameter och högre i höjd jämfört med det trimmade provet i DSR-maskinen, vilket underlättade applicering av provkroppen

på spindeln på så sätt att det fanns större marginaler att arbeta med jämfört med PP08.

- Höjden justerades genom att hissa spindeln upp och ner för att erhålla en så bra kontakt som möjligt mellan provkropp, spindel och platta, utan att på något vis förstöra provkroppen. En bra kontakt mellan de tre komponenterna innebär att provkroppens kanter blir exakt raka, det vill säga att provkroppen placeras på hela spindels- och plattans yta med raka sidor enligt Figur 47 nedan. Indikationen på rätt placering innebär att det inte uppstår någon utbuktning eller tomrum för provkroppen mellan den underliggande mätplattan och spindeln, vilket illustreras i Figur 48 nedan.



Figur 47 - Rätt placering av provkropp med raka sidor (Bakløkk, 2002).



Figur 48 - Fel placering av provkroppen med utbuktning (till vänster av figuren) och tomrum (till höger av figuren) (Bakløk, 2002).

- När trimningshöjden hade bestämts och provkroppen tagit sin korrekta plats mellan spindeln och plattan sänktes värmekåpan ner i syfte att bibehålla trimningstemperaturen.
- Efter föregående steg väntades i fem minuter för att vara säkerställa att alla komponenter omslutna av värmekåpan uppnådde samma temperatur.

- Under väntetiden öppnades ett Excel dokument framtaget av Tyllgren (2022) för att beräkna gaphöjden vid olika förbestämda temperaturer, även dessa av Tyllgren (2022). Dessa gaphöjder erhöles genom att i Excel dokumentet skriva in den trimningshöjd och uppskattade mjuktemperatur som tagits fram i tidigare skede.
- Samtliga gaphöjder skrevs in i kontrollpanelen i programvaran RheoCompass genom att trycka på "Measurement".
- Därefter genomfördes en sista kontroll där alla temperaturer och gaphöjder dubbelkollades och att provkroppens kontakt med spindeln och plattan var intakt, alltså att provkroppens kanter var raka enligt tidigare beskrivning.
- Efter att kontrollen godkännts initierades testmätningen genom att trycka på knappen "Start" i programvaran.

3.3 Utförande av tester

3.3.1 Frekvenssveptest PP25 och PP08

Frekvenssveptesterna utfördes på PP25- och PP08-provkroppar av referensprover med bitumen 70/100 och Nypol 73. Frekvens- och temperaturintervallsmallarna som användes i RheoCompass programvaran i denna studie framtogs med hjälp av Tyllgren (2022), där värdena var baserade på tidigare studier av olika bitumensorter som undersökts med DSR. Samtliga värden erhöles av Nynas AB där frekvensen och amplituden för varje temperatur som användes på alla prover delades upp i 10 intervaller mellan 0,1 och 100 rad/s, och framgår i Bilaga 1.

För PP08 utfördes testen med en starttemperatur på 30°C för att sedan minskas med ett temperatursintervall på 10°C fram till den slutliga temperaturen -30°C. Den slutliga temperaturen -30 °C är en temperatur som medför en ökad styvhet på bituminet, vilket kan resultera i en ökad risk för att provet spricker i slutet av mätserien. Däremot justerades de inställda temperaturerna för PP08 till -9,6 °C för "-10", -18,9 °C för "-20" och -27,6 °C för "-30", se Tabell 8 nedan. Detta efter att Nynas hade kontrollerat verklig temperatur i provet under huden. För PP25 utfördes testen med en starttemperatur på 20°C som ökades med ett temperatursintervall på 10°C fram till den slutliga temperaturen på 80°C, se Tabell 8 nedan.

Anledningen till att två olika storlekar, PP08 respektive PP25, av samma bitumensort provades var för att säkerställa att ett mättningsresultat erhöles ifall ett av provstorlekarnas mätresultat misslyckades. För om endast testkroppen PP25 används finns risk för att sprickor uppstår på provkroppen vid låga temperaturer på grund av de höga krafter som uppstår under testkörningen. För PP08 storlekarna finns risken att provet rinner ut vid höga temperaturer och att kontakten med spindeln således förloras. Oavsett vilken av provkropparna PP08 och PP25 som används av samma bitumenvariant ska de två erhålla mättningsresultaten från respektive provkropp överlappa varandra vid samma temperatur för att få trovärdiga resultatet och kunna förlänga mättningsintervallet. Detta illustreras på

blackdiagrammet genom att ett visst antal punkter från båda mätningarna måste överlappa

Frekvenssvepetester	Undersökta temperaturer [°C]											
PP08	-27,6	-18,9	-9,6	0	10	20	30	-	-	-	-	-
PP25	-	-	-	-	-	20	30	40	50	60	70	80

varandra (Tyllgren, 2022).

Tabell 8- Temperaturer för frekvenssvepetester PP08 och PP25.

3.3.2 Multiple Stress Creep Recovery Test (MSCR)

MSCR-testet utfördes för att undersöka materialets höga temperaturegenskaper och spårbildningsresistens. Samma provkroppar som användes för frekvenssveptest PP25 användes även för MSCR-test. De använda temperatursintervallen som kördes på de olika proven varierade beroende på bitumenets styvhet enligt Tabell 9 nedan. Enligt erfarenheter från Tyllgren (2022) baserat på tidigare studier förväntades t-hög för MSCR-testen ligga mellan de valda temperaturintervallen. Den kvarstående deformationen J_{nr} beräknades vid lasten 3200 Pa, $J_{n,3200}$, för varje temperatur enligt Ekvation 2.21, och värdena mellan dessa interpolerades sedan. Tyllgren (2022) antog således temperaturer för $J_{n,3200}$ vid 0,5–4 kPa för att en eventuell extrapolering skulle bli så kort som möjligt. När gissningarna på temperaturerna var för dåliga och resultatet från MSCR-testet således inte var användbart så kördes testet på PMB (polymermodifierade bitumen) om med nya temperatursintervall, fram tills att resultaten blev bra. Den temperatur som sedan uppfyllde kravet $J_{n,3200} < 4$ kPa betraktades som t-hög för MSCR-testet.

$$J_{nr} = \gamma_{nr} / \tau \quad (2.21)$$

Där:

τ – Skjuvkraft [kPa]

J_{nr} – Kvarstående deformation [kPa^{-1}]

Tabell 9 - Temperaturer för MSCR-test.

Prov	Typ av bitumen	Undersökta temperaturer [°C]
70/100	1A (Original bitumen)	44-52-60
	1B (eRTFOT)	44-52-60
	1C (eRTFOT+ PAV)	56-64-72
Nypol 73	2A (Original bitumen)	72-78-84
	2B (eRTFOT)	72-77-83
	2C (eRTFOT+ PAV)	72-81-90

Arbetsgången för DSR-maskinen vid utförandet av MSCR-testerna genomfördes med hjälp Tyllgren (2022) enligt följande:

1. Stabilisering av temperatur och normalkraft i 15 min.
2. Belastning med 100 Pa under 1 s.
3. Avlastning i 9 s. Steg 2 och 3 upprepas ytterligare 9 gånger innan programmet går vidare till nästa steg.
4. Ny belastning med 3200 Pa under 1 s.
5. Avlastning i 9 s. Steg 4 och 5 repeteras ytterligare 9 gånger innan programmet går vidare till nästa steg.
6. Ny temperatur och omstart av cykeln.

3.4 Framtagning av bedömningsparametrar

3.4.1 Masterkurva

Frekvenssveptestresultaten för PP08 och PP25 exporterades till ett tidigare genererat excel-dokument som användes som beräkningsmall. Resultaten räknades om med hjälp av WLF-ekvationen för att förskjuta dem med en skiftfaktor a_T enligt kapitel 2.9.1. De resulterande värdena för komplex skjuvmodul (G^*) och fasvinkel (δ) framtagna från programvaran RheoCompass skiftades till referenstemperaturen $T_{ref} = 25\text{ °C}$ och ritades på grafen. Dessutom ritades kurvan enligt Sigmoidal-modellen och startvärdena är $\beta = -1$, $\delta = 1$ och $\gamma = 1$. Värden för konstanterna C_1 , C_2 , α , β , γ och δ erhöles med hjälp av funktionen "Solver" genom att iterativt anpassa kurvan till punkterna, vilket minimerar avvikelser. För masterkurvan för fasvinkeln bör värdena α och δ sättas till $\alpha = 90^\circ$ respektive $\delta = 0^\circ$. I praktiken betyder detta att det lägsta och högsta värdet som kan antas för fasvinkeln är 0° respektive 90° enligt definitionen om viskoelastiskt beteende i kapitel 2.6.2.

3.4.2 Beräkning av t-hög, t-mellan och t-låg

Vid beräkning av t-hög, t-mellan och t-låg erhöles värdena som inte kunde mätas genom interpolering. T-hög beräknades med hjälp av resultaten som erhöles av frekvenssvepet PP25. Att hitta t-hög med PP25-svepet gjordes på två olika sätt, genom att hitta temperaturen varvid $G^*/\sin(\delta)$ antar värdena 1 kPa respektive 2,2 kPa samt via svepfrekvens MSCR.

Med hjälp av mättningsresultaten erhållna från ekvationen $G^*/\sin(\delta)$ och frekvensen $\omega = 10\text{ rad/s}$ vid temperaturerna som framgår i Tabell 8 för PP25 skapades en graf. t-hög lästes av för två $G^*/\sin(\delta)$ -värden, där den ena värdet på t-hög erhöles då $G^*/\sin(\delta) = 1000\text{ kPa}$ för spårbildning i nylagd beläggning och det andra t-hög värdet då $G^*/\sin(\delta) = 2200\text{ kPa}$, för senare spårbildning (RTFOT-behandlat).

T-hög som beräknades från svepfrekvens MSCR erhöles genom att interpolera resultaten från de tre uppmätta temperaturerna enligt Tabell 9, där den högsta temperaturen som uppfyller kravet på den kvarstående deformationen J_{nr3200} vid 4, 2, 1 och 0,5 kPa⁻¹ väljs som t-hög för MSCR. $J_{nr3200} = 4 \text{ kPa}^{-1}$ ska motsvara värdet från sveptestet vid 2200 Pa för rent bitumen. Modifierade bitumensorter kan ha avvikande värden.

T-mellan erhöles på samma sätt som t-hög, med skillnaden att parametern t-mellan fås med hjälp av resultaten från frekvenssvep PP08 där grafen skapas genom funktionen $G^* \cdot \sin(\delta)$ och temperaturen som fullgör villkoret $\leq 5 \text{ MPa}$. I beräkningen av klimatkravet på t-mellan, ökas medelvärde av t-hög och t-låg med 4 °C.

T-låg beräknas ur Masterkurvan. Temperaturen som gav värdet 100 MPa för parametern $G^* \cdot \cos(\delta)$ vid $\omega = 0,0167 \text{ rad/s}$ motsvarar $S(60) = 300 \text{ MPa}$. Beräkningarna görs enligt minsta kvadratmetoden med Excelbladets problemlösare. T-låg enligt m-värde = 0,3 beräknades med lutningskoefficienten efter 60 sekunders belastning efter avläsningar vid 8, 15, 30, 60 120 och 240 sekunder. Lutningskoefficienten beräknas med hjälp av derivatan av ett approximerat andragradspolynom (Tyllgren, 2022).

De involverade stegen vid beräkning av BBR m-värdet $m_r(60s)$ och styvmodulen $G(60s)$ från dynamisk oscillerande skjuvningsdata med en referenstemperatur på PG +10 °C redovisas i avsnitt 2.7.3.3.

Mätresultaten för t-låg med BBR respektive DSR ligger 10 °C över graderingsvärdet som åsyftas i PG-klassificeringen. Detta görs av praktiska skäl. Mätningar på den avsedda nivån skulle ta alldeles för lång tid. I stället för några minuter skulle det annars röra sig om flera timmar. Med hjälp av superpositioneringsprincipen har gränsvärdena för mätmetoden förflyttats så att de motsvarar de som gäller i verkligheten (Tyllgren, 2022).

3.4.3 Beräkning av duktilitet

Duktilitet är ett materials förmåga att utstå plastiska deformationer utan att sprickbildning uppstår och redogörs mer ingående i kapitel 2.7.1. Resultaten som erhöles utifrån mätningarna som gjordes med hjälp av DSR användes för att estimerar hur duktilitet kommer att variera beroende på bitumens styvhet och hur denna styvhet inverkar på bitumens lågtemperaturregenskaper. Dukilitet beräknas med hjälp av ekvationerna (2.15) och (2.16) enligt kapitel 2.7.1, där beräkningen sker vid temperaturen 15 °C och med en frekvens på 0,005 rad/s.

3.4.4 Mjukpunkt

Vid framtagning av mjukpunkt i den här undersökningen utnyttjas viskositetsvärden från svepmätningar med DSR. Willem Heukelom angav viskositeten för Mjukpunkt med Kula & Ring-metoden till $1\,300\,000\text{ mm}^2/\text{s}$, vilket har visat sig stämma väl i en lång rad examensarbeten på LTH (Aurell, 2018; Imeri & Maka, 2021). För att kunna bestämmas med DSR måste en lämplig belastningsfrekvens väljas. I den här studien valdes 0,464 rad/s, som gav ett rimligt värde för 70/100. Modifierade bitumensorter brukar ge orimligt höga värden med Kula & Ring-metoden, som endast varit avsedd för rent bitumen. Trots det används värdena för benämning av polymermodifierat bitumen. Polymermodifierat bitumen reagerar inte som rent bitumen vid olika belastningsfrekvenser och skjuvspänningar (se Bilaga 2). Därför ska mjukpunktsbestämning av Nypol 73 inte ges för stor betydelse vad gäller mätetalen, bara ett konstaterande att de är styvare än rent bitumen. En metod som ger realistiska mjukpunkts-temperaturer vid $1\,300\,000\text{ mm}^2/\text{s}$ är rotationsviskosimeter, RVB (Tyllgren, 2022).

4 Resultat

I detta kapitel presenteras och analyseras erhållna resultat från egna genomförda mätningar med DSR och Nynas mätningar med BBR. Mättningsresultaten från genomförda undersökningar finns bifogade i Bilagor.

Då samtliga prover i denna studie har utsatts för åldring med åldringsmetoderna RTFOT och RTFOT+PAV kan resultaten användas för klassificering enligt Superpave. För att undersöka studiens syfte, som bland annat är att bestämma superpaveparametern t-låg genom att testa ett mätförfarande med DSR och se ifall BBR-testet i denna studie kan försöka ersättas med DSR-mätningar, analyserades totalt sex olika provserier, tre för respektive bitumensort (70/100 och Nypol 73).

4.1 Mätningar med DSR och BBR

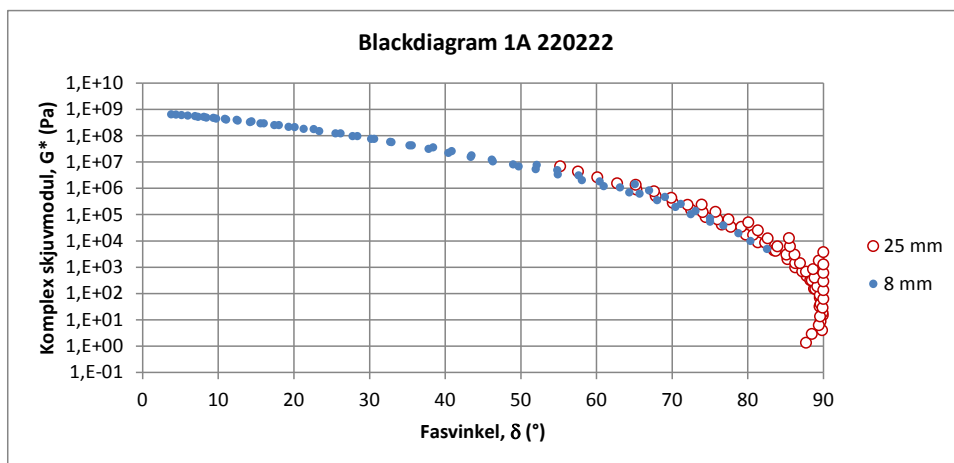
I Bilaga 7 finns en sammanställning över parametrarna t-mellan, t-hög (erhållet från både frekvenssvop och MSCR), duktilitet, mjukpunkt samt t-låg från både DSR och BBR. Förändring, alltså ökning eller minskning, av respektive parameter ska tolkas enligt följande. Ju högre värde på parametern t-hög desto bättre spårbildningsresistens för asfaltbeläggningen. Samtidigt gäller att lägre värden för t-mellan anses vara bättre. För att en asfaltsbeläggning ska vara motståndskraftig mot temperatursprickor gäller att värdena på t-låg ska vara låga.

Duktilitet, som även det är ett mått på en beläggnings resistens mot utmattningssprickor genom att uppge hur segt eller sprött materialet är, är att föredra höga värden på. Slutligen gäller för parametern mjukpunkt att eftersträvat värde beror på omgivande klimat och trafik. Om det råder höga temperaturer och hög trafikbelastning, alltså ett styvare bindemedel, eftersträvas ett högt mjukpunktsvärde. Vid låga temperaturer och låg trafikbelastning eftersträvas ett lågt mjukpunktsvärde, alltså en flexiblare beläggning (Sulejmani, 2022). Resultaten från Bilaga 7 redovisas i form av diagram under kommande delkapitel.

När det gäller att ange prestandan för t-låg enligt Superpave väljs det högsta värdet av S(60) och m(60). Samtidigt minskas det valda värdet med 10 °C. Detta görs för att testet utförs vid 10 °C högre temperatur av praktiska skäl och framgår i tabellen i Bilaga 6, se även avsnitt 3.4.2 för vidare motivering.

4.1.1 Blackdiagram (PP08 och PP25)

Som det framgår i avsnitt 2.9.2 är blackdiagram ett reologiskt verktyg som beskriver sambandet mellan den komplexa skjuvmodulen (G^*) och fasvinkeln (δ). Samtliga Blackdiagram redovisas i Bilaga 2 där Figur 49 visar på ett av dessa för bitumensort 70/100. Huvudsakligen används diagrammet för att se ifall det under mätserien har uppstått något brott i något av proven då det illustreras som ett brott i kurvan i diagrammet. Diagrammet kan även användas för att påvisa om materialet har newtonskt eller icke newtonskt beteende vätska då kurvan för newtonska vätskor får en tilltagande krökt form.



Figur 49 - Sambandet mellan komplex skjuvmodul, G^* , och fasvinkel, δ , i ett Blackdiagram.

Kommentarer:

Figur 49 ovan visar på att det finns en god överlappning mellan PP25 och PP08 för bitumen 70/100, vilket även övriga två diagram för 70/100 i bilaga 3 visar.

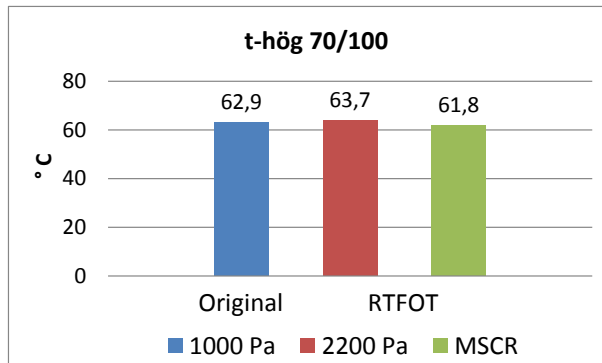
4.1.2 Spårbildningsresistens

Spårbildningsresistens analyseras genom parametern t-hög som beräknades med hjälp av resultaten som erhöles av frekvenssveptest med DSR. I Figur 50 illustreras resultaten från frekvenssveptestet PP25 på bitumensorten 70/100 som lästes av för två $G^*/\sin(\delta)$ -värden, 1 kPa respektive 2,2 kPa. Resultatet för t-hög vid riktvärdet 1 kPa (spårbildning i nylagd beläggning), alltså stapeln benämnd "Original", är inte utsatt för åldring, men resultaten för riktvärdet 2,2 kPa (senare spårbildning), den röda stapeln, utvärderas för bindemedlet åldrat med RTFOT.

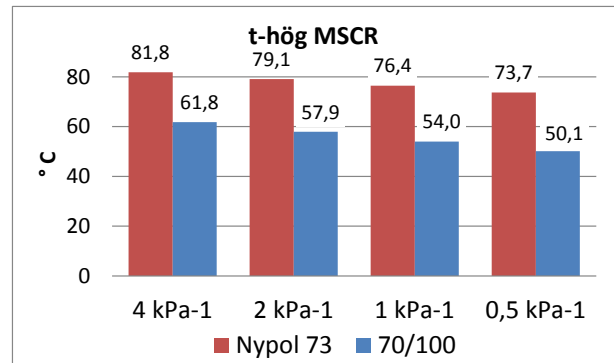
Resultatet för t-hög som beräknades för 70/100 i Figur 50 från svepfrekvens MSCR är också utsatt för åldringsmetoden RTFOT och åskådliggörs i den gröna stapeln. Det är den högsta temperaturen som uppfyller kravet på den kvarstående deformationen J_{nr3200} vid 4 kPa^{-1} , och ska motsvara värdet från sveptestet vid 2200 Pa för rent bitumen. Den

röda stapeln utgör alltså det gamla kriteriet och den gröna stapeln det nya kriteriet med MSCR.

I Figur 51 presenteras resultat från MSCR-test utförd med DSR för både bitumen 70/100 och Nypol 73. Den högsta temperaturen som uppfyller kravet på den kvarstående deformationen J_{nr3200} som motsvarar ökande trafikvolymen väljs som t-hög för MSCR. T-hög för Nypol 73 kunde endast bestämmas med MSCR på grund av ämnets dåliga svepresultat med PP25. Både Figur 50 och 51 visar på resultat utifrån bedömningar enligt Superpave vars värden framgår i de rektangulära blocken i Bilaga 6.



Figur 50 - Resultat för t-hög vid riktvärdet 1 kPa och 2,2 kPa från sveptest.



Figur 51 - Resultat för t-hög från MSCR-mätningar.

Kommentarer:

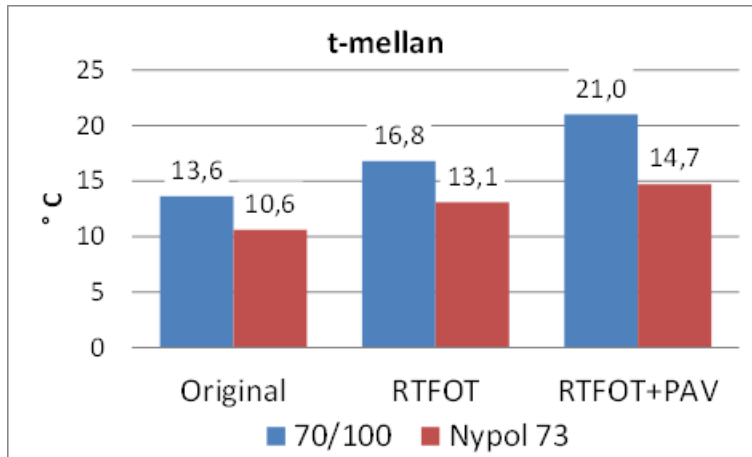
Resultaten för Figur 50 visar på att det ej åldrade bitumenprovet "Original" vid riktvärdet 1 kPa är väldigt lika t-hög värdet för de RTFOT behandlade varianterna av samma bitumensort, vid riktvärdet 2,2 kPa samt för MSCR-test. I fallet för rent bitumen 70/100 framgår således att det nya och gamla kriteriet (grön respektive röd stapel i Figur 50) ligger ganska lika. Med andra ord innebär det att bedömning av spårresistens i nylagd beläggning kan göras på originalbitumen från depåtank, kriteriet 1 kPa fungerar.

Av resultaten i Figur 51, MSCR-mätningarna, framgår hur känsliga de två bitumensorternas krypförmåga är relaterat till varandra. Ju högre temperatur som uppnås i testet desto större motståndsförmåga mot krypning och således permanent spårbildning. Resultaten för Figur 51 visar på att t-hög ökar med ökande värde på trafikvolymerna (0,5, 1, 2 och 4 kPa⁻¹) för båda bitumensorterna. Dessutom framgår att Nypol 73 har ett högre t-hög värde och således högre spårresistens än 70/100 för samtliga trafikvolymen. Det kan uttryckas som att användning av Nypol 73 ökar en asfaltbeläggningens möjlighet att återgå från påförda deformationer mer jämfört med bitumen 70/100.

I Bilaga 6 framgår också att spårresistensen, alltså t-hög, ökar med åldring av bitumen, för alla trafikvolymen (0,5, 1, 2 och 4 kPa⁻¹) och för båda bitumensorterna.

4.1.3 Resistens mot utmattningssprickor

Parametern t -mellan används för att utvärdera resistens mot utmattningssprickor. I Figur 52 redovisas resultatet för t -mellan utifrån frekvenssveptest med DSR vid riktvärdet 5 MPa för båda bitumensorterna, utan och med åldringsmetoderna RTFOT och RTFOT+PAV. För t -mellan finns inga absoluta gränser för vad bra värde är, utan det beror på kriteriet som finns (ett bra värde klarar kriteriet och vice versa).



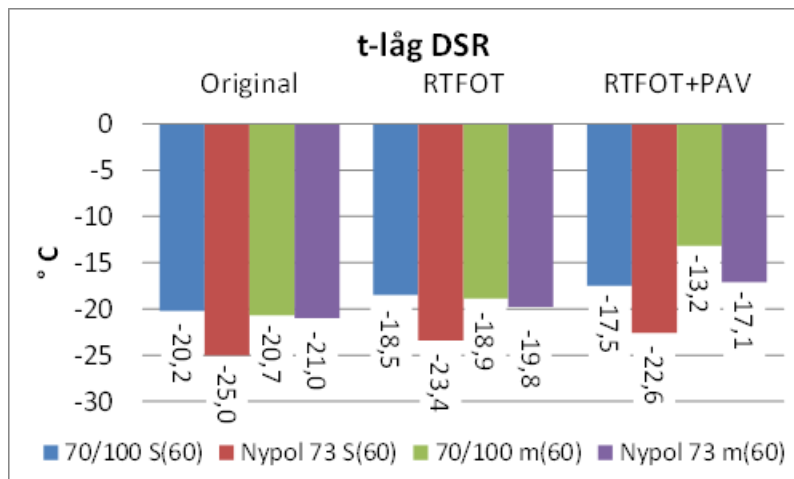
Figur 52 - Resultat för t -mellan från frekvenssveptest för bitumensorterna 70/100 och Nypol 73 utan och med åldringsmetoderna RTFOT och RTFOT+PAV.

Kommentarer:

Resultaten visar på att värdet på t -mellan är högre för åldrat bitumen med den kortsiktiga åldringsmetoden RTFOT jämfört med Original bitumen för båda bitumensorterna, samt att den långsiktiga åldringsmetoden RTFOT+PAV medför högre värde på t -mellan jämfört med bitumen behandlat med RTFOT. Detta pekar mot att ju äldre beläggningen blir desto sämre blir resistensen mot utmattningsskador. Dessutom framgår att Nypol 73 har bättre resistens mot utmattningsskador än bitumen 70/100 eftersom t -mellan för Nypol 73 är lägre i samtliga fall. Ökningen av parametern t -mellan från icke åldrad till åldrad bitumen var lite större för 70/100.

4.1.4 Mätning av t -låg (DSR)

Resistens mot lågtemperatursprickor utvärderas med hjälp av parametern t -låg. I Figur 53 redovisas resultatet från frekvenssveptest med DSR för t -låg för åldrat (RTFOT samt RTFOT+PAV) och icke åldrat bitumen av båda bitumensorterna. De två t -låg värdena $S(60)=300$ MPa och $m(60) = 0,3$ i BBR motsvarar och beräknas i DSR för $S(60) = 100$ MPa respektive $m(60) = -0,300$.



Figur 53 - Resultat för t-låg från sveptest med DSR för bitumensorterna 70/100 och Nypol 73 utan och med åldringsmetoderna RTFOT och RTFOT+PAV.

Kommentarer:

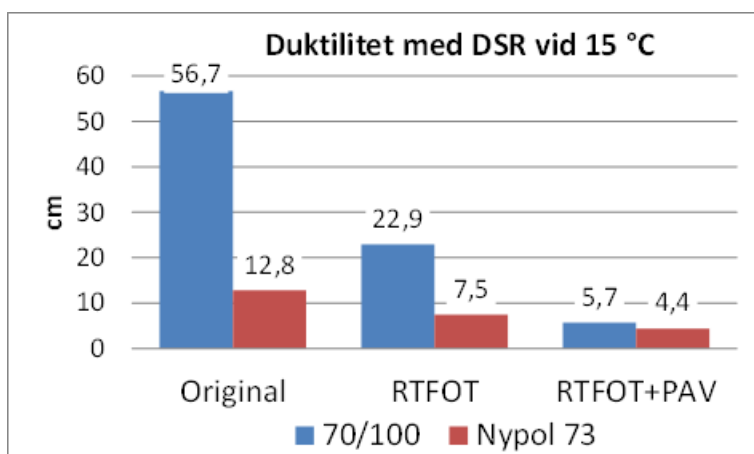
Resultaten visar på att t-låg värdet S(60) för bitumen 70/100 är högre än motsvarande värde för Nypol 73, för icke åldrat bitumen, "Original". För t-låg parametern m(60) är värdena för t-låg relativt lika för de båda bitumensorterna, där Nypol 73 antar ett något lägre värde.

För RTFOT-behandlat bitumen är förhållandet liknande det för Original-bitumen, dock med ett lägre t-låg värde för alla fyra parametrar. För RTFOT+PAV gäller också att t-låg värdet från parametern S(60) är lägre för Nypol 73 jämfört med 70/100, däremot är skillnaden mellan t-låg värdena för parametern m(60) större jämfört med Original och RTFOT, med lägre värde för Nypol 73. I relation till RTFOT-behandlat bitumen gäller för samtliga parametrar att t-låg värdena är lägre hos RTFOT+PAV behandlat bitumen.

Således framgår att resistensen mot lågtemperatursprickor minskar med åldring av bitumen för båda bitumensorterna då t-låg för S(60) och m(60) ökar vid behandling med RTFOT och RTFOT+PAV. Överlag utifrån beskrivningen i stycket ovan visar resultaten på att skillnaden mellan t-låg värdena för de fyra parametrarna skiljer sig åt mer vid ökad åldring, där specifikt t-låg värdet S(60) för Nypol 73 avviker mest (även utan åldringsbehandling).

4.1.5 Duktilitet

Ett materials förmåga att utsättas för plastiska deformationer utan att gå till brott, alltså ett materials seghet, analyseras genom parametern duktilitet. I Figur 54 presenteras det resultat från frekvenssveptest med DSR för duktilitet vid en temperatur på 15 °C för åldrat (RTFOT och RTFOT+PAV) och icke åldrat bitumen.



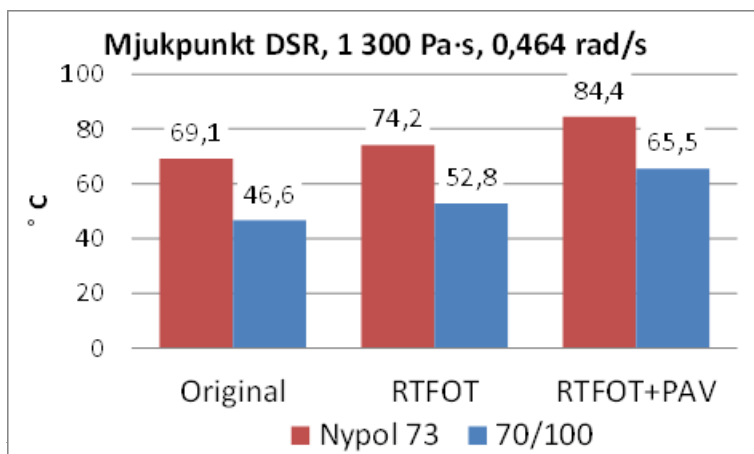
Figur 54 - Resultat för duktilitet från sveptest för bitumensorterna 70/100 och Nypol 73 utan och med åldringsmetoderna RTFOT och RTFOT+PAV.

Kommentarer:

Generellt visar resultaten på att duktiliteten är högst för icke åldrat bitumen och minskar desto mer åldrat bituminet blir. Vid jämförande mellan de två bitumensorterna åskådliggörs att bitumen 70/100 har högre duktilitet i samtliga fall, för både åldrat och icke-åldrat bitumen. Dessutom åskådliggörs i figuren ovan att duktiliteten för bitumen 70/100 avtar mycket fortare vid åldring jämfört med Nypol 73.

4.1.6 Mjukpunkt

I Figur 55 presenteras resultatet för mjukpunkt för de båda bitumensorterna från frekvenssveptest med DSR vid en viskositet på 1 300 Pa·s och frekvens på 0,464 rad/s.



Figur 55 - Resultat för mjukpunkt från DSR-mätningar för bitumensorterna 70/100 och Nypol 73 utan och med åldringsmetoderna RTFOT och RTFOT+PAV.

Kommentarer:

Resultaten visar på att mjukpunkten ökar med åldring där ökningen var succesiv för båda bitumensorterna. Dessutom är mjukpunkten högre för Nypol 73 jämfört med 70/100 för både åldrad och icke åldrad bitumen. Däremot är den successiva ökningen av mjukpunkten i takt med åldring liknande för båda bitumensorterna.

4.1.7 Jämförelse av t-låg med BBR

Vid framtagande av korrelationssamband mellan BBR och DSR för t-låg parametrarna S(60) och m(60) utfördes en regressionsanalys med hjälp av Excel. I utdatasammanfattningen från den linjära regressionsanalysen finns bland annat en så kallad "Anova"-analys med värden på viktiga parametrar, och framgår i Tabell 10 nedan för analys av S(60), och Tabell 11 för m(60).

Värdet på justerad R² och P-värdeskoefficienterna indikerar att funktionen representerar sambandet mellan de oberoende variablerna och de beroende variablerna. R² är ett viktigt mått som visar på hur mycket av korrelationen mellan BBR och DSR som drivs av de två faktorerna som undersökts, nämligen uppmätta BBR-värden och uppskattade värden från DSR via en formel (se nedan). Ju närmare 1 (eller 100%) R²-värdet ligger desto högre korrelation mellan BBR och DSR, och i detta fall blev R²-värdet 98,6% för S(60) respektive 82,2% för m(60) (se rubrikerna för Figur 55 och Figur 56).

Parametern "p-värde" är också en viktig parameter (fetstil-markerad i Tabell 10 och Tabell 11), och ett allmänt mål för denna är ett värde som understiger 0,05. Regressionsanalysen för både parametern S(60) och m(60) visar på att p-värdet understiger 0,05. Däremot är p-värdet vid analys av S(60), 6,95 E-05, betydligt mindre än för m(60), 0,008, vilket visar på en starkare korrelation mellan BBR och DSR för S(60). Koefficienten för S(60) DSR och $m_c(60)$ DSR anger hur stark korrelation som finns mellan de två undersökta faktorerna som nämnts ovan, ju högre värde desto större korrelation. Det som framgår från Tabell 10 och Tabell 11 är att korrelationen mellan BBR och DSR är större för parametern S(60) jämfört med m(60).

Tabell 10- ANOVA analys för S(60).

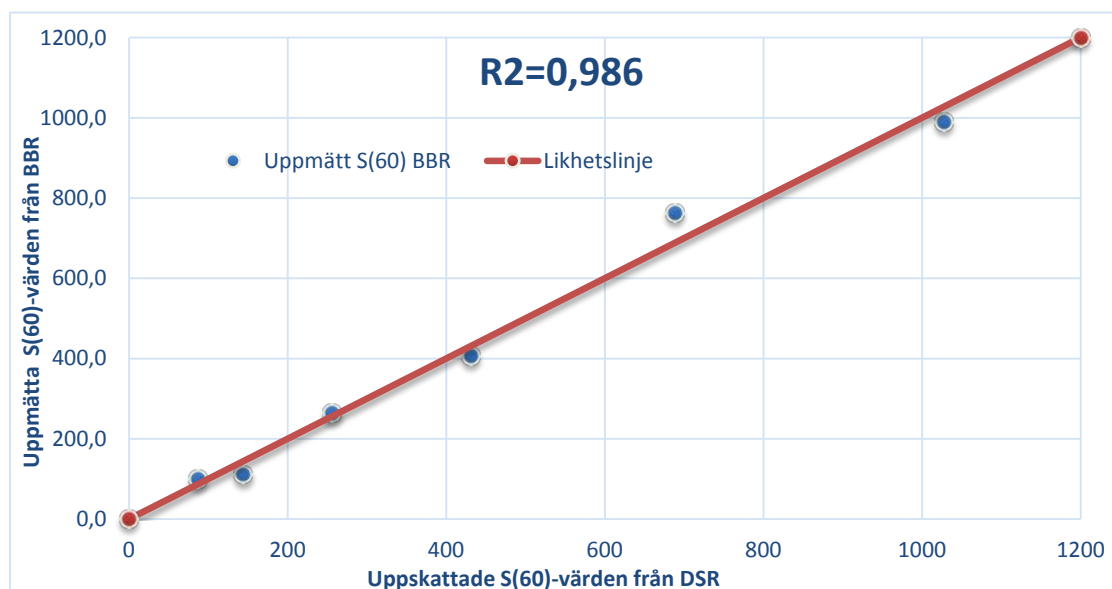
Statistik	Koefficient	Standardfel	P-värde
Konstant	30,867	30,797	0,373
S(60) DSR	3,058	0,179	6.95 E-05
R ²	0,986	*	*
R ² Justerad	0,983	*	*
Standardavvikelse	47,414	*	*

Tabell 11- ANOVA analys för m(60).

Statistik	Koefficient	Standardfel	P-värde
Konstant	0,066	0,04	0,17
$m_c(60)$ DSR	0,735	0,15	0,008
R2	0,857	*	*
R2 Justerad	0,822	*	*
Standardavvikelse	0,03	*	*

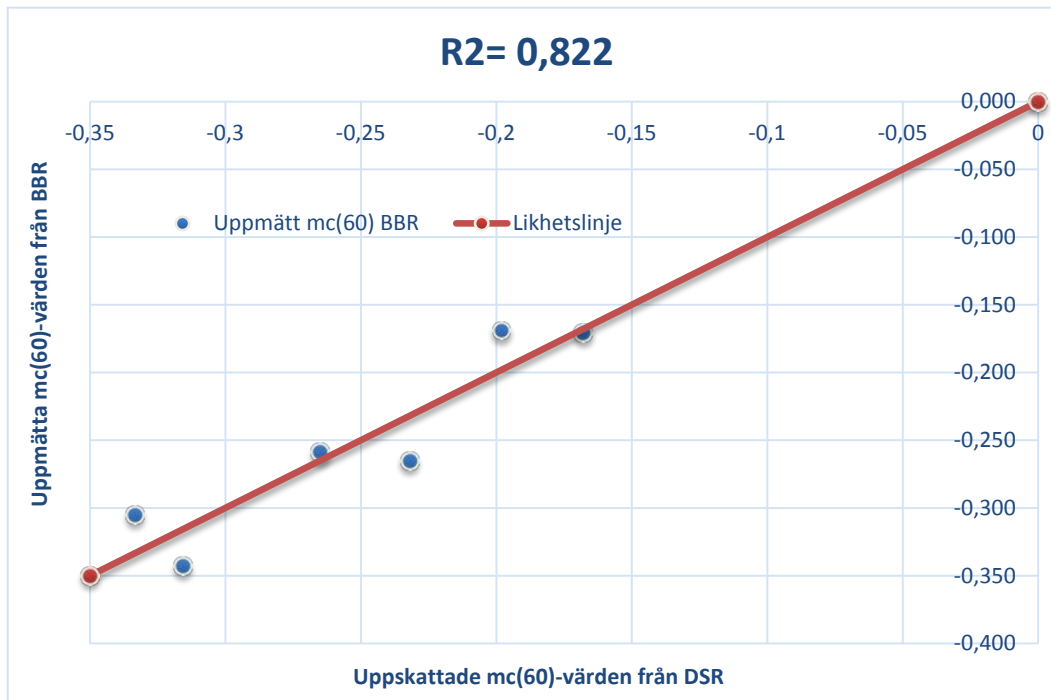
I Figur 56 jämförs resultatet från frekvenssveptest med DSR med BBR för t-låg parametern S(60) där korrelation mellan BBR S(60) och DSR S(60) redovisas. I Figur 57 visas jämförelser och korrelationen mellan BBR $m_c(60)$ och DSR $m_c(60)$ för båda bitumensorterna. Jämförelserna mellan BBR och DSR för t-låg parametrarna S(60) och m(60) har gjorts vid temperaturerna -10, -20 och -30 °C då Nynas mätte vid dessa tre temperaturer med BBR, se Bilaga 6 för tabell över värdena. Således förekommer det för varje korrelationsdiagram sex mätpunkter för respektive parameter, varav tre av mätpunkterna kommer från Nypol 73 och resterande tre från 70/100, båda mätta vid samma temperaturer enligt Bilaga 6.

Sambandet och korrelationen mellan BBR S(60), alltså uppmätta S(60)-värden från BBR, och DSR S(60) som är uppskattade S(60)-värden från DSR utifrån formeln $BBR\ S(60) = 3,06 \cdot DSR\ S(60) + 30,87$, redovisas i Figur 56 nedan.



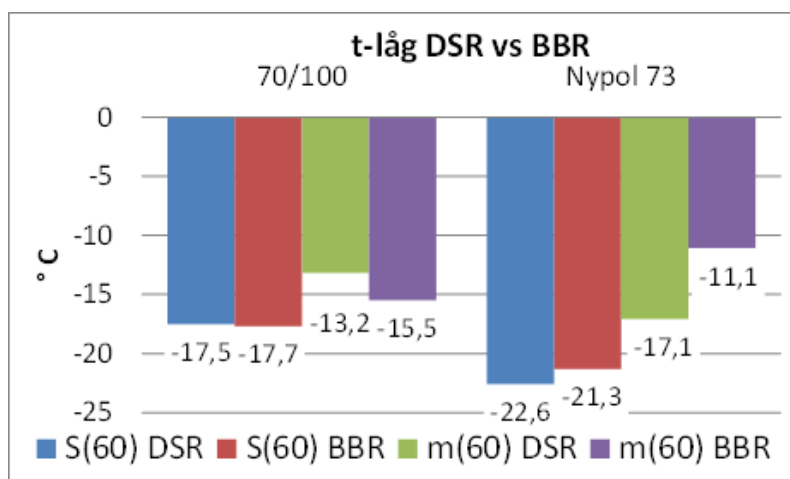
Figur 56 - Korrelationen mellan uppmätta BBR S(60)-värden och uppskattade DSR S(60)-värden.

Korrelationen mellan BBR $m_c(60)$, alltså uppmätta $m(60)$ -värden från BBR i Bilaga 6, och DSR $m_c(60)$ som är uppskattade $m(60)$ -värden från DSR utifrån formeln $BBR\ m_c(60) = 0,74 \cdot DSR\ m_c(60) + 0,07$, illustreras i Figur 57.



Figur 57-Korrelationen mellan uppmätta BBR $m_c(60)$ -värden och uppskattade DSR $m_c(60)$ -värden.

I Figur 58 redovisas och jämförs resultatet från frekvenssveptest med DSR med BBR för parametern t-låg. De två t-låg-värdena i DSR beräknas för $S(60) = 100$ MPa (motsvarande $S(60)=300$ MPa i BBR) respektive $m(60) = 0,300$, alltså samma som gäller för BBR.



Figur 58- Resultat för de två t-låg värdena $S(60)$ och $m(60)$ för DSR och BBR.

Kommentarer:

Till att börja med observeras i Figur 58 en tydlig korrelation mellan BBR S(60) och DSR S(60), speciellt starkare korrelation för bitumen 70/100. Däremot gäller att korrelationen för t-låg parametern $m(60)$ mellan DSR och BBR är svagare för båda bitumensorterna jämfört med S(60).

Figur 56 ger också belägg för det ovan nämnda, alltså att det finns en stark korrelation mellan BBR S(60) och DSR S(60). För $m(60)$ gäller också enligt ovan att korrelationen mellan DSR och BBR är svagare, där specifikt korrelationen hos Nypol 73 är svagare jämfört med bitumen 70/100.

5 Diskussion och slutsatser

I detta kapitel genomförs en diskussion kring resultatet och den använda metoden och metodens lämplighet efterföljt av slutsatser från studien. Slutligen avslutas kapitlet med rekommendationer till fortsatta studier inom ämnet.

5.1 Resultatdiskussion

5.1.1 MSCR (t-hög)

Ju högre t-hög värde som åstadkomms desto större motståndsförmåga mot krypning och således permanent spårbildning. Att t-hög ökar med åldring för båda bitumensorterna beror på att bitumen blir allt styvare med åldring. Detta innebär att ju styvare bitumenet är desto högre temperatur krävs för att få bitumenet mjukt igen vid återvinning.

Förklaringen till att Nypol 73 har högre t-hög värde än bitumen 70/100 beror på högre styvhet. Penetrationstalet, som anger hur många tiondels millimeter en nål sjunker ner i ett bitumenprov, är uppenbarligen högre för bitumen 70/100 än Nypol 73, som har penetrationstal 40/100–75. Bitumen 70/100 är således mjukare än Nypol 73, och kräver lägre temperatur för att understiga gränsvärdena 4, 2, 1 och 0,5 kPa⁻¹ för kvarstående deformationen J_{nr3200} vid ökande trafikvolym.

Risken med ökande resistens mot spårbildning är minskade eftergivlighet och att beläggningen spricker genom utmattning eller låg temperatur och behöver repareras eller bytas ut i förtid.

5.1.2 t-låg utifrån DSR-mätningar

I Figur 53 framgår att samtliga t-låg parametrar, $S(60)$ och $m(60)$, utifrån mätning med DSR ökar (temperaturen blir högre) successivt vid ökad åldring. Det innebär med andra ord att t-låg, som är den lägsta, passande temperaturen för att minimera risken för krackelering ökar med åldring av bitumen. Detta resultat stödjer teorin då risken för termisk sprickbildning ökar (alltså att t-låg värdet ökar i temperatur) med beläggningens ålder då bindemedlet härdar som ett resultat oxidation eller tidsberoende fysisk härdning. Samtidigt gäller även att den främsta orsaken till lågtemperatursprickning är att den ackumulerade termiska spänningen på grund av ökning av styvhet och minskning av förmågan att relaxera från spänningar medför att draghållfastheten hos bitumen överskrids. Som tidigare nämnt blir just bitumen allt styvare med åldring, vilket kan förklara resultatet.

Resultatet att t-låg värdena ökar vid ökad åldring stöds även av teorin gällande bindemedlets kemiska sammansättning vid åldring. Den egenskap som förändras mest under åldring är att viskositeten ökar, vilket medför att bitumenet blir styvare och således ökad risk för krackelering/sprickbildning. Den komponent i bitumen som främst orsakar åldring är minskningen av de flyktiga beståndsdelarna i bitumen, hartserna (en av de fyra SARA-bitumenfraktionerna som den nuvarande forskningen delar in bitumens uppbyggnad i). Att ha i åtanke däremot är att det på grund av komplexiteten hos varje fraktion och den stora skillnaden mellan de ingående SARA-fraktionerna i olika typer av bitumen, finns motstridiga åsikter i den här aspekten. Det som däremot är mer självklart är att SARA-fraktionerna med stor sannolikhet har betydande effekter på lågtemperaturregenskaperna hos bindemedel.

Orsaken till att det överhuvudtaget finns en skillnad mellan t-låg värdena för de fyra parametrarna beror först och främst på att det är två olika bitumensorter som undersöks. Däremot borde t-låg värdena från de två parametrarna S(60) och m(60) för respektive bitumensort vara relativt nära varandra. Utifrån resultatet observeras att det finns en större skillnad mellan t-låg värdena m(60) och S(60) för Nypol 73 jämfört med bitumen 70/100, vilket kan bero på svårigheten med hantering och korrekt placering av provkropparna spindel och platta under mätningarna med Nypol 73, se metoddiskussion.

Resultaten visar även på att t-låg värdet S(60) för bitumen 70/100 i samtliga steg (föråldrat och icke föråldrat) är högre än motsvarande värde för Nypol 73, med konstant liknande förhållande mellan dem. För t-låg parametern m(60) är värdena för t-låg snarlika för de båda bitumensorterna, där Nypol 73 antar ett något lägre värde. Men jämfört med parametern S(60) blir skillnaden mellan t-låg värdena för parametern m(60) större vid åldring, förhållandet är inte liknande. Vad detta kan bero på är möjligtvis valet av t-låg-värdet som i DSR beräknats för $G(60) = 100 \text{ MPa}$ (motsvarande $S(60)=300 \text{ MPa}$).

5.1.3 DSR vs BBR, Styvhet S(60)

Resultatet enligt Figur 56 och de erhållna parametrarna i Tabell 10 från regressionsanalysen visade på en tydlig korrelation mellan BBR S(60) och DSR G(60). Således har beräkningsmodellen som tagits fram av Tyllgren (2022) med hjälp av Nynas bedömning där t-låg parametern S(t), spänningen efter 60 sekunders belastning, beräknas för $G(60) = 100 \text{ MPa}$ (motsvarande $S(60)=300 \text{ MPa}$ i BBR) visat sig ge en bra korrelation med BBR.

För att jämföra de två bitumensorterna med varandra så framgår ur Bilaga 4, i tabellen "Prestandagradering av prov 1C 220225" att t-låg parametern S(t) beräknad för $G(60) = 100 \text{ MPa}$ i DSR, alltså DSR S(60), för RTFOT+PAV behandlad bitumen 70/100 blev -17,5 °C. Motsvarande t-låg parameter från BBR-mätningar utförda av Nynas, BBR S(60), blev -17,66 °C enligt Bilaga 5. För RTFOT+PAV behandlad bitumen Nypol 73 blev t-låg värdet erhållet från DSR -22,6 °C, motsvarande -21,33 °C från BBR. Utifrån dessa resultat framgår att korrelationen mellan BBR och DSR är en aning svagare för Nypol 73 då t-låg värdena skiljer sig åt mer gentemot 70/100.

5.1.4 DSR vs BBR, m-värde $m(60)$

Om man jämför värdet på t-låg erhållen från m-värdet efter 60 sekunder, $m(60)$, så är korrelationen mellan DSR och BBR svagare för båda bitumensorterna jämfört med parametern $S(60)$, även här med en aning svagare korrelation för bitumen Nypol 73. Från Bilaga 4, i tabellen "Prestandagradering av prov 1C 220225" framgår att t-låg parametern $m(60)$ erhållet från DSR (där m-värdet sattes till det som gäller för BBR, 0,300) för RTFOT+PAV behandlad bitumen 70/100 blev -13,2 °C. Motsvarande t-låg parameter från BBR-mätningar utförda av Nynas, BBR $m(60)$, blev -15,53 °C enligt Bilaga 5. För RTFOT+PAV behandlad bitumen Nypol 73 blev t-låg värdet erhållet från DSR -17,1 °C enligt Bilaga 4, motsvarande -11,08 °C från BBR. Således är differensen större för Nypol 73.

$S(60)$ ska normalt ligga lägre än $m(60)$ och det gör det för båda bitumensorterna. Orsaken är att när ett bitumen åldras påverkas t-låg för $m(60)$ mer än t-låg för $S(60)$ och blir ofta utslagsgivande för det slutliga prestandavärdet för t-låg, alltså det minst gynnsamma värdet av de två, det högsta. $m(60)$ är en spänningsrelaxerande krypförmnåga som ska motverka sprickbildning och den förmågan avtar med åldern och resulterar till slut i sprickor och materialsläpp, betingat av enbart låg temperatur (Tyllgren, 2022).

Den enda avvikelser från resultatet är att $m(60)$ BBR för Nypol 73 ökar kraftigt och ligger högt i förhållande till $m(60)$ DSR jämfört med 70/100, där $m(60)$ BBR minskar och ligger lågt. Dessutom framgår i Figur 57 att korrelationen mellan BBR $m_c(60)$ och DSR $m_c(60)$ är sämre gentemot parametern $S(60)$ då de blåa punkterna, alltså uppmätta $m_c(60)$ värden med BBR, ligger längre ifrån jämställdhetslinjen. Detta i relation till jämförelsen mellan BBR $S(60)$ och DSR $S(60)$ i Figur 55 där mätpunkterna ligger närmare jämställdhetslinjen. För siffror som stödjer det "visuella" i diagrammen visade parametern R^2 ur "Anova"-analysen på 98,6% för $S(60)$ respektive 82,2% för $m(60)$. Således är korrelationen generellt hög mellan BBR och DSR för båda parametrar, men samtidigt med en klar fördel för $S(60)$. P-värdet liksom koefficienterna för $S(60)$ DSR och $m_c(60)$ visade även de att korrelationen mellan BBR och DSR är större för parametern $S(60)$ jämfört med $m(60)$.

Det ovan nämnda antyder på att det inte finns en full överensstämmelse mellan DSR och BBR när det gäller $m(60)$ då mätningen av $m(60)$ med DSR kan skilja sig åt signifikant från BBR, men det fordras fler undersökningar för att klarlägga det. Samtidigt kan det vara så att det är DSR som ger ett mer trovärdigt resultat.

När det kommer till faktorer som påverkar korrelationen mellan BBR och DSR mätningar förekommer flera stycken. Att få exakt samma resultat från BBR och DSR är väldigt svårt, nästintill omöjligt, men genom att justera faktorerna som påverkar korrelationen negativt kan DSR så småningom bli ett likvärdigt alternativ som kan ersätta BBR vid undersökning av lågtemperaturregenskaperna hos bitumen. Forskning har nämligen visat på att olika experimentella förhållanden mellan BBR och DSR, såsom termiska förhållanden, vilket inkluderar fysisk härdning vid mycket låga temperaturer, kylhastighet och kylmedier kan leda till olika reologiska mätningresultat vid låga temperaturer. Därmed är de olika erhållna värdena på t-låg från parametern $m(60)$ ett resultat som stödjer teorin.

Därutöver har ett flertal studier observerat att krypstyvheten vid låga temperaturer erhållet med BBR är starkt beroende av kylmediet i asfaltbindemedel. Bindemedlets styvhetsresultat mätt i luften är 20 % till 33 % högre än den som utförs i etanol och då BBR tester utförs i etanol, medan DSR provet utförs i luft kan detta ha en inverkan på resultatet. I två relativt nya studier har man funnit att när BBR-tester utförs i luft kan bättre korrelation hittas mellan BBR och DSR resultat (Riccardi et. al., 2017; Wang et. al., 2019).

Utöver de kontrollerbara experimentella förhållandena, förekommer en annan faktor som kan påverka korrelationen mellan BBR och DSR, nämligen förändringar i de reologiska egenskaperna hos bindemedel orsakat av "glass transition" (glasövergång) vid låga temperaturer. Detta fenomen inträffar omedelbart när temperaturen går under "glass transition temperature" (glasövergångstemperaturen) T_g och under dessa förhållanden förändras bindemedlets optiska, termodynamiska och mekaniska egenskaper väsentligt.

Den fysiska betydelsen av detta fenomen kan beskrivas utifrån två olika skalor. På makroskalan blir bindemedlet glansigt till utseendet och extremt sprött och styvt, samtidigt som densiteten på bindemedlet ökar på grund av volymkontraktion, bindemedlet blir tätare. På mikronivå, är övergången förknippad med en avsevärt reducerad molekylär rörelse som så småningom blir försumbar över lång observationstid. Alltså kan de lite sämre korrelationerna mellan DSR och BBR resultaten möjligtvis hänföras till både de experimentella förhållandena samt fenomenet "glass transition".

Att nämna i detta sammanhang är dock att för att justera avvikelser orsakad av glasövergång för bituminösa material har det införts en temperaturberoende parameter, modulkiftfaktor b_T . Faktorn kan användas för att mildra avvikelser av förtätningen hos bindemedel orsakad av glasövergångsfenomenet vid temperaturer under "glasövergångstemperaturen". Med detta som bakgrund kan det antas att fenomenet "glass transition" inte har en så stor effekt på resultatet. Men även små avvikelser orsakat av fenomenet kan påverka resultatet.

5.1.5 Duktilitet

Av Figur 54 framgår att åldring av bitumen kan försämra dess förmåga att motstå påtvingade töjningar utan att brista då duktiliteten minskar successivt för båda 70/100 och Nypol 73 vid ökad åldring. Detta kan tolkas som, och styrks av föreliggande mätningar, att viskositeten, som beskriver en gas eller vätskas motstånd mot flöde, ökar hos båda bitumensorterna med en ökad åldring. Det innebär bituminets viskoelastiska egenskaper är starkt anknutet till hur åldrat bitumenet är.

Därtill kan resultatet uttryckas som att bitumen 70/100 har en större förmåga att utstå plastiska deformationer utan att det uppstår sprickbildning jämfört med Nypol 73, då den har högre duktilitet i samtliga fall. Orsaken till detta kan vara att bitumen 70/100 är mjukare än Nypol 73, och således kan motstå ökade spänningar utan att brista på ett bättre sätt jämfört med Nypol 73. Bindemedlet ska nämligen både vara tillräckligt styvt

för att klara av trafiklasterna, samtidigt som det ska vara mjukt nog för att hantera de sammandragningar som sker vid sjunkande temperatur i vägkonstruktionen. Antagligen är orsaken därmed att Nypol 73 i relation till bitumen 70/100 för styv.

Som ett tecken på en beläggnings slutstadium visade Kandhal (1977) på att då bindemedlets duktilitet är $\leq 5\text{ cm}$ så börjar asfalten uppvisa tecken på krackelering. För Nypol 73 så råkade mättalet hamna under gränsen 5 cm efter behandling med RTFOT+PAV, då mätetalet blev 4,4 cm enligt Bilaga 4.

5.1.6 Mjukpunkt

Resultaten från Figur 55 indikerar både på att ju äldre ett bitumen är desto sämre blir hanterbarheten av asfaltmassan och att det krävs högre temperatur under utläggning, då mjukpunkten visade sig öka med åldring för båda bitumensorterna. Att mjukpunkten ökar med åldring för båda bitumensorterna beror på att bitumen blir allt styvare med åldring. Det innebär att det krävs en högre temperatur för att ett lager av bitumen som värms kontinuerligt i ett mjukpunktest under tyngden av en stålkula ska uppleva en viss deformation. Det krävs alltså högre temperatur för att få bitumenet deformerat efter åldring.

Då resultatet även påvisade att mjukpunkten för Nypol 73 var högre jämfört med 70/100 innebär det att bitumen 70/100 är lämpligast ur mjukhetssynpunkt. Förklaringen till Nypol 73:s högre värde kan förmodligen enklast beskrivas av att den bitumensorten har högre mjukpunkt än bitumen 70/100, som har en mjukpunkt mellan 42–52 °C.

5.1.7 Blackdiagram (PP08 och PP25)

För samtliga blackdiagram i Bilaga 2 gäller att ett visst antal punkter från båda mätningarna från de två olika provstorlekarna PP08 och PP25 av samma bitumensort överlappar varandra. Detta tyder på att mätningarna är pålitliga då de två erhållna mätningresultaten från de olika provstorlekarna ska överlappa varandra vid samma temperatur.

Däremot åskådliggörs utifrån blackdiagrammen att mätningarna för det rena bituminet 70/100 är mer pålitliga då mätningarna i dessa fall i stora drag följer en relativt mjuk kurva. Mätningarna med de olika spindlarna, 25mm och 8mm, möter varandra väl för bitumen 70/100 till skillnad från Nypol 73 där punkterna från de kompletterande PP25 mätningarna generellt ligger mer utspridda i en oregelbundenhet och ej i synk med punkterna från PP08 mätningarna. För bitumen Nypol 73 visar diagrammen i Bilaga 6 på en brist på överlappning vid de låga temperaturerna med PP25, vilket kan förklaras med att egenskaperna ligger utanför geometrins och systemets mätförmåga. Blackdiagrammen visar därmed på att mätningen med PP25 på det polymermodifierade bituminet Nypol 73 kan vara problematisk vid tolkning av fasvinkeln.

Beteendet på kurvan för Nypol 73, i synnerhet för PP25 mätningarna, stödjer teorin för polymermodifierade bitumensorter där materialen kan uppvisa olika komplexa skjuvmodul vid samma fasvinkel. Orsaken till detta är att de tillsatser som finns i polymermodifierade bitumensorter har egna specifika smältpunkt som påverkar beteendet av prover (Yusoff, 2012).

Att diagrammet inte alltid ser perfekt ut i mätseriens ändpunkter är även beroende på mätningar i ytterkanten av geometrins mätförmåga. Enligt Tyllgren (2022) är det just en vanlig brist på överensstämmelse överlappningen mellan PP08 och PP25. För rent bitumen brukar resultaten stämma bra, vilket förklaras av den jämna skiftfaktorn, som tyder på att det finns en ekvivalens mellan temperatur och tid. En variabel skiftfaktor, som i fallet med polymermodifierat bitumen, brukar visa sig med kraftigt olika utseende, vilket är fallet för blackdiagrammen för Nypol 73.

Det som också illustreras och kan iakttas ur Blackdiagrammen är att mätningarna indikerar på att båda bitumensorterna är en newtonsk vätska, eftersom kurvorna för respektive bitumensort (PP08 kurvorna specifikt) har en tilltagande krökt form. För bitumen gäller enligt teori att den komplexa skjuvmodulen minskar med ökande fasvinkel, vilket innebär att materialet blir mer visköst. Utseende på kurvan för bitumen kännetecknas just av en parabelliknande form som går asymptotiskt mot fasvinkeln 90° , vilket illustreras i samtliga blackdiagram för PP08 mätningarna. Således visar kurvorna för PP08 mätningarna till skillnad från PP25 att PP08 fungerar bra även för polymermodifierad bitumen. För de kompletterande PP25 mätningarna gäller, i synnerhet med det polymermodifiserade bitumenet, att kurvorna inte är utformade på detta parabelliknande sätt (Yusoff, 2012).

Å andra sidan kan punkterna för PP25 mätningarna för Nypol 73 ses som en indikator på att bitumenet med dess polymermodifiering beter sig mindre och mindre som en newtonsk vätska. Den praktiska betydelsen av detta hade behövts undersökas närmare.

5.2 Metoddiskussion

5.2.1 Hantering av provkroppar

I studien värmdes de sex olika provkropparna upp till olika temperaturer för att erhålla en flytande form på bituminet då det blir mer lätthanterligt att arbeta vid applicering i silikonformarna. Detta kan leda till att respektive bitumensorts påverkan av uppvärmningen skiljer sig åt, vilken kan ha en inverkan på resultatet. Dock har detta tillvägagångssätt ansetts som det enda alternativet då temperaturen som krävdes för att uppnå flytande form var olika för de sex provburkarna då dessa har olika styvhet. Om alla provburkar skulle värmas till samma temperatur skulle det medföra problem vid blandningen och applicering av bitumen i silikonformarna.

Även om de olika uppvärmningstemperaturernas påverkan ej bör ignoreras helt och hållet, antas att påverkan är relativt liten. Förklaringen till detta är att det var relativt

stora mängder bitumen som värmdes upp, vilket medför att temperaturens påverkan bör bli mindre. Men för att minimera den påverkan som ändå sker, hölls tiden för uppvärmningen så kort som möjligt, nämligen 30 minuter.

I kapitel 2.7.1 nämns att bitumens egenskaper påverkas vid temperaturförändringar där det skapas spänningar i materialet vid inverkan av låga temperaturer till följd av förstyvning. Risken för förändring till följd av låga temperaturer är något att beakta då provkropparna i denna studie lades i en frys vid en temperatur på -15°C , dock endast under fem minuter. Men de temperaturerna som provkropparna förvarades i under större delen av tiden, i väntan på testkörning med DSR, var över fryspunkt, i temperaturer högre än 5°C . Dessutom gäller enligt Anderson et. al. (1994) att hastigheten på en temperatursänkning påverkar bitumens styvhet oberoende av vilken temperatur som sänkningen görs till. För att ta hänsyn till detta har alla provkroppar kylts på samma sätt och i samma kyl.

5.2.2 DSR

Apparaten DSR som användes i studiens metod beskrivs i andra publikationer som en känslig apparat när det kommer till applicering av provkropparna på spindlarna. Samtidigt gäller att kontakten mellan provkropp och spindeln har stor inverkan på om resultatet som erhålls från mätningen är användbart eller inte. Under mätningarna med Nypol 73 fick vissa mätningar göras om ett par gånger då resultatet inte var användbart på grund av att placeringen och kontakten mellan provkropp, spindel och platta inte var bra nog. Främst förekom svårigheter vid appliceringen av 25 mm provkropparna. Dock är det inte endast applicering av provkropparna som kan medföra dåliga resultat, utan även om appliceringen sker korrekt kan resultateten fortfarande vara missvisande, detta kan bero på om mätningarna är gjorda utanför LVE-området. Däremot antyder ingenting på att de resultaten som väl valts att redovisas i denna studie ska ha påverkats av det ovan nämnda.

Amplitudmallen som använts i denna studie är samma som använts i tidigare undersökningar från början. Amplitudmallen kommer från Nynas och har fungerat väl för de diverse bitumensorter samt för asfaltbruk, i 10 år utan att resultaten pekar på att man skulle ha passerat LVE-området i något enda fall (Tyllgren, 2022).

5.2.3 BBR

BBR är en arbetskrävande metod som emellertid har ett försteg i att ha tillämpats och stämts av mot verkligheten under en lång följd av år, vilket kan fördröja en möjlig övergång till DSR. I fallet med polymermodifierade bitumensorter brukar den kompletteras med DTT, Direct Tensile Testing. Det ska enligt förespråkarna för det förfarandet ge en mer rättvisande bild av PMB:s lågtemperaturegenskaper. Det motiverar ytterligare en övergång till ett enklare alternativ som DSR, förutsatt att den även fungerar i bedömningen av PMB.

5.3 Slutsatser

Studien visar att DSR kan ersätta BBR i bedömningen av lågtemperaturegenskaper hos bitumen då det hittades goda korrektionssamband för både S(60) och m(60). Särskilt väl stämmer S(60). Värdena för m(60) rör sig i rätt riktning jämfört med S(60) medan nivåerna skiljer sig mellan 70/100 och den undersökta PMB-sorten Nypol 73, där korrelationen mellan BBR och DSR är aningen starkare för 70/100. Då korrelationen mellan S(60) och m(60) är olika kan det inte bedömas vilken av metoderna BBR och DSR som visar rätt eller mäter ”bäst” förrän mätningarna upprepas med olika bitumensorter och sedan studerar samma bitumen i verkligheten.

Åldringen med RTFOT respektive RTFOT+PAV visade på en stegvis logisk förändring med DSR för båda bitumensorterna, både för S(60) och m(60), vilket styrker metodens känslighet för förändringar och repeterbarhet.

5.4 Rekommendationer till fortsatta studier

Försöken behöver upprepas med andra bitumensorter och med andra aktörer. Prover från verkligheten med bitumen från asfaltbeläggningar i olika stadier av nedbrytning samlas in och undersöks i ringanalyser. Särskilt inhämtas prover från väl fungerande asfaltbeläggningar som visat prov på lång hållbarhet men till slut kommit till sitt slutstadium.

Parallellt med detta provas asfaltbruk på samma sätt som bitumen och olika fillertypers och mängders betydelse.

En ytterligare rekommendation skulle vara att undersöka korrelationen mellan DTT och DSR för PMB i syfte att se hur DSR förhåller sig till DTT vid bedömning av PMB.

6 Referenser

Agardh, S. & Parhamifar, E., 2012. Kompendium i Vägbyggnad.

Ahmad, T., & Khawaja, H. (2018). Review of low-temperature crack (LTC) Developments in asphalt Pavements.

Anderson, D. A., Christensen, D. W., Bahia, H. U., Dongre, R., Sharma, M. G., Antle, C. E., & Button, J. (1994). Binder characterization and evaluation, volume 3: Physical characterization. Strategic Highway Research Program, National Research Council, Report No. SHRP-A-369

Airey, G. D. (1997). Rheological Characteristics of Polymer Modified and Aged Bitumens,: The University of Nottingham.

Airey, G.D. (2002) "Rheological evalutaion of ethylene vinyl acetate polymer modified bitumens" *Construction and Building Materials*, 16 (8) s. 473-487.

Anderson, R.M., King, G.N., Hanson, D I., & Blankenship, P. B. (2011). Evaluation of the relationship between asphalt binder properties and non-load related cracking. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 80

Asfaltboken (u.å). 3 Vägens uppbyggnad. <https://asfaltboken.se/vagens-uppbyggnad/>

Asfaltskolan (2020). *Asfaltteknik*. [Asfaltteknik | Asfaltskolan.se](https://asfaltteknik.asfaltskolan.se/) [2022-02-16]

Aurell, O. (2018). *Undersökning av asfaltbruk med olika fillersorter - Reologiska egenskaper testade med DSR*. Masteruppsats. Lunds tekniska högskola. Lund: LTH, avd. Trafik och väg. Institutionen för Teknik och Samhälle.

Baglieri, O., Dalmazzo, D., Barazia, M., Tabatabaee, H. & Bahia, H.U. (2012). Influence of Physical Hardening on the Low-Temperature Properties of Bitumen and Asphalt Mixtures. *Department of Environmental, Land and Infrastructure Engineering*, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877042812043637>

Bahia, H.U., Anderson, D.A., & Christensen, D.W. (1992). The bending beam rheometer; A simple device for measuring low-temperature rheology of asphalt binders. Association of Asphalt Paving Technologists (AAPT), 117-153.

Bahia, H.U., & Anderson, D.A. (1995). "The development of the Bending Beam Rheometer; Basics and critical Evaluation of the Rheometer". Physical Properties of

Asphalt Cement Binders: ASTM STP 1241, John C. Hardin, Ed., American society for Testing and Materials, Philadelphia.

Baklökk, Leif, Randi Skoglund, Björn Kalman & Petri Peltonen (2002). "Superpave test methods for asphalt - Procedure for DSR testing". I: Nordtest Report 1.

Brodnyan, J. G., Gaskins, F. H., Philippoff, W., & Thelen, E. (1960). The rheology of asphalt. III. Dynamic mechanical properties of asphalt. Transactions of the Society of Rheology, 4(1), 279-296.

Brookfield Engineering. (2017). (Elektronisk) Tillgänglig: More Solutions to Sticky Problems 05-1.pdf (findtheneedle.co.uk)

Cannone Falchetto, I. Turos, M.O. Marasteanu. (2012). Investigation on asphalt binder strength at low temperatures, Road Mater. Pavement Des. 13 (4) 804–816.

Chen, J. S., Kuo, P. H., Lin, P. S., Huang, C. C., & Lin, K. Y. (2008). Experimental and theoretical characterization of the engineering behavior of bitumen mixed with mineral filler. Materials and structures, 41(6), 1015-1024.

Riccardi, C., Falchetto Cannone, F., Wang, D., & Wistuba, M.P. (2017). *Effect of cooling medium on low-temperature properties of asphalt binder*, Road Mater. Pavement Des. 18 (sup4) 234–255.

Edwards, Y. (2005). *Influence of Waxes on Bitumen and Asphalt Concrete Mixture Performance*. Diss. Stockholm: Kungliga Tekniska Högskolan. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:14419/FULLTEXT01.pdf>

Energihandboken (u.å). *Viskositet*. <http://www.energihandbok.se/viskositet/>

Eriksson, E & Zia, D (2019). "Undersökning av asfaltbruk modifierat med polymerer och fibrer". Examensarbete. Lunds Tekniska Högskola. Lund: LTH, avd. Trafik och väg. Institutionen för Teknik och Samhälle.

Eurobitume (2021). *Testing*. Tillgänglig: <https://www.eurobitume.eu/technical/testing/>

Farrar, M., Sui, C., Salmans, S., & Qin, Q. (2015). Determining the Low-Temperature Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR). Western Research Institute.

Federal Highway Administration (2011). "The Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Procedure". (Elektronisk) Tillgänglig: THE MULTIPLE STRESS CREEP RECOVERY (MSCR) PROCEDURE (dot.gov)

Glover, C.J., Davison, R.R., Domke, C.H., Ruan, Y., Juristyarini, P., Knorr, D.B., & Jung, S.H. (2005). Development of a new method for assessing asphalt binder durability with field validation. Texas Dept Transport, 1872.

Granhage, L (2009). Kompendium i vägbyggnad. Chalmers Tekniska Högskola. Göteborg

Hadzikadunic, A & Al-Sultani, H (2020). "Metodik för utmattning av asfaltbruk". Examensarbete. Lunds Tekniska Högskola. Lund: LTH, avd. Trafik och väg. Institutionen för Teknik och Samhälle.

Harrigan, E. L. R. & Y. J. (1994). The SUPERPAVE Mix Design System Manual of Specifications, Test Methods and Practices.

Hesami, E., Birgisson, B., Kringos, N. (2014). "Numerical and experimental evaluation of the influence of the filler-bitumen interface in mastics". Materials and structures. 1325:1337. (Elektronisk) Tillgänglig: [Numerical and experimental evaluation of the influence of the filler-bitumen interface in mastics | SpringerLink](#)

Hunter, R.N., Self A. & Read, J. (2015) The Shell Bitumen Handbook, Sixth edition. London: ICE Publishing

Håkansson, A. & Härstedt, M. (2015) Reologiska egenskaper för bitumen och asfaltbruk - Inblandning av returafalt samt framtagande av mätmetod DSR. M.Sc-Thesis. Lunds tekniska högskola. Lund: LTH, avd. Trafik och väg. Institutionen för Teknik och Samhälle.

Höbeda, P. & Bern, R., (u.å). 4 Stenmaterial. 4 [Stenmaterial - Asfaltboken](#) [2022-02-16]

Imeri, L. & Maka, N. (2021). *Lignin i bindemedel för hållbara asfaltbeläggning-Reologiska undersökningar*. Masteruppsats. Lunds tekniska högskola. Lund: LTH, avd. Trafik och väg. Institutionen för Teknik och Samhälle.

Jones, G. & David, I. (2001). Handbok of viscoelastic vibration damping :John Wiley & Sons, LTD.

Kandhal, P. S. (1977) Low-temperature Properties of Bituminous Materials and Compacted Bituminous Paving Mixtures, ASTM STP 628, C. R. Marek, Ed., ASTM International, Philadelphia, PA.

Koenders, B. (2015) "Routine testing and mechanical properties of bitumens". The Shell Bitumen Handbook, Sixth edition. London: ICE Publishing.

Liao, M.C., Chen, J.S. & Airey, G. (2013a). Characterization of Viscoelastic Properties of BitumenFiller Mastics. Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol.9, 2013

- Liao, M. C., Airey, G., & Chen, J. S. (2013b). Mechanical properties of filler-asphalt mastics. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 6(5), 576-581.
- Liao, M, C., Chen, J, C., Tsou, K, W. (2012). Fatigue Characteristics of Bitumen-Filler Mastics and Asphalt Mixtures. *American Society of Civil Engineers*. 24(7): 916-923. (Elektronisk) Tillgänglig: [Fatigue Characteristics of Bitumen-Filler Mastics and Asphalt Mixtures | Journal of Materials in Civil Engineering | Vol 24, No 7 \(ascelibrary.org\)](#)
- Liu, S., Qi, X. & Shan, S. (2021). Effect of molecular structure on low-temperature properties of bitumen based on molecular dynamics, *School of Transportation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, Heilongjiang, China*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061821037612>
- Lundström, R (2001). Utmattning av asfalt. Kungliga Tekniska Högskolan. Stockholm. ISSN 1104-7437.
- Mahboud, K.C. (2004) An Introduction to Superpave, Huang, Y.H (red), *Pavement Analysis and Design*, second editio, 682-692. New Jersey: Pearson Education, Inc.
- Malcolm, L. Williams, R, F. Land & Johan D. Ferry (1955) "The Temperature Dependence of Relaxation Mechanisms in Amorphous Polymers and other Glass-forming Liquids". *University of WisconsinMadison. USA*. 77. 14. S.3701-3707.
- Mezger, T. G. (2014). *The Rheology Handbook*, fourth edition. Hanover: Vincentz Network
- Micaelo, R., Guerra, A., Quaresma, L., & Cidade, M. T. (2017). Study of the effect of filler on the fatigue behaviour of bitumen-filler mastics under DSR testing. *Construction and Building Materials*, 155, 228-238
- Mukandila, E. M., Loots, H. & Dlamini, P. (2015). Principle of Dynamic Shear Rheometer Testing of Non-Standard Samples for Cohesion and Adhesion of Bituminous Road Seal Materials. (Elektronisk) Tillgänglig: [Principle of Dynamic Shear Rheometer testing of non-standard samples for cohesion and adhesion of bituminous road seal materials \(researchgate.net\)](#)
- Nynas AB (2021). *Though demands on durability*. <https://www.nynas.com/en/bitumenmatters/projects/tough-demands-on-durability/> [2022-02-22]
- Paar, A. (2022a). "Basics of rheology". (Elektronisk) Tillgänglig: [Basics of rheology :: Anton Paar Wiki \(anton-paar.com\)](#)
- Paar, A. (2022b). "Viscosity and Viscometry". (Elektronisk) Tillgänglig: [Basics of viscometry :: Anton Paar Wiki \(anton-paar.com\)](#)

Paar, A. (2022c). "Amplitude sweeps". (Elektronisk) Tillgänglig: Amplitude sweeps :: Anton Paar Wiki (anton-paar.com)

Paar, A. (2022d). "Frequency sweeps". (Elektronisk) Tillgänglig: Frequency sweeps :: Anton Paar Wiki (anton-paar.com)

P. Michalica, I.B. Kazatchkov, J. Stastna, L. Zanzotto. (2008). Relationship between chemical and rheological properties of two asphalts of different origins, Fuel 87 (15-16), 3247–3253. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236108002111>

Potucek, J & Granlund, J (2015). 2 Vägarnas roll i samhället: 2 Vägarnas roll i samhället - Asfaltboken [2022-02-16]

RAHA GROUP (2016). Bitumen Penetration Grade 70/100. <https://rahaoil.com/bitumen-penetration-grade-70-100/> [2022-04-13].

Read, J., & Whiteoak, D. (2003). *The Shell Bitumen Handbook*, Fifth edition. London: Thomas Telford Publishing.

Redelius, P (u.å). "Asfaltboken: Bindemedel". Asfaltskolan (Elektronisk) Tillgänglig: 5 Bindemedel - Asfaltboken [2022-02-16]

Rowe, G.M., King, G. & Anderson, M. (2014) The Influence of Binder Rheology in the Cracking of Asphalt Mixes in Airport and Highway Projects, Journal of Testing and Evaluation, 42(5), 1063- 1072.

Self, A (2015). "Introduction". The shell bitumen handbook, sixth edition. London: ICE Publishing. S. 1- 13

Soenen, H., & Teugels, W. (1999). Rheological investigation on binder-filler interactions. In Eurobitume Workshop (Vol. 1999).

Subramanian, R. S. (2002). "Non-Newtonian Flows". Department of Chemical and Biomolecular Engineering Clarkson University. S. 1

Sulejmani, P. (2022). Handedare. Muntlig källa (referens) under arbetets gång.

Sultana, S., & Bhasin, A. (2014). Effect of chemical composition on rheology and mechanical properties of asphalt binder. Construction and Building Materials, 72, 293–300.

Svenskt VägCentrum (2021). *UNDERSÖKNING AV LÅGTEMPERATUREGENSKAPER HOS BITUMEN FÖR ASFALTBELÄGGNINGAR MED DYNAMISK SKJUVREOMETER, DSR*. pm210929a DSR vs BBR Projektplan.pdf

Tan, Y. & Guo, M. (2014). "Interfacial thickness and interaction between asphalt and mineral fillers". I: *Materials and Structures* 47, s. 605–614.

Taylor, R & Airey, T (2015). "Rheology of bitumens". *The Shell Bitumen Handbook* sixth edition. London: ICE Publishing.

Trafikverket (2016). *Vägars och gators utformning – Utformningsprocess*. Borlänge: Trafikverket. [VGU-guide Utformningsprocess \(ineko.se\)](#)

Tyllgren, P. (2022). Experthandledare. Muntlig källa (referens) under arbetets gång.

T. Wang, J. Wang, X. Hou, F. Xiao. (2019). *Effects of SARA fractions on low temperature properties of asphalt binders*, *Road Mater. Pavement* 22 (3), 539–556. [file:///C:/Users/Lenovo/Downloads/EffectsofSARAFractionsonlowtemperaturepropertiesofasphaltbinders.pdf](#)

Wang, D., Falchetto Cannone, A., Riccardi, C., Poulikakos, L., Hofko, B., Porot, L. Wistuba, P. L., Baaj, H., Mikhailenko, P., & Moon, K. H. (2019). *Investigation on the combined effect of aging temperatures and cooling medium on rheological properties of asphalt binder based on DSR and BBR*, *Road Mater. Pavement Des.* 20 (sup1), 409–433.

Wang, D., Falchetto, A.C., Riccardi, C. & Wistuba, M. (2020). *Investigation on the low temperature properties of asphalt binder: Glass transition temperature and modulus shift factor*, Department of Civil & Environmental Engineering. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061820303561>

Wågberg, L-G (2013). *7 Val av beläggning*. <https://asfaltboken.se/val-av-belaggningsforfattare> [2022-02-17]

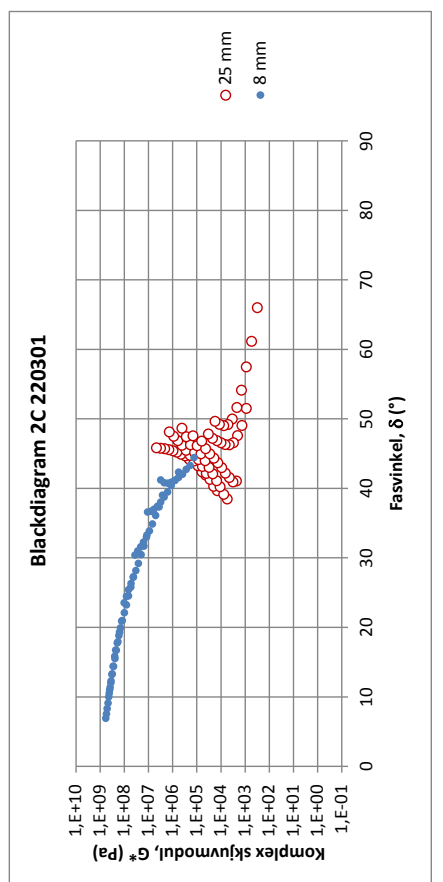
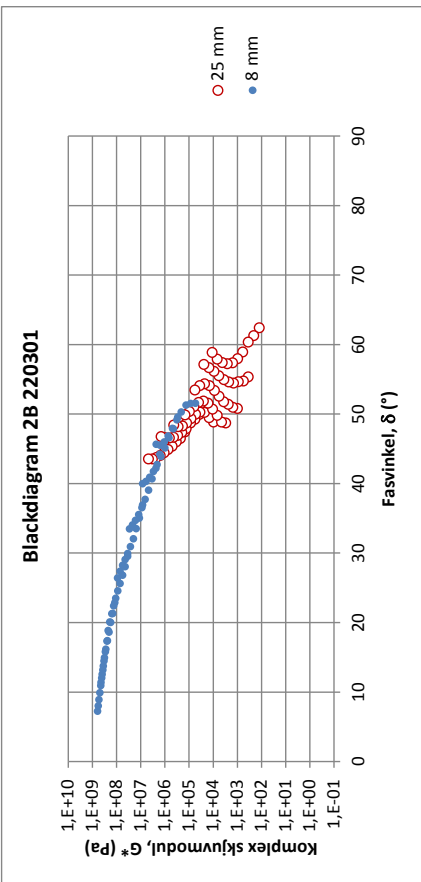
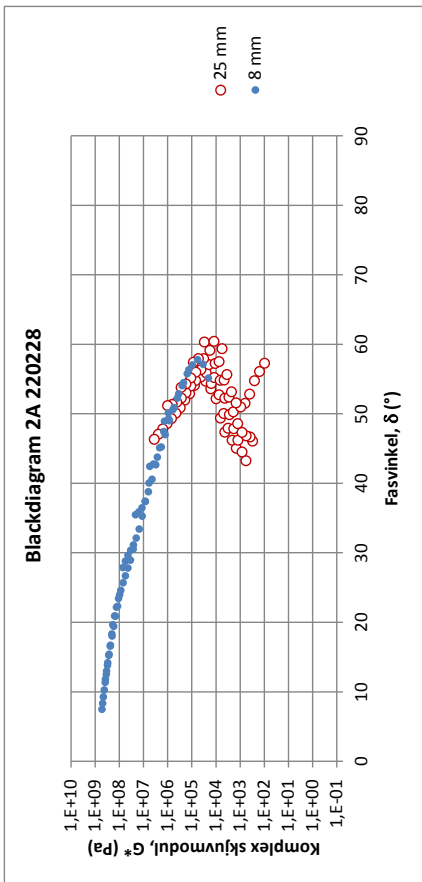
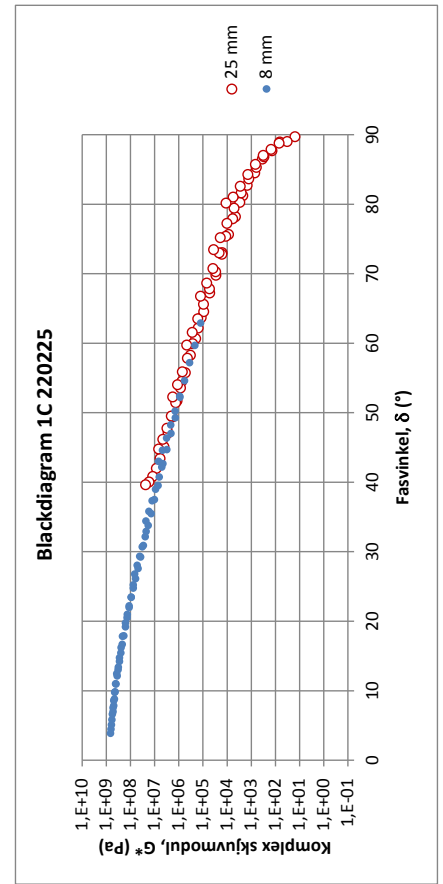
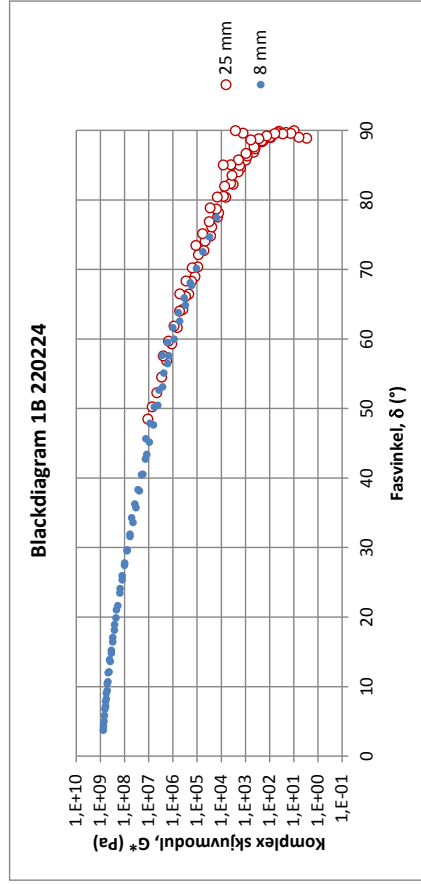
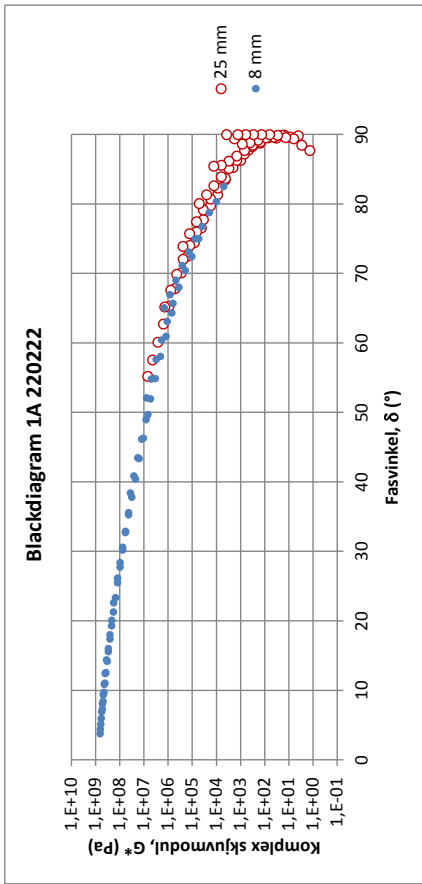
Yee P., Aida B., Hesp S., Marks P. & Tam K. (2006). *Analysis of premature low-temperature cracking in three Ontario, Canada, pavements*. *Transportation Research Record*, 1962, 2006, 44–51.

Yusoff, N. I. M. (2012). *Modelling the Linear Viscoelastic Rheological Properties of Bituminous Binders*: University of Nottingham

7 Bilagor

- Bilaga 1 Mätresultat från svepmätningar med DSR
- Bilaga 2 Blackdiagram över svepmätningar med DSR
- Bilaga 3 T-hög vid olika J_{nr3200} från MSCR-mätningar med DSR
- Bilaga 4 Prestandagraderingar, T-hög/MSCR och duktilitet med DSR
- Bilaga 5 T-låg från BBR-mätningar utförda av NYNAS AB.
- Bilaga 6 Tabell över S(60) och m(60) från mätningar med BBR och LTHs DSR.
- Bilaga 7 – Sammanställning över de framtagna parametrarna t-hög ur frekvenssvep vid riktvärden 1 kPa och 2,2 kPa, t-hög ur MSCR, t-mellan, t-låg vid S(60) och m(60) från DSR och BBR, duktilitet och mjukpunkt.

Bilaga 2 Blackdiagram över svepmätningar med DSR



Bilaga 3 T-hög vid olika J_{nr3200} från MSCR-mätningar med DSR

1A, 220223	
J_{nr3200} , kPa ⁻¹	$t_{högr}$, °C
4	56,7
2	52,4
1	48,1
0,5	43,9

1B, 220224	
J_{nr3200} , kPa ⁻¹	$t_{högr}$, °C
4	61,8
2	57,9
1	54,0
0,5	50,1

1C, 220228	
J_{nr3200} , kPa ⁻¹	$t_{högr}$, °C
4	74,9
2	70,9
1	67,0
0,5	63,0

2A, 2200303	
J_{nr3200} , kPa ⁻¹	$t_{högr}$, °C
4	78,8
2	76,5
1	74,1
0,5	71,7

2B, 220305	
J_{nr3200} , kPa ⁻¹	$t_{högr}$, °C
4	81,8
2	79,1
1	76,4
0,5	73,7

2C, 220303	
J_{nr3200} , kPa ⁻¹	$t_{högr}$, °C
4	90,2
2	86,9
1	83,6
0,5	80,2

Bilaga 4 Prestandagraderingar, T-hög/MSCR och duktilitet med DSR

Prestandagradering av prov 1A 220222							
t-hög		t-mellan	t-låg		t-hög MSCR	Duktilitet	Mjpkt
$G^*/(\sin(\delta))$		$G^*(\sin(\delta))$	$S(60)=300 \text{ MPa}$	$m(60)=0,300$	$J_{nr3200} = 4 \text{ kPa}^{-1}$	cm	°C
			$G(t)=G^*\cos(\delta)=100 \text{ MPa}$	$\log G(\log(t))'=0,30$			
62,9	57,2	13,6	-20,2	-20,7	56,7	56,7	46,6

Prestandagradering av prov 1B 220224							
t-hög		t-mellan	t-låg		t-hög MSCR	Duktilitet	Mjpkt
$G^*/(\sin(\delta))$		$G^*(\sin(\delta))$	$S(60)=300 \text{ MPa}$	$m(60)=0,300$	$J_{nr3200} = 4 \text{ kPa}^{-1}$	cm	°C
			$G(t)=G^*\cos(\delta)=100 \text{ MPa}$	$\log G(\log(t))'=0,30$			
69,5	63,7	16,8	-18,5	-18,9	61,8	22,9	52,8

Prestandagradering av prov 1C 220225							
t-hög		t-mellan	t-låg		t-hög MSCR	Duktilitet	Mjpkt
$G^*/(\sin(\delta))$		$G^*(\sin(\delta))$	$S(60)=300 \text{ MPa}$	$m(60)=0,300$	$J_{nr3200} = 4 \text{ kPa}^{-1}$	cm	°C
			$G(t)=G^*\cos(\delta)=100 \text{ MPa}$	$\log G(\log(t))'=0,30$			
82,3	76,3	21,0	-17,5	-13,2	74,9	5,7	65,5

Prestandagradering av prov 2A 220228							
t-hög		t-mellan	t-låg		t-hög MSCR	Duktilitet	Mjpkt
$G^*/(\sin(\delta))$		$G^*(\sin(\delta))$	$S(60)=300 \text{ MPa}$	$m(60)=0,300$	$J_{nr3200} = 4 \text{ kPa}^{-1}$	cm	°C
			$G(t)=G^*\cos(\delta)=100 \text{ MPa}$	$\log G(\log(t))'=0,30$			
-*	-*	10,6	-25,0	-21,0	78,8	12,8	69,1

* relevant fasvinkel saknas

Prestandagradering av prov 2B 220301							
t-hög		t-mellan	t-låg		t-hög MSCR	Duktilitet	Mjpkt
$G^*/(\sin(\delta))$		$G^*(\sin(\delta))$	$S(60)=300 \text{ MPa}$	$m(60)=0,300$	$J_{nr3200} = 4 \text{ kPa}^{-1}$	cm	°C
			$G(t)=G^*\cos(\delta)=100 \text{ MPa}$	$\log G(\log(t))'=0,30$			
-*	-*	13,1	-23,4	-19,8	81,8	7,5	74,2

* relevant fasvinkel saknas

Prestandagradering av prov 2C 220301							
t-hög		t-mellan	t-låg		t-hög MSCR	Duktilitet	Mjpkt
$G^*/(\sin(\delta))$		$G^*(\sin(\delta))$	$S(60)=300 \text{ MPa}$	$m(60)=0,300$	$J_{nr3200} = 4 \text{ kPa}^{-1}$	cm	°C
			$G(t)=G^*\cos(\delta)=100 \text{ MPa}$	$\log G(\log(t))'=0,30$			
-*	-*	14,7	-22,6	-17,1	90,2	4,4	84,4

* relevant fasvinkel saknas

Bilaga 5 T-låg från BBR-mätningar utförda av NYNAS AB

BBR Results from samples send to Lund University

Metod: EN 14771:2012

Sample ID : 606802 Nynas 70/100
RTFOT+PAV

Temperature : -10

-20

-30

Media solution
in the BBR
instrumentEthanolEthanolEthanol

Plate	Measured Stiffness (Mpa)	m-value
1	111	0,347
2	114	0,343
3	108	0,34
Mean	111	0,343

Measured Stiffness (Mpa)	m-value
397	0,262
412	0,27
410	0,263
406	0,265

Measured Stiffness (Mpa)	m-value
969	0,172
1001	0,174
1000	0,168
990	0,171

Sample ID : 606803 Nypol 73
RTFOT+PAV

Temperature : -10

-20

-30

Media solution
in the BBR
instrumentEthanolEthanolEthanol

Plate	Measured Stiffness (Mpa)	m-value
1	119	0,305
2	90,5	0,308
3	93,1	0,302
Mean	101	0,305

Measured Stiffness (Mpa)	m-value
376	0,23
254	0,253
162	0,293
264	0,259

Measured Stiffness (Mpa)	m-value
732	0,172
745	0,178
813	0,156
763	0,169

Nynas				
Beräkningar av t-låg °C med interpolering				
Temp. °C	70/100		Nypol 73	
	S(60) MPa	m-värde	S(60) MPa	m-värde
-10	111	0,343	101	0,305
-20	406	0,265	264	0,259
-30	990	0,171	763	0,169
t-låg*	-17,66	-15,53	-21,33	-11,08

*Tc = t-låg - 10 °C

Bilaga 6 Tabell över S(60) och m(60) från mätningar med BBR och LTHs DSR

		BBR		DSR	
	°C	S(60)	mc (60)	S(60)	mr (60)
70/100	-10	111,0	-0,343	37,0	-0,339
	-20	406,0	-0,265	131,0	-0,225
	-30	990,0	-0,171	326,0	-0,138
Nypol 73	-10	101,0	-0,305	18,4	-0,363
	-20	264,0	-0,259	73,7	-0,270
	-30	763,0	-0,169	215,0	-0,179

Bilaga 7 Sammanställning över de framtagna parametrarna t-hög, t-mellan, t-låg vid S(60) och m(60) från DSR och BBR, duktilitet och mjukpunkt.

		70/100			Nypol 73		
		Orig.	RTFOT	+PAV	Orig.	RTFOT	+PAV
t-hög, °C	1000 Pa	62,9	69,5	82,3	-	-	-
	2200 Pa	57,2	63,7	76,3	-	-	-
MSCR, °C	4 kPa ⁻¹	56,7	61,8	74,9	78,8	81,8	90,2
	2 kPa ⁻¹	52,4	57,9	70,9	76,5	79,1	86,9
	1 kPa ⁻¹	48,1	54,0	67,0	74,1	76,4	83,6
	0,5 kPa ⁻¹	43,9	50,1	63,0	71,7	73,7	80,2
t-mellan, °C	5 MPa	13,6	16,8	21,1	10,6	13,1	14,7
t-låg, °C *	S(60)	-20,1	-18,5	-17,4	-23,7	-22,2	-21,2
	m-värde	-22,4	-21,0	-15,3	-17,3	-15,4	-11,8
BBR	S(60)			-17,7			-21,3
	m-värde			-15,5			-11,1
Duktilitet	cm	58,2	23,1	5,7	12,8	7,5	5,0
Mjukpunkt	°C	46,6	52,8	65,5	69,1	74,2	84,4
Begrepp och definitioner		T-high			↔	t-hög	
för prestandagradering		T-Intermediate*			↔	t-mellan	
enl. Superpave:		T-low			↔	t-låg - 10 °C	

: Bedömning enligt Superpave

* Medelvärde för T-high/T-low + 4 °C