

Jämförelse av fossila bindemedel och biobindemedel med tallbecksolja

Karolina Almlöf

Isa Ehrengren

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



Copyright © Karolina Almlöf, Isa Ehrengren

LTH, Institutionen för Teknik och samhälle
CODEN: LUTVDG/(TVTT-5385)/1-71/2026
ISSN 1653-1922

Tryckt i Sverige av Media-Tryck, Lunds universitet
Lund 2026

Author(s): Karolina Almlöf
Isa Ehrengren

Title: Jämförelse av fossila bindemedel och biobindemedel med tallbecksolja – Undersökningar med DSR

English title: Comparison of fossil-based binders and bio-based binders with tall oil pitch – Investigations using DSR

Language: Svenska

Year: 2026

Keywords: DSR; Bitumen; Tallbecksolja; Biobindemedel; Reologi

Citation: Almlöf, K. & Ehrengren, I., Jämförelse av fossila bindemedel med biobindemedel med tallbecksolja – Undersökningar med DSR. Lund, Lunds universitet, LTH, Institutionen för Teknik och samhälle. Trafik och väg 2026. Thesis. 418

Abstract:

The road construction industry is associated with high energy consumption and significant greenhouse gas emissions due to the extensive use of petroleum-based bitumen. To support a more sustainable society, bio-based alternatives such as tall oil pitch (TOP), a by-product from the pulp industry, have gained increasing interest as partial substitutes for conventional bitumen. However, the long-term performance and rheological properties of these materials are not yet fully understood. The aim of this study was to determine the TOP content required in 50/70 bitumen to resemble the properties of conventional 70/100 and 160/220 bitumen. Dynamic Shear Rheometer (DSR) testing and Ring & Ball softening point measurements were used to evaluate the rheological behaviour and temperature sensitivity of the binders. Mastercurves and deviation analyses were also performed to compare the bio-binders with conventional bitumen over wide range of temperatures and loading frequencies. The results showed that the bio-binders exhibited rheological properties like those of the corresponding conventional bitumen. Aging was evaluated using the Rolling Thin Film Oven Test (RTFOT), which enabled analysis of rutting and fatigue-related properties. The bio-binders demonstrated slightly improved rutting resistance, while fatigue resistance showed some variation. Overall, the study indicates that TOP-based bio-binders can provide rheological performance comparable to conventional bitumen while offering potential environmental benefits.

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

Innehåll

Förord	1
Sammanfattning	2
Summary	3
1 Inledning	4
1.1 Bakgrund	4
1.2 Syfte och frågeställningar	5
1.3 Metodbeskrivning	5
1.4 Avgränsning	5
2 Litteraturstudie	7
2.1 Klimatproblem och miljöfrågor	7
2.2 Bitumen	8
2.2.1 Uppbyggnad	9
2.2.2 Kvalitet	10
2.2.3 Åldring	11
2.3 Tallbecksolja	12
2.3.1 TOP som bindemedel	12
2.3.2 Klimatpåverkan	13
2.4 Returasfalt	14
2.4.1 Upptagning och hantering av returasfalt	14
2.4.2 Halvvarm asfaltsteknik kombinerat med returasfalt	14
2.4.3 Återvinning i verk – parallelltrumma	14
2.5 Reologi	15
2.5.1 Viskositet	15
2.5.2 Elasticitet	16
2.5.3 Viskoelasticitet	16
2.6 Dynamisk skjuvreometer	16
2.6.1 Oscillation	16
2.6.2 Skjuvspänning, skjuvhastighet och skjuvtöjning	17
2.6.3 Komplex skjuvmodul	18
2.6.4 Fasvinkel	18

2.7	Masterkurvor	19
2.7.1	Williams-Landel-Ferry ekvationen	20
2.7.2	Sigmoidalmodellen	20
2.8	Blackdiagram	21
2.9	Spårbildning	21
2.10	Utmattning	22
2.11	Biobindemedel med TOP	22
3	Metod	24
3.1	Material och provserier	24
3.2	Inledande tester	24
3.2.1	Materialblandning	25
3.2.2	Kula & Ring metoden	25
3.2.3	DSR	27
3.3	Ny blandning	29
3.3.1	Rolling Thin Film Oven Test	29
4	Resultat	31
4.1	Val av mängd TOP	31
4.1.1	Mjukpunkt	31
4.1.2	Komplex skjuvmodul	31
4.2	Kula & Ring	32
4.3	Masterkurvor	33
4.3.1	Komplex skjuvmodul	33
4.3.2	Fasvinkel	36
4.3.3	Återvunnet biobindemedel	39
4.4	Spårbildning	42
4.5	Utmattning	45
5	Diskussion och slutsatser	49
5.1	Resultatdiskussion	49
5.1.1	Mjukpunkt	49
5.1.2	Val av halt TOP	50
5.1.3	Masterkurvor	50
5.1.4	Spårbildning/ Utmattning	51
5.1.5	Återvunnet biobindemedel	52
5.2	Metoddiskussion	52

5.3	Slutsatser	54
5.4	Rekommendationer till fortsatta studier	54
6	Referenser	55
7	Bilaga / bilagor	59

Förord

Detta examensarbete har genomförts som en avslutande del på Civilingenjörsprogrammet i Väg- och Vattenbyggnad vid Lunds Tekniska Högskola. Studien undersöker hur tallbecksolja kan användas som en biobaserad tillsats i bitumen. Studien är skriven av Karolina Almlöf och Isa Ehrengren under vårterminen 2026 på institutionen för Teknik och Samhälle, avdelning Trafik och väg, i samarbete med Skanska Sverige.

Vi vill inledningsvis rikta ett stort tack till våra handledare vid Lunds Tekniska Högskola, Maya Sheidaei och Pajtim Sulejmani, för deras stöd och engagemang under arbetets gång. Ett särskilt tack till Maya för hjälp med laborationer, instruktioner för DSR och provmätningar. Tack till Pajtim för stöd i rapportskrivning och för värdefulla synpunkter.

Vi vill också tacka Skanska Industrial Solutions Syd för det varma mottagandet och för att ha bidragit med både material och värdefull teoretisk kunskap.

Ett särskilt tack riktas till våra handledare Annhelen Tångemar och Johan Tettenborn för deras stöd, vägledning och hjälp att skapa viktiga kontakter.

Tack till Kenneth Olsson och Richard Nilsson för deras hjälp med frågor och resultat kopplade till DSR-analyser.

Tack till Madelaine Matsson på laboratoriet i Gunnilse för hjälpen med RTFOT-provning.

Vi vill även tacka Skanska för deras inspirerade klimatresa och satsningen Asfalt Zero, som väckte vårt intresse för att undersöka ett miljövänligt alternativ inom asfaltsproduktion.

Examensarbetet har varit både lärorikt och utvecklande och har gett oss en fördjupad förståelse för bindemedels egenskaper samt hur tillsats av tallbecksolja påverkar bitumen.

Lund, Maj 2026

Karolina Almlöf och Isa Ehrengren

Sammanfattning

För att uppnå ett hållbart samhälle krävs utveckling av klimatsmarta alternativ till traditionella vägmaterial. Asfaltsproduktionen är förknippad med hög energiförbrukning och omfattande användning av råvaror, där bitumen utgör det vanligaste bindemedlet. Bitumen är en icke-förnybar restprodukt från petroleumindustrin och bidrar till betydande utsläpp av växthusgaser. Utifrån denna bakgrund har intresset ökat för biobaserade alternativ som kan minska klimatpåverkan från vägbyggnadsindustrin.

Ett sådant alternativ är tallbecksolja (TOP), en biprodukt från pappersmassaindustrin. TOP har börjat användas som substitut för bitumen, men dess egenskaper och långsiktiga prestanda är ännu inte fullt klarlagda. Trots att produkten har potential att minska utsläppen, är det viktigt att säkerställa att den uppfyller de tekniska krav som ställs på bindemedel i asfalt, särskilt avseende motstånd mot sprickbildning och deformation. Materialen har olika kemiska sammansättningar vilket påverkar de reologiska egenskaperna.

Syftet med studien är att undersöka vilken halt av TOP som behövs tillsättas i bitumen 50/70 för att efterlikna egenskaperna hos konventionell bitumen med penetrationsgraderna 70/100 respektive 160/220. För att uppnå detta har två huvudsakliga metoder använts. Dels har dynamisk skjuvreometer (DSR) använts för att analysera de reologiska egenskaperna, med fokus på komplex skjuvmodul och fasvinkel. Dels har Kula & Ring metoden använts för att bestämma bindemedlens mjukpunkt och därigenom deras temperaturkänslighet.

Utifrån resultaten från dessa tester identifierades en optimal halt av TOP, som därefter blandades in i bitumen 50/70 för att efterlikna egenskaperna hos referensbitumen 70/100 respektive 160/220. De framtagna biobindemedlen jämfördes sedan med motsvarande konventionella bitumen avseende både mjukpunkt och reologiska egenskaper. För att beskriva materialens beteende över ett brett spektrum av temperaturer och belastningsfrekvenser konstruerades masterkurvor samt analyser av avvikelser mellan materialen.

Resultaten visar att biobindemedlen uppvisar ett beteende som i stor utsträckning liknar de egenskaper som traditionell bitumen har. För att vidare utvärdera bindemedlens långsiktiga egenskaper genomfördes åldring med hjälp av Rolling Thin Film Oven Test (RTFOT). Detta möjliggjorde analys av parametrar kopplade till spårbildning och utmattning, vilket är avgörande för asfaltens livslängd. Biobindemedlet uppvisade något bättre motstånd mot spårbildning men motståndet mot utmattning visade variation.

Sammanfattningsvis visar studien att TOP har potential att användas som biobaserat tillsatsmedel i bitumen för att framställa bindemedel med egenskaper liknande ett mjukare bitumen. Resultaten visar dock att effekten är komplex och starkt beroende av materialens sammansättning.

Summary

To achieve a sustainable society, the development of climate-smart alternatives to traditional road materials is required. Asphalt production is associated with high energy consumption and extensive use of raw materials, where bitumen is the most used binder. Bitumen is a non-renewable by-product of the petroleum industry and contributes significantly to greenhouse gas emissions. Against this background, interest has increased in bio-based alternatives that can reduce the climate impact of the road construction industry.

One such alternative is tall oil pitch (TOP), a by-product of the pulp and paper industry. TOP has recently begun to be used as a substitute for bitumen, although its properties and long-term performance are not yet fully understood. Despite its potential to reduce emissions, it is important to ensure that the material meets the technical requirements imposed on asphalt binders, particularly regarding resistance to cracking, deformation, and fatigue. The materials differ in chemical composition, which affects their rheological properties.

The aim of this study is to investigate the amount of TOP that needs to be added to 50/70 bitumen to replicate the properties of conventional bitumen with penetration grades 70/100 and 160/220, respectively. To achieve this, two main methods were used. A Dynamic Shear Rheometer (DSR) was employed to analyze the rheological properties, with a focus on complex shear modulus and phase angle. In addition, the Ring & Ball method was used to determine the softening point of the binders and thereby assess their temperature susceptibility.

Based on the results from these tests, an optimal TOP content was identified and subsequently blended with 50/70 bitumen to replicate the properties of the reference bitumen grades 70/100 and 160/220. The developed bio-based binders were then compared with the corresponding conventional bitumen in terms of both softening point and rheological properties. To describe the material behavior over a wide range of temperatures and loading frequencies, master curves were constructed and deviations between the materials were analyzed.

The results show that the bio-based binders exhibit behavior that largely resembles the properties of traditional bitumen. To further evaluate the long-term performance of the binders, aging was carried out using the Rolling Thin Film Oven Test (RTFOT). This enabled analysis of parameters related to rutting and fatigue resistance, which are crucial for asphalt durability. The bio-based binder demonstrated slightly better resistance to rutting, while the fatigue resistance showed some variation.

In conclusion, the study demonstrates that TOP has the potential to be used as a bio-based additive in bitumen to produce binders with properties like those of softer conventional bitumen. However, the results also show that the effect is complex and highly dependent on the composition of the materials.

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Vägnätet är en väsentlig del för att samhället ska fungera. I Sverige finns idag drygt 40 000 mil väg och årligen produceras cirka 6–8 miljoner ton asfalt (Asfaltskolan u.å.; EAPA 2023). Den omfattande användningen av asfalt innebär att materialval inom vägbyggnation har en stor betydelse ur ett klimat- och hållbarhetsperspektiv.

I infrastrukturbranschen har klimat- och miljöfrågor blivit alltmer uppmärksammade och det finns ett ökat behov av att hitta mer hållbara alternativ för vägmateriäl. Traditionellt används petroleumbaserade bindemedel såsom bitumen, som framställs från råolja. Bitumen består av komplexa blandningar av kolväten och utgör en central komponent i asfalt genom att både binda samman stenmaterial och bidra till dess mekaniska egenskaper. Materialet uppvisar goda viskoelastiska egenskaper vilket innebär att det kan motstå både deformation vid höga temperaturer och sprickor vid låga temperaturer (Asfaltskolan u.å.). Produktionen medför en hög energiförbrukning samt betydande utsläpp av växthusgaser, samtidigt som råolja är en icke-förnybar resurs (Zhu et al. 2025). För att minska klimatpåverkan krävs därför en övergång till mer hållbara och förnybara material inom vägbyggnationen.

En lösning som undersöks just nu är användning av biobindemedel i asfalt, där en del av det fossila bindemedlet ersätts med biobaserade oljor. En av dessa biooljor som idag används är tallbecksolja (TOP), som är en biprodukt från pappersmassaindustrin. TOP har potential att minska klimatpåverkan och bidra till en mer cirkulär resursanvändning. Samtidigt utgör asfaltsproduktionen en central del av dagens transportinfrastruktur och omfattar flera steg som har en påverkan på miljön, såsom produktion, transport och utläggning. Åtgärder som användning av fossilfria bränslen, återvinning av asfalt samt införande av biobindemedel kan minska den totala klimatpåverkan. Bindemedlet påverkar klimatet samtidigt som det spelar en viktig roll för materialets funktion och livslängd. Skillnader i den kemiska sammansättningen hos bitumen och TOP kan påverka bindemedlets reologiska beteende, temperaturkänslighet och påverkan av åldring. Det är avgörande att alternativa bindemedel inte försämrar asfaltens mekaniska egenskaper eller dess motstånd mot sprickbildning och utmattnings, då detta kan leda till ökat underhållsbehov och resursanvändning (Zhu et al. 2025).

Användningen av TOP är relativt ny och det finns fortfarande begränsad kunskap om hur materialet påverkar bindemedlets egenskaper och långsiktiga prestanda. Mer forskning krävs kring hur olika inblandningshalter av TOP påverkar de reologiska egenskaperna över olika temperaturer och frekvenser samt hur TOP reagerar vid åldring/oxidation och motstånd mot åldringsrelaterade skador. Det finns ännu inga tydliga eller standardiserade riktlinjer för användningen av TOP och dess effekter.

1.2 Syfte och frågeställningar

Syftet med arbetet är att undersöka biobindemedel där en del av det konventionella bindemedlet bitumen ersätts med tallbecksolja (TOP). Studien fokuserar på att analysera hur inblandning av TOP påverkar bindemedlets egenskaper, både före och efter korttidsåldring med hjälp av Rolling Thin Film Oven Test (RTFOT).

Målet är att identifiera vilka inblandningshalter av TOP som behövs i bitumen 50/70 för att erhålla ett biobindemedel med liknande egenskaper som de mjukare bitumensorterna 70/100 och 160/220. Arbetet syftar även till att bidra till en ökad förståelse för hur biobaserade tillsatser kan användas för att minska beroendet av fossila råvaror inom asfaltproduktion, utan att kompromissa med tekniska prestandakrav.

För att uppnå studiens syfte behandlas följande frågeställningar:

- Vilken halt TOP behövs tillsättas i bitumen 50/70 för att efterlikna bitumen 70/100 och 160/220?
- Hur skiljer sig optimal halt TOP utifrån mjukpunkt och DSR-mätningar?
- Hur skiljer sig reologiska egenskaper hos biobindemedel med TOP i jämförelse med rent bitumen innan och efter korttidsåldring?
- Hur skiljer sig motståndet mot spår- och sprickbildning för biobindemedel med TOP i jämförelse med dess referensbitumen?

1.3 Metodbeskrivning

Studien inleds med en litteraturstudie där relevanta begrepp och metoder beskrivs för att ge läsaren en omfattande förståelse kring ämnet. I litteraturstudien beskrivs även tidigare studier med tallbecksolja för att få en grund till resonemang i analysen. Litteratursökningen har gjorts i LTH:s söksystem Finn, ScienceDirect och Google Scholar och sökorden som har använts var bland annat bitumen, tallbecksolja, reologi, DSR och biobindemedel.

De mätningar som genomförs i studien är mjukpunkt med Kula & Ring metoden, reologiska mätningar med DSR och åldring av bindemedel med RTFOT. Mjukpunkt och de reologiska mätningarna gjordes på LTH och åldringen av bindemedlet genomfördes av Skanska i Gunnilse.

För beräkningar har Williams-Landell-Ferry- ekvationen och Sigmoidalmodellen använts för att ta fram masterkurvor. Mätningsresultaten analyserades och de tillsammans med tidigare studier ligger till grund för de slutsatser och den diskussion som redovisas.

1.4 Avgränsning

Material är tillhandahållet av Skanska vilket inkluderade tallbecksolja och bitumen med penetrationsgraderna 50/70, 70/100 och 160/220. Exakt ursprung för tallbecksolja och bitumen är okänt.

Studien utgår från asfalt tillverkad med varmasfaltsteknik i satsblandningsverk med parallelltrumma där returafalt tillsätts, därför beskrivs endast detta.

Det återvunna biobindemedlet är upptaget från Bronsåldersgatan, Malmö, som asfalterades med Asfalt Zero 17 november 2025.

Temperaturintervallet som undersöks i DSR är från -20°C till 80°C , med mätningar i temperatursteg om 10°C . Frekvenserna som undersökts var 0,1; 0,215; 0,464; 1; 2,15; 4,64; 10; 21,5; 46,4 och 100 rad/s.

I de inledande studierna undersöktes bitumen 50/70 med olika halter TOP. Inblandningshalterna begränsades till 4%, 8%, 12%, 16%, 20% och 24% för att optimera tiden då DSR-mätningar är tidskrävande.

Korttidsåldring (RTFOT) har genomförts på bindemedlet men långtidsåldring (PAV) har inte gjorts. Korttidsåldring utfördes endast på referensbitumen 70/100 och 160/220, samt biobindemedlen med 5,5% och 19% TOP.

De reologiska egenskaper som undersöks är komplex skjuvmodul och fasvinkel, samt parametrarna för spårbildning och utmattnings.

2 Litteraturstudie

2.1 Klimatproblem och miljöfrågor

Klimatfrågorna blir allt viktigare samtidigt som klimatförändringar ökar i frekvens och intensitet. År 2015 godkände 196 länder Parisavtalet, vars syfte är att begränsa ökningen av den globala temperaturen till 2°C och nå nettonollutsläpp till år 2050. Målet är att minska klimatförändringar, växthusgasutsläpp och dess effekter samt stärka motståndskraften. Agenda 2030 godkändes av samtliga FN-stater och innehåller 17 utvecklingsmål, 169 delmål och 257 indikatorer för en hållbar utveckling (Thacker et al. 2021).

Varje år släpps cirka 50 miljarder ton växthusgaser ut globalt varav bygg- och transportsektorn står för 28% (Afshin & Behnood 2025). Samtidigt står branschen för en betydande del av de investeringar som krävs för klimatanpassning, då en stabil infrastruktur är väsentlig för att skydda samhället mot klimatförändringars effekter (Thacker et al. 2021).

För att minska klimatutsläppen är det väsentligt att skapa hållbara lösningar genom hela infrastrukturens livscykel. Förändringar måste ske på flera plan, från nationell- till företagsnivå. Lösningar för detta anses vara att avskaffa ineffektiva subventioner för fossila bränslen och samtidigt öka användning av naturbaserade lösningar och cirkulär ekonomi, genom att återvinna material. Vid återvinning av material minskar behovet av nya råvaror och därmed även dess produktion och transport. Infrastrukturens hållbarhet påverkar transporters effektivitet och kan bidra till att mindre bränsle förbrukas och därmed mindre utsläpp (Thacker et al. 2021).

Sveriges långsiktiga klimatmål är att nå nettonollutsläpp av växthusgaser till atmosfären senast år 2045 (Naturvårdsverket 2026). Trafikverkets mål är att uppnå klimatneutral infrastruktur senast 2040. Ett delmål är att år 2030 uppnå en reduktion på minst 60% utsläpp av växthusgaser, jämfört med 2015 (Trafikverket 2025). Alla delmål för reduktion av växthusgaser visas i Tabell 2-1.

Tabell 2-1: Delmål för reduktion av växthusgaser (Trafikverket 2025).

År	Mål (%)
2020-2024	15
2025	30
2026	36
2027	42
2028	48
2029	54
2030	60
2031	64
2032	68
2033	72
2034	76
2035	80
2036	84
2037	88
2038	92
2039	96
2040	100

Växthusgaserna avser utsläpp från råvaruutvinning, förädling, transporter, byggande samt drift och underhåll (Trafikverket 2025). TDOK 2023:0125 beskriver krav på maximalt utsläpp av koldioxidekvivalenter (CO₂e) för den tillverkade asfaltmassan enligt Tabell 2-2 (Trafikverket 2023).

Tabell 2-2: Krav för maximalt utsläpp CO₂ (Trafikverket 2023).

Asfaltsmassa typ	Maximalt utsläpp kg CO ₂ e per ton		
	2025-2026	2027-2029	2030
ABT	26	24	19
ABS	30	27	24
ABb	26	24	22
AG	24	22	20

Asfalt bidrar i olika steg till stor del av byggsektorns klimatpåverkan. Detta främst genom växthusgaser, energianvändning och materialutvinning. År 2025 uppskattades den globala uppvärmningspotentialen för asfaltproduktion till cirka 42 kg CO₂ per ton asfalt. Det som dominerar koldioxidutsläppen från asfalt är råmaterialutvinning och produktion, där uppvärmning och materialberedning är väsentliga, medan transport har minst påverkan. (Afshin & Behnood 2025). Energiprocesserna omfattar bland annat utvinning, produktion, lagring och konsumtion och står för ungefär 37% av de globala växthusgasutsläppen (Thacker et al. 2021).

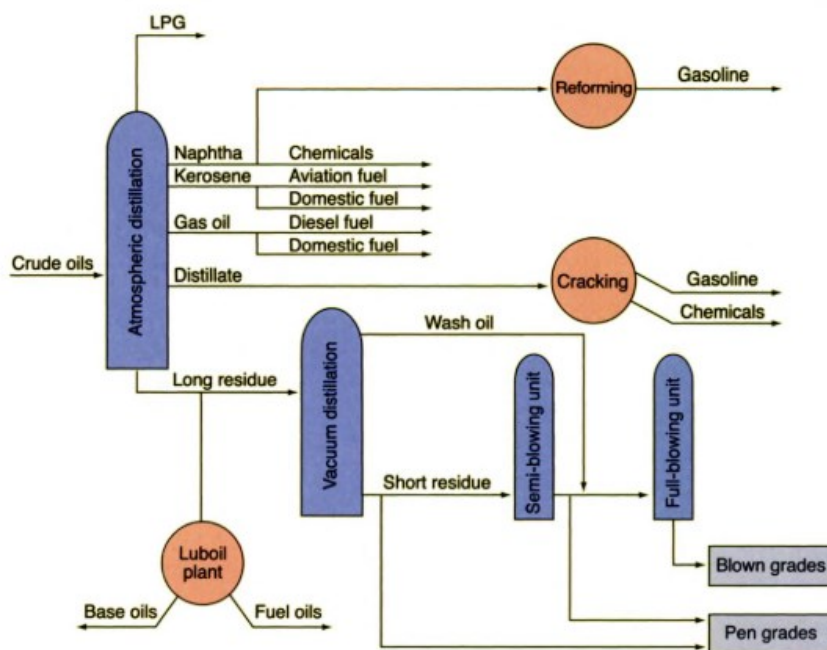
Användning av retur-asfalt kan bidra till en betydande minskning av klimatpåverkan från asfaltsproduktion. Studier påvisar att asfalt som innehåller en hög andel retur-asfalt, upp till 93%, och samtidigt producerad vid lägre temperaturer, cirka 105°C, kan minska koldioxidavtrycket med 55%-64% jämfört med asfalt med 0% retur-asfalt och producerad vid högre temperaturer. Blandningar utan retur-asfalt uppvisar det högsta koldioxidavtrycket, främst på grund av primära råmaterial samt hög energiförbrukning vid uppvärmning under produktion. En ökad andel av retur-asfalt minskar behovet av det primära materialet. För en asfalt med upp till 58% retur-asfalt beror hela minskningen av koldioxidavtrycket på minskad konsumtion av primära råmaterial medan en asfalt med 58–70% av retur-asfalt även kräver lägre temperatur under produktion (Bizarro et al. 2021).

Bitumen anses vara den största faktorn till klimatutsläpp när det gäller konstruktion av asfaltsbeläggningar, men analyserna av detta är begränsade. I produktionen av bitumen ger utvinning av råolja, som kräver mycket energi, det största klimatavtrycket på ungefär 55%. Även transport och raffinering har en stor bidragande faktor. År 2020 var den globala bitumenproduktionen ungefär 143 miljoner ton bitumen, där vägsektorn står för 88% av användningen. Bitumenproduktionen bidrar till mellan 26 och 80 miljoner ton CO₂e, vilket är 0,05–0,15% av de globala växthusgasutsläppen. För att minska dessa siffror utvecklas nya lösningar hela tiden, bland annat genom återvinning, användning av biobaserade material och restprodukter (de Bortoli et al. 2024).

2.2 Bitumen

Bitumen är det bindemedel som vanligen används i asfaltmassor och karaktäriseras av sin svarta färg och klibbiga konsistens. Bindemedel är en viktig komponent som håller ihop stenmaterialet i asfaltsbeläggningar och det har goda egenskaper såsom vidhäftningsförmåga, resistans mot vatten, kemikalier och klimat. Bitumen har en hög hållbarhet i form av att de tål höga belastningar (Agardh & Parhamifar 2014).

Bitumen kommer från råolja som har gått igenom en raffineringsprocess. Råolja, petroleum, är ett fossilt material som tas upp ur marken som en trögflytande vätska. Råoljan har bildats naturligt av nedbrutna växter och djur, främst på havsbottnar. Den obehandlade oljan är väl användbar tack vare dess kolväten. Råolja är en komplex blandning som skiljer sig åt i molekylvikt och viskositet. Bitumen är en produkt som fås fram genom raffinering där man renar och delar upp råoljan, se Figur 2-1 (Read & Whiteoak 2003).



Figur 2-1: Konceptuell bild över destillationen av råolja (Read & Whiteoak 2003).

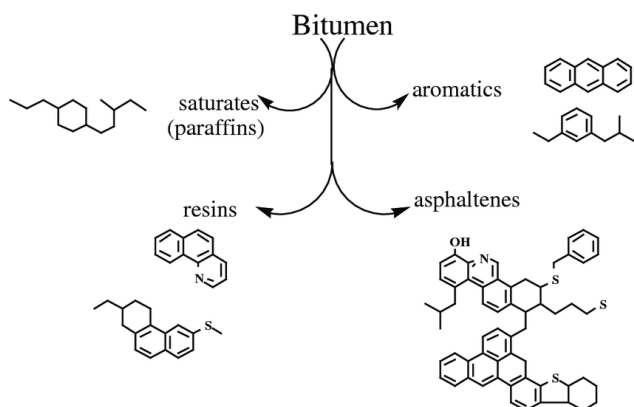
Raffinering av råolja består av flera steg där den första processen är fraktionerad destillation, där råoljan separeras i olika strömmar med varierande kokpunkter. Destillationen sker i kolonner vars insida består av hål där ånga kan stiga upp. Råoljan består av en blandning av vätska med högre kokpunkt och ånga med lägre kokpunkt. I destillationsanläggningen värms råoljan upp och ångorna stiger uppåt och kyls ner tills de kondenserar och tas ut. De olika fraktionerna samlas på olika ställen i kolonnen. De lättaste fraktionerna, som propan och butan, tas ut från toppen, de mellan tunga fraktioner lämnar genom sidoströmmar och de tyngsta förblir vätska i kolonnens botten. Den tyngsta resten, kallad restolja, behöver vidare bearbetning (Read & Whiteoak 2003).

Restoljan destilleras vidare i en vakuumdestillationskolonn som leder till en uppdelning på gasolja, destillatfraktioner och en ytterligare bottensats, kallad "short residue". Viss bitumen kan framställas direkt från destillationsprocessen och "den korta resten", annars används luftblåsning. Kortresten värms då upp och placeras i en kolonn där luft blåses in. Luften både reagerar och blandar materialet, som bidrar till en ökad kontaktyta och reaktionshastighet. Materialet passerar därefter värmeväxlare som ger en önskad tappningstemperatur för bitumen. Egenskaperna hos den färdiga produkten beror på bland annat råoljans viskositet och ursprung, temperatur och uppehållstid i kolonnen samt förhållandet mellan luft och bitumen (Read & Whiteoak 2003).

2.2.1 Uppbyggnad

Bitumen är en komplex blandning av molekyler främst bestående av kolväten men även en liten mängd svavel-, kväve- och syreatomer. En vanlig metod för att karaktärisera bitumen

är genom SARA-analys där bindemedlet delas upp i fyra huvudfraktioner, mättade kolväten (Saturates), aromater (Aromatics), hartser (Resins) och asfaltener (Asphaltenes), se Figur 2-2. Den exakta sammansättningen varierar beroende på källan till råoljan. Mättade kolväten är opolära och viskösa oljor. Hartser och aromater är ett oljeliknande ämne som utgör den största delen i bitumen. Aromater fungerar som ett dispersionsmedium för asfaltener. Hartserna fungerar som ett dispergeringsmedel och dras till asfaltenerna och lägger sig som ett stabiliserande och absorberande hölje kring asfaltenerna. Asfaltener är starkt polära partiklar av kolföreningar som svävar i oljorna. De har hög molekylvikt men är så pass små att de fortfarande svävar i oljan istället för att sjunka. Halten av asfaltener hos bitumen har en stor påverkan på de reologiska egenskaperna. Högre halt av asfaltener gör bitumen hårdare och mer visköst. Viskositeten beror även på graden av peptisering hos asfaltenerna, alltså hur finfördelade partiklarna är. Asfaltenerna blir fullständigt peptiserade när det finns tillräckliga mängder av hartser och aromater (Read & Whiteoak 2003).



Figur 2-2: Bitumens sammansättning (Masson & Lacasse 2000).

Bitumens egenskaper påverkas av interaktionen mellan molekylerna. När förändringar sker i sammansättning och struktur sker även förändringar i reologin. Bitumens reologiska egenskaper vid en viss temperatur bestäms utifrån molekylernas kemiska sammansättning och materialets struktur. En ökning av andelen mättade kolväten samtidigt som ett konstant förhållande mellan hartser och aromater bidrar till ett mjukare bitumen. En hög aromathalt sänker viskositeten och bidrar till ett mjukare bitumen. En ökning av hartser stabiliserar materialet och ger ett något styvare bitumen med högre viskositet och förbättrad kohesion och adhesion. När temperaturen ökar bryts bindningarna mellan asfaltenaggregaten som leder till förändringar hos form och storlek, vilket gör att viskositeten minskar. Asfaltenerna i bitumen klumpar ihop sig när den svalnar, då molekylerna dras till varandra. När materialet utsätts för skjuvning deformeras eller bryts strukturerna, vilket ytterligare förändrar beteendet (Read & Whiteoak 2003).

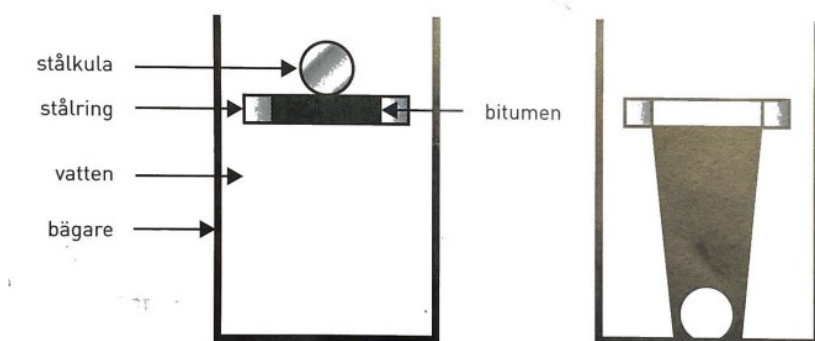
2.2.2 Kvalitet

Det är viktigt att kunna förutsäga asfaltens långsiktiga beteende för prestandan av vägen. Bitumen är en liten komponent men den har en avgörande roll för asfaltens viskoelastiska egenskaper. Godkänd prestanda kan säkerställas om reologi, kohesion, vidhäftning och hållbarhet kontrolleras hos bitumen (Read & Whiteoak 2003).

Vid bedömning av bitumens kvalitet analyseras dess viskositet, det vill säga hur trögflytande bindemedlet är. Viskositeten har en stark koppling till temperaturen, ju högre temperatur desto mjukare och lättflytande blir bitumen. Egenskaperna vid kvalitetsbedömning anges därför vid en viss temperatur eller temperaturintervall (Agardh & Parhamifar 2014).

En metod att mäta kvaliteten är med penetrationstest. En nål med en viss tyngd får under en bestämd tid sjunka ner i bitumenprovet som har en temperatur på 25°C. Penetrationstalet anger hur många tiondels millimetrar nålen sjunker. Varje bitumenkvalitet har ett intervall för vilket penetrationstalet ska ligga inom. För bitumen 70/100 ligger penetrationstalet mellan 70 och 100 (Agardh & Parhamifar 2014).

Ett mått på bitumens temperaturberoende är mjukpunkt som är vid den temperatur som bitumen blir flytande. Det finns flera provningsmetoder för att få fram mjukpunkten, en av dessa är Kula & Ring metoden, se Figur 2-3. Metoden innebär att bitumen får stelna i en metallring som sedan placeras i en ställning som sätts i ett vattenbad. En stålkula med vikten 3,5 gram placeras på bindemedlet. Vattenbadet värms upp 5°C per minut och med ökande temperatur mjuknar bindemedlet och kulans tyngd töjer ut det i en säckliknande form. Temperaturen då kulan når ett djup på 25,4 mm är mjukpunkten enligt Kula & Ring metoden (Agardh & Parhamifar 2014).



Figur 2-3: Illustration av Kula & Ring metoden (Agardh & Parhamifar 2014).

2.2.3 Åldring

Bitumens egenskaper försämras med tiden och när bitumen är i kontakt med syre åldras det. Vid oxidation blir det hårdare och sprödare vilket gör att flexibiliteten minskar. När flexibiliteten minskar utvecklas det lättare sprickor i bitumen (Read & Whiteoak 2003).

Bitumens egenskaper ändras över tid både av tillverkningsprocessen av asfalt och när det ligger ute på vägarna och kommer i kontakt med syre. När stenmaterial och bindemedel blandas för att producera asfalt värms det upp till cirka 150°C. Denna process gör att bitumen börjar oxidera och åldras. Resultatet av åldringen är att det blir hårdare och sprödare (Southern 2015).

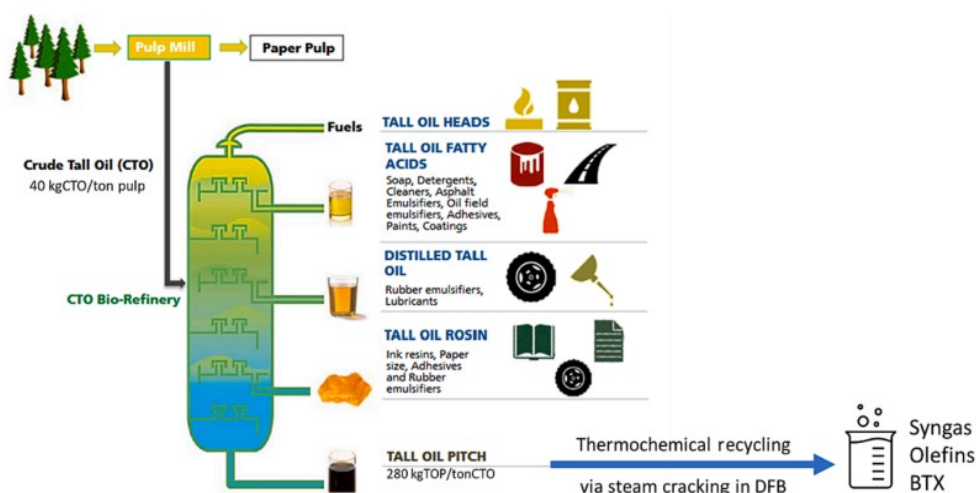
RTFOT, Rotating Thin Film Oven Test, är en metod för att efterlikna hur bindemedlets egenskaper ändras efter asfaltstillverkning och utläggning genom att simulera effekten av värme och luft (Yu et al. 2011). Testprincipen är att bitumen värms upp i en ugn till en specificerad temperatur under en given tidsperiod med konstant lufttillförsel. Glasbehållare fylls med 35 gram bitumen som placeras horisontellt på en roterande ställning i en förvärmad ugn. Ställningen roterar 15 r/min och kan hålla upp till 8 glasbehållare. En luftstråle, med hastigheten 4 L/min är placerad så luft blåser in i glasbehållarna när de når sin lägsta punkt i rotationen. Testet utförs i 163°C i 75 minuter. Effekten av åldringen kan bestämmas utifrån olika tester som penetration eller mjukpunkt (SIS 2024a).

Pressure Aging Vessel (PAV) är ett test för att simulera långtidsåldring med tryckluft och förhöjd temperatur i ett trycksatt kärl. Metoden simulerar den oxidativa åldring som bitumen utsätts för vid långvarig exponering för syre i luften under vägens brukstid. PAV görs på

korttidsåldrat bindemedelsprov som placeras i en stålbehållare. Mängden bindemedel i behållaren ska vara 50 g och behållaren har en diameter som gör att provet får en tjocklek på cirka 3,2 mm. Behållarna placeras i ett trycksatt kärl på 2,1 MPa och proven åldras i 20 timmar för temperaturer på 90°C, 100°C och 110°C eller i 65 timmar för 85°C (SIS 2023a). Temperaturen bestäms utifrån vilket klimat som bindemedlet förväntas användas. PAV åldring motsvarar en brukstid på 5–10 år (Harrigan et al. 1994).

2.3 Tallbecksolja

Tallbecksolja (TOP) är en biprodukt från råtallolja som kan användas som substitut för en del av bitumen. Råtallolja är en restprodukt från sulfatmassaprocessen från pappersmassaindustrin. TOP tillverkas genom vakuumdestillationen av råtallolja i bioraffinaderier. Genom fraktioners olika kokpunkter separeras TOP under destillation. Produkten är en tung, trög, viskös och mörkfärgad och är den tyngsta delen i råtalloljan, som visas i Figur 2-4 (Zhu et al. 2025).



Figur 2-4: Konceptuell bild över destillationen av TOP (Cañete Vela et al. 2023).

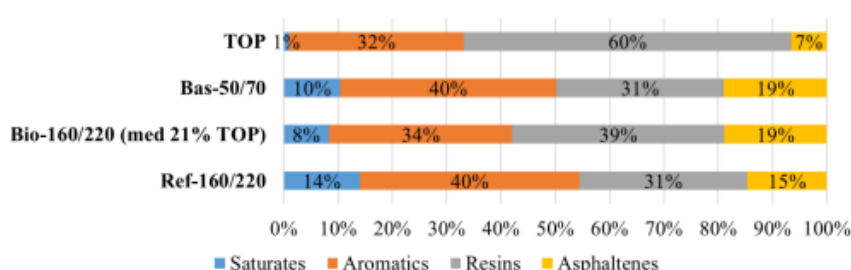
Beroende på ursprung skiljer sig uppbyggnaden av råtalloljan. Träden med ursprung från Europa innehåller råtallolja med sammansättning av ungefär 34% fettsyror, 27% hartser, 11% destillerad tallolja och 28% TOP. TOP består i sin tur av fettsyror, hartssyror samt syror som reagerat med alkohol och bildat estrar. Oljan är rik på fettsyror som med en alifatisk struktur, bestående av flexibla kolkedjor, bidrar till lägre viskositet och styvhet (Cañete Vela et al. 2023).

2.3.1 TOP som bindemedel

Redan i slutet av 1980-talet testades användningen av TOP i asfalt, vilket då främst var utifrån ekonomiska perspektiv. På 1990-talet påvisades att en halt på mer än 10% TOP gav en viss förbättrad vidhäftning mellan bindemedel och stenmaterial, på grund av den ökade surheten, samt förbättrad vattenkänslighet. Däremot konstaterades även att TOP bidrar till högre känslighet för oxidativ härdning efter åldring. En studie från en provväg, år 2010, visade att biobindemedel med TOP presterade lika bra som konventionellt bitumen (Zhu et al. 2025).

Tallbecksoljaens kemiska egenskaper har utvärderats utifrån FTIR-tester (Fouriertransform-infraröd spektroskopi). FTIR-testerna mäter absorptionen av infrarött ljus vid olika våglängder och kan identifiera specifika funktionella grupper. Dessa tester visade i huvudsak samma resultat för biobindemedel och ren bitumen, då båda innehåller kolväten. Skillnaden visade sig i absorptionstopparna, där ämnen absorberar mest energi, vilket tyder på att de biobaserade bindemedlen har en minskning av oxiderade svavelföreningar eller sulfoxidkomponenter. Testen visade att dubbelbindningarna mellan kolatomerna var ungefär lika på ren bitumen och TOP-bindemedel (Zhang et al. 2025).

Utifrån en tidigare studie har en SARA-analys genomförts, där sammansättning för TOP, biobindemedel och bitumen tagits fram, se Figur 2-5. TOP består av nästan dubbelt så mycket hartser som bitumen. Tillsättning av TOP gav biobindemedlet högre andel hartser än sitt referensbindemedel. TOP består av lägre andel aromater än rent bitumen och därför har biobindemedlet en lite lägre andel. TOP består av väldigt små mängder mättade kolväten. Sammansättningen skiljer sig åt vilket gör att de fysiska och mekaniska egenskaperna påverkas. Däremot förändras inte de grundläggande principerna (Zhu et al. 2025).



Figur 2-5: Resultat av en SARA-analys (Zhu et al. 2025).

2.3.2 Klimatpåverkan

Tallbecksolja är en biprodukt från naturlig tall som är en förnybar resurs. Under tillväxten absorberas koldioxid i träden genom fotosyntes (Zhu et al. 2025). För varje kilo kol som genereras absorberar ett träd 3,67 kg CO₂. När restprodukten TOP sedan används i asfaltstillverkning binds den upptagna koldioxiden i produkten. Däremot släpps koldioxid ut i produktion av TOP vilket uppskattas mellan 0,7–1,5 kg CO₂e per kilo, men ger totalt en koldioxidkredit på cirka -2,18 kg CO₂e. Produktion av bitumen ger ett koldioxidavtryck på cirka 147 kg CO₂e per ton bitumen. En inblandning av 10% TOP i bitumen ger därför en koldioxidkredit på cirka -220 kg CO₂e per ton bitumen (Porot & Haslam 2020). Biomassa är däremot en begränsad produkt och det krävs därför att den används effektivt för att kunna uppnå ett hållbart system (Cañete Vela et al. 2023).

Det finns även studier som genomfört livscykelanalys (LCA) där resultatet visade att användning av biobindemedel inte nödvändingsvis minskar klimatpåverkan. I studien ökar den fossila delen av GWP (global warming potential) för asfaltbeläggningar med 1%, utifrån biogen koldioxid. Även bioråvaror kräver utvinning och bearbetning vid produktion (Zhu et al. 2025).

2.4 Returasfalt

Returasfalt är återvunnet asfaltmaterial som kommer ifrån uppgrävda massor från om- och nybyggnationer, massor från fräsningar i samband med reparationer eller av asfaltsgranulat från krossning eller sortering. Returasfalt består främst av bituminöst bindemedel och stenmaterial med eventuella tillsatser. Bindemedlen i returasfalt förändras ofta under tid i förhållande till sina ursprungliga egenskaper, genom produktion, transport och utläggning (Vägverket 2004). Returasfalt innehåller åldrat bitumen, vilket innebär att materialets egenskaper kan påverkas men möjliggör samtidigt lägre produktionstemperatur som kan bidra till minskad oxidation (Bizarro et al. 2021). Dess inverkan på beläggnings egenskaper beror främst på återvinningsmetod, process, andel returasfalt och egenskaper hos returasfalten (Vägverket 2004).

2.4.1 Upptagning och hantering av returasfalt

Asfalt kan antingen återvinnas på plats eller i verk. Vid återvinning på plats återanvänds det befintliga materialet och kompletteras med en mindre mängd jungfruligt material medan returasfalt i blandningsverk kan utgöra upp till 100% av blandningen. Vid återvinning i verk kan antingen asfalt från befintliga konstruktioner användas eller returasfalt som finns i upplag. I det första fallet analyseras delar av eller hela konstruktionen med hjälp av tidigare dokumentation, följt av provtagning. För båda metoderna bestäms provkropparnas kornstorleksfördelning, bindemedelshalt, stenmaterialegenskaper samt bindemedels-egenskaper. Återvinningsprocessen kan påverka materialet och därför ger analysresultaten inte alltid en rättvisande bild. (Vägverket 2004).

För att säkerställa en jämn och hög kvalitet behöver asfaltgranulaten som återvinns krossas och sorteras. Vid varm återvinning bör materialet lagras under tak eller täckas över för att minska fukttinnehållet. En högre andel granulat kan användas om materialet har ett lågt och homogent vatteninnehåll (Vägverket 2004).

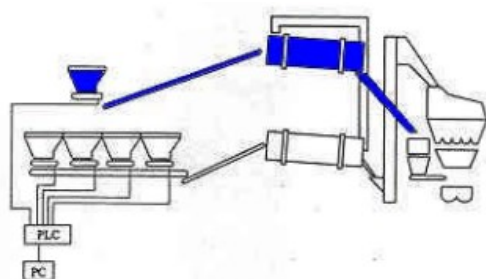
2.4.2 Halvvarm asfaltsteknik kombinerat med returasfalt

Halvvarm asfaltsteknik möjliggör produktion och utläggning vid lägre temperaturer än varm asfalt, vilket är den traditionella metoden med högst tillverkningstemperatur. Den lägre temperaturen bidrar till minskad energiförbrukning och växthusgasutsläpp. Tekniken bidrar även till förbättrad packningsgrad, minskat korttidsåldrande och hårdnande av bindemedel. Då lägre temperaturer minskar den sekundära åldringen möjliggörs tillförande av höga halter returasfalt, som redan innehåller åldrat bindemedel. Halvvarm asfaltsteknik sänker viskositeten hos det nya bituminet, vilket gör blandningen med returasfalt enklare samtidigt som det inte påverkar beläggningsens bearbetbarhet. Kombinationen av halvvarm asfaltsteknik och returasfalt minskar temperatur, energiförbrukning samtidigt som tillverkning av ny asfalt och utvinning av nya material minskar (Keymanesh et al. 2023).

2.4.3 Återvinning i verk – parallelltrumma

Varmblandning kan ske i diskontinuerliga verk, kontinuerliga verk eller satsblandningsverk, där materialet blandas i omgångar. Returasfalten kan tillsättas i satsblandningsverk med bland annat en parallelltrumma, en separat torktrumma, se Figur 2-6 och 2-7, som möjliggör separat uppvärmning av granulatet (Vägverket 2004). Returasfalten värms upp i parallelltrumman till mellan 120–140°C och transporteras sedan till en blandare genom en

buffertsilo. I blandaren blandas sedan returafalt med jungfruligt material. Uppvärmningen i separata trummor bidrar till att både det gamla och nya stenmaterialet minskar risken för överhettning och därmed ytterligare förhårdning av bindemedlet (Olsson 2019). Inblandningshalten beror på granulatets egenskaper, fukttinnehåll samt vilken typ av massa som tillverkas men parallelltrumma är den teknik där högst andel returafalt kan blandas in (Vägverket 2004).



Figur 2-6: Konceptuell bild över returafaltens väg i asfaltsverk (blå markering) (Olsson 2019).



Figur 2-7: Parallelltrumma

2.5 Reologi

Reologi är läran om hur material flyter, deformeras och beter sig under belastning. Det beskriver spännings- och töjningsförhållanden i olika material både i fast och visköst tillstånd (Nationalencyklopedin u.å.a). Reologiska undersökningar handlar både om hur vätskor flödar och deformationen hos fasta material. Sambandet mellan dessa är att stora deformationer skapade av skjuvkraft gör att många material flyter (Mezger 2014). Skjuvbeteenden hos material kan beskrivas som att de ligger mellan två extremer, flöde av ett idealt visköst material och deformation av ett idealelastiskt material. Dessa material kallas för viskoelastiska (Mezger 2014).

2.5.1 Viskositet

I en flödande vätska rör sig molekylerna relativt varandra med en viss inre friktion. Hur stor denna kraft är avgör hur trögflytande vätskan är (Mezger 2014). Ju högre inre friktion desto högre viskositet, alltså är materialet mer trögflytande. Viskositeten beskrivs med en viskositetskonstant som betecknas, η . Den beskriver förhållandet mellan skjuvspänningen och skjuvningshastigheten, se Ekvation 1 (Nationalencyklopedin u.å.c).

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad \text{ekv 1}$$

η	<i>viskositet [Pa·s]</i>
τ	<i>skjuvspänning [Pa]</i>
$\dot{\gamma}$	<i>skjuvhastighet [s⁻¹]</i>

2.5.2 Elasticitet

Elasticitet hos ett material är en egenskap som innebär att materialet återgår till sin ursprungliga form efter mekanisk belastning som skapat deformationer (Nationalencyklopedin u.å.a). För ett idealelastiskt material beskrivs den elastiska deformationen av Hookes lag, se Ekvation 2. Hookes samband säger att deformationen, γ , är proportionell mot spänningen, τ (Mezger 2014).

$$\tau = G * \gamma \quad \text{ekv 2}$$

τ	<i>skjuvspänning [Pa]</i>
G	<i>skjuvmodul [Pa]</i>
γ	<i>skjuvtöjning [-]</i>

2.5.3 Viskoelasticitet

Viskoelastiska material påvisar alltid viskösa och elastiska beteenden samtidigt. Den viskösa delen beter sig enligt Newtons lag medan den elastiska beter sig enligt Hooks lag. När en spänning eller töjning appliceras eller avlägsnas uppvisar dessa material en tidsberoende, fördröjd respons (Mezger 2014).

2.6 Dynamisk skjuvreometer

Dynamisk skjuvreometer (DSR) används för att mäta reologiska egenskaper hos bituminösa bindemedel. Vid mätningen får man bland annat ut den komplexa skjuvmodulen och fasvinkeln hos bindemedel över ett intervall av provningsfrekvenser och provningstemperaturer vid provning i oscillerande skjuvning. Metoden används för oåldrade, åldrade, stabiliserade och återvunna bituminösa bindemedel (SIS 2023b).

Principen för ett test är ett prov placerat i en temperaturkontrollerad apparat. På provet mäts antingen bindemedlets skjuvtöjning, genom att applicera en känd oscillerande skjuvspänning, eller den skjuvspänning som uppstår efter applicering av oscillerande skjuvtöjning. Testet utförs i det linjära viskoelastiska området vilket innebär det område där skjuvspänningen är proportionerlig mot skjuvtöjningen och den komplexa skjuvmodulen, G^* , förblir konstant oberoende av skjuvspänning och skjuvtöjning (SIS 2023b).

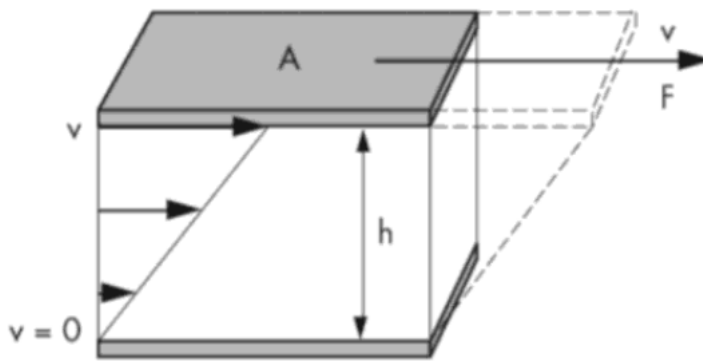
2.6.1 Oscillation

En oscillerande rörelse är en periodisk rörelse som rör sig fram och tillbaka genom en jämviktspunkt (Arfken 1984). Oscillation används för att testa reologiska egenskaper hos olika sorters viskoelastiska material. Vid olika temperaturer och belastningsfrekvenser visar bindemedel olika egenskaper. Vid högre temperaturer och låga frekvenser påvisar

bindemedel mer vätskeliknande egenskaper och vid låga temperaturer och höga frekvenser beter sig bindemedel som ett fast material (Xu et al. 2025).

2.6.2 Skjuvspänning, skjuvhastighet och skjuvtöjning

Tvåplattsmodellen används för att definiera reologiska parametrar som skjuvspänning och skjuvtöjning, se Figur 2-8. Två plattor befinner sig på ett avstånd, h , med ett material mellan dem. Den undre plattan är stationär, alltså $v=0$, och den övre plattan, med skjuvarean A , sätts i rörelse av skjuvkraften F vilket gör att hastigheten, v , kan uppmätas (Mezger 2014).



Figur 2-8: Tvåplattsmodellen (Mezger 2014).

Skjuvspänningen definieras som förhållandet mellan skjuvkraften och skjuvarean, se Ekvation 3.

$$\tau = \frac{F}{A} \quad \text{ekv 3}$$

τ	skjuvspänning [Pa]
F	skjuvkraft [N]
A	skjuvarean [m^2]

Skjuvhastigheten är förhållandet mellan hastigheten och avståndet mellan plattorna, se Ekvation 4.

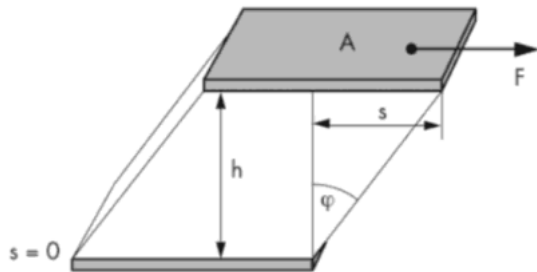
$$\dot{\gamma} = \frac{v}{h} \quad \text{ekv 4}$$

$\dot{\gamma}$	skjuvhastighet [s^{-1}]
v	hastighet [m/s]
h	avstånd [m]

När den övre plattan utsätts för en skjuvkraft kommer den att deformeras, se Figur 2-9. Skjuvtöjningen beräknas som förhållandet mellan deformationen och avståndet mellan plattorna, se Ekvation 5 (Mezger 2014).

$$\gamma = \frac{s}{h} \quad \text{ekv 5}$$

γ	skjuvtöjning [-]
s	deformation [m]
h	avstånd [m]



Figur 2-9: Tvåplattsmodellen fortsättning (Mezger 2014).

2.6.3 Komplex skjuvmodul

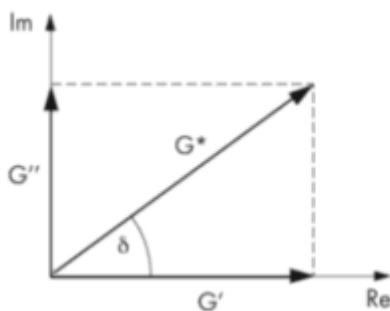
Den komplexa skjuvmodulen, G^* , är förhållandet mellan amplituden av skjuvspänningen och amplituden av skjuvtöjningen vid harmonisk sinusformad oscillation (SIS 2023b). Den komplexa modulen, G^* , består av en reell del och en imaginär del. Den reella delen, kallad lagringsmodul G' , visar de elastiska egenskaperna hos materialet och den imaginära delen, kallad förlustmodul G'' , visar de viskösa egenskaperna, se Ekvation 6 (Zhang et al. 2020).

$$G^* = \sqrt{(G')^2 + (G'')^2} \quad \text{ekv 6}$$

2.6.4 Fasvinkel

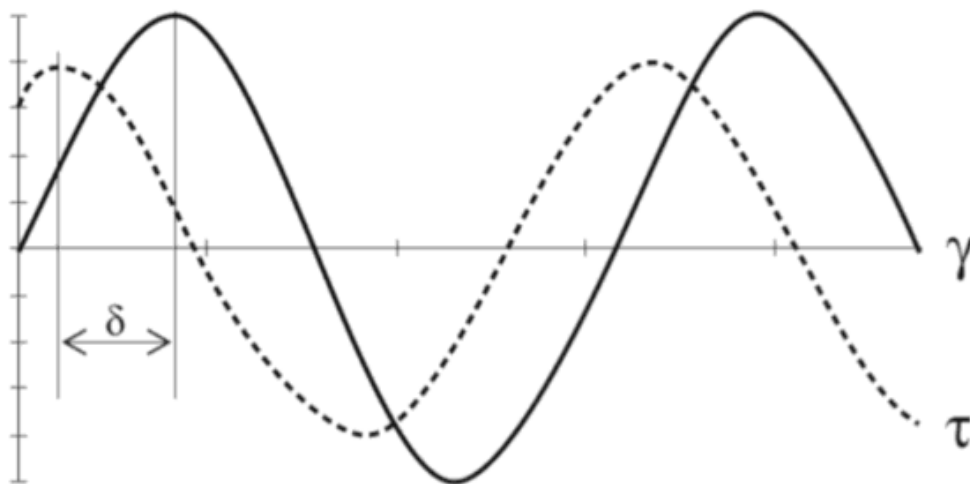
Hur elastiskt eller visköst ett material är beskrivs av fasvinkeln, δ . Fasvinkeln, som visas i Figur 2-10, beskriver förhållandet mellan G' och G'' , se Ekvation 7. För ett idealt elastiskt material gäller $\delta=0^\circ$ och för idealt visköst material är $\delta=90^\circ$. Material som är viskoelastiska har en fasvinkel som ligger mellan 0° och 90° (Mezger 2014).

$$\delta = \tan^{-1} \frac{G''}{G'} \quad \text{ekv 7}$$



Figur 2-10: Fasvinkel som funktion av G' och G'' (Mezger 2014).

Fasvinkeln kan även beskrivas med sinuskurvor där fasvinkeln är fasskillnaden mellan skjuvspänningen och skjuvtöjningen. Den tas fram genom att mäta hur mycket töjningen är tidsmässigt förskjuten i förhållande till den applicerade spänningen (Read & Whiteoak 2003). Figur 2-11 visar hur sinuskurvorna kan vara förskjutna. Fasvinkeln kan läsas av mellan kurvornas extremvärden (Mezger 2014).



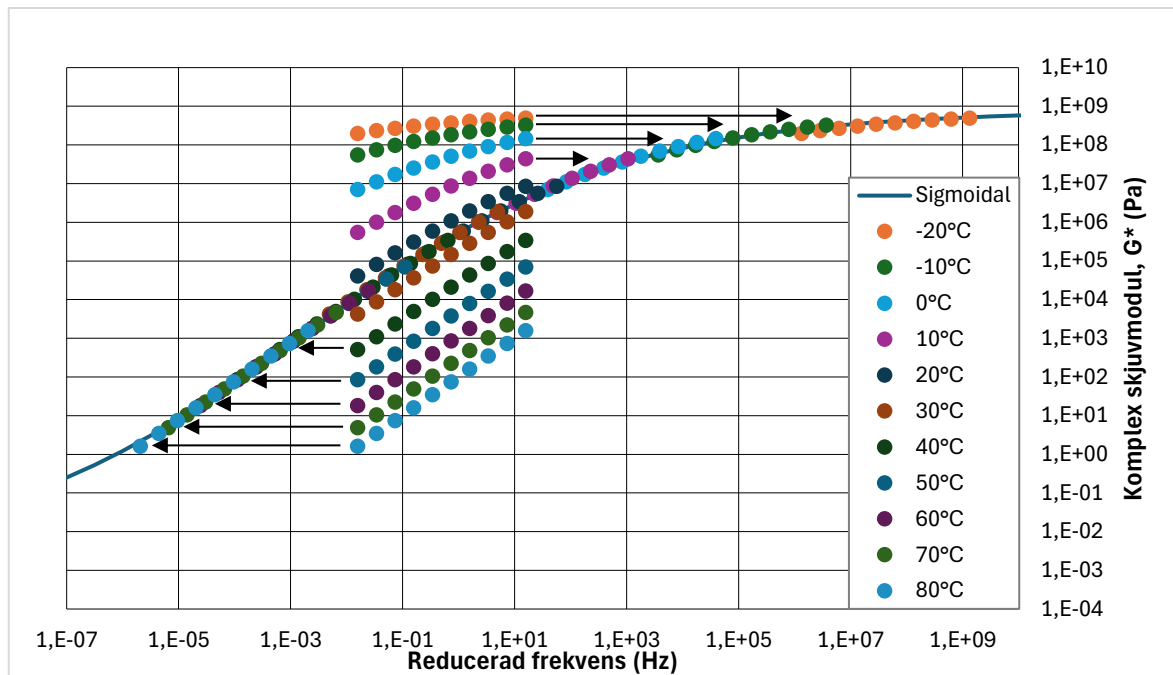
Figur 2-11: Fasvinkel utifrån sinuskurvor (Mezger 2014).

2.7 Masterkurvor

Masterkurvor kan tas fram med hjälp av Excel-kalkylblad, MatLab eller Python genom att använda den dynamiska skjuvmodulen, frekvensen och temperaturerna från DSR-testerna. Med hjälp av data kan temperatur-tid-förskjutningsfaktorer beräknas genom att anpassa datapunkterna till en referenstemperatur (Sudarsanan et al. 2020). Masterkurvor är ett sätt att beskriva de reologiska egenskaperna hos bindemedel beroende på temperatur och frekvens. Efter DSR undersökning kombineras data från olika temperaturer och frekvenser för att skapa en sammanhängande kurva (Zhu et al. 2025). Masterkurvor konstrueras genom att flytta modul- och frekvensplottar vid olika temperaturer för att skapa en sammanhängande kurva, se Figur 2-12 (Read & Whiteoak 2003).

Den teoretiska grunden för masterkurvor är tid-temperatur superposition (TTSP). Forskning har visat att det finns ett samband mellan temperatur och frekvens. Genom att ta fram skiftfaktorer kan mätningar gjorda vid olika temperaturer passas till en kontinuerlig kurva med en reducerad frekvens. Detta gör att en mätning gjorda inom ett frekvensområde kan passas till en kurva som visar ett större frekvensområde än det som mätningarna var gjorda inom (Yusoff et al. 2011).

Det som är väsentligt för en masterkurva är data över ett temperatur- och frekvensintervall och en referenstemperatur, som är innanför temperaturintervallet. Det är de reologiska parametrarna som kan förskjutas och förskjutningen vid de olika temperaturerna bestäms av skiftfaktorn, a_T . Skiftfaktorn och temperaturberoendet kan beskrivas på olika sätt, bland annat genom Williams-Landell-Ferry ekvationen (Yusoff et al. 2011).



Figur 2-12: Konceptuell bild hur modul- och frekvensplottar förflyttas i horisontalld för att skapa en masterkurva.

2.7.1 Williams-Landel-Ferry ekvationen

Williams-Landell-Ferry (WLF) ekvationen används för att bestämma temperaturberoendet för förskjutningarna, se Ekvation 8 (Yusoff et al. 2011). Den används för att flytta data från uppmätta temperaturer till en referenstemperatur. a_T är en förskjutningsfaktor som är förhållandet mellan processen för en godtycklig temperatur och processen att uppnå en referenstemperatur. C_1 och C_2 är konstanter som varierar för olika material och beror även på referenstemperaturen (Ashter 2014).

$$\log(a_T) = \frac{-C_1(T - T_0)}{(C_2 + T - T_0)} \quad \text{ekv 8}$$

a_T	förskjutningsfaktor [-]
T_0	referenstemperatur [°C]
T	godtycklig temperatur [°C]
C_1	WLF konstant 1 [-]
C_2	WLF konstant 2 [-]

2.7.2 Sigmoidalmodellen

Sigmoidalmodellen är en dynamisk funktion som används för att beskriva hastighetsberoendet för masterkurvan. Den matematiska modellen innehåller fyra anpassningsparametrar, v , α , β och γ , se ekvation 9. v är den nedre asymptoten, α är skillnaden mellan den övre och nedre asymptoten och β och γ definierar formen mellan asymptoterna (Yusoff et al. 2013).

$$\log(G^*) = v + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta - \gamma(\log f_r)}} \quad \text{ekv 9}$$

G^* *komplex skjuvmodul [Pa]*
 f_r *reducerad frekvens [Hz]*
 v, α, β, γ *anpassningsparametrar [-]*

Konstanterna C1 och C2 i WLF-ekvationen tillsammans med anpassningsparametrarna, v , α , β och γ , bestäms genom kurvanpassning där sigmoidalmodellen anpassas till mätdata så att skillnaderna mellan uppmätta värden och beräknade värden minimeras, vanligtvis med hjälp av minsta kvadratmetoden. Resultatet blir en best-fit kurva som beskriver materialets beteende över ett brett frekvensintervall.

2.8 Blackdiagram

I blackdiagram framförs den komplexa skjuvmodulen, G^* , i förhållande till fasvinkeln, δ , och frekvens och temperatur utelämnas från diagrammet. Detta gör att den dynamiska datan kan presenteras i ett och samma diagram utan att utföra tids- och temperatur superpositionsbearbetningar av rådata. Blackdiagrammet kan ge en bra indikation på tid- och temperaturekvivalens utifrån kurvans jämnhet. En jämn kurva indikerar ekvivalens medan en ojämn eller uppsplittrad kurva indikerar att tids- och temperatursuperpositionen inte är uppfyllt. Att kurvan blir ojämn kan bero på att bitumen är modifierat (Read & Whiteoak 2003).

2.9 Spårbildning

Spårbildning orsakas av upprepade trafikbelastningar och uppstår som långsgående fördjupning i hjulspåren. Deformationen kan uppstå i en eller flera lager (Fares et al. 2024). Trafikverket har en underhållsstandard med krav på maximala spårdjup utifrån trafikmängd och skyltad hastighet (Trafikverket 2012). Uppståndelsen av spårbildning påverkar faktorer som säkerhet, körkomfort, underhållskostnader och hållbarhet. Trafiksäkerhetsrisker kan uppstå genom vattenplaning när vatten samlas i spåren och minskar fordonets friktion mot vägbanan. Det ökade rullmotståndet påverkar bränsleförbrukningen, däckslitage och körkomforten (Fares et al. 2024). Spårbildning, permanent deformation, uppstår särskilt vid kraftig inbromsning, acceleration eller svängningar, då hög skjuvpåkänning uppstår (Asfaltskolan u.å.).

Med DSR kan bindemedlets känslighet för spårbildning bestämmas genom att mäta hur bindemedlet beter sig vid höga temperaturer. Detta görs genom att kolla på parametern $G^*/\sin(\delta)$, där ett högre värde ger ett bättre motstånd mot spårbildning. För att ett bindemedel ska vara godkänt finns det krav på vad parametern $G^*/\sin(\delta)$ ska uppnå för värde vid frekvensen 10 rad/s. För ett oåldrat bindemedel är kravet 1 kPa och för ett korttidåldrat bindemedel är kravet 2,2 kPa (Asfaltskolan u.å.).

2.10 Utmattning

När en asfaltsbeläggning utsätts för upprepade belastningar sker en gradvis nedbrytning som kan leda till sprickbildning. Vägar är särskilt utsatta för utmattning då bindemedlet uppvisar en hög styvhet vilket är vanligt vid låga temperaturer och när belastningen sker vid en hög frekvens (Asfaltskolan u.å.). Utmattning sker oftast sent i en vägs livscykel och därför kan bindemedel analyseras utifrån utmattning efter långtidsåldring (PAV). Parametern som undersöks är $G^*\sin(\delta)$ där ett högre värde indikerar en högre benägenhet för utmattning (Read & Whiteoak 2003).

2.11 Biobindemedel med TOP

Tidigare studier visar att inblandning av TOP i bitumen påverkar bindemedlets viskoelastiska egenskaper där effekterna beror till stor del av temperatur, frekvens och inblandad mängd TOP. Generellt observeras att penetrationen ökar med ökande halt TOP medan mjukpunkten minskar med ökande halt TOP vilket indikerar att tallbecksolja har en mjukgörande effekt på bitumen (Zhang et al. 2025; Zhu et al. 2026). Förändringen i bitumens egenskaper har använts för att anpassa biobindemedel där bitumen 50/70 har modifierats med TOP för att efterlikna ett mjukare bitumen. Utifrån penetrations- och mjukpunktsmätningar har det visats att inblandning med 5% TOP motsvarar bitumen 70/100 och 21% TOP motsvarar bitumen 160/220 (Zhu et al. 2024; Zhu et al. 2025; Zhu et al. 2026).

Trots liknande grundläggande egenskaper visar flera studier att biobindemedel uppvisar avvikande reologiska beteenden jämfört med dess referensbindemedel. Masterkurvor för biobindemedel och referensbitumen överlappar inte perfekt vilket tyder på skillnader i reologiska egenskaper och att endast bestämma mängd TOP utifrån mjukpunkt och penetration är inte tillräckligt. För att ta fram biobindemedel med rätt karaktär krävs även reologiska analyser (Zhang et al. 2025). Detta stöds ytterligare av analyser där biobindemedel generellt visar en högre fasvinkel och därmed ett mer visköst beteende, särskilt vid mellan och höga temperaturer (Zhu et al. 2025; Zhu et al. 2026). Däremot vid mycket låga temperaturer visade biobindemedel 160/220 lägre fasvinkel än referensbitumen efter långtidsåldring.

Olika studier visar varierande resultat avseende låg- och högttemperaturegenskaper hos biobindemedel jämfört med deras referensbindemedel. Vid låga temperaturer visar studier att biobindemedel kan ha förbättrade lågttemperaturegenskaper vilket innebär bättre motstånd mot utmattning och sprickor. Biobindemedel har lägre integritet än sin referens som tyder på att de tappar sin struktur och skadas snabbare. Däremot har biobindemedlet högre skadetall vilket betyder ett bättre utmattningsmotstånd och att materialet klarar mer belastning innan brytning. Analys visade också att biobindemedel har sämre högttemperaturegenskaper och har därmed ett sämre motstånd mot spårbildning (Zhang et al. 2025). Vidare visar studier på att biobindemedel vid höga temperaturer uppvisar ett bättre utmattningsmotstånd (Zhu et al. 2025) medan andra studier indikerar att bitumen 70/100 och biobindemedel 70/100 har jämförbara utmattningsegenskaper och biobindemedel 160/220 rapporteras ha sämre motstånd mot utmattning än bitumen 160/220 vid små töjningar (Zhu et al. 2024).

Åldringens, både kort- och långtid, inverkan på biobindemedel har också studerats och visar att mjukpunkten för biobindemedel genomgår en mindre förändring än dess referensbitumen. Vid korttidsåldring, RTFOT, var den komplexa skjuvmodulen, G^* , liknande för biobindemedel och referensbitumen och efter långtidsåldring, PAV, uppvisar

biobindemedlen högre G^* än referensbitumen vid låga temperaturer (Zhu et al. 2025). En återkommande observation är att biobindemedel är mer känsligt för frekvensförändringar, särskilt efter långvarig åldring (Zhu et al. 2026) samt vid högre halter TOP (Zhu et al. 2025).

I undersökning av förhållandet mellan G^* och δ visade rena bindemedel och biobindemedel liknande trender, med högt G^* och låg δ vid mycket låga temperaturer. Med ökande temperaturer minskar G^* gradvis och fasvinkeln ökar. Detta beteende överensstämmer med det typiska utseendet för blackdiagram för oarbetade bitumen vilket tyder på att de viskoelastiska egenskaperna hos biobindemedel är samma som hos rent bitumen. Detta innebär att tillsats av TOP inte stör den strukturella integriteten eller flödesegenskaperna (Zhang et al. 2025).

3 Metod

3.1 Material och provserier

De material som användes tillhandahölls av Skanska och listas nedan. Tabell 3-1 visar de provserier som utförts.

- Bitumen 50/70
- Bitumen 70/100
- Bitumen 160/220
- Tallbecksolja (TOP)
- Återvunnet biobindemedel

Det återvunna biobindemedlet har utvunnits ur utlagd asfalt som tillverkades med en blandning av jungfruligt material, innehållande stenmaterial, bitumen och tallbecksolja, samt returafalt med okänd sammansättning. Det återvunna biobindemedlet ska motsvara bitumen 70/100 och eftersom det genomgått en tillverkningsprocess, utläggning samt varit i drift i mindre än sex månader motsvarar det en korttidsåldring.

Tabell 3-1: Utförda prover.

Bindemedel	Innan RTFOT					Efter RTFOT		
	Kula & Ring				DSR	Kula & Ring		DSR
	Prov 1	Prov 2	Prov 3	Prov 4		Prov 1	Prov 2	
50/70	x							
70/100	x				x	x	x	x
160/220	x				x	x	x	x
50/70+4% TOP	x	x			x			
50/70+8% TOP	x	x			x			
50/70+12% TOP	x	x			x			
50/70+16% TOP	x	x	x	x	x			
50/70+20% TOP	x	x	x	x	x			
50/70+24% TOP	x	x	x		x			
50/70+5,5% TOP	x	x			x	x	x	x
50/70+19% TOP	x	x			x	x	x	x
Återvunnen						x	x	x

3.2 Inledande tester

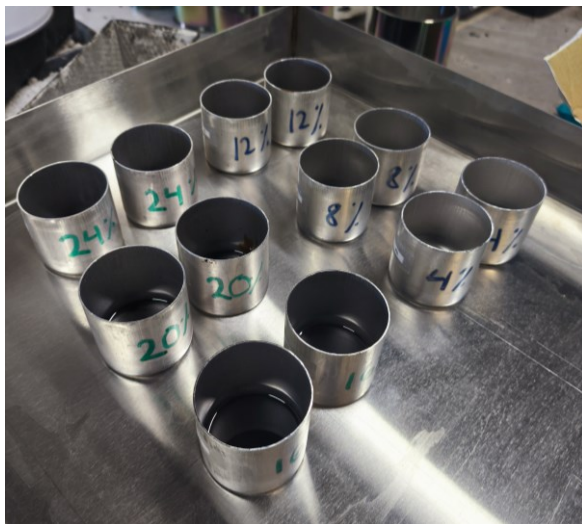
I de inledande testerna undersöktes mjukpunkt för bitumen 50/70, 70/100, 160/220 samt bitumen 50/70 med 4%, 8%, 12%, 16%, 20% och 24% TOP. Dessa bindemedel, förutom bitumen 50/70, testades även i DSR. Dessa tester gjordes för att hitta den mängd TOP som gör att bindemedlet liknar bitumen 70/100 och 160/220 utifrån mjukpunkt och komplex skjuvmodul.

3.2.1 Materialblandning

Bitumen 50/70 blandades med olika procenthalter av TOP i penetrationsburkar. Två blandningar gjordes per bindemedel med totalt 50 gram bindemedel per penetrationsburk. För att blanda biobindemedlet värmdes bitumen 50/70 till 150°C och tallbecksolja till 110°C. Sedan vägdes och blandades 4%, 8%, 12%, 16%, 20% respektive 24% av TOP in i bitumen 50/70. Andel och mängd visas i Tabell 3-2. Även bitumen 70/100 och 160/220 hölls upp i tre penetrationsburkar med 50 gram i varje. De färdiga blandningarna visas i Figur 3-1.

Tabell 3-2: Mängd TOP och bitumen 50/70 per penetrationsburk.

Bitumen 50/70 [g]	TOP [g]	TOP [%]
48	2	4
46	4	8
44	6	12
42	8	16
40	10	20
38	12	24



Figur 3-1: Färdiga provblandningar.

3.2.2 Kula & Ring metoden

För att ta reda på andelen TOP som ska blandas in i 50/70 för att motsvara 70/100 respektive 160/220 mätes mjukpunkterna med hjälp av Kula & Ring metoden enligt SIS (2015).

3.2.2.1 Provkroppar

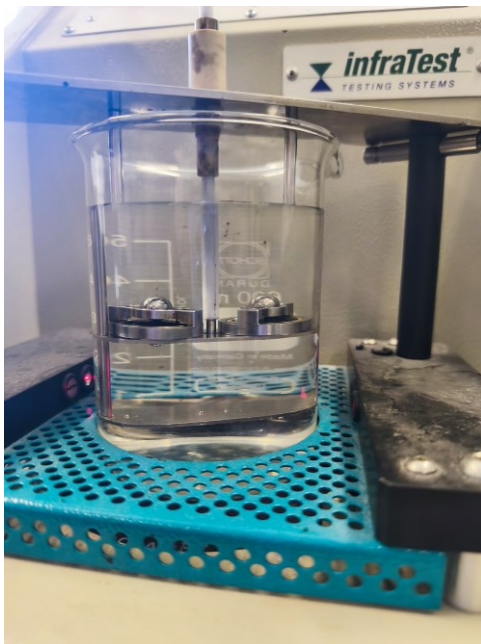
Biobindemedel och bitumen 70/100 och 160/220 värmdes upp till 150°C. Samtliga prover hälldes i fem mässingringar var, se Figur 3-2, med en jämn yta och fick sedan svalna i minst 30 minuter i kylskåp. Då proverna är <50 g så värmdes de upp maximalt 15 minuter per gång, enligt SIS (2024b).



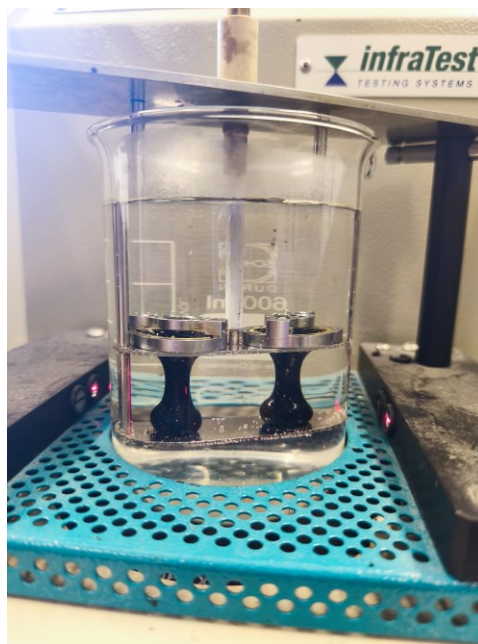
Figur 3-2: Provkroppar till Kula & Ring.

3.2.2.2 Tillvägagångssätt

Två ringar med prover placerades i ringhållaren och ovanpå proverna placerades en kulcentreringsstyrning med en stålkula. Ringhållaren med provkropparna placerades sedan i vattenbägaren, se Figur 3-3, som värmdes upp med 5°C/minut tills att kulan föll igenom. När kulan bröt ljusstrålen, se Figur 3-4, registrerades temperaturen som visade mjukpunkten. Rent bitumen testades en gång medan proverna med TOP testades två gånger. Utifrån mjukpunkts-resultatet valdes 16%, 20% och 24% att testas ytterligare, då dessa blev mjukare än förväntat.



Figur 3-3: Precis startad Kula & Ring.



Figur 3-4: Avslutat Kula & Ring.

Mjukpunkt på bitumen 70/100 och 160/220 mättes upp för att få fram referensvärden. Därefter plottades värdena med mjukpunkterna för bitumen 50/70 blandat med olika mängder TOP (0%, 4%, 8%, 12%, 16%, 20%, 24%) och en best fit linjär linje skapades, se Figur 4-1 i kapitel 4.1.1. Där linjen korsade referensvärdena är andelen TOP som gör att bitumen 50/70 liknar bitumen 70/100 respektive 160/220.

3.2.3 DSR

3.2.3.1 Komponenter

Den dynamiska skjuvreometern som användes är Anton Paar MCR302 DSR, se Figur 3-5, med datorprogrammet RheoCompass. Nedan listas de övriga komponenter som användes.

- Spindel, 8mm, 25mm, se Figur 3-6 (hädanefter kallas dessa PP25 och PP08)
- Plattor, 8mm, 25mm, se Figur 3-7
- Silikonformar



Figur 3-5: Dynamisk skjuvreometer.



Figur 3-6: 25 och 8 mm spindel.



Figur 3-7: 25 och 8 mm platta.

3.2.3.2 Provkroppar

För DSR-mätningarna tillverkades provkroppar med hjälp av silikonformar för 25 mm och 8 mm för samtliga bindemedelsprov. Bindemedelsproverna värmdes upp i 150°C i maximalt 15 minuter och hölls sedan upp i silikonformarna. För 25 mm vägdes provkropparna upp till cirka 0,53 gram och för 8 mm cirka 0,11 gram, se Figur 3-8. Dessa provkroppar kylde därefter ner och DSR tester genomfördes inom 3 dygn. Provkropparna för de olika blandningarna gjordes i omgångar för att de inte skulle ligga för länge.



Figur 3-8: Silikonformar med bindemedel.

3.2.3.3 Tillvägagångssätt

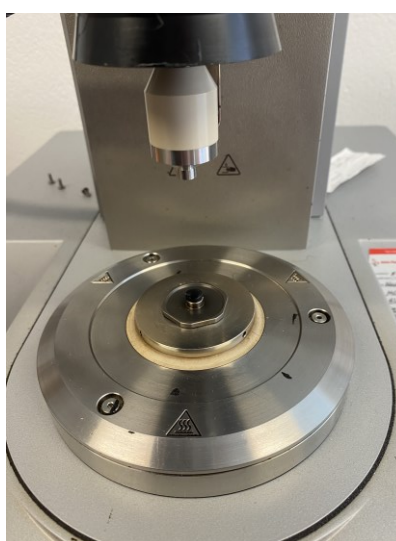
Varje blandning testades i DSR en gång för PP25, vid 20°C, 30°C, 40°C, 50°C, 60°C, 70°C och 80°C, och en gång för PP08 vid -20°C, -10°C, 0°C, 10°C och 20°C. För både PP25 och PP08 utfördes tester vid 20°C för att få ett överlappande resultat. Testerna utfördes för varje temperatur vid frekvens 0,1; 0,215; 0,464; 1; 2,15; 4,64; 10; 21,5; 46,4 och 100 rad/s.

Tillvägagångssättet för DSR-testerna utfördes i enlighet med den steg för steg beskrivna metoden av Sheidaei (2025) som baseras på SS-EN 14770. Inför ett test startades RheoCompass och DSR-maskinen, lufttrycket och kylaren sattes på. Kylaren ställdes in utifrån vilken spindel som användes, 20 grader för PP25 och 5 grader för PP08 och lufttrycket var mellan 6 och 7 bar. Drivaxeln höjdes sedan till den högsta positionen.

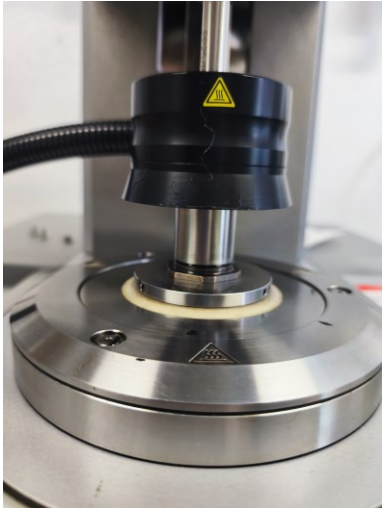
Innan testet startade genomfördes Zero gap vid medeltemperaturen för testerna, 50°C för PP25 och 0°C för PP08. Zero gap utförs för att instrumentet ska kalibrera avståndet mellan plattorna vilket möjliggör korrekt inställning av plattavståndet och förbättrar mät noggrannheten. Temperaturen sattes därefter till cirka 10°C över mjukpunkten utifrån referensbitumen, för 70/100 och 50/70 + 4%, 8% och 12% sattes temperaturen till 55°C och för 160/220 och 50/70 + 16%, 20% och 24% sattes temperaturen till 50°C. Därefter placerades proverna på plattan, se Figur 3-9 och 3-10. Spindeln sänktes ner till 1,05 mm för PP25 och 2,1 mm för PP08, se Figur 3-11 och 3-12. De överblivna kanterna på proverna trimmades för att skapa en optimal passform. Den övre plattan sänktes sedan ner till 1 mm respektive 2 mm. Därefter sattes temperaturen till starttemperaturen, vilket var 20°C för både PP25 och PP08 och testet startades.



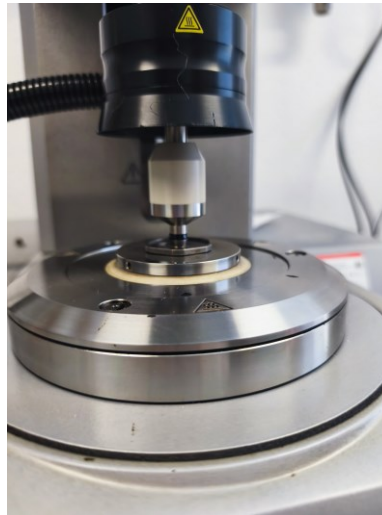
Figur 3-10: 25 mm prov placerat på plattan.



Figur 3-9: 8 mm prov placerat på plattan.



Figur 3-12: 25 mm prov efter trimning.



Figur 3-11: 8 mm prov efter trimning.

3.2.3.4 Inställningar

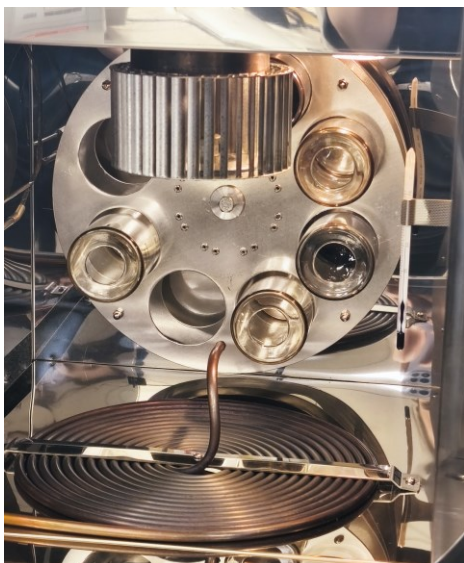
Amplitudsväp genomfördes vid 20°C för samtliga prover i syfte att säkerställa att de applicerade töjningarna låg inom det linjärviskoelastiska området (LVE). Sväpen genomfördes inom ett töjningsområde på 0,01% och 100% för PP25 och 0,001% till 10% för PP08, enligt SIS (2023b). Efter A-sväpningen genomfördes en frekvenssväpning mellan 0,1 och 100rad/s för samtliga temperaturer.

3.3 Ny blandning

Utifrån Kula & Ring och DSR mätningar valdes att tillsätta 5,5% respektive 19% TOP, se kapitel 4.1, till bitumen 50/70 för att efterlikna bitumen 70/100 och 160/220. Den nya procenten TOP blandades in i bitumen 50/70 och nya provkroppar för Kula & Ring och DSR skapades och test genomfördes enligt kapitel 3.2. Utifrån resultaten från DSR testerna för 70/100, 160/220, 50/70+5,5% och 50/70+19% TOP skapades masterkurvor. Masterkurvorna visade en kombinerad och sammanhängande kurva för komplex skjuvmodul och fasvinkel för frekvenssväpningen.

3.3.1 Rolling Thin Film Oven Test

Biobindemedel 50/70 + 5,5% och 19% TOP och respektive referensbitumen togs till Skanskas labb i Göteborg för korttidsåldring med Rolling Thin Film Oven test enligt standard SIS (2024a). Bindemedlen värmdes upp och det hölls 35 gram vardera i fyra glasbehållare. En ugn med roterande ställning värmdes upp till 163°C. De fyllda behållarna placerades i ugnen, se Figur 3-13. Den roterande ugnen har åtta platser så en tom glasbehållare placerades på varannan plats för stabilitet. Ställningen roterade därefter och proverna fick in luft i sin lägsta punkt i rotationen. Testet utfördes i 75 minuter och därefter hölls de över i nya penetrationsburkar och fick svalna.



Figur 3-13: Ställning med glasbehållare för RTFOT.

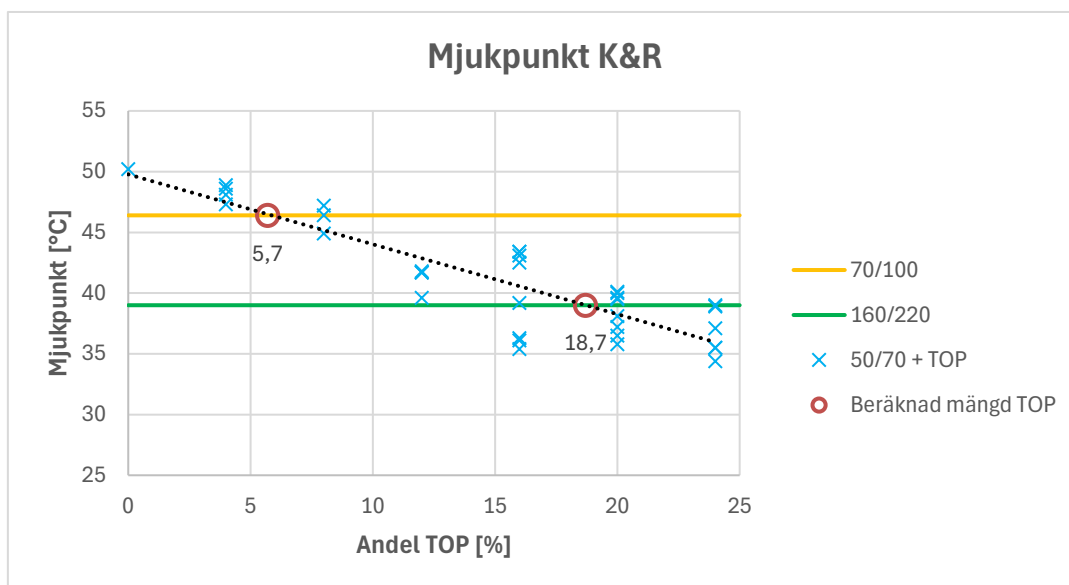
Slutligen genomfördes Kula & Ring och DSR test, enligt kapitel 3.2, för samtliga åldrade bindemedel inklusive återvunnet biobindemedel. Masterkurvor skapades och jämfördes med varandra och masterkurvorna innan åldring.

4 Resultat

4.1 Val av mängd TOP

4.1.1 Mjukpunkt

Figur 4-1 visar uppmätta mjukpunkter i Kula & Ring för bitumen 70/100, 160/220 samt bitumen 50/70 med olika halter inblandning av TOP, 0%, 4%, 8%, 12%, 16%, 20% och 24%. För rent bitumen testades mjukpunkten en gång och för biobindemedlet mättes mjukpunkten från början två gånger. Mjukpunkten för de biobindemedlen med högre halt TOP, 16%, 20% och 24%, hamnade lägre än förväntat och ytterligare mjukpunktstester gjordes för dessa. Värden som låg utanför två standardavvikelser bortsågs.



Figur 4-1: Uppmätta mjukpunkter i Kula & Ring och jämförelse med 70/100, 160/220 och 50/70 + TOP.

Mjukpunkten för bitumen 70/100 var 46,4°C och för 160/220 var 39°C. Ren bitumen 50/70 fick en mjukpunkt på 50,2°C. Punktlinsen visar trenden för hur mjukpunkten förändras med halten TOP. Som trendlinjen visar sjunker mjukpunkten med ökad halt TOP. För att beräkna optimal mängd TOP utifrån mjukpunkt användes trendlinjens skärningspunkt med 70/100 och 160/220. Skärningen visar att bitumen 50/70 med 5,7% TOP motsvarar mjukpunkt för 70/100 och 18,7% TOP motsvarar 160/220. Spridningen av mjukpunkt var större för de tre bindemedel med högre halt TOP.

4.1.2 Komplex skjuvmodul

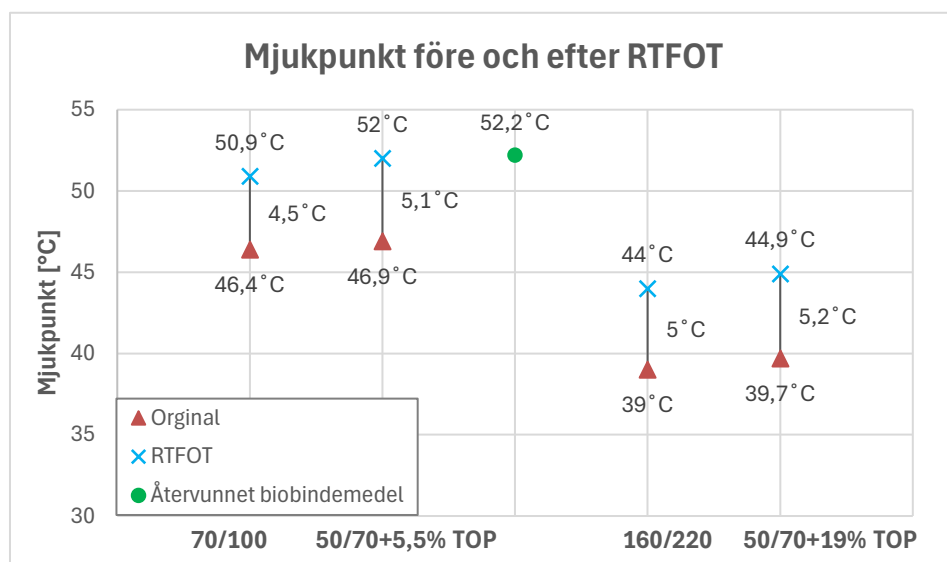
I DSR-mätningarna låg den komplexa skjuvmodulen för bitumen 70/100 mellan värdena för 50/70 + 4% och 50/70 + 8%. Utifrån detta antas motsvarande halt TOP för att likna 70/100 ligga mellan dessa halter. Interpolation genomfördes för att beräkna optimal mängd TOP vid frekvenserna 0,1, 1 och 10 rad/s vid temperaturerna -20°C, 0°C, 20°C, 40°C, 60°C och 80°C.

Medelvärde från dessa interpolationer visar önskad mängd TOP. Värden som låg utanför två standardavvikelser från medelvärdet bortsågs. Resultat blev 5,4% TOP. Samma beräkningsgång gjordes för 160/220 där resultatet blev 19,2% TOP. För biobindemedel 70/100 påvisade DSR resultatet en lägre halt TOP än Kula & Ring metoden medan det för biobindemedel 160/220 påvisade en högre halt TOP.

Då skillnaden mellan resultaten från Kula & Ring och DSR var liten, valdes ett representativt avrundat värde. Resultatet från båda metoder avrundades till närmaste 0,5% enhet. Andelen TOP beräknades därmed till 5,5% och 19% för att likna bitumen 70/100 respektive 160/220.

4.2 Kula & Ring

Figur 4-2 visar mjukpunkterna uppmätta innan respektive efter RTFOT för 70/100, 50/70 + 5,5% TOP, 160/220 och 50/70 + 19% TOP. Samtliga bindemedel testades två gånger och det är medelvärdet som presenteras i diagrammet.



Figur 4-2: Uppmätta mjukpunkter för 70/100, 50/70 + 5,5% TOP, 160/220, 50/70 + 19% TOP innan och efter RTFOT, samt återvunnet biobindemedel

Innan åldring var skillnaden mellan biobindemedlet och deras respektive referensbitumen lägre än efter åldring. Biobindemedlets mjukpunkt har ökat mer än vad referensbitumen har gjort. För 70/100 och 50/70 + 5,5% TOP ökade mjukpunkten med 4,5°C respektive 5,1°C. Skillnaden i mjukpunktsökning för 160/220 och 50/70 + 19% TOP var mindre, här har mjukpunkten ökat med 5°C respektive 5,2°C. För rent bitumen åldras 160/220 mer än 70/100 medan för biobindemedlet åldras de lika mycket.

Det återvunna biobindemedlet uppvisade en medelmjukpunkt på 52,2°C, vilket bäst överensstämde med biobindemedlet 50/70 med 5,5% TOP, som hade en mjukpunkt på 52°C. Dock är ursprunglig mjukpunkt på det återvunna biobindemedlet okänt och därmed är det okänt hur mycket mjukpunkten ökad vid tillverkning och utläggning av asfalten.

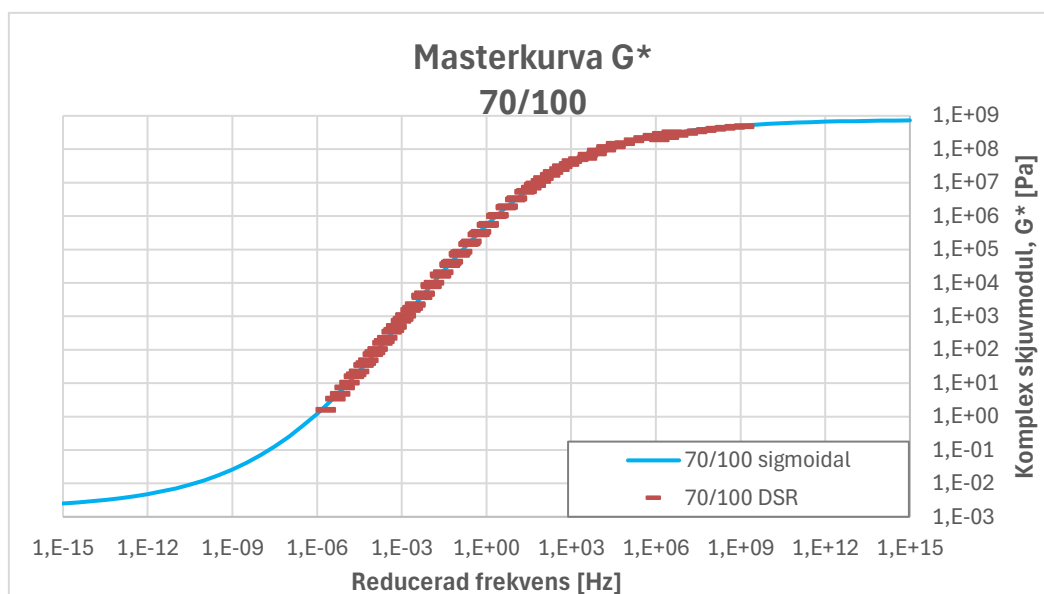
4.3 Masterkurvor

Masterkurvor för komplex skjuvmodul och fasvinkel togs fram för samtliga bindemedelsorter. Varje diagram innehåller masterkurva för biobindemedel och dess referensbitumen för att se om de överlappar. I diagrammen redovisas den komplexa skjuvmodulen och fasvinkeln som funktion av frekvensen. Masterkurvorna har anpassats utifrån Sigmoidalmodellen och samtliga har en passningsgrad över 0,99, se Figur 4-3. Masterkurvorna som jämfördes var dels biobindemedlet med dess referensbitumen för att se om de har liknande reologiska egenskaper, dels samtliga bindemedel innan och efter korttidsåldring för att se hur åldringen påverkat den komplexa skjuvmodulen och fasvinkeln. För att tydligare visa differenser mellan masterkurvorna presenteras även tabeller med skillnader och relativa skillnader vid olika frekvenser. Frekvenserna är valda för att fånga hela intervallet med ett värde i de lågre, ett i mitten och ett i de högre frekvenserna.

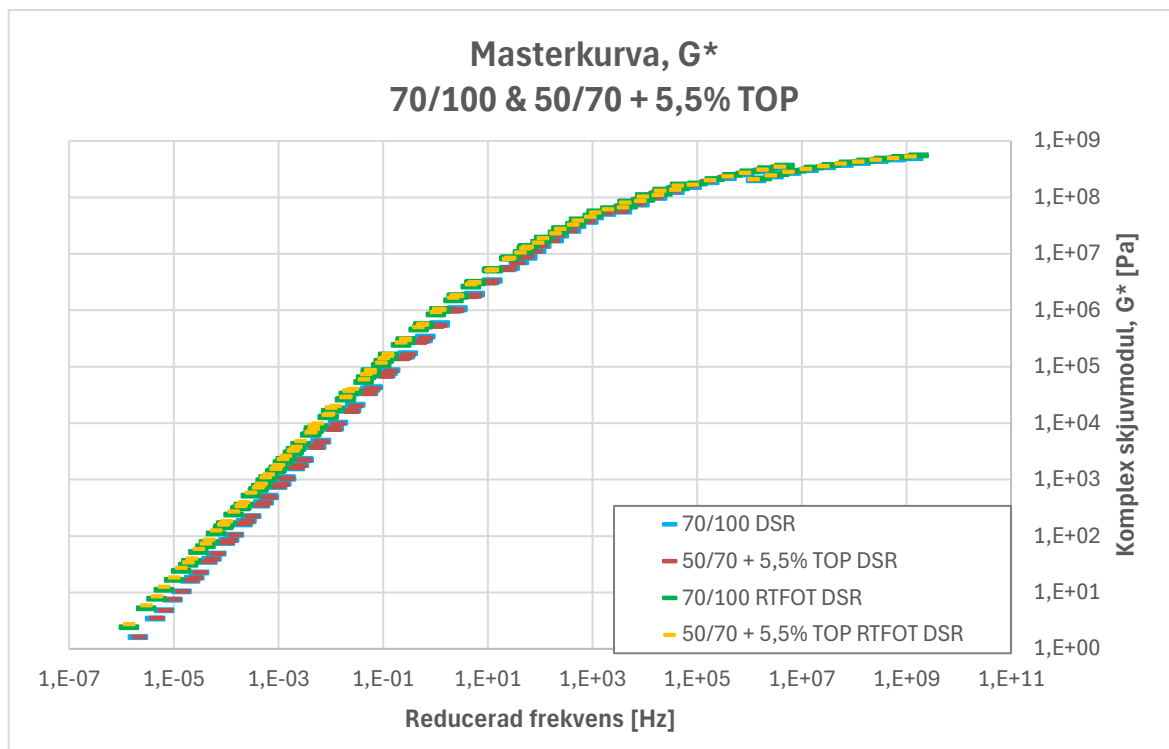
4.3.1 Komplex skjuvmodul

Figur 4-3 visar ett exempel för passningsgraden för masterkurvan för bitumen 70/100 och biobindemedel 50/70 + 5,5% TOP med motsvarande Sigmoidalmodell, utifrån den komplexa skjuvmodulen. Masterkurvor togs fram för samtliga bindemedel i ursprungligt tillstånd och jämfördes för att se om den komplexa skjuvmodulen var liknande för bitumen och biobindemedlet. Efter korttidsåldring med RTFOT gjordes nya DSR-tester och nya masterkurvor togs fram. Dessa jämförs med masterkurvorna för det oåldrade bindemedlet. Även jämförelser med referensbitumen och dess biobindemedel görs efter åldring för att se om de fortfarande har liknande reologiska egenskaper. Figur 4-4 och 4-5 visar masterkurvor för 70/100 och biobindemedel 50/70 + 5,5% TOP samt 160/220 och 50/70 + 19% TOP i både oåldrat och åldrat tillstånd.

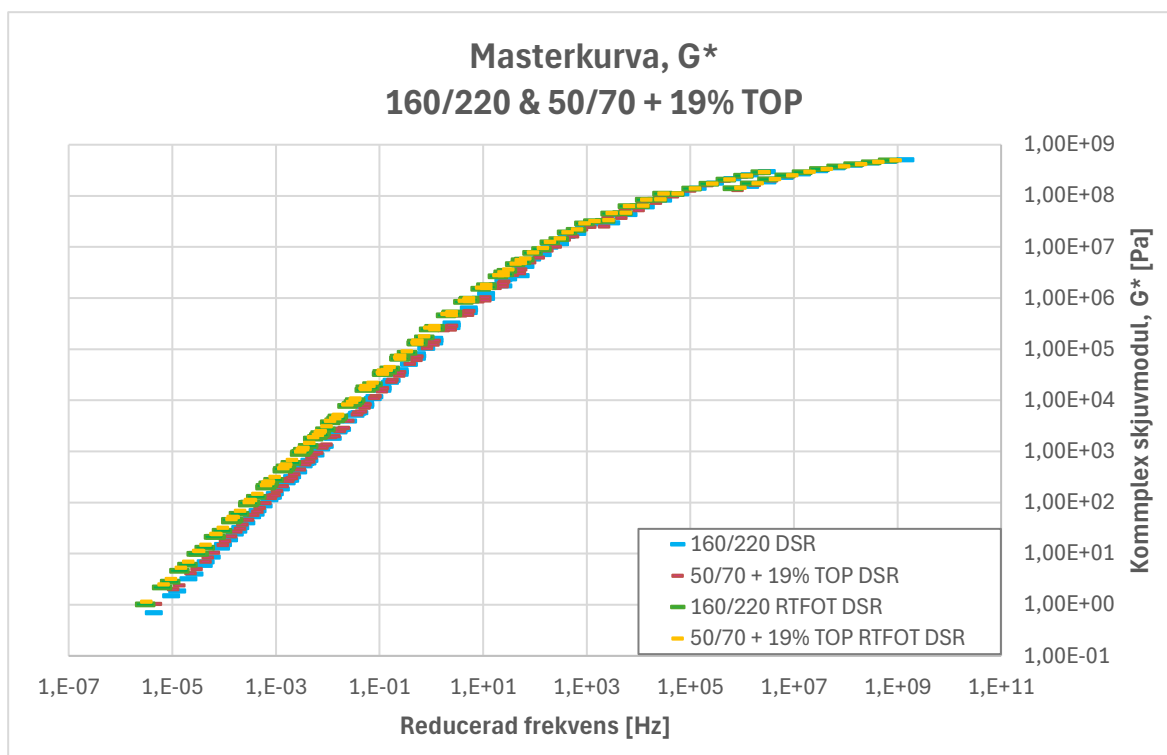
Tabell 4-1 visar hur mycket den komplexa skjuvmodulen för biobindemedlet avviker från referensbitumen för samtliga bindemedel vid frekvenserna 1E-05, 1E02 och 1E08 Hz. Tabell 4-2 visar hur mycket den komplexa skjuvmodulen har ökat efter åldring för respektive bindemedel vid frekvenserna 1E-05, 1E02 och 1E08 Hz. De relativa skillnaderna utgår från referensbitumen.



Figur 4-3: Masterkurva, G^* , för 70/100 med sigmoidalkurva.



Figur 4-4: Masterkurva, G^* , för 70/100 och 50/70 + 5,5% TOP innan och efter RTFOT.



Figur 4-5: Masterkurva, G^* , för 160/220 och 50/70 + 19% TOP innan och efter RTFOT.

Tabell 4-1: Relativ skillnad, G^* , mellan biobindemedel och respektive referensbitumen innan och efter RTFOT.

Frekvens [Hz]	G^*		ΔG^*	$\Delta G^*/G^*$
	Bitumen	Biobindemedel		
	70/100	50/70+5,5% TOP		
1,00E-05	7,81E+00	7,50E+00	3,12E-01	0,04
1,00E+02	1,31E+07	1,33E+07	-1,76E+05	-0,01
1,00E+08	3,95E+08	4,26E+08	-3,12E+07	-0,08
	160/220	50/70+19% TOP		
1,00E-05	1,55E+00	1,94E+00	-3,91E-01	-0,25
1,00E+02	6,12E+06	5,64E+06	4,81E+05	0,08
1,00E+08	3,74E+08	3,82E+08	-7,89E+06	-0,02
	70/100 RTFOT	50/70+5,5% TOP RTFOT		
1,00E-05	1,66E+01	1,82E+01	-1,56E+00	-0,09
1,00E+02	1,63E+07	1,71E+07	-8,19E+05	-0,05
1,00E+08	4,27E+08	4,26E+08	7,75E+05	0,00
	160/220 RTFOT	50/70+19% TOP RTFOT		
1,00E-05	3,20E+00	3,38E+00	-1,79E-01	-0,06
1,00E+02	7,98E+06	8,15E+06	-1,65E+05	-0,02
1,00E+08	3,93E+08	3,83E+08	9,67E+06	0,02

Tabell 4-2: Relativ skillnad, G^* , innan och efter RTFOT för samtliga bindemedel.

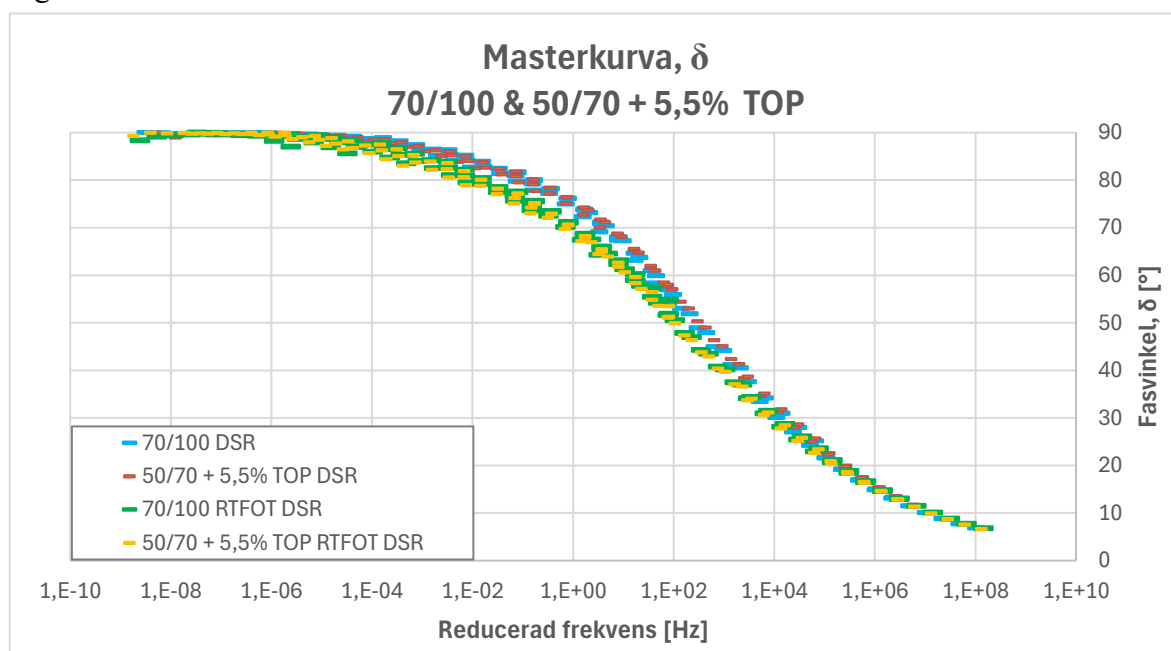
Frekvens [Hz]	G^*		ΔG^*	$\Delta G^*/G^*$
	Original	Åldrat (RTFOT)		
	70/100	70/100 RTFOT		
1,00E-05	7,81E+00	1,66E+01	8,83E+00	1,13
1,00E+02	1,31E+07	1,63E+07	3,21E+06	0,25
1,00E+08	3,95E+08	4,27E+08	3,15E+07	0,08
	50/70+5,5% TOP	50/70+5,5% TOP RTFOT		
1,00E-05	7,50E+00	1,82E+01	1,07E+01	1,43
1,00E+02	1,33E+07	1,71E+07	3,85E+06	0,29
1,00E+08	4,26E+08	4,26E+08	-5,17E+05	0,00
	160/220	160/220 RTFOT		
1,00E-05	1,55E+00	3,20E+00	1,64E+00	1,06
1,00E+02	6,12E+06	7,98E+06	1,87E+06	0,31
1,00E+08	3,74E+08	3,93E+08	1,88E+07	0,05
	50/70+19% TOP	50/70+19% TOP RTFOT		
1,00E-05	1,94E+00	3,38E+00	1,43E+00	0,74
1,00E+02	5,64E+06	8,15E+06	2,51E+06	0,45
1,00E+08	3,82E+08	3,83E+08	1,19E+06	0,00

Masterkurvorna för 70/100 och 50/70 + 5,5% TOP respektive 160/220 och 50/70 + 19% TOP visar generellt god överlappning. Den relativa skillnaden ligger under 0,1 för samtliga frekvenser med undantag för den lägre frekvensen för 160/220 och 50/70 + 19% TOP där den relativa skillnaden är 0,25. Detta kan bero på att vid låga frekvenser är materialet visköst vilket ger en större osäkerhet. I de lägre frekvenserna är även den komplexa skjuvmodulen låg, i detta fall 1,55 och 1,94 Pa vilket är en skillnad på 0,39 Pa. Vid låga värden på G^* kan små skillnader ge upphov till stora relativa skillnader. Utifrån likheterna i masterkurvorna tyder det på att bindemedlen har liknande reologiska egenskaper.

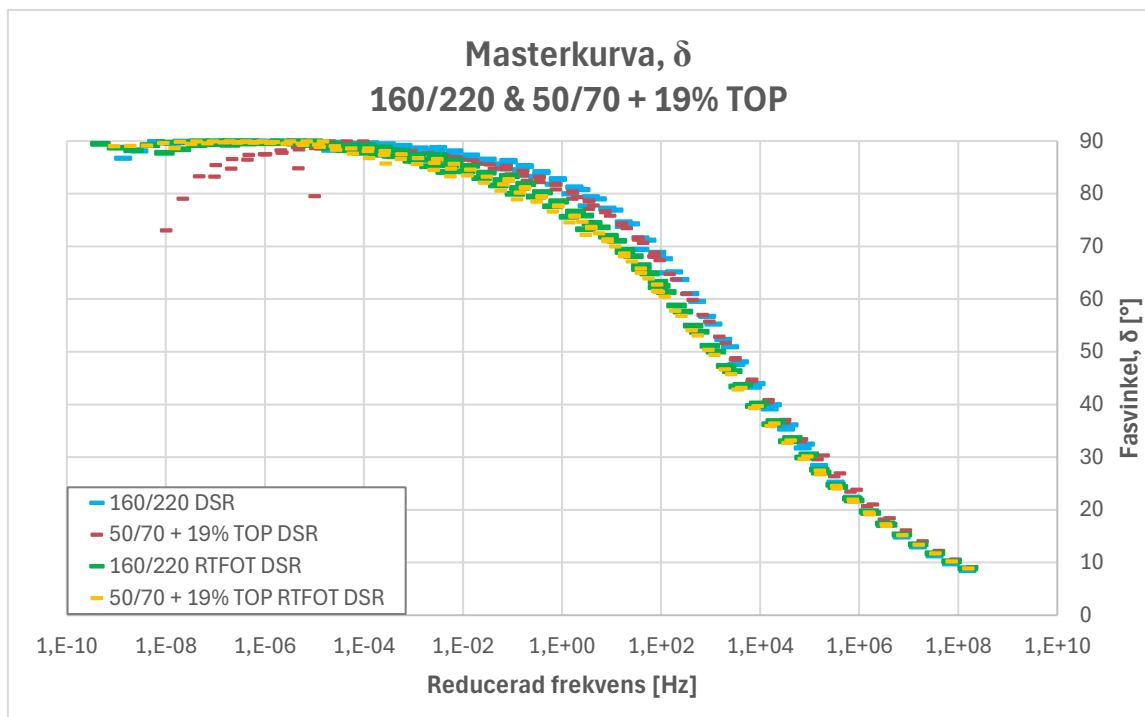
Efter åldring är masterkurvorna för biobindemedlen och deras referensbitumen fortsatt överensstämmande. För samtliga bindemedel och frekvenser är den relativa skillnaden under 0,1. Den relativa skillnad som innan åldring överskred 0,1 ligger nu under denna gräns. Efter åldring ökar den komplexa skjuvmodulen för samtliga bindemedel vilket tyder på att materialen blir styvare. Ökningen är som störst i de lägre frekvenserna och avtar ju högre frekvensen blir. För biobindemedlen är den komplexa skjuvmodulen oförändrad i de högre frekvenserna.

4.3.2 Fasvinkel

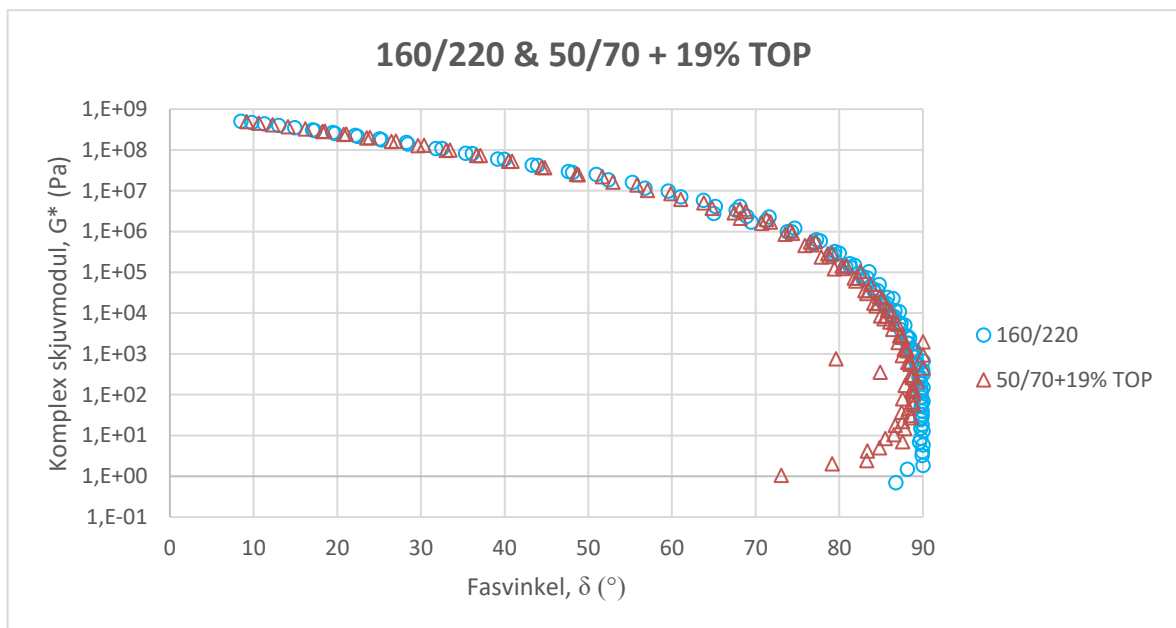
Masterkurvor utifrån fasvinkel togs fram för samtliga bindemedel i originaltillstånd och fasvinkeln för biobindemedlet jämfördes med dess referensbitumen. Efter åldring med RTFOT togs nya masterkurvor fram som jämfördes med masterkurvorna för de oåldrade bindemedlen. Masterkurvorna för biobindemedlen och dess referensbitumen jämfördes för att se om de har liknande reologiska egenskaper innan och efter åldring. Figur 4-6 och 4-7 visar masterkurvorna för fasvinkeln hos 70/100 och 50/70 + 5,5% TOP respektive 160/220 och 19% TOP innan och efter åldring. Figur 4-8 visar blackdiagram för biobindemedel 50/70+19% TOP respektive referensbitumen 160/220. Blackdiagrammen visar sambandet mellan materialens fasvinkel och den komplexa skjuvmodulen. Tabell 4-3 visar avvikelserna för fasvinkeln mellan 50/70+5,5% TOP och 70/100 samt 50/70 + 19% TOP och 160/220 i frekvenserna 1E-07, 1E+00 och 1E+07 Hz innan och efter RTFOT. Tabell 4-4 visar hur mycket fasvinkeln för samtliga bindemedel förändras efter åldring. De relativa skillnaderna utgår från referensbitumen.



Figur 4-6: Masterkurva, δ , 70/100 och 50/70 + 5,5% TOP innan och efter RTFOT.



Figur 4-7: Masterkurva, δ , 160/220 och 50/70 + 19% TOP innan och efter RTFOT.



Figur 4-8: Blackdiagram för 50/70 + 19% TOP och 160/220.

Tabell 4-3: Relativ skillnad, fasvinkel, mellan biobindemedel och respektive referensbitumen innan och efter RTFOT.

Frekvens [Hz]	δ		$\Delta\delta$	$\Delta\delta/\delta$
	70/100	50/70+5,5% TOP		
	Bitumen	Biobindemedel		
1,00E-07	89,90	89,72	0,18	0,00
1,00E+00	75,11	75,43	-0,32	0,00
1,00E+07	10,18	10,85	-0,67	-0,07
	160/220	50/70+19% TOP		
1,00E-07	89,71	84,21	5,50	0,06
1,00E+00	82,01	81,06	0,95	0,01
1,00E+07	14,26	15,96	-1,71	-0,12
	70/100 RTFOT	50/70+5,5% TOP RTFOT		
1,00E-07	89,70	89,84	-0,13	0,00
1,00E+00	70,03	69,61	0,43	0,01
1,00E+07	10,90	10,64	0,26	0,02
	160/220 RTFOT	50/70+19% TOP RTFOT		
1,00E-07	89,78	89,97	-0,19	0,00
1,00E+00	77,78	76,85	0,93	0,01
1,00E+07	14,78	14,73	0,05	0,00

Tabell 4-4: Relativ skillnad, fasvinkel, innan och efter RTFOT för samtliga bindemedel.

Frekvens [Hz]	δ		$\Delta\delta$	$\Delta\delta/\delta$
	Original	Åldrat (RTFOT)		
	70/100	70/100 RTFOT		
1,00E-07	89,90	89,70	-0,20	0,00
1,00E+00	75,11	70,03	-5,08	-0,07
1,00E+07	10,18	10,90	0,71	0,07
	50/70+5,5% TOP	50/70+5,5% TOP RTFOT		
1,00E-07	89,72	89,84	0,12	0,00
1,00E+00	75,43	69,61	-5,82	-0,08
1,00E+07	10,85	10,64	-0,22	-0,02
	160/220	160/220 RTFOT		
1,00E-07	89,71	89,78	0,07	0,00
1,00E+00	82,01	77,78	-4,23	-0,05
1,00E+07	14,26	14,78	0,52	0,04
	50/70+19% TOP	50/70+19% TOP RTFOT		
1,00E-07	84,21	89,97	5,76	0,07
1,00E+00	81,06	76,85	-4,21	-0,05
1,00E+07	15,96	14,73	-1,23	-0,08

Den relativa skillnaden för fasvinklarna ligger generellt under 0,1 vilket tyder på liknande reologiska egenskaper. För den högre frekvensen hos 160/220 och 50/70 + 19% TOP är den relativa skillnaden 0,12, något sämre än resterande värden. Detta kan bero på att fasvinklarna i detta frekvensområde är relativt små och små skillnader i fasvinklar kan ge stora relativa skillnader.

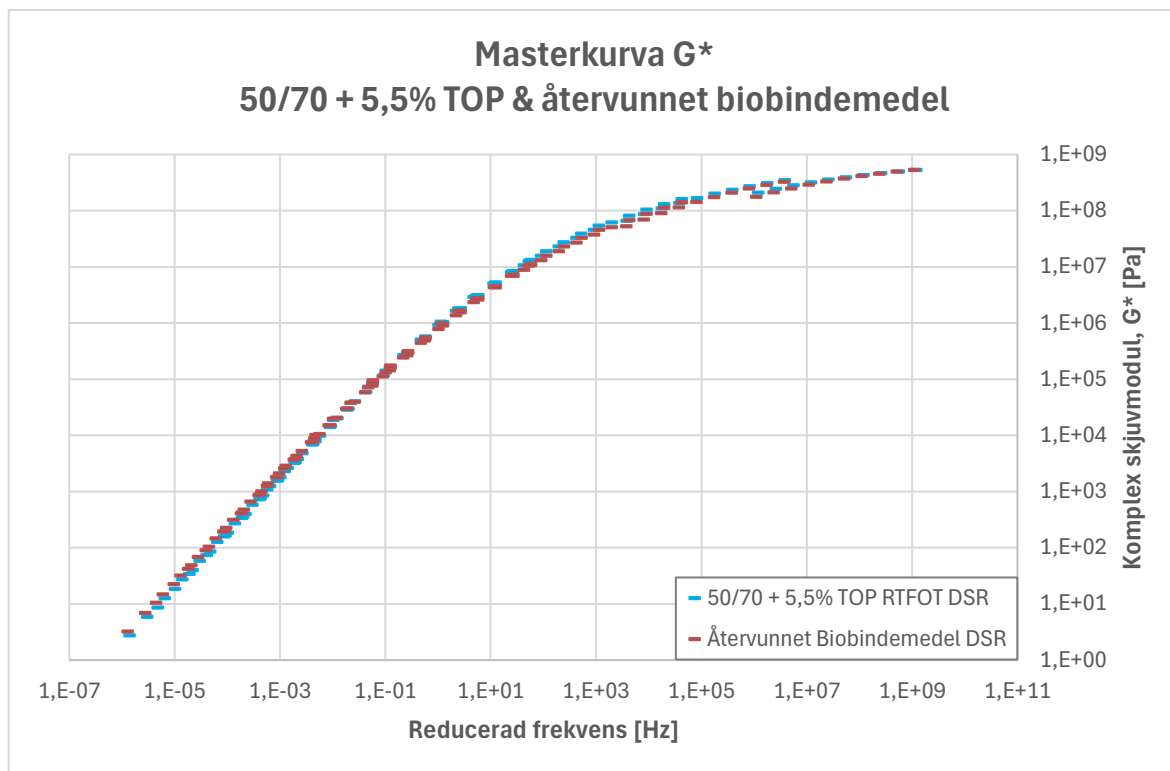
I masterkurvan för 50/70 + 19% TOP syns det tydligt att fasvinklarna i det lägre frekvensområdet avviker från masterkurvan för 160/220. Dessa avvikelser syns även tydligt i blackdiagrammen. Blackdiagrammet för 160/220 visar en jämn kurva medan 50/70 + 19% TOP har spridda punkter ju mer visköst bindemedlet blir. Eftersom inbladningar av TOP påverkar bitumens reologiska egenskaper följer det inte alltid samma kurva som rent bitumen. I de lägre frekvenserna dominerar visköst beteende och TOP förändrar den viskösa delen i bitumen vilket kan vara en förklaring till dessa avvikelser.

Innan åldring överensstämmer fasvinklarna mycket väl för både 70/100 och 50/70 + 5,5% TOP och 160/220 och 50/70 + 19% TOP med samtliga skillnader under 0,02. Innan åldring hade masterkurvan för 50/70 + 19% TOP i lågfrekvensområdet spridda punkter. Efter åldring följer nu hela masterkurvan samma form som rent bitumen. Detta tyder på att åldringen har påverkat bindemedlets viskösa beteende vid låga frekvenser.

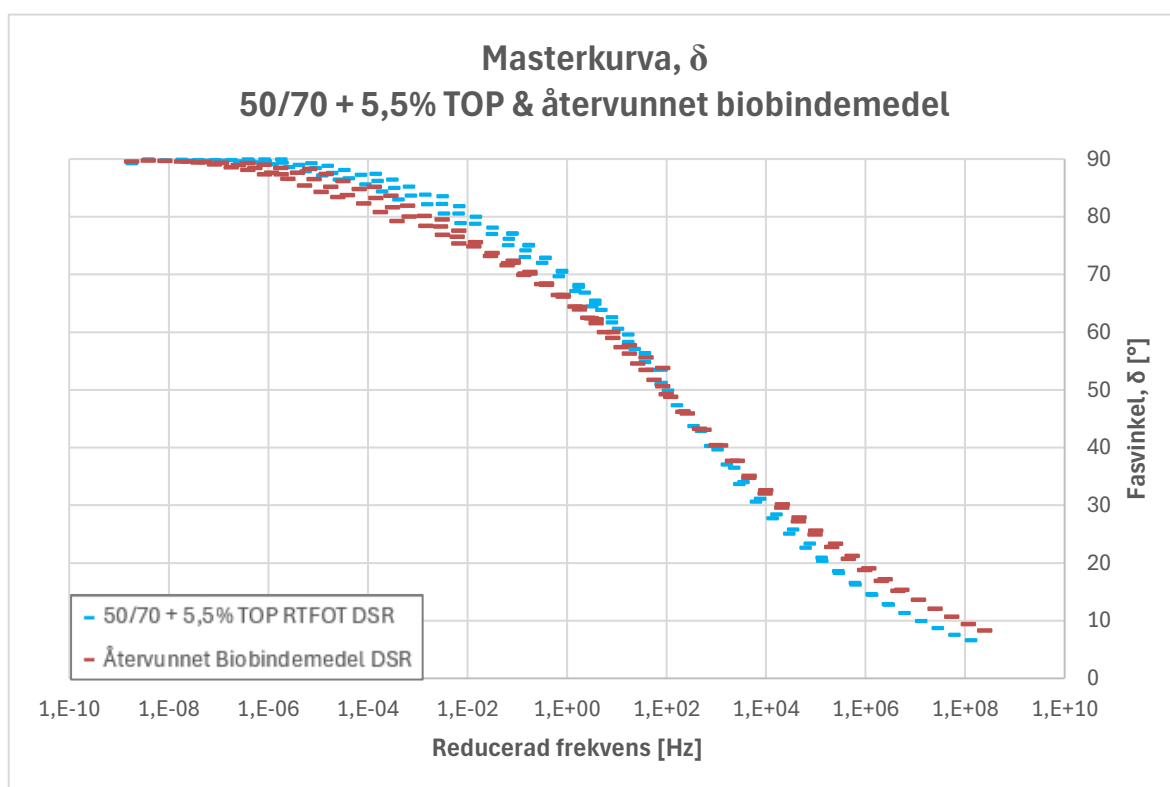
I lågfrekvensområdet är fasvinkeln oförändrad efter åldring för alla bindemedel förutom 50/70 + 19% TOP där fasvinkeln har ökat. Detta beror på avvikelsen bindemedlet hade innan åldring som nu har återställt sig till en jämn kurva. I mellanfrekvensområdet har fasvinkeln minskat för samtliga bindemedel. Detta betyder att de viskoelastiska egenskaperna har förändrats och att materialet är mer elastiskt vid dessa frekvenser. Vid högre frekvenser har fasvinkeln för rent bitumen ökat men minskat för bindemedlen med TOP.

4.3.3 Återvunnet biobindemedel

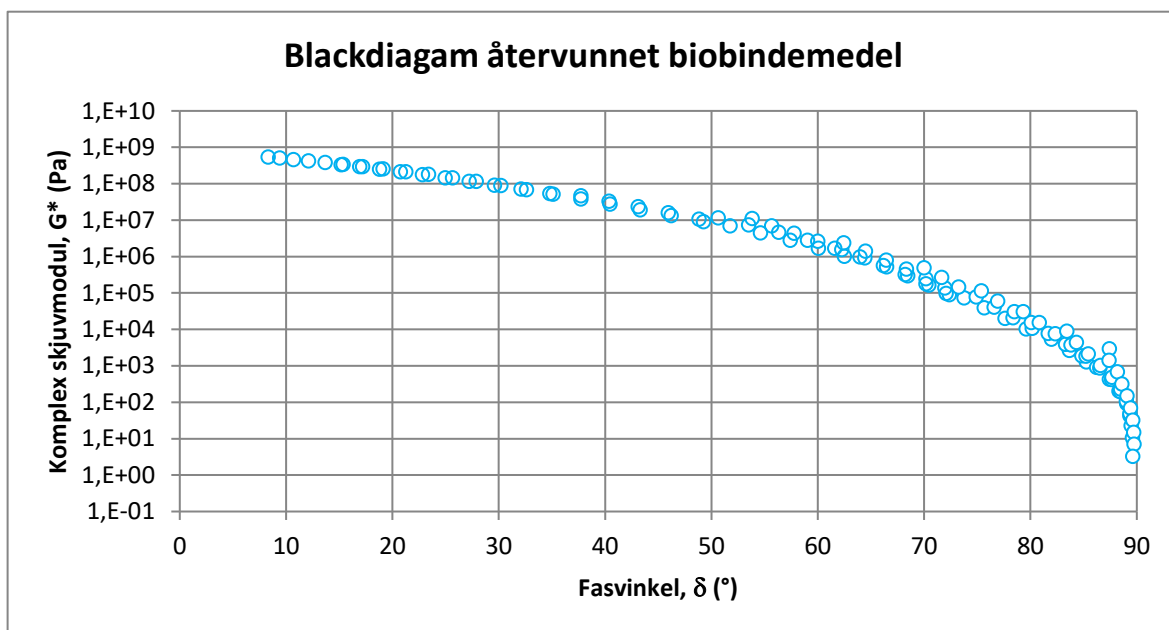
Biobindemedel 50/70 + 5,5% TOP, som genomgått RTFOT, har jämförts med ett återvunnet biobindemedel med egenskaper motsvarande bitumen 70/100. Det återvunna bindemedlet kommer från en gata som asfalterades för mindre än sex månader sedan, vilket innebär att bindemedlet huvudsakligen har genomgått korttidsåldring motsvarande RTFOT. Det återvunna bindemedlet består av nytt bitumen, tallbecksolja och returbitumen. Figur 4-9 och 4-10 visar masterkurvor för G^* respektive fasvinkel för båda bindemedlen. Tabell 4-5 visar skillnader och relativa skillnader mellan bindemedlen. De relativa skillnaderna utgår från 50/70 + 5,5% TOP. Figur 4-11 visar blackdiagrammet för det återvunna biobindemedlet.



Figur 4-9: Masterkurva G^* 50/70 + 5,5% TOP och återvunnet biobindemedel.



Figur 4-10: Masterkurva fasvinkel 50/70 + 5,5% TOP och återvunnet biobindemedel.



Figur 4-11: Blackdiagram för återvunnet biobindemedel.

Tabell 4-5: Skillnader och relativa skillnader mellan 50/70 + 5,5% TOP och återvunnet biobindemedel.

Frekvens [Hz]	G*		ΔG^*	$\Delta G^*/G^*$
	50/70 + 5,5% TOP	Återvunnet biobindemedel		
1,00E-05	1,82E+01	2,36E+01	5,39E+00	0,30
1,00E-03	1,76E+03	2,18E+03	4,20E+02	0,24
1,00E-01	2,59E+11	1,83E+11	7,59E+10	-0,29
1,00E+01	4,61E+06	3,99E+06	6,21E+05	-0,13
1,00E+03	4,90E+07	4,06E+07	8,44E+06	-0,17
1,00E+05	1,76E+08	1,51E+08	2,49E+07	-0,14
1,00E+07	3,12E+08	2,86E+08	2,56E+07	-0,08
	δ		$\Delta \delta$	$\Delta \delta/\delta$
	50/70 + 5,5% TOP	Återvunnet biobindemedel		
1,00E-07	89,84	89,22	-0,61	-0,01
1,00E-05	88,10	85,40	-2,70	-0,03
1,00E-03	83,78	80,12	-3,66	-0,04
1,00E-01	75,98	71,64	-4,33	-0,06
1,00E+01	61,23	58,93	-2,30	-0,04
1,00E+03	39,87	40,45	0,58	0,01
1,00E+05	22,40	25,63	3,24	0,14
1,00E+07	10,64	14,10	3,46	0,33

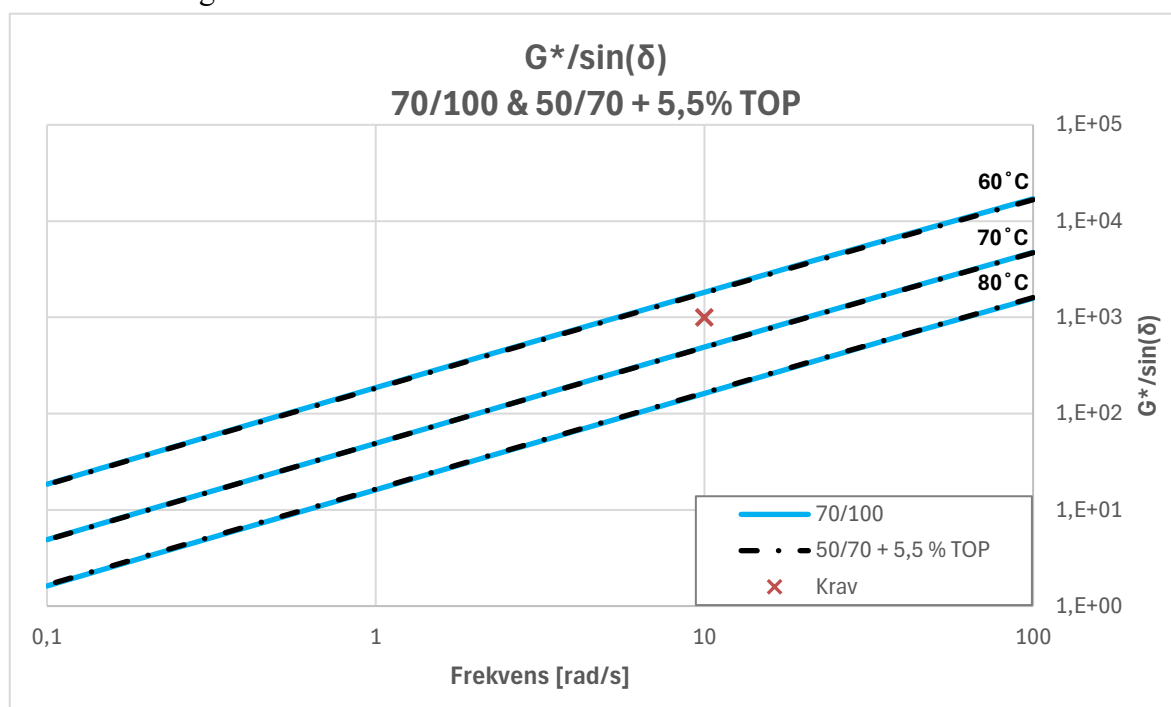
Den komplexa skjuvmodulen, G^* , varierar i överlappning mellan de två bindemedlen. I de lägre frekvenserna är överlappningen sämre men blir bättre med ökande frekvens. Det återvunna bindemedlet har inte helt känd sammansättning och det är därför svårt att göra en direkt jämförelse. Med hänsyn till att bindemedlen består av olika material bedöms passformen ändå vara god, trots de observerade skillnaderna.

Fasvinkel visar god passform i de lägre och mellanfrekvenser med relativa skillnader upp till 0,06. I de högre frekvenserna visar de sämre passform med relativa skillnader på 0,14 och 0,33.

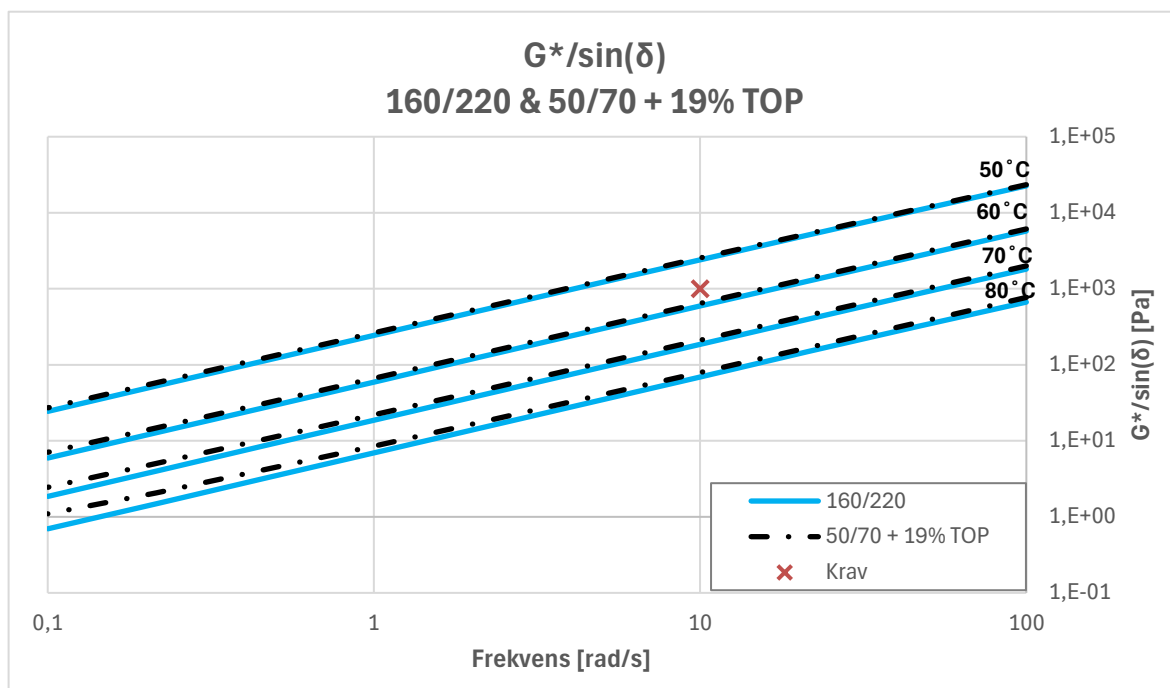
Blackdiagrammet visar en jämn kurva vilket indikerar att tillsatsen av tallbecksolja inte har påverkat bitumens viskoelastiska egenskaper i någon större utsträckning eftersom blackdiagram för oblandat bitumen normalt kännetecknas av en jämn kurva.

4.4 Spårbildning

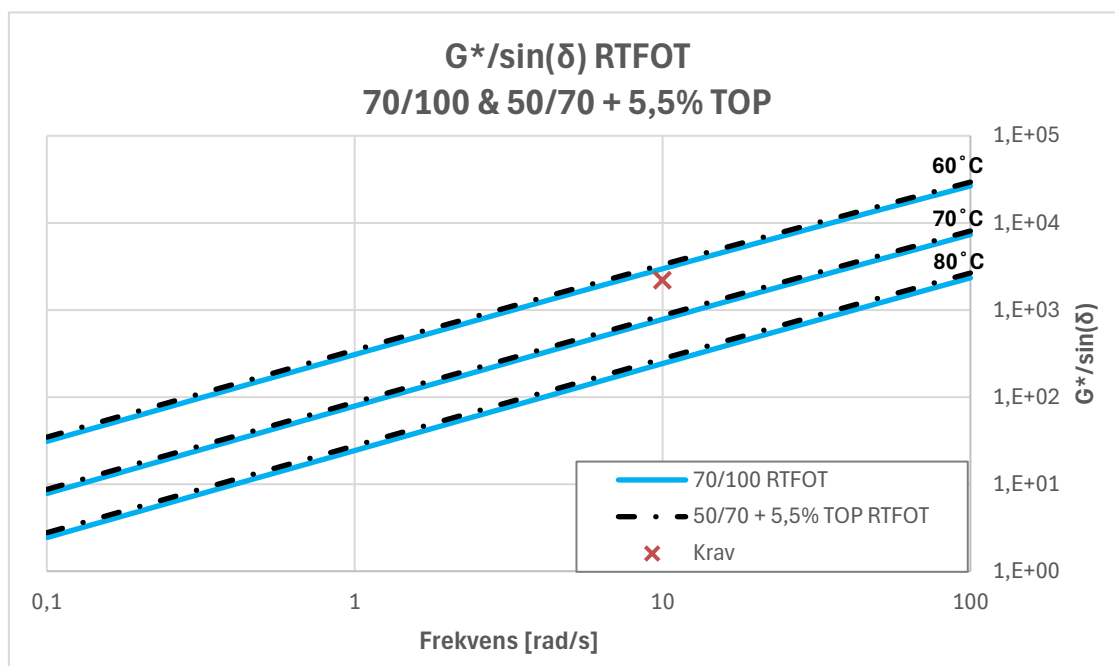
Parametern $G^*/\sin(\delta)$ har tagits fram för samtliga bindemedel för att kunna bedöma bindemedlets beständighet mot spårbildning. Figur 4-12, 4-13, 4-14 och 4-15 visar $G^*/\sin(\delta)$ för 70/100, 50/7 + 5,5% TOP, 160/220 och 50/70 + 19% TOP innan samt efter RTFOT vid temperaturerna 60°C, 70°C och 80°C, samt 50°C för 160/220 och 50/70+19% TOP, då det är vid de högre temperaturerna som spårbildning är intressant. Det röda krysset visar var kravet är för minst godkänt värde på $G^*/\sin(\delta)$ vid 10 rad/s. Innan RTFOT är kravet 1 kPa och efter 2,2 kPa. Kravet används för att se vid vilken temperatur samtliga bindemedel uppnår kravet, där en högre temperatur indikerar ett bättre motstånd mot spårbildning. Tabell 4-6 visar vid vilken maxtemperatur respektive bindemedel uppfyller kraven. Tabell 4-7 visar den relativa skillnaden mellan biobindemedlet och dess referensbitumen. De relativa skillnaderna utgår från referensbitumen.



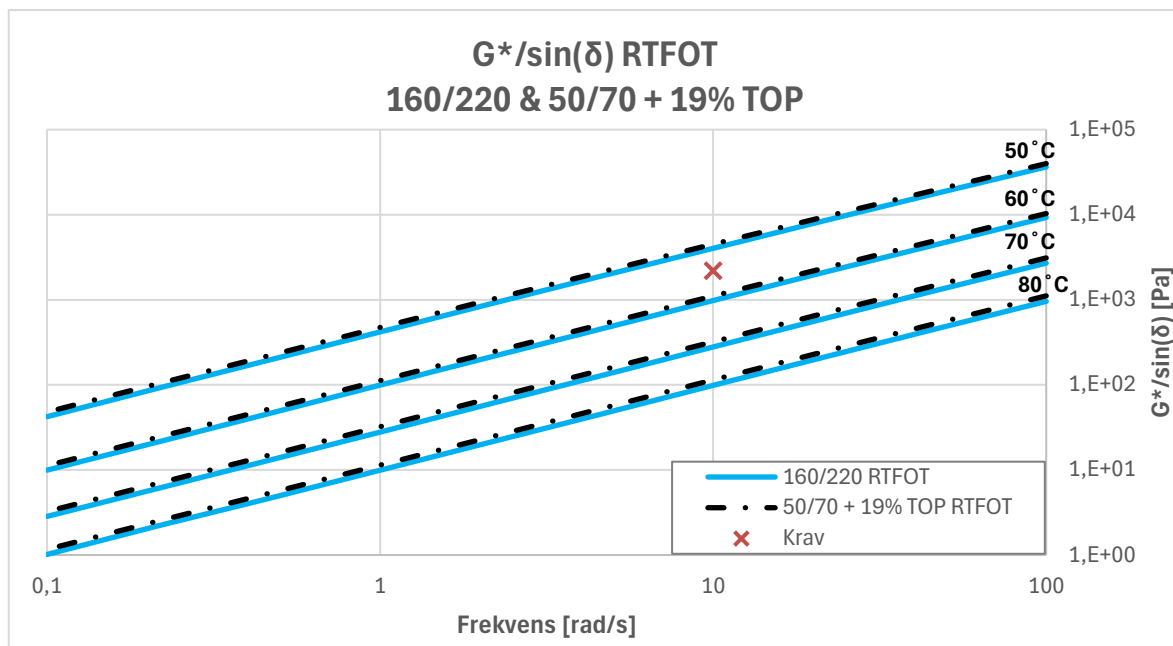
Figur 4-12: $G^*/\sin(\delta)$ för 70/100 och 50/70+5,5% TOP med aktuellt krav på 1 kPa.



Figur 4-13: $G^*/\sin(\delta)$ för 160/220 och 50/70+19% TOP med aktuellt krav på 1 kPa.



Figur 4-14: $G^*/\sin(\delta)$ för 70/100 och 50/70+5,5% TOP efter RTFOT med aktuellt krav 2,2 kPa.



Figur 4-15: $G^*/\sin(\delta)$ för 160/220 och 50/70+19% TOP efter RTFOT med aktuellt krav på 2,2 kPa.

Tabell 4-6: Maxtemperatur för uppnått krav på 1 kPa respektive 2,2 kPa för samtliga bindemedel.

Bindemedel	Temperatur [°C]	Krav [kPa]
70/100	66	1
50/70 + 5,5% TOP	66	1
160/200	58	1
50/70 + 19% TOP	58	1
70/100 RTFOT	64	2,2
50/70 + 5,5% TOP RTFOT	65	2,2
160/220 RTFOT	56	2,2
50/70 + 19% TOP RTFOT	57	2,2

Tabell 4-7: Relativ skillnad, $G^*/\sin(\delta)$, mellan samtliga biobindemedel och dess referensbitumen innan och efter RTFOT.

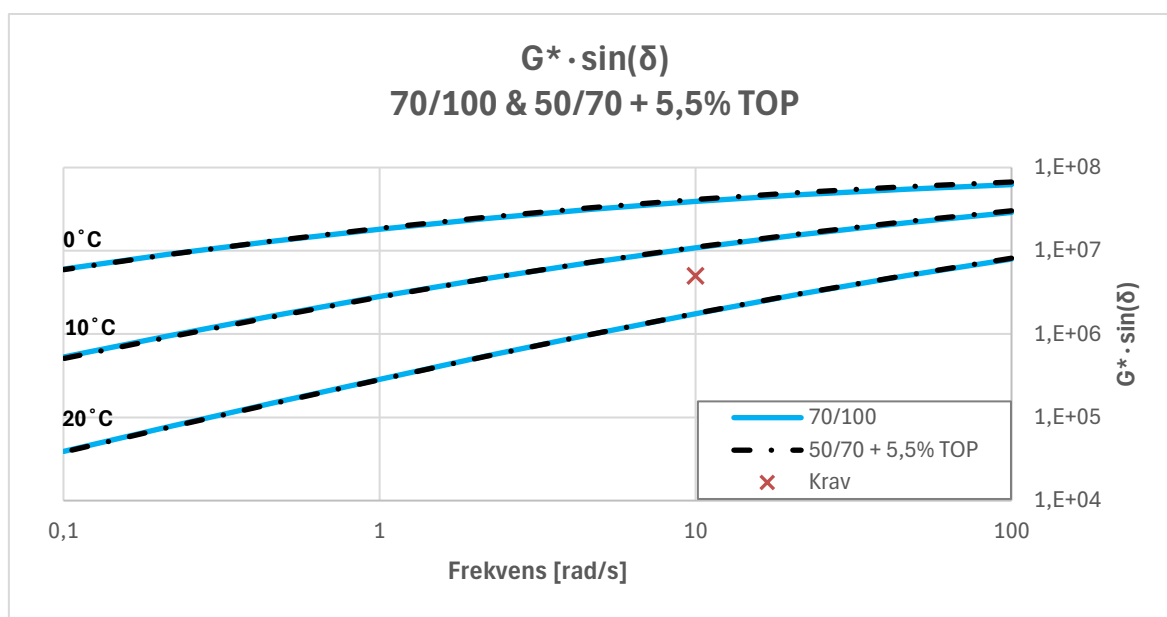
Frekvens [rad/s]	$\Delta(G^*/\sin(\delta))/(G^*/\sin(\delta))$							
	70/100 och 50/70 + 5,5% TOP							
	Oåldrat				Åldrat			
	50°C	60°C	70°C	80°C	50°C	60°C	70°C	80°C
0,1	-	-0,01	0,00	0,02	-	0,12	0,11	0,14
1	-	-0,01	0,00	0,01	-	0,12	0,11	0,14
10	-	-0,02	-0,01	0,01	-	0,12	0,11	0,14
100	-	-0,02	-0,01	0,02	-	0,11	0,10	0,14
160/220 och 50/70 + 19% TOP								
	Oåldrat				Åldrat			
0,1	0,11	0,19	0,32	0,58	0,13	0,13	0,14	0,15
1	0,08	0,12	0,18	0,22	0,12	0,13	0,16	0,15
10	0,06	0,09	0,13	0,14	0,11	0,12	0,16	0,16
100	0,04	0,07	0,10	0,15	0,10	0,11	0,15	0,16

Innan åldring uppvisar 70/100 och 50/70 + 5,5% TOP mycket liknande egenskaper, den relativa skillnaden är maximalt 0,02 och båda uppfyller kravet på 1 kPa vid temperaturer under 66°C. Efter åldring med RTFOT har värdet på $G^*/\sin(\delta)$ ökat mer för 50/70 + 5,5% TOP än för 70/100, biobindemedlet är efter åldring 0,10-0,14 gånger större än bitumen. Maximal temperatur är efter åldring 64°C för 70/100 och 65°C för 50/70 + 5,5% TOP. Detta indikerar att biobindemedlet står emot deformationer något bättre.

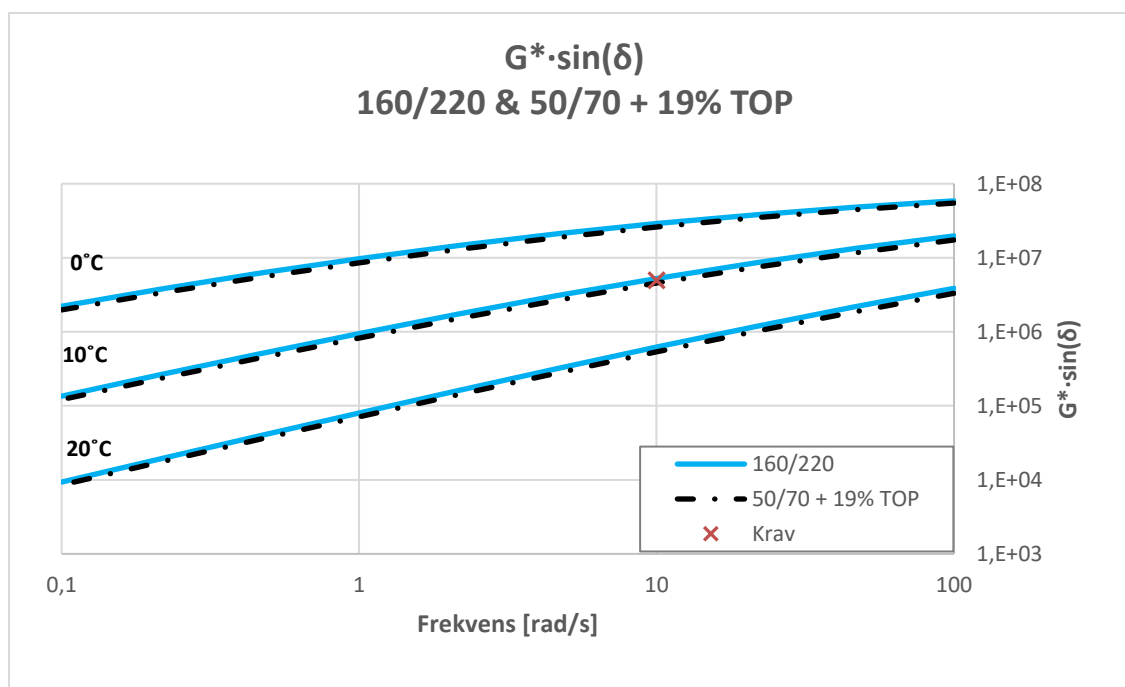
Innan åldring skiljer sig värdena på $G^*/\sin(\delta)$ tydligt för de 160/220 och 50/70+19% TOP i 70°C och 80°C för frekvenser under 1 rad/s med relativa skillnader mellan 0,18 och 0,58. För temperaturer på 50°C och 60°C visar bindemedlen mer liknande egenskaper vid frekvenser över 10 rad/s, i detta område är den relativa skillnaden under 0,1. Båda bindemedlen uppnår kravet på 1 kPa under 58°C. Efter åldring minskar den relativa skillnaden i frekvenser under 0,1 rad/s och de relativa skillnaderna blir jämlika över hela frekvensintervallet, 50/70+19% har mellan 0,1 och 0,16 högre värden. Detta tillsammans med att efter åldring klarar 160/220 kravet på 2,2 kPa vid 56°C och 50/70 + 19% TOP vid 57°C indikerar att biobindemedlet har något bättre motstånd mot spårbildning.

4.5 Utmattning

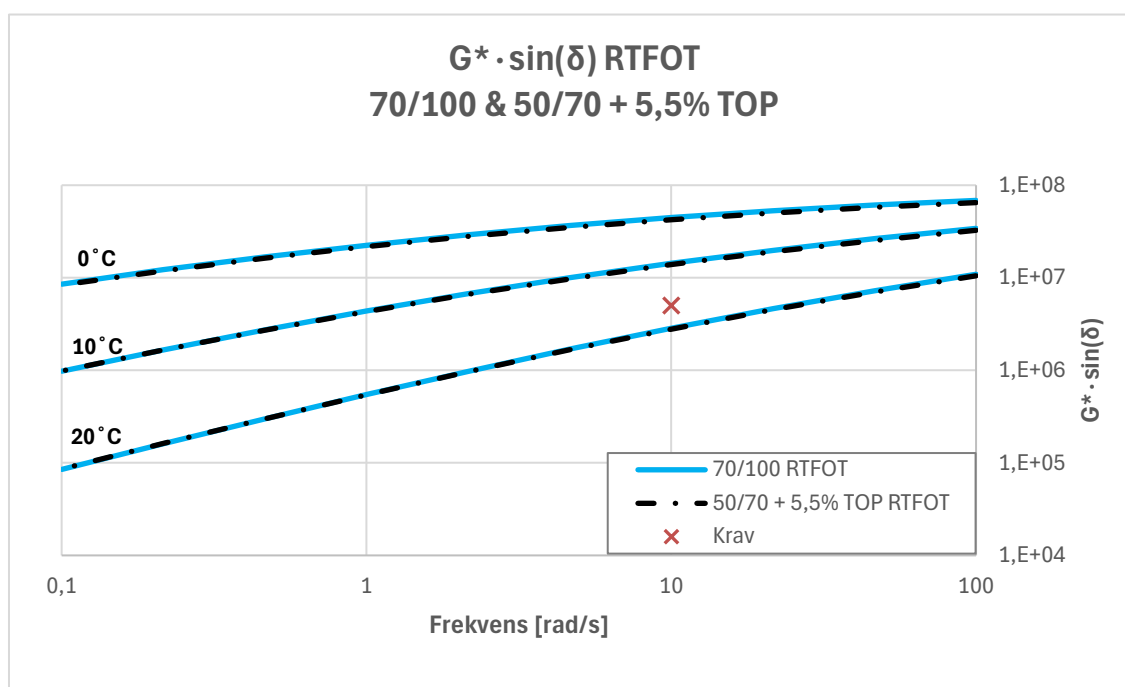
Parametern $G^*\sin(\delta)$ har tagits fram för samtliga bindemedel för att kunna bedöma bindemedlets risk för utmattningsprickor. Figur 4-16, 4-17, 4-18 och 4-19 visar parametern för 70/100, 50/70+5,5% TOP, 160/220 och 50/7+19% TOP innan och efter RTFOT vid temperaturerna 0°C, 10°C och 20°C, då det är de lägre temperaturerna som är intressanta vid sprickor. Kravet för parametern är maximalt 5000 kPa vid 10 rad/s, som markeras med rött kryss. Detta krav används för att se vid vilken temperatur samtliga bindemedel uppnår kravet, där en lägre temperatur indikerar ett bättre motstånd mot utmattning. Kravet utgår från långtidsåldring, vilket inte har undersökts i denna studie, men figurerna visar en indikation på bindemedlens beteende. Tabell 4-8 visar vid vilken temperatur som samtliga bindemedlen uppnår kravet. Tabell 4-9 visar den relativa skillnaden mellan biobindemedlen och dess referensbitumen vid frekvenserna 0,1, 1, 10 och 100 rad/s. De relativa skillnaderna utgår från referensbitumen.



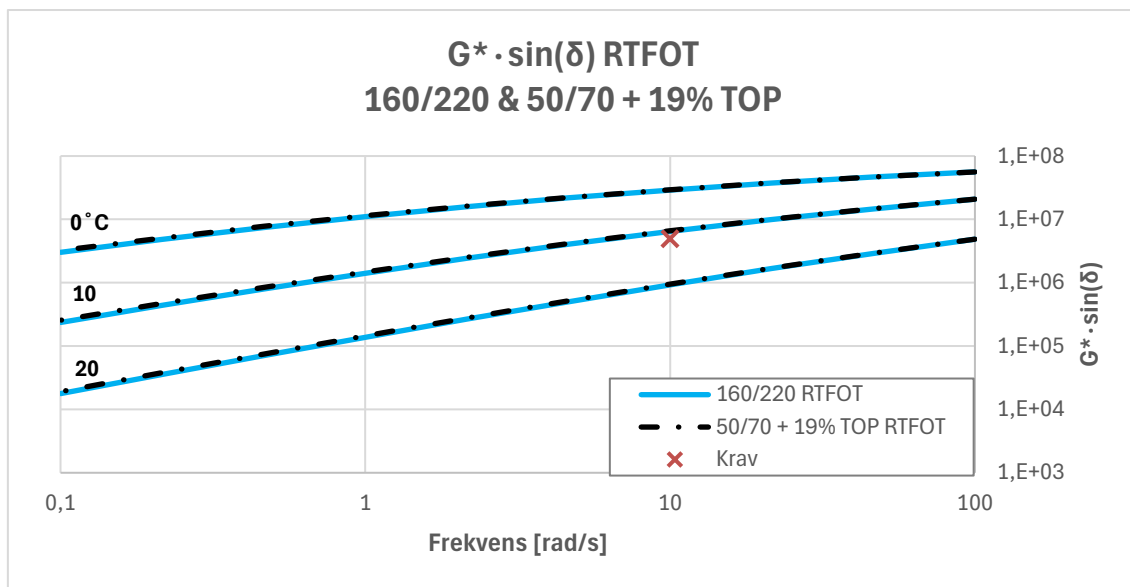
Figur 4-16: $G^*\sin(\delta)$ för 70/100 och 50/70+5,5% TOP med aktuellt krav på 5000 kPa.



Figur 4-18: $G^* \cdot \sin(\delta)$ för 160/220 och 50/70+19% TOP med aktuellt krav på 5000 kPa.



Figur 4-17: $G^* \cdot \sin(\delta)$ för 70/100 och 50/70+5,5% efter TOP efter RTFOT med aktuellt krav på 5000 kPa.



Figur 4-19: $G^* \cdot \sin(\delta)$ för 160/220 och 50/70+19% TOP med aktuellt krav på 5000 kPa.

Tabell 4-8: Minimitemperatur för uppnått krav på 5000 kPa för samtliga bindemedel.

Bindemedel	Temperatur [°C]	Krav [kPa]
70/100	16	5000
50/70+5,5% TOP	17	5000
160/200	11	5000
50/70 + 19% TOP	10	5000
70/100 RTFOT	18	5000
50/70+5,5% TOP RTFOT	18	5000
160/220 RTFOT	13	5000
50/70+19% TOP RTFOT	13	5000

Tabell 4-9: Relativ skillnad, $G^* \cdot \sin(\delta)$, mellan samtliga biobindemedel och dess referensbitumen innan och efter RTFOT.

$\Delta(G^* \cdot \sin(\delta)) / (G^* \cdot \sin(\delta))$						
70/100 och 50/70 + 5,5% TOP						
Frekvens [rad/s]	Oåldrat			Åldrat		
	0°C	10°C	20°C	0°C	10°C	20°C
0,1	-0,02	-0,04	-0,02	-0,02	0,00	0,01
1	0,02	-0,02	-0,01	-0,04	-0,02	0,00
10	0,06	0,02	0,00	-0,05	-0,03	-0,02
100	0,08	0,05	0,02	-0,05	-0,05	-0,04
160/220 och 50/70 + 19% TOP						
Frekvens [rad/s]	Oåldrat			Åldrat		
	0°C	10°C	20°C	0°C	10°C	20°C
0,1	-0,11	-0,10	-0,09	0,07	0,08	0,07
1	-0,12	-0,13	-0,11	0,03	0,05	0,05
10	-0,10	-0,14	-0,14	0,01	0,02	0,02
100	-0,07	-0,12	-0,14	0,00	0,00	0,00

Innan åldring uppfyller bindemedlen 70/100 och 50/70 + 5,5% TOP kravet på maximum 5000 kPa vid 16°C respektive 17°C. Båda bindemedel uppnår en minimumtemperatur på 18°C efter åldring. Innan åldring är den relativa skillnaden maximalt 0,08 och efter åldring är den relativa skillnaden som mest 0,05. Den största relativa skillnaden mellan bindemedlen observeras vid 0°C samt vid högre frekvenser. Innan åldring har 50/70 + 5,5% TOP lägre värden vid lägre frekvenser och högre temperatur men har högre värden än 70/100 vid högre frekvenser och lägre temperaturer. Det indikerar att de har olika bra motstånd mot sprickor beroende på temperatur och frekvens. Efter åldring uppnår 50/70 + 5,5% TOP generellt lägre värden vilket tyder på bättre motstånd mot utmattning, däremot är skillnaderna små.

Innan åldring uppfyller 50/70 + 19% TOP kravet på maximum 5000 kPa vid 10°C och dess referensbitumen 160/220 vid 11°C. Båda bindemedel uppnår en minimumtemperatur på 13°C efter åldring. Innan åldring har 50/70 + 19% TOP lägre värden på $G^* \cdot \sin(\delta)$ än 160/220 med en relativ skillnad ner till -0,14. Efter åldring har värdet på $G^* \cdot \sin(\delta)$ ökat mer för biobindemedlet och får därmed ett högre värde på parametern än 160/220 med en relativ skillnad mellan 0 och 0,08. Detta kan indikera att 50/70 + 19% TOP har sämre utmattningsmotstånd än 160/220. Eftersom kravet gäller för långtidsåldring och detta inte testats går det inte att veta hur de beter sig i längden.

5 Diskussion och slutsatser

5.1 Resultatdiskussion

5.1.1 Mjukpunkt

I enlighet med tidigare studier visar resultatet att mjukpunkten minskar med ökad halt TOP (Zhang et al. 2025; Zhu et al. 2026). För proverna med högre halt TOP observerades dock en större spridning i temperaturerna och det krävdes fler tester. Exempelvis varierade mjukpunkten för blandningar med 16% TOP mellan 36°C och 43°C. Detta kan bero på att en högre halt av olja skapar ett inhomogent förhållande som försvårar mätningen.

Resultatet från Kula & Ring visade att inblandning av 5,7% TOP i bitumen 50/70 gav en motsvarighet till mjukpunkten för bitumen 70/100. Detta är något högre än resultatet från tidigare studier där motsvarande värde var 5% (Zhu et al. 2024; Zhu et al. 2025; Zhu et al. 2026). Denna skillnad kan bero på att materialens sammansättning inte är identiska. Det är generellt svårt att uppnå produkter med exakt samma materialegenskaper, eftersom dessa påverkas av flera faktorer såsom ursprung och tillverkningsprocess. Exempelvis kan bitumen 50/70 i denna studie ha varit något hårdare eller äldre. Klassificeringen 50/70 innebär dessutom ett intervall där materialen inom klassen inte nödvändigtvis har identiska penetrationsvärden och mjukpunkter.

Ursprung av tallbecksolja har även en stor påverkan då den kan variera i kemisk struktur. I denna studie är oljans ursprung okänt. Tallbecksoljans kemiska sammansättning påverkar även vilken mjukgörande effekt den har, till exempel bidrar mer fettsyror till mjukare beteende (Cañete Vela et al. 2023). Då resultatet gav en högre procent än tidigare studier kan det bero på att talloljan hade lägre andel fettsyror och därmed gav en lägre mjukgörande effekt. Eftersom den kemiska sammansättningen inte är känd kan dock inte detta fastställas.

Vidare visade resultatet från Kula & Ring att 18,7% TOP inblandat i bitumen 50/70 motsvarade mjukpunkten för bitumen 160/220, vilket är mindre än tidigare studier som haft TOP-halter på 21% för att efterlikna bitumen 160/220 (Zhu et al. 2024; Zhu et al. 2025; Zhu et al. 2026). Även här tyder det på att andelen TOP beror på ursprung av bitumen och tallbecksolja. Eftersom det krävdes mer TOP för att uppnå 70/100 men mindre TOP för att uppnå 160/220 än tidigare studier finns det inget tydligt samband som påvisar att aktuell tallbecksolja har lägre mjukgörande effekt. Efter vald TOP-halt har båda biobindemedel något högre mjukpunkt än deras referensbindemedel, 50/70 + 5,5% TOP ligger 0,5°C över 70/100 och 50/70 + 19% TOP ligger 0,7°C över 160/220. Skillnaden är dock liten och bör sättas i relation till att Kula & Ring metoden kan ge viss spridning mellan olika prover av samma bindemedel. Den uppmätta skillnaden bedöms därför inte vara särskilt stor och kan delvis bero på metodens variation. Att biobindemedlet inte får exakt samma mjukpunkt som referensbitumen kan även bero på att mängden TOP bestämdes utifrån både mjukpunkt och komplex skjuvmodul. Även variationer i provpreparering kan ha skett då de nya blandningarna gjordes vid en annan tidpunkt.

Efter åldring med RTFOT ökade mjukpunkten för samtliga bindemedel vilket påvisar ett styvare material. Detta stämmer överens med teorin om att bitumen blir hårdare och styvare vid oxidation (Read & Whiteoak 2003). I båda fall har biobindemedlets mjukpunkt ökat mer än referensbindemedlet vilket tyder på att de är mer känsliga för korttidsåldring. Detta avviker från tidigare studier som indikerar att biobindemedel har lägre mjukpunktsökning

än sina referensbindemedel (Zhu et al. 2025). Denna avvikelse kan bero på att tallbecksoljan som användes i denna studie kan ha innehållit en större andel aromater och hartser vilket kan leda till en snabbare oxidation. Däremot var skillnaden i mjukpunktsökning mindre mellan de två biobindelmedlen än mellan deras respektive referensbitumen. Bitumen 160/220 var tydligt mer känslig för åldring än bitumen 70/100, med en ökning på 5°C i jämförelse med 4,5°C. Det påvisar dess olika egenskaper och hur de påverkas olika av åldring. 50/70 + 19% TOP ökade med 5,2° C i jämförelse med 50/70 + 5,5% som ökade med 5,1°C. Detta indikerar att biobindelmedlen påverkas lika av åldring oberoende av TOP-halt, samt att en mättnadseffekt uppstår efter en viss tillsatsnivå. Vid mindre andel TOP ger det en negativ effekt på bindemedlets åldrande då det åldras mer än referensbitumen men vid högre halter avtar denna effekt och ger inte samma proportionella förändring.

5.1.2 Val av halt TOP

Både utifrån mjukpunkt och komplex skjuvmodul gavs ett liknande resultat för optimal mängd TOP. För att likna 70/100 gav Kula & Ring en optimal halt på 5,7% medan DSR gav ett lägre resultat på 5,4%. För 160/220 var det däremot tvärtom, Kula & Ring gav ett resultat på 18,7% och DSR ett högre värde på 19,2%. Detta tyder på att det inte finns en tydlig koppling mellan metoderna utan det varierar för material och förändringar i halt av TOP. Skillnaderna tyder på att TOP påverkar materialets struktur på ett komplext sätt och egenskaper som mjukpunkt och komplex skjuvmodul påverkas olika beroende på TOP-halt. Metoderna mäter även olika egenskaper, Kula & Ring metoden mäter mjukpunkt medan DSR fokuserar på viskoelastiska egenskaper vilket kan förklara dessa avvikelser.

5.1.3 Masterkurvor

Masterkurvorna visar den komplexa skjuvmodulen respektive fasvinkel och den reducerade frekvensen från DSR. För den komplexa skjuvmodulen sammanföll masterkurvorna för biobindelmedlen väl med deras referensbindemedel, både i oåldrat och åldrat tillstånd, vilket tyder på liknande beteende och reologiska egenskaper vid frekvens- och temperaturskillnader. Detta sammanfaller väl med tidigare studier som säger att vid korttidsåldring är den komplexa skjuvmodulen liknande för biobindelmedel och dess referensbitumen (Zhu et al. 2025).

De största skillnaderna i komplex skjuvmodul visade sig i de lägre frekvenserna mellan oåldrat 160/220 och 50/70 + 19% TOP, med en relativ skillnad på 0,25. Vid lägre frekvenser beter sig materialet mer visköst och den långsamma belastningen ger materialet mer tid att utveckla deformationer. Deformationen styrs av materialets kemiska sammansättning vilket gör att skillnaderna mellan bindemedlens sammansättning framträder tydligare. Vid högre frekvenser uppvisar materialet i stället ett mer elastiskt beteende, där deformationen främst styrs av styvheten snarare än den inre friktionen, vilket inte har en lika tydlig variation.

För 50/70 + 19% TOP avviker fasvinkeln i det lägre frekvensområdet i jämförelse med 160/220 innan RTFOT, detta visas också i blackdiagrammen där kurvan för biobindelmedlet inte följer en typisk kurva för rent bitumen. Detta säger emot tidigare forskning som visar att blackdiagram för biobindelmedel följer en jämn kurva (Zhang et al. 2025). Detta indikerar att TOP i större utsträckning påverkar bindemedlets viskösa egenskaper än de elastiska, då skillnaderna framträder tydligare där materialet uppvisar ett visköst beteende. Efter åldring med RTFOT minskar denna avvikelse vilket tyder på att de initiala skillnaderna mellan bindemedlen delvis jämnas ut till följd av åldringsprocessen. Detta kan bero på att åldringen orsakar oxidation och förlust av lättflyktiga komponenter, som utgör den mer flytande delen, vilket ger en mer homogen struktur i biobindelmedlet.

Resultatet visade att biobindemedlet innan åldring hade en lägre fasvinkel i höga frekvenser än deras referensbitumen vilket indikerar ett mer elastiskt beteende. Den snabba belastningen begränsar materialets möjlighet att utveckla viskösa deformationer och responsten styrs av bindemedlets styvhet och elastiska återhämtning. Detta kan tyda på att tallbecksoljan ger en struktur som ger ökad elastisk respons vid korta belastningar. Ytterligare kan det betyda att tallbecksoljans effekt inte syns vid höga frekvenserna, utan att det är den hårdare bitumen som dominerar och ger bindemedlet mer elastiska egenskaper. I de lägre frekvenserna visade en lägre halt TOP samma fasvinkel men en högre halt TOP ledde till en fasvinkel som var högre än referensbitumen. Vid lägre frekvenser dominerar visköst beteende och materialet hinner deformeras under längre tid vilket gör att den kemiska sammansättningen påverkar resultatet. TOP påverkar bindemedlets viskösa egenskaper men en låg halt verkar inte förändra balansen mellan visköst och elastiskt beteende. Däremot kan en högre halt TOP påverka balansen och ge ett mjukare bindemedel som får ett mer visköst beteende och därmed en högre fasvinkel. I mellanfrekvenserna observerades liknande fasvinkel vilket tyder på att balansen mellan viskösa och elastiska egenskaper hamnar i ett jämnsläge där bindemedlet får samma egenskaper.

Efter åldring visar däremot samtliga biobindemedel mycket liknande fasvinkel som dess referensbitumen vilket tyder på att åldringsprocessen reducerade skillnaderna i viskoelastiskt beteende. Oxidation och förlust av lättare komponenter kan ha förändrat bindemedlets struktur vilket resulterade i mer likartad balans mellan elastiska och viskösa egenskaper.

Tidigare studier visar att biobindemedel har högre fasvinkel än referensbitumen både innan och efter åldring (Zhu et al. 2025; Zhu et al. 2026). Det finns inget tydligt samband till tidigare studier, vilket kan bero på variation i den kemiska sammansättningen hos TOP.

Vid höga frekvenser observerades en ökning av fasvinkel för det rena bitumenet efter RTFOT- åldring, vilket avviker från det generellt förväntade beteendet där fasvinkeln minskar till följd av ökad elasticitet. Detta kan bero på osäkerheter kopplade till extrapolering i masterkurvornas högfrekvensområde.

5.1.4 Spårbildning/ Utmattnings

Resultatet visar att både 50/70 + 5,5% TOP och 50/70 + 19% TOP står emot deformationer bättre än deras referensbitumen efter korttidsåldring. Detta skiljer sig från tidigare studier som indikerar att bindemedel med TOP ofta har sämre motstånd mot spårbildning vid höga temperaturer (Zhang et al. 2025). En möjlig förklaring till denna är att effekten av TOP är starkt beroende av inblandningshalt och hur TOP påverkar bitumens kemiska struktur. Det kan också bero på att en större del av flyktiga ämnen från TOP har förlorats vid åldring och en större andel av den hårdare bitumen 50/70 är kvar.

Tidigare studier visar att det skiljer sig åt i utmattningsmotstånd för bitumen och deras respektive biobindemedel. Resultatet visar att bindemedel med TOP, beroende på studie, kan ha både bättre, lika eller sämre motstånd mot utmattnings. De studier som visar att TOP bindemedel har sämre utmattningssegenskaper betonar att det främst gäller för bindemedel med en hög halt TOP (Zhu et al. 2024; Zhu et al. 2025). I denna studie visade resultatet att 50/70 + 19% TOP kan ha något sämre beständighet mot utmattnings även om skillnaderna var små ($<0,08$). För 50/70 + 5,5% visade det generellt för bättre utmattningssegenskaper men även här är skillnaderna små ($<0,05$). Dessa resultat baseras även på korttidsåldring (RTFOT) och inte långtidsåldring (PAV) vilket gör att det inte går och veta hur deras faktiska egenskaper kommer förändras av PAV och därmed hur de står emot utmattnings.

Biobindemedlen visar bättre motstånd mot spårbildning vilket borde indikera att det har sämre motstånd mot utmattning, eftersom materialet blir mindre flexibelt och mer sprickbenäget. Detta är fallet för 50/70 + 19% TOP men för 50/70 + 5,5% TOP visar resultatet att det står emot utmattning bättre än bitumen 70/100. Detta kan indikera att en låg halt TOP ger en gynnsam balans mellan styvhet och flexibilitet. Det tyder på att bindemedlet kan bli tillräckligt styvt för att motstå permanenta deformationer, samtidigt som det behåller en tillräcklig elasticitet för att motstå sprickor. En annan möjlig förklaring är att långtidsåldring faktiskt inte är gjord på bindemedlen och kunskap om hur bindemedlens egenskaper förändras över lång tid saknas.

Resultatet på spår- och sprickbildning är dock inget som kan översättas direkt till verkligheten utan bara en indikation på bindemedlets potentiella egenskaper. Hur vägen faktiskt kommer utveckla spår och utmattningssprickor beror på andra faktorer som stenmaterial, trafikbelastning och klimat.

5.1.5 Återvunnet biobindemedel

Återvunnet biobindemedel med egenskaper som bitumen 70/100 är analyserat. Detta bindemedel har tagits från en gata som asfalterades för mindre än sex månader sedan, vilket innebär att den har genomgått en korttidsåldring motsvarande RTFOT. Resultaten från DSR-mätningarna visar att bindemedel innehållande tallbecksolja i praktiken uppvisar ett reologisk beteende som i stor utsträckning överensstämmer med konventionellt bitumen och biobindemedel åldrade i labb. Masterkurvorna för den komplexa skjuvmodulen för det återvunna biobindemedlet och RTFOT åldrat 50/70 + 5,5% TOP följer samma kurva men visar vissa skillnader i värden, framför allt i de lägre frekvenserna. Den relativa skillnaden för komplex skjuvmodul är upp till 0,3, vilket kan anses som högt. Detta kan delvis förklaras av att det återvunna biobindemedlet har en okänd sammansättning vilket försvårar en direkt jämförelse. Resultaten för fasvinkel visar på god överensstämmelse i låga och medelhöga frekvenser medan större avvikelser kan ses i de högre frekvenserna. Masterkurvorna följer formen för konventionellt bitumen vilket tyder på att bindemedlens viskoelastiska egenskaper i huvudsak bibehålls trots tillsatsen av tallbecksolja.

Detta stöds ytterligare av blackdiagrammet för det återvunna biobindemedlet som visar en kontinuerlig kurva vilket är karaktäristiskt för konventionellt bitumen. Resultaten tyder därför på att biobindemedel med tallbecksolja fungerar i praktisk tillämpning och behåller ett reologiskt beteende som liknar traditionellt bitumen även efter asfaltproduktion och utläggning. Detta stämmer väl överens med tidigare studier som också visar på att blackdiagram för biobindemedel följer samma kurva som för rent bitumen (Zhang et al. 2025).

Utifrån detta bedöms likheten vara god och att biobindemedlet beter sig liknande både vid verklig korttidsåldring och simulerad åldrig genom RTFOT.

5.2 Metoddiskussion

Både Kula & Ring och DSR gav liknande resultat för optimal halt TOP, men små skillnader kunde observeras. Kula & Ring metoden analyserar främst bindemedlets temperaturkänslighet vid högre temperaturer medan DSR analyserar de viskoelastiska egenskaperna över ett större spektrum och därmed ger en mer detaljerad bild av materialets beteende. DSR kan därför anses vara en mer avancerad metod som är mer känslig för förändringar i materialets struktur och deformationsegenskaper. DSR metoden är dessutom tekniskt

avancerad och beroende av fungerande programvara, vilket däremot under vissa tillfällen ledde till avbrott i programmet som inte kunde kontrolleras. Samtidigt är Kula & Ring en enklare och mer etablerad metod för klassificering av bindemedel. Valet av metod påverkar resultatet eftersom de fokuserar på olika aspekter av materialets beteende. För att försöka ta hänsyn till flera olika aspekter användes därför en kombination av resultaten från båda metoderna. På så sätt kunde både bindemedlets temperaturrelaterade egenskaper och dess viskoelastiska beteende beaktas vid bedömning av optimal TOP-halt.

Flera felkällor kan ha påverkat resultaten i studien. För att uppnå en homogen blandning av proverna är den mänskliga faktorn betydande, vilket kan ha påverkat fördelningen av TOP i bindemedlet. Detta märktes särskilt vid högre halter TOP, där spridningen i resultatet för mjukpunkt var större. Det kan bero på att en högre halt av olja förändrar bindemedlets struktur, vilket gör blandningen mer känslig och det blir svårare att få en helt jämn fördelning innan provet svalnar och stelnar. Även variationer i uppvärmnings- och nedkylningstid kan ha påverkat materialets egenskaper och därmed resultaten. Vissa prov värmdes även upp flera gånger än andra när det fanns behov av flera provkroppar. Ojämna provkroppar för Kula & Ring respektive DSR samt förekomst av luftbubblor kan också ha bidragit till mätosäkerheter. Det är svårt att framställa exakt lika stora provkroppar, och variationer i precision vid placering och hantering kan ha påverkat resultaten.

För att öka tillförlitligheten i resultatet och få en tydligare bild av bindemedlets långtidsåldring hade metoden PAV (Pressure Aging Vessel) kunnat användas. PAV simulerar långtidsåldring och ger därmed en bättre förståelse för materialets egenskaper över tid samt dess motstånd mot utmattning. Genom en kombination av RTFOT och PAV möjliggörs en utvärdering av både korttidsåldring och långtidsåldring, vilket hade kunnat ge ett mer representativt resultat.

En jämförelse mellan olika biobindemedel hade kunnat ge en bättre förståelse för hur bindemedlens sammansättning påverkar asfaltens egenskaper och om effekterna varierar mellan olika typer av biobindemedel.

5.3 Slutsatser

Syftet med studien var att undersöka hur tillsats av tallbecksolja påverkar egenskaperna hos bitumen 50/70 samt om biobindemedel med TOP kan efterlikna bitumen 70/100 och 160/220. Utifrån resultaten kan följande slutsatser dras:

- 5,5% och 19% TOP behövs tillsättas till bitumen 50/70 för att efterlikna bitumen 70/100 respektive 160/220.
- Mjukpunkt och DSR mätningar gav liknande resultat för optimal mängd TOP med en skillnad på maximalt 0,5 procentenheter.
- Biobindemedel med TOP uppvisar liknande reologiska egenskaper i både komplex skjuvmodul och fasvinkel som dess referensbitumen
- Biobindemedlet uppvisar bättre motstånd mot deformationer än rent bitumen
- Biobindemedel med 5,5% TOP visar bättre beständighet mot utmattning än referensbitumen och biobindemedel med 19% TOP visar sämre beständighet mot utmattning än referensbitumen utifrån RTFOT åldring.

5.4 Rekommendationer till fortsatta studier

För att erhålla en mer tillförlitlig bedömning av bindemedlens långsiktiga egenskaper rekommenderas att framtida studier inkluderar långtidsåldring med hjälp av Pressure Aging Vessel (PAV). Detta skulle ge ett ytterligare underlag för att utvärdera materialens motstånd mot åldring över tid och därmed få en bättre bild över utmattningsmotstånd.

Vidare bör fortsatta studier undersöka hur biobindemedel innehållande TOP fungerar under verkliga förhållanden i vägkonstruktioner. Laboratorieresultat ger viktiga indikationer på materialens egenskaper, men faktorer såsom klimatvariationer, trafikbelastning och produktionsprocesser kan påverka prestandan i praktiken.

Det finns även behov av att studera återvinningsegenskaperna hos asfalt som innehåller tallbecksolja. Framtida forskning bör därför undersöka hur många gånger sådan asfalt kan återanvändas samt vilken påverkan TOP har på egenskaperna hos retur-asfalt.

Slutligen rekommenderas vidare studier kring eventuella långsiktiga hälsoeffekter kopplade till användningen av biobindemedel med TOP, både vid produktion och vid exponering under vägmateriellens livslängd.

6 Referenser

- Agardh, S. & Parhamifar, E. (2014). *Vägbyggnad*. Liber.
- Afshin A. & Behnood A. (2025). *Sustainability of Asphalt Pavements: The role of life cycle assessment (LCA) and emerging technologies*. Cleaner Materials. 18, 100346. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clema.2025.100346>
- Arfken, G.B., Griffing, D.F., Kelly, D.C. & Priest, J. (1984). *OSCILLATORY MOTION*. University Physics. 270–291. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-059860-1.50019-9>
- Asfaltskolan (u.å.). *Asfaltboken- 5 Bindemedel*. Tillgänglig: <https://asfaltboken.se/bindemedel/> (Hämtad: 2026-03-10).
- Ashter, S.A. (2014). *Mechanics of Materials*. Thermoforming of Single and Multilayer Laminates, 123–145. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-1-4557-3172-5.00006-2>
- Bizarro, D.E.G., Steinmann, Z., Nieuwenhuijse, I., Keijzer, E. & Hauck, M. (2021). *Potential Carbon Footprint Reduction for Reclaimed Asphalt Pavement Innovations: LCA Methodology, Best Available Technology, and Near-Future Reduction Potential*. Sustainability 2021. 13(3), 1382. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13031382>
- Cañete Vela, I., González-Arias, J., Berdugo Vilches, T., Seemann, M. & Thunman, H. (2023). *Thermochemical recycling of tall oil pitch in a dual fluidized bed*. Fuel. 340, 127596. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.127596>
- de Bortoli, A., Rahimy, O. & Levasseur, A. (2024). *Environmental life-cycle impacts of bitumen: Systematic review and new Canadian models*. Transportation Research Part D: Transport and Environment. 136, 104439. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2024.104439>
- EAPA (2023). *Asphalt in figures 2023*.
- Fares, A., Zayed, T., Abdelkhalek, S., Faris, N. & Muddassir, M. (2024). *Rutting measurement in asphalt pavements*. Automation in Construction 161, 105358. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105358>
- Harrigan, E. T., Leahy, R. B., Youtcheff, J. S. (1994). *The SUPERPAVE Mix Design System Manual of Specifications, Test Methods, and Practices*. SHRP-A-379. Washington DC, National Research Council.
- Keymanesh, M. R., Amani, S., Omran, A. T. & Karimi, M. M. (2023). *Evaluation of the impact of long-term aging on fracture properties of warm mix asphalt (WMA) with high RAP contents*. Construction and Building Materials 400, 132671. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132671>
- Masson, J. F. & Lacasse, M. (2000). *A Review Of Adhesion Mechanisms At The Crack Sealant/asphalt Concrete Interface*.
- Mezger, T.G. (2014). *The rheology handbook: for users of rotational and oscillatory rheometers*. 4th Edition. Vincentz Network.
- Naturvårdsverket. (2026). *Sveriges klimatmål och klimatpolitiska ramverk*. Tillgänglig: <https://www.naturvardsverket.se/amnesomraden/klimatomställningen/sveriges-klimatarbete/sveriges-klimatmal-och-klimatpolitiska-ramverk/> (Hämtad: 2026-03-16).

Nationalencyklopedin. (u.å.a). *Elasticitet*. Tillgänglig:
<https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/l%C3%A5ng/elasticitet?isSearchResult=true>
(Hämtad: 2026-03-11)

Nationalencyklopedin. (u.å.b). *Reologi*. Tillgänglig:
<https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/l%C3%A5ng/reologi> (Hämtad: 2026-03-11)

Nationalencyklopedin. (u.å.c). *Viskositet*. Tillgänglig:
<https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/l%C3%A5ng/viskositet?isSearchResult=true>
(Hämtad: 2026-03-11)

Olsson, K. (2019). *Återvinning i högkvalitativa slitlagerbeläggningar*.

Porot, L. & Haslam, B. (2020). *Pitch in Bitumen Applications*.

Read, J. & Whiteoak, D. (2003). *The shell bitumen handbook*. Thomas Telford.

Sheidaei, M. (2025). *Dynamic Shear Rheometer for rheological investigation of bitumen in road applications – The impact of measurement technique*. Doktorsavhandling, Lunds universitet.

Southern, M. (2015). *A perspective of bituminous binder specifications*. *Advances in asphalt materials*. Woodhead publishing, 1-27. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100269-8.00001-5>

Sudarsanan, N., Fonte, B.R. & Kim, Y.R. (2020). *Application of time-temperature superposition principle to pull-off tensile strength of asphalt tack coats*. *Construction and Building Materials* 262(28), 120798. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120798>

Svenska Institutet för Standarder (SIS). (2015). SS-EN 1427:2015. *Bitumen och bituminösa bindemedel: Bestämning av mjukpunkt – Kula och Ring-metoden*. Stockholm: SIS

Svenska Institutet för Standarder (SIS). (2023a). SS-EN 14769:2023. *Bitumen och bituminösa bindemedel – Accelererad långtidsåldring i tryckåldringskärl*. Stockholm: SIS

Svenska institutet för standarder (SIS). (2023b). SS-EN 14770:2023 *Bitumen och bituminösa bindemedel - Bestämning av komplex skjuvmodul och fasvinkel - Dynamisk skjuvreometer*. Stockholm: SIS

Svenska Institutet för Standarder (SIS). (2024a). SS-EN 12607-1:2024 *Bitumen och bituminösa bindemedel – Bestämning av förhårdningsegenskaper under inverkan av värme och luft – Del 1: RTFOT-metoden*. Stockholm: SIS

Svenska Institutet för Standarder (SIS). (2024b). SS-EN 12594:2024 *Bitumen och bituminösa bindemedel – Provberedning*. Stockholm: SIS

Thacker S, Adshead D, Fantini C, Palmer R, Ghosal R, Adeoti T, Morgan G & Stratton-Short S. (2021). *Infrastructure for climate action*. UNOPS, Copenhagen, Denmark.

Trafikverket. (2023). TDOK 2023:0125. *Trafikverkets ändringar och tillägg till AMA Anläggning 23*. Version 1.

Trafikverket. (2025). TDOK 2015:0480. *Klimatkrav i planläggning, byggskede, underhåll och på tekniskt godkänt material*. Version 9.

Trafikverket. (2012). *Underhållsstandard belagd väg 2011*. ISBN: 978-91-7467-272-5

Vägverket. (2004). *Handbok för återvinning av asfalt*. Publikation 2004:91.

Xu, J., Wang, Z., Fan, Z., Liu, J., Lu, G. & Wang, D. (2025). *Nonlinear rheological behavior of asphalt based on large amplitude oscillation shear test under different loading*,

aging, and modification conditions. *Journal of Road Engineering*. 5(1), 48-64. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jreng.2024.12.001>

Yu, J.Y., Feng, Z.G. and Zhang, H.L. (2011). 9 - *Ageing of polymer modified bitumen (PMB)*. *Polymer Modified Bitumen*. Woodhead publishing, 264-297. DOI: <https://doi.org/10.1533/9780857093721.2.264>

Yusoff, N.I., Jakarni, F.M., Nguyen, V.H., Hainin, M.R & Airey, G.D. (2013). *Modelling the rheological properties of bituminous binders using mathematical equations*. *Construction and Building Materials*. 40, 174-188. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.105>

Yusoff, N.I., Montgomery, T.S. & Airey, G.D. (2011). *Modelling the linear viscoelastic rheological properties of bituminous binders*. *Construction and Building Materials*. 25(5), 2171-2189. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.086>

Zhang, K., Huchet, F. & Hobbs, A. (2019). *A review of thermal processes in the production and their influences on performance of asphalt mixtures with reclaimed asphalt pavement (RAP)*. *Construction and Building Materials* 206, 609–619. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.057>

Zhang, F., Wang, L., Li, C. & Xing, Y. (2020). *Predict the Phase Angle Master Curve and Study the Viscoelastic Properties of Warm Mix Crumb Rubber-Modified Asphalt Mixture*. *Materials*. 13(21), 5051. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma13215051>

Zhang, F., Zhu, J., Sun, Y., Benny, C.M., Wang, D. & Falchetto, A.C. (2025). *Effect analysis of using tall oil pitch (TOP) to partially extend bitumen in asphalt pavements: comparison of different TOPs*. *Road Materials and Pavement Design*. 26:sup1, 361-380, DOI: <https://doi.org/10.1080/14680629.2025.2483478>

Zhu, J., Ahmed, A., Dinegdae, Y., Waldemarson, A., Lu, X., Witkiewicz, P. & Olsson, K. (2024). *Long-term performance of asphalt mixtures containing bio-extended bituminous binders: laboratory investigation and accelerated pavement testing*. *Road Materials and Pavement Design*, 26(sup1), 135-152. DOI: <https://doi.org/10.1080/14680629.2025.2482845>

Zhu, J., C Witkiewicz, P., Waldemarson, A., Olsson, K., Lu, X. & Jelagin, D. (2025). *Långsiktiga egenskaper och klimatavtryck av asfaltmassor med biobindemedel Laboratoriestudie och livscykelanalys*. VTI rapport, ISSN 0347-6030; 1241.

Zhu, J., Ahmed, A. & Dinegdae, Y. (2026). *Chemical and rheological characterization of bituminous binders extended with tall oil pitch*. *Roads and Bridges-Drogi i Mosty*, 25(1), 37-46.

7 Bilaga / bilagor

Bilaga 1: Mätresultat från DSR

70/100 PP08									
Vinkelfrekvens rad/s		Temperatur, °C							
		20	10	0	-10	-20	Komplex skjuvmodul, G*, Pa		
100	100	9,49E+06	4,45E+07	1,46E+08	3,27E+08	4,97E+08			
46,4	46,4	5,74E+06	3,11E+07	1,17E+08	2,91E+08	4,71E+08			
21,5	21,5	3,35E+06	2,11E+07	9,15E+07	2,56E+08	4,42E+08			
10	10	1,90E+06	1,38E+07	6,96E+07	2,20E+08	4,11E+08			
4,64	4,64	1,04E+06	8,74E+06	5,14E+07	1,86E+08	3,78E+08			
2,15	2,15	5,60E+05	5,34E+06	3,69E+07	1,54E+08	3,44E+08			
1	1	2,95E+05	3,15E+06	2,57E+07	1,24E+08	3,08E+08			
0,464	0,464	1,53E+05	1,81E+06	1,74E+07	9,80E+07	2,72E+08			
0,215	0,215	7,80E+04	1,01E+06	1,13E+07	7,52E+07	2,36E+08			
0,1	0,1	3,94E+04	5,53E+05	7,17E+06	5,62E+07	2,01E+08			
Fasvinkel, δ, °									
100	100	56,96	40,49	25,19	13,32	6,85			
46,4	46,4	60,89	44,14	27,99	15,08	7,75			
21,5	21,5	64,62	47,95	30,99	17,05	8,84			
10	10	68,07	51,89	34,19	19,24	10,08			
4,64	4,64	71,17	55,91	37,59	21,63	11,5			
2,15	2,15	73,88	59,89	41,18	24,22	13,09			
1	1	76,21	63,71	44,98	27,04	14,89			
0,464	0,464	78,2	67,23	48,94	30,07	16,89			
0,215	0,215	79,99	70,37	53,06	33,42	19,16			
0,1	0,1	81,59	73,13	57,15	36,97	21,6			

70/100 PP25									
Vinkelfrekvens rad/s		Temperatur, °C							
		20	30	40	50	60	70	80	90
100	100	8,56E+06	1,91E+06	3,43E+05	69931	16997	4731,3	1578,5	
46,4	46,4	5,62E+06	1,04E+06	1,75E+05	34258	8139,2	2237	747,4	
21,5	21,5	3,45E+06	5,55E+05	8,78E+04	16612	3668,6	1050,6	349,49	
10	10	1,99E+06	2,89E+05	4,35E+04	7981,5	1825,4	489,82	162,24	
4,64	4,64	1,10E+06	1,48E+05	2,13E+04	3802,9	855,39	227,78	75,369	
2,15	2,15	5,93E+05	7,45E+04	1,03E+04	1800,1	398,98	105,79	34,983	
1	1	3,12E+05	3,71E+04	4,94E+03	845,45	185,5	49,146	16,209	
0,464	0,464	1,62E+05	1,82E+04	2,35E+03	394,77	86,114	22,745	7,5178	
0,215	0,215	8,24E+04	8,85E+03	1,11E+03	183,94	39,909	10,583	3,479	
0,1	0,1	4,15E+04	4,25E+03	5,19E+02	85,635	18,462	4,898	1,6172	
Fasvinkel, δ, °									
100	100	54,11	69,13	77,86	82,75	85,31	88,25	89,22	
46,4	46,4	58,37	72,32	79,74	84,06	86,51	88,64	89,53	
21,5	21,5	63,11	74,99	81,38	85,24	87,47	89,13	90	
10	10	67,38	77,23	82,85	86,28	88,23	89,44	89,89	
4,64	4,64	70,9	79,19	84,23	87,2	88,87	89,68	89,93	
2,15	2,15	73,72	80,92	85,43	88,02	89,33	89,83	89,96	
1	1	76,15	82,47	86,49	88,7	89,62	89,89	89,92	
0,464	0,464	78,22	83,92	87,44	89,17	89,77	89,73	89,8	
0,215	0,215	80,05	85,22	88,24	89,41	89,76	89,89	89,91	
0,1	0,1	81,71	86,35	88,88	89,51	89,8	90	90	

160/220 PP08									
Vinkelfrekvens rad/s		Temperatur, °C					-20		
		20	10	0	-10				
		Komplex skjvmodul, G*, Pa							
100	4,17E+06	2,54E+07	1,09E+08	2,99E+08	5,10E+08				
46,4	2,29E+06	1,62E+07	8,18E+07	2,56E+08	4,75E+08				
21,5	1,22E+06	9,90E+06	5,93E+07	2,15E+08	4,38E+08				
10	6,36E+05	5,84E+06	4,16E+07	1,76E+08	3,98E+08				
4,64	3,25E+05	3,33E+06	2,82E+07	1,41E+08	3,56E+08				
2,15	1,63E+05	1,83E+06	1,84E+07	1,10E+08	3,13E+08				
1	8,09E+04	9,84E+05	1,16E+07	8,27E+07	2,70E+08				
0,464	3,97E+04	5,17E+05	7,07E+06	6,06E+07	2,28E+08				
0,215	1,94E+04	2,68E+05	4,15E+06	4,29E+07	1,89E+08				
0,1	9,36E+03	1,37E+05	2,37E+06	2,94E+07	1,53E+08				
		Fasvinkel, δ, °							
100	68,14	50,95	32,51	17,28	8,51				
46,4	71,61	55,28	36,15	19,73	9,8				
21,5	74,67	59,58	39,97	22,4	11,3				
10	77,28	63,76	43,97	25,3	13				
4,64	79,44	67,68	48,11	28,42	14,91				
2,15	81,25	71,22	52,4	31,77	17,06				
1	82,76	74,3	56,77	35,35	19,47				
0,464	84,05	76,89	61,07	39,19	22,13				
0,215	85,17	79,03	65,18	43,3	25,05				
0,1	86,12	80,79	68,92	47,61	28,26				

160/220 PP25									
Vinkelfrekvens rad/s		Temperatur, °C							80
		20	30	40	50	60	70		
		Komplex skjvmodul, G*, Pa							
100	2,76E+06	5,86E+05	1,04E+05	22550	5736,5	1811,6	668,14		
46,4	1,72E+06	2,97E+05	5,08E+04	10747	2705,6	855,47	318,52		
21,5	9,87E+05	1,49E+05	2,45E+04	5091,6	1269,2	400,04	149,55		
10	5,19E+05	7,33E+04	1,17E+04	2398,5	591,77	185,82	69,358		
4,64	2,65E+05	3,57E+04	5,58E+03	1124,7	275,22	86,268	32,235		
2,15	1,33E+05	1,72E+04	2,64E+03	524,58	127,84	40,047	14,958		
1	6,61E+04	8,26E+03	1,24E+03	244,06	59,351	18,607	6,9609		
0,464	3,24E+04	3,93E+03	5,79E+02	113,28	27,528	8,6296	3,2283		
0,215	1,58E+04	1,86E+03	2,70E+02	52,586	12,794	3,9992	1,4901		
0,1	7,59E+03	8,73E+02	1,25E+02	24,392	5,9357	1,8552	0,69461		
		Fasvinkel, δ, °							
100	65	77,72	83,53	86,42	87,11	88,3	90		
46,4	69,47	79,99	84,76	87,18	88,18	89,18	90		
21,5	73,79	81,83	85,78	87,82	88,89	89,96	90		
10	76,99	83,32	86,65	88,41	89,33	89,76	90		
4,64	79,43	84,58	87,38	88,96	89,62	89,82	89,91		
2,15	81,32	85,66	88,07	89,38	89,8	89,89	89,75		
1	82,89	86,58	88,69	89,64	89,85	89,91	89,61		
0,464	84,23	87,39	89,19	89,77	89,86	89,73	89,9		
0,215	85,38	88,13	89,52	89,79	90	89,95	88,15		
0,1	86,36	88,76	89,7	89,75	90	90	86,77		

50/70 + 5,5% TOP PP25									
Vinkelfrekvens rad/s		Temperatur, °C							
		20	30	40	50	60	70	80	
		Komplex skjvmodul, G*, Pa							
100	8,96E+06	1,80E+06	3,26E+05	67395	16614	4882,6	1603,9		
46,4	5,54E+06	9,76E+05	1,66E+05	33104	7969,6	2216,4	757,22		
21,5	3,23E+06	5,18E+05	8,36E+04	16084	3791,8	1042,1	354,24		
10	1,82E+06	2,69E+05	4,15E+04	7736	1792	486,33	164,45		
4,64	1,00E+06	1,38E+05	2,03E+04	3692,6	841,26	226,42	76,402		
2,15	5,36E+05	6,97E+04	9,86E+03	1750	393,03	105,38	35,453		
1	2,82E+05	3,47E+04	4,74E+03	823,48	183,04	48,96	16,424		
0,464	1,46E+05	1,71E+04	2,26E+03	385,23	85,062	22,743	7,696		
0,215	7,43E+04	8,30E+03	1,07E+03	179,61	39,418	10,534	3,5592		
0,1	3,74E+04	4,00E+03	5,02E+02	83,557	18,266	4,8757	1,6559		
		Fasvinkel, δ, °							
100	58,04	70	77,74	82,5	85,7	87,07	88,21		
46,4	62,02	72,75	79,59	83,85	86,61	88,06	89,13		
21,5	65,54	75,17	81,22	85,05	87,43	88,8	89,97		
10	68,78	77,26	82,68	86,09	88,12	89,22	89,77		
4,64	71,67	79,16	84,05	86,99	88,71	89,49	89,89		
2,15	74,15	80,85	85,23	87,8	89,17	89,67	89,91		
1	76,39	82,37	86,27	88,48	89,47	89,74	89,9		
0,464	78,36	83,78	87,18	89,02	89,69	89,75	89,78		
0,215	80,14	85,04	87,96	89,38	89,78	89,75	88,97		
0,1	81,76	86,11	88,59	89,61	89,88	89,44	90		

50/70 + 5,5% TOP PP08									
Vinkelfrekvens rad/s		Temperatur, °C							
		20	10	0	-10	-20			
		Komplex skjvmodul, G*, Pa							
100	9,64E+06	4,58E+07	1,54E+08	3,52E+08	5,42E+08				
46,4	5,79E+06	3,18E+07	1,23E+08	3,12E+08	5,12E+08				
21,5	3,36E+06	2,13E+07	9,52E+07	2,72E+08	4,79E+08				
10	1,89E+06	1,38E+07	7,18E+07	2,33E+08	4,43E+08				
4,64	1,04E+06	8,67E+06	5,26E+07	1,96E+08	4,05E+08				
2,15	5,54E+05	5,25E+06	3,74E+07	1,61E+08	3,65E+08				
1	2,91E+05	3,07E+06	2,57E+07	1,29E+08	3,25E+08				
0,464	1,50E+05	1,75E+06	1,72E+07	1,01E+08	2,84E+08				
0,215	7,67E+04	9,71E+05	1,11E+07	7,66E+07	2,44E+08				
0,1	3,86E+04	5,29E+05	6,96E+06	5,67E+07	2,06E+08				
		Fasvinkel, δ, °							
100	57,77	41,33	25,73	13,51	6,74				
46,4	61,63	45,11	28,68	15,41	7,74				
21,5	65,3	49,03	31,82	17,51	8,92				
10	68,66	53,04	35,16	19,81	10,26				
4,64	71,65	57,06	38,68	22,32	11,79				
2,15	74,25	61	42,42	25,04	13,51				
1	76,48	64,73	46,34	28	15,43				
0,464	78,42	68,11	50,37	31,21	17,58				
0,215	80,14	71,11	54,47	34,69	19,99				
0,1	81,68	73,7	58,52	38,39	22,6				

50/70 + 19% TOP PP25									
Vinkelfrekvens rad/s		Temperatur, °C							
		20	30	40	50	60	70	80	
		Komplex skjuvmodul, G*, Pa							
100	3,10E+06	5,64E+05	1,05E+05	23306	6107,8	1999		756,63	
46,4	1,70E+06	2,89E+05	5,17E+04	11188	2896,1	949,37		357,55	
21,5	9,07E+05	1,46E+05	2,52E+04	5332,6	1366,9	447,24		168,71	
10	4,75E+05	7,24E+04	1,21E+04	2530,4	642,4	209,67		79,126	
4,64	2,44E+05	3,56E+04	5,81E+03	1194,2	301,42	98,442		37,325	
2,15	1,24E+05	1,74E+04	2,77E+03	562,09	141,41	46,431		17,665	
1	6,17E+04	8,38E+03	1,31E+03	264,05	66,363	21,967		8,4765	
0,464	3,05E+04	4,02E+03	6,18E+02	123,74	31,193	10,465		4,1611	
0,215	1,49E+04	1,92E+03	2,91E+02	57,924	14,81	5,0287		2,0332	
0,1	7,27E+03	9,10E+02	1,36E+02	27,142	7,0562	2,4287		1,0488	
		Fasvinkel, δ, °							
100	68,82	77,15	82,5	85,1	86,04	90		79,59	
46,4	71,77	79,13	83,73	86,16	87,29	90		84,9	
21,5	74,42	80,84	84,82	86,96	88,04	90		87,88	
10	76,74	82,29	85,76	87,58	88,43	89,3		87,58	
4,64	78,78	83,56	86,54	88,08	88,68	88,86		87,46	
2,15	80,48	84,67	87,22	88,44	88,79	88,28		86,67	
1	81,96	85,61	87,76	88,7	88,71	87,55		85,48	
0,464	83,27	86,39	88,17	88,86	88,47	86,52		83,35	
0,215	84,4	87,02	88,49	88,85	87,85	84,81		79,13	
0,1	85,34	87,52	88,7	88,65	87,55	83,27		73,08	

50/70 + 19% TOP PP08									
Vinkelfrekvens rad/s		Temperatur, °C							
		20	10	0	-10	-20			
		Komplex skjuvmodul, G*, Pa							
100	3,57E+06	2,22E+07	9,92E+07	2,82E+08	4,97E+08				
46,4	1,97E+06	1,40E+07	7,36E+07	2,40E+08	4,58E+08				
21,5	1,05E+06	8,57E+06	5,30E+07	1,99E+08	4,17E+08				
10	5,52E+05	5,05E+06	3,69E+07	1,62E+08	3,74E+08				
4,64	2,84E+05	2,88E+06	2,49E+07	1,28E+08	3,30E+08				
2,15	1,44E+05	1,59E+06	1,62E+07	9,81E+07	2,87E+08				
1	7,18E+04	8,60E+05	1,02E+07	7,33E+07	2,44E+08				
0,464	3,56E+04	4,56E+05	6,20E+06	5,31E+07	2,02E+08				
0,215	1,75E+04	2,38E+05	3,68E+06	3,73E+07	1,64E+08				
0,1	8,55E+03	1,23E+05	2,13E+06	2,54E+07	1,30E+08				
		Fasvinkel, δ, °							
100	68,12	51,68	33,49	18,24	9,19				
46,4	71,31	55,8	37,11	20,77	10,62				
21,5	74,15	59,88	40,88	23,51	12,26				
10	76,56	63,82	44,8	26,46	14,11				
4,64	78,6	67,45	48,83	29,63	16,18				
2,15	80,34	70,73	52,95	33,03	18,5				
1	81,8	73,53	57,07	36,64	21,06				
0,464	83,06	75,89	61,06	40,47	23,89				
0,215	84,11	77,83	64,81	44,46	27				
0,1	84,91	79,42	68,18	48,59	30,37				

50/70 + 8% TOP PP25									
		Temperatur, °C							
Vinkelfrekvens		20	30	40	50	60	70	80	
rad/s		Komplex skjuvmodul, G*, Pa							
100	7,22E+06	1,42E+06	2,60E+05	54524	13508	3951,4	1391		
46,4	4,36E+06	7,64E+05	1,31E+05	26637	6461,9	1870,6	653,76		
21,5	2,53E+06	4,02E+05	6,57E+04	12882	3069,1	878,03	305,5		
10	1,41E+06	2,07E+05	3,24E+04	6176,6	1447	409,47	141,81		
4,64	7,64E+05	1,05E+05	1,58E+04	2939	678,47	190,66	65,91		
2,15	4,05E+05	5,28E+04	7,62E+03	1389,6	316,93	88,736	30,648		
1	2,11E+05	2,61E+04	3,65E+03	653,15	147,76	41,274	14,289		
0,464	1,08E+05	1,28E+04	1,73E+03	305,7	68,712	19,191	6,739		
0,215	5,48E+04	6,17E+03	8,18E+02	142,65	31,897	8,9681	3,1083		
0,1	2,74E+04	2,96E+03	3,84E+02	66,462	14,839	4,1829	1,505		

50/70 + 4% TOP PP08									
		Temperatur, °C							
Vinkelfrekvens		20	10	0	-10	-20			
rad/s		Komplex skjuvmodul, G*, Pa							
100	1,12E+07	5,13E+07	1,65E+08	3,63E+08	5,48E+08				
46,4	6,87E+06	3,62E+07	1,33E+08	3,24E+08	5,19E+08				
21,5	4,06E+06	2,47E+07	1,04E+08	2,85E+08	4,88E+08				
10	2,32E+06	1,63E+07	7,97E+07	2,46E+08	4,54E+08				
4,64	1,29E+06	1,04E+07	5,93E+07	2,09E+08	4,18E+08				
2,15	6,96E+05	6,44E+06	4,29E+07	1,73E+08	3,79E+08				
1	3,69E+05	3,84E+06	3,01E+07	1,40E+08	3,40E+08				
0,464	1,93E+05	2,23E+06	2,05E+07	1,11E+08	3,00E+08				
0,215	9,93E+04	1,26E+06	1,35E+07	8,59E+07	2,60E+08				
0,1	5,05E+04	6,93E+05	8,64E+06	6,46E+07	2,22E+08				

50/70 + 8% TOP PP08									
		Temperatur, °C							
Vinkelfrekvens		20	10	0	-10	-20			
rad/s		Komplex skjuvmodul, G*, Pa							
100	8,16E+06	4,05E+07	1,42E+08	3,30E+08	5,07E+08				
46,4	4,83E+06	2,78E+07	1,12E+08	2,92E+08	4,76E+08				
21,5	2,77E+06	1,84E+07	8,57E+07	2,53E+08	4,43E+08				
10	1,54E+06	1,18E+07	6,40E+07	2,16E+08	4,08E+08				
4,64	8,33E+05	7,28E+06	4,63E+07	1,80E+08	3,70E+08				
2,15	4,42E+05	4,34E+06	3,25E+07	1,46E+08	3,32E+08				
1	2,30E+05	2,51E+06	2,21E+07	1,16E+08	2,92E+08				
0,464	1,18E+05	1,41E+06	1,46E+07	9,00E+07	2,53E+08				
0,215	5,97E+04	7,77E+05	9,30E+06	6,77E+07	2,15E+08				
0,1	2,99E+04	4,19E+05	5,76E+06	4,95E+07	1,78E+08				

50/70 + 4% TOP PP25									
		Temperatur, °C							
Vinkelfrekvens		20	30	40	50	60	70	80	
rad/s		Komplex skjuvmodul, G*, Pa							
100	9,31E+06	1,88E+06	3,45E+05	72888	18442	5328,2	1795,2		
46,4	5,75E+06	1,03E+06	1,78E+05	35949	8868,7	2524,6	844,53		
21,5	3,39E+06	5,52E+05	8,97E+04	17525	4229,1	1188,4	395,05		
10	1,94E+06	2,89E+05	4,48E+04	8455,5	2001	555,01	183,51		
4,64	1,07E+06	1,49E+05	2,21E+04	4045,7	940,73	258,42	85,227		
2,15	5,81E+05	7,59E+04	1,07E+04	1922,5	440,24	120,25	39,591		
1	3,08E+05	3,81E+04	5,18E+03	907,07	205,28	55,842	18,385		
0,464	1,61E+05	1,88E+04	2,47E+03	425,4	95,516	25,891	8,5631		
0,215	8,25E+04	9,19E+03	1,17E+03	198,82	44,406	12,015	3,987		
0,1	4,18E+04	4,44E+03	5,52E+02	92,807	20,656	5,5538	1,85		

50/70 + 16% TOP PP25							
		Temperatur, °C					
Vinkelfrekvens	20	30	40	50	60	70	80
rad/s	Komplex skjuvmodul, G*, Pa						
100	2,76E+06	8,42E+05	1,52E+05	33354	8454,5	2583,8	947,2
46,4	2,12E+06	4,41E+05	7,56E+04	16099	4013,3	1220	447,38
21,5	1,37E+06	2,26E+05	3,71E+04	7711,3	1895,6	571,46	209,37
10	7,72E+05	1,14E+05	1,80E+04	3669,4	888,38	265,72	97,06
4,64	4,09E+05	5,68E+04	8,68E+03	1735,1	414,93	123,52	45,049
2,15	2,11E+05	2,79E+04	4,15E+03	815,32	193,21	57,373	20,874
1	1,07E+05	1,36E+04	1,97E+03	381,47	89,786	26,6	9,7354
0,464	5,38E+04	6,56E+03	9,29E+02	177,71	41,666	12,364	4,5046
0,215	2,67E+04	3,13E+03	4,36E+02	82,644	19,286	5,7353	2,1061
0,1	1,31E+04	1,49E+03	2,04E+02	38,354	8,9459	2,6572	0,97575

50/70 + 12% TOP PP08							
		Temperatur, °C					
Vinkelfrekvens	20	30	40	50	60	70	80
rad/s	Komplex skjuvmodul, G*, Pa						
100	6,35E+06	3,36E+07	1,25E+08	3,09E+08	3,09E+08	4,94E+08	4,94E+08
46,4	3,68E+06	2,25E+07	9,70E+07	2,70E+08	2,70E+08	4,62E+08	4,62E+08
21,5	2,07E+06	1,46E+07	7,32E+07	2,32E+08	2,32E+08	4,28E+08	4,28E+08
10	1,13E+06	9,14E+06	5,36E+07	1,95E+08	1,95E+08	3,91E+08	3,91E+08
4,64	6,02E+05	5,52E+06	3,80E+07	1,60E+08	1,60E+08	3,53E+08	3,53E+08
2,15	3,14E+05	3,22E+06	2,61E+07	1,28E+08	1,28E+08	3,13E+08	3,13E+08
1	1,62E+05	1,82E+06	1,74E+07	1,00E+08	1,00E+08	2,73E+08	2,73E+08
0,464	8,20E+04	1,01E+06	1,12E+07	7,61E+07	7,61E+07	2,34E+08	2,34E+08
0,215	4,11E+04	5,46E+05	7,01E+06	5,62E+07	5,62E+07	1,96E+08	1,96E+08
0,1	2,04E+04	2,89E+05	4,26E+06	4,03E+07	4,03E+07	1,61E+08	1,61E+08

50/70 + 16% TOP PP08							
		Temperatur, °C					
Vinkelfrekvens	20	30	40	50	60	70	80
rad/s	Komplex skjuvmodul, G*, Pa						
100	5,32E+06	2,98E+07	1,18E+08	3,05E+08	5,10E+08	5,10E+08	5,10E+08
46,4	3,02E+06	1,96E+07	9,05E+07	2,65E+08	4,77E+08	4,77E+08	4,77E+08
21,5	1,66E+06	1,25E+07	6,73E+07	2,25E+08	4,42E+08	4,42E+08	4,42E+08
10	8,90E+05	7,64E+06	4,86E+07	1,87E+08	4,04E+08	4,04E+08	4,04E+08
4,64	4,67E+05	4,51E+06	3,39E+07	1,52E+08	3,64E+08	3,64E+08	3,64E+08
2,15	2,41E+05	2,58E+06	2,29E+07	1,21E+08	3,23E+08	3,23E+08	3,23E+08
1	1,22E+05	1,43E+06	1,50E+07	9,31E+07	2,82E+08	2,82E+08	2,82E+08
0,464	6,14E+04	7,78E+05	9,49E+06	6,98E+07	2,41E+08	2,41E+08	2,41E+08
0,215	3,05E+04	4,15E+05	5,83E+06	5,09E+07	2,02E+08	2,02E+08	2,02E+08
0,1	1,50E+04	2,19E+05	3,48E+06	3,60E+07	1,66E+08	1,66E+08	1,66E+08

50/70 + 12% TOP PP25							
		Temperatur, °C					
Vinkelfrekvens	20	30	40	50	60	70	80
rad/s	Komplex skjuvmodul, G*, Pa						
100	5,41E+06	1,06E+06	1,95E+05	42095	10885	3262	1163
46,4	3,25E+06	5,61E+05	9,78E+04	20434	5189,9	1542,5	550,88
21,5	1,84E+06	2,91E+05	4,84E+04	9832	2456,9	723,93	257,69
10	1,00E+06	1,48E+05	2,37E+04	4691,9	1155,3	337,2	119,53
4,64	5,35E+05	7,45E+04	1,15E+04	2226,2	540,75	156,86	55,479
2,15	2,79E+05	3,69E+04	5,51E+03	1049,1	252,39	72,914	25,765
1	1,43E+05	1,81E+04	2,63E+03	492,08	117,43	33,885	11,972
0,464	7,25E+04	8,78E+03	1,24E+03	229,94	54,555	15,769	5,5561
0,215	3,63E+04	4,23E+03	5,85E+02	107,19	25,333	7,3304	2,5873
0,1	1,79E+04	2,02E+03	2,74E+02	49,841	11,741	3,3841	1,2174

50/70 + 24% TOP PP25									
		Temperatur, °C							
Vinkelfrekvens		20	30	40	50	60	70	80	
rad/s		Komplex skjuvmodul, G*, Pa							
100	2,01E+06	3,62E+05	6,96E+04	16261	4638,2	1556,3	613,57		
46,4	1,09E+06	1,83E+05	3,39E+04	7775,2	2196,2	737,15	288,9		
21,5	5,72E+05	9,16E+04	1,64E+04	3689,5	1033,2	345	135,2		
10	2,95E+05	4,52E+04	7,87E+03	1742,3	482,57	160,26	62,71		
4,64	1,50E+05	2,20E+04	3,75E+03	818,94	224,95	74,458	29,092		
2,15	7,50E+04	1,07E+04	1,78E+03	383,74	104,76	34,642	13,533		
1	3,71E+04	5,12E+03	8,38E+02	179,23	48,719	16,09	6,2788		
0,464	1,82E+04	2,44E+03	3,94E+02	83,569	22,646	7,447	2,9292		
0,215	8,85E+03	1,16E+03	1,85E+02	38,904	10,552	3,4601	1,3723		
0,1	4,28E+03	5,48E+02	8,63E+01	18,107	4,9561	1,5945	0,64093		

50/70 + 20% TOP PP08									
		Temperatur, °C							
Vinkelfrekvens		20	10	0	-10	-20			
rad/s		Komplex skjuvmodul, G*, Pa							
100	3,30E+06	2,04E+07	9,09E+07	2,58E+08	4,49E+08				
46,4	1,81E+06	1,29E+07	6,74E+07	2,19E+08	4,14E+08				
21,5	9,71E+05	7,84E+06	4,84E+07	1,82E+08	3,78E+08				
10	5,08E+05	4,62E+06	3,36E+07	1,48E+08	3,40E+08				
4,64	2,61E+05	2,63E+06	2,26E+07	1,17E+08	3,01E+08				
2,15	1,32E+05	1,45E+06	1,47E+07	8,98E+07	2,62E+08				
1	6,59E+04	7,82E+05	9,19E+06	6,69E+07	2,24E+08				
0,464	3,26E+04	4,14E+05	5,59E+06	4,84E+07	1,87E+08				
0,215	1,60E+04	2,16E+05	3,30E+06	3,39E+07	1,52E+08				
0,1	7,81E+03	1,11E+05	1,90E+06	2,31E+07	1,21E+08				

50/70 + 24% TOP PP08									
		Temperatur, °C							
Vinkelfrekvens		20	10	0	-10	-20			
rad/s		Komplex skjuvmodul, G*, Pa							
100	2,33E+06	1,52E+07	7,34E+07	2,12E+08	3,32E+08				
46,4	1,26E+06	9,42E+06	5,35E+07	1,77E+08	2,96E+08				
21,5	6,65E+05	5,62E+06	3,78E+07	1,45E+08	2,60E+08				
10	3,43E+05	3,24E+06	2,58E+07	1,15E+08	2,24E+08				
4,64	1,74E+05	1,81E+06	1,70E+07	8,90E+07	1,88E+08				
2,15	8,72E+04	9,81E+05	1,08E+07	6,68E+07	1,54E+08				
1	4,32E+04	5,21E+05	6,66E+06	4,85E+07	1,23E+08				
0,464	2,12E+04	2,73E+05	3,98E+06	3,42E+07	9,49E+07				
0,215	1,04E+04	1,41E+05	2,31E+06	2,33E+07	7,08E+07				
0,1	5,05E+03	7,21E+04	1,32E+06	1,53E+07	5,09E+07				

50/70 + 20% TOP PP25									
		Temperatur, °C							
Vinkelfrekvens		20	30	40	50	60	70	80	
rad/s		Komplex skjuvmodul, G*, Pa							
100	2,82E+06	5,29E+05	9,94E+04	22521	6073,3	1926	726,74		
46,4	1,58E+06	2,71E+05	4,88E+04	10800	2875,9	911,77	345,51		
21,5	8,54E+05	1,37E+05	2,37E+04	5145,7	1354	427,01	161,81		
10	4,48E+05	6,81E+04	1,14E+04	2438,5	633,43	198,59	75,108		
4,64	2,31E+05	3,35E+04	5,47E+03	1148,5	295,6	92,31	34,865		
2,15	1,17E+05	1,63E+04	2,60E+03	538,67	137,71	42,912	16,19		
1	5,85E+04	7,88E+03	1,23E+03	252	64,015	19,952	7,4781		
0,464	2,89E+04	3,77E+03	5,79E+02	117,53	29,73	9,2717	3,5108		
0,215	1,42E+04	1,80E+03	2,72E+02	54,753	13,777	4,3082	1,6607		
0,1	6,89E+03	8,52E+02	1,27E+02	25,486	6,3642	2,0315	0,75144		