



PROJEKTNR. 14070

Långtidseffekter av biobindemedel i asfalt

Patryk Witkiewicz (Skanska Sverige AB)

Katarina Ekblad (Skanska Sverige AB)

Kenneth Olsson (Skanska Industrial Solutions AB)

Jiqing Zhu (VTI)

Abubeker Ahmed (VTI)

Andreas Waldemarson (VTI)

Xiaohu Lu (Nynas AB)

Denis Jelagin (KTH)

Skanska

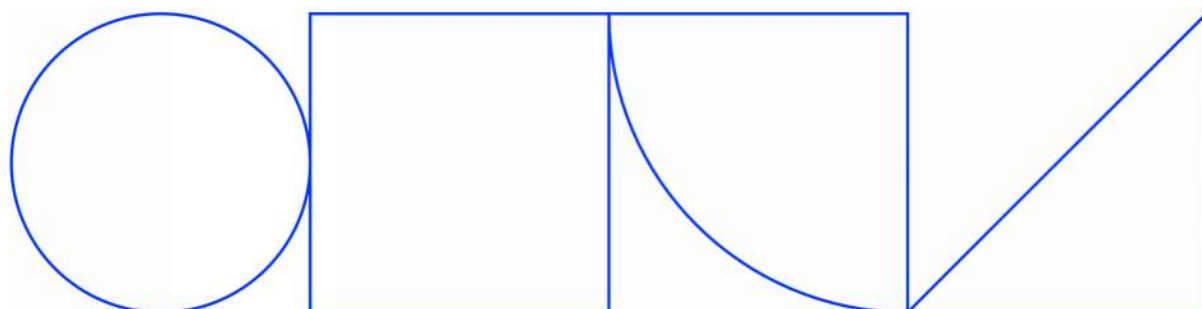
2025-10-02

SKANSKA

SBUF



TRAFIKVERKET



Förord

Detta projekt har genomförts av Skanska, VTI, Nynas och KTH.

Tack till alla i arbets- och referensgruppen som bidragit med ert arbete och er viktiga kunskap och erfarenhet.

Ett stort tack även till SBUF och Trafikverket som har finansierat projektet, tillsammans med projektföretagens egeninsatser.

Projektledare

Patryk Witkiewicz	Skanska Teknik
-------------------	----------------

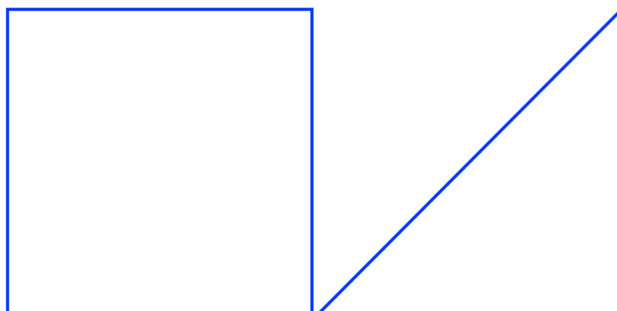
Arbetsgrupp

Patryk Witkiewicz	Skanska Sverige AB
Roger Nilsson	Skanska Sverige AB
Paulina Johansson	Skanska Sverige AB
Rickard Nilsson	Skanska Industrial solutions
Eric Gardner	Skanska Sverige AB
Jiqing Zhu	VTI
Abubeker Ahmed	VTI
Denis Jelagin	KTH

Referensgrupp

Kenneth Olsson	Skanska Industrial solutions
Henrik Arnerdal	Trafikverket
Mats Jonsson	Svevia
Lars Jansson	Peab
Jonas Ekblad	NCC AB
Björn Kalman	VTI
Xiaohu Lu	Nynas AB
Krister Persson	TotalEnergies

Oktober 2025



Sammanfattning

Med ökande fokus på klimat- och miljöfrågor inom infrastrukturen har behovet av hållbara alternativ till traditionella vägmateriäl ökat. Bioasfalt med biobindemedel, där förnybara bindemedel delvis ersätter petroleumbitumen, är en lovande lösning för att minska klimatpåverkan och beroendet av fossila resurser. Detta projekt undersöker hur biobindemedel påverkar asfaltens egenskaper och klimatavtryck på lång sikt, med fokus på talloljebeck (TOP) och polymermodifierat bitumen (PMB) med biogen komponent.

Projektet omfattar litteraturstudie, tillverkning av asfaltprover, laboratorieprovningar och livscykelanalys (LCA) för att bedöma klimatpåverkan från råvaruutvinning till färdig beläggning. I laboratoriet har bindemedel och asfaltprover analyserats med avseende på åldring, reologiska egenskaper, utmattningsmotstånd och vattenkänslighet. Totalt analyserades sex olika bindemedel, två 70/100-bindemedel (Bio och Ref), två 160/220-bindemedel (Bio och Ref) samt två 40/100-75 PMB (Bio och Ref). Biobindemedlen utan polymer innehöll 5 % respektive 21 % TOP.

Resultaten visar att biobindemedel med TOP uppfyller de tekniska krav som ställs för bituminösa bindemedel. Penetration och mjukpunkt kunde anpassas genom att variera TOP-halten. Efter långtidsåldring visade biobindemedlen mindre mjukpunktsökning än referensbindemedlen, vilket tyder på bättre åldringsmotstånd.

Reologiska analyser med dynamisk skjuvreometer (DSR) visade att biobindemedel har högre fasvinkel vid höga temperaturer, vilket tyder på mer visköst beteende. Vid låga temperaturer visade vissa biobindemedel högre styvhet och lägre fasvinkel, vilket kan indikera ökad sprödhet. Masterkurvor för bindemedel visade att biobindemedel var något mer känsliga för frekvensförändringar, särskilt vid högre TOP-halt och efter långtidsåldring.

Utmattningsmotståndet hos bindemedel analyserades med flera metoder, Glover-Rowe-parametern (GR), Christensen-Anderson R-värde och Linear Amplitude Sweep (LAS) test och resultaten visade att alla biobindemedel klarar specifikationskriterierna för GR och R-värde. LAS-analysen visade att Bio-70/100 hade något bättre utmattningsmotstånd än Ref-70/100 vid 25 °C, medan Bio-160/220 presterade sämre än sin referens vid 10 °C. Vid låga temperaturer klarade både Bio-70/100 och Bio-160/220 ΔT_c -kriteriet ($\geq -2,0$ °C) som är det strängaste kravet i USA. Bio-160/220 visade dock högre kritiska temperaturer (mindre negativa under 0 °C), vilket kan tyda på sämre sprickmotstånd vid låga temperaturer. För PMB var ΔT_c -värdena mer negativa, vilket är ett känt fenomen just för PMB, men Bio-PMB visade ändå bättre ΔT_c än sin referens.

När det gäller asfaltprovernans egenskaper visade resultaten att biobindemedel inte förändrar sambanden mellan bindemedlets och asfaltens styvhet och fasvinkel. Åldringens inverkan på styvhet och fasvinkel förändras inte heller av biobindemedel. Däremot observerades skillnader i nivåerna av dessa egenskaper samt deras temperatur-/frekvenskänslighet. Trots att hårdheten hos biobindemedlet hade reglerats med penetration och mjukpunkt som mått, syntes inte denna reglering på samtliga temperaturer och frekvenser. Detta gäller för både bindemedel och asfaltmassor och effekten är mer betydande när TOP-halten är högre i bindemedlet.

Utmattningsprovningarna på asfaltmassor visade att AG 16-massan med Bio-160/220 hade något sämre motstånd vid små töjningar än den med Ref-160/220, eftersom styvhetsmodulen efter laboratorieåldring var högre för AG 16-massan med Bio-160/220, jämfört med Ref-160/220. Samtidigt visade Semi-Circular Bending test att AG 16-massan med Bio-160/220 hade högre brottseghet än sin referens, men också visade en snabbare sprickpropagering, vilket tyder på ett sprödare brottbeteende. Efter konditionering med en Moisture Induced

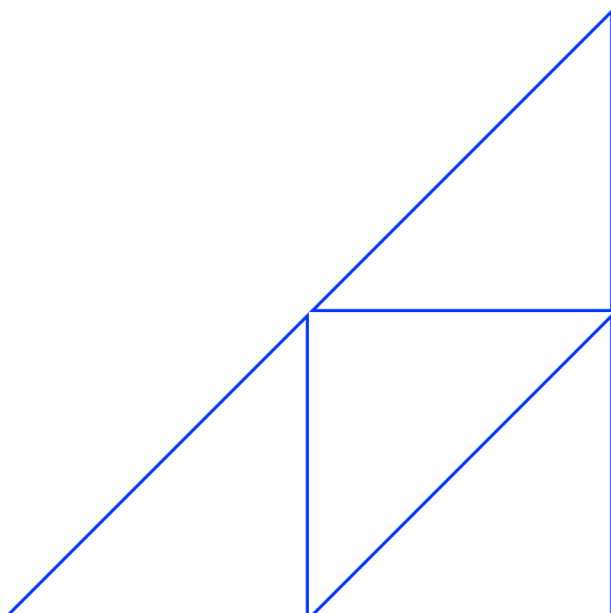
Stress Tester (MIST) minskade sprödheten, vilket tyder på att vattenpåverkan kan mildra vissa negativa effekter av åldring för asfaltmassor med TOP.

Biobindemedels inverkan på vattenkänsligheten hos asfaltmassor visade sig vara generellt positiv. Indirekt draghållfasthetsindex för massorna med Bio-70/100 och Bio-PMB låg över Trafikverkets krav, medan den med Bio-160/220 låg något under men ändå högre än sin referens. Detta tyder på att TOP kan förbättra vidhäftningen mellan bindemedel och stenmaterial. Dock bör man beakta att inget vidhäftningsmedel användes i denna studie, vilket innebär att resultaten kan förbättras ytterligare i praktisk tillämpning. Det är dock viktigt att välja lämpligt vidhäftningsmedel med hänsyn till den kemiska reaktiviteten med TOP, som innehåller fria syror som kan reagera med aminbaserade tillsatser.

Livscykelanalysen i denna studie som omfattar livscykel faser A1-A5 samt redovisning av biogen koldioxid i livscykel faser C/D visade att användningen av biobindemedel marginellt ökade den fossila delen av klimatpåverkan, främst på grund av de uppströms klimatpåverkan från utvinning och bearbetning av råvarorna för att producera TOP och Bio-PMB. Däremot visade redovisning av biogen koldioxid enligt en alternativ metod (så kallad "-1/+X"-metod) att den totala klimatpåverkan kan halveras. Metodvalet för redovisning av biogen koldioxid har stor betydelse för bedömningen av klimatnyttan för biobindemedel.

Användning av PMB i slitlagret kan förlänga beläggningens livslängd med upp till 20 %, vilket i sin tur kan minska den genomsnittliga årliga klimatpåverkan. Trots att PMB hade högre initial klimatpåverkan blev påverkan lägre när livslängden beaktades. Detta visar att både materialval och beläggningens livslängd är avgörande för en rättvis klimatbedömning.

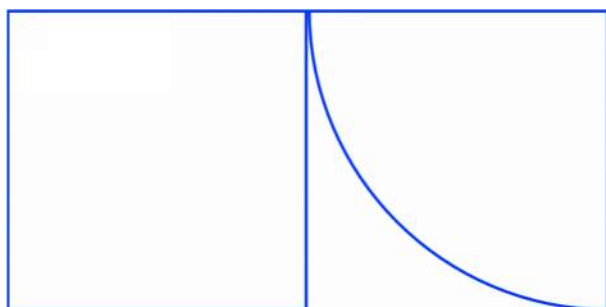
Sammanfattningsvis visar denna studie att biobindemedel, särskilt de med måttlig andel TOP eller polymer, har potential att bidra till mer hållbara asfaltbeläggningar utan att kompromissa med teknisk prestanda. För att säkerställa långsiktig prestanda samt klimat- och miljönytta rekommenderas fortsatt forskning, särskilt kring åldringsmekanismer, återanvändning av asfaltmassor med biobindemedel, val av vidhäftningsmedel och standardisering av klimatredovisning för biogena material i asfalt. Fullskaliga försök och provvägar under verkliga trafik- och klimatförhållanden är också viktiga nästa steg för att validera laboratorieresultaten i praktiken.



Innehåll

Förord	1
Sammanfattning	2
Innehåll	4
1. Bakgrund	6
2. Syfte	6
3. Metodik	7
4. Litteraturstudie	9
4.1. Tall Oil Pitch (TOP)	9
4.2. Användning av TOP i asfalt	10
5. Laboratoriestudie	13
5.1. Bindemedel	13
5.1.1. Proportionering av biobindemedel med TOP	15
5.2. Ballastmaterial	17
5.3. Tillverkning av asfaltmassor	17
5.4. Tillverkning av provkroppar	18
6. Provningsmetoder och resultat	22
6.1. Bindemedel	22
6.1.1. SARA-analys	22
6.1.2. Laboratorieåldring av bindemedel	23
6.1.3. Karakterisering med FTIR	23
6.1.4. Förändring av mjukpunkt efter åldring	26
6.1.5. DSR temperatursvep	27
6.1.6. Masterkurvor för bindemedel	30
6.1.7. Utmattningsmotstånd	35
6.1.8. Sprickmotstånd vid låga temperaturer	42
6.1.9. Bedömning av biobindemedels långsiktiga egenskaper	47
6.2. Asfalt	48
6.2.1. Kontroll av tillverkade asfaltprover	48
6.2.2. Stabilitetsegenskaper	49
6.2.3. Vattenkänslighet	49
6.2.4. Laboratorieåldring av asfaltmassor	52
6.2.5. Masterkurvor för asfalt	53
6.2.6. Styvhet genom intryckning	55

6.2.7.	Kombinerade effekter av åldring och vatten	59
6.2.8.	Utmattningsegenskaper	60
6.2.9.	Sprickpropagering	62
6.2.10.	Samband mellan bindemedels- och asfaltegenskaper	65
7.	Livscykelanalys	66
7.1	Systemgränser	66
7.2.	Funktionell enhet	67
7.3.	Livscykelinventering	68
7.4.	Fossil Global Warming Potential (GWP-fossil)	70
7.5.	Redovisning av biogen koldioxid	71
7.6.	Livslängdens inverkan	74
7.7.	Känslighetsanalys	76
8.	Resultat	78
9.	Litteraturförteckning	81
10.	Figurförteckning	88
11.	Tabellförteckning	91
12.	Förteckning bilagor	92



1. Bakgrund

Bygg- och anläggningsbranschen har tagit fram en gemensam färdplan för en hållbar, klimatneutral och konkurrenskraftig byggsektor i hela värdekedjan. Målet är att till 2045 ha nettonollutsläpp av växthusgaser inom bygg- och anläggningssektorn. Färdplanen förvaltas av Byggföretagen som arbetar med genomförandet och implementeringen. Det är tydligt att det behövs utveckling och innovation av ny teknik för att målet skall kunna uppnås.

Vägmateriens långsiktiga egenskaper är viktiga för att säkerställa vägens långa livslängd och låga klimatpåverkan ur ett livscykelperspektiv. För att nå klimatmålen har det blivit fokus för anläggningsbranschen att använda en högre andel returafalt i asfaltbeläggningar. Dessutom ökar intresset att ersätta fossilbaserat bitumen med biobaserade bindemedel i asfalt, för att ytterligare minska koldioxidavtrycket från asfaltproduktion. Att ersätta en del av bitumen med biobaserade bindemedel har testats sedan lång tid tillbaka och flertalet laboriестudier har visat att motsvarande egenskaper på bindemedlet erhålls. Ett högre pris än traditionell bitumen samt kunskapsbrist och osäkerhet om långtidseffekterna har varit starkt bidragande faktorer till att en bredare implementering uteblivit. Ökad kunskap och nya förbättrade biobindemedel som till exempel Tall-Oil Pitch, lignin med flera har drivit på utvecklingen. SBUF-projekt 13864 (Lundström, Pågående)

I och med den klimatomställning branschen står inför så finns idag bättre förutsättningar för implementering av tekniken i större skala. Dessa nya biobindemedel uppvisar vanligtvis bra initiala klimateffekter i ett tidigt skede. Ett långsiktigt perspektiv är dock oundgängligt för att utvärdera livscykelkostnaden och klimatavtrycket för dessa nya material och produkter. Föreliggande projekt kommer att bidra till att öka förståelsen och effekten av biobindemedel för att minska koldioxidutsläppen ur ett livscykelperspektiv (inte bara den initiala klimateffekten utan den totala). Egenskaperna som ska undersökas är främst utmattningsegenskaper och lågtemperaturegenskaper hos asfalt samt bindemedel efter åldring. Där gäller mekaniska och DSR-analyser på asfalt respektive bindemedel. De förväntade resultaten kan bidra till att öka förståelsen av effekten av ökad andel inblandning av biobindemedel på utveckling av asfaltbeläggningens tillstånd över tid. Vidare kan resultaten ligga till grund för hur framtida krav kan formuleras.

2. Syfte

Projektets syfte är att utvärdera prestanda och relaterade egenskaper före och efter långtidsåldring av bindemedel samt asfaltprover, där delar av det fossila bindemedlet bitumen ersätts med biobaserat bindemedel av typen Tall-Oil Pitch, TOP, samt utvärdera livscykelkostnaden och klimatavtrycket för dessa nya material och produkter.

3. Metodik

Föreliggande projekt har genomförts i samverkan med VTI i ett samfinansierat BVFF-projekt "Långsiktiga egenskaper och klimatavtryck av asfaltmassor med biobindemedel".

Projektet är indelat i sju olika steg:

- Steg 1: Litteraturstudie, inventering asfalt med biobindemedel
- Steg 2: Receptuppföljning, provtagning, kvalitetskontroll
- Steg 3: Tester
- Steg 4: Dataanalys
- Steg 5: Prediktering och utvärdering av funktionella egenskaper
- Steg 6: LCC/Klimatberäkningar
- Steg 7: Rapportskrivning

I denna första del av projektet har en litteraturstudie gjorts på vad Tall Oil Pitch, TOP, är och hur den tillverkas. Även ett flertal undersökningar på erfarenheter av asfalt med TOP, har studerats.

Vidare har en laboratoriestudie planerats och olika biobindemedel 70/100 med TOP, 160/220 med TOP och 40/100-75 med en biogen komponent, har blandats. Sedan har asfaltmassor, ABT och AG, proportionerats och tillverkats dels med referensbindemedel 70/100, 160/220 och PMB 40/100-75 dels med de olika biobindemedlen 70/100 med TOP, 160/220 med TOP och 40/100-75 med en biogen komponent. De olika asfaltmassorna har sedan packats till provplattor på laboratorium och provkroppar har borrats upp för provning.

I denna del av projektet har bland annat nedanstående initiala tekniska materialegenskaper undersökts:

- Bitumenegenskaper före och efter laboratorieåldring
- Styvhet och utmattningsegenskaper före och efter laboratorieåldring
- ITSIR-egenskaper före och efter laboratorieåldring
- Lågtemperatüreenskaper

Följande analyser har utförts på referens- och biobindemedlen:

- Sara-analys, penetration och mjukpunkt före åldring
- Mjukpunkten efter åldring enligt RTFOT och RTFOT+PAV
- FTIR-analys före och efter åldring enligt RTFOT och RTFOT+PAV
- DSR temperatursvep, dynamisk skjuvmodul och fasvinkel, före och efter åldring enligt RTFOT och RTFOT+PAV
- Masterkurvor före och efter åldring enligt RTFOT och RTFOT+PAV
- Utmattningsmotstånd enligt $|G^*| \cdot \sin(\delta)$, Glover-Rowe-parametern $G'/\tan(\delta)$, Christensen-Anderson R-värde (reologiskt index), LAS-test efter åldring enligt RTFOT och RTFOT+PAV
- Sprickmotstånd vid låga temperaturer enligt 4-mm DSR-test och BBR för bestämning av ΔT_c , efter åldring enligt RTFOT och RTFOT+PAV
- Duktilitet (ASTM D113) har ej provats i projektet men flera utmattnings- och sprickmotståndsparmetrar har tagits fram, som mäter likvärdiga egenskaper som duktilitet, se avsnitt 6.1.7 och 6.2.9.

Följande analyser har utförts på asfaltproverna:

- Stabilitet med dynamiskt triaxialförsök före åldring
- Vattenkänslighet med ITSr före åldring och styvhetsmodul före och efter MIST-konditionering, på AG-prover
- Laboratorieåldring av asfaltproverna
- Masterkurvor före och efter åldring och åldring+MIST-konditionering
- Styvhet genom intryckning
- Utmattningssegenskaper på åldrade AG-prover
- Sprickpropagering genom böjprovning på halvcirkulära provkroppar, SCB-test, på AG-proverna efter åldring och åldring+MIST-konditionering

Provresultaten har analyserats och utvärderats.

En livscykelanalys (LCA), se avsnitt 7, har genomförts för asfaltbeläggningarna med de sex analyserade bituminösa bindemedlen. Analysen fokuserade på koldioxidavtrycket och redovisningen av biogen koldioxid.

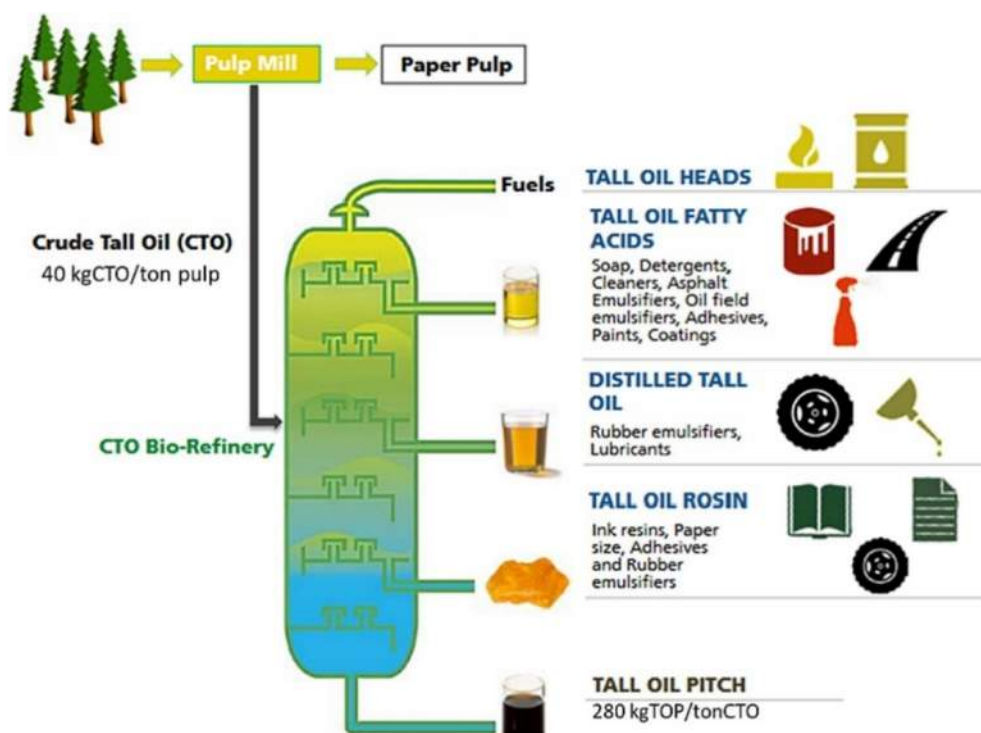
Samtliga resultat, i denna del, har rapporterats, dels i en VTI-rapport nr 1241, utgiven 2025, "Långsiktiga egenskaper och klimatavtryck av asfaltmassor med biobindemedel" (Zhu, o.a., 2025), dels i denna SBUF-rapport.

Det som återstår i den andra delen av projektet är att utföra fullskaliga försök och provvägar under verkliga trafik- och klimatförhållanden för att validera laboratorieresultaten i praktiken. Åldringsmekanismer, återanvändning av asfaltmassor med biobindemedel, val av vidhäftningsmedel och standardisering av klimatredovisning för biogena material i asfalt, är också intressant att fortsätta undersöka.

4. Litteraturstudie

4.1. Tall Oil Pitch (TOP)

Tall Oil Pitch, kallas även för talloljebeck, tillverkas i bioraffinaderier genom destillation av råttallolja, som är en biprodukt från sulfatmassa-processen vid pappersbruk. Under destillationen separeras olika fraktioner baserade på kokpunkt, där TOP utgör den tyngsta och minst flyktiga delen (Figur 1). TOP är en viskös och mörkfärgad substans med viss bindningsförmåga (Figur 2). Kemiskt sett består TOP huvudsakligen av högkokande estrar och fria syror. Dessa egenskaper gör den potentiellt användbar som delvis ersättning av bitumen i asfaltmassor.



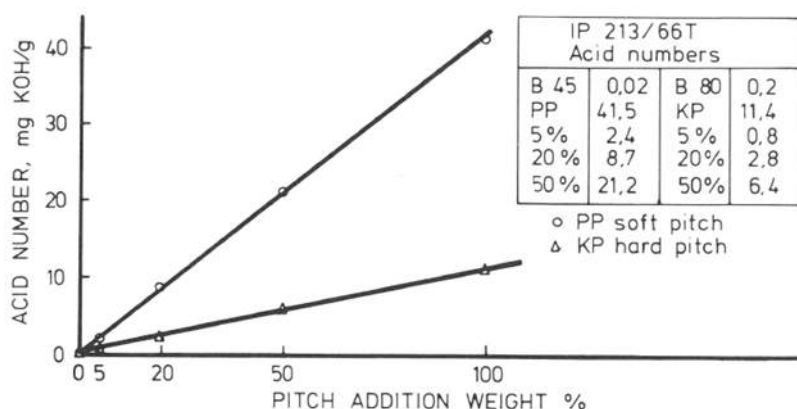
Figur 1. Fraktioner av råttallolja separerade av bioraffinaderi (Vela, González-Arias, Vilches, Seemann & Thunman 2023).



Figur 2. Den TOP-produkt som användes i denna studie. Foto: Jiqing Zhu.

4.2 Användning av TOP i asfalt

Tidiga försök att använda TOP som tillsats i asfalt rapporterades från Finland och Kanada i slutet av 1980-talet (Blomberg 1987; Mazuck 1993). Motivationen för att bedriva forskningen vid den tiden var främst de ekonomiska fördelarna. I början av 1990-talet forskade Peltonen (1990, 1992) på biobindemedel som innehöll mer än 10 % TOP. Studien hävdade att TOP kan användas i asfalt med viss fördel av förbättrad vidhäftning mellan bindemedel och stenmaterial. Den förbättrade vidhäftningen antogs bero på den höga surheten (lågt pH-värde och högt syratalt, se Figur 3) hos TOP genom kemisk adsorption (även kallas för kemisorption). Mazuch och Jeffery (1995) konstaterade i sin studie att TOP kan förbättra vidhäftningen i en utsträckning som är jämförbar med konventionella vidhäftningsmedel.

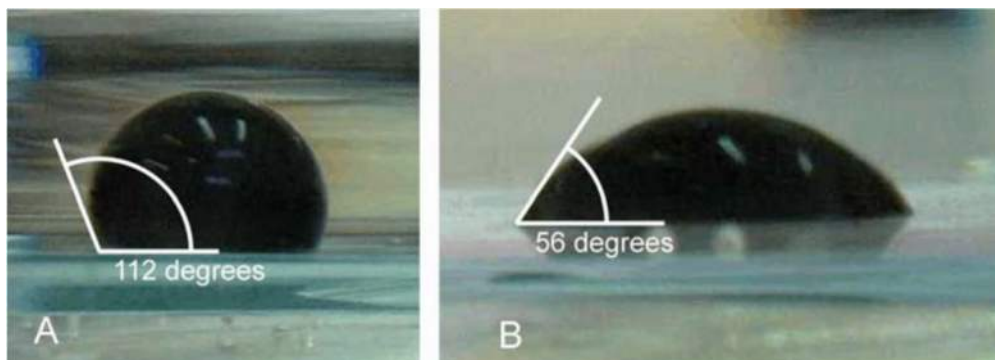


Figur 3. Syratalt av bindemedel med TOP (Peltonen 1990).

Ball, Herrington och Patrick (1993) undersökte blandningar av TOP och bitumen och kom fram till att de uppfyller kraven i specifikationen och ska kunna fungera som bindemedel i asfaltbeläggningar på Nya Zeeland. Forskarna menade dock att den höga syrahalten i TOP kan orsaka problem när TOP används tillsammans med vidhäftningsmedel baserade på aminer, eftersom karboxylatsalter skulle sannolikt bildas. Även om karboxylatsalterna fortfarande är aktiva som vidhäftningsmedel, kan dehydrering av salterna ske vid högre temperaturer, 130–180 °C enligt Ball, Herrington och Patrick (1993) och 200 °C enligt Walker (2019), och därmed bilda inaktiva amider och vatten.

Under 2000-talet fortsatte forskare från Nya Zeeland (Bearsley 2003; Bearsley & Haverkamp 2007a, 2007b) att undersöka användningen av TOP i asfalt. Forskarna (Bearsley & Haverkamp 2007a) bekräftade att TOP förbättrar asfaltens vattenkänslighet men negativt påverkar effektiviteten av aminbaserade vidhäftningsmedel. Förbättringen av vattenkänslighet förklarades genom att undersöka gränstytspänning och kontaktvinkel hos bindemedel (Figur 4). Bearsley och Haverkamp (2007b) konstaterade också att TOP gör biobindemedel mer känsliga för oxidativ härdning på grund av åldring, jämfört med konventionella bitumen. Med

andra ord skulle biobindemedel med TOP härda mer än konventionella bitumen efter åldring, hävdade forskarna.

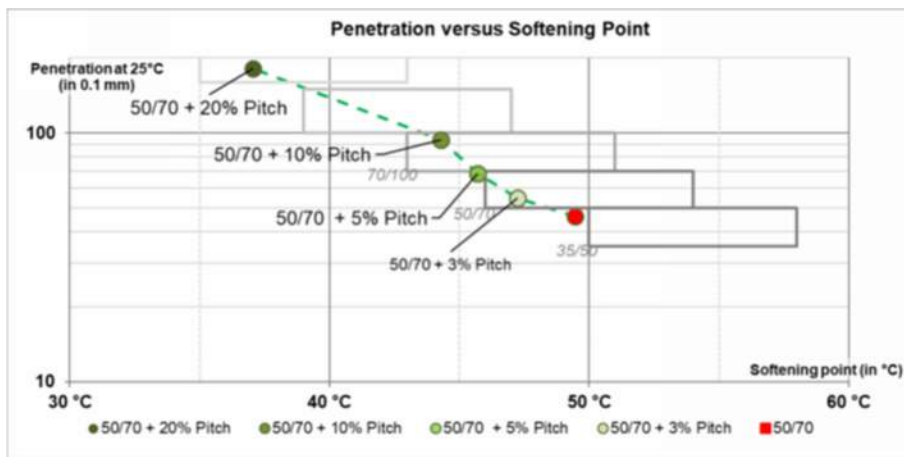


Figur 4. Kontaktvinkelmätningar på objektglas i vatten vid 60 °C: (A) ett 180/200 bitumen; (B) ett 180/200 biobindemedel med 75 % 40/50 bitumen och 25 % TOP. Mindre kontaktvinkel innebär ökad energi som krävs för att vatten ska få bort bitumen från objektglaset (Bearsley & Haverkamp 2007a).

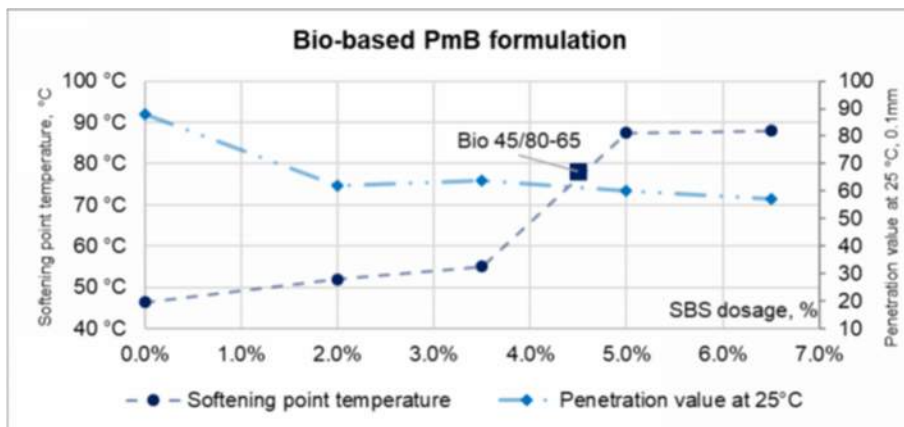
Wu, Feng och Wong (2004) analyserade syntetiska blandningar av fettsyra, hartssyra och sterol för att förutsäga de fysiska egenskaperna hos TOP. Deras resultat visade att fysiska egenskaper såsom viskositet och penetration hos TOP kan justeras för att möta olika tekniska krav i olika klimatzoner. Ahmedzade, Tigdemir och Kalyoncuoglu (2007) undersökte användningen av en hårdare TOP tillsammans med SBS-polymer, en blocksampolymer med kedjestruktur styren-butadien-styren (SBS), i bitumen och konstaterade att modifieringen med TOP och SBS förbättrade fysiska och mekaniska egenskaper hos asfalt.

I början av 2010-talet belades en provväg i Australien för att undersöka alternativa bindemedel för vägbeläggningar (Urquhart 2012; Urquhart & Malone 2013). Under urvalsprocessen, bland flera alternativ, visade en TOP-produkt de mest lovande resultaten som bindemedel för en provväg med tanke på tekniska egenskaper och säkerhet. TOP-produkten användes som delvis ersättning i bitumen (6,9 %). En ytbehandling med bituminösa bindemedel (ej emulsion, på engelska: sprayed sealing) belades med biobindmedlet i jämförelse med ett konventionellt bitumen. Den första uppföljningen av provvägen visade att biobindmedlet med TOP presterade likt konventionell bitumen, men med vissa problem med stensläpp som inte berodde på bindemedlet självt. Studien konstaterade att biobindmedlet med den valda TOP-produkten ska fungera bra i ytbehandling. Den enda nackdelen med dess användning i ytbehandling är att det kan leda till en något kortare livslängd än konventionellt bitumen, och därmed en något högre kostnad för beläggningen.

Under de senaste åren har användningen av TOP i asfalt motiverats mer av dess miljöfördelar. Till exempel, TOP bidrar till att minska fossilberoendet och klimatpåverkan av asfalt (Porot & Haslam 2020; Eriksson 2021; Olshage 2022). Porot och Haslam (2020) använde TOP för att delvis ersätta bitumen med upp till 20 % och konstaterade att biobindemedlen uppfyller de tekniska kraven i dagens specifikation för bitumen (Figur 5). Den samma studie undersökte också användningen av TOP i PMB och visade att ett 45/80-65 PMB kan tillverkas med ett 35/50 basbitumen och 10 % TOP samt 4,5 % SBS (Figur 6).



Figur 5. Egenskaper hos blandningar av 50/70 bitumen och TOP (Porot & Haslam 2020).



Figur 6. Formulering av ett PMB med TOP (10 %) och SBS (Porot & Haslam 2020).

5. Laboratoriestudie

5.1 Bindemedel

Sex bituminösa bindemedel valdes ut i denna studie. De var av tre olika kvalitetstyper, 70/100, 160/220 och 40/100-75 PMB. För varje kvalitetstyp fanns ett biobindemedel med biogen komponent och ett kommersiellt tillgängligt referensbindemedel för jämförelseändamål. De sex analyserade bindemedlen listas nedan:

- Bio-70/100, biobindemedel med TOP
- Ref-70/100, konventionellt belägningsbitumen
- Bio-160/220, biobindemedel med TOP
- Ref-160/220, konventionellt belägningsbitumen
- Bio-PMB 40/100-75, polymermodifierat bitumen med en biogen komponent
- Ref-PMB 40/100-75, konventionellt polymermodifierat bitumen.

De två biobindemedlen med TOP (Bio-70/100 och Bio-160/220) proportionerades och framställdes i VTI:s vägmateriallaboratorium i Linköping genom att blanda en TOP-produkt med ett 50/70 basbitumen. Bio-70/100 innehåller 5 % TOP och Bio-160/220 innehåller 21 % TOP.

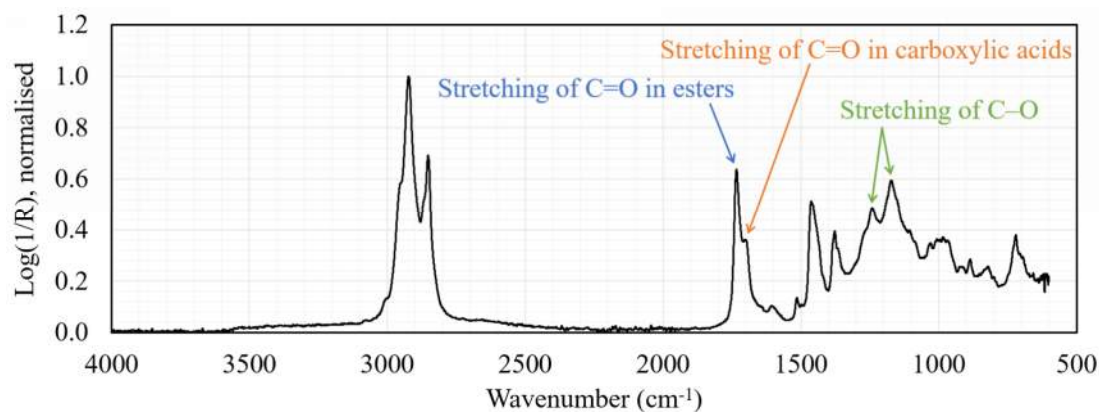
Den TOP-produkt som användes i denna studie var en viskös och mörkfärgad substans, se Figur 2, vars egenskaper anges i Tabell 1 och dess fettsyrasammansättning visas i Figur 7. TOP-produkten analyserades med FTIR, Fourier Transform Infrared Spectroscopy. Dess FTIR-spektrum presenteras i Figur 8. Förutom de metylen- och metylgrupper som vanligtvis finns i organiska ämnen, visar FTIR-spektrumet starka signaler från C=O och C-O kemiska bindningar, vilket bekräftar förekomsten av en stor mängd estrar och syror i TOP-produkten.

Tabell 1. Egenskaper hos den TOP-produkt som användes i denna studie.

Egenskap	Provningsmetod	Resultat
Densitet vid 50 °C (kg/m ³)	ISO 12185:2024	995
Flampunkt, Cleveland Open Cup (°C)	ISO 2592:2017	>200
Viskositet, Brookfield vid 60 °C (mPa•s)	SS-EN 13302:2018	1060
Syratal (mg KOH/g)	ISO 660:2020	33
Jodtal (g jod/100 g)	ISO 3961:2024	136

Fatty acid composition GC-FID	
(QTI-C-005 In accordance with ISO 12966-2 (95.2) and in accordance with ISO 12966-4)	
Q C14:0	0,2 %
Q C15:0	0,1 %
Q C16:0	4,8 %
Q C16:1 omega 7	0,9 %
Q C17:0	0,3 %
Q C18:0	1,7 %
C18:1 omega 7	1,2 %
Q C18:1 omega 9	32,4 %
C18:1 Trans Fatty Acid	<0,1 %
Q C18:2 omega 6	35,7 %
C18:2 Trans Fatty Acid	2,2 %
Q C18:3 omega 3	0,9 %
C18:3 Trans Fatty Acid	0,2 %
Q C20:0	1,4 %
C20:1 omega 7	0,8 %
Q C20:1 omega 9	1,6 %
C20:1 omega 11	5,7 %
Q C20:2 omega 6	1,7 %
Q C22:0	3,2 %
Q C22:1 omega 9	0,5 %
Q C24:0	4,5 %

Figur 7. Fettsyrasammansättning av den TOP-produkt som användes i denna studie.

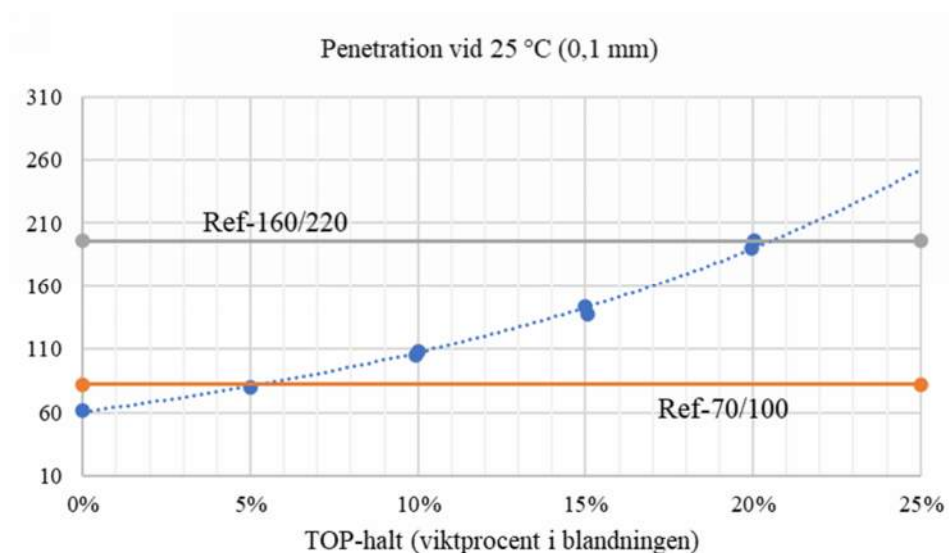


Figur 8. FTIR-spektrum av den TOP-produkt som användes i denna studie.

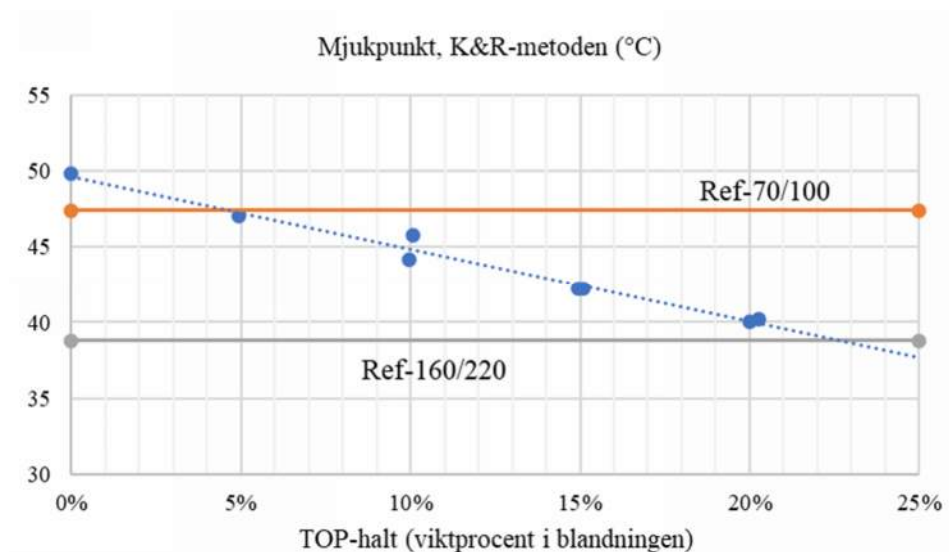
Både Bio-PMB 40/100-75 och Ref-PMB 40/100-75 tillhandahålls av en tillverkare av bituminösa bindemedel. Bio-PMB innehåller en växtbaserad biogen komponent från skogsindustrin medan Ref-PMB är en vanlig PMB-produkt.

5.1.1. Proportionering av biobindemedel med TOP

För att proportionera 70/100 och 160/220 biobindemedel med TOP, blandades ett 50/70 basbitumen med TOP, i olika TOP-halter av 5 %, 10 %, 15 % respektive 20 % (viktpocent i blandningen). Därefter analyserades blandningarna för penetration och mjukpunkt enligt SS-EN 1426:2024 respektive SS-EN 1427:2015. Resultaten presenteras i Figur 9 och Figur 10, som visar att penetration av blandningen ökar med TOP-halten medan mjukpunkt minskar med TOP-halten. Penetrations- och mjukpunktsresultaten följer en exponentiell respektive linjär trendlinje. Referensbitumen Ref-70/100 och Ref-160/220 analyserades också för penetration och mjukpunkt. Genom att matcha både penetration och mjukpunkt mellan referensbitumen och blandningarna bestämdes TOP-halterna i biobindemedel Bio-70/100 och Bio-160/220, det vill säga 5 % respektive 21 %.



Figur 9. Penetration av blandningarna med TOP och 50/70 basbitumen.



Figur 10. Mjukpunkt av blandningarna med TOP och 50/70 basbitumen.

Dessa två biobindemedel med TOP (Bio-70/100 och Bio-160/220) analyserades enligt provningsmetoderna i SS-EN 12591:2009. Resultaten presenteras i Tabell 2 och Tabell 3. De uppfyller kraven för 70/100 och 160/220 bitumen i SS-EN 12591:2009.

Tabell 2. Provningsresultat av Bio-70/100, med 5 % TOP.

Analys	Resultat	Krav i SS-EN 12591:2009
Penetration vid 25 °C (0,1 mm)	80	70–100
Mjukpunkt, K&R-metoden (°C)	47,2	43–51
Dynamisk viskositet vid 60 °C (Pa·s)	160	Min. 90
Kinematisk viskositet vid 135 °C (mm²/s)	350	Min. 230
Brytpunkt Fraass (°C)	-13	Max. -10
Flampunkt, Cleveland Open Cup (°C)	> 300	Min. 230
Löslighet i toluen	99,95 %	Min. 99,0
Viktförändring, efter RTFOT vid 163 °C	0,05 %	Max. 0,8 % (absolutbelopp)
Mjukpunktsökning (°C), efter RTFOT vid 163 °C	3,4	Max. 9
Bibehållen penetration, efter RTFOT vid 163 °C	66 %	Min. 46 %

Tabell 3. Provningsresultat av Bio-160/220, med 21 % TOP.

Analys	Resultat	Krav i SS-EN 12591:2009
Penetration vid 25 °C (0,1 mm)	193	160–220
Mjukpunkt, K&R-metoden (°C)	40,4	35–43
Dynamisk viskositet vid 60 °C (Pa·s)	50,2	Min. 30
Kinematisk viskositet vid 135 °C (mm²/s)	211	Min. 135
Brytpunkt Fraass (°C)	-20	Max. -15
Flampunkt, Cleveland Open Cup (°C)	> 295	Min. 220
Löslighet i toluen	99,85	Min. 99,0
Viktförändring, efter RTFOT vid 163 °C	-0,03 %	Max. 1,0 % (absolutbelopp)
Mjukpunktsökning (°C), efter RTFOT vid 163 °C	3,4	Max. 11
Bibehållen penetration, efter RTFOT vid 163 °C	65 %	Min. 37 %

5.2 Ballastmaterial

Ballastmaterial från Skanskas täkt i Vällsta, användes för att tillverka asfaltmassorna i denna studie. En petrografisk analys utfördes på materialet. Analysen visar att det provade materialet är ovittrat och består av 100 % krossberg i storleken 4–32 mm. Flera olika distinkta bergartstyper identifierades där granitisk-granodioritisk gnejs dominerar. Dessutom förekommer granit och diabas också. Se Bilaga 1 för mer information om bergartfördelningen.

5.3 Tillverkning av asfaltmassor

Ballastmaterialets fraktioner siktades upp, för att kunna tillsättas i rätt proportioner vid tillverkningen av asfaltmassorna. Recept togs fram för att asfaltmassorna skulle uppfylla Trafikverkets krav. Trots det blev samtliga asfaltmassors fillerhalter aningen förhöjda, se avsnitt 6.2.1. Troligtvis har filler skapats vid blandningen av asfaltmassorna.

Samtliga blandningar av asfaltmassa, utfördes på Skanskas asfaltslaboratorium i Västerhaninge, i en laboratorieblandare med en kapacitet på 50 kg (se Figur 11). Totalt genomfördes 20 olika blandningar, bestående av 2 testblandningar och 18 blandningar, avsedda för tillverkning av plattor. Vid blandningarna användes ballastmaterialet enligt avsnitt 5.2, penetrationsbitumen från Skanskas bitumendepå i Norrköping, Bio-bindemedel som tillverkades av VTI enligt avsnitt 5.1.1 samt PMB-bitumen, både Ref- och Bio-, som tillverkades av Nynas AB.



Figur 11. Laboratorieblandare och inuti blandaren. Foton: Patryk Witkiewicz.

Ballastmaterialet var densamma för alla asfaltmassor. Ingen returafalt eller vidhäftningsmedel användes i massorna.

För varje asfalttyp med biobindemedel och dess referens var receptet och packningsförfarandet detsamma. Deras volymetriska parametrar hölls så nära varandra som möjligt. Detta underlättar jämförelsen mellan asfaltmassorna med olika bindemedel. Se avsnitt 6.2.1. för mer information om dessa sex asfaltmassor.

Stenmaterial och bitumen värmdes upp i varmluftsugn till rätt temperatur innan blandning kunde ske. Även blandaren var utrustad med en uppvärmningsfunktion och isolerade vägar i kammaren, för att hålla konstant temperatur under blandningen. Blandningsprocessen följde samma sekvens som i asfaltverket, det vill säga först tillsätts stenmaterialet, sedan bitumen och slutligen filler. Tillsättning av bitumen visas i Figur 12. Därefter ökades omrörningen med metallbladen till högsta hastighet och asfaltmassan blandades i 2 minuter.

Färdigblandad asfaltmassa överfördes omedelbart till formen för tillverkning av plattor. Komprimering startades direkt för att säkerställa att asfaltmassan hade rätt temperatur vid vältningen.

Sex typer av asfaltmassa tillverkades:

- ABT 16 med Bio-70/100
- ABT 16 med Ref-70/100
- AG 16 med Bio-160/220
- AG 16 med Ref-160/220
- ABT 16 med Bio-PMB 40/100-75
- ABT 16 med Ref-PMB 40/100-75.



Figur 12. Tillsättning av bindemedel vid blandning av asfaltmassa. Foto: Patryk Witkiewicz.

5.4 Tillverkning av provkroppar

Vid tillverkningen av provkroppar packades asfaltsplattor med en asfaltvält. Kärnprover borrades från plattorna (se Figur 16).



Figur 13. Tillverkning av provkroppar. Till vänster: packning av asfaltsplattor på Skanskas labb i Västerhaninge; till höger: borrkärnor från plattorna. Foton: Patryk Witkiewicz.

Sammantaget tillverkades arton asfaltsplattor i denna studie (3 plattor av varje asfaltstyp med 6 olika asfaltstyper). Tillverkning av plattor krävde omfattande förberedelser, inklusive insamling av material (till exempel ballast från Skanskas täkt samt färdigblandade biobindemedel med TOP från VTI) och proportionering (siktanalys av alla stenmaterialfraktioner och proportionering av asfaltmassor enligt recept). Efter detta utfördes laboratorieblandning av asfalt i en asfaltsblandare med en maximal kapacitet på 50 kg (en platta vägde 41–44 kg beroende på typ av massa). Vid plattframställningen placerades en vält på en räls och asfaltmassa i en stålform med måtten 625×500×50 mm placerades undertill, se Figur 13 (till vänster). Välten hade en vikt av 1650 kg med en vibrationsfrekvens på max 50 Hz. För att uppnå önskad nivå av komprimering genomfördes vältning enligt följande plan:

- 10 överfarter med statisk vältning
- 10 överfarter med vibrationer
- 10 överfarter med statisk vältning.

Tillverkningen av provkroppar genomfördes i flera steg och visas i Figur 14. Den korrekta mängden av massan placerades i formen och därefter komprimerades asfaltsplattan med välten till en tidigare fastställd hålrums halt i enlighet med asfaltreceptet (se Bilaga 2) och det ovanstående vältningsschemat.



Figur 14. Olika steg för att tillverka provkroppar. (A) Stålformen, (B) Gjutning av asfaltmassa i formen, (C) Vältning av platta, (D) Platta efter packning, (E) Färdig platta, (F) Framtagning av borrhärnor. Foton: Patryk Witkiewicz.

Vid slutförd packning lämnades plattan för att svalna innan den togs ut ur formen och placerades på en jämn och stabil yta för att undvika deformationer och skador (se Figur 15). Från varje asfaltsplatta borrades ur borrhärnor med diametrar på 150 mm och 100 mm (se Figur 16) för vidare analyser. Prover borrades med ett minimum av 10 mm avstånd från plattans kant för att förhindra en undermålig packningsgrad, som ofta uppstår runt kanterna.



Figur 15. Packade asfaltsplattor. Foto: Patryk Witkiewicz.



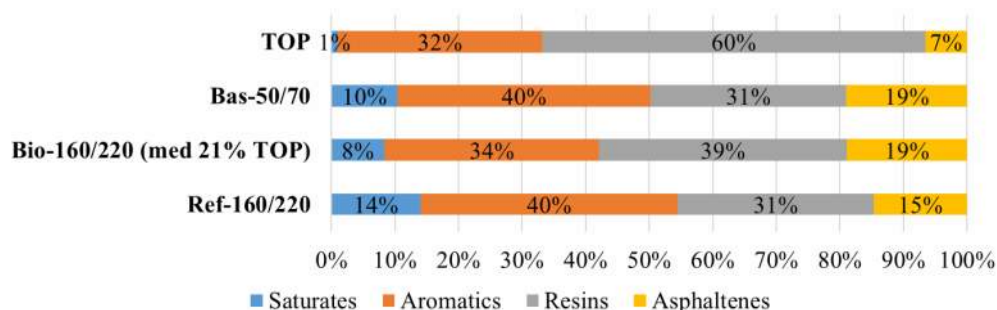
Figur 16. Borrning av kärnor med diametrar på 150 mm (till vänster) och 100 mm (till höger). Foton: Patryk Witkiewicz.

6. Provningsmetoder och resultat

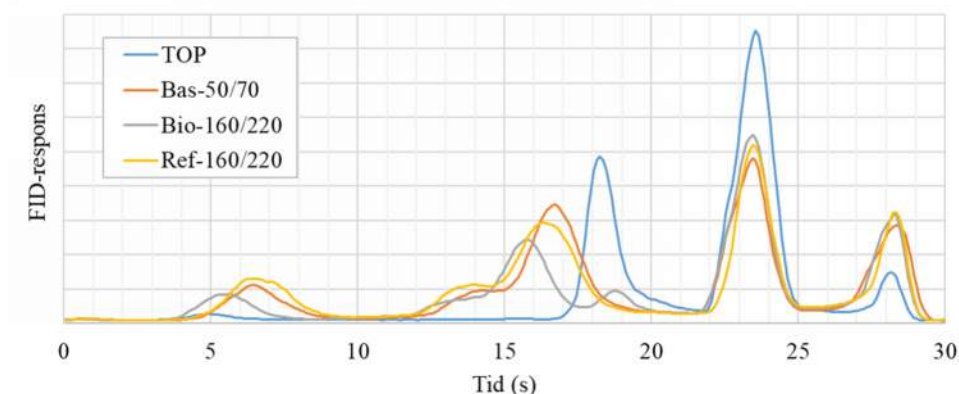
6.1 Bindemedel

6.1.1. SARA-analys

Två bindemedel, Bio-160/220 som innehåller en större andel TOP och dess referens Ref-160/220, testades med SARA-analys genom TLC-FID enligt metodbeskrivningen i VTI notat 74-1999 (Edwards, Salomonsson & Wallgren 1999). SARA-analysen utfördes med VTI:s Iatroscan TLC-FID, Thin-Layer Chromatography with Flame Ionization Detection. För jämförelse testades också TOP och 50/70 basbitumen med samma metod. Resultaten presenteras i Figur 17, som visar att TOP består huvudsakligen av aromater och hartser. Halten av hartser i TOP var 60 %, vilket var dubbelt så mycket som i konventionella bitumen. Efter blandningen med TOP blev halten av hartser i biobindemedlet Bio-160/220 betydligt högre än det 50/70 basbitumen. Med 21 % TOP har Bio-160/220 väldigt annorlunda procentandelar av SARA-fraktioner från dess referensbitumen Ref-160/220. Även deras skillnad i andelen aromater är inte så stor (34 % respektive 40 %), FID-responskurvorna (se Figur 18) visar att aromaterna i TOP skiljer sig från aromaterna i konventionella bitumen. Detta indikeras av den extra topp hos Bio-160/220 som visas mellan 18 och 19 sekunder i Figur 18. Trots denna direkta jämförelse är det värt att notera att SARA-analys genom TLC-FID inte är en helt lämplig metod för lättare oljor (Kheirollahi, BinDahbag, Bagherzadeh, Abbasi & Hassanzadeh 2024). Lämpligheten av denna metod för TOP planeras undersökas ytterligare i framtida studier.



Figur 17. Resultat av SARA-analysen.



Figur 18. FID-responskurvor från SARA-analysen.

6.1.2. Laboratorieåldring av bindemedel

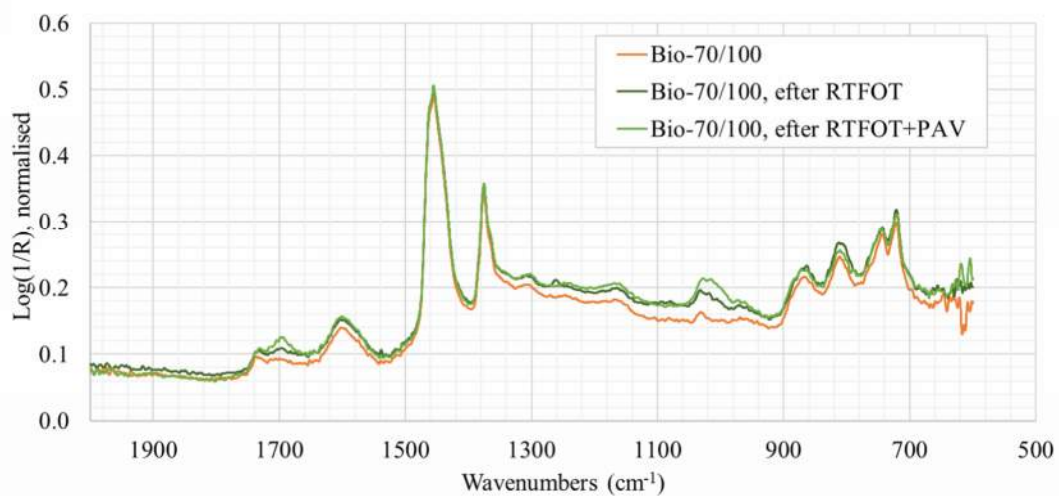
För att undersöka långsiktiga egenskaper åldrades alla de sex bituminösa bindemedlen i laboratorium med Rolling Thin Film Oven Test, RTFOT vid 163 °C i 75 minuter enligt SS-EN 12607-1:2024 och därefter Pressure Aging Vessel, PAV-åldring vid 100 °C och 2,1 MPa i 20 timmar enligt SS-EN 14769:2023. Alla dessa bindemedel listas i Tabell 4 med deras penetration (SS-EN 1426:2024) och mjukpunkt (SS-EN 1427:2015) före åldring. Dessutom bestämdes deras PG-klasser (Performance Grades) också enligt ASTM D6373-23 och AASHTO M 320-23, som presenteras i samma tabell.

Tabell 4. Bindemedels penetration och mjukpunkt före åldring samt PG-klass.

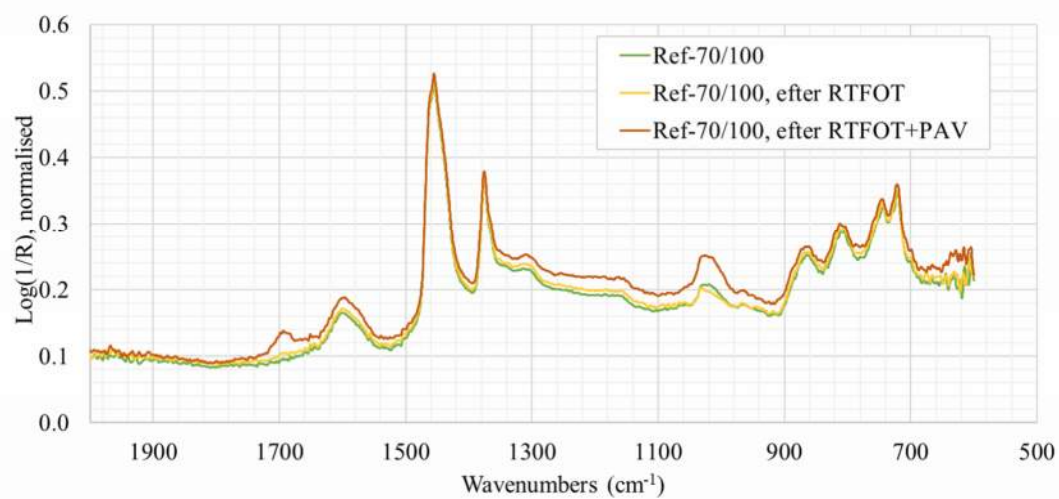
Bindemedel	Bio-70/100	Ref-70/100	Bio-160/220	Ref-160/220	Bio-PMB 40/100-75	Ref-PMB 40/100-75
Penetration vid 25 °C (0,1 mm)	80	82	193	196	66	53
Mjukpunkt, K&R-metoden (°C)	47,2	46,8	40,4	38,8	86,5	81,5
PG-klass	58-22	64-22	52-28	52-28	76-22	82-16

6.1.3. Karakterisering med FTIR

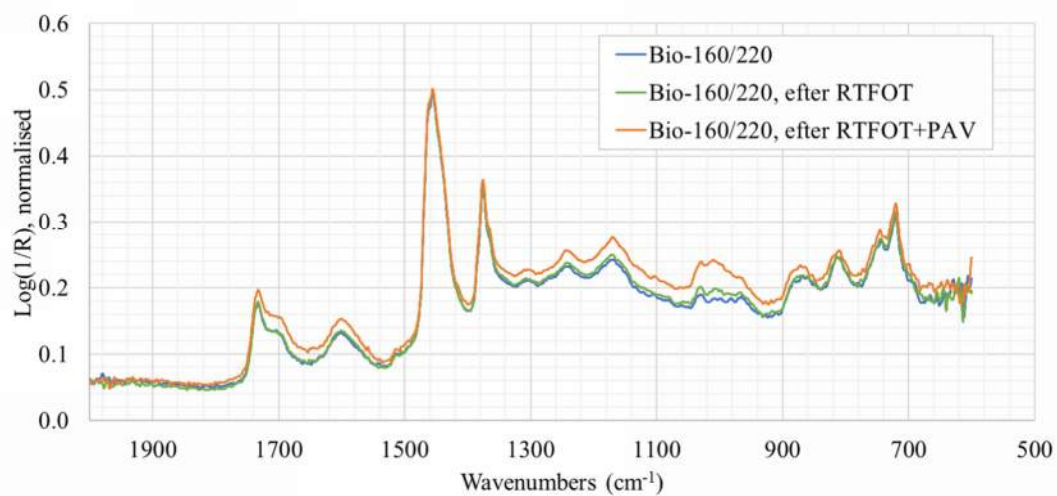
Både före och efter åldring karakteriserades de bituminösa bindemedlen med Attenuated Total Reflectance, ATR-FTIR. FTIR-analys kan identifiera kemiska och sammansättningsförändringar i bitumen genom att mäta absorptionen av infrarött ljus vid olika våglängder. Detta gör det möjligt att upptäcka specifika funktionella grupper, såsom karbonyl- och sulfoxidgrupper som bildas under åldringsprocessen samt andra funktionella grupper på grund av blandning med andra material (till exempel TOP). Figur 19 till Figur 24 presenterar FTIR-spektra för bindemedlen i denna studie. Resultaten visar att blandningen med TOP leder till ökade signaler från karbonylgrupp C=O och kol-syrebindning C-O (se Figur 8) vid 1735–1710 cm⁻¹ respektive 1300–1100 cm⁻¹. Ju mer TOP blandas in desto starkare signaler från dessa bindningar visas (Bio-160/220 med 21 % TOP jämfört med Bio-70/100 med 5 % TOP). Dessutom bildas karbonyl- och sulfoxidgrupper (vid 1660–1753 cm⁻¹ respektive 970–1070 cm⁻¹) under åldringsprocessen av bindemedel. Dessa grupper är viktiga indikatorer på kemiska förändringar som sker under åldring. Eftersom både blandningen med TOP och åldringen resulterar i ökad signal från karbonylgrupp C=O är det dock svårt att använda FTIR-resultaten, särskilt baserat på karbonylgrupp, för att utvärdera åldringsbeständigheten hos bindemedel med TOP.



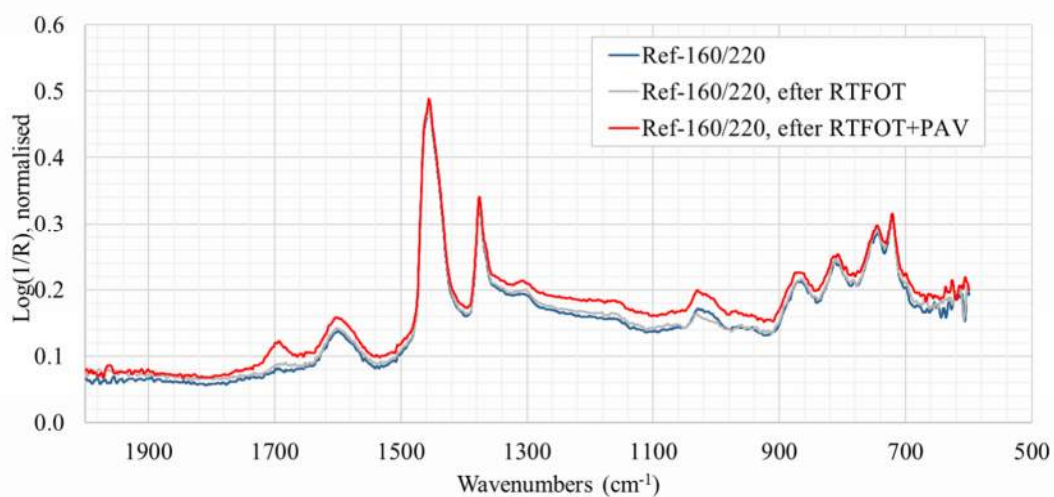
Figur 19. FTIR-spektra av Bio-70/100 före och efter åldring.



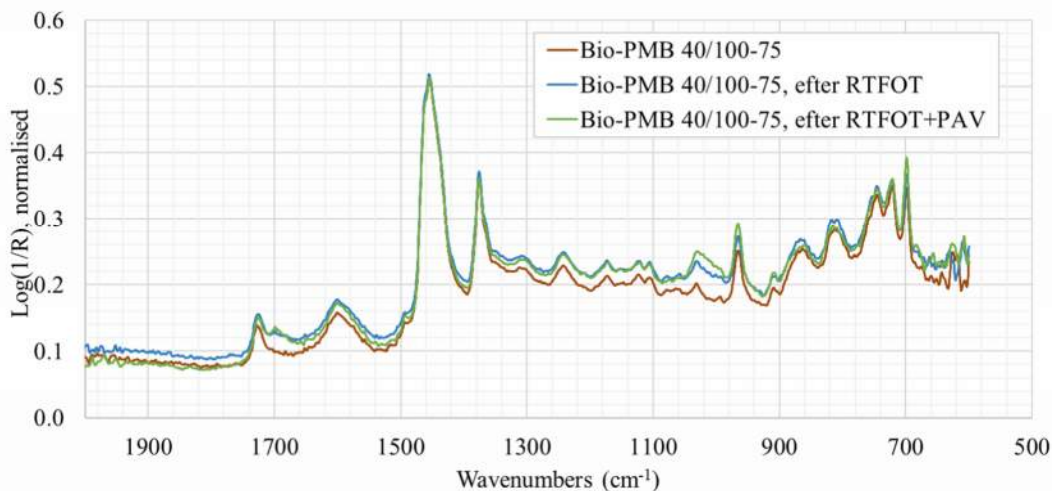
Figur 20. FTIR-spektra av Ref-70/100 före och efter åldring.



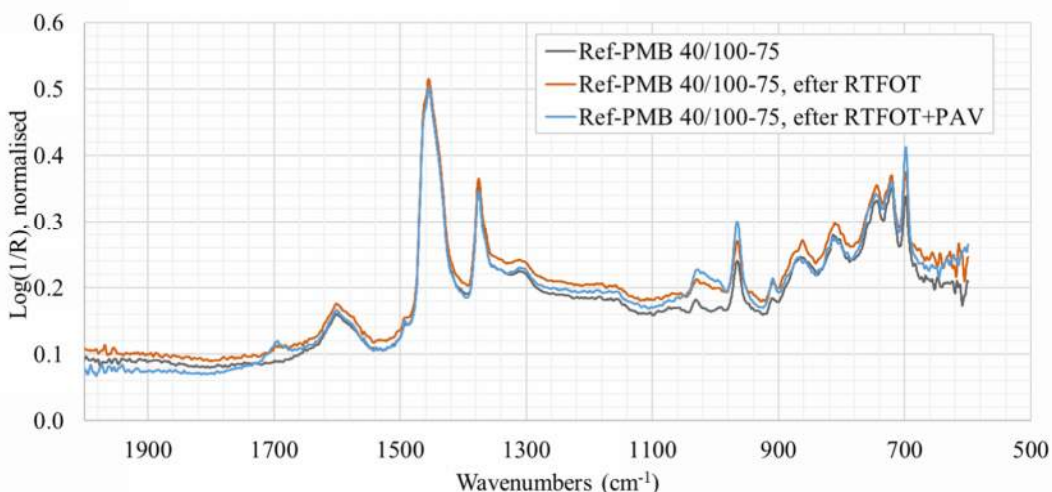
Figur 21. FTIR-spektra av Bio-160/220 före och efter åldring.



Figur 22. FTIR-spektra av Ref-160/220 före och efter åldring.



Figur 23. FTIR-spektra av Bio-PMB 40/100-75 före och efter åldring.



Figur 24. FTIR-spektra av Ref-PMB 40/100-75 före och efter åldring.

6.1.4. Förändring av mjukpunkt efter åldring

Resultaten av mjukpunkt (SS-EN 1427:2015) för de undersökta bindemedlen listas i Tabell 5. De biobindemedlen utan polymer, d.v.s. Bio-70/100 och Bio-160/220, uppvisar mindre mjukpunktsökningar efter åldring än sina referensbindemedel. Detta innebär att dessa biobindemedel, inom mätområdet och med mjukpunkt som mått, härdar mindre på grund av åldring. När det gäller PMB kan inte bara härdningen av basbitumen utan även den eventuella nedbrytningen av polymer påverka mjukpunkt efter åldring. Tabell 5 visar att mjukpunkt för Bio-PMB minskar efter åldring medan den för Ref-PMB ökar efter korttidsåldring med RTFOT och sedan minskar något efter långtidsåldring med PAV. Förutsätts samma åldringpåverkan på grund av

polymernedbrytning för båda PMB-bindemedlen, tyder resultaten på att Bio-PMB inom mätområdet härdar mindre på grund av åldring än Ref-PMB.

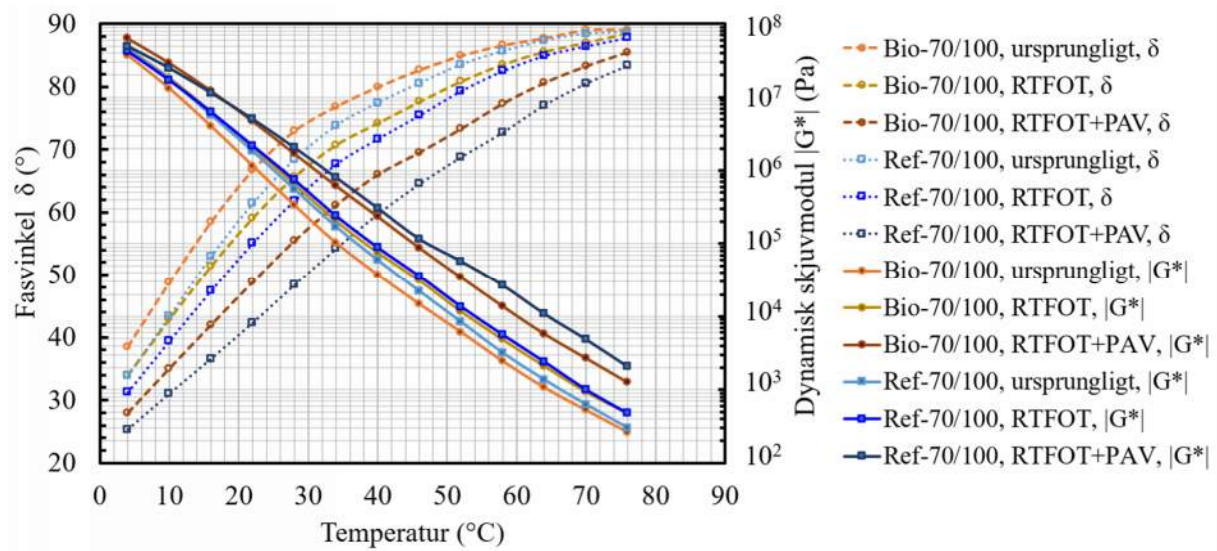
Tabell 5. Bindemedels mjukpunkt (SS-EN 1427:2015) före och efter åldring.

Åldringsstatus	Bio-70/100	Ref-70/100	Bio-160/220	Ref-160/220	Bio-PMB 40/100-75	Ref-PMB 40/100-75
Mjukpunkt (°C), ursprungligt	47,2	46,8	40,4	38,8	86,5	81,5
Mjukpunkt (°C), efter RTFOT	51,2	52,8	43,6	45,0	85,5	88,5
Mjukpunkt (°C), efter RTFOT+PAV	57,8	62,4	50,4	53,8	81,5	86,0

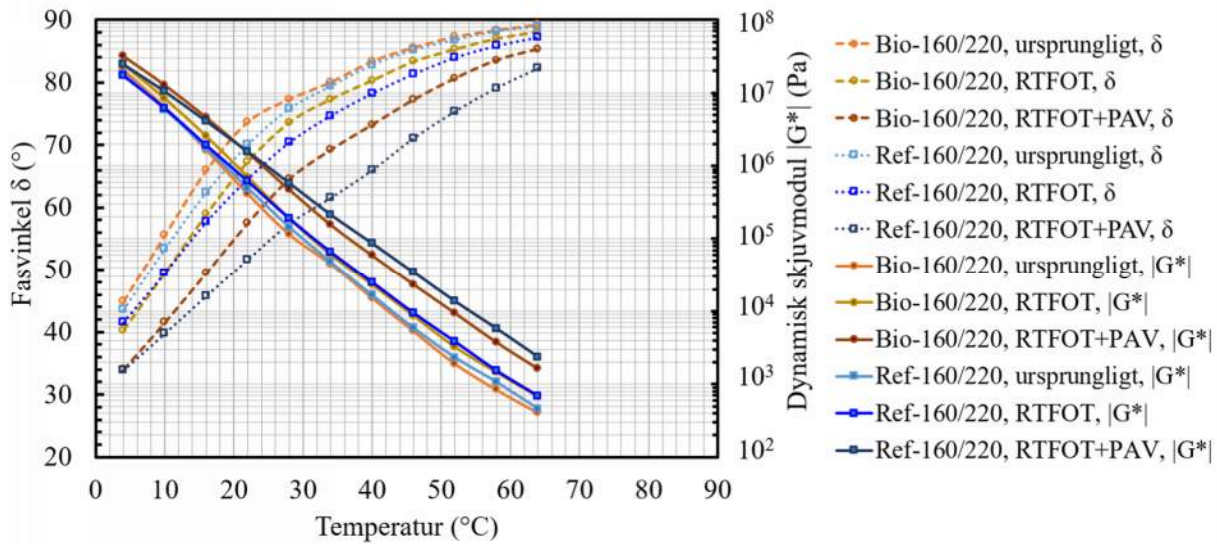
6.1.5. DSR temperatursvep

Resultaten av Dynamic Shear Rheometer, DSR temperatursvep (SS-EN 14770:2023) vid 1,59 Hz (10 rad/s) för de undersökta bindemedlen presenteras i Figur 25 till Figur 27, inklusive dynamisk skjuvmodul $|G^*|$ och fasvinkel δ , inom det linjära viskoelastiska området. Analyserna utfördes från 4 °C och uppåt med 8 mm och 25 mm plattor. Resultaten visar att de biobindemedlen har högre fasvinkel än sina referensbindemedel. Efter åldring, för bindemedel utan polymer, minskar fasvinkeln. De biobindemedlen utan polymer, d.v.s. Bio-70/100 och Bio-160/220, uppvisar fortfarande högre fasvinkel än sina referensbindemedel efter långtidsåldring med PAV. När det gäller PMB når fasvinkeln en plåtå i högttemperaturområdet. Bio-PMB visar mycket liknande åldringseffekt som Ref-PMB men med högre δ -värden.

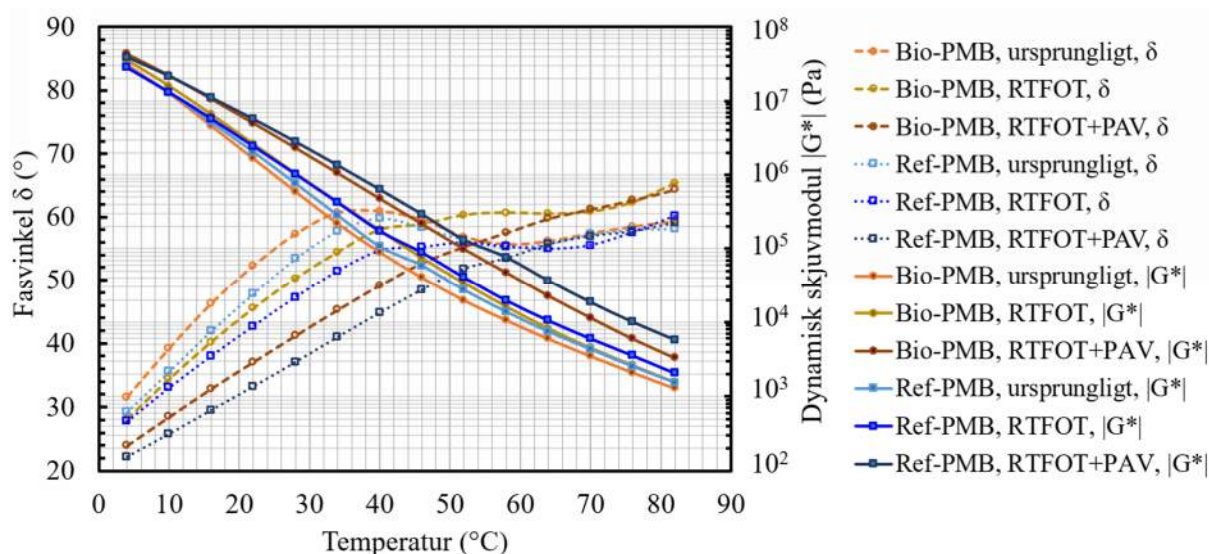
För varje bindemedelskvalitetstyp är $|G^*|$ -kurvorna för de två RTFOT-åldrade bindemedlen nästan identiska, även om det finns vissa små skillnader mellan de ursprungliga bindemedlen. Efter långtidsåldring med PAV ökar $|G^*|$, vilket innebär att bindemedlet blir styvare. De biobindemedlen uppvisar dock mindre ökning i $|G^*|$ efter långtidsåldring än sina referensbindemedel, särskilt i högttemperaturområdet. Detta stämmer överens med slutsatsen som dragits i föregående avsnitt baserat på mjukpunktsresultaten. Samtidigt verkar de biobindemedlen utan polymer uppvisa något högre $|G^*|$ -värden efter långtidsåldring än sina referensbindemedel vid lägre temperaturer (runt 4 °C), vilket tyder på att deras $|G^*|$ är något mer känslig för temperaturförändringar efter att ha genomgått PAV-åldring.



Figur 25. DSR temperatursvep resultat vid 1,59 Hz (10 rad/s) av 70/100 bindemedel.

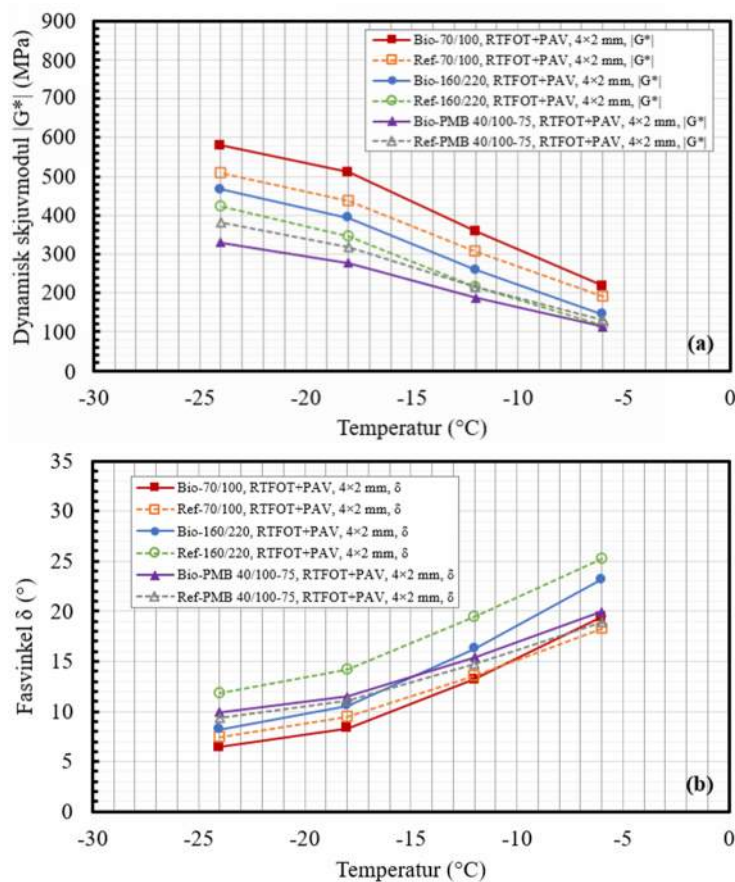


Figur 26. DSR temperatursvep resultat vid 1,59 Hz (10 rad/s) av 160/220 bindemedel.



Figur 27. DSR temperatursvep resultat vid 1,59 Hz (10 rad/s) av PMB.

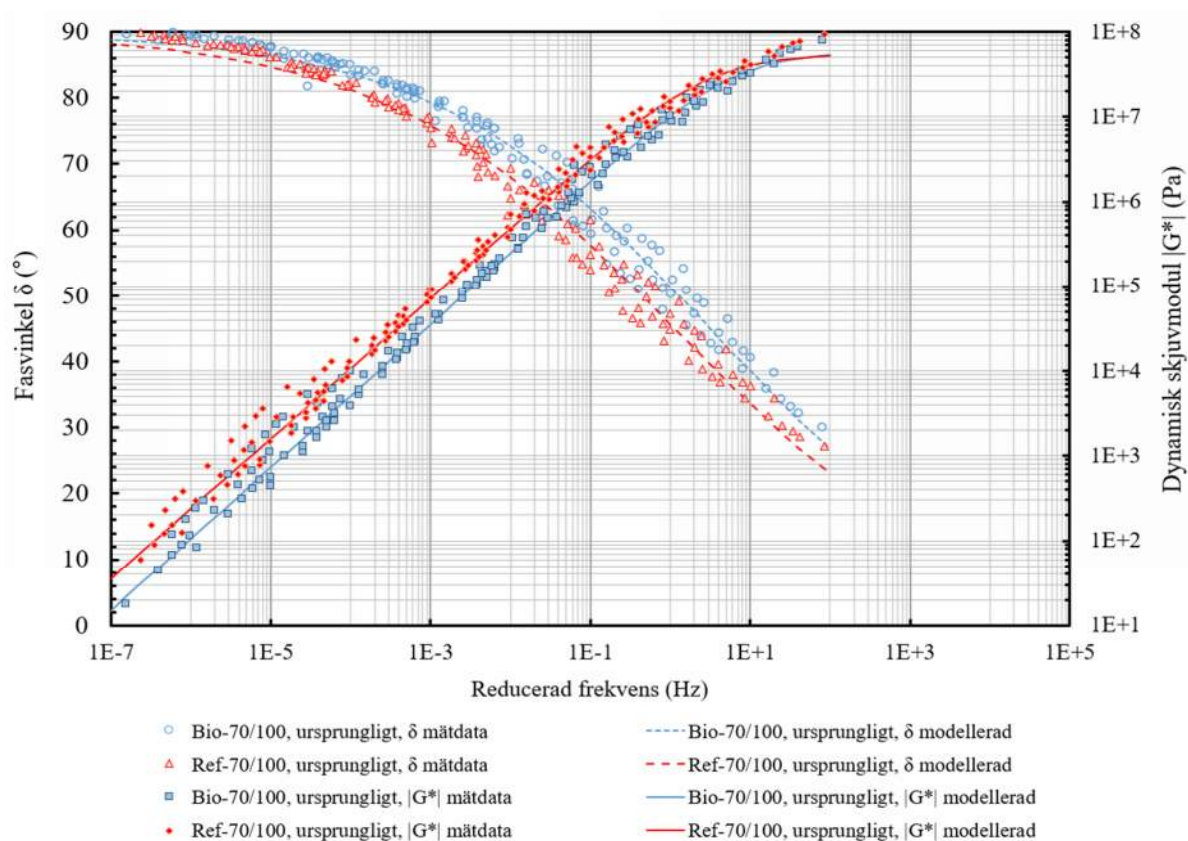
Vid minusgrader användes 4-mm DSR för att mäta de reologiska egenskaperna hos långtidsåldrade bindemedel. Figur 28 presenterar resultaten från 4-mm DSR-testet vid 1,59 Hz (10 rad/s) och olika låga temperaturer. Det framgår att, efter långtidsåldring och vid mycket låga temperaturer, visar de biobindemedlen utan polymer (d.v.s. Bio-70/100 och Bio-160/220) till viss del högre $|G^*|$ än sina respektive referensbindemedel. Samtidigt visar Bio-PMB något lägre $|G^*|$ än sitt referensbindemedel. När det gäller fasvinkel vid mycket låga temperaturer visar Bio-160/220 lägre δ än Ref-160/220 efter RTFOT+PAV, medan δ -värdena för de andra biobindemedlen ligger på liknande nivåer som sina motsvarande referensbindemedel.



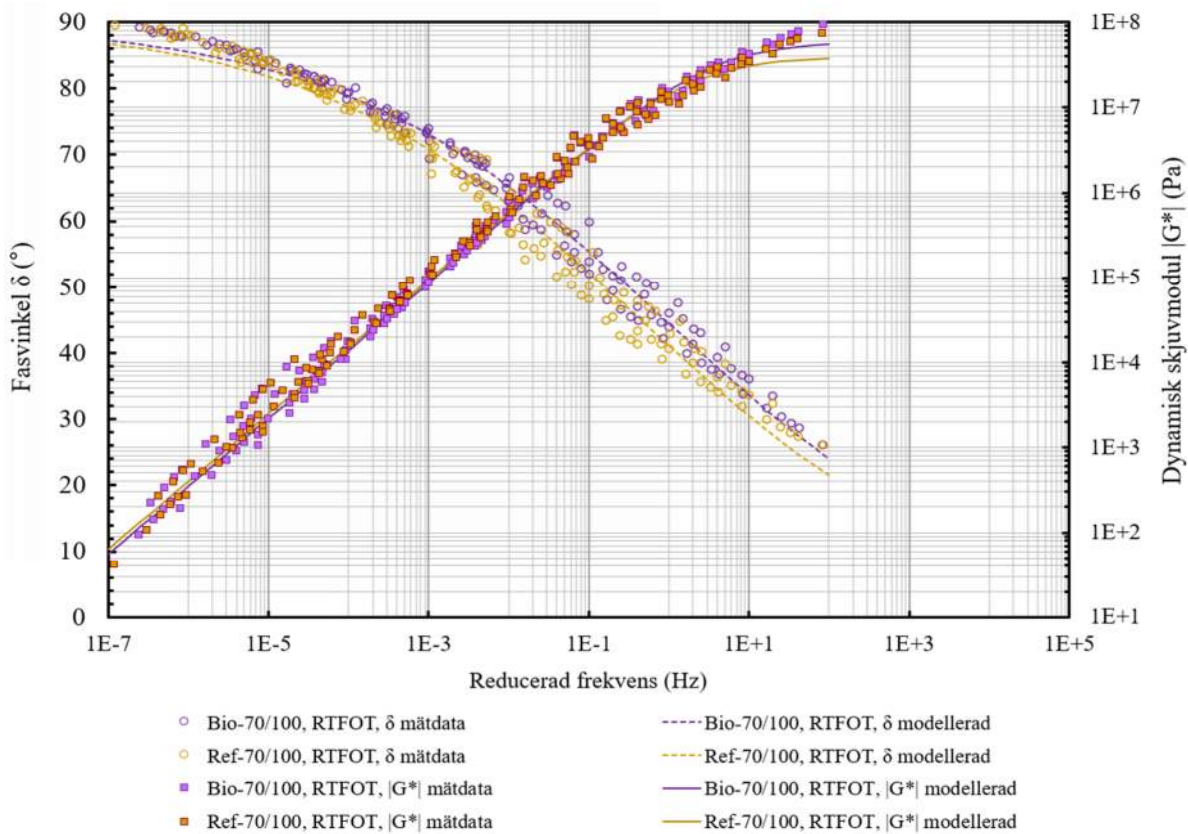
Figur 28. 4-mm DSR resultat vid 1,59 Hz (10 rad/s) av långtidsåldrade bindemedel: (a)- $|G^*|$, (b)- δ .

6.1.6. Masterkurvor för bindemedel

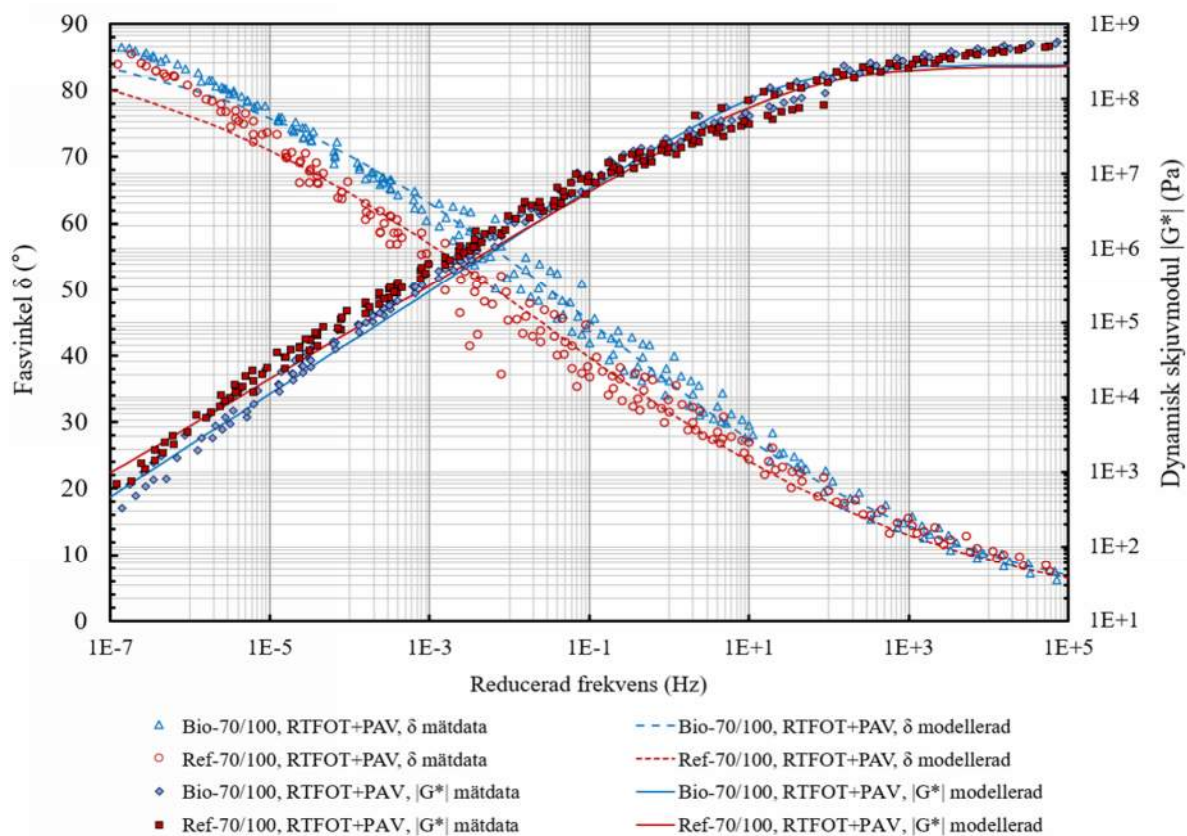
Masterkurvor används för att beskriva reologiska egenskaper hos bituminösa bindemedel över ett bredare temperatur- och frekvensområde. Dessa kurvor skapas genom att kombinera data från DSR vid olika temperaturer och frekvenser. I denna studie konstruerades masterkurvor för de undersökta bindemedlen vid referenstemperatur 10 °C och modellerades med den metod som beskrivs i VTI rapport 1084A (Zhu, Ahmed & Dinegdaie 2021). Figur 29 till Figur 37 presenterar dessa masterkurvor. Resultaten bekräftar att de biobindemedlen generellt har högre fasvinkel än sina referensbindemedel. Ett undantag är Bio-160/220 efter RTFOT+PAV som visade lägre fasvinkel än referensen vid mycket höga frekvenser (se Figur 34). Detta kan tyda på bindemedlets sprödhet vid mycket låga temperaturer och ökad risk för sprickbildning efter åldring. När det gäller $|G^*|$ verkar det som att de biobindemedlen är något mer känsliga för frekvensförändringar än sina referensbindemedel, särskilt efter långtidsåldring med RTFOT+PAV. De långtidsåldrade biobindemedlen har lägre $|G^*|$ än sina referensbindemedel vid låga frekvenser, men de kan nå liknande eller till och med högre $|G^*|$ -nivåer än referenserna vid höga frekvenser. Detta är en oönskad egenskap för bindemedel i asfalt. I vilken utsträckning det kan påverka asfaltegenskaper behöver utvärderas med försök på asfaltmassor.



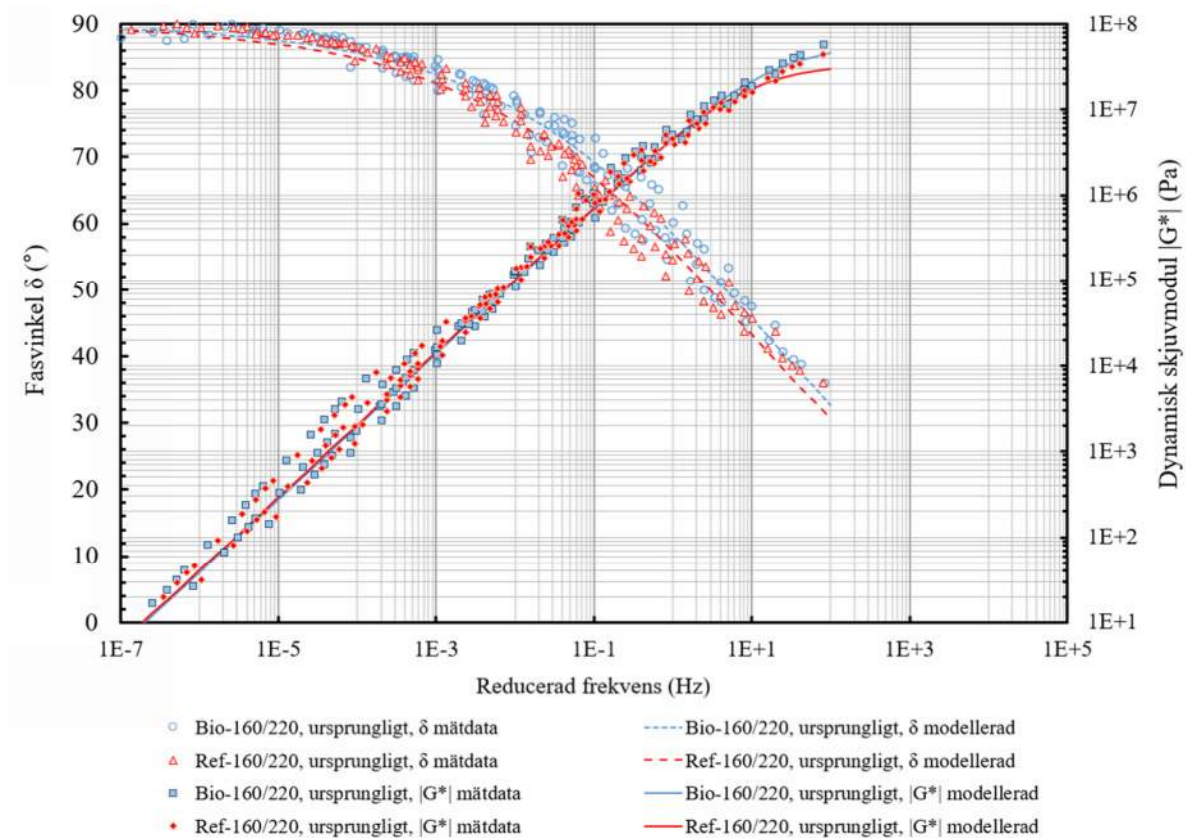
Figur 29. Masterkurvor av ursprungliga 70/100 bindemedel vid referenstemperatur 10 °C.



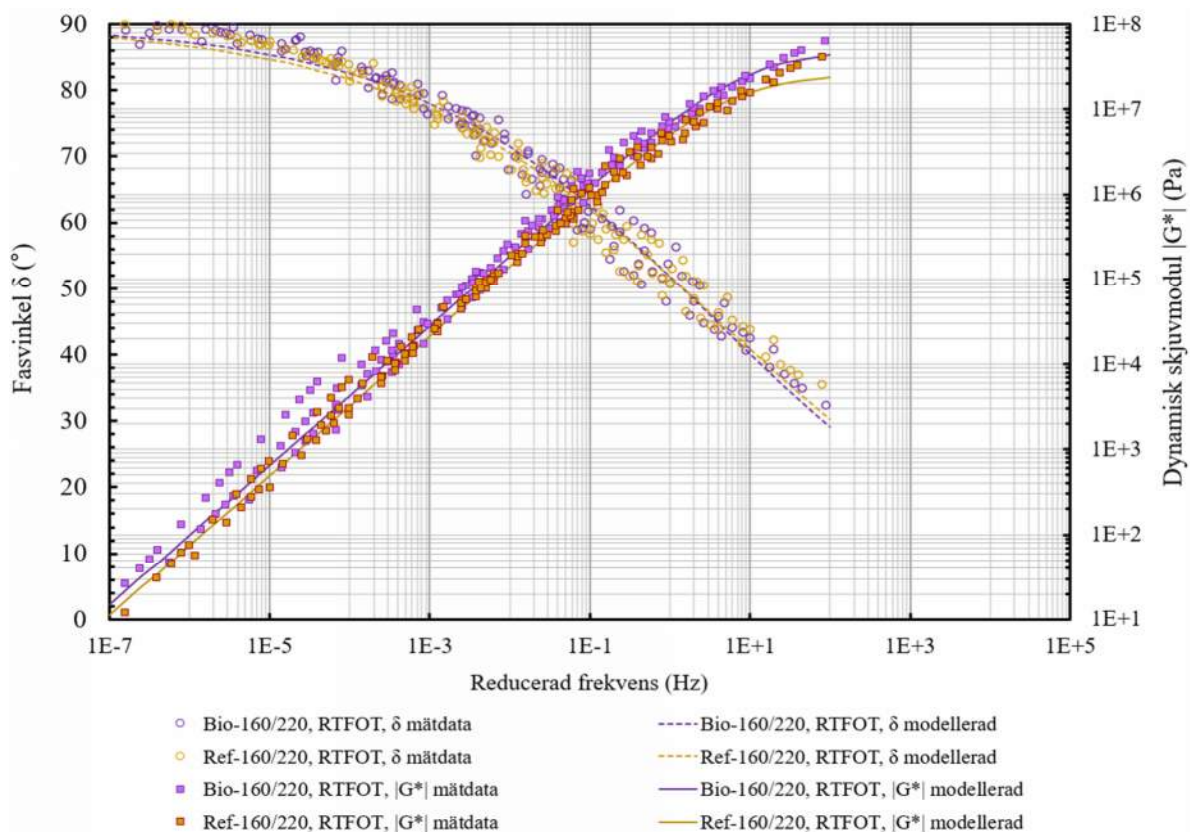
Figur 30. Masterkurvor av 70/100 bindemedel efter RTFOT vid referenstemperatur 10 °C.



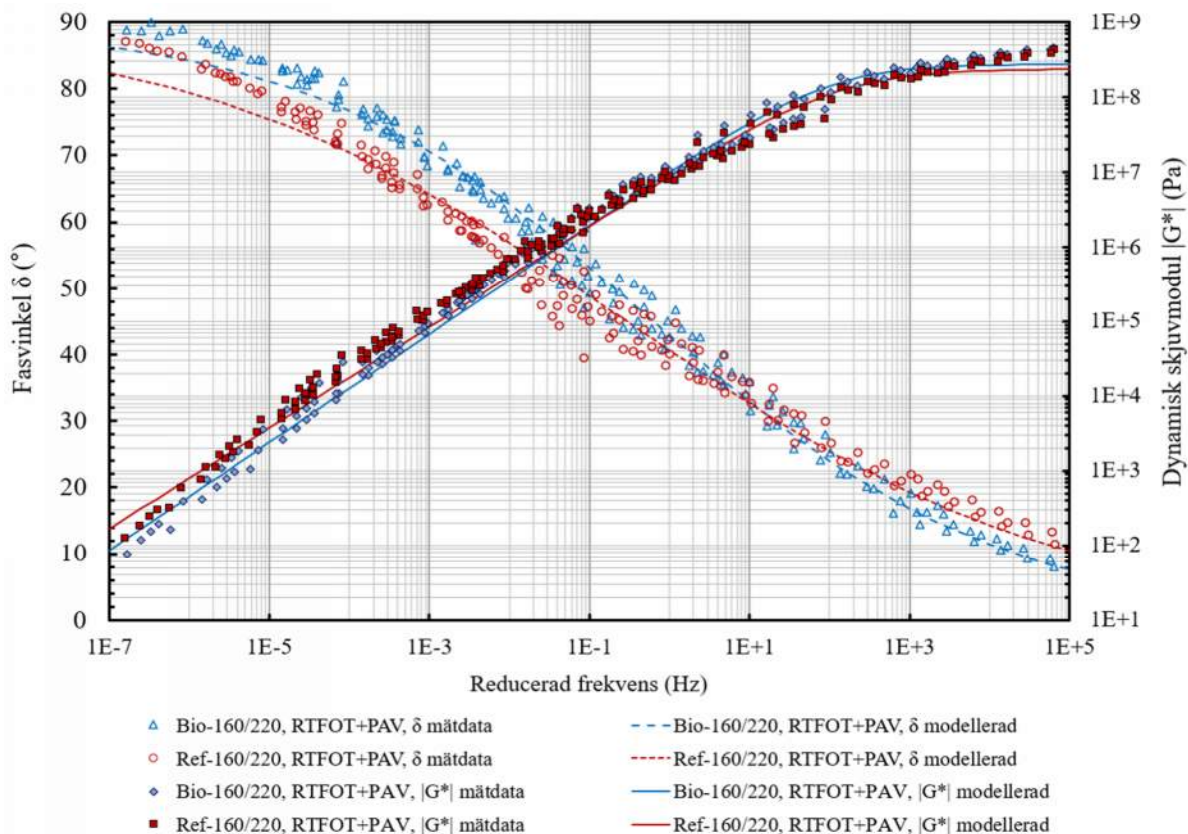
Figur 31. Masterkurvor av 70/100 bindemedel efter RTFOT+PAV vid referenstemperatur 10 °C.



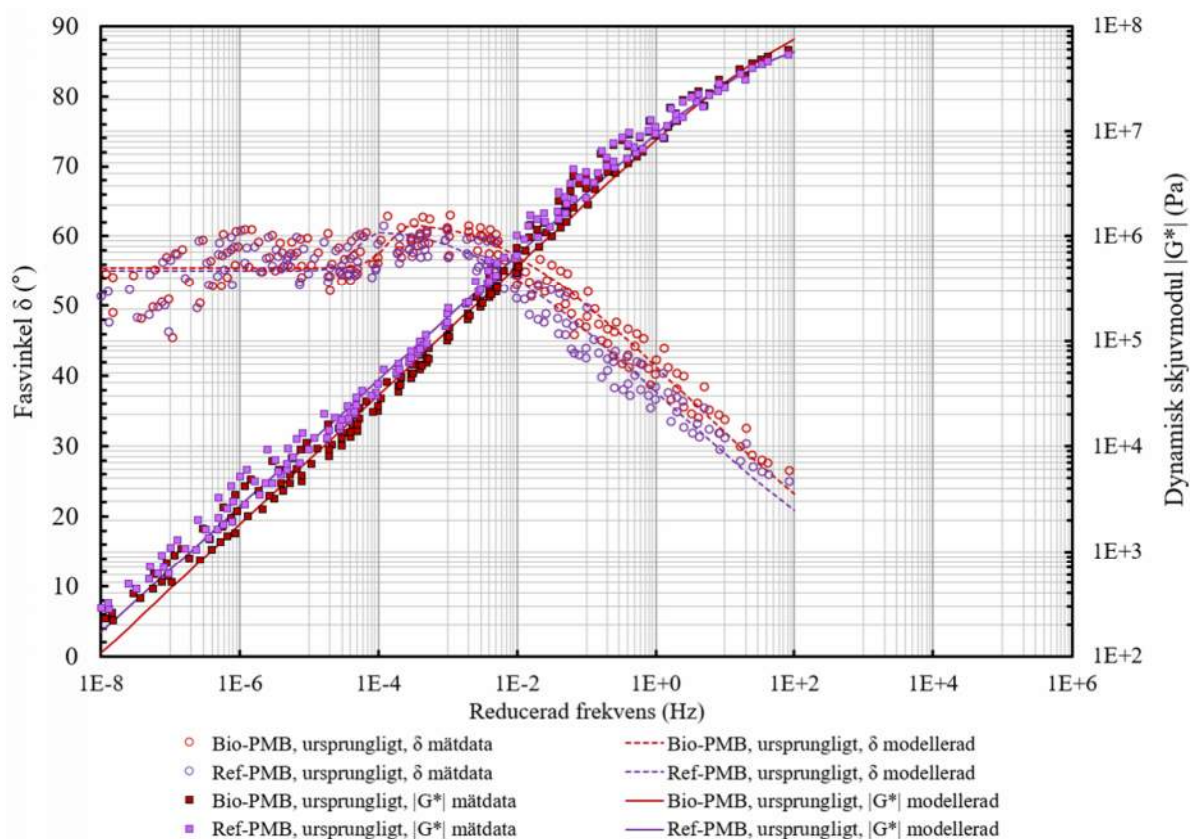
Figur 32. Masterkurvor av ursprungliga 160/220 bindemedel vid referenstemperatur 10 °C.



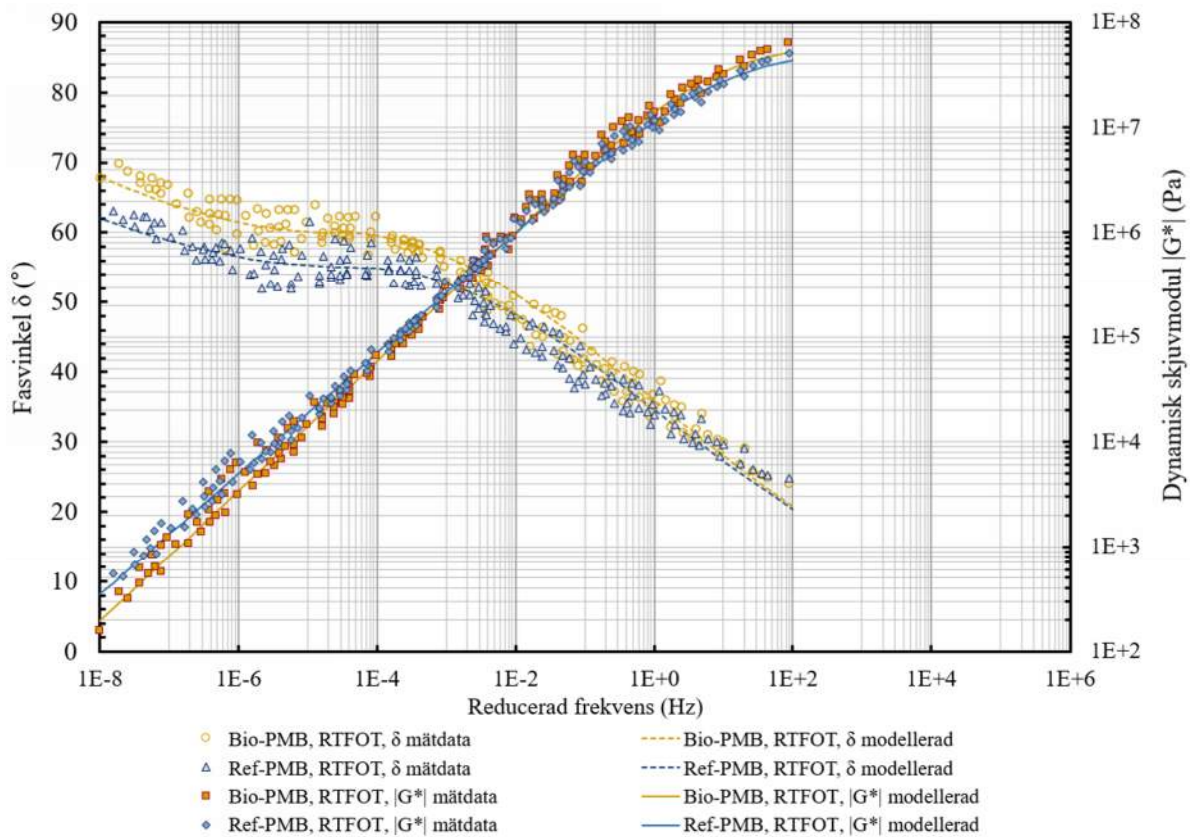
Figur 33. Masterkurvor av 160/220 bindemedel efter RTFOT vid referenstemperatur 10 °C.



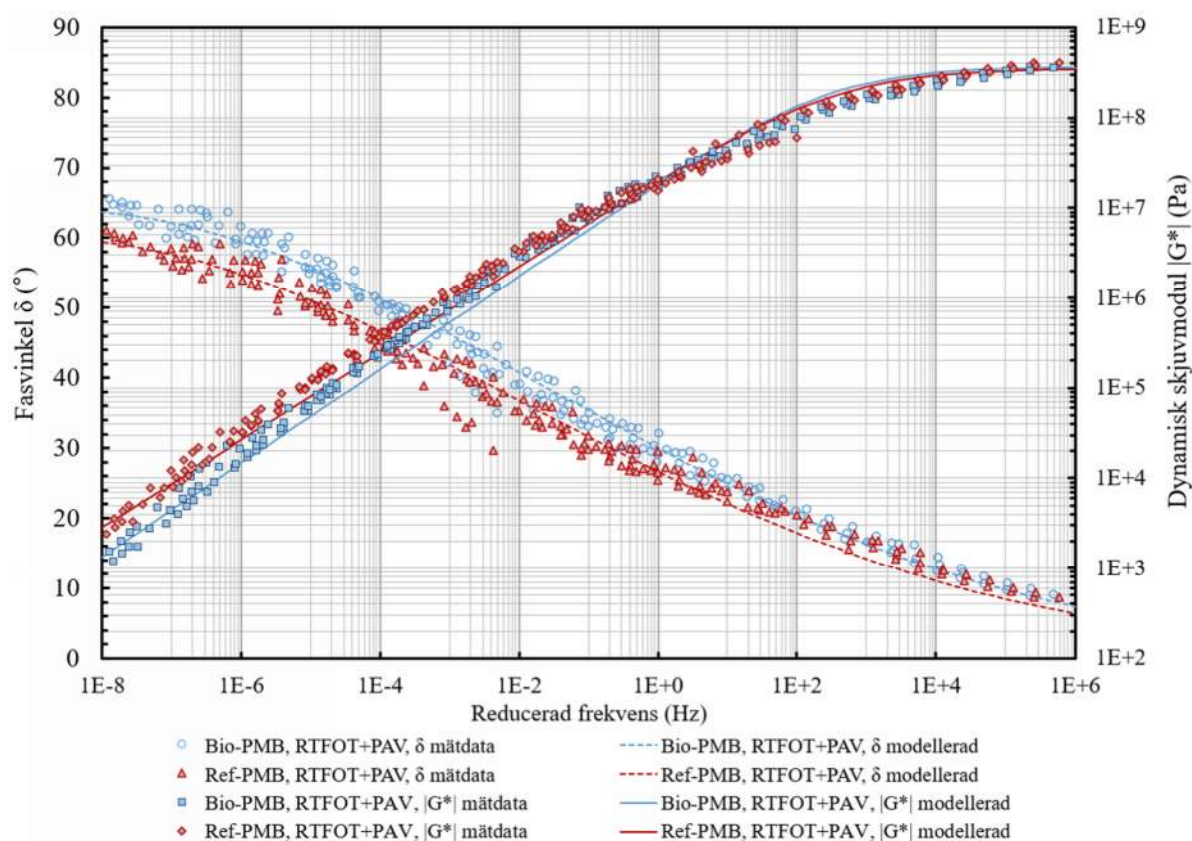
Figur 34. Masterkurvor av 160/220 bindemedel efter RTFOT+PAV vid referenstemperatur 10 °C.



Figur 35. Masterkurvor av ursprungliga PMB 40/100-75 vid referenstemperatur 10 °C.



Figur 36. Masterkurvor av PMB 40/100-75 efter RTFOT vid referenstemperatur 10 °C.



Figur 37. Masterkurvor av PMB 40/100-75 efter RTFOT+PAV vid referenstemperatur 10 °C.

6.1.7. Utmattningsmotstånd

Utmattningssprickor är en typ av skada som uppstår i asfalt efter asfaltbeläggningar har utsatts för repetitiva trafikbelastningar över tid. Det finns olika tekniska parametrar för bituminösa bindemedel vid mellantemperaturer för att kontrollera och minimera risken för utmattningssprickbildning. Tabell 6 visar resultat för de undersökta bindemedlen efter långtidsåldring för en av de vanligaste utmattningsparametrarna, $|G^*| \cdot \sin(\delta)$ baserat på DSR-mätningar enligt ASTM D6373-23 och AASHTO M 320-23. Eftersom bindemedlens PG-klasser är olika i denna studie (se Tabell 4), enligt gällande standarder, är temperaturer för att bestämma deras $|G^*| \cdot \sin(\delta)$ olika, från 16 °C till 37 °C. Frekvensen är densamma för alla bindemedel, 1,59 Hz (10 rad/s). Tabell 6 visar att alla bindemedel klarade utmattningskriteriet för sin respektive PG-klass (max 5000 kPa).

Tabell 6. Utmattningsparameter $|G^*| \cdot \sin(\delta)$ enligt ASTM D6373-23 och AASHTO M 320-23.

Bindemedel (efter RTFOT+PAV)	Bio-70/100	Ref-70/100	Bio-160/220	Ref-160/220	Bio-PMB 40/100-75	Ref-PMB 40/100-75
Temperatur (°C)	22	25	16	16	31	37
$ G^* \cdot \sin(\delta)$ (kPa)	3528	2280	3477	2930	1071	626

Trots sin stora popularitet har utmattningsparametern $|G^*| \cdot \sin(\delta)$ fått stor kritik (Deacon, Harvey, Tayebali & Monismith 1997; Bahia et al. 2001; Gibson et al. 2012). Den verkar inte korrelera väl med bituminösa bindemedels utmattningsprestanda i fält. En nyligen genomförd studie i USA (Christensen & Tran 2022) undersökte flera alternativa bindemedelsprovningar och parametrar för specifikationsändamål. Som slutsats rekommenderades den Glover-Rowe-parametern $G'/\tan(\delta)$ och Christensen-Anderson R-värde (reologiskt index) efter långtidsåldring som tekniska parametrar för att utvärdera och kontrollera bindemedels utmattningsprestanda. Studien föreslog också en förändring av temperatur för utmattningsutvärdering.

Tabell 7 visar resultat för de undersökta bindemedlen efter RTFOT+PAV för Glover-Rowe-parametern $G'/\tan(\delta)$ vid 1,59 Hz (10 rad/s). Värden vid flera olika temperaturer listas, både vid de föreslagna temperaturerna av Christensen och Tran (2022) och vid 10 °C. Anledningen till att resultaten vid 10 °C också presenteras är att de nyligen föreslagna temperaturerna för bindemedel utan polymer verkar vara ännu högre än deras nuvarande temperaturer (se Tabell 6), även om de föreslagna för PMB blir lägre. Med tanke på Sveriges specifika klimatförhållanden är det vanligtvis vid 10 °C som beläggningars utmattningsprestanda utvärderas (Said 1995; Trafikverket 2023). Därför skulle 10 °C vara en rimlig nivå för att jämföra de olika bindemedlen under samma förhållanden.

Tabell 7. Glover-Rowe-parametern $G'/\tan(\delta)$ efter RTFOT+PAV vid 1,59 Hz (10 rad/s).

Bindemedel (efter RTFOT+PAV)	Bio-70/100	Ref-70/100	Bio-160/220	Ref-160/220	Bio-PMB 40/100-75	Ref-PMB 40/100-75
$G'/\tan(\delta)$ @ 10 °C (kPa)	34081	35262	10721	9632	35742	40289
$G'/\tan(\delta)$ @ 22 °C (kPa)	N/A	N/A	518	765	N/A	N/A
$G'/\tan(\delta)$ @ 25 °C (kPa)	1347	2222	N/A	N/A	3237	N/A
$G'/\tan(\delta)$ @ 27 °C (kPa)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	3429

Resultaten i Tabell 7 visar att alla bindemedel också klarade det nya utmattningskriteriet för sin respektive PG-klass (max 5000 kPa). Vid 10 °C är

$G'/\tan(\delta)$ -värdena för biobindemedel efter långtidståldring på liknande nivåer som de motsvarande referensbindemedlen. Vid parvis jämförelse är skillnaderna inom samma bindemedelskvalitetstyp inte mer än cirka $\pm 10\%$. Över 22 °C verkar det dock som att biobindemedel har lägre $G'/\tan(\delta)$ -värden än referensbindemedlen. Detta kan tolkas som ett positivt tecken på att biobindemedel har något högre utmattningsmotstånd än referensbindemedlen i temperaturområdet över 22 °C .

Det Christensen-Anderson R-värde är en av parametrarna i Christensen-Anderson (CA)-modellen för att anpassa bindemedels masterkurvor. Det definieras som skillnaden mellan de logaritmiska värdena av glasmodul G_g och s.k. crossover-modul G_c . R-värdet speglar formen på masterkurvan för $|G^*|$ och är en bra indikator på bindemedels töjningstålighet (Christensen & Tran 2022). Glasmodulen G_g för bituminösa bindemedel antas generellt vara 1 GPa medan crossover-modulen G_c är det $|G^*|$ -värde när fasvinkeln är 45° ($G'=G''$). Vid crossover-punkten visar ett bindemedel lika elasticitet som viskositet, vilket anses vara ett tecken för att identifiera den breda övergången av bituminösa bindemedel mellan det viskoelastiska fasta tillståndet och det viskoelastiska flytande tillståndet (Padmarekha & Krishnan 2013). Därför har crossover-parametrar också undersökts i denna studie som potentiella indikatorer för bindemedelsprestanda.

Tabell 8 visar resultat för de undersökta bindemedlen för flera crossover-parametrar efter långtidståldring. Det framgår att, vid $1,59\text{ Hz}$ (10 rad/s), de biobindemedlen efter RTFOT+PAV har lägre värden för crossover-temperatur än sina respektive referensbindemedel. Detta innebär att de långtidståldrade biobindemedlen har lägre temperaturgränser upp till vilka den elastiska delen av $|G^*|$ (d.v.s. G') är dominerande över den viskösa delen G'' . Enligt tid-temperatur superpositionsprincipen skulle en högre crossover-frekvens vid en specificerad referenstemperatur ha en liknande effekt, vilket visas av värdena för crossover-frekvens i Tabell 8. Dessa skillnader leder till högre värden för crossover-modul för de biobindemedlen efter långtidståldring jämfört med referensbindemedlen.

Tabell 8. Crossover-parametrar ($\delta=45^\circ$ och $G'=G''$) efter RTFOT+PAV.

Bindemedel (efter RTFOT+PAV)	Bio-70/100	Ref-70/100	Bio-160/220	Ref-160/220	Bio-PMB 40/100-75	Ref-PMB 40/100-75
Crossover-temperatur @ $1,59\text{ Hz}$ (10 rad/s) ($^\circ\text{C}$)	18,6	24,6	12,6	15,2	33,6	40,3
Crossover-frekvens @ 10 °C (rad/s)	0,287	0,116	2,593	0,659	N/A	N/A
Crossover-frekvens @ 40 °C (rad/s)	N/A	N/A	N/A	N/A	97,64	7,993
Crossover-modul G_c (kPa)	7332	3938	7482	3867	1388	600

Baserat på värdena för crossover-modul G_c som presenteras i Tabell 8 kan Christensen-Anderson R-värdet beräknas för varje bindemedel. Beräkningsresultaten listas i Tabell 9. I Tabell 8 är G_c för PMB lägre än för bindemedel utan polymer. Detta resulterar i ett högre R-värde för PMB när det bestäms med G_c , vilket kan påverka utmattningsutvärderingen. För att ha en gemensam metod för olika bindemedelstyper, enligt Christensen och Tran (2022), bör Christensen-Anderson R-värdet beräknas vid en tillräckligt hög modulnivå där effekten av polymermodifiering är begränsad. Forskarna föreslog två alternativa metoder för att bestämma R-värdet. Först, vid en hög $|G^*|$ -nivå (minst 10 MPa), kan Ekvation 1 användas för att bestämma R-värdet.

$$R = \log(2) \cdot \frac{\log(|G^*| \cdot 10^{-9})}{\log(1 - \frac{\delta}{90})} \quad (1)$$

I Ekvation 1:

R – Christensen-Anderson R-värde (reologiskt index);

$|G^*|$ – dynamisk skjuvmodul i Pa som ska vara minst 10^7 Pa; och

δ – fasvinkel i grader (°) vid samma temperatur och frekvens där $|G^*|$ bestäms.

För det andra, vid en ännu högre styvhetsnivå, kan testresultat från BBR (böjkrypstyvhets med Bending Beam Rheometer, enligt SS-EN 14771:2023) användas för att bestämma R-värdet med Ekvation 2.

$$R = \log(2) \cdot \frac{\log(S/3000)}{\log(1-m)} \quad (2)$$

I Ekvation 2:

R – Christensen-Anderson R-värde (reologiskt index);

S – BBR-krypstyvhets vid 60 s i MPa; och

m – BBR m-värde vid 60 s och vid samma temperatur där S bestäms.

Beräkningsresultat med dessa två alternativa metoder för de undersökta bindemedlen efter långtidståldring presenteras i Tabell 9 (andra och tredje raden under rubriker). Christensen och Tran (2022) hävdade att bindemedel med höga R-värden kan resultera i snabb ackumulering av utmattningsskador i tunna beläggningar vid låga temperaturer, medan bindemedel med låga R-värden kan visa dålig utmattningsprestanda i tjocka beläggningar. Därför föreslog forskarna både en maxgräns och en minimigräns för R-kriteriet, ett intervall från 1,5 till 2,5 beräknat med BBR-resultat och Ekvation 2. Resultaten i Tabell 9 (tredje raden under rubriken) visar att alla bindemedel klarade detta kriterium. Dessutom har de biobindemedlen efter RTFOT+PAV lägre R-värden än sina respektive referensbindemedel. Detta beror på deras högre G_c (se Tabell 8).

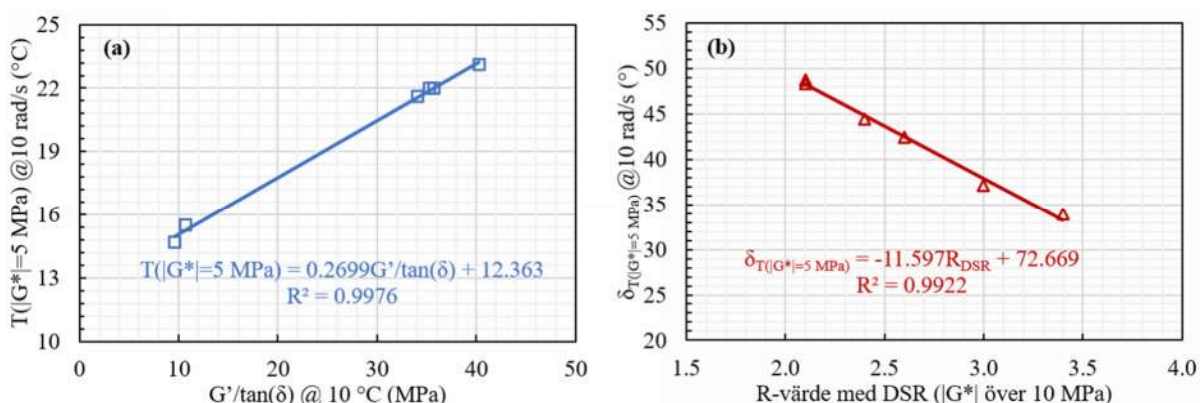
Tabell 9. Christensen-Anderson R-värde efter RTFOT+PAV bestämt med olika metoder.

Bindemedel (efter RTFOT+PAV)	Bio-70/100	Ref-70/100	Bio-160/220	Ref-160/220	Bio-PMB 40/100-75	Ref-PMB 40/100-75
Med crossover-modul G_c	2,1	2,4	2,1	2,4	2,9	3,2
Med DSR $ G^* $ över 10 MPa	2,1	2,6	2,1	2,4	3,0	3,4
Med BBR-test vid -18 °C	1,8	1,9	1,9	2,1	2,2	2,4

Förutom de parametrar som beskrivits ovan (främst för PG- klassificering) specificerar SS-EN 14770:2023 bestämning av temperaturer vid givna $|G^*|$ -nivåer och vid 1,59 Hz (10 rad/s) med hjälp av DSR. Bland andra, temperaturen T_3 , vid vilken $|G^*|$ är lika med 5 MPa efter långtidsåldring, ligger i mellantemperaturområdet och kan vara en möjlig parameter för utvärdering av bindemedelsutmattning. Tabell 10 listar resultat för de undersökta bindemedlen för T_3 och fasvinkel vid T_3 (δ_{T_3}). Även om inget kriterium har fastställts hittills, verkar de ha vissa samband med den ovan beskrivna Glover-Rowe-parametern $G'/\tan(\delta)$ och R-värdet. Figur 38 visar de linjära sambanden mellan T_3 och Glover-Rowe-parametern vid 10 °C samt mellan δ_{T_3} och R-värdet genom DSR ($|G^*|$ över 10 MPa). Dessa samband visar att de biobindemedlen efter RTFOT+PAV följer samma regler för interkonvertering mellan de angivna mellantemperaturparametrarna som referensbindemedlen gör.

Tabell 10. Reologiska parametrar T_3 och δ_{T_3} vid 1,59 Hz (10 rad/s) efter RTFOT+PAV.

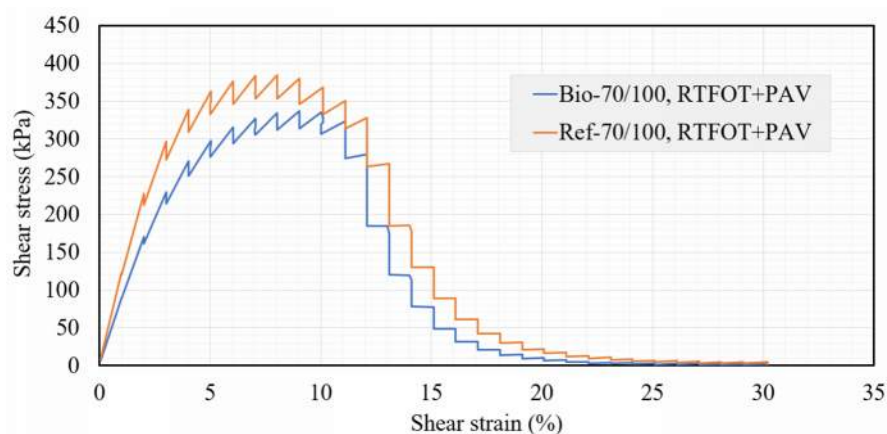
Bindemedel (efter RTFOT+PAV)	Bio-70/100	Ref-70/100	Bio-160/220	Ref-160/220	Bio-PMB 40/100-75	Ref-PMB 40/100-75
$T(G^* =5 \text{ MPa})$ (°C)	21,6	22,0	15,5	14,7	22,0	23,1
$\delta_{T(G^* =5 \text{ MPa})}$ (°)	48,4	42,4	48,8	44,5	37,1	33,9



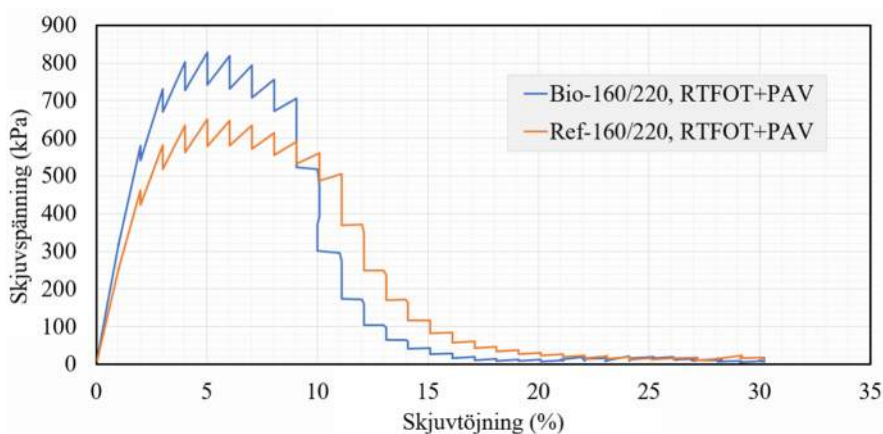
Figur 38. Samband mellan olika utmattningsparametrar inom mellantemperaturområdet efter RTFOT+PAV – (a) mellan T_3 och Glover-Rowe-parametern $G'/\tan(\delta)$ vid 10 °C; (b) mellan δ_{T_3} och R-värde med DSR vid $|G^*|$ över 10 MPa.

Ytterligare en ny metod för att utvärdera bindemedels utmattningsmotstånd är Linear Amplitude Sweep, LAS-test enligt AASHTO T391-20. Under LAS-test genererar

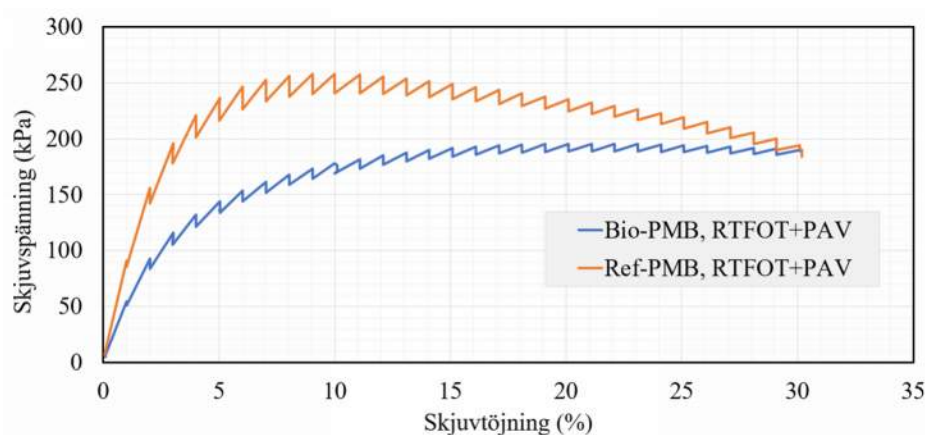
belastningen med DSR (8 mm mätplattor) skjuvspännings-töjningskurvor som i Figur 39 till Figur 41 för de undersökta bindemedlen efter långtidsåldring. Vid mycket små skjuvtöjningar uppvisar bindemedlen ett linjärt beteende. När skjuvtöjningen ökar når bindemedlen sitt icke-linjära område och skador börjar uppstå. För bindemedlen utan polymer (70/100 och 160/220), efter att ha nått sitt maximum, minskar skjuvspänningen snabbt vid stora töjningar, vilket tyder på signifikanta skador i bindemedlet (Hintz, Velasquez, Johnson & Bahia 2011). För de två PMB (se Figur 41) håller sig dock skjuvspänningen på en hög nivå utan snabb minskning. Dessa två PMB visar ett tydligt annorlunda beteende under LAS-test än de 70/100 bindemedlen vid 25 °C. Det finns studier som ifrågasätter användningen av standard LAS-test och brottkriteriet på 35 % skada för PMB med högre polymerhalt (Wu et al. 2024; Fares, Marini & Lanotte 2024). Därför kommer inte LAS-testdata för PMB att användas för att utvärdera deras utmattningsmotstånd i denna rapport. Men bindemedlen utan polymer kommer att utvärderas med standard LAS-test.



Figur 39. Skjuvspännings-töjningskurvor för långtidsåldrade 70/100 bindemedel under LAS-test vid 25 °C.



Figur 40. Skjuvspännings-töjningskurvor för långtidsåldrade 160/220 bindemedel under LAS-test vid 10 °C.



Figur 41. Skjuvspännings-töjningskurvor för långtidsåldrade PMB under LAS-test vid 25 °C.

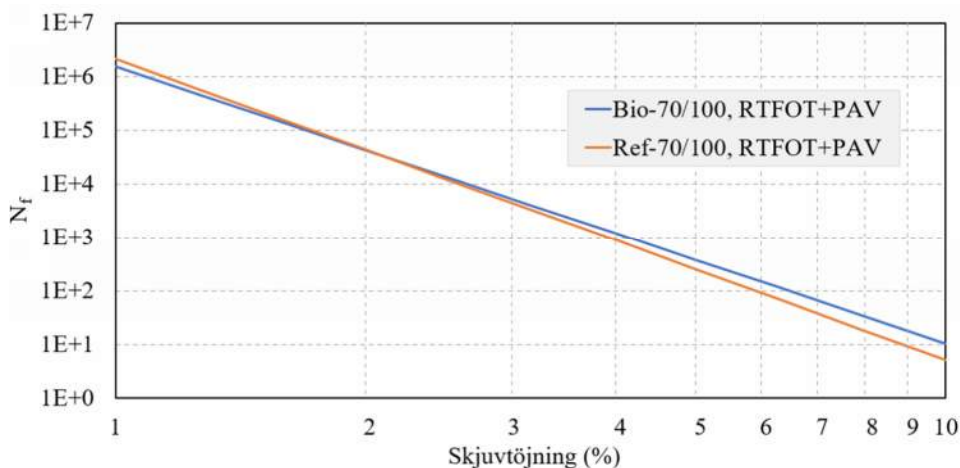
LAS-analysmallen v1.59 (utvecklad av Modified Asphalt Research Center vid University of Wisconsin-Madison, version den 26 mars 2024) användes för att beräkna utmattningsmodellens parametrar (A_{35} och B) och utmattningsparameter N_f för de bindemedlen utan polymer (70/100 och 160/220). Bindemedels brottkriterium på 35 % skada beaktades, det vill säga 35 % minskning av ursprunglig $|G^*| \cdot \sin \delta$ vid 0,1 % skjuvtöjning, där $|G^*|$ är dynamisk skjuvmodul och δ är fasvinkel. Beräkningsresultaten listas i Tabell 11.

Tabell 11. LAS-resultat för de bindemedlen utan polymer efter långtidsåldring.

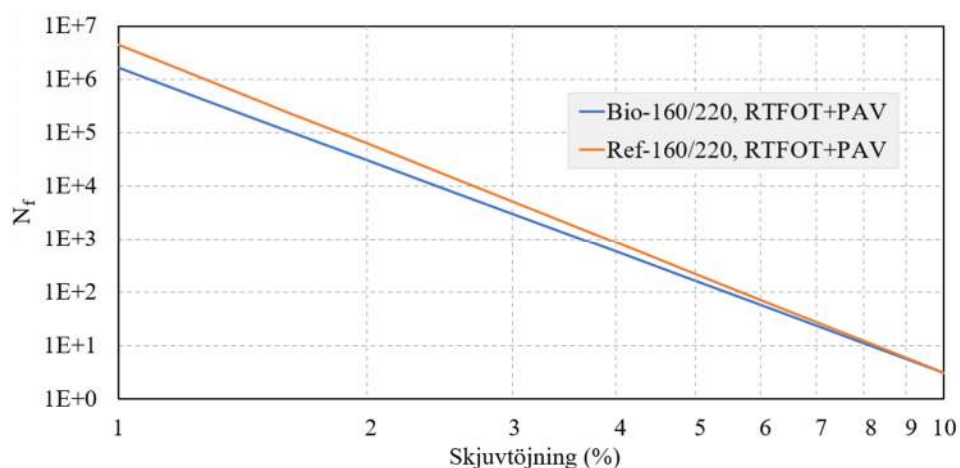
Bindemedel (efter RTFOT+PAV)	Temperatur (°C)	Parameter A_{35}	Parameter B	N_f @ 2,5 % skjuvtöjning	N_f @ 5,0 % skjuvtöjning
Bio-70/100, RTFOT+PAV	25	1.538×10^6	5,172	13457	373
Ref-70/100, RTFOT+PAV	25	2.137×10^6	5,624	12351	250
Bio-160/220, RTFOT+PAV	10	1.635×10^6	5,737	8527	160
Ref-160/220, RTFOT+PAV	10	4.482×10^6	6,172	15686	218

Resultaten i Tabell 11 indikerar att det långtidsåldrade Bio-70/100 med 5 % ersättning av TOP visar något bättre utmattningsprestanda (högre N_f vid både 2,5 % och 5,0 % skjuvtöjningar) än referensbindemedlet vid 25 °C. Det långtidsåldrade Bio-160/220, med högre ersättningsgrad (21 %) av TOP, verkar dock vara sämre än referensbindemedlet när det gäller utmattningsmotstånd vid 10 °C (nästan halverad N_f vid 2,5 % skjuvtöjning). För en mer omfattande jämförelse visar Figur 42 och Figur 43 utmattningsbeständigheten hos de analyserade bindemedlen över ett större område av skjuvtöjningar. Det framgår att det finns vissa skillnader i utmattningsbeständighet mellan biobindemedlen och konventionella bitumen, beroende på skjuvtöjningsnivå, ersättningsgrad med TOP och temperatur. Det långtidsåldrade Bio-70/100 visar inte betydligt sämre utmattningsmotstånd än

referensbindemedlet vid 25 °C. Men vid 10 °C verkar det långtidsåldrade Bio-160/220 vara mindre motståndskraftigt mot utmattningsskador än referensbindemedlet vid små skjuvtöjningar.



Figur 42. Utmattningsmotstånd hos långtidsåldrade 70/100 bindemedel genom LAS-test vid 25 °C.



Figur 43. Utmattningsmotstånd hos långtidsåldrade 160/220 bindemedel genom LAS-test vid 10 °C.

6.1.8. Sprickmotstånd vid låga temperaturer

Vid låga temperaturer genomgår asfaltmassor termisk kontraktion, vilket kan resultera i utveckling av termiska spänningar inom beläggningen. De termiska spänningarna som uppstår från denna kontraktion kan orsaka skador i beläggningen, vanligtvis termiska sprickor. För att minimera risken för termisk sprickbildning i asfaltmassor kan vissa provningsmetoder och tekniska parametrar användas för att säkerställa att bindemedlet har lämpliga egenskaper för att motstå de spänningar som orsakas av låga temperaturer. Denna studie använde 4-mm DSR-test och BBR-test efter RTFOT+PAV för att utvärdera termiskt sprickmotstånd hos de undersökta bindemedlen.

Western Research Institutes (WRI) metod, reviderad vid PG+10 °C (Farrar, Sui, Salmans & Qin 2015), användes för att analysera data från 4-mm DSR-test och bestämma bindemedlens reologiska egenskaper vid låga temperaturer, inklusive

skjuvspänningsrelaxationsmodul $G(t)$ och dess förändringshastighet (lutning) m_r vid 60 s. Med denna metod kunde $G(t)$ för de undersökta bindemedlen efter långtidsåldring tas fram genom en approximativ interkonvertering från $G'(\omega)$ med hjälp av Ekvation 3 (Christensen 1982).

$$G(t) \approx G'(\omega)|_{\omega=\frac{2}{\pi t}} \quad (3)$$

I Ekvation 3:

$G(t)$ – skjuvspänningsrelaxationsmodul;

$G'(\omega)$ – lagringsskjuvmodul, d.v.s. den elastiska delen av $|G^*|(\omega)$;

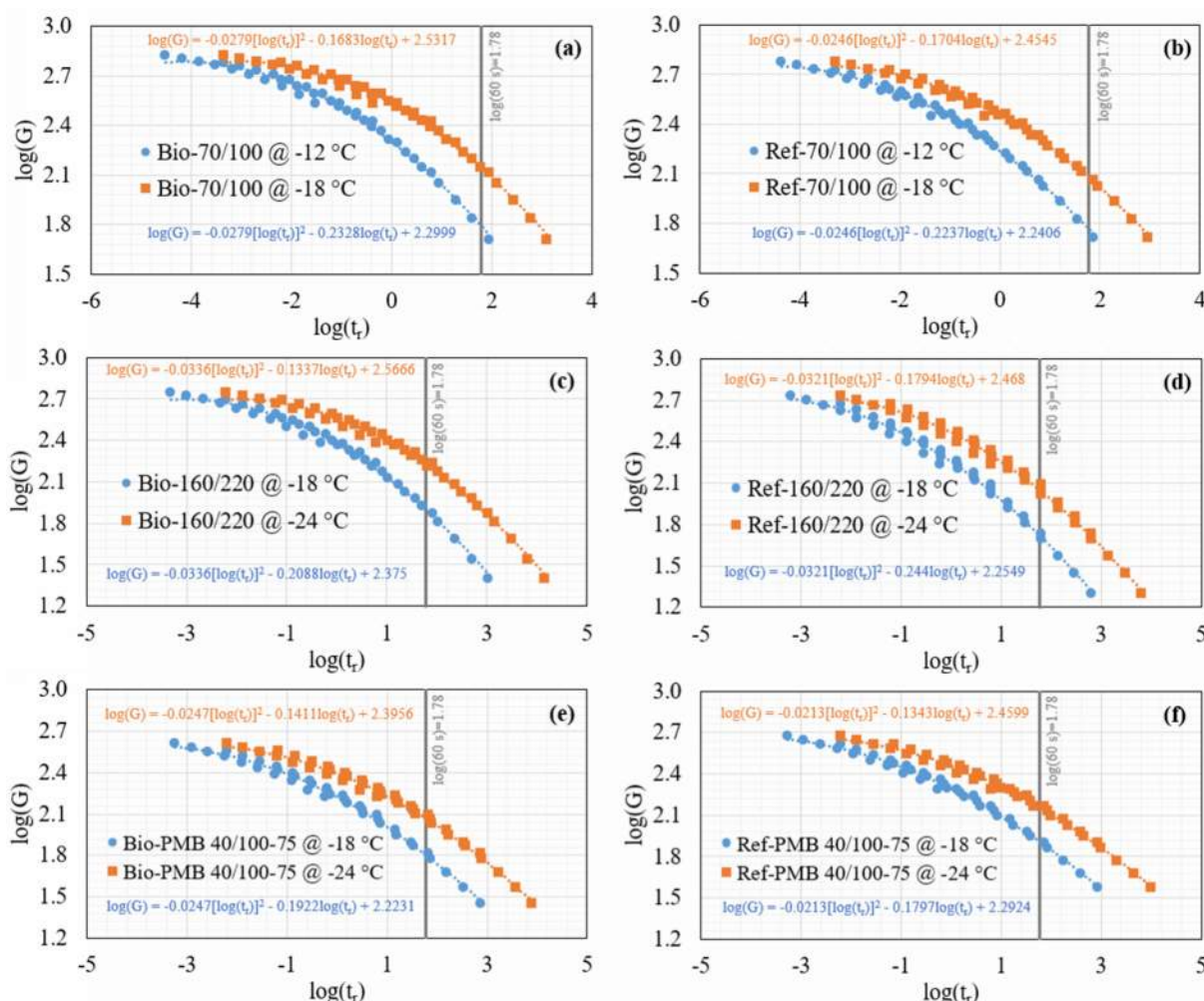
ω är vinkelfrekvens i rad/s; och

t är belastningstid.

Den 4-mm DSR-test utfördes vid olika vinkelfrekvenser (0,1–100 rad/s) och låga temperaturer (–6 °C, –12 °C, –18 °C och –24 °C). Med testdata kan masterkurvor för G' konstrueras genom att använda sigmoidmodellen för anpassning och William-Landel-Ferry (WLF) ekvation för skiftfaktorer. Efter detta kan masterkurvor för $G(t)$ tas fram genom den approximativa interkonverteringen (Ekvation 3). Figur 44 visar masterkurvorna för $G(t)$ för de undersökta bindemedlen efter RTFOT+PAV vid olika referenstemperaturer. Genom att anpassa $G(t)$ -masterkurvorna med ett andragradspolynom kan relaxationsmodul och dess lutning vid 60 s, $G(60 \text{ s})$ och $m_r(60 \text{ s})$, bestämmas vid olika referenstemperaturer. Enligt Farrar et al. (2015) motsvarar $G(60 \text{ s})$ -nivån på 143 MPa BBR-krypstyvheten 300 MPa och $m_r(60 \text{ s})$ -nivån på 0,280 motsvarar BBR m -värdet 0,300 vid 60 s och samma temperatur som masterkurvans referenstemperatur. Således kan de kritiska temperaturerna beräknas, inklusive T_{cG} vid vilken $G(60 \text{ s})$ är lika med 143 MPa och T_{cmr} vid vilken $m_r(60 \text{ s})$ är lika med 0,280. Skillnaden mellan dem ($T_{cG}-T_{cmr}$) definieras som ΔT_c -värdet bestämt genom 4-mm DSR-test. Alla dessa resultat för de undersökta bindemedlen efter långtidsåldring visas i Tabell 12.

Tabell 12. Resultat av 4-mm DSR-test efter RTFOT+PAV.

Bindemedel (efter RTFOT+PAV)	Bio-70/100	Ref-70/100	Bio-160/220	Ref-160/220	Bio-PMB 40/100-75	Ref-PMB 40/100-75
G(60 s) vid $T_{ref} = -12 \text{ °C}$ (MPa)	62,8	58,2	N/A	N/A	N/A	N/A
$m_r(60 \text{ s})$ vid $T_{ref} = -12 \text{ °C}$	0,332	0,311	N/A	N/A	N/A	N/A
G(60 s) vid $T_{ref} = -18 \text{ °C}$ (MPa)	139	119	79,0	52,4	63,6	80,4
$m_r(60 \text{ s})$ vid $T_{ref} = -18 \text{ °C}$	0,268	0,258	0,328	0,358	0,280	0,255
G(60 s) vid $T_{ref} = -24 \text{ °C}$ (MPa)	N/A	N/A	167	112	117	142
$m_r(60 \text{ s})$ vid $T_{ref} = -24 \text{ °C}$	N/A	N/A	0,253	0,294	0,229	0,210
$T_{cG} @ G(60 \text{ s})=143 \text{ MPa}$ (°C)	-18,2	-19,6	-22,8	-26,0	-26,0	-24,0
$T_{cmr} @ m_r(60 \text{ s})=0.280$ (°C)	-16,8	-15,5	-21,9	-25,3	-18,0	-14,8
$\Delta T_c = T_{cG} - T_{cmr}$ (°C)	-1,4	-4,1	-0,9	-0,7	-8,0	-9,3

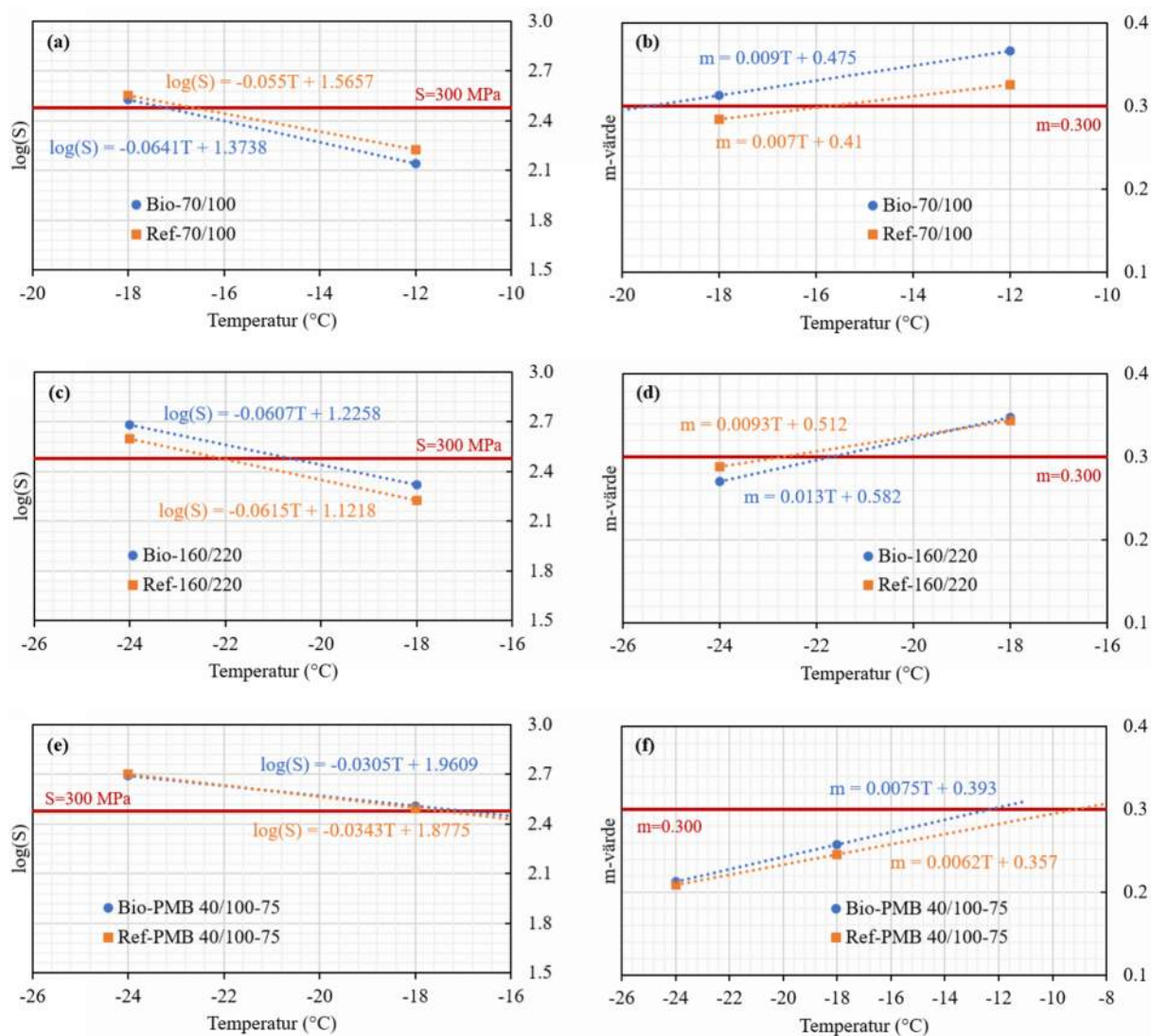


Figur 44. Skjuvspänningsrelaxationsmodul $G(t)$ genom 4-mm DSR-test – (a), (b), (c), (d), (e), (f) för de sex olika bituminösa bindemedlen efter RTFOT+PAV.

Tabell 12 visar att alla undersökta bindemedel har negativa ΔT_c -värden (< 0 °C) som bestämts genom 4-mm DSR-test. Båda biobindemedlen utan polymer (Bio-70/100 och Bio-160/220) har sina ΔT_c -värden högre än $-2,0$ °C, vilket är den lägsta specifikationsgränsen ($\geq -2,0$ °C) som antagits av vissa delstater i USA för bindemedel efter RTFOT och 20 timmars PAV-åldring (i vissa andra delstater är kravet $\geq -5,0$ °C eller $\geq -6,0$ °C). Ref-70/100 klarade inte kravet $\Delta T_c \geq -2,0$ °C, men dess ΔT_c var högre än $-5,0$ °C. PMB har mer negativa ΔT_c (lägre negativa värden) än de bindemedlen utan polymer. Detta är ett känt fenomen som ifrågasätter tillämpbarheten av ΔT_c för PMB (Asphalt Institute 2019). Mellan de två undersökta PMB har Bio-PMB ett högre ΔT_c än Ref-PMB efter långtidståldring. När det gäller de kritiska temperaturnivåerna visar Tabell 12 att Bio-160/220 inte skulle kunna motstå samma låga temperaturer som Ref-160/220. Men Bio-PMB skulle kunna motstå lägre temperaturer än Ref-PMB. Ingen signifikant skillnad kan observeras i de kritiska temperaturerna för 70/100-bindemedlen.

Eftersom ΔT_c -parametern ursprungligen utvecklades baserat på BBR-test utfördes även BBR-mätningar på de undersökta bindemedlen vid olika låga temperaturer. BBR-test mäter bituminösa bindemedels styvhet och krypbeteende vid låga temperaturer.

Figur 45 visar BBR-resultat för de undersökta bindemedlen efter långtidsåldring. Varje bindemedel analyserades vid två olika låga temperaturer. Genom interpolation eller extrapolation kan de kritiska temperaturerna beräknas, inklusive T_{cs} vid vilken kryptstyvhet S är lika med 300 MPa vid 60 s och T_{cm} vid vilken m -värdet är lika med 0,300 vid 60 s. Skillnaden mellan dem ($T_{cs}-T_{cm}$) definieras som ΔT_c -värdet bestämt genom BBR-test. Beräkningsresultat för de undersökta bindemedlen efter långtidslagring visas i Tabell 13.



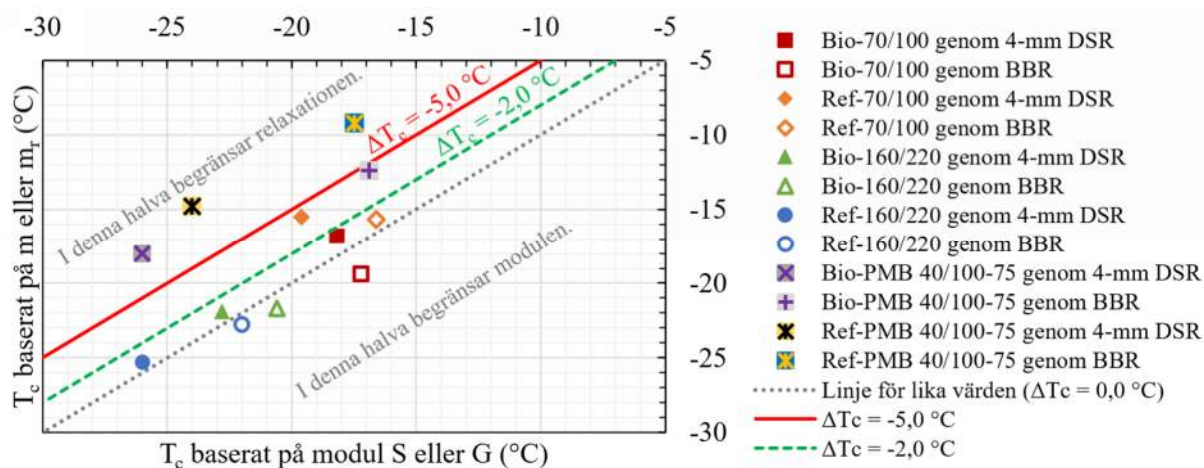
Figur 45. BBR-resultat vid 60 s efter RTFOT+PAV – (a) kryptstyvhet S för 70/100 bindemedel; (b) m -värde för 70/100 bindemedel; (c) kryptstyvhet S för 160/220 bindemedel; (d) m -värde för 160/220 bindemedel; (e) kryptstyvhet S för PMB; (f) m -värde för PMB.

Tabell 13. Kritiska temperaturer genom BBR vid 60 s och ΔT_c efter RTFOT+PAV.

Bindemedel (efter RTFOT+PAV)	Bio-70/100	Ref-70/100	Bio-160/220	Ref-160/220	Bio-PMB 40/100-75	Ref-PMB 40/100-75
$T_{cs} @ S=300 \text{ MPa } (^{\circ}\text{C})$	-17,2	-16,6	-20,6	-22,0	-16,9	-17,5
$T_{cm} @ m\text{-värde}=0,300 (^{\circ}\text{C})$	-19,4	-15,7	-21,7	-22,8	-12,4	-9,2
$\Delta T_c = T_{cs} - T_{cm} (^{\circ}\text{C})$	2,2	-0,9	1,1	0,8	-4,5	-8,3

Resultaten i Tabell 13 bekräftar att båda biobindemedlen utan polymer (Bio-70/100 och Bio-160/220) klarar ΔT_c -kriteriet ($\geq -2,0^{\circ}\text{C}$) efter RTFOT+PAV. PMB visar också mer negativa ΔT_c (lägre negativa värden) än de bindemedlen utan polymer enligt BBR-test. Bio-PMB visar fortfarande ett högre ΔT_c än Ref-PMB efter långtidståldring. När det gäller de kritiska temperaturnivåerna bekräftar Tabell 13 att Bio-160/220 inte skulle kunna motstå samma låga temperaturer som Ref-160/220. Men baserat på BBR-resultaten kan ingen signifikant skillnad observeras i de kritiska temperaturerna för 70/100- eller PMB-bindemedlen.

För att göra en omfattande analys av provningsresultaten vid låga temperaturer visar Figur 46 alla kritiska temperaturer samt ΔT_c -kriterier i samma diagram. Det framgår att alla biobindemedel utan polymer (70/100 och 160/220) befinner sig på den "acceptabla" sidan av diagrammet. Användningen av biobaserat material i bindemedlen påverkade inte ΔT_c negativt och detta gäller även för PMB. Bio-160/220 visar betydligt högre kritiska temperaturer (mindre negativa under 0°C) än Ref-160/220, vilket stöds av de konsekventa resultaten från både 4-mm DSR-test och BBR-test. En möjlig förklaring till detta är att Bio-160/220 innehåller mer TOP (21 %), för vilket effekten av TOP på bindemedels egenskaper är mer signifikant och lättare att fånga upp genom provningar.

Figur 46. Jämförelse av kritiska temperaturer och ΔT_c med olika metoder (alla bindemedel efter RTFOT+PAV).

6.1.9. Bedömning av biobindemedels långsiktiga egenskaper

Resultaten som beskrivs ovan visar att de undersökta biobindemedlen i denna studie klarar alla specifikationskriterierna efter långtidsåldring med RTFOT+PAV som har diskuterats i detta avsnitt, inklusive:

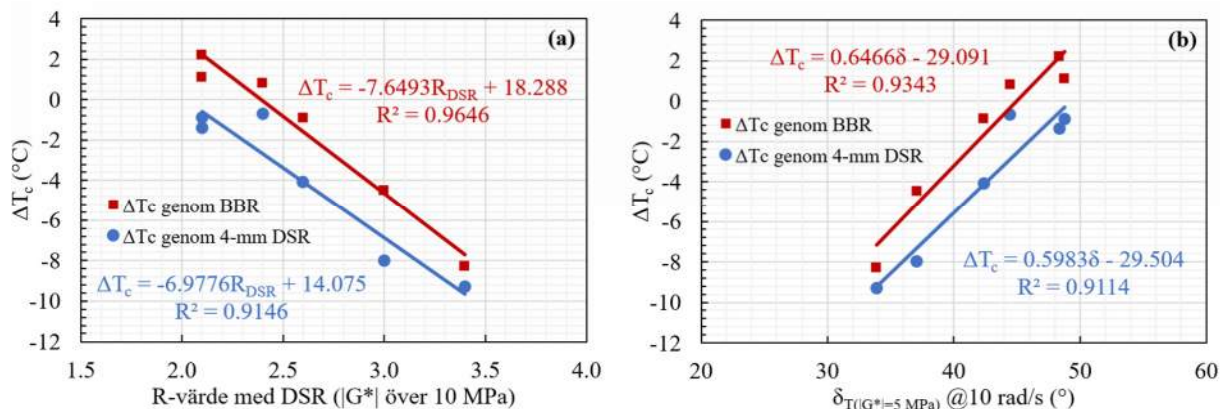
- Utmattningskriteriet för mellantemperatur baserat på $|G^*| \cdot \sin(\delta)$ enligt ASTM D6373-23 och AASHTO M 320-23, max 5000 kPa vid 10 rad/s;
- Det nya utmattningskriteriet baserat på Glover-Rowe-parametern $G'/\tan(\delta)$, max 5000 kPa vid 10 rad/s som föreslagits av Christensen och Tran (2022);
- Det nya utmattningskriteriet baserat på R-värde genom BBR-test, mellan 1,5 och 2,5 enligt Christensen och Tran (2022);
- För biobindemedel utan polymer (Bio-70/100 och Bio-160/220), ΔT_c -kriteriet ($\geq -2,0$ °C) som det strängaste kravet i USA; och
- För Bio-PMB, en högre ΔT_c än Ref-PMB.

Dessutom påverkade inte användningen av biobaserat material i bindemedlen ΔT_c eller standard PG-lågtemperaturklass negativt. Effekten på ΔT_c är faktiskt till stor del positiv. Detta gäller även för PMB. Men trots den oförändrade PG-lågtemperaturklassen (se Tabell 4) visar Bio-160/220 betydligt högre kritiska temperaturer (mindre negativa under 0 °C) än Ref-160/220, vilket stöds av konsekventa resultat från både 4-mm DSR-test och BBR-test. Detta kan bero på den relativt höga andelen TOP i bindemedlet.

Vid 10 °C är $G'/\tan(\delta)$ -värdet efter långtidsåldring för Bio-160/220 marginellt högre än Ref-160/220 medan de andra biobindemedlen visar marginellt lägre värden än sina respektive referensbindemedel. Å andra sidan har alla undersökta biobindemedel lägre $G'/\tan(\delta)$ -värden än sina referensbindemedel vid 22 °C eller högre (se Tabell 7). Detta kan tolkas som ett positivt tecken på att biobindemedel har något högre utmattningsbeständighet än referensbindemedlen vid temperaturer över 22 °C. Men vid lägre temperaturer, särskilt omkring 10 °C eller lägre, kan denna fördel minska eller till och med upphöra. Detta överensstämmer med LAS-resultaten i Tabell 11. Vid mycket låga temperaturer (minusgrader), som nämnts ovan, kan biobindemedel uppvisa högre kritiska temperaturer (mindre negativa under 0 °C). Denna effekt skulle vara mer signifikant för biobindemedel med en högre andel TOP och utan polymer i bindemedlet.

Dessutom enligt Christensen och Tran (2022) finns det generellt en god korrelation mellan R-värde och ΔT_c för bituminösa bindemedel. För att verifiera denna korrelation även för biobindemedel, visar Figur 47(a) det linjära sambandet mellan ΔT_c för alla de undersökta bindemedlen och deras R-värden efter långtidsåldring. ΔT_c -värdena genom både BBR-test och 4-mm DSR-test plottas mot R-värdena bestämda genom DSR-test vid $|G^*|$ över 10 MPa. Det visar att biobindemedlen efter RTFOT+PAV följer samma korrelation mellan de angivna parametrarna som referensbindemedlen gör. Eftersom det även finns ett linjärt samband mellan δ_{T3} och R-värdet genom DSR-test vid $|G^*|$ över 10 MPa, som visas i Figur 38(b), kan ΔT_c -värdena för bituminösa bindemedel (inklusive biobindemedel) också korreleras till δ_{T3} , fasvinkeln när $|G^*|$ är

lika med 5 MPa vid 1,59 Hz (10 rad/s) efter långtidsåldring med RTFOT+PAV. Baserat på testdata i denna studie presenteras det linjära sambandet mellan dem i Figur 47(b).



Figur 47. Samband mellan olika sprickindikatorer efter RTFOT+PAV – (a) ΔT_c mot R-värde genom DSR vid $|G^*|$ över 10 MPa; (b) ΔT_c mot δ_{T3} .

6.2. Asfalt

6.2.1. Kontroll av tillverkade asfaltprover

Efter tillverkning av provkroppar analyserades bindemedelshalt, kornstorleksfördelning, hålrums halt och mjukpunkt på det återvunna bindemedlet, för att verifiera att asfaltmassorna uppfyllde Trafikverkets krav enligt Bitumenbundna lager, TDOK 2013:0529 Version 4.0, se resultaten och kraven i Tabell 14.

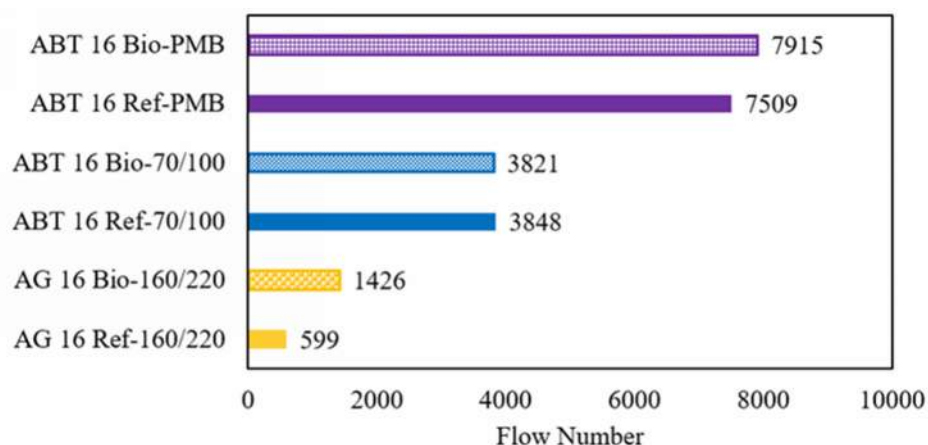
Tabell 14. Kontroll av de tillverkade asfaltproverna mot Trafikverkets krav.

Kornstorleksfördelning, PV-%	ABT 16 Bio-70/100	ABT 16 Ref-70/100	ABT 16 70/100, enligt TDOK 2013:0529 V. 4.0	AG 16 Bio-160/220	AG 16 Ref-160/220	AG 16 160/220, enligt TDOK 2013:0529 V. 4.0	ABT 16 Bio-PMB 40/100-75	ABT 16 Ref-PMB 40/100-75	ABT 16 70/100, enligt TDOK 2013:0529 V. 4.0
16 mm	98	99	90-100 ± 5	99	98	90-100 ± 5	99	98	90-100 ± 5
8 mm	67	68	57-73 ± 7	68	64	50-76 ± 9	73	73	57-73 ± 7
2 mm	38	39	26-47 ± 6	40	38	26-47 ± 7	40	42	26-47 ± 6
0,5 mm	21	22	13-30 ± 4	22	21	13-26 ± 5	23	23	13-30 ± 4
0,063 mm	9,6	9,9	6-9 ± 2,4	10,5	9,6	2-6 ± 3,4	10,7	10,1	6-9 ± 2,4
Bindem.halt, vol.-%	5,69	5,75	5,9 ± 0,5	4,53	4,36	4,5 ± 0,6	5,86	6,02	5,9 ± 0,5
Hålrums halt, %	1,1	1,4	1,0-3,5	2,1	2,2	2,0-6,0		0,7	1,0-3,5
Mjukpunkt, °C på återvunnet bindemedel	48,6	49,4	43-54	42,2	45,0	35-47			-

Samtliga asfaltmassor hade vid kontrollen aningen förhöjda fillerhalter. Både AG 16 Ref-160/220 och AG 16 Bio-160/220 hade fillerhalter som låg precis utanför kraven. Troligtvis har filler skapats vid blandningen av asfaltmassorna. De höga fillerhalterna har troligtvis också orsakat de låga hålrums halterna. ABT 16 Ref-PMB 40/100-75 ligger under kravet i Bitumenbundna lager. Trots det visar både ABT 16 Ref-PMB och ABT 16 Bio-PMB höga stabilitetsegenskaper, enligt avsnitt 6.2.2.

6.2.2. Stabilitetsegenskaper

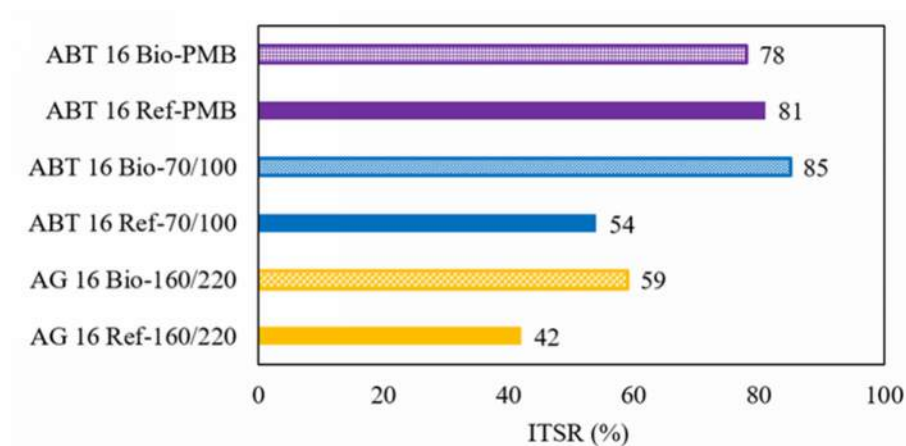
Stabilitet hos alla sex asfaltmassor före åldring, undersöktes med dynamiska triaxialförsök. Se Bilaga 3 för mer information om metoden. Figur 48 visar resultat på Flow Number (FN), det vill säga antal lastcykler där materialet övergår från den linjära fasen (secondary flow) till accelerationsfasen (tertiary flow), hos de nytillverkade asfaltmassorna vid 50 °C. Ett högre FN betyder att asfalten är stabilare och mer motståndskraftig mot permanent deformation (alltså ju högre FN desto bättre). Det framgår att de undersökta biobindemedlen inte signifikant försämrar stabiliteten. Asfaltmassorna med Bio-160/220 och Bio-PMB visar faktiskt bättre stabilitet än sina respektive referensvarianter.



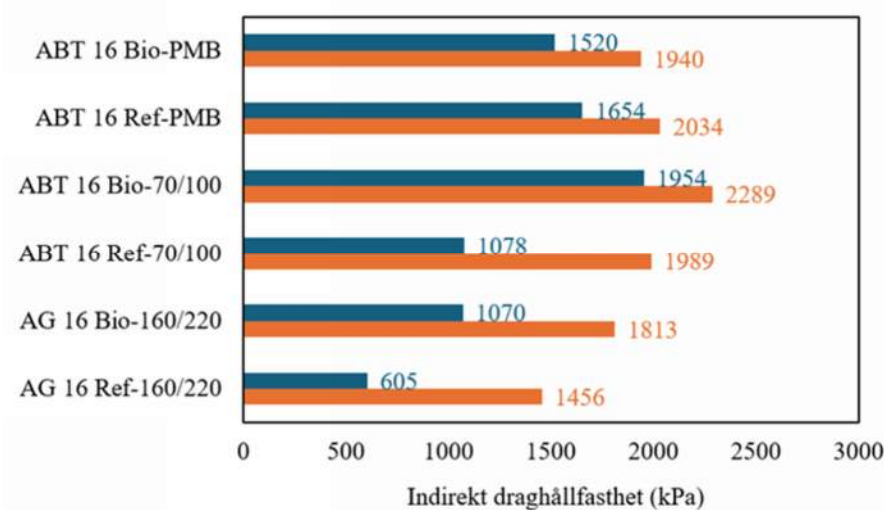
Figur 48. Flow Number hos nytillverkade asfaltmassor vid 50 °C.

6.2.3. Vattenkänslighet

Vattenkänslighet hos asfaltmassorna före åldring, utvärderades genom att bestämma deras ITSR-värden, (Indirect Tensile Strength Ratio), enligt TDOK 2017:0650 version 2.0. Se Bilaga 4 för provningsrapporter för ITSR. Trafikverkets kravdokument TDOK 2013:0529 version 4.0 kräver att ITSR hos asfaltmassor ska vara högre än 75 %. Det framgår att asfaltmassorna med PMB och Bio-70/100 i denna studie uppfyller detta krav. Men de andra tre asfaltmassor klarar inte det (se Figur 49). För dessa tre massor visar resultat på indirekt draghållfasthet att deras hållfasthet i torrt tillstånd uppfyller kravet i TDOK 2013:0529 version 4.0 (högre än 1000 kPa vid 10 °C). Det var konditioneringen i vatten som orsakade för låg hållfasthet i vått tillstånd (se Figur 50).



Figur 49. ITSR-värden hos nytillverkade asfaltmassor enligt TDOK 2017:0650 version 2.0.



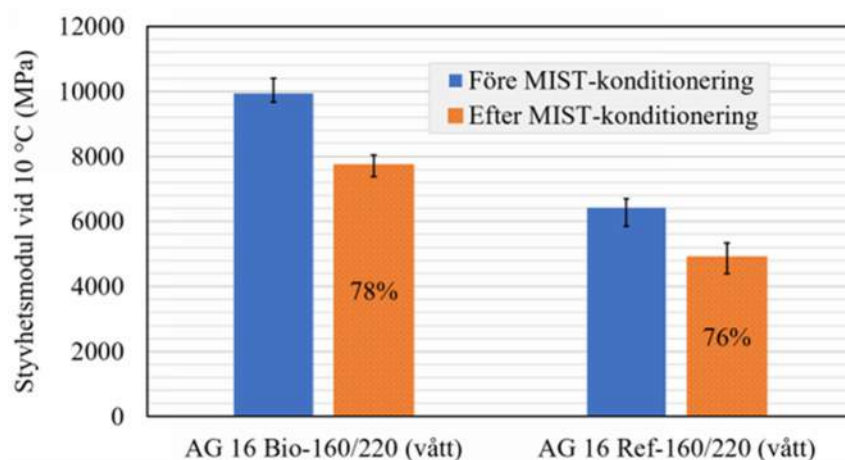
Figur 50. Indirekt draghållfasthet hos nytillverkade asfaltmassor vid 10 °C enligt TDOK 2017:0650 version 2.0 (se Bilaga 4 för enskilda resultat och övrig information om ITSR-analysen).

De för låga ITSR-värdena kan bero på att inget vidhäftningsmedel användes i asfaltmassorna. Uteslutningen av vidhäftningsmedel var en avsiktlig process för att endast studera effekten av biobindemedel på massornas vattenkänslighet. Att beakta endast en komponent (biobaserad komponent) möjliggör en tillförlitlig jämförelse mellan biobindemedel och referensbitumen.

De undersökta biobindemedlen försämrar inte ITSR signifikant. Asfaltmassorna med Bio-70/100 och Bio-160/220 visar faktiskt förbättrad ITSR än sina respektive referensvarianter. För att ytterligare förbättra vattenkänsligheten hos AG 16-asfaltmassan med Bio-160/220 till den acceptabla nivån skulle en lösning vara att använda vidhäftningsmedel. Numera finns det krav från Trafikverket att vidhäftningsmedel ska användas i samtliga typer av asfaltmassor. Med tanke på den möjliga kemiska reaktionen mellan aminer och fria syror i TOP (se Figur 3) måste dock typen av vidhäftningsmedel bestämmas utifrån ordentliga undersökningar i samband med den förbättrande effekten av själva TOP på asfaltmassans vattenkänslighet.

En annan metod för att utvärdera vattenkänslighet hos asfaltmassor är att använda MIST, Moisture Induced Stress Tester, (Rahman, Waldemarson & Ahmed 2022).

MIST kan utföra accelererad konditionering på packade provkroppar under cykliskt portryck vid förhöjd temperatur. Det förväntas att MIST-konditioneringen skulle försvaga provkropparna. Genom att analysera förändringen i deras mekaniska egenskaper före och efter MIST-konditionering kan vattenkänslighet hos asfaltmassor bedömas. I denna studie konditionerades AG 16-asfaltmassor innehållande 160/220 bindemedel med MIST och analyserades för förändring i styvhetsmodul i vått tillstånd vid 10 °C enligt SS-EN 12697-26:2018+A1:2022 Bilaga C (indirekt dragprovning på cylindriska provkroppar, 100 mm diameter och 50 mm tjocklek). AG 16-asfaltmassan med Bio-160/220 innehåller en relativt hög andel TOP, vilket förväntas leda till en relativt signifikant effekt av TOP på vattenkänslighet hos massan. Provningsresultaten presenteras i Figur 51.



Figur 51. Styvhetsmodul för AG 16-asfaltmassor innehållande 160/220 bindemedel vid 10 °C före och efter MIST-konditionering (felstaplar indikerar max/min-värden).

Resultaten visar att, vid 10 °C och i vått tillstånd, har AG 16-asfaltmassan med Bio-160/220 högre styvhetsmodul än den med Ref-160/220 (belastningstid 0,1 s och vilotid 2,9 s). Efter MIST-konditioneringen vid 40 °C och 0,28 MPa portryck med 12000 cykler minskar styvhetsmodulen för båda asfaltmassorna, vilket indikerar en försämring av materialets integritet. Deras minskningsgrader liknar varandra (22 % jämfört med 24 %), vilket tyder på liknande vattenkänslighet hos asfaltmassorna även om deras initiala styvhetsmodulsnivåer är olika.

När det gäller jämförelsen mellan ITSR-analysen och MIST-analysen indikerar de två metoderna att AG 16-asfaltmassan med Bio-160/220 är styvare och starkare vid 10 °C. Efter konditionering med vatten minskar dess styvhet och hållfasthet men är fortfarande högre än den med Ref-160/220. Procentmässigt visade AG 16-asfaltmassan innehållande Bio-160/220 förbättrad ITSR med 21 % TOP i bindemedlet, men inte signifikant lägre minskningsgrad av styvhetsmodul.

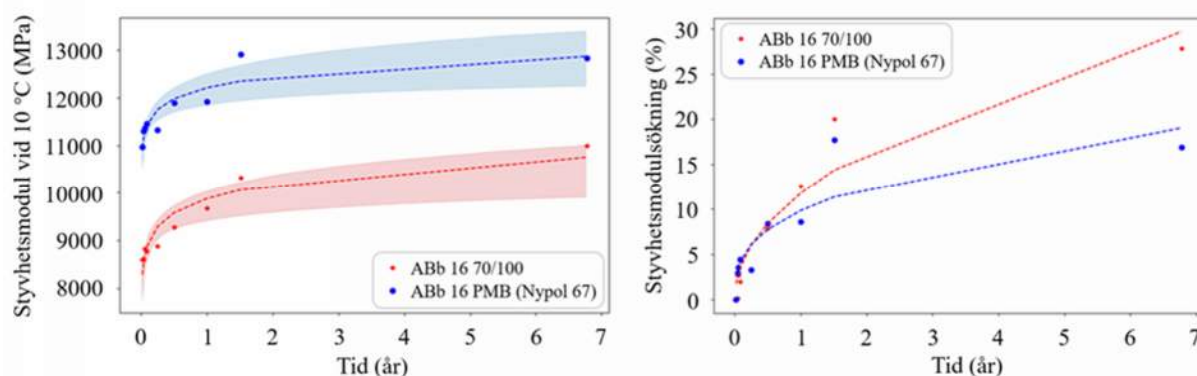
Dessutom observerades det att provkropparna uppvisade olika färger på ytan efter MIST-konditioneringen, se Figur 52. AG 16-asfaltmassan med Bio-160/220 var gulbrunaktig efter konditioneringen, medan den med Ref-160/220 var svart. Deras färg var densamma före MIST-konditioneringen – båda var svarta på ytan.



Figur 52. Provkroppar (AG 16-asfaltmassor med 160/220 bindemedel) efter MIST-konditionering.

6.2.4. Laboratorieåldring av asfaltmassor

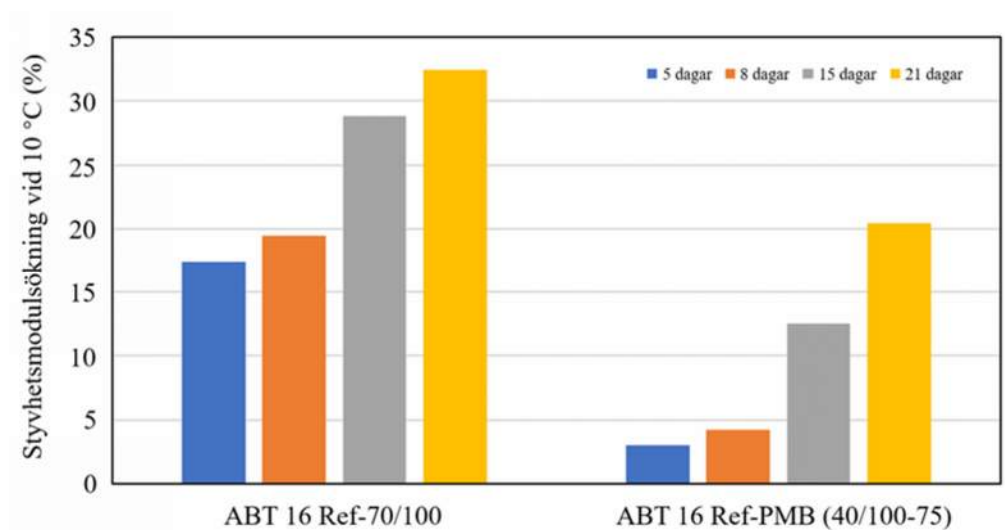
För att undersöka långsiktiga egenskaper åldrades alla sex asfaltmassor i laboratorium enligt SIS-CEN/TS 12697-52:2017 Procedur B.1. Åldringen av packade provkroppar var vid 65 °C och i 15 dagar. Åldringstemperaturen och -tiden bestämdes baserat på mätdata för asfaltmassor innehållande liknande bituminösa bindemedel som i denna studie. Bestämningen stöds också av fältdata från provvägar under verkliga förhållanden. Figur 53 visar, på vänster sida, styvhetsmoduls utveckling över tid för två typer av asfaltmassor innehållande konventionellt 70/100 bitumen respektive PMB (Nypol 67). På höger sida visar figuren ökningen av styvhetsmodul hos massorna i procent. Styvhetsmodulvärdena i Figur 54 (varje som medelvärde av tre provkroppar) bestämdes vid 10 °C genom indirekt dragprovning enligt SS-EN 12697-26:2018+A1:2022 Bilaga C (cylindriska provkroppar med 100 mm diameter och 50 mm tjocklek, belastningstid 0,1 s och vilotid 2,9 s). Mätningarna genomfördes under en period av cirka 7 år.



Figur 53. Styvhetsmoduls utveckling över tid för två typer av asfaltmassor under en period av cirka 7 år (färgskuggade områden indikerar 95 % konfidensintervall).

Figur 53 indikerar att, under mätperioden, ökade styvhetsmodulen med cirka 30 % för asfaltmassan innehållande konventionellt 70/100 bitumen och med cirka 15 % för den

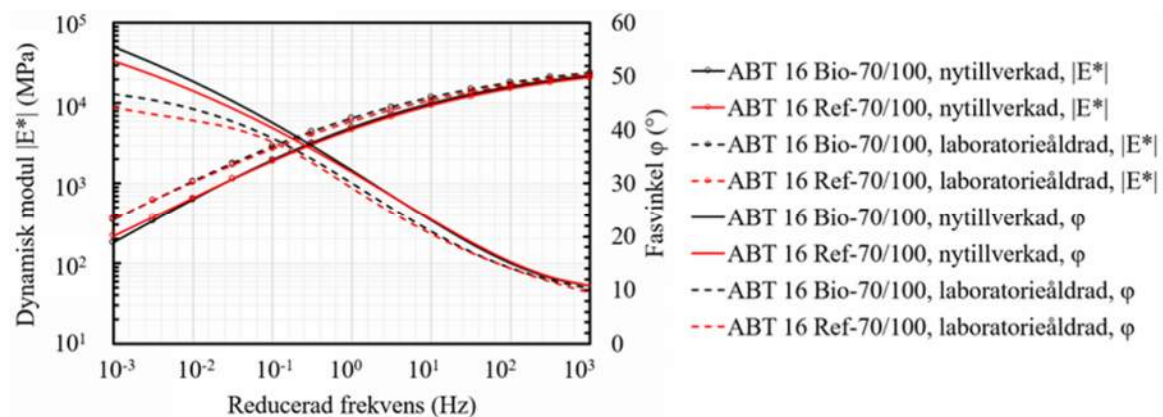
innehållande PMB. Laboratorieåldringsproceduren som används i denna studie skulle uppnå dessa nivåer av styvhetsmodulsökning för respektive typer. Figur 54 visar styvhetsmodulsökningar för två referensmassor i denna studie över tid, d.v.s. antal dagar då de packade provkropparna konditionerades i en ugn vid 65 °C. Åldringstemperaturen på 65 °C valdes för att undvika att förstöra provkropparna innehållande mjukare bindemedel, såsom 160/220 bindemedel. Det framgår att 15 dagars åldring vid 65 °C av de packade provkropparna, resulterade i nivåer av styvhetsmodulökning nära de i Figur 54.



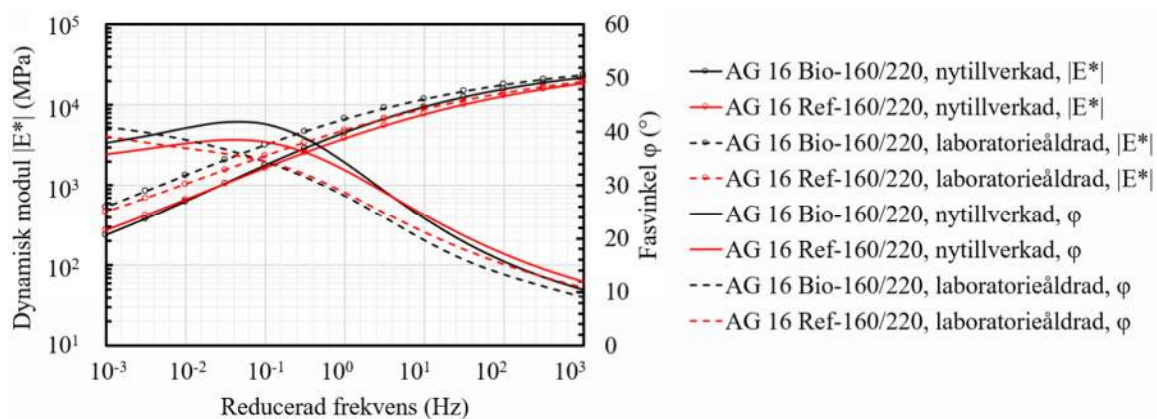
Figur 54. Styvhetsmodulsökning över tid, d.v.s. antal dagar då packade provkroppar konditionerades i en ugn vid 65 °C.

6.2.5. Masterkurvor för asfalt

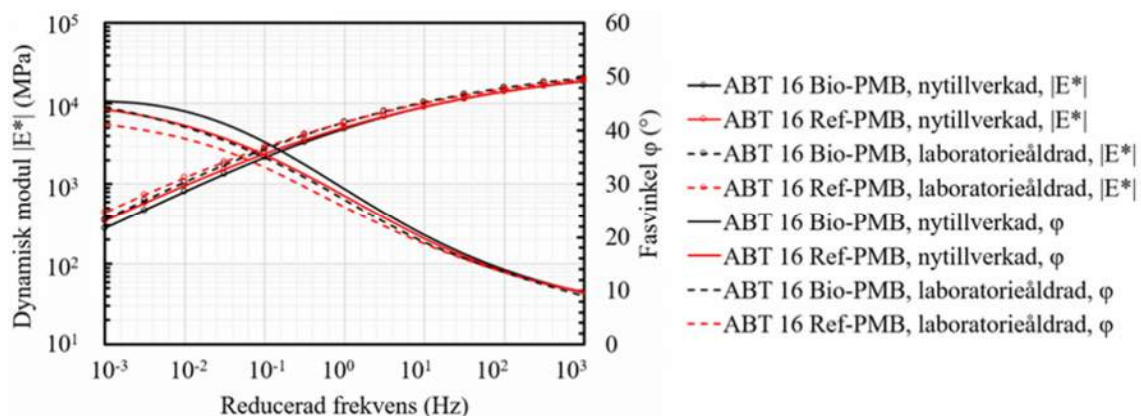
Både före och efter laboratorieåldringen analyserades de undersökta asfaltmassorna för dynamisk modul $|E^*|$ och fasvinkel φ vid olika temperaturer och frekvenser genom en cyklisk indirekt dragprovning på cylindriska provkroppar (100 mm diameter och 50 mm tjocklek) enligt SS-EN 12697-26:2018+A1:2022 Bilaga F. Därefter konstruerades deras masterkurvor vid referenstemperatur 10 °C, som visas i Figur 55 till Figur 57.



Figur 55. Masterkurvor för dynamisk modul $|E^*|$ och fasvinkel φ hos ABT 16-asfaltmassor innehållande 70/100 bindemedel vid referenstemperatur 10 °C.



Figur 56. Masterkurvor för dynamisk modul $|E^*|$ och fasvinkel φ hos AG 16-asfaltmassor innehållande 160/220 bindemedel vid referenstemperatur 10 °C.



Figur 57. Masterkurvor för dynamisk modul $|E^*|$ och fasvinkel φ hos ABT 16-asfaltmassor innehållande PMB (40/100-75) vid referenstemperatur 10 °C.

Vid låga frekvenser (motsvarande höga temperaturer) har asfaltmassorna innehållande biobindemedel högre φ -värden än sina referensmassor. Vid mycket höga frekvenser (motsvarande mycket låga temperaturer) leder dock de biobindemedlen till lägre φ -värden hos asfaltmassorna än referensbindemedlen, särskilt när andelen TOP är högre (till exempel AG 16-massan innehållande Bio-160/220). Efter åldring minskar fasvinkel φ hos asfaltmassorna och det högsta φ -

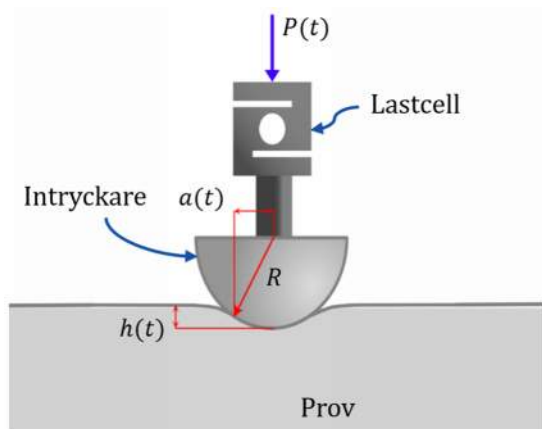
värdet (Zhu, Ahmed, Lu & Said 2022) förskjuts mot lägre frekvenser. De laboratorieåldrade asfaltmassorna visar ett liknande förhållande mellan sina φ -värden som de nytillverkade massorna, men på en lägre nivå.

Asfaltmassorna innehållande biobindemedel har lägre $|E^*|$ än sina respektive referensmassor vid låga frekvenser. Men när frekvensen ökar, överstiger $|E^*|$ för bio-asfaltmassorna sina referensvarianter. Denna effekt är mest betydande när andelen TOP är relativt hög, såsom AG 16-massan innehållande Bio-160/220. Efter åldring ökar $|E^*|$ hos asfaltmassorna. De laboratorieåldrade asfaltmassorna visar ett liknande förhållande mellan sina $|E^*|$ -värden som de nytillverkade massorna, men på en ökad nivå.

6.2.6. Styvhet genom intryckning

De nytillverkade asfaltmassorna med 160/220 bindemedel analyserades med avseende på styvhet genom ett intryckningstest (Fadil, Jelagin, Zhu & Ahmed 2025). Denna metod utvecklades i Sverige (Fadil, Chen, Jelagin & Partl 2021; Fadil, Jelagin & Partl 2022) och möjliggör bestämning av skjuvspänningsrelaxationsmodul $G(t)$ från den uppmätta intryckningskraften $P(t)$ och -djupet $h(t)$ vid godtycklig icke-minskande belastningshistorik. Intryckningsmätningar gör det möjligt att fånga lokala mekaniska egenskaper hos asfaltsprover, eftersom de lokala egenskaperna påverkas endast av materialen i omedelbar närhet av kontaktpunkten mellan intryckaren och provet. Detta test är således ett lovande verktyg för att övervaka förändringar i bindemedelsfasen av asfalt, genom mätningar utförda på asfaltsprover.

En schematisk bild av intryckningstestet visas i Figur 58, tillsammans med testparametrarna. Ett foto av apparaten för att utföra intryckningstestet visas i Figur 59. Under testet trycks den sfäriska intryckaren in i provet med en specifik intryckningsdjuphistorik, $h(t)$, vilket resulterar i en reaktionskraft, $P(t)$. Både $P(t)$ och $h(t)$ mäts som en funktion av tiden under testet. Den viskoelastiska lösningen för det sfäriska kontaktproblemet, härledd av Fadil, Jelagin och Larsson (2018), visas som Ekvation 4. Giltigheten av Ekvation 4 är begränsad till godtycklig icke-minskande belastning. Genom att ge $G(t)$ formen av en Prony-serie enligt Ekvation 5, löses Ekvation 4 numeriskt för $G(t)$ med hjälp av linjär programmering.



Figur 58. Schematisk bild av intryckningstest.



Figur 59. Foto av apparaten för intryckningstest.

$$P(t) = \frac{8}{3(1-\nu_o)} \sqrt{R} \int_0^t G(t-\tau) \times \frac{dh^{\frac{3}{2}}(\tau)}{d\tau} d\tau \quad (4)$$

I Ekvation 4:

ν_o – Poissons konstant;

R – intryckarens radie (se Figur 58); och

τ – integrationsvariabel (dummy).

$$G(t) = G_\infty + \sum_{i=1}^N G_i \cdot e^{-t/\tau_i} \quad (5)$$

I Ekvation 5:

G_∞ – jämviktsskjuvmodul;

N – antal grenar i Prony-serien;

G_i – skjuvspänningsrelaxationsmodul för gren nummer i ; och

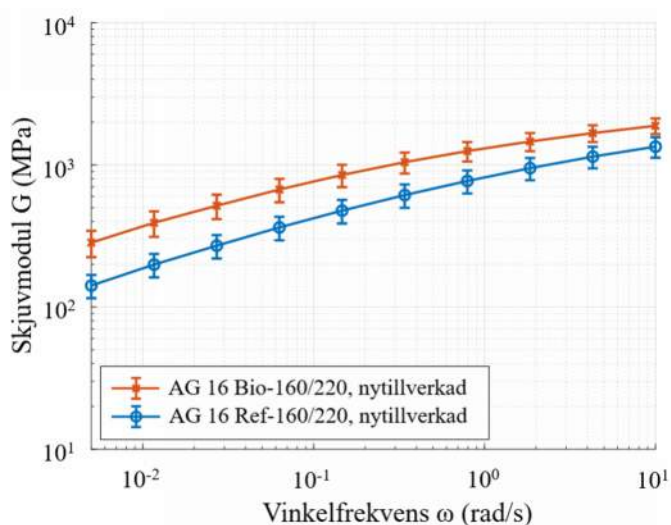
τ_i – relaxationstid för gren nummer i .

Resultatet $G(t)$ som uppmäts med sfärisk intryckningsmetod är representativt för viskoelastiska egenskaper hos materialet i omedelbar närhet av kontaktpunkten

mellan intryckaren och provet. Storleken på området som mäts i testet är proportionell mot storleken på kontaktytan, med radie $a(t)$ som i Figur 58. Att utföra intryckningstest i rutmönster på provets yta leder vanligtvis till stor variation i uppmätta $G(t)$. Detta är förväntat, på grund av den varierande fördelningen av de olika asfaltkomponenterna i närheten av intryckningspunkten, vilket resulterar i att vissa mätningar domineras av mastixfasen, medan andra domineras av ballasten. Följaktligen föreslogs en statistisk metod av Fadil, Jelagin och Partl (2022) för att separera mätningarna i två kluster: mastixdominerade och ballastdominerade. Genomsnittet av alla $G(t)$ -mätningar visade sig korrelera linjärt till asfaltens skjuvspänningsrelaxationsmodul uppmätt med konventionella metoder. Samtidigt visade sig de mastixdominerade resultaten fånga egenskaperna hos mastixfasen.

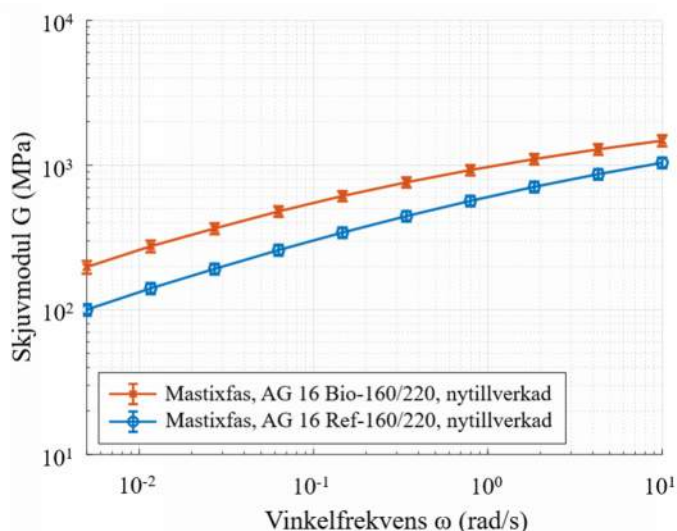
I denna studie utfördes intryckningstest för att analysera de nytillverkade asfaltmassorna med 160/220 bindemedel. Provningarna utfördes på provkroppar med en diameter på 150 mm. Provytorna förbereddes genom att skära bort cirka 5 mm från varje sida. Provkropparna hade en slutlig tjocklek på 37–40 mm. Två provkroppar analyserades för varje asfaltmassa. Till intryckningstest användes en sfärisk intryckare av stål med radie R på 15,875 mm. Testtriggen var ett MTS 810 servo-hydrauliskt testsystem med en 10 kN lastcell. Provningarna utfördes i djupkontrollerat läge. Det maximala intryckningsdjupet h_{max} var 0,3 mm och det applicerades under en ramp på 0,1 s och hölls konstant i 200 s. Detta motsvarar en maximal kontaktområdesradie a_{max} på 2,51 mm. Provytorna delades in i ett rutnät med 25 rutor, varje med en sidokant på 2 cm. Intryckningstest utfördes nära mitten av varje ruta på båda sidor av varje provkropp, vilket resulterade i totalt 50 provningar per provkropp. Detta säkerställer att avståndet mellan varje intryckning är minst $10 \times a$, vilket är för att undvika att störa mätningar i närheten, såsom i nästa ruta. Intryckningstest utfördes vid 0 °C.

Den interkonverteringsmetod som föreslogs av Park och Schapery (1999) används i denna studie för att konvertera $G(t)$ mätt på asfaltmassor genom intryckningstest till $G(\omega)$. Detta är för att underlätta jämförelser med resultaten som presenteras ovan i avsnitt 6.1.6 och 6.2.5. I Figur 60 visas genomsnittliga $G(\omega)$ -resultat för asfaltmassor genom intryckningstest vid 0 °C, tillsammans med deras 95 % konfidensintervall. Resultaten framgår att den nytillverkade AG 16-massan innehållande Bio-160/220 bindemedel med 21 % TOP är styvare än sin referensmassa inom intryckningstestets mätområde. Detta överensstämmer med $|E^*|$ -resultaten inom högfrekvensområdet i Figur 56, där referenstemperaturen är högre (10 °C).



Figur 60. Genomsnittliga $G(\omega)$ -resultat för asfaltmassor genom intryckningstest vid 0 °C.

I Figur 61 presenteras genomsnittliga $G(\omega)$ -resultat av de mastixdominerade mätningarna i intryckningstestet, tillsammans med deras 95 % konfidensintervall. Det framgår att mastixfasen i den nytillverkade AG 16-massan innehållande Bio-160/220 bindemedel är styvare än sitt referensmaterial inom mätområdet, vilket överensstämmer med bindemedels $|G^*|$ -resultat inom högfrekvensområdet i Figur 33 vid en högre referenstemperatur, 10 °C. Detta visar att den högre modulen hos den nytillverkade asfaltmassan innehållande Bio-160/220 bindemedel i Figur 60 beror på den högre modulen hos dess mastixfas, vilket i sin tur sannolikt beror på den högre modulen hos dess bindemedel inom mätområdet.

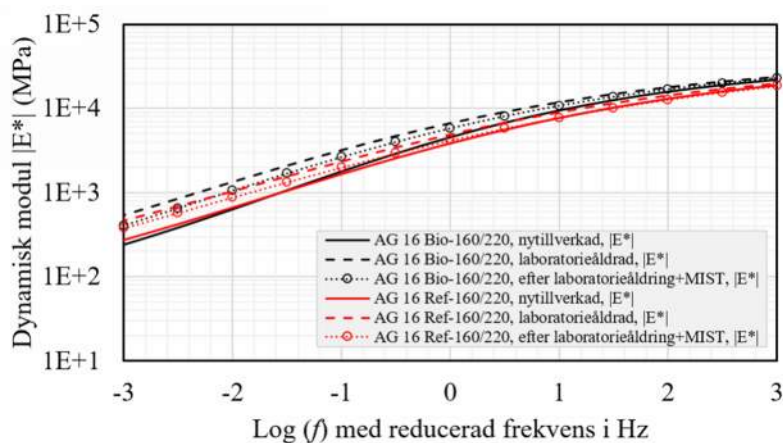


Figur 61. Genomsnittliga $G(\omega)$ -resultat av de mastixdominerade mätningarna i intryckningstestet vid 0 °C.

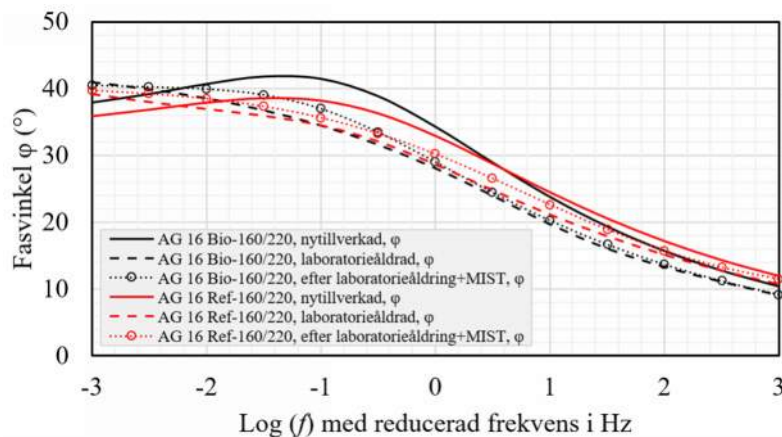
6.2.7. Kombinerade effekter av åldring och vatten

Eftersom både åldring och vatten kan påverka mekaniska egenskaper hos asfaltmassor, utvärderades deras kombinerade effekter genom dynamiska mekaniska analyser. Figur 62 och Figur 63 visar masterkurvor för dynamisk modul $|E^*|$ respektive fasvinkel φ hos AG 16-asfaltmassorna innehållande 160/220 bindemedel vid referenstemperatur 10 °C. I högfrekvensområdet (som motsvarar låga temperaturer) hade den nytillverkade AG 16-massan med Bio-160/220 högre $|E^*|$ än sin referensmassa, vilket indikerar en förstyvande effekt. Men när frekvensen minskar, minskar också dess $|E^*|$ och överträffas av referensmassan vid mycket låga frekvenser (d.v.s. förstyvningseffekten upphör). Efter laboratorieåldringen ökade $|E^*|$ för båda asfaltmassorna. De två åldrade massorna visade ett mycket liknande förhållande vad gäller $|E^*|$ som de nytillverkade massorna, men på en ökad nivå och med en eventuell överträffning (där förstyvningseffekten upphör) vid ännu lägre frekvenser. Den ytterligare MIST-konditioneringen minskade $|E^*|$ för de åldrade asfaltmassorna, men $|E^*|$ -värdena efter MIST var fortfarande högre än för de nytillverkade massorna. Efter laboratorieåldring och MIST hade AG 16-massan med Bio-160/220 högre $|E^*|$ än sin referensmassa (en förstyvande effekt) i nästan hela det analyserade frekvensområdet.

När det gäller fasvinkel φ (Figur 63), i lågfrekvensområdet (som motsvarar höga temperaturer), hade AG 16-massan med Bio-160/220 högre φ än sin referensmassa. Vid mycket höga frekvenser (som motsvarar mycket låga temperaturer) ledde dock Bio-160/220 till lägre φ hos asfaltmassan än Ref-160/220. Efter åldringen minskade φ för båda asfaltmassorna i högfrekvensområdet och deras högsta φ -värden försköts mot lägre frekvenser. De två åldrade massorna visade ett mycket liknande förhållande vad gäller φ som de nytillverkade massorna, men på en lägre nivå och med en förskjutning mot lägre frekvenser. Liknande som för $|E^*|$, reverserade den ytterligare MIST-konditioneringen också vissa av φ -förändringarna på grund av åldring. Detta resulterade i φ -masterkurvor efter laboratorieåldring och MIST som ligger mellan de nytillverkade och åldrade massorna, medan förhållandet vad gäller φ mellan de två massorna förblev likartat trots ytterligare förändrad nivå och omvänd förskjutning efter MIST.



Figur 62. Masterkurvor för dynamisk modul $|E^*|$ hos AG 16-asfaltmassor innehållande 160/220 bindemedel vid referenstemperatur 10 °C.



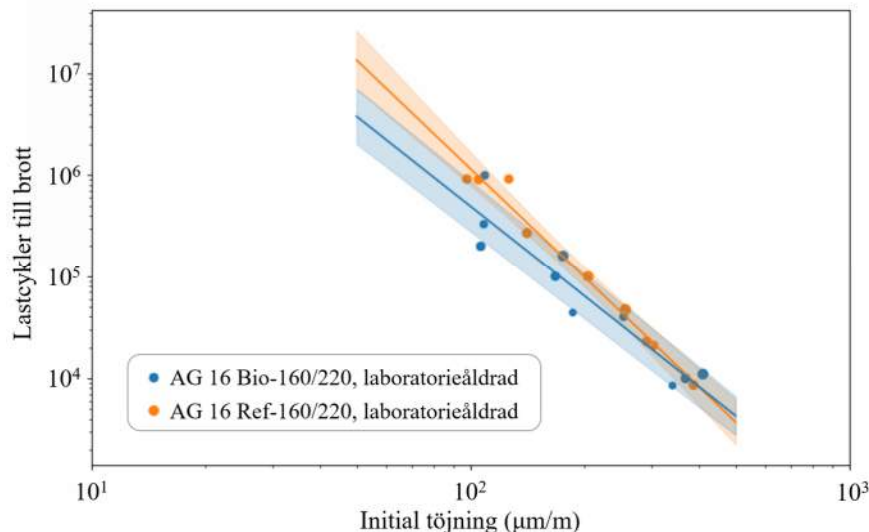
Figur 63. Masterkurvor för fasvinkel ϕ hos AG 16-asfaltmassor innehållande 160/220 bindemedel vid referenstemperatur 10 °C.

6.2.8. Utmattningssegenskaper

De åldrade AG 16-massorna innehållande 160/220 bindemedel analyserades för utmattningssegenskaper vid 10 °C enligt SS-EN 12697-24:2018 Bilaga E (indirekt dragprovning på cylindriska provkroppar med 100 mm diameter och 50 mm tjocklek). Anledningen till att analysera dessa asfaltmassor var att de brukar utsättas för högre risk för utmattnings-skador i asfaltbärlager och bindemedelsanalyser genom LAS-test (se Figur 43) hade väckt frågor om biobindemedels inverkan på utmattningsmotståndet. Provningsresultaten visas i Figur 64.

Resultaten för utmattningssegenskaper hos asfaltmassorna överensstämde väl med resultaten från bindemedelsanalys i Figur 43. Vid 10 °C och små töjningar (dragtöjningar för asfaltmassor) verkade den åldrade AG 16-massan med Bio-160/220 bindemedel vara mindre motståndskraftig mot utmattnings-skador än den med Ref-160/220. I Figur 64 representerar de färgskuggade områdena 95 % konfidensintervall. Vid höga töjningar visade asfaltmassan med Bio-160/220 inte signifikant annorlunda utmattningsmotstånd jämfört med referensmassan. När

töjningsnivån minskar, ska deras skillnad i utmattningsmotstånd börja synas. Det är dock värt att notera att konfidensnivån för denna skillnad ska vara lägre än 95 % inom det undersökta området för dragtöjningar.



Figur 64. Utmattningsmotstånd hos de åldrade AG 16-asfaltmassorna innehållande 160/220 bindemedel vid 10 °C (färgskuggade områden representerar 95 % konfidensintervall).

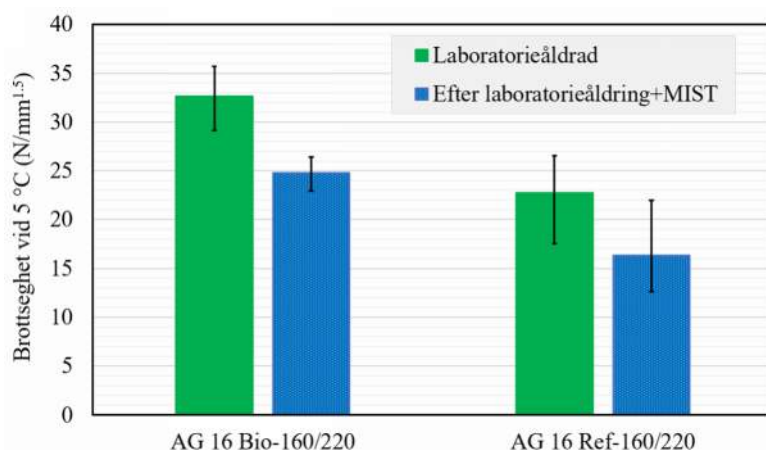
En kritisk faktor som påverkar utmattningsmotståndet hos asfaltmassa är modulen. Att öka asfaltmassans modul minskar utmattningsmotståndet (Sudarsanan & Kim 2022). Tabell 15 listar styvhetsmodulen för AG 16-massorna vid 10 °C före och efter laboratorieåldringen. Det framgår att AG 16-massan (i torrt tillstånd) med Bio-160/220 bindemedel hade högre styvhetsmodul än sin referensmassa vid 10 °C under belastningsförhållandet med belastningstid 0,1 s och vilotid 2,9 s. Efter laboratorieåldringen ökade styvhetsmodulen för båda asfaltmassorna, vilket indikerar härdning på grund av åldring. Deras ökningsgrader var liknande varandra (båda cirka 40 % ökning), vilket ledde till att styvhetsmodulen för den åldrade AG 16-massan med Bio-160/220 förblev högre än referensmassan. Detta kan förklara åtminstone delvis skillnaden mellan de åldrade AG 16-massorna i utmattningsmotstånd i Figur 64.

Tabell 15. Styvhetsmodul för AG 16-asfaltmassor innehållande 160/220 bindemedel vid 10 °C före och efter laboratorieåldring.

Asfaltmassor	Styvhetsmodul vid 10 °C (MPa), nyttillverkad asfaltmassa	Styvhetsmodul vid 10 °C (MPa), laboratorieåldrad asfaltmassa
AG 16 Bio-160/220 (torrt tillstånd)	5868	8239
AG 16 Ref-160/220 (torrt tillstånd)	4565	6432

6.2.9. Sprickpropagering

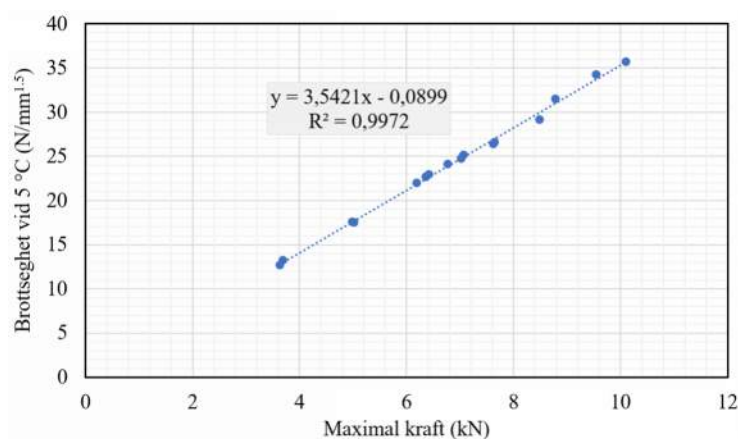
De åldrade AG 16-massorna innehållande 160/220 bindemedel analyserades även för sprickpropageringspotential vid 5 °C enligt SS-EN 12697-44:2019 (böjprovning på halvcirkulära provkroppar, med Semi-Circular Bending, SCB-test). Provkropparna för SCB-testet var 150 mm i diameter och 50 mm tjocka, med en skåra som är 10 mm djup. Dessutom konditionerades några åldrade provkroppar ytterligare med MIST och dessa provkroppar analyserades också med SCB-test vid 5 °C efter både laboratorieåldring och MIST-konditionering. SCB-testet applicerar en last från toppen av en halvcirkulär provkropp med en central skåra. På grund av belastningen genereras en dragspänning och en spricka börjar sprida sig. Genom att mäta den applicerade kraften och den vertikala förskjutningen kan brottsegheten och andra relaterade parametrar beräknas som indikatorer för asfaltmassans sprickutbredningspotential. Beräkningsresultaten för brottsegheten hos de undersökta asfaltmassorna visas i Figur 65.



Figur 65. Brottseghet hos AG 16-asfaltmassor innehållande 160/220 bindemedel vid 5 °C (felstaplar indikerar max/min-värden).

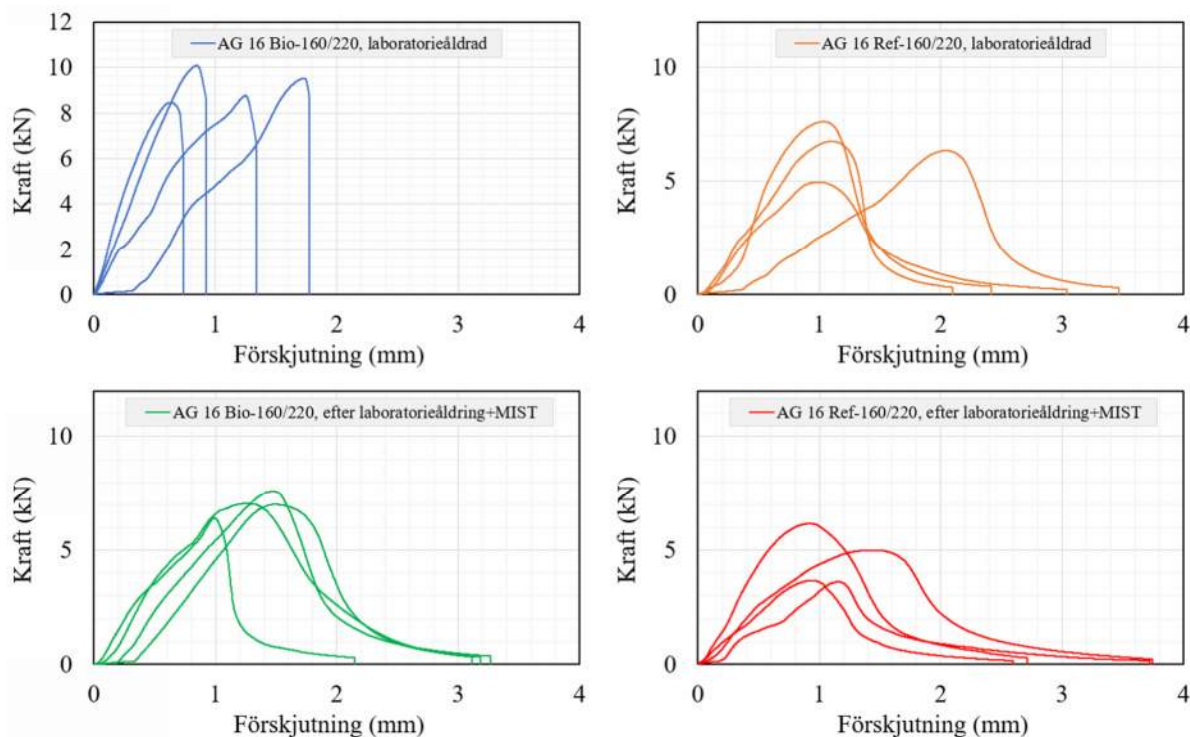
Beräkningsresultaten i Figur 65 visar att den åldrade AG 16-massan med Bio-160/220 bindemedel hade signifikant högre brottseghet än sin referensmassa vid 5 °C. Efter MIST-konditionering vid 40 °C och 0,28 MPa portryck med 12000 cykler minskade brottsegheten hos båda asfaltmassorna, vilket indikerar påverkan av vatten på asfaltmassornas sprickpropageringsmotstånd. Efter både laboratorieåldring och MIST-konditionering var brottsegheten hos AG 16-massan med Bio-160/220 fortfarande högre än sin referensmassa. Det är värt att notera att brottsegheten hos AG 16-massan med Bio-160/220 efter både laboratorieåldring och MIST-konditionering var högre än den hos den åldrade AG 16-massan med Ref-160/220 före MIST-konditionering.

Även om standarden SS-EN 12697-44:2019 har brottsegheten som huvudresultat, verkar den inte visa något annat än den maximala kraften under SCB-testet och provkroppens hållfasthet. Det finns ett linjärt samband mellan brottsegheten hos asfaltmassorna och den maximala kraften under SCB-testet, se Figur 66. Förutom hållfasthet och brottseghet finns det andra parametrar relaterade till asfaltmassas sprickpropageringsmotstånd (Meng et al. 2023).

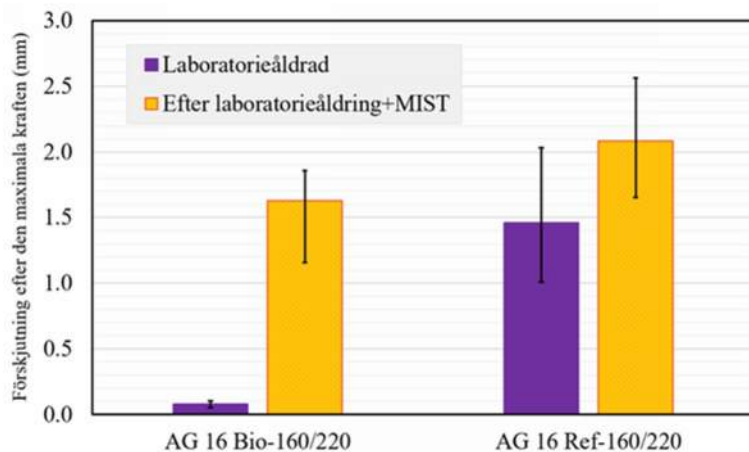


Figur 66. Linjärt samband mellan brottsegheten hos AG 16-asfaltmassorna innehållande 160/220 bindemedel vid 5 °C och den maximala kraften under SCB-test.

En annan relevant parameter är förskjutningen efter den maximala kraften. Den definieras som förskjutningen från den maximala kraften till brott. En liten förskjutning efter den maximala kraften indikerar vanligtvis en snabb sprickpropagering genom provkroppen, vilket tyder på en spröd asfaltmassa. Däremot är en stor förskjutning efter den maximala kraften ett tecken på långsam sprickpropagering och en flexibel asfaltmassa (Kaseer et al. 2018). Figur 67 visar kraft-förskjutningskurvorna för de analyserade asfaltmassorna (fyra replikat vardera) under SCB-testet vid 5 °C. Skillnaderna i maximal kraft mellan olika asfaltmassor är tydliga. Dessutom visade den laboratorieåldrade AG 16-massan med Bio-160/220 bindemedel väldigt annorlunda kurvor efter den maximala kraften – nästan omedelbart brott. Detta indikerar en snabb sprickpropagering genom provkroppen och ett sprött brott. Efter ytterligare MIST-konditionering försvagades dock AG 16-massan innehållande Bio-160/220 (lägre hållfasthet) och visade inte längre sprödhet. Detta kan bero på den minskade materialintegriteten efter MIST-konditionering, vilket gjorde asfaltmassan svagare men tillät större deformation före brottet.



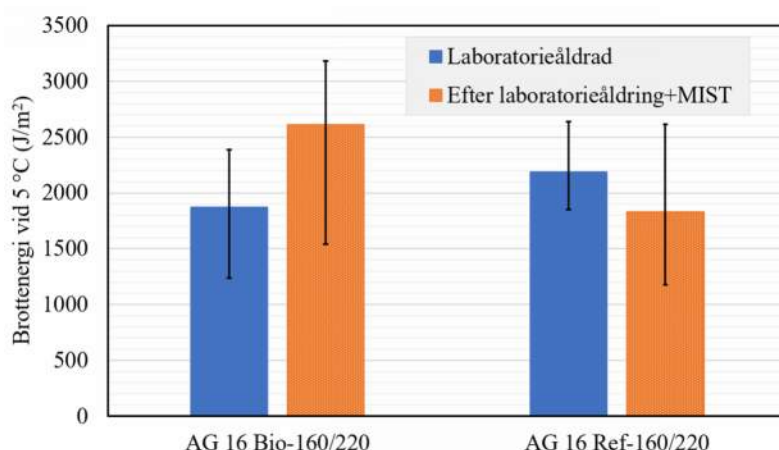
Figur 67. Kraft-förskjutningskurvor för AG 16-asfaltmassorna innehållande 160/220 bindemedel under SCB-test vid 5 °C.



Figur 68. Förskjutning efter den maximala kraften för AG 16-asfaltmassorna innehållande 160/220 bindemedel vid 5 °C (felstaplar indikerar max/min-värden).

Resultaten av förskjutningen efter den maximala kraften för alla undersökta asfaltmassor visas i Figur 68. Det framgår att den åldrade AG 16-massan innehållande Bio-160/220 bindemedel hade betydligt lägre förskjutning efter den maximala kraften än sin referensmassa vid 5 °C, vilket tyder på dess sprödhet. Efter MIST-konditioneringen ökade förskjutningen för båda asfaltmassorna, möjligen på grund av vattens inverkan på materialets integritet. Efter både laboratorieåldring och MIST-konditionering var förskjutningen efter den maximala kraften för AG 16-massan med Bio-160/220 fortfarande lägre än sin referensmassa.

Genom att kombinera både kraft och förskjutning under SCB-testet definieras brottenergi som arbete per ytenhet (enhet: J/m²) som krävs för att initiera och sprida sprickan i provkroppen tills brott. För provkroppar med identiska dimensioner (såsom standardprovkroppar) motsvarar brottenergin arean under kraft-förskjutningskurvan. Brottenergin för alla undersökta AG 16-asfaltmassor i denna studie beräknades. Beräkningsresultaten visas i Figur 69. Det framgår att den åldrade AG 16-massan innehållande Bio-160/220 bindemedel hade något lägre brottenergi än sin referensmassa vid 5 °C. Efter MIST-konditioneringen ökade dess brottenergi på grund av den minskade sprödheten. Samtidigt minskade referensmassans brottenergi på grund av den försvagande effekten av MIST-konditioneringen. Sammantaget visade SCB-testet vid 5 °C att den åldrade AG 16-massan innehållande Bio-160/220 bindemedel (med 21 % TOP ersättning) hade högre hållfasthet att motstå sprickor än referensmassan, men dess högre sprödhet skulle leda till en snabbare sprickpropagering när sprickan börjar sprida sig. Efter vattens inverkan skulle asfaltmassan med biobindemedlet bli svagare men mindre spröd.



Figur 69. Brottenergi för AG 16-asfaltmassorna innehållande 160/220 bindemedel vid 5 °C (felstaplar indikerar max/min-värden).

6.2.10. Samband mellan bindemedels- och asfaltegenskaper

I denna studie analyserades flera materialegenskaper på både bindemedelsnivå och asfaltnivå, inklusive styvhet, fasvinkel, åldring, utmattning och sprickmotstånd. Analyserna har visat att användningen av TOP som delvis ersättning i bindemedlet inte förändrar den grundläggande principen om bindemedlets inverkan på asfaltens styvhet och fasvinkel. Asfaltens styvhet är positivt korrelerad med bindemedlets styvhet, och asfaltens fasvinkel beror på styvheten (Zhu, Ahmed, Said, Dinegda & Lu 2022). Åldringens inverkan på styvhet och fasvinkel förändras inte heller av TOP. Åldring orsakar ökad styvhet hos både bindemedel och asfalt samt minskad fasvinkel hos bitumen. Det är dock värt att notera att användningen av TOP kan påverka nivåerna av dessa egenskaper och förändra deras temperatur-/frekvenskänslighet något. Styvheten kan anpassas genom att styra blandningsgraden av TOP i bindemedlet, men anpassningen av styvheten vid en temperatur eller frekvens betyder inte nödvändigtvis samma anpassning vid en annan temperatur eller frekvens. Detta gäller för både bindemedel och asfaltmassor och effekten är mer betydande när TOP-halten är högre i bindemedlet. Användningen av TOP ökar

vanligtvis bindemedlets fasvinkel vid mellan- och högtemperaturer (alternativt mellan- och lågfrekvenser), men inte vid lågtemperaturer eller högfrekvenser. Det verkar som att detta kan även påverka fasvinkeln hos asfaltmassor. Framtida studier genom modellering av masterkurvorna skulle förmodligen ge djupare insikter om de specifika effekterna.

Som nämnts ovan överensstämde resultaten för utmattningssegenskaper hos de åldrade AG 16-asfaltmassorna innehållande 160/220 bindemedel i Figur 64 väl med resultaten från bindemedelsanalys i Figur 43. Även det linjära viskoelastiska DSR-resultatet vid 10 °C (Glover-Rowe-parameter i Tabell 7) stöder slutsatsen om något sämre utmattningsmotstånd hos Bio-160/220 bindemedlet vid små töjningar. Men det bör noteras att detta handlar om den relativa jämförelsen och inte om acceptanskriteriet. När det gäller sprickmotståndet efter långtidsåldring pekar både bindemedels- och asfaltanalyserna i samma riktning – vid lägre temperaturer (alternativt högre frekvenser) blir de åldrade materialen innehållande TOP styvare, starkare och mindre flexibla. Detta gäller särskilt när TOP-halten är hög i biobindemedel.

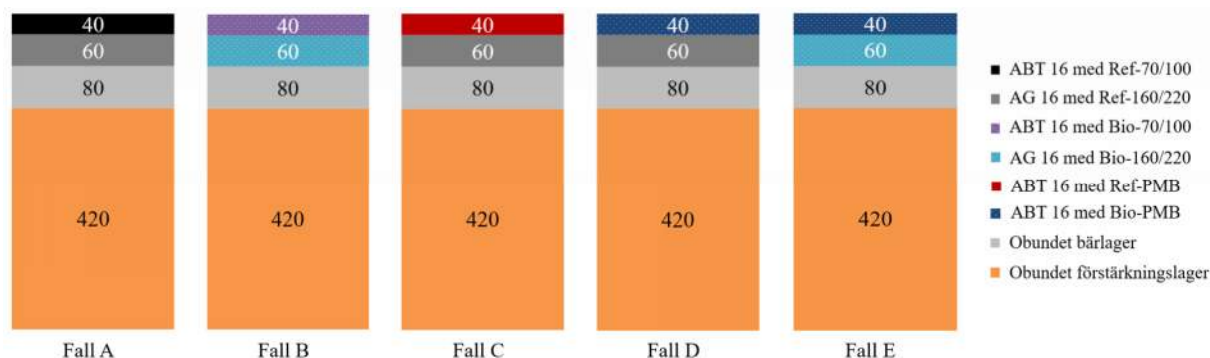
7. Livscykelanalys

Livscykelanalys (LCA) är en metod som ofta används för att utvärdera koldioxidavtrycket och andra miljöpåverkan från en produkt, process eller tjänst under hela dess livscykel. LCA-verktyg används av beläggningsbranschen och forskare idag för att utvärdera koldioxidavtrycket och andra miljöpåverkan från olika typer av beläggningar och vägmateriäl. I denna studie genomfördes en LCA-analys för asfaltbeläggningar med de sex analyserade bituminösa bindemedlen (se avsnitt 5.1 för mer information). Analysen fokuserade på koldioxidavtrycket och redovisningen av biogen koldioxid. Beräkningarna omfattade livscykelfaserna A1-A5, från vagga till beläggning (inklusive utvinning och bearbetning av råmaterial, transport av råmaterial och asfalt, asfaltblandning och beläggningsarbete), samt redovisningen av biogen koldioxid (del av livscykelfaserna C/D). Effekterna av biogena komponenter och polymermodifiering analyserades. Syftet med denna LCA-analys är att utvärdera koldioxidavtrycket för de undersökta biobindemedlen och bedöma deras potential att minska koldioxidutsläppen från asfaltbeläggningar (Zhu, Huang, Ahmed, Dinegda & Shen 2025).

7.1 Systemgränser

För en LCA-analys är det viktigt att välja de systemgränser och processer inom de gränser som utgör en livscykelinventering (LCI). Detta definierar analysens omfattning. Gränserna är viktiga för att analysen ska vara både komplett och praktisk. De valda systemgränserna i denna studie presenteras i Figur 70, inklusive dessa processer:

16), ett obundet bärlager (krossat berg) och ett obundet förstärkningslager (krossat berg). Sex olika asfaltmassor (se avsnitt 5.3 beaktades för de bundna lagren. Fem olika kombinationer (Fall A-E) av slitlager och bundna bärlager undersöktes i LCA-analysen. Samtidigt hölls materialen i obundna bär- och förstärkningslager samt tjockleken på alla lager konstanta.



Figur 71. De analyserade beläggningsskonstruktionerna – fyra lager ovanpå en terrass av sand (siffrorna anger lagertjockleken i mm).

7.3. Livscykelinventering

Fallstudier genomfördes för att jämföra de olika beläggningsskonstruktionerna med konventionella bindemedel och biobindemedel. De obundna bär- och förstärkningslagren inkluderades inte i denna analys eftersom de är identiska i alla analyserade fall. Som nämnts i avsnitt 5.3, var arbetsreceptet och packningsförfarandet detsamma för varje asfalttyp med biobindemedel och dess referensmassa.

Asfaltmassornas densitet antogs vara 2,4 t/m³ för alla asfalttyper för att inventera transporter. En bitumenemulsion innehållande 67 % bitumen användes för klistringen mellan slitlagret (40 mm tjockt) och det bundna bärlagret (60 mm tjockt). Klistermängden var 0,3 L/m². Bindemedelshalten var 5,9 % respektive 4,5 % i ABT 16-asfaltmassorna (slitlager) och AG 16-massorna (bundet bärlager). Ingen retur-asfalt användes. Två typer av lastbilar beaktades för transporter av material, det vill säga 32-tons lastbilar för transport av ballast (5 km till asfaltverket) samt asfaltmassor (15 km till utläggningsplatsen), och 14-tons lastbilar för transport av andra material såsom konventionella bitumen (75 km till asfaltverket), TOP (230 km till asfaltverket), PMB (470 km till asfaltverket, inklusive Ref-PMB och Bio-PMB) och bitumenemulsion (480 km till utläggningsplatsen).

Indata för energityp och -förbrukning för de olika processer i produktions-, transport- och byggfaserna samlades in från sekundära källor med hänsyn till svenska och europeiska förhållanden. Endast traditionell elproduktion och fossila bränslen beaktades i denna studie, se Tabell 16.

Tabell 16. Energityp och -förbrukning för olika processer (data för produktionsprocesser inkluderar uppströms energiförbrukning).

Process och energityp	Enhet	Energiförbrukning	Referens
Ballastproduktion, diesel	L/t	0,475	Stripple 2001
Ballastproduktion, el	kWh/t	5,886	Stripple 2001
Produktion av konventionella bitumen, eldningsolja och diesel	L/t	29,6	Stripple 2001
Produktion av konventionella bitumen, el	kWh/t	70,0	Stripple 2001
Bitumenemulsion produktion, eldningsolja	L/t	31,7	Eurobitume 2012
Bitumenemulsion produktion, el	kWh/t	100,8	Eurobitume 2012
Produktion av konventionella PMB, eldningsolja och diesel	L/t	45,6	Nynas 2021; Stripple 2001
Produktion av konventionella PMB, el	kWh/t	107,8	Nynas 2021; Stripple 2001
Bio-PMB produktion, eldningsolja och diesel	L/t	47,0	Nynas 2021; Stripple 2001
Bio-PMB produktion, el	kWh/t	111,0	Nynas 2021; Stripple 2001
Produktion av TOP, eldningsolja och diesel	L/t	41,3	Nynas 2021; Stripple 2001
Produktion av TOP, el	kWh/t	97,8	Nynas 2021; Stripple 2001
Asfaltblandning, varmblandad asfalt icke-PMB, eldningsolja	L/t	6,8	Butt 2014
Asfaltblandning, varmblandad asfalt icke-PMB, el	kWh/t	8,3	Butt 2014
Asfaltblandning, varmblandad asfalt med PMB, eldningsolja	L/t	8,0	Butt 2014
Asfaltblandning, varmblandad asfalt med PMB, el	kWh/t	9,7	Butt 2014
Utlägningsarbete, diesel	L/m ²	0,0166	Butt 2014
Packningsarbete, diesel	L/m ²	0,0223	Butt 2014
Klistring mellan lagren, diesel	L/m ²	0,0031	Stripple 2001

Med insamlade data genomfördes beräkningen inom de definierade systemgränserna (se Figur 70). LCA-modellen består av fem delar. Belägningsparametrar (Del 1) och transportparametrar (Del 2) presenteras ovan i detta avsnitt.

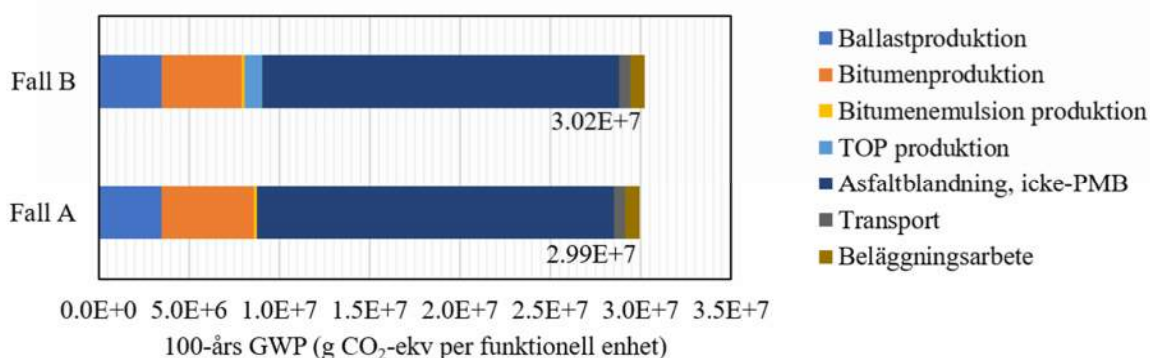
Energiförbrukningsparametrar (Del 3) visas i Tabell 16. Beräkningen genom att kombinera dessa 3 delar med inventeringsparametrar för energi (Del 4) ger de luftburna utsläppen från produktions-, transport- och byggfaserna (Del 5). Resultaten för några utvalda viktiga luftburna utsläpp listas i Tabell 17.

Tabell 17. Beräkningsresultat för de analyserade fallen (utvalda luftburna utsläpp i g per funktionell enhet).

Fall	SO ₂	NO _x	CO	CO ₂	NMVOC ¹	Partiklar	CH ₄
Fall A	4.37×10 ⁴	2.42×10 ⁵	1.33×10 ⁵	2.97×10 ⁷	3.49×10 ⁴	1.69×10 ⁴	7.51×10 ³
Fall B	4.42×10 ⁴	2.44×10 ⁵	1.35×10 ⁵	3.00×10 ⁷	3.52×10 ⁴	1.70×10 ⁴	7.81×10 ³
Fall C	4.66×10 ⁴	2.80×10 ⁵	1.52×10 ⁵	3.37×10 ⁷	4.03×10 ⁴	1.84×10 ⁴	7.51×10 ³
Fall D	4.68×10 ⁴	2.81×10 ⁵	1.55×10 ⁵	3.39×10 ⁷	4.04×10 ⁴	1.85×10 ⁴	8.58×10 ³
Fall E	4.72×10 ⁴	2.83×10 ⁵	1.57×10 ⁵	3.41×10 ⁷	4.07×10 ⁴	1.86×10 ⁴	8.83×10 ³

7.4. Fossil Global Warming Potential (GWP-fossil)

För att bedöma klimatpåverkan (det vill säga koldioxidavtryck) beräknades global uppvärmningspotential (Global Warming Potential, GWP) över 100 år för de analyserade fallen baserat på resultaten för CO₂ och CH₄ i Tabell 17. En faktor på 25 användes för CH₄. Eftersom livscykelinventeringen endast beaktade traditionell elproduktion och fossila bränslen, motsvarar den 100-års GWP som diskuteras i detta avsnitt fossil GWP (GWP-fossil). För varje fall delades GWP-fossil från vagga till beläggning (livscykelfaserna A1-A5) upp i olika livscykelprocesser. Resultaten för Fall A (med konventionella bitumen) och Fall B (med biobindemedel i två bundna lager, utan polymer) visas i Figur 72. Det framgår att användningen av TOP som delvis ersättning i bindemedlet ökar den 100-års GWP-fossil av asfaltbeläggningar något, med cirka 1 %. Denna ökning beror främst på de uppströms klimatpåverkan från utvinning och bearbetning av råvarorna (biobaserade biprodukter från sulfatmassaprocessen vid pappersbruk) för att producera TOP.



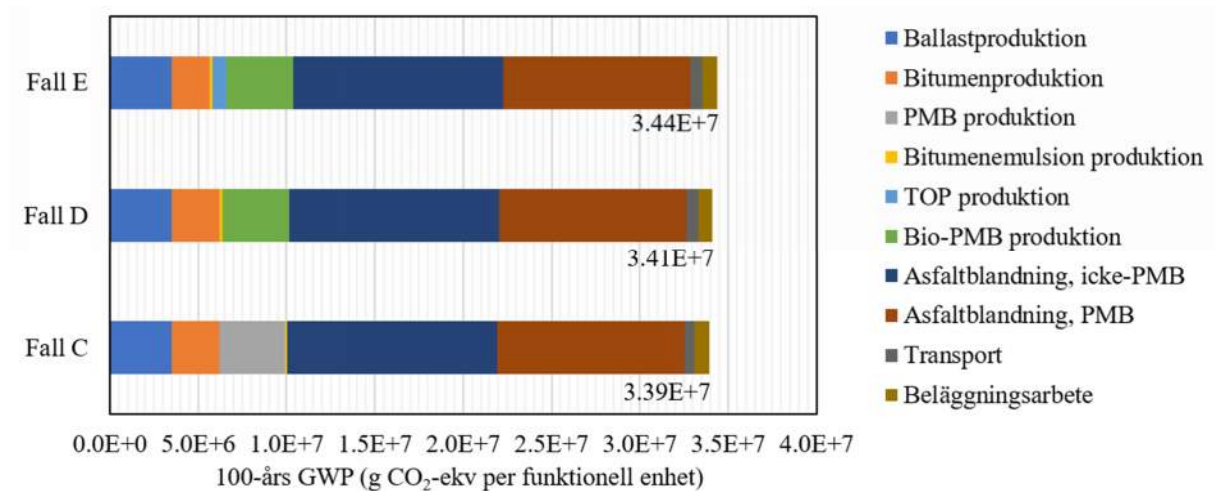
Figur 72. 100-års fossil GWP från vagga till beläggning (A1-A5) för Fall A och B baserat på CO₂- och CH₄-utsläpp.

När det gäller livscykelprocesserna framgår det att GWP-värdet för asfaltblandning utgör den största andelen i båda fallen. Detta innebär att en sänkning av blandningstemperaturen för asfalt skulle ha störst potential för att minska koldioxidavtrycket från asfaltbeläggningar. Produktionen av ballast och bindemedel (inklusive TOP) står också för en betydande andel av totalen. Däremot har transport-

¹ NMVOC = non-methane volatile organic compound

och byggprocesser såsom asfaltutläggning, packning och klistering relativt små andelar i båda fallen, även om vissa långdistanstransporter har beaktats i analysen.

För de fallen med PMB (Fall C, D och E) visar Figur 73 deras 100-års fossil GWP baserat på CO₂- och CH₄-utsläpp. Jämförelsen mellan Fall C (med konventionellt PMB i slitlager) och Fall D (med Bio-PMB i slitlager) visar att användningen av Bio-PMB också ökar den 100-års GWP-fossil av asfaltbeläggningar något. Detta beror främst på de uppströms klimatpåverkan som uppstår vid utvinning och bearbetning av råmaterialen för att producera Bio-PMB. Fall E kombinerar effekterna av både TOP och Bio-PMB i två bundna lager. Det visar den högsta 100-års GWP-fossil bland alla de analyserade fallen. Dessutom, med samma belägningsstruktur och lagertjocklek, är 100-års GWP-fossil för de PMB-fallen cirka 13 % högre än de fallen utan polymer. Detta beror på den relativt höga klimatpåverkan av PMB (särskilt polymer) samt den ökade produktionstemperaturen för PMB-asfalt.



Figur 73. 100-års fossil GWP från vagga till beläggning (A1-A5) för Fall C, D och E baserat på CO₂- och CH₄-utsläpp.

7.5. Redovisning av biogen koldioxid

Enligt standarden SS-EN 15804:2012+A2:2019/AC:2021 består en byggprodukts totala GWP av tre delar – fossil GWP, biogen GWP och GWP för markanvändning (på engelska: land use and land use change, luluc). Inom systemgränserna för denna studie (se Figur 70) antogs markanvändningen vara samma för alla de analyserade fallen och inkluderades därför inte i beräkningen. Som nämnts ovan, eftersom livscykelinventeringen endast beaktade traditionell elproduktion och fossila bränslen, motsvarar den 100-års GWP som diskuterats ovan fossil GWP. TOP och Bio-PMB i denna studie innehåller dock biogent kol på grund av överföringar från sina uppströms produktsystem (massa- och pappersprodukter som tillverkas med råvaror från skogen). Därför ska den biogena kolhalten deklarerats för de analyserade fallen som innehåller biogena komponenter. Effekterna av biogena kolflöden ska undersökas.

För redovisning av biogen GWP använder standarden SS-EN 15804:2012+A2:2019/AC:2021 den så kallade “-1/+1”-metoden. Med denna metod karakteriseras inflöden (inåtgående överföringar) av biogent kol från de tidigare produktsystemen till det analyserade produktsystemet som -1 g CO₂-ekv/g CO₂ (det vill säga cirka -3,67 g CO₂-ekv/g C) medan utsläpp av biogent kol samt utflöden (utåtgående överföringar) från det analyserade produktsystemet till de efterföljande produktsystemen karakteriseras som +1 g CO₂-ekv/g CO₂ (det vill säga cirka +3,67 g CO₂-ekv/g C). Således ger denna metod en översikt över hela det biogena kolflödet och leder till ett nollsaldo av biogent kol.

Den så kallade “-1/+1”-metoden återspeglar dock inte det faktum att asfaltmassor inte förbränns efter livslängdens slut utan är 100 % återanvändbara och återvinningsbara material (Zaumanis, Mallick & Frank 2014). För en mer lämplig redovisning av biogen koldioxid, särskilt för asfaltmassor och asfaltbeläggningar, behöver andra metoder utforskas. Generellt sett finns det tre olika metoder inom LCA-litteraturen för att redovisa växtbaserad biogen koldioxid för byggprodukter (Hoxha et al. 2020; Ouellet-Plamondon et al. 2023), beroende på hur biogen kolbindning, överföring och utsläpp beaktas. Figur 74 illustrerar dessa metoder (så kallade “0/0”, “-1/+1” och “-1/+X”) i kontexten av asfaltbeläggningar.



Figur 74. Olika metoder för att redovisa växtbaserad biogen koldioxid för asfaltbeläggningar (denna studie omfattar A1-A5 samt redovisning av biogen koldioxid i slutskede C).

Till skillnad från “-1/+1”-metoden i SS-EN 15804:2012+A2:2019/AC:2021 beaktar “0/0”-metoden varken bindning, överföring eller utsläpp av biogent kol i analysen. Vid återanvändning, återvinning eller deponering i slutskedet kan dock en variant av “-1/+1”-metoden användas för att beakta bindning, överföring eller utsläpp av biogent kol, vilket leder till att inget eller inte allt biogent kol modelleras som utsläpp eller utflöde i slutskedet. Denna variant benämns “-1/+X”-metoden i denna studie. En sammanfattning av dessa tre olika metoder presenteras i Tabell 18.

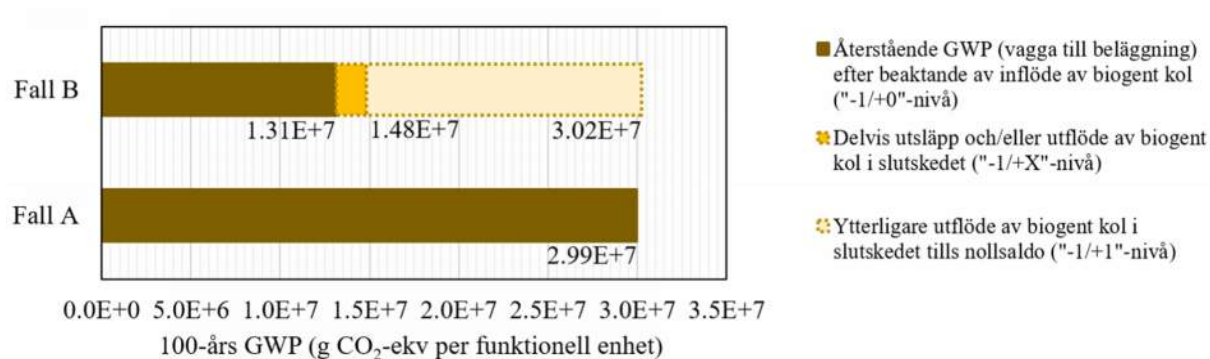
Tabell 18. Sammanfattning av tre olika metoder för att redovisa växtbaserad biogen koldioxid.

Metod	Skogssystem	Beläggningssystem, livscykelkedade A1-A5	Beläggningssystem, livscykelkedade B1-B7	Beläggningssystem, livscykelkedade C1-C4
0/0	–	–	–	–
-1/+1	Kolbindning	Inflöde/inåtgående överföring (-1)	–	Utflyde/utåtgående överföring (+1)
-1/+X	Kolbindning	Inflöde/inåtgående överföring (-1)	–	Kol återvunnet ² (+X)

Eftersom "0/0"-metoden inte beaktar biogent kol i beräkningen, redovisas biogen GWP i denna studie med både "-1/+1"- och "-1/+X"-metoderna. Med tanke på att "X"-värdet för asfaltbeläggningar inte har fastställts i större utsträckning än, används ett värde som ofta används för att redovisa biogent kol för träbyggnader i flera länder för asfaltbeläggningar i denna studie, som ett utforskande försök. "X"-värdet är 0,1 (Ouellet-Plamondon et al. 2023). Det nyligen uppdaterade dokumentet, norska produktkategoriregler NPCR 025 del B för asfalt (version 1.1 uppdaterad 2022), använder samma värde för asfaltmassor i slitlager (EPD-Norge 2022). Det är värt att notera att mer noggranna "X"-värden, särskilt för asfaltbeläggningar av olika typer, fortfarande behöver fastställas i framtida studier.

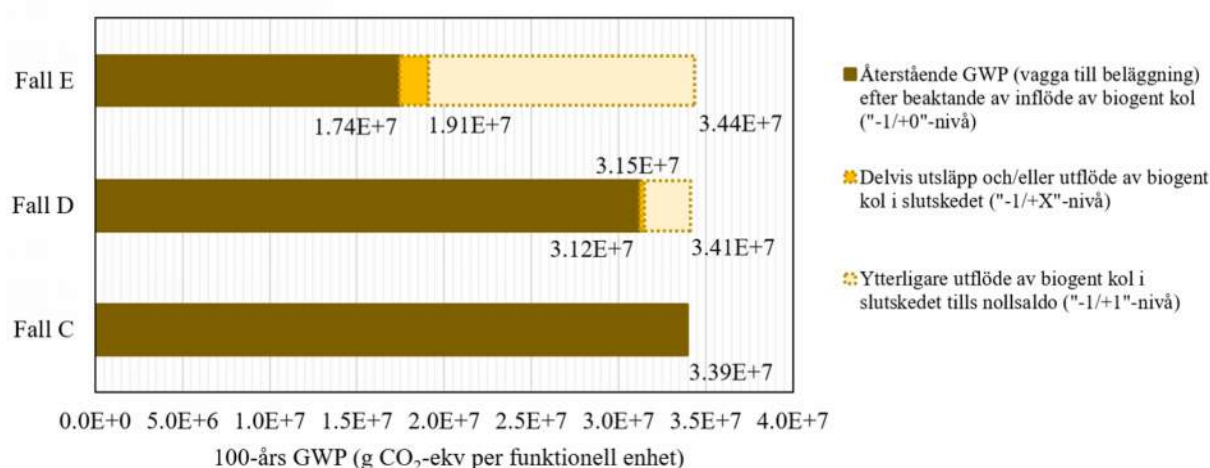
Baserat på andelen biogen komponent i asfaltmassorna för Fall A-E och kolhalten i bio-komponenten, genom elementaranalys (Nynas 2021), kunde den biogena kolhalten i de analyserade fallen beräknas, $4,67 \times 10^6$ g C per funktionell enhet för Fall B, $8,01 \times 10^6$ g C per funktionell enhet för Fall D och $4,62 \times 10^6$ g C per funktionell enhet för Fall E. Med den biogena kolhalten och genom att använda "-1/+1"- och "-1/+X"-metoderna kunde effekterna av biogena kolflöden på 100-års GWP undersökas. Resultaten för Fall A och B (utan polymer) presenteras i Figur 75. Det framgår att, för en beläggning med två asfaltlager innehållande biobindemedel (Fall B), stod negativ biogen GWP på grund av inflöde av biogent kol för cirka 57 % av den initiala fossila GWP-nivån. Däremot varierar effekterna av utflyden och eventuella utsläpp av biogent kol från det analyserade systemet i slutskedet beroende på vilken metod som används i analysen ("-1/+1" eller "-1/+X"). "-1/+1"-metoden leder tillbaka till den initiala fossila GWP-nivån med ett nollsaldo av biogent kol, medan "-1/+X"-metoden resulterade i en halvering (cirka 49 %) av total GWP jämfört med den initiala fossila GWP-nivån.

² Delvis koldioxidutsläpp och/eller -utflyde



Figur 75. Effekter av biogent kolflöde på 100-års GWP för Fall A och B ($X=0,1$).

När det gäller fallen med PMB (Fall C, D och E) visar Figur 76 effekter av biogent kolflöde på 100-års GWP. Det framgår att, för en beläggning med slitlagret som innehåller Bio-PMB (Fall D), stod negativ biogen GWP på grund av inflöde av biogent kol för cirka 9 % av den initiala fossila GWP-nivån. Att kombinera ett slitlager innehållande Bio-PMB och ett bundet bärlager med biobindemedel innehållande TOP, Fall E, halverade dock nästan (cirka 49 %) den initiala fossila GWP-nivån efter att ha beaktat inflödet av biogent kol. I likhet med ovan beror för fallen med PMB också effekterna av utflöden och eventuella utsläpp av biogent kol från det analyserade systemet i slutskedet på vilken metod som används i analysen. " -1/+1 "-metoden leder alltid tillbaka till den initiala nivån av fossil GWP, medan " -1/+X "-metoden resulterar i en lägre total GWP jämfört med den initiala fossila GWP-nivån (cirka 8 % minskning för Fall D och 44 % minskning för Fall E).



Figur 76. Effekter av biogent kolflöde på 100-års GWP för Fall C, D och E ($X=0,1$).

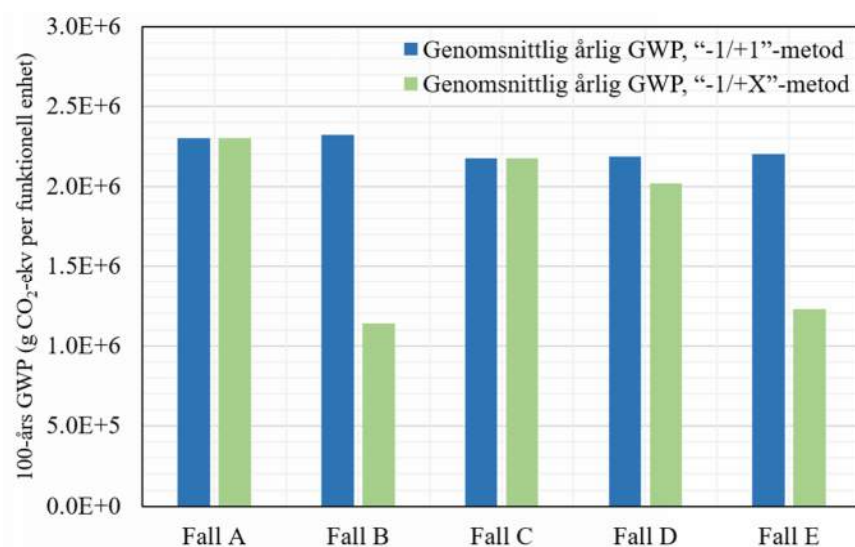
7.6. Livslängdens inverkan

Eftersom de analyserade fallen i denna studie har samma lagertjocklek men olika material i bundna lager, kan deras teknisk livslängd variera. Trots vissa skillnader observerades mellan biobindemedlen och deras referensmaterial i laboratoriestudien, verkar det som att dessa skillnader inte var tillräckligt stora för att påverka kvalitetsklassificeringen av bindemedlen och asfaltmassorna, särskilt när det gäller

asfaltbeläggnings dimensionering. Till exempel är deras styvhet mycket likartad under de vanligaste förhållandena för vägar (se resultaten i avsnitt 6.1.5 och 6.2.5). De undersökta biobindemedlen i denna studie klarar alla specifikationskriterierna efter långtidsåldring med RTFOT+PAV som har diskuterats i avsnitt 6.1.9. Endast en liten skillnad observerades när det gäller deras utmattningsmotstånd. Denna LCA-analys antog därför att de analyserade fallen inte har signifikant olika utmattningslivslängd enligt sprickkriteriet vid botten av det bundna bärlagret.

Att använda PMB i slitlagret (som Fall C, D och E) kan dock påverka beläggningens livslängd. Tidigare studier av andra forskare (Von Quintus, Mallela & Buncher 2007; Yan et al. 2023; Eklöf & Wendel 2024) har rapporterat olika grader av livslängdsförlängning genom att använda PMB under olika förhållanden, från 8 % upp till 100 % längre livslängd vid användning av PMB. I denna studie beaktas svenska förhållanden. Baserat på svenska data konstaterade en studie av Eklöf och Wendel (2024) att PMB kan förlänga asfaltbeläggnings livslängd med 8 % till 24 %. Därför ledde en övergripande bedömning i denna studie till en relativt realistisk och rimlig uppskattning av livslängdsförlängningen för de fallen med PMB, 20 % längre livslängd för Fall C, D och E jämfört med Fall A och B.

Beräkningen av teknisk livslängd utfördes för Fall A, som är ett referensfall med konventionella bitumen för vilket mest erfarenhet finns och den mest tillförlitliga beräkningen kunde göras. Det visade att Fall A har en teknisk livslängd på 13 år. Genom en uppskattning om 20 % längre livslängd med PMB, skulle Fall C, D och E ha en livslängd på 15,6 år. Med de totala GWP-värdena som presenterades ovan (efter redovisning av biogen GWP enligt både $-1/+1$ - och $-1/+X$ -metoderna), kunde den genomsnittliga årliga klimatpåverkan för de analyserade fallen, det vill säga deras genomsnittliga årliga 100-års GWP över hela livslängden, beräknas och utvärderas. Denna utvärdering syftar till rättvisa jämförelser mellan fallen med hänsyn till skillnaden i deras teknisk livslängd till följd av användning av PMB. Resultaten presenteras i Figur 77. Det framgår att, när $-1/+1$ -metoden används, har de fallen med PMB (Fall C, D och E) en lägre genomsnittlig årlig GWP än fallen utan polymer (Fall A och B) över hela livslängden. Dessutom, liksom det som diskuterats ovan för total GWP, minskar redovisningen av biogen koldioxid enligt $-1/+X$ -metoden också den genomsnittliga årliga GWP-nivån betydligt för de fallen med biobindemedel (Fall B, D och E).



Figur 77. Genomsnittlig årlig 100-års GWP för de analyserade fallen.

7.7. Känslighetsanalys

För att verifiera tillförlitligheten hos resultaten av koldioxidavtrycket som diskuterats ovan utfördes två känslighetsanalysfall genom att ersätta vissa indata med data från andra källor. En sammanfattning av de två känslighetsanalysfallen presenteras i Tabell 19. I varje fall ersattes tre typer av indata och alla övriga data förblev desamma som i Tabell 16. Det första känslighetsanalysfallet fokuserade på känsligheten för bindemedelsproduktionsdata medan det andra fallet fokuserade på ballast- och asfaltproduktionsdata.

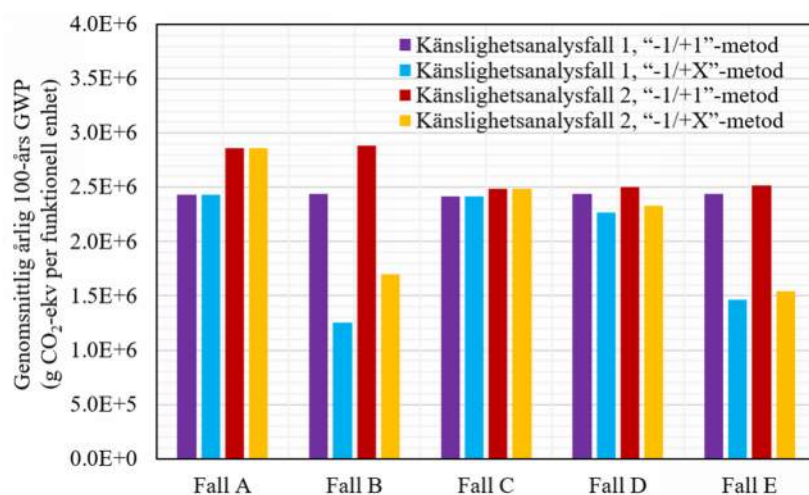
Tabell 19. Sammanfattning av två känslighetsanalysfall.

Känslighetsanalys	Analyserade datatyper	Alternativa datakällor	Ursprungliga datakällor
Känslighetsanalysfall 1	(a) Produktion av konventionella bitumen; (b) Produktion av konventionella PMB; (c) Bio-PMB produktion ³	Eurobitume 2012, 2021	Stripple 2001; Nynas 2021
Känslighetsanalysfall 2	(a) Ballastproduktion; (b) Asfaltblandning, varmblandad asfalt icke-PMB; (c) Asfaltblandning, varmblandad asfalt med PMB	En brittisk entreprenör	Stripple 2001; Butt 2014

Resultaten från känslighetsanalysen presenteras i Figur 78, som visar den genomsnittliga årliga 100-års GWP för de fem beläggningskonstruktionerna (Figur 71) efter redovisning av biogen koldioxid enligt både "-1/+1"- och "-1/+X"-metoderna. Det framgår att de absoluta GWP-nivåerna kan variera beroende på indata. Särskilt för fallen utan polymer (Fall A och B) resulterade det andra känslighetsanalysfallet i signifikant högre GWP-värden än det första fallet, trots skillnaderna mellan dem inte

³ Alternativa data uppskattades baserat på Eurobitumes data från 2012

var lika stora för de fallen med PMB. När det gäller effekten av PMB, vid användning av den "-1/+1"-metoden, ledde det andra känslighetsanalysfallet till samma slutsats som ovan, det vill säga lägre genomsnittlig årlig GWP när PMB används. Men det första känslighetsanalysfallet visade nästan oförändrad genomsnittlig årlig GWP för de fallen med PMB. Effekten av PMB på genomsnittlig årlig GWP över hela livslängden kan alltså variera beroende på vilka specifika indata som används i analysen. Dessutom bekräftade båda känslighetsanalysfallen att redovisningen av biogen koldioxid enligt "-1/+X"-metoden minskar den genomsnittliga årliga GWP-nivån betydligt för de fallen med biobindemedel.



Figur 78. Genomsnittlig årlig 100-års GWP för känslighetsanalysfall.

8. Resultat

Denna rapport presenterar en studie om långsiktiga egenskaper och klimatavtryck av asfaltmassor med biobindemedel. Olika laboratorieprovningar utfördes både på bindemedelsnivå och på asfaltmassanivå. Dessutom utfördes en LCA-analys. Baserat på de resultaten och diskussionerna som beskrivits i tidigare kapitel kan följande slutsatser dras utifrån denna studie:

- Den kemiska sammansättningen av TOP skiljer sig från bitumens, vilket leder till annorlunda fysiska egenskaper hos TOP. Det är möjligt att anpassa styvheten hos ett biobindemedel som innehåller TOP genom att styra TOP-halten och basbitumen. Det resulterande biobindemedlet kan dock ha vissa annorlunda fysiska och mekaniska egenskaper än konventionella bitumen.
- Analyserna i denna studie visar att användningen av TOP som delvis ersättning i bindemedlet inte förändrar den grundläggande principen om bindemedlets inverkan på asfaltens styvhet och fasvinkel. Asfaltens styvhet är positivt korrelerad med bindemedlets styvhet, och asfaltens fasvinkel beror på styvheten. Åldringens inverkan på styvhet och fasvinkel förändras inte heller av TOP. Åldring orsakar ökad styvhet hos både bindemedel och asfalt samt minskad fasvinkel hos bitumen. Det är dock värt att notera att användningen av TOP kan påverka nivåerna av dessa egenskaper och förändra deras temperatur-/frekvenskänslighet något. Styvheten hos biobindemedlet kan anpassas som nämnts ovan, men anpassningen av styvheten vid en temperatur eller frekvens betyder inte nödvändigtvis samma anpassning vid en annan temperatur eller frekvens. Detta gäller för både bindemedel och asfaltmassor och effekten är mer betydande när TOP-halten är högre i bindemedlet.
- Användningen av TOP ökar vanligtvis bindemedlets fasvinkel vid mellan- och högttemperaturer (alternativt mellan- och lågfrekvenser), men inte vid lågttemperaturer eller högfrekvenser. Detta innebär att användningen av TOP förändrar bindemedlets viskoelastiska egenskaper. Det verkar som att även fasvinkeln hos asfaltmassor kan påverkas av TOP. Framtida studier genom modellering av masterkurvorna skulle förmodligen ge djupare insikter om dess specifika effekter.
- Bio-PMB innehåller också en biogen komponent som har en annan kemisk sammansättning än bitumen. Det är de kombinerade effekterna av polymer och den biogena komponenten som styr bindemedlets egenskaper. Det verkar som att polymeren har större inverkan vid högttemperaturer (alternativt lågfrekvenser) medan den biogena komponenten visar sina effekter mer vid lågttemperaturer (alternativt högfrekvenser).
- Alla undersökta biobindemedel uppfyllde kriterierna för långsiktig prestanda som analyserades i denna studie. Användningen av dessa biobindemedel hade i stort sett en positiv effekt på ΔT_c och påverkade inte standard PG-lågtemperaturklass signifikant. Vissa smärre negativa effekter kunde dock

observeras vid låga temperaturer när TOP-halten var högre. Till exempel visade biobindemedlet Bio-160/220 (med 21 % TOP) betydligt högre kritiska temperaturer (mindre negativa under 0 °C) än Ref-160/220.

- Biobindemedlen kan ha något högre utmattningsbeständighet än referensbindemedlen vid temperaturer över 22 °C. Men vid lägre temperaturer, särskilt omkring 10 °C eller lägre, kan denna fördel minska eller till och med upphöra. Vid minusgrader, som nämnts ovan, kan biobindemedel uppvisa högre kritiska temperaturer (mindre negativa under 0 °C). Denna effekt skulle vara mer signifikant för biobindemedel med en högre andel TOP och utan polymer i bindemedlet.
- Resultaten från utmattningsanalysen hos åldrade AG 16-asfaltmassor (med biobindemedlet innehållande TOP) överensstämde väl med LAS-analysen hos bindemedel. Även det linjära viskoelastiska DSR-resultatet vid 10 °C (Glover-Rowe-parameter) stöder samma slutsats om något sämre utmattningsmotstånd hos Bio-160/220 bindemedlet vid små töjningar. Men det bör noteras att detta handlar om en relativ jämförelse och inte om acceptanskriteriet. När det gäller sprickmotståndet efter långtidsåldring pekar både bindemedels- och asfaltanalyserna i samma riktning – vid lägre temperaturer (alternativt högre frekvenser) blir de åldrade materialen innehållande TOP styvare, starkare och mindre flexibla.
- Vattenkänsligheten hos AG 16-asfaltmassan med Bio-160/220 (innehållande 21 % TOP) uppfyllde inte ITSr-kravet på 75 %, trots en förbättring jämfört med referensmassan. Att använda vidhäftningsmedel kan ytterligare förbättra vattenkänsligheten. Med tanke på den möjliga kemiska reaktionen mellan aminer och fria syror i TOP måste dock typen av vidhäftningsmedel bestämmas utifrån ordentliga undersökningar i samband med den förbättrande effekten av själva TOP på asfaltmassans vattenkänslighet. Dessutom uppfyllde asfaltmassorna med Bio-PMB och Bio-70/100 ITSr-kravet på 75 %.
- LCA-analysen visar att användning av de undersökta biobindemedlen i denna studie (inklusive TOP som delvis ersättning i bindemedlet och Bio-PMB) ökar den fossila delen av GWP för asfaltbeläggningar något, med cirka 1 %. Detta beror främst på de uppströms klimatpåverkan från utvinning och bearbetning av biobaserade råvarorna (till exempel biprodukter från sulfatmassaprocessen vid pappersbruk) för att producera biobindemedel. För att minska den totala klimatpåverkan av asfaltbeläggningar är det viktigt att välja råvaror med låg klimatpåverkan. Detta gäller även för biobaserade råvaror. Att vara biobaserad betyder inte nödvändigtvis lägre klimatpåverkan. De uppströmsprocesserna påverkar också bio-råvarors klimatavtryck.
- Klimatfördelarna med att använda de undersökta biobindemedlen kunde visas endast genom redovisning av biogen koldioxid i denna studie. Metodvalet för redovisningen har en betydande påverkan på resultatet. För beläggningar med två asfaltlager innehållande biobindemedel (Fall B och E) stod negativ biogen GWP på grund av inflöde av biogent kol för cirka 50 % av den initiala fossila

GWP-nivån. Däremot varierar effekterna av utflöden och eventuella utsläpp av biogent kol i slutskedet beroende på vilken metod som används i analysen ("1/+1" eller "1/+X"). Med "1/+1"-metoden återgår GWP till den initiala nivån av fossil GWP, vilket uppnår ett nollsaldo av biogent kol i det analyserade systemet. Medan resulterar "1/+X"-metoden i en signifikant lägre total GWP för Fall B och E jämfört med den initiala fossila GWP-nivån. Denna minskning beror på hur mycket biogent kol, asfaltbeläggningen innehåller.

- Både de absoluta GWP-nivåerna och effekten av polymermodifiering på genomsnittlig årlig GWP kan variera beroende på indata till LCA-analysen. När "1/+1"-metoden används visade två av de tre analyserade fallen (7.4 samt två känslighetsanalysfall) en lägre genomsnittlig årlig GWP för asfaltbeläggningar med PMB, medan ett fall visade nästan oförändrad genomsnittlig årlig GWP. Alla analyserade fall bekräftade att redovisningen av biogen koldioxid enligt "1/+X"-metoden leder till betydligt minskad GWP för de fallen med biobindemedel.

Sammantaget visar denna studie att de undersökta biobindemedlen har god potential som en lösning för att minska asfaltbranschens klimatavtryck och beroende av fossila resurser. Deras fördelar och nackdelar vad gäller långsiktiga egenskaper och koldioxidavtryck har identifierats. Med denna förbättrade förståelse rekommenderas det att testa dessa biobindemedel ytterligare i större skalor med fullskaliga försök och provvägar under simulerade och verkliga trafik- och klimatförhållanden. För att ta itu med potentiella hinder för verklig uppskalning kan det fortfarande behövas vissa forskningsinsatser, bland andra, för att (1) förstå grundläggande mekanismer för åldring av biobindemedel, (2) utvärdera återanvändbarheten av biobindemedel, (3) hitta alternativa sätt att förbättra vattenkänsligheten hos asfaltmassor, (4) utreda kombinerade effekter av biobindemedel och returafalt och (5) definiera och standardisera metoder för att redovisa biogen koldioxid.

9. Litteraturförteckning

Ahmedzade, P. E. R. V., Tigdemir, M., & Kalyoncuoglu, S. F. (2007). Laboratory investigation of the properties of asphalt concrete mixtures modified with TOP-SBS. *Construction and Building Materials*, 21(3), ss. 626-633. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.12.003>

Asphalt Institute. (2019). State-of-the-Knowledge: Use of the Delta Tc Parameter to Characterize Asphalt Binder Behavior. (Asphalt Institute Technical Document IS-240). Lexington, K.Y.: Asphalt Institute. <https://www.asphaltinstitute.org/engineering/delta-tc-technical-documents/>

Bahia, H. U., Hanson, D. I., Zeng, M., Zhai, H., Khatri, M. A., & Anderson, R. M. (2001). Characterization of Modified Asphalt Binders in Superpave Mix Design. (NCHRP Report 459). Washington, D.C.: The National Academy Press. https://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/nchrp_rpt_459-a.pdf

Ball, G. F. A., Herrington, P. A., & Patrick, J. E. (1993). Tall oil pitch as bitumen extender. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 23(2), ss. 236-242. https://www.scionresearch.com/_data/assets/pdf_file/0016/17701/NZJFS2321993BALL236-242.pdf

Bearsley, S. R. (2003). The Modification of Bituminous Materials Using Tall Oil Pitch. Master Thesis. Palmerston North, New Zealand: Massey University. <https://mro.massey.ac.nz/items/f8c6972b-b1c0-4d45-9bde-6751a0b4a8cc>

Bearsley, S. R., & Haverkamp, R. G. (2007a). Adhesive properties of tall oil pitch modified bitumen. *Road Materials and Pavement Design*, 8(3), ss. 449-465. <https://doi.org/10.1080/14680629.2007.9690083>

Bearsley, S. R., & Haverkamp, R. G. (2007b). Age hardening potential of tall oil pitch modified bitumen. *Road Materials and Pavement Design*, 8(3), ss. 467-481. <https://doi.org/10.1080/14680629.2007.9690084>

Blomberg, T. (1987). Report from Finland on Construction and Maintenance of Flexible Pavements. I Proceedings of the PIARC XVIII World Road Congress, September 13-19, 1987, Brussels, Belgium. <https://trid.trb.org/view/296569>

Butt, A. A. (2014). Life Cycle Assessment of Asphalt Roads: Decision Support at the Project Level. Diss. Stockholm: Kungliga Tekniska högskolan. <https://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A763875>

Christensen, D. W., & Tran, N. (2022). Relationships Between the Fatigue Properties of Asphalt Binders and the Fatigue Performance of Asphalt Mixtures. (NCHRP Research Report 982). Washington, D.C.: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/26302>

Christensen, R. M. (1982). *Theory of Viscoelasticity: An Introduction* (Second Edition). New York: Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-174252-2.X5001-7>

- Corona, B., Hoefnagels, R., Gürsel, I. V., Moretti, C., van Veen, M., & Junginger, M. (2022). Metrics for minimising environmental impacts while maximising circularity in biobased products: The case of lignin-based asphalt. *Journal of Cleaner Production*, 379, 134829. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134829>
- Deacon, J., Harvey, J., Tayebali, A., & Monismith, C. (1997). Influence of binder loss modulus on the fatigue performance of asphalt concrete pavements. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 66, ss. 633-668. <https://trid.trb.org/View/488047>
- Edwards, Y., Salomonsson, J., & Wallgren, H. (1999). Bituminösa bindemedel: Forsknings- och utvecklingsarbete. (VTI notat 74-1999). Linköping: VTI. <https://vti.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A669926>
- Eklöf, K., & Wendel, M. (2024). Lifetime Performance of Polymer-Modified Bitumen in Swedish Roads Evaluated with Survival Analysis. *Transportation Research Record*, 2678(4), ss. 106-117. <https://doi.org/10.1177/03611981231183713>
- EPD-Norge. (2022). Product Category Rules – NPCR 025 Part B for Asphalt (version 1.1, reference to EN 15804+A2). Oslo: EPD-Norge. <https://www.epd-norge.no/getfile.php/13161982-1741628092/PCRer/NPCR%20025%202022%20Part%20B%20for%20Asphalt%20ver2-2022.pdf>
- Eriksson, F. (2021). Här läggs framtidens asfalt på gångbanan i Sundsvall. SVT Nyheter, 27 juni. <https://www.svt.se/nyheter/lokalt/vasternorrland/har-laggs-framtidens-asfalt-pa-gangbanan-i-sundsvall>
- Eurobitume. (2012). Life Cycle Inventory – Bitumen (2nd Edition). Bryssel: Eurobitume – European Bitumen Association.
- Eurobitume. (2021). 2021 Update to the Eurobitume Life-Cycle Inventory for Bitumen (Version 3.1). Bryssel: Eurobitume – European Bitumen Association.
- Fadil, H., Chen, F., Jelagin, D., & Partl, M. N. (2021). The viscoelastic characterisation of asphalt mixtures using the indentation test. *Road Materials and Pavement Design*, 22(sup1), ss. S411-S424. <https://doi.org/10.1080/14680629.2021.1907218>
- Fadil, H., Jelagin, D., & Larsson, P. L. (2018). On the measurement of two independent viscoelastic functions with instrumented indentation tests. *Experimental Mechanics*, 58, ss. 301-314. <https://doi.org/10.1007/s11340-017-0342-7>
- Fadil, H., Jelagin, D., & Partl, M. N. (2022). Spherical indentation test for quasi-non-destructive characterisation of asphalt concrete. *Materials and Structures*, 55(3), 102. <https://doi.org/10.1617/s11527-022-01945-5>
- Fadil, H., Jelagin, D., Zhu, J., & Ahmed, A. (2025). Characterization of asphalt mixture containing bio-extended bituminous binder with spherical indentation test. I *Advances in Materials and Pavement Performance Prediction (AM3P) Conference 2025* (under tryckning).

Fares, M. Y., Marini, S., & Lanotte, M. (2024). Evaluation of Linear Amplitude Sweep data analysis techniques and failure criteria for High Polymer-Modified binders. *Construction and Building Materials*, 432, 136623. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136623>

Farrar, M., Sui, C., Salmans, S., & Qin, Q. (2015). Determining the Low-Temperature Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR). (WRI Technical White Paper FP 08). Laramie, W.Y.: WRI. <https://www.westernresearch.org/renewable-upcycling-materials-and-asphalt-technologies/resources-and-links/fundamental-properties---technical-white-papers/>

Gaudenzi, E., Cardone, F., Lu, X., & Canestrari, F. (2023). Chemical and rheological analysis of unaged and aged bio-extended binders containing lignin. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 10(6), ss. 947-963. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2023.05.005>

Gibson, N., Qi, X., Shenoy, A., Al-Khateeb, G., Kutay, M. E., Andriescu, A., Stuart, K., Youtcheff, J., & Harman, T. (2012). Performance Testing for Superpave and Structural Validation. (Final Report FHWA-HRT-11-045). McLean, V.A.: FHWA. <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/11045/11045.pdf>

He, L., Tao, M., Liu, Z., Cao, Z., Zhu, J., Gao, J., Chailleux, E., Huang, Y., Vasconcelos, K., Falchetto, A.C., Balieu, R., Grenfell, J., Wilson, D. J., Valentin, J., Kowalski, K. J., Rzek, L., Gaspar, L., Ling, T., & Ma, Y. (2023). Biomass valorization toward sustainable asphalt pavements: Progress and prospects. *Waste Management*, 165, ss. 159-178. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.03.035>

Hintz, C., Velasquez, R., Johnson, C., & Bahia, H. (2011). Modification and validation of linear amplitude sweep test for binder fatigue specification. *Transportation Research Record*, 2207(1), ss. 99-106. <https://doi.org/10.3141/2207-13>

Hoxha, E., Passer, A., Mendes Saade, M. R., Trigaux, D., Shuttleworth, A., Pittau, F., Allacker, K., & Habert, G. (2020). Biogenic carbon in buildings: a critical overview of LCA methods. *Buildings & Cities*, 1(1), ss. 504-524. <https://doi.org/10.5334/bc.46>

Ingrassia, L. P., Lu, X., Ferrotti, G., & Canestrari, F. (2019a). Renewable materials in bituminous binders and mixtures: Speculative pretext or reliable opportunity? *Resources, Conservation and Recycling*, 144, ss. 209-222. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.01.034>

Ingrassia, L. P., Cardone, F., Canestrari, F., & Lu, X. (2019b). Experimental investigation on the bond strength between sustainable road bio-binders and aggregate substrates. *Materials and Structures*, 52, 80. <https://doi.org/10.1617/s11527-019-1381-6>

Ingrassia, L. P., Lu, X., Ferrotti, G., & Canestrari, F. (2020). Chemical, morphological and rheological characterization of bitumen partially replaced with wood bio-oil: Towards more sustainable materials in road pavements. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 7(2), ss. 192-204. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2019.04.003>

Ingrassia, L. P. (2021). Advanced Experimental Characterization of Bituminous Binders Extended with Renewable Materials in Asphalt Pavements. Diss. Ancona: Università Politecnica delle Marche. <https://iris.univpm.it/handle/11566/289509>

Kaseer, F., Yin, F., Arámbula-Mercado, E., Martin, A. E., Daniel, J. S., & Salari, S. (2018). Development of an index to evaluate the cracking potential of asphalt mixtures using the semi-circular bending test. *Construction and Building Materials*, 167, ss. 286-298. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.014>

Kheirollahi, S., BinDahbag, M., Bagherzadeh, H., Abbasi, Z., & Hassanzadeh, H. (2024). Improved determination of saturate, aromatic, resin, and asphaltene (SARA) fractions using automated high-performance liquid chromatography approach. *Fuel*, 371, 131884. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.131884>

Lundström, R. (Pågående). Lignin i asfaltbeläggning: provväg med fossilreducerat bindemedel, SBUF-projekt 13864 <https://www.sbuf.se/projektresultat/projekt?id=8dce8668-21c3-44eb-bb0a-34daca3d5f5>

Mattinzioli, T., Sol-Sanchez, M., del Barco Carrion, A. J., Moreno-Navarro, F., del Carmen Rubio-Gamez, M., & Martínez, G. (2021). Analysis of the GHG savings and cost-effectiveness of asphalt pavement climate mitigation strategies. *Journal of Cleaner Production*, 320, 128768. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128768>

Mazuck, L. (1993). Tall Oil Pitch Modified Asphalt – Properties and Use in Road Construction and Maintenance Operations. I Transportation and National Prosperity – Proceedings of the 1993 Annual Conference of the Transportation Association of Canada (Vol. 1), September 19-22, 1993, Ottawa, Ontario, Canada. <https://trid.trb.org/View/410022>

Mazuch, L., & Jeffery, D. (1995). Antistripping Properties of Asphalt Modified with Tall Oil Pitch. I 1995 Transportation Association of Canada (TAC) Annual Conference Proceedings, Vol. 1 – Pavements, Soils and Materials and Canadian Strategic Highway Research Program (C-SHRP) Sessions, Oktober 22-25, 1995, Victoria, British Columbia, Canada. <https://trid.trb.org/View/457090>

Meng, Y., Kong, W., Gou, C., Deng, S., Hu, Y., Chen, J., & Fan, L. (2023). A review on evaluation of crack resistance of asphalt mixture by semi-circular bending test. *Journal of Road Engineering*, 3(1), ss. 87-97. <https://doi.org/10.1016/j.jreng.2022.07.003>

Nynas. (2021). White paper – A Nynas bitumen breaking new ground for lower carbon roads. Stockholm: Nynas. <https://www.nynas.com/globalassets/bitumen/white-paper--a-nynas-bitumen-breaking-new-ground-for-lower-carbon-roads-rev.pdf>

Olshage, P. (2022). Inverkan av Tallbecksolja på Asfalts Styvhet och Deformationsegenskaper: Biobindemedel som Ersättning av Konventionellt Bindemedel. Examensarbete. Helsingborg: LTH Ingenjörshögskolan vid Campus Helsingborg. <http://lup.lub.lu.se/student-papers/record/9087565>

- Ouellet-Plamondon, C. M., Ramseier, L., Balouktsi, M., Delem, L., Foliente, G., Francart, N., Garcia-Martinez, A., Hoxha, E., Lützkendorf, T., Rasmussen, F. N., & Peuportier, B. (2023). Carbon footprint assessment of a wood multi-residential building considering biogenic carbon. *Journal of Cleaner Production*, 404, 136834. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136834>
- Padmarekha, A., & Krishnan, J. M. (2013). Viscoelastic transition of unaged and aged asphalt. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25(12), ss. 1852-1863. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000734](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000734)
- Park, S. W., & Schapery, R. (1999). Methods of interconversion between linear viscoelastic material functions. Part I – A numerical method based on Prony series. *International Journal of Solids and Structures*, 36(11), ss. 1653-1675. [https://doi.org/10.1016/S0020-7683\(98\)00055-9](https://doi.org/10.1016/S0020-7683(98)00055-9)
- Peltonen, P. (1990). Research on Tall-Oil Pitch Modified Asphalt. *Nordic Road & Transport Research*, 2(2), ss. 13-15. <https://trid.trb.org/View/1175096>
- Peltonen, P. (1992). Asphalt Mixtures Modified with Tall Oil Pitches and Cellulose Fibres. Diss. Espoo: University of Helsinki. <https://cris.vtt.fi/en/publications/asphalt-mixtures-modified-with-tall-oil-pitches-and-cellulose-fib>
- Penki, R., & Rout, S. K. (2021). Next-generation bitumen: a review on challenges and recent developments in bio-bitumen preparation and usage. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 13, ss. 9583-9600. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01803-4>
- Porot, L., & Haslam, B. (2020). Pitch in Bitumen Application: Supportive Data for Record of Invention. (Technical report). <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.21500.36487>
- Rahman, S., Waldemarson, A. & Ahmed, A. (2022). Evaluation of Conditioning Methods for the Determination of Water Sensitivity of Asphalt Concrete Mixtures: Comparison of MIST, SS-EN 12697-12:2018 (Method A) and TDOK 2017:0650. (VTI rapport 1145A). Linköping: VTI. <https://vti.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1704181>
- Riccardi, C., & Losa, M. (2024). Recent advances and perspectives in circular bio-binder extender to substitute part of the fossil-based binder in asphalt mixture. *Construction and Building Materials*, 410, 134222. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134222>
- Said, S. F. (1995). Bestämning av utmattningshållfasthet hos asfaltbetong genom pulserande pressdragprovning. (VTI notat 38-1995). Linköping: VTI. <https://vti.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A669709>
- Shirzad, S., & Zouzias, H. (2024). Enhancing the performance of wood-based bio-asphalt: strategies and innovations. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 26, ss. 2095-2115. <https://doi.org/10.1007/s10098-024-02745-x>
- Stripple, H. (2001). Life Cycle Assessment of Road – A Pilot Study for Inventory Analysis (2nd Revised Edition). (IVL rapport B1210E). IVL Svenska Miljöinstitutet. <https://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1550976>

Sudarsanan, N., & Kim, Y. R. (2022). A critical review of the fatigue life prediction of asphalt mixtures and pavements. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 9(5), ss. 808-835. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2022.05.003>

Trafikverket. (2023). Överbyggnad väg, Dimensionering och utformning. (Trafikverket Krav TRVINFRA-00224, Version 4.0). Borlänge: Trafikverket. <https://puben.trafikverket.se/dpub/visa-dokument/5561b138-1389-4b16-b550-6e341985f6b8>

Urquhart, R. (2012). Investigation into the Properties of Alternative Surfacing Binders and Bitumen Extending Binders. (Austroads Publication No. AP-T206-12). Sydney: Austroads Ltd. <https://austroads.gov.au/publications/pavement/ap-t206-12/media/AP-T206-12.pdf>

Urquhart, R., & Malone, S. (2013). Future Availability and Assessment of Alternative Surfacing Binders. (Austroads Publication No. AP-T243-13). Sydney: Austroads Ltd. <https://austroads.gov.au/publications/pavement/ap-t243-12/media/AP-T243-13.pdf>

Vela, I. C., González-Arias, J., Vilches, T. B., Seemann, M., & Thunman, H. (2023). Thermochemical recycling of tall oil pitch in a dual fluidized bed. *Fuel*, 340, 127596. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.127596>

Von Quintus, H. L., Mallela, J., & Buncher, M. (2007). Quantification of effect of polymer-modified asphalt on flexible pavement performance. *Transportation research record*, 2001(1), ss. 141-154. <https://doi.org/10.3141/2001-16>

Walker, M. (2019). *Organic Chemistry 2: An Open Textbook*. Potsdam, N.Y.: SUNY Potsdam. [https://chem.libretexts.org/Courses/SUNY_Potsdam/Book%3A_Organic_Chemistry_II_\(Walker\)](https://chem.libretexts.org/Courses/SUNY_Potsdam/Book%3A_Organic_Chemistry_II_(Walker))

Wang, H., Ma, Z., Chen, X., & Hasan, M. R. M. (2020). Preparation process of bio-oil and bio-asphalt, their performance, and the application of bio-asphalt: A comprehensive review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 7(2), ss. 137-151. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2020.03.002>

Wu, S., Feng, Y., & Wong, A. (2004). Selected rheological properties of tall oil pitch binder for asphaltic road pavement construction. *International Journal of Pavement Engineering*, 5(3), ss. 175-182. <https://doi.org/10.1080/10298430412331309124>

Wu, W., Jiang, W., Xiao, J., Yuan, D., Wang, T., & Ling, X. (2024). Investigation of LAS-based fatigue evaluation methods for high-viscosity modified asphalt binders with high-content polymers. *Construction and Building Materials*, 422, 135810. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135810>

Yan, T., Marasteanu, M., Turos, M., Barman, M., Manikavasagan, V., & Chakraborty, M. (2023). Cost Estimate of B vs. C Grade Asphalt Binders. (Report No. MN 2023-19). St. Paul, M.N.: Minnesota Department of Transportation. <https://cts-d8resmod-prd.oit.umn.edu/pdf/mndot-2023-19.pdf>

Zaumanis, M., Mallick, R. B., & Frank, R. (2014). 100% recycled hot mix asphalt: A review and analysis. *Resources, Conservation and Recycling*, 92, ss. 230-245. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.07.007>

Zhu, J., Ahmed, A., & Dinegdae, Y. (2021). Bitumen properties and the shear resistance of asphalt mixtures: towards a tool for bitumen selection. (VTI rapport 1084A). Linköping: VTI. <https://vti.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1555065>

Zhu, J., Ahmed, A., Lu, X., & Said, S. (2022). Influence of binder properties on dynamic shear response of asphalt mixture. I RILEM International Symposium on Bituminous Materials (ss. 1071-1078). Cham: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-46455-4_136

Zhu, J., Ahmed, A., Said, S., Dinegdae, Y., & Lu, X. (2022). Experimental analysis and predictive modelling of linear viscoelastic response of asphalt mixture under dynamic shear loading. *Construction and Building Materials*, 328, 127095. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127095>

Zhu, J., Huang, Y., Ahmed, A., Dinegdae, Y., & Shen, S. (2025). Cradle-to-pavement carbon footprint and biogenic carbon accounting of bio-extended bituminous binders for asphalt pavements. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 52(7), ss. 1355-1365. <https://doi.org/10.1139/cjce-2024-0262>

Zhu, J., Ahmed, A., Witkiewicz, P., Waldemarson, A., Olsson, K., Lu, X. & Jelagin, D. (2025). Långsiktiga egenskaper och klimatavtryck av asfaltmassor med biobindemedel, (VTI rapport 1241). <https://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1993355&dswid=3114>

10. Figurförteckning

Figur 1. Fraktioner av råttallolja separerade av bioraffinaderi (Vela, González-Arias, Vilches, Seemann & Thunman 2023).	9
Figur 2. Den TOP-produkt som användes i denna studie. Foto: Jiqing Zhu.....	9
Figur 3. Syratalt av bindemedel med TOP (Peltonen 1990).	10
Figur 4. Kontaktvinkelmätningar på objektglas i vatten vid 60 °C: (A) ett 180/200 bitumen; (B) ett 180/200 biobindemedel med 75 % 40/50 bitumen och 25 % TOP. Mindre kontaktvinkel innebär ökad energi som krävs för att vatten ska få bort bitumen från objektglaset (Bearsley & Haverkamp 2007a).....	11
Figur 5. Egenskaper hos blandningar av 50/70 bitumen och TOP (Porot & Haslam 2020).....	12
Figur 6. Formulering av ett PMB med TOP (10 %) och SBS (Porot & Haslam 2020). ...	12
Figur 7. Fettsyrasammansättning av den TOP-produkt som användes i denna studie.	14
Figur 8. FTIR-spektrum av den TOP-produkt som användes i denna studie.....	14
Figur 9. Penetration av blandningarna med TOP och 50/70 basbitumen.....	15
Figur 10. Mjukpunkt av blandningarna med TOP och 50/70 basbitumen.....	15
Figur 11. Laboratorieblandare och inuti blandaren. Foton: Patryk Witkiewicz.	17
Figur 12. Tillsättning av bindemedel vid blandning av asfaltmassa. Foto: Patryk Witkiewicz.	18
Figur 13. Tillverkning av provkroppar. Till vänster: packning av asfaltsplattor på Skanskas labb i Västerhaninge; till höger: borrhärnor från plattorna. Foton: Patryk Witkiewicz.	19
Figur 14. Olika steg för att tillverka provkroppar. (A) Stålformen, (B) Gjutning av asfaltmassa i formen, (C) Vältning av platta, (D) Platta efter packning, (E) Färdig platta, (F) Framtagning av borrhärnor. Foton: Patryk Witkiewicz.	20
Figur 15. Packade asfaltsplattor. Foto: Patryk Witkiewicz.....	20
Figur 16. Borrning av kärnor med diametrar på 150 mm (till vänster) och 100 mm (till höger). Foton: Patryk Witkiewicz.....	21
Figur 17. Resultat av SARA-analysen.	22
Figur 18. FID-responskurvor från SARA-analysen.	22
Figur 19. FTIR-spektra av Bio-70/100 före och efter åldring.....	24
Figur 20. FTIR-spektra av Ref-70/100 före och efter åldring.....	24
Figur 21. FTIR-spektra av Bio-160/220 före och efter åldring.	25
Figur 22. FTIR-spektra av Ref-160/220 före och efter åldring.	25
Figur 23. FTIR-spektra av Bio-PMB 40/100-75 före och efter åldring.....	26
Figur 24. FTIR-spektra av Ref-PMB 40/100-75 före och efter åldring.	26
Figur 25. DSR temperatursvep resultat vid 1,59 Hz (10 rad/s) av 70/100 bindemedel.	28
Figur 26. DSR temperatursvep resultat vid 1,59 Hz (10 rad/s) av 160/220 bindemedel.	28
Figur 27. DSR temperatursvep resultat vid 1,59 Hz (10 rad/s) av PMB.....	29
Figur 28. 4-mm DSR resultat vid 1,59 Hz (10 rad/s) av långtidsåldrade bindemedel: (a)- $ G^* $, (b)- δ	30

Figur 29. Masterkurvor av ursprungliga 70/100 bindemedel vid referenstemperatur 10 °C.....	31
Figur 30. Masterkurvor av 70/100 bindemedel efter RTFOT vid referenstemperatur 10 °C.....	31
Figur 31. Masterkurvor av 70/100 bindemedel efter RTFOT+PAV vid referenstemperatur 10 °C.....	32
Figur 32. Masterkurvor av ursprungliga 160/220 bindemedel vid referenstemperatur 10 °C.....	32
Figur 33. Masterkurvor av 160/220 bindemedel efter RTFOT vid referenstemperatur 10 °C.....	33
Figur 34. Masterkurvor av 160/220 bindemedel efter RTFOT+PAV vid referenstemperatur 10 °C.....	33
Figur 35. Masterkurvor av ursprungliga PMB 40/100-75 vid referenstemperatur 10 °C.	34
Figur 36. Masterkurvor av PMB 40/100-75 efter RTFOT vid referenstemperatur 10 °C.	34
Figur 37. Masterkurvor av PMB 40/100-75 efter RTFOT+PAV vid referenstemperatur 10 °C.....	35
Figur 38. Samband mellan olika utmattningsparametrar inom mellantemperaturområdet efter RTFOT+PAV – (a) mellan T_3 och Glover-Rowe-parametern $G'/\tan(\delta)$ vid 10 °C; (b) mellan δ_{T_3} och R-värde med DSR vid $ G^* $ över 10 MPa.	39
Figur 39. Skjuvspännings-töjningskurvor för långtidsåldrade 70/100 bindemedel under LAS-test vid 25 °C.	40
Figur 40. Skjuvspännings-töjningskurvor för långtidsåldrade 160/220 bindemedel under LAS-test vid 10 °C.....	40
Figur 41. Skjuvspännings-töjningskurvor för långtidsåldrade PMB under LAS-test vid 25 °C.	41
Figur 42. Utmattningsmotstånd hos långtidsåldrade 70/100 bindemedel genom LAS-test vid 25 °C.	42
Figur 43. Utmattningsmotstånd hos långtidsåldrade 160/220 bindemedel genom LAS-test vid 10 °C.....	42
Figur 44. Skjuvspänningsrelaxationsmodul $G(t)$ genom 4-mm DSR-test – (a), (b), (c), (d), (e), (f) för de sex olika bituminösa bindemedlen efter RTFOT+PAV.	44
Figur 45. BBR-resultat vid 60 s efter RTFOT+PAV – (a) krypstyvhet S för 70/100 bindemedel; (b) m-värde för 70/100 bindemedel; (c) krypstyvhet S för 160/220 bindemedel; (d) m-värde för 160/220 bindemedel; (e) krypstyvhet S för PMB; (f) m-värde för PMB.	45
Figur 46. Jämförelse av kritiska temperaturer och ΔT_c med olika metoder (alla bindemedel efter RTFOT+PAV).	46
Figur 47. Samband mellan olika sprickindikatorer efter RTFOT+PAV – (a) ΔT_c mot R-värde genom DSR vid $ G^* $ över 10 MPa; (b) ΔT_c mot δ_{T_3}	48
Figur 48. Flow Number hos nytillverkade asfaltmassor vid 50 °C.	49
Figur 49. ITR-värden hos nytillverkade asfaltmassor enligt TDOK 2017:0650 version 2.0.	50

Figur 50. Indirekt draghållfasthet hos ny tillverkade asfaltmassor vid 10 °C enligt TDOK 2017:0650 version 2.0 (se Bilaga 4 för enskilda resultat och övrig information om ITSIR-analysen).	50
Figur 51. Styvhetsmodul för AG 16-asfaltmassor innehållande 160/220 bindemedel vid 10 °C före och efter MIST-konditionering (felstaplar indikerar max/min-värden).	51
Figur 52. Provkroppar (AG 16-asfaltmassor med 160/220 bindemedel) efter MIST-konditioneringen.	52
Figur 53. Styvhetsmoduls utveckling över tid för två typer av asfaltmassor under en period av cirka 7 år (färgskuggade områden indikerar 95 % konfidensintervall).	52
Figur 54. Styvhetsmodulsökning över tid, d.v.s. antal dagar då packade provkroppar konditionerades i en ugn vid 65 °C.	53
Figur 55. Masterkurvor för dynamisk modul $ E^* $ och fasvinkel ϕ hos ABT 16-asfaltmassor innehållande 70/100 bindemedel vid referenstemperatur 10 °C.	54
Figur 56. Masterkurvor för dynamisk modul $ E^* $ och fasvinkel ϕ hos AG 16-asfaltmassor innehållande 160/220 bindemedel vid referenstemperatur 10 °C.	54
Figur 57. Masterkurvor för dynamisk modul $ E^* $ och fasvinkel ϕ hos ABT 16-asfaltmassor innehållande PMB (40/100-75) vid referenstemperatur 10 °C.	54
Figur 58. Schematisk bild av intryckningstest.	55
Figur 59. Foto av apparaten för intryckningstest.	56
Figur 60. Genomsnittliga $G(\omega)$ -resultat för asfaltmassor genom intryckningstest vid 0 °C.	58
Figur 61. Genomsnittliga $G(\omega)$ -resultat av de mastixdominerade mätningarna i intryckningstestet vid 0 °C.	58
Figur 62. Masterkurvor för dynamisk modul $ E^* $ hos AG 16-asfaltmassor innehållande 160/220 bindemedel vid referenstemperatur 10 °C.	60
Figur 63. Masterkurvor för fasvinkel ϕ hos AG 16-asfaltmassor innehållande 160/220 bindemedel vid referenstemperatur 10 °C.	60
Figur 64. Utmattningsmotstånd hos de åldrade AG 16-asfaltmassorna innehållande 160/220 bindemedel vid 10 °C (färgskuggade områden representerar 95 % konfidensintervall).	61
Figur 65. Brottseghet hos AG 16-asfaltmassor innehållande 160/220 bindemedel vid 5 °C (felstaplar indikerar max/min-värden).	62
Figur 66. Linjärt samband mellan brottsegheten hos AG 16-asfaltmassorna innehållande 160/220 bindemedel vid 5 °C och den maximala kraften under SCB-test.	63
Figur 67. Kraft-förskjutningskurvor för AG 16-asfaltmassorna innehållande 160/220 bindemedel under SCB-test vid 5 °C.	64
Figur 68. Förskjutning efter den maximala kraften för AG 16-asfaltmassorna innehållande 160/220 bindemedel vid 5 °C (felstaplar indikerar max/min-värden).	64
Figur 69. Brottenergi för AG 16-asfaltmassorna innehållande 160/220 bindemedel vid 5 °C (felstaplar indikerar max/min-värden).	65
Figur 70. Systemgränser för LCA-analysen i denna studie.	67
Figur 71. De analyserade beläggningskonstruktionerna – fyra lager ovanpå en terrass av sand (siffrorna anger lagertjockleken i mm).	68
Figur 72. 100-års fossil GWP från vagga till beläggning (A1-A5) för Fall A och B baserat på CO ₂ - och CH ₄ -utsläpp.	70

Figur 73. 100-års fossil GWP från vagga till beläggning (A1-A5) för Fall C, D och E baserat på CO ₂ - och CH ₄ -utsläpp.	71
Figur 74. Olika metoder för att redovisa växtbaserad biogen koldioxid för asfaltbeläggningar (denna studie omfattar A1-A5 samt redovisning av biogen koldioxid i sluteskedet C).....	72
Figur 75. Effekter av biogent kolflöde på 100-års GWP för Fall A och B (X=0,1).....	74
Figur 76. Effekter av biogent kolflöde på 100-års GWP för Fall C, D och E (X=0,1)....	74
Figur 77. Genomsnittlig årlig 100-års GWP för de analyserade fallen.....	76
Figur 78. Genomsnittlig årlig 100-års GWP för känslighetsanalysfall.....	77

11. Tabellförteckning

Tabell 1. Egenskaper hos den TOP-produkt som användes i denna studie.....	13
Tabell 2. Provningsresultat av Bio-70/100, med 5 % TOP.....	16
Tabell 3. Provningsresultat av Bio-160/220, med 21 % TOP.....	16
Tabell 4. Bindemedels penetration och mjukpunkt före åldring samt PG-klass.	23
Tabell 5. Bindemedels mjukpunkt (SS-EN 1427:2015) före och efter åldring.	27
Tabell 6. Utmattningsparameter $ G^* \cdot \sin(\delta)$ enligt ASTM D6373-23 och AASHTO M 320-23.....	36
Tabell 7. Glover-Rowe-parametern $G'/\tan(\delta)$ efter RTFOT+PAV vid 1,59 Hz (10 rad/s).	36
Tabell 8. Crossover-parametrar ($\delta=45^\circ$ och $G'=G''$) efter RTFOT+PAV.....	37
Tabell 9. Christensen-Anderson R-värde efter RTFOT+PAV bestämt med olika metoder.	39
Tabell 10. Reologiska parametrar T3 och δ_{T3} vid 1,59 Hz (10 rad/s) efter RTFOT+PAV.	39
Tabell 11. LAS-resultat för de bindemedlen utan polymer efter långtidsåldring.....	41
Tabell 12. Resultat av 4-mm DSR-test efter RTFOT+PAV.....	43
Tabell 13. Kritiska temperaturer genom BBR vid 60 s och ΔT_c efter RTFOT+PAV.	46
Tabell 14. Kontroll av de tillverkade asfaltproverna mot Trafikverkets krav.....	48
Tabell 15. Styvhetsmodul för AG 16-asfaltmassor innehållande 160/220 bindemedel vid 10 °C före och efter laboratorieåldring.....	61
Tabell 16. Energityp och -förbrukning för olika processer (data för produktionsprocesser inkluderar uppströms energiförbrukning).....	69
Tabell 17. Beräkningsresultat för de analyserade fallen (utvalda luftburna utsläpp i g per funktionell enhet).....	70
Tabell 18. Sammanfattning av tre olika metoder för att redovisa växtbaserad biogen koldioxid.	73
Tabell 19. Sammanfattning av två känslighetsanalysfall.	76

12. Förteckning bilagor

Bilaga 1. Petrografisk analys (Vällstas stenmaterial), 2 sidor

Bilaga 2. Provningsrapporter för sex asfaltmassor, 6 sidor

Bilaga 3. Utvärdering av stabilitet, 8 sidor

Bilaga 4. Provningsrapporter för ITSr, 6 sidor