

Långsiktiga egenskaper och klimatavtryck av asfaltmassor med biobindemedel

Laboratoriestudie och livscykelanalys

Jiqing Zhu
Abubeker Ahmed
Patryk Witkiewicz
Andreas Waldemarson
Kenneth Olsson
Xiaohu Lu
Denis Jelagin

vti

VTI rapport 1241
Utgivningsår 2025
vti.se/publikationer

Långsiktiga egenskaper och klimatavtryck av asfaltmassor med biobindemedel

Laboratoriestudie och livscykelanalys

Jiqing Zhu

Abubeker Ahmed

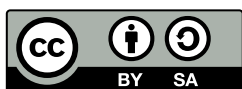
Patryk Witkiewicz

Andreas Waldemarson

Kenneth Olsson

Xiaohu Lu

Denis Jelagin



Om inget annat anges är publikationen licensierad enligt [CC BY-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/), omslaget omfattas inte av licensen. / Unless otherwise stated, the publication is licensed under [CC BY-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/), the cover is not included in the license.

Översatt titel: Long-term performance and climate impact of asphalt mixtures with bio-binder:
Laboratory study and life-cycle analysis

Författare: Jiqing Zhu (VTI), Abubeker Ahmed (VTI), Patryk Witkiewicz (Skanska Sverige AB),
Andreas Waldemarson (VTI), Kenneth Olsson (Skanska Industrial Solutions AB),
Xiaohu Lu (Nynas AB), Denis Jelagin (KTH)

Diarienummer: 2021/0513-9.2

Publikation: VTI rapport 1241

Utgiven av VTI 2025

Publikationsuppgifter – Publication Information

Titel/Title

Långsiktiga egenskaper och klimatavtryck av asfaltmassor med biobindemedel. Laboratoriestudie och livscykelanalys / Long-term performance and climate impact of asphalt mixtures with bio-binder. Laboratory study and life-cycle analysis

Författare/Authors

Jiqing Zhu (VTI, orcid.org/0000-0003-1779-1710)

Abubeker Ahmed (VTI, orcid.org/0000-0002-6327-4709)

Patryk Witkiewicz (Skanska Sverige AB)

Andreas Waldemarson (VTI, orcid.org/0000-0001-7024-9395)

Kenneth Olsson (Skanska Industrial Solutions AB)

Xiaohu Lu (Nynas AB, orcid.org/0000-0001-5426-4413)

Denis Jelagin (KTH, orcid.org/0000-0002-0596-228X)

Utgivare/Publisher

VTI, Statens väg- och transportforskningsinstitut /
Swedish National Road and Transport Research Institute (VTI)
www.vti.se

Serie och nr/Publication No.

VTI rapport 1241

Utgivningsår/Published

2025

VTI:s diarienum/Reg. No., VTI

2021/0513-9.2

ISSN

0347–6030

Projektnamn/Project

Utvärdering av långsiktiga egenskaper och klimatavtryck av asfaltmassor med returafalt och biobindemedel / Evaluation of long-term performance and climate impact for asphalt mixtures with reclaimed asphalt and bio-based binder

Uppdragsgivare/Commissioned by

Trafikverket via BVFF, SBUF, Vinnova via InfraSweden / Swedish Transport Administration via BVFF, SBUF, Vinnova via InfraSweden

Språk/Language

Svenska/Swedish

Kort sammanfattning

Bioasfalt med biobindemedel, där ett förnybart bindemedel delvis ersätter petroleumbitumen, är en lovande lösning för att minska asfaltbranschens fossilberoende och klimatpåverkan. Denna studie har undersökt hur ett förnybart bindemedel påverkar asfaltmassors långsiktiga egenskaper och klimatavtryck. Studien fokuserade på biobindemedel innehållande talloljebeck och ett polymermodifierat bitumen (PMB) med biogen komponent som alternativ till konventionella bituminösa bindemedel. Metoderna i denna studie omfattar laboratorieprovningar av bindemedel och asfaltmassor, inklusive åldring, reologi, utmattningsmotstånd, sprickmotstånd och vattenkänslighet. En livscykelanalys har genomförts också för att bedöma klimatpåverkan från råvaruutvinning till beläggning (byggskedet, livscykel faser A1-A5 enligt europeiska standarder för hållbarhet hos byggnadsverk), med särskild hänsyn till biogen koldioxid (del av livscykel faser C/D enligt de europeiska standarderna). Resultaten visar att biobindemedel med talloljebeck uppfyller tekniska krav för bituminösa bindemedel. Vid högre blandningsgrad av talloljebeck kan dock sprödhet och minskat utmattningsmotstånd hos asfaltmassa uppstå vid låga temperaturer efter åldring. PMB med biogen komponent visade god prestanda. Livscykelanalysen visar att biobindemedel marginellt ökar fossil Global Warming Potential, men redovisning av biogen koldioxid enligt en alternativ metod kunde halvera den totala klimatpåverkan. Denna studie visar att biobindemedel har potential att bidra till mer hållbara asfaltbeläggningar. För fortsatt utveckling rekommenderas fullskaliga försök, samt vidare forskning kring åldring, återanvändning, alternativt vidhäftningsmedel och standardisering av klimatredovisning för biogena material i asfalt.

Nyckelord

Bioasfalt, biobindemedel, talloljebeck, polymermodifierat bitumen, långsiktiga egenskaper, åldring, klimatavtryck, livscykelanalys.

Abstract

Bio-asphalt with bio-extended bituminous binder, where a renewable binder partially replaces petroleum bitumen, is a promising solution to reduce the asphalt industry's fossil dependence and climate impact. This study has investigated how a bio-binder affects the long-term performance and climate impact of asphalt mixtures. The study focused on bio-extended bituminous binders containing Tall Oil Pitch (TOP) and a polymer-modified bitumen (PMB) with a biogenic component as alternatives to conventional bituminous binders. The methods in this study include laboratory testing of binders and asphalt mixtures, such as ageing, rheology, fatigue, cracking resistance and water sensitivity. A life cycle assessment (LCA) has also been carried out to assess the climate impact from raw material extraction to pavement (construction stage, life cycle phases A1-A5 according to European standards for sustainability of construction works), with a special consideration of biogenic carbon (part of life cycle phases C/D according to the European standards). The results show that bio-extended binders with TOP meet technical requirements for bituminous binders. However, at a higher TOP content, brittleness and reduced fatigue resistance of asphalt mixtures can occur at low temperatures after ageing. The PMB with a biogenic component showed good performance. The LCA shows that bio-extended binders marginally increase the fossil Global Warming Potential, but biogenic carbon accounting according to an alternative method could halve the total climate impact. This study shows that bio-extended binders have the potential to contribute to more sustainable asphalt pavements. For continued development, full-scale trials are recommended, as well as further research on ageing, reuse, alternative adhesion promoter and standardisation of climate accounting for biogenic materials in asphalt.

Keywords

Bio-asphalt, bio-binder, Tall Oil Pitch, polymer-modified bitumen, long-term performance, ageing, climate impact, life cycle assessment.

Innehållsförteckning

Publikationsuppgifter – Publication Information	5
Kort sammanfattning.....	6
Abstract	7
Sammanfattning	10
Summary	12
Förord.....	15
1. Inledning	16
1.1. Bakgrund.....	16
1.2. Syfte och mål	16
1.3. Disposition	17
2. Litteraturoversikt.....	18
2.1. Tall Oil Pitch (TOP).....	18
2.2. Användning av TOP i asfalt.....	19
3. Material och metoder.....	23
3.1. Material	23
3.1.1. Bindemedel	23
3.1.2. Ballastmaterial	25
3.1.3. Asfaltmassor och provkroppar.....	25
3.2. Provningsmetoder	27
3.2.1. Provningsmetoder för bindemedel.....	27
3.2.2. Provningsmetoder för asfaltmassor.....	28
3.3. Livscykelanalys.....	29
3.3.1. Systemgränser.....	29
4. Biobindemedel och deras långsiktiga egenskaper	30
4.1. Formulering av biobindemedel med TOP	30
4.2. Laboratorieåldring av bindemedel	32
4.3. Karakterisering med FTIR	32
4.4. Förändring av mjukpunkt efter åldring	35
4.5. Reologiska egenskaper hos bindemedel.....	35
4.5.1. DSR temperatursvep	35
4.5.2. Masterkurvor för bindemedel	38
4.6. Långsiktiga egenskaper hos bindemedel.....	43
4.6.1. Bindemedels utmattningsmotstånd	43
4.6.2. Sprickmotstånd vid låga temperaturer	48
4.6.3. Bedömning av biobindemedels långsiktiga egenskaper	52
5. Långtidseffekter av biobindemedel i asfalt	54
5.1. Egenskaper hos nytillverkade asfaltmassor	54
5.1.1. Stabilitetsegenskaper.....	54
5.1.2. Vattenkänslighet	54
5.2. Laboratorieåldring av asfaltmassor.....	56
5.3. Styvhetsmodul och fasvinkel	58
5.3.1. Masterkurvor för asfalt	58
5.3.2. Styvhet genom intryckning.....	59

5.4. Kombinerade effekter av åldring och vatten	62
5.5. Utmattnings- och sprickegenskaper	63
5.5.1. Utmattningsegenskaper.....	63
5.5.2. Sprickpropagering.....	64
5.6. Samband mellan bindemedels- och asfaltegenskaper	67
6. Livscykelanalys och koldioxidavtryck.....	69
6.1. Funktionell enhet.....	69
6.2. Livscykelinventering.....	69
6.3. Fossil Global Warming Potential (GWP-fossil).....	71
6.4. Redovisning av biogen koldioxid.....	72
6.5. Livslängdens inverkan	74
6.6. Känslighetsanalys.....	75
7. Slutsatser	77
Referenser	79
Bilaga 1. Petrografisk analys.....	85
Bilaga 2. Provningsrapporter för sex asfaltmassor	88
Bilaga 3. Utvärdering av stabilitet	95
Bilaga 4. Provningsrapporter för ITSr.....	104

Sammanfattning

I takt med att klimat- och miljöfrågor har blivit alltmer centrala inom infrastrukturen har behovet av hållbara alternativ till traditionella vägmaterier ökat. Bioasfalt med biobindemedel, där ett förnybart bindemedel delvis ersätter petroleumbitumen, är en lovande lösning för att minska asfaltbranschens klimatpåverkan och beroende av fossila resurser. Denna studie, genomförd av VTI i samarbete med Skanska, Nynas och KTH, har undersökt hur ett förnybart bindemedel påverkar asfaltmassors långsiktiga egenskaper och klimatavtryck. Fokus har legat på två typer av biobindemedel: dels bituminösa bindemedel innehållande tallolja (även kallat Tall Oil Pitch, eller TOP, som tillverkas från biprodukt av sulfatmassaprocessen inom skogsindustrin), dels ett polymermodifierat bitumen (PMB) med biogen komponent.

Denna studie omfattar både laboratorieprovningar och en livscykelanalys (LCA). I laboratoriet har bindemedel och asfaltmassor analyserats med avseende på åldring, reologiska egenskaper, utmattningsmotstånd och vattenkänslighet. LCA har genomförts för att bedöma klimatpåverkan från råvaruutvinning till färdig beläggning (byggskedet, livscykelfaser A1-A5 enligt europeiska standarder för hållbarhet hos byggnadsverk), med särskild hänsyn till biogen koldioxid (del av livscykelfaser C/D enligt de europeiska standarderna). 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. Asfaltmassor tillverkades i laboratoriet med dessa sex bindemedel. För varje grupp (Bio och Ref) var recept och packningsförfaranden identiska för att möjliggöra rättvisa jämförelser.

Resultaten visar att biobindemedel med TOP uppfyller de tekniska krav för bituminösa bindemedel enligt SS-EN 12591:2009. Penetration och mjukpunkt kunde anpassas genom att variera TOP-halten. Exempelvis hade Bio-70/100 med 5 % TOP och 50/70 basbitumen en penetration på 80 (enhet 0,1 mm) och en mjukpunkt på 47,2 °C, vilket ligger inom specifikationen för 70/100-bitumen. Bio-160/220 med 21 % TOP (samma basbitumen) uppvisade en penetration på 193 och mjukpunkt på 40,4 °C, vilket också uppfyller kraven för sin klass.

Efter långtidsåldring visade biobindemedlen generellt mindre mjukpunktsökning än referensbindemedlen. Mjukpunktsökningen för Bio-70/100 var 10,6 °C, jämfört med 15,6 °C för Ref-70/100. Reologiska analyser med dynamisk skjuvreometer (DSR) visade att biobindemedel hade högre fasvinkel vid höga temperaturer, vilket tyder på ett mer visköst beteende. Vid låga temperaturer var skillnaderna mindre, men vissa biobindemedel visade 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, inklusive $G^* \cdot \sin(\delta)$, Glover-Rowe-parametern, Christensen-Anderson R-värde och Linear Amplitude Sweep (LAS) test. Alla biobindemedel klarade specifikationskriterierna för $G^* \cdot \sin(\delta)$, Glover-Rowe-parametern 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 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 asfaltmassornas egenskaper visade resultaten att biobindemedel inte förändrar de grundläggande sambanden mellan bindemedlets och asfaltens styvhet och fasvinkel. Åldringens inverkan på styvhet och fasvinkel förändras inte heller av biobindemedel. Däremot kunde vissa skillnader observeras i nivåerna av dessa egenskaper samt deras temperatur-/frekvenskänslighet. Styvheten eller hårdheten hos biobindemedlet kan anpassas som nämnts ovan (penetration och mjukpunkt som mått), men anpassningen 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.

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. Detta förutsatt att styvhetsmodulen efter laboratorieåldring var högre för AG 16-massan med Bio-160/220, nämligen 8239 MPa vid 10 °C jämfört med 6432 MPa för den med Ref-160/220. Samtidigt visade Semi-Circular Bending test vid 5 °C 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 på 75 %, medan den med Bio-160/220 låg något under (59 %), men ändå högre än sin referens (42 %). 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 (fossil Global Warming Potential, GWP-fossil) med cirka 1 %, 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. För beläggningar med två lager innehållande biobindemedel stod negativ biogen GWP för cirka 50 % av den initiala fossila GWP-nivån. Detta visar att metodvalet för redovisning av biogen koldioxid har stor betydelse för bedömningen av klimatnyttan för biobindemedel.

Vidare tog LCA-analysen hänsyn till att användning av PMB i slitlagret kan förlänga beläggningens livslängd med upp till 20 %, vilket i sin tur kan minska den genomsnittliga årliga klimatpåverkan. När livslängden beaktades i analysen blev den genomsnittliga årliga GWP-nivån för PMB-fall lägre än för de fallen utan PMB, trots att PMB-fallen har högre initial klimatpåverkan. Detta visar att både materialval och beläggningens livslängd är avgörande för en rättvis klimatbedömning.

Känslighetsanalyser visade att LCA-resultat kan bero på vilka indata som används. Trots detta bekräftade alla analyser att redovisning av biogen koldioxid enligt “-1/+X”-metoden leder till betydligt lägre GWP för beläggningar med biobindemedel. Med tanke på den stora betydelsen av metodval för LCA-resultat är det viktigt att utveckla och standardisera metoder för att redovisa biogen koldioxid på ett sätt som speglar verkliga kolflöden i asfaltens livscykel.

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.

Summary

As climate and environmental issues have become increasingly important in the infrastructure sector, the need for sustainable alternatives to traditional road materials has increased. Bio-asphalt with bio-extended bituminous binder, where a renewable binder partially replaces petroleum bitumen, is a promising solution to reduce the asphalt industry's climate impact and dependence on fossil resources. This study, conducted by VTI in collaboration with Skanska, Nynas and KTH, has investigated how bio-extended bituminous binders affect the long-term performance and climate impact of asphalt mixtures. The focus has been on two types of bio-extended binders: bituminous binders extended with Tall Oil Pitch (TOP, produced from a by-product of the kraft pulping process in the forest industry), and a polymer-modified bitumen (PMB) with a biogenic component.

This study includes both laboratory tests and a life cycle assessment (LCA). In the laboratory, binders and asphalt mixtures have been analysed with respect to ageing, rheological properties, fatigue, cracking resistance and water sensitivity. LCA has been carried out to assess the climate impact from raw material extraction to ready-compacted pavement (construction stage, life cycle phases A1-A5 according to European standards for sustainability of construction works), with a special consideration of biogenic carbon (part of life cycle phases C/D according to the European standards). A total of six different binders were analysed: two 70/100 binders (Bio and Ref), two 160/220 binders (Bio and Ref) and two 40/100-75 PMB (Bio and Ref). The bio-extended binders without polymer contained 5 % and 21 % TOP, respectively. Asphalt mixtures were prepared in the laboratory with these six binders. For each group (Bio and Ref), the mix design and compaction procedures were identical to enable fair comparisons.

The results show that bio-extended binders with TOP meet the technical requirements for bituminous binders according to SS-EN 12591:2009. Penetration and softening point could be adapted by varying the TOP content. For example, Bio-70/100 with 5 % TOP and 50/70 base bitumen had a penetration of 80 (unit 0,1 mm) and a softening point of 47,2 °C, which is within the specification range for 70/100 bitumen. Bio-160/220 with 21 % TOP (same base bitumen) showed a penetration of 193 and a softening point of 40,4 °C, which also meets the requirements for its grade.

After long-term ageing, the bio-extended binders generally showed less increase of softening point than their reference binders. The increase of softening point for Bio-70/100 was 10,6 °C, compared to 15,6 °C for Ref-70/100. Rheological analyses using a dynamic shear rheometer (DSR) showed that the bio-extended binders had higher values of phase angle at high temperatures, indicating a more viscous behaviour. At low temperatures, the differences were smaller, but some bio-extended binders showed higher stiffness and lower phase angle, which may indicate increased brittleness. Master curves of binders showed that bio-extended binders were slightly more sensitive to frequency changes, especially at higher TOP content and after long-term ageing.

The fatigue resistance of binders was analysed using several methods, including $G^* \cdot \sin(\delta)$, Glover-Rowe parameter, Christensen-Anderson R-value, and Linear Amplitude Sweep (LAS) test. All bio-extended binders met the specification criteria of $G^* \cdot \sin(\delta)$, Glover-Rowe parameter, and R-value. The LAS analysis showed that Bio-70/100 had slightly better fatigue resistance than Ref-70/100 at 25 °C, while Bio-160/220 showed worse fatigue performance than its reference at 10 °C. At low temperatures, both Bio-70/100 and Bio-160/220 passed the ΔT_c criterion (≥ -2.0 °C) as the strictest requirement in the USA. However, Bio-160/220 showed higher critical temperatures (less negative below 0 °C), which may indicate poorer cracking resistance at low temperatures. For PMB, the ΔT_c values were more negative, which is a known phenomenon specifically for PMB, but Bio-PMB still showed better ΔT_c than its reference.

Regarding the properties of asphalt mixtures, the results showed that bio-extended binders do not change the fundamental relationships between the stiffness and phase angle of the binder and asphalt mixture. The effect of ageing on stiffness and phase angle is also not changed by bio-extended binders.

However, some differences could be observed in the levels of these properties and their temperature/frequency sensitivity. The stiffness or hardness of bio-extended binder can be adapted as mentioned above (by adjusting penetration and soft point), but the adaptation at one temperature or frequency does not necessarily mean the same adaptation at another temperature or frequency. This applies to both binders and asphalt mixtures, and the effect is more significant when the TOP content in the binder is higher.

The fatigue test on asphalt mixtures showed that the AG 16 mixture with Bio-160/220 had slightly worse resistance at small strains than that with Ref-160/220. This was provided that the stiffness modulus after laboratory ageing was higher for the AG 16 mixture with Bio-160/220, namely 8239 MPa at 10 °C compared to 6432 MPa for that with Ref-160/220. Meanwhile, the Semi-Circular Bending test at 5 °C showed that the AG 16 mixture with Bio-160/220 had higher fracture toughness than its reference, but also showed faster crack propagation, which indicates a more brittle fracture behaviour. After conditioning with a Moisture Induced Stress Tester (MIST), the brittleness decreased, which indicates that the impact of water can mitigate some negative effects of ageing for asphalt mixtures containing TOP.

The influence of bio-extended binders on the water sensitivity of asphalt mixtures was found to be generally positive. The Indirect Tensile Strength Ratio (ITSR) values for the mixtures with Bio-70/100 and Bio-PMB were above the Swedish Transport Administration's requirement of 75 %, while that with Bio-160/220 was below the requirement (59 %), but still higher than its reference (42 %). This suggests that TOP can improve the adhesion between binder and aggregates. However, it should be noted that no adhesion promoter was used in this study, which means that the results could be further improved in practical applications. Nevertheless, it is important to choose an appropriate adhesion promoter by taking into account the chemical reactivity with TOP, which contains free acids that can react with amine-based additives.

The LCA in this study, covering life cycle phases A1-A5 as well as biogenic carbon accounting in life cycle phases C/D, showed that the use of bio-extended binders marginally increased the fossil part of climate impact (fossil Global Warming Potential, GWP-fossil) by approximately 1 %, mainly due to the upstream climate impacts from the extraction and processing of the raw materials to produce TOP and Bio-PMB. However, the biogenic carbon accounting according to an alternative method (so-called “-1/+X” method) showed that the total climate impact can be halved. For pavements with two layers containing bio-extended binders, the negative biogenic GWP accounted for approximately 50 % of the initial fossil GWP. This shows that the selection of method for biogenic carbon accounting has a significant impact on the assessment of climate benefit for bio-extended binders.

Furthermore, the LCA analysis took into account that the use of PMB in the wearing course can extend the service life of pavement by up to 20 %, which in turn can reduce the average annual climate impact. When the service life was taken into account in the analysis, the average annual GWP of the PMB cases became lower than that of the cases without PMB, even though the initial climate impact of the PMB cases is higher. This shows that both the selection of material and service life of the pavement are crucial for a fair climate assessment.

Sensitivity analyses showed that LCA results can depend on the input data used in the analysis. Despite this, all analyses confirmed that the biogenic carbon accounting according to the “-1/+X” method leads to significantly lower GWP for pavements with bio-extended binders. Given the significant impact of method selection on LCA results, it is important to develop and standardise methods for biogenic carbon accounting that reflect realistic carbon flows in the asphalt life cycle.

In conclusion, this study shows that bio-extended binders, especially those with a moderate proportion of TOP or polymer, have the potential to contribute to more sustainable asphalt pavements without compromising technical performance. To ensure the long-term performance as well as climate and environmental benefits, continued research is recommended, especially on ageing mechanisms, reuse

of asphalt mixtures with bio-extended binders, selection of adhesion promoter and standardisation of climate accounting for biogenic materials in asphalt. Full-scale trials and test roads under real traffic and climate conditions are also important next steps to validate the laboratory results in practice.

Förord

Denna rapport redovisar resultaten av ett projekt som har genomförts gemensamt av VTI, Skanska, Nynas och KTH. Projektet syftar till att utvärdera långsiktiga egenskaper och klimatavtryck av asfaltmassor med biobindemedel. Förutom projektparternas egeninsatser har detta projekt finansierats av tre finansiärer:

- Trafikverket, via industriprogrammet BVFF – Bana väg för framtiden, diarienummer: TRV 2021/79537
- SBUF – Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond, projektnummer: 14070
- Vinnova, via strategiska innovationsprogrammet InfraSweden, diarienummer: 2022-00166.

Projektet har haft en referensgrupp med följande medlemmar:

- Henrik Arnerdal, projektets kontaktperson hos Trafikverket
- Mats Jonsson, Svevia
- Lars Jansson, Peab asfalt
- Krister Persson, TotalEnergies
- Jonas Ekblad, NCC.

Förutom författarna har flera personer också bidragit till projektet med hjälp och stöd. Roger Nilsson, före detta Skanska och för närvarande Trafikverket, deltog i arbetsgruppen i projektets tidiga planeringsfas. Eric Gardner och Richard Nilsson, båda Skanska, har hjälpt till med att utföra olika provningar i Skanskas laboratorium. Hassan Fadil, före detta KTH, har utfört intryckningstestet i laboratoriet vid KTH. Yue Huang och Songfeng Shen, båda University of Leeds i Storbritannien, har hjälpt till med livscykelanalysen. Yared Dinegdae, VTI, har stöttat resultatanalysen.

Tack alla som har bidragit till projektet, såväl nämnda som onämnda.

Linköping, juli 2025

Jiqing Zhu, Abubeker Ahmed, Patryk Witkiewicz
Projektleddare



Granskare/Examiner

Ehsan Ghafoori, VTI.

De slutsatser och rekommendationer som uttrycks är författarnas egna och speglar inte nödvändigtvis myndigheten VTI:s uppfattning. / The conclusions and recommendations in the report are those of the authors and do not necessarily reflect the views of VTI as a government agency.

Publikationen godkänd för publicering

Björn Kalman, VTI.

1. Inledning

1.1. Bakgrund

Asfalt används i stor utsträckning som beläggningsmaterial för vägar över hela världen, där bitumen vanligtvis används som bindemedel för att hålla samman asfaltmassan. På senare tid har dock användningen av traditionellt petroleumbaserat bitumen i asfalt ifrågasatts i takt med att klimat- och miljöfrågor får allt större uppmärksamhet. Orsakerna är bitumens beroende av icke-förnybar resurs (råolja), relativt höga energiförbrukning och utsläpp av växthusgaser vid produktionen (Corona et al. 2022; Mattinzioli et al. 2021; Shirzad & Zouzias 2024). För att möta dessa utmaningar har alternativa bindemedel utvecklats, som helt eller delvis utvinns från förnybara resurser och därmed erbjuder en mer hållbar lösning för vägbyggen (Ingrassia, Lu, Ferrotti & Canestrari 2019a; Penki & Rout 2021). Ett lovande exempel bland andra är bituminösa bindemedel som innehåller biobaserade komponenter som delvis ersätter petroleumbitumen (även om dessa bindemedel fortfarande innehåller konventionellt bitumen kallas de i denna rapport för *biobindemedel*, på engelska: bio-extended bituminous binders). Dessa biobindemedel kan enligt uppgift bidra till att minska både asfaltbranschens koldioxidavtryck och beroende av fossila resurser (Gaudenzi, Cardone, Lu & Canestrari 2023; Riccardi & Losa 2024).

Bland de undersökningar som hittills genomförts har användningen av växtbaserade biooljor som delvis ersättning av bitumen visat de mest lovande resultaten (Ingrassia 2021; Wang, Ma, Chen & Hasan 2020). Framgången med att delvis ersätta bitumen med biooljor beror på flera faktorer. För det första har tillsatsen av biooljor, särskilt i låg halt, inte visat någon betydande negativ påverkan på bituminösa bindemedels egenskaper. För det andra möjliggör biooljor en relativt hög ersättningsgrad av bitumen jämfört med andra metoder, vilket maximerar de miljö- och hållbarhetsmässiga fördelarna. Slutligen är ersättningen av petroleumbaserat bitumen, snarare än andra komponenter i asfaltmassan, en mer effektiv strategi för att bemöta klimat- och miljörelaterade utmaningar.

Växtbaserade biooljor kan utvinnas från en rad olika förnybara biomassakällor, såsom trä, jordbruksrester och använt matfett (He et al. 2023). Genom att blanda biooljor med konventionellt bitumen skapas ett biobindemedel som utgör ett mer hållbart och mindre fossilberoende alternativ till enbart petroleumbaserat bitumen i asfaltbeläggningar. Utöver de miljömässiga fördelarna har tidigare studier visat att vissa växtbaserade biooljor även kan förbättra tekniska egenskaper hos bituminösa bindemedel. Exempelvis har det rapporterats att vissa biooljor kan öka bindemedlets flexibilitet, vidhäftning och bearbetbarhet (Ingrassia, Cardone, Canestrari & Lu 2019b; Ingrassia, Lu, Ferrotti & Canestrari 2020), egenskaper som är avgörande för asfaltens prestanda och livslängd. Dessa resultat visar att växtbaserade biooljor inte bara kan bidra till att minska asfaltens klimatpåverkan, utan även förbättra beläggningsens tekniska funktion och livslängd.

1.2. Syfte och mål

Trots de potentiella fördelarna krävs ytterligare forskning för att fullt ut förstå de långsiktiga egenskaper och klimatavtryck av asfaltmassor med biobindemedel under olika trafik- och klimatförhållanden. Detta är nödvändigt för att säkerställa att växtbaserade biooljor kan ersätta traditionellt petroleumbitumen på ett lämpligt och adekvat sätt i asfaltbeläggningar ur ett långsiktigt perspektiv.

För detta ändamål undersökte denna studie en specifik typ av växtbaserad bioolja, Tall Oil Pitch (TOP, även kallas för talloljebeck på svenska), för dess användning som delvis ersättning av bitumen i asfaltmassor. TOP tillverkas i bioraffinaderier genom destillation av råttallolja, som i sin tur är en biprodukt från sulfatmassaprocessen vid pappersbruk. Detta gör TOP till ett hållbart alternativ baserat på skogsresurser. Dessutom analyserades ett polymermodifierat bitumen (PMB) som innehåller en biogen komponent.

I denna studie genomfördes en litteraturöversikt om användningen av TOP i bitumen och asfalt. Biobindemedel med TOP som delvis ersättning av bitumen formulerades. Ett PMB innehållande en biogen komponent erhöles från en bindemedelsproducent. Asfaltmassor tillverkades med dessa biobindemedel i laboratoriet. För att utvärdera deras långsiktiga egenskaper genomfördes olika laborietester på både de biobindemedlen och deras asfaltmassor. Dessutom genomfördes en livscykelanalys (LCA) för att utvärdera deras koldioxidavtryck. Resultaten från denna studie förväntas bidra till en bättre förståelse av de långsiktiga egenskaperna och klimatavtrycket hos asfaltmassor med biobindemedel.

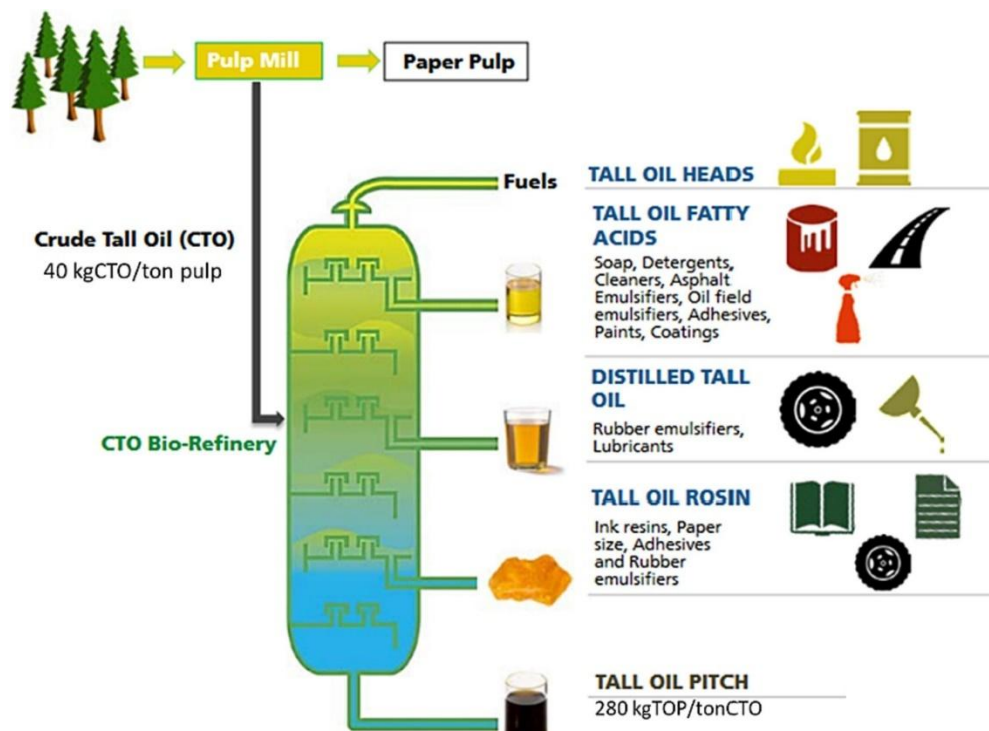
1.3. Disposition

Denna rapport består av sju kapitel. Efter detta inledande kapitel presenteras i kapitel 2 en litteraturöversikt om användningen av TOP i asfalt. Kapitel 3 beskriver de material och metoder som användes i denna studie. Kapitel 4 analyserar provningsresultat av bindemedel med fokus på deras långsiktiga egenskaper. Kapitel 5 diskuterar biobindemedels långtidseffekter i asfalt med tanke på flera viktiga egenskaper hos massor. Kapitel 6 presenterar en LCA-analys på asfaltmassor med biobindemedel angående deras koldioxidavtryck. Slutligen sammanfattar kapitel 7 huvudresultaten, drar slutsatser av denna studie och ger rekommendationer baserade på forskningsresultaten.

2. Litteraturöversikt

2.1. Tall Oil Pitch (TOP)

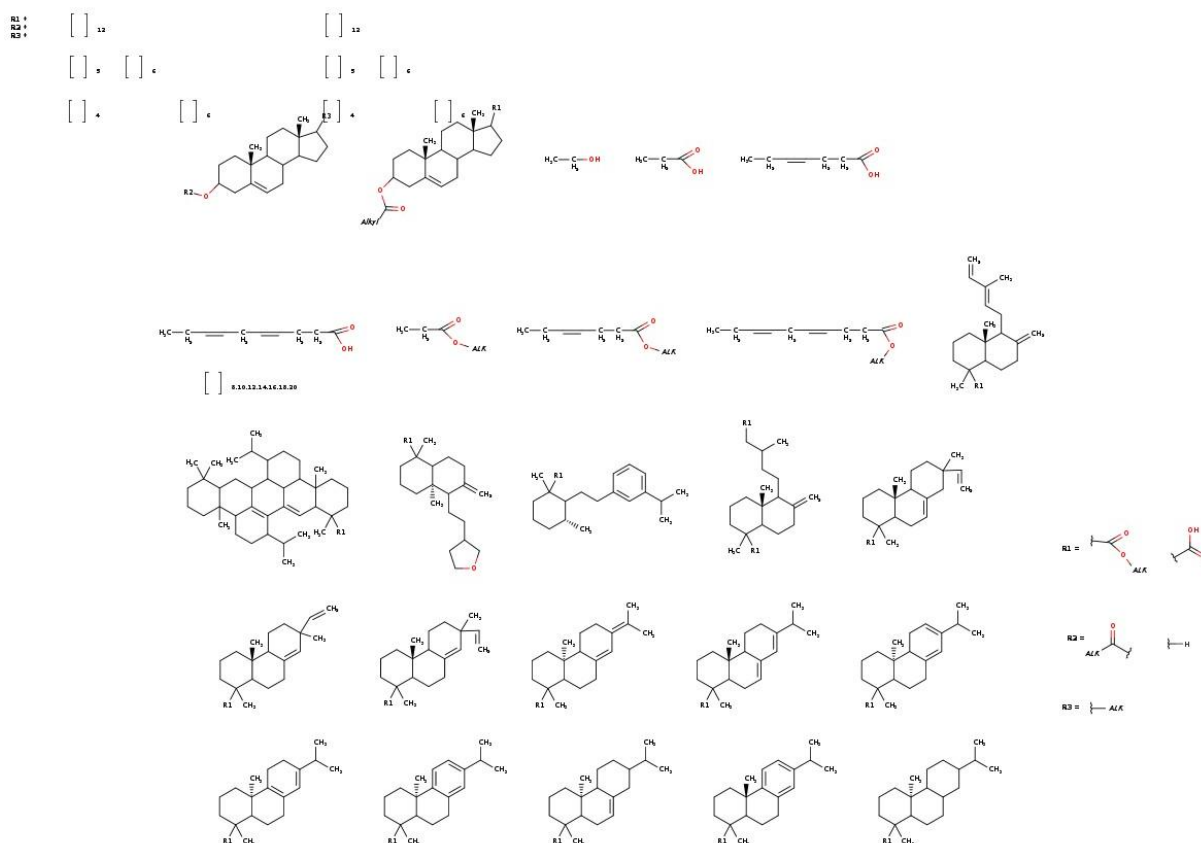
Tall Oil Pitch, även kallas för talloljebeck på svenska, tillverkas i bioraffinaderier genom destillation av råttallolja, som i sin tur är en biprodukt från sulfatmassaprocessen vid pappersbruk. Under destillationen separeras olika fraktioner baserade på kokpunkt, där TOP utgör den tyngsta och minst flyktiga delen (se Figur 1). TOP är en viskös och mörkfärgad substans (se Figur 2) med viss bindningsförmåga. Kemiskt sett består TOP huvudsakligen av högkokande estrar och fria syror (se Figur 3). 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).



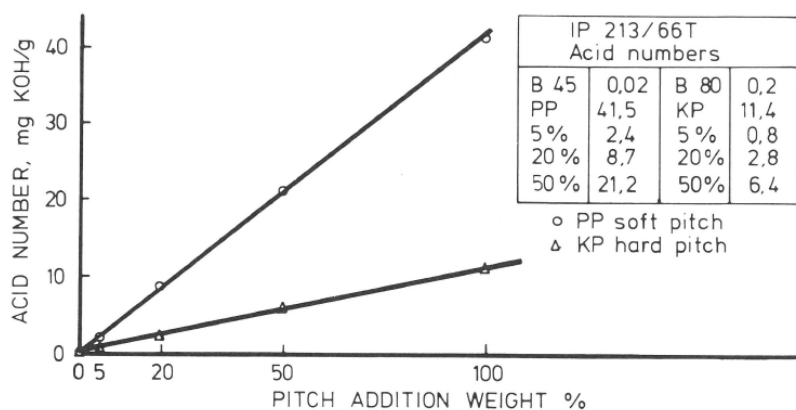
Figur 2. TOP i ett fat (Urquhart & Malone 2013).



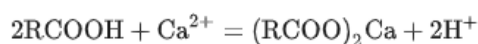
Figur 3. Molekylformler för TOP i den Europeiska kemikaliemyndigheten ECHA:s kemikaliendatabas (ECHA CHEM: <https://chem.echa.europa.eu/100.029.464/> [2025-02-14]).

2.2. 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 potentiella ekonomiska fördelarna. I början av 1990-talet forskade Peltonen (1990, 1992) 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 syrataltal, se Figur 4) hos TOP genom kemisk adsorption (även kallat kemisorption), se Figur 5. Mazuch och Jeffery (1995) konstaterade i sin studie att TOP kan förbättra vidhäftningen i en utsträckning som är jämförbar med konventionella vidhäftningsmedel.

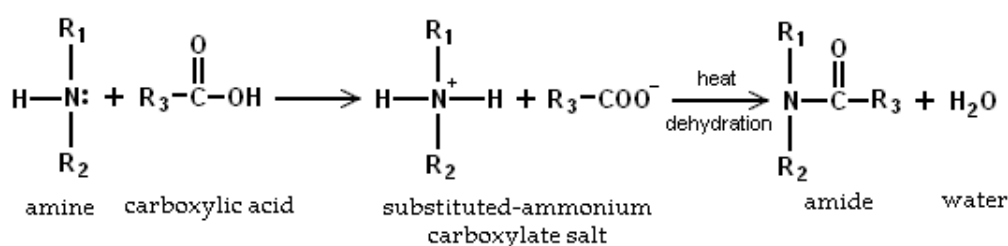


Figur 4. Syrataltal av bindemedel med TOP (Peltonen 1990).



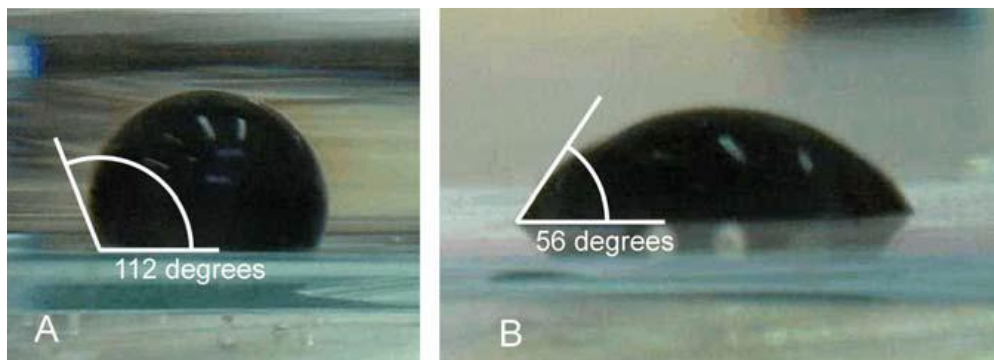
Figur 5. Kemisk adsorption mellan TOP (med fria syror) och stenmaterial, med fria kalciumkationer (Ahmedzade, Tigdemir & Kalyoncuoglu 2007).

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 i 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 (se Figur 6).



Figur 6. Kemisk reaktion mellan amin och karboxylsyra (Walker 2019).

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 gränstypspanning och kontaktvinkel hos bindemedel (se Figur 7). 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 7. 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).

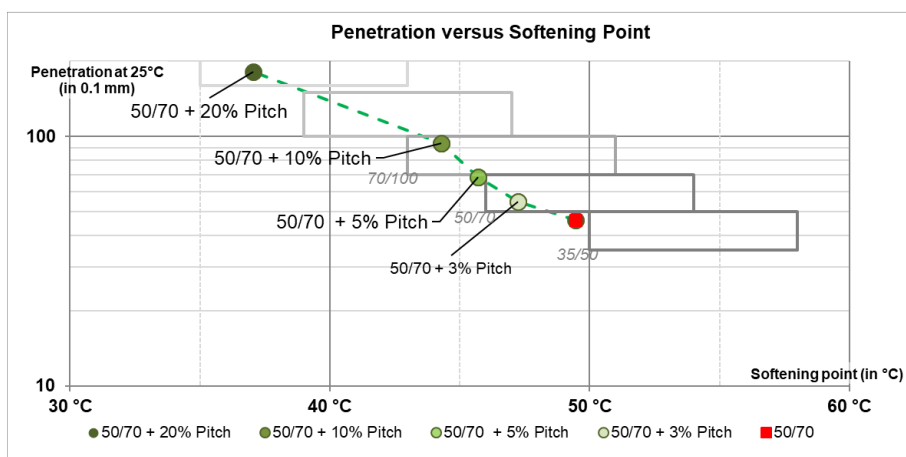
Wu, Feng och Wong (2004) analyserade syntetiska blandningar av fettsyra, hartssyra och sterol för att förutsäga de fysiska egenskaperna hos TOP. Deras resultat visade att fysiska egenskaper såsom viskositet och penetration hos TOP kan justeras för att möta olika tekniska krav i olika klimatzoner. Ahmedzade, 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 (se Figur 8). 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.

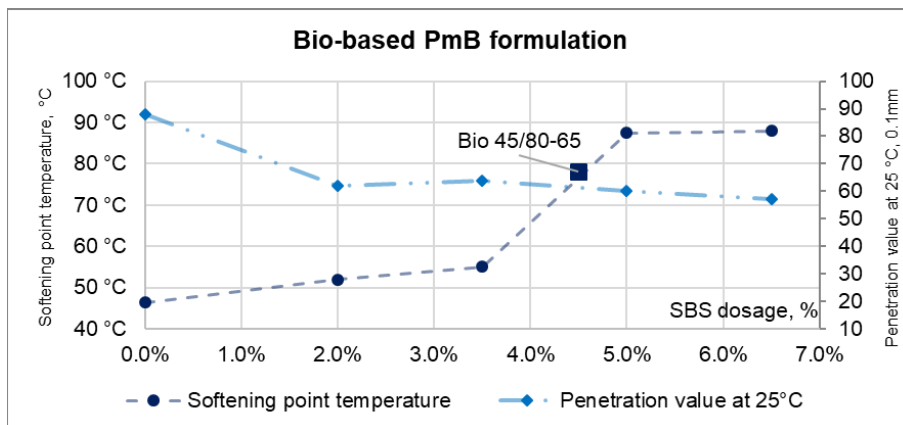


Figur 8. Färdigt belagd ytbehandling på provvägen i Australien: till vänster med konventionellt bitumen och till höger med biobindmedel (Urquhart & Malone 2013).

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 (se Figur 9). 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 (se Figur 10).



Figur 9. Egenskaper hos blandningar av 50/70 bitumen och TOP (Porot & Haslam 2020).



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

3. Material och metoder

3.1. Material

3.1.1. Bindemedel

Sex bituminösa bindemedel analyserades i denna studie. De var av tre olika kvalitetstyper enligt SS-EN 12591:2009 och SS-EN 14023:2010, nämligen två 70/100 belägningsbitumen, två 160/220 belägningsbitumen och två 40/100-75 PMB. För varje kvalitetstyp fanns ett biobindemedel med biogen komponent och ett kommersiellt tillgängligt referensbindemedel för jämförelseändamål. Alla 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) formulerades 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. Se avsnitt 4.1 för mer information om formuleringen.

Den TOP-produkt som användes i denna studie var en viskös och mörkfärgad substans (se Figur 11). Dess egenskaper anges i Tabell 1 och dess fettsyrasammansättning visas i Figur 12 (Skanskas analyser). TOP-produkten analyserades med FTIR, Fourier Transform Infrared Spectroscopy. Dess FTIR-spektrum presenteras i Figur 13. 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.



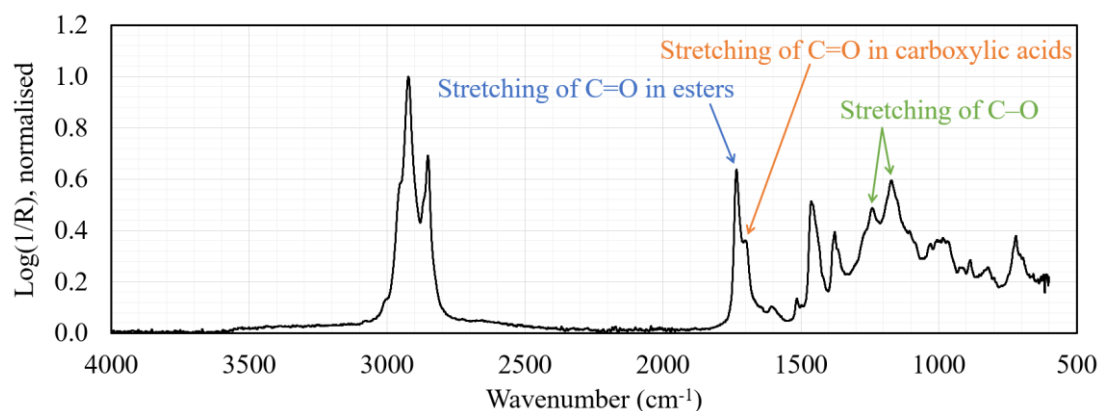
Figur 11. Den TOP-produkt som användes i denna studie. Foto: Jiqing Zhu.

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	
(QTL-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 12. Fettsyrasammansättning av den TOP-produkt som användes i denna studie.



Figur 13. FTIR-spektrum av den TOP-produkt som användes i denna studie.

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

3.1.2. Ballastmaterial

Ett ballastmaterial användes för att tillverka asfaltmassor i denna studie. En petrografisk analys på materialet utfördes och presenteras i Bilaga 1. 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.

3.1.3. Asfaltmassor och provkroppar

De sex bindemedlen och ballastmaterialet användes för att tillverka asfaltmassor i laboratorium: ABT 16-massor med 70/100 och PMB bindemedel, samt AG 16-massor med 160/220 bindemedel. Ballastmaterialet var densamma för alla asfaltmassor. Ingen returafalt eller vidhäftningsmedel användes i massorna. Sex typer av asfalt 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.

För varje asfalttyp med biobindemedel och dess referens var arbetsreceptet och packningsförfarandet detsamma. Deras volymetriska parametrar hölls så nära varandra som möjligt. Detta underlättar jämförelsen mellan bindemedlen. Se Bilaga 2 för mer information om dessa sex asfaltmassor. När det gäller tillverkning av provkroppar packades asfaltsplattor med en asfaltvält. Kärnprover borrades från plattorna. Se Figur 14.

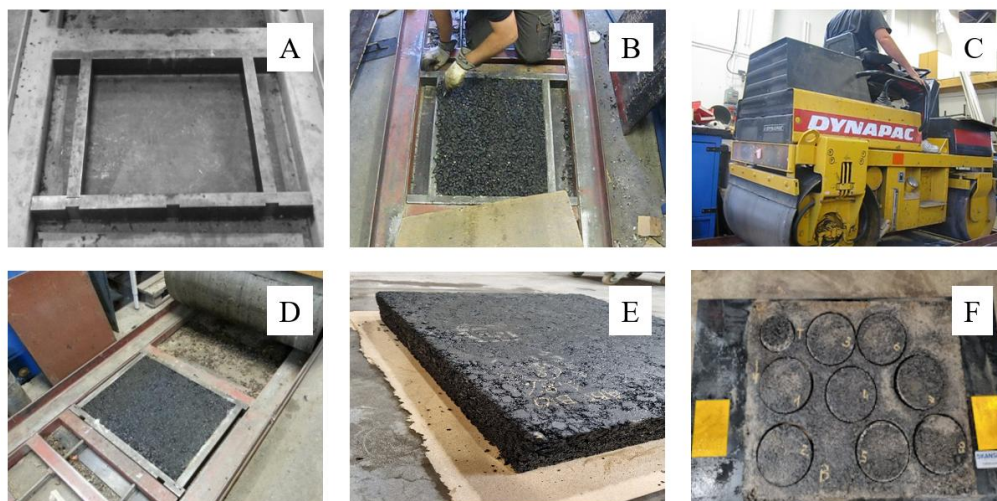


Figur 14. Tillverkning av provkroppar. Till vänster: packning av asfaltsplattor på Skanskas labb i Västerhaninge; till höger: borrhärdar från plattorna. Foton: Patryk Witkiewicz.

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 14 (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 15. 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.

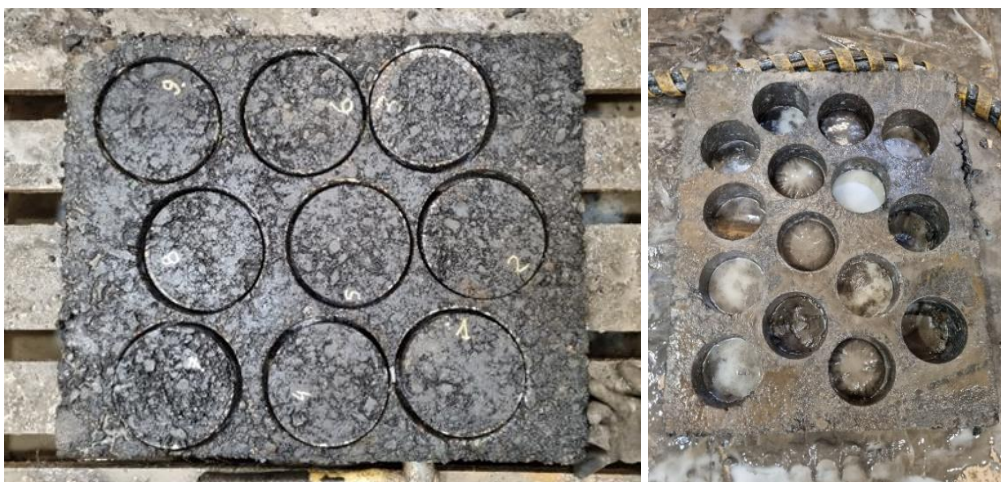


Figur 15. Olika steg för att tillverka provkroppar. (A) Stålformen, (B) Gjutning av asfaltmassa i formen, (C) Vältning av platta, (D) Platta efter packning, (E) Färdig platta, (F) Framtagning av borrhärdar. Foton: Patryk Witkiewicz.

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 16). Från varje asfaltsplatta borrades ur borrhärdar med diametrar på 150 mm och 100 mm (se Figur 17) 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 16. Packade asfaltsplattor. Foto: Patryk Witkiewicz.



Figur 17. Borrning av kärnor med diametrar på 150 mm (till vänster) och 100 mm (till höger). Foton: Patryk Witkiewicz.

3.2. Provningsmetoder

3.2.1. Provningsmetoder för bindemedel

Efter formulering och framställning analyserades biobindemedlen med TOP enligt provningsmetoderna i SS-EN 12591:2009. Två bindemedel, Bio-160/220 som innehåller en större andel TOP och dess referens Ref-160/220, testades med SARA-analys 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 att undersöka långtidseffekter åldrades 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. Efter varje steg av långtidsåldringen analyserades de konditionerade bindemedlen med olika provningsmetoder, inklusive FTIR (med ATR, Attenuated Total Reflectance), mjukpunkt samt reologisk karakterisering med en dynamisk skjuvreometer (DSR, på engelska: Dynamic Shear Rheometer). Mjukpunkt bestämdes enligt SS-EN 1427:2015. Dynamisk skjuvmodul $|G^*|$ och fasvinkel δ hos bindemedlen bestämdes med DSR inom det linjära viskoelastiska området vid olika temperaturer och frekvenser enligt SS-EN 14770:2023. Till dessa DSR-analyser användes mätplattorna med diameterstorlekar 25 mm (gapet mellan plattorna 1 mm), 8 mm (gapet 2 mm) och 4 mm (gapet 2 mm).

Eftersom syftet med denna studie var att undersöka långsiktiga egenskaper sattes en fokus för DSR-provningen efter långtidsåldringen på mellan- och lågtemperaturer (vid mellanliggande temperaturer för att utvärdera utmattningsegenskaper och vid låga temperaturer för att utvärdera termisk sprickresistens). Parallella mätplattor användes för DSR-provningen. Vid mellanliggande temperaturer användes mätplattorna med diameterstorlek 8 mm (gapet mellan plattorna 2 mm). Vid låga temperaturer användes mätplattorna med diameterstorlek 4 mm (gapet också 2 mm).

Dessutom bestämdes böjkrypstyvhet hos de långtidsåldrade bindemedlen med en böjbalksreometer (BBR, på engelska: Bending Beam Rheometer) vid olika låga temperaturer enligt SS-EN 14771:2023. Efter långtidsåldringen analyserades de konditionerade bindemedlen även med metoden Linear Amplitude Sweep (LAS) enligt AASHTO T391-20, för att utvärdera deras utmattningsmotstånd. LAS-analyserna utfördes med DSR (8 mm mätplattor) vid 25 °C för 70/100 och PMB bindemedel och vid 10 °C för 160/220 bindemedel.

3.2.2. Provningsmetoder för asfaltmassor

Efter tillverkning av provkroppar analyserades de sex asfaltmassor enligt SS-EN 12697-26:2018+A1:2022 Bilaga F (cyklisk indirekt dragprovning på cylindriska provkroppar med 100 mm diameter och 50 mm tjocklek) för att bestämma deras masterkurvor. Dessutom bestämdes även AG 16-massornas styvhet med en intryckningsmetod (Fadil, Jelagin, Zhu & Ahmed 2025). Se avsnitt 5.3.2 för mer information om metoden. Vattenkänslighet utvärderades hos alla sex asfaltmassor genom att bestämma deras indirekt draghållfasthetsindex (ITSR, på engelska: Indirect Tensile Strength Ratio) enligt TDOK 2017:0650 version 2.0. AG 16-massorna konditionerades även med en Moisture Induced Stress Tester (MIST) vid 40 °C och 0,28 MPa portryck med 12000 cykler (Rahman, Waldemarson & Ahmed 2022). Både före och efter MIST-konditioneringen analyserades provkropparna i vått tillstånd för styvhetsmodul vid 10 °C enligt SS-EN 12697-26:2018+A1:2022 Bilaga C (indirekt dragprovning på cylindriska provkroppar med 100 mm diameter och 50 mm tjocklek). Stabilitet undersöktes hos alla sex asfaltmassor med dynamiska triaxialförsök. Se Bilaga 3 för mer information om metoden.

Dessutom åldrades provkropparna i laboratorium enligt SIS-CEN/TS 12697-52:2017 (Procedur B.1 vid 65 °C i 15 dagar, se avsnitt 5.2 för mer information om laboratorieåldringen) och analyserades därefter för masterkurvor (samma metod som före åldringen) för att utvärdera inverkan av åldring på deras mekaniska egenskaper. AG 16-massorna analyserades även med flera andra provningar efter laboratorieåldringen. Hos AG 16-massorna undersöktes de kombinerade effekter av åldring och vatten genom att bestämma och jämföra deras masterkurvor efter först laboratorieåldring och sedan MIST-konditionering. De åldrade AG 16-massorna analyserades även för utmattningsbeständighet vid 10 °C enligt SS-EN 12697-24:2018 Bilaga E (indirekt dragprovning på cylindriska provkroppar med 100 mm diameter och 50 mm tjocklek), samt för sprickpropageringspotential vid 5 °C enligt SS-EN 12697-44:2019 (böjprovning på halvcirkulära provkroppar, på engelska: Semi-Circular Bending, SCB). Provkropparna för SCB-testet var 150 mm i diameter och 50 mm tjocka, med notch som är 10 mm djup. Vissa åldrade provkroppar konditionerades ytterligare med MIST och dessa provkroppar analyserades med SCB-metoden vid 5 °C efter både laboratorieåldring och MIST-konditionering.

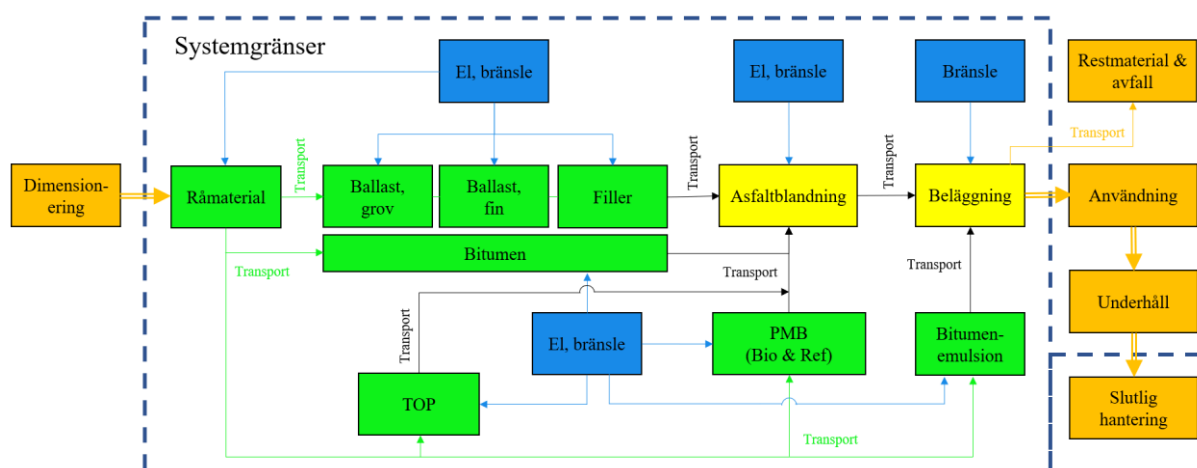
3.3. Livscykelanalys

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 3.1.1 för mer information). Analysen fokuserade på koldioxidavtrycket och redovisningen av biogen koldioxid. Beräkningarna omfattade livscykelfaserna A1-A5, nämligen 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, Dinegdae & Shen 2025).

3.3.1. 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 18, inklusive dessa processer:

- **Ballastutvinning och -produktion.** Denna process innefattar utvinning av ballastmaterial samt krossnings- och siktningsarbete för att framställa ballast i olika storlekar.
- **Produktion av bituminösa bindemedel och biobindemedel.** Denna process inkluderar produktion av TOP, bituminösa bindemedel (bitumen, PMB och bitumenemulsion), det Bio-PMB med en biogen komponent och deras uppströms försörjningskedjor.
- **Asfaltblandning.** Denna studie omfattar varmblandad asfalt som tillverkas vid högre temperaturer upp till 170–200 °C.
- **Transport av råmaterial och asfalt.** Denna process inkluderar transport av råmaterial till asfaltverket eller utläggningsplatsen samt transport av asfaltmassor till utläggningsplatsen.
- **Beläggningsarbete.** Denna process innefattar utläggnings- och packningsarbete samt klistring mellan lagren.
- **Redovisning av biogen koldioxid.** Denna process omfattar hela det biogena koldioxidflödet, både inkommande och utgående biogen koldioxid.

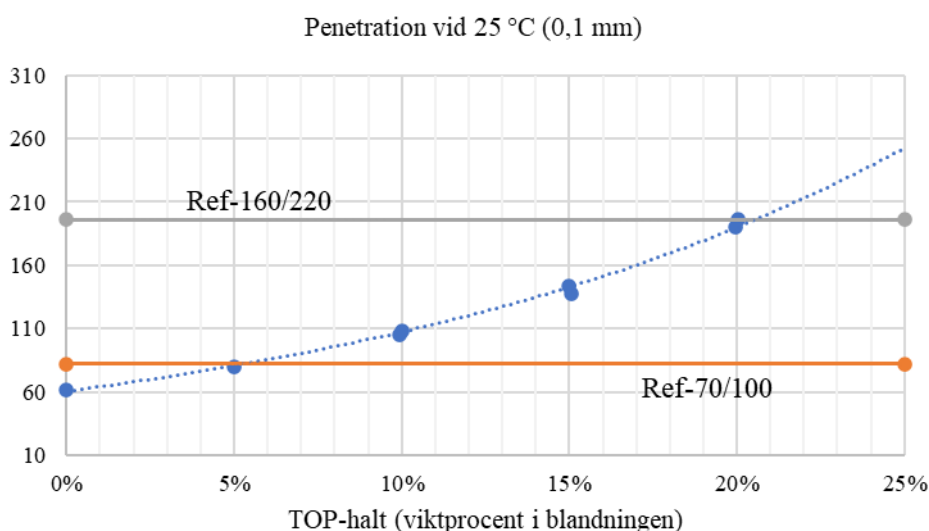


Figur 18. Systemgränser för LCA-analysen i denna studie.

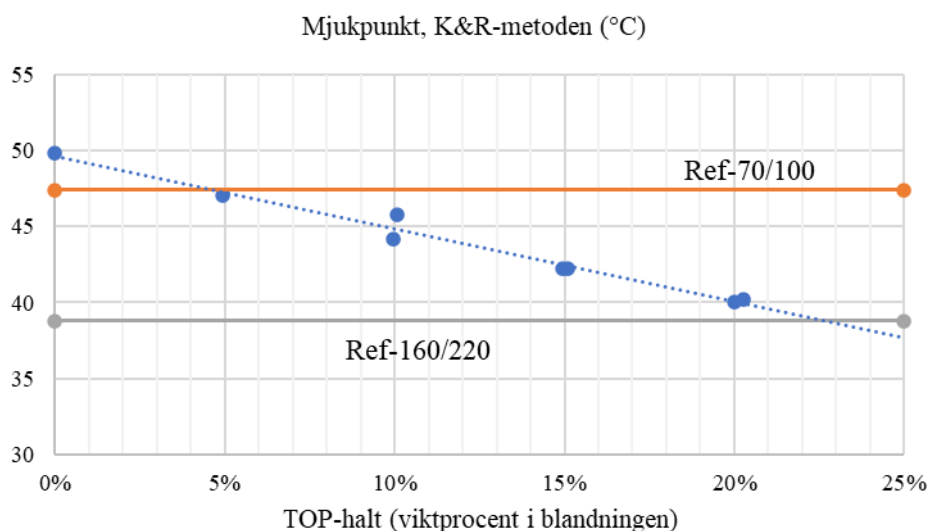
4. Biobindemedel och deras långsiktiga egenskaper

4.1. Formulering av biobindemedel med TOP

För att formulera 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 % (viktpcent i blandningen). Därefter analyserades blandningarna för penetration och mjukpunkt enligt SS-EN 1426:2024 respektive SS-EN 1427:2015. Resultaten presenteras i Figur 19 och Figur 20, 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, som i Figur 19 och Figur 20. Genom att matcha både penetration och mjukpunkt mellan referensbitumen och blandningarna bestämdes TOP-halterna i biobindemedel Bio-70/100 och Bio-160/220, nämligen 5 % respektive 21 %.



Figur 19. Penetration av blandningarna med TOP och 50/70 basbitumen.



Figur 20. 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.

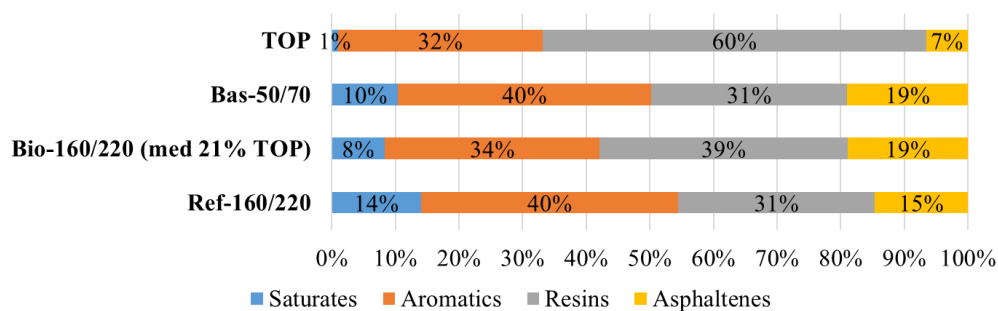
Tabell 2. Provningsresultat av Bio-70/100, med 5 % TOP.

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 (mm ² /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 %

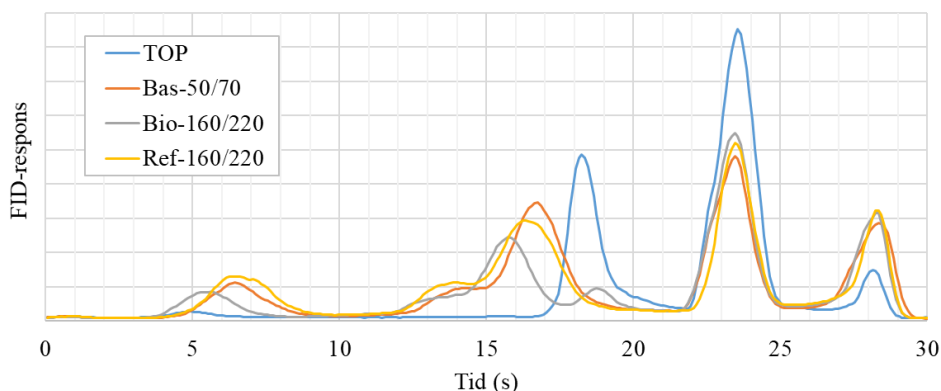
Tabell 3. Provningsresultat av Bio-160/220, med 21 % TOP.

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 (mm ² /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 %

Dessutom testades två bindemedel, Bio-160/220 som innehåller en större andel TOP och dess referens Ref-160/220, med SARA-analys genom TLC-FID enligt metodbeskrivningen i VTI notat 74-1999 (Edwards, Salomonsson & Wallgren 1999). För jämförelse testades också TOP och 50/70 basbitumen med samma metod. Resultaten presenteras i Figur 21, 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 22) 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 22. 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 ska undersökas ytterligare i framtida studier.



Figur 21. Resultat av SARA-analysen.



Figur 22. FID-responskurvor från SARA-analysen.

4.2. Laboratorieåldring av bindemedel

För att undersöka långsiktiga egenskaper åldrades alla de sex bituminösa bindemedlen i laboratorium med RTFOT vid 163 °C i 75 minuter enligt SS-EN 12607-1:2024 och därefter 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.

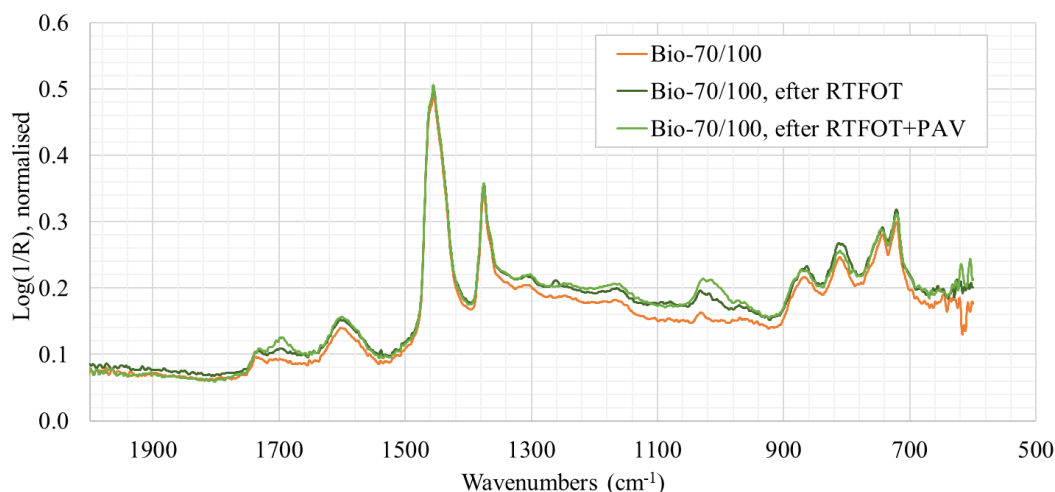
Tabell 4. Bindemedels penetration och mjukpunkt före åldring samt PG-klass.

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

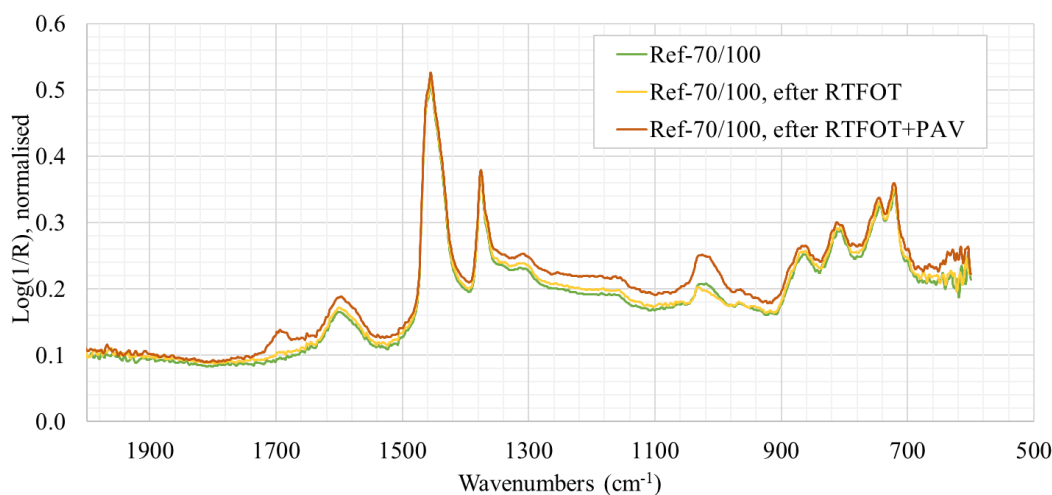
4.3. Karakterisering med FTIR

Både före och efter åldring karakteriserades de bituminösa bindemedlen med 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 23 till Figur 28 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 13) vid 1735–

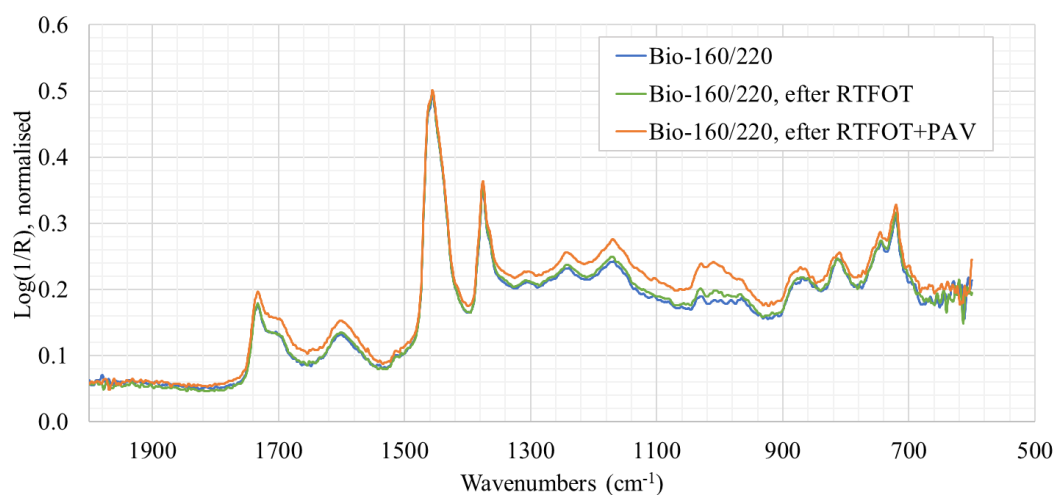
1710 cm^{-1} respektive 1300–1100 cm^{-1} . Ju mer TOP blandas in desto starkare signaler från dessa bindningar visas (Bio-160/220 med 21 % TOP jämfört med Bio-70/100 med 5 % TOP). Dessutom bildas karbonyl- och sulfoxidgrupper (vid 1660–1753 cm^{-1} respektive 970–1070 cm^{-1}) under åldringsprocessen 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.



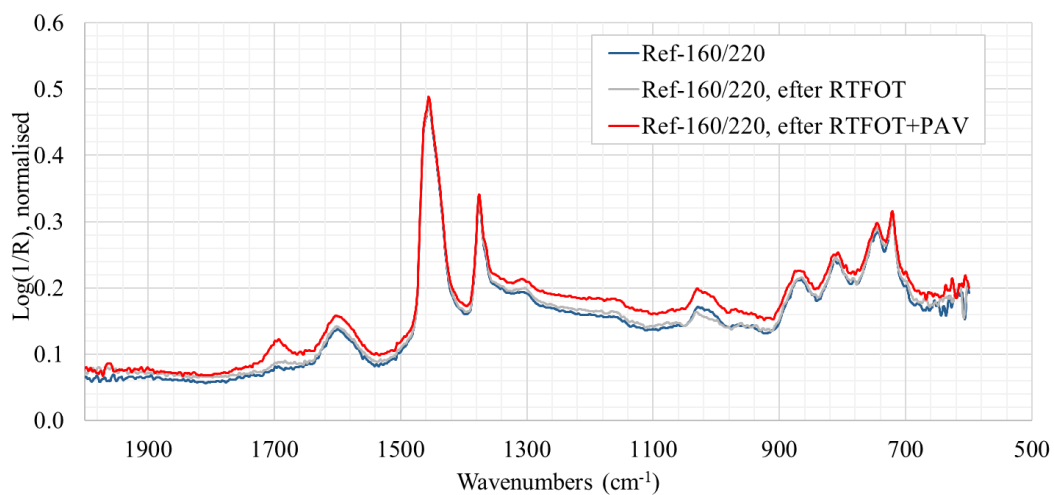
Figur 23. FTIR-spektra av Bio-70/100 före och efter åldring.



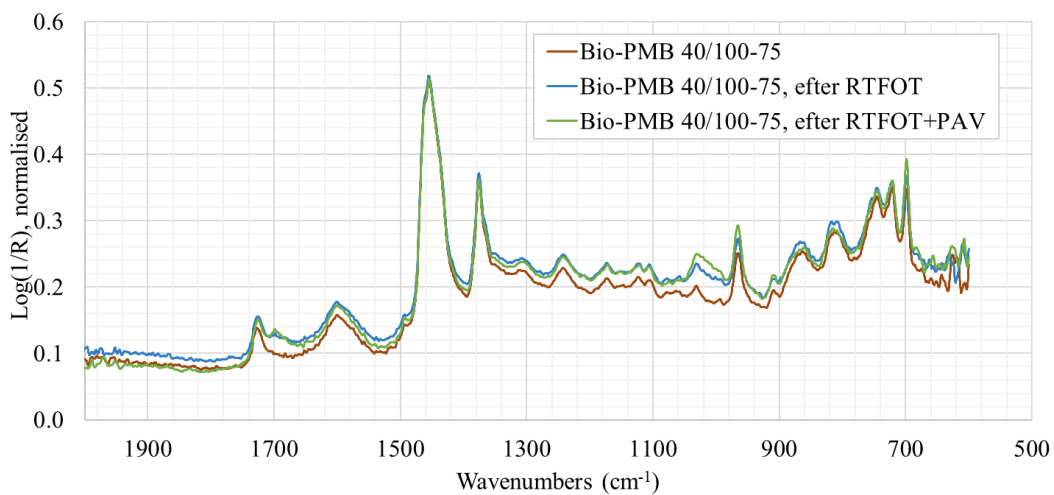
Figur 24. FTIR-spektra av Ref-70/100 före och efter åldring.



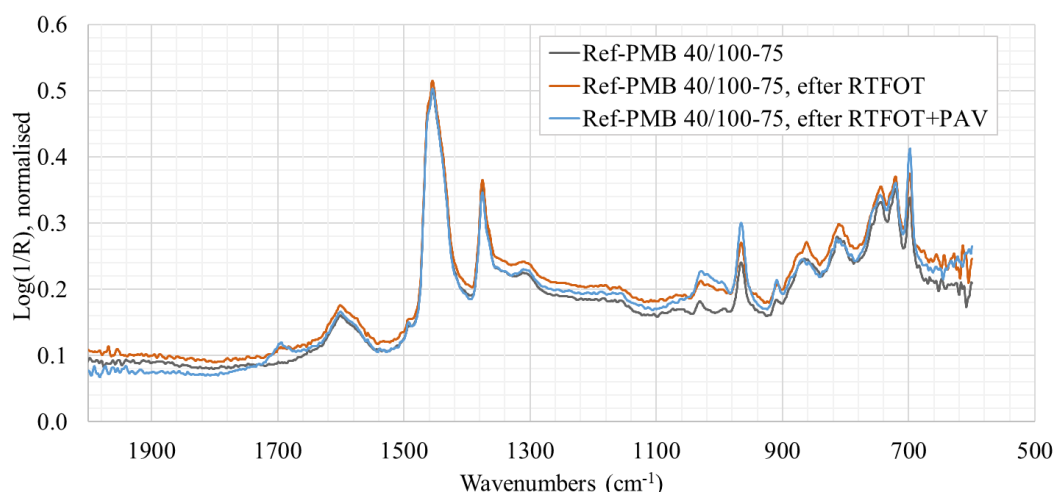
Figur 25. FTIR-spektra av Bio-160/220 före och efter åldring.



Figur 26. FTIR-spektra av Ref-160/220 före och efter åldring.



Figur 27. FTIR-spektra av Bio-PMB 40/100-75 före och efter åldring.



Figur 28. FTIR-spektra av Ref-PMB 40/100-75 före och efter åldring.

4.4. 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

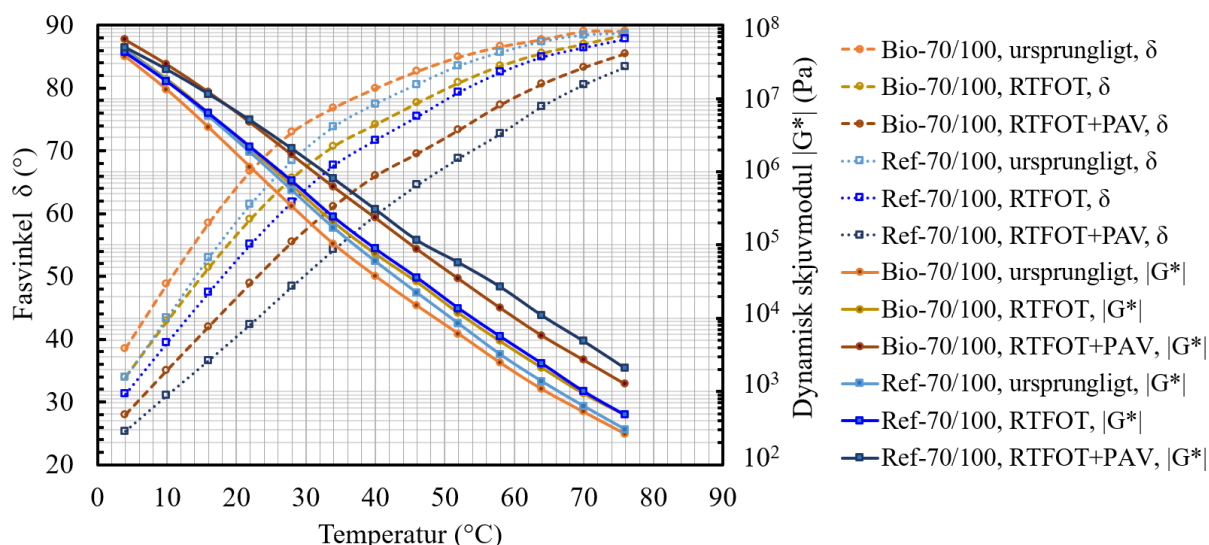
4.5. Reologiska egenskaper hos bindemedel

4.5.1. DSR temperatursvep

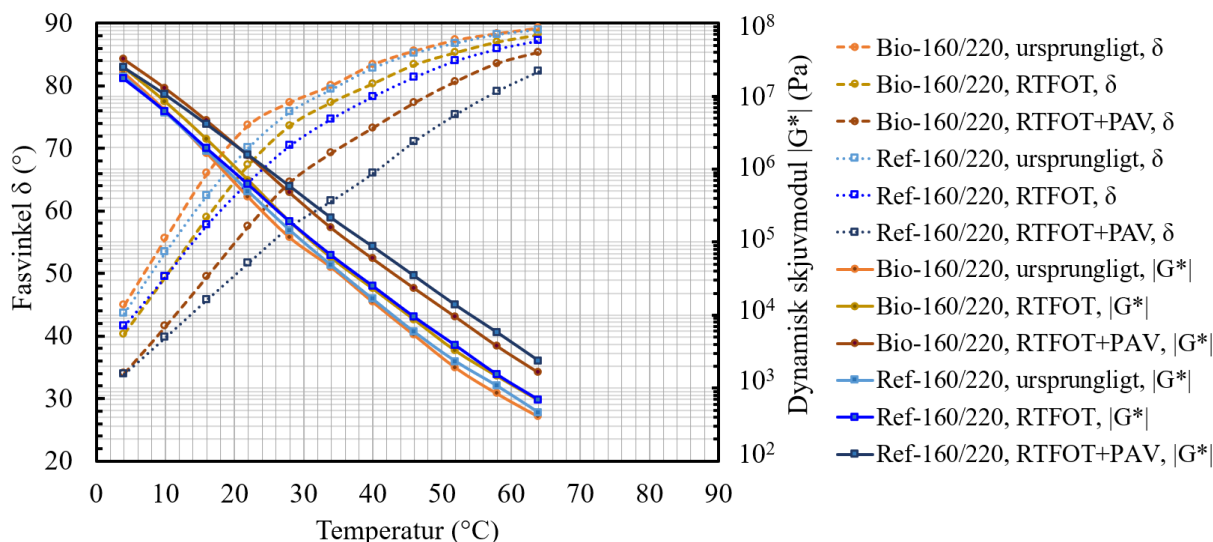
Resultaten av DSR temperatursvep (SS-EN 14770:2023) vid 1,59 Hz (10 rad/s) för de undersökta bindemedlen presenteras i Figur 29 till Figur 31, inklusive dynamisk skjuvmodul $|G^*|$ och fasvinkel δ . Analyserna utfördes från 4 °C och uppåt med 8 mm och 25 mm plattor. Resultaten visar att de biobindemedlen 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.

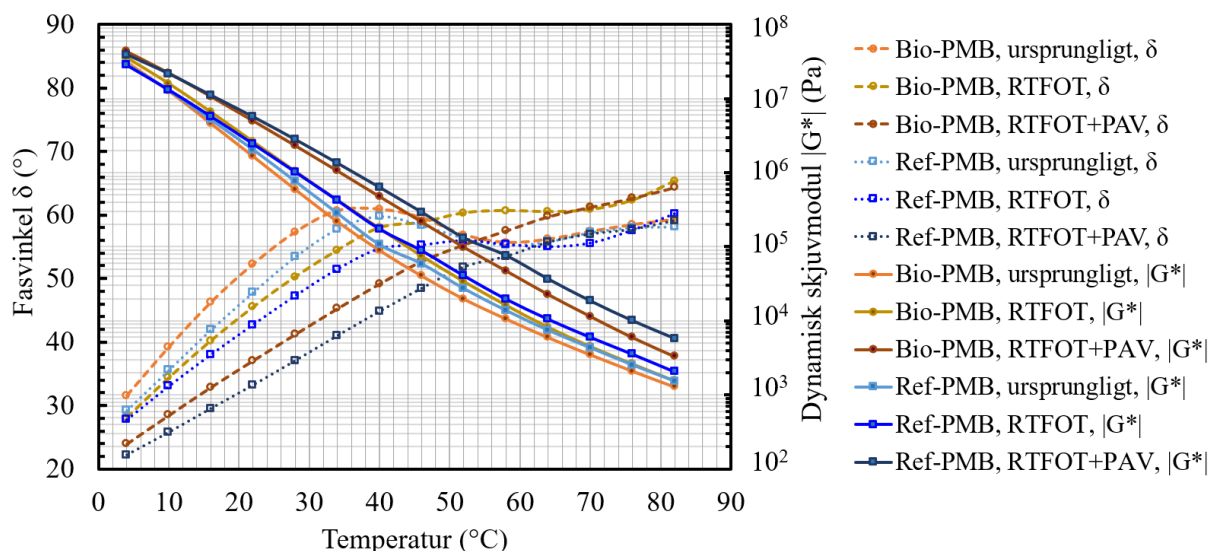
För varje bindemedelskvalitetstyp är $|G^*|$ -kurvorna för de två RTFOT-åldrade bindemedlen nästan identiska, även om det finns vissa små skillnader mellan de ursprungliga bindemedlen. Efter långtidsåldring med PAV ökar $|G^*|$, vilket innebär att bindemedlet blir styvare. De biobindemedlen uppvisar 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 29. DSR temperatursvep resultat vid 1,59 Hz (10 rad/s) av 70/100 bindemedel.

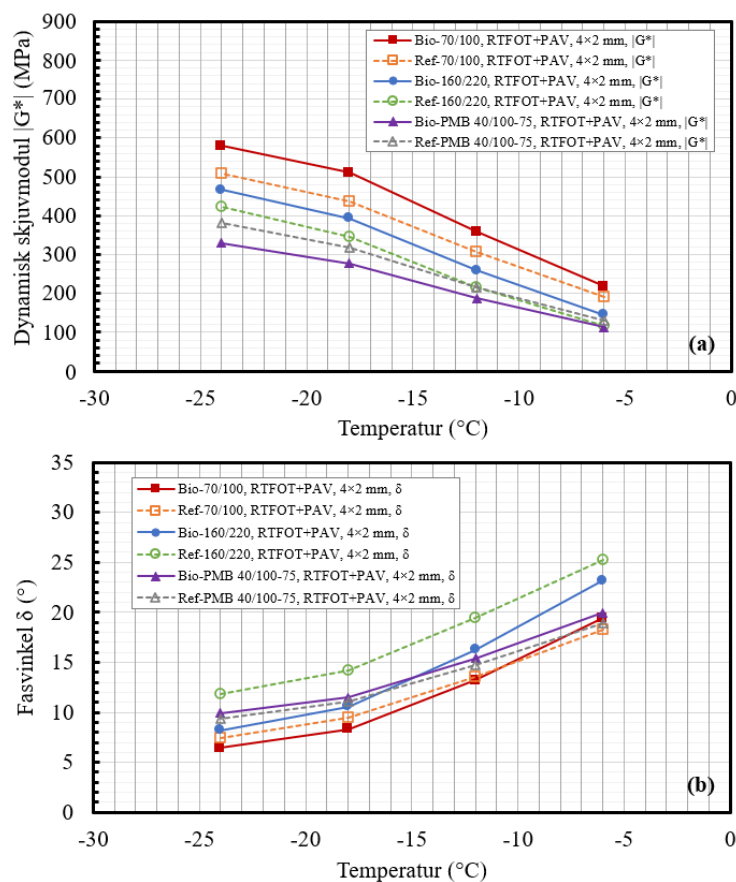


Figur 30. DSR temperatursvep resultat vid 1,59 Hz (10 rad/s) av 160/220 bindemedel.



Figur 31. DSR temperatursvep resultat vid 1,59 Hz (10 rad/s) av PMB.

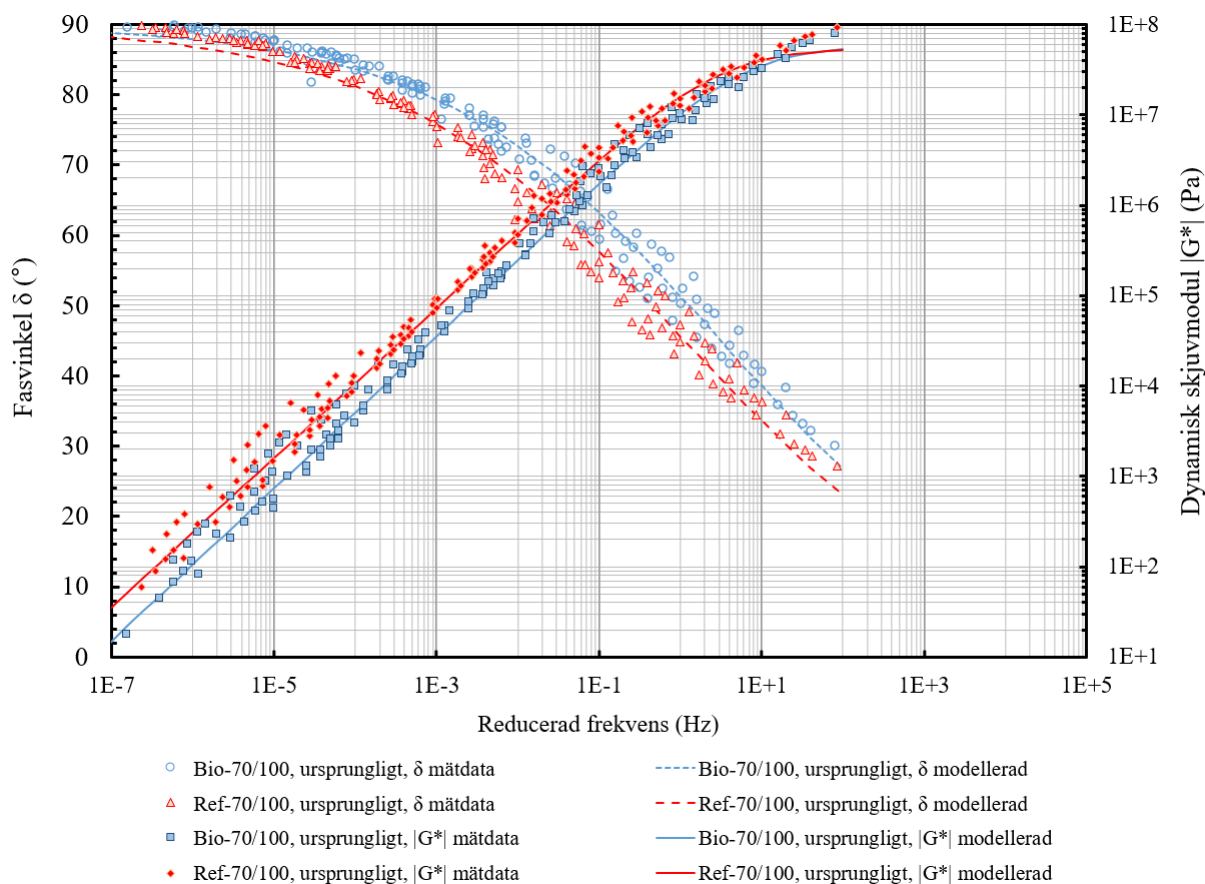
Vid minusgrader användes 4-mm DSR för att mäta de reologiska egenskaperna hos långtidsåldrade bindemedel. Figur 32 presenterar resultaten från 4-mm DSR-testet vid 1,59 Hz (10 rad/s) och olika låga temperaturer. Det framgår att, efter långtidsåldring och vid mycket låga temperaturer, visar de biobindemedlen 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.



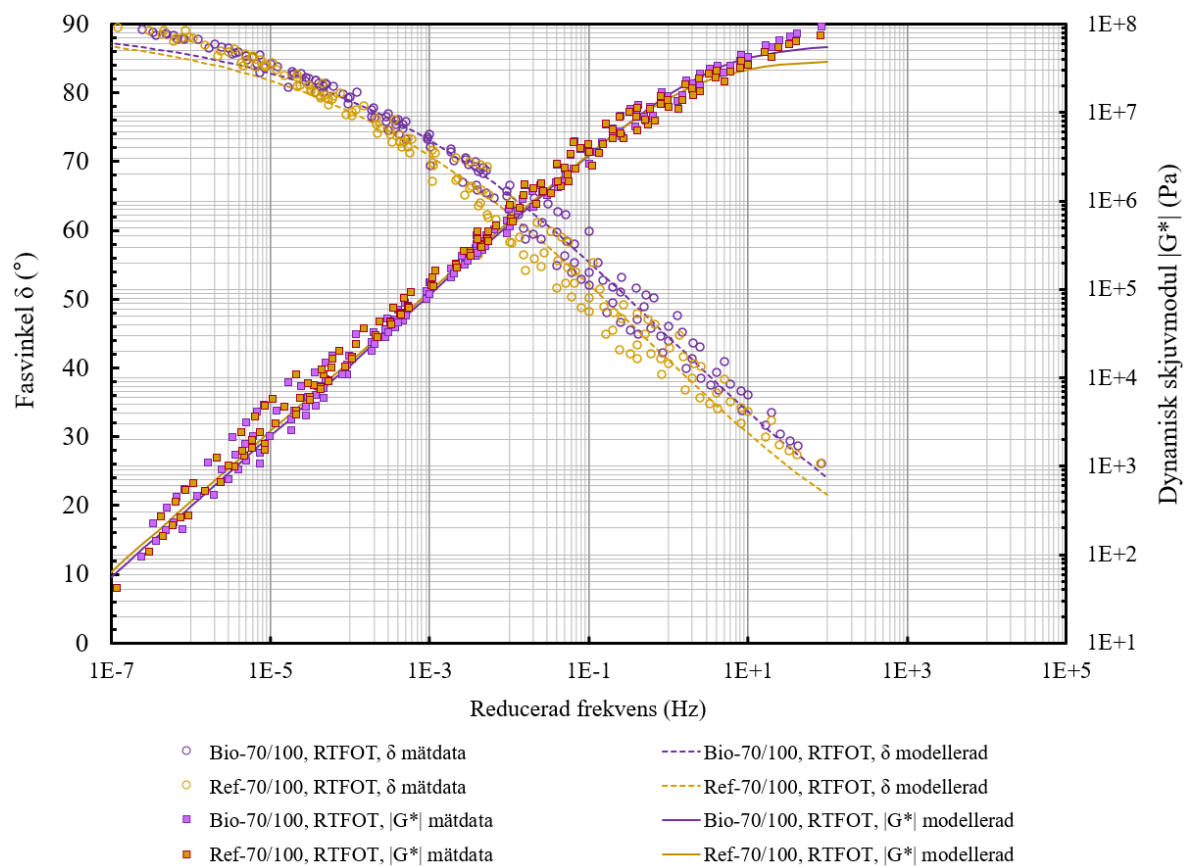
Figur 32. 4-mm DSR resultat vid 1,59 Hz (10 rad/s) av långtidsåldrade bindemedel: (a)- $|G^*|$, (b)- δ .

4.5.2. Masterkurvor för bindemedel

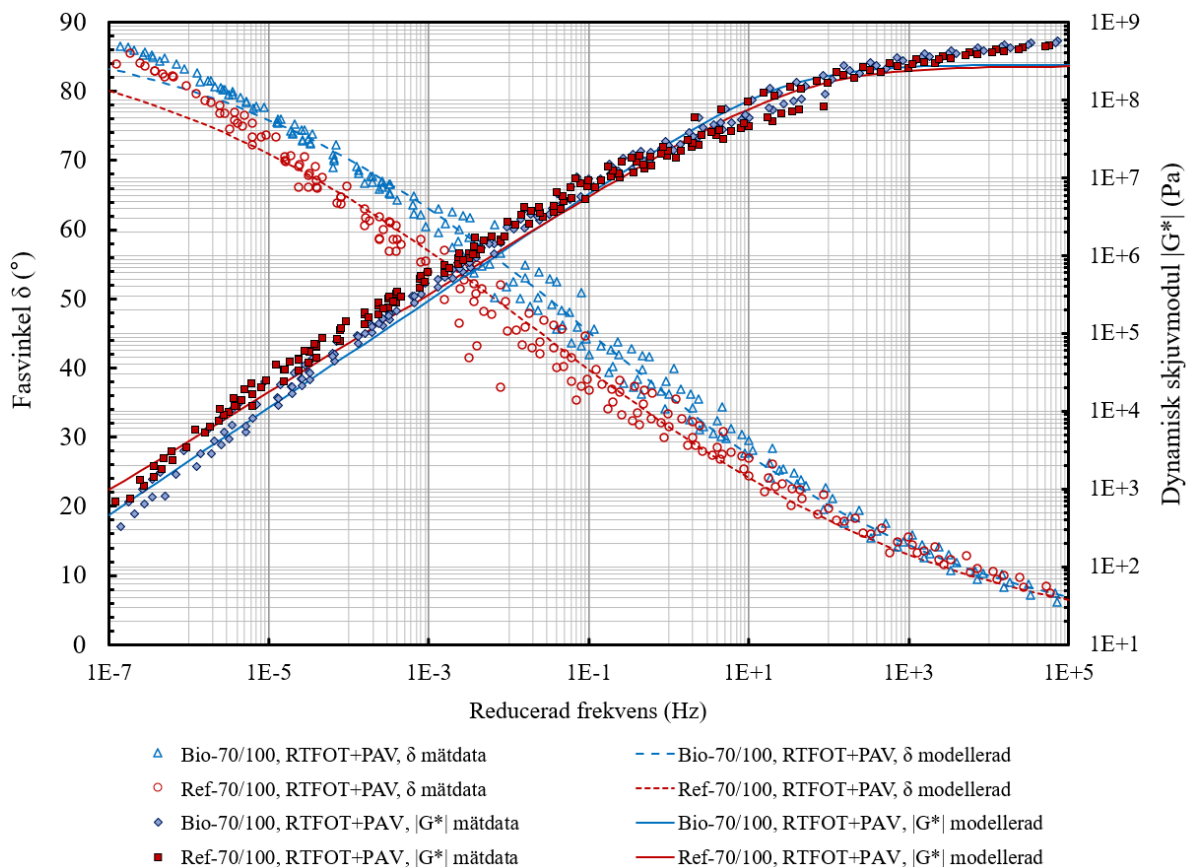
Masterkurvor används för att beskriva reologiska egenskaper hos bituminösa bindemedel över ett bredare temperatur- och frekvensområde. Dessa kurvor skapas genom att kombinera data från DSR vid olika temperaturer och frekvenser. I denna studie konstruerades masterkurvor för de undersökta bindemedlen vid referenstemperatur 10 °C och modellerades med den metod som beskrivs i VTI rapport 1084A (Zhu, Ahmed & Dinegdaie 2021). Figur 33 till Figur 41 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 38). 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.



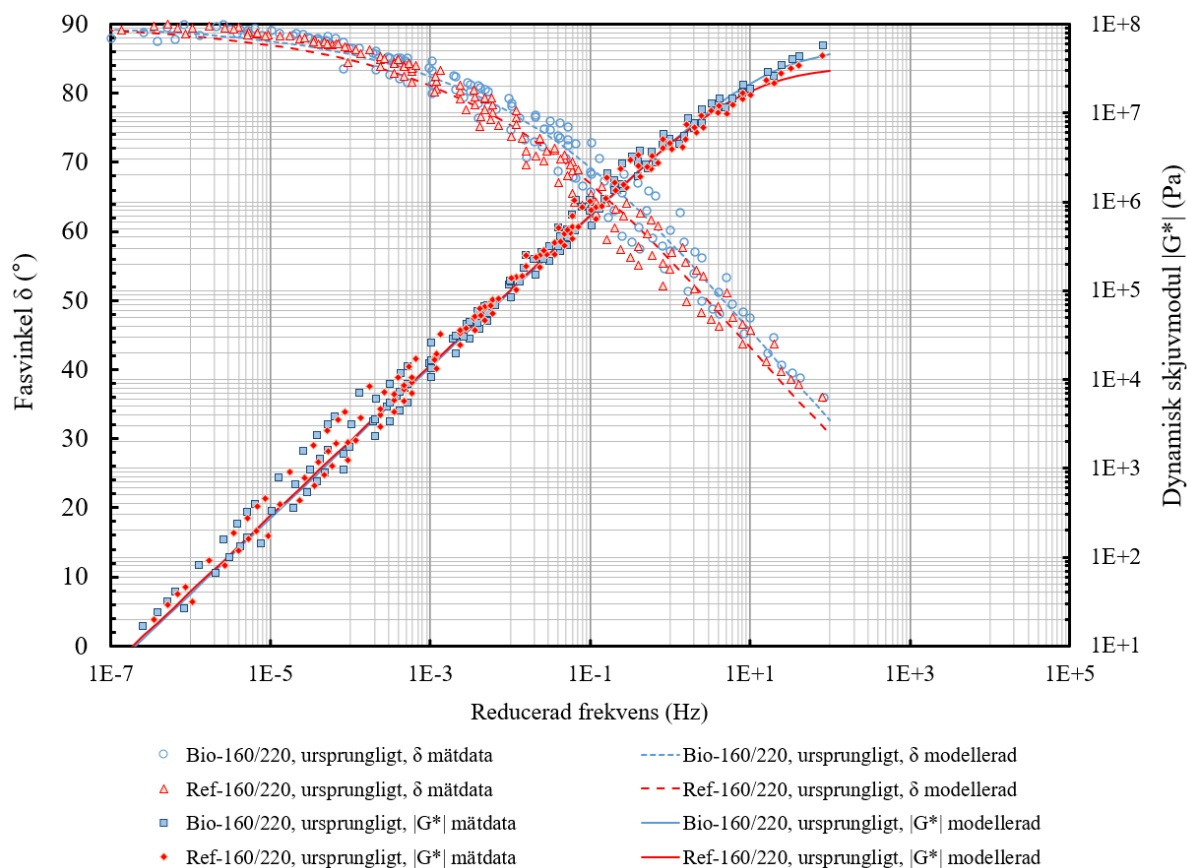
Figur 33. Masterkurvor av ursprungliga 70/100 bindemedel vid referenstemperatur 10 °C.



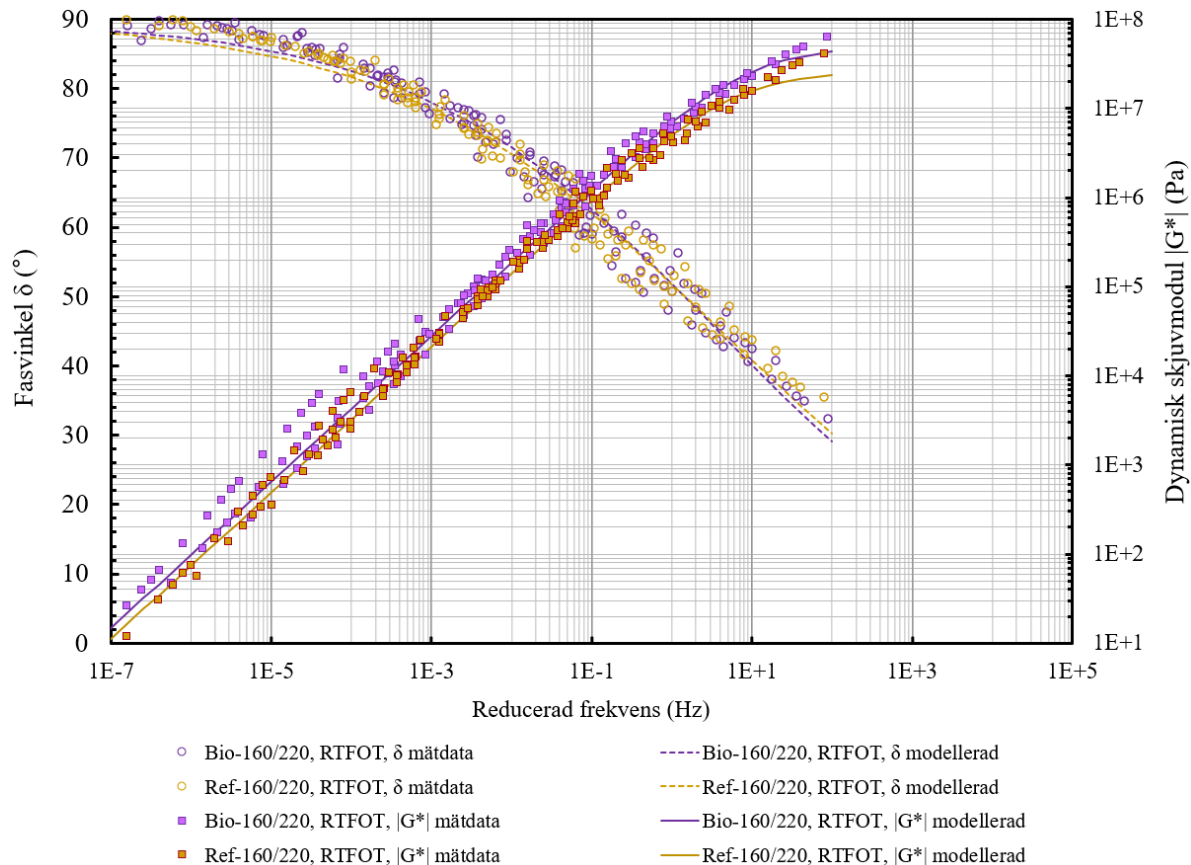
Figur 34. Masterkurvor av 70/100 bindemedel efter RTFOT vid referenstemperatur 10 °C.



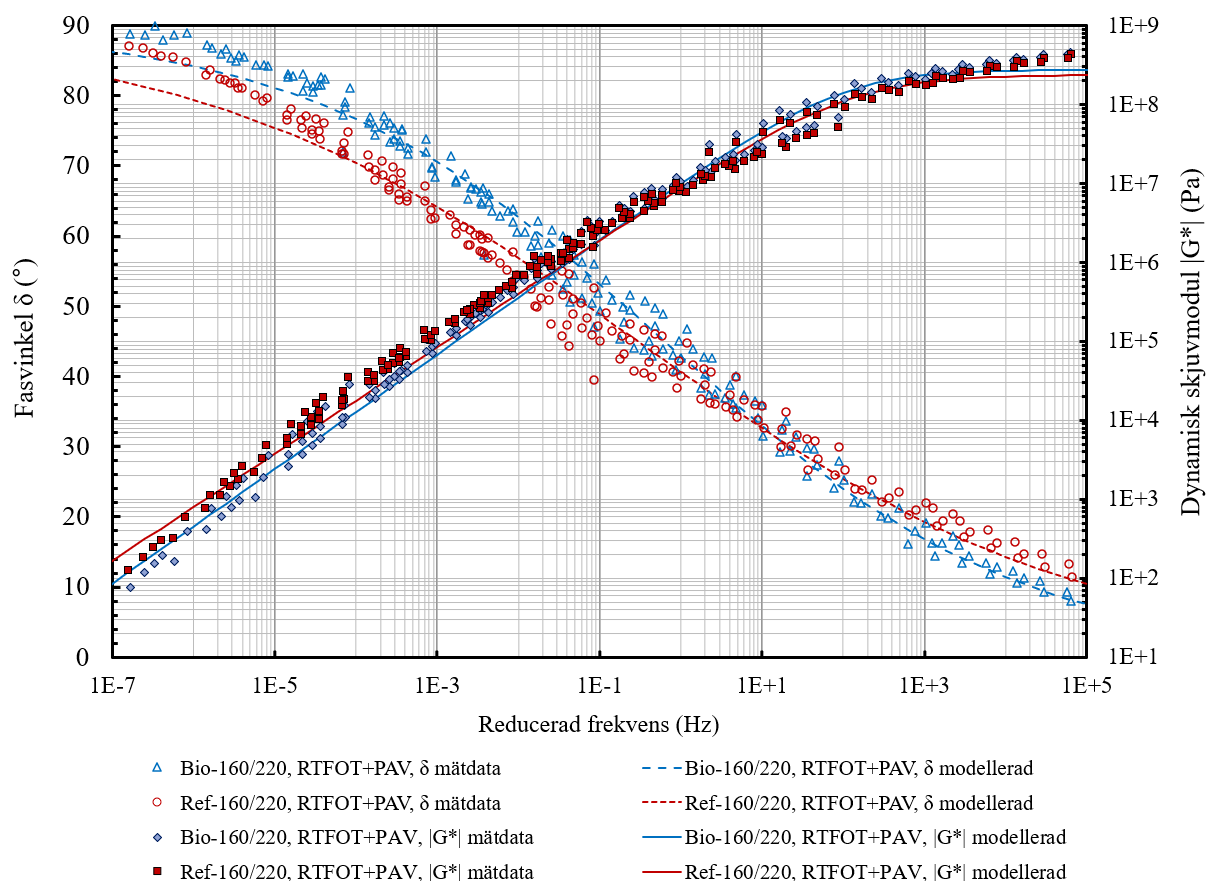
Figur 35. Masterkurvor av 70/100 bindemedel efter RTFOT+PAV vid referenstemperatur 10 °C.



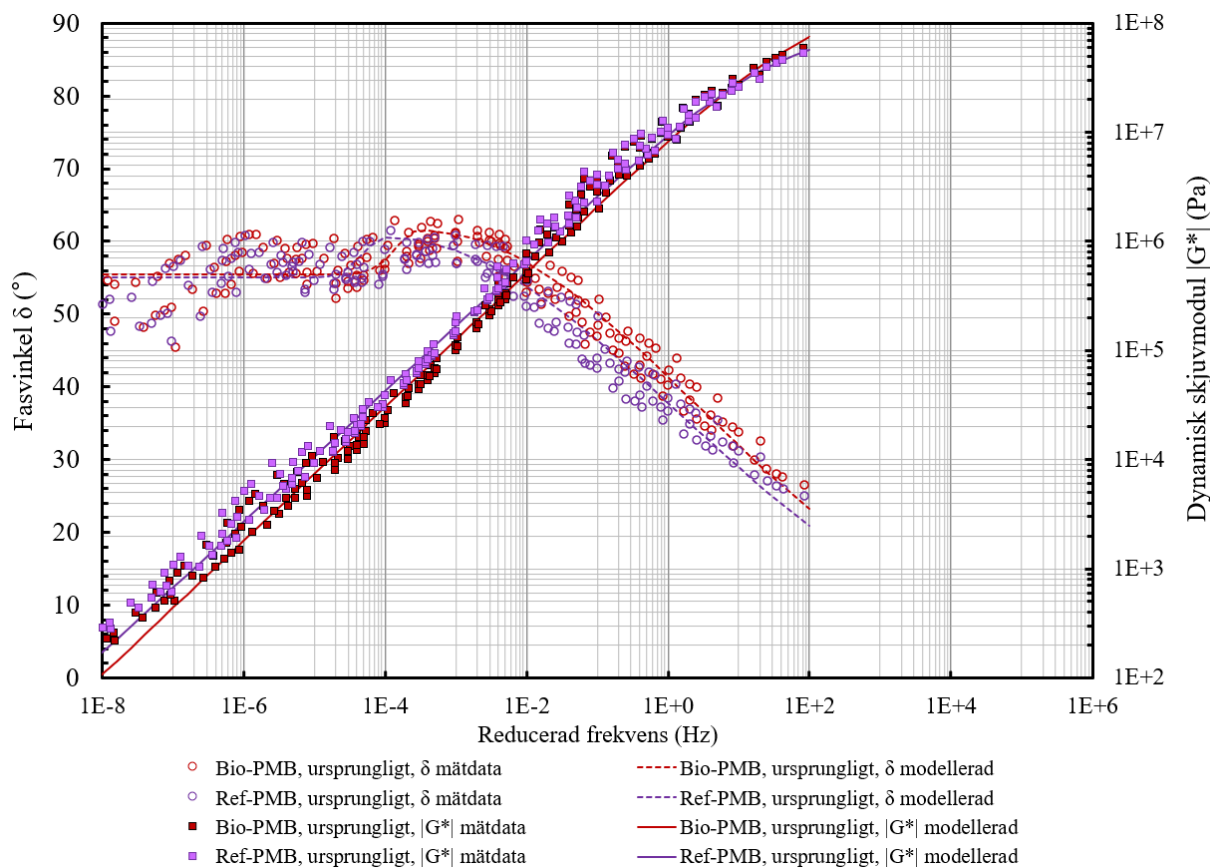
Figur 36. Masterkurvor av ursprungliga 160/220 bindemedel vid referenstemperatur 10 °C.



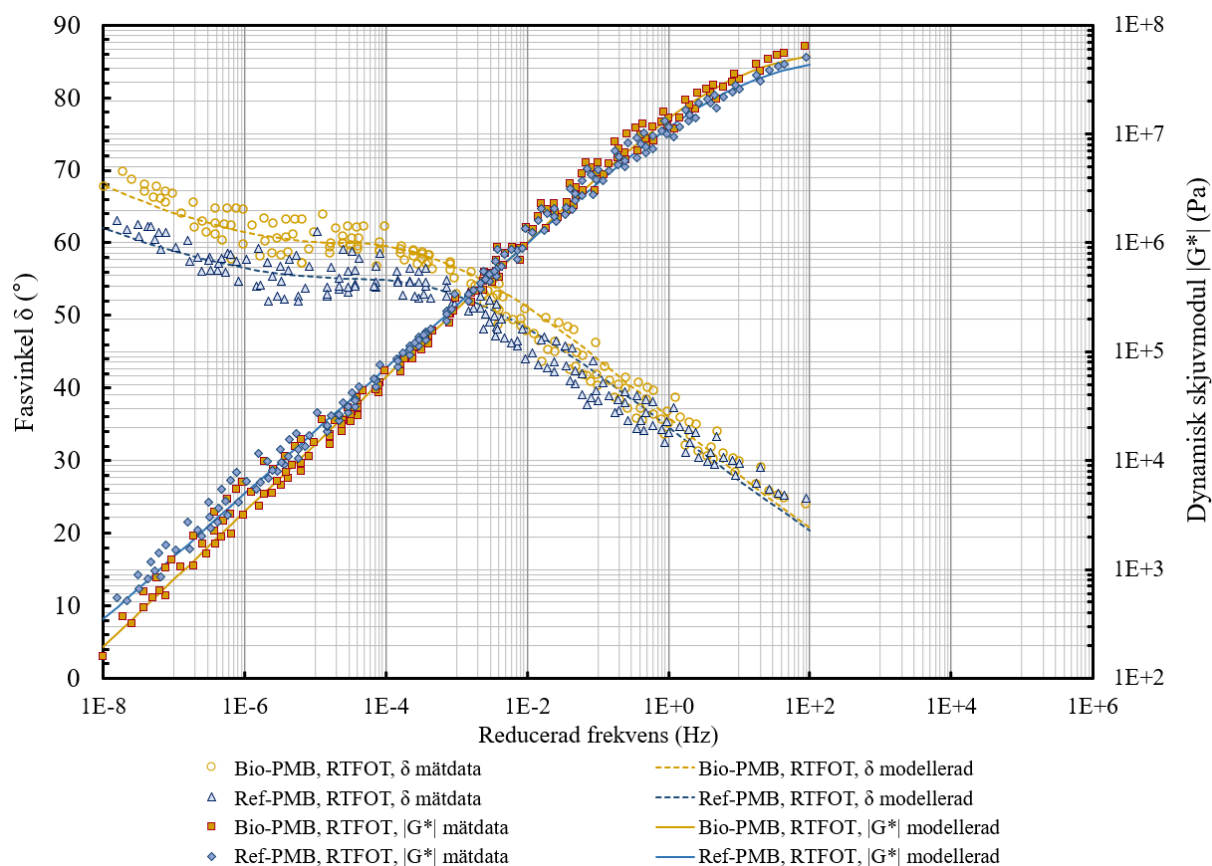
Figur 37. Masterkurvor av 160/220 bindemedel efter RTFOT vid referenstemperatur 10 °C.



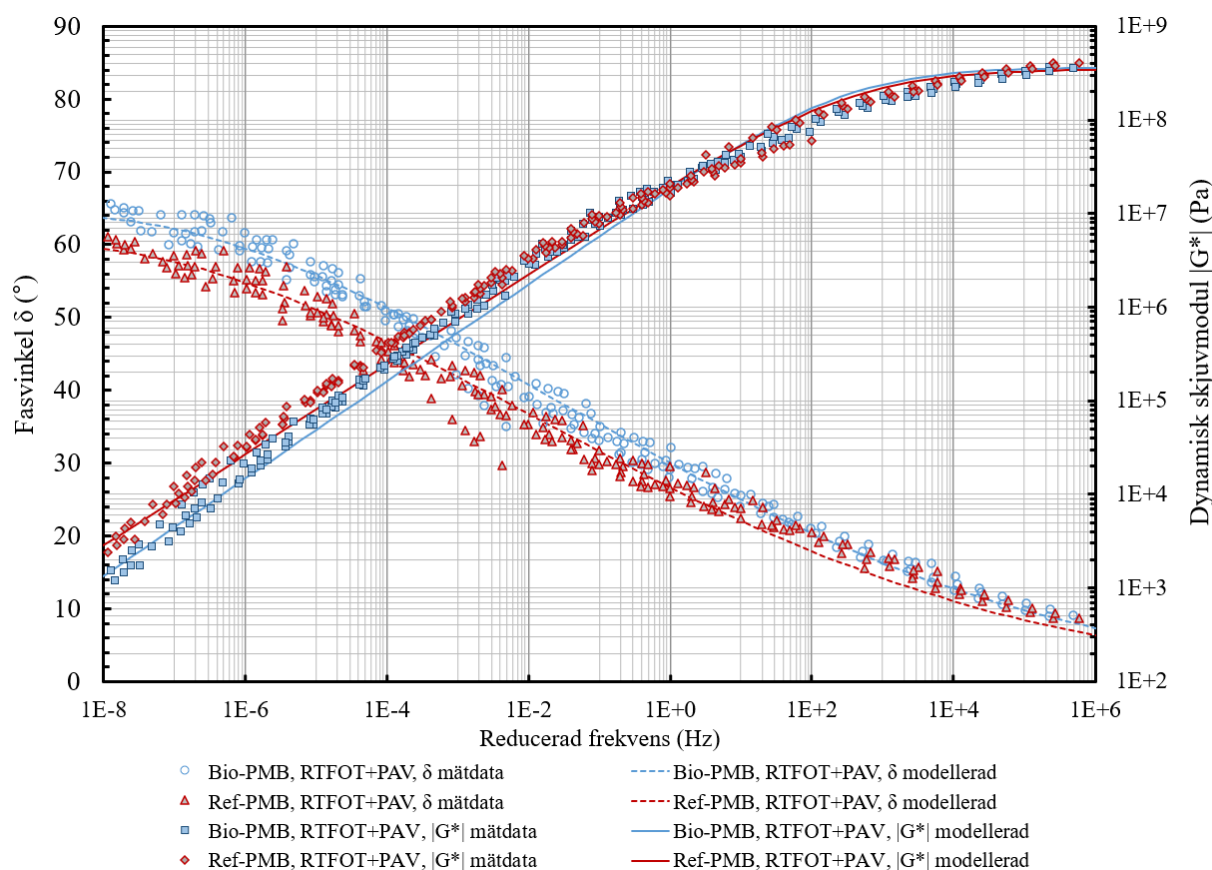
Figur 38. Masterkurvor av 160/220 bindemedel efter RTFOT+PAV vid referenstemperatur 10 °C.



Figur 39. Masterkurvor av ursprungliga PMB 40/100-75 vid referenstemperatur 10 °C.



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



Figur 41. Masterkurvor av PMB 40/100-75 efter RTFOT+PAV vid referenstemperatur 10 °C.

4.6. Långsiktiga egenskaper hos bindemedel

4.6.1. Bindemedels 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, nämligen $|G^*| \cdot \sin(\delta)$ 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, nämligen 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 långtidsåldring 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° (nämligen $G' = G''$). 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 långtidsåldring. Det framgår att, vid 1,59 Hz (10 rad/s), de biobindemedlen efter RTFOT+PAV har lägre värden för crossover-temperatur än sina respektive referensbindemedel. Detta innebär att de långtidsåldrade 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 långtidsåldring 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 Hz (10 rad/s) (°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 4–8 (första raden under rubriker). 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 BBR-testresultaten 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-krypstyvhet 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 långtidsåldring 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 utmattningskador 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, nämligen ett intervall från 1,5 till 2,5 beräknat med BBR-resultat och Ekvation 2. Resultaten i Tabell 9 (tredje raden under rubriker) 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).

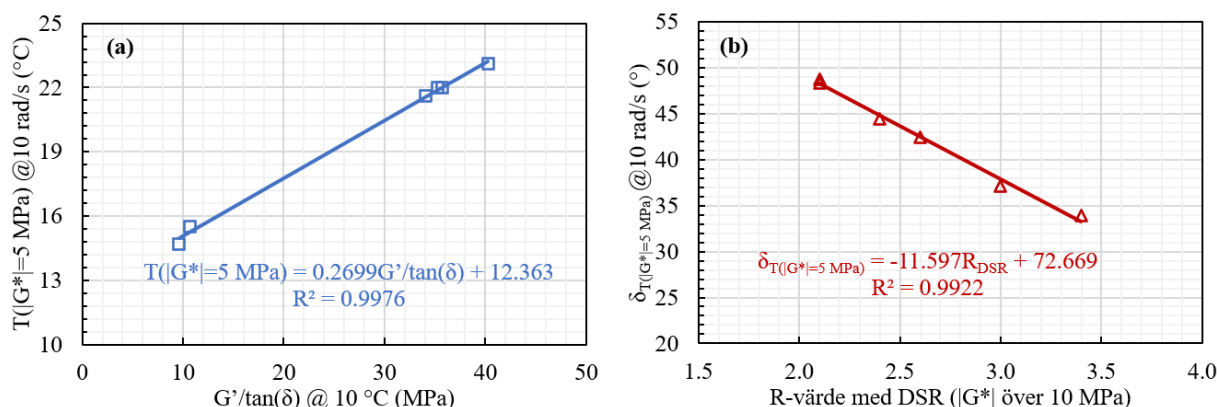
Tabell 9. Christensen-Anderson R-värde efter RTFOT+PAV bestämt med olika metoder.

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 bindemedelsutmattnings. 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 42 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.

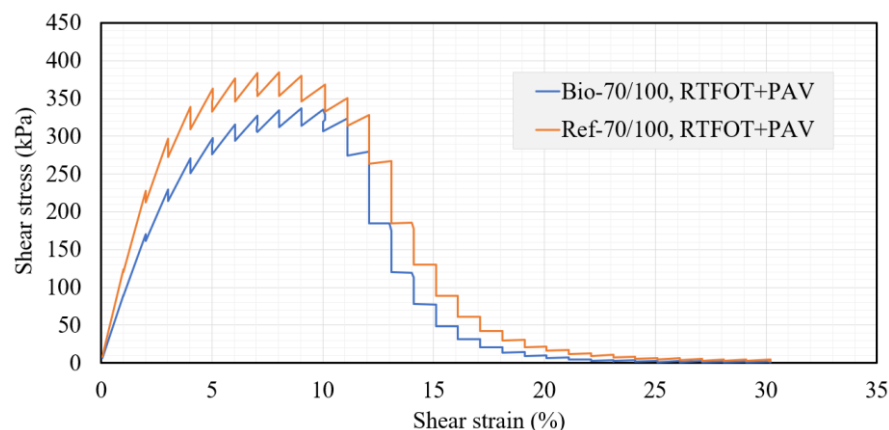
Tabell 10. Reologiska parametrar T_3 och δ_{T_3} vid 1,59 Hz (10 rad/s) efter RTFOT+PAV.

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
$\delta_{T_3}(G^* =5 \text{ MPa})$ (°)	48,4	42,4	48,8	44,5	37,1	33,9

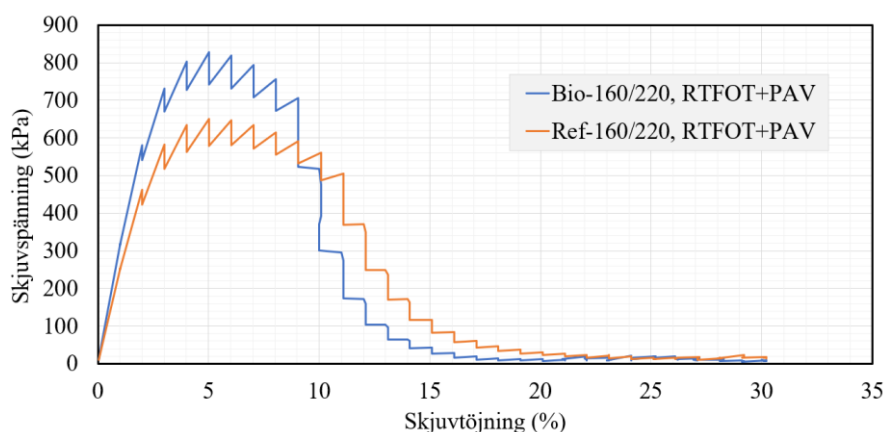


Figur 42. Samband mellan olika utmattningsparametrar inom mellantemperaturområdet efter RTFOT+PAV – (a) mellan T_3 och Glover-Rowe-parametern $G'/\tan(\delta)$ vid 10 °C; (b) mellan δ_{T3} och R-värde med DSR vid $|G^*|$ över 10 MPa.

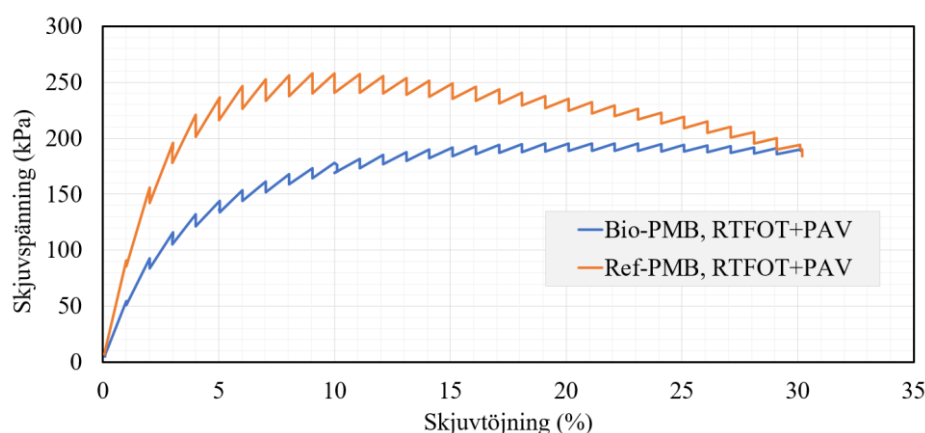
Ytterligare en ny metod för att utvärdera bindemedels utmattningsmotstånd är LAS-test enligt AASHTO T391-20. Under LAS-test genererar belastningen med DSR skjuvspännings-töjningskurvor som i Figur 43 till Figur 45 för de undersökta bindemedlen efter långtidsåldring. Vid mycket små skjuvtöjningar uppvisar 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 45) 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 43. Skjuvspännings-töjningskurvor för långtidsåldrade 70/100 bindemedel under LAS-test vid 25 °C.



Figur 44. Skjuvspännings-töjningskurvor för långtidsåldrade 160/220 bindemedel under LAS-test vid 10 °C.



Figur 45. Skjuvspännings-töjningskurvor för långtidsåldrade PMB under LAS-test vid 25 °C.

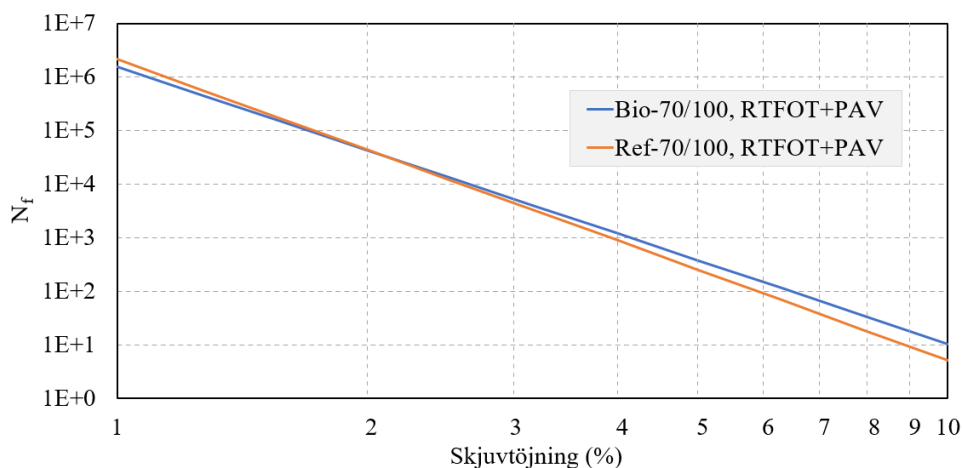
LAS-analysmallen v1.59 (utvecklad av Modified Asphalt Research Center vid University of Wisconsin-Madison, version den 26 mars 2024) användes för att beräkna utmattningsmodellens parametrar (A_{35} och B) och utmattningsparameter N_f för de bindemedlen utan polymer (70/100 och 160/220). Bindemedels brottkriterium på 35 % skada beaktades, nämligen 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.

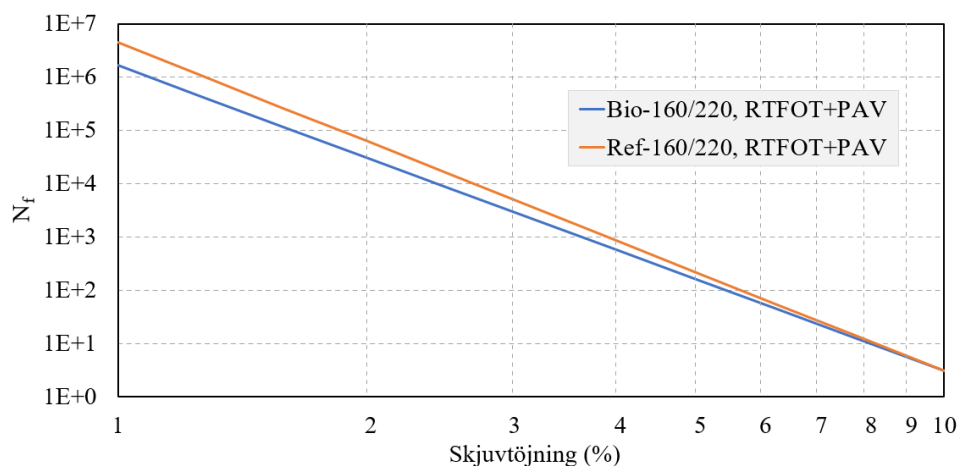
Bindemedel (efter RTFOT+PAV)	Temperatur (°C)	Parameter A_{35}	Parameter B	N_f @ 2,5 % skjuvtöjning	N_f @ 5,0 % skjuvtöjning
Bio-70/100, RTFOT+PAV	25	1.538×10^6	5,172	13457	373
Ref-70/100, RTFOT+PAV	25	2.137×10^6	5,624	12351	250
Bio-160/220, RTFOT+PAV	10	1.635×10^6	5,737	8527	160
Ref-160/220, RTFOT+PAV	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 46 och Figur 47 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 utmattningskador än referensbindemedlet vid små skjuvtöjningar.



Figur 46. Utmattningsmotstånd hos långtidsåldrade 70/100 bindemedel genom LAS-test vid 25 °C.



Figur 47. Utmattningsmotstånd hos långtidsåldrade 160/220 bindemedel genom LAS-test vid 10 °C.

4.6.2. 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 bindemedlets 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).

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

I Ekvation 3:

$G(t)$ – skjuvspänningsrelaxationsmodul;

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

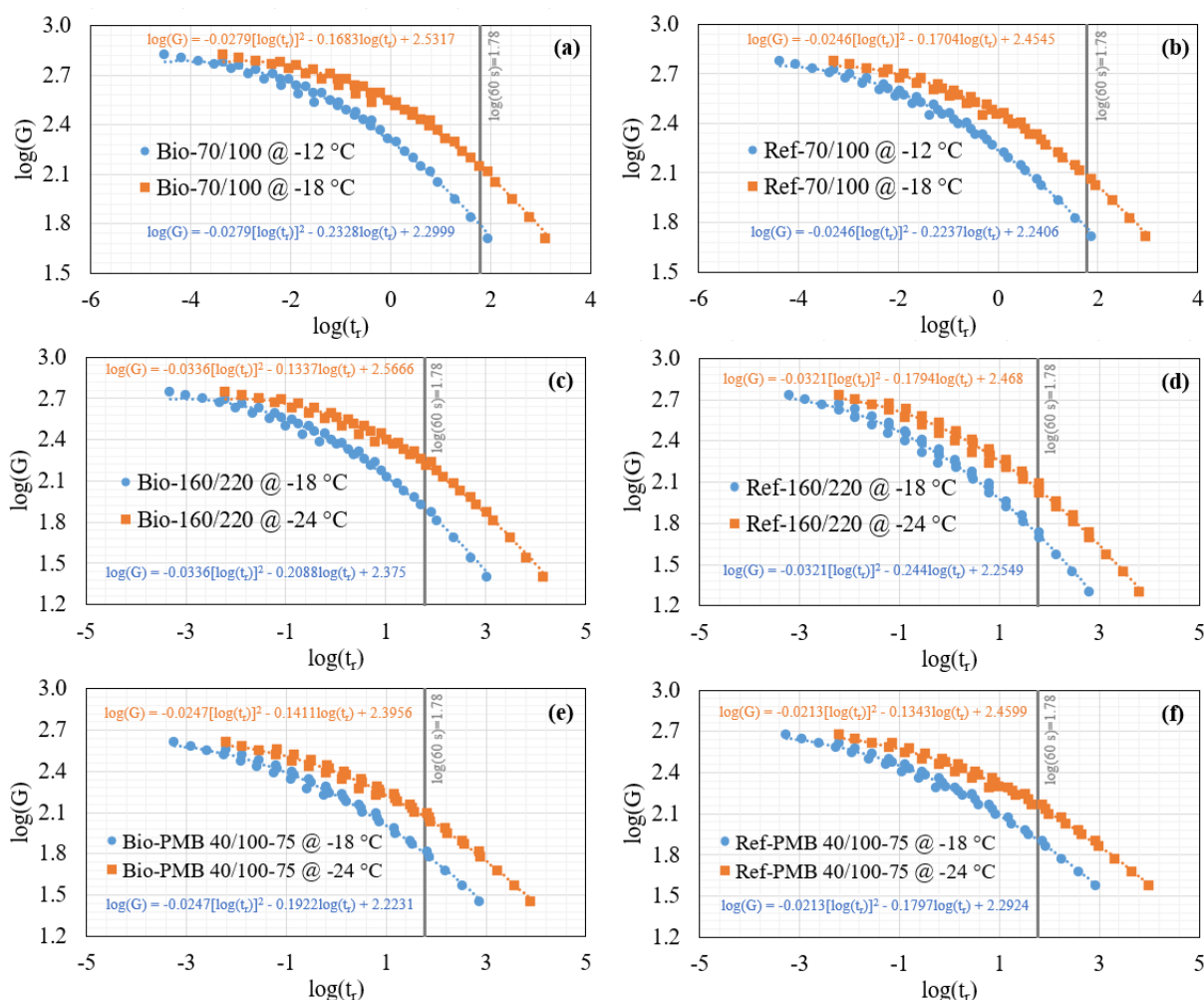
ω är vinkelfrekvens i rad/s; och

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 48 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, nämligen $G(60\text{ s})$ 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.

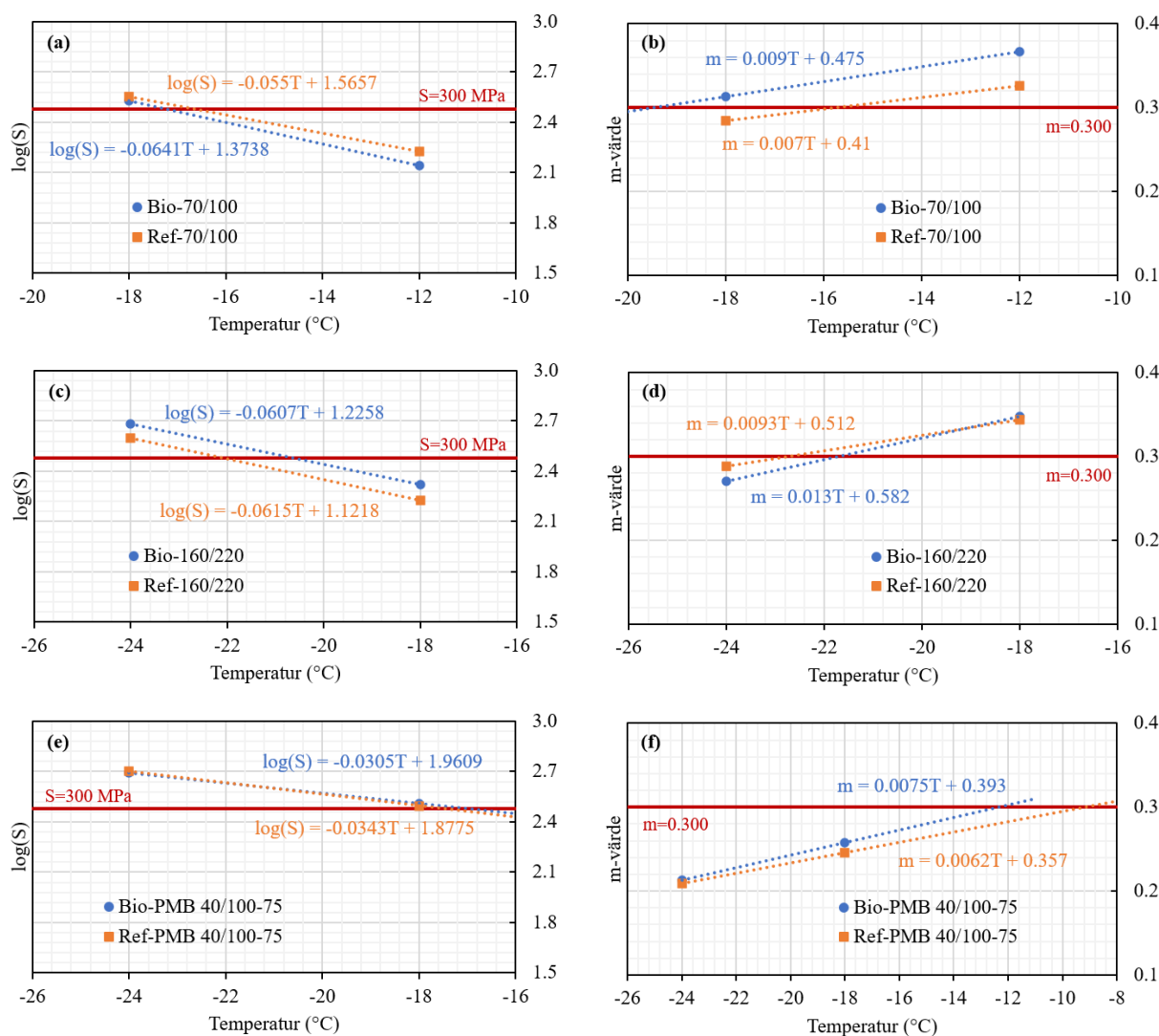
Bindemedel (efter RTFOT+PAV)	Bio-70/100	Ref-70/100	Bio-160/220	Ref-160/220	Bio-PMB 40/100-75	Ref-PMB 40/100-75
G(60 s) vid $T_{ref} = -12\text{ °C}$ (MPa)	62,8	58,2	N/A	N/A	N/A	N/A
$m_r(60\text{ s})$ vid $T_{ref} = -12\text{ °C}$	0,332	0,311	N/A	N/A	N/A	N/A
G(60 s) vid $T_{ref} = -18\text{ °C}$ (MPa)	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 48. 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 49 visar BBR-resultat för de undersökta bindemedlen efter långtidståldring. Varje bindemedel analyserades vid två olika låga temperaturer. Genom interpolation eller extrapolation kan de kritiska temperaturerna beräknas, inklusive T_{cs} vid vilken krypstyvhet 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 49. 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.

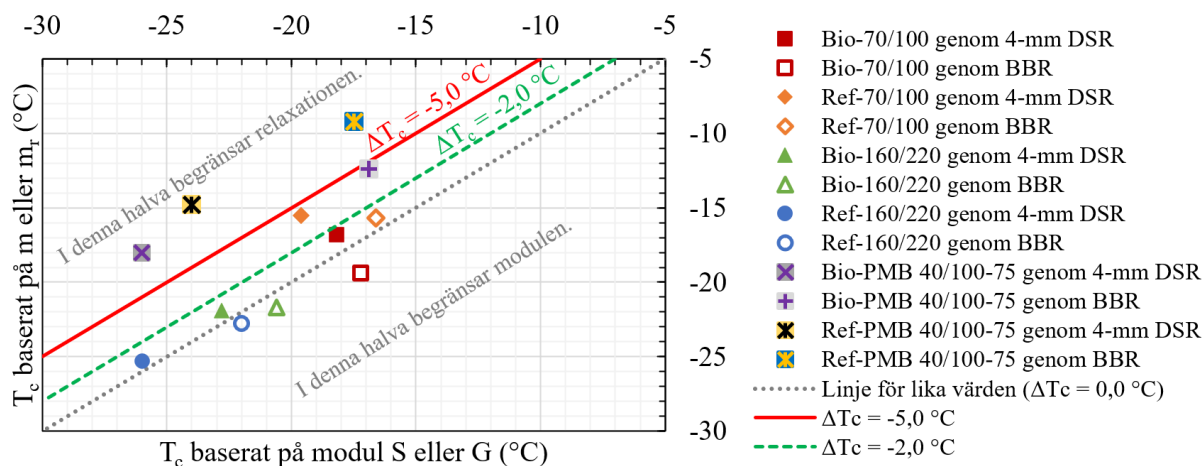
Tabell 13. Kritiska temperaturer genom BBR vid 60 s och ΔT_c efter RTFOT+PAV.

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} @ $S=300$ MPa (°C)	-17,2	-16,6	-20,6	-22,0	-16,9	-17,5
T_{cm} @ m -värde=0,300 (°C)	-19,4	-15,7	-21,7	-22,8	-12,4	-9,2
$\Delta T_c = T_{cs} - T_{cm}$ (°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 ($\geq -2,0$ °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 50 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 50. Jämförelse av kritiska temperaturer och ΔT_c med olika metoder (alla bindemedel efter RTFOT+PAV).

4.6.3. 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:

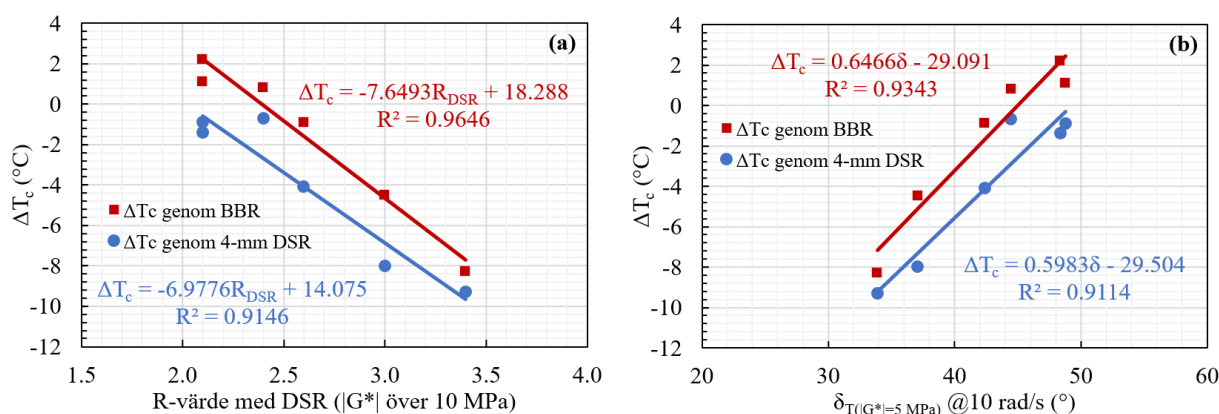
- Utmattningskriteriet för mellantemperatur baserat på $|G^*| \cdot \sin(\delta)$ enligt ASTM D6373-23 och AASHTO M 320-23, max 5000 kPa vid 10 rad/s;
- Det nya utmattningskriteriet baserat på Glover-Rowe-parametern $G'/\tan(\delta)$, max 5000 kPa vid 10 rad/s som föreslagits av Christensen och Tran (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 51(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 42(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 51(b).



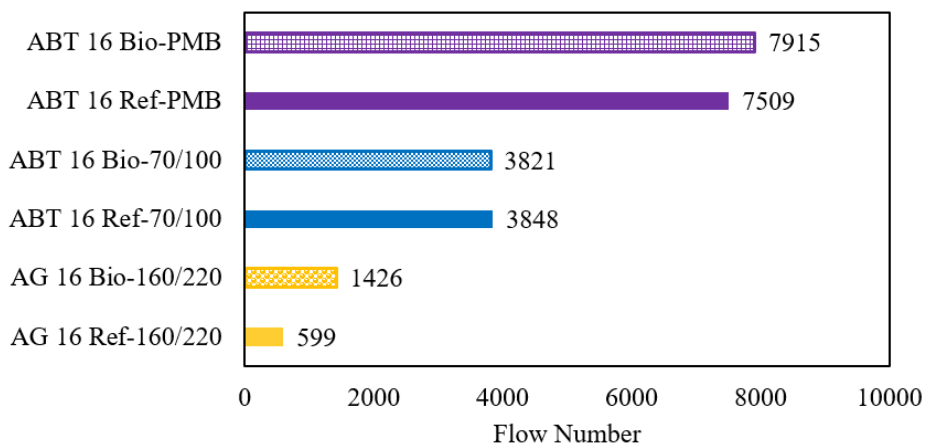
Figur 51. Samband mellan olika sprickindikatorer efter RTFOT+PAV – (a) ΔT_c mot R-värde genom DSR vid $|G^*|$ över 10 MPa; (b) ΔT_c mot δ_{T3} .

5. Långtidseffekter av biobindemedel i asfalt

5.1. Egenskaper hos nytillverkade asfaltmassor

5.1.1. Stabilitetsegenskaper

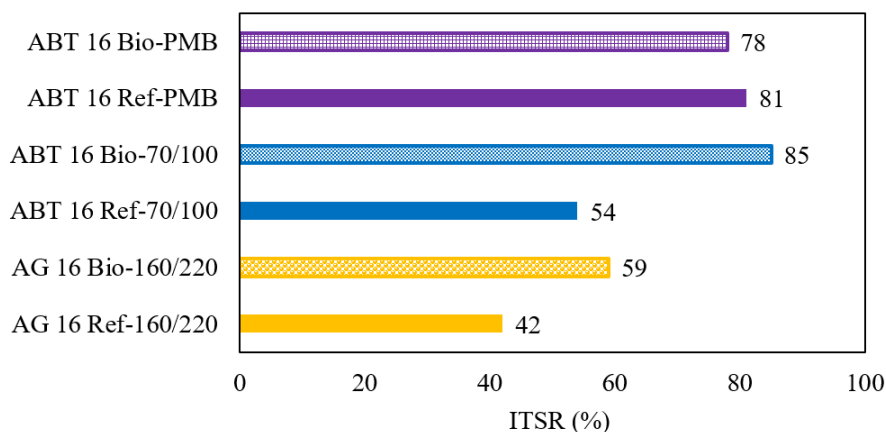
Stabilitet hos alla sex asfaltmassor undersöktes med dynamiska triaxialförsök. Se Bilaga 3 för mer information om metoden. Figur 52 visar resultat på Flow Number (FN), nämligen antal lastcykler där materialet övergår från den linjära fasen (secondary flow) till accelerationsfasen (tertiary flow), hos 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.



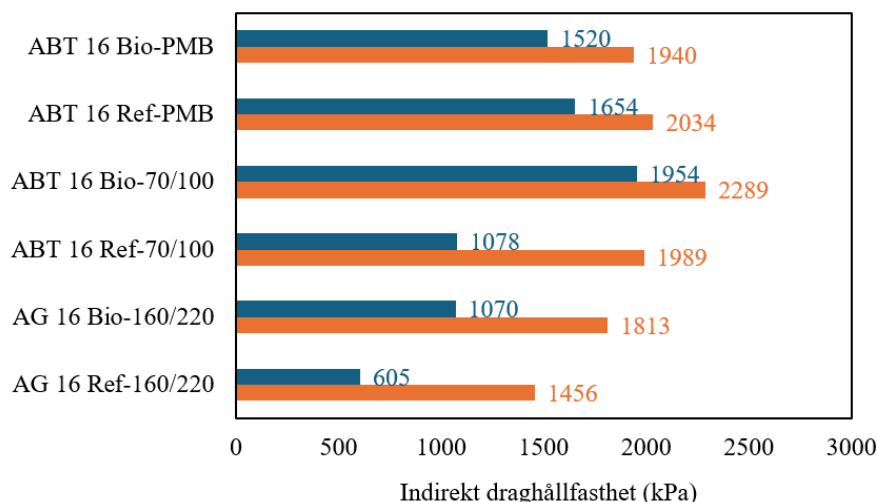
Figur 52. Flow Number hos nytillverkade asfaltmassor vid 50 °C.

5.1.2. Vattenkänslighet

Vattenkänslighet hos asfaltmassorna utvärderades genom att bestämma deras ITSR-värden enligt TDOK 2017:0650 version 2.0. Se Bilaga 4 för provningsrapporter för ITSR. Figur 53 visar resultat hos de nytillverkade asfaltmassorna. 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. För dessa tre massor visar resultat på indirekt draghållfasthet (se Figur 54) 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.



Figur 53. ITSR-värden hos nytillverkade asfaltmassor enligt TDOK 2017:0650 version 2.0.

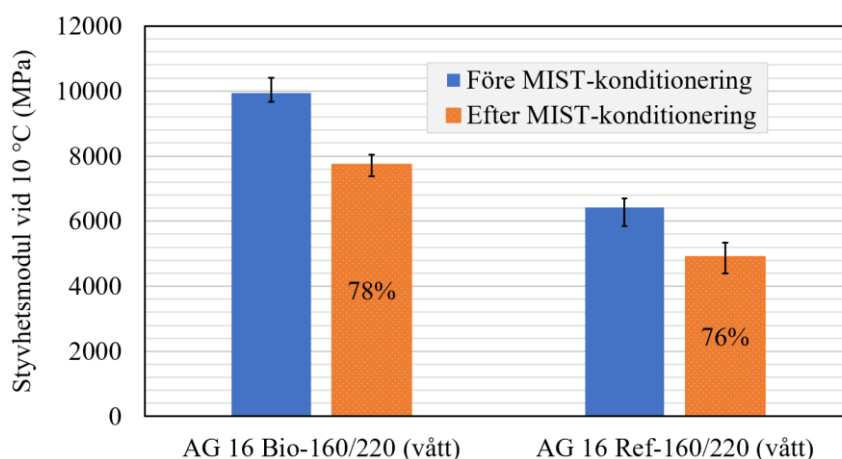


Figur 54. Indirekt draghållfasthet hos nytillverkade asfaltmassor vid 10 °C enligt TDOK 2017:0650 version 2.0 (se Bilaga 4 för enskilda resultat och övrig information om ITSR-analysen).

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 6) 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 som 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). 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 55.



Figur 55. 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 56. 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.

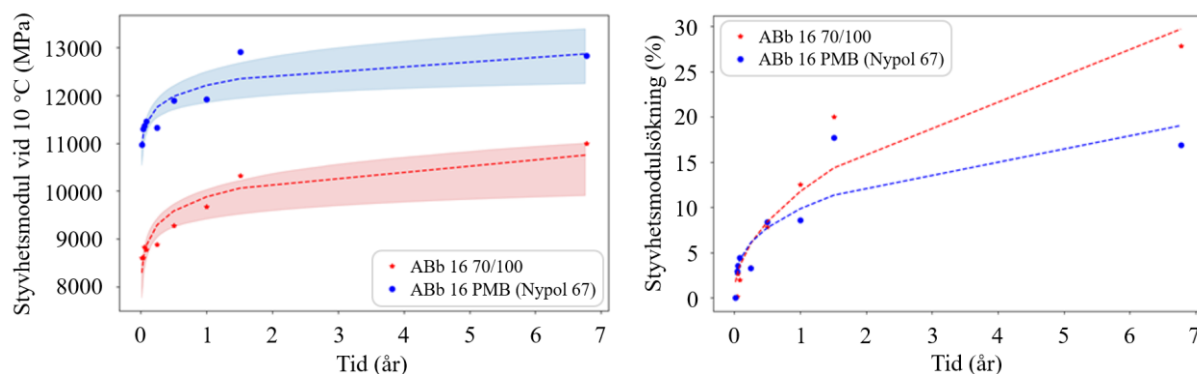


Figur 56. Provkroppar (AG 16-asfaltmassor med 160/220 bindemedel) efter MIST-konditioneringen.

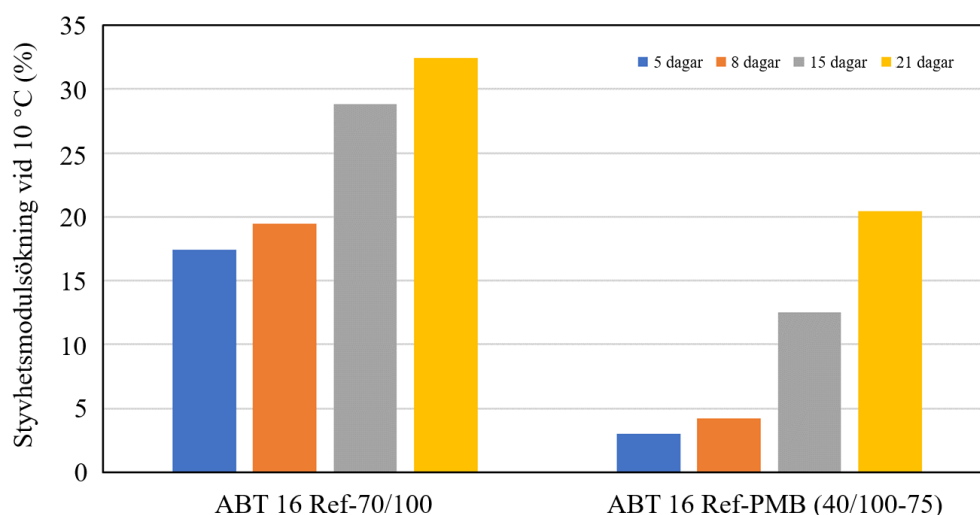
5.2. Laboratorieåldring av asfaltmassor

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 57 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 57 (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 57. Styvhetsmoduls utveckling över tid för två typer av asfaltmassor under en period av cirka 7 år (färgskuggade områden indikerar 95 % konfidensintervall).



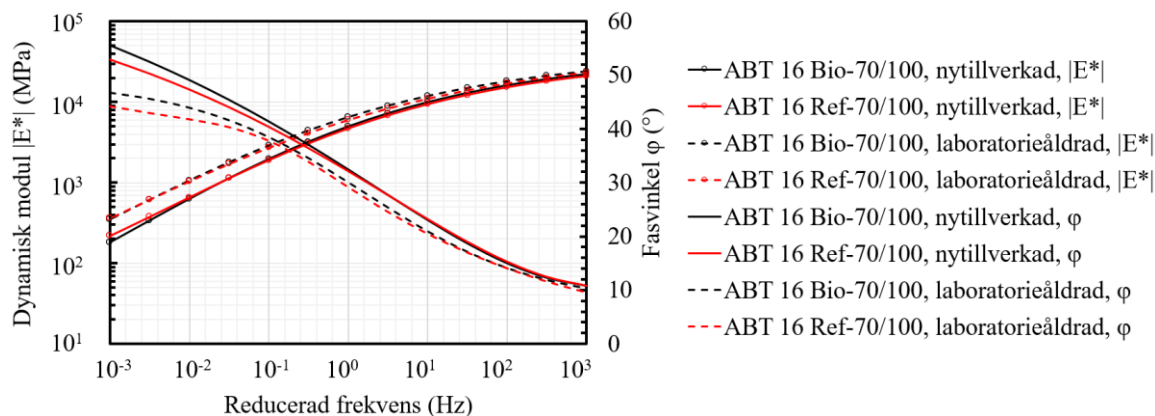
Figur 58. Styvhetsmodulsökning över tid, d.v.s. antal dagar då packade provkroppar konditionerades i en ugn vid 65 °C.

Figur 57 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 58 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 av de packade provkropparna vid 65 °C resulterade i nivåer av styvhetsmodulökning nära de i Figur 57.

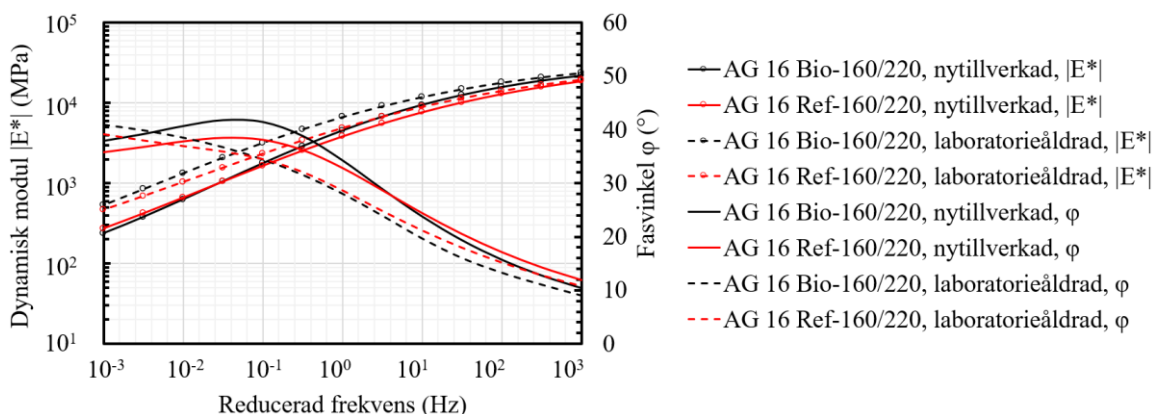
5.3. Styvhetsmodul och fasvinkel

5.3.1. Masterkurvor för asfalt

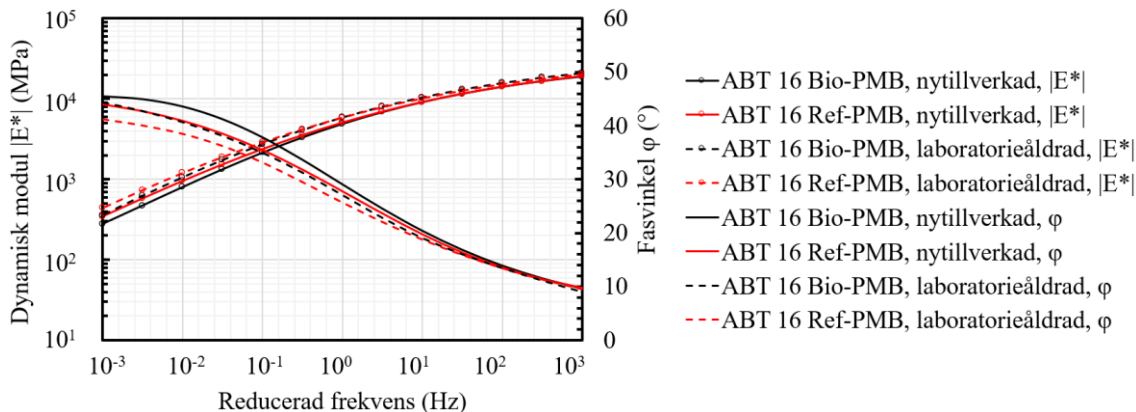
Både före och efter laboratorieåldringen analyserades de undersökta asfaltmassorna för dynamisk modul $|E^*|$ och fasvinkel φ vid olika temperaturer och frekvenser genom en cyklisk indirekt dragprovning på cylindriska provkroppar (100 mm diameter och 50 mm tjocklek) enligt SS-EN 12697-26:2018+A1:2022 Bilaga F. Därefter konstruerades deras masterkurvor vid referenstemperatur 10 °C, som visas i Figur 59 till Figur 61.



Figur 59. Masterkurvor för dynamisk modul $|E^*|$ och fasvinkel φ hos ABT 16-asfaltmassor innehållande 70/100 bindemedel vid referenstemperatur 10 °C.



Figur 60. Masterkurvor för dynamisk modul $|E^*|$ och fasvinkel φ hos AG 16-asfaltmassor innehållande 160/220 bindemedel vid referenstemperatur 10 °C.



Figur 61. Masterkurvor för dynamisk modul $|E^*|$ och fasvinkel φ hos ABT 16-asfaltmassor innehållande PMB (40/100-75) vid referenstemperatur 10 °C.

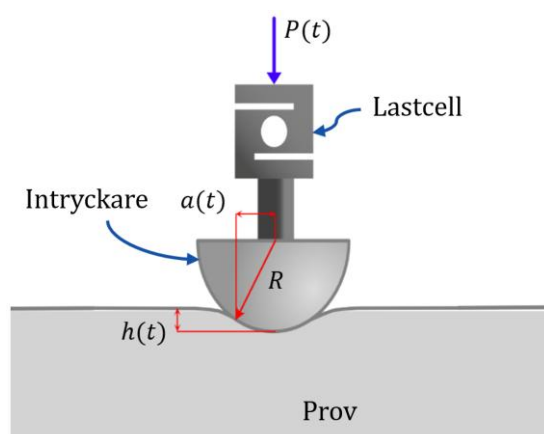
Vid låga frekvenser (motsvarande höga temperaturer) har asfaltmassorna innehållande biobindemedel högre ϕ -värden än sina referensmassor. Vid mycket höga frekvenser (motsvarande mycket låga temperaturer) leder dock de biobindemedlen till lägre ϕ -värden hos asfaltmassorna än referensbindemedlen, särskilt 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.

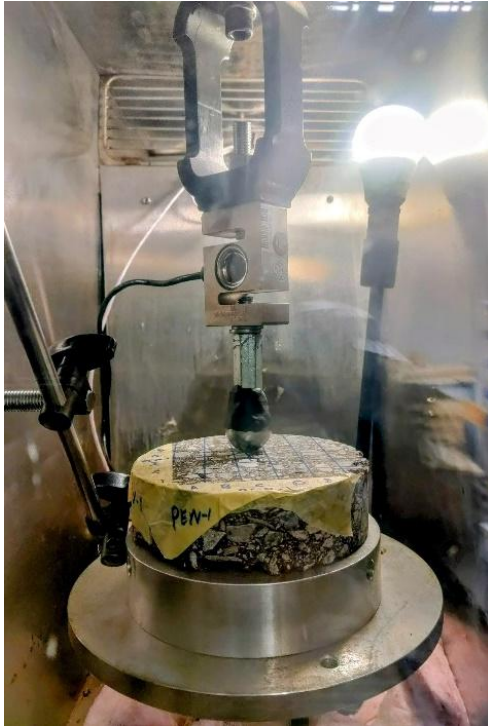
5.3.2. Styvhet genom intryckning

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 62, tillsammans med testparametrarna. Ett foto av apparaten för att utföra intryckningstestet visas i Figur 63. 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 62. Schematisk bild av intryckningstest.



Figur 63. 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 62); 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;

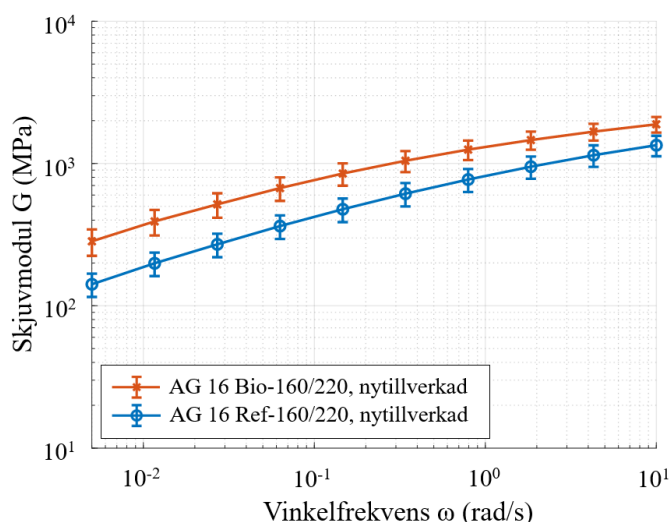
G_i – skjuvspänningsrelaxationsmodul för gren nummer i ; och

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 62. 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.

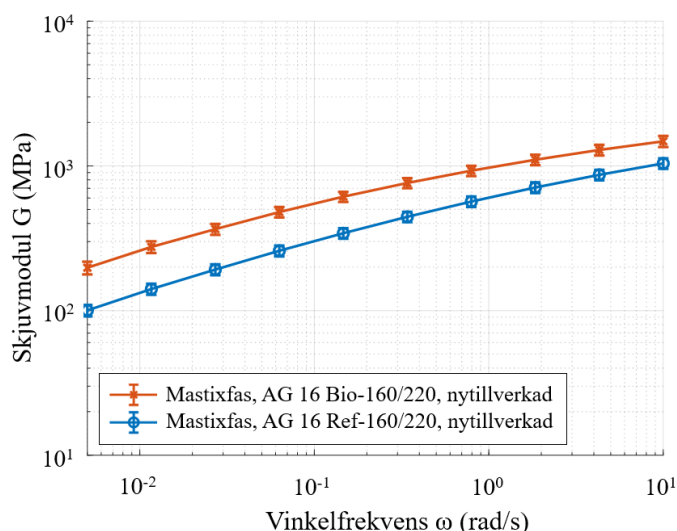
I denna studie utfördes intryckningstest för att analysera de nytillverkade asfaltmassorna med 160/220 bindemedel. Provningarna utfördes på provkroppar med en diameter på 150 mm. Provytorna förbereddes genom att skära bort cirka 5 mm från varje sida. Provkropparna hade en slutlig tjocklek på 37–40 mm. 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 4.5.2 och 5.3.1. I Figur 64 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 60, där referenstemperaturen är högre (10 °C).



Figur 64. Genomsnittliga $G(\omega)$ -resultat för asfaltmassor genom intryckningstest vid 0 °C.

I Figur 65 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 37 vid en högre referenstemperatur, 10 °C. Detta visar att den högre modulen hos den nytillverkade asfaltmassan innehållande Bio-160/220 bindemedel i Figur 64 beror på den högre modulen hos dess mastixfas, vilket i sin tur sannolikt beror på den högre modulen hos dess bindemedel inom mätområdet.

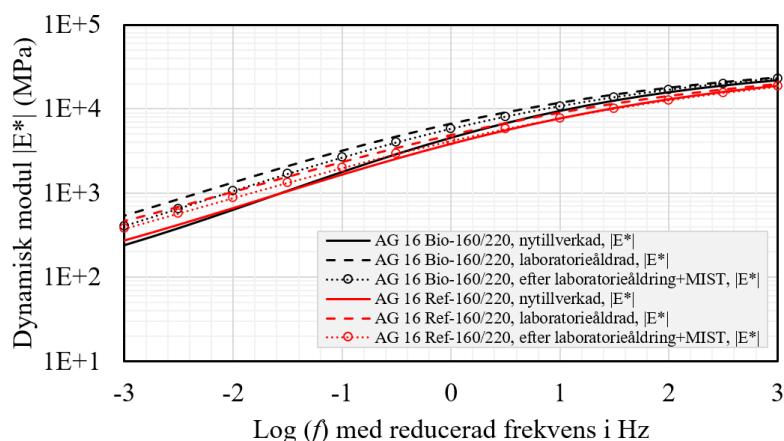


Figur 65. Genomsnittliga $G(\omega)$ -resultat av de mastixdominerade mätningarna i intryckningstestet vid 0 °C.

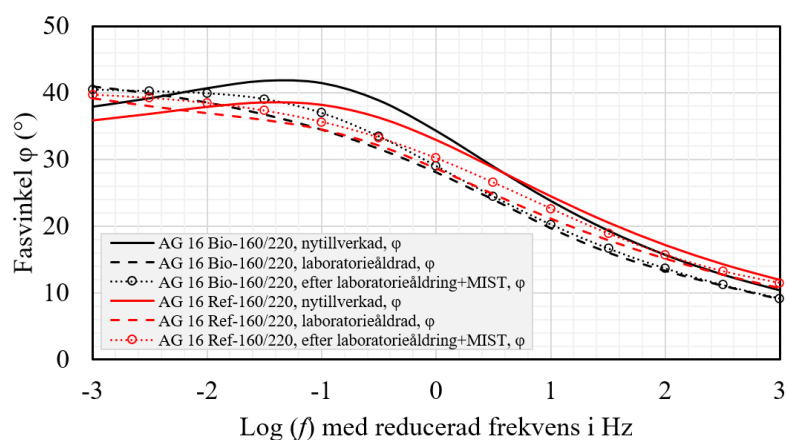
5.4. Kombinerade effekter av åldring och vatten

Eftersom både åldring och vatten kan påverka mekaniska egenskaper hos asfaltmassor, utvärderades deras kombinerade effekter genom dynamiska mekaniska analyser. Figur 66 och Figur 67 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 (nämligen en förstyvande effekt) i nästan hela det analyserade frekvensområdet.

När det gäller fasvinkel ϕ (Figur 67), 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 66. Masterkurvor för dynamisk modul $|E^*|$ hos AG 16-asfaltmassor innehållande 160/220 bindemedel vid referenstemperatur 10 °C.



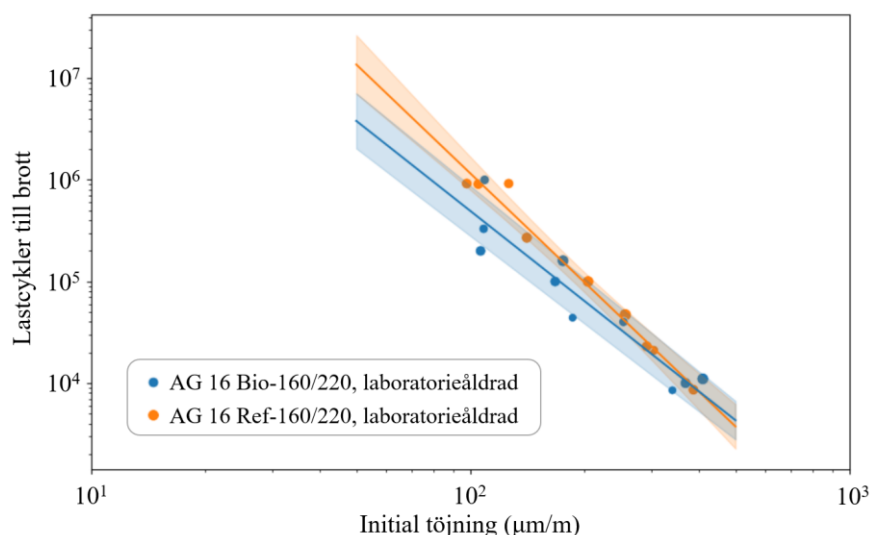
Figur 67. Masterkurvor för fasvinkel ϕ hos AG 16-asfaltmassor innehållande 160/220 bindemedel vid referenstemperatur 10 °C.

5.5. Utmattnings- och sprickegenskaper

5.5.1. 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). Anledningen till att analysera dessa asfaltmassor var att de brukar utsättas för högre risk för utmattningskador i asfaltbärlager och bindemedelsanalyser genom LAS-test (se Figur 47) hade väckt frågor om biobindemedels inverkan på utmattningsmotståndet. Provningsresultaten visas i Figur 68.

Resultaten för utmattningssegenskaper hos asfaltmassorna överensstämde väl med resultaten från bindemedelsanalys i Figur 47. Vid 10 °C och små töjningar (dragtöjningar för asfaltmassor) verkade den åldrade AG 16-massan med Bio-160/220 bindemedel vara mindre motståndskraftig mot utmattningskador än den med Ref-160/220. I Figur 68 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 68. Utmattningsmotstånd hos de åldrade AG 16-asfaltmassorna innehållande 160/220 bindemedel vid 10 °C (färgskuggade områden representerar 95 % konfidensintervall).

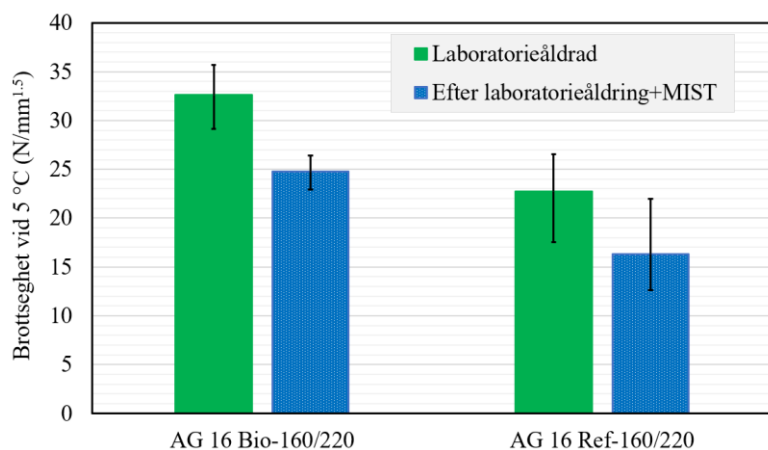
En kritisk faktor som påverkar utmattningsmotståndet hos asfaltmassa är modulen. Att öka asfaltmassans modul minskar utmattningsmotståndet (Sudarsanan & Kim 2022). Tabell 14 listar styvhetsmodulen för AG 16-massorna vid 10 °C före och efter laboratorieåldringen. Det framgår att AG 16-massan (i torrt 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 68.

Tabell 14. 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

5.5.2. Sprickpropagering

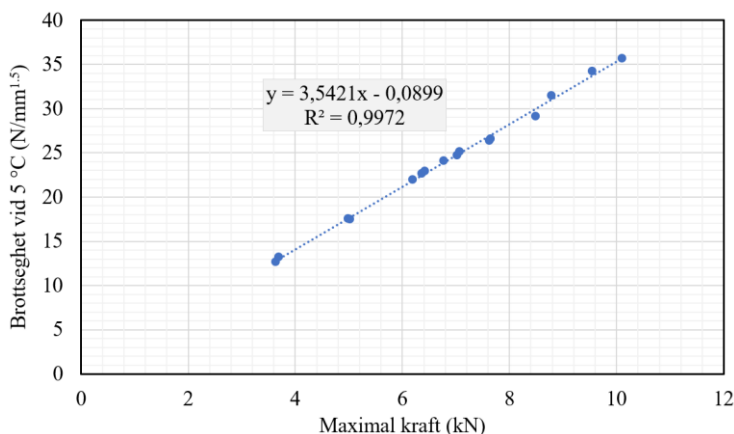
De åldrade AG 16-massorna innehållande 160/220 bindemedel analyserades även för sprickpropageringspotential vid 5 °C enligt SS-EN 12697-44:2019 (böjprovning på halvcirkulära provkroppar, SCB-test). Dessutom konditionerades några åldrade provkroppar ytterligare med MIST och dessa provkroppar analyserades 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 ett centralt notch. 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 69.



Figur 69. Brottseghet hos AG 16-asfaltmassor innehållande 160/220 bindemedel vid 5 °C (felstaplar indikerar max/min-värden).

Beräkningsresultaten i Figur 69 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.

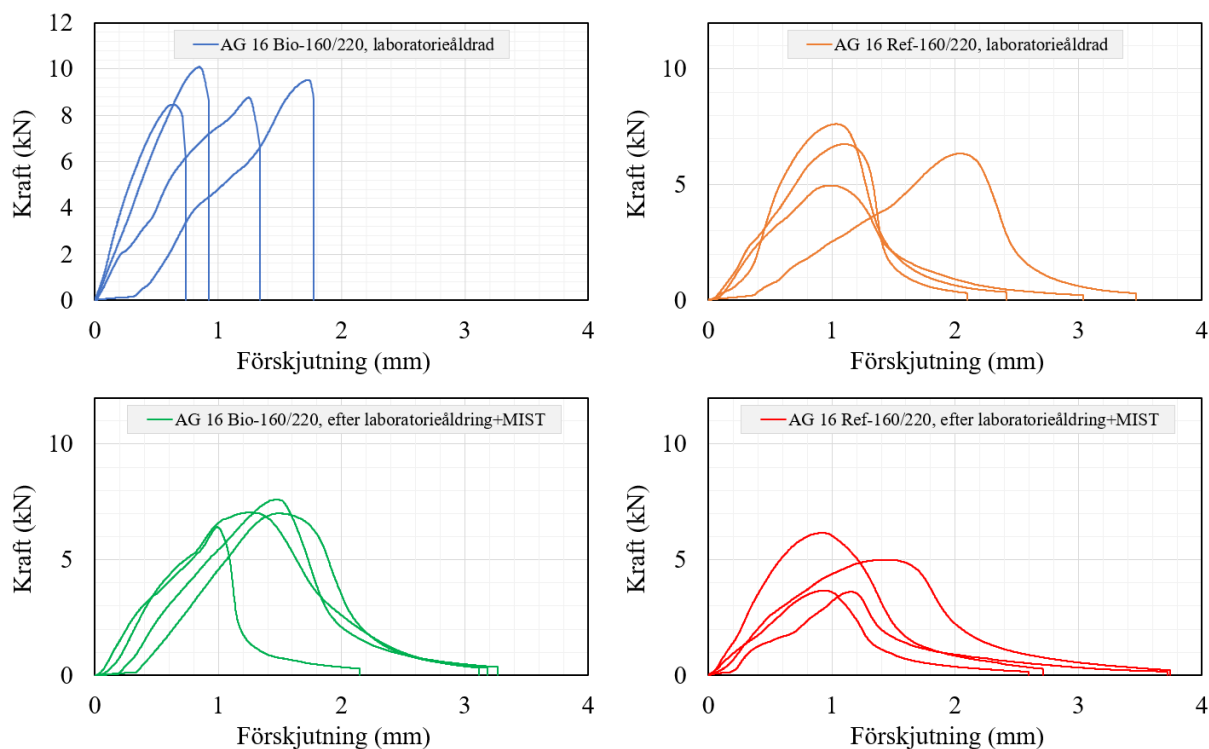
Även om standarden SS-EN 12697-44:2019 har brottsegheten som huvudresultat, verkar den inte visa något annat än den maximala kraften under SCB-testet och provkroppens hållfasthet. Det finns ett linjärt samband mellan brottsegheten hos asfaltmassorna och den maximala kraften under SCB-testet, se Figur 70. Förutom hållfasthet och brottseghet finns det andra parametrar relaterade till asfaltmassas sprickpropageringsmotstånd (Meng et al. 2023).



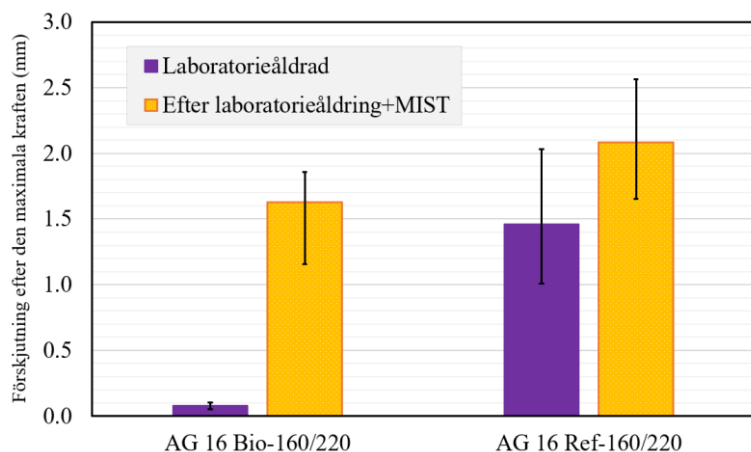
Figur 70. Linjärt samband mellan brottsegheten hos AG 16-asfaltmassorna innehållande 160/220 bindemedel vid 5 °C och den maximala kraften under SCB-test.

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

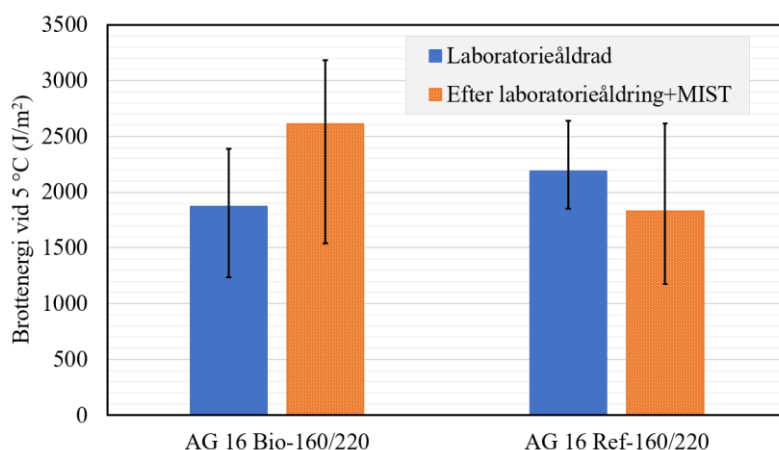


Figur 72. Förskjutning efter den maximala kraften för AG 16-asfaltmassorna innehållande 160/220 bindemedel vid 5 °C (felstaplar indikerar max/min-värden).

Resultaten av förskjutningen efter den maximala kraften för alla undersökta asfaltmassor visas i Figur 72. 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/m^2) 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 73. 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 73. Brottenergi för AG 16-asfaltmassorna innehållande 160/220 bindemedel vid 5 °C (felstaplar indikerar max/min-värden).

5.6. Samband mellan bindemedels- och asfaltegenskaper

I denna studie analyserades flera materialegenskaper på både bindemedelsnivå och asfaltsnivå, 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. Nämligen är asfaltens styvhet positivt korrelerad med bindemedlets styvhet, och asfaltens fasvinkel beror på styvheten (Zhu, Ahmed, Said, Dinegdae & Lu 2022). Åldringens inverkan på styvhet och fasvinkel förändras inte heller av TOP. Nämligen orsakar åldring 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 lågt temperaturer eller högt frekvenser. 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.

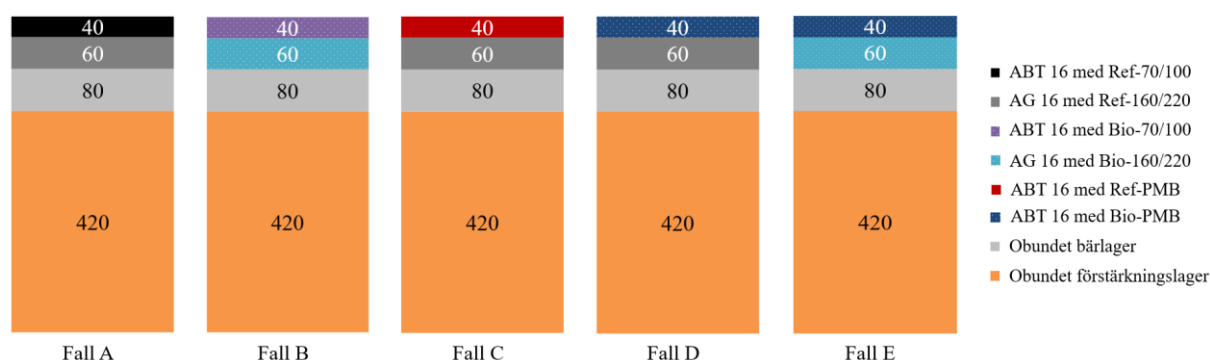
Som nämnts ovan överensstämde resultaten för utmattningsegenskaper hos de åldrade AG 16-asfaltmassorna innehållande 160/220 bindemedel i Figur 68 väl med resultaten från bindemedelsanalys i Figur 47. Även det linjära viskoelastiska DSR-resultatet vid 10 °C (Glover-Rowe-parameter i Tabell 7) stöder slutsatsen 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.

6. Livscykelanalys och koldioxidavtryck

6.1. Funktionell enhet

Jämförbara beläggningsstrukturer är avgörande i en LCA-analys för att säkerställa att de analyserade beläggningsarna har samma "funktion". I denna studie definieras en funktionell enhet så att beläggningsarna gjorda med olika asfaltmassor kan jämföras rättvist. För detta ändamål beaktades en beläggningssträcka (funktionell enhet) på 1 km lång och 3,6 m bred. Med tanke på att biobindemedel är anpassade för att ersätta vanliga bindemedel av samma kvalitetsklass analyserades fem beläggningskonstruktioner (Fall A-E) med identisk lagertjocklek men sex olika bindemedel (se avsnitt 3.1.1) i asfaltmassor för de bundna lagren.

Som illustreras i Figur 74 bestod de analyserade beläggningsarna av fyra lager ovanpå en terrass av sand, nämligen ett bundet slitlager (asfalt ABT 16), ett bundet bärlager (asfalt AG 16), ett obundet bärlager (krossat berg) och ett obundet förstärkningslager (krossat berg). Sex olika asfaltmassor (se avsnitt 3.1.3) 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 74. De analyserade beläggningskonstruktionerna – fyra lager ovanpå en terrass av sand (siffrorna anger lagertjockleken i mm).

6.2. Livscykelinventering

Fallstudier genomfördes för att jämföra de olika beläggningskonstruktionerna 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 3.1.3 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, d.v.s. 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 15.

Tabell 15. 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 18). LCA-modellen består av fem delar. Beläggningsparametrar (Del 1) och transportparametrar (Del 2) presenteras ovan i detta avsnitt. Energiförbrukningsparametrar (Del 3) visas i Tabell 15. Beräkningen genom att kombinera dessa 3 delar med inventeringsparametrar för energi (Del 4) ger de luftburna utsläppen från produktions-, transport- och bygghfaserna (Del 5). Resultaten för några utvalda viktiga luftburna utsläpp listas i Tabell 16.

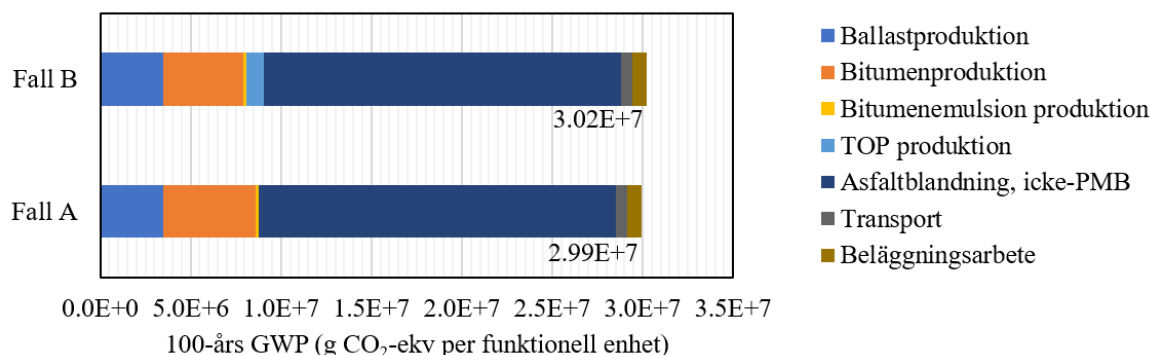
Tabell 16. Beräkningsresultat för de analyserade fallen (utvalda luftburna utsläpp i g per funktionell enhet).

Fall	SO ₂	NO _x	CO	CO ₂	NMVOC	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

Anteckning: NMVOC = non-methane volatile organic compound.

6.3. Fossil Global Warming Potential (GWP-fossil)

För att bedöma klimatpåverkan (d.v.s. koldioxidavtryck) beräknades global uppvärmningspotential (Global Warming Potential, GWP) över 100 år för de analyserade fallen baserat på resultaten för CO₂ och CH₄ i Tabell 16. 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 (nämligen 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 75. 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.

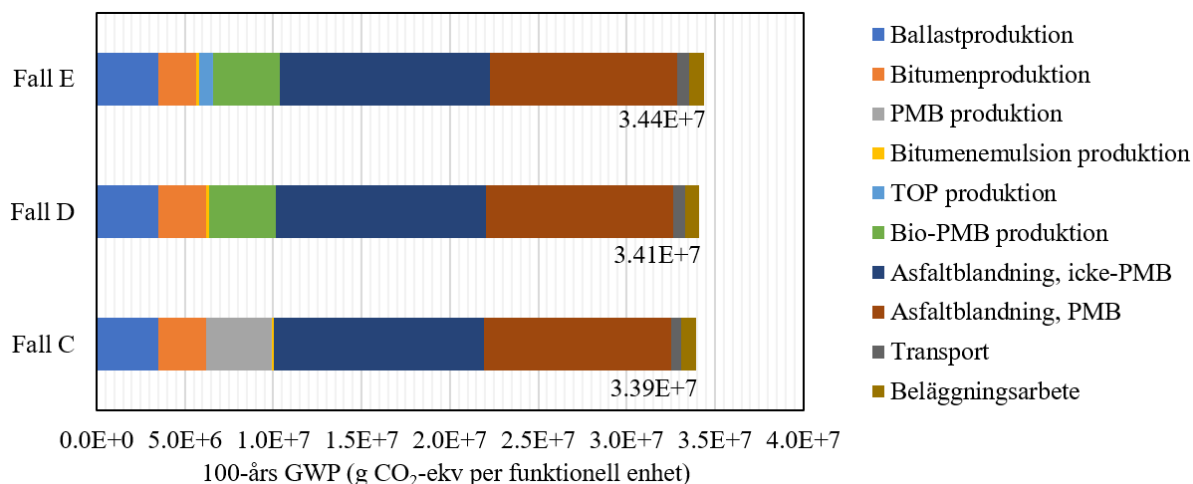


Figur 75. 100-års fossil GWP från vagga till beläggning (A1-A5) för Fall A och B baserat på CO₂- och CH₄-utsläpp.

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- och byggprocesser såsom asfaltutläggning, packning och klistring 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 76 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 beläggningsstruktur 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 76. 100-års fossil GWP från vagga till beläggning (A1-A5) för Fall C, D och E baserat på CO₂- och CH₄-utsläpp.

6.4. 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 18) 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 deklarerars 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 (nämligen inåtgående överföringar) av biogent kol från de tidigare produktsystemen till det analyserade produktsystemet som -1 g CO₂-ekv/g CO₂ (d.v.s. cirka -3,67 g CO₂-ekv/g C) medan utsläpp av biogent kol samt utflöden (nämligen utåtgående överföringar) från det analyserade produktsystemet till de efterföljande produktsystemen karakteriseras som +1 g CO₂-ekv/g CO₂ (d.v.s. 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 77 illustrerar dessa metoder (så kallade “0/0”, “-1/+1” och “-1/+X”) i kontexten av asfaltbeläggningar.



Figur 77. 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 17.

Tabell 17. Sammanfattning av tre olika metoder för att redovisa växtbaserad biogen koldioxid.

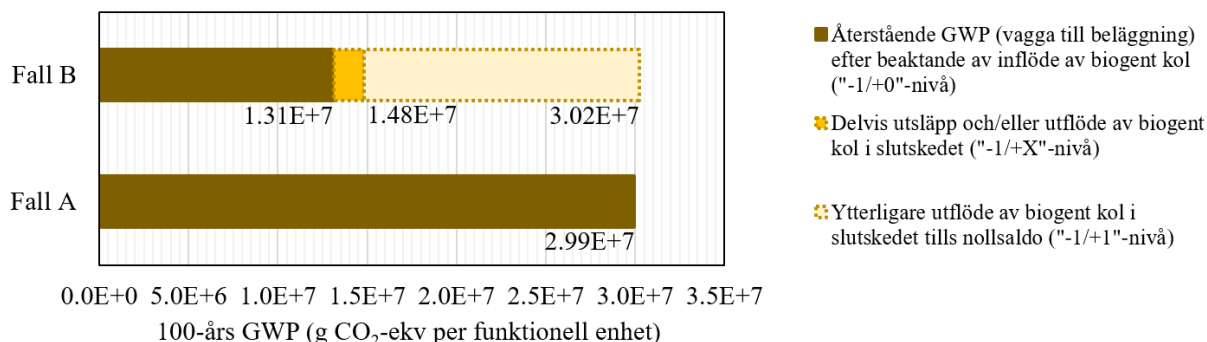
Metod	Skogssystem	Beläggningssystem, livscykelsskede A1-A5	Beläggningssystem, livscykelsskede B1-B7	Beläggningssystem, livscykelsskede C1-C4
0/0	–	–	–	–
-1/+1	Kolbindning	Inflöde/inåtgående överföring (-1)	–	Utlöde/utåtgående överföring (+1)
-1/+X	Kolbindning	Inflöde/inåtgående överföring (-1)	–	Kol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

* Anteckning: delvis koldioxidutsläpp och/eller -utflöde.

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 asfalmassor 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.

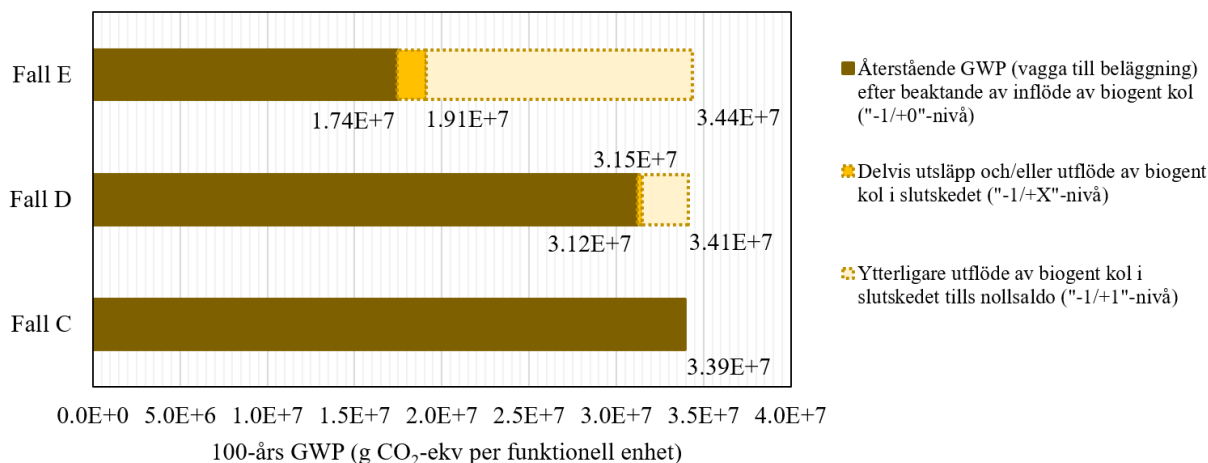
Baserat på andelen biogen komponent i asfalmassorna i Fall A-E och kolhalten i bio-komponenten, genom elementaranalys (Nynas 2021), kunde den biogena kolhalten i de analyserade fallen beräknas, nämligen $4,67 \times 10^6$ g C per funktionell enhet för Fall B, $8,01 \times 10^6$ g C per funktionell enhet 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 78. 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 utflöden 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.



Figur 78. 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 79 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, nämligen 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 79. Effekter av biogent kolflöde på 100-års GWP för Fall C, D och E ($X=0,1$).

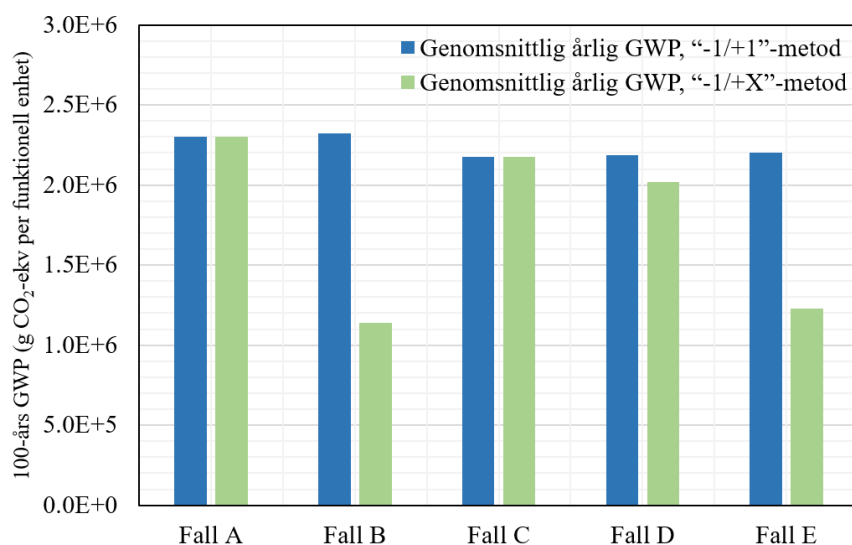
6.5. Livslängdens inverkan

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 4.5.1 och 5.3.1). De undersökta biobindemedlen i denna studie klarar alla specifikationskriterierna efter långtidsåldring med RTFOT+PAV som har diskuterats i avsnitt 4.6. 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 asfaltbeläggningens 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, nämligen 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, nämligen 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 80. 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 80. Genomsnittlig årlig 100-års GWP för de analyserade fallen.

6.6. Känslighetsanalys

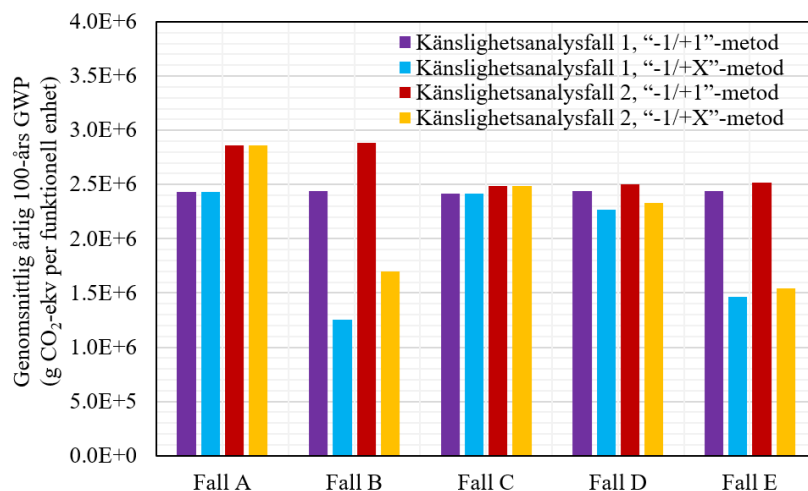
För att verifiera tillförlitligheten hos resultaten av koldioxidavtrycket som diskuterats ovan utfördes två känslighetsanalysfall genom att ersätta vissa indata med data från andra källor. En sammanfattning av de två känslighetsanalysfallen presenteras i Tabell 18. I varje fall ersattes tre typer av indata och alla övriga data förblev desamma som i Tabell 15. Det första känslighetsanalysfallet fokuserade på känsligheten för bindemedelsproduktionsdata medan det andra fallet fokuserade på ballast- och asfaltproduktionsdata.

Tabell 18. 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*	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

* Anteckning: alternativa data uppskattades baserat på Eurobitumes data från 2012.

Resultaten från känslighetsanalysen presenteras i Figur 81, som visar den genomsnittliga årliga 100-års GWP för de fem beläggingskonstruktionerna (Figur 74) 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 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, nämligen 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 81. Genomsnittlig årlig 100-års GWP för känslighetsanalysfall.

7. Slutsatser

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. Nämligen är asfaltens styvhet positivt korrelerad med bindemedlets styvhet, och asfaltens fasvinkel beror på styvheten. Åldringens inverkan på styvhet och fasvinkel förändras inte heller av TOP. Nämligen orsakar åldring 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 (Figur 74 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 returasfalt och (5) definiera och standardisera metoder för att redovisa biogen koldioxid.

Referenser

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>

- 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>
- Strippel, 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>

Bilaga 1. Petrografisk analys

1 rapport av Skanska, 2 sidor.

Leverantör: Vällsta bergtäkt
Produkt: 0/32K
Objekt: Vällsta
Provtagningsdatum: 2024-05-15
Provtagare: Basse

Petrografisk analys, förenklad enligt SSEN 932–3

Utförande

Fraktionerna 4–8, 8–16 och 16–32 siktades ur från 0/32 och sedan tvättades. En lämplig provmängd delades ned och provet sorterades med avseende på olika bergartstyper. Dessa bedömdes främst okulärt, med visst stöd av stereolupp. Därefter räknades minst 150 stenar i varje fraktion för en procentuell fördelning av bergarter. De grövre fraktionerna anses även representera de mer finkorniga delarna av provet. Analysen avser att bedöma materialets lämplighet som bärlager och förstärkningslager. En glimmeranalys utfördes även på 0,125-0,250 fraktionen.

Geologiskt ursprung

Provmaterialiet kommer från ett område med prekambrisk gnejser som tillhör den Svekokarelska orogenen.

Bergartsbeskrivning

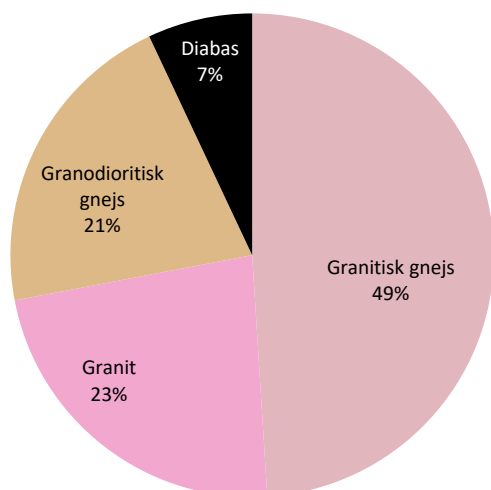
Det provade materialet är ovittrat och består av 100% krossberg i storleken 4-32. Inga andra ytbeläggningar iaktogs på kornytorna i någon av fraktionerna. Flera olika distinkta bergartstyper identifierades där granitisk-granodioritisk gnejs dominerar. En ljus grå variant är medelkornig och består av kvarts, fältspater och biotitaggregat. Den granitiska gnejsen visar en tydlig gnejsighet som definieras av biotit, samt kvarts-fältspatneosom. Den granodioritisk gnejsen är medelkornig och mörkt grå. Den består av plagioklas, kvarts och mindre del hornblände, biotit och kalifältspat. Det förekommer en vit till ljusgrå och är relativt finkornig granit. Den saknar gnejsig struktur och består av kvarts och kalifältspat. Underordnat förekommer gångbergarten diabas. Den är finkornig, svart och består av plagioklas och mörka mineral.



Figur 1. Tvättat, vått material ur 16-32. Penna som skala.

Tabell 1. Avrundning har skett till närmsta heltal.

Grupp	Bergart	Stycke-% 16-32 mm	Stycke-% 8-16 mm	Stycke-% 4-8 mm
Metamorf bergart	Granitisk gnejs	49	50	52
	Granodioritisk gnejs	21	18	20
Djupbergart	Granit	23	24	22
Gångbergart	Diabas	7	8	6
Summa räknade partiklar		227	203	197



Figur 2. Diagram över bergartsfördelningen i 16-32 fraktionen.

Glimmer i finfraktion

Tabell 2. Resultat av fri glimmer analys. 0,125–0,250 mm, 400 korn bedömdes

Mineral	Antal korn	Stycke (%)
Biotit	32	8
Muskovit	6	1,5
Klorit	2	0,5
Övriga mineral	360	90
Summa	400	100

All glimmer utgörs av fri glimmer och andelen fri glimmer enligt TDOK 2014:0144 utgör 10 % av provet där biotit är den dominerade glimmermineralet på 8%. Resterande glimmermineral utgörs av muskovit på 1,5% och klorit på 0,5%. Inga övriga glimmermineral upptäcktes i provet.

Utlåtande och bedömning

Då inga sulfidmineral påträffades samt att andelen fri glimmer som provet består av är godkänd enligt TDOK 2014:0144 så lämpar sig materialet väl som råmaterial för obundna material i bärlager och förstärkningslager, förutsatt att ställda krav på de tekniska analyserna Micro-Deval och Los Angeles också uppfylls.

Upplands Väsby, 2024-07-10

Samuel Sköldbloom

Geolog/laboratorietekniker
Samuel Sköldbloom

Granskat av

Emma Rehnström

Emma Rehnström
Fil. Dr. Berggrundsgeologi, Specialist

Bilaga 2. Provningsrapporter för sex asfaltmassor

6 provningsrapporter av Skanska:

1. ABT 16 med Bio-70/100, 1 sida.
2. ABT 16 med Ref-70/100, 1 sida.
3. AG 16 med Bio-160/220, 1 sida.
4. AG 16 med Ref-160/220, 1 sida.
5. ABT 16 med Bio-PMB 40/100-75, 1 sida.
6. ABT 16 med Ref-PMB 40/100-75, 1 sida.

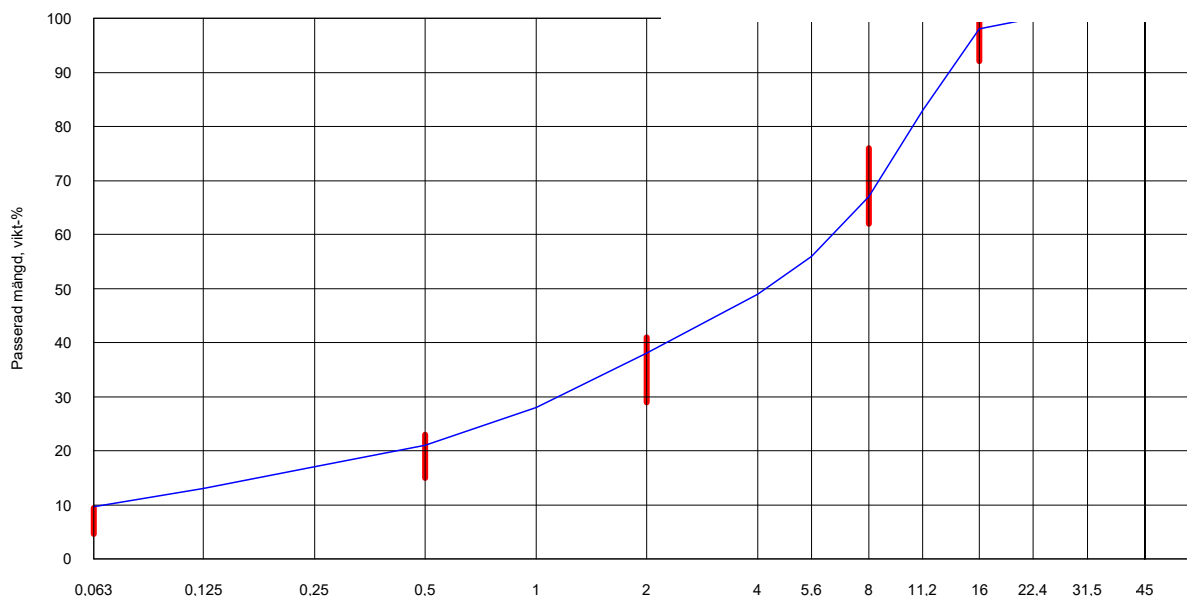
LEVERANSKONTROLL Beläggning

Provnummer 37A230061

Sidan 1 av 1

Beställare	Provtagningsdatum	Analys datum
Skanska Industrial Solutions AB	2023-03-03	2023-03-24
Asfaltverket Vällsta	Ankomstdatum	Analys avslut
Rydholmsvägen 3	2023-03-03	2023-03-25
194 91 Upplands Väsby	ID-nummer	Provtagare
Kontaktperson	Temperatur (°C)	PW
-		Följesedels nr
Produkt	Receipt	Provtagningsplats
ABT 16 70/100	1000083-22-1	Provplatta Västerhaninge
Leverantör	Objekt	Provtagningsstidpunkt
Skanska Industrial Solutions AB	Biobindemedel	
Asfaltverket Vällsta	Märkning	
Entreprenör	ABT 16 70/100 BIO	
Skanska Industrial Solutions AB		

KORNSTORLEKSFÖRDELNING - SS-EN 12697-2:2015+A1:2015 Gränsvärden enligt TDOK 2013:0529 V 3.0-4.0



Sikt (mm)	0,063	0,125	0,25	0,5	1,0	2,0	4,0	5,6	8,0	11,2	16,0	22,4	31,5	Bm.halt
Arbetsrecept	7	10	13	19	25	35	48	57	69	82	97	100		5,90
Analysvärde	9,6	13	17	21	28	38	49	56	67	83	98	100		5,69
Avvikelse	2,6	3	4	2	3	3	1	-1	-2	1	1	0		-0,21
Avviker från tolerans	***													

Provresultat	Medelvärde	+/-	Arb. rec	Notering
SS-EN 12697-1:2020, Bindemedelshalt enl. Annex B.1.7 (Vikt-%)	5,69	-0,21	5,90	Prov har körts i laboratorium
SS-EN 12697-5:2019, Kompaktdensitet (Mg/m³)	2,494	0,018	2,476	
Procedur A med vatten, vid temperaturen, (°C)	25			Ort och datum Vällsta, 2023-04-19
SS-EN 12697-6:2020, Skrymdensitet, Procedur B (Mg/m³)	2,467	0,043	2,424	
Torrsvikt delprov 1 (g)	1196,8			
Torrsvikt delprov 2 (g)	1198,5			
SS-EN 12697-8:2019, Hålrumsinhalt (%)	1,1	-1,0	2,1	Patryk Witkiewicz, Projektledare Digitalt utfärdad signatur
SS-EN 1427:2015, Mjukpunkt (bitumen från asfaltmassa) (°C)	48,6			
Badvätska:	Vatten			
SS-EN 12697-3:2013+A1:2019, Återvinning av bitumen				
Temperaturer och tryck under destillationen följer metodens anvisningar				
Lösningsmedel: Metylenklorid				

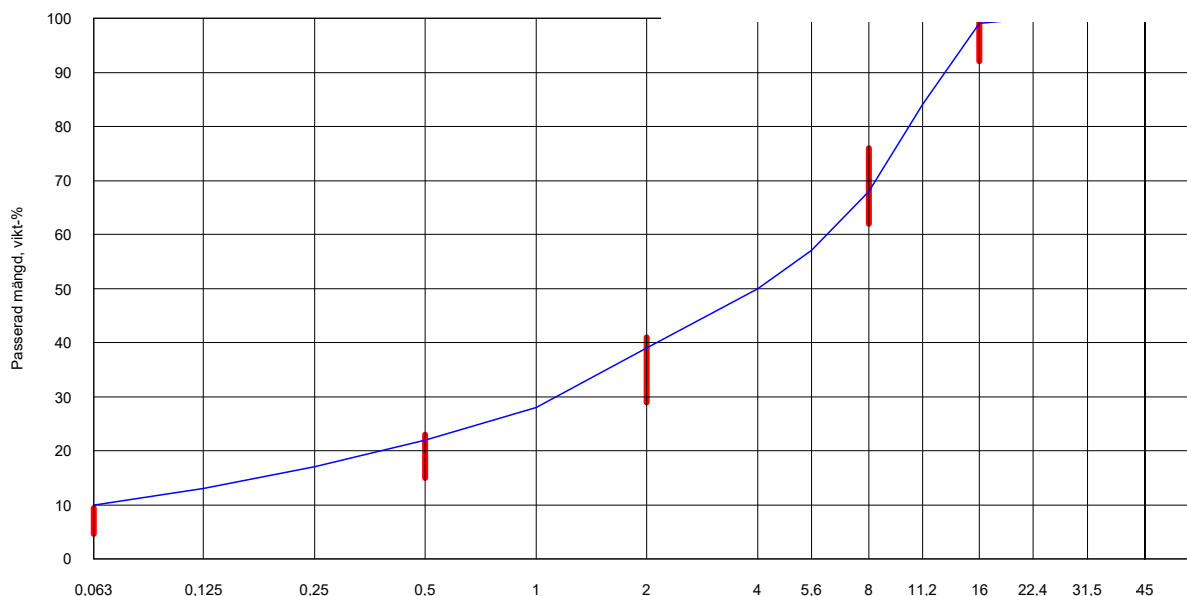
LEVERANSKONTROLL Beläggning

Provnummer 37A230060

Sidan 1 av 1

Beställare	Provtagningsdatum	Analys datum
Skanska Industrial Solutions AB	2023-03-03	2023-03-24
Asfaltverket Vällsta	Ankomstdatum	Analys avslut
Rydholmsvägen 3	2023-03-03	2023-03-25
194 91 Upplands Väsby	ID-nummer	Provtagare
Kontaktperson	Temperatur (°C)	PW
-		Följesedels nr
Produkt	Receipt	Provtagningsplats
ABT 16 70/100	1000083-22-1	Provplatta Västerhaninge
Leverantör	Objekt	Provtagningsstidpunkt
Skanska Industrial Solutions AB	Biobindemedel	
Asfaltverket Vällsta	Märkning	
Entreprenör	ABT 16 70/100 PEN	
Skanska Industrial Solutions AB		

KORNSTORLEKSFÖRDELNING - SS-EN 12697-2:2015+A1:2015 Gränsvärden enligt: TDOK 2013:0529 V 3.0-4.0



Sikt (mm)	0,063	0,125	0,25	0,5	1,0	2,0	4,0	5,6	8,0	11,2	16,0	22,4	31,5	Bm.halt
Arbetsrecept	7	10	13	19	25	35	48	57	69	82	97	100		5,90
Analysvärde	9,9	13	17	22	28	39	50	57	68	84	99	100		5,75
Avvikelse	2,9	3	4	3	3	4	2	0	-1	2	2	0		-0,15
Avviker från tolerans	***													

Provresultat	Medelvärde	+/-	Arb. rec	Notering
SS-EN 12697-1:2020, Bindemedelshalt enl. Annex B.1.7 (Vikt-%)	5,75	-0,15	5,90	Prov har körts i laboratorium
SS-EN 12697-5:2019, Kompaktdensitet (Mg/m³)	2,500	0,024	2,476	
Procedur A med vatten, vid temperaturen, (°C)	25			
SS-EN 12697-6:2020, Skrymdensitet, Procedur B (Mg/m³)	2,466	0,042	2,424	Ort och datum
Torrsvikt delprov 1 (g)	1203,3			Vällsta, 2023-04-19
Torrsvikt delprov 2 (g)	1198,0			
SS-EN 12697-8:2019, Hålrums halt (%)	1,4	-0,7	2,1	
SS-EN 1427:2015, Mjukpunkt (bitumen från asfaltmassa) (°C)	49,4			Patryk Witkiewicz, Projektledare
Badvätska:	Vatten			Digitalt utfärdad signatur
SS-EN 12697-3:2013+A1:2019, Återvinning av bitumen				
Temperaturer och tryck under destillationen följer metodens anvisningar				
Lösningsmedel: Metylenklorid				

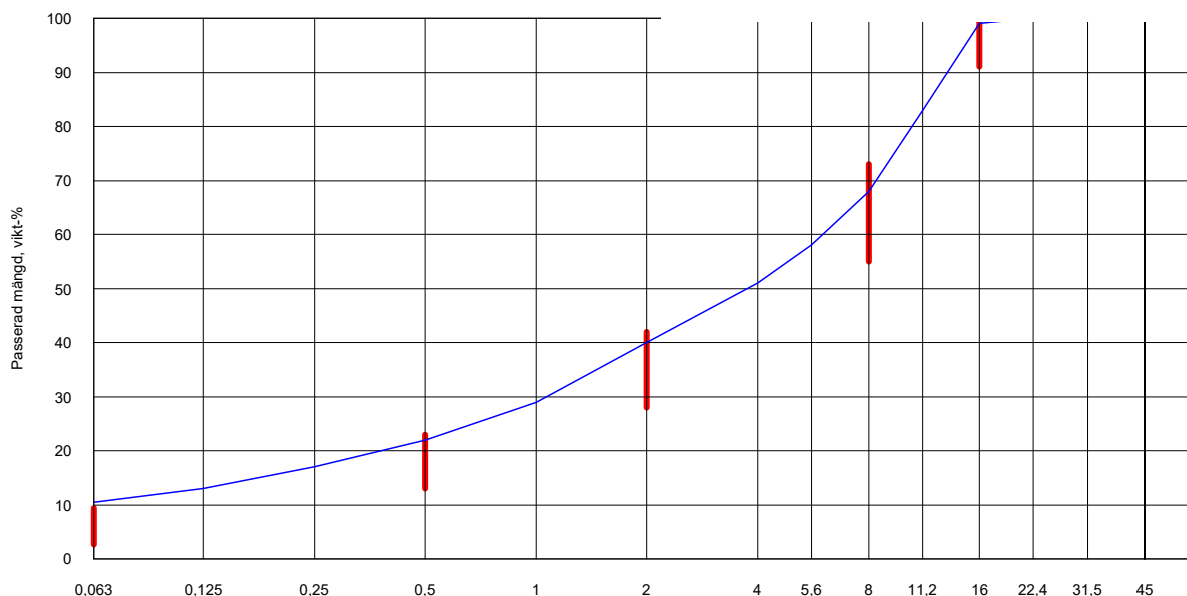
LEVERANSKONTROLL Beläggning

Provnummer 37A230063

Sidan 1 av 1

Beställare	Provtagningsdatum	Analys datum
Skanska Industrial Solutions AB	2023-03-03	2023-03-24
Asfaltverket Vällsta	Ankomstdatum	Analys avslut
Rydholmsvägen 3	2023-03-03	2023-03-25
194 91 Upplands Väsby	ID-nummer	Provtagare
Kontaktperson	Temperatur (°C)	PW
-		Följesedels nr
Produkt	Receipt	Provtagningsplats
AG 16 160/220	1000161-22-1	Provplatta Västerhaninge
Leverantör	Objekt	Provtagningsstidpunkt
Skanska Industrial Solutions AB	Biobindemedel	
Asfaltverket Vällsta	Märkning	
Entreprenör	AG 16 160/220 BIO	
Skanska Industrial Solutions AB		

KORNSTORLEKSFÖRDELNING - SS-EN 12697-2:2015+A1:2015 Gränsvärden enligt: TDOK 2013:0529 V 3.0-4.0



Sikt (mm)	0,063	0,125	0,25	0,5	1,0	2,0	4,0	5,6	8,0	11,2	16,0	22,4	31,5	Bm.halt
Arbetsrecept	6	9	13	18	25	35	46	53	64	76	96	100		4,50
Analysvärde	10,5	13	17	22	29	40	51	58	68	83	99	100		4,53
Avvikelse	4,5	4	4	4	4	5	5	5	4	7	3	0		0,03
Avviker från tolerans	***													

Provresultat	Medelvärde	+/-	Arb. rec	Notering
SS-EN 12697-1:2020, Bindemedelshalt enl. Annex B.1.7 (Vikt-%)	4,53	0,03	4,50	Prov har körts i laboratorium
SS-EN 12697-5:2019, Kompaktdensitet (Mg/m³)	2,539	0,010	2,529	
Procedur A med vatten, vid temperaturen, (°C)	25			
SS-EN 12697-6:2020, Skrymdensitet, Procedur B (Mg/m³)	2,486	0,064	2,422	Ort och datum
Torrsvikt delprov 1 (g)	1208,0			Vällsta, 2023-04-19
Torrsvikt delprov 2 (g)	1203,3			
SS-EN 12697-8:2019, Hålrumsinhalt (%)	2,1	-2,1	4,2	
SS-EN 1427:2015, Mjukpunkt (bitumen från asfaltmassa) (°C)	42,2			Patryk Witkiewicz, Projektledare
Badvätska:	Vatten			Digitalt utfärdad signatur
SS-EN 12697-3:2013+A1:2019, Återvinning av bitumen				
Temperaturer och tryck under destillationen följer metodens anvisningar				
Lösningsmedel: Metylenklorid				

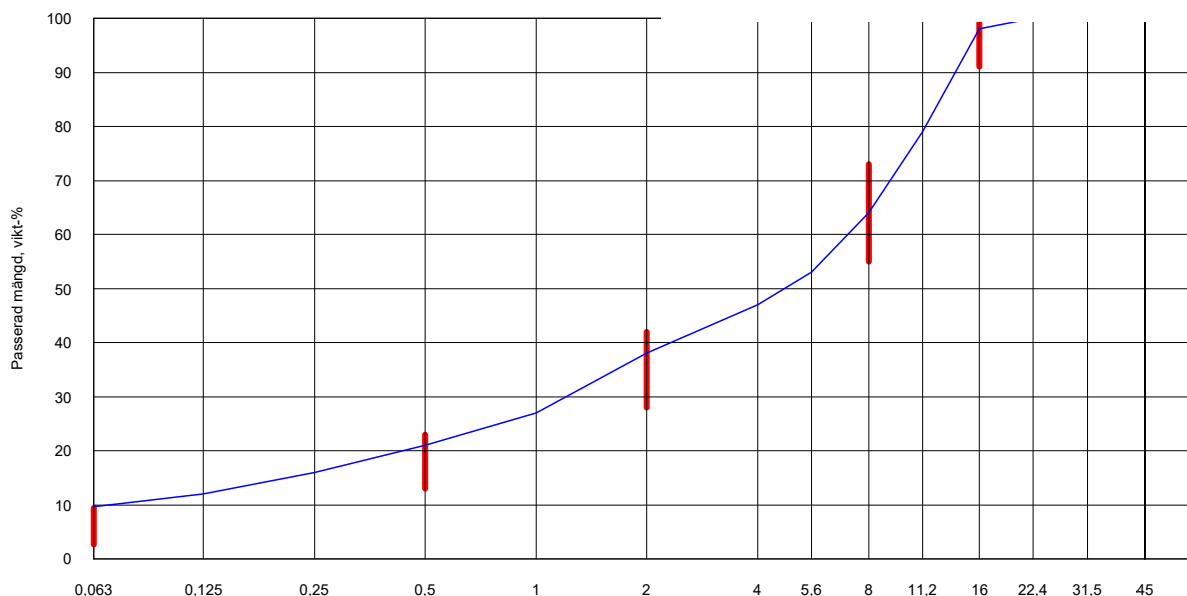
LEVERANSKONTROLL Beläggning

Provnummer 37A230062

Sidan 1 av 1

Beställare	Provtagningsdatum	Analys datum
Skanska Industrial Solutions AB	2023-03-03	2023-03-24
Asfaltverket Vällsta	Ankomstdatum	Analys avslut
Rydholmsvägen 3	2023-03-03	2023-03-25
194 91 Upplands Väsby	ID-nummer	Provtagare
Kontaktperson		PW
-	Temperatur (°C)	Följesedels nr
Produkt		
AG 16 160/220	Receipt	Provtagningsplats
Leverantör	1000161-22-1	Provplatta Västerhaninge
Skanska Industrial Solutions AB		Objekt
Asfaltverket Vällsta		Biobindemedel
Entreprenör		Märkning
Skanska Industrial Solutions AB		AG 16 160/220 PEN

KORNSTORLEKSFÖRDELNING - SS-EN 12697-2:2015+A1:2015 Gränsvärden enligt: TDOK 2013:0529 V 3.0-4.0



Sikt (mm)	0,063	0,125	0,25	0,5	1,0	2,0	4,0	5,6	8,0	11,2	16,0	22,4	31,5	Bm.halt
Arbetsrecept	6	9	13	18	25	35	46	53	64	76	96	100		4,50
Analysvärde	9,6	12	16	21	27	38	47	53	64	79	98	100		4,36
Avvikelse	3,6	3	3	3	2	3	1	0	0	3	2	0		-0,14
Avviker från tolerans	***													

Provresultat	Medelvärde	+/-	Arb. rec	Notering
SS-EN 12697-1:2020, Bindemedelshalt enl. Annex B.1.7 (Vikt-%)	4,36	-0,14	4,50	Prov har körts i laboratorium
SS-EN 12697-5:2019, Kompaktdensitet (Mg/m³)	2,535	0,006	2,529	
Procedur A med vatten, vid temperaturen, (°C)	25			
SS-EN 12697-6:2020, Skrymdensitet, Procedur B (Mg/m³)	2,480	0,058	2,422	Ort och datum
Torrsvikt delprov 1 (g)	1207,5			Vällsta, 2023-04-19
Torrsvikt delprov 2 (g)	1205,5			
SS-EN 12697-8:2019, Hålrums halt (%)	2,2	-2,0	4,2	
SS-EN 1427:2015, Mjukpunkt (bitumen från asfaltmassa) (°C)	45,0			
Badvätska:	Vatten			
SS-EN 12697-3:2013+A1:2019, Återvinning av bitumen				
Temperaturer och tryck under destillationen följer metodens anvisningar				
Lösningsmedel: Metylenklorid				

Patrik Witkiewicz, Projektledare
Digitalt utfärdad signatur

LEVERANSKONTROLL Beläggning

Provnummer **37A250023**

Sidan 1 av 1

Beställare
Skanska Industrial Solutions AB
Asfaltverket Upplands Väsby
Rydholmsvägen 4
194 91 Upplands Väsby
Kontaktperson
Anthony Haddad
Produkt
ABT 16 PMB
Leverantör
Skanska Industrial Solutions AB
Asfaltverket Upplands Väsby
Entreprenör
Skanska Industrial Solutions AB

Provtagningsdatum
2023-03-03
Ankomstdatum
2023-03-03
ID-nummer

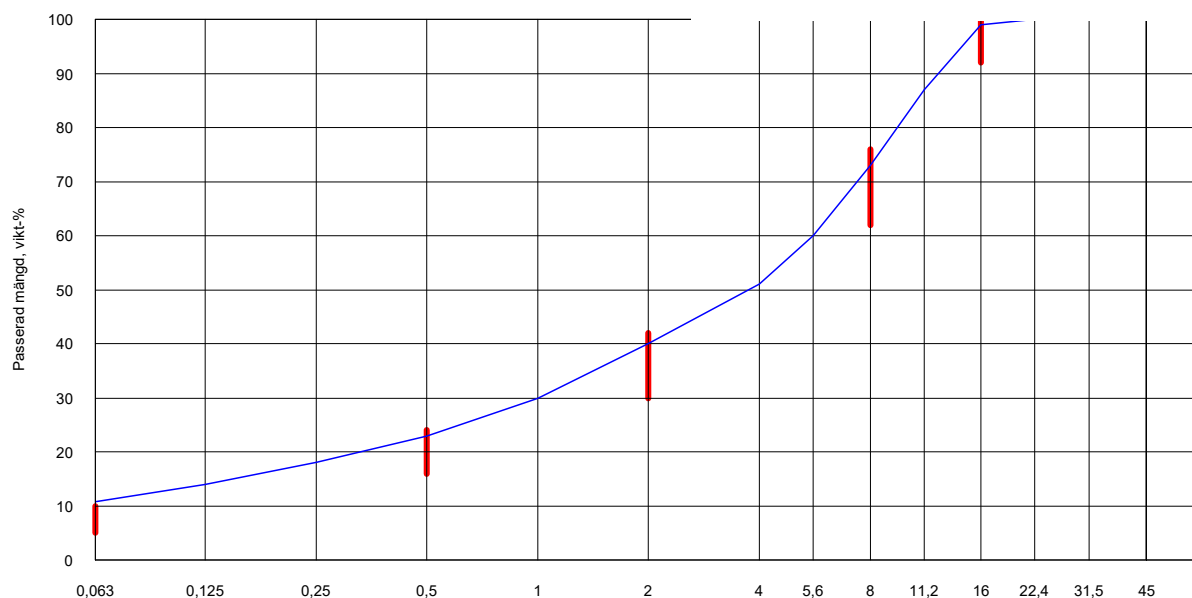
Analys datum
2023-05-17
Analys avslut
2023-05-17
Provtagare
PW
Följesedels nr

Receipt
1000900-24-1

Temperatur (°C)
Provtagningsplats
Provplatta Västerhaninge
Objekt
Biobindemedel
Märkning
ABT 16 PMB BIO

Provtagningsstidpunkt

KORNSTORLEKSFÖRDELNING - SS-EN 12697-2:2015+A1:2019 Gränsvärden enligt: TDOK 2013:0529 V 3.0-4.0



Sikt (mm)	0,063	0,125	0,25	0,5	1,0	2,0	4,0	5,6	8,0	11,2	16,0	22,4	31,5	Bm.halt
Arbetsrecept	7,5	11	15	20	26	36	49	57	69	82	97	100		5,90
Analysvärde	10,7	14	18	23	30	40	51	60	73	87	99	100		5,86
Avvikelse	3,2	3	3	3	4	4	2	3	4	5	2	0		-0,04
Avviker från tolerans	***													

Provresultat	Medelvärde	+/-	Arb. rec	Notering
SS-EN 12697-1:2020, Bindemedelshalt enl. Annex B.1.7 (Vikt-%)	5,86	-0,04	5,90	Ort och datum Vällsta, 2025-03-03 <i>Patryk Witkiewicz</i> Patryk Witkiewicz, Projektledare Digitalt utfärdad signatur

Denna rapport måste återges i sin helhet och inga uppgifter får ändras. Provresultatet avser endast analyserat prov. Metodlista med ev. metodavsteg återfinns på www.skanska.se.

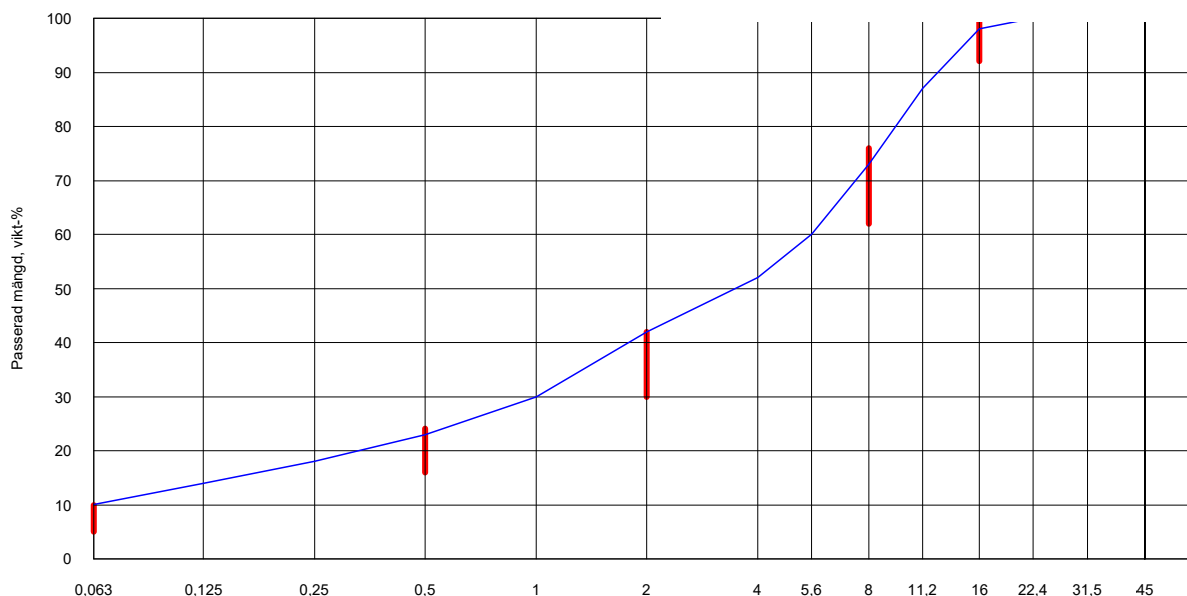
LEVERANSKONTROLL Beläggning

Provnummer 37A230431

Sidan 1 av 1

Beställare	Provtagningsdatum	Analys datum
Skanska Industrial Solutions AB	2023-03-03	2023-05-17
Asfaltverket Vällsta	Ankomstdatum	Analys avslut
Rydholmsvägen 3	2023-03-03	2023-05-17
194 91 Upplands Väsby	ID-nummer	Provtagare
Kontaktperson	Temperatur (°C)	PW
-		Följesedels nr
Produkt	Receipt	Provtagningsplats
ABT 16 PMB	1000900-23-1	Provplatta Västerhaninge
Leverantör	Objekt	Provtagningsstidpunkt
Skanska Industrial Solutions AB	Biobindemedel	
Asfaltverket Upplands Väsby	Märkning	
Entreprenör	ABT 16 PMB PEN	
Skanska Industrial Solutions AB		

KORNSTORLEKSFÖRDELNING - SS-EN 12697-2:2015+A1:2015 Gränsvärden enligt: TDOK 2013:0529 V 3.0-4.0



Sikt (mm)	0,063	0,125	0,25	0,5	1,0	2,0	4,0	5,6	8,0	11,2	16,0	22,4	31,5	Bm.halt
Arbetsrecept	7,5	11	15	20	26	36	49	57	69	82	97	100		5,90
Analysvärde	10,1	14	18	23	30	42	52	60	73	87	98	100		6,02
Avvikelse	2,6	3	3	3	4	6	3	3	4	5	1	0		0,12
Avviker från tolerans	***													

Provresultat	Medelvärde	+/-	Arb. rec	Notering
SS-EN 12697-1:2020, Bindemedelshalt enl. Annex B.1.7 (Vikt-%)	6,02	0,12	5,90	Prov har körts i laboratorium
SS-EN 12697-5:2019, Kompaktdensitet (Mg/m³)	2,477	0,004	2,473	
Procedur A med vatten, vid temperaturen, (°C)	25			Ort och datum Vällsta, 2023-06-13  Patryk Witkiewicz, Projektledare Digitalt utfärdad signatur
SS-EN 12697-6:2020, Skrymdensitet, Procedur B (Mg/m³)	2,460	0,040	2,420	
Torrsvikt delprov 1 (g)	1205,2			
Torrsvikt delprov 2 (g)	1214,4			
SS-EN 12697-8:2019, Hållrumshalt (%)	0,7	-1,4	2,1	

Denna rapport måste återges i sin helhet och inga uppgifter får ändras. Provresultatet avser endast analyserat prov. Metodlista med ev. metodavsteg återfinns på www.skanska.se.

Bilaga 3. Utvärdering av stabilitet

1 rapport av Skanska, 8 sidor.

Vår kontakt:

Richard Nilsson
Telefon 010-448 32 68
richard.nilsson@skanska.se
Skanska Industrial Solution AB

Biobitumenprojektet
Version 2023-03-30

Utvärdering av stabilitet för asfaltbeläggningar ingående i Biobitumenprojektet

Innehållsförteckning

Utvärdering av stabilitet för asfaltbeläggningar ingående i Biobitumenprojektet	1
Sammanfattning	2
Inledning	3
Beskrivning av metod som använts för att bestämma stabilitet	3
Resultat laboratorieanalyser	6
Resultat stabilitet	7
Referenser	8

Sammanfattning

Stabilitet har bestämts på laboratorietillverkade provkroppar. Följande beläggningar testades:

- AG16, 160/220, Ref
- AG16, 160/220, Bio (50/70 + 21% TOP)
- ABT16, 70/100, Ref
- ABT16, 70/100, Bio (50/70 + 5% TOP)
- ABT16, 40/100-75, PMB, Ref.
- ABT16, 40/100-75, PMB, Bio

Då bestämning av stabilitet endast är en del av testerna, som utförts inom ramen för projektet, är det inte möjligt att dra några långtgående slutsatser angående eventuella skillnader mellan referens och bio innan övriga data studerats.

Inledning

Resultaten som redovisas i denna rapport har tagits fram inom ramen för Biobindemedelsprojektet, som är ett SBUF-projekt (projektledare Patryk Witkiewicz, Skanska Teknik – VTC).

Beskrivning av metod som använts för att bestämma stabilitet

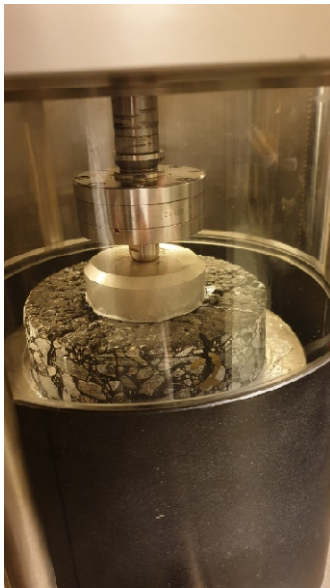
Stabiliteten har bestämts med dynamiska triaxialförsök, se Figur 1. Vanligtvis används dynamisk krypstabilitet (f.d. FAS 468, nu SS-EN 12697-25), se Figur 4, för att utvärdera en beläggnings motståndskraft mot permanenta deformationer. I Sverige är testmetoden något av en standardmetod för att utvärdera stabilitet. De krav som finns i Trafikverkets normer är baserade på resultat från denna typ av test.

Vid test av mycket stabila beläggningar (exempelvis kraftigt polymermodifierade) är dock inte standardmetoden särskilt utslagsgivande (för snäll) och det är därför svårt att få fram skillnader mellan olika material. Av denna anledning användes i stället dynamiska triaxialförsök. Den ursprungliga metodiken har utvecklats inom ramen för *National Cooperative Highway Research Program* (NCHRP) Project 9-29 i USA. Vid utvärderingen av materialen har dock vissa justeringar (ex. provkroppsstorlek) gjorts för att passa bättre för svenska förhållanden. I Tabell 1 görs en jämförelse av de båda metoderna.

Tabell 1 Jämförelse av testmetoder

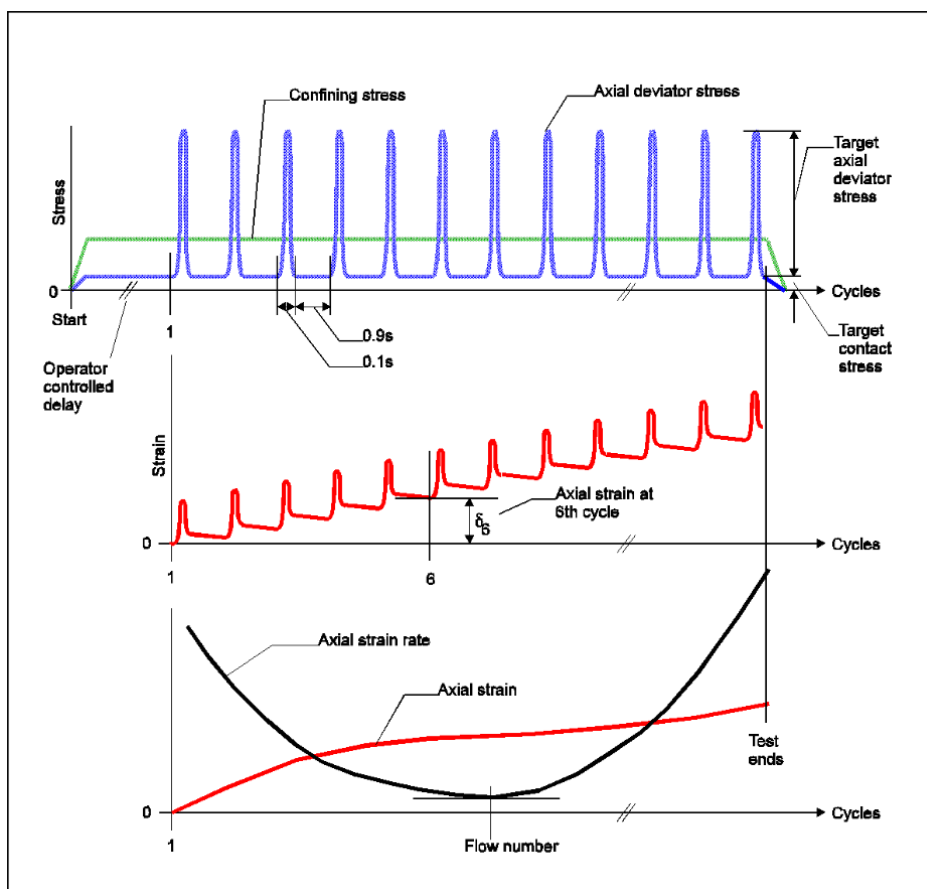
Parameter	Dynamisk krypstabilitet	Dynamiskt triaxialförsök
Temperatur	40°C	50°C
Max antal lastcykler	3600	10000
Max töjningsnivå	50000 μ strain	100000 μ strain
Belastning	100 kPa	600 kPa
Typ av belastning	Square	Haversine
Tid belastning/vila	1 s/1 s	0,1 s / 0,9 s
Omgivningstryck	-	20 kPa
Resultat	ϵ_{p3600}	ϵ_{p10000} , Flow Number, FN, Flow Number Index

- ϵ_p = Permanent töjning vid lastcykel 3600 resp. 10000 (ju lägre värde desto bättre stabilitet).
- **Flow Number, FN** = Den lastcykel där materialet övergår till tertiary flow (ju högre FN desto bättre).
- **Flow Number Index** = Permanent töjning vid FN dividerat med den lastcykel (dvs. FN) där materialet övergår till tertiary flow (ju lägre FN-Index desto bättre).

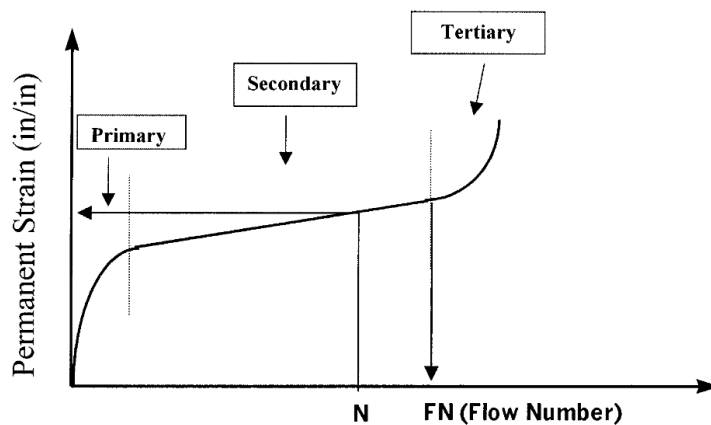


Figur 1 Utrustning för som använts för dynamiska triaxialförsök (Foto: B.R. Nilsson)

I Figur 2 och Figur 3 redovisas schematiskt hur ett dynamiskt triaxialförsök körs och hur en typisk relation mellan permanent töjning och antal lastcykler brukar se ut. Flow Number, FN definieras som den lastcykel där materialet övergår till tertiary flow (ju högre FN desto bättre stabilitet). Detta korresponderar även med då den axiella töjningshastigheten är som lägst.



Figur 2 Principskiss Flow Number Test (Källa: IPC Global Ltd., UTS005)



Loading Cycles

Figur 3 Typisk relation mellan permanent töjning och antal lastcykler (Källa: nchrp_rpt_465)

Från FAS 468:

"Metoden är avsedd för bestämning av permanent deformation hos en provkropp av asfaltbetong genom pulserande belastning. Provkroppen kan antingen vara framställd på laboratorium eller uttagen ur en beläggning. Begreppet permanent deformation används i denna metod även om det kanske kan anses vara riktigare att använda begreppet irreversibel töjning.

Ett cylinderformat prov med diameter 150 mm utsätts för en vertikal periodiskt återkommande given belastning, applicerad via en stämpel med diameter 100 mm, som genom en avfasning får en anliggningsyta mot provet med en diameter av 96 mm, och därpå följande viloperiod. Belastningsformen består av fyrkantsvågor. Deformationen efter förutbestämda cykler mäts och därur beräknas permanenta deformationen".



Figur 4 Utrustning för bestämning av dynamisk krypstabilitet (Foto: B.R. Nilsson)

Resultat laboratorieanalyser

Plattor laboratoriepackades vid Skanska Teknik VTC:s laboratorium i Stockholm. Därefter borrades provkroppar upp ifrån plattorna och skrymdensiteterna bestämdes. Provkropparna skickades sedan till Malmö för mätning samt bestämning av stabilitet. Totalt testades 3 provkroppar (Ø150 mm x 50 mm) för varje beläggningstyp enligt metodik (triax) beskriven ovan.

I Tabell 2 redovisas medelvärden för skrymdensiteterna. Då det vid upprättandet av denna rapport inte fanns tillgängliga bindemedelshalter och kompaktdensiteter går det inte att beräkna hålrumshalter och bitumenfyllt hålrum, vilket kan vara till hjälp när stabiliteterna utvärderas.

Tabell 2 Skrymdensiteter (medelvärden)

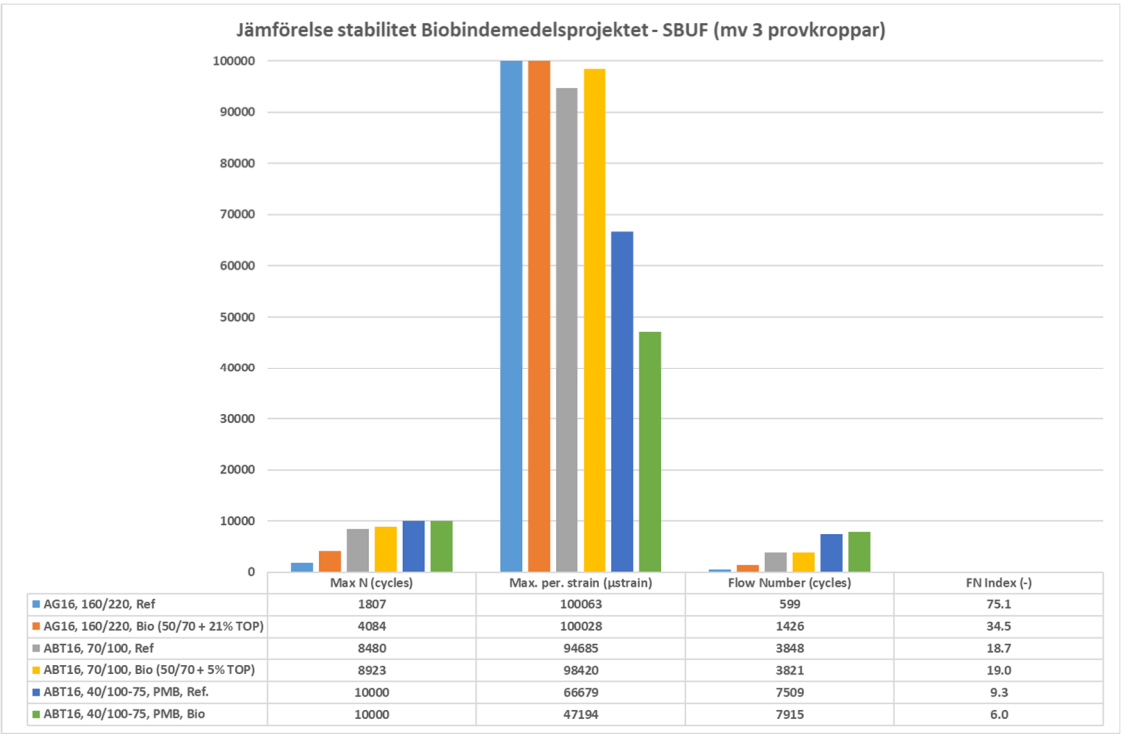
Beläggning	Skrymdensitet (kg/m ³)
AG16, 160/220, Ref.	2443
AG16, 160/220, Bio (50/70 + 21% TOP)	2473
ABT16, 70/100, Ref.	2480
ABT16, 70/100, Bio (50/70 + 5% TOP)	2477
ABT16, 40/100-75, PMB, Ref.	2457
ABT16, 40/100-75, PMB, Bio	2442

Resultat stabilitet

I Tabell 3 och Figur 5 redovisas uppmätta stabilitetsvärden för de testade beläggningarna.

Tabell 3 Stabilitetsdata för samtliga testade beläggningar (medelvärde 3 provkroppar)

Beläggning	Lastcykler (cykler)	Max. per. strain (µstrain)	Flow Number (cykler)	FN Index (-)
AG16, 160/220, Ref.	1807	100063	599	75.1
AG16, 160/220, Bio (50/70 + 21% TOP)	4084	100028	1426	34.5
ABT16, 70/100, Ref.	8480	94685	3848	18.7
ABT16, 70/100, Bio (50/70 + 5% TOP)	8923	98420	3821	19.0
ABT16, 40/100-75, PMB, Ref.	10000	66679	7509	9.3
ABT16, 40/100-75, PMB, Bio	10000	47194	7915	6.0



Figur 5 Jämförelse av stabilitet för de testade beläggningarna (medelvärde 3 provkroppar)

Referenser

SS-EN 12697-25:2016, Pulserande kryptest, metod A1, Fyrkantspuls

TRVK VÄG, Publikations nr TDOK 2011-0264

TRVR VÄG, Publikations nr TDOK 2011-0267

Bitumenbundna lager, Publikations nr TDOK 2013-0529

NCHRP Report 465, Simple Performance Test for Superpave Mix Design.
TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, ISBN 0-309-06715-4.

Malmö 2023-03-30

.....
Richard Nilsson
Teknologie doktor
Specialist Asphalt och Vägteknik

Bilaga 4. Provningsrapporter för ITSr

6 provningsrapporter av Skanska:

1. ABT 16 med Bio-70/100, 1 sida.
2. ABT 16 med Ref-70/100, 1 sida.
3. AG 16 med Bio-160/220, 1 sida.
4. AG 16 med Ref-160/220, 1 sida.
5. ABT 16 med Bio-PMB 40/100-75, 1 sida.
6. ABT 16 med Ref-PMB 40/100-75, 1 sida.

LEVERANSKONTROLL Beläggning

Provnummer 37A230066

Sidan 1 av 1

Beställare	Provtagningsdatum	Analys datum
Skanska Industrial Solutions AB	2023-02-15	2023-05-25
Asfaltverket Vällsta	Ankomstdatum	Analys avslut
Rydholmsvägen 3	2023-02-22	2023-06-07
194 91 Upplands Väsby	ID-nummer	Provtagare
Kontaktperson	Temperatur (°C)	PW
-		Följesedels nr
Produkt	Receipt	Provtagningsplats
ABT 16 70/100	1000083-22-1	Provtagningsstidpunkt
Leverantör	Provplatta Västerhaninge	
Skanska Industrial Solutions AB	Objekt	
Asfaltverket Vällsta	Biobindemedel	
Entreprenör	Märkning	
Skanska Industrial Solutions AB	ABT 16 70/100 BIO	

TDOK 2017:0650 Ver.2.0 Bestämning av vattenkänslighet genom pressdragprovning

Typ av prov:

Anmärkning: 7 dygn i vattenbad i 40C

Provkroppar från platta

Provkropp	Skrymdensitet (g/cm³)	Svällning efter Vattenmättnings volym-%	Konditionering volym-%	Uptagen vattenmängd i vikt-%	Drag- hållfasthet kPa	Okulär bedömning av brottytor
Våta gruppen						
ABT BIO 3A	2,442	-0,20	-0,20	0,30	2097	Brott i bruk, enstaka brott i sten
ABT BIO 3B	2,447	0,20	-0,20	0,40	2046	Brott i bruk, enstaka brott i sten
ABT BIO 3G	2,415	0,81	0,81	0,80	1721	Brott i bruk, enstaka brott i sten
ABT BIO 3H	2,459	0,40	0,40	0,30	1970	Brott i bruk, enstaka brott i sten
ABT BIO 3J	2,463	-0,00	0,20	0,40	1937	Brott i bruk, enstaka brott i sten
Medelvärde	2,445				1954	
STD.	0,019					
Torra gruppen						
ABT BIO 3C	2,424				2349	Brott i bruk, enstaka brott i sten
ABT BIO 3D	2,459				2254	Brott i bruk, enstaka brott i sten
ABT BIO 3E	2,442				2307	Brott i bruk, enstaka brott i sten
ABT BIO 3F	2,456				2223	Brott i bruk, enstaka brott i sten
ABT BIO 3I	2,453				2314	Brott i bruk, enstaka brott i sten
Medelvärde	2,447				2289	
STD.	0,014					

ITSR % 85

Notering

Provet har körts i laboratorium

Ort och datum

Vällsta, 2023-06-07



Patryk Witkiewicz, Projektledare

Digitalt utfärdad signatur

Denna rapport måste återges i sin helhet och inga uppgifter får ändras. Provresultatet avser endast analyserat prov. Metodlista med ev. metodavsteg återfinns på www.skanska.se.

LEVERANSKONTROLL Beläggning

Provnummer 37A230065

Sidan 1 av 1

Beställare	Provtagningsdatum	Analys datum
Skanska Industrial Solutions AB	2023-02-15	2023-05-25
Asfaltverket Vällsta	Ankomstdatum	Analys avslut
Rydholmsvägen 3	2023-02-22	2023-06-07
194 91 Upplands Väsby	ID-nummer	Provtagare
Kontaktperson	Temperatur (°C)	PW
-		Följesedels nr
Produkt	Receipt	Provtagningsplats
ABT 16 70/100	1000083-22-1	Provtagningsstidpunkt
Leverantör	Provplatta Västerhaninge	
Skanska Industrial Solutions AB	Objekt	
Asfaltverket Vällsta	Biobindemedel	
Entreprenör	Märkning	
Skanska Industrial Solutions AB	ABT 16 70/100 PEN	

TDOK 2017:0650 Ver.2.0 Bestämning av vattenkänslighet genom pressdragprovning

Typ av prov:

Anmärkning: 7 dygn i vattenbad i 40C

Provkroppar från platta

Provkropp	Skrymdensitet (g/cm³)	Svällning efter		Upptagen vattenmängd i vikt-%	Drag- hållfasthet kPa	Okulär bedömning av brottytor
		Vattenmättnings volym-%	Konditionering volym-%			
Våta gruppen						
ABT PEN 3E	2,441	-0,00	0,60	0,80	974	Brott i bruk, enstaka brott i sten
ABT PEN 3G	2,447	0,00	1,20	0,80	1194	Brott i bruk, enstaka brott i sten
ABT PEN 3H	2,427	-0,00	1,20	1,10	938	Brott i bruk, enstaka brott i sten
ABT PEN 3I	2,460	0,00	0,80	0,50	1319	Brott i bruk, enstaka brott i sten
ABT PEN 3J	2,427	0,00	0,80	0,90	965	Brott i bruk, enstaka brott i sten
Medelvärde	2,440				1078	
STD.	0,014					
Torra gruppen						
ABT PEN 3A	2,443				2157	Brott i bruk, enstaka brott i sten
ABT PEN 3B	2,447				2043	Brott i bruk, enstaka brott i sten
ABT PEN 3C	2,448				1980	Brott i bruk, enstaka brott i sten
ABT PEN 3D	2,428				1864	Brott i bruk, enstaka brott i sten
ABT PEN 3F	2,428				1899	Brott i bruk, enstaka brott i sten
Medelvärde	2,439				1989	
STD.	0,010					

ITSR % 54

Notering

Provet har körts i laboratorium

Ort och datum

Vällsta, 2023-06-07



Patryk Witkiewicz, Projektledare

Digitalt utfärdad signatur

Denna rapport måste återges i sin helhet och inga uppgifter får ändras. Provresultatet avser endast analyserat prov. Metodlista med ev. metodavsteg återfinns på www.skanska.se.

LEVERANSKONTROLL Beläggning

Provnummer 37A230068

Sidan 1 av 1

Beställare	Provtagningsdatum	Analys datum
Skanska Industrial Solutions AB	2023-02-15	2023-04-19
Asfaltverket Vällsta	Ankomstdatum	Analys avslut
Rydholmsvägen 3	2023-02-22	2023-06-15
194 91 Upplands Väsby	ID-nummer	Provtagare
Kontaktperson	Temperatur (°C)	PW
-		Följesedels nr
Produkt	Recept	Provtagningsplats
AG 16 160/220	1000161-22-1	Provtagningsstidpunkt
Leverantör	Provplatta Västerhaninge	
Skanska Industrial Solutions AB	Objekt	
Asfaltverket Vällsta	Biobindemedel	
Entreprenör	Märkning	
Skanska Industrial Solutions AB	AG 16 160/220 BIO	

TDOK 2017:0650 Ver.2.0 Bestämning av vattenkänslighet genom pressdragprovning

Typ av prov:

Anmärkning: 7 dygn i vattenbad i 40C

Provkroppar från platta

Provkropp	Skrymdensitet (g/cm³)	Svällning efter Vattenmättnings volym-%	Konditionering volym-%	Uptagen vattenmängd i vikt-%	Drag- hållfasthet kPa	Okulär bedömning av brottytor
Våta gruppen						
AG BIO 3E	2,449	0,20	0,40	1,40	893	Brott i bruk
AG BIO 3F	2,485	0,40	0,20	0,90	1129	Brott i bruk
AG BIO 3G	2,475	0,00	0,60	0,90	1188	Brott i bruk
AG BIO 3H	2,438	0,41	0,61	1,50	1053	Brott i bruk
AG BIO 3I	2,427	0,00	0,00	1,20	1087	Brott i bruk
Medelvärde	2,455				1070	
STD.	0,025					
Torra gruppen						
AG BIO 3A	2,464				1752	Brott i bruk
AG BIO 3B	2,453				1911	Brott i bruk
AG BIO 3C	2,461				1858	Brott i bruk
AG BIO 3D	2,457				1801	Brott i bruk
AG BIO 3J	2,445				1744	Brott i bruk
Medelvärde	2,456				1813	
STD.	0,007					

ITSR % 59

Notering

Provet har körts i laboratorium

Ort och datum

Vällsta, 2023-06-26



Patryk Witkiewicz, Projektledare

Digitalt utfärdad signatur

Denna rapport måste återges i sin helhet och inga uppgifter får ändras. Provresultatet avser endast analyserat prov. Metodlista med ev. metodavsteg återfinns på www.skanska.se.

LEVERANSKONTROLL Beläggning

Provnummer 37A230067

Sidan 1 av 1

Beställare	Provtagningsdatum	Analys datum
Skanska Industrial Solutions AB	2023-02-15	2023-05-25
Asfaltverket Vällsta	Ankomstdatum	Analys avslut
Rydholmsvägen 3	2023-02-22	2023-06-07
194 91 Upplands Väsby	ID-nummer	Provtagare
Kontaktperson	Temperatur (°C)	PW
-		Följesedels nr
Produkt	Receipt	Provtagningsplats
AG 16 160/220	1000161-22-1	Provtagningsstidpunkt
Leverantör	Provplatta Västerhaninge	
Skanska Industrial Solutions AB	Objekt	
Asfaltverket Vällsta	Biobindemedel	
Entreprenör	Märkning	
Skanska Industrial Solutions AB	AG 16 160/220 PEN	

TDOK 2017:0650 Ver.2.0 Bestämning av vattenkänslighet genom pressdragprovning

Typ av prov:

Anmärkning: 7 dygn i vattenbad i 40C

Provkroppar från platta

Provkropp	Skrymdensitet (g/cm³)	Svällning efter Vattenmättnings volym-%	Konditionering volym-%	Uptagen vattenmängd i vikt-%	Drag- hållfasthet kPa	Okulär bedömning av brottytor
Våta gruppen						
AG PEN 3A	2,413	0,00	0,60	1,80	652	Brott i bruk, enstaka brott i sten
AG PEN 3E	2,432	0,00	0,80	1,60	530	Brott i bruk, enstaka brott i sten
AG PEN 3F	2,433	0,00	0,80	1,70	633	Brott i bruk, enstaka brott i sten
AG PEN 3H	2,432	0,20	1,20	1,70	646	Brott i bruk, enstaka brott i sten
AG PEN 3J	2,416	0,00	0,60	1,60	566	Brott i bruk, enstaka brott i sten
Medelvärde	2,425				605	
STD.	0,010					
Torra gruppen						
AG PEN 3B	2,417				1446	Brott i bruk, enstaka brott i sten
AG PEN 3C	2,417				1361	Brott i bruk, enstaka brott i sten
AG PEN 3D	2,439				1562	Brott i bruk, enstaka brott i sten
AG PEN 3G	2,434				1422	Brott i bruk, enstaka brott i sten
AG PEN 3I	2,418				1489	Brott i bruk, enstaka brott i sten
Medelvärde	2,425				1456	
STD.	0,011					

ITSR % 42

Notering

Provet har körts i laboratorium

Ort och datum

Vällsta, 2023-06-07



Patryk Witkiewicz, Projektledare

Digitalt utfärdad signatur

Denna rapport måste återges i sin helhet och inga uppgifter får ändras. Provresultatet avser endast analyserat prov. Metodlista med ev. metodavsteg återfinns på www.skanska.se.

LEVERANSKONTROLL Beläggning

Provnummer 37A230070

Sidan 1 av 1

Beställare	Provtagningsdatum	Analys datum
Skanska Industrial Solutions AB	2023-02-15	2023-04-19
Asfaltverket Vällsta	Ankomstdatum	Analys avslut
Rydholmsvägen 3	2023-02-22	2023-04-19
194 91 Upplands Väsby	ID-nummer	Provtagare
Kontaktperson	Temperatur (°C)	PW
-		Följesedels nr
Produkt	Recept	Provtagningsplats
ABT 16 PMB	1000900-22-1	Provtagningsstidpunkt
Leverantör	Provplatta Västerhaninge	
Skanska Industrial Solutions AB	Objekt	
Asfaltverket Vällsta	Biobindemedel	
Entreprenör	Märkning	
Skanska Industrial Solutions AB	AG 16 PMB BIO	

TDOK 2017:0650 Ver.2.0 Bestämning av vattenkänslighet genom pressdragprovning

Typ av prov:

Anmärkning: 7 dygn i vattenbad i 40C

Provkroppar från platta

Provkropp	Skrymdensitet (g/cm³)	Svällning efter		Upptagen vattenmängd i vikt-%	Drag- hållfasthet kPa	Okulär bedömning av brottytor
		Vattenmättnings volym-%	Konditionering volym-%			
Våta gruppen						
ABT PMB BIC	2,410	0,20	0,40	1,10	1522	Brott i bruk, enstaka brott i sten
ABT PMB BIC	2,430	-0,20	0,00	0,70	1560	Brott i bruk, enstaka brott i sten
ABT PMB BIC	2,423	0,00	0,00	0,80	1559	Brott i bruk, enstaka brott i sten
ABT PMB BIC	2,442	0,20	0,40	0,70	1590	Brott i bruk, enstaka brott i sten
ABT PMB BIC	2,383	-0,20	0,00	1,50	1370	Brott i bruk, enstaka brott i sten
Medelvärde	2,418				1520	
STD.	0,023					
Torra gruppen						
ABT PMB BIC	2,423				1878	Brott i bruk, enstaka brott i sten
ABT PMB BIC	2,390				1955	Brott i bruk, enstaka brott i sten
ABT PMB BIC	2,446				2012	Brott i bruk, enstaka brott i sten
ABT PMB BIC	2,429				1910	Brott i bruk, enstaka brott i sten
ABT PMB BIC	2,409				1943	Brott i bruk, enstaka brott i sten
Medelvärde	2,419				1940	
STD.	0,021					

ITSR % 78

Notering

Provet har körts i laboratorium

Ort och datum

Vällsta, 2023-06-26



Patryk Witkiewicz, Projektledare

Digitalt utfärdad signatur

Denna rapport måste återges i sin helhet och inga uppgifter får ändras. Provresultatet avser endast analyserat prov. Metodlista med ev. metodavsteg återfinns på www.skanska.se.

LEVERANSKONTROLL Beläggning

Provnummer 37A230069

Sidan 1 av 1

Beställare	Provtagningsdatum	Analys datum
Skanska Industrial Solutions AB	2023-02-15	2023-04-19
Asfaltverket Vällsta	Ankomstdatum	Analys avslut
Rydholmsvägen 3	2023-02-22	2023-04-19
194 91 Upplands Väsby	ID-nummer	Provtagare
Kontaktperson	Temperatur (°C)	PW
-		Följesedels nr
Produkt	Receipt	Provtagningsplats
ABT 16 PMB	1000900-22-1	Provtagningsstidpunkt
Leverantör	Provplatta Västerhaninge	
Skanska Industrial Solutions AB	Objekt	
Asfaltverket Vällsta	Biobindemedel	
Entreprenör	Märkning	
Skanska Industrial Solutions AB	ABT 16 PMB	

TDOK 2017:0650 Ver.2.0 Bestämning av vattenkänslighet genom pressdragprovning

Typ av prov:

Anmärkning: 7 dygn i vattenbad i 40C

Provkroppar från platta

Provkropp	Skrymdensitet (g/cm³)	Svällning efter		Upptagen	Drag-	Okulär bedömning av brottytor
		Vattenmättnings volym-%	Konditionering volym-%	vattenmängd i vikt-%	hållfasthet kPa	
Våta gruppen						
ABT PMB 3C	2,434	0,00	0,00	0,40	1568	Brott i bruk, enstaka brott i sten
ABT PMB 3G	2,424	0,40	0,40	0,80	1436	Brott i bruk, enstaka brott i sten
ABT PMB 3H	2,444	-0,20	-0,40	0,30	1811	Brott i bruk, enstaka brott i sten
ABT PMB 3I	2,440	0,00	0,40	0,60	1680	Brott i bruk, enstaka brott i sten
ABT PMB 3J	2,423	0,20	0,00	0,30	1775	Brott i bruk, enstaka brott i sten
Medelvärde	2,433				1654	
STD.	0,009					
Torra gruppen						
ABT PMB 3A	2,409				1955	Brott i bruk, enstaka brott i sten
ABT PMB 3B	2,448				1948	Brott i bruk, enstaka brott i sten
ABT PMB 3D	2,436				2068	Brott i bruk, enstaka brott i sten
ABT PMB 3E	2,427				2017	Brott i bruk, enstaka brott i sten
ABT PMB 3F	2,443				2181	Brott i bruk, enstaka brott i sten
Medelvärde	2,433				2034	
STD.	0,015					

ITSR % 81

Notering

Provet har körts i laboratorium

Ort och datum

Vällsta, 2023-06-26



Patryk Witkiewicz, Projektledare

Digitalt utfärdad signatur

Denna rapport måste återges i sin helhet och inga uppgifter får ändras. Provresultatet avser endast analyserat prov. Metodlista med ev. metodavsteg återfinns på www.skanska.se.

VTI är ett oberoende och internationellt framstående forskningsinstitut inom transportsektorn. Vi bedriver forskning och utveckling för att förbättra kunskapen om infrastruktur, trafik och transporter. Genom vårt arbete bidrar vi till att nå Sveriges transportpolitiska mål för tillgänglighet, säkerhet, miljö och hälsa.

Vi utför forskning på uppdrag inom alla transportslag och arbetar i en tvärvetenskaplig organisation. Den kunskap vi genererar ger viktig information till aktörer inom transportsektorn och används ofta direkt i nationell och internationell transportpolitik.

Utöver forskning erbjuder vi utredningar, rådgivning samt olika mät- och provningstjänster. På VTI har vi avancerad forskningsutrustning av olika slag och världsledande körsimulatorer. Vi har även ackrediterade laboratorier för vägmaterial och krocksäkerhetstestning.

Transportbiblioteket vid VTI är en nationell resurs som samlar in och sprider information om svensk transportforskning. Biblioteket ger stöd och vägledning till alla som söker information inom området vilket inkluderar lån- och kopieservice. Exempel på uppdrag är informationssökningar, handledning i referenshantering och skräddarsydd service till myndigheter och organisationer.

I Sverige samarbetar VTI med universitet och högskolor som bedriver relaterad forskning och utbildning. Vi deltar regelbundet i internationella forskningsprojekt, främst i Europa, och är aktiva inom internationella nätverk och allianser. Vi är cirka 240 medarbetare och finns i Linköping, Stockholm, Göteborg och Lund.

vti

Statens väg- och transportforskningsinstitut • www.vti.se • vti@vti.se • +46 (0)13-20 40 00