

Thesis 360

Kartläggning av biobitumen i världen

- Ett steg närmare en hållbar infrastruktur

Siri Lerjefors

Emma Wittboldt

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



Copyright © Siri Lerjefors, Emma Wittboldt

LTH, Institutionen för Teknik och samhälle

CODEN: LUTVDG/(TVTT-5327)/1-129/2021

ISSN 1653-1922

Tryckt i Sverige av Media-Tryck, Lunds universitet

Lund 2021

Examensarbete

CODEN: LUTVDG/(TVTT-5327)/1-129 /2021

Thesis / Lunds Tekniska Högskola,
Institutionen för Teknik och samhälle,
Trafik och väg, 360

ISSN 1653-1922

Authors: Siri Lerjefors
Emma Wittboldt

Title: Kartläggning av biobitumen i världen – Ett steg närmare en hållbar infrastruktur

English title: A global survey of bio bitumen – One step closer to a more sustainable infrastructure

Language Svenska

Year: 2021

Keywords: Bio binder; Bioasphalt; Rheological properties; Bitumen; Modifier; Rejuvenator; Sustainable pavement

Citation: Lerjefors, S. & Wittboldt, E., Kartläggning av biobitumen i världen – Ett steg närmare en hållbar infrastruktur. Lund, Lunds universitet, LTH, Institutionen för Teknik och samhälle. Trafik och väg 2021. Thesis. 360

Abstract:

The crude oil resources used for bitumen are constantly decreasing, whereas the road network is expanding. This has in the recent years led to increased research for an alternative binder to replace petroleum bitumen in road construction. In this study, nine alternative bio binders were examined and compared in a technical, environmental, and practical aspect. This was done through a literature study where bio binder from swine manure, microalgae, crayfish shell, soybean oil, sunflower oil, waste cooking oil, waste coffee grounds, oakwood and lignin were investigated. The results from the study show that the different bio binders have some similarities with bitumen, but with varying technical advantages and disadvantages including high and low temperature performance. The bio binders show potential in different applications: either as a bitumen modifier, bitumen extender, full bitumen replacement or rejuvenator.

The different bio binders are made from waste or byproducts from other industries. This results in environmental benefits both regarding the reduction of bitumen, as well as improved valorization of byproducts and waste management which otherwise often can lead to major environmental problems. Some of the bio binders also contribute to lower energy needs during mixing and compaction of the asphalt.

In many cases, the practical and economical aspects of different processes need further research to examine if an upscaling of the processes is possible and profitable.

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

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

Innehållsförteckning

Förord	II
Sammanfattning	IV
Summary	VII
1 Inledning	2
1.1 Bakgrund	2
1.2 Syfte	3
1.3 Avgränsningar	3
1.4 Metodbeskrivning	4
1.5 Rapportens disposition	4
2 Teori	6
2.1 Bitumen	6
2.1.1 Framställning	6
2.1.2 Kemisk sammansättning	7
2.1.3 Fysiska egenskaper	8
2.2 Svensk standard för bitumenbundna lager	8
2.2.1 Penetrationstal	9
2.2.2 Viskositet (Kinematisk & Dynamisk)	9
2.2.3 Mjukpunkt	10
2.2.4 Brytpunkt Fraass	10
2.3 Ytterligare mätbara egenskaper	10
2.3.1 Simulerad åldring	10
2.3.2 Krypstyvhet	10
2.3.3 Fasvinkel	11
2.3.4 Komplex skjuvmodul	11
2.3.5 Utmattning	12
2.3.6 Spårbildning	12
2.4 Bindemedlets påverkan	13
3 Biobindemedel	14

3.1	Biobindemedels olika tillämpningar	14
3.2	Krav på biobindemedel	14
3.2.1	Tekniskt	15
3.2.2	Miljömässigt	15
3.2.3	Praktiskt	15
3.3	Biobindemedelmateriel	16
3.4	Svingödsel	18
3.4.1	Beskrivning av svingödsel	18
3.4.2	Utvinning av svingödsel	18
3.4.3	Förekomst av svingödsel	18
3.4.4	Framställning av biobindemedlet	19
3.4.5	Tekniska egenskaper	20
3.4.6	Miljö och klimat	23
3.4.7	Praktiska aspekter	25
3.4.8	Forskningsframsteg	25
3.5	Mikroalger	26
3.5.1	Beskrivning av mikroalger	26
3.5.2	Utvinning av mikroalger	26
3.5.3	Förekomst av mikroalger	27
3.5.4	Framställning av biobindemedlet	27
3.5.5	Tekniska egenskaper	28
3.5.6	Miljö och klimat	31
3.5.7	Praktiska aspekter	32
3.5.8	Forskningsframsteg	32
3.6	Kräftskal	33
3.6.1	Beskrivning av kräftskal	33
3.6.2	Utvinning av kräftskal	33
3.6.3	Förekomst av kräftskal	33
3.6.4	Framställning av biobindemedlet	34
3.6.5	Tekniska egenskaper	34
3.6.6	Miljö och klimat	37
3.6.7	Praktiska aspekter	37
3.6.8	Forskningsframsteg	37
3.7	Sojabönsolja	38

3.7.1	Beskrivning av sojabönsolja	38
3.7.2	Utvinning av sojabönsolja	38
3.7.3	Förekomst av sojabönsolja	38
3.7.4	Framställning av biobindemedlet	39
3.7.5	Tekniska egenskaper	40
3.7.6	Miljö och klimat	43
3.7.7	Praktiska aspekter	44
3.7.8	Forskningsframsteg	44
3.8	Solrosolja	45
3.8.1	Beskrivning av solrosolja	45
3.8.2	Utvinning av solrosolja	45
3.8.3	Förekomst av solrosolja	45
3.8.4	Framställning av biobindemedlet	46
3.8.5	Tekniska egenskaper	48
3.8.6	Miljö och klimat	51
3.8.7	Praktiska aspekter	51
3.8.8	Forskningsframsteg	51
3.9	Matoljeavfall	53
3.9.1	Beskrivning av matoljeavfall	53
3.9.2	Utvinning av matoljeavfall	53
3.9.3	Förekomst av matoljeavfall	53
3.9.4	Framställning av biobindemedlet	53
3.9.5	Tekniska aspekter	54
3.9.6	Miljö och klimat	57
3.9.7	Praktiska aspekter	57
3.9.8	Forskningsframsteg	57
3.10	Kaffesump	58
3.10.1	Beskrivning av kaffesump	58
3.10.2	Utvinning av kaffesump	59
3.10.3	Förekomst av kaffesump	59
3.10.4	Framställning av biobindemedlet	59
3.10.5	Tekniska egenskaper	59
3.10.6	Miljö och klimat	63
3.10.7	Praktiska aspekter	64

3.10.8	Forskningsframsteg	64
3.11	Ek	65
3.11.1	Beskrivning av ek	65
3.11.2	Utvinning av ek	65
3.11.3	Förekomst av ek	66
3.11.4	Framställning av biobindemedlet	66
3.11.5	Tekniska egenskaper	66
3.11.6	Miljö och klimat	68
3.11.7	Praktiska aspekter	69
3.11.8	Forskningsframsteg	69
3.12	Lignin	70
3.12.1	Beskrivning av lignin	70
3.12.2	Utvinning av lignin	71
3.12.3	Förekomst av lignin	72
3.12.4	Framställning av biobindemedlet	72
3.12.5	Tekniska egenskaper	73
3.12.6	Miljö och klimat	79
3.12.7	Praktiska aspekter	80
3.12.8	Forskningsframsteg	81
4	Teknisk jämförelse	82
4.1	Penetrationstal & Mjukpunkt	82
4.2	Viskositet	84
4.3	Komplex skjuvmodul- & fasvinkelsamband	85
4.4	Varma temperaturer	86
4.5	Kalla temperaturer	86
4.6	Åldrande	87
5	Provvägar	88
6	Diskussion och slutsatser	91
6.1	Resultatdiskussion	91
6.1.1	Tekniska aspekter	91
6.1.2	Miljö, klimat och praktiska aspekter	93
6.1.3	Ekonomiskt	94
6.2	Metoddiskussion	95

6.3	Slutsatser	96
6.3.1	Rekommendationer för framtida undersökningar	96
7	Referenser	98

Förord

Detta examensarbete utfördes på vårterminen 2021 på Lunds tekniska högskola inom vägbyggnad och är det avslutande momentet på civilingenjörsprogrammet väg- & vattenbyggnad.

Vi båda tycker det är viktigt med hållbarhet och vill bidra till det samt tycker vägbyggnad är ett intressant ämne. Dessa två faktorer resulterade i att vi genom handledning bestämde oss för att ta oss an det aktuella ämnet biobitumen. Arbetet utfördes för att kartlägga hur långt forskningen kommit och sammanställa detta i ett arbete för den svenska branschen. Detta då en sådan översiktlig sammanfattning inte finns tillgänglig i dagsläget. Vi vill bidra till en bättre förståelse över vad det finns för svårigheter men även möjligheter i framtiden.

Vi vill rikta ett stort tack till Sven Agardh som har funnits vid vår sida under arbetets gång och tagit sig an handledarrollen. Ditt tålamod och tydliga sätt att förklara alla frågor vi kommit med varje vecka har förgyllt denna process. Vi vill även rikta ett stort tack till Mats Wendel & Anders Gudmarsson för att ni har funnits där som bollplank, inspiration och vägledning när vi behövt det.

Slutligen vill vi tacka våra familjer och vänner för den enorma stöttning, alla hejarop och ert engagemang som vi fått ta del av under arbetets gång samt under hela vår studietid, Tack!

Siri Lerjefors & Emma Wittboldt

Lund, maj 2021

Sammanfattning

Investering i nya lösningar är ett måste för att kunna fortsätta producera 1,6 miljarder ton asfalt per år på ett hållbart sätt. En av anledningarna till att omställning krävs är att asfalten idag är baserad på petroleumbaserad olja, en resurs som minskar och därmed ökar fossilt material i pris. Samtidigt byggs vägnätet ut då antalet bilar ökar vilket bidrar till större efterfrågan av bitumen. Det går dessutom åt stora mängder energi vid tillverkningen av bitumen. Dessa faktorer har bidragit till att forskning på nya alternativa bindemedel ökat de senaste åren vilket kan bidra till en social, ekonomisk och miljömässig hållbarhet samt en fossilfri bransch.

Då det finns behov av ett mer hållbart alternativt bindemedel är syftet med detta examensarbete att kartlägga forskningsframgångarna i världen hittills. Detta för att skapa en överblick i vilka möjligheter samt utmaningar som finns inom tekniska, miljömässiga och praktiska aspekter. Det görs även för att få en uppfattning om styrkor och svagheter hos de alternativa materialen jämfört med petroleumbaserat bitumen och de bitumenbundna lager som används i dagsläget som Trafikverket har föreskrivit i Sverige. En av avgränsningarna som gjorts i arbetet är polymermodifierade material, då de inte klassas som biomaterial.

För att utföra examensarbetet har en litteraturstudie gjorts för att samla in kunskap om forskningen som genomförts. En likvärdig mängd samt typ av information har redogjorts för nio utvalda biobindemedel som sedan har jämförts med varandra samt petroleumbaserat bitumen och svensk standard för bitumenbundna lager. När en tillräcklig mängd kunskap samlats in angående styrkor, svagheter och skillnader diskuteras de möjligheter, svårigheter och kategoriseringar som kan göras för biomaterialen och dess eventuella framtida användning.

Resultatet visar att de olika biobindemedlen har liknande egenskaper som bitumen, men med varierande tekniska fördelar och nackdelar. Lignin och kräftskals fördelar är att de motverkar spårbildning, vilket ger nackdelen att de kan försämra sprickmotståndet vid låga temperaturer. Sojabönsolja, solrosolja, matoljeavfall och kaffesump bidrar i stället till minskad risk för sprickbildning vid låga temperaturer, men ökad risk för spårbildning vid höga. Svingödsel visar på både goda sprick- och spårbildningsegenskaper vid en lägre procentandel. Mikroalger och ekträ har undersökts som fullständig ersättare och visar på liknande reologiska egenskaper som bitumen. Mikroalger visar på större spårbildningsmotstånd än bitumen, och ekträ kan behöva polymermodifieras samt att det är stor risk att materialet spricker i kallt klimat. Lignin, svingödsel och matoljeavfall minskar dessutom oxidationen vilket ökar biobindemedlens beständighet. Biobindemedlen har alla tekniskt sett potential att användas som antingen modifierare, extender, total ersättare eller förnygringsmedel.

Utöver reduktionen av petroleumbaserat bitumen bidrar biobindemedlen till förädling av biprodukter och förbättrad avfallshantering vilket minskar miljöpåverkan. Dessutom bidrar vissa biobindemedel till mindre uppvärmningsbehov och därmed energibehov vid blandning och utläggning. För att storskalig produktion ska kunna ske behövs dock i många fall mer forskning, för att undersöka om processen är lönsam. Det behöver även analyseras hur utvinningen av material till biobindemedel kan komma att påverka jordbruk och markanvändning, då det kan konkurrera med andra branscher

Biobindmedlen har undersökts med olika procents inblandning i bitumen, samt att förnyngsmedlen används till åldrat bitumen. Vidare har de testats för olika egenskaper, med olika mätmetoder, ingångsvärden och enheter gjort jämförelserna mer komplexa.

Då de olika biobindemedlens egenskaper kan passa olika bra i olika klimat, varierar förutsättningarna för vad som kan användas beroende geografisk placering, vilket också styr tillgången på de olika materialen.

Än så länge är inblandningen av biobindemedel i bitumen relativt låg, och materialen har ännu inte visat ett helt optimalt beteende. Det krävs därför mycket forskning inom området, som vid framgång ger fördelar till flera parter. Dels minskar beroendet av råolja. Samtidigt behöver mindre mängd avfall läggas på deponi, och användning av biprodukter ökar olika industriprocessers värde.

Detta betyder dock inte att allt som är biobaserat är bra, utan det krävs positiv inverkan i slutet av hållbarhetskedjan. Trots att petroleumbaserat bitumen inte är bra från flera olika synvinklar behöver det alternativa materialet kunna leva upp till samma eller högre standard. Om biomaterialet kräver fler drift och underhållsarbeten kanske det inte lönar sig att byta ut materialet då det inte blir långsiktigt hållbart.

Biomaterialen som har tagits upp i detta arbete är i de flesta fall restprodukter från andra industrier vilket är positivt då de kommer till användning. Det är dock svårt att förutse hur efterfrågan kommer att utvecklas allt eftersom och hur det påverkar andra branscher då det är ett samspel mellan utbud och efterfrågan. Detta bör tas i åtanke när restprodukter skall förädlas då ett samarbete mellan branscher krävs för att samhället skall gå ihop och det bäst lämpade materialet skall tas fram.

Materialens möjligheter att produceras storskaligt är svår att förutse då livscykelanalyser saknas för de flesta materialen. Hur kostnadseffektiva de är samt hur de påverkar andra faktorer är ett stort frågetecken och kommer att vara avgörande för hur de går att använda i framtiden. När nytta och konsekvenser vägs samman kan en helhetsbild över framtidens möjligheter fås.

Summary

Investment in new solutions is a must to be able to continue producing 1,6 billion tonnes of asphalt per year in a sustainable way. One of the reasons why adjustments are required is that the asphalt today is based on petroleum. This resource is decreasing which makes fossil materials increase in cost. At the same time, the road network is expanding as the number of cars increases, which leads to a greater demand for bitumen. In addition, the production of bitumen requires large amounts of energy. These factors have in recent years contributed to an increase in the research for a new alternative binder which can provide a social, economic, and environmental sustainability as well as a fossil free industry.

As there is a need for a more sustainable alternative binder, the purpose of this thesis is to make a survey of the research and its prosperities in the world so far. This thesis is made to create an overview of the opportunities and difficulties that exist regarding technical, environmental, and economic aspects. This is also made to get an idea of the strengths and weaknesses of the various materials compared to petroleum bitumen and the bitumen-bound layers currently used in Sweden as prescribed by the Swedish Transport Administration. One of the delimitations made in the report is polymer-modified materials, as they are not qualified as biomaterials.

To accomplish the mater thesis, a literature study was performed to gather knowledge about the research that has been done. A similar amount and type of information has been gathered for nine selected bio binders, which have been compared with each other as well as petroleum-based bitumen and Swedish standards for bitumen-bound layers. When a sufficient amount of knowledge had been gathered regarding strengths, weaknesses and differences about the materials, a discussion about the possibilities, difficulties and categorizations for future area of use was presented.

The results show that the different bio binders have similar properties to bitumen, but with varying technical advantages and disadvantages. The advantages of lignin and crayfish shell are that they reduce rutting, which gives the disadvantage that they can impair the crack resistance at low temperatures. Soybean oil, sunflower oil, waste cooking oil and waste coffee grounds instead contribute to a reduced risk of cracking at low temperatures, but an increased risk of rutting at high temperatures. Swine manure shows both good cracking and rutting properties, at low percentages. Microalgae and oakwood have been examined as complete bitumen substitutes and show similar rheological properties as bitumen. Microalgae show greater rutting resistance than bitumen does. Oakwood has a high risk of cracking in cold climates and may need polymer modification to meet the requirements. Lignin, swine manure and waste cooking oil additionally reduced the oxidation which increases their durability. The bio binders all have the technical potential to be used as either a modifier, extender, total replacement, or rejuvenator.

In addition to the reduction of petroleum-based bitumen, bio binders contribute to refining of by-products and improved waste management which can possibly reduce their environmental impact. Moreover, some bio binders contribute to less energy needs for mixing and paving. However, in order for large-scale production to be possible, more research is in many cases needed to investigate whether the process is profitable.

The biomaterials were examined with varying percentages mixed that are mixed into the bitumen, and the rejuvenators were used for aged bitumen. Furthermore, they have been tested for different properties, with different measurement methods, input values and units, which has made the comparisons complex.

As the properties of the different bio binders can fit different climates, the conditions for what can be used depend on the geographical location, which also controls the availability of the different materials.

So far, the percentage of biomaterial in mixtures are quite low, and the materials have not yet shown a completely optimal behaviour. Much research is therefore required in the area, which, if successful, can provide benefits to several parties. Dependence on crude oil decreases, while less waste needs to be landfilled. Additionally, the use of by-products increases the value of various industrial processes.

However, this does not mean that everything biological is good. A positive impact is required at the end of the sustainability chain. Although petroleum-based bitumen is not optimal from several points of view, the alternative binder needs to be able to live up to the same or higher performance standard. If the biomaterial requires more maintenance, it may not be profitable to replace the material as it will not be sustainable in the long term.

The biomaterials that have been included in this work are in most cases residual products from other industries, and it is positive that these can be utilized. However, it is difficult to predict how demand will develop over time and how it will affect other industries as there is an interplay between supply and demand. This should be kept in mind when residual products are to be refined, as cooperation between industries is required for society to unite and the most suitable material to be produced.

The opportunities for the materials to be produced on a large scale are difficult to predict as life cycle analyzes are lacking for most materials. How cost-effective they are and how they affect other factors is a major question and will be crucial for how they can be used in the future. When benefits and consequences are weighed together, an overall picture of future opportunities can be obtained.

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Miljöfrågan är högaktuell och Sveriges regerings målsättning är att nå första platsen när det kommer till att bli ett fossilfritt land. Detta är en ambition för att lyckas med FN:s Agenda 2030 (Regeringskansliet, 2015). I Agenda 2030 sätter de globala målen 11, 12 och 13 press på att börja bygga hållbart och investera i nya lösningar (Globala målen, 2020). Miljömålsrådet (2020) menar att bygg- och anläggningssektorn står för en stor mängd växthusgaser och branschen har kommit överens om att år 2045 ha ett nettoutsläpp på noll. För att nå målen krävs det att miljövänliga material används i en större utsträckning och tillsammans med nya alternativa lösningar (Miljömålsrådet, 2020).

Möjligheten till en ökad social hållbarhet kräver välbyggd infrastruktur samt transporter. Infrastrukturen i form av vägar som skall tillgodose dessa är beroende av bitumen som därför behöver bytas ut mot ett mer hållbart alternativ (Trafikverket, 2017). Enligt Trafikanalys (2021) har både mängden personbilar samt lastbilar i trafik ökat varje år mellan åren 2001–2020. Möjligheten att förflytta sig leder till att människor enklare kan ta del av ett större utbud i form av till exempel arbetstillfällen, sjukvård eller fritidsaktiviteter. Detta i sig bidrar till en ökad social hållbarhet då det knyter samman samhället genom transportsystemet (Trafikverket, 2017).

Världens vägnät utgör flera miljontals kilometer, och siffror från 2007 visar att världsproduktionen av asfalt då var 1,6 miljarder ton per år (European Asphalt Pavement Association & National Asphalt Pavement Association, 2009). Det krävs alltså stora mängder asfalt, då asfalt används som beläggning på 90% av världens vägar (Yang & Suciption, 2016). Detta bidrar i sin tur till en ökad användning av bindemedlet bitumen som är en viktig beståndsdel i asfalt, och till största del utvinns av råolja (Asphalt Institute, 2011). Då oljan förbrukas i snabbare takt än vad ny olja bildas kommer dock oljeresurserna ständigt minska tills det att resurserna tar slut (Naturskyddsföreningen, 2018). Oljepriset kommer därmed öka med tiden och det är inte hållbart för branschen att fortsätta att använda råoljebaserad bitumen i samma omfattning som idag. Dessutom sker i nuläget en aktiv omställning från fossilbaserade material på grund av klimatfrågans betydelse i samhället. Frågans intresse skapar en drivkraft som speglar sig i politiken och som sätter upp mål samt regler för att minska beroendet av råolja och därmed öka användningen av miljövänligare material.

Av dessa anledningar är det av intresse att minska andelen bitumen i vägarna, och det har därför börjat forskas på alternativa material att ersätta eller delvis ersätta bitumen med (Yang et al., 2013). Vidare menar Shell (2021) på att de passerade sin oljeproduktionstopp 2019 och att deras oljeproduktion efter detta kommer minska årligen i hopp om att bli utsläppsneutrala år 2050.

En omställning från råolja till mer hållbara material hade även kunnat gynna arbetsmiljön. Vid beläggingsarbeten värms bitumen upp till höga temperaturer, vilket frigör ånga innehållande Polycykliska aromatiska kolväten (PAH). Detta innebär en potentiell risk för asfaltsarbetarnas långsiktiga hälsa då de kontinuerligt utsätts för dessa ämnen (Binet et al., 2002). Flertalet undersökningar har dessutom visat på att asfaltsarbetarnas exponering har negativ påverkan på deras hälsa då det till exempel skadar cellerna i form av oxidativ stress (Bal et al., 2018; Binet et al., 2002; Çelik et al., 2013). Detta motiverar ytterligare fortsatt

forskning på andra alternativa material än bitumen, då det finns stora möjligheter till förbättring även inom arbetsmiljö.

En annan anledning till att minska användandet av bitumen är att det kräver en stor mängd energi för att produceras. Vid asfaltstillverkningen menar Zapata & Gambatese (2005) att 43% av den totala energin går åt för att framställa bindemedlet. Bitumentillverkningens energiförbrukning står för 40% av det som totalt tillverkas i oljeraffinaderier (Stripple, 2001) och ett alternativt bindemedel hade kunnat minska energianvändningen. Utöver minskningen hade samtidigt de bundna lagrens egenskaper kunnat bevaras och i vissa fall även förbättras (Huang et al., 2012).

Många av de hittills framtagna alternativa bindemedlen har liknande kemiska sammansättningar som petroleumbaserat bitumen. Trots detta finns stora variationer i deras egenskaper, och det är inte helt klarlagt hur de reagerar tillsammans med bitumen. Det krävs noggrann testning och granskning av hur materialen beter sig och vad de har för effekter på asfalten både kort- och långsiktigt, och i vissa fall är kunskapen bristfällig (Huang et al., 2012).

De senaste åren har dock forskningen om biobindemedel ökat drastiskt, då många forskare blivit mer optimistiska över möjligheterna inom området. Flertalet forskare inom vägbyggnad instämmer i att om biobitumen kan användas som bindemedel i vägar, eller till och med helt ersätta petroleumbaserat bitumen, är det värt att satsa resurser och kapital på fortsatt forskning inom ämnet (Wang et al., 2020a). En utredning av alternativa bindemedel som inte är tillverkade av råolja bidrar till en social, ekonomisk och miljömässigt mer hållbar värld.

1.2 Syfte

Examensarbetets syfte är att kartlägga forskningen av biobitumen i världen. Målet är därför att utforska vad det finns för olika hållbara alternativa bindemedel för vägbyggnad sett utifrån tekniska, miljömässiga och praktiska aspekter. Deras egenskaper jämfört med dagens petroleumbaserade bitumen skall också kontrolleras. För att uppnå syftet har nedanstående frågeställningar formulerats:

- Vilka olika biobindemedel forskas det på i världen?
- Vad finns det för styrkor & svagheter med de olika alternativen sett utifrån tekniska, miljömässiga och praktiska aspekter?
- I hur stor utsträckning och i vilka sammanhang går respektive biobindemedel att använda?
- Hur beter sig materialen vid inblandning i eller som fullständig ersättare av petroleumbaserat bitumen i jämförelse med petroleumbaserat bitumen?
- Hur står sig de utvalda materialen i jämförelse med Trafikverkets svenska standard, TDOK 2013:0529 för bitumenbundna lager?

1.3 Avgränsningar

Det finns en rad olika material som forskare har arbetat fram genom åren för att hitta ett motståndskraftigt material som uppfyller de egenskaper som bitumen besitter. Då alla biobindemedel är framforskade i olika stor utsträckning och en begränsning av tid är ett faktum för detta examensarbete, har ett antal alternativa biobindemedel valts ut. De utvalda biobindemedlen studeras närmare för att en ordentlig studie, samt jämförelse, skall vara

möjlig. I examensarbetet har material som är väletablerade i forskningssammanhang för framtida biobindemedel undersökts. Även nyligen upptäckta material i sammanhang som gäller biobitumen har valts ut för att skapa en bredd i arbetet. Dessa tros ha potential men de har ännu inte undersökts i samma utsträckning, dock har de studerats med likvärdiga tester vilket ger en möjlighet till jämförelse med de väletablerade materialen.

Detta examensarbete tar inte upp material som till exempel vägar av cement då även cementtillverkningen bidrar till en stor negativ miljö- och klimatpåverkan (Worrell et al., 2001). Cement tas därför inte upp som alternativ då det inte bedöms vara konkurrenskraftigt sett utifrån dagens miljöpåverkan och framtidens miljökriterier. Även ett antal andra material har valts bort på grund av otillräcklig forskning samt att material som till exempel råolja-baserad plast inte är långsiktigt hållbara då de baseras på en ändlig resurs. Vidare fokuseras det inte på material som är polymermodifierade i detta examensarbete på grund av att de inte klassas som biomaterial.

1.4 Metodbeskrivning

Examensarbetet har utförts genom en litteraturstudie där sökord som ”bioasphalt”, ”bio bitumen”, ”alternative asphalt pavements”, ”environmentally friendly asphalt”, ”bio binder” etc. använts för att få en grundläggande förståelse över ämnet och vilka material det forskats på. När kunskapsnivån var tillräckligt hög gjordes ett urval av material som undersöktes mer noggrant. För att få en uppfattning om hur de alternativa bindemedlen stod sig jämfört med svensk standard och petroleumbaserat bitumen genomfördes en jämförelse av de tekniska egenskaperna. De tekniska egenskaper som granskats var reologiska egenskaper som penetrationstal, mjukpunkt, viskositet, komplexa skjuvmodul och fasvinkel. Hur materialen beter sig i varma respektive kalla temperaturer undersöktes för att bidra till ytterligare förståelse angående deformation och sprickbildning. Även hur materialen påverkas av oxidation undersöktes, vilket visar påverkan av åldring. Miljö och praktiska aspekter undersöktes också för att se om materialen har tillräcklig konkurrenskraft för att kunna användas i storskalig produktion till vägbyggnad. Detta låg till grund för diskussionen där de olika materialens för- och nackdelar i olika aspekter togs upp samt en allmän diskussion om användande av biobindemedel gjordes.

1.5 Rapportens disposition

Rapporten inleds med att skapa förståelse för bindemedlet bitumen som används runt om i världen idag. Materialet presenteras noggrannare med hur framställningen, den kemiska uppbyggnaden samt fysiska faktorer som kan påverka materialet vid alternativa inblandningar. För att skapa perspektiv över hur de alternativa biobindemedlen står sig jämfört med dagens petroleumbaserade bindemedel presenteras de krav som ställs på svenska bitumenbundna lager i Sverige. De tester som ingår i Trafikverkets standard presenteras för att skapa en förståelse. Andra tester presenteras därefter då en kartläggning av forskning från hela världen genomförs. Detta bidrar till att en variation av tester utförs och finns inte med i den svenska standarden.

En ingång till vad ett biobindemedel är för något, eventuella indelningar, förutsättningar samt krav presenteras vidare. Det är en stor mängd forskning som bedrivs i världen vilket presenteras i en lista för att sedan kunna välja ut nio material. En djupgående undersökning av de nio utvalda materialen görs på ett så jämförbart sätt som möjligt för att det skall vara möjligt att jämföra dem. En redogörelse över provvägar görs för att få en uppfattning om vilka material som endast är i laboratoriestadiet, men även för att belysa framsteg och vilka

material som testats i större skala. Examensarbetet avslutas med en jämförelse mellan biobindemedel och petroleumbaserat bitumen för att belysa skillnader som följs av en diskussion som lyfter styrkor, svagheter, problematik och betydande faktorer som kan påverka vägarnas bitumenbundna lager både i nutid och i framtiden. Rapporten avslutas med en slutsats för att knyta an till syftet som presenterades i början av rapporten samt rekommendationer för eventuella framtida studier.

2 Teori

2.1 Bitumen

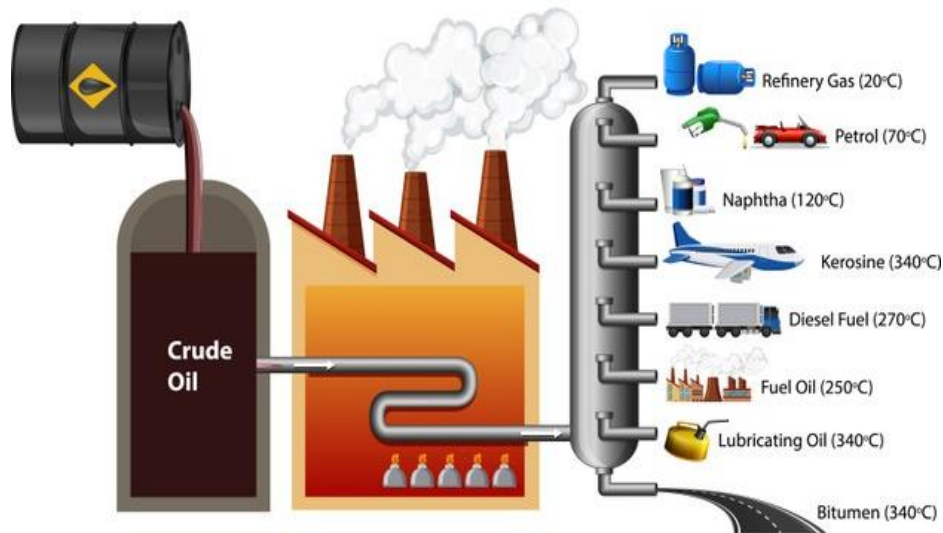
Bitumen är ett material med varierande egenskaper samt flera olika användningsområden, varav 80–85 % används till vägbyggnad. Resten används till största del inom takläggning men även andra industriella applikationer (Eurobitume, u.å.).

Trots att bitumen endast utgör 5–7 vikt-% av vägmaterialet (Agardh & Parhamifar, 2014), har det en betydande roll för vägarnas funktion och beteende (Asphalt Institute, 2011). Det har flera viktiga roller i en asfaltsbeläggning. Bland annat bidrar det till beläggningens lastfördelande förmåga, och gör beläggningen flexibel vilket innebär att den kan formas efter olika laster utan att gå till brott. Bitumen har även som uppgift att binda samman stenmaterialet samt ge det skydd från krossning och klimatpåverkan. Vid utläggning och packning fungerar bitumen även som smörjmedel vilket underlättar en tät och stabil uppbyggnad av stenaggregatet (Agardh & Parhamifar, 2014).

2.1.1 Framställning

Bitumen kan förekomma naturligt både i berggrunden och i så kallade asfaltsjöar, där avdunstning av flyktiga avlagringar sker och lämnar kvar bitumen. Naturlig bitumen används dock sällan idag utan majoriteten av bitumen framställs i raffinaderier genom destillation av råolja (Asphalt Institute, 2011). Det är emellertid endast vissa typer av råoljor som genom destillation kan framställa bitumen av tillräckligt god kvalitet. Av all tillgänglig råolja är det bara cirka 10–15 % som kan tillgodose de önskade egenskaperna (Eurobitume, u.å.).

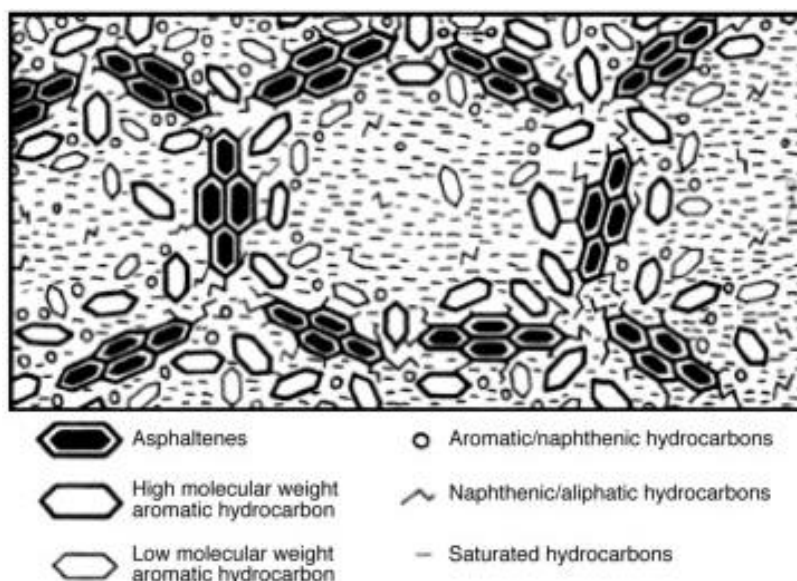
Den vanligaste raffineringsmetoden för att framställa bitumen är genom destillation i ett destillationstorn, där oljan värms upp till 350–380°C. De lättare fraktionerna med låg kokpunkt är då i gasform och stiger uppåt i tornet där de förlorar värme längs vägen. När varje fraktion når höjden där temperaturen är precis under dess kokpunkt kondenserar de och leds bort. De allra lättaste fraktionerna separeras bort som ånga i översta delen. Den kvarvarande tjockare oljan rinner vidare till en vakuumdestillation, där tryckminskning gör att kokpunkten minskar. Detta separerar bort ytterligare fraktioner, samtidigt som termisk sprickning av molekylerna undviks (Shell Bitumen, 2003). Processen visas i Figur 1 på nästa sida.



Figur 1. Framställning av bitumen från råolja (Freepik, 2020). *Licens: Freepik License*

2.1.2 Kemisk sammansättning

Bitumen består av en blandning av flera olika organiska molekyler med relativt hög molekylvikt. Den exakta sammansättningen varierar dock beroende på vilken typ av råolja som destillerats samt på raffinering- och blandningsprocessen (Asphalt Institute, 2011). Blandningen består till största del av kolväten, med en liten andel andra kemiska grupper innehållande svavel, kväve och syre. Analyser som utförts på olika bitumen visar att de flesta innehåller 82–88% kol, 8–11% väte, 0–6% svavel, 0–1,5% syre och 0–1% kväve. Den kemiska sammansättningen är komplex och delas därför förenklat in i två kemiska huvudgrupper: asfaltener och maltener. Malten kan i sig delas upp i tre grupper: Mättade kolväten, aromatiska kolväten och hartser. Bitumen ses som ett kolloidalt system, vilket syns i Figur 2 där asfaltenerna som har hög molekylvikt är utspridda i de oljiga maltenerna. (Shell Bitumen, 2003).



Figur 2. Bitumens kolloidala struktur. Koncentrationen asfaltenerna och maltenerna kan variera men figuren visar ett exempel (Shell bitumen, 2003).

Innehållet av organiska molekyler gör att bitumen reagerar med syre från den omgivande luften, vilket gör att de ingående molekylerna ändrar sammansättning och struktur. Detta kallas för oxidation, och dess påverkan på asfalten beskrivs vidare i kapitel 2.4 (Asphalt Institute, 2011).

2.1.3 Fysiska egenskaper

Bitumen är ett viskoelastiskt material, vilket innebär att det vid höga temperaturer beter sig som trögflytande vätskor och vid låga temperaturer som elastiska solider. Bitumens reologiska egenskaper, det vill säga flödes- och deformationsegenskaper, påverkas alltså till stor del av temperatur. Detta i sig har stor betydelse för arbetsprocessen där det används samt för spänningar och töjningar som uppstår på grund av trafikbelastning och klimat (Phønix Contractors, 1995).

Ett optimalt bitumen är vid låga temperaturer tillräckligt elastiskt och flexibelt för att motverka sprickor, sönderfall av beläggning, samt att klistringen brister. Det ska vid höga temperaturer dessutom vara tillräckligt hårt för att motverka deformationer av asfaltsbeläggningen vid belastning. Vidare är det viktigt att bindemedlet kan göras tillräckligt flytande vid antingen uppvärmning, tillsats av lösningsmedel eller vid emulgering i vatten, för att underlätta utläggning (Phønix Contractors, 1995).

Vid deformation reagerar bitumen olika beroende på belastningstid. Materialets elastiska egenskaper är dominerande vid korta belastningar, och viskosdeformation (bestående deformation) är dominerande vid långtidsbelastning (Phønix Contractors, 1995).

Förutom de reologiska egenskaperna kännetecknas materialet av god vidhäftning mot flertalet stenmaterial (Phønix Contractors, 1995). Andra positiva egenskaper hos bitumen som bidragit till dess stora användningsområde är att det är vattenresistent, att det är resistent mot måttliga koncentrationer av de flesta kemikalier samt att det står emot klimatpåverkan i form av regn, luft, värme och kyla (Agardh & Parhamifar, 2014).

2.2 Svensk standard för bitumenbundna lager

Det finns ett flertal olika tester som behöver göras för att fastställandet av de krav på bitumen som Trafikverket (2015) har föreskrivit i Krav Bitumenbundna lager, TDOK 2013:0529. Krav sätts för att vägar skall hålla en god standard och ha en så lång livslängd som möjligt. Testerna som krävs fastställer bindemedlets olika egenskaper som sedan kan kategoriseras samt jämföras med Trafikverkets kravspecifikationer, se dessa i Tabell 1 nedan.

Tabell 1. Trafikverkets (2015) krav i TDOK 2013:0529 för bitumenbundna lager vid bestämning av penetrationstal samt andra egenskaper (NR står för No Requirement, vilket betyder att det inte finns några speciella krav att ta hänsyn till). Återgiven från Krav Bitumenbundna lager. Rapport: TDOK 2013:0529 (2015:11), Trafikverket. Copyright (2015) med tillstånd från Trafikverket.

Egenskap	Analysmetod SS-EN	Enhet	Typbeteckning				
			50/70	70/100	100/150	160/220	330/430
Penetration vid 25°C	1426	x 0,1 mm	50-70	70-100	100-150	160-220	NR
Penetration vid 15°C	1426	x 0,1 mm	NR	NR	NR	NR	90-170
Kinematisk viskositet vid 135°C	12595	mm ² /s	≥ 295	≥ 230	≥ 175	≥ 135	≥ 85
Dynamisk viskositet vid 60°C	12596	Pa·s	≥ 145	≥ 90	≥ 55	≥ 30	≥ 12
Mjukpunkt	1427	°C	46-54	43-51	39-47	35-43	NR
Brytpunkt Fraass	12593	°C	≤ -8	≤ -10	≤ -12	≤ -15	≤ -18

2.2.1 Penetrationstal

Vid bestämning av penetrationstal och i sin tur några av bindemedlets fysiska egenskaper belastas en standardiserad nål med en vikt på 100 gram. Nålen tränger ned i provkroppen av bitumen i fem sekunder och djupet som den har trängt ned till mäts. Djupet som uppmätts uttrycks ofta i tiondelmillimeter och är dess penetrationstal vilket är starkt kopplat till bindemedlets temperatur vid testillfället som oftast utgår från 25°C, men kan ändras beroende på bindemedlets användningsområden och vad som skall undersökas (Swedish Standards Institute, 2015a). Penetrationstalet mäter hårdheten och motstånd mot deformation, där ett lägre penetrationstal innebär ett hårdare bitumen.

2.2.2 Viskositet (Kinematisk & Dynamisk)

Ytterligare en egenskap som nämns i Tabell 1 ovan är kinematisk viskositet. Denna egenskap beror endast på gravitation och är ett mått på vätskors inre rörelsemotstånd, alltså hur trögflytande vätskor är. För att fastställa denna egenskap används en kalibrerad viskosimeter som består av provrörsliknande glasrör, så kallade kapillärrör. Anordningen består av sammansatta kapillärrör i olika form och diameter. Viskosimetern sänks ner i olja som är upphettad till 135°C där sedan bitumen hålls i anordningen. När bindemedlet nått samma temperatur som oljebadet skapas ett vakuum eller ett övertryck i en av viskosimeterns ändar så att den tillsatta bitumenmängden sätts i rörelse och fortsätter sedan att röra sig med hjälp av gravitation. Ett tidtagarur mäter tiden det tar från en start- respektive slutpunkt på viskosimetern. Tiden som fås multipliceras med den använda viskosimeterns faktor (som kan variera beroende på vilken sorts av viskosimeter som använts) och ger sedan den slutgiltiga kinematiska viskositeten för just det utvalda bitumen som undersökts (Asphalt Institute, 2011).

Dynamisk viskositet hänger ihop med den kinematiska, men inkluderar yttre krafter i form av skjuvspänning. Den dynamiska viskositeten mäts på samma sätt som den kinematiska men i stället för att gravitationen hjälper vätskan att förflytta sig är det ett skapat undertryck på 40 kPa som driver bindemedlet i viskosimetern framåt. Tiden som uppmäts mellan två givna start- respektive slutpunkt multipliceras med viskosimeterns faktor som sedan ger ett resultat på vad den dynamiska viskositeten är för bindemedlet (Swedish Institute for Standards, 2000).

Viskositeten kan även mätas med hjälp av andra mätmetoder än de som presenterades ovan samt i andra enheter än de som finns i svensk standard. Detta skapar svårigheter att kunna jämföra egenskapen från varierande källor.

2.2.3 Mjukpunkt

Mjukpunktstestet, som är ett av de vanligaste testen, som utförs genom att bindemedel läggs i två olika mässingsringar som då bildar två kompakta diskar. Ovanpå testkropparna läggs varsin stålkula och hela testanordningen befinner sig i ett vätskebad. Vätskan tillsammans med provkroppen hettas upp och det är när båda stålkulorna faller igenom bitumendisken samt ytterligare ca 25 mm ($\pm 0,4$) som mjukpunkten registreras. Det tal som avläses är den temperatur när detta skett för respektive kula som sedan beräknas till ett medelvärde av dessa temperaturer (Swedish Standards Institute, 2015b).

2.2.4 Brytpunkt Fraass

För att ta reda på hur stor dragspänning bindemedlet klarar av vid kylning mäts en brytpunkt. Detta går till genom att en böjbar plåt kyls ner och på plåten smetas ett jämnt lager bitumen ut. När plåten sedan töjer ut bindemedlet med hjälp av att den böjs samtidigt som avkylningen sker, kan till slut bindemedlet inte klara av dragspänningen som uppstår. När dragkraften blir för stor uppstår sprickor i bindemedlet. Brytpunkten är när första sprickan uppenbarar sig. Då avläses plåtens temperatur och det gradtalet blir bindemedlets brytpunkt enligt Fraass (Swedish Standards Institute, 2015c).

Den lägsta temperaturen bindemedlet klarar av kan även mätas med andra metoder. Därför kan det vara svårt att jämföra olika värden.

2.3 Ytterligare mätbara egenskaper

2.3.1 Simulerad åldring

För att se hur ett bindemedels åldrande påverkar dess egenskaper simuleras åldringen genom olika processer.

Rolling Thin Film Oven Test (RTFOT) används för att simulera korttidsåldring, alltså den åldring som sker vid blandning, transport och packning. Detta görs genom att en liten mängd bitumen hålls i en glasflaska som sätts in i en ugn där den roteras vertikalt i ca 85 minuter, med konstant lufttillförsel. Effekten av värmen och luften undersöks sedan genom massförändringen av provet, eller så genomförs ytterligare fysiska och kemiska tester för att se hur åldringen förändrat andra egenskaper för bindemedlet bitumen (Asphalt Institute, 2011).

En process som istället simulerar långtidsåldring, det vill säga åldringen som sker när vägen är i drift, är Pressure Aging Vessel (PAV). Bindemedlet placeras då i stålpannor där de utsätts för luft med högt tryck och temperatur i ett tryckåldringskärl i ca 20 timmar. Denna process simulerar åldring efter 5–10 år, och används efter RTFOT för att få med alla åldrandets delar för bindemedlet (Asphalt Institute, 2011).

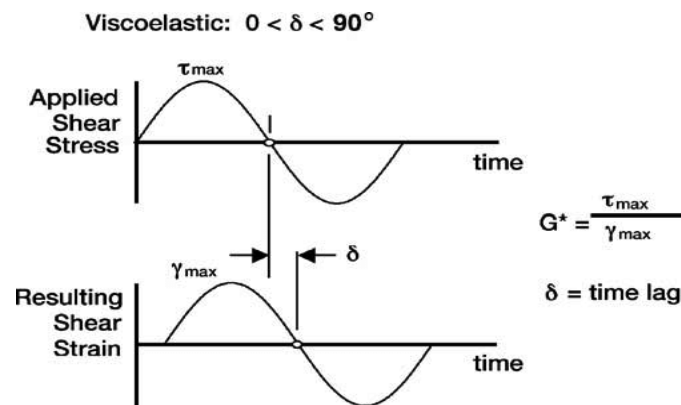
2.3.2 Krypstyvhet

För att kunna utvärdera bitumens egenskaper vid låga temperaturer används en böjbalksreometer (BBR). Den mäter vid de lägsta tjänstetemperaturerna då bindemedlet till största del agerar som en elastisk solid. Testet brukar göras på bitumen som genomgått åldringssimulering genom både RTFOT och PAV (Asphalt Institute, 2011).

Testet genomförs genom att en liten bitumenbalk läggs i ett kallt vätskebad för att kylas ner till rätt temperaturer. Balken läggs sedan upp fritt upplagd på stöd och dess mittpunkt utsätts för konstant last i fyra minuter medan töjningen registreras vid olika tidpunkter. Balkteori används sedan för att beräkna styvheten under kryplast. Krypstyvhet, S är motståndet mot kryplasten, och om styvheten är för hög kommer asfalten ha ett sprött beteende vilket ökar risken för att sprickor ska uppstå (Asphalt Institute, 2011).

2.3.3 Fasvinkel

Fasvinkeln, ϕ , kan mätas med en dynamisk skjuvreometer (DSR). Då placeras bindemedlet mellan två plattor, varav en är fast och en oscillerar fram och tillbaka. Detta sker i ett specifikt antal cykler, och antalet cykler per sekund varierar beroende på vilken belastningsfrekvens som ska undersökas. Spänningen och deformationen mäts efter varje cykel, genom vilka fasvinkeln kan beräknas med hjälp av tidsförskjutningen mellan dessa, vilket ses i Figur 3. Fasvinkeln beskriver på detta sätt hur stor relativ andel elastiska respektive viskösa komponenter bitumen har. Ett helt elastiskt material deformeras direkt av en lastpåverkan, alltså helt utan tidsförskjutning, vilket ger en fasvinkel på 0° . Denna tidsförskjutning är däremot relativt stor hos ett visköst material, och fasvinkeln kan bli som högst 90° . Bitumen, som är viskoelastiskt, har med temperaturen varierande egenskaper inom intervallet 0° - 90° (Asphalt Institute, 2011).



FFigur 3. Diagram över tidsförskjutningen mellan spänning och deformation (Baumgardner et al., 2007).

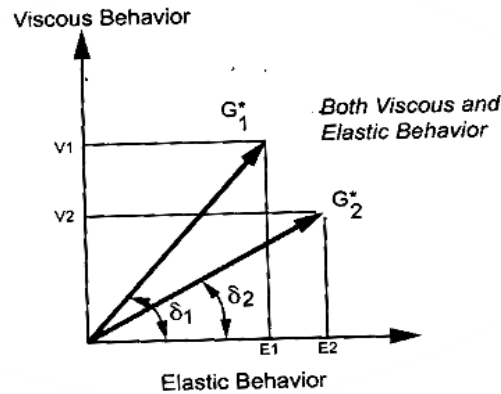
Återgiven från *Journal of ASTN International*, 4(8), Baumgardner, G. L. & Rowe G. M., *Specifications for Roofing and Industrial Asphalts Using Dynamic Shear Rheometry (DSR)*, Copyright (2007) med tillstånd från ASTM International.

2.3.4 Komplex skjuvmodul

Genom DSR-mätningar kan även den komplexa skjuvmodulen, G^* mätas. Skjuvmodulen beskriver ett materials motstånd mot deformation vid exponering av sinusformad skjuvspänning, och innehåller både en elastisk del och en viskös del, vilket ses i Figur 4. Komplex skjuvmodul, G^* beräknas genom den maximala skjuvspänningen dividerat på den maximala skjuvdeformationen, trots att en tidsförskjutning mellan dessa kan finnas (Asphalt Institute, 2011).

Skjuvmodulen förhåller sig till elasticitetsmodulen genom sambandet (Popov, 1976):

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$



Figur 4. Samband mellan den komplexa skjuvmodulen och fasvinkel (Asphalt Institute, 2011). Återgiven från MS-26 *The Asphalt Binder Handbook*, Asphalt Institute. Copyright (2011) med tillstånd från Asphalt Institute.

Mätningen med dynamisk skjuvreometer sker för olika temperaturer och belastningsfrekvenser och ger därmed en indikation över bitumens beteende vid förväntade beläggningstemperaturer och trafiklast, vilka kan variera (Asphalt Institute, 2011).

2.3.5 Utmattning

När bitumen åldrats under lång tid ökar styvheten, och samtidigt utsätts bitumen för upprepade trafiklast. Denna kombination av styvhet och regelbunden belastning som påfrestar vägen gör att det finns risk för utmattningsprickor vid medelhöga till låga temperaturer (Asphalt Institute, 2011).

Ett vanligt sätt att mäta bitumens utmattning är genom en utmattningsfaktor som fås genom att multiplicera den komplexa skjuvmodulen med sinus av fasvinkeln, $G^* \sin \phi$. Detta görs efter att bituminet åldrats genom RTFOT och PAV, och faktorn anses ge en indikation på bitumens styvhet vid måttliga temperaturer efter åldring. Enligt amerikanska kriterier (Superpave) ska värdet inte överstiga ett maxvärde på 5000 kPa (Asphalt Institute, 2011).

2.3.6 Spårbildning

När plastiska deformationer ackumuleras efter upprepade belastningar från bland annat tung trafik vid höga temperaturer, bildas spår i vägen. Ett vanligt sätt att mäta bitumens resistens mot spårbildning är genom en spårbildningsfaktor. Spårbildningsfaktorn beräknas genom den komplexa skjuvmodulen dividerat med sinus av fasvinkeln, $G^* / \sin \phi$. Ju högre spårbildningsfaktor, desto större resistens mot spårbildning. Ur ett spårbildningsperspektiv är därför en hög komplex skjuvmodul, G^* och en låg fasvinkel, ϕ att föredra (Asphalt Institute, 2011).

2.4 Bindemedlets påverkan

Bitumen påverkas av många egenskaper som är viktiga att beakta samt testa för att klara av de krav som ställs samt för att vägen skall hålla en så god standard under så lång tid som möjligt i det rådande klimatet.

Trafikverkets krav, tillsammans med tester, kan ge en god indikation på hur bindemedlet klarar av det som vägen utsätts för under sin livslängd. Det finns flera olika sorters bitumen som används beroende på vilken typ av väg som skall byggas och vad den kräver för egenskaper (Trafikverket, 2014). Dessa bindemedelstyper delas in efter intervall på penetrationstal och är ett mått på bindemedlets konsistens som i sin tur hänger samman med andra egenskaper (Laurell Lyne & Trädgårdh, 2018).

Som de tidigare nämnda testernas tillvägagångssätt visade, är temperatur en parameter som utgör en avgörande roll när det kommer till bitumens egenskaper. Intervallen som penetrationstalen utgör samt mjukpunkten beskriver bitumens styvhet och hur den förändras med temperaturen. Om bindemedlet vid höga temperaturer har en styvare karaktär kan detta innebära att de permanenta deformationerna inte uppkommer i en så stor skala på grund av att belastningen sprids ut. Om vägen i stället befinner sig i ett kallt klimat bör bindemedlet ha en mjukare konsistens för att klara av termiska spänningar och eventuell tjällyftning som i annat fall kan generera sprickor. Med ett mjukare bindemedel är väggroppen mer flexibel och kan motverka bindemedlets benägenhet att spricka (Trafikverket, 2014).

Även brytpunkten genom Fraass-testning ger en indikation i form av gradtal som bitumen spricker, vilket enligt Trafikverket (2015) ligger någonstans omkring -8°C till -18°C beroende på penetrationstalsintervallet. Bindemedel är mer benäget att spricka ju styvare det är på grund av spänningar som uppstår i materialet (Trafikverket, 2014).

I och med att bindemedlet är känsligt och föränderligt med temperatur är klimatet en avgörande faktor för att veta hur bindemedlets egenskaper påverkas. Ytterligare faktorer förutom temperaturen som även de till viss del hänger ihop med klimatet är hur luft och vatten påverkar bindemedlet och dess egenskaper, vilket bör beaktas (Trafikverket, 2014).

Syret från luften tenderar att reagera med bitumen och påskyndar åldringsprocessen genom oxidation, vilket leder till att bitumen blir styvare och sprödare och därmed blir mer benägen att spricka. Oxidationen går relativt långsamt, men ökar i varmare klimat (Asphalt Institute, 2011). Åldrandet av bindemedlet kan göra att material (både bitumen samt stenen) lossnar från vägytan. Åldringens påverkan visas på penetrationstal- respektive mjukpunktstesterna genom att penetrationstalet minskar och mjukpunktens gradtal ökar (Trafikverket, 2014).

Regnet utgör även en betydande parameter då det ställer krav på bitumens vattenkänslighet. Detta kan påverka bindemedlets förmåga att klistra samman asfaltsbeläggningen och kan resultera i att vägen bryts ner. Ett sätt att motverka detta kan vara genom en ökad mängd av andelen bindemedel (Trafikverket, 2014).

Viskositeten är också något som testas och som Trafikverket (2015) ställer krav på. Denna egenskap varierar beroende vilken bindemedelstyp som används och påverkar hur rörligt bitumen är. Bitumen är ett mer trögflytande bindemedel ju högre viskositeten är (Asphalt Institute, 2011). Om viskositeten är för hög blir bindemedlet för styvt för att kunna packas och blir därmed svårhanterligt. Det kan även skapa problem vid för låga värden på viskositeten då det kan bidra till påtagliga deformationer (Agardh & Parhamifar, 2014).

3 Biobindemedel

3.1 Biobindemedels olika tillämpningar

Ett biobindemedel är ett alternativt bindemedel som är baserat på förnybara material i stället för råolja. Biobindemedel produceras från biomassa, som i huvudsak används till att producera biobränsle. Det finns olika biomassor med varierande ursprungsområden som till exempel sopåtervinning, skogsindustrin, jordbruk och avföring från djur (Su et al., 2018).

Utöver att det baseras på förnybara resurser, är en fördel med flera biobindemedel att det bidrar till större återvinning av industriella biprodukter och avfall från andra branscher, som då i stället kan utnyttjas i vägar. Detta reducerar både mängden avfall som behöver slängas på deponier samt behovet av nya material (Ingrassia et al., 2019). För att vara användbart måste det dock klara både tekniska och praktiska krav i form av tillgång, hantering, logistik och prestanda (Ingrassia et al., 2019).

Det finns olika tillämpningar av biobindemedel i asfalt som kan minska efterfrågan av råolja. I nya asfaltmassor kan biobindemedlet minska andelen petroleumbaserat bitumen genom att agera som antingen ett direkt alternativt bindemedel, bitumen extender eller en bitumenmodifierare. Ett direkt alternativt bindemedel innebär en hundra procentig ersättning av råoljebitumen. En bitumen extender ersätter råoljebitumen med 25–75% och en modifierare med mindre än 10% (Peralta et al., 2012). Dessa kategorier täcker inte alla intervall men anses ge en anvisning över hur det går att kategorisera olika biobindemedel. Biobindemedlen kan inte endast reducera andelen av bitumen, utan har även möjlighet att förbättra hela bindemedlets kvalitet (Rahman et al., 2015).

Ett annat användningsområde för biobindemedel är inom återanvändning av asfalt, vilket är aktuellt då asfalt är 100% återanvändbart. Då är biobindemedlets uppgift att återskapa de gamla bituminets egenskaper. De kallas då för föryngringsmedel, och används för att återställa de reologiska egenskaperna hos använd asfalt så att den ska få tillbaka sina ursprungliga mekaniska egenskaper. Ett föryngringsmedel bidrar till ökade möjligheter att återanvända asfalt på vägarna, och bidrar därför också till minskad efterfrågan av petroleumbaserat bitumen (European Asphalt Pavement Association, 2018).

3.2 Krav på biobindemedel

För att ett biobindemedel ska vara möjligt att använda som alternativ till bitumen, finns ett stort antal krav som måste uppfyllas. Kraven ställs på både tekniska egenskaper, miljöaspekter samt praktiska aspekter.

3.2.1 Tekniskt

Ett alternativt bindemedel måste klara ett antal tekniska krav, vilka nämnts förut. Bland annat ska det ha särskilda reologiska egenskaper. Vidare ska det ha speciella åldrande egenskaper samt vidhäftningsegenskaper till stenmaterialet. Även vattenlöslighet, interaktion med olika blandningar, hur det reagerar med oljor och bränsle är exempel på egenskaper det ställs krav på (Kluttz, 2012).

Trots att bindemedlets testade egenskaper ger en god fingervisning, kan de inte alltid ensamma förutsäga den slutliga prestandan i vägen. Det behöver fastslås hur bindemedlet reagerar inblandat i en asfaltsmix, och i slutändan behövs fältförsök för att på riktigt kunna fastställa bindemedlets påverkan på vägens egenskaper (Kluttz, 2012).

3.2.2 Miljömässigt

Det är även viktigt att biobindemedlet är hållbart ur ett miljöperspektiv. För att användningen av biomassa ska anses hållbar måste flera krav uppfyllas enligt Naturvårdsverket (2021). Det får till exempel inte bidra till skövling av skog, minskande av den biologiska mångfalden, försämra markens produktionsförmåga långsiktigt, försämra vatten- och markkvaliteter eller släppa ut skadliga föroreningar. Andra viktiga krav är att arbetsvillkor och lokalbefolkning inte får påverkas negativt, samt att växthusgaserna måste vara lägre än från en fossilbaserad produktion.

3.2.3 Praktiskt

Logistiken är en annan viktig del som det ställs krav på, på grund av att bindemedlet måste kunna transporteras, lagras och hanteras utan problem.

Bindemedlet måste även vara ekonomiskt hållbart. Även om ett nytt, alternativt material kan ge god prestanda i vägar, krävs att det prismässigt är i närheten av petroleumbaserat bitumen för att det ska vara konkurrenskraftigt. För att bindemedlet ska vara kommersiellt användbart måste materialet även finnas tillgängligt i stora mängder på begäran. Om dessa krav inte uppfylls finns ingen möjlighet för ett alternativt bindemedel att bli mer än laboratorieförsök (Kluttz, 2012).

3.3 Biobindemedelmateriel

Nedan följer en lista på material som författarna hittat i olika vetenskapliga artiklar och som undersökts som potentiella biobindemedel. De engelska termerna för materialen finns i parentes nedan:

- Bomullsolja (Cotton seed oil)
- Druvrester (Grape residues)
- Ekträ (Oakwood)
- Fiskfjäll (Fish scales)
- Halm (Straw)
- Hampväxter (Hemp Plants)
- Jute (Jute)
- Kaffesump (Spent coffee grounds)
- Kokosnötskal (Coconut shell)
- Kräftskal (Crayfish shell)
- Lignin (Lignin)
- Linfröolja (Linseed oil)
- Majsblast (Corn stover)
- Matavfall (Food waste)
- Matoljeavfall (Waste cooking oil)
- Mikroalger (Microalgae)
- Nanolera (Nanoclay)
- Oljeatrofa (*Jatropha curcas*)
- Ostronskal (Oyster shell)
- Palmkärnolja (Palm kernel oil)
- Pellets (Pellets)
- Rapsolja (Rapeseed oil)
- Ricinolja (Castor oil)
- Risskal (Rice husk)
- Råtalolja (Crude tall oil)
- Rödhirs (Switch grass)
- Sjögräs (Seaweed)
- Slam (Sludge)
- Sojabönsolja (Soybean oil)
- Solrosolja (Sunflower oil)
- Sisalblad (Sisal leaf)
- Svingödsel (Swine manure)
- Vallmokapsel (Poppy capsule)

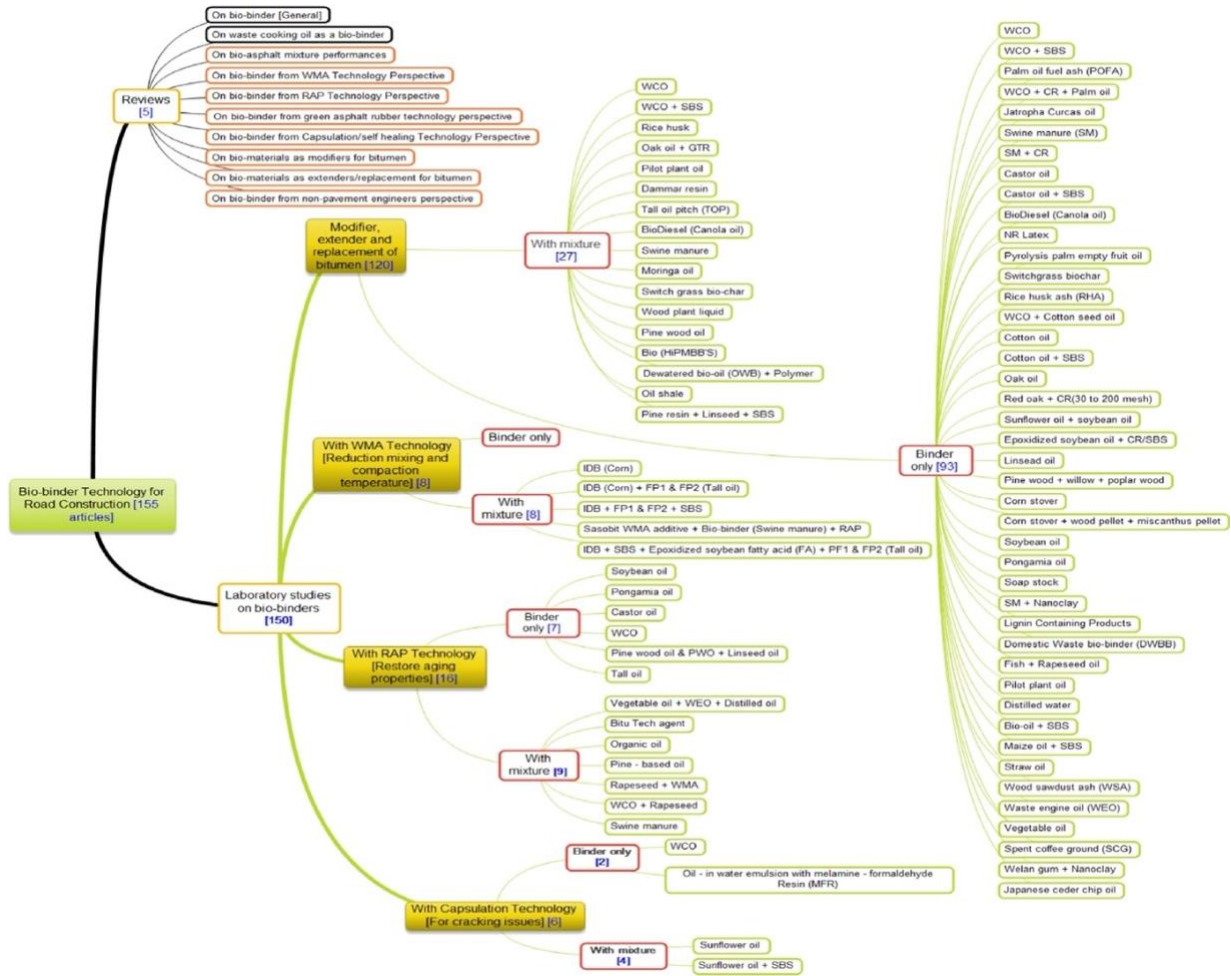
Av de biobindemedel som har listats ovan och som syns i Figur 5, har nio stycken valts ut för en fördjupad granskning och presenteras i kommande delkapitel. De utvalda materialen är svingödsel, mikroalger, kräftskal, sojabönsolja, solrosolja, matoljeavfall, kaffesump, ek och lignin.

De material som valts ut är dels nyuppkomna, aktuella material som det forskas mycket på i laboratorier: svingödsel och mikroalger.

Även material som använts i befintliga vägbyggen och därmed har stor potential att fungera som biobindemedel har valts ut: lignin, ek, vegetabiliska oljor (matoljeavfall, sojabönsolja och solrosolja).

Material där tillräcklig forskning med relevanta tester genomförts så att de är jämförbara och skapar en bredd på arbetet har också valts ut: kräftskal och kaffesump.

Det finns fler material än de nio som har potential och kan undersökas vidare, men då arbetet är tidsbegränsat fanns ingen möjlighet att undersöka ytterligare material.



Figur 5. Överblick av forskningens biomaterial och dess olika grenar (Al-Sabaei et al., 2019). Återgiven från Journal of Cleaner Production, 249(2020), Al-Sabaei, A. M., Naipah, M. B., Sutano, M. H., Alaloul, W. S. & Usman, A., A systematic review of bio-asphalt for flexible pavement applications: Coherent taxonomy, motivations, challenges and future directions, Copyright (2019) med tillstånd från Elsevier.

3.4 Svingödsel

3.4.1 Beskrivning av svingödsel

Genom tillväxten av världens befolkning, har även grisuppfödningen i världen accelererat på grund av ökad efterfrågan. Därför sker produktionen nu i större skala, vilket bidrar till stora problem gällande hantering av svingödsel. Svingödsel innehåller tungmetaller, vilket kan skapa föroreningar om det inte hanteras på ett bra sätt. Tungmetallerna kan då transporteras med ytvattnet ner i jorden, vilket i sin tur förorenar grundvattnet. Detta är lätt hänt om svingödsel lagras under en lång tid, och kan göra stor skada på den ekologiska miljön (Wang et al., 2020b).

3.4.2 Utvinning av svingödsel

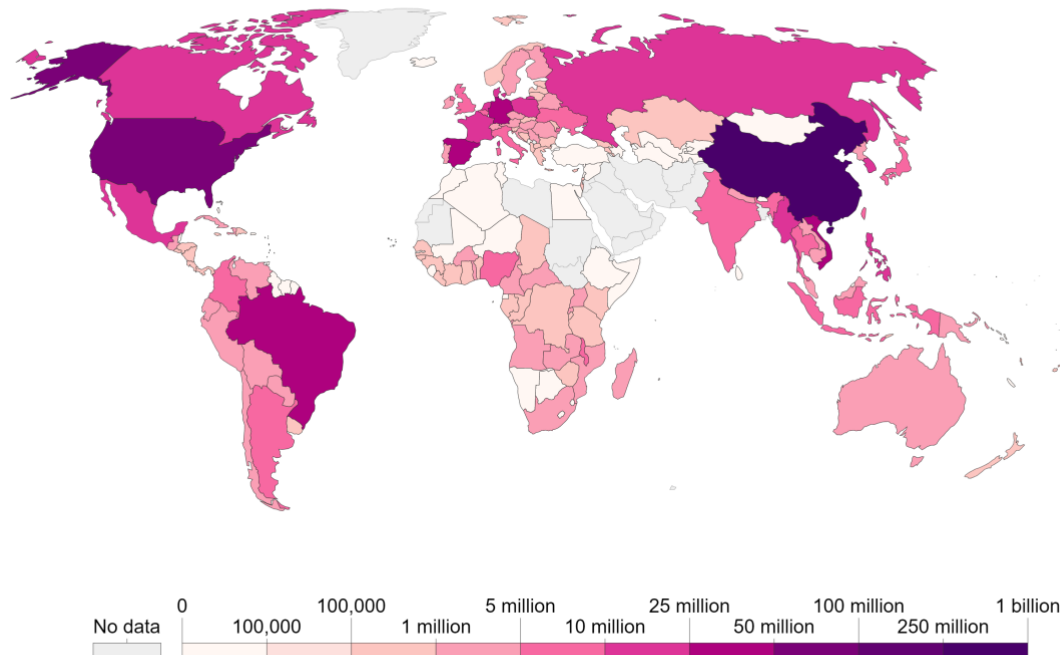
Att transportera gödslet är inte ekonomiskt försvarbart, och hanteringen av svingödsel går därför oftast ut på att lagra det i laguner. Detta skapar, förutom läckor till yt- och grundvattnet, illaluktande lukter och gasutsläpp som försämrar luftkvaliteten i områden runtomkring (Fini, 2016).

Jordbrukarna kan till viss del använda gödslet till att gödsla sina åkermarker, men då mängderna är så pass stora är det ofta omöjligt för dem att kunna göra sig av med allt genom gödsling. Överdriven gödsling kan dessutom även bidra till ökade tungmetallhalter i marken vilket inte heller är att föredra (Steyn et al., 2014).

3.4.3 Förekomst av svingödsel

Enligt Statista (2020) fanns ungefär 678 miljoner grisar i världen i början av 2020. Kina står för cirka hälften av all uppfödning, därefter kommer EU och USA på andra respektive tredje plats. Av dessa grisar produceras ungefär totalt 1,7 miljarder ton av flytande gödsel varje år, enligt Makara & Kowalski (2017), vilket måste hanteras på något sätt. Världens grispopulation visas i Figur 6.

Number of pigs, 2018



Source: UN Food and Agricultural Organization (FAO)

OurWorldInData.org/meat-production • CC BY

Figur 6. Världens grispopulation år 2018 (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2020a) *Licens: CC-BY 4.0: <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>*

3.4.4 Framställning av biobindemedlet

Bindemedlet produceras från svingödsel genom termokemisk omvandling, en process som omvandlar organiska beståndsdelar till bioolja. Två exempel på termokemiska omvandlingsprocesser är pyrolys och hydrotermisk förvätskning. Skillnaden mellan dessa två är att pyrolys sker med torr biomassa och hydrotermisk med våt. Pyrolys sker även vid högre temperatur (400-600°C) men lägre tryck (0,1-0,5 MPa) (Jena & Das, 2011).

Det är främst hydrotermisk förvätskning som använts vid produktion av olja från svingödsel (Fini et al., 2011; Fini et al., 2012; Mills-Beale et al., 2014). Genom denna process bildas en vattenlöslig fraktion och kläbbiga rester, vilka separeras från varandra genom vakuumfiltration (Fini et al., 2011).

I produktionen av biobindemedel genom termokemisk förvätskning utnyttjas kolet, medan kvävet, fosfor och kalium blir biprodukter som sedan kan användas som gödningsämne. Dessutom kan de lättare ämnena som framställs ur processen användas som biobränsle (Fini et al., 2011).

Den kemiska sammansättningen för biobindemedlet jämfört med petroleumbaserat bitumen presenteras i Tabell 2 nedan, där det framkommer att kolhalten respektive vätehalten är liknande för båda. Syrehalten och kvävehalten varierar dock stort mellan biobindemedlet och bitumen. En ökad halt kväve och syre anses kunna skapa fler kemiska reaktioner med stenmaterialets yta, och borde därmed kunna förbättra resistensen mot fuktskador. (Fini et al., 2011)

Tabell 2. Jämförelse mellan kemisk uppbyggnad i viktprocent mellan biobitumen och petroleumbaserat bitumen (Fini et al., 2011). Återgiven från *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(11), Fini, E. H., Kalberer, E. W., Shahbazi, A., Basti, M., You, Z., Ozer, H & Aurangzeb, Q., *Chemical Characterization of Biobinder from Swine Manure: Sustainable Modifier for Asphalt Binder*, 1506-1513, Copyright (2011) med tillstånd från *American Society of Civil Engineers (ASCE)*.

Komponent	Biobindemedel (vikt-%)	Petroleumbaserat bitumen (AAD-1) (vikt- %)
Kol	72,58	81,6
Väte	9,76	10,8
Kväve	4,47	0,77
Syre	13,19	0,9

3.4.5 Tekniska egenskaper

Penetrationstal & Mjukpunkt

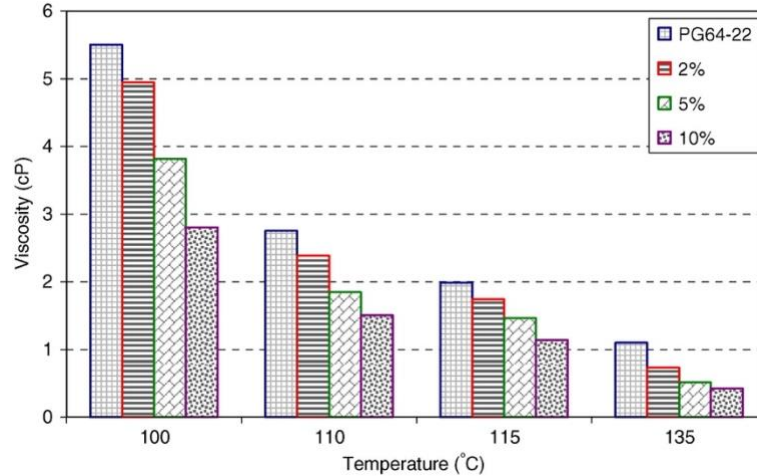
Wang et al. (2020b) har genomfört pyrolys av svingödsel med olika ingångsvärden på processen och därmed erhållit olika egenskaper på det resulterande bindemedlet där 15 vikt-% svingödsel blandats in i bitumen med penetrationstal 70. Penetrationstal- och mjukpunktsvärdena för dessa har beräknats till medelvärden vilket visas i Tabell 3.

Tabell 3. Medelvärde för penetrationstal och mjukpunkt för olika pyrolystemperaturer och reaktionstider, vid 15% inblandning av svingödsel (Wang et al., 2020b). Återgiven från *Transportation Research part D: Transport and Environment*, 89(2020), Wang, H., Wang, L., Zhang, J., Jing, Y., Cao, Y., *Effect of pyrolysis temperature and reaction time on the performance of swine-manure-derived bio-binder*. Copyright (2020) med tillstånd från *Elsevier*.

Penetrationstal vid 25°C (0,1 mm)	Mjukpunkt (°C)
64	50

Viskositet

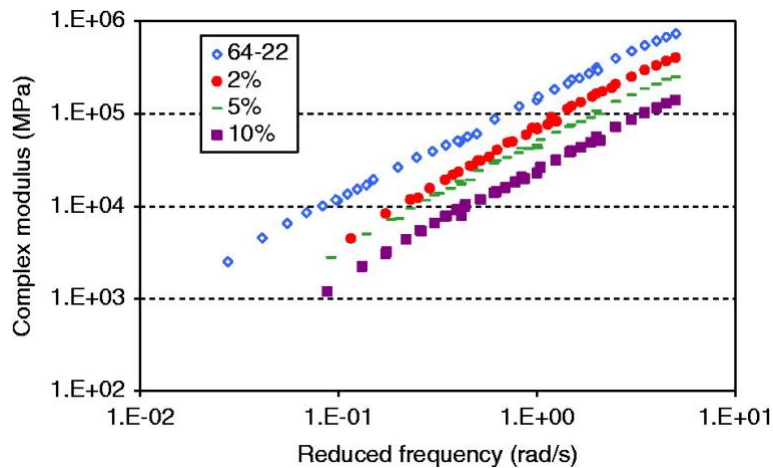
Fini et al. (2011) kom fram till att inblandning av biobindemedel från svingödsel i bitumen sänkte viskositeten på bindemedlet, proportionellt mot andelen biobindemedel som blandats i, se Figur 7. Detta kan ge en bättre hållbarhet för blandningen, samt möjliggöra lägre temperatur vid blandning och packning.



Figur 7. Diagram över viskositeten för olika temperaturer och procent inblandning av svingödsel. PG64-22 är petroleumbaserat bitumen (Fini et al., 2011). Återgiven från *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(11), Fini, E. H., Kalberer, E. W., Shahbazi, A., Basti, M., You, Z., Ozer, H & Aurangzeb, Q., *Chemical Characterization of Biobinder from Swine Manure: Sustainable Modifier for Asphalt Binder*, 1506-1513, Copyright (2011) med tillstånd från American Society of Civil Engineers (ASCE).

Komplex skjuvmodul- & fasvinkelsamband

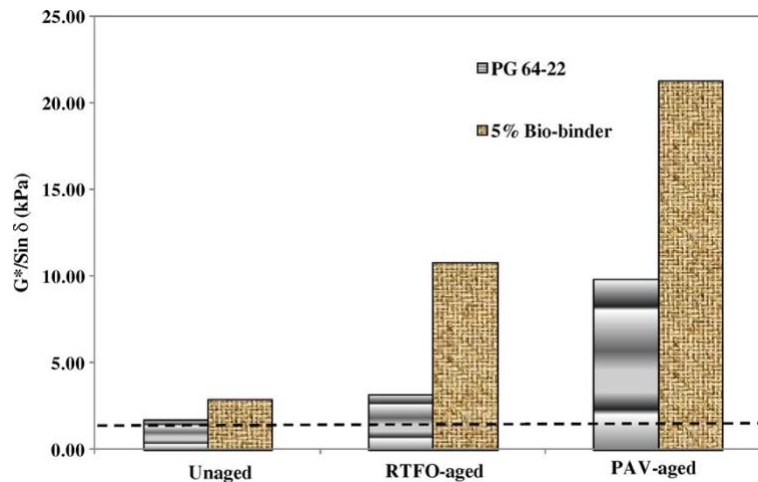
I Figur 8 sträcker sig de biomodifierade blandningarna över ett mindre intervall vilket innebär att temperaturkänsligheten minskar (Fini et al., 2012). Den komplexa skjuvmodulen blev även lägre med ökad procent inblandning biobindemedel, vilket innebär att materialets styvhet minskade.



Figur 8. Masterkurva som visar hur den komplexa skjuvmodulen varierar vid olika frekvenser, för varierande procent inblandning av svingödsel i petroleumbaserat bitumen, PG64-22. (Fini et al., 2012). Återgiven från *International Journal of Pavement Engineering*, 13(6), Fini, E. H., Al-Qadi, I. L., You, Z., Zada, B. & Mills-Beale, J., *Partial replacement of asphalt binder with bio-binder: characterisation and modification*, 515-522, Copyright (2012) med tillstånd från Taylor & Francis.

Varma temperaturer

En minskad komplex skjuvmodul kan innebära sämre resistens mot deformationer, men inblandningen av biobindemedlet i bitumen bidrog även till en sänkt fasvinkel vilket innebär att bindemedlet blev mer elastiskt. Detta resulterade i att 5% inblandning av biobindemedel bidrog till att resistensen mot spårbildning vid höga temperaturer ökade enligt Figur 9 nedan (Mills-Beale et al., 2014).



Figur 9. Resistens mot spårbildning för petroleumbaserat bitumen (PG 64-22) och biomodifierat bitumen (5%) vid jungfruligt, korttidsåldrat (RTFO) och långtidsåldrat (PAV) bitumen (Mills-Beale et al., 2014).

Återgiven från *Journal of Materials in Civil Engineering*, 26(2), Mills-Beale, J., You, Z., Fini, E., Zada, B., Lee, C. H. & Yap, Y. K. Aging Influence on Rheology Properties of Petroleum-Based Asphalt Modified with Biobinder, 358-366, Copyright (2014) med tillstånd från American Society of Civil Engineers (ASCE).

Kalla temperaturer

Fini et al. (2012) visar även i Tabell 4 att spricktemperaturen för asfalten sänks vid inblandning av biobindemedlet, vilket alltså förbättrar bindemedlets prestanda vid låga temperaturer. Spricktemperatur vid olika procents inblandning visas i Tabell 4, vilka har tagits fram genom BBR tester.

Tabell 4. Olika spricktemperaturer uträknade genom BBR-test, beroende på procent inblandning av svingödsel i petroleumbaserat bitumen, PG 64-22 (Fini et al., 2012). Återgiven från *International Journal of Pavement Engineering*, 13(6), Fini, E. H., Al-Qadi, I. L., You, Z., Zada, B. & Mills-Beale, J., Partial replacement of asphalt binder with bio-binder: characterisation and modification, 515-522, Copyright (2012) med tillstånd från Taylor & Francis.

Bindemedel	Spricktemperatur (°C)
Petroleumbaserat bitumen (PG 64-22)	-31,7
2% biomodifierat	-33,1
5% biomodiferat	-34,7
10% biomodiferat	-36,3

Åldrande

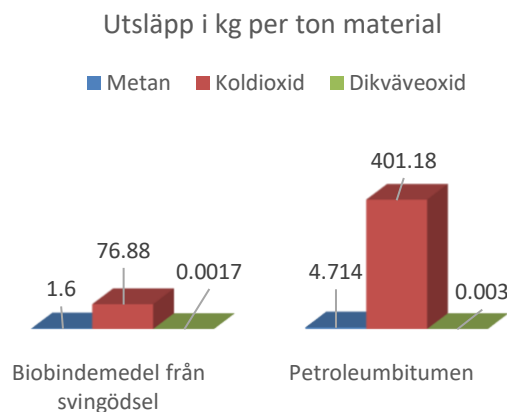
Fini et al. (2017) kom fram till att biobindemedel från svingödsel var minst känslig för oxidation, jämfört med växtbaserade biooljor samt petroleumbaserat bitumen. Detta på grund av oljans kemiska struktur och höga halt av lipider.

Biobindemedlet har därför också stor potential att användas som förnygringsmedel och därmed kunna öka återanvändningen av asfalt i vägar, så kallad Reclaimed Asphalt Pavement (RAP). Detta för att när RAP blandas in i asfaltsmassa ökar styvheten, då den åldrats. Inblandning av biobindemedlet baserat på svingödsel minskar den komplexa skjuvmodulen och kan därför mjuka upp mixen igen så att de ursprungliga egenskaperna erhålls (Fini et al., 2012).

3.4.6 Miljö och klimat

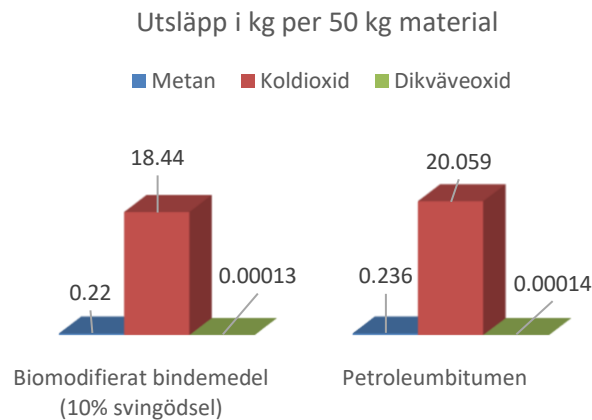
Samieadel et al. (2017) visade i sin livscykelanalys att klimatpåverkan minskade vid 10% inblandning av bioolja från svingödsel. Både energikonsumtionen och bidragandet till klimatpåverkan minskade totalt sett. Behovet av energi till blandning och packning minskade med 50%, då massan inte behövde värmas upp lika mycket. Detta skapar dessutom bättre arbetsförhållanden för asfaltsarbetarna (Fini et al., 2011).

Det visade sig också att utsläpp av koldioxid var över fem gånger så stor för petroleumbaserat bitumen som för biobindemedlet. Metanutsläppet var tre gånger så stor för den petroleumbaserat bitumen (Samieadel et al., 2017). Detta visas i Figur 10 nedan.

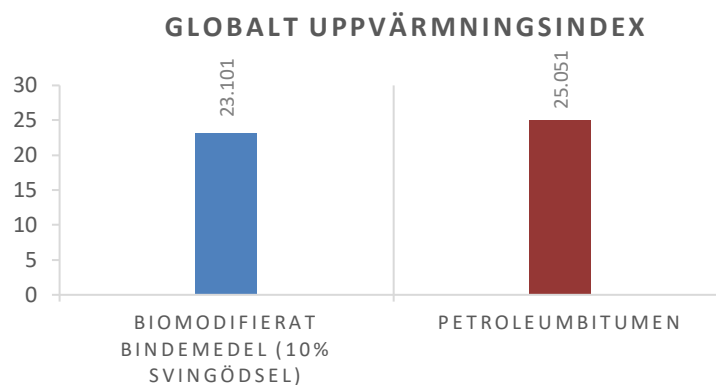


Figur 10. Jämförelse av 100% biobindemedel gjort på svingödsel och petroleumbaserat bitumens miljöpåverkan sett utifrån utsläpp av växthusgaser (Samieadel et al., 2017). Återgiven med modifikation från *Clean Technologies and Environmental Policy*, 2018(20) Samieadel, A., Schimmel, K. & Fini, E. H, Comparative life cycle assessment (LCA) of bio-modified binder and conventional asphalt binder, 191-200, Copyright (2017) med tillstånd från Springer Nature.

Den totala utsläppsdaten för ett biomodifierat bindemedel med 10% biobindemedel, jämfört med petroleumbaserat bitumen visas i Figur 11. Globala uppvärmnings-indexet förbättrades även med 7% för biomodifierade bindemedlet (Samieadel et al., 2017). Detta visas i Figur 12



Figur 11. Jämförelse av biomodifierat bindemedel (10%) och petroleumbaserat bitumens påverkan sett utifrån utsläppsmängd (Samieadel et al., 2017). Återgiven med modifikation från *Clean Technologies and Environmental Policy, 2018(20) Samieadel, A., Schimmel, K. & Fini, E. H, Comparative life cycle assessment (LCA) of bio-modified binder and conventional asphalt binder, 191-200, Copyright (2017) med tillstånd från Springer Nature.*



Figur 12. Jämförelse av biomodifierat bindemedel (10%) och petroleumbaserat bitumens miljöpåverkan sett utifrån globalt uppvärmningsindex (Samieadel et al., 2017). Återgiven med modifikation från *Clean Technologies and Environmental Policy, 2018(20) Samieadel, A., Schimmel, K. & Fini, E. H, Comparative life cycle assessment (LCA) of bio-modified binder and conventional asphalt binder, 191-200, Copyright (2017) med tillstånd från Springer Nature.*

Både lagringen i laguner och gödslingen av åkermark bidrar till att metangas och koldioxid frigörs. Om det i stället omvandlas till bioolja binds kolet i stället för att släppas ut i atmosfären (Fini et al., 2011). En jämförelse av gasutsläpp gjordes mellan att lagra 139 kg gödsel i en lagun jämfört med att producera 5 kg biobindemedel av samma mängd (svingödslet består till största del av vatten). Detta visade att globala uppvärmningsindexet blev 80% mindre om svingödslet användes till att producera biobindemedel (Samieadel et al., 2017).

3.4.7 Praktiska aspekter

Genom att bygga anläggningar till att producera bioolja löses inte bara problemet var bönderna ska göra av gödslet, utan de kan även tjäna pengar genom att producera biooljan själv på sina gårdar och sedan sälja produkten. Detta kan då bidra till att bönderna i första hand vill använda gödslet till bioolja, snarare än att endast använda det för att gödsla jordbruksmark (Steyn et al., 2014).

Dessutom införs mer och mer regler om gödselhantering i till exempel USA, vilket sätter press på bönderna att minska gödselproduktionen och därmed i vissa fall tvingas minska sin grisuppfödning. Detta talar för att omvandling av svingödsel till bindemedel hade varit attraktivt även för bönderna (Fini et al., 2011).

Vid framställningen försvinner en betydande mängd av de illaluktande beståndsdelarna i svingödslet genom den kemiska processen till bioolja, genom destillation. Därför luktar inte biobindemedlet illa i rumstemperatur och odör är därför inget betydande problem. När bindemedlet däremot värms upp finns en mild illaluktande doft (Mills-Beale et al., 2014).

Framställningen av biooljan kan dessutom kosta mindre än petroleumbaserat bitumen. Fini et al. (2011) menar på att denna kostnad jämfört med petroleumolja är ungefär fyra gånger mindre per liter. De menar även på att svingödsel är enklare att omvandla till bioolja än andra biomassor, på grund av dess höga innehåll av lipider. Den behöver dessutom inte stora mängder vatten för att omvandlas vilket även gör den billigare.

3.4.8 Forskningsframsteg

Svingödsel anses ha stor potential som biobindemedel genom att delvis ersätta petroleumbaserat bitumen (Fini et al., 2011; Fini et al., 2012; Mills-Beale et al., 2014). Detta då den kan förbättra bindemedlets egenskaper samt att den ger fördelar både ekonomiskt och miljömässigt. Det behövs dock fortsatta studier på bearbetning och modifikation av biobindemedlet så att det ska få de önskade egenskaperna och därmed kunna bli en bättre ersättare av petroleumbaserat bitumen (Fini et al., 2012).

Olika stor andel inblandning av biobindemedel från svingödsel har testats. Än så länge har det enligt funna rapporter testats som modifierare med 2, 5, 10 samt 15% inblandning, samt som föryngringsmedel (Fini et al., 2011; Mills-Beale et al., 2014; Pahlavan et al., 2020; Wang et al., 2020b). Enligt Mills-Beale et al. (2014) behöver en optimal procenthalt av biobindemedlet tas fram för att få de bästa egenskaperna. Det bör även genomföras fler undersökningar för att få en bättre bild av samspelet mellan petroleumbaserat bitumen och biobindemedlet, samt undersökningar på molekylnivå för att få sambandet mellan procenthalten och åldrandet samt vattenbeständighet. Det bör även utföras ändringar i ingångsparametrar i tillverkningsprocessen för att se hur dessa påverkar de viskoelastiska egenskaperna. Jämförelser mellan svingödsel från olika geografiska områden där grisarna fått olika diet bör även genomföras för att hitta eventuella samband.

Svingödsel har även undersökts tillsammans med gummi från däck (Fini, 2016) samt använts tillsammans med silica-nanopartiklar för att förbättra bitumens egenskaper (Karnati et al., 2020). Det är alltså ett högaktuellt ämne som har potential både som modifierare, ensam eller tillsammans med andra material, och föryngringsmedel.

Ännu har inga fältförsök gjorts med vägsträckor innehållande svingödsel, utan bindemedlet och asfaltsblandningar innehållande bindemedlet undersöks fortfarande endast i laboratorieskala (Fini et al., 2011; Fini et al., 2012; Fini, 2016; Fini et al., 2017; Mills-Beale et al., 2014).

3.5 Mikroalger

3.5.1 Beskrivning av mikroalger

Mikroalger är mikroskopiska organismer med simpel cellstruktur som livnär sig genom fotosyntes. De kräver ljus, koldioxid, vatten och näringsämnen i form av till största del fosfor och kväve för att kunna växa. Mikroalger består av protein, lipider och olika former av kolhydrater (Zullaikah et al., 2019).

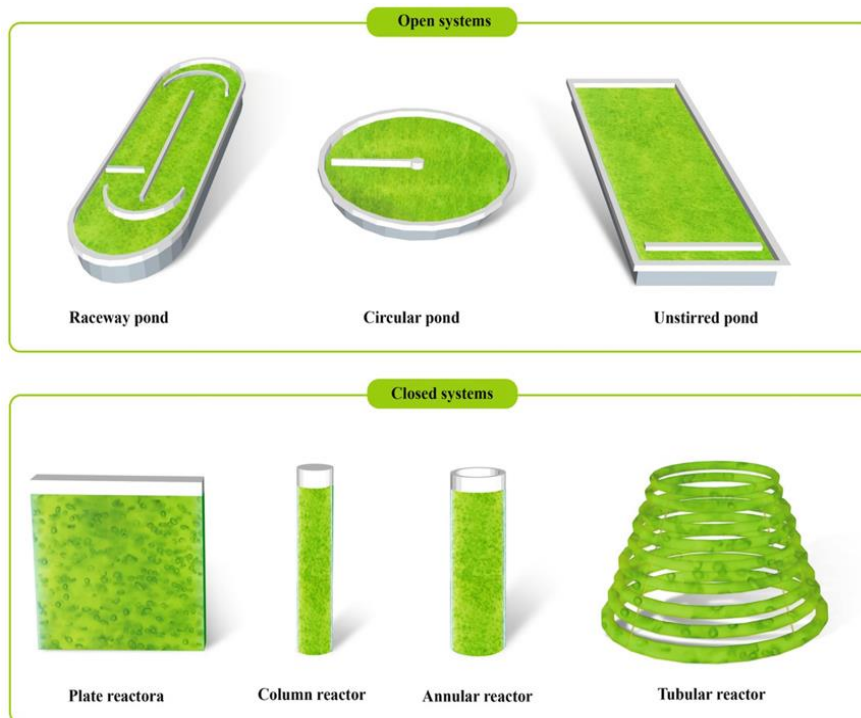
Mikroalger finns bland annat i hav, sjöar och åar. Trots det är koncentrationen av växterna i ekosystemet för låga för att användas i ett kommersiellt syfte. Alger har dock odlats fram i flera årtionden och använts till exempelvis kosttillskott, naturliga pigment och fiskfoder (Vandamme et al., 2013).

3.5.2 Utvinning av mikroalger

Odling av alger kan ske antingen i öppna system, där den vanligaste metoden är raceway ponds, eller i stängda system som fotobioreaktorer. I Figur 13 visas de olika sorternas system. Öppna system är de vanligaste då de är billigare och enklare att bygga, har större produktionskapacitet och är mer slitstarka. Raceway ponds är grunda bassänger med 0,2–0,5 meters djup, där algceller och näringsämnen mixas med hjälp av skovelhjul. Nackdelen med dessa system är att de är mer utsatta för föroreningar, och att det inte går att kontrollera förhållanden som temperatur, ljus eller avdunstning (Aishvarya et al., 2015). I detta system är det även lätt att mikroalgscellerna skuggar varandra vilket försämrar produktiviteten (Vandamme et al., 2013).

Till skillnad från de öppna systemen har stängda system som fotobioreaktorer kontroll på alla fysiska parametrar, och har mindre risk för föroreningar. Nackdelen är dock att produktionskostnaden är högre (Zullaikah et al., 2019).

Skördandet av mikroalger är en stor utmaning då koncentrationen av biomassa i en odling är relativt låg. I ett öppet system fås ungefär 0,5 gram biomassa per liter ut, och i en fotobioreaktor 5 gram per liter. En stor vattenvolym måste alltså separeras från biomassan vid skördning (Vandamme et al., 2013). Det finns två processer vid skördning: bulkskördning och förtjockning. Bulkskördning sker genom flockning, flytning eller sedimentering, vilka samlar ihop algerna. Därefter minskas vatteninnehållet ytterligare genom centrifugering eller filtrering. Efter detta brukar algerna torkas ytterligare, för att sänka vattenhalten till mindre än 10% för att underlätta oljeproduktionen från biomassan (Zullaikah et al., 2019).



Figur 13. Olika öppna samt stängda system för odling av mikroalger (Zerrouki & Henni, 2019). Återgiven från *Outdoor Microalgae Cultivation for Wastewater Treatment*, Zerrouki, D. & Henni, A. I Gupta, S. K. & Bux, F. (red.) *Application of Microalgae in Wastewater Treatment*, 81-99. Copyright (2019) med tillstånd från Springer Nature.

3.5.3 Förekomst av mikroalger

Mikroalger är en mycket tålig organism som kan växa och överleva i nästintill alla miljöer över hela världen, både i vatten och på land. Algernas biologiska mångfald är mycket hög, och uppskattningsvis finns från 200 000 till flera miljoner arter i världen. Av dessa är det dock endast ett mindre antal som undersökts och analyserats (Aishvarya et al., 2015).

3.5.4 Framställning av biobindemedlet

Det har senaste årtiondet lagts stort fokus på att genom hydrotermisk förvätskning producera olja från mikroalger till bränsle. Vid industriell användning av denna teknologi kommer, utöver bränsle, även avfall skapas, det vill säga rester från mikroalgerna. Det är därför av stor vikt att hitta en värdefull användning av dessa biprodukter för att kunna maximera processens lönsamhet. Av denna anledning har det forskats på huruvida biprodukter från mikroalg-industrin kan användas som alternativt bindemedel i vägar (Audo et al., 2015).

Hydrotermisk förvätskning är en termokemisk omvandling i en sluten reaktor, där blöt biomassa omvandlas till bioråolja och kemikalier vid temperaturen 200–400 grader och trycket 10–25 MPa. Det är ett lämpligt tillvägagångssätt för biomassa med högt fuktinnehåll, då vatten är en viktig reaktant i processen (Zhang & Chen, 2018). Utav denna process erhålls en vattenlösning, koldioxid samt en hydrofobisk vätska. Det är den hydrofobiska delen som undersökts som bindemedel. Denna del består av varierande andel olja och fast material beroende på vilken ingångstemperatur som använts (Queffelec et al., 2019).

Många arter av mikroalger kan producera olja av 50% av sin torra massa, vilket anses vara en hög andel. De är även bland de snabbast växande växterna i världen, och kan därför, jämfört

med landväxter, producera 10–100 gånger mer olja (Randrianarison & Ashraf, 2017). Dessutom är deras livscykel kort vilket innebär att biomassa från mikroalger har potential att skördas dagligen, till skillnad från jordbruksväxter (Chisti, 2010).

Mikroalger har i nuläget främst undersökts som fullständig ersättare och har därför inte blandats samman med petroleumbaserat bitumen, vilket återspeglas i de tekniska egenskaperna nedan.

3.5.5 Tekniska egenskaper

Penetrationstal & Mjukpunkt

Inga värden angående penetrationstal och mjukpunkt har hittats för mikroalger.

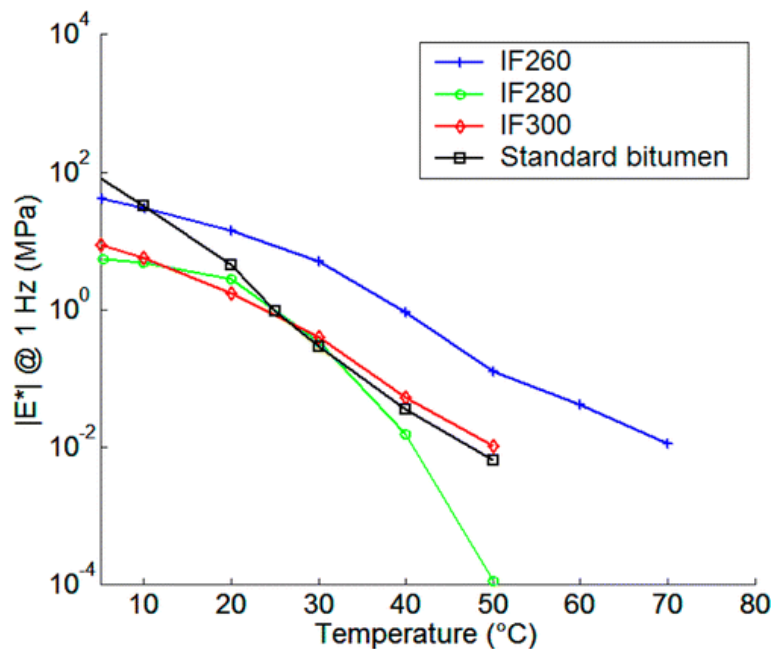
Viskositet

Inga värden angående viskositet har hittats för mikroalger.

Komplex skjuvmodul- & fasvinkelsamband

Audo et al. (2015) har klargjort att det går att påverka de reologiska egenskaperna genom HTL-processen, genom att styra ingångstemperaturen (°C). Ju högre temperatur, desto mer av det fasta materialet i blandningen försvinner vilket ger en större andel olja.

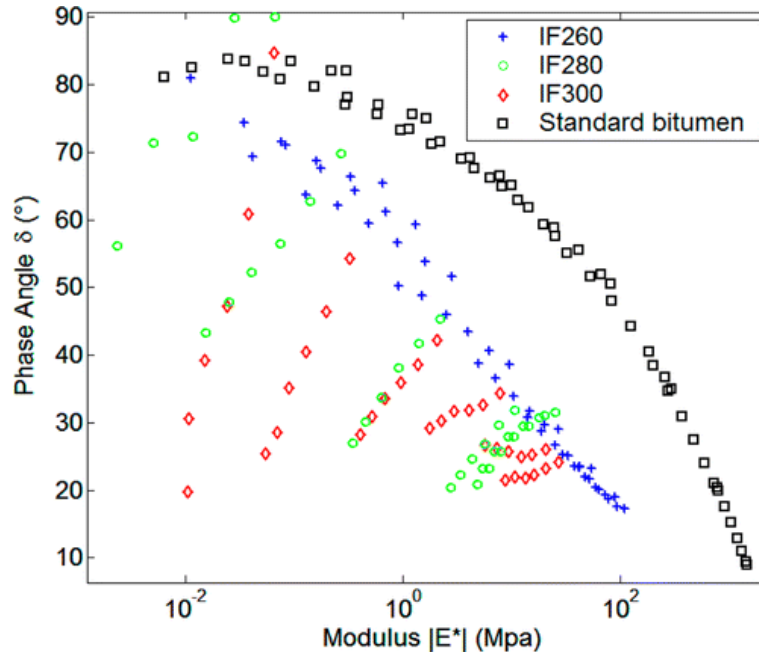
I Figur 14 nedan visas sambandet mellan komplexa elasticitetsmodulen, E^* , och temperaturen på bindemedlet från algen *Scenedesmus*, jämfört med petroleumbaserat bitumen (Audo et al. 2015). De olika färgerna i diagrammen representerar vilken ingångstemperatur (°C) blandningen hade vid processen (IF260, IF280, IF300). Mätningen utfördes med frekvensen 1 Hz.



Figur 14. Diagram över komplex elasticitetsmodul, E^* , för mikroalgsblandningar med olika ingångstemperaturer (IF260, IF280, IF300), vid jämförelse med petroleumbaserat bitumen (Audo et al., 2015). Återgiven från *ASC Sustainable Chemistry & Engineering*, 3(4), Audo, M., Paraschiv, M., Queffélec, C., Louvet, I., Hémez, J., Franck, F., Lépine, O., Legrand, J., Tazerout, M., Chailleux, E. & Bujoli, B., *Subcritical Hydrothermal Liquefaction of Microalgae Residues as a Green Route to Alternative Road Binders*, 583-590, Copyright (2015) med tillstånd från American Chemical Society (ACS).

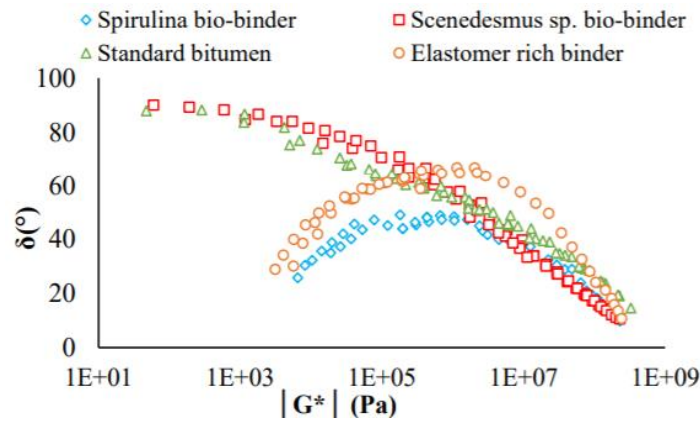
Det framkom att alla prov får en snabbt minskande styvhet vid ökande temperatur. HTL-fraktionerna har vid lägre temperaturer en lägre elasticitetsmodul än petroleumbaserat bitumen, men vid höga temperaturer har IF260 och IF300 högre elasticitetsmodul än petroleumbaserat bitumen. IF260 och IF300 verkar vara mindre temperaturkänsligt än petroleumbaserat bitumen, då dess kurvor är flackare.

I Figur 15 nedan visas förhållandet mellan fasvinkeln och elasticitetsmodulen för samma prover. Här ses störst likhet för IF260 och petroleumbaserat bitumens reologiska egenskaper.



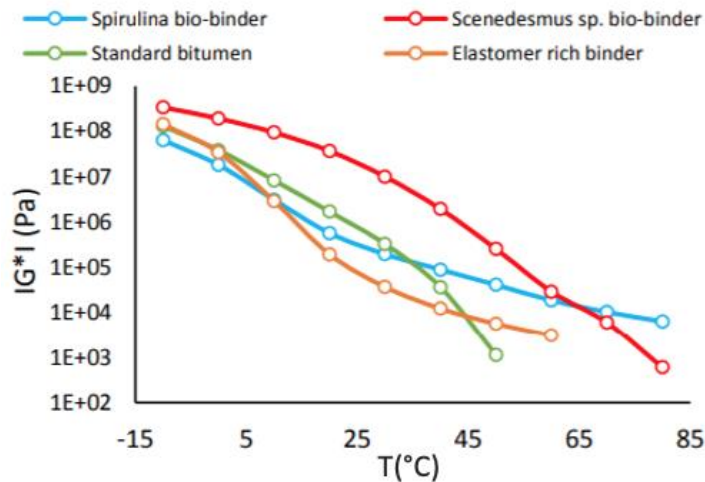
Figur 15. Blackdiagram för mikroalgsblandningar med olika ingångstemperaturer (IF260, IF280, IF300), vid jämförelse med petroleumbaserat bitumen (Audo et al., 2015). Återgiven från ASC Sustainable Chemistry & Engineering, 3(4), Audo, M., Paraschiv, M., Queffélec, C., Louvet, I., Hémez, J., Franck, F., Lépine, O., Legrand, J., Tazerout, M., Chailleux, E. & Bujoli, B., Subcritical Hydrothermal Liquefaction of Microalgae Residues as a Green Route to Alternative Road Binders, 583-590, Copyright (2015) med tillstånd från American Chemical Society (ACS).

Borghol et al., (2018a) har undersökt bioolja baserat på mikroalgen *Scenedesmus* respektive *Spirulina*. De båda proven är framtagna vid 260°C och det framkom att biooljan från *Scenedesmus* har liknande reologiska egenskaper som petroleumbaserat bitumen med penetrationstal 35/50. I Figur 16 nedan visas sambandet mellan fasvinkeln och olika komplexa skjuvmoduler, och detta samband är likt för petroleumbaserat bitumen och *Scenedesmus*. *Spirulina* skiljer sig mer, men har liknande beteende som ett elastomer-rikt bindemedel, det vill säga ett bindemedel modifierat med elastiska polymerer. I diagrammet visas ett bindemedel med 8% elastomerer som referens (Borghol et al., 2018a)

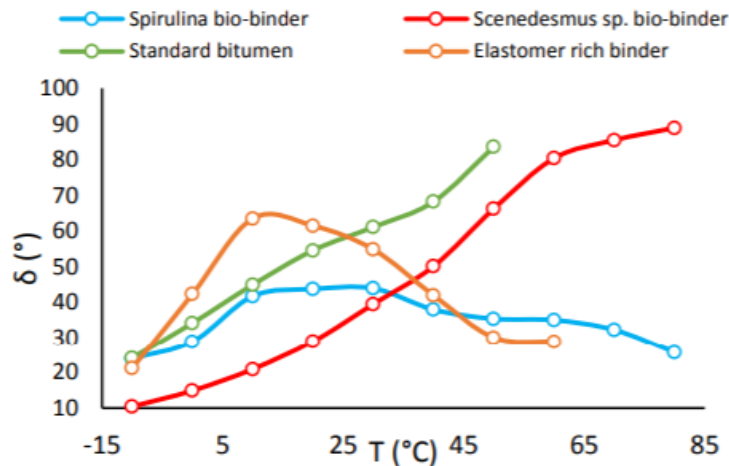


Figur 16. Blackdiagram för två olika alg sorter samt jämförelse med petroleum-baserat bitumen och elastomer-rikt bindemedel (Borghol et al., 2018a). Återgiven från *Hydrothermal liquefaction of microalgae to produce a bio-binder: feedstock type influence*, Borghol, I., Chailleux, E., Bujoli, B., Queffelec, C., Legrand, J., Drouin, D. & Lombard, C., Copyright (2018) med tillstånd från E. Chailleux.

I Figur 17 nedan framkommer att biobindemedel från Scenedesmus är styvare än petroleum-baserat bitumen, då dess komplexa skjuvmodul är högre för alla temperaturer. Det framkommer även i Figur 18 att fasvinkeln minskar för Scenedesmus jämfört med petroleum-baserat bitumen.



Figur 17. Diagram över komplex skjuvmodul och temperatur för två olika alg sorter samt jämförelse med petroleum-baserat bitumen och elastomer-rikt bindemedel (Borghol et al., 2018a) Återgiven från *Hydrothermal liquefaction of microalgae to produce a bio-binder: feedstock type influence*, Borghol, I., Chailleux, E., Bujoli, B., Queffelec, C., Legrand, J., Drouin, D. & Lombard, C., Copyright (2018) med tillstånd från E. Chailleux.



Figur 18. Diagram över fasvinkel och temperatur för två olika alg sorter samt jämförelse med petroleumbaserat bitumen och elastomer-rikt bindemedel (Borghol et al., 2018a). Återgiven från *Hydrothermal liquefaction of microalgae to produce a bio-binder: feedstock type influence*, Borghol, I., Chailleux, E., Bujoli, B., Queffelec, C., Legrand, J., Drouin, D. & Lombard, C., Copyright (2018) med tillstånd från E. Chailleux.

Skillnaden i Scenedesmus och Spirulina visar på hur stor skillnad i egenskaper det kan bli av olika sorter av mikroalger. Borghol et al. (2018a) menar på att Scenedesmus har potential att kunna användas som direkt alternativ för petroleumbaserat bitumen, medan Spirulina kan användas som tillsatsmaterial för att modifiera de reologiska egenskaperna.

Varma temperaturer

Det framkommer i Figur 17 och 18 att mikroalgen Scenedesmus både har högre komplex skjuvmodul än det petroleumbaserade bituminet, samt lägre fasvinkel (Borghol et al., 2018a). Då spårbildningsfaktorn beräknas enligt $G^*/\sin\phi$ bör denna vara högre för mikroalgen än för petroleumbaserat bitumen, vilket innebär att mikroalgen bidrar till ökad resistens mot spårbildning vid höga temperaturer. Mikroalgen Spirulina har högre skjuvmodul och lägre fasvinkel än det elastomer-rika bindemedlet, och har därmed en högre spårbildningsfaktor än denna.

Kalla temperaturer

Inga värden angående kalla temperaturer har hittats för mikroalger.

Åldrande

Inga värden angående hur egenskaperna påverkas av åldrande har hittats för mikroalger.

3.5.6 Miljö och klimat

Beroende på art kan mikroalger växa i antingen sötvatten, bräckt vatten eller saltvatten. Detta påverkar vattenkonsumtionen, vilket anses vara den huvudsakliga miljöfrågan för odling av mikroalger (Muylaert et al., 2017). Om saltvatten används bör inte massproduktion av mikroalger belasta jordbruk i hög grad genom behov av sötvatten eller åkermark (Halim et al., 2011). Största delen av vattnet som används vid odlingen kan dessutom återanvändas efter skördning. Dock behövs viss mängd sötvatten oavsett för att kompensera för avdunstning och för att hålla salthalten konstant (Muylaert et al., 2017).

En fördel med alger är att de tar upp koldioxid, vilket gör att algproducerande företag är intresserade att samarbeta med kraftverk, cementfabriker och annan industri så att alger kan binda koldioxiden som annars skulle försvinna ut i atmosfären (Mascarelli, 2009).

3.5.7 Praktiska aspekter

Mikroalger som råvara ses som ett potentiellt alternativ att ersätta råolja och även andra bioljor inom bränsleindustrin. Trots detta är processen i nuläget inte lönsam utifrån ett teknoeconomiskt perspektiv. Innovativ design behövs för att kunna möjliggöra en storskalig odling av mikroalger. Dessutom är det nödvändigt att hitta en mer effektiv och billigare skördemetod (Okoro et al., 2019). Skördekostanden anses nu vara mellan 20–30% av produktionskostnaden (Zullaikah et al., 2019). Det finns därmed ett antal utmaningar för att klara av en massproduktion av mikroalger.

Det har även forskats på användning av mikroalger vid rening av avloppsvatten, där algerna får näring av fosfor och kvävet i vattnet. Detta skapar en möjlighet till cirkulär ekonomi, där algerna kan odlas för att rena avloppsvattnet, varefter olja kan utvinnas ur dem. Oljan kan sedan användas som bindemedel i vägar, och resterna från detta användas i djurfoder eller gödsel (Tabacović, 2020).

3.5.8 Forskningsframsteg

Flertalet forskare instämmer i att mikroalger har stor potential att användas som biobindemedel i vägkonstruktioner (Audo et al., 2015; Borghol et al., 2018a; Chailleux et al., 2012).

Nu behövs undersökningar för att finna samband mellan mikroalgsort och den hydrofobiska delens sammansättning. Sambandet mellan de huvudsakliga beståndsdelarna samt molekylvikt och de slutliga viskoelastiska egenskaperna behöver också utredas. Från detta kan de mest lämpliga algsorterna väljas ut, och dess prestanda samt ekonomiska lönsamhet som vägmateriäl undersökas. Detta görs genom att undersöka uppskalning av processen, studera åldrandet av mikroalg-bitumen, utföra en livscykelanalys och en global kostnadsanalys som jämförs med råoljedestillation (Borghol et al., 2018b).

Det har även börjat forskas på en blandning av mikroalger och svingödsel, då mikroalgerna är proteinrika och svingödslet är rikt på lipider. Specifikt har de tillsammans undersökts som förnygringsmedel, och det har visat sig att en mix av dessa fungerar bättre som förnygringsmedel än vad de gör var för sig. Fördelningen 80% mikroalger och 20% svingödsel visade sig vara den mest optimala mixen som förnygringsmedel till åldrat bitumen. Detta skapade en balanserad mix av molekyler som underlättar separering av ihopklumpade asfaltener, som skapas under oxidering (Pahlavan et al., 2020).

En alg- och svingödselblandning med fördelningen 1:1 har även tillverkats och testats som förnygringsmedel. Där framkom det att denna blandning gav längst hållbarhet som förnygringsmedel jämfört med sojabönsolja och olja från växtextrakt. Alg- och svingödselblandningen gav längre varaktighet både gällande motstånd mot åldrande och mot fuktskador (Rajib et al., 2020).

Ännu har inga fältförsök gjorts med vägsträckor innehållande mikroalger, utan bindemedlet har fortfarande endast undersökts i laboratorieskala (Audo et al., 2015; Borghol et al., 2018a; Chailleux et al., 2012).

3.6 Kräftska

3.6.1 Beskrivning av kräftska

Akvakulturen är en av de snabbast växande matproduktionerna i världen och är ett komplement till de vilda vattenlevande organismerna (Kandra et al., 2011). Denna, som är en del av matproduktionen i världen genererar stora mängder biprodukter och avfall, vilka ofta inte utnyttjas till fullo. Avfallshanteringen kan leda till problem för industrierna och samhället i form av föroreningar, hälsoproblem och kostnader.

Kräfter och andra skaldjur är vanliga livsmedel för människor, och skapar stora mängder avfall i form av bland annat ska (Hamed et al., 2015). Kräftdjurska innehåller 20–40% protein, 20–50% kalciumkarbonat och 15–40% kitin, ett cellulosaliknande polymer som är den huvudsakliga strukturella komponenten i kräftdjurs exoskelett (Yan & Chen, 2015). Kitin är det naturliga polymeren efter cellulosa som det finns mest av på jordklotet (Hamed et al., 2015).

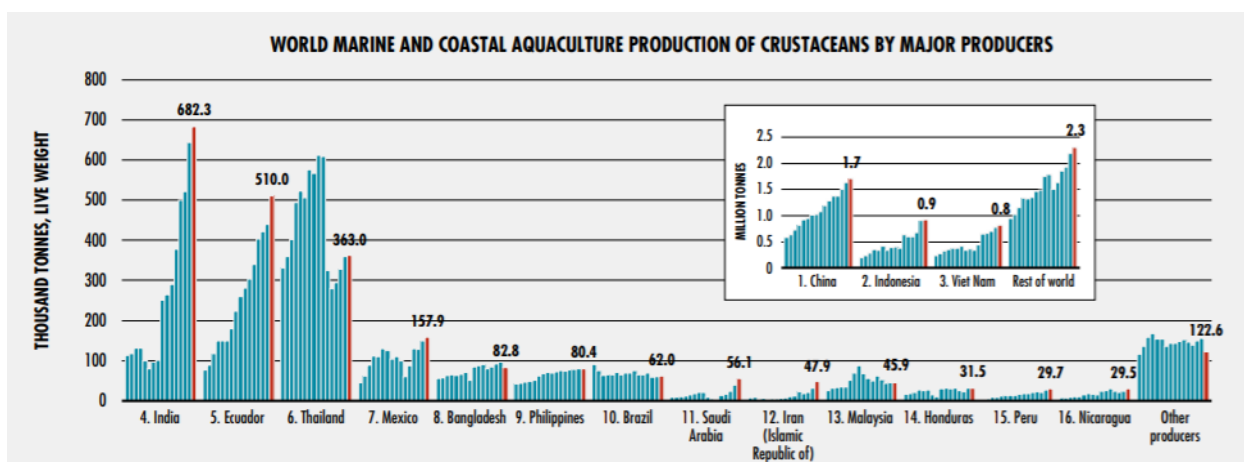
3.6.2 Utvinning av kräftska

Kräftdjur fiskas både i havet och odlas i akvakulturer. Enligt Food and Agriculture Organization of the United Nations, odlades 2018 9,4 miljoner ton kräftdjur i världen, och 6 miljoner ton kräftdjur fiskades i havet (Food and Agriculture Organization of the United Nations., 2020f).

Då det endast är 40% av kräftdjuret som består av kött, uppstår även en stor andel rester. Av denna anledning skapas årligen ungefär 6–8 miljoner ton av skalrester från industrin (Yan & Chen, 2015).

3.6.3 Förekomst av kräftska

I Figur 19 nedan visas produktion av kräftdjur för olika länder. Det är tydligt att den absoluta majoriteten sker i Asien, där Kina, Indonesien och Vietnam ligger i toppen. Det är också tydligt att produktionen i de flesta länder har ökat stort under åren 2003–2018.



Figur 19. Olika länders produktion av kräftdjur mellan åren 2003–2018, där sista stapeln markerad i rött visar år 2018 (Food and Agricultural Organization of the United Nations, 2020f). *Licens: CC-BY-NC-SA 3.0 IGO: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/igo>*

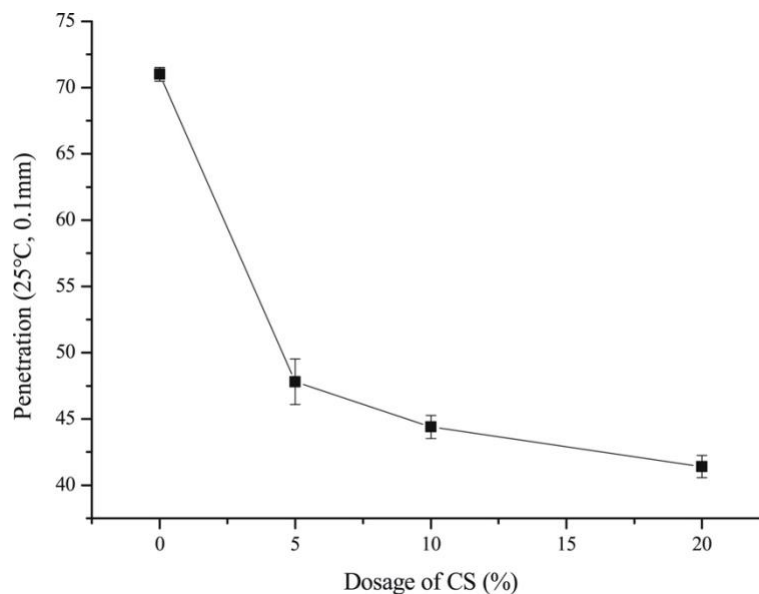
3.6.4 Framställning av biobindemedlet

Lv et al. (2020) framställde ett biomodifierat bindemedel genom att kokt kräftskal tvättades och torkades över en natt i 100°C, och maldes sen till ett pulver. Vid inblandning i petroleumbaserat bitumen värmdes materialet upp i en ugn till 140–150°C varvid olika procentsatser kräftskalspulver blandades i.

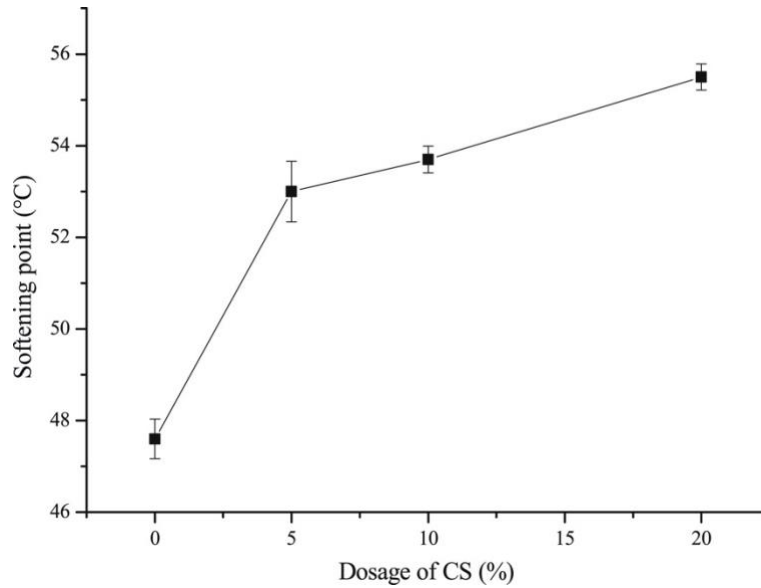
3.6.5 Tekniska egenskaper

Penetrationstal & Mjukpunkt

I Figur 20 nedan visar Lv et al. (2020) att penetrationstalet minskar ju större andel av kräftskalspulver som blandats i. Bindemedlet får alltså en hårdare konsistens vid inblandning. Mjukpunkten ökade av kräftskalspulver vilket visar på möjliga förbättrade egenskaper vid höga temperaturer, då det krävs högre temperaturer för att asfalten ska mjukna, vilket syns i Figur 21.



Figur 20. Diagram över hur penetrationstalet förändras vid olika halter av kräftskal. CS står för crayfish shell, kräftskal. Kräftskalet har blandats in i petroleumbaserat bitumen med penetrationstal 71 (Lv et al., 2020). Återgiven från *Journal of Cleaner Production*, 264(2020), Lv, S., Xia, C., Yang, Q., Guo, S., You, L., Guo, Y., Zheng, J. *Improvements on high-temperature stability, rheology, and stiffness of asphalt binder modified with waste crayfish shell powder*, 121745, Copyright (2020) med tillstånd från Elsevier.



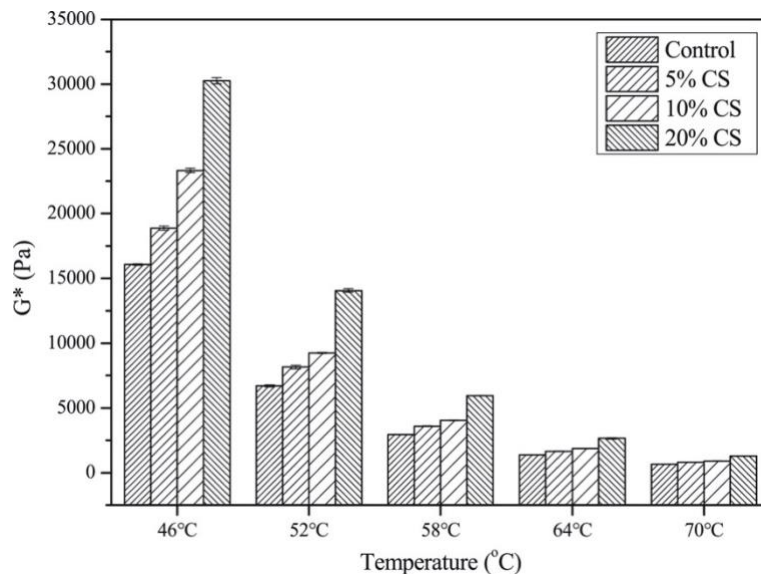
Figur 21. Diagram över hur mjukpunkten förändras vid olika halter av kräftskal. CS står för crayfish shell, kräftskal. Kräftskalet har blandats in i petroleumbaserat bitumen med mjukpunkt 47,6 °C (Lv et al., 2020). Återgiven från *Journal of Cleaner Production*, 264(2020), Lv, S., Xia, C., Yang, Q., Guo, S., You, L., Guo, Y., Zheng, J. Improvements on high-temperature stability, rheology, and stiffness of asphalt binder modified with waste crayfish shell powder, 121745, Copyright (2020) med tillstånd från Elsevier.

Viskositet

Inga värden för hur viskositeten förändras har hittats för kräftskal.

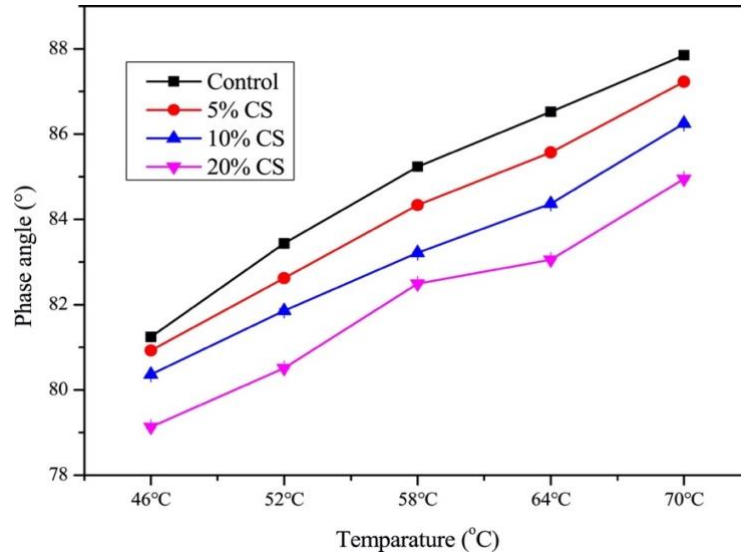
Komplex skjuvmodul- & fasvinkelsamband

Den komplexa skjuvmodulen, G^* ökade vid högre inblandning av kräftskalpulver, vilket visar att kräftskalpulvret bidrar till högre styvhet, se Figur 22 nedan.



Figur 22. Diagram över hur den komplexa skjuvmodulen, G^* förändras vid varma temperaturer och olika kräftskals inblandning. CS står för crayfish shell, kräftskal. Control står för petroleumbaserat bitumen med penetrationstal 71 (Lv et al., 2020). Återgiven från *Journal of Cleaner Production*, 264(2020), Lv, S., Xia, C., Yang, Q., Guo, S., You, L., Guo, Y., Zheng, J. Improvements on high-temperature stability, rheology, and stiffness of asphalt binder modified with waste crayfish shell powder, 121745, Copyright (2020) med tillstånd från Elsevier.

Fasvinkeln minskade med ökad inblandning kräftskalpulver, men följer samma beteende som petroleumbaserat bitumen, se Figur 23. Detta innebär att ju mer kräftskalpulver, desto mer elastiskt blir bindemedlet.

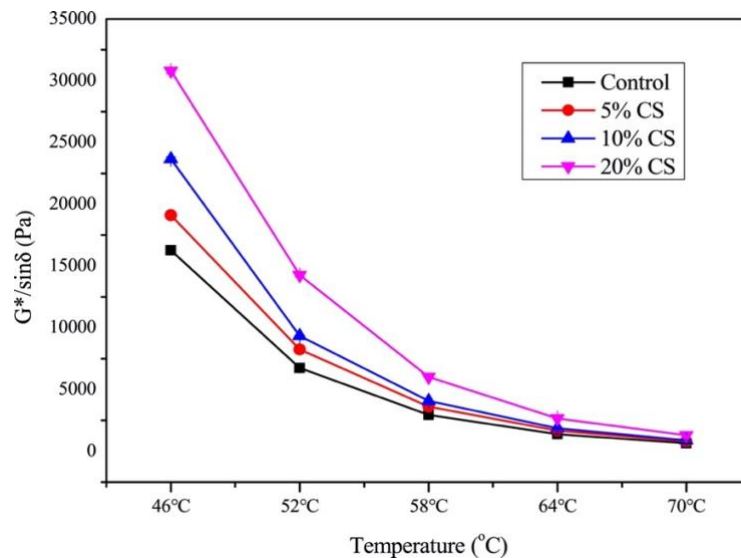


Figur 23. Diagram över förändring i fasvinkel vid varierande varma temperaturer. CS står för crayfish shell, kräftskal. Control står för petroleumbaserat bitumen med penetrationstal 71 (Lv et al., 2020).

Återgiven från *Journal of Cleaner Production*, 264(2020), Lv, S., Xia, C., Yang, Q., Guo, S., You, L., Guo, Y., Zheng, J. Improvements on high-temperature stability, rheology, and stiffness of asphalt binder modified with waste crayfish shell powder, 121745, Copyright (2020) med tillstånd från Elsevier.

Varma temperaturer

Spårbildningsfaktorn, som är en kvot av den komplexa skjuvmodulen och fasvinkeln blir högre ju större inblandning, se Figur 24. Detta innebär att en ökad procenthalt kräftskalpulver ger en högre stabilitet vid höga temperaturer.



Figur 24. Diagram över benägenheten att bilda spår vid höga temperaturer för olika kräftskalinblandning. CS står för crayfish shell, kräftskal. Control står för petroleumbaserat bitumen med penetrationstal 71 (Lv et al., 2020). Återgiven från *Journal of Cleaner Production*, 264(2020), Lv, S., Xia, C., Yang, Q., Guo, S., You, L., Guo, Y., Zheng, J. Improvements on high-temperature stability, rheology, and stiffness of asphalt binder modified with waste crayfish shell powder, 121745, Copyright (2020) med tillstånd från Elsevier.

Kalla temperaturer

Inga värden för kalla temperaturer har hittats för kräftskal.

Åldrande

Inga värden angående hur egenskaperna påverkas av åldrande har hittats för kräftskal.

3.6.6 Miljö och klimat

Att kunna använda biprodukter från kräftdjuren ökar både dess värde samtidigt som behovet av avfallshantering minskar. Skalet från skaldjur bryts ner långsamt i naturen (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2020f). I utvecklingsländer hanteras avfallet genom antingen förbränning, läggs på deponi eller slängs i havet. Bristen på ett bättre kontrollerat avfall bidrar till miljöproblem. I andra länder blir det i stället dyrt, och hanteringen kostar till exempel 150 dollar per ton avfall i Australien (Yan & Chen, 2015). Om avfallet inte hanteras på ett bra sätt skapas både estetiska problem och starka lukter till följd av bakterierna som samlas. Visst avfall slängs i havet, vilket enligt United States Environmental Protection Agency (u.å.) bidrar till lägre syrenivåer på botten i havet, begraving och kvävning av levande organismer och potentiell överföring av sjukdom eller invasiva arter som förstör ekosystemet.

3.6.7 Praktiska aspekter

Alla komponenter i kräftskal är värdefulla. Kitin kan användas bland annat till läkemedel och kosmetika, proteinet kan användas till djurfoder och kalciumkarbonaten kan användas till bland annat konstruktions- och pappersindustrier. För att få ut de separata ämnena krävs dock fraktionering, vilket med nuvarande metoder är både dyr och miljöfarlig. (Yan & Chen, 2015). Vid utvinning av kitin krävs exempelvis farliga kemikalier som reagenser samt stora mängder vatten. Samtidigt bryts proteinet och kalciumkarbonatfraktionerna av kemikalierna, vilket gör att processen anses slösaktig (Kerton & Yan, 2017).

Vid testning av kräftskal i petroleumbaserat bitumen används hela kräftskalpulvret (Lv et al., 2020) och det krävs inte någon fraktionering vilket gör detta till ett praktiskt enklare område för förädling av kräftskal.

Xiao et al. (2015) menar dock på att det troligtvis kommer bli kostsamt med transport och lagring av biprodukter från fiskindustrin. Vidare kommer det krävas stora mängder energi för att torka kräftdjursskal för att förhindra mikrobiell tillväxt och tillväxt av cancerframkallande bakteriella gifter.

3.6.8 Forskningsframsteg

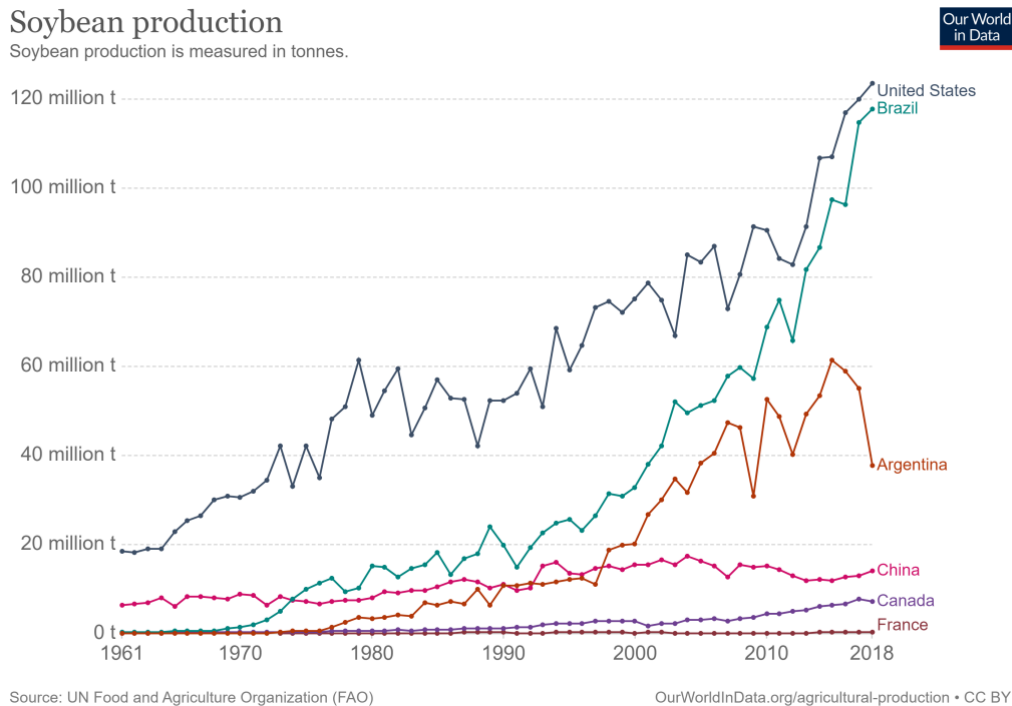
Det är ett nyligen upptäckt biobindemedel inom vägbyggnad vilket innebär att det finns knappt med forskning inom området i nuläget. Lv et al. (2020) är de första som testat det specifika materialet. Det framkom i deras rapport att biomodifikation med kräftskal förbättrade mekaniska egenskaper hos bindemedlet. Dock krävs undersökningar av ytterligare egenskaper som bland annat beständighet och åldrande samt termisk sprickbildning, innan det går att helt förutsäga dess potential som biomodifierare och extender.

Även om just forskning om dess applikation inom vägbyggnad är liten än, så är frågan om utnyttjande och förädling av avfall från kräftdjur och andra skaldjur högaktuell.

3.7 Sojabönsolja

3.7.1 Beskrivning av sojabönsolja

Efterfrågan på sojaböner har ökat under en längre tid vilket syns i Figur 25 och det beror på dess många användningsområden. Grödan sojaböna klassas som en av världens viktigaste grödor då det bland annat utgör ett protein i människors kost men även som en del vid produktion av miljövänlig diesel samt foder till djur (Masuda & Goldsmith, 2009).



Figur 25. Diagram över produktionen av sojaböner mellan åren 1961-2018 (Food and Agriculture Organisation of the United Nations, 2020b). *Licens: CC-BY 4.0: <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>*

3.7.2 Utvinning av sojabönsolja

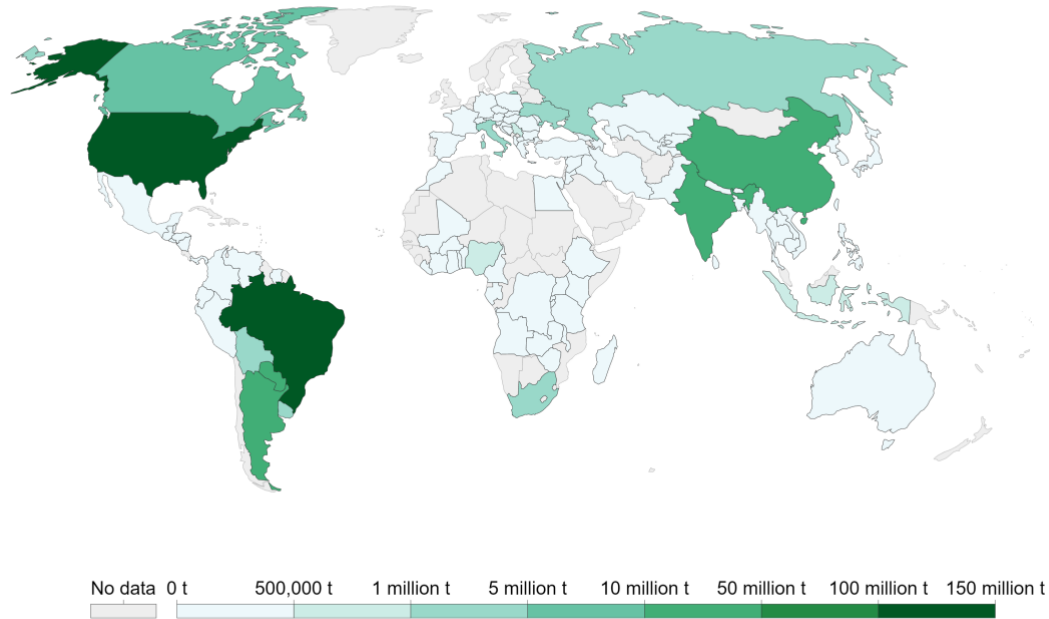
20% av sojabönan består utav olja (Deshpande et al., 1993) och när oljan skall utvinnas genomgår grödan en rad olika processer. Bönerna torkas i första steget för att sedan genomgå rengöring och skalning för att separera det som skall bli olja och det som bildar ett slags sojamjöl. Oljeprocessen fortsätter sedan med hjälp av lösningsmedel för att kunna få fram olja som raffinerar (Van Eys, 2004).

3.7.3 Förekomst av sojabönsolja

Den främsta producenten av sojaböner är USA följt av länderna Brasilien, Argentina, Kina och Indien, vilken syns i Figur 26. Dessa fem länder stod för 92% av de 217,6 miljoner ton sojaböner som producerades i världen 2005–2007. Mängden förväntas öka till 370 miljoner ton tills år 2030 (Masuda & Goldsmith, 2009).

Soybean production

Soybean production is measured in tonnes.



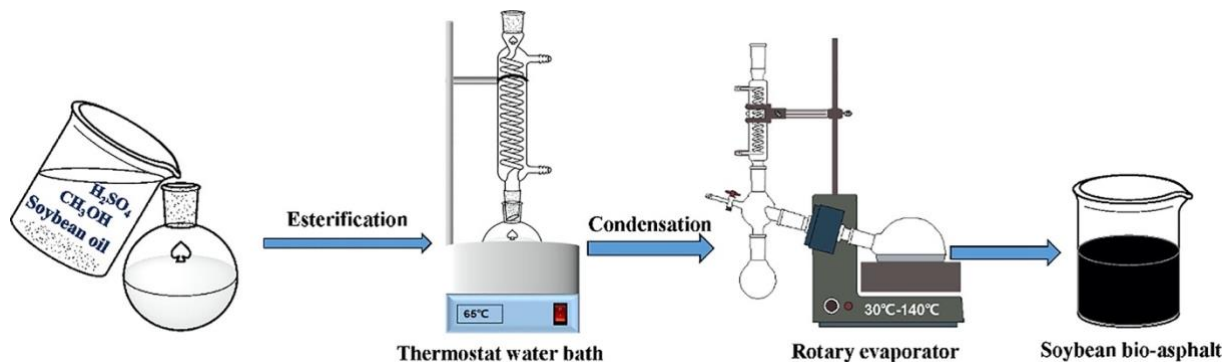
Source: UN Food and Agriculture Organization (FAO)

OurWorldInData.org/agricultural-production • CC BY

Figur 26. Översiktlig bild över hur produktionen av sojabönor var fördelad i världen år 2018 (Food and Agricultural Organization of the United Nations, 2020c). *Licens: CC-BY 4.0:*
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

3.7.4 Framställning av biobindemedlet

När oljan som är gjord på sojabönor skall omvandlas till biobindemedel används en katalysator i form av svavelsyra när oljan blandas tillsammans med metanol. Blandningen av vätskor hettas upp i ett vattenbad till 65°C som sedan kondenseras och omvandlar syran och blandningens kemiska bindningar. När vätskan genomgått omvandlingen utförs en vakuumbestillation så att ett svart bitumenliknande material framställs, se Figur 27 nedan (Li et al., 2019).



Figur 27. Översiktlig bild för tillvägagångssättet hur sojabönsolja omvandlas till biobindemedel (Li et al., 2019). Återgiven från *Construction and Building Materials*, 201(2019), Li, J., Zhang F., Liu, Y., Muhammad, Y., Su, Z., Meng, F. & Chen, X, *Preparation and properties of soybean bio-asphalt/SBS modified petroleum asphalt*, 268-277., Copyright (2019) med tillstånd från Elsevier.

3.7.5 Tekniska egenskaper

När Li et al. (2019) undersökte de reologiska egenskaperna så använde de sig av fyra olika prover med varierande procentsatser av biobindemedlet gjort på sojabönor, enligt Tabell 5 nedan.

Tabell 5. Sammansättning av biobitumen modifierat med sojabönsolja tillsammans med petroleumbaserat bitumen (Li et al., 2019). Återgiven från *Construction and Building Materials*, 201(2019), Li, J., Zhang F., Liu, Y., Muhammad, Y., Su, Z., Meng, F. & Chen, X, *Preparation and properties of soybean bio-asphalt/SBS modified petroleum asphalt*, 268-277., Copyright (2019) med tillstånd från Elsevier.

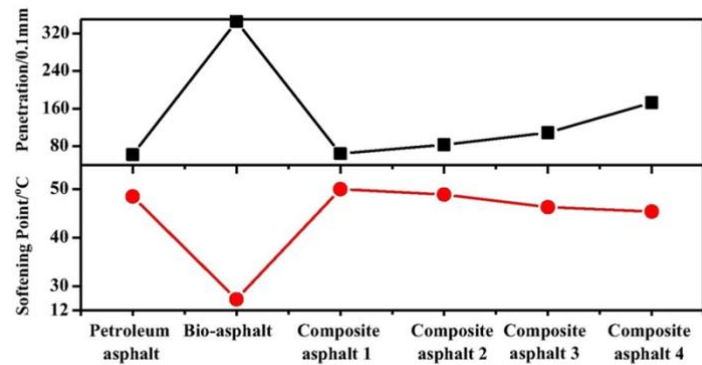
Provkroppar	Petroleumbaserat Bitumen, ESSO70A (g)	Biobitumen (g)	Biobitumen (%)
Sammansättning 1	135	15	10
Sammansättning 2	127,5	22,5	15
Sammansättning 3	120	30	20
Sammansättning 4	105	45	30

Penetrationstal & Mjukpunkt

När Li et al. (2019) utredde hur provernas penetrationstal varierade visade testerna att biobindemedlet har ett betydligt högre penetrationstal jämfört med petroleumbaserat bitumen vilket även syns i Tabell 6 och Figur 28 nedan. Penetrationstalet ökar ju högre procentsats av bindemedlet gjort på sojabönor som blandas in. Det motsatta sker för mjukpunkten vid över 15% inblandning, där denna egenskap i stället minskar vid en ökad procentsats sojabönsolja jämfört med petroleumbaserat bitumen (Li et al., 2019), vilket syns i Tabell 6 och Figur 28.

Tabell 6. Sammanställning av de reologiska egenskaperna för petroleumbaserat bitumen och provkroppar med varierande mängd sojabönsmodifierat biobitumen (Li et al., 2019). Återgiven från *Construction and Building Materials*, 201(2019), Li, J., Zhang F., Liu, Y., Muhammad, Y., Su, Z., Meng, F. & Chen, X, *Preparation and properties of soybean bio-asphalt/SBS modified petroleum asphalt*, 268-277., Copyright (2019) med tillstånd från Elsevier.

Test	Petroleumbaserat Bitumen	Biobitumen (100%)	Sammansättning 1 (10%)	Sammansättning 2 (15%)	Sammansättning 3 (20%)	Sammansättning 4 (30%)
Penetrationstal vid 25°C (0,1 mm)	62,0	345,5	64,1	83,1	108,6	172,8
Mjukpunkt (°C)	48,5	27,3	50,0	48,9	46,3	45,4



Figur 28. Sammanställning i diagramform av de reologiska egenskaperna för petroleumbaserat bitumen samt biobitumen modifierat på sojabönsolja. Sammansättningarna har sojabönsinblandning i turordning 10%, 15%, 20% och 30% (Li et al., 2019). Återgiven från *Construction and Building Materials*, 201(2019), Li, J., Zhang F., Liu, Y., Muhammad, Y., Su, Z., Meng, F. & Chen, X, *Preparation and properties of soybean bio-asphalt/SBS modified petroleum asphalt*, 268-277., Copyright (2019) med tillstånd från Elsevier.

När Portugal et al. (2016) forskade på bindemedel gjort på soja jämfördes jungfruligt utvunnen sojabönsolja och återvunnen olja i olika inblandningsmängd (1–3%). En ökning av penetrationstalet observerades när oljeinnehållet ökade, dock var det en större variation för jungfrulig sojabönsolja jämfört med återvunnen.

Viskositet

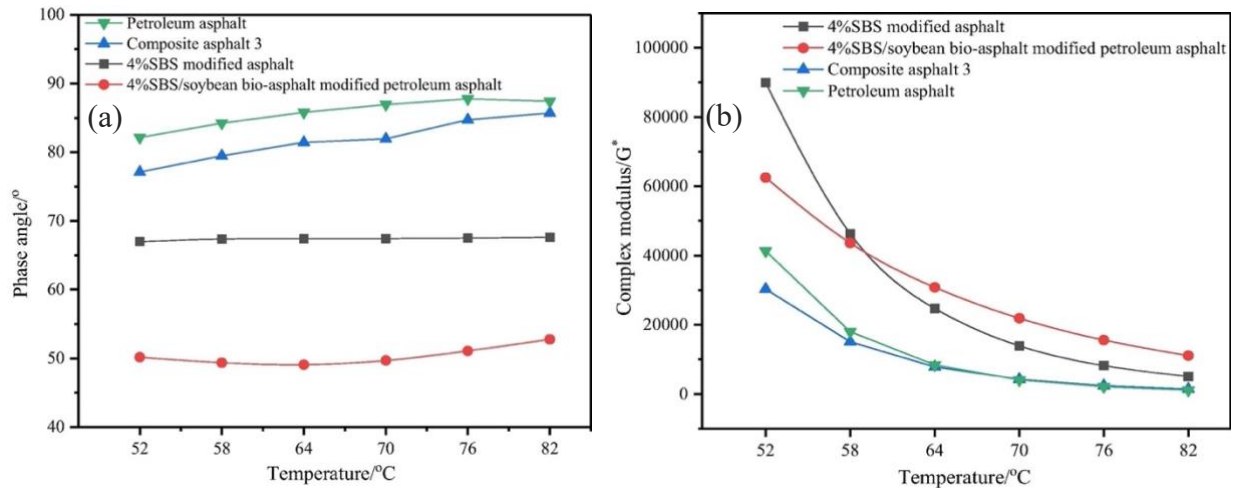
Portugal et al. (2016) konstaterade efter undersökta egenskaper att inblandning av sojabönsolja minskar viskositeten vid höga temperaturer, både för jungfruligt och korttidsåldrat bitumen. Detta då oljan i sig har en låg viskositet, se Tabell 7.

Tabell 7. Rotationsviskositet i före och efter åldring med RTFOT för jungfrulig och återvunnen sojabönsolja. Enheten för rotationsviskositeten nedan är mPa*s (Portugal et al., 2016). Återgiven från *Road Materials and Pavement Design*, 19(4), Portugal, A. C. X., de Figueirêdo Lopes Lucena, L. C., de Figueirêdo Lopes Lucena, A. E. & da Costa, D. B. *Rheological performance of soybean in asphalt binder modification*, 768-782, Copyright (2016) med tillstånd från Taylor & Francis.

RTFOT	Temperatur (°C)	Petroleumbaserat Bitumen (50/70)	1% Jungfrulig sojabönsolja	2% Jungfrulig sojabönsolja	3% Jungfrulig sojabönsolja	1% Återvunnen sojabönsolja	2% Återvunnen sojabönsolja	3% Återvunnen sojabönsolja
Före	135	463,75	423,75	386,25	317,50	411,25	367,50	337,50
	150	227,00	210,50	193,50	164,00	203,50	187,50	172,50
	177	80,50	75,75	69,75	61,25	72,00	68,00	65,00
Efter	135	607,50	538,75	488,75	406,25	555,00	476,25	427,50
	150	287,50	259,50	239,50	206,00	266,00	234,50	215,50
	177	96,25	86,25	81,25	71,50	88,50	77,50	72,00

Komplex skjuvmodul- & fasvinkelsamband

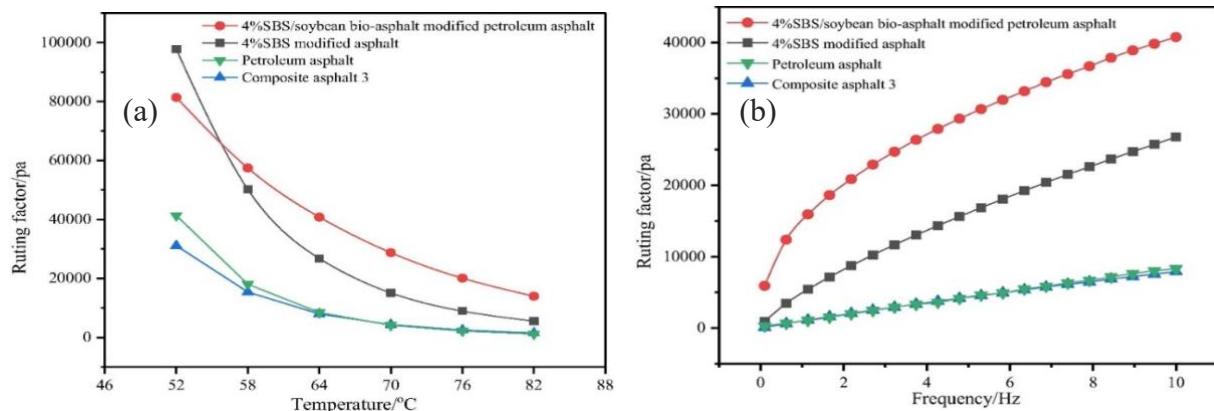
Petroleumbaserat bitumen har vid temperaturen 52°C högre komplex skjuvmodul än biobitumen sammansättning 3, men när temperaturen ökar ännu mer får de båda materialen liknande egenskaper. De båda materialens fasvinkel ökar vid en ökning i temperatur dock har petroleumbaserat bitumen en högre fasvinkel över samtliga temperaturer (Li et al., 2019). Sambanden kan ses nedan i Figur 29. Vid inblandning av SBS, styrene-butadiene-styrene, en så kallad polymermodifierad tillsats, förändras egenskaperna markant. Detta är dock en av avgränsningarna i denna rapport, därför jämförs inte detta ytterligare.



Figur 29. Diagram över hur (a) fasvinkeln och (b) komplex skjuvmodul förhåller sig till temperaturförändringar vid den konstanta frekvensen 10Hz. Jämförelse med petroleumbaserat bitumen och bindemedel gjort på 20% sojabönsolja (Composite asphalt 3) samt två polymermodifierade blandningar (Li et al., 2019). Återgiven från *Construction and Building Materials*, 201(2019), Li, J., Zhang F., Liu, Y., Muhammad, Y., Su, Z., Meng, F. & Chen, X, *Preparation and properties of soybean bio-asphalt/SBS modified petroleum asphalt*, 268-277., Copyright (2019) med tillstånd från Elsevier.

Varma temperaturer

När sammansättning 3 av biobitumen med 20% inblandning av sojabönsolja jämfördes med petroleumbaserat bitumen uppvisade de liknande benägenhet att bilda spår vid höga temperaturer. Vid medelhöga temperaturer har petroleumbaserat bitumen en högre förmåga att kunna stå emot spårbildning jämfört med bindemedel gjort på sojabönsolja. Om frekvensen förändras istället för temperaturen som hålls konstant vid 64°C beter sig materialen lika när benägenheten att stå emot spårbildning jämförs (Li et al., 2019). Vid inblandning av SBS förändras egenskaperna markant. Sambandet kan ses i Figur 30.



Figur 30. Diagram över hur spårbildningen förändras vid olika höga temperaturer (a) och olika frekvenser vid konstant temperatur 64°C (b) med hjälp av spårbildningsfaktorn ($G^*/\sin(a)$). Jämförelse med petroleumbaserat bitumen och bindemedel gjort på 20% sojabönsolja (Composite asphalt 3) samt två polymermodifierade blandningar (Li et al., 2019). Återgiven från *Construction and Building Materials*, 201(2019), Li, J., Zhang F., Liu, Y., Muhammad, Y., Su, Z., Meng, F. & Chen, X, *Preparation and properties of soybean bio-asphalt/SBS modified petroleum asphalt*, 268-277., Copyright (2019) med tillstånd från Elsevier.

Kalla temperaturer

Tester som utfördes av Li et al. (2019) indikerar på att benägenheten för bindemedel att spricka vid låga temperaturer minskar vid inblandning av sojabönsolja.

Åldrande

Inga värden angående hur egenskaperna påverkas av åldrande har hittats för sojabönsolja.

3.7.6 Miljö och klimat

Det första steget som innebär miljöpåverkan är produktionen av sojabönorna som genom odlingen bidrar till att mycket mark tas i anspråk samtidigt som marken göds i en stor mängd vilket kan påverka ekosystemet. Den fortsatta torkningen av bönorna kräver mycket energi för att kunna fortgå. Båda dessa steg är dock inget större problem om det rör sig om återvunnen sojabönsolja. Om produktionen kräver större kvantiteter som innebär att återvinningen inte räcker till, utan nyproduktion behövs som komplement kan dock dessa miljöfaktorer innebära en större påverkan i oljans livscykelanalys. När återvunnen sojabönsolja används är det omvandlingsprocessen som energianvändning och miljöpåverkan förflyttas till. De båda alternativen är dock bättre jämfört med petroleumbaserat bitumen sett utifrån ett klimaterspektiv (Sanz Requena et al., 2010).

3.7.7 Praktiska aspekter

Då det finns en stor mängd sojabönsolja tillgänglig samt att dess kostnad sett utifrån råvaran i sig resulterar i en tillgänglig och billig produkt. Dessa två faktorer tillsammans genererar ett kostnadseffektivt alternativ jämfört med petroleumbaserat bitumen som har möjlighet att produceras i stora mängder (Li et al., 2019).

När Portugal et al. (2016) forskade på en inblandning av 1-3% sojabönsolja som återanvänds och tillsätts i bindemedel leder detta till en minskning i materialets viskositet. Viskositetsförändringen bidrar till att temperaturen som krävs när materialet blandas samman och packas inte i en lika hög temperatur vilket är gynnsamt både miljömässigt och ekonomiskt (Portugal et al., 2016).

3.7.8 Forskningsframsteg

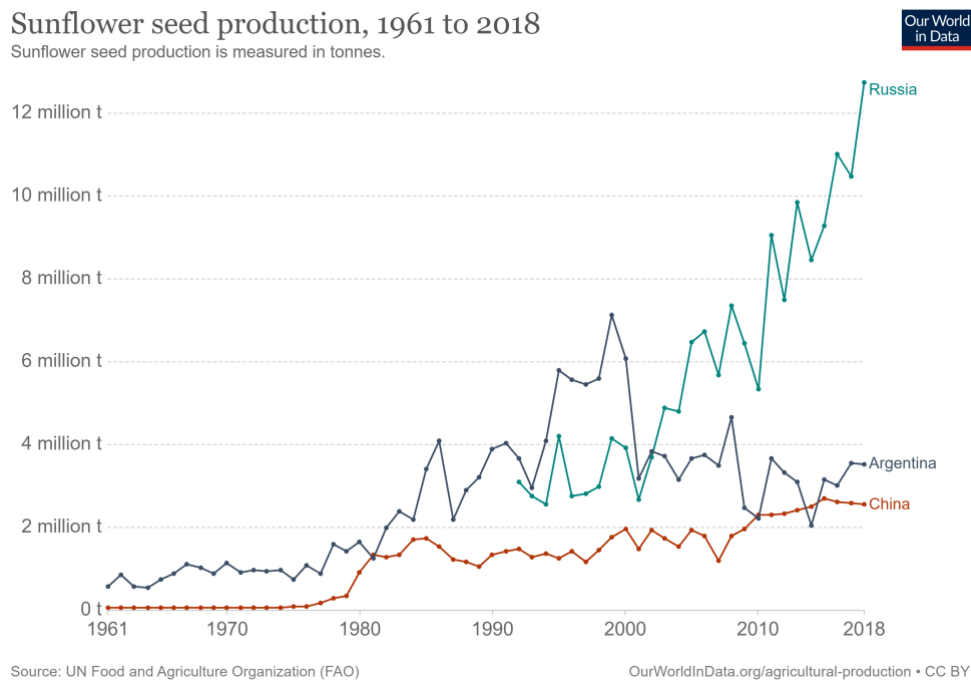
Fortsatt forskning om hur materialets egenskaper förändras krävs men de tester som är finns i dagsläget visar goda resultat och förutsättningar. Forskningen behöver förflytta testerna vidare från laboratoriet till fält för att kunna utveckla resultaten (Portugal et al., 2016).

Sojabönsolja har även undersökts som föryngringsmedel, och den har visats vara effektiv i att återställa de reologiska egenskaperna hos åldrat asfalt (Elkashef et al., 2018).

3.8 Solrosolja

3.8.1 Beskrivning av solrosolja

Växten solros kan användas till flera olika saker, men det primära användningsområdet för grödan är solrosolja. Solrosoljan är, tillsammans med rapsolja, de mest betydelsefulla i Europa samtidigt som det är bland topp fyra sett utifrån betydelsen i hela världen (Jocić et al., 2015). I Figur 31 visas en stor ökning av solrosproduktionen i världen de senaste åren.



Figur 31. Diagram över hur produktionen av solrosfrön har ökat mellan åren 1961–2018, för Ryssland, Argentina och Kina (Food and Agricultural Organization of the United Nations, 2020d). Licens: CC-BY 4.0: <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

3.8.2 Utvinning av solrosolja

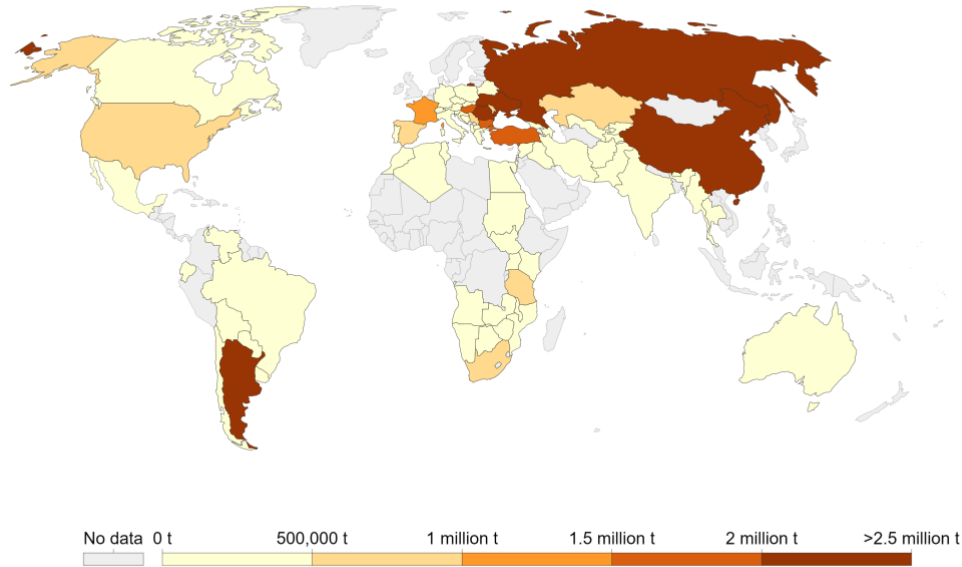
När utvinningen av olja från solrosgrödan skall genomföras sker detta främst genom en process som genererar upp till 40% olja. Solrosfröna tvättas, torkas och skalas för att sedan pressas och delas upp i olika produkter. Oljan blandas samman med lösningsmedel som renar och återvinns i en process och ger utvunnen solrosolja som slutprodukt (Le Clef & Kemper, 2015).

3.8.3 Förekomst av solrosolja

50% av världens solrosfrön står Ryssland och Ukraina för. De två länderna tillsammans odlar solrosor på en area av 13 miljoner hektar som nådde en mängd på 20 miljoner ton, år 2012. Den totala produktionen i världen år 2012 var 40,64 miljoner ton (U.S. Department of Agriculture, 2013, refererad i Jocić et al., 2015). Figur 32 visar solrosproduktionen i världen år 2018.

Sunflower seed production, 2018

Sunflower seed production is measured in tonnes.



Source: UN Food and Agriculture Organization (FAO)

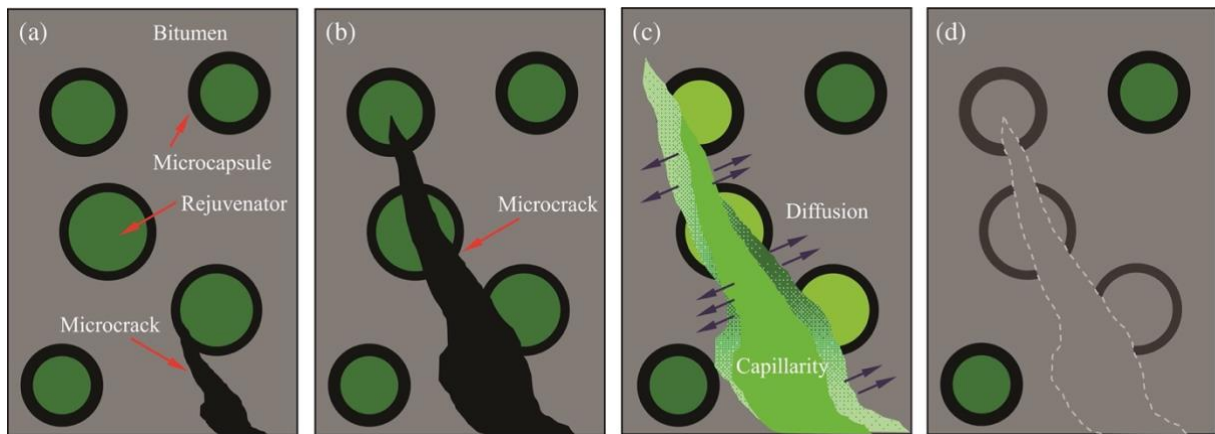
OurWorldInData.org/agricultural-production • CC BY

Figur 32. Översiktlig bild över hur produktionen av solrosfrön var fördelad i världen år 2018 (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2020e). *Licens: CC-BY 4.0:*

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

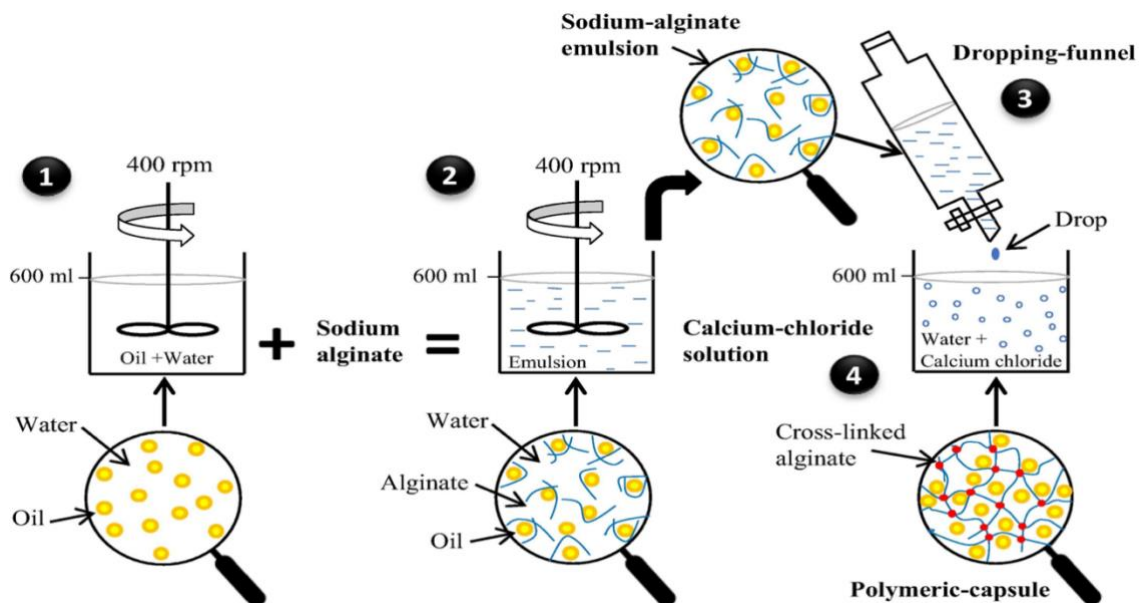
3.8.4 Framställning av biobindemedlet

Solrosolja används som föryngringsmedel i asfalt och det görs i många fall genom kapslar, som har en läkande förmåga (García et al., 2015). De mikroskopiska kapslarna fungerar enligt Figur 33 nedan men kan bestå av olika uppbyggnader och sammansättningar i olika forskningsprojekt. Kapslarna, som består utav föryngringsmedel, blandas in i asfalten och när belastning i form utav trafik eller miljöpåverkan som resulterar i oxidation och därmed styvare konsistens blir för stor för att asfalten skall kunna hålla samman går kapseln sönder och solrosoljan släpps ut och bidrar till en föryngring av materialet (García et al., 2010). Kapseln föryngrar den uppspruckna asfalten och hjälper den att laga samt förbättra vägens egenskaper (Shirzad et al., 2017).



Figur 33. Föryngring av asfalt genom mikrokapslar (Su et al., 2015). Återgiven från *Construction and Building Materials*, 106(2016), Su, J-F., Wang, Y-Y., Han, N-X., Yang, P. & Han, S., *Experimental investigation and mechanism analysis of novel multi-self-healing behaviors of bitumen using microcapsules containing rejuvenator*, 317-329, Copyright (2015) med tillstånd från Elsevier.

En av uppbyggnaderna som Al-Mansoori et al. (2017) forskade fram var att göra kapseln med solrosolja utav en polymer gjord på kalcium-alignat. Solrosolja blandades samman med vatten och sedan tillsattes natriumalignat som finns i bruna alger. Ämnet finns i algernas cellväggar. När blandningen har blandats ordentligt droppas lösningen ner i kalciumklorid för att bilda kapslar som sedan torkas, se Figur 34 nedan.



Figur 34. Översiktlig bild för tillvägagångssättet hur solrosolja omvandlas till biobitumen (Al-Mansoori et al., 2017) Återgiven från *Construction and Building Materials*, 161(2018), Al-Mansoori, T., Norambuena-Contreras, J., Micaelo, R. & Garcia, A., *Self-healing of asphalt mastic by the action of polymeric capsules containing rejuvenators*, 330-339. Copyright (2017) med tillstånd från Elsevier.

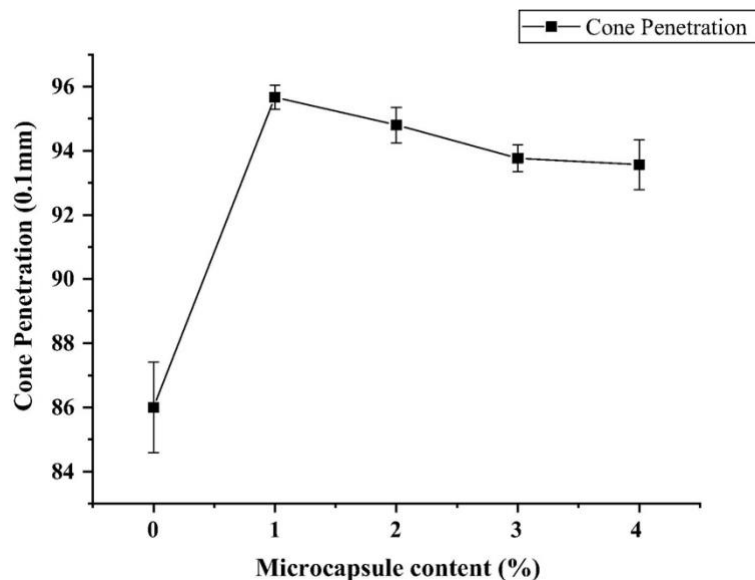
3.8.5 Tekniska egenskaper

Penetrationstal & Mjukpunkt

Sun et al. (2020) undersökte bi-bitumens reologiska egenskaper med en inblandning av solrosolja vid 1–4 viktprocent. När penetrationstalstester gjordes och jämfördes med de ursprungliga värdena, som ses i Tabell 8 nedan, observerades en minskning ju högre halt inblandning av solrosolja, vilket ses i Figur 35. Det skedde dock en markant ökning sett utifrån ursprungsmaterialet. Ökningen som uppstår vid testerna kan vara sammankopplad med kapslarna som går sönder under belastning vilket kan vara svårt att kontrollera under testets gång och på så sätt påverka utfallet.

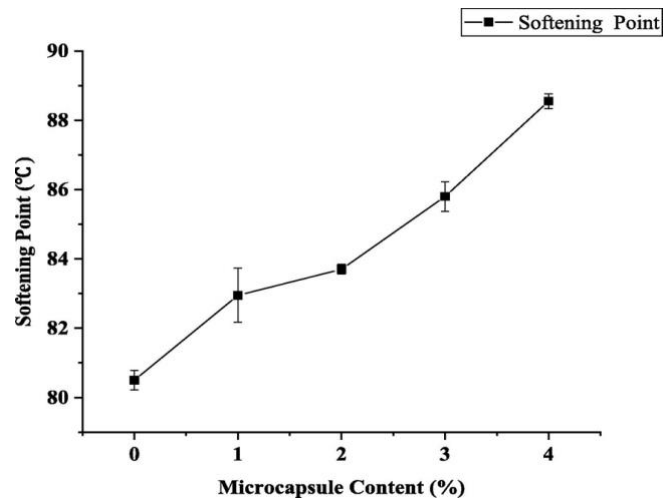
Tabell 8. Reologiska egenskaper för petroleumbaserat bitumen som används vid försegling (Sun et al., 2020). Återgiven från *Construction and Building Materials*, 254(2020), Sun, G., Zhang, J., Tan, X., Guo, D., Zhou, Y. & Guan, Y.). *Evaluation of conventional technical properties and self-healing ability of bitumen-based sealants containing sunflower-oil microcapsules for pavement cracks*, 119299, Copyright (2020) med tillstånd från Elsevier.

Test	Värden
Penetrationstal (0,1 mm)	86
Mjukpunkt (°C)	80,5
Fluiditet (mm)	2,0



Figur 35. Diagram över relationen mellan penetrationstal och mängden solroskapslar (Sun et al., 2020). Återgiven från *Construction and Building Materials*, 254(2020), Sun, G., Zhang, J., Tan, X., Guo, D., Zhou, Y. & Guan, Y.). *Evaluation of conventional technical properties and self-healing ability of bitumen-based sealants containing sunflower-oil microcapsules for pavement cracks*, 119299, Copyright (2020) med tillstånd från Elsevier.

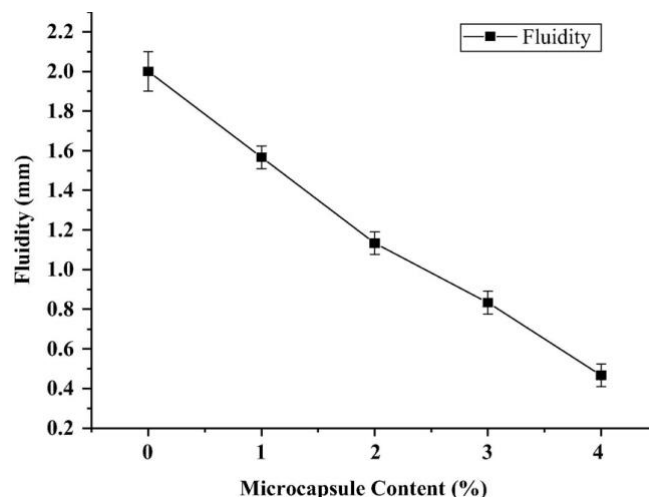
Sett till mjukpunkten i Figur 36 nedan för de olika provkropparna och jämfört med tabellvärdet ovan (Tabell 8) syntes en ökning vid ökat oljekapselinnehåll. Dessa två tester leder till slutsatsen att höga temperaturer inte påverkar material med högre solrosinnehåll lika mycket som vid en mindre andel oljeinnehåll (Sun et al., 2020).



Figur 36. Diagram över relationen mellan mjukpunkt och mängden solroskapslar (Sun et al., 2020). Återgiven från *Construction and Building Materials*, 254(2020), Sun, G., Zhang, J., Tan, X., Guo, D., Zhou, Y. & Guan, Y.). *Evaluation of conventional technical properties and self-healing ability of bitumen-based sealants containing sunflower-oil microcapsules for pavement cracks*, 119299, Copyright (2020) med tillstånd från Elsevier.

Viskositet

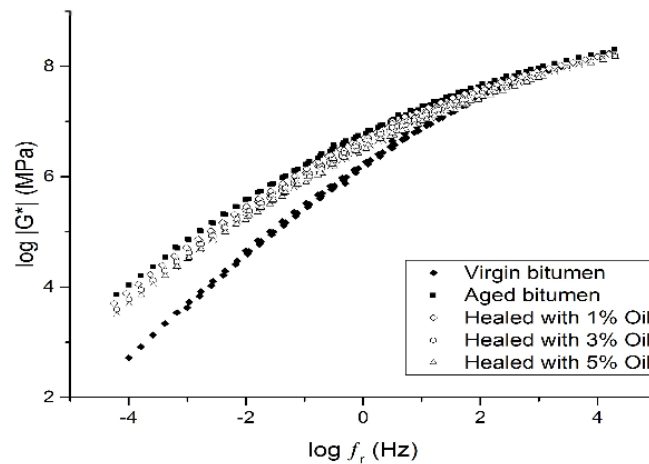
En minskning av flödet uppstår när solroskapslar tillsätts vilket kan förklaras genom kapslarnas blockering inuti materialet som bidrar till flödesmotstånd och därmed resulterar i utseendet som visas i Figur 37 nedan (Sun et al., 2020). Flödesmotståndet som speglas genom fluiditet i figuren nedan som är ett mått på hur lätt materialet flyter, alltså motsatsen till viskositet. En hög fluiditet resulterar i en låg viskositet och därmed är materialet lättflytande (Nationalencyklopedin, u.å.b). Fluiditet tas upp då inga värden har hittats för viskositet.



Figur 37. Diagram över relationen mellan fluiditet och mängden solroskapslar (Sun et al., 2020). Återgiven från *Construction and Building Materials*, 254(2020), Sun, G., Zhang, J., Tan, X., Guo, D., Zhou, Y. & Guan, Y.). *Evaluation of conventional technical properties and self-healing ability of bitumen-based sealants containing sunflower-oil microcapsules for pavement cracks*, 119299, Copyright (2020) med tillstånd från Elsevier.

Komplex skjuvmodul- & fasvinkelsamband

När Zheng (2019) utvärderade åldrad asfalt med olika mängd solrosolja kunde Figur 38 nedan plottas i ett diagram. I diagrammet kan det utläsas att asfalt som har utsatts för åldring har en högre komplex skjuvmodul, G^* detta på grund av den ökade styvheten som uppstår i materialet under en åldringsprocess. När solrosolja adderas så minskar den komplexa skjuvmodulen för åldrat biobitumen, vilket främst gäller för frekvenserna i det lägre intervallet. Vid högre frekvenser kan inte solrosoljan förbättra egenskaperna och därmed den komplexa skjuvmodulen jämfört med petroleumbaserat bitumen. Vid 5% inblandning kan åldrat bitumen återhämta sina ursprungliga reologiska egenskaper till 32% av det som förlorats vid åldrandet.



Figur 38. Diagram över den komplexa skjuvmodulens förändring vid olika frekvenser vid varierande solrosoljeinblandning jämfört med petroleumbaserat jungfruligt och åldrat bitumen. (Zheng, 2019).

Licens: CC-BY 3.0: <https://creativecommons.org/licenses/by/3.0/>

Varma temperaturer

Spårbildningsfaktorn ökar vid åldrat petroleumbaserat bitumen och Zheng (2019) undersökte olika inblandningar av föryngringsmedlet solrosolja. När detta undersöktes kunde en lägre spårbildningsfaktor och därmed spårbildningsresistens ses vid inblandning av olja, se Tabell 9. Även mängden som frekvensen påverkar provkropparna minskade. Dock så påpekar Zheng (2019) att temperaturen är en viktig parameter som kan påverka provresultatet.

Tabell 9. Spårbildningsparametrar för varierande solrosoljeinblandning jämfört med petroleumbaserat jungfruligt och åldrat bitumen vid temperaturen 20°C (Zheng, 2019). Licens: CC-BY 3.0:

<https://creativecommons.org/licenses/by/3.0/>.

Bindemedelstyp	Frekvens 0,0628 rad/s	Frekvens 4,44 rad/s	Frekvens 314 rad/s
Petroleumbaserat Bitumen	$4,64 * 10^4$	$1,43 * 10^6$	$2,58 * 10^7$
Åldrat petroleumbaserat bitumen	$4,32 * 10^9$	$6,21 * 10^{10}$	$5,58 * 10^{11}$
1% Solrosolja	$2,83 * 10^5$	$4,39 * 10^6$	$4,04 * 10^7$
3% Solrosolja	$2,37 * 10^5$	$3,81 * 10^6$	$3,69 * 10^7$
5% Solrosolja	$1,79 * 10^5$	$3,01 * 10^6$	$3,17 * 10^7$

Kalla temperaturer

Den minskande spårbildningsfaktor som syntes i Tabell 9 ovan kan vara fördelaktigt vid kallare temperaturer för att minska sprickbildning vilket solrosolja kan bidra till (Zheng, 2019).

Åldrande

Zheng (2019) utvärderade även olika provkroppars utmattning vid varierande sammansättningar vid åldrat bitumen. Även här kunde en förbättring ses vilket visas i tabell 10 nedan.

Tabell 10. Utmattningsparametrar för varierande solrosoljeblandning jämfört med petroleumbaserat jungfruligt och åldrat bitumen vid temperaturen 20°C (Zheng, 2019). Licens: CC-BY 3.0:

<https://creativecommons.org/licenses/by/3.0/>.

Bindemedelstyp	Frekvens 0,0628 rad/s	Frekvens 4,44 rad/s	Frekvens 314 rad/s
Petroleumbaserat Bitumen	$4,49 * 10^4$	$1,22 * 10^6$	$1,42 * 10^7$
Åldrat bitumen	$3,40 * 10^9$	$3,68 * 10^{10}$	$2,14 * 10^{11}$
1% Solrosolja	$2,32 * 10^5$	$2,72 * 10^6$	$1,68 * 10^7$
3% Solrosolja	$1,96 * 10^5$	$2,43 * 10^6$	$1,60 * 10^7$
5% Solrosolja	$1,5 * 10^5$	$1,99 * 10^6$	$1,40 * 10^7$

3.8.6 Miljö och klimat

För att föryngra asfalten i dagsläget används kemikalier som hålls ovan på vägytan vilket de föryngrande solroskapslarna kan bytas ut mot och ge ett bättre och mer miljövänligt alternativ att laga sprickor på (Garcia et al., 2015; Garcia et al., 2010). Om jungfrulig solrosolja används tas ytterligare jordbruksmark i anspråk för odlingen vilket kan konkurrera med andra branscher (Hassouneh et al., 2012). Om däremot återvunnen solrosolja utnyttjas skapas i stället mer värde av nuvarande odlingar.

3.8.7 Praktiska aspekter

Om det finns möjlighet att använda sig av solroskapslar i stället för kemikalier bidrar det till att vägen slipper stängas av för att kunna utföra behandlingen av vägen. När lagret av kemikalier hålls ut ovanpå vägbanan försämrar detta friktionen vilket är farligt för vägens resenärer och som inte kapslarna bidrar till (Garcia et al., 2010). Solrosoljan är även enkel att utvinna och är en redan tillgänglig och billig produkt (Tarar et al., 2020).

3.8.8 Forskningsframsteg

Solrosolja visar på lovande läkande egenskaper som kan byggas vidare på i framtiden (Zheng et al., 2019), det krävs dock ytterligare undersökningar för att kunna utveckla tekniken. En av stegen som Shirzad et al., (2017) menar på är att använda sig av återvunnen asfalt och se hur det går att anpassa kapslarna i en sådan materialsammansättning. Även en översiktlig bild över materialets påverkan behövs för att utforska framtida möjligheter i form av en

livscykelanalys som kan resultera i en jämförelse av varierande sammansättningar. Detta bidrar då till att det mest optimala alternativet kan väljas (Shirzad et al., 2017). Trots att solrosolja framför allt undersökts som föryngringsmedel, har den visats ha potential även som modifierare (Tarar et al., 2020).

3.9 Matoljeavfall

3.9.1 Beskrivning av matoljeavfall

Det används en stor mängd vegetabiliska oljor i världen i dagsläget och efterfrågan fortsätter öka. Anledningen till ökningen beror bland annat på att världens population i nuläget växer vilket genererar fler konsumenter (Uz & Gökalp, 2020). En ökning av efterfrågan resulterar i en stor kvantitet avfall i form av vegetabiliska oljor som kan orsaka miljöfara i form av föroreningar om den inte återvinns och behandlas på rätt sätt (Math et al., 2010). Mängden matoljeavfall som det rör sig om i världen är enligt Lee et al. (2014) ca 15 miljoner ton varje år.

3.9.2 Utvinning av matoljeavfall

Dessa enorma mängder använda vegetabiliska oljor kommer överallt ifrån där matlagning sker men en stor del av avfallet kommer från servicebranscherna restaurang och hotell men även från hushåll (Maharaj et al., 2015).

3.9.3 Förekomst av matoljeavfall

Då matlagning och fritering sker i hela världen resulterar det i att även matoljeavfall finns tillgängligt som restprodukt globalt (Math et al., 2010).

3.9.4 Framställning av biobindemedlet

Vid omvandlingen från matoljeavfall till biobindemedel använder sig Wen et al. (2013) av en temperaturökning för att ändra materialets kemiska uppbyggnad. Denna process kallas termokemisk omvandling (Wen et al., 2013).

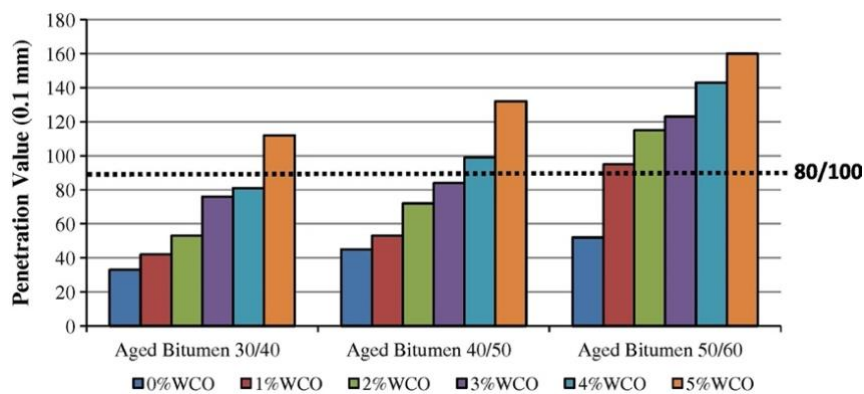
När materialet använts som föryngringsmedel har matoljeavfallet innehållit icke önskvärda partiklar som stör materialets önskade egenskaper, partiklarna filterats då bort (Asli et al., 2012 ; Uz & Gökalp, 2020).

3.9.5 Tekniska aspekter

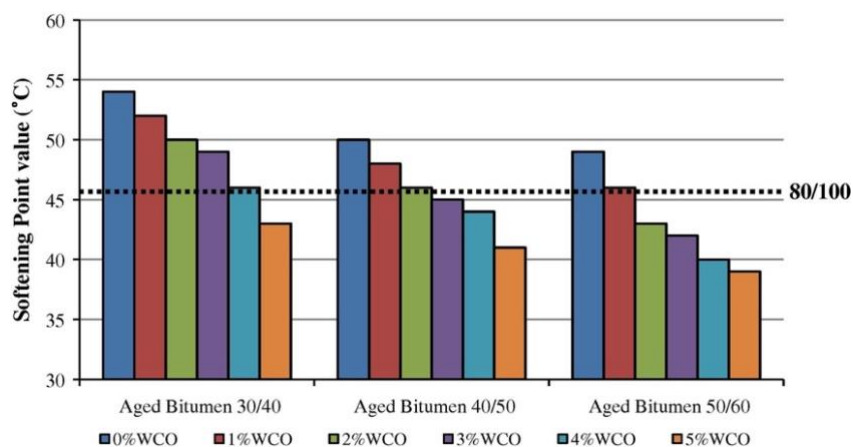
Penetrationstal & Mjukpunkt

Penetrationstalet samt mjukpunkten undersöktes för petroleumbaserat bitumen med penetrationstal 80/100 som utsatts för olika mängd åldring. Beroende på hur mycket bituminet åldrats, får det penetrationstal 30/40, 40/50 eller 50/60. 1 vikt-% till och med 5 vikt-% av matoljeavfall blandades in vilket resulterar i ett mjukare material. Resultatet kan ses i Figur 39 och 40 nedan, där det går att läsa av hur stor mängd matoljeavfall som behöver blandas in för att få tillbaka de ursprungliga reologiska egenskaperna för bitumen 80/100.

Penetrationstalen ökar ju mer inblandning av olja som tillsätts, och det motsatta sker för mjukpunkten (Asli et al., 2012; Zargar et al., 2012). Det observerades att vissa mängder olja som till exempel 1% oljeinblandning för petroleumbaserat bitumen som åldrats till penetrationstal 50/60, gör att det åldrade materialet får tillbaka de egenskaper som det hade innan åldringen (80/100).



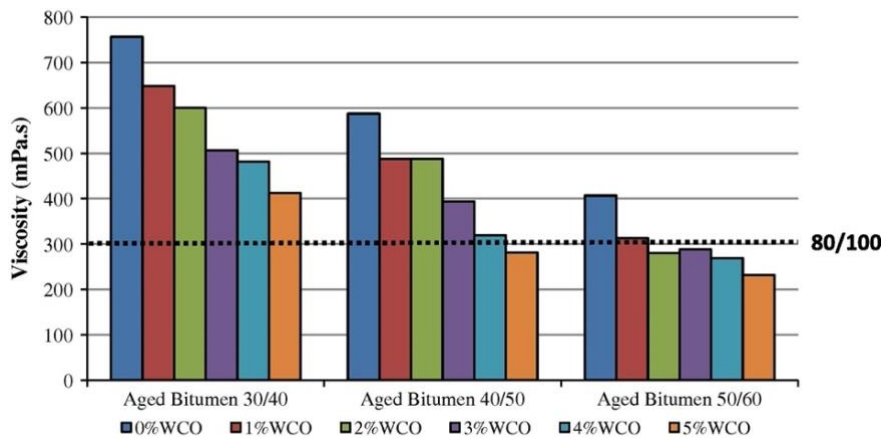
Figur 39. Diagram över hur penetrationstalet varierar för bitumen 80/100 som åldrats till bitumen 30/40, 40/50 och 50/60. I dessa har 0–5% matoljeavfall blandats in som föryngringsmedel. Detta jämförs med jungfruligt petroleumbaserat bitumen 80/100 (Asli et al., 2012). Återgiven från *Construction and Building Materials*, 37(2012), Asli, H., Ahmadienia, E., Zargar, M. & Karim, M. R., *Investigation on physical properties of waste cooking oil – Rejuvenated bitumen binder*, 398-405, Copyright (2012) med tillstånd från Elsevier.



Figur 40. Diagram över hur mjukpunkten varierar för bitumen 80/100 som åldrats till bitumen 30/40, 40/50 och 50/60. I dessa har 0–5% matoljeavfall blandats in som föryngringsmedel. Detta jämförs med jungfruligt petroleumbaserat bitumen 80/100 (Asli et al., 2012). Återgiven från *Construction and Building Materials*, 37(2012), Asli, H., Ahmadienia, E., Zargar, M. & Karim, M. R., *Investigation on physical properties of waste cooking oil – Rejuvenated bitumen binder*, 398-405, Copyright (2012) med tillstånd från Elsevier.

Viskositet

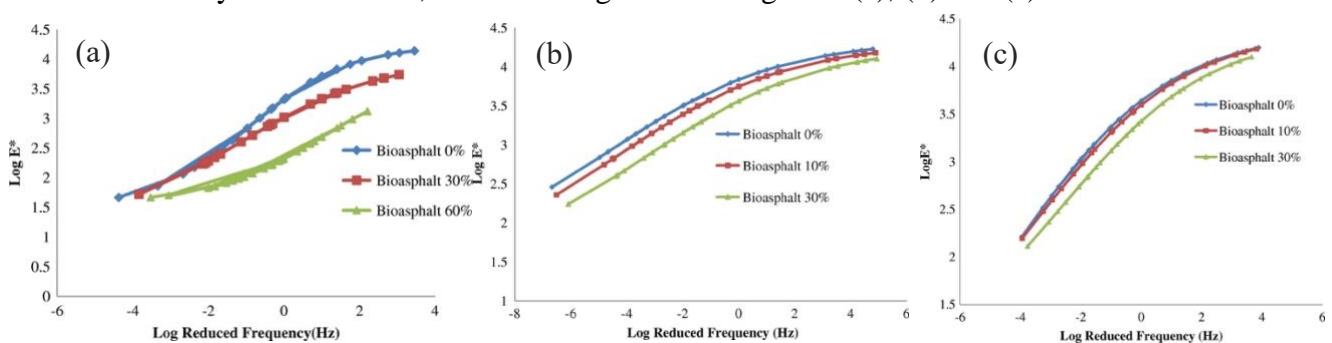
Viskositeten förändras enligt Figur 41 nedan och visar på att en ökning av andelen olja genererar en minskning av de åldrade testmaterialens viskositet vilket tros ha att göra med den kemiska förändringarna i materialen (Asli et al., 2012 ; Zargar et al., 2012).



Figur 41. Diagram över hur viskositeten varierar för bitumen 80/100 som åldrats till bitumen 30/40, 40/50 och 50/60. I dessa har 0–5% matoljeavfall blandats in som föryngringsmedel. Detta jämförs med jungfruligt petroleumbaserat bitumen 80/100 (Asli et al., 2012). Återgiven från *Construction and Building Materials*, 37(2012), Asli, H., Ahmadienia, E., Zargar, M. & Karim, M. R., *Investigation on physical properties of waste cooking oil – Rejuvenated bitumen binder*, 398-405, Copyright (2012) med tillstånd från Elsevier.

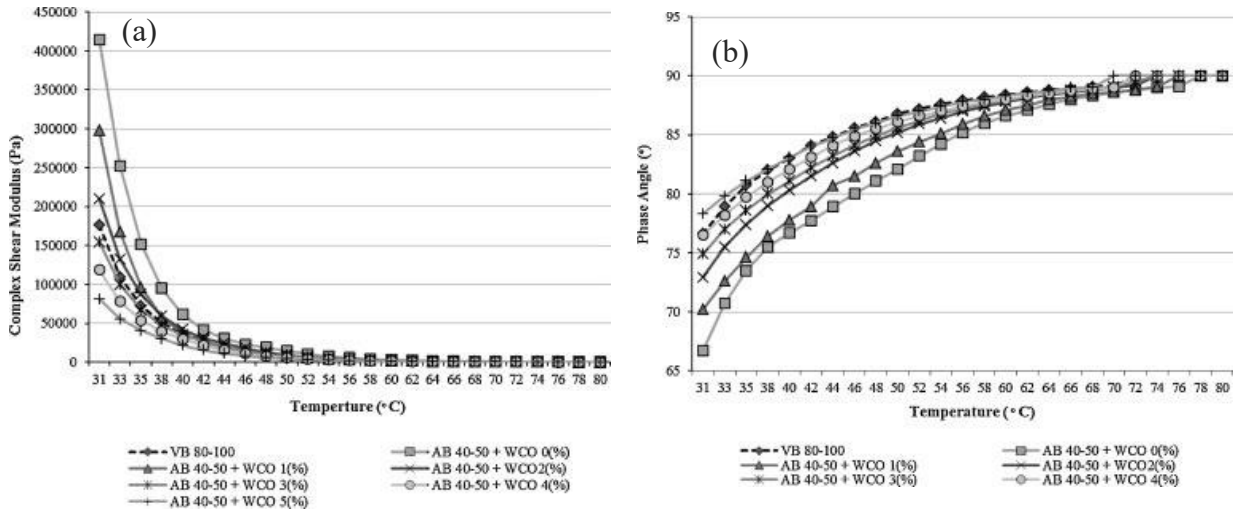
Komplex skjuvmodul- & fasvinkelsamband

Wen et al. (2013) undersökte egenskaperna hos biobitumen för sammansättningar med petroleumbaserat bitumen PG58-28 för inblandning av bioasfalten gjort på matoljeavfall med andelen 30- respektive 60 vikt-%. Ytterligare tester utfördes med petroleumbaserade bitumen PG82-16 samt PG72-22 med 10- respektive 30 vikt-% inblandning av biobitumen. När forskarna undersökte komplex elasticitetsmodul, E^* så kunde ett samband mellan andelen biobitumen som blandades in i bindemedlet och styvheten resultera i slutsatsen att samtliga materials styvhet minskade, se detta i diagrammen i figur 42 (a), (b) och (c) nedan.



Figur 42. Diagram över hur elasticitetsmodulen förändras vid ökad frekvens för olika inblandningar av petroleumbaserat bitumen (a) PG58-28 (b) PG 82-16 (c) PG72-22 (Wen et al., 2013). Återgiven från *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25(10), Wen, H., Bhusal, S. & Wen, B., *Laboratory Evaluation of Waste Cooking Oil-Based Bioasphalt as an Alternative Binder for Hot Mix Asphalt*, 1432-1437, Copyright (2013) med tillstånd från American Society of Civil Engineers (ASCE).

Zargar et al. (2012) undersökte komplexa skjuvmodulen, G^* och fasvinkel för petroleumbaserat bitumen för både jungfruligt samt åldrat med inblandning av matoljaavfall mellan 1–4%. Bindemedel med en inblandning av 3% matoljaavfall har liknande komplex skjuvmodul som materialet hade innan det åldrades, samma kan ses fast vid 4% för Figur 43 som visar fasvinkel men som helhet sker en ökning av parametern vid inblandning av olja (Zargar et al., 2012).



Figur 43. Diagram över hur den (a) komplexa skjuvmodulen respektive (b) fasvinkeln förändras vid ökande temperatur. AB står för åldrat bitumen, och VB står för jungfruligt bitumen (Zargar et al., 2012). Återgiven från *Journal of Hazardous Materials*, 233-234(2012), Zargar, M., Ahmadiania, E., Asli, H. & Karim, M. R. Investigation of the possibility of using waste cooking oil as a rejuvenating agent for aged bitumen, 254-258, Copyright (2012) med tillstånd från Elsevier.

Varma temperaturer

Spårbildning har visat få negativa konsekvenser vid inblandning av biobitumen. Materialet kan inte stå emot deformationen visar laborationer som gjordes på materialens flöden. Benägenheten att bilda spår ökar vid ökad inblandning av biobitumen av matoljaavfall för samtliga materialsammansättningar (Wen et al., 2013).

Kalla temperaturer

När tester gjordes för kalla temperaturer kunde Wen et al. (2013) se en ökad resistens mot benägenheten att spricka vid kalla temperaturer.

Åldrande

När förnyngningsmedel i form av matoljeavfall tillsätts kan slutsatsen dras att åldrat bitumen fortsätter åldras i en högre takt än vad bitumen förnygrad med oljeinblandning gör, se Tabell 11 nedan.

Tabell 11. Förändring i testegenskaper vid korttidsåldring, för åldrat samt förnygrad bitumen (Zargar et al., 2012) Återgiven från *Journal of Hazardous Materials*, 233-234(2012), Zargar, M., Ahmadiania, E., Asli, H. & Karim, M. R. *Investigation of the possibility of using waste cooking oil as a rejuvenating agent for aged bitumen*, 254-258, Copyright (2012) med tillstånd från Elsevier.

Testade egenskaper	Åldrat bitumen	Förnygrad bitumen
Viskositet (mPa*s)	400	432,4
Penetrationstal (0,1mm)	60	67
Mjukpunkt (°C)	48,3	48
Penetrationsförlust	25	14
Komplex skjuvmodul vid 64°C	357,25	292,5
Komplex skjuvmodul förändring	1,56	1,08

3.9.6 Miljö och klimat

Möjligheten att förnygra asfalten gör att materialet tas tillvara på och återvinningen skapar en mer hållbar och cirkulär livscykel av belagda ytor (Uz & Gökalp, 2020).

Ännu en hållbar lösning är att kunna återanvända och återvinna matoljeavfall då det motverkar miljöfara. Materialet hanteras i dagsläget inte på ett miljösäkert sätt i den utsträckning som krävs och resulterar i förorening av både sjöar och mark. Möjligheten att ta vara på råvaran och undgå detta är önskvärt (Math et al., 2010).

3.9.7 Praktiska aspekter

En stor fördel om vegetabiliska oljor visar sig kunna klara av de egenskaper som krävs och kan användas och produceras storskaligt är att det inte bidrar till någon miljöpåverkan utan i stället är miljövänlig även i större kvantiteter (Zheng et al., 2019).

Forskning från Asli et al. (2012) visar på en ekonomisk vinning i att använda matoljeavfall i framtiden då redan belagda vägars underhållskostnader kan minska om oljans förnygrande egenskaper tas tillvara på.

En annan stor positiv faktor med matoljeavfall är tillgången som sträcker sig över hela jordklotet, det finns en stor mängd av materialet då matlagning och fritering sker i stora mängder runt om i världen (Math et al., 2010).

3.9.8 Forskningsframsteg

För att kunna utveckla användningen av matoljeavfall i biobitumen krävs det mer forskning. Utvecklingen gäller både för sammansättningen av materialet samt testvägar för att se hur det beter sig i en större skala än dagens laboratorietester (Aziz et al., 2015 ; Wen et al., 2013).

3.10 Kaffesump

3.10.1 Beskrivning av kaffesump

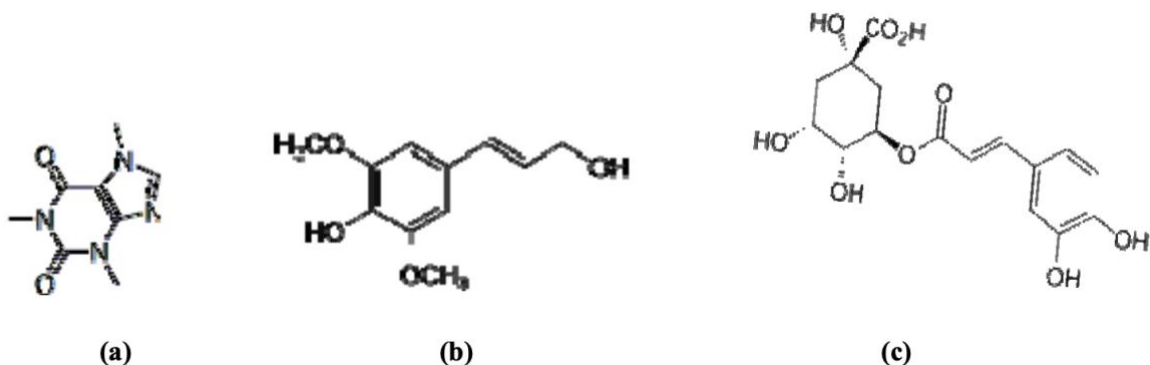
Kaffe dricks dagligen av de flesta och har en betydande roll i många människors vardag (Marx et al., 2020). Det finns flera kopplingar mellan den råolja som minskar i mängd och kaffe men ett av sambanden som Tucker (2017) menar på är att olja och därefter kaffe är i utvecklingsländer de råvaror som värderas som de mest viktiga. Mussatto et al. (2011) poängterar också att miljontals arbetstillfällen skapas genom kaffeindustrin som är en viktig del i världsekonomin.

I värden producerades över 10 miljoner ton kaffe år 2020 enligt International Coffee Organization (2021). När varor produceras och därefter konsumeras skapar det oftast i slutändan någon form av avfall som behöver hanteras. I detta fall rör det sig om kaffesump och enligt Tokimoto et al. (2004) genereras i världen upp emot 6 miljoner ton om året. Kaffesumpen resulterar i slutändan i växthusgaser då en stor mängd av restavfallet eldas upp då endast en liten andel används till djurmat alternativt komposteras (Tokimoto et al., 2004).

För att kunna hantera avfallet har forskning gjorts för att kunna återvinna kaffesumpen till flera olika användningsområden. Materialet kaffesump är en restprodukt som uppstår när kaffe bryggs som ursprungligen kommer från kaffekörsbäret (Mussatto et al., 2011). Båret plockas från träd efter 5 år och skalas därefter för att komma åt de två kaffebönorna som befinner sig inuti båret. Bönorna torkas, rostas och mals (Arya & Rao, 2010). Detta görs i de varmare delarna av världen så som Afrika, Asien, syd- och central Amerika samt Oceanien (International Coffee Organization, 2021).

Materialet kaffesump släpper vid kompostering i från sig ämnena tannin, polyfenol och koffein som generar gift till naturen vid nedbrytningen vilket gör kaffesump till ett miljöfarligt avfall (Mussatto et al., 2011). På grund av restproduktens innehåll kräver nedbrytningen stora mängder syre (Silva et al., 1998).

Kemin som kaffe byggs upp utav är de nedanstående elementen från Figur 44 som tillsammans skapar strukturen i materialet (Zofka & Yut, 2012).



Figur 44. (a) koffein (b) lignin (c) klorogensyra visas i figuren och är de komponenter som kaffesumpen består utav kemiskt (Zofka & Yut, 2012). Återgiven från *Investigation of Rheology and Aging Properties of Asphalt Binder Modified with Waste Coffee Grounds*, Zofka, A. & Yut, I, *Alternative Binders for Sustainable Asphalt Pavements*, 67-78, Copyright (2012) med tillstånd från I. Yut.

3.10.2 Utvinning av kaffesump

Drycken kaffe kan framställas på många olika sätt beroende på kaffetyp men det är framför allt rostade samt malda kaffebönor som med hjälp av kokande vatten utvinns. Restprodukten som sedan uppstår utgör kaffesumpen som kan användas till biobindemedel (Mussatto et al., 2011). 650kg kaffesump framställs från varje producerat ton kaffebönor (Pfluger, 1975, refererad i Mussatto et al., 2011).

3.10.3 Förekomst av kaffesump

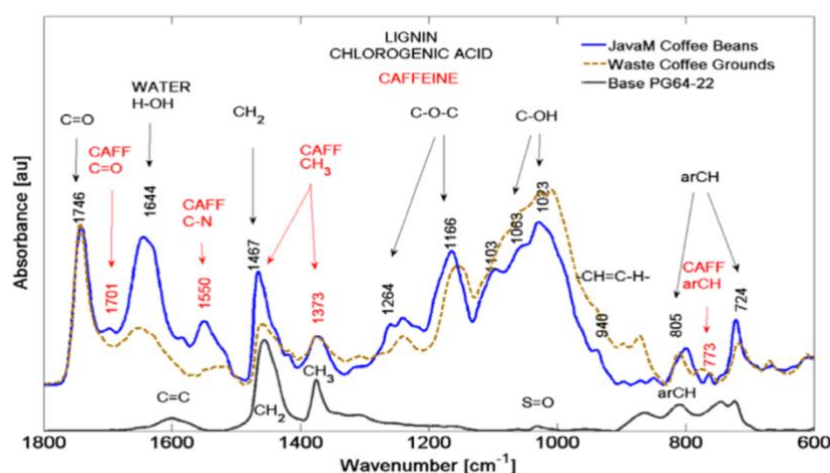
Kaffe konsumeras i hela världen och efterfrågan ökar, vilket resulterar i att restprodukten kaffesump finns som avfall överallt globalt sett (Saberian et al, 2021). Detta gör det möjligt att kunna tillämpa avfallet till biobindemedel på samtliga platser i världen sett utifrån ett tillgångsperspektiv.

3.10.4 Framställning av biobindemedlet

När kaffesump görs till olja som skall kunna användas till biobindemedel är det första som noteras hur mycket fukt som materialet innehåller. Nästa steg är därefter att torka kaffesumpen i en temperatur på 105°C i några timmar så att restprodukten fuktighet minskas. Lösningemedel tillsätts sedan för att kunna fastställa hur stort oljeinnehållet är i den torkade kaffesumpen, materialet torkas efter detta ytterligare en gång. För att få ett material utan lösningemedel så skiljs dessa åt genom att avdunstning sker vid rotation i en maskin som är inställd på temperaturen 55°C samtidigt som trycket sätts till 335 mbar (Jalkh et al., 2017).

3.10.5 Tekniska egenskaper

Zofka & Yut (2012) studerade egenskaperna hos petroleumbaserat bitumen PG 64-22 modifierat med 4- respektive 8vikt-% kaffesump, 2- respektive 4-vikt% kaffebönor samt ren petroleumbaserat bitumen. Den kemiska uppbyggnaden skiljer sig åt vilket kan ses i Figur 45 nedan. Detta kan påverka egenskaper som materialens olika viskositet.



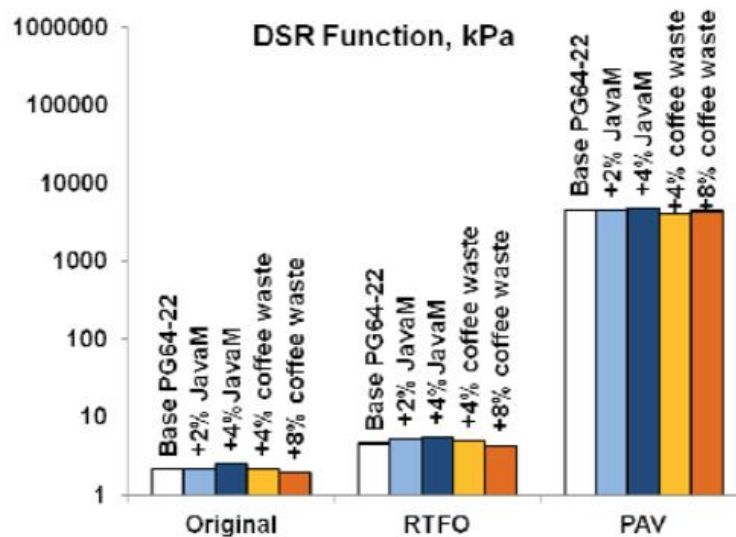
Figur 45. Skillnad i kemisk struktur för kaffebönor, kaffesump och petroleumbaserat bitumen som påverkar andra egenskaper (Zofka & Yut, 2012). Återgiven från *Investigation of Rheology and Aging Properties of Asphalt Binder Modified with Waste Coffee Grounds*, Zofka, A. & Yut, I, *Alternative Binders for Sustainable Asphalt Pavements*, 67-78, Copyright (2012) med tillstånd från I. Yut.

Penetrationstal & Mjukpunkt

Inga värden angående penetrationstal och mjukpunkt har hittats för kaffesump.

Viskositet

Materialens viskositet mättes samt jämfördes av Zofka & Yut (2012) vid materialens ursprungliga tillstånd, vid korttidsåldring (RTFO) samt vid långtidsåldring (PAV). Observationerna som dokumenteras i Figur 46 nedan uppvisar att materialens ursprungliga viskositet har kaffebönor en högre mängd medans kaffesump lägre, skillnaderna ökar med ökad procentsats kaffe jämfört med ren petroleum-baserat bitumen. När oxidationen och därmed materialet åldras snabbt sker ingen större förändring i den ursprungliga uppdelningen, dock ändras förhållandet vid ytterligare åldrande på lång sikt. Vid långtidsåldrandet är kaffesump det material med lägst viskositet, dock har samtliga material en mer jämn viskositet jämfört med tidigare (Zofka & Yut, 2012).



Figur 46. Diagram över skillnaden i viskositet för petroleum-baserat bitumen (Base PG 64-22), 2-4% inblandning av kaffebönor (JavaM) och 4-8% inblandning av kaffesump (Coffee waste) när de är jungfruliga material samt utsatts för korttidsåldring (RTFO) och långtidsåldring (PAV) (Zofka & Yut, 2012). Återgiven från *Investigation of Rheology and Aging Properties of Asphalt Binder Modified with Waste Coffee Grounds*, Zofka, A. & Yut, I, *Alternative Binders for Sustainable Asphalt Pavements*, 67-78, Copyright (2012) med tillstånd från I. Yut.

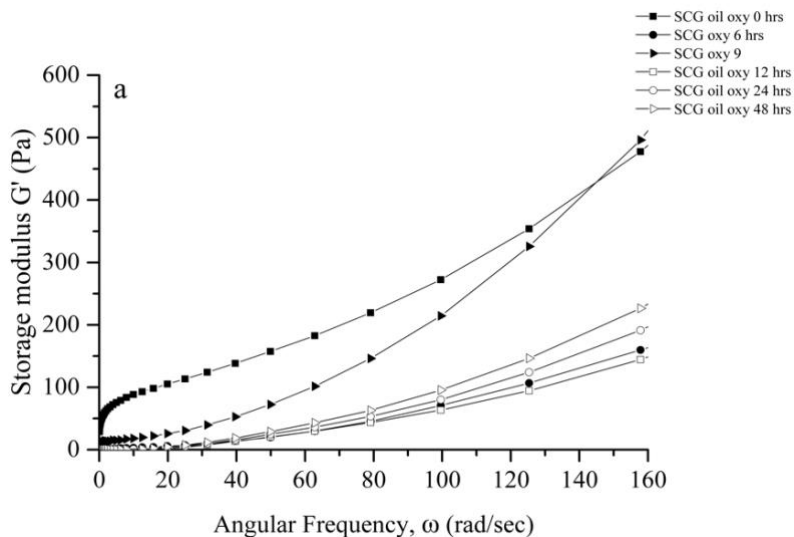
Viskositeten hänger dock ihop med oxidationstiden som båda ökar samtidigt, dock med en högre hastighet ju mer oxiderat kaffesumpen blir ses en markant skillnad i viskositetsökning vilket kan observeras i Tabell 12 nedan. Även temperaturen är en påverkande faktor som bidrar till en fortsatt ökning av viskositeten vid en temperaturminskning.

Tabell 12. Sammanställning av viskositet vid olika oxidationstider för biobitumen som modifierats med kaffesump uppdelat på temperaturerna 40°C och 100°C (Jalkh et al., 2017). Återgiven från Waste Biomass Valor, 2018(9), Jalkh, R., El-Rassy, H., Chehab, G. R. & Abiad, M. G., Assessment of Physico-Chemical Properties of Waste Cooking Oil and Spent Coffee Ground Oil for Potential Use as Asphalt Binder Rejuvenators, 2125-2132, Copyright (2017) med tillstånd från Springer Nature.

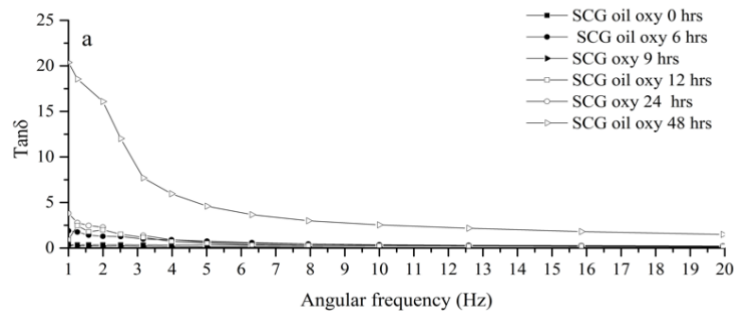
Oxidationstid (h)	Viskositet (Pa*s)	
	40°C	100°C
0	0,0449	0,0082
6	0,0717	0,0115
12	0,1199	0,0161
24	0,2039	0,0236
48	1,7144	0,1066

Komplex skjuvmodul- & fasvinkelsamband

Jalkh et al. (2017) kunde vid analys av tester se att kaffesumpens egenskaper påverkas dels av oxidationsgrad som bidrar till högre fasvinkel och den elastiska delen av den komplexa skjuvmodulen (Storage modulus, G') vilket kan ses i Figurerna 47 och 48 nedan. Även en ökning av frekvens påverkar kaffesumpens egenskaper genom ökning av elasticitet (Jalkh et al., 2017).

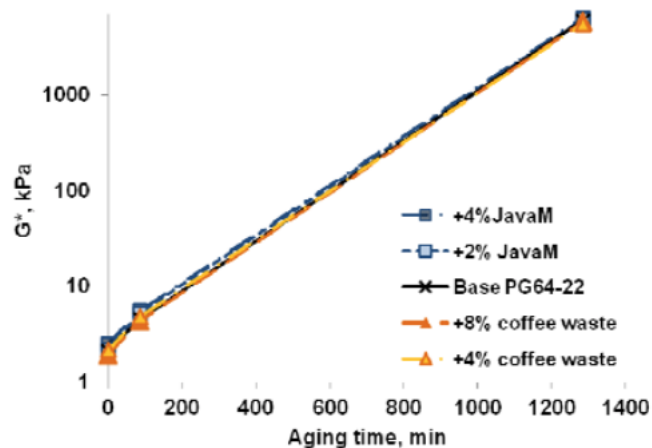


Figur 47. Diagram över variation av den elastiska delen av komplexa skjuvmodulen, G' och frekvens för kaffesump med olika oxidationsgrad (Jalkh et al., 2017). Återgiven från Waste Biomass Valor, 2018(9), Jalkh, R., El-Rassy, H., Chehab, G. R. & Abiad, M. G., Assessment of Physico-Chemical Properties of Waste Cooking Oil and Spent Coffee Ground Oil for Potential Use as Asphalt Binder Rejuvenators, 2125-2132, Copyright (2017) med tillstånd från Springer Nature.



Figur 48. Diagram över hur tangens av fasvinkeln varierar vid förändring av frekvensen för kaffesump med olika oxideringsgrad (Jalkh et al, 2017). Återgiven från Waste Biomass Valor, 2018(9), Jalkh, R., El-Rassy, H., Chehab, G. R. & Abiad, M. G., Assessment of Physico-Chemical Properties of Waste Cooking Oil and Spent Coffee Ground Oil for Potential Use as Asphalt Binder Rejuvenators, 2125-2132, Copyright (2017) med tillstånd från Springer Nature.

Den komplexa skjuvmodulen påverkas i liten utsträckning om jämförelse med de olika kaffeinblandningarna genomförs med petroleumbaserat bitumen vid åldring vilket syns i Figur 49 nedan (Zofka & Yut, 2012).



Figur 49. Diagram över hur den Komplexa skjuvmodulen, G^* förändras när materialen 2- respektive 4% kaffebönsinblandning (JavaM), petroleumbaserat bitumen (Base PG 64-22) och 4- respektive 8% kaffesumpsinblandning (coffee waste) utsätts för åldring för (Zofka & Yut, 2012). Återgiven från Investigation of Rheology and Aging Properties of Asphalt Binder Modified with Waste Coffee Grounds, Zofka, A. & Yut, I, Alternative Binders for Sustainable Asphalt Pavements, 67-78, Copyright (2012) med tillstånd från I. Yut.

Varma temperaturer

Genom att mjuka upp bitumen minskar även spårbildningsfaktorn $G^*/\sin \delta$ med ökad inblandning kaffesump vilket ökar känsligheten för deformation (Jalkh, 2016).

Kalla temperaturer

Inga värden för kalla temperaturer har hittats för kaffesump.

Åldrande

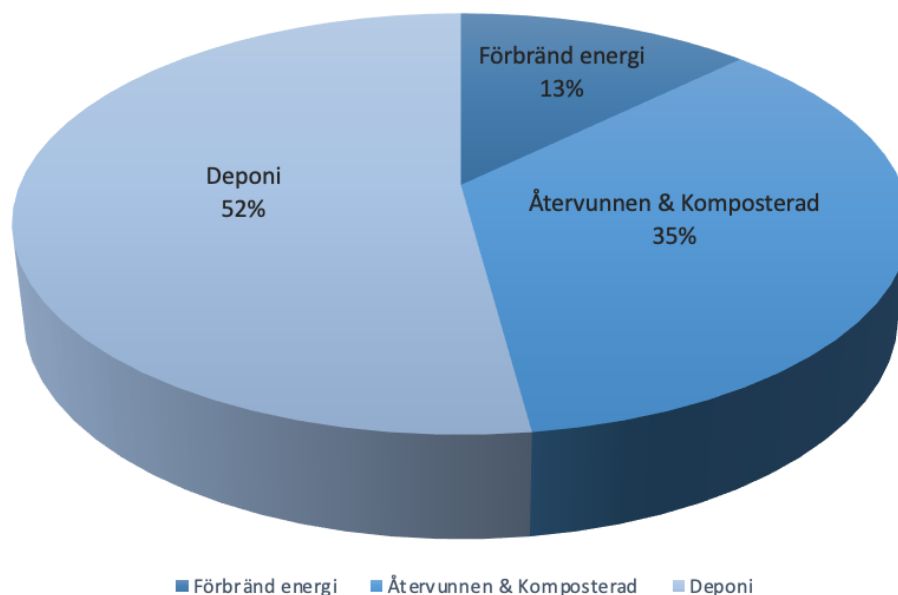
Jalkh (2016) använde sig av olika typer av petroleumbaserat bitumen, både jungfruligt samt åldrat, tillsammans med olika procentsatser av kaffesump för att undersöka egenskaperna hos de olika materialblandningarna. Procentandelarna påverkar asfaltens styvhet på så sätt att materialets styvhet minskar då en högre andel kaffesump och därmed olja adderas. Detta kan dock öka när asfalten utsätts för oxidation som då ger bindemedlet en styvare konsistens. En minskning av styvhet visar sig ha positiva effekter på motståndskraften mot sprickor som uppstår när asfalten utsätts för utmattande påverkningar, dock så kan detta påverka deformationerna som uppstår vid belastning då de blir permanenta i en högre utsträckning (Jalkh, 2016).

Kaffesumpen hindrar inte oxidationen i bindemedlet, men minskar viskositeten vilket motverkar att bindemedlet blir hårdare (Zofka & Yut, 2012).

3.10.6 Miljö och klimat

Deponi kan skapa problem med gifter för olika typer av organismer och är den sista utvägen för material som inte går att använda (Schmidt Rivera et al., 2020).

Saberion et al. (2021) undersökte vad som händer med olika typer av material när de är förbrukade, vilket visas i Figur 50 nedan. Mängden som läggs på deponi i världen kan ses i figuren är 52,1% vilket kan minskas om material så som kaffesump kan återanvändas och skapa värde utifrån en längre livscykel (Saberion et al., 2021).



Figur 50. Diagram över uppdelningen av avfallsmaterial (Saberion et al., 2021). Återgiven från *Journal of Cleaner Production*, 279(2021), Saberian, M., Li, J., Donnoli, A., Bonderenko, E., Oliva, P., Gill, B., Lockrey, S. & Siddique, R., *Recycling of spent coffee grounds in construction materials: A review*, Copyright (2021) med tillstånd från Elsevier.

3.10.7 Praktiska aspekter

Då kaffe konsumeras runt om i världen och är en restprodukt som i dagsläget endast slängs finns produkten i stora mängder globalt till lågt pris (Zofka & Yut, 2012). Kaffesumpen innehåller dock skadliga ämnen där en hög andel i dagsläget hamnar på deponi, vilket inte är bra varken sett utifrån en miljöaspekt men inte heller sett utifrån en ekonomisk synvinkel (McNutt & He, 2018).

Stor variation i utvinningen och framställningen har en betydande roll för materialets strukturella uppbyggnad kemiskt vilket måste anpassas efter önskade egenskaper (Jalkh et al., 2017).

3.10.8 Forskningsframsteg

En begränsad mängd forskning med en mindre andel kaffesump finns i dagsläget och inriktar sig främst på egenskaper för återvunnen asfalt, det vill säga som förnygringsmedel (Jalkh et al., 2017).

Forskning utifrån ett livscykelperspektiv krävs för att få en klarare bild av materialets påverkan på större områden som ekonomi och miljö skall kunna utvärderas (Mussatto et al., 2011).

3.11 Ek

3.11.1 Beskrivning av ek

Ek är ett hårt och starkt träslag som används till bland annat möbler och golv. Eken kan bli flera hundra år gammal (Nationalencyklopedin, u.å.a).

Biomassa från trä består av cellulosa, hemicellulosa, lignin, organiska extrakt och icke-organiska mineral (Mohan et al., 2006). I Tabell 13 nedan visas de olika beståndsdelarna i viktsprocent hos ek.

Tabell 13. Ekträets sammansättning i viktprocent (Mohan et al., 2006). Återgiven från *Energy Fuels*, 20(3), Mohan, D., Pittman Jr, C.U. & Steele, P.H, *Pyrolysis of Wood/Biomass for Bio-oil: A Critical Review*, 848-889. Copyright (2006) med tillstånd från American Chemical Society.

	Vikt-%
Cellulosa	40
Hemicellulosa	26
Lignin	16

Även de kemiska beståndsdelarna, i andel kol, väte och syre visas i Tabell 14 nedan.

Tabell 14. Kemisk sammansättning i viktprocent i ek (Mohan et al., 2006). Återgiven från *Energy Fuels*, 20(3), Mohan, D., Pittman Jr, C.U. & Steele, P.H, *Pyrolysis of Wood/Biomass for Bio-oil: A Critical Review*, 848-889. Copyright (2006) med tillstånd från American Chemical Society.

	Vikt-%
Kol	60,50
Väte	6,50
Syre	34,60

3.11.2 Utvinning av ek

Bränslen baserade på biomassa som exempelvis skogsrester blir mer och mer aktuellt, och i omvandlingen från biomassa till bränsle skapas biprodukter. En del av dessa biprodukter har i nuläget inget användningsområde, vilket ger möjligheter till att använda dessa på olika sätt. Till exempel hade de kunnat användas som bitumenersättare, ifall de visar på en teknisk potential (Raouf & Williams, 2010).

Standardprocessen vid träbaserad bränsleproduktion är att rester från skogsavverkningen körs till ett avlastningsställe där de i några månader får torka. Sedan görs träet till flisor innan det kan användas till bränsle (Flisberg et al., 2012).

3.11.3 Förekomst av ek

Ek växer i Europa, Nordafrika och i sydvästra Asien (Nationalencyklopedin, u.å.a).

Enligt Sekab (u.å.) ger dessutom EU:s skogsindustri årligen upphov till 145 Mton restprodukter, vilket är tillräckligt för att förse hundratals bioraffinaderier med råvaror.

3.11.4 Framställning av biobindemedlet

Raouf & Williams (2010) använde sig av snabb pyrolys för att omvandla ek till bioolja.

Snabb pyrolys sker genom att biomassan snabbt värms upp till höga temperaturer i vakuum, vilket skapar ånga, aerosoler och förkolnade rester. Efter nedkylning och därmed kondensation bildar ångorna och aerosolerna en mörkbrun vätska, det vill säga en bioolja. Trä ger 72–80 viktprocent bioolja (Mohan et al., 2006).

Mohamed Metwally & Williams (2010) kom dock fram till att obehandlad bioolja från ek har för låg viskositet på grund av för mycket vatteninnehåll och flyktiga ämnen, och behöver därmed ytterligare behandlas genom uppvärmning för att kunna användas som vägmaterial.

Ek har i nuläget främst undersökts som fullständig ersättare och har därför inte blandats samman med petroleumbaserat bitumen, vilket återspeglas i de tekniska egenskaperna nedan.

3.11.5 Tekniska egenskaper

Penetrationstal & Mjukpunkt

Inga värden angående penetrationstal och mjukpunkt har hittats för ek.

Viskositet

Raouf & Williams (2010) kom fram till att biobindemedel från ek har ett liknande reologiskt beteende som petroleumbaserat bitumen, då dess viskositet minskar med ökad temperatur. Biooljan var dock mer känslig för temperatur än petroleumbaserat bitumen var.

Biooljan och petroleumbaserat bitumen har däremot olika temperaturintervall för det viskösa beteendet, vilket visas i Tabell 15. Detta innebär att petroleumbaserat bitumen och biobindemedlet blir flytande vid olika temperaturer, och att dess lägsta tillåtna viskositet är vid olika temperaturer.

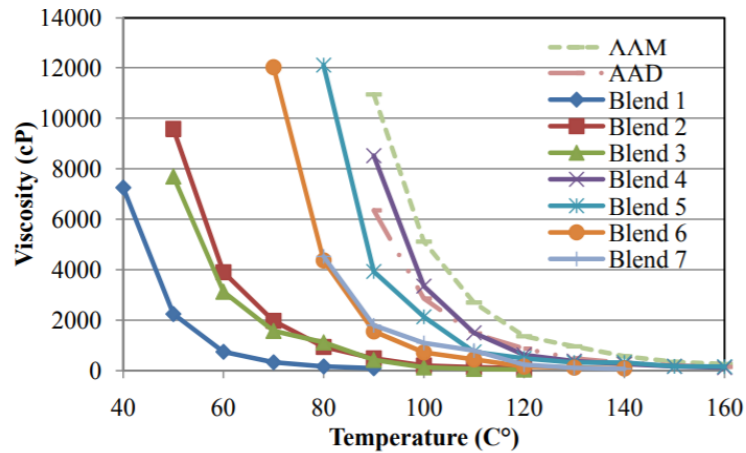
Tabell 15. Sammanställning av temperaturintervall för det viskösa beteendet för två olika petroleumbaserade bitumen samt ekbaserad biobitumen (Mohamed Metwally & Williams, 2010).

Återgiven från Williams, R. C & Mohamed Metwally, M.A.R., Development of Non-Petroleum Based Binders for Use in Flexible Pavements. Copyright (2010) med tillstånd från R. C Williams.

Bindemedel	Temperaturintervall (°C)
Petroleumbaserat bitumen (AAM)	90 - 160
Petroleumbaserat bitumen (AAD)	90 - 160
Ekbaserad biobitumen (Blandning 1)	40 - 90

Mohamed Metwally & Williams (2010) menar därför även på att packning och blandning kräver lägre temperaturer med biobindemedlet. Dock blir det problem med deformationer om bindemedlet blir för mjukt vid för låga temperaturer.

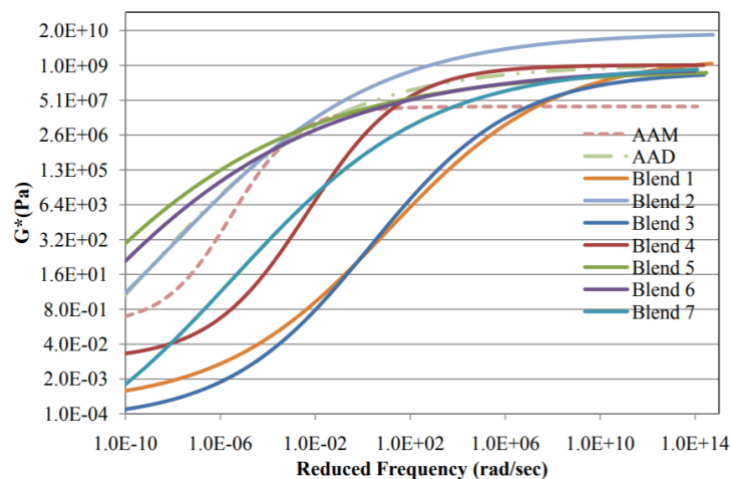
Diagrammet i Figur 51 nedan visar viskositet för både omodifierat ekbaserat bindemedel samt modifierade med olika polymerer. Blandning 1 är den omodifierade. Petroleumbaserat bitumen jämförs även i diagrammet. Det syns här att blandning 1 (100% ekbaserad biobitumen) har liknande beteende som petroleumbaserat bitumen men som tidigare nämnts ligger i ett lägre temperaturintervall. Det syns även att polymermodifikation kan höja temperaturintervallet till att bli mer likt petroleumbitumen, men detta undersöks inte vidare på grund av arbetets avgränsning.



Figur 51. Diagram över viskositeten för omodifierat ekbaserat biobitumen (blandning 1) samt petroleumbaserat bitumen (AAD och AAM). Blandning 2–7 är polymermodifierade ekbaserade biobitumen (Mohamed Metwally & Williams, 2010). Återgiven från Williams, R. C & Mohamed Metwally, M.A.R., *Development of Non-Petroleum Based Binders for Use in Flexible Pavements*. Copyright (2010) med tillstånd från R. C Williams.

Komplex skjuvmodul- & fasvinkelsamband

Den komplexa skjuvmodulen av den omodifierade biobindemedlet var lägre än petroleumbaserat bitumens vid höga och medelhöga temperaturer (låga frekvenser). Vid låga temperaturer var skjuvmodulen för biobindemedlet dock högre än för petroleumbaserat bitumen, vilket syns i Figur 52.



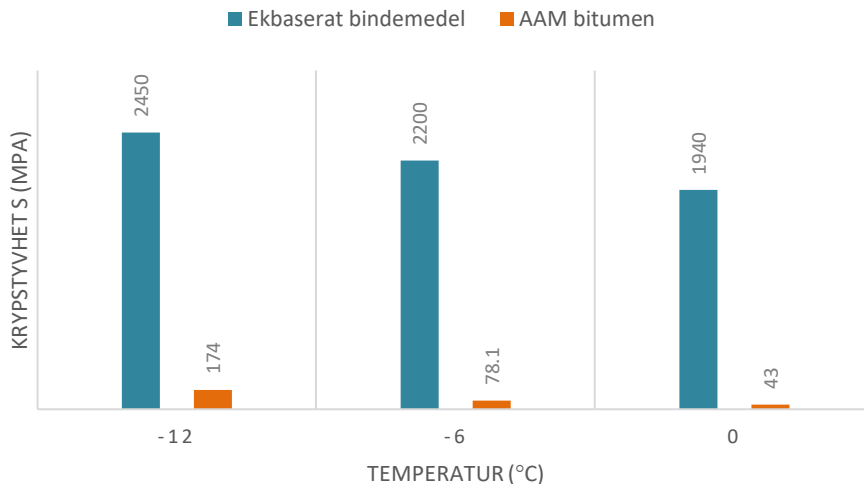
Figur 52. Masterkurva för ekbaserat biobitumen (blandning 1) samt petroleumbaserat bitumen (AAD och AAM). Blandning 2–7 är polymermodifierade ekbaserade biobitumen (Mohamed Metwally & Williams, 2010) Återgiven från Williams, R. C & Mohamed Metwally, M.A.R., *Development of Non-Petroleum Based Binders for Use in Flexible Pavements*. Copyright (2010) med tillstånd från R. C Williams.

Varma temperaturer

Inga värden för varma temperaturer har hittats för ek.

Kalla temperaturer

Efter PAV-åldring var kryptyvheten mycket hög för biobindemedlet jämfört med petroleumbaserat bitumen, se Figur 53 nedan. Detta innebär att biobindemedlet har lägre motstånd mot sprickning. Det kan enligt Mohamed Metwally & Williams (2010) ha att göra med den höga syrehaltens styvande förmåga. Därmed är bindemedlet inte optimalt att använda i kalla klimat.



Figur 53. Diagram över hur kryptyvheten förändras vid kalla temperaturer för petroleumbaserat bitumen samt för ekbaserat bindemedel (Mohamed Metwally & Williams, 2010). Återgiven från Williams, R. C & Mohamed Metwally, M.A.R., *Development of Non-Petroleum Based Binders for Use in Flexible Pavements*. Copyright (2010) med tillstånd från R. C Williams.

Åldrande

Det framkom att biooljan oxiderade i snabbare takt än petroleumbaserat bitumen, vilket enligt Mohamed Metwally & Williams (2010) har att göra med att biooljan innehåller större mängd syre.

3.11.6 Miljö och klimat

Biobränsle från skogsindustrin behövs för att kunna minska beroendet av fossila bränslen, och att då kunna använda resterna av biobränsleproduktionen till biobitumen skapar ännu högre lönsamhet för produktionen (Raouf & Williams, 2010).

För att skapa en cirkulär ekonomi bör enligt Världsnaturfonden (2016) så mycket som möjligt av träet i första hand återanvändas och därefter återvinnas för att till sist brännas till energi. De menar på att innovation krävs för att kunna hitta fler användningsområden från färre resurser för att kunna minska pressen på skogen, vilket visar på stora möjligheter till att göra biobitumen av biprodukter.

3.11.7 Praktiska aspekter

Preem (2017) satsar på att bygga Sveriges första pyrolysanläggning för att kunna skapa olja av trärester som grenar, toppar och sågspån. De menar på att detta är fördelaktigt för många. Exempelvis får både skogsägarna och sågverken inkomst för sina restprodukter genom detta.

3.11.8 Forskningsframsteg

Mohamed Metwally & Williams (2010) undersökte, vilket syntes i kapitlet om tekniska egenskaper, ekbaserat bindemedel som potentiell 100-procentig ersättare av petroleumbaserat bitumen. De tog även patent på sin process att göra biomassa till bioolja där de inte endast undersökt ek, utan även majsblast och rödhirs med samma process.

Bioolja baserad på ek har dessutom testats i fält, med 5 % inblandning. Den har då använts i en cykelled i Des Moines, Iowa (Iowa State University, 2010).

Peralta et al. (2014) har undersökt rödek tillsammans med gummi från gamla bildäck, vilket inblandat 20% i asfaltmixar visade goda egenskaper i alla utförda tester som exempelvis vattenkänslighet, utmattningssprickor, komplex skjuvmodul och sprickmotstånd vid låga temperaturer. Nästa steg i denna process är att de uppvisade goda egenskaperna ska bekräftas i en fältundersökning, för att kunna visa på att det går att öka halten biobindemedel i asfalten.

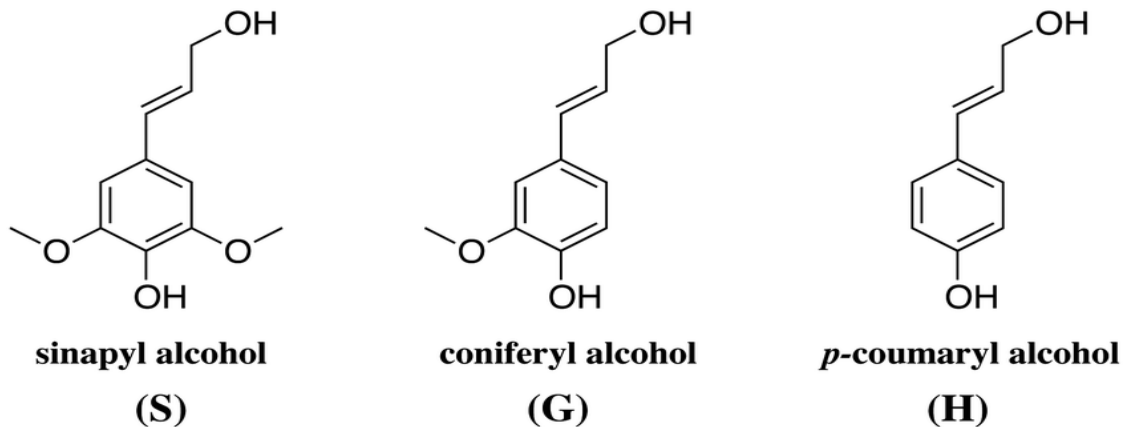
3.12 Lignin

3.12.1 Beskrivning av lignin

Lignin är en polymer som finns i naturen (Gellerstedt, 2015). Ligninets uppgift är att motverka trädets nedbrytning både kemiskt och biologiskt, vilket ämnet gör inne i cellväggarna genom sin komplexa polymerstruktur som kallas polyfenolstruktur. Ämnet finns som polymer i de flesta kärlväxter och dessa förhindrar nedbrytningen genom att ämnet inte är vattenlösligt vilket gör det svårt för organismer och kemikalier att bryta ner lignin (Gosselink, 2011).

Ligninet som finns i cellväggarna kan därför förflytta vatten och andra viktiga ämnen som växter behöver i deras system genom de vattentäta cellväggarna. Polymeren stärker även växtmaterialet i stammen samt roten för att kunna klara av den bärighet som krävs för dess överlevnad (Ralph et al., 2007).

Den struktur som lignin uppvisar påminner mycket om petroleumbaserat bitumen sett utifrån kemiska uppbyggnader och det är därför ämnet har stor potential att kunna verka som ett substitut (van Vliet et al., 2016). Lignin kan dock se olika ut beroende på vilken typ av växt det är, i Figur 54 nedan visas de tre vanligaste uppbyggnaderna som används i olika konstellationer beroende på växtart (Upton & Kasko, 2015).



Figur 54. De vanligaste kemiska beståndsdelar som lignin består utav (Strassberger et al., 2014). *Licens: CC-BY 3.0: <https://creativecommons.org/licenses/by/3.0/>*

Trä består av många beståndsdelar men framför allt så är det cellulosa, hemicellulosa samt ämnet lignin som är huvudinnehållet. Av trädets totala biomassa så består 15–30% av komponenten lignin (Upton & Kasko, 2015). Detta tyder på att stora mängder lignin finns att ta tillvara på. De två första huvudkomponenterna, cellulosa och hemicellulosa används till exempel till bränslet etanol medan lignin har en mer komplicerad struktur som är mer svårhanterlig (Strassberger, 2014). Detta resulterar i att lignin främst eldas upp för att generera värme alternativt bränsle till massaindustrierna (Li et al., 2015).

För att få tillgång till ligninet så att det kan användas, till exempel till biobitumen, så används kemiska metoder. Detta krävs på grund av att ämnet inte är vattenlösligt, för att ämnet skall lösas upp och bli tillgängligt (Gosselink, 2011).

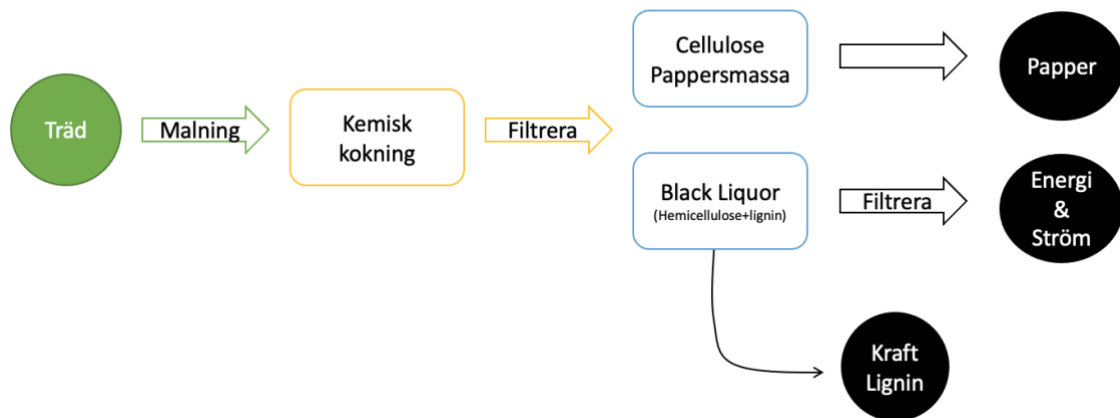
Enligt van Vliet et al. (2016) är det pappersindustrin som står för den största delen av komponenten lignin. Inom papperstillverkningen önskas nämligen inte lignin i papper då detta minskar kvalitén. Därför lägger dessa företag stor kapacitet på att bli av med detta i en så stor utsträckning som möjligt (van Vliet et al., 2016). På så sätt finns det en stor tillgång på lignin som bör tas tillvara på.

3.12.2 Utvinning av lignin

Det finns fyra olika tillvägagångssätt för att utvinna lignin från trä så att bindemedel eller andra användningsområden kan få tillgång till polymeren. Processerna som gör det och samtidigt bevarar ligninet kvalitét med olika steg är Kraft, Sulfit, Organosolv och Soda (Strassberger et al., 2014), varav den förstnämnda är den vanligaste metoden när lignin skall utvinnas från pappersmassatillverkning (Gosselink, 2011; Luo & Abu-Omar, 2017; van Vliet et al., 2016).

En primär skillnad är att de två första utvinningssätten, kraft och sulfit är processer som sker genom inbländning av svavel (Luo & Abu-Omar, 2017) medan detta inte är fallet för Organosolv som i stället använder sig av till exempel etanol (Gosselink, 2011) och Soda som i stället använder sig utav natriumhydroxid (Upton & Kasko, 2015). Beroende på vilken process som används när ligninet bryts ner kan faktorer så som molekylvikt och sammansättning förändras och det är det som gör att just bearbetning med hjälp av Kraft är den dominerande processen för pappersmassaindustrin (Upton & Kasko, 2015).

Kraft går till så att trämaterialiet görs till träflis som sedan utsätts för temperatur- och tryckförändringar i en basisk miljö. Tillsättning av sulfit i dessa förhållanden bidrar till att lignin (samt hemicellulosa) löses upp (van Vliet et al., 2016). Denna lösning har en svart karaktär som främst används till att framställa energi. Den svarta lösningen från processen kraft produceras i Europa 55 miljoner ton per år (Besamusca, 2020). Se materialets flödesschema i Figur 55.



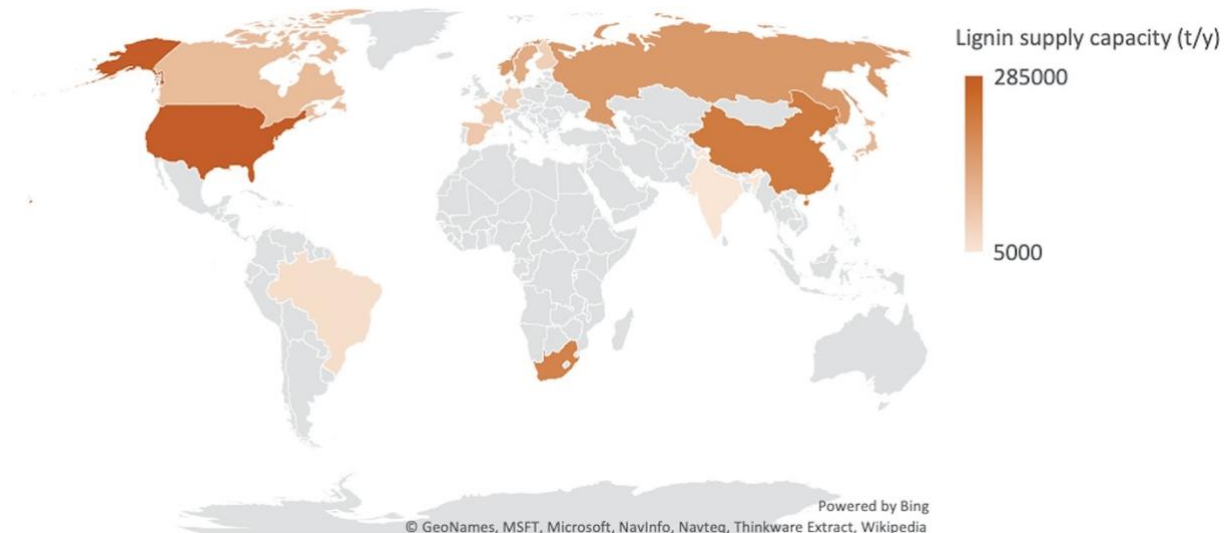
Figur 55. Flödesschema över utvinningen från trä till lignin samt andra användningsområden (Pacific Northwest National Laboratory, 2007).

Kraftprocessen är som sagts tidigare det mest använda tillvägagångssättet för att få tillgång till lignin, över 98% av allt lignin i världen framställs på detta sätt, vilket i siffror är över en miljon ton. Dock så har denna metod begränsningar då svavlet minskar användningsområdet och resulterar i att ligninet som utvinns främst används till energi (van Vliet et al., 2016).

Processerna organosolv och soda gör att ligninet som utvinns är renare och enklare att använda då dess struktur inte förändras (Kai et al., 2016).

3.12.3 Förekomst av lignin

Då lignin finns i växtmaterial menar Gosselink (2011) att ämnet finns i en stor utsträckning runt om i världen. Det som dock är viktigt för ämnet och dess återvinning är att jorden är bördig för att träd skall kunna växa och lignin med en god kvalitet skall kunna utvinnas. Som Dessbesell et al. (2020) visar i Figur 56 nedan är USA det land som har möjlighet att producera lignin med högst kapacitet som sedan följs av Kina, Sydafrika samt Norge. Dessa länder har en stor mängd trä med bra kvalitet.



Figur 56. Den globala kapaciteten av ligninproduktion (Dessbesell et al., 2020). Återgiven från *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 123(2020), Dessbesell, L., Paleologou, M., Leitch, M., Pulkki, R. & Xu, C., *Global lignin supply overview and kraft lignin potential as an alternative for petroleum-based polymers*, Copyright (2020) med tillstånd från Elsevier.

3.12.4 Framställning av biobindemedlet

För att det utvunna ligninet skall kunna användas som bindemedel i asfalt behövs ytterligare omvandlingar av materialet. Materialets struktur och uppbyggnad beror till stor del på vilken metod som används vid utvinningen av lignin och detta spelar även roll i nästkommande steg. Även vilken träsort som ligninet utvinns ifrån påverkar då dess sammansättning kan variera både i mängd och kvalitet (He et al., 2019).

Den svarta lösningen från kraftprocessen kan sedan i bioraffinaderier separera och utvinna endast ligninet genom att pH-värdet sänks med hjälp av tillsatser som koldioxid eller svavelsyra. Detta resulterar i att endast ämnet lignin finns kvar från träet och den svarta lösningen, resterande ämnen faller ut. Materialets process går sedan vidare ytterligare genom filtrering samt att det tvättas rent för att kunna hålla en kvalitet som går att återvinna och som inte innehåller för stora mängder sulfid (Arafat et al., 2019; Pacific Northwest National Laboratory, 2007).

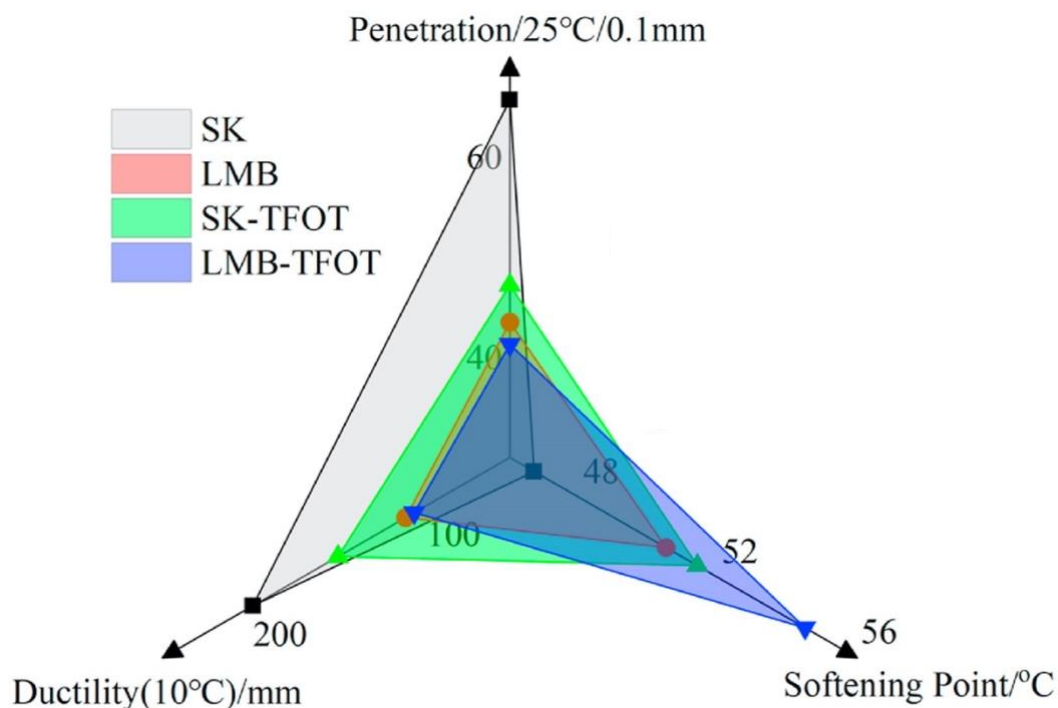
3.12.5 Tekniska egenskaper

För att kunna ersätta petroleumbaserat bitumen med biobindemedlet lignin krävs det att lignin kan leva upp till de krav som petroleumbaserat bitumen uppnår då det skall kunna hålla en lika hög standard.

Även fast att de båda materialen har liknande strukturer kan valet av vilken sorts lignin och petroleumbaserat bitumen som används ha stor betydelse på materialets egenskaper (Asukar et al., 2016). De egenskaper som framför allt gör lignin till en god kandidat är dess beteende vid höga temperaturer där polymeren visar sig vara motståndskraftig. Materialet har även en vidhäftande förmåga vilket krävs för bindemedel (Besamusca et al., 2020).

Penetrationstal & Mjukpunkt

Då Wu et al., (2020) forskade på lignins möjligheter som extender och konstaterade att penetrationstalet minskade med tillsats av 20% lignin (LMB) jämfört med ren petroleumbaserat bitumen (SK). De visade även att mjukpunkten ökade för ligninbaserad bitumen jämfört med petroleumbaserat bitumen, se Figur 57 och Tabell 16. Om lignin tillsätts i petroleumbaserat bitumen minskar värdet för penetrationstalet medan mjukpunkten ökar. Wu et al. (2020) poängterar att bitumens styvhetsgenskaper förbättras om andelen som byts ut hålls under 50 volymprocent. Duktilitet som visas i en av staplarna i figuren nedan är ett mått som utvärderar den plastiska deformationen som kan genereras hos lignin (Benham et al., 1996).



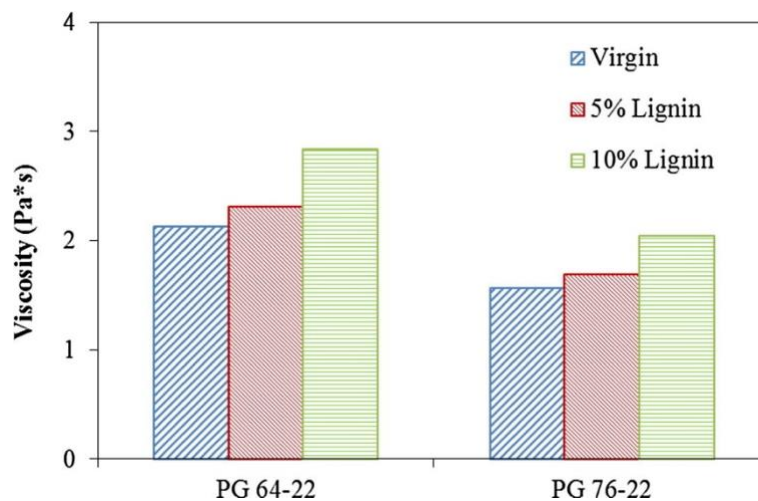
Figur 57. Diagram över penetrationstal, mjukpunkt och duktilitet för 20% ligninmodifierat bindemedel, LMB, jämfört med petroleumbaserat bitumen, SK. Dessa har jämförts både som jungfruliga material samt när de korttidsåldrats (TFOT) (Wu et al., 2020). Återgiven från *Journal of Cleaner Production*, 283(2021), Wu, J., Liu, Q., Wang, C., Wu, W. & Han, W., *Investigation of lignin as an alternative extender of bitumen for asphalt pavements*, Copyright (2020) med tillstånd från Elsevier.

Tabell 16. Sammanställning av penetrationstal och mjukpunkt för 20% ligninmodifierat bindemedel, LMB, jämfört med petroleumbaserat bitumen, SK. Dessa har jämförts både som jungfruliga material samt när de korttidsåldrats (TFOT)) (Wu et al., 2020). Återgiven från *Journal of Cleaner Production*, 283(2021), Wu, J., Liu, Q., Wang, C., Wu, W. & Han, W., *Investigation of lignin as an alternative extender of bitumen for asphalt pavements*, Copyright (2020) med tillstånd från Elsevier.

Bindemedel	SK	LMB	SK-TFOT	LMB-TFOT
Penetrationstal vid 25°C (0,1mm)	65,7	43,5	47,2	41,3
Mjukpunkt (°C)	46,7	50,5	51,4	54,5

Viskositet

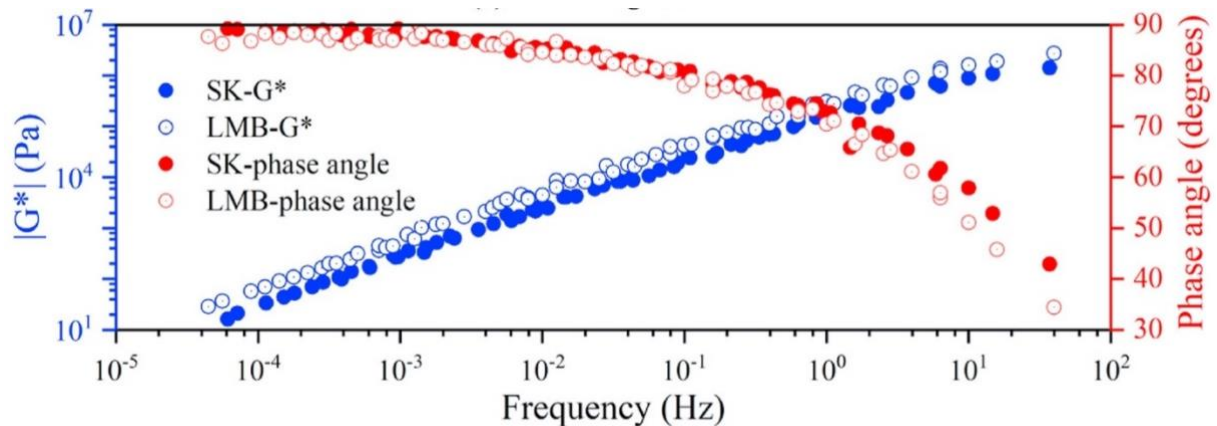
Även Xu et al. (2017) har jämfört två olika bindemedel med andelarna 0%, 5% och 10% lignininblandning. Detta undersöktes genom att kontrollera viskositeten för respektive bindemedel och ligninhalt, detta visade att viskositeten ökar ju mer lignin som tillsattes vid temperaturen 135°C, se Figur 58 nedan.



Figur 58. Diagram över viskositeten för två olika petroleumbaserade bitumen (PG 64-22 och PG 76-22) vid 0-10% inblandning av lignin (Xu et al., 2017). Återgiven från *Construction and Building Materials*, 151(2017), Xu, G., Wang, H. & Zhu, H., *Rheology properties and anti-aging performance of asphalt binder modified with wood lignin*, Copyright (2017) med tillstånd från Elsevier.

Komplex skjuvmodul- & fasvinkelsamband

När den komplexa skjuvmodulen och fasvinkeln kontrollerades av Wu et al. (2020) för bitumen och blandad petroleumbaserat bitumen med lignin kunde detta plottas till masterkurvan i Figur 59 nedan. I dessa kan man urskilja att bitumen för samtliga undersökta temperaturer och frekvenser har en lägre komplex skjuvmodul. Fasvinkeln för de båda materialen följer varandras kurvor till stor del dock så skiljer det sig lite vid de högsta frekvenserna där bitumen har något högre värden på fasvinkeln.

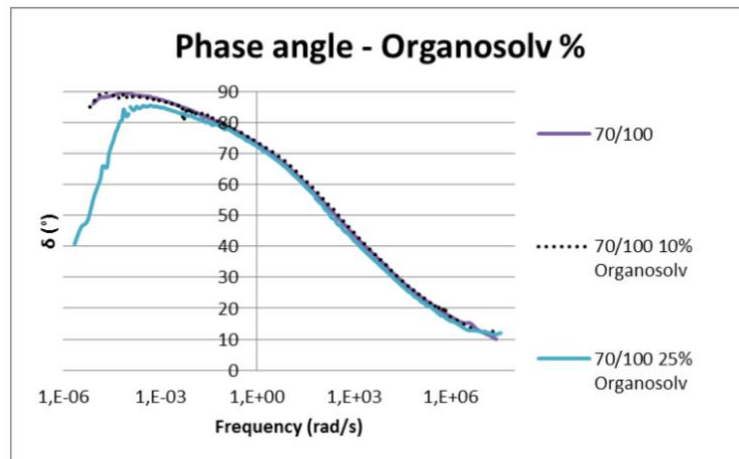


Figur 59. Masterkurva för 20% ligninmodifierat bindemedel, LMB, jämfört med petroleumbaserat bitumen, SK. Dessa har jämförts både som jungfruliga material samt när de korttidsåldrats (TFOT) (Wu et al., 2020). Återgiven från Journal of Cleaner Production, 283(2021), Wu, J., Liu, Q., Wang, C., Wu, W. & Han, W., Investigation of lignin as an alternative extender of bitumen for asphalt pavements, Copyright (2020) med tillstånd från Elsevier.

Asukar et al. (2016) gjorde även observationer på den komplexa skjuvmodulen, G^* och fasvinkel som visade på att andelen lignin inte bör överstiga 7%, då detta kan resultera i att materialet blir för styvt.

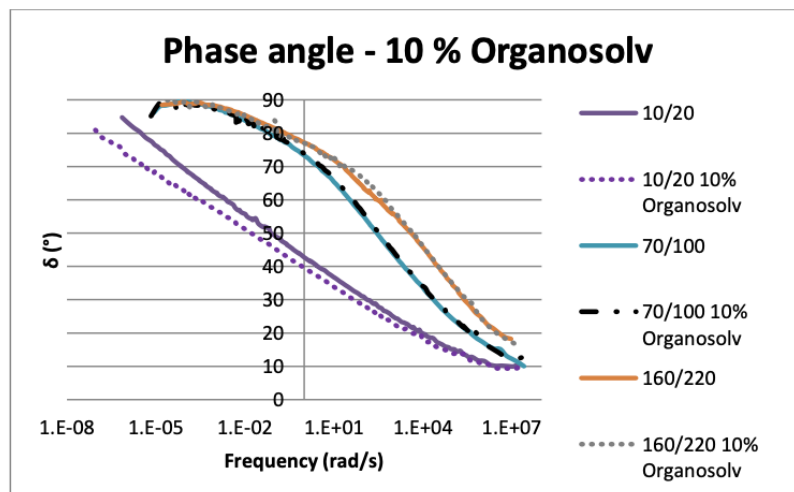
Zhang et al. (2020) har forskat på 10% ligninbaserad bitumen som en modifierare och använt sig av lignin som framställts genom processen organosolv. De har laborerat med åldrande material för att kontrollera hur egenskaperna varierar när detta sker. När den komplexa skjuvmodulen, G^* och fasvinkeln jämfördes observerades att materialen oberoende av när de åldras har liknande beteenden och därmed påverkas inte dessa egenskaper av de olika typerna av blandningar och varierande åldringstillfällen.

Van Vliet et al. (2016) utforskade lignins egenskaper vid inblandning av lignin upp till 25 viktprocent vid olika framtagningprocesser. När de använde sig av processen organosolv för att få fram lignin noterades det att blandningen av de två ämnena lignin samt bitumen blev svår när procentsatsen närmade sig 25 vikt-% då materialet lätt koagulerade. Andra komplikationer vid denna höga andel lignin för van Vliet et al. (2016) visade sig vara materialets konsistens som blev mycket styvt samt fasvinkeln som minskade drastiskt, se Figur 60. Detta jämfört med 10% inblandning som gav godkända värden.



Figur 60. Diagram över hur fasvinkeln förändras för 0, 10 och 25% lignininblandning i petroleumbaserat bitumen 70/100 vid framställning från organosolv (van Vliet et al, 2016). Återgiven från *Lignin as a green alternative for bitumen*, Van Vliet, D., Slaghek., Geizen, C. & Haaksman, I., 6th Euroasphalt & Eurobitume Congress, Copyright (2016) med tillstånd från D.Van Vliet.

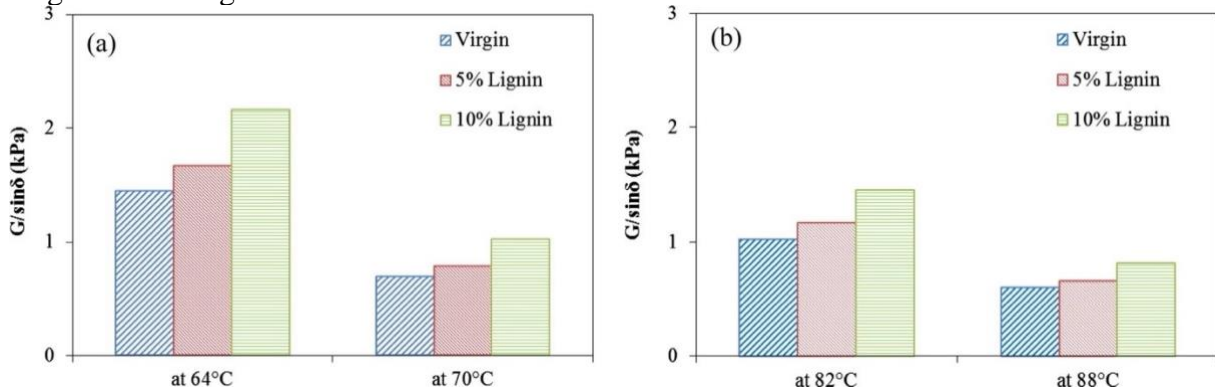
Då van Vliet et al. (2016) jämförde olika sorters bitumen med varierande viktprocent av lignin har ytterligare upptäckter gjorts. För bitumen med högt penetrationstal syns inga tydliga skillnader i egenskaper när lägre andelar lignin blandas samman med bitumen. När styvare bitumen testas noterades det att de ovanstående komplikationerna uppstod redan vid lägre ligninandelar som vid 10%, se Figur 61. Detta resulterar i att vilken typ av bitumen som används har en betydande roll för hur stor andel lignin som kan tillsättas.



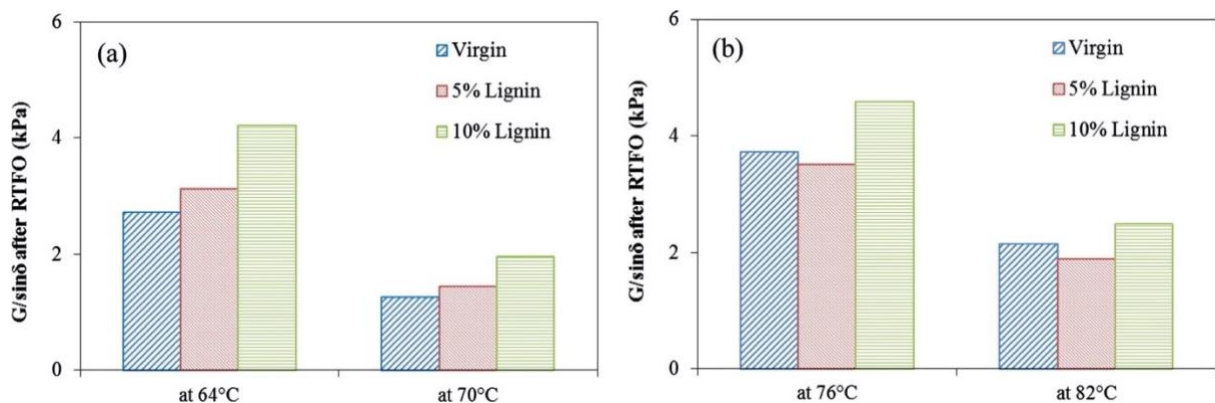
Figur 61. Diagram över hur fasvinkeln förändras vid 0% och 10% lignininblandning för olika sorters petroleumbaserade bitumen (van Vliet et al., 2016). Återgiven från *Lignin as a green alternative for bitumen*, Van Vliet, D., Slaghek., Geizen, C. & Haaksman, I., 6th Euroasphalt & Eurobitume Congress, Copyright (2016) med tillstånd från D.Van Vliet..

Varma temperaturer

Xu et al. (2017) inspekterade materialens motstånd mot spårbildning vid olika höga temperaturer. En ökning av mängden lignin visades vara fördelaktig för att motverka spårbildning, dock kan vilken variant av bitumen som används spela in, vilket syns i diagrammen i Figur 62 och 63 nedan.



Figur 62. Diagram över spårbildningsfaktorn vid höga temperaturer för (a) PG 64-22 och (b) PG 76-22 vid 0-10% inblandning av lignin (Xu et al., 2017). Återgiven från *Construction and Building Materials*, 151(2017), Xu, G., Wang, H. & Zhu, H., *Rheology properties and anti-aging performance of asphalt binder modified with wood lignin*, Copyright (2017) med tillstånd från Elsevier.

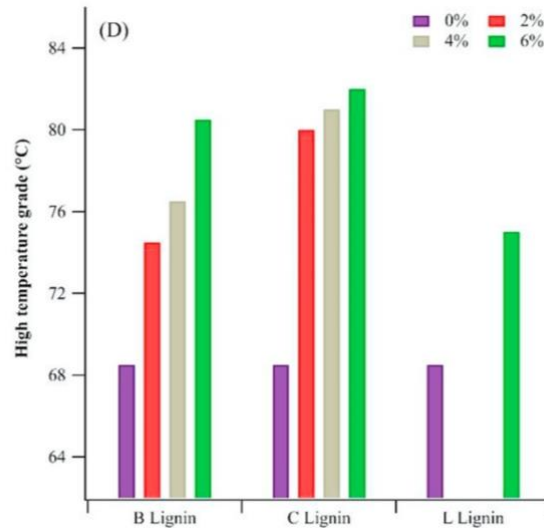


Figur 63. Diagram över spårbildningsfaktorn vid höga temperaturer efter korttidsåldring (RTFO) för (a) PG 64-22 och (b) PG 76-22 vid 0-10% inblandning av lignin (Xu et al., 2017). Återgiven från *Construction and Building Materials*, 151(2017), Xu, G., Wang, H. & Zhu, H., *Rheology properties and anti-aging performance of asphalt binder modified with wood lignin*, Copyright (2017) med tillstånd från Elsevier.

Vid mätningar av återhämtningen av asfalt vilket hänger samman med deformationer i materialet visar att elasticiteten och därmed återhämtningen vid belastning är större när lignin har tillsatts. Vid höga temperaturer får bituminet en mjukare konsistens och därmed är det mer benäget att deformeras samt generera spårbildning, vilket lignin kan motverka (Xu et al., 2017).

Både växtart samt framställning spelar roll i hur bindemedlet beter sig därför har Arafat et al. (2019) gjort forskning som undersökt detta. Bitumen med tre olika typer av lignin, ett från rishusk (L), ett från kraftprocessen (C) och även lignin från fällningen (B), den svarta vätskan som tidigare förklarats. Dessa tre varianter av lignin blandades samman med bitumen i 3 mängderna 2%, 4% respektive 6%.

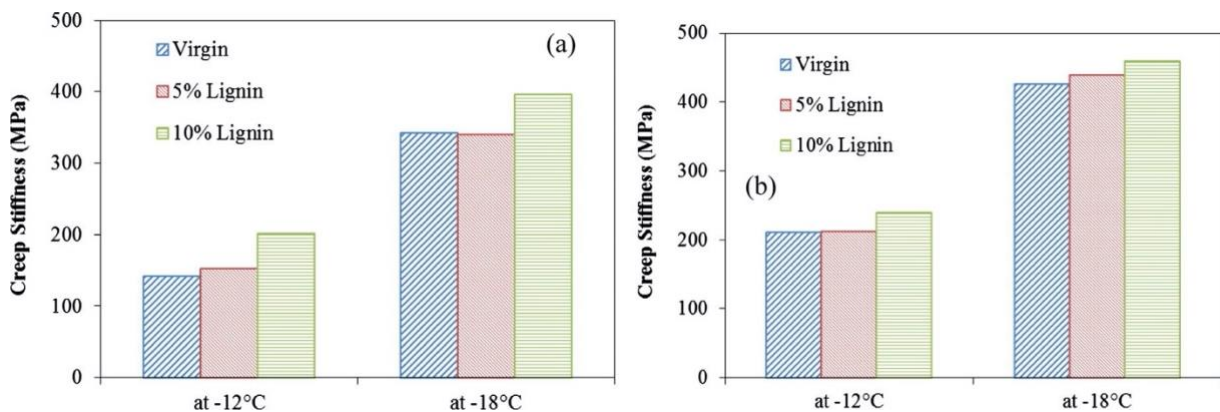
När de tre olika bindemedlen testades för höga temperaturer visades det att samtliga presterade bättre än petroleumbaserat bitumen, se Figur 64 nedan. Egenskaper som hänger samman med höga temperaturer så som benägenheten att deformeras permanent och skapa spårbildning minskade (Arafat et al., 2019).



Figur 64. Olika typer av framställningsprocesser av ligninbaserade bindemedel och dess prestation vid höga temperaturer vid 0-6% inblandning (Arafat et al., 2019). Återgiven från *Journal of Cleaner Production*, 217(2019), Arafat, S., Kumor, N., Wasiuddin, N. M., Owhe, E.O & Lynam, J. G., *Sustainable lignin to enhance asphalt binder oxidative aging properties and mix properties*, Copyright (2019) med tillstånd från Elsevier.

Kalla temperaturer

När Xu et al. (2017) i stället observerade materialens egenskaper vid lägre temperaturer kunde även här dras slutsatsen att materialen med och utan lignin besitter liknande egenskaper. Dock noterades att materialet med 10% lignin är lite sämre på att hantera spänningar som uppkommer vid kyla och är mer benäget att spricka. Xu et al. (2017) menar därför på att en andel högre än 10% lignin inte är att föredra sett utifrån låga temperaturer och spänningar vilket syns i Figur 65 nedan.



Figur 65. Diagram över krypstyvhet vid låga temperaturer för (a) PG 64-22 och (b) PG 76-22 vid 0-10% inblandning av lignin (Xu et al., 2017). Återgiven från *Construction and Building Materials*, 151(2017), Xu, G., Wang, H. & Zhu, H., *Rheology properties and anti-aging performance of asphalt binder modified with wood lignin*, Copyright (2017) med tillstånd från Elsevier.

Det visade sig vid Xie et al., (2017) forskning att tillsatsen av lignin försämrade materialets egenskaper vid kallare temperaturer. De menar på att kraftprocessen inte lämpar sig för att framställa lignin med tillräckligt bra egenskaper. Dock beror materialets egenskaper på många parametrar som struktur och molekylvikten. Dessa kan anpassas och påverka bindemedlets egenskaper till det bättre vilket Xie et al. (2017) menar på att lignin har potential till att bli ett fungerande biobindemedel.

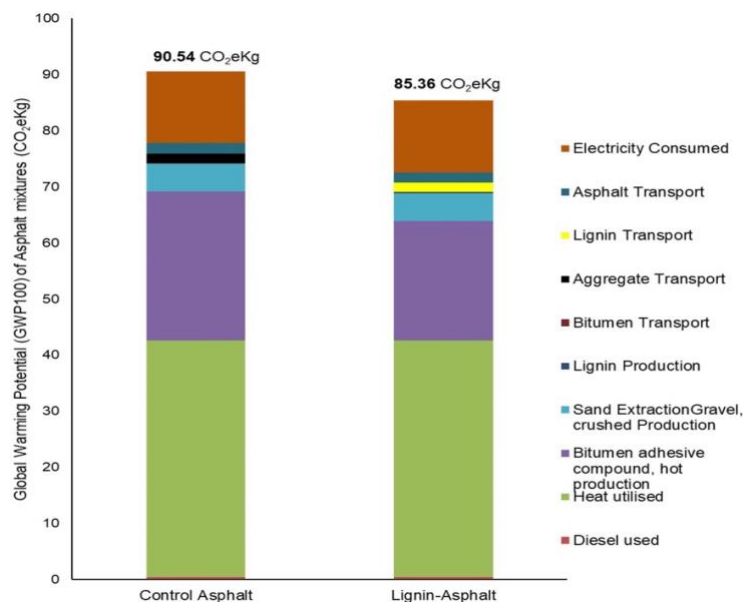
Åldrande

Materialet lignin har vid ett flertal tester visat sig besitta en motverkande effekt mot oxidation vilket motverkar asfaltens åldring. Anledningen till att lignin har denna effekt är på grund av dess kemiska struktur som gör lignin till en antioxidant som skyddar asfalten från att oxidera och inte reagera på oxiderande föroreningar (Asukar et al., 2016). När Asukar et al. (2016) testade två olika bindemedel med 5% samt 7% tillsats av lignin bekräftades den antioxidantiska förmågan genom att de blandningarna vid åldring visade en mindre ökning av viskositet jämfört med rent petroleumbaserat bitumen.

Beläggningens livslängd kan minskas när lignin tillsätts i bindemedlet då dess egenskaper som motverkar utmattnings minskar. När materialet lignin tillsätts får bindemedlet en styvare konsistens som inte kan klara av töjning i en lika stor utsträckning (Xu et al., 2017).

3.12.6 Miljö och klimat

Då lignin skall tillverkas och bli en del av ett bindemedel så finns begränsade data över hela processens miljöpåverkan. Vid försök på en hur miljövänligt ligninbaserad bitumen med 25% lignin är jämfört med helt petroleumbaserat bitumen så kunde ur ett livscykelerspektiv (utvärderat i Australien) som syns i Figur 66 tas fram som visar att bitumen har en högre miljöpåverkan (Tokede et al., 2020).



Figur 66. Ligninmodifierat bindemedel (25%) samt petroleumbaserat bindemedels miljöpåverkan, mätt i kg koldioxidutsläpp per ton asfalt i ett livscykelerspektiv (Tokede et al., 2020). Återgiven från Structures, 25(2020), Tokede, O. O., Whittaker, A., Mankaa, R. & Traverso, M., Life cycle assessment of asphalt variants in Infrastructures: The case of lignin in Australian road pavements, 190-199, Copyright (2020) med tillstånd från Elsevier.

Beroende på rådande omständigheter och mängden asfalt som skall användas så har det visats att även vid mindre ligninandel ner till 10% syns det att mängden utsläpp minskas. Dock kan klimat och andra osäkra faktorer spela roll i hur mycket utsläppen minskar (Tokede et al., 2020).

3.12.7 Praktiska aspekter

En positiv effekt av användningen av biobindemedel är temperaturen som krävs vid tillverkning av asfalten. När petroleumbaserat bitumen och lignin blandas samman med lika viktandelar har Besamusca et al. (2020) sett att materialet inte kräver lika hög temperatur som då endast helt oljebaserat bindemedel används. Vid det ligninbaserade bindemedlet behövs en temperatur på 130–140°C medan det för bitumen krävs 170–180°C. Detta säger dock emot lignins ökning av viskositet som visats i andra undersökningar, då en ökad viskositet rimligtvis inte bör innebära behov av lägre temperaturer vid blandning och utläggning.

Testbesked i form av att bromssträckan, rullmotståndet och buller gav alla goda resultat och visar på att vägar med lignin förbättrar dessa faktorer. Dock krävs vidare forskning för att kunna fastställa dessa egenskaper (Besamusca et al., 2020).

När lignin utvinns med hjälp av sulfat så som vid den populära kraftprocessen, vilket står för runt 55 miljoner ton per år, så är det problematik kring den starka doften som begränsar materialets användningsområden (Besamusca et al., 2020).

I dagsläget används lignin som bränsle framför allt i många industrier, om lignin i framtiden utgör en stor del av asfaltsproduktionen så krävs det att en annan form av bränsle kan användas i industrierna. Då kan andra alternativa bränslen som kol behöva användas istället vilket ger en negativ miljöpåverkan. Därför är det viktigt att titta på användandet av lignin från ett livscykelperspektiv för att kontrollera de substitut och andra utsläpp som kan uppstå då lignin får ett annat användningsområde (Besamusca, 2020).

En annan faktor som är svår att kontrollera är bindemedlets stabilitet vid lagring som kan ha en avgörande roll i asfaltens egenskaper. Blandningsmetod, andelar av respektive material samt tillsatsmedel gör skillnad och bör beaktas samt göras mer forskning på då detta moment är kritiskt (Wu et al., 2020).

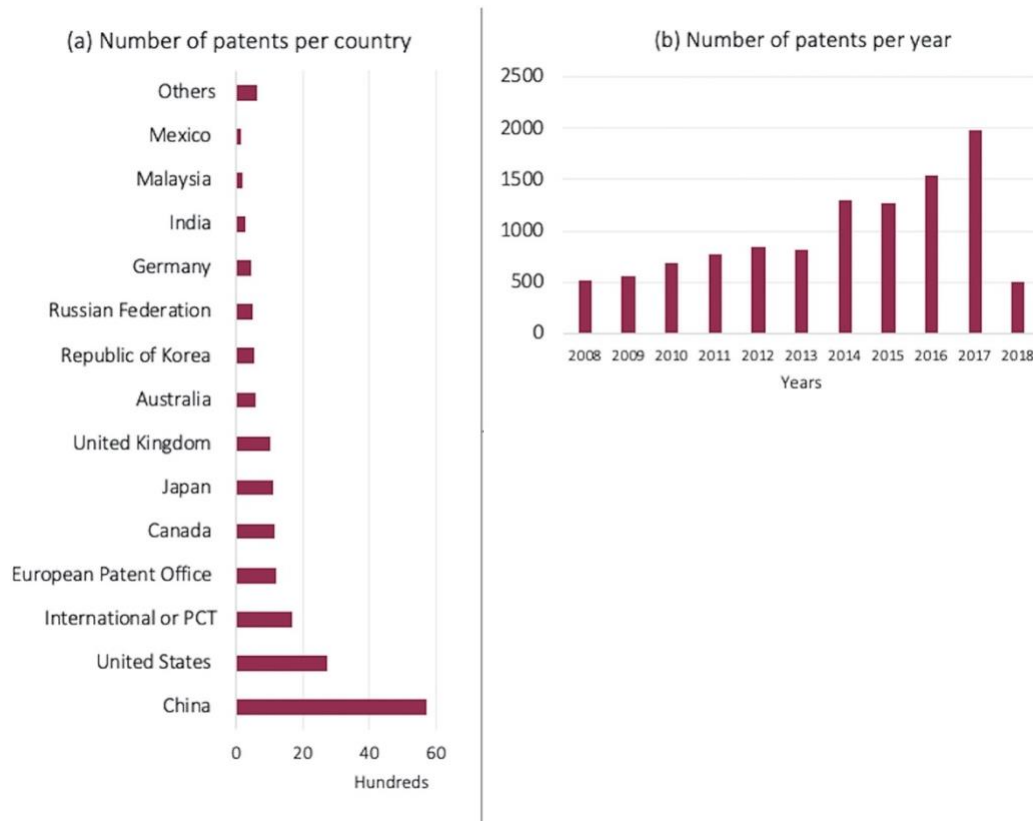
Lignin har som nämnts tidigare stor potential att delvis ersätta bitumen och materialet har många olika användningsområden som att generera bränsle och kemikalier. Ännu en positiv aspekt är att materialet inte verkar konkurrera med andra tillverkningsprocesser som till exempel mattillverkningen. Inte mer än genom tillgången på mark som behöver tas i anspråk (Li et al., 2015). Trots detta ses lignin fortfarande som en restprodukt där massaföretagen fokuserar på att producera exempelvis papper. Dagens industrier är inte utvecklade för att tillverka papper och samtidigt utvinna lignin med en god kvalitet på ett kostnadseffektivt sätt, vilket ställer krav på utveckling och optimering av massaproduktionen (Bajwa et al., 2019).

När den digitala världen tar över allt mer bör även detta tas med i beräkningar då det påverkar massatillverkningen. När efterfrågan på pappersmassa sjunker så påverkas även mängden lignin, vilket kan vara en av många påverkande faktorer mot biobindemedlets möjligheter att produceras (Bajwa et al., 2019).

Vid jämförelse av petroleumbaserat bitumen och lignin så är produktionen något som skiljer sig åt speciellt sett utifrån mängden som produceras vilket gör det svårt att jämföra de båda materialen på lika villkor. När Tokede et al. (2020) jämförde ett flertal kostnader från tidigare forskning så visade det sig att kostnaden för bitumen är billigare totalt sett, dock med ökad kostnad på olja samtidigt som bättre utvecklade produktionsprocesser för lignin som sker i en större skala än i dagslägen så kan kostnaderna se olika ut i framtiden (Tokede et al., 2020).

3.12.8 Forskningsframsteg

Materialet lignin är aktuellt i hela världen och det sker en mängd forskning på ligninrelaterade undersökningar. Detta kan tydligt ses utifrån antalet patent som ansökts på ämnet som har ökat under de senaste åren, se Figur 67 nedan. Mellan åren 2008 – 2018 registrerades 17 889 patentansökningar angående ligninrelaterade upptäckter och det är många massa tillverkande företag som har visat intresse i att ställa om och använda sig av restprodukten lignin (Dessbessell, 2020).



Figur 67. Diagram över antal patentansökningar för olika länder, samt antalet patentansökningar per år för ligninrelaterade ärenden i världen år 2008-2018 (Dessbessell, 2020). Återgiven från *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 123(2020), Dessbesell, L., Paleologou, M., Leitch, M., Pulkki, R. & Xu, C., *Global lignin supply overview and kraft lignin potential as an alternative for petroleum-based polymers*, Copyright (2020) med tillstånd från Elsevier.

Intresset som växt sig större tillsammans med teknikens ständiga utveckling kan lignin ha en stor betydelse i framtiden när oljebaserade produkter behöver miljövänligare substitut (Luo & Abu-Omar, 2017).

Än så länge går lignin inte att använda som ett rent biobindemedel utan det används i olika mängder blandat med bitumen för att kunna behålla de egenskaper som krävs. Ligninbaserad bitumen har använts på ett flertal testvägar i Nederländerna med en inblandning med upp till 30–50% lignin. Dessa vägar har visat positiva testresultat men ytterligare forskning på ett livscykelperspektiv krävs för att få en ännu bättre förståelse över hur hela produktionskedjan samt livstiden påverkar klimatet. Även hur utvinningsprocesserna påverkar under de senare stegen behöver testas samt utvärderas då ligninets kemiska struktur kan variera. En ekonomisk analys är svår att fastställa då det inte finns någon storskalig produktion i dagsläget vilket påverkar både kostnader men även mängderna som går att producera (Besamusca, 2020).

4 Teknisk jämförelse

4.1 Penetrationstal & Mjukpunkt

I Tabellerna 17 och 18 nedan visas värden på penetrationstal och mjukpunkt för de materialen med data på egenskaperna. Det bör dock ha i åtanke att bindemedlets slutliga egenskaper beror på vilken bitumensort som biobindemedlet blandats in i från början, och därmed inte bara har med biobindemedlet att göra. Tabell 17 visar de värden för biobindemedlen med högst procentinblandning som samtidigt håller sig inom eller nära godkända penetrations- och mjukpunktsintervall för Trafikverkets krav för bitumenbundna lager.

Tabell 17. Störst andel biomaterialsandel som håller sig inom kraven för något bitumen i svensk standard från Trafikverkets TDOK 2013:0529

Biomaterial	Penetrationstal¹ (0,1 mm)	Mjukpunkt ² (°C)
Svingödsel (15 vikt-%)	64	50
Mikroalger	-	-
Kräftskal (5 vikt-%)	47,5	53
Sojabönsolja (20 vikt-%)	108,6	46,3
Solrosolja (4 vikt-%)	94	88
Matoljeavfall (5 vikt-%)	160	39
Kaffesump	-	-
Ek	-	-
Lignin (25 vikt-%)	43,5	50,5

¹ Enligt svensk standard för bitumenbundna lager ska penetrationstalet ligga inom intervallet 50-430.

² Enligt svensk standard för bitumenbundna lager ska mjukpunkten ligga inom intervallet 35-54.

I Tabell 18 visas värden för materialen där de betar sig så likt bitumen 70/100 som möjligt, då det är en av de vanligaste bitumensorten i Sverige.

Tabell 18. Biomaterial som är mest lik bitumen 70/100 i Trafikverkets TDOK 2013:0529 (understrukna värden är undantag som inte håller sig inom svensk standards intervall för 70/100).

Biomaterial	Penetrationstal³ (0,1 mm)	Mjukpunkt⁴ (°C)
Svingödsel	64	50
Mikroalger	-	-
Kräftskal (5 vikt-%)	47,5	53
Sojabönsolja (15 vikt-%)	83,1	48,9
Solrosolja (1 vikt-%)	96	83
Matoljeavfall (3 vikt-%)	85	45
Kaffesump	-	-
Ek	-	-
Lignin (25 vikt-%)	43,5	50,5

- Svingödsel: materialet minskade penetrationstalet samt ökade mjukpunkten vid inblandning i bitumen med penetrationstal 70. Vid 15% inblandning passar bindemedlets penetrationstal och mjukpunkt in i Trafikverkets TDOK 2013:0529 för 50/70-bitumen.
- Mikroalger: inga penetrationstal- och mjukpunktsvärden hittades för detta material.
- Kräftskal: blandningarna med kräftskal och petroleumbaserat bitumen med penetrationstal 71 fick ett minskande penetrationstal och ökad mjukpunkt med ökad andel kräftskal. Blandningen med högst andel kräftskal som passar in i ett intervall i svensk standard visas i tabell 17, vilket även är den andel som liknar bitumen 70/100 mest och därmed även visas i tabell 18. Mjukpunkten är godkänd om man ser till svensk standard, och 50/70 är den bitumensort som värdena bäst passar in i.
- Sojabönsolja: inblandning av sojabönsolja ökade penetrationstalet och minskade mjukpunkten. En inblandning av 20% sojabönsolja inblandat i petroleumbaserat bitumen med penetrationstal 70 är den högsta procenthalten som har penetrationstal och mjukpunkter i godkända intervall enligt svensk standard. 100/150 är den bitumensort som värdena passar in i tabell 17. 15% inblandning av sojabönsolja har värden som stämmer överens med kraven på 70/100.
- Solrosolja: solrosoljekapslarna minskar penetrationstalet och ökar mjukpunkten. Då detta testats som försegling av asfalt är den hårdare än petroleumbaserat bitumen. Detta gör att dess mjukpunkt skiljer sig från vanligt bindemedel och därför inte passar in i något intervall i svensk standard vilket tydligt syns i värdena från tabellerna.

³ Enligt svensk standard för bitumenbundna lager för bitumensorten 70/100 ska penetrationstalet ligga inom intervallet 70-100.

⁴ Enligt svensk standard för bitumenbundna lager för bitumensorten 70/100 ska mjukpunkten ligga inom intervallet 43-51.

- Matoljeavfall: oljan höjer penetrationstalet med ökad inblandning och sänker mjukpunkten för åldrat bitumen. Vid 5% inblandning ändras till exempel ett åldrat 80/100-bitumen med penetrationstal 50/60 till att ligga inom intervallet för en 160/220. Vid en tillsatt oljehalt på 3 vikt-% tillgodoses kraven för 70/100.
- Kaffesump: inga penetrationstal- och mjukpunktsvärden hittades för detta material
- Ek: inga penetrationstal- och mjukpunktsvärden hittades för detta material.
- Lignin: materialet minskar penetrationstalet och ökar mjukpunkten vid inblandning i petroleumbaserat bitumen. Det visar på låga penetrationstal vid inblandning med petroleumbaserat bitumen med penetrationstal 70, vilket gör att blandningen då inte klarar av kraven för bitumenbundna lager 70/100.

4.2 Viskositet

En kort sammanställning över hur de olika materialens inblandning påverkar viskositeten följer nedan, där de största likheterna och skillnaderna tas upp samt hur den varierar.

- Svingödsel: den dynamiska viskositeten minskade proportionellt vid ökad andel svingödsel jämfört med petroleumbaserat bitumen, PG-64-22. Viskositeten testades vid 100, 110, 115 och 135°C, och minskade med ökad temperatur.
- Mikroalger: inga värden på viskositet hittades för detta material.
- Kräftskal: inga värden på viskositet hittades för detta material.
- Sojabönsolja: en jämförelse med petroleumbaserat bitumen 50/70 vid temperaturerna 135, 150, 177 °C och 1, 2 respektive 3% inblandning av sojabönsolja visade på förändrade egenskaper. Viskositeten minskade vid högre inblandning sojabönsolja, samt vid högre temperatur både för jungfruligt och korttidsåldrat.
- Solrosolja: fluiditeten minskar med andelen kapslar innehållande solrosolja vilket resulterar i en ökad viskositet.
- Matoljeavfall: tillsats av olja minskar viskositeten hos åldrat bitumen.
- Kaffesump: vid jämförelse av viskositet med petroleumbaserade bitumen, PG64-22, förändras inte egenskapen vid 4% inblandning. Vid 8% inblandning visar det sammansatta materialet på en minskning av viskositet.
- Ek: viskositeten minskar vid ökad temperatur likt petroleumbaserat bitumen för biobindemedel gjort på ek som dock är mer temperaturkänsligt. Materialens olika känslighet bidrar till att biobindemedlets temperaturintervall för ett visköst beteende är 40–90 °C vilket är lägre än för petroleumbaserat bitumen. Det har visat sig att material som polymermodifieras får ett högre temperaturintervall.
- Lignin: vid 135°C ökade viskositeten både för 5% respektive 10% lignininblandning, jämfört med de petroleumbaserade bitumenmaterialen PG64-22 och PG76-22.

4.3 Komplex skjuvmodul- & fasvinkelsamband

En kort sammanställning över hur de olika materialens inblandning påverkar sambandet mellan den komplexa skjuvmodulen- och fasvinkeln följer nedan. De största likheterna och skillnaderna tas upp samt hur de varierar.

- Svingödsel: den komplexa skjuvmodulen minskar vid ökad inblandning samtidigt som fasvinkeln sänks vilket ger ett mer elastiskt biobindemedel.
- Mikroalger: olika sorters alger har visat olika reologiska egenskaper. Vid utredning som fullständig ersättare, har biobindemedel från algsorten Scenedesmus liknande reologiska samband som petroleumbaserat bitumen. Det har även en högre komplex skjuvmodul och lägre fasvinkel än petroleumbaserat bitumen med penetrationstal 30/50. Vid kalla temperaturer har Scenedesmus visat en lägre elasticitetsmodul än bitumen och vid höga temperaturer har två av tre framställningar högre elasticitetsmodul än petroleumbaserat bitumen. Dessa två är mindre temperaturkänsliga än petroleumbaserat bitumen. Materialet visar potential att kunna användas som en fullständig ersättare till petroleumbaserat bitumen. Algsorten, Spirulina beter sig mer som ett elastomermodifierat bindemedel. Den har potential att främst kunna användas som tillsatsmedel för att förbättra de reologiska egenskaperna.
- Kräftskal: komplexa skjuvmodulen ökar vid inblandning av kräftskalpulver och fasvinkeln minskar jämfört med petroleumbaserat bitumen.
- Sojabönsolja: vid 52°C (medeltemperatur) har petroleumbitumen högre komplex skjuvmodul än sojabönsolja (vid 20% inblandning) men i takt med att temperaturen ökar får de båda materialen liknande komplexa skjuvmoduler. Petroleumbaserat bitumen har en högre fasvinkel för samtliga uppmätta temperaturerna 52–82°C men de båda materialens fasvinkel ökar vid ökad temperatur.
- Solrosolja: när solrosolja adderas minskar den komplexa skjuvmodulen, för åldrat bitumen. Vid höga frekvenser kan inte solrosolja förbättra egenskaperna och därmed den komplexa skjuvmodulen jämfört med jungfruligt bitumen. Solrosolja kan, för åldrad asfalt, återskapa 30% av de ursprungliga reologiska egenskaperna genom 5% inblandning av solrosolja.
- Matoljeavfall: styvheten sjunker vid inblandning och fasvinkeln ökar.
- Kaffesump: genom att kaffe minskar oxidationsgraden ökar fasvinkel medan den komplexa skjuvmodulen minskar. Den komplexa skjuvmodulen påverkas endast i en mindre grad om jämförelse med varierande inblandning av kaffesump i petroleumbaserat bitumen görs vid åldring.
- Ek: den komplexa skjuvmodulen för biobindemedlet inblandning av ek är lägre än för petroleumbaserat bitumen vid höga och medelhöga temperaturer. Vid låga temperaturer är den dock högre för biobindemedlet jämfört med petroleumbaserat bitumen.
- Lignin: inblandning av lignin i petroleumbaserat bitumen ökar den komplexa skjuvmodulen. Fasvinkeln minskar även vid inblandning av lignin. Lignins styvande förmåga kan vara ett problem vid procentsatser över 7% och 10%. Vilken typ av bitumen som används har betydelse för mängden lignin som kan tillsättas.

4.4 Varma temperaturer

En kort sammanställning över hur de olika materialens inblandning påverkar beteendet vid varma temperaturer följer nedan. De största likheterna och skillnaderna tas upp samt hur de varierar.

- Svingödsel: materialet ökar resistensen mot spårbildning vid 5% inblandningen av svingödsel jämfört med petroleumbaserat bitumen, PG64-22. Spårbildningsfaktorn blir dubbelt så hög för biobindemedlet jämfört med det petroleumbaserade bindemedlet, PG64-22, vid både kort (RTFOT)- och långtidsåldring (PAV).
- Mikroalger: spårbildningsresistensen var högre för algarten Scenedesmus än för petroleumbaserat bitumen med penetrationstalet 35/50. För algarten Spirulina ökar spårbildningsresistansen jämfört med ett elastomer-rikt bindemedel.
- Kräftskal: spårbildningsfaktorn ökar vid ökad procent inblandning jämfört med petroleumbaserat bitumen med penetrationstal 70. Kräftskal bidrar alltså till högre resistens mot spårbildning.
- Sojabönsolja: vid medelhöga temperaturer har bitumen, ESSO70A (62 i penetrationstal och 48 i mjukpunkt) högre förmåga att stå emot spårbildning jämfört med en blandning av petroleumbaserat bitumen, ESSO70A vid 20% inblandning av sojabönsolja. Vid konstant temperatur men ändrad frekvens beter sig materialen lika sett utifrån egenskapen att stå emot spårbildning. Vid polymermodifiering bindemedel ökar resistensen ytterligare mot spårbildning.
- Solrosolja: för petroleumbaserat bitumen, 70/100 samt åldrat bitumen med 1-, 3- och 5% oljeinblandning visar ett mönster i att spårbildningsfaktorn minskar med högre inblandning, vilket minskar resistens mot spårbildning.
- Matoljeavfall: benägenheten att bilda spår har setts öka vid inblandning av matoljeavfall.
- Kaffesump: spårbildningsfaktorn minskar vid inblandning av kaffesump, vilket minskar resistens mot spårbildning.
- Ek: inga värden har hittats angående hur materialet påverkas vid varma temperaturer.
- Lignin: spårbildningsfaktorn ökar vid ligninhalten 5% och 10% även efter långtidsåldrande, RTFOT. Vilken variant av bitumen som används spelar roll då det skiljer sig vid åldrat bitumen, vilket kan ha påverkat resultatet. När tester på high temperature grade undersöktes visade testerna på en ökad grad vid de högre ligninhalten 2-, 4- respektive 6%, vilket generar en motståndskraft hos bindemedlet mot spårbildning.

4.5 Kalla temperaturer

En kort sammanställning över hur de olika materialens inblandning påverkar beteendet vid kalla temperaturer följer nedan. De största likheterna och skillnaderna tas upp samt hur de varierar.

- Svingödsel: inblandning av 2-, 5-, respektive 10% av materialet i petroleumbaserat bitumen klarar av kallare temperaturer utan att spricka jämfört med rent petroleumbaserat bitumen. Spricktemperaturen minskas med ca 5°C från -31,7°C till -36,3°C vid 10% inblandning av svingödsel.
- Mikroalger: inga värden hittades på hur materialet påverkas vid kalla temperaturer.

- Kräftskal: inga värden hittades på hur materialet påverkas vid kalla temperaturer.
- Sojabönsolja: materialet bidrar vid inblandning i petroleumbaserat bitumen till en mindre benägenhet att spricka vid låga temperaturer.
- Solrosolja: addering av materialet verkar öka sprickresistensen vid låga temperaturer.
- Matoljeavfall: inblandning av materialet i petroleumbaserat bitumen minskar benägenheten att spricka vid låga temperaturer.
- Kaffesump: Inga värden hittades på hur materialet påverkas vid kalla temperaturer.
- Ek: ekbaserat bindemedel har högre styvhet vid kalla temperaturer jämfört med petroleumbaserat bitumen, vilket innebär att biobindemedlet har lägre motstånd mot sprickning och bör inte användas i kalla klimat. Därmed är en 100% inblandning av biobindemedlet inte att föredra i kalla klimat.
- Lignin: ligninmodifierat bindemedel har liknande egenskaper som petroleumbaserat bitumen vid låg inblandning. Vid 10% eller högre inblandning blir materialet sämre på att hantera spänningar och är därmed mer benäget att spricka. En inblandning över 10% är därför inte att föredra för egenskaperna vid kalla temperaturer.

4.6 Åldrande

En kort sammanställning över hur de olika materialens inblandning påverkar åldringen hos bindemedlet följer nedan. De största likheterna och skillnaderna tas upp samt hur de varierar.

- Svingödsel: materialet var vid jämförelse minst känslig för oxidation jämfört med andra växtbaserade biooljor samt petroleumbaserat bitumen. Därför har biobindemedlet stor potential att kunna användas som föryngringsmedel.
- Mikroalger: inga värden för hur materialet beter sig vid åldrande har hittats.
- Kräftskal: inga värden för hur materialet beter sig vid åldrande har hittats.
- Sojabönsolja: inga värden för hur materialet beter sig vid åldrande har hittats.
- Solrosolja: oljan minskade utmattningsparametern för åldrat bitumen vid inblandning.
- Matoljeavfall: oljan som har blandats samman med åldrat bitumen för en föryngrad effekt oxiderar i en långsammare takt än en som inte blivit föryngrad.
- Kaffesump: materialet motverkar inte oxidationen i bindemedlet vid inblandning.
- Ek: ekoljan oxiderade i snabbare takt än petroleumbaserat bitumen, troligen på grund av dess höga syrehalt.
- Lignin: materialet har motverkande effekt mot oxidation och motverkar asfaltens åldring då den är en antioxidant vid ligninmodifiering.

5 Provvägar

Biobindemedel är ett nytt ämne och befinner sig främst i laboriestadiet än så länge, vilket nämnts tidigare i rapporten. Om en överblick tas över världen är det som Figur 68 antyder, ett fåtal material, företag och länder som har lyckats ta forskningen ut i fält och gjort testvägar för att utveckla biobindemedlet ytterligare.



Figur 68. Byggda vägar med bioasfalt i Norge, Kina, Frankrike, Danmark, USA, Nederländerna, Belgien och Sverige. *Licens: Freepik License. Design av Layerace.*

Vegetabiliska oljor

Det är flera länder som har byggt vägar på vegetabiliska oljor. I Norge byggde företaget Shell år 2007 två vägar med asfalt innehållande vegetabiliska oljor (Wang et al., 2016 refererad i Su et al., 2018). Kina har anlagt bioasfalt med en inblandning av 10% vegetabilisk olja på en testväg i Hangzhou som visade på goda resultat (Cao et al., 2015 refererad i Su et al., 2018). Även Frankrike har använt sig av vegetabiliska oljor för att anlägga både en gångbana i parkmiljö samt två landsvägar (Colas, 2005).

I samtliga av dessa vägar som är gjorda av vegetabiliska oljor finns det svårigheter att följa upp och det finns ingen lättåtkomlig information angående uppföljning, skick eller om de rivits.

I Danmark och Norge har mindre vägar i form av gångbanor använt sig av bindemedel gjort på vegetabiliska oljor. Gångbanorna är exempelvis belägna på zoo, i parker och på golfbanor (Dansk Overfladebelægning, u.å.).

Ek

Forskarna i Nordamerika har undersökt och producerat biobindemedel gjort på ek. År 2010 testade de materialet i Iowa vilket resulterat i en cykelväg med 5% ekbaserad bioolja i staden Des Moines (Iowa State University, 2010). Uppföljningen är svår att ta del av vilket gör att det inte går att uttala sig om hur vägens standard har utvecklats och är idag.

Lignin

Sedan 2015 har det framför allt i Nederländerna men även Belgien har anlagt testvägar med ligninbaserad bioasfalt, vilket listas i Tabell 19 nedan. Andelen biobindemedel som testats har varit från 30% upp till 50%. På första testvägen användes bioasfalten på topplagret, och trots att testvägen belastas dagligen av bilar och lastbilar var topplagret i ett bra skick efter fyra år (Besamusca et al., 2020).

Tabell 19. Demonstrationsvägar av ligninbaserad asfalt i Nederländerna och Belgien (Besamusca et al., 2020). Återgiven från 7th Euroasphalt & Eurobitume congress, Besamusca, J., Landa, P., Zoetemeyer, R., Gosselink, R., Lommers, B., Junginger, M. & Verschuren, M., Copyright (2020) med tillstånd från R. Gosselink.

Land	Plats	Namn	Vägtyp	Längd (m)	Ligninsort	Procent biobindemedel	Installationsår
Nederländerna	Sas Van Gent	Wervenweg	Industriell	70	Soda	50	2015
Nederländerna	Terneuzen	Europaweg	Regional	400	Kraft	45	2016
Nederländerna	Terneuzen	Finlandweg	Industriell	100	Kraft	45	2017
Nederländerna	Wageningen	Bornsesteeg	Cykelväg	1000	Soda, kraft, hydrolys	45	2017
Nederländerna	Beek en Donk-Boxmeer	N272	Regional	2500	Kraft	32	2017
Nederländerna	Oostburg	Rondweg	Regional	1000	Kraft	45	2018
Nederländerna	Vlissingen	Schotlandweg	Industriell	500	Kraft	45	2018
Nederländerna	Vlissingen	IJslandweg	Industriell	400	Kraft	45	2018
Nederländerna	Zevenaar	Witte Kruis	Cykelväg	500	Soda	50	2018
Belgien	Gent	Industrieterrein	Industriell	200	Kraft	45	2018
Nederländerna	Goes	Joachimkade	Industriell	300	Kraft	45	2019

Det är flera företag i Sverige som 2020 är på gång att ställa om, testa och anlägga vägar gjorda på skogsprodukter.

Peab Asfalt anlade 2020 ligninmodifierad asfalt på en testväg i Sundsvall som är trafikerad med 8000–10 000 bilar om dagen (Ligno City 2.0, 2020). Detta är en del av ett

forskningsprojekt i EU där olika företag samverkar för att utveckla nya biobaserade produkter från skogsbruksrester (Peab asfalt, u.å.).

Även Svevia har 2020 använt sig av lignin. Produkten Lineo™ är ett biobindemedel gjort på lignin som företaget har anlagt genom samarbete med Stora Enso. Materialet har lagts ut på mindre sträckor men har sammanlagt resulterat i 15 kilometer ligninbaserad asfalt på vägen som sträcker sig mellan Sandbrink och Gnesta (Stora Enso, 2020).

Entreprenadföretaget Skanska har även de lagt asfalt med biobindemedel från skogen i Dalarna mellan Ludvika och Björsö, där de lagt ut 18 000 ton asfalt innehållande biobindemedel. För att kunna se detta i ett större perspektiv är detta är en liten mängd asfalt av de 7,5 miljoner ton som anläggs årligen, dock en bra start och en bit på vägen för att kunna ställa om asfaltbranschen (Skanska, 2020).

Samtliga vägar verkar hålla från ett tekniskt perspektiv, dock är det för tidigt att uttala sig om hur deras kvalité kommer att hålla och se ut i framtiden.

6 Diskussion och slutsatser

6.1 Resultatdiskussion

6.1.1 Tekniska aspekter

De potentiella användningsområdena för de studerade biobindemedlen sammanställs i Tabell 20, enligt de tidigare nämnda kategorierna från Peralta et al. (2012). De biobindemedel som inte passar in i något intervall placeras i den kategori som är mest lik.

Tabell 20. Kategorisering av de studerade biobindemedlen utifrån potentiellt användningsområde.

Fullständig ersättare	Extender (25-75%)	Modifierare (<10%)	Föryngringsmedel
Mikroalger (Scenedesmus)	Kräftskal	Svingödsel	Svingödsel
Ek	Sojabönsolja	Mikroalger (Spirulina)	Mikroalger/Svingödsel
	Matoljeavfall	Kräftskal	Sojabönsolja
	Ek	Sojabönsolja	Solrosolja (självläkning)
	Lignin	Solrosolja	Matoljeavfall
		Matoljeavfall	Kaffesump
Kaffesump			
		Ek	
		Lignin	

Förutom att de olika biobindemedlen ersätter en viss procent av petroleumbitumen eller bidrar till större andel återvinning, ger de också olika tekniska fördelar och nackdelar. Det är oftast någon eller några tekniska egenskaper som gynnas av biobindemedlet, men dessvärre oftast på bekostnad av någon annan teknisk egenskap. Exempelvis kan de biobindemedel som bidrar till bättre beständighet vid varma temperaturer, som lignin och kräftskal, ofta innebära en försämring i sprickbeständighet vid kalla temperatur. Detta är dock endast bekräftat för lignin. Detsamma gäller de som bidrar till ett mjukare och mindre sprickbenäget bitumen, som matoljeavfall, solrosolja, sojabönsolja och kaffesump, men i stället försämrar deformationsresistensen. Svingödsel har dock uppvisat bättre egenskaper både vid kalla och varma temperaturer, vid 5% inblandning jämfört med petroleumbaserat bitumen. Bindemedlen gjorda på svingödsel, sojabönsolja, ek och i ett fall även lignin bidrar dessutom till en lägre blandnings- och packningstemperatur vilket bidrar till mindre energianvändning och därmed mindre utsläpp. Mikroalger och ek har i de tekniska testerna undersökts utan att blandas in i bitumen. En av de undersökta mikroalgerna har mycket liknande reologiska egenskaper som petroleumbaserat bitumen, och visar på större resistens mot deformationer. Det återstår dock att se hur mikroalger beter sig vid andra testade egenskaper. Ek visar på ett

liknande beteende men kan behöva polymermodifieras samt har hög sprickbenägenhet vid kalla temperaturer.

Det kan eventuellt vara så att materialen i pulverform, det vill säga lignin och kräftskal, inte kemiskt reagerat med bituminet och därmed inte lösts upp. De kan då i stället ha agerat filler, det vill säga finkornigt material som styvar upp bindemedlet, vilket både lignin och kräftskal gjorde. Dessa material kanske därför inte egentligen rent tekniskt fungerar som biobindemedel, men är ändå biomaterial som förbättrar bindemedlets egenskaper samt ersätter viss mängd petroleumbitumen. Denna fråga bör dock undersökas vidare, för att helt kunna förstå materialens inverkan på bitumen.

Då det krävs att biobindemedlen inte bidrar till en sämre beständighet, är frågan om oxidation också viktig. Här verkar både svingödsel, lignin, och matoljeavfall motverka oxidation. De material som bidrar till lägre viskositet förhindrar även att bindemedlet blir för hårt vid oxidation och åldring.

Då de olika biobindemedlen har olika för- och nackdelar skulle en blandning av olika kunna undersökas för att försöka få fram optimala egenskaper. Detta har som nämnts tidigare testat med mikroalger och svingödsel, en blandning som visat sig ha bättre egenskaper än de separata biobindemedlen. Det vore intressant att testa även andra blandningar av material. En möjlighet är att testa blandningar av de styvare biobindemedlen med de mjukare, som exempelvis lignin och matoljeavfall. Då både ett för styvt och ett för mjukt bindemedel kan bidra till problem för en väg, skulle lignin och matoljeavfall tillsammans eventuellt kunna kompensera för varandras brister. Speciellt i varierande klimat där både höga och låga temperaturer kan bidra till problem.

Det har varit svårt att jämföra de olika biobindemedlens styrkor och svagheter då de undersökts med olika procents inblandning i bitumen, samt att vissa undersökts som förnyngsmedel. Det som eftersträvas hos biobindemedel är dels att bevara eller förbättra bitumens egenskaper, dels så stor ersättning av petroleumbaserat bitumen som möjligt. Det blir därför svårt att jämföra material som endast blandats in till 3% med ett material som blandats in 30%, eller som undersökts som fullständig ersättare till bitumen, som till exempel ek och mikroalger. Ytterligare blir det svårt att jämföra ett bindemedel som främst använts som förnyngsmedel med ett som blandas i jungfruligt bitumen, då dessa har olika uppgifter.

En annan faktor som påverkar jämförelserna är att det finns många olika sätt att mäta ett bindemedels tekniska egenskaper, och vad som används är inte konsekvent. Olika material har därför testats för dels olika egenskaper, dels med olika mätmetoder, dels med olika ingångsvärden som till exempel olika temperatur, och dels mätt i olika enheter. De mätvärdena som finns i svensk standard har till exempel varit svåra att hitta i forskningsrapporter, då dessa ofta går efter något annat system.

Dessutom har de olika bindemedlen kommit olika långt i forskningen, vilket gör att det finns olika bredd på vad som undersökts. De nyare materialen har inte testats på lika många egenskaper och går därför inte att jämföra helt med de som genomgått fler tester.

Vidare finns det viktiga egenskaper som det inte funnits resultat på, som vattenbeständighet och vidhäftningsförmåga. Detta är dock egenskaper som kräver tester i färdiga asfaltblandningar, för att se hur stenmaterialet och bindemedlet agerar tillsammans.

För att sedan kunna få en hundraprocentig bild över bindemedlets prestation behövs tester i fält, då det inte endast går att förlita sig på vad laborietesterna indikerar. Detta har skett för några material, men här har också ett problem varit att uppföljningen på dessa fältförsök inte funnits, vilket till viss del hindrar forskningen att utvecklas vidare.

Möjligheten att polymermodifiera biomaterialen för att få förbättrade och önskvärda egenskaper finns och har visats vara lyckat både för sojabönsolja och för ek. Detta kan öka

förutsättningarna att kunna använda biomaterialen då de enklare kan anpassas efter rådande omständigheter och klimat. Däremot är det inte alltid att föredra att blanda in polymerer då även dessa ofta är gjord av råolja vilket inte är hållbart och bidrar till negativ miljöpåverkan som bör undvikas.

6.1.2 Miljö, klimat och praktiska aspekter

Materialen är i många fall restprodukter som kan förädlas och skapa nytt värde genom framtagningen av biobindemedel. Genom att ge produkter nytt liv undviks risk för miljöfarliga konsekvenser som kan uppstå när material läggs på deponi. Processer för till exempel borttransport krävs i vissa fall inte längre, dock kan det krävas fler steg i tidigare skeden för att kunna använda materialen till biobindemedel. Detta skapar både givande och tagande i tid, energi och ekonomi.

Vid framtagningen av biobindemedel kan tillvägagångssättet variera vilket skapar en variation mellan materialen sett utifrån deras hållbarhet vid dessa delprocesser. I vissa fall som för till exempel svingödsel kan vissa ämnen som används i processen återanvändas i stället för att resultera i ytterligare restprodukter vilket gynnar både miljön samt praktiska aspekter. I andra fall tillsätts olika kemikalier för att materialet ska få de egenskaper som önskas och detta kanske inte alltid ses som den mest hållbara lösningen beroende på vad det är som blandas i.

Totalt sett har dock flera material visat sig bidra till mindre miljöpåverkan än petroleumbaserat bitumen. De flesta biobindemedlen som diskuterats framställs genom tryck och temperaturförändringar vid framtagningen av biobitumen. Detta kräver energi, men oftast i en mindre mängd än vad som krävs för petroleumbaserat bitumen. Energiåtgången som genereras vid framställningen är starkt sammankopplat både med miljö och klimat men även med ekonomi. Detta har en avgörande betydelse för den totala hållbarhetens olika aspekter vilket har visat sig vara varierande.

Olika länder har olika förutsättningar att tillverka asfalt beroende på geografi och därmed tillgången på de material som krävs. Förutsättningarna sätter även varierande krav på de egenskaper som krävs för just det rådande klimatet. Detta resulterar i att olika material kan användas på olika platser i världen för att säkerställa tillgången, minska importen och därmed transporter som i slutändan kan minska utsläppen. Länders drivkraft borde styrkas i denna fråga då möjligheten att kunna göra sig av med de restprodukter som finns samt använda de tillgångar som existerar att tillgå geografiskt.

Sett till den långa lista som presenterades över de material som forskas på som framtida kandidater för biobindemedel visar på en stor bredd och möjlighet att kunna hitta något för samtliga länder och klimat. Dock är det en lång väg att vandra och den låga andelen viktprocent som har visats vara möjlig att ersätta bitumen i bindemedlet visar på att mycket forskning fortfarande krävs. Inget material bekräftas ännu ha de optimala egenskaperna som petroleumbaserat bindemedel besitter. Det krävs därför att länder ställer om och prioriterar miljöarbetet där efterfrågan på ett substitut som kan ersätta petroleumbaserade produkter får ekonomiskt stöd och engagemang som kan generera en större mängd forskning.

Satsningen på biobindemedel ger inte bara fördelen att beroendet av råolja minskar, utan den bidrar även till förbättrad avfallshantering i vissa industrier. Avfallshanteringen är som nämnts i rapporten ofta ett stort problem på många ställen och därför bidrar biobindemedel till att flera parter vinner på satsningen. Mängder av exempelvis svingödsel och kräftskaal behöver inte läggas på deponi i lika stor utsträckning, och pappersmassaindustrin samt biobränsleproduktion av mikroalger och skogsrester kan ökas i värde om biprodukterna kan komma till användning.

Det är dock viktigt att poängtera att allt som är biomaterial är inte automatiskt bra. Det kräver en långsiktig hållbarhetskedja där positiv inverkan är något som behöver ske i samtliga steg.

Materialen i sig är en viktig beståndsdel och även hur det sedan omvandlas till biobindemedel kräver positiv inverkan. Dagens petroleumbaserade bitumen är återanvändningsbart till 100%. Asfaltmaterialet släpper heller inte ut några större mängder partiklar eller gaser under tiden vägen är anlagd. Detta gör att det inte nödvändigtvis bidrar till en försämrad miljö eller påverkar klimatet negativt. Om vägarna som vi använder oss utav idag skulle räcka för att förflytta oss är inte dagens asfalttillgång något problem då den går att återanvända. Vagnäten byggs dock ut och det finns behov av ny asfalt vilket bidrar till problem då oljan är en ändlig resurs. För att biobitumen skall kunna konkurrera med dagens petroleumbaserade bindemedel måste det nya alternativa bindemedlet leva upp till samma standard för att vara lönsam, hållbar och värd att satsa på.

Stegen som kommer längre fram i hållbarhetskedjan, som drift och underhåll är processer som innebär att biobitumenbundna vägar behöver ha samma eller högre standard än vad petroleumbaserat bindemedel har. Detta då det krävs att de kan leva upp till alla de egenskaper som materialet har samt inte behöva fler underhållsarbeten eller högre kostnader för drift och underhåll bara för att det inte håller långsiktigt. Drift och underhåll kommer att behöva ske men det ska löna sig att använda biobindemedel. Det blir annars kostsamt både ekonomiskt och för miljön om vägar ständigt behöver byggas om eller underhållas i en större skala bara för att ett biomaterial har använts. Detta är ett exempel på när biomaterial inte automatiskt är bra då nyttan i så fall inte väger upp konsekvenserna.

För att inte behöva konkurrera med andra branscher eller stöta på andra hinder är det viktigt att skilja på återanvändning och återvinning. Möjligheten att kunna återanvända material är mer önskvärd än att återvinna då det skapar ett cirkulärt omlopp som kan vara mer självständigt.

Om asfalten i form av Recycled Asphalt Pavement kan tas tillvara på utan några större omvandlingar är det bättre än att återvinna en annan produkt. Trots att återanvändning är det primära målet kan återvinningen av andra produkter hjälpa till med detta som föryngringsmedel, vilket är positivt. När en annan produkt förädlas till ett annat syfte kräver dock detta omställningar i form av sammansättning och förändringar i produktionskedjan som kan skapa svårigheter, ta tid eller kosta extra pengar vilket bör tas i åtanke.

Trots att de flesta material som har tagits upp är restprodukter från andra processer kan det ske att materialen konkurrerar med andra branscher. Om biobindemedlet visar sig vara konkurrenskraftigt och kostnadseffektivt kan det resultera i att det krävs en större tillgång till restprodukten vilket konkurrerar med andra material. Exempel på detta är lignin som är en restprodukt från pappersmassaindustrin som kan ge en omvänd effekt där restprodukten kan få en högre efterfrågan medan efterfrågan på papper i form av böcker, tidningar etcetera minskar i takt med samhällets digitalisering. Då världens population ständigt ökar uppkommer en högre efterfrågan på matolja och därmed avfallet, vilket är en möjlighet att kunna använda det till biobitumen. Om produktionen av vägar gjort på matolja får genomslagskraft kan det i värsta fall konkurrera med livsmedelsbranschen vilket inte är hållbart. Detta gör att det krävs miljövänliga material som kan återanvändas utan att konkurrera med andra viktiga delar utav samhällspusslet.

6.1.3 Ekonomiskt

Det är svårt att säga hur samtliga material kan produceras i en större skala som hade behövts om det i framtiden är möjligt att anlägga vägar utav det och hur det i så fall hade påverkat andra faktorer. Det saknas tydliga studier på hur kostnadseffektiva de är vilket hade varit en förutsättning att komma underfund med, för att få ett livscykelperspektiv. När användandet utökas krävs en enhetlig bild på den totala nyttan jämfört med de negativa parametrarna/konsekvenserna för att få en helhetsbild över materialens möjligheter. Även om till exempel de hittills undersökta tekniska egenskaperna hos mikroalger visat på

stora likheter med petroleumbitumen, finns det i nuläget stora problem med en storskalig ekonomisk produktion där odling och skördning är mycket kostsamt.

Stora delar utav världen är bilberoende och de kräver drivmedel. Det är många av de material som står som framtida kandidater till att bli biobindemedel som har uppkommit genom forskningen på drivmedel. Forskningen hjälper andra delar som biobitumen med upptäckter samtidigt som de tävlar om ekonomiskt stöd. Det måste dock finnas vägar för att fordon skall kunna ta sig fram och de behöver vara hållbara för att vägnätet skall kunna förbättras i framtiden.

Det syntes i kapitlet, 3.12 om lignin att många ansöker om patent för att skydda de idéer som uppkommit under forskningens gång. Detta är en positiv bild av att det pågår en stor mängd forskning på ämnet men det kan eventuellt även hämma utvecklingen då många då tingar tillvägagångssätt.

6.2 Metoddiskussion

Biobitumen är ett brett och aktuellt ämne att utforska vilket gör det svårt att hitta information som utgår ifrån samma förutsättningar och tester. Världen försöker ställa om och en mängd olika egenskaper, förutsättningar och svårigheter finns och kan variera beroende på plats och tidpunkt.

När biobitumens egenskaper har undersökts har detta gjorts i olika mängd samt med varierande tillvägagångssätt vilket gör det svårt att granska. Hur tillvägagångssättet varit, i vilka miljöer det har skett samt i vilket utsträckning/bredd har en stor betydelse och har varit ojämnt fördelat. Detta har bidragit till att materialen har försökts jämföras på lika villkor trots att detta inte alltid varit möjligt.

Det finns en mängd olika tester som utforskar samma egenskaper men på olika sätt. Trots detta kan testernas resultat variera och kan inte alltid jämföras då förutsättningarna och enheter skilts för mycket åt.

Då biobitumen är ett nytt ämne finns det ett stort antal material och en bredd som gör att det uppstår svårigheter i vilka material som borde valts ut. Forskningen har i de flesta fall inte kommit tillräckligt långt för att kunna säga hur materialens egenskaper på sikt beter sig.

En möjlig alternativ metod hade kunnat vara att välja ut materialen så att de haft mer lika mätmetoder för de tekniska egenskaperna för att underlätta jämförelser. Det hade även varit möjligt att fokusera på antingen biobindemedel i jungfruligt bitumen eller biobindemedel som föryngringsmedel. Detta då deras uppgifter skiljer sig och därmed inte är helt jämförbara. Dock hade dessa tillvägagångssätt kunnat leda till en mindre bredd av material, samt att högaktuella biobindemedelsmaterial missats.

Då arbetet är baserat på en litteraturstudie, har tillgången på litteratur påverkat var fokus legat hos de olika materialen. Det har funnits olika mängd data om det tekniska, praktiska och miljömässiga hos olika material, vilket har lett till en ojämnhet i information i varje rubrik. För ett visst material har det kanske inte varit stort fokus på de praktiska aspekterna, på en annan kanske det inte varit fokus på miljöaspekter osv, vilket ytterligare försvårar jämförelser.

Vidare kan mängden information leda till en något skev bild av materialens för- och nackdelar i de olika aspekterna. Material som till exempel bekräftats ha en viss negativ egenskap kan verka sämre än material där det inte finns någon information om samma egenskap även om så inte behöver vara fallet. I vissa rapporter har dessutom inte nackdelar framhävts lika mycket som i andra. Detta behöver dock inte betyda att de materialen inte har negativa egenskaper bara för att författarna inte tagit upp det.

6.3 Slutsatser

Det finns en bred och stor mängd möjliga material som det forskas på i världen som är potentiella substitut till bitumen i olika mängd. De varierande förutsättningarna beroende på klimatet bidrar till att det framtida biobindemedlet behöver varierande egenskaper.

Biobindemedlens beteende och egenskaper liknar på flera sätt petroleumbaserat bitumen, men skiljer sig i vissa avseenden. Den enda data som har kunnat jämföras med svensk standard var mjukpunktsvärden och penetrationstal, vilka för de flesta av materialen passade in i något intervall för svensk standard.

Lignin och kräftskals tekniska styrkor är att de bidrar till minskad benägenhet för spårbildning, vilket även kan innebära lägre sprickmotstånd vid kalla temperaturer. Sojabönsolja, solrosolja, matoljeavfall och kaffesump bidrar till minskad risk för sprickbildning vid låga temperaturer, men ökar deformationsbenägenheten vid höga. Svingödsel visar på goda egenskaper både vid låga och höga temperaturer. Mikroalger och ek har testats självständigt och visar på liknande reologiska egenskaper som petroleumbaserat bitumen. Mikroalger visar på högre spårbildningsresistens än bitumen, och ek kan behöva polymermodifieras samt har stor benägenhet att spricka vid låga temperaturer. Lignin, svingödsel och matoljeavfall bidrar dessutom till minskad oxidation vilket gör de hållbara i längden.

Förutom reduktionen av petroleumbaserat bitumen, bidrar biobindemedel dessutom till fördelar gällande avfallshantering och förädling av biprodukter vilket gynnar miljön stort. Klimatmässigt bidrar dessutom vissa av biobindemedlen till mindre utsläpp vid uppvärmning. Ifall det kan fastslås att drift och underhåll inte påverkas bör biobindemedel ge fördelar för miljön.

De praktiska aspekterna behöver i många fall mer forskning, för att storskalig produktion ska kunna ske och vara lönsam i framtiden. Detta ses som ett problem hos framför allt mikroalger där produktionen i nuläget är mycket kostsam.

Än så länge har de olika biobindemedlen laborietestats med olika hög procentinblandning, men andelen biobindemedel som använts i testvägar är mycket låg förutom testvägar i Nederländerna med 50% lignin.

6.3.1 Rekommendationer för framtida undersökningar

Vid ytterligare studier och undersökningar på ämnet kan ett ännu bredare perspektiv tas alternativt ett annorlunda urval av biomaterial göras. Vilka aspekter som tas i anspråk vid undersökningen kan bytas ut samt forskas vidare på i en annan skala eller från andra perspektiv till exempel från en ekonomisk synvinkel alternativt ett livscykelanalysperspektiv. Tester på hur materialen beter sig som praktiska vägar och under ett längre tidsintervall är några av en mängd saker som behöver undersökas vidare.

Även potentialen att blanda olika biobindemedel för ett optimalt resultat bör undersökas vidare.

7 Referenser

- Agardh, S. & Parhamifar, E. (2014). *Vägbyggnad*. Stockholm: Liber AB
- Aishvarya V., Jena J., Pradhan N., Panda P. K. & Sukla L. B. (2015) Microalgae: Cultivation and Application. Sukla L. B., Pradhan N., Panda S., Mishra B. K. (red.) *Environmental Microbial Biotechnology* 45, 289–311. Cham: Springer https://doi.org/10.1007/978-3-319-19018-1_15
- Al-Mansoori, T., Norambuena-Contreras, J., Micaelo, R. & Garcia, A. (2017). Self-healing of asphalt mastic by the action of polymeric capsules containing rejuvenators. *Construction and Building Materials* 161(2018), 330-339. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.125>
- Al-Sabaei, A. M., Napiah, M. B., Sutanto, M. H., Alaloul, W. S. & Usman, A. (2019) A systematic review of bio-asphalt for flexible pavement applications: Coherent taxonomy, motivations, challenges and future directions. *Journal of Cleaner Production*, 249(2020), 119357. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119357>
- Arafat, S., Kumor, N., Wasiuddin, N. M., Owhe, E. O & Lynam, J. G. (2019). Sustainable lignin to enhance asphalt binder oxidative aging properties and mix properties. *Journal of Cleaner Production* 217(2019) 456-468. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.238>
- Arya, M. & Rao, L. J. M. (2010). An Impression of Coffee Carbohydrates. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 47(1), 51-67. <https://doi.org/10.1080/10408390600550315>
- Asli, H., Ahmadinia, E., Zargar, M. & Karim, M. R. (2012). Investigation on physical properties of waste cooking oil – Rejuvenated bitumen binder. *Construction and Building Materials* 37(2012), 398-405. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.042>
- Asukar, S. D., Behl, A. & Gundaliya, P. J. (2016). Utilization of Lignin as an Antioxidant in Asphalt Binder. *International Journal of Innovative Research in Technology* 143626, 2(12), 198-207. http://ijirt.org/master/publishedpaper/IJIRT143626_PAPER.pdf
- Asphalt Institute (2011). *The Asphalt Binder Handbook*. MS-26, 1st edition. Lexington, Kentucky: Asphalt Institute.
- Audo, M., Paraschiv, M., Queffélec, C., Louvet, I., Hémez, J., Franck, F., Lépine, O., Legrand, J., Tazerout, M., Chailleux, E. & Bujoli, B. (2015) Subcritical Hydrothermal Liquefaction of Microalgae Residues as a Green Route to Alternative Road Binders. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* 3(4), 583–590. <http://dx.doi.org/10.1021/acssuschemeng.5b00088>
- Aziz, M. M. A., Rahman, M. T., Hainin, M. R. & Bakar, W. A. W. A. (2015). An overview on alternative binders for flexible pavement. *Construction and Building Materials* 84(2015), 315-319. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.068>
- Bajwa, D. S., Pourhashem, G., Ullah, A. H & Bajwa, S. G. (2019). A concise review of current lignin production, applications, products and their environmental impact. *Industrial Crops & Products* 139 (2019) 111526. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111526>

- Bal, C., Ağış, E. R., Büyükşekerci, M., Gündüzöz, M., Tutkun, L., Yılmaz, Ö. H. (2018). Occupational exposure to asphalt fumes can cause oxidative DNA damage among road paving workers. *American Journal of Industrial Medicine* 2018 juni, 61(6) 471–476. <https://doi.org/10.1002/ajim.22830>
- Baumgardner, G. L. & Rowe, G. M. (2007) Specifications for Roofing and Industrial Asphalts Using Dynamic Shear Rheometry (DSR). *Journal of ASTN International*, 4(8). <https://doi.org/10.1520/JAI101044>
- Benham, P. P., Crawford, R. J. & Armstrong, C. G. (1996). *Mechanics of Engineering Materials, 2nd edition*. Harlow: Pearson Education Limited.
- Besamusca, J., Landa, P., Zoetemeyer, R., Gosselink, R., Lommers, B., Junginger, M. & Verschuren, M. (2020). The use of lignin as bio-binder in asphalt applications. *7th Euroasphalt & Eurobitume congress*. Bryssel: European Asphalt Pavement Association.
- Binet, S., Pfohl-Leszkowicz, A., Brandt, H., Lafontaine, M. & Castegnaro, M. (2002) Bitumen fumes: review of work on the potential risk to workers and the present knowledge on its origin. *The Science of the Total Environment* 300 (2002) 37-49. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(02\)00279-6](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(02)00279-6)
- Borghol, I., Chailleux, E., Bujoli, B., Queffelec, C., Legrand, J., Drouin, D. & Lombard, C. (2018a) *Hydrothermal liquefaction of microalgae to produce a bio-binder: feedstock type influence*. Lino Lakes Minneapolis: International Society for Asphalt Pavements. https://www.researchgate.net/publication/325146255_Hydrothermal_liquefaction_of_microalgae_to_produce_a_bio-binder_feedstock_type_influence
- Borghol, I., Queffélec, C., Bolle, P., Descamps, J., Lombard, C., Lépine, O., Kucma, D., Lorentz, C., Laurenti, D., Montouillout, V., Chailleux, E. & Bujoli, B. (2018b) Biosourced analogs of elastomer-containing bitumen through hydrothermal liquefaction of *Spirulina* sp. Microalgae residues. *Green Chemistry*, 2018, 20(10), 2337-2344. <https://doi-org.ludwig.lub.lu.se/10.1039/C8GC00094H>
- Çelik, A., Yildirim, S., Ekinci, S. Y. & Taşdelen, B. (2013). Bio-monitoring for the genotoxic assessment in road construction workers as determined by the buccal micronucleus cytome assay. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 92 (2013) 265-270. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoenv.2013.01.030>
- Chailleux, E., Audo, M., Bujoli, B., Queffelec, C., Legrand, J., Lépine, O. (2012) Alternative Binder from Microalgae – Algoroute Project. Transportation Research circular E-C165. *Alternative Binders for Sustainable Asphalt Pavements, 13-20*. Washington, D. C: Transportation Research board. <http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/circulars/ec165.pdf>
- Chisti, Y. (2010) Fuels from microalgae. *Biofuels*, 1(2), 233-235. <https://doi.org/10.4155/bfs.10.9>
- Colas (2005). *Végécol: Liant Végétal*. Notice Technique. Paris: Colas Group.
- Dansk Overfladebelægning (u.å.). *Miljøvenlige belægnings – for vores fælles fremtid*. (Elektronisk) Tillgänglig: <https://dob.dk/project/miljoevenlige-belaegninger/> [hämtad: 2021-05-07]
- Deshpande, S. D., Bal, S. & Ojha, T. P. (1993). Physical Properties of Soybean. *Journal of Agricultural Engineering Research* 56(2), 89-98. <https://doi.org/10.1006/jaer.1993.1063>
- Dessbesell, L., Paleologou, M., Leitch, M., Pulkki, R. & Xu, C. (2020). Global lignin supply overview and kraft lignin potential as an alternative for petroleum-based polymers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 123(2020) 109768. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109768>

- Elkashaf, M., Podolsky, J., Williams, R.C. & Cochran, E.W. (2018). Introducing a soybean oil-derived material as a potential rejuvenator of asphalt through rheology, mix characterisation and Fourier Transform Infrared analysis. *Road Materials and Pavement Design*, 19(8), 1750-1770. <https://doi.org/10.1080/14680629.2017.1345781>
- Eurobitume (u.å.). *Bitumen comes in many forms*. (Elektronisk) Tillgänglig: <https://www.eurobitume.eu/feature-production/> [hämtad: 2021-02-05]
- European Asphalt Pavement Association (2018). *Recommendations for the use of rejuvenators in hot and warm asphalt production*. (Elektronisk) Brussels: European Asphalt Pavement Association. <https://eapa.org/wp-content/uploads/2018/08/TC-18-N1155-EAPA-Rejuvenators-Paper-Long-version-for-EAPA-Members-Only.pdf> [hämtad: 2021-02-05]
- European Asphalt Pavement Association & National Asphalt Pavement Association (2009). *The Asphalt Paving Industry: A Global Perspective: Production, Use, Properties, and Occupational Exposure Reduction Technologies and Trends*. Brussels: European Asphalt Pavement Association.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (2020a). *Number of pigs, 2018*. (Elektronisk) <https://ourworldindata.org/grapher/pig-livestock-count-heads> [hämtad: 2021-04-19]
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (2020b). *Soybean production*. (Elektronisk) <https://ourworldindata.org/grapher/soybean-production?tab=chart> [hämtad: 2021-04-14]
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (2020c). *Soybean production, 2018*. (Elektronisk) <https://ourworldindata.org/grapher/soybean-production> [hämtad: 2021-04-14]
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (2020d). *Sunflower seed production, 1961 to 2018*. (Elektronisk) <https://ourworldindata.org/grapher/sunflower-seed-production?tab=chart> [hämtad: 2021-04-14]
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (2020e). *Sunflower seed production, 2018*. (Elektronisk) <https://ourworldindata.org/grapher/sunflower-seed-production> [hämtad: 2021-04-14]
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (2020f). *The State of World Fisheries and Aquaculture 2020. Sustainability in Action*. Rome. <https://doi.org/10.4060/ca9229en>
- Fini, E. H. (2016) Producing a Sustainable, Bio-Based Alternative to Petroleum-Based Asphalt Binder. *NCHRP IDEA-171- Final Report*. Washington, DC: Transportation Research Board. http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/IDEA/FinalReports/Highway/NCHRP171_Final_Report.pdf
- Fini, E. H., Al-Qadi, I. L., You, Z., Zada, B. & Mills-Beale, J. (2012) Partial replacement of asphalt binder with bio-binder: characterisation and modification, *International Journal of Pavement Engineering*, 13(6), 515-522. <https://doi.org/10.1080/10298436.2011.596937>
- Fini, E. H., Hosseinezhad, S., Oldham, D. J, Chailleux, E. & Gaudefroy, V. (2017) Source dependency of rheological and surface characteristics of bio-modified asphalts. *Road Materials and Pavement Design*, 18(2), 408-424. <https://doi.org/10.1080/14680629.2016.1163281>
- Fini, E. H., Kalberer, E. W., Shahbazi, A., Basti, M., You, Z., Ozer, H & Aurangzeb, Q. (2011) Chemical Characterization of Biobinder from Swine Manure: Sustainable Modifier for Asphalt Binder. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(11), 1506-1513. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000237](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000237)

- Flisberg, P., Frisk, M. & Rönnqvist, M (2012). FuelOpt: a decision support system for forest fuel logistics. *Journal of the Operational Research Society*, 63(11), 1600-1612, <https://doi.org/10.1057/jors.2011.157>
- Freepik, Designed by Layerace (2016). *Blue world map design Free Vector*. (Elektronisk) Tillgänglig: https://www.freepik.com/free-vector/blue-world-map-design_893721.htm#page=1&query=world%20map&position=3 [hämtad: 2021-05-03]
- Freepik, Designed by brgfx (2020) *Crude Oil Distillation Process*. (Elektronisk) Tillgänglig: https://www.freepik.com/free-vector/crude-oil-distillation-process-isolated-white-background_10804995.htm#page=1&query=oil%20distillation&position=1 [hämtad: 2021-03-16]
- Garcia, A., Jelfs, J. & Austin, C. J. (2015). Internal asphalt mixture rejuvenation using capsules. *Construction and Building Materials* 101(2015), 309-316. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.062>
- García, Á., Schlangen, E., van de Ven, M. & Sierra-Beltrán, G. (2010). Preparation of capsules containing rejuvenators for their use in asphalt concrete. *Journal of Hazardous Materials* 184(2010), 603-611. <https://doi-org.ludwig.lub.lu.se/10.1016/j.jhazmat.2010.08.078>
- Gellerstedt, G. (2015). Softwood kraft lignin: Raw material for the future. *Industrial Crops and Products* 77(2015), 845-854. <https://doi-org.ludwig.lub.lu.se/10.1016/j.indcrop.2015.09.040>
- Globala målen (2020). *Om Globala målen*. (Elektronisk) Tillgänglig: <https://www.globalamalen.se/om-globala-malen/> [hämtad: 2021-01-26]
- Gosselink, R. (2011). *Lignin as a renewable aromatic resource for the chemical industry*. PhD Thesis, Wageningen University. Wageningen, Netherlands. <https://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/fulltext/186285>
- Halim, R., Harun, R., Danquah, M. K. & Webley, P. A. (2011) Microalgal cell disruption for biofuel development. *Applied Energy*, 91(2012), 116-121. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.08.048>
- Hamed, I., Özogul, F. & Regenstein, J. M. (2015) Industrial applications of crustacean by-products (chitin, chitosan, and chitooligosaccharides): A review. *Trends in Food Science & Technology*, 48(2016), 40-50. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tifs.2015.11.007>
- Hassouneh, I., Serra, T., Goodwin, B.K. & Gil, J.M. (2012) Non-parametric modeling of biodiesel, sunflower oil, and crude oil price relationships. *Energy Economics*, 34(5), 1507-1513. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2012.06.027>
- He, M., Tu, C., Cao, D. W. & Chen, Y. J. (2019). Comparative analysis of bio-binder properties derived from different sources. *International Journal of Pavement Engineering* 20(7), 792-800. <https://doi.org/10.1080/10298436.2017.1347434>
- Huang, S-C., Salomon, D. & Haddock, J.E. (2012). Workshop Introduction. Transportation Research circular E-C165. *Alternative Binders for Sustainable Asphalt Pavements, I*. Washington, D. C: Transportation Research board.
- Ingrassia, L. P., Lu, X., Ferrotti, G. & Canestrari, F. (2019). Renewable materials in bituminous binders and mixtures: Speculative pretext or reliable opportunity? *Resources, Conservation & Recycling* 144 (2019) 209-222. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.01.034>

- International Coffee Organization. (ICO) (2021). *Coffee Market Report – February 2021*. (Elektronisk) <http://www.ico.org/documents/cy2020-21/cmr-0221-e.pdf> [hämtad: 2021-03-09]
- Iowa State University. (2010). *Bioasphalt® developed at Iowa State to be used, tested on Des Moines bike trail*. (Elektronisk) Tillgänglig: <https://www.news.iastate.edu/news/2010/oct/Bioasphalt> [hämtad: 2021-04-28]
- Jalkh, R. M. (2016). *Oil extracts from spent coffee grounds and waste cooking oil to modify the physical properties of recycled asphalt binder*. Beirut: American University of Beirut, Avd. f. Nutrition and Food Sciences. Institution Agricultural and Food Sciences. <https://scholarworks.aub.edu.lb/bitstream/handle/10938/11153/st-6456.pdf?sequence=1>
- Jalkh, R., El-Rassy, H., Chehab, G. R. & Abiad, M. G. (2017). Assessment of Physio-Chemical Properties of Waste Cooking Oil and Spent Coffee Grounds Oil for Potential Use as Asphalt Binder Rejuvenators. *Waste Biomass Valor* 9(2018), 2125-2132. <https://doi.org/10.1007/s12649-017-9984-z>
- Jena, U. & Das, K. C. (2011) Comparative Evaluation of Thermochemical Liquefaction and Pyrolysis for Bio-Oil Production from Microalgae. *Energy Fuels* 2011 25(11), 5472–5482. <https://doi.org/10.1021/ef201373m>
- Jocić, S., Miladinović, D. & Kaya, Y. (2015). 1. Breeding and Genetics of Sunflower. Martinez-Force, E., Dunford, N. T. & Salas, J. J. (red.), *Sunflower – Chemistry, Production, Processing, and Utilization*, 1-25. AOCS Press: Urbana, Illinois. <https://doi.org/10.1016/B978-1-893997-94-3.50007-6>
- Kai, D., Tan, M. J., Chee, P. L., Chua, Y. K., Yap, Y. L & Loh, X. J (2016). Towards lignin-based functional materials in a sustainable world. *Green Chemistry*, 2016, 18(2016), 1175-1200. <https://doi-org.ludwig.lub.lu.se/10.1039/C5GC02616D>
- Kandra, P., Challa, M. M. & Jyothi, H. K. P. (2011). Efficient use of shrimp waste: present and future trends. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 93(2012), 17-29. <https://doi.org/10.1007/s00253-011-3651-2>
- Karnati, S. R., Oldham, D., Fini, E. H. & Zhang, L. (2020) Surface functionalization of silica nanoparticles with swine manure-derived bio-binder to enhance bitumen performance in road pavement. *Construction and Building Materials*, 266(2021) 121000. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121000>
- Kerton, F. M. & Yan, N. (2017) *Fuels, Chemicals and Materials from the Oceans and Aquatic Sources*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons.
- Kluttz, R. (2012). Considerations for Use of Alternative Binders in Asphalt Pavements – Material characteristics. Transportation Research circular E-C165. *Alternative Binders for Sustainable Asphalt Pavements*, 8-12. Washington, D. C: Transportation Research board. <http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/circulars/ec165.pdf>
- Laurell Lyne, Å. & Trädgårdh, J. (2018). *Vidhäftningsegenskaper i asfaltsbeläggningar – Karaktärisering av delmaterial. Rapport: 13191*. Stockholm: SBUF, Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond.
- Le Clef, E. & Kemper, T. (2015). 8. *Sunflower Seed Preparation and Oil Extraction*. Martinez-Force, E., Turgut Dunford, N. & Salas, J. J. (red.), *Sunflower: Chemistry, Production, Processing, and Utilization*, 187-226. AOCS Press: Urbana Illinois. <https://doi.org/10.1016/B978-1-893997-94-3.50007-6>
- Lee, A. F., Bennett, J. A., Manayil, J. C. & Wilson, K. (2014). Heterogeneous catalysis for sustainable biodiesel production via esterification and transesterification. *Chemical Society Reviews*, 43(2014), 7887-7916. <https://doi-org.ludwig.lub.lu.se/10.1039/C4CS00189C>

- Li, C., Zhao, X., Wang, A., Huber, G. W. & Zhang, T. (2015). Catalytic Transformation of Lignin for the Production of Chemicals and Fuels. *Chemical Reviews* 115(2015), 11559-11624. <http://dx.doi.org/10.1021/acs.chemrev.5b00155>
- Li, J., Zhang F., Liu, Y., Muhammad, Y., Su, Z., Meng, F. & Chen, X. (2019). Preparation and properties of soybean bio-asphalt/SBS modified petroleum asphalt. *Construction and Building Materials* 201(2019), 268-277. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.206>
- Ligno City 2.0. (2020). *Sverige har fått sin första klimatsmarta ligninväg asfalterad*. (Elektronisk) Tillgänglig: <https://lignocity.se/artiklar/sverige-har-fatt-sin-forsta-klimatsmarta-ligninvag-asfalterad/> [hämtad: 2021-04-28]
- Luo, H. & Abu-Omar, M. M. (2017). Chemicals from Lignin. *Encyclopedia of Sustainable Technologies* 3(2017), 573-585. <https://doi-org.ludwig.lub.lu.se/10.1016/B978-0-12-409548-9.10235-0>
- Lv, S., Xia, C., Yang, Q., Guo, S., You, L., Guo, Y., Zheng, J. (2020) Improvements on high-temperature stability, rheology, and stiffness of asphalt binder modified with waste crayfish shell powder. *Journal of Cleaner Production*, 264(2020), 121745. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121745>
- Maharaj, R., Ramjattan-Harry, V. & Mohamed, N. (2015). Rutting and Fatigue Cracking Resistance of Waste Cooking Oil Modified Trinidad Asphaltic Materials. *The Scientific World Journal* 2015, 1-7. <https://doi.org/10.1155/2015/385013>
- Makara, A. & Kowalski, Z. (2017) Selection of pig manure management strategies: Case study on Polish farms. *Journal of Cleaner Production*, 172(2018), 187-195. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.095>
- Marx, S., Venter, R., Karmee, S. K., Louw, J. & Truter, C. (2020). Biofuels from spent coffee grounds: comparison of processing routes. *Biofuels*. <https://doi.org/10.1080/17597269.2020.1793538>
- Mascarelli, A. L. (2009) Algae: fuel of the future? *Environmental Science & Technology* 2009, 43(19), 7160-7161. <https://doi.org/10.1021/es902509d>
- Math, M. C., Kumar, S. P. & Chetty, S. V. (2010). Technologies for biodiesel production from used cooking oil – A review. *Energy for Sustainable Development* 14(2010), 339-345. <http://dx.doi.org/10.1016/j.esd.2010.08.001>
- Masuda, T. & Goldsmith, P. D. (2009). Worlds Soybean Production: Area Harvested, Yield, and Long-Term Projections, *International Food and Agribusiness Management Review* 12(4), 2009. <http://dx.doi.org/10.22004/ag.econ.92573>
- McNutt, J. & He, Q. (2018). Spent coffee grounds: A review on current utilization. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* 71 (2019), 78-88. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2018.11.054>
- Mills-Beale, J., You, Z., Fini, E., Zada, B., Lee, C. H. & Yap, Y. K. (2014) Aging Influence on Rheology Properties of Petroleum-Based Asphalt Modified with Biobinder. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 26(2), 358-366. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000712](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000712)
- Miljömålsrådet (2020). Miljömålsrådets gemensamma åtgärdslista, årsrapport 2020. Stockholm: Naturvårdsverket. <https://sverigesmiljomal.se/contentassets/7d5ef45c745e4addacc4610575bcd9fa/miljomalsradets-atgardslista-2020.pdf>

- Mohamed Metwally, M. A. R. & Williams, R. C. (2010) Development of Non-Petroleum Based Binders for Use in Flexible Pavements. *InTrans Project Reports. 17*. https://lib.dr.iastate.edu/intrans_reports/17
- Mohan, D., Pittman Jr, C. U. & Steele, P. H. (2006). Pyrolysis of Wood/Biomass for Bio-oil: A Critical Review. *Energy & Fuels* 2006,, 20(3), 848–889. <https://doi.org/10.1021/ef0502397>
- Mussatto, S. I., Machado, E. M. S., Martins, S. & Teixeira, J. A. (2011). Production, Composition, and Application of Coffee and Its Industrial Residues. *Food Bioprocess Technol* 4 (2011), 661-672. <https://doi.org/10.1007/s11947-011-0565-z>
- Muylaert, K., Bastiaens, L., Vandamme, D. & Gouveia, L. (2017). Harvesting of microalgae: Overview of process options and their strengths and drawbacks. I: Gonzalez-Fernandez, C. & Muñoz, R. *Microalgae-based Biofuels and Bioproducts*, 113-132. Woodhead Publishing Series in Energy. Woodhead publishing: Cambridge. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101023-5.00005-4>
- Nationalencyklopedin (u.å.a) *Ek*. (Elektronisk) Tillgänglig: <https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/l%C3%A5ng/ek> [hämtad: 2021-04-08]
- Nationalencyklopedin (u.å.b) *Fluiditet*. (Elektronisk) Tillgänglig: <https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/l%C3%A5ng/fluiditet> [hämtad: 2021-04-19]
- Naturskyddsföreningen (2018). Faktablad: *Energikällor. Om förnybara och icke förnybara energikällor*. (Elektronisk) Tillgänglig: <https://www.naturskyddsforeningen.se/skola/energifallet/faktablad-energikallor> [hämtad: 2021-02-11]
- Naturvårdsverket (2021). *Hållbar bioenergi*. (Elektronisk) Tillgänglig: <https://www.naturvardsverket.se/Miljoarbete-i-samhallet/Miljoarbete-i-Sverige/Uppdelat-efter-omrade/Energi/Bioenergi/> [hämtad: 2021-02-11]
- Okoro, V., Azimov, U., Munoz, J., Hernandez, H. H. & Phan, A. N. (2019) Microalgae cultivation and harvesting: Growth performance and use of flocculants – a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 115(2019) 109364. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109364>
- Pahlavan, F., Rajib., A., Deng, S., Lammers, P. & Fini, E. H. (2020) Investigation of Balanced Feedstocks of Lipids and Proteins To Synthesize Highly Effective Rejuvenators for Oxidized Asphalt. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 8(20), 7656–7667. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c01100>
- Peab asfalt. (u.å.). *Nu läggs första asfalten med skogens eget bindemedel*. (Elektronisk) Tillgänglig: <https://peabasfalt.se/utveckling/nu-laggs-forsta-asfalten-med-skogens-eget-bindemedel/> [hämtad: 2021-04-28]
- Peralta, J., Williams, R. C., Silva, H. M. R. D. & Machado, A. V. A. (2014) Recombination of Asphalt with Bio-Asphalt: Binder Formulation and Asphalt Mixes Application. *Civil, Construction and Environmental Engineering Conference Presentations and Proceedings 77*. Iowa: Iowa state University. https://lib.dr.iastate.edu/ccee_conf/77
- Peralta, J., Raouf, M. A., Tang, S. & Williams, R. C. (2012). Bio-Renewable Asphalt Modifiers and Asphalt Substitutes. Gopalakrishnan, K., van Leeuwen, J., Brown, R. C. (red) *Sustainable Bioenergy and Bioproducts – Value Added Engineering Applications*. *Green Energy and Technology*. London: Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-2324-8_6
- Phønix Contractors A/S (1995). *Vejbygning: -Materialer, -Befæstelser, - Belægninger*. 3:e utgåvan. Phønix Contractors A/S.

- Pacific Northwest National Laboratory (2007). Top Value-Added Chemicals from Biomass – Volume II: Results of Screening for Potential Candidates from Biorefinery Lignin. *United States department of energy*. Tillgänglig: https://www.pnnl.gov/main/publications/external/technical_reports/PNNL-16983.pdf [hämtad: 2021-02-05]
- Portugal, A. C. X., de Figueirêdo Lopes Lucena, L. C., de Figueirêdo Lopes Lucena, A. E. & da Costa, D. B. (2016). Rheological performance of soybean in asphalt binder modification. *Road Materials and Pavement Design*, 2018, 19(4), 768-782. <https://doi.org/10.1080/14680629.2016.1273845>
- Popov, E.P. (1976) *Mechanics of Materials*. Second edition. Prentice-Hall International Editions. New Jersey: Prentice-Hall, Inc.
- Preem (2017) *Snart kan du tanka bilen med sågspån*. (Elektronisk) Tillgänglig: <https://www.preem.se/om-preem/insikt-kunskap/2017/snart-kan-du-tank-a-bilen-med-sagspan/> [hämtad: 2021-04-08]
- Queffelec, C., Chailleux, E., Borghol, I., Bujoli, B., Laurenti, D., Geantet, C., Guilhaume, N & Lombard, C. (2019) Hydrothermal conversion of micro-algae as new biomaterials for pavement. Proceedings from *Pyroliq 2019: Pyrolysis and Liquefaction of Biomass and Wastes*. New York: Engineering Conferences International (ECI) Symposium Series. https://dc.engconfintl.org/pyroliq_2019/13
- Rahman, N. A. A., Hainin, M. R., Hassan, N.A. & Ani, F.N. (2015) A Review on the Application of Bio-oil as an Additive for Asphalt. *Jurnal Teknologi (Science & Engineering)* 72(5), 105–110. <http://dx.doi.org/10.11113/jt.v72.3948>
- Rajib, A. I., Pahlavan, F. & Fini, E. H. (2020) Investigating molecular-level factors that affect the durability of restored aged asphalt binder. *Journal of Cleaner Production*, 270(2020), 122501. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122501>
- Ralph, J., Brunow, G. & Boerjan, W. (2007). *Lignins*. Chichester, United Kingdom: John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9780470015902.a0020104>
- Randrianarison, G. & Ashraf, M. A. (2017) Microalgae: a potential plant for energy production. *Geology, Ecology, and Landscapes*, 1(2), 104–120. <https://doi.org/10.1080/24749508.2017.1332853>
- Raouf, M. A. & Williams, R. C. (2010) Temperature and Shear Susceptibility of a Nonpetroleum Binder as a Pavement Material. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2180(1), 9-18. <https://doi.org/10.3141/2180-02>
- Regeringskansliet (2015). *Sveriges arbete med Agenda 2030*. (Elektronisk) Tillgänglig: <https://www.regeringen.se/regeringens-politik/globala-malen-och-agenda-2030/globala-mal-for-hallbar-utveckling/> [hämtad: 2021-01-26]
- Saberian, M., Li, J., Donnoli, A., Bonderenko, E., Oliva, P., Gill, B., Lockrey, S. & Siddique, R. (2021). Recycling of spent coffee grounds in construction materials: A review. *Journal of Cleaner Production* 289(2021) 125837. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.125837>
- Samieadel, A., Schimmel, K. & Fini, E. H. (2017) Comparative life cycle assessment (LCA) of bio-modified binder and conventional asphalt binder. *Clean Technologies and Environmental Policy* (2018) 20, 191-200. <https://doi.org/10.1007/s10098-017-1467-1>
- Sanz Requena, J. F., Guimaraes, A. C., Quirós Alpera, S., Relea Gangas, E., Hernandez-Navarro, S., Navas Gracia, L. M., Martin-Gil, J. & Fresneda Cuesta, H. (2010). Life Cycle Assessment (LCA) of the biofuel

- production process from sunflower oil, rapeseed oil and soybean oil. *Fuel Processing Technology* 92 (2011), 190-199. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuproc.2010.03.004>
- Schmidt Rivera, X. C., Gallego-Schmid, A., Najsanovic-Visak, V. & Azapagic, A. (2020). Life cycle environmental sustainability of valorisation routes for spent coffee grounds: From waste to resources. *Resources, Conservation & Recycling* 157(2020) 104751. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104751>
- Sekab (u.å.). *Skogsrester bästa chansen för flyget att bli hållbart*. (Elektronisk) Tillgänglig: <https://www.sekab.com/sv/produkter-tjanster/produkt/projekt-rewofuel/>. [hämtad: 2021-04-29]
- Shell (2021). *Shell accelerates drive for net-zero emissions with customer-first strategy*. (Elektronisk) Tillgänglig: <https://www.shell.com/media/news-and-media-releases/2021/shell-accelerates-drive-for-net-zero-emissions-with-customer-first-strategy.html> [hämtad: 2021-03-16]
- Shell Bitumen (2003). *The Shell Bitumen Handbook*. 5:e utgåvan. Thomas Telford Publishing: London.
- Shirzad, S., Hassan, M. M., Aguirre, M. A., Mohammad, L. N., Cooper, S. & Negulescu, I. I. (2017). Microencapsulated Sunflower Oil for Rejuvenation and Healing of Asphalt Mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering* 2017, 29(9): 04017147-1-9. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001988](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001988)
- Silvia, M. A., Nebra, S. A., Machado, S. & Sanchez, C. G. (1998). The use of biomass residues in the Brazilian soluble coffee industry. *Biomass and Bioenergy* 14(5/6), 457-467. [https://doi-org.ludwig.lub.lu.se/10.1016/S0961-9534\(97\)10034-4](https://doi-org.ludwig.lub.lu.se/10.1016/S0961-9534(97)10034-4)
- Skanska. (2020). *Vägen är utstakad mot klimatneutral asfalt*. (Elektronisk) Tillgänglig: <https://www.skanska.se/om-skanska/press/nyheter/vagen-ar-utstakad-mot-klimatneutral-asfalt/> [hämtad: 2021-04-28]
- Statista. (2020) *Number of pigs worldwide in 2020, by leading country (in million head)* (Elektronisk) Tillgänglig: <https://www.statista.com/statistics/263964/number-of-pigs-in-selected-countries/> [hämtad: 2021-03-03]
- Steyn, W. J., Coetzee, A. & Welham, H. (2014) Evaluation of swine manure stabilizer on selected pavement material. Losa, M. & Papagiannakis, T. (Red.). *Sustainability, Eco-efficiency and Conservation in Transportation Infrastructure Asset Management 1st edition*. Leiden: CRC Press, Taylor & Francis Group. <https://doi.org/10.1201/b16730>.
- Stora Enso. (2020). *Lineo™ by Stora Enso tested in asphalt on Swedish roads*. (Elektronisk) Tillgänglig: <https://www.storaenso.com/en/newsroom/news/2020/10/lignin-tested-in-asphalt-on-swedish-roads> [hämtad: 2021-04-28]
- Strassberger, Z., Tanase, S. & Rothenberg, G. (2014). The pros and cons of lignin valorisation in an integrated biorefinery.. *The Royal Society of Chemistry Advances* 4(2014), 25310-25318. <https://doi.org/10.1039/C4RA04747H>
- Stripple, H. (2001). Life cycle analysis of road; A pilot study for inventory analysis, 2nd revised edition. Göteborg, Sverige: *Swedish Environmental Research Institute (IVL)*. <https://www.ivl.se/download/18.34244ba71728fcb3f3f57f/1591704221839/B1210E.pdf>
- Su, J-F., Wang, Y-Y., Han, N-X., Yang, P. & Han, S. (2015). Experimental investigation and mechanism analysis of novel multi-self-healing behaviors of bitumen using microcapsules containing rejuvenator. *Construction and Building Materials* 106(2016), 317-329. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.120>

- Su, N., Xiao, F., Wang, J., Cong, L. & Amirhanian, S. (2018). Productions and applications of bio-asphalts – A review. *Construction and Building Materials* 183 (2018), 578-591.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.118>
- Sun, G., Zhang, J., Tan, X., Guo, D., Zhou, Y. & Guan, Y. (2020). Evaluation of conventional technical properties and self-healing ability of bitumen-based sealants containing sunflower-oil microcapsules for pavement cracks. *Construction and Building Materials* 254(2020) 119299.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119299>
- Swedish Institute for Standards (2000). Bitumen and bituminous binders – Determination of dynamic viscosity by vacuum capillary. Rapport: SS-EN 12596 (2000:05)
- Swedish Standards Institute (2015a). *Bitumen and bituminous binders – Determination of needle penetration*. Rapport: SS-EN 1426:2015 (2015:10)
- Swedish Standards Institute (2015b). Bitumen and bituminous binders – Determination of the softening point – Ring and Ball method. Rapport: SS-EN 1427:2015 (2015:10)
- Swedish Standards Institute (2015c). *Bitumen and bituminous binders – Determination of the Fraass braking point*. Rapport: SS-EN 12593:2015 (2015:10).
- Tabacović, A. (2020) Bio Binder – Innovative Asphalt Technology. *Applied Science* 2020 10(23), 8655.
<https://doi.org/10.3390/app10238655>
- Tarar, M.A., Khan, A.H., ur Rehman, Z., Qamar, S. & Akhtar, M.N. (2020) Compatibility of sunflower oil with asphalt binders: a way toward materials derived from renewable resources. *Materials and Structures* (2020), 53(64). <https://doi.org/10.1617/s11527-020-01506-8>
- Tokede, O. O., Whittaker, A., Mankaa, R. & Traverso, M. (2020). Life cycle assessment of asphalt variants in Infrastructures: The case of lignin in Australian road pavements. *Structures* 25(2020), 190-199.
<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.02.026>
- Tokimoto, T., Kawasaki, N., Nakamura, T., Akutagawa, J. & Tanada, S. (2004). Removal of lead ions in drinking water by coffee grounds as vegetable biomass. *Journal of Colloid and Interfaces Science* 281 (2005), 56-61. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2004.08.083>
- Trafikanalys (2021). *Fordon på väg: Gör ditt eget statistikurval*. (Elektronisk) Tillgänglig:
<https://www.trafa.se/vagtrafik/fordon/?cw=1&q=t10016|ar|itrfslut~barchart> [hämtad: 2021-02-01]
- Trafikverket (2014). *Val av beläggning – Kunskapsdokument*. Publikationsnummer: 2014:173. Borlänge.
- Trafikverket (2015). *Krav Bitumenbundna lager*. Rapport: TDOK 2013:0529 (2015:11). Borlänge
- Trafikverket (2017). *Ett inkluderande samhälle – PM till Nationell plan för transportsystemet 2018-2029*. Publikationsnummer: 2017:159 (2017:08). Borlänge.
- Tucker, C. M. (2017). *Coffee Culture: Local Experiences, Global Connections*, 2nd Edition. New York: Routledge, Taylor & Francis.
- United States Environmental Protection Agency (u.å.) *Ocean Disposal of Fish Waste*. (Elektronisk) Tillgänglig:
<https://www.epa.gov/ocean-dumping/ocean-disposal-fish-wastes> [hämtad: 2021-04-06]

- Upton, B. M & Kasko, A. M. (2015). Strategies for the Conversion of Lignin to High-Value Polymeric Materials: Review and Perspective. *American Chemical Review* 2016, 116(4) 2275-2306. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.5b00345>
- Uz, V. E. & Gökalp, I. (2020). Sustainable recovery of waste vegetable cooking oil and aged bitumen: Optimized modification for short and long term aging cases. *Waste Management* 110(2020), 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.05.012>
- Vandamme, D., Foubert, I. & Muylaert, K. (2013). Flocculation as a low-cost method for harvesting microalgae for bulk biomass production. *Trends in Biotechnology*. 31(4), 233-239. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2012.12.005>
- Van Eys, J. E. (2004). Manual of Quality Analyses – For Soybean Products in the Feed Industry. 2nd edition. U.S. Soybean Export Council (USSED). Fourqueux: GANS Inc <https://ussec.org/wp-content/uploads/2012/09/Manual-of-Quality-Analyses-2nd-edition.pdf>
- Van Vliet, D., Slaghek., Geizen, C. & Haaksman, I. (2016) Lignin as a green alternative for bitumen, 6th *Euroasphalt & Eurobitume Congress*. Brussels: European Asphalt Pavement Association . [dx.doi.org/10.14311/EE.2016.159](https://doi.org/10.14311/EE.2016.159)
- Världsnaturfonden (2016). *Cascading use of wood products*. (Elektronisk) Tillgänglig: <https://www.wwf.eu/?263091/Cascading-use-of-wood-products-report> [hämtad: 2021-04-08]
- Wang, H., Ma, Z., Chen., X. & Hasan, M. R. M (2020a). 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* 2020, 7(2), 137-151. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2020.03.002>
- Wang, H., Wang, L., Zhang, J., Jing, Y & Cao, Y. (2020b) Effect of pyrolysis temperature and reaction time on the performance of swine-manure-derived bio-binder. *Transportation Research part D: Transport and Environment*, 89(2020), 102608. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102608>
- Wen, H., Bhusal, S. & Wen, B. (2013). Laboratory Evaluation of Waste Cooking Oil-Based Bioasphalt as an Alternative Binder for Hot Mix Asphalt. *Journal of Materials in civil engineering* 2013, 25(10), 1432-1437. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000713](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000713)
- Worrell, E., Prince, L., Martin, N., Hendriks, C. & Meida O. L. (2001). Carbon Dioxide Emissions from Global Cement Industry. *Annual Review of Energy and the Environment*. 26(1), 303-329. <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.26.1.303>
- Wu, J., Liu, Q., Wang, C., Wu, W. & Han, W. (2020). Investigation of lignin as an alternative extender of bitumen for asphalt pavements. *Journal of Cleaner Production* 283 (2021) 124663. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124663>
- Xiao, H-W., Gao, Z-J. & Mujumdar, A. (2015) Mining shell waste will not be easy. *Nature*, 525, 321. <https://doi.org/10.1038/525321c>
- Xie, S., Li, Q., Karki, P., Zhou, F. & Yuan, J. S. (2017). Lignin as Renewable and Superior Asphalt Binder Modifier. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* 2017, 5(4), 2817-2823. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.6b03064>

- Xu, G., Wang, H. & Zhu, H. (2017). Rheology properties and anti-aging performance of asphalt binder modified with wood lignin. *Construction and Building Materials* 151(2017), 801-808.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.151>
- Yan, N. & Chen, X. (2015) Sustainability: Don't waste seafood waste. *Nature*, 524(7564), 155-157.
<https://scite.ai/reports/10.1038/524155a>
- Yang, S-H & Suciptan, T. (2016). Rheological behavior of Japanese cedar-based biobinder as partial replacement for bituminous binder. *Construction and Building Materials* 114 (2016), 127–133.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.100>
- Yang, X., You, Z., Dai, Q. & Mills-Beale, J. (2013). Mechanical performance of asphalt mixtures modified by bio-oils derived from waste wood resources. *Construction and Building Materials* 51 (2014), 424–431.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.017>
- Zapata, P & Gambatese, J. A. (2005). Energy Consumption of Asphalt and Reinforced Concrete Pavement Materials and Construction. *Journal of Infrastructure Systems*; 2005, 11(1), 9-20.
[http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)1076-0342\(2005\)11:1\(9\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)1076-0342(2005)11:1(9))
- Zargar, M., Ahmadiania, E., Asli, H. & Karim, M. R. (2012). Investigation of the possibility of using waste cooking oil as a rejuvenating agent for aged bitumen. *Journal of Hazardous Materials* 233-234(2012), 254-258. <https://doi-org.ludwig.lub.lu.se/10.1016/j.jhazmat.2012.06.021>
- Zerrouki, D. & Henni, A. (2019) Outdoor Microalgae Cultivation for Wastewater Treatment. I Gupta, S. K. & Bux, F. (red.) *Application of Microalgae in Wastewater Treatment*, 81-99. Cham: Springer Nature Switzerland https://doi.org/10.1007/978-3-030-13913-1_5
- Zhang, Y. & Chen, W.-T. (2018) Hydrothermal liquefaction of protein-containing feedstocks. I Rosendahl, L. *Direct Thermochemical Liquefaction for Energy Applications*, 127-168. Woodhead Publishing: Cambridge. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101029-7.00004-7>
- Zhang, Y., Liu, X., Apostolidis, P., Gard, W., Poeran, N. Van de Ven, M., Erkens, S. & Scarpas, T. (2020). Effects of lignin Modification on Bitumen Rheology. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*.
- Zheng, Y. (2019). Evaluation of sunflower oil's healing effect in bituminous. 2nd International Conference on Frontiers of Materials Synthesis and Processing. Bristol: IOP Science. doi:10.1088/1757-899X/493/1/012021
- Zofka, A. & Yut, I. (2012). Investigation of Rheology and Aging Properties of Asphalt Binder Modified with Waste Coffee Grounds. Transportation Research circular E-C165. *Alternative Binders for Sustainable Asphalt Pavements*, 67-78. Washington, D. C: Transportation Research board.
https://www.researchgate.net/publication/264896727_Investigation_of_Rheology_and_Aging_Properties_of_Aspalt_Binder_Modified_with_Waste_Coffee_Grounds
- Zullaikah, S., Utomo, A. T., Yasmin, M., Ong, L. K. & Ju, Y. H. (2019). Ecofuel conversion technology of inedible lipid feedstocks to renewable fuel. I: Azad, K. *Advances in Eco-Fuels for a Sustainable Environment*, 237-276. Woodhead Publishing Series in Energy. Woodhead publishing: Cambridge.
<https://doi-org.ludwig.lub.lu.se/10.1016/B978-0-08-102728-8.00009-7>