



Schlussbericht

zum FGSV-Forschungsthema Nr. 1/2022:

„Möglichkeiten der vollständigen oder teilweisen Substitution von Bitumen als Bindemittel im Asphaltstraßenbau“

Ruhr-Universität Bochum

Fakultät für Bau- und
Umweltingenieurwissenschaften
Lehrstuhl für Verkehrswegebau

Prof. Dr.-Ing. Martin Radenberg
Kim Schwettmann, M.Sc.

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung

Fachbereich 7.1 Baustoffe
Dr.-Ing. Sandra Weigel

Inhalt

Abkürzungsverzeichnis	6
1 Einleitung	8
1.1 Problemstellung und Motivation	8
1.2 Vorgehen	9
2 Theoretische Grundlagen und Stand der Kenntnisse.....	11
2.1 Chemische und physikalische Grundlagen zu Bitumen.....	11
2.2 Allgemeine Erkenntnisse zu Alternativen für Bitumen	12
2.2.1 Ausgangsmaterialien und Verarbeitungsmöglichkeiten	12
2.2.2 Aktueller Stand der Erkenntnisse zu Alternativmaterialien als Bitumenersatz	13
3 Informations- und Datensammlung.....	16
3.1 Vollständige Bitumensubstitution	16
3.2 Teilweise Bitumensubstitution	16
3.2.1 Anteile > 10 M.-% (Teilsubstitution)	17
3.2.2 Anteile ≤ 10 M.-% (Modifizierung)	17
3.2.3 Sonstige Abfälle oder aus Abfällen gewonnene Materialien.....	18
3.2.4 Weitere Materialien zur Verbesserung der Eigenschaften der Bitumenalternativen	18
3.3 Bitumensubstitution im Rahmen der Asphaltwiederverwendung.....	19
4 Bewertung der Substitute.....	21
4.1 Wirtschaftliche Bewertungskriterien	21
4.2 Technische Bewertungskriterien	21
4.3 Bewertung der Nachhaltigkeitskriterien.....	22
4.4 Wichtung der Kriterien und Ergebnisse der systematischen Bewertung	23
5 Auswahl von Konzepten für eine Praxisumsetzung.....	24
5.1 SWOT-Analyse.....	25
5.2 Konzeptvorschläge für die Praxisumsetzung	26
5.2.1 Vollständige und teilweise Bitumensubstitution	26
5.2.2 Asphaltwiederverwendung	27
5.2.3 Versuchsablaufplan	27
5.2.4 Ergebnisse der Recherche bei Industrieverbänden	28
6 Zusammenfassung, Empfehlungen und Ausblick.....	30
Literaturverzeichnis	31
Anhang	41
A.1 Nicht verwendete Literatur	41
A.2 Übersichtstabellen zur systematischen Bewertung	45

Abkürzungsverzeichnis

BAM	Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung
BP	Biophalt
BMB	Biomodifizierter Binder (engl. bio-modified binder)
BR	Birke (engl. birch)
CH	Kokosnusschalen (engl. coconut shells)
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CPO	Unverarbeitetes Pamöl (engl. crude palm oil)
CS	Maisstroh (engl. corn stover)
DAV	Deutscher Asphaltverband e.V.
DSR	Dynamisches Scherrheometer
DWBO	Entwässertes Bioöl (engl. dewatered bio-oil)
EAPA	European Asphalt Pavement Association
EMS	Epoxidiertes Sojamethylester (engl. epoxidized methyl soyate)
EP RuK	Erweichungspunkt Ring und Kugel
FAME	Fettsäuremethylester (engl. fatty acid methyl ester)
FR	Tanne (engl. fir tree)
FTIR-Spektroskopie	Fourier-Transformations-Infrarotspektroskopie
HDPE	Polyethylen mit hoher Dichte (engl. high density polyethylene)
HiPMBB	Hochgradig polymermodifizierte Biobinder (engl. highly polymer-modified bio-binder)
HTL	Hydrothermale Verflüssigung (engl. hydrothermal liquefaction)
k.A.	keine Angabe
LCA	Life Cycle Assessment (dt. Lebenszyklusanalyse)
LDPE	Polyethylen mit geringer Dichte (engl. low density polyethylene)
MP	Miscanthuspellets (engl. miscanthus pellets)
OBO	Original Bioöl (engl. original bio-oil)
PB	Kiefernrinde (engl. pine bark)
PBA	Polybuten Acrylat (engl. polybutyl acrylate)
PE	Polyethylen
PEA	Polyethylen Acrylat (engl. polyethyl acrylate)
PEG	Polyethylenglycol
PMA	Polymethyl Acrylat (engl. polymethyl acrylate)
PMBO	Polymermodifiziertes Bioöl (engl. polymer-modified bio-oil)
PP	Polypropylen
PS	Erdnusschalen (engl. peanut shells)
RAP	Reclaimed Asphalt Pavement (dt. wiedergewonnener Asphaltbelag)
RUB	Ruhr-Universität Bochum

SARA	Saturates (dt.gesättigte Kohlenwasserstoffe), Aromatics (dt. Aromate), Resins (dt. Erdölharze), Asphaltens (dt. Asphaltene)
SBS	Styrol–Butadien–Styrol
SWM	Zuckerrohrmelasse (engl. sugarcane waste molasses)
SWOT-Analyse	Strengths (dt. Stärken), Weaknesses (dt. Schwächen), Opportunities (dt. Chancen), and Threats (dt. Risiken)-Analyse
TPO	Reifenpyrolyseöl (engl. tire pyrolysis oil)
TUB	Technische Universität Berlin
WCO	Altspeiseöl (engl. waste cooking oil)
WEO	Altmotoröl (engl. waste engine oil)
WP	Holzpellets (engl. wood pellets)
WS	Walnusschalen (engl. walnut shells)

1 Einleitung

1.1 Problemstellung und Motivation

Asphaltstraßen bilden eine entscheidende Säule der deutschen Verkehrsinfrastruktur und somit unserer modernen Wirtschaft und Gesellschaft. Durch die Klimakrise sowie die aktuelle Situation in Europa ist der Baustoff Asphalt jedoch so gefährdet wie nie zuvor. Nicht nur, dass durch die Energiewende und der damit verbundenen Distanzierung vom Erdöl die Verfügbarkeit des bitumenhaltigen Bindemittels stetig abnehmen und langfristig versiegen kann, die aktuelle Situation des Ukrainekriegs und der Konflikt mit Russland macht auch der Asphaltbranche die Erdölabhängigkeit schmerzlich bewusst. So hat sich der Importstopp der Erdöllieferungen aus Russland deutlich auf die Bitumenversorgung in Deutschland, insbesondere in den östlichen Raffinerien, ausgewirkt, wobei der zunächst angenommene Einbruch von bis zu einem Drittel durch andere Rohölquellen teilweise ausgeglichen werden konnte [1, 2]. Um unser Straßennetz und damit unsere Infrastruktur aufrechterhalten zu können, muss auch die Asphaltbranche sowohl lang- als auch kurzfristig erdölunabhängige Wege suchen. Als langfristiger Ansatz ist ein vollständiger Ersatz des erdölstämmigen Bindemittels Bitumen durch biobasierte, nachhaltige Alternativmaterialien anzustreben, um beim Bau und der Erhaltung unseres Straßennetzes vollkommen unabhängig von fossilen Rohstoffen zu werden. Kurzfristig könnte bereits ein teilweiser Ersatz zu einer erheblichen Einsparung von Bitumen führen, der zudem das Sammeln erster Erfahrungen mit alternativen Bindemittelmaterialien erlauben und die Akzeptanz der neuen Materialien in der Fachcommunity und der Bevölkerung steigern kann. Der Ersatz des Bitumens ist jedoch nicht allein auf die Herstellung von Frischasphalten beschränkt. Ein weiteres hochaktuelles Anwendungsgebiet und zudem ein weiterer Ansatz für eine kurzfristige Erdölunabhängigkeit im Asphaltstraßenbau zeigt sich in der Verjüngung von Ausbauasphalten durch biobasierte Alternativmaterialien. Zur Wiederverwendung von Ausbauasphalten werden diesen derzeit Frischbindemittel oder teilweise auch schon sogenannte Rejuvenatoren zugegeben, um die alterungsbedingten Veränderungen der Bindemittel im Ausbauasphalt zu kompensieren. Insbesondere nach mehrfacher Wiederverwendung und der damit verbundenen fortgeschrittenen Alterung werden jedoch zu hohe Mengen an Frischbindemittel erforderlich bzw. reicht die Verjüngungswirkung der im deutschen Regelwerk berücksichtigten weichen Bitumen nicht aus. Einen vielversprechenden Lösungsansatz bieten hierbei Alternativmaterialien mit verjüngenden Eigenschaften, mit denen auch stark gealterte Ausbauasphalte in Anteilen von bis zu 100 % wiederverwendet und damit die herausragenden Wiederverwendungspotenziale von Asphalt aufrechterhalten werden können. Solche Rejuvenatoren sind organischen Stoffe/Stoffgemische, die bei Raumtemperatur flüssig/zähflüssig sind und damit eine deutlich niedrigere Viskosität als weiche oder auch sehr weiche bitumenhaltige Bindemittel aufweisen.

Mit dieser beschriebenen Problematik als Grundlage ist das Gesamtziel dieses Projekts die Identifizierung erfolgversprechender Alternativmaterialien für einen partiellen und einen vollständigen Ersatz von Bitumen bzw. bitumenhaltigen Bindemitteln im Asphaltstraßenbau. Dabei sollen Alternativmaterialien bewertet werden, die als (Teil-)Ersatzstoffe verwendet werden können und vergleichbare physikalische Eigenschaften zum Bitumen bzw. bitumenhaltigen Bindemitteln aufweisen, während diese zudem möglichst biobasiert, nachhaltig, klimaschonend, umweltfreundlich und in ausreichender Menge verfügbar bzw. unter angemessenen ökonomischen Bedingungen herstellbar sein sollen.

Um das Projektziel zu erreichen, erfolgt zu Beginn eine umfangreiche Informations- und Datensammlung sowie eine systematische Bewertung der bisher in der internationalen Fachwelt untersuchten und beschriebenen Alternativmaterialien. Dabei werden sowohl bereits in der Praxis umgesetzte Asphaltanwendungen als auch neuartige Ansätze eingeschlossen. Für die erfolgversprechendsten Alternativmaterialien wird final ein Konzept erstellt, mit dem eine großtechnische Nutzbarkeit in der Praxis nachgewiesen werden kann.

1.2 Vorgehen

Die Bearbeitung des Projekts erfolgte in vier Arbeitspaketen. Im Arbeitspaket 1 (AP 1, Informations- und Datensammlung zu potenziellen Alternativmaterialien) wurden die Informationen und Daten zu bisher in der internationalen Fachwelt untersuchten Alternativmaterialien zu Bitumen zusammengetragen. Dabei wurde zunächst eine umfassende internationale Literaturrecherche durchgeführt, um eine Übersicht von bereits in der Praxis angewandten Alternativmaterialien, Ansätzen zu neuartigen Materialien und auch vielleicht auch weniger zielführenden Materialien zusammenzustellen. Darüber hinaus wurde durch Anfragen an verschiedenen Stellen (z.B. DAV und Bauindustrieverband) nach bereits laufenden Aktivitäten recherchiert, bei denen potenzielle Alternativen zu Bitumen für die Asphaltproduktion angewendet oder untersucht werden.

Bei der Informations- und Datensammlung wurden grundsätzlich vier Gruppen unterschieden, wobei die Unterteilung der Gruppen 1 bis 3 auf dem Ansatz von Raouf und Williams basiert [3, 4]:

1. Vollständige Bitumensubstitution: Übersicht von Materialien oder Materialkombinationen, die für einen vollständigen Ersatz des Bitumens verwendet werden.
2. Teilweise Bitumensubstitution (Anteil > 10 M.-%): Übersicht von Materialien oder Materialkombinationen, die für einen teilweisen Ersatz des Bitumens verwendet werden mit einem Anteil von >10 M.-%.
3. Modifizierungen (Anteil ≤ 10 M.-%): Materialien, die bisher hauptsächlich zur Modifizierung (beispielsweise Rejuvenatoren) und damit mit einem Anteil ≤ 10 M.-% verwendet wurden, aber möglicherweise auch für einen Teilersatz geeignet sein könnten.
4. Asphaltwiederverwendung: Übersicht, ob einzelne Materialien oder Materialkombination auch für eine Verjüngung und damit eine Wiederverwendung von Ausbauasphalten vorgeschlagen werden oder geeignet sein könnten.

Für die verschiedenen Alternativmaterialien wurden – soweit verfügbar und vorhanden – sowohl Metadaten als auch verschiedene metrische Parameter erfasst. Zu den Metadaten zählen z.B. Informationen zum Namen, den Kosten sowie der Art und der Herstellung bzw. Gewinnung der Materialien. Weitere wünschenswerte Parameter waren die physikalischen und chemischen Kennwerte sowie Erkenntnisse zum Alterungs- oder Verjüngungsverhalten, wobei diese Parameter möglichst sowohl für die reinen Alternativmaterialien als auch für das resultierende Bindemittel gesucht wurden. Die Informationen zu den Alternativmaterialien wurden in einer umfangreichen Tabelle gesammelt, die als elektronischer Anhang zur Verfügung steht. Aufgrund der Größe der Tabelle (ca. 190 Zeilen und 100 Spalten) ist diese Tabelle nicht Bestandteil des Schlussberichtes. Der Zugang zu dieser Tabelle kann bei der FGSV angefragt werden.

Basierend auf der Informations- und Datengrundlage des AP 1 erfolgte im AP 2 die systematische Bewertung der potenziellen Alternativmaterialien. Als Grundlage wurde hierfür eine tabellarische Gegenüberstellung der potenziellen Alternativmaterialien erstellt, um diese systematisch zu vergleichen und zu bewerten. Folgende Kriterien wurden dabei berücksichtigt:

- Wirtschaftliche Kriterien: Kosten, Rohstoffverfügbarkeit und Produktionsaufwand
- Technische Kriterien: chemische Struktur/ Zusammensetzung, physikalische Bindemittelleigenschaften im hohen und niedrigen Temperaturbereich, Asphalteigenschaften, Verarbeitbarkeit und Alterungsverhalten
- Nachhaltigkeitskriterien: Umweltverträglichkeit (z.B. anhand von Herstellerangaben, der chemischen Zusammensetzung oder der Verarbeitbarkeit), CO₂-Reduktion (z.B. anhand der Datenlage), Recyclingoptionen (z.B. anhand von Alterungs- und Verjüngungseigenschaften) und Arbeitssicherheit (z.B. anhand der chemischen Zusammensetzung und der Verarbeitbarkeit)

Die Bewertung der Kriterien erfolgte auf Basis der in den Studien veröffentlichten Ergebnissen, welche mithilfe eines qualitativen Bewertungssystems in Relation zum Bitumen gesetzt wurden. Dafür wurden die folgenden Faktoren verwendet:

- „++“ (Doppelplus: signifikant besser als Bitumen),
- „+“ (Plus: besser als Bitumen),
- „o“ (Null: vergleichbar mit Bitumen),
- „-“ (Minus: schlechter als Bitumen) und
- „--“ (Doppelminus: signifikant schlechter als Bitumen)

Für eine nichtvorhandene Information konnte das jeweilige Kriterium nicht bewertet werden, welches demzufolge mit k.A. (keine Angabe) ausgefüllt wurde. Im Anschluss wurden die vergebenen Faktoren für einen zielführenden Vergleich quantifiziert, sodass eine „Endsumme“ errechnet werden konnte. Anhand der Vergleichsparameter und der Bewertungsmaßstäbe konnte eine Reihung der in AP 1 zusammengestellten Alternativmaterialien hinsichtlich der Eignung zur Substitution von Bitumen vorgenommen werden.

In AP 3 (Auswahl geeigneter Alternativmaterialien und Konzepterstellung zum Nachweis der Praxistauglichkeit) wurden basierend auf den Ergebnissen der beiden Arbeitspakete 1 und 2 die geeignetsten Alternativmaterialien anhand der Reihung identifiziert. Für diese wurde eine Analyse der Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken (SWOT-Analyse) vorgenommen, um das Potenzial für eine zukünftige Nutzung einschätzen zu können. Mit den Ergebnissen der SWOT-Analyse wurde die Grundlage für die Reihung erweitert, um daraus ein abschließendes Ranking vornehmen zu können. Für die nach dieser SWOT-Analyse zielführendsten Alternativmaterialien wurde abschließend ein theoretisches Konzept erstellt, mit dem die großtechnische Anwendbarkeit in der Praxis nachgewiesen werden könnte. Für das abschließende Konzept wurden wiederum die vier Säulen des AP 1 berücksichtigt und Alternativmaterialien für eine vollständige und teilweise Bitumensubstitution sowie für die Asphaltwiederverwendung bewertet.

2 Theoretische Grundlagen und Stand der Kenntnisse

2.1 Chemische und physikalische Grundlagen zu Bitumen

Bitumen ist ein organisches Bindemittel, bei dem die Viskosität bzw. die Konsistenz und die plastische Verformbarkeit von der Temperatur abhängen. Beim Erwärmen von Bitumen zeigt sich ein stufenloser Übergang vom festen über den zähflüssigen bis hin zum dünnflüssigen Zustand. Nach der Verarbeitung und dem Einbau stellt sich durch das Abkühlen des Bitumens eine hohe Viskosität/ Steifigkeit des Bitumens ein, wodurch ein schadloser Lastabtrag einer Straßenbefestigung mit Asphalt erreicht werden kann [5 bis 7]. Durch dieses thermoviskose und thermoplastische Verhalten sowie die sehr guten adhäsiven Eigenschaften zu Gesteinoberflächen eignet sich Bitumen hervorragend als Bindemittel für den Asphaltstraßenbau.

Aus chemischer Sicht besteht Bitumen aus tausenden hoch- bzw. nicht siedenden Kohlenwasserstoffverbindungen mit zum Teil funktionellen Sauerstoff-, Stickstoff- und Schwefelgruppen, die üblicherweise in Substanzklassen, den sogenannten SARA-Fraktionen aus gesättigten Kohlenwasserstoffen (**Saturates**), Aromaten (**Aromatics**), Erdölharzen (**Resins**) und Asphaltenen (**Asphaltenes**), zusammengefasst werden [7]. Das Zusammenspiel dieser vier Fraktionen wird traditionell in Form eines kolloidalen Systems beschrieben, in dem Komponenten hoher Molmasse (Kolloidteilchen aus Asphaltenen und teilweise Erdölharzen) in einer flüssigen Phase aus Bestandteilen niedriger Molmasse (Dispersionsmittel aus gesättigten Kohlenwasserstoffen, Aromaten und teilweise Erdölharzen) dispergiert vorliegen [8 bis 10].

Als organisches Material ist Bitumen einem Alterungsprozess ausgesetzt, bei dem insbesondere infolge oxidativer Prozesse eine stetige Verhärtung und Versprödung einsetzen. Bei dieser oxidativen Alterung werden durch radikalische Kettenreaktionen zwischen Bitumenmolekülen und Luftsauerstoff zunehmend höhermolekulare, polare Bestandteile gebildet, wodurch sich die Verteilung der SARA-Fraktionen in Richtung der Asphaltene verschiebt [8, 11, 12].

Trotz der ablaufenden Alterungsprozesse weisen Bitumen bzw. bitumenhaltige Bindemittel und damit auch die daraus hergestellten Asphalte aufgrund der thermoviskosen und thermoplastischen Eigenschaften eine sehr gute Eignung zur Wiederverwendung auf, was durch die hohe Wiederverwendungsrate in Deutschland von ca. 84 % bestätigt wird (Jahr 2020) [13]. Für eine Wiederverwendung müssen jedoch die Auswirkungen der Bitumenalterung ausreichend kompensiert werden, wofür den Ausbauasphalten klassischerweise bitumenhaltige Frischbindemittel zugegeben werden [14]. Aktuell und auch zukünftig befinden sich die Ausbauasphalte jedoch in zunehmend höheren Wiederverwendungszyklen, sodass die zum Ausgleich der Alterung erforderlichen Mengen an Frischbindemittel die zulässigen Bindemittelgehalte übersteigen würden. Als Alternative werden Ausbauasphalten zunehmend weichere Bitumen oder auch Rejuvenatoren (Begriffsdefinition: Rejuvenator ist ein Zusatz, der ein gealtertes Bitumen wieder in die Nähe seiner ursprünglichen rheologischen Eigenschaften versetzt. Zumeist werden Öle mit Strukturen ähnlich dem Dispersionsmittel im Bitumen verwendet) zugegeben, mit denen die Alterungsauswirkungen nach den ersten Verwendungszyklen effizient ausgeglichen werden können [15 bis 17]. Die Ergebnisse des DFG-Projekts *Postcarbone Straße* (Nr. 392670763, RUB und TUB) zeigen jedoch, dass eine Kompensation der Alterungerscheinungen bei mehrfach gealterten Bitumen allein mithilfe der derzeit verfügbaren Rejuvenatoren nicht problemlos möglich ist, da die verjüngten Bindemittel eine gegenüber den ursprünglichen Bitumen deutlich abweichende Struktur und Zusammensetzung aufweisen [16].

Bitumen weist somit aufgrund des temperaturabhängigen viskoelastischen Verhaltens, der adhäsiven Eigenschaften und des hohen Wiederverwendungspotenzials eine herausragende Eignung als Bindemittel im Asphaltstraßenbau auf. Ein entscheidender Nachteil des Bitumens ist jedoch die Abstammung des Erdöls und die damit verbundene Abhängigkeit von fossilen Rohstoffen. Aus diesem Grund wurde in den letzten Jahren zunehmend nach möglichen nachhaltigen Alternativmaterialien zur Substitution von Bitumen bzw. bitumenhaltigen Bindemitteln gesucht [4].

2.2 Allgemeine Erkenntnisse zu Alternativen für Bitumen

2.2.1 Ausgangsmaterialien und Verarbeitungsmöglichkeiten

Ein Großteil der bisherigen Studien zu potenziellen Alternativmaterialien beschäftigt sich mit Modifizierungen und Teilersatzstoffen, zu denen pflanzenbasierte Bioöle u.a. aus Holz, Hirse, Maisstroh, Leinensamen, Raps und Soja [4, 18] oder auch wiedergewonnene und aufbereitete Produkte aus Abfallmaterialien z.B. Altkunststoffe wie Plastiktüten, Schweröle aus Altöl, Gummi aus Altreifen, Speisefette aus Restaurants oder Lebensmittelgeschäften, Kaffeesatzreste oder auch Gülle aus der Schweinezucht [4, 19 bis 23] zählen.

Die Ausgangsmaterialien werden meist unter dem Oberbegriff der Biomasse zusammengefasst und dabei im Allgemeinen wie folgt unterteilt [24, 25]:

1. Land- und forstwirtschaftliche Rückstände (z.B. Gräser, Holzspäne, Sägemehl, Wurzeln, Zweige, Blätter und Rinde),
2. krautige Pflanzen (haben keine verholzenden Bestandteile wie Bäume oder Sträucher),
3. aquatische und Meeresbiomasse (z.B. Algen) und
4. Abfälle (die Materialien, die bei der Erzeugung oder dem Verbrauch von Biomasse anfallen, einschließlich Holz, Stroh, Tierdung und Haushaltsabfälle).

Der Schwerpunkt der Forschung zur Verarbeitung von Biomasse liegt vor allem auf der Gewinnung von Biokraftstoffen [26]. Diese Kenntnisse und Erfahrungen lassen sich aber auch für die Herstellung von Bioölen für den Einsatz im Asphalt nutzen. Je nach Beschaffenheit der vorliegenden Biomasse können durch verschiedene Verarbeitungsmöglichkeiten Bioöle mit unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften hergestellt werden. Für die Bestimmung einer geeigneten Methode zur Weiterverarbeitung kann bei der Biomasse zwischen trockenem und nassem Zustand unterschieden werden [25]. Trockene Biomasse wird hauptsächlich mithilfe von thermochemischen Umwandlungsverfahren weiterbearbeitet, wohingegen nasse Biomasse mittels biochemischer Umwandlungsprozesse zu Bioölen verarbeitet werden [25 bis 27]. Biochemische Verfahren, wie die alkoholische Gärung oder Fermentation, kommen für die Herstellung von Biobindern für den Asphalt vergleichsweise selten zum Einsatz [26]. Häufiger werden thermische Umwandlungsverfahren für Biomasse verwendet, wobei hier überwiegend die Schnellpyrolyse oder die hydrothermale Verflüssigung zum Einsatz kommen. Die Pyrolyse-Technologie (engl.: pyrolysis) ist ein thermochemisches Verfahren, welche als die effektivste Methode zur Herstellung von Bioöl gilt und zumeist für die Umwandlung von land- und forstwirtschaftlicher Biomasse benutzt wird [28, 29]. Durch die Pyrolyse lassen sich verschiedene Produkte gewinnen, indem organische Stoffe durch Erhitzen in Abwesenheit von Sauerstoff oder mit deutlich weniger Sauerstoff als für eine vollständige Verbrennung erforderlich sind, zersetzt und somit in feste (Koks), flüssige (Bioöl) und gasförmige (Brenngas) Stoffe umgewandelt werden [28 bis 30]. Während des Prozesses erfolgt eine Spaltung in kleinere Moleküle durch thermische Energie [26]. Je nach den gewählten Randbedingungen (Pyrolysetemperatur, Heizrate und Zeitdauer) wird zwischen einer langsamen und schnellen Pyrolyse unterschieden [28]. Für die Produktion der Mehrheit der in den Studien verwendeten Bioöle wird eine Schnellpyrolyse angewendet. Bei der Schnellpyrolyse entsteht durch die schnelle Erhitzung des Biomasserohstoffs mehr Pyrolyseflüssigkeit, da die entstehenden Dämpfe ebenfalls schneller kondensieren [30]. Bei der hydrothermalen Verflüssigung (engl.: hydrothermal liquefaction, HTL) wird Biomasse (z.B. Schweinegülle oder Mikroalgen) mithilfe von Wasser (oder einem alkoholischen Lösungsmittel, z.B. Ethanol) und hohem Druck, jedoch bei moderaten Temperaturen (180 bis 400°C) in rohölähnliches Öl umgewandelt [31, 32]. Das Hauptprodukt der hydrothermalen Verflüssigung ist Bioöl (bis zu 75 %), während die festen (20 %) und gasförmigen (5 %) Produkte als Nebenprodukte angesehen werden [31]. Das gewonnene Öl enthält einen Sauerstoffanteil zwischen 10 und 20 %, welcher mittels Wasserstoffs (Hydrierung) entfernt werden kann [33].

2.2.2 Aktueller Stand der Erkenntnisse zu Alternativmaterialien als Bitumenersatz

Ein großer Anteil von Biomasse, die für den Einsatz im Asphalt verwendet werden kann, ist der ersten Gruppe, der land- und forstwirtschaftlichen Rückstände zuzuordnen [30]. Holz und andere pflanzliche Biomasse können im Wesentlichen als ein Verbundwerkstoff aus sauerstoffhaltigen organischen Polymeren betrachtet werden [30]. Die Hauptbestandteile sind Cellulose (ein polymeres Glucosan), Hemicellulosen (auch Polyose genannt), Lignin, organische Extrakte und anorganische Mineralien. Der Gewichtsprozentanteil von Cellulose, Hemicellulose und Lignin variiert abhängig von den Holzarten, wobei die wichtigsten chemischen Strukturkomponenten mit hohen Molmassen Kohlenhydratpolymere und -oligomere (65 % bis 75 %) und Lignin (18 % bis 35 %) sind [30].

Aus dieser Gruppe bildet das Biopolymer Lignin einen sehr aussichtsreichen Teilersatzstoff (1 bis 40 M.-%), der bereits von verschiedenen Forschungsgruppen untersucht und als vielversprechend bewertet wurde [34 bis 37]. Darüber hinaus wurde in dem Projekt CHAPLIN XL ein ligninmodifizierter Asphalt entwickelt, der bereits patentiert und zudem auf einer Teststrecke in den Niederlanden erprobt wurde [38, 39]. Erste Berechnungen zur Lebenszyklusanalyse (Life Cycle Assessment, LCA) zeigen, dass die als klimarelevant eingestuften Auswirkungen durch den Einsatz dieses ligninmodifizierten Asphalts deutlich gegenüber konventionellem Asphalt reduziert werden können [40]. Hinsichtlich des Lignins bleibt jedoch grundsätzlich zu beachten, dass dieses aus sehr unterschiedlichen Quellen (z.B. Holz, Mais, Stroh, Eukalyptus, Miscanthus, Zuckerrohr) und mit unterschiedlichen Methoden (z.B. Sulfit-, Kraft-, Organosolv-Prozess) gewonnen wird und somit stark variierende Strukturen aufweisen kann [41]. Generell kann dabei zwischen schwefelhaltigem Lignin (Kraft-Lignin, Lignosulfonate und hydrolysierte Lignine) und schwefelfreiem Lignin (Organosolv- und Soda-Lignin) unterschieden werden [37]. Die Auswirkungen auf das resultierende Bindemittel können in Abhängigkeit des Lignintyps variieren [34, 37]. So zeigten sich beispielsweise für Klason-Lignin bei einer Zugabemenge von 10 bis 25 M.-% keine signifikanten Auswirkungen auf die Bitumeneigenschaften eines Straßenbaubitumens 70/100, wohingegen das Kraft-Lignin und das Organosolv-Lignin die Steifigkeiten, bestimmt mit dem komplexen Schermodul G*, bei gleicher Zugabemenge erhöhten [34]. Auch auf den Phasenwinkel hatte das Klason-Lignin den geringsten Einfluss. Allerdings ist dabei zu beachten, dass solche Ergebnisse ebenso vom Bitumentyp abhängig sein können und nicht nur von dem verwendeten Lignintyp. Grundsätzlich gilt jedoch, dass schwefelfreies Lignin umweltfreundlicher ist und daher zu bevorzugen wäre, obwohl das Kraft-Lignin aktuell mit 85 % den größten Anteil an der gesamten Ligninproduktion ausmacht [37].

Auch für Bioöle aus den anderen Biomassegruppen gibt es bereits Studien, die einen Einsatz als Teilstoffersetzung oder Modifizierung von Bitumen untersuchen. Eine übersichtliche Zusammenfassung bietet hierzu eine Literaturrecherche von Ameri et al. [24]. In dieser Veröffentlichung werden Bioöle aus Biomasse von nachwachsenden Rohstoffen hauptsächlich mittels Schnellpyrolyse gewonnen. Des Weiteren werden die Auswirkungen von verschiedenen Bioölen auf die Bitumeneigenschaften zusammengefasst und es zeigte sich, dass einige Bioöle die Alterung von Bitumen verlangsamen und gealtertes Bitumen verjüngen können [24]. Die molekularen Bestandteile von Bioölen, z.B. die Phenole, sollen dabei als Antioxidantien wirken [24]. Dabei bietet der Einsatz nicht nur Vorteile bei der Verbesserung der Eigenschaften von gealtertem Bitumen, sondern auch für die Umwelt, indem es Kohlenstoffemissionen reduziert, die Luftqualität verbessert und den Energieverbrauch senkt. Zusätzlich können Bioöle die Löslichkeit von Wachsen in der Gesamtmasse verbessern und verhindern eine Kristallisation [24]. Die Autoren haben dabei die folgenden kritischen Forschungslücken identifiziert [24]:

- Es bestehen große Unterschiede zwischen den Bioölen und deren Auswirkungen und das sogar zwischen den Materialien, die aus demselben Ausgangsmaterial hergestellt, jedoch mit unterschiedlichen Methoden weiterverarbeitet wurden. Zur Verringerung dieser Problematik müsste es einen einheitlichen Standard geben, nach dem Bioöle produziert, untersucht und bewertet werden, um dadurch die Qualität zu gewährleisten und auch den Eintritt von Bioölen in den Asphaltmarkt zu erleichtern.
- Es existieren keine verfügbaren Langzeitstudien, Langzeidaten und Feldstudien zur Untersuchung der Auswirkungen der Bioöle auf die Nutzungsdauer, um die Erstellung von umfassenden Lebenszyklusanalysen zu unterstützen.

In ersten eigenen Tastversuchen (Projektpartner: BAM) konnte die grundsätzliche Eignung ausgewählter Alternativmaterialien im Labormaßstab bereits bestätigt werden, wobei zum einen ein Lignin (Kraftlignin aus Weichholz) und zum anderen Rückstände der Mikroalgenaufbereitung, die bspw. bei der Biokraftstoffherstellung anfallen, jeweils mit einem Gehalt von 25 M.-% als Teilersatzstoffe zu einem Bitumen 50/70 zugegeben wurde. Abb. 1(a) zeigt anhand von Spektren der Fourier-Transformations-Infrarotspektroskopie (FTIR-Spektroskopie), dass der strukturelle Aufbau des Mikroalgenrückstands dem des Bitumens 50/70 sehr stark ähnelt, während die Struktur des Lignins deutlich abweicht. Hinsichtlich der rheologischen Eigenschaften führt die Zugabe des Mikroalgenrückstands nach Untersuchungen mittels Dynamischem Scherrheometer (DSR) zu einer Abnahme der Steifigkeit und einer Zunahme der viskosen Verformungsanteile, während das verwendete Lignin eine gegenläufige Veränderung (Verhärtung) bewirkt (vgl. Abb. 1(b)). Die Versuche verdeutlichen, dass sowohl der Mikroalgenrückstand als auch das Lignin mit dem Bitumen kompatibel sind und daher grundsätzlich als potenzielle Teilersatzstoffe geeignet wären. Neben der Veränderung der Steifigkeit und des Verformungsverhaltens führt die Zugabe der beiden betrachteten Teilersatzstoffe jedoch auch zu einer verringerten Kohäsion des resultierenden Bindemittels.

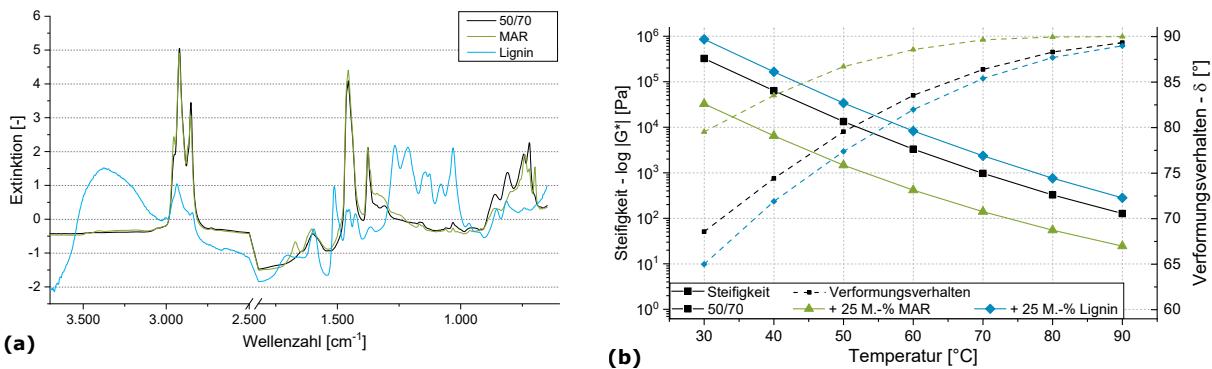


Abb. 1: Ergebnisse erster Tastversuche zu Mikroalgenrückständen (MAR) und Lignin als Teilersatzstoffe:
(a) FTIR-Spektren der reinen und (b) DSR-Ergebnisse der modifizierten Proben

Im Gegensatz zu den Teilersatzstoffen sind Ersatzstoffe für eine vollständige Substitution bisher weniger erforscht. Auch in diesem Zusammenhang scheinen Rückstände der Mikroalgenaufbereitung ein vielversprechender Ansatz für eine vollständige Substitution zu sein. Einige dieser Rückstände weisen ein temperaturabhängiges Verhalten auf, das mit dem von Bitumen vergleichbar ist [42].

Anstelle eines einzelnen Materials oder einer Materialgruppe werden jedoch häufiger Kombinationen verschiedener Materialien betrachtet, die ebenfalls ein bitumenähnliches Verhalten zeigen, wie Bioöl mit Gummigranulat aus Altgummi oder Bioöl mit Polymeren [3, 43]. Um die typischen Bitumeneigenschaften zu erhalten, müssten die Alternativmaterialien ggf. noch weiter aufbereitet oder modifiziert (z.B. durch Polymere) werden. Demzufolge zeigen diese Ergebnisse, dass die Eigenschaften eines resultierenden Bindemittels jeweils so umfassend wie möglich erfasst werden sollten. Für eine Bewertung möglicher Alternativmaterialien ist diese Erkenntnis entscheidend und bildet eine wichtige experimentelle Grundlage für die Bearbeitung eines Folgeprojektes. Einen weiteren aktuellen Ansatz zur vollständigen Substitution von erdölstämmigem Bitumen bildet das sogenannte *Instant Bitumen*, das künstlich aus einer Asphaltene- und einer Maltenfraktion gemischt wird. Die Asphaltene werden dabei bergmännisch gewonnen, während es sich bei der Maltenphase um einen Rejuvenator handelt [44, 45]. Zur Bewertung der Praxistauglichkeit wurde auf einer Haldenfläche getestet [46]. Eine telefonische Recherche bei Industrieverbänden hat ergeben, dass mit diesem *Instant Bitumen* in Bayern auch bereits Radwege gebaut wurden.

Hinsichtlich der Substitution von Bitumen liegen nach den obigen Ausführungen bereits verschiedenste, teilweise sehr vielversprechende Ansätze für einen partiellen sowie einen vollständigen Ersatz für die Asphalttherstellung vor. Eine Gegenüberstellung dieser verschiedenen Ansätze erfolgte bisher jedoch nicht, sodass derzeit auch keine vergleichenden Aussagen zu den resultierenden Bindemittelalternativen möglich sind. Zudem wurden in einem Großteil der bisherigen Untersuchungen überwiegend die physikalischen Eigenschaften der resultierenden Bindemittel analysiert, während das Alterungsverhalten sowie der

chemische Aufbau bzw. die Struktur nur gelegentlich betrachtet wurden. Das Alterungsverhalten spielt jedoch insbesondere im Hinblick auf die Dauerhaftigkeit und auch die Wiederverwendbarkeit eine maßgebende Rolle, da vereinzelt von einem ungünstigen Alterungsverhalten der alternativen Bindemittelmaterialien ausgegangen wird [47]. Darüber hinaus ist die Kenntnis des chemischen Aufbaus und der Struktur entscheidend, da diese maßgebend für die physikalischen Eigenschaften sowie das Alterungsverhalten sind. So können durch Modifizierungen des Aufbaus bzw. der Struktur gezielte Veränderungen der physikalischen Eigenschaften und der Alterungsprozesse ermöglicht und die Bindemittel somit an die Anforderungen angepasst werden.

Ein weiterer in bisherigen Studien weniger berücksichtiger Punkt ist der Einsatz der biobasierten Alternativmaterialien zur Wiederverwendung von Ausbauasphalten. Durch die Weiterentwicklung der Asphaltwiederverwendung könnte der schnellste Weg gebildet werden, die Erdölabhängigkeit im Asphaltstraßenbau zumindest kurzfristig deutlich zu reduzieren. Dafür sollten in neu einzubauenden Asphalten möglichst hohe Asphaltgranulatanteile (bis nahezu 100 %) angestrebt werden, während die alterungsbedingte Verhärtung durch die Zugabe eines biobasierten, verjüngenden Alternativmaterials kompensiert werden könnte. Für solche nachhaltigen Verjüngungsalternativen könnten zum einen sowohl die Teilersatz- als auch die vollständigen Ersatzstoffe dienen, die auch für die Herstellung von frischem Asphaltmischgut geeignet sind. Zum anderen wäre an dieser Stelle auch die Weiterentwicklung von Rejuvenatoren sinnvoll, die derzeit hinsichtlich der stofflichen Zusammensetzung nur einen kleinen Ausschnitt der vielfältigen Eigenschaften eines Bitumens abbildet und daher aktuell nicht oder zumindest nicht alleine für eine vollständige Substitution des Bindemittels geeignet sind.

3 Informations- und Datensammlung

Dieses Kapitel beinhaltet die Ergebnisse der Literaturrecherche, bei der die Informationen und Rechercheergebnisse in vier Gruppen unterteilt wurden. Die Unterteilung erfolgte in Gruppen der vollständigen Bitumensubstitution, der teilweisen Bitumensubstitution (aufgeteilt in Substitutionsmengen von $> 10 \text{ M.-\%}$ und $\leq 10 \text{ M.-\%}$) und der Bitumensubstitution während der Asphaltwiederverwendung.

3.1 Vollständige Bitumensubstitution

Die nachfolgenden Informationen und Daten berücksichtigen Substitutionskonzepte, die so ausgelegt sind, dass keine weiteren Bindemittelkomponenten (mit Ausnahme von Modifikationen, z.B. durch Polymere) für eine Asphaltproduktion benötigt werden. Während der Recherche konnten unterschiedliche Studien zu insgesamt acht verschiedenen Produkten ausfindig gemacht werden, bei denen eine vollständige Bitumensubstitution untersucht wurde. Die Tab. 1 gibt eine Übersicht der Produkte und der jeweiligen Quellen, welche nach den Veröffentlichungsdaten der wissenschaftlichen Artikel geordnet sind. Eine tiefergehende Betrachtung der Produkte erfolgt im Kapitel 4 zur Bewertung der Substitute. Der Vergleich dieser Produkte zeigt, wie unterschiedlich die Herangehensweisen und Ausgangsmaterialien sind, die für die Studien verwendet wurden. Dabei werden neben der Biomasse aus land- und forstwirtschaftlichen Rückständen sowohl aquatische Meeresbiomasse als auch Abfallprodukte, wie Schweinegülle und Altgummi, für eine vollständige Bitumensubstitution untersucht.

Tab. 1: Produkte zur vollständigen Bitumensubstitution

Art/ Name	Quelle
Synthetische Bindemittel aus verschiedenen organischen Polymeren PEA, PMA und PBA	[48]
Polymermodifizierte Biobinder aus Eichenholz, Rutenhirse und Maisstroh	[3, 49 bis 51]
Mikroalgen	[42, 52 bis 55]
Vergleich von Bioölen aus verschiedenen Quellen: Schweinegülle, Miscanthus, Holzpellets und Maisstroh	[56]
Pyrolyse von Autoreifen, mit einem Anteil an Kunststoffabfällen	[57]
Dammar Naturharz, Flugasche, gebrauchtes Speiseöl und Latex	[58]
Pech (ein Nebenprodukt der Papierindustrie), Kolophonium und SBS	[59]
Nebenprodukt aus der Verarbeitung von Kiefernholzharz	[60, 61]

Ein vielleicht besonders vielversprechendes Konzept zur vollständigen Bitumensubstitution scheint die Kombination von Stoffen oder Produkten, die in den Kapiteln 3.1 bis 3.3 benannt sind. Hierzu müsste eine sinnvolle Auswahl an Kombinationsmöglichkeiten in Abhängigkeit von den chemischen und physikalischen Eigenschaften der Einzelkomponenten getroffen werden, um dann die Homogenisierbarkeit, die Verträglichkeit und die Lagerstabilität solcher Gemische in einem ersten Schritt zu untersuchen.

3.2 Teilweise Bitumensubstitution

Die Informationen und Daten in diesem Kapitel beziehen sich auf alternative Bindemittelkomponenten, die alleine keine vollständige Substitution von Bitumen ergeben würden. Zur besseren Übersicht ist diese Produktgruppe in zwei Untergruppen eingeteilt und es wird in Produktanteile von $>$ und $\leq 10 \text{ M.-\%}$ unterschieden. Wie bereits beschrieben, wird in der internationalen Literatur die Nomenklatur verwendet, dass ein Masseanteil von $> 10 \text{ M.-\%}$ als Teilstubstitution definiert wird, während ein Produktanteil von $\leq 10 \text{ M.-\%}$ als Modifizierung bezeichnet wird. Zusätzlich wurden zwei weitere Untergruppen ergänzt. Zum einen wurden Studien zusammengefasst, in denen Produkte zum Einsatz kamen, die sich aufgrund ihrer Rohstoffherkunft nicht unter dem Begriff Biomasse einordnen lassen (Kapitel 3.2.3 Sonstige Abfälle oder aus Abfällen gewonnene Materialien). Zum anderen wurden Materialien zusammengefasst, die in Studien zur Bitumensubstitutionen zur Verbesserung der Eigenschaften des jeweiligen Bitumensubstituts eingesetzt wurden, das heißt, Materialien, die sich möglicherweise für eine Kombination mit einem Biobinder eignen (Kapitel 3.2.4 Weitere Materialien zur Verbesserung der Eigenschaften der Biobinder).

3.2.1 Anteile > 10 M.-% (Teilsubstitution)

Für eine teilweise Bitumensubstitution mit einem Anteil des Alternativprodukts von mehr als 10 M.-% wurden insgesamt 49 Veröffentlichungen zusammengetragen, in denen 53 verschiedene Materialien getestet wurden. Den größten Anteil haben dabei die Bioöle aus land- und forstwirtschaftlichen Rückständen, die hauptsächlich mittels Pyrolyse gewonnen werden. Ähnlich wie bei Bitumen ist die Chemie von Bioölen komplex, wodurch eine vollständige chemische Charakterisierung der Bioöle schwierig ist [62]. Die maximale Zugabemenge von Bioölen, die aus Holzabfällen gewonnen wurden, liegt bei 70 M.-% [62]. In den meisten Fällen sind die Viskositäten deutlich geringer als die Viskosität von Bitumen, was zu einer Erweichung des resultierenden Bindemittels führt [63]. Aus diesem Grund werden die Bioöle auch häufig in Verbindung mit einer Wiederverwendung von Bitumen benutzt, um der erhöhten Steifigkeit der gealterten Bindemittel entgegenzuwirken. Problematisch wird bei diesen Produkten allerdings das Verhalten bei hohen Temperaturen, da zumeist die Beständigkeit gegen Spurrinnen abnimmt. Die rheologischen Eigenschaften der Biobindemittel ändern sich erheblich, wenn Polymere als Modifikatoren hinzugefügt werden, wodurch eine Verringerung der Temperaturempfindlichkeit erzielt werden kann [64].

Ein weiteres Material, welches bereits in mehreren Studien angewendet wurde, ist Lignin, wobei sich die Produkte innerhalb dieser Bezeichnung erheblich unterscheiden. Die physikalischen und chemischen Eigenschaften eines Lignins sind dabei unter anderem von der pflanzlichen Quelle und der Extraktionsmethode abhängig [37]. Im Gegensatz zu den Bioölen hat Lignin eine versteifende Wirkung, wobei die Zugabemenge von Lignin zumeist zwischen 10 bis 40 M.-% liegt [37]. Eine zu hohe Dosierung von Lignin kann demnach auch negative Auswirkungen haben, da höhere Misch- und Verdichtungstemperaturen erforderlich werden, um den steiferen Binder sachgemäß verarbeiten zu können [37]. Um dem entgegenzuwirken, wurden bereits Studien mit modifiziertem Lignin, z.B. in Kombination mit einem Öl, z.B. einem gebrauchten Motoröl oder einem gebrauchten Sojabohnenöl, durchgeführt. Hier zeigte sich, dass die Viskosität des Materials durch die Hinzugabe der Öle in geeigneter Menge wieder abgesenkt werden konnte [65 bis 67].

Insgesamt wurden 13 der 49 Studien für die systematische Bewertung nicht weiterverwendet. Die Aussortierung erfolgte hauptsächlich aufgrund der Qualität der Veröffentlichungen, anhand derer eine nachvollziehbare weiterführende Bewertung nicht möglich war, bspw. aufgrund fehlender Informationen zum Biobindemittel oder fehlender Referenzproben. Im Anhang des Berichts befindet sich eine Liste der nicht weiterverwendeten Literatur.

3.2.2 Anteile ≤ 10 M.-% (Modifizierung)

Für diese Untergruppe wurden insgesamt 35 Veröffentlichungen zusammengetragen in denen insgesamt 40 verschiedene Materialien untersucht wurden. In diese Gruppe fällt zudem ein Großteil der Wiederverwendungsstudien, in denen vor allem Rejuvenatoren als Alternativmaterialien in Verbindung mit gealtertem Bitumen zum Einsatz kamen.

Hierbei haben die Bioöle aus verschiedenen Biomassequellen erneut einen großen Anteil [68 bis 70]. Die Zugabemengen der Produkte sind signifikant abhängig von der Viskosität der Materialien und deren Einfluss auf das Endprodukt. Eine geringe Zugabemenge von Bioölen lässt auf eine geringe Viskosität dieser Produkte schließen, was wiederum die Zugabemenge dieser Produkte beschränkt. Neben den extra hergestellten Bioölen fällt auch die Gruppe der gebrauchten Speiseöle (engl. Waste cooking oil, WCO) in diesen Dosierungsmengenbereich. Die Verwendung von gebrauchten Speiseölen wird häufig mit ihrer einfachen Verfügbarkeit begründet. WCO wird hauptsächlich in Verbindung mit gealtertem Bitumen verwendet und hat dabei, so wie die meisten Bioöle, eine erweichende Wirkung auf das Bindemittel [71].

Als weitere Möglichkeit der Teilsubstitution wird ein aus Schweinegülle gewonnener Biobinder gesehen, welcher mittels thermochemischer Verflüssigung hergestellt und mit einer Zugabemenge bis zu 10 M.-% verwendet wird [72 bis 74].

Für die nachfolgende systematische Bewertung wurden aus dieser Gruppe insgesamt 23 Materialien ausgewählt. Wie schon zuvor beschrieben, lag der Hauptgrund der Aussortierung eines Materials an

unzureichenden Informationen, die eine weitere Betrachtung nicht zuließen. Auch hier wurde die nicht weiter beachtete Literatur in einer Übersicht im Anhang aufgelistet.

3.2.3 Sonstige Abfälle oder aus Abfällen gewonnene Materialien

Die Literaturrecherche hat gezeigt, dass es durchaus noch weitere Materialien gibt, die für eine Verbesserung der Eigenschaften zum Bitumen bzw. zum Asphalt hinzugegeben werden können, die sich aber nicht in die im Rahmen dieser Arbeit festgelegten Gruppen einsortieren lassen. Hierzu gehört zum Beispiel die Zugabe von Kunststoffabfällen. Eine Methode hierfür ist die Zugabe von zerkleinerten Kunststoffresten zu Asphalt [75, 76]. In Deutschland wurde dieses Vorgehen bereits im Jahr 2000 im Rahmen einer Erprobungsstrecke auf der BAB 1 getestet [77]. Hier wurde ein sortenreiner Kunststoffabfall im Vergleich mit einigen anderen Modifikationen erprobt. Das Erprobungsfeld mit dem Kunststoffabfall zeigte allerdings ein frühzeitiges Versagen in Form von Rissen und hat sich in dieser Form letztendlich nicht bewährt. Aktuellere Forschungsansätze gehen wieder in diese Richtung (z.B. EcoFlakes) und sollten insbesondere bezüglich des Kälteverhaltens kritisch überprüft werden. Grundsätzlich ist bei diesem Vorgehen und auch bei allen anderen Konzepten ebenfalls zu berücksichtigen, dass das sehr gut recyclefähige System „Asphalt“ nicht durch den Eintrag von Stoffen dahingehend beeinträchtigt wird, dass anschließend eine Wiederverwendung des Asphalts erschwert oder möglicherweise verhindert wird.

Vor diesem Hintergrund empfiehlt auch die EAPA in einer Veröffentlichung zur Benutzung von sekundären Materialien, Nebenprodukten oder Abfällen im Asphalt die folgenden Punkte zu beachten, welche während der systematischen Bewertung bei der Definition der Nachhaltigkeitskriterien berücksichtigt wurden [78]. Jegliche Materialien sind nur dann im Asphalt einzubauen, wenn neben der Gewährleistung eines sinnvollen wirtschaftlichen Einsatzes keine Risiken in den folgenden Bereichen auftreten [78]:

- Die zukünftige Wiederverwendung von Asphalt sollte durch die hinzugegebenen Produkte nicht beeinträchtigt werden.
- Es dürfen keine Nachteile in Bezug auf die Gesundheit und Sicherheit der Arbeitnehmer und der Allgemeinheit während der Verarbeitung, Verwendung und Anwendung entstehen. Außerdem darf es keine negativen Umweltauswirkungen und/oder Haftungsprobleme bei der Verarbeitung, Verwendung und Anwendung geben. Diese Voraussetzungen bedeuten weiterhin, dass die Gesundheits- und Umweltklassifizierung von Bitumen oder Asphalt durch die Zugabe von Abfällen nicht beeinträchtigt wird.
- Es sollte keine negativen Auswirkungen auf die technische Produktleistung von Asphalt geben.

3.2.4 Weitere Materialien zur Verbesserung der Eigenschaften der Bitumenalternativen

Vor dem Hintergrund der Nachhaltigkeit gibt es Ansätze die Materialeigenschaften von substituierten Bitumen und Asphalten mithilfe von Materialien zu verbessern, ohne dass Risiken für die Gesundheit, die Umwelt und die Wiederverwendung entstehen. Eine tiefergehende Betrachtung dieser Produkte wird an dieser Stelle nicht erfolgen, jedoch gibt die nachfolgende Tab. 2 einen Überblick zu möglichen Materialien, die im Asphalt zur Verbesserung der Eigenschaften untersucht wurden. Das Hauptziel dabei ist die Verbesserung der mechanischen Eigenschaften des Asphalt. Bei der Untersuchung der rheologischen Eigenschaften der Biobindemittel zeigte sich beispielsweise häufig im Vergleich zu Bitumen eine höhere Temperaturempfindlichkeit, was ähnlich zum reinen Bitumen auch bei den Biobindern mit einer Zugabe von Polymeren verbessert werden konnte. Wie sich zeigte, können für die Verbesserung der Eigenschaften von Bitumen und Asphalt jedoch auch Produkte aus anderen Rohstoffquellen zum Einsatz kommen. Generell sind Modifizierungen mit Sorgfalt und Vorsicht auszuwählen, da sich die physikalischen Eigenschaften der entwickelten Biobindemittel im Gebrauchstemperaturbereich häufig von denen in der Bitumenindustrie verwendeten Materialien unterscheidet [63].

Tab. 2: Materialien zur Verbesserung der Eigenschaften von Bitumenalternativen

Art/ Name	Quelle	Ziel
Naturfasern (z.B. aus Jute, Leinen, Hanf, Sisal, Baumwolle)	[79 bis 82]	Verbesserung des Ermüdungsverhaltens, der Stabilität und der Widerstandsfähigkeit gegen Beanspruchung
Synthetische Fasern (PP, PE, Nylon, Glas und Stahlfasern)	[79]	Verbesserung des Ermüdungsverhaltens, der Stabilität und der Widerstandsfähigkeit gegen Beanspruchung
Verschiedenste Anti-Ageing-Additive	[23, 83]	Verbesserung des Alterungsverhaltens und Erhöhung der Lebensdauer
Mikrokapseln mit Rejuvenatoren oder anderen Ölen	[84 bis 87]	Zur Selbstheilung während der Nutzungsphase und somit zur Verlängerung der Lebensdauer
Polymere z.B. aus SBS oder aus Recycling (Polyethylen mit hoher oder geringer Dichte (HDPE and LDPE) oder Gummigranulat (engl. Crumb rubber))	[88 bis 91]	HDPE (z.B. aus Verpackungen oder Plastikflaschen) zur Verbesserung der Stabilität und Dauerhaftigkeit von Asphalten, Gummigranulat (aus gebrauchten Reifen) zur Verbesserung des Widerstands gegen dauerhafte Verformungen und Rissbildung, SBS zur Erweiterung der Elastizitätsspanne (niedrigere Penetration und höherer Erweichungspunkt) und Verbesserung des Widerstands gegen Spurrillen und Risse
Wachse (z.B. Sasobit, Paraffinwachs, Polyethylenwachs)	[92]	Senkung der Viskosität und somit Verbesserung der Verarbeitbarkeit bei Senkung der Verarbeitungstemperatur und somit des Energieverbrauchs

3.3 Bitumensubstitution im Rahmen der Asphaltwiederverwendung

Die Ressource „Altasphalt“ ist aufgrund des sehr großen Straßenbestandes für zukünftige Bindemittelkonzepte von erheblicher Bedeutung. Insofern ist dies in einem gesonderten Kapitel berücksichtigt worden, auch wenn hier Produkte zum Einsatz kamen, die bereits in den beiden vorangehenden Kapiteln zur reinen Bindemittelsubstitution behandelt wurden. Hilfreich waren dabei vor allem Studien, die mit ihren ausgewählten Materialien sowohl reine Bindemittel- als auch Asphaltuntersuchungen durchgeführt haben. Insgesamt konnten 31 Studien zusammengetragen werden, in denen eine Asphaltwiederverwendung im Zusammenhang mit Bitumenalternativen oder anderen Modifizierungen wie Rejuvenatoren untersucht wurden. Dabei ist das allgemeine Ziel die Abhängigkeit von frischem Bindemittel bei der Wiederverwendung zu reduzieren, indem das gealterte Bindemittel z.B. durch Rejuvenatoren verjüngt oder das notwendige frische Bindemittel durch Alternativen ersetzt wird. In dem Großteil der Studien, insgesamt 21 Publikationen, werden ausschließlich als Rejuvenatoren bezeichnete Produkte bei der Wiederverwendung eingesetzt. Auffällig ist, dass bei den Studien zu den Rejuvenatoren die benutzen Produkte häufig anonymisiert sind und wenig bis keine Informationen zur Rohstoffquelle oder Verarbeitung angegeben werden. Aufgrund der fehlenden Informationen wurden diese Studien in der systematischen Bewertung nicht weiter berücksichtigt, da daraus kein Mehrwert für das Konzept gewonnen werden konnte. Für den weiteren Verlauf wurde festgelegt, nur die Asphaltstudien weiter zu berücksichtigen, die entweder direkt aufgrund der Autoren zu einer Bindemittelstudie zugeordnet werden konnten oder in denen genügend Informationen zu den Alternativmaterialien gegeben wurden, um eine möglichst vollständige Bewertung durchführen zu können. Letztendlich konnten so lediglich neun Studien für die systematischen Bewertung ausgewählt werden, die in der nachfolgenden Tab. 3 dargestellt sind.

Tab. 3: Übersicht der Asphaltstudien für die systematische Bewertung

Art/ Name	Quelle	Zugabemenge bezogen auf Binderanteil / Wirkung
BioBinder (Biophalt) aus Nebenprodukten der Forstwirtschaft und weiterer Modifizierung (hochgradig polymermodifizierte BioBinder, HiPMBB)	[93]	100 M.-% / Bitumensubstitution
Bioöl aus Holzabfällen: original bio-oil (OBO), dewatered bio-oil (DWBO), polymer-modified bio-oil (i.e., PMBO)	[94] zugehörige Bindemittelstudien [69, 95]	5 M.-%, 10 M.-% OBO, 5 M.-%, 10 M.-% DWBO, 5 M.-%, 10 M.-% PMBO / Bitumensubstitution
Dammar Naturharz	[96] zugehörige Bindemittelstudie-[57]	2,5 M.-%, 5 M.-%, 7,5 M.-%, 10 M.-% / Bitumensubstitution
Biomodifikatoren aus Maisstroh (CS), Miscanthuspellets (MP), Holzpellets (WP) und Schweinegülle (BMB – bio-modified binder)	[97]	5 M.-%, 10 M.-% / Bitumensubstitution
Ligninhaltiger Abfall	[98] zugehörige Bindemittelstudie [99]	5 M.-%, 10 M.-%, 20 M.-%, 40 M.-%, 60 M.-% / Bitumensubstitution
Lignin	[100]	30 M.-%/ Bitumensubstitution
Rejuvenatoren aus: Maisöl, Sojabohnenöl, Heizöl	[101]	3 M.-%, 6 M.-%, 9 M.-% / Rejuvenator
Sylvaroad (Rejuvenator auf Kiefernholzbasis) Biophalt (BP), Epoxidiertes Sojamethylester (EMS)	[102]	2 M.-% Sylvaroad, 62 M.-% Biophalt, 3 M.-% Epoxidiertes Sojamethylester / Bitumensubstitution und Rejuvenator
Biophalt (BP)	[103]	100 M.-% / Bitumensubstitution

4 Bewertung der Substitute

Wie die Literaturrecherche ergeben hat, gibt es bereits verschiedenste Materialansätze mit Produkten aus unterschiedlichen Stoffgruppen, deren Eignung als Bitumenersatz, Bitumenteilersatz oder Bitumenmodifizierung untersucht wurden. Im Anschluss an die Literaturrecherche wurden aus den 138 ausgewerteten Studien insgesamt 64 Produkte identifiziert, die sich für einen Einsatz als Bitumensubstitut eignen könnten und mit denen anhand der Informationslage eine systematische Bewertung möglich ist. Für diese wurde eine Gegenüberstellung der zusammengestellten potenziellen Alternativmaterialien in tabellarischer Form durchgeführt, um diese systematisch vergleichen und bewerten zu können (siehe Anhang Tab. A-1). Zuvor wurden Kriterien definiert, welche sich in wirtschaftliche, technische und Nachhaltigkeitskriterien unterscheiden lassen. Die Auswahl dieser drei Bereiche erfolgte auf Grundlage gewonnener Erkenntnisse. Wie im Kapitel 3.2.3 erwähnt, ist es unumgänglich, Anforderungen und Ansprüche an die Alternativmaterialien zu setzen, um auf einen erfolgreichen Einsatz dieser Produkte hinzuarbeiten. Die Auswahl der jeweiligen Kriterien und deren Beschreibung erfolgt in den nachfolgenden Kapiteln.

Die Bewertung der definierten Kriterien wurde durch eine symbolische Bewertungsmethodik mittels der fünf Zeichen „++“ (Doppelplus), „+“ (Plus), „o“ (Null), „-“ (Minus) und „--“ (Doppelminus) vorgenommen. Als Bewertungsbasis wurde dafür die typischen Eigenschaften von Bitumen herangezogen. Das bedeutet, dass ein im Vergleich zu Bitumen signifikant besseres Produkt mit „++“ bewertet wird. Ist das Produkt geringfügig besser, wird es mit „+“ bewertet. Ist das Produkt vergleichbar mit Bitumen, wird die Bewertung „o“ vergeben. Die Aufteilung der negativen Bewertungen „-“ und „--“ erfolgt nach dem gleichen Prinzip, wie im positiven Bereich. Minus wird vergeben, wenn das Produkt schlechter ist als Bitumen und Doppelminus, wenn das Produkt signifikant schlechter ist.

4.1 Wirtschaftliche Bewertungskriterien

Um ein Produkt erfolgreich und längerfristig auf dem Markt platzieren zu können, muss neben den technischen Anforderungen auch aus kommerzieller Sicht eine praktikable Lösung vorhanden sein. Demnach sollte ein möglichst erneuerbares Material im Bedarfsfall in großen Mengen verfügbar sein, aus welchem ohne großen zusätzlichen Aufwand in einer typischen Asphaltmischanlage Asphalt hergestellt werden kann. In Deutschland wurden allein im Jahr 2020 ca. 1,9 Mio. Tonnen Bitumen im Asphaltstraßenbau verbaut [104]. Da in der Regel die Mittel für den Bau und die Instandhaltung von Straßen begrenzt sind, sollten erneuerbare Materialien einige Leistungsvorteile bieten, ohne dass sich die Kosten erhöhen oder mit einem nur geringen Anstieg der Kosten verbunden sind. Andernfalls sollten die Produkte, falls diese die Leistung leicht verringern, zumindest mit den Kosten der traditionellen Lösungen konkurrenzfähig sein [27]. Für ein mögliches Alternativprodukt zu Bitumen sollten demnach auch die lokalen Produktions- und Industrieaktivitäten und die Nebenprodukte, die auf dem lokalen Markt verfügbar sind, in Betracht gezogen werden, um somit unter anderem die wirtschaftlichen und ökologischen Kosten des Transports gering zu halten [27].

Um diese Überlegungen während der systematischen Bewertung zu berücksichtigen, wurden die folgenden wirtschaftlichen Kriterien festgelegt:

- Kosten,
- Rohstoffverfügbarkeit und
- Herstellungsprozess und Produktionsaufwand.

4.2 Technische Bewertungskriterien

Neben der Wirtschaftlichkeit ist die technische Qualität entscheidend für die erfolgreiche Einführung eines Produkts. Ein grundlegendes technisches Merkmal, das es zu beachten gilt, ist, dass es sich bei dem erneuerbaren Material um eine bitumenähnliche, viskoelastische Masse und diese eine gute Klebkraft aufweist, um eine ausreichende Haftung mit der Gesteinskörnung zu gewährleisten [27]. Diese

Anforderung ist besonders entscheidend, wenn es darum geht, einen sehr hohen Prozentsatz an Bitumensubstitution zu erreichen. Des Weiteren ist das Verhalten im Gebrauchstemperaturbereich (ca. -20 bis 60 °C) sowie die Widerstandsfähigkeit der Alternativprodukte gegen äußere Einflussfaktoren zu berücksichtigen, da Asphaltstraßen während ihrer gesamten Nutzungsdauer der Witterung und mechanischen Beanspruchungen ausgesetzt sind. Dafür gilt es in Deutschland, dass das Produkt den unterschiedlichen thermischen Beanspruchungen zwischen hohen Temperaturen im Sommer und niedrigen Temperaturen im Winter über einen geforderten Mindestzeitraum (Nutzungsdauer einer Asphaltstraße) standhalten sollte, wobei auch das generelle Alterungsverhalten der Materialien Beachtung finden muss. Schließlich gilt für eine gute und einfache technische Umsetzung, dass je geringer die Änderungen an den traditionellen Verfahren sind, desto größer ist die Akzeptanz solcher neuen Stoffe. Für eine umfassende technische Bewertung sollten letztendlich nicht nur die Materialeigenschaften im Gebrauchstemperaturbereich betrachtet werden, sondern auch die gesamte Herstellungs- und Verarbeitungskette (Produktlagerung/Lagerstabilität, Mischgutherstellung und -zwischenlagerung, Transport zur Baustelle und Einbau) [27].

Auf Basis dieser Überlegungen wurden für die technischen Kriterien folgende Vergleichspunkte ausgewählt:

- Chemische Struktur und Zusammensetzung,
- Physikalische Bindemitteleigenschaften im hohen Temperaturbereich,
- Physikalische Bindemitteleigenschaften im niedrigen Temperaturbereich,
- Asphalteigenschaften (falls vorhanden),
- Verarbeitbarkeit und
- Alterungsverhalten.

4.3 Bewertung der Nachhaltigkeitskriterien

Der Hauptantrieb für eine Bitumensubstitution ist das Erreichen der Unabhängigkeit von Rohöl mittels einer nachhaltigeren Alternative. Daher ist es unumgänglich, neben wirtschaftlichen und technischen Kriterien auch ökologische und soziokulturelle Nachhaltigkeitskriterien zu beurteilen, wozu als Basis die bereits genannten Empfehlungen der EAPA dienten [78]. Daneben sind aber auch weitere Aspekte zu beachten, um zusätzlichen Risiken z.B. für die Gesundheit und Sicherheit der Arbeitnehmer zu vermeiden [27]. Dabei haben Untersuchungen immer wieder aufgezeigt, dass die Alternativmaterialien aufgrund ihrer organischen Beschaffenheit häufig einen niedrigeren Flammpunkt als Bitumen haben, was in Anbetracht der Verarbeitungstemperaturen von bituminösen Mischungen ein Sicherheitsrisiko für die Arbeiter darstellen könnte [27]. Ein gesonderter Aspekt bei der Bewertung der Umweltkriterien ist die Beurteilung der CO₂-Reduktion durch die Verwendung der Alternativprodukte. Vorteile nachwachsender Materialien, wie beispielsweise Holz oder Pflanzen, ist, dass diese für ihr Wachstum CO₂ benötigen und dieses aus der Erdatmosphäre binden. Dabei sollte sichergestellt werden, dass das CO₂ auch bei der Verwendung gebunden bleibt und nicht freigesetzt wird, z.B. bei der Verarbeitung. Ein weiterer grundlegender Aspekt zur Nachhaltigkeit ist, dass das Asphaltmischgut, das nachwachsende Rohstoffe enthält, am Ende seiner Lebensdauer recycelbar sein sollte und somit in neuen Straßenbelägen zur Anwendung kommen kann [27]. Die Alternativmaterialien sollten also die bereits gute Wiederverwendbarkeit von Asphaltstraßen nicht negativ beeinflussen.

Die hier vorgenommene Berücksichtigung von weiteren Nachhaltigkeitskriterien (neben den technischen und wirtschaftlichen) kann nur ein kleines und ausgewähltes Fenster an Aspekten berücksichtigen, da eine vollumfängliche Nachhaltigkeitsbetrachtung bereits für ein Produkt den Rahmen dieser Arbeit sprengen würde.

Zur Bewertung der ökologischen und soziokulturellen Nachhaltigkeitskriterien der Produkte wurden folgende Kriterien herangezogen:

- Umweltverträglichkeit (z.B. anhand von Herstellerangaben und der chemischen Zusammensetzung),
- CO₂-Reduktion (z.B. anhand von Datenlage),
- Recyclingoptionen (z.B. anhand von Alterungs- und Verjüngungseigenschaften) und
- Arbeitssicherheit (z.B. anhand der chemischen Zusammensetzung und der Verarbeitbarkeit).

4.4 Wichtung der Kriterien und Ergebnisse der systematischen Bewertung

Im Gegensatz zur Informations- und Datensammlung sind die Materialien (Anzahl: 64) in diesem Abschnitt nicht mehr nach den Zugabemengen sortiert, sondern wurden anhand der Ausgangsstoffe zusammengefasst. Die Tabelle der systematischen Bewertung befindet sich im Anhang (Tab. A-1). Den größten Anteil bilden mit 29 Produkten die Materialien auf Basis von Holz und Holzrückständen. Darauf folgen mit 20 verschiedenen Produkten die Materialien, die aus Gräsern oder anderen landwirtschaftlichen Pflanzen gewonnen wurden. Die restlichen Materialien basieren auf Abfallprodukten, z.B. gebrauchtes Speiseöl oder alten Reifen, oder wurden aus Biomasse tierischen oder aquatischen Ursprungs gewonnen. Die Bewertung der festgelegten Kriterien erfolgte sowohl anhand der in den Veröffentlichungen gegebenen Informationen als auch anhand von subjektiven Einschätzungen.

Kriterien, die aufgrund fehlender Informationen nicht bewertet werden konnten, wurden mit dem Eintrag „k.A.“ (keine Angabe) ausgefüllt. Dadurch wird deutlich aufgezeigt, welche Kriterien in den wissenschaftlichen Veröffentlichungen eine untergeordnete Rolle spielen, nämlich vor allem die Angabe möglicher Kosten. Für dieses Kriterium konnte für die Mehrheit der Materialien keine Angabe gemacht werden (für 56 der 64 Materialien). Weitere Untersuchungslücken wurden für die Kriterien der physikalischen Eigenschaften im Tieftemperaturbereich und für die Asphalteigenschaften festgestellt. Hierzu konnten jeweils für 32 der 64 Materialien keine Angaben gemacht werden, da die Untersuchungen dieser Eigenschaften keine Bestandteile der Studien waren. Außerdem hat sich gezeigt, dass ein weiteres wichtiges Kriterium in Hinblick auf die Nachhaltigkeit ebenfalls zu wenig Aufmerksamkeit erhält, nämlich die Untersuchung des Alterungsverhaltens der Materialien. Für insgesamt 29 der 64 Materialien wurde das Alterungsverhalten im Rahmen der Studien nicht untersucht. Es ist wichtig zu betonen, dass die alternativen Materialien keine negativen Auswirkungen auf die Alterung und somit auf die Nutzungsdauer der Straßen haben sollten. Aus diesem Grund muss die Alterung stärkere Beachtung finden, wenn es um die Beurteilung der alternativen Materialien geht.

Um im Anschluss eine numerische Bewertung der Materialien zu erstellen, erfolgte für die vergebenen Kriterien eine Zuordnung mithilfe eines ganzzahligen Bewertungssystems. Die numerische Bewertung der Kriterien erfolgte dafür mit einer Summenbildung der Bewertungspunkte der Kriterien mit jeweils fünf Abstufungen (2 bis -2):

$$\text{Endsumme} = („++“=2) + („+“=1) + („o“=0) + („-“=-1) + („- -“=-2) \quad (1)$$

Das bedeutet, je höher die Endsumme eines Produktes ausfällt, desto besser ist dessen Bewertung. Mithilfe dieses Vorgehens wurden zunächst diejenigen Materialien identifiziert, deren Endsumme negativ waren, was heißt, dass diese im Gesamtvergleich mit Bitumen insgesamt schlechter bewertet wurden und somit für eine weitere Beachtung ausgeschlossen wurden. Insgesamt wurden 13 Materialien mit einer Endsumme geringer als 0 bewertet. Da für die gewählten Bewertungsbereiche unterschiedlich viele Kriterien ausgewählt wurden (sechs technischen Kriterien, vier Nachhaltigkeitskriterien und drei Wirtschaftlichkeitskriterien) liegt eine Gewichtung der Bereiche vor. Zudem konnten bei einigen Produkten für bestimmte Kriterien keine Angaben gefunden werden, was zu einem leichten Ungleichgewicht der Bewertung führt. Die Auswirkungen auf das Endergebnis werden aber als eher gering angesehen. Die ausgeschlossenen Materialien verteilen sich über alle Stoffgruppen, daher kann erstmal nicht pauschal festgestellt werden, dass ein schlechtes Abschneiden explizit auf eine Rohstoffquelle zurückgeführt werden kann. Für die nachfolgende SWOT-Analyse und die Erstellung eines Konzepts wurden dann die 18

Materialien mit der besten Bewertung (Endsumme 5 und besser) weiter betrachtet. Diese sind in der Tab. 4 orange gekennzeichnet. Die vollständige Liste ist dem Anhang A2, Tab. A-1 zu Tab. A-1 zu entnehmen.

Tab. 4: Liste der ausgewählten Stoffe mit numerischer Bewertung

Nr.*	Stoff/Stoffgruppe	End-summe	Nr.*	Stoff/Stoffgruppe	End-summe
1	Meeresbiomasse	6		Gräser und landwirtschaftliche Pflanzen	
2	Ölschiefer	-7	32	Pflanzliche Biomasse (Gräser)	7
	Holz und Holzrückstände		33	Pflanzliche Biomasse (Gräser)	6
3	Pflanzliche Biomasse (Holz)	9	34	Pflanzliche Biomasse (Gräser)	5
4	Pflanzliche Biomasse (Holz) und gebrauchtes Motoröl	8	35	Pflanzlich	5
5	Pflanzliche Biomasse (Holz)	7	36	Harz aus pflanzlicher Biomasse (Gräser)	4
6	Pflanzliche Biomasse (Holz-Abfall)	7	37	Pflanzliche Biomasse (Gräser)	4
7	Pflanzliche Biomasse (Holz)	6	38	Pflanzliche Biomasse (Gräser)	4
8	Pflanzliche Biomasse (Holz)	6	39	Pflanzliche Biomasse (Gräser)	4
9	Wasser und pflanzliche Biomasse	5	40	Pflanzlich (Samen eines Baums)	4
10	Pflanzliche Biomasse (Holz-Abfall)	4	41	Pflanzlich	4
11	Pflanzliche Biomasse (Holz)	4	42	Pflanzliche Biomasse (Gräser)	3
12	Pflanzliche Biomasse (Holz) und Bau- und Abbruchabfälle	4	43	Pflanzlich	3
13	Pflanzliche Biomasse (Holz)	4	44	Pflanzliche Biomasse (Gräser)	2
14	Pflanzliche Biomasse (Holz)	3	45	Pflanzlich	2
15	Pflanzliche Biomasse (Holz-Abfall)	3	46	Pflanzliche Biomasse (Gräser)	0
16	Pflanzliche Biomasse (Holz)	3	47	Pflanzlich (Samen)	0
17	Naturharz	2	48	Pflanzlicher Ursprung (Keine genaue Angabe)	-1
18	Pflanzliche Biomasse (Holz-Abfall)	2	49	Planzlicher Ursprung sehr stark chemisch aufbereitet	-1
19	Pflanzliche Biomasse (Holz)	2	50	Pflanzlich	-1
20	Pflanzliche Biomasse (Holz)	2	51	Planzlicher Ursprung sehr stark chemisch aufbereitet	-1
21	Pflanzliche Biomasse (Holz)	2		Abfallprodukte (gebrauchtes Speiseöl, alte Reifen, etc.)	
22	Pflanzliche Biomasse (Holz)	2	52	Gebrauchtes Speiseöl	7
23	Pflanzliche Biomasse (Holz)	0	53	Biomasse aus Kunststoffabfällen & pflanzlichem Öl	6
24	Pflanzliche Biomasse (Holz-Abfall)	-1	54	Pflanzliche und tierische Abfallprodukte, Bioflux	6
25	Pflanzliche Biomasse	-1	55	Gebrauchtes Speiseöl, Altspeiseöl	5
26	Pflanzliche Biomasse (Holz-Abfall)	-2	56	Biomasse aus Hausmüll	4
27	Pflanzliche Biomasse (Holz-Abfall)	-2	57	Biomasse aus pulverisierten Kunststoffabfällen	4
28	Pflanzliche Biomasse (Holz)	-3	58	Gebrauchtes Speiseöl	3
29	Biomasse aus Holz (Harz)	-3	59	Gebrauchtes Speiseöl	2
30	Harz und andere pflanzliche Stoffe	-4	60	Gebrauchtes Speiseöl	2
31	Guayule Harz	-4	61	Biomasse aus Kunststoffabfällen	2
		62		Gebrauchtes Speiseöl	1
				Biomasse aus tierischem Ursprung	
		63		Tierische Biomasse	9
		64		Tierische Biomasse	5

*: Nr. gemäß Tab. A-1, Anhang A2

5 Auswahl von Konzepten für eine Praxisumsetzung

Für die Erstellung der Konzepte wurden zunächst die Ergebnisse der systematischen Auswertung für eine SWOT-Analyse weiterverwendet, in welcher die individuellen Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken des jeweiligen Produkts bewertet werden. Mithilfe der zusammengetragenen Informationen wurde im Anschluss ein theoretisches Konzept erstellt, mit dem die großtechnische Anwendbarkeit von alternativen Materialien für den Einsatz in der Praxis nachgewiesen werden könnte. Für dieses abschließende Konzept

wurden wiederum die drei Säulen des AP 1 berücksichtigt und Alternativmaterialien für eine vollständige und teilweise Bitumensubstitution sowie für die Asphaltwiederverwendung bewertet.

5.1 SWOT-Analyse

Für die SWOT-Analyse wurden die 18 Stoffe mit den höchsten Punktzahlen (Stoffe mit Endsumme größer oder gleich 5) ausgewählt, aus denen dann eine Auswahl für die Konzepte vorgeschlagen wird. Die Ergebnisse der SWOT-Analyse sind in der folgenden Tabelle (Tab. 4) abgebildet. Als Stärken und Schwächen wurden jeweils die Ergebnisse der systematischen Bewertung verwendet. Basierend auf den gegebenen Informationen wurden die Chancen und Risiken abgeleitet. Da während der systematischen Bewertung die Stärken und Schwächen bereits bewertet wurden, erfolgte für die Auswertung der Ergebnisse der SWOT-Analyse noch eine numerische Einbindung der jeweiligen Chancen und Risiken. Hierzu wurde für die Chancen und Risiken, wie bereits bei der systematischen Bewertung, jeweils eine Werteskala von -2 bis +2 hinzuaddiert. Für die Gesamtbewertungszahl hat sich dadurch das Wertespektrum auf 4 bis 10 (vorher 5 bis 9) leicht erweitert. Insgesamt wurden die Endsummen durch die numerische Bewertung der Chancen und Risiken jedoch nach unten korrigiert. Bei neun der 18 Materialien führte die Bewertung zu einer Reduzierung der Endsumme. Bei acht Produkten blieb die Endsumme unverändert und lediglich bei einem Material, dem Kraft-Lignin, stieg die Endsumme von 9 auf 10 Punkte.

Das durch die Bewertung und die SWOT-Analyse errechnete Ranking der 18 Stoffe zeigt die Tab. 5. Die vollständige Liste der SWOT-Analyse ist dem Anhang A2, Tab. A-2 zu entnehmen.

Tab. 5: Ranking der Stoffe unter Berücksichtigung der SWOT-Analyse

Nr.	Stoff/Stoffgruppe	End-summe	Bonus/Malus SWOT	Ranking
3	Pflanzliche Biomasse (Holz), Kraft-Lignin	9	1	10
63	Tierische Biomasse, Schweinegülle	9	-1	8
4	Pflanzliche Biomasse (Holz) und gebrauchtes Motoröl, Kraft-Lignin & Altmotoröl (WEO)	8	-1	7
5	Pflanzliche Biomasse (Holz), Holzbasiertes Bioöl	7	0	7
52	Gebrauchtes Speiseöl, Biodiesel-Rückstand aus gebr. Speiseöl	7	0	7
32	Pflanzliche Biomasse (Gräser), Rohzuckerrohrmelasse (sugarcane waste molasses)	7	-1	6
1	Meeresbiomasse, Mikroalgenrückstände	6	0	6
7	Pflanzliche Biomasse (Holz), Klason-Lignin modifiziert mit Polyethylenglycol und Schwefel	6	0	6
8	Pflanzliche Biomasse (Holz), Lignin und gebrauchtes Sojabohnenöl	6	0	6
53	Biomasse aus Kunststoff Abfällen pflanzlichem Öl, Pyrolyseöl aus Reifen und unverarbeitetem Palmöl	6	0	6
6	Pflanzliche Biomasse (Holz-Abfall), Biobinder aus Spänen von japanischem Zedernholz	7	-2	5
33	Pflanzliche Biomasse (Gräser), Rohe Rohzuckerrohrmelasse	6	-1	5
54	Pflanzliche und tierische Abfallprodukte, Bioflux	6	-1	5
35	Pflanzlich, Fettsäuremethylester (FAME) von Rapsöl	5	0	5
64	Tierische Biomasse, Schweinegülle kombiniert mit Algae (Swilgae)	5	0	5
9	Wasser und pflanzliche Biomasse, Ligninhaltiger Abfall	5	-1	4
34	Pflanzliche Biomasse (Gräser), Bioöl aus Zuckerrohr Bagasse (SCB)	5	-1	4
55	Gebrauchtes Speiseöl, Altspeiseöl	5	-1	4

5.2 Konzeptvorschläge für die Praxisumsetzung

Auf Basis der in den vorangehenden Kapiteln zusammengetragenen Informationen wurde abschließend ein theoretisches Konzept erstellt, mit dem die großtechnische Anwendbarkeit von alternativen Materialien für den Einsatz in der Praxis nachgewiesen werden könnte.

5.2.1 Vollständige und teilweise Bitumensubstitution

Derzeit ist noch kein einzelnes Material verfügbar, mit dem eine vollständige Bitumensubstitution möglich ist. Daher sollte der Ansatz verfolgt werden, eine vollständige Substitution durch eine Kombination von verschiedenen Produkten anzustreben, die zumindest für eine teilweise Substitution bereits vielversprechende Ergebnisse gezeigt haben. Dafür ist das Ziel zu verfolgen, eine Kombination von Stoffen so zusammenzustellen, dass sich deren positive Effekte auf die Asphalteigenschaften ergänzen oder negative Einzelauswirkungen ausgleichen. Dahingehend können durch eine Kombination möglicherweise auch Materialien mit zunächst ungünstigeren Eigenschaften noch Potenzial für die Bitumensubstitution haben. Folgende Materialkombination wurden bereits mit vielversprechenden Ergebnissen untersucht und sollten daher berücksichtigt werden:

- Kraft-Lignin & Altmotoröl (WEO) [65],
- Pyrolyseöl aus alten Reifen und unverarbeitetem Palmöl [117],
- Lignin und gebrauchtes Sojabohnenöl [67],
- Klason-Lignin modifiziert mit Polyethylenglycol und Schwefel [121] und
- Schweinegülle kombiniert mit Mikroalgen [125, 126].

An den bereits durchgeföhrten Kombinationen wird vor allem Lignin als strukturbildendes Produkt eingesetzt, welches mit öligen Produkten kombiniert wurde, z.B. bei der Kombination von Kraft-Lignin und gebrauchtem Motoröl oder Sojabohnenöl. Bei dieser Kombination ergänzen sich die Effekte beider Materialien, und es wird ein Ausgleich potenziell negativer Wirkungsweisen erzielt.

Eine ebenfalls vielversprechende Kombination könnte die Zusammenführung von Stoffen aus Schweinegülle und aus Mikroalgen sein. Die Mengenzusammensetzung dieser Mischung beträgt 80 M.-% Mikroalgen und 20 M.-% Schweinegülle, welche dann mittels hydrothermaler Verflüssigung zu Biobinder verarbeitet wurde [125]. Die geringere Endsumme nach der systematischen Bewertung und der SWOT-Analyse dieser Materialkombination liegt dabei hauptsächlich an fehlenden Informationen, da bei dieser Kombination bis jetzt weder die Tieftemperatureigenschaften noch das Alterungsverhalten untersucht wurden. Die Stärken dieser Kombination sprechen jedoch dafür, dass weitere Untersuchungen in Betracht gezogen werden sollten.

Insgesamt werden folgende Materialien aus den Ergebnissen der systematischen Bewertung und der SWOT-Analyse für eine Bitumensubstitution vorgeschlagen:

- Bioöl aus Schweinegülle als Voll- und als Teilsubstitution
- Biobinder aus Mikroalgen als Basis
- Kraft-Lignin als Teilsubstitution
- Holzbasiertes Bioöl als Modifizierung
- Pyrolyseöl aus alten Reifen (Nebenprodukt der Biokraftstoffherstellung) als Teilsubstitution
- Bioöl aus Zuckerrohr oder Zuckerrohrmelasse (Restprodukt bei der Verarbeitung von Zuckerrohr) als Teilsubstitution
- Bioöl aus Biodiesel-Rückständen (Nebenprodukt der Biokraftstoffherstellung) als Modifizierung/ Rejuvenator
- Fettsäuremethylester (FAME) von Rapsöl (Nebenprodukt der Biokraftstoffherstellung) als Modifizierung/ Rejuvenator
- Gebrauchtes Speiseöl als Modifizierung/ Rejuvenator

Zur Verbesserung der Eigenschaften der Materialkombinationen und zur Stabilisierung der Mischungen könnten außerdem Modifizierung durch z.B. Polymere, Naturfasern, Stabilisatoren, Dispergiermittel, Anti-Ageing-Additive, etc. Beachtung finden.

5.2.2 Asphaltwiederverwendung

Ergänzend zu der Suche nach einer Produktkombination für die vollständige Substitution von Bitumen sollte zudem eine Bindemittelstrategie verfolgt werden, bei der auch das Bindemittel aus dem Ausbauasphalt mitberücksichtigt wird. Während der Aufbereitung des gebrauchten Bindemittels liegt das Hauptziel in der Reduzierung der Bindemittelsteifigkeit, wofür grundsätzlich alle Produkte geeignet wären, die eine Viskositätsenkende Wirkung haben, welche aus der zumeist geringeren Viskosität dieser Produkte selbst resultiert (fluxende Wirkung). Durch die Vermischung lässt sich wiederum die gesamte Viskosität des Materials reduzieren, wobei hier sicherlich nicht nur die Viskosität oder die Steifigkeit (komplexer Schermodul) betrachtet werden sollten, sondern eine umfassende rheologische Charakterisierung vorzunehmen ist. Für eine alternative Bindemittelstrategie unter Berücksichtigung von Ausbauasphalt kann der Großteil der Materialien aus der SWOT-Analyse in Betracht kommen, da die meisten Bioöle, Modifizierungen und Rejuvenatoren eine mit Bitumen verglichen geringe Viskosität aufzeigen. Bei der Auswahl von geeigneten Produkten sollte jedoch darauf geachtet werden, dass diese keine negativen Auswirkungen auf die Alterungseigenschaften der neuen Asphaltmischung während der Nutzungsdauer haben – eine Eigenschaft, die in den Studien nur vereinzelt untersucht wurde.

Daher werden folgende Produkte der SWOT-Analyse, bei denen die Wirkung auf die Alterung bereits untersucht wurden und die keine oder sogar eine positive Wirkung auf die Alterung haben, auch für eine Wiederverwendung von Asphalt vorgeschlagen:

- Kraft-Lignin in Kombination mit einem viskositätsverändernden Zusatzstoff
- Bioöl aus Schweinegülle
- Holzbasiertes Bioöl
- Pyrolyseöl aus alten Reifen und unverarbeitetem Palmöl

Bei den übrigen Produkten ist die Auswirkung auf die Alterung noch ungewiss und sollte daher ein fester Bestandteil in zukünftigen Untersuchungen sein.

5.2.3 Versuchsablaufplan

Aus den Erkenntnissen der Literaturrecherche wird für die wissenschaftliche Fortführung des Themas der Bindemittelsubstitution im Asphalt ein Ablaufplan vorgeschlagen (Abb. 2), durch den ein systematischer, experimenteller Prozess gewährleistet werden soll, der einen aussagekräftigen Stoffvergleich ermöglicht.

Der Ablaufplan besteht aus drei übergeordneten Arbeitspaketen: der Materialebene, gefolgt von der Bindemittelebene und der Asphaltebene.

Im ersten Arbeitspaket werden zunächst die Stoffe ausgewählt (siehe Ergebnis der SWOT-Analyse), die potenziell für eine Bitumensubstitution in Frage kommen können. Dabei ist die Auswahl unter anderem abhängig von der Verfügbarkeit, den Kosten und den Herstellungsmöglichkeiten. Heimische Materialien sollten dabei präferiert werden, um z.B. den CO₂-Abdruck und die Kosten für einen Transport so gering wie möglich zu halten. Ergänzend sollen die wesentlichen chemischen und physikalischen Eigenschaften der Produkte bestimmt werden, um bereits auf dieser Ebene ungeeignete Stoffe ausschließen zu können. Die in diesem Arbeitspaket zu erwartende große Anzahl an Stoffen sollte durch einen geeigneten Prüfplan reduziert werden.

Im Anschluss daran folgt die Überprüfung der ausgewählten Stoffe auf der Bindemittelebene. In diesem Paket werden sämtliche Stoffe und Stoffkombinationen hergestellt und getestet, die entweder für eine Vollsubstitution oder eine Teilsubstitution in Verbindung mit zurückgewonnenen Bindemitteln aus Asphaltgranulat in Frage kommen könnten. Da die Testmethoden auf Bindemittelebene (z.B. DSR, FTIR-

Spektroskopie, SARA-Analyse) vergleichsweise wenig Probematerial benötigen und schnell durchführbar sind, lassen sich auch hier noch vergleichsweise viele Kombinationsmöglichkeiten herstellen und untersuchen. Hierzu gehört auch die Untersuchung der Auswirkungen von verschiedenen Arten von weiteren Modifizierungen, z.B. Polymermodifikatoren, auf die verschiedenen Arten von Alternativmaterialien. Mit den ausgewählten Stoffen und Stoffkombinationen sind zudem die Alterungseigenschaften nach einer Kurz- und Langzeitalterung zu ermitteln. Mit diesem Schritt lässt sich eine weitere Eingrenzung der Stoffvielfalt erreichen.

Die Stoffe, mit denen auf der Bindemittelebene (einschl. Alterungseigenschaften) die vielversprechendsten Ergebnisse erzielt wurden, sollten dann auf Asphalt ebene zum Einsatz kommen. Hierbei wird erneut in Bindemittelkonzepte für eine Vollsubstitution und Bindemittelkonzepte für eine Teilsubstitution in Kombination mit Ausbauasphalt unterschieden. Zusätzlich muss die Asphaltzusammensetzung definiert werden, wobei auch eine Betrachtung unterschiedlicher Asphaltkonzepte möglich ist. Von diesen Asphaltkonzepten sollten dann abschließend die Nachweise aller Performance-Eigenschaften vor und nach einer Alterung geführt werden.

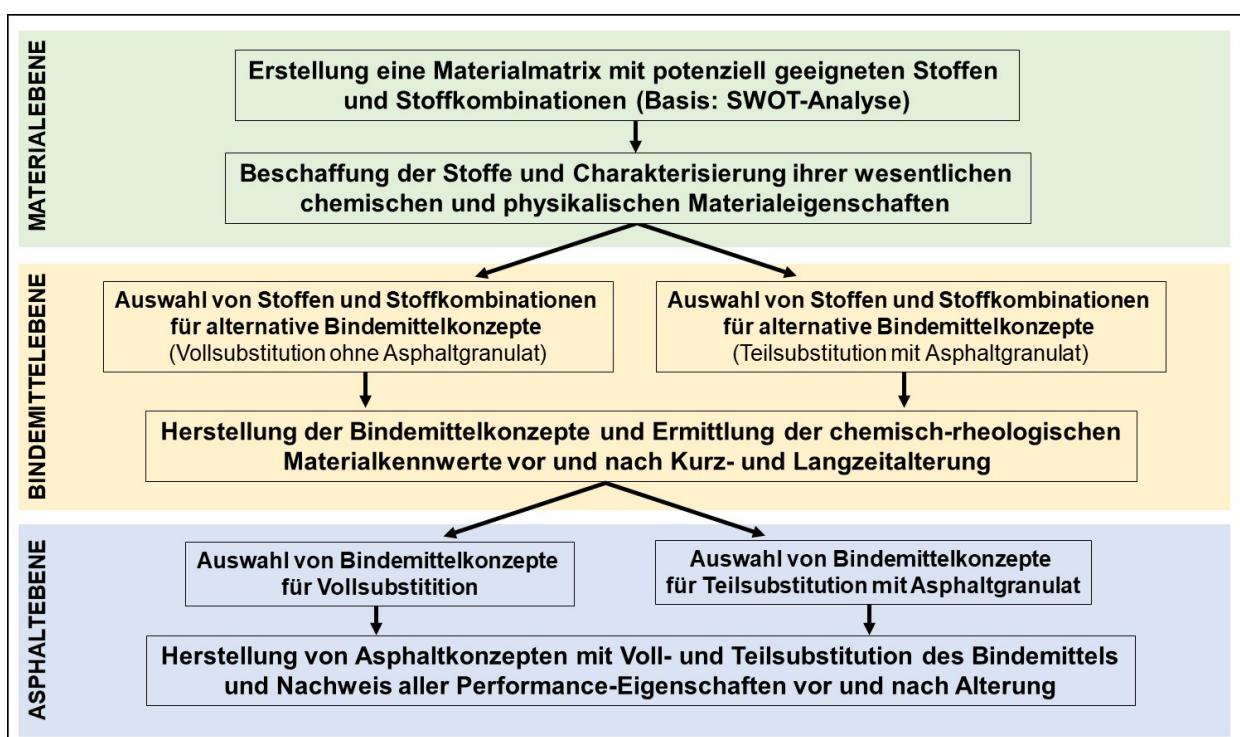


Abb. 2: Vorschlag für die wissenschaftliche und experimentelle Fortführung des Themas auf der Grundlage von Ingrassia et al. (2019) [27]

Das Gesamtkonzept sollte mit den Laboruntersuchungen, den Bewertungen und Schlussfolgerungen enden. Aufbauend auf den Ergebnissen dieser Laboruntersuchungen könnte dann ein weiteres Projekt mit Einbindung von großtechnischen Erprobungen durchgeführt werden.

5.2.4 Ergebnisse der Recherche bei Industrieverbänden

Um bereits in Umsetzung befindliche Konzepte für Asphalt mit alternativen Bindemitteln zu ergründen, wurde eine Recherche bei den maßgebenden Industrieverbänden durchgeführt. Diese hat ergeben, dass an einigen Stellen schon intensiv nach Alternativen gesucht wird oder sogar schon erste Erprobungen mit alternativen Bindemittelkonzepten angestoßen wurden. So wurden z.B. Fahrradwege mit einem sogenannten „Instantbitumen“ (<https://www.supply-concepts.com>, Gemisch aus Naturasphalt und einem Rejuvenator) erfolgreich hergestellt. Hier ist allerdings zu beachten, dass die Quellen für Naturasphalt auch endlich sind. Daher wird nicht nur im internationalen Raum nach Alternativen für den hochmolekularen Anteil im Bitumen gesucht. Auch in Deutschland beschäftigen sich einige Stellen (z.B.

Forschungsabteilungen von großen Bauunternehmen und Forschungseinrichtungen (Fraunhofer) intensiv mit dieser Thematik. Erfolgsaussichten werden hierbei primär in der Stoffgruppe der Lignine gesehen. So hat das Fraunhofer Institut ein FE-Projekt mit dem Titel „Lignobitumen“ initiiert und dabei auch einen mittelständischen Asphaltmischgutproduzenten in das Projekt eingebunden. Hier sollen im ersten Ansatz polare Kraft-Lignine zum Einsatz kommen.

Der Teilersatz von Bitumen mit Hilfe von Rejuvenatoren wird in Deutschland und besonders im internationalen Raum von sehr vielen Asphaltmischgutproduzenten mit großem Interesse beobachtet, und an zahlreichen Stellen in Deutschland (insbesondere in Baden-Württemberg und in Hamburg) hat es bereits Erprobungsmaßnahmen gegeben (Maximalrecycling). Die Erfahrungen mit solchen Asphaltkonzepten sind allerdings nicht durchweg positiv gewesen. So hat beispielsweise das Land Baden-Württemberg die Möglichkeit des Maximalrecyclings mit Rejuvenatoren aufgrund von Schäden in solchen Flächen wieder zurückgezogen. Die Stadt Hamburg hat dagegen bisher noch keine frühzeitige Schadensbildung mit solchen Asphaltkonzepten beobachtet. Diese unterschiedlichen Beobachtungen sind auch der Anlass, dass die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) ein Forschungsprojekt zu dieser Fragestellung ausgeschrieben hat (FE 07.0322/2023/ERB, "Beurteilung des Potentials von Maximalrecycling"), das voraussichtlich im Jahr 2024 starten wird.

Des Weiteren hat die Recherche ergeben, dass in der Asphaltindustrie eine große Unsicherheit und Sorge bezüglich der Bitumenverfügbarkeit besteht. Diese Sorge ist nicht nur durch die derzeitigen geopolitischen Unruhen begründet, sondern auch durch Gerüchte über den Rückzug von Erdölkonzernen aus der Bitumenproduktion, was auch schon begonnen hat. Vor diesem Hintergrund sind auch alternative Lösungen für den Straßenbau zu begrüßen, die mit komplett anderen Bindemittelkonzepten (kein Asphalt) arbeiten (z.B. PU-Harze „Inno-Bond“).

6 Zusammenfassung, Empfehlungen und Ausblick

Die Literaturrecherche und ihre anschließende Auswertung haben gezeigt, dass die Forschung zu Alternativmaterialien für einen Einsatz im Asphaltstraßenbau im Bereich der Biomassen international eine große Bedeutung hat. Die Recherche stellte dabei deutlich heraus, wie breit der Begriff der Biomasse greift und wie unterschiedlich die verwendeten Materialien sind. Unter den Oberbegriff der Biomasse fallen sämtliche organische Materialien aus pflanzlichen oder tierischen Produkten. Biomasse wird vor allem als Energieträger für die Produktion von Bioenergie, wie Biogas oder Biokraftstoffen, eingesetzt. Da es sich bei Bitumen um ein Restprodukt aus der Verarbeitung von Erdöl zu fossilen Energieträgern handelt, wird erhofft, dass bei der Produktion von Bioenergiträgern (Eco-Fuels) ebenfalls Neben- oder Restprodukte anfallen könnten, die sich für einen Einsatz im Asphalt eignen. Auf solche Entwicklungen sollte aber nicht gehofft werden. Es sollte vielmehr eine aktive Suche nach geeigneten Stoffen ohne Sekundärcharakter (Biobindemittel als „Abfallprodukt“ einer Produktionslinie) gesucht werden. Allerdings konnte gezeigt werden, dass die verschiedenen Arten von Bioölen sich erheblich voneinander unterscheiden. So variiert die chemische Zusammensetzung der verschiedenen Arten von Bioölen aufgrund zahlreicher Faktoren erheblich. Diese Faktoren sind z.B. das Verfahren, mit dem die Bioöle hergestellt werden, und die Art der biologisch erneuerbaren Ressource, aus der die Bioöle gewonnen wurden [63]. Letztendlich konnte herausgestellt werden, dass noch kein geeigneter Stoff oder keine geeignete Stoffkombination gefunden wurde, mit der sich eine vollständige Bitumensubstitution erreichen lässt. Daher sind weitere Forschungsanstrengungen notwendig, um die Anwendbarkeit von Biomaterialien als alternatives Bindemittel oder in Kombination mit Ausbauasphalt für den Straßenbau nachzuweisen.

Der vorgeschlagene Ablaufplan bietet eine erste Anregung, wie in einem zukünftigen Projekt Materialien, Methoden und Kombinationen verschiedener Stoffe untersucht werden können, um den Nachweis der Vergleichbarkeit mit Bitumen bis zur Asphaltbene mit experimentellen Laborversuchen zu führen. Dabei sollten Bindemittel- und Mischgutkonzepte mit Ausbauasphalt ein fester Bestandteil des Projektes sein. Durch rheologische und chemische Untersuchungen mit Gemischen aus Rejuvenatoren und Bindemittel aus Asphaltgranulat liegen auf der Bindemittelebene bereits zahlreiche Erkenntnisse vor, die genutzt werden sollten. Da die Anwendung jedoch häufig von wirtschaftlichen, zunehmend von umweltrelevanten und vielleicht weniger von technischen Aspekten abhängen dürfte, könnten in einem weiteren Schritt des Projektes ggf. zusätzlich die Umweltauswirkungen, die Ökobilanz und die Kostenentwicklung von Bioasphaltbindemitteln und herkömmlichen Asphaltbindemitteln auf Erdölbasis verglichen werden.

Literaturverzeichnis

- [1] Homepage Deutscher Asphaltverband (DAV): <https://www.asphalt.de> [30.03.2022]
- [2] Rundfunk Berlin-Brandenburg (rbb): PCK Schwedt und das Öl-Embargo – Pipeline zu. Zukunft offen?, Beitrag vom 08.06.2022 <https://www.rbb24.de/studiofrankfurt/wirtschaft/2022/06/pck-embargo-russland-oel-habeck-landesregierung.html> [11.08.2022]
- [3] Raouf, M.A.; Williams, R.C.: Temperature susceptibility of non-petroleum binders derived from bio-oils, In: The 7th Asia Pacific Conference on Transportation and the Environment Semarang, Indonesia; 2010, <https://doi.org/10.3141/2180-0>
- [4] Aziz, M.M.; Rahman, M.T.; Hainin, M.R.; Bakar, W.A.W.A.: An overview of alternative binders for flexible pavement, Construction and Building Materials 84, 2015, 315-319, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.068>
- [5] Beecken, G.; Höppel, H.E.; Metelmann, P.; Rudolph, F.; Schönian, E.; Springer, E.; Vondenhof, M.: Shell Bitumen für den Straßenbau und andere Anwendungsgebiete, Deutsche Shell AG Hamburg, 1994, 7.Auflage
- [6] Braun, E.: Bitumen, Verlagsgesellschaft Rudolf Müller Köln, 1991, 2. überarbeitete und erweiterte Auflage
- [7] Neroth, G.; Vollenschaar, D.: Wendehorst Baustoffkunde, Vieweg und Teubner Verlag Wiesbaden, 2011, 27.Auflage
- [8] Hunter, R.N.; Self, A.; Read, J.: The Shell Bitumen Handbook, Shell International Petroleum, Company Ltd, London 2015
- [9] Dickie, J.P.; Yen, T.F.: Macrostructures of the Asphaltic Fractions by Various Instrumental Methods, Analytical Chemistry 39(14), 1967, 1847-1852, <https://doi.org/10.1021/ac50157a057>
- [10] Mullins, O.C.: The Modified Yen Model, Energy and Fuels 24, 2010, 2179-2207, <https://doi.org/10.1021/ef900975e>
- [11] Radenberg, M., Nytus, N., Gehrke, M.: Einfluss der chemischen, rheologischen und physikalischen Grundeigenschaften von Straßenbaubitumen auf das Adhäsionsverhalten unterschiedlicher Gesteinskörnungen, IGF-Vorhaben 16639 N/1, 2014
- [12] Hirsch, V.; Ripke, O.: Lernen von der Straße – Offenporige Asphalte, Straße und Autobahn 1/2008, 2008, 12-19
- [13] European Asphalt Pavement Association (EAPA): Asphalt in Figures 2020, 2021, <https://eapa.org/asphalt-in-figures/> [10.08.2022]
- [14] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V. (FGSV): Technische Lieferbedingungen für Asphaltmischgut für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen TL Asphalt-StB 07/13, 2013
- [15] Radenberg, M.; Boetcher, S.; Sedaghat, N., Wistuba, M.P.; Walther, A.; Büchler, S.; Schmidt, H.; Cetinkaya, R.: Einsatz von Rejuvenatoren bei der Wiederverwendung von Asphalt, Schlussbericht zu FE 07.0250/2011/ LRB, 2016
- [16] Schwettmann, K.; Nytus, N.; Radenberg, M.; Stephan, D.: Bitumen Reuse: physical and chemical approach to investigate the effectiveness of rejuvenators, Road Materials and Pavement Design 24(4), 2022, 1-28, <https://doi.org/10.1080/14680629.2022.2060129>
- [17] Wistuba, M.P.; Grönninger J.; Alisov, A.: Biobasierte Verjüngung von Asphaltmischgut mit hohem Anteil an Ausbauasphalt, Straße und Autobahn 9/2016, 2016, 671-679

- [18] Seidel, J.C.; Haddock, J.E.: Soy Fatty Acids as Sustainable Modifier for Asphalt Binders, Workshop Alternative Binders for Sustainable Asphalt Pavements, 2012, Frankreich, 15-22
- [19] Qadir, A.; Imam, M.: Utilisation of waste plastic bags in bituminous mix for improved performance of roads, *Journal of Solid Waste Technology and Management* 32(3), 2006, 185-195, DOI 10.1007/s12205-015-0511-0
- [20] Rokade, S.: Use of waste plastic and waste rubber tyres in flexible highway pavements, International conference on future environment and energy IPCBEE, 2012, Singapur, Singapur, <http://www.ipcbee.com/vol28/21-ICFEE2012-F10020.pdf>
- [21] Wen, H.; Bhusal, S.; Wen, B.: Laboratory evaluation of waste cooking oil-based bioasphalt as an alternative binder for hot mix asphalt, *Journal of Materials in Civil Engineering* 25(10), 2013, 1432-1437, DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000713
- [22] 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, *Journal of Materials in Civil Engineering* 23(11), 2011, 1506-1513, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.000023](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.000023)
- [23] Zofka, A.; Yut, I.: Investigation of Rheology and Ageing Properties of Asphalt Binder Modified with Waste Coffee Grounds, Workshop Alternative Binders for Sustainable Asphalt Pavements, 2012, Frankreich, 61-72
- [24] Ameri, A.; Haghshenas, H.F.; Fini E.H.: Future Directions for Applications of Bio-Oils in the Asphalt Industry: A Step to Sequester Carbon in Roadway Infrastructure, *Energy Fuels* 37, 2023 , 4791-4815, <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.2c03824>
- [25] Zhang, S.; Yang., X.; Zhang, H.; Chu, C.; Zheng, K.; Ju, M.; Liu, L.: Liquefaction of Biomass and Upgrading of Bio-Oil: A Review, *Molecules* 24(12), 2019, 2250; <https://doi.org/10.3390/molecules24122250>
- [26] Demirbas, M.F.; und Balat, M.: Recent advances on the production and utilization trends of bio-fuels: A global perspective, *Energy Conversion and Management* 47, 2006, 2371-2381, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2005.11.014>
- [27] Ingrassia, L.P.; Lu,X.; Ferrotti, G.; Canestrari, F.: 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>
- [28] Su, N.; Xiao, F.; Wang, J.; Cong, L.; Amirkhanian, S.: Productions and applications of bio-asphalts – A review, *Construction and Building Materials* 183, 2019 , 578-591 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.118>
- [29] Wang, H.; Ma, Z.; Chen, X.; Hasan, M.R.M: 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* 7(2), 2020, 137-151, <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2020.03.002>
- [30] Mohan, D.; Pittman Jr, C.U.; Steele, P.H.: Pyrolysis of Wood/Biomass for Bio-oil: A Critical Review, *Energy & Fuels* 20, 2006, 848-889, <https://doi.org/10.1021/ef0502397>
- [31] Nizamuddin, S.; Baloch, H.A.; Jamal, M.; Madapusi, S.; Giustozzi, F.: Performance of waste plastic bio-oil as a rejuvenator for asphalt binder, *Science of The Total Environment* 828, 2022, 154489, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154489>
- [32] Ding, Y.; Shan, B.; Cao, X.; Liu, Y.; Huang, M.; Tang, B.: Development of Bio Oil and Bio Asphalt by Hydrothermal Liquefaction using Lignocellulose, *Journal of Cleaner Production* 288, 2021, 125586, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125586>
- [33] Homepage Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH (DBFZ) <https://www.dbfz.de/projektseiten/hydrothermale-prozesse> [01.06.2023]

- [34] van Vliet, D.; Slaghek, T.; Giezen, C.; Haaksmann, I.: Lignin as a green alternative for bitumen, 6th Eurasphalt & Eurobitume Congress 2016, Prag, Tschechien, DOI: 10.14311/EE.2016.159
- [35] Xu, C.; Wang, D.; Zhang, S.; Guo, E.; Luo, H.; Zhang, Z.; Yu, H.: Effect of Lignin Modifier on Engineering Performance of Bituminous Binder and Mixture, Polymers 13, 2021, 1-22, <https://doi.org/10.3390/polym13071083>
- [36] Pérez, I.; Pasandín, A.R.; Pais, J.C.; Pereira, P.A.A.: Feasibility of Using a Lignin-Containing Waste in Asphalt Binders, Waste and Biomass Valorization 11, 2020, 3021-3034, <https://doi.org/10.1007/s12649-019-00590-4>
- [37] Gaudenzi, E.; Cardone, F.; Lu, X.; Canestrari, F.: The use of lignin for sustainable asphalt pavements: A literature review, Construction and Building Materials 362, 2023, 129773 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129773>
- [38] Homepage Wageningen University & Research, Beitrag vom 21.04.2020 zu Projekt CHAPLIN XL – Collaboration in asphalt Applications with LigniN: Huge boost for bio-asphalt based on lignin; <https://www.wur.nl/en/research-results/research-institutes/food-biobased-research/show-fbr/huge-boost-for-bioasphalt-based-on-lignin.htm> [10.08.2022]
- [39] Patent WO2019092278: Lignin-based bio-asphalt, Stichting Wageningen Research, Asfalt Kennis Centrum B.V., 2019, <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=WO2019092278>
- [40] Moretti, C.; Corona, B.; Hoefnagels, R.; van Veen, M.; Vural-Gürsel, I.; Strating, T.; Gosselink, R.; Junginger, M.: Kraft lignin as a bio-based ingredient for Dutch asphalts: An attributional LCA, Science of Total Environment 806, 2022, 150316, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150316>
- [41] Fink, F.; Emmerling, F.; Falkenhagen, J.: Identification and Classification of Technical Lignins by means of Principle Component Analysis and k-Nearest Neighbor Algorithm, Chemistry Methods 1(8), 2021, 354-361, <https://doi.org/10.1002/cmtd.202100028>
- [42] Chailleur, E.; Audo, M.; Bujoli, B.; Queffelec, C.; Legrand, J.; Lepine, O.: Alternative Binder from microalgae: Algoroute project, Workshop Alternative Binders for Sustainable Asphalt Pavements, 2012, Frankreich, 7-14
- [43] Peralta, J.; Williams, R.C.; Rover, M.; Silva, H.M.R.D.: Development of Rubber-Modified Fractionated Bio-Oil for Use as Noncrude Petroleum Binder in Flexible Pavements, Workshop Alternative Binders for Sustainable Asphalt Pavements, 2012, Frankreich, 15-22
- [44] Homepage Albrecht Supply Concepts GmbH, <https://www.supply-concepts.com/en/> [10.08.2022]
- [45] Albrecht Supply Concepts GmbH, Messeposter: Instant Bitumen- Bitumen-Reverse Engineered, 2019, https://start-green.net/media/filer_public/af/1d/af1da475-4deb-4f17-bd75-63cf1b4cc73f/messeplakat_albrecht.pdf [10.08.2022]
- [46] Sutor-Fiedler, M.: Erster Praxiseinsatz von Instant-Bitumen, Beitrag Baunetzwerk vom 16.08.2021, <https://www.baunetzwerk.biz/erster-praxiseinsatz-von-instant-bitumen> [10.08.2022]
- [47] Barzegari, S.; Solaimanian, M.: Rheological behaviour of bio-asphalts and effect of rejuvenators, Construction and Building Materials 251, 2020, 1-9, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118137>
- [48] Airey, G.D.; Mohammed, M.H.; Fichter, C.: Rheological characteristics of synthetic road binders, Fuel 87, 2008, 1763-1775, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2008.01.012>
- [49] Raouf, M.A.: Development of non-petroleum binders derived from fast pyrolysis bio-oils for use in flexible pavement, Graduate Theses and Dissertations. Iowa State University, 2010, Paper 11604.
- [50] Raouf, M.A.; Williams, C.R.: General Rheological Properties of Fractionated Switchgrass Bio-Oil as a Pavement Material, Road Materials and Pavement Design 11(1), SPECIAL ISSUE ON ASPHALT TECHNOLOGY (EATA 2010), 2010, 325- 353, <https://doi.org/10.1080/14680629.2010.9690337>

- [51] Raouf, M.A.; Williams, C.R.: Temperature and Shear Susceptibility of a Nonpetroleum Binder as a Pavement Material, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 2180, 2010, 9-18. <https://doi.org/10.3141/2180-02>
- [52] Halim, R.; Danquah, M.K.; Webley, P.A.: Extraction of oil from microalgae for biodiesel production: A review, *Biotechnology Advances* 30, 2012 ,709-732, <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2012.01.001>
- [53] Mofijur, M.; Rasul, M.G.; Hassan, N.M.S; Nabi, M.N.: Recent Development in the Production of Third Generation Biodiesel from Microalgae, 5th International Conference on Power and Energy Systems Engineering, CPESE 2018, 19-21 September 2018, Nagoya, Japan, *Energy Procedia* 156, 2019, 53-58, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.11.088>
- [54] Rolland, A.; Leroy, E.; Sarda, A.; Colomines, G.; Chailleux, E.: Kinetics of biobased bitumen synthesis from microalgae biomass by hydrothermal liquefaction, ISGC 2019, N°192
- [55] Tan, X.B.; Lam, M.K.; Uemura, Y.; Lim, J.W.; Wong, C.Y.; Lee, K.T.: Cultivation of microalgae for biodiesel production: A review on upstream and downstream processing, *Chinese Journal of Chemical Engineering* 26, 2018, 17-30, <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2017.08.010>
- [56] Hosseinnezhad, S.; Fini, E.H.; Sharma, B.K.; Basti, M.; Kunwar, B.: Physiochemical characterization of synthetic biooils produced from bio-mass: a sustainable source for construction bio-adhesives, *RSC Advances* 92, 2015, 5, 75519-75527, <https://doi.org/10.1039/C5RA10267G>
- [57] Avsenik, L.; Tušar, M.: Analysis of possible use of pyrolytic products as binders in asphalt mixes, *Gradevinar* 68(3), 2016, <https://doi.org/10.14256/JCE.1305.2015>
- [58] Setyawan, A.; Djumari; Legowo, S.J.; Widiharjo, B.; Zai, A.K.S.; Pradana, A.A.W.; Rusadi, I.P.; Permana, A.: Design and Characterization of Renewable Bioasphalt Containing Damar Resin, Fly Ash, Wasted Cooking Oil and Latex, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 176, 2017, 012027, doi:10.1088/1757-899X/176/1/012027
- [59] Dalmazzo, D.; Jiménez Del Barco Carrión, A.; Tsantilis, L.; Lo Presti, D.; Santagata, E.: Non-petroleum- Based Binders for Paving Applications: Rheological and Chemical Investigation on Ageing Effects, M. Pasetto et al. (Eds.): Proceedings of the 5th International Symposium on Asphalt Pavements & Environment, LNCE 48, 2019, 67-76, https://doi.org/10.1007/978-3-030-29779-4_7
- [60] Espinosa, L.V.; Gadler, F.; Mota, R.V.; Vasconcelos, K.L.; Bernucci, L.L.B.: Comparison Between Rheological Behavior of a Neat Asphalt Binder and a Bio-Binder from Renewable Source, ISBM 2020: Proceedings of the RILEM International Symposium on Bituminous Materials, 2021, 443-448, https://doi.org/10.1007/978-3-030-46455-4_56
- [61] Espinosa, L.V.; Gadler, F.; Mota, R.V.; Vasconcelos, K.L.; Bernucci, L.L.B.: Comparison of the rheological and the thermal behaviour of a neat asphalt binder and a wood-based binder for pavement surface layer, *Road Materials and Pavement Design* 22(1), EATA2021-Vienna, 2021, S702-S717, <https://doi.org/10.1080/14680629.2021.1911834>
- [62] Yang, X.; You, Z.; Mills-Beale, J: Asphalt Binders Blended with a High Percentage of Biobinders: Aging Mechanism Using FTIR and Rheology, *Journal of Materials in Civil Engineering* 27(4), [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.000111](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.000111)
- [63] Peralta, J.; Raouf, M. A.; Tang, S.; Williams, R. C.: Bio-Renewable Asphalt Modifiers and Asphalt Substitutes, K. Gopalakrishnan et al. (eds.), Sustainable Bioenergy and Bioproducts, Green Energy and Technology, DOI: 10.1007/978-1-4471-2324-8_6,
- [64] Gao, J.; Wang, H.; You, Z.; Hasan, M.R.M.; Lei, Y.; Irfan, M.: Rheological Behavior and Sensitivity of Wood-Derived Bio-Oil Modified Asphalt Binders, *Applied Science* 8(6), 2018, 919; <https://doi.org/10.3390/app8060919>

- [65] Fakhri, M.; Norouzi, M.A.: Rheological and ageing properties of asphalt bio-binders containing lignin and waste engine oil, *Construction and Building Materials* 321, 2022, 126364 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126364>
- [66] Wu, J.; Liu, Q.; Wang, C.; Wu, W.; Han, W.: Investigation of lignin as an alternative extender of bitumen for asphalt pavements, *Journal of Cleaner Production* 283, 10 2021, 124663 <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124663>
- [67] Feng, L.; Liu, J.; Hu, L.: Rheological behavior of asphalt binder and performances of asphalt mixtures modified by waste soybean oil and lignin, *Construction and Building Materials* 362, 2023, 129735, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129735>
- [68] Ahmad, M.F.; Zaidi, S.B.A.; Fareed, A.; Ahmad, N.; Hafeez, I.: Assessment of sugar cane bagasse bio-oil as an environmental friendly alternative for pavement engineering applications, *International Journal of Pavement Engineering* 23(8), 2022, 2761-2772, <https://doi.org/10.1080/10298436.2020.1870114>
- [69] Yang, X.; Mills-Beale, J.; You, Z.: Chemical characterization and oxidative aging of bio-asphalt and its compatibility with petroleum asphalt, *Journal of Cleaner Production* 142(4), 1837-1847, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.100>
- [70] Park, K.-B.; Kim, J.-S.; Pahlavan, F.; Fini, E.H.: Biomass Waste to Produce Phenolic Compounds as Antiaging Additives for Asphalt, *ACS Sustainable Chem. Eng* 10(12), 2022, 3892-3908, <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.1c07870>
- [71] Asli, H.; Ahmadiania, E.; Zargar, M.; Karim, M.R.: 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>
- [72] Fini, E.H.; Al-Qadi, I.L.; You, Z.; Zada, B.; Mills-Beale, J.: Partial replacement of asphalt binder with biobinder: characterisation and modification, *International Journal of Pavement Engineering* 13(6), 2012, 515-522, <https://doi.org/10.1080/10298436.2011.596937>
- [73] Mills-Beale, J.; You, Z.; Fini, E.H.; Zada, B.; Lee, C.H.; Yap, Y.K.: Aging Influence on Rheology Properties of Petroleum-Based Asphalt Modified with Biobinder, *Journal of Materials in Civil Engineering* 26(2), [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000712](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000712)
- [74] Pahlavan, F.; Mousavi, M.; Hung, A.M.; Fini, E.H.: Characterization of oxidized asphaltenes and the restorative effect of a bio- Modifier, *Fuel* 212, 2018, 593-604, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.10.090>
- [75] Lu, D.X.; Enfrin, M.; Boom, Y.J.; Giustozzi, F.: Future recyclability of hot mix asphalt containing recycled plastics, *Construction and Building Materials* 368, 2023, 130396, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130396>
- [76] Movilla-Quesada, D.; Raposeiras, A.C.; Silva-Klein, L.T.; Lastra-González, P.; Castro-Fresno, D.: Use of plastic scrap in asphalt mixtures added by dry method as a partial substitute for bitumen, *Waste Management* 87, 2019, 751-760, <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.03.018>
- [77] Hirsch V.; Jannicke B.; Radenberg M.; Weßelborg H.-H.: BAB 1 „Modifizierende Zusätze im Splittmastixasphalt“, km 444+457 bis km 450+385, Fachveröffentlichung der BASt 2005, https://www.bast.de/DE/Publikationen/Fachveroeffentlichungen/Strassenbau/Downloads/s6-dokumentation-bab1.pdf?__blob=publicationFile&v=3
- [78] Position Paper EAPA: The use of secondary materials, by-products and waste in asphalt mixtures, European Asphalt Pavement Association, 2020, [https://eapa.org/eapa-position-papers/\[01.06.2022\]](https://eapa.org/eapa-position-papers/[01.06.2022])
- [79] Abiola, O.S.; Kupolati, W.K.; Sadiku, E.R.; Ndambuki, J.M.: Utilisation of natural fibre as modifier in bituminous mixes: A review *Construction and Building Materials* 54, 2014, 305-312, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.037>
- [80] Oda, S.; Fernandes Jr., J.L.; Ildefonso, J.S.: Analysis of use of natural fibers and asphalt rubber binder in discontinuous asphalt mixtures, *Construction and Building Materials* 26, 2012, 13-20, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.06.030>

- [81] Ramalingam, S.; Murugasan, R.; Nagabhushana, M.N.: Laboratory performance evaluation of environmentally sustainable sisal fibre reinforced bituminous mixes, *Construction and Building Materials* 148, 2017, 22-29, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.006>
- [82] Shanbara, H.K.; Ruddock, F.; Atherton, W.: A laboratory study of high-performance cold mix asphalt mixtures reinforced with natural and synthetic fibres, *Construction and Building Materials* 172, 2018, 166-175, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.252>
- [83] do Nascimento Camargo, I.G.; Dhia, T.B.; Loulizi, A.; Hofko, B.; Mirwald, J.: Anti-aging additives: proposed evaluation process based on literature review, *Road Materials and Pavement Design* 22:sup1, EATA2021-Vienna, 2021, S134-S153, <https://doi.org/10.1080/14680629.2021.1906738>
- [84] García, Á.; Austin, C.J.; Jelfs, J.: Mechanical properties of asphalt mixture containing sunflower oil capsules, *Journal of Cleaner Production* 118, 2016, 124-132, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.01.072>
- [85] García, Á.; Schlangen, E.; van de Ven, M.; Sierra-Beltrán, G.: Preparation of capsules containing rejuvenators for their use in asphalt concrete, *Journal of Hazardous Materials* 184, 2010, 603-611, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.08.078>
- [86] Su, J.-F.; Qiu, J.; Schlangen, E.; Wang, Y.-Y.: Investigation the possibility of a new approach of using microcapsules containing waste cooking oil: In situ rejuvenation for aged bitumen, *Construction and Building Materials* 74, 2015, 83-92, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.10.018>
- [87] Su, J.-F.; Qiu, J.; Schlangen, E.: Stability investigation of self-healing microcapsules containing rejuvenator for bitumen, *Polymer Degradation and Stability* 98(6), 2013, 1205-1215, <http://dx.doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2013.03.008>
- [88] Fernandes, S.; Costa, L.; Silva, H.; Oliveira, J.: Effect of incorporating different waste materials in bitumen, *Ciência & Tecnologia dos Materiais* 29, 2017, e204-e209, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ctmat.2016.07.003>
- [89] Fernandes, S.; Peralta, J.; Oliveira, J.R.M.; Williams, R.C.; Silva, H.M.R.D.: Article Improving Asphalt Mixture Performance by Partially Replacing Bitumen with Waste Motor Oil and Elastomer Modifiers, *Applied Science* 7(8), 2017, 794; <https://doi.org/10.3390/app7080794>
- [90] Kabir, S.F.; Zheng, R.; Delgado, A.G.; Fini, E.H.: Use of microbially desulfurized rubber to produce sustainable rubberized bitumen, *Resources, Conservation and Recycling* 164, 2021, 105144, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105144>
- [91] Zhang, R.; Wang, H.; Gao, J.; You, Z.; Yang, X.: High temperature performance of SBS modified bio-asphalt, *Construction and Building Materials* 144, 2017, 99-105, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.103>
- [92] Jamaloei, M.H.; Esfahani, M.A.; Torkaman, M.F.: Rheological and Mechanical Properties of Bitumen Modified with Sasobit, Polyethylene, Paraffin, and Their Mixture, *Journal of Materials in Civil Engineering* 31 (7), [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002664](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002664)
- [93] Pouget S.; Loup, F: Thermo-mechanical behaviour of mixtures containing bio-binders, *Road Materials and Pavement Design* 14: sup1: EATA 2013, 2013, <http://dx.doi.org/10.1080/14680629.2013.774758>
- [94] Yang, X.; You, Z.; Dai, Q.; Mills-Beale, J.: 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>
- [95] Yang, X.; You, Z.; Dai, Q.: Performance Evaluation of Asphalt Binder Modified by Bio-oil Generated from Waste Wood Resources, *International Journal of Pavement Research and Technology* 6(4), DOI: 10.6135/ijprt.org.tw/2013.6(4).431
- [96] Djumari; Yami, M.A.D.; Nasution, M.F.; Setyawan, A.: Design and properties of renewable bioasphalt for flexible pavement, *Procedia Engineering* 171, 2017, 1413-1420, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.01.458>

- [97] Hill, B.; Oldham, D.; Behnia, B.; Fini, E.H.; Buttlar, W.G.; Reis, H.: Evaluation of low temperature viscoelastic properties and fracture behavior of bio-asphalt mixtures, International Journal of Pavement Engineering 19(4), 2016, 362-369, <http://dx.doi.org/10.1080/10298436.2016.1175563>
- [98] Pérez, I.; Pasandín, A.R.; Pais, J.C.; Pereira, P.A.A.: Use of lignin biopolymer from industrial waste as bitumen extender for asphalt mixtures, Journal of Cleaner Production 220, 2019, 87-98, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.082>
- [99] Pérez, I.; Pasandín, A.R.; Pais, J.C.; Pereira, P.A.A.: Feasibility of Using a Lignin-Containing Waste in Asphalt Binders, Waste and Biomass Valorization 11, 2020, 3021–3034, <https://doi.org/10.1007/s12649-019-00590-4>
- [100] Gaudenzi, E.; Cardone, F.; Lu, X.; Canestrari, F.: Performance assessment of asphalt mixtures produced with a bio-binder containing 30% of lignin, <https://doi.org/10.1617/s11527-022-02057-w>
- [101] Suo, Yan, Ji, Liu, Chen, Zhang – 2021, The aging behavior of reclaimed asphalt mixture with vegetable oil rejuvenators, Materials and Structures 55, 2022, Article number: 221, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123811>
- [102] Blanc, J.; Hornych, P.; Sotoodeh-Nia, Z.; Williams, C.; Porot, L.; Pouget, S.; Boysen, R.; Planche, J.-P.; Lo Presti, D.; Jimenez, A.; Chailleux, E.: Full-scale validation of bio-recycled asphalt mixtures for road pavements, Journal of Cleaner Production 227, 2019, 1068-1078, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.273>
- [103] Manke, N.D.; Williams, R.C.; Sotoodeh-Nia, Z.; Cochran, E.W.; Porot, L.; Chailleux, E.; Pouget, S.; Olard, F.; Jimenez Del Barco Carrion, A.; Planche, J.-P.; Lo Presti, D.: Performance of a sustainable asphalt mix incorporating high RAP content and novel bio-derived binder, Road Materials and Pavement Design 22(4), 2021, 812-834, <https://doi.org/10.1080/14680629.2019.1643769>
- [104] Eurobitume Statistik Bitumenverbrauch in Deutschland 2020 https://www.eurobitume.eu/de/nc/media/pressemitteilungen/?tx_pitsdownloadcenter_pitsdownloadcenter%5Bcontroller%5D=Download&tx_pitsdownloadcenter_pitsdownloadcenter%5Baction%5D=forceDownload&tx_pitsdownloadcenter_pitsdownloadcenter%5Bfileid%5D=8wphwz2dC5 [01.06.2023]
- [105] Batista, K.B.; Padilha, R.P.L.; Castro, T.O.; Silva, C.F.S.C.; Araújo, M.F.A.S.; Leite, L.F.M., Pasa, V.M.D; Lins, V.F.C.: High-temperature, low-temperature and weathering aging performance of lignin modified asphalt binders, Industrial Crops and Products 111, 2018 107-116, <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.10.010>
- [106] Xu, C.; Wang, D.; Zhang, S.; Guo, E.; Luo, H.; Zhang, Z.; Yu, H.: Effect of Lignin Modifier on Engineering Performance of Bituminous Binder and Mixture. Polymers 13(7), 2021, 1083. <https://doi.org/10.3390/polym13071083>
- [107] Yao, H.; Wang, Y.; Liu, J.; Xu, M.; Ma, P.; Ji, J.; You, Z.: Review on Applications of Lignin in Pavement Engineering: A Recent Survey. Front. Mater. Sec. Structural Materials Volume 8, 2022, 803524, <https://doi.org/10.3389/fmats.2021.803524>
- [108] 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. Journal of Materials in Civil Engineering 23(11), 2011. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000237](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000237)
- [109] You, Z.; Mills-Beale, J.; Fini, E.H.; Goh, S.W.; Colbert, B.: Evaluation of Low-Temperature Binder Properties of Warm-Mix Asphalt, Extracted and Recovered RAP and RAS, and Bioasphalt, Journal of Materials in Civil Engineering 23(11), [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000295](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000295)
- [110] Xiu, S.; Rojanala, H.K.; Shahbazi, A.; Fini, E.H.; Wang, L.: Pyrolysis and combustion characteristics of Bio-oil from swine manure, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry 107, 2012, 823-829, <https://doi.org/10.1007/s10973-011-1604-8>
- [111] Aflaki, S.; Hajikarimi, P.; Fini, E.H.; Zada, B.: Comparing Effects of Biobinder with Other Asphalt Modifiers on Low-Temperature Characteristics of Asphalt, Journal of Materials in Civil Engineering 26(3), [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000835](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000835)

- [112] Ingrassia, L.P.; Lu, X.; Ferrotti, G.; Canestrari, F.: Chemical, morphological and rheological characterization of bitumen partially replaced with wood bio-oil: Towards more sustainable materials in road pavements, *Journal of Traffic and Transportation Engineering* 7(2), 2020, 192-204, <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2019.04.003>
- [113] Ingrassia, L.P.; Lu, X.; Ferrotti, G.; Conti, C.; Canestrari, F.: Investigating the “circular propensity” of road bio-binders: Effectiveness in hot recycling of reclaimed asphalt and recyclability potential, *Journal of Cleaner Production* 255, 2020, 120193, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120193>
- [114] Yang, S.-H.; Suciptan, T.: Rheological behavior of Japanese cedar-based biobinder as partial replacement for bituminous binder, *Construction and Building Materials* 114, 2016, 127-133, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.100>
- [115] Van Phuc Le: Performance of asphalt binder containing sugarcane waste molasses in hot mix asphalt, *Case Studies in Construction Materials* 15, 2021, e00595, <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00595>
- [116] Gong, M.; Yang, J.; Zhang, J.; Zhu, H.; Tong, T.: Physical–chemical properties of aged asphalt rejuvenated by bio-oil derived from biodiesel residue, *Construction and Building Materials* 105, 2016, 35-45, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.025>
- [117] Al-Sabaei, A.M.; Napiah, M.B.; Sutanto, M.H.; Alaloul, W.S.; Yusoff, N.I.M.; Khairuddin, F.H.; Memon, A.M.: Evaluation of the high-temperature rheological performance of tire pyrolysis oil-modified bioasphalt, *International Journal of Pavement Engineering* 23(11), 2022, 4007-4022, <https://doi.org/10.1080/10298436.2021.1931200>
- [118] Simonen, M.; Blomberg, T.; Pellinen, T.; Makowska, M.; Valtonen, J.: Curing and ageing of biofluxed bitumen: a physicochemical approach, *Road Materials and Pavement Design* 14:1, 2013, 159-177, <http://dx.doi.org/10.1080/14680629.2012.755933>
- [119] Simonen, M.; Blomberg, T.; Pellinen, T.; Valtonen, J.: Physicochemical properties of bitumens modified with bioflux, *Road Materials and Pavement Design* 14:1, 2013, 36-48, <http://dx.doi.org/10.1080/14680629.2012.735798>
- [120] Saboo, N.; Sukhija, M.; Mehta, D.; Haswanth, K.; Srivastava, A.; Patil, A.: Use of raw sugarcane molasses as a partial replacement of asphalt binder: An experimental investigation, *Construction and Building Materials* 369, 2023, 130541, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130541>
- [121] Wu, J.; Liu, Q.; Wang, C.; Wu, W.; Han, W.: 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>
- [122] Król, J.B.; Kowalski, K.J.; Niczke, Ł.; Radziszewski, P.: Effect of bitumen fluxing using a bio-origin additive, *Construction and Building Materials* 114, 2016, 194-203, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.086>
- [123] Kowalski, K.J.; Król, J.B.; Bankowski, W.; Radziszewski, P.; Sarnowsk, M.: Thermal and Fatigue Evaluation of Asphalt Mixtures Containing RAP Treated with a Bio-Agent. *Applied Science* 7(3), 2017, 216, <https://doi.org/10.3390/app7030216>
- [124] 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, *Journal of Hazardous Materials* Volumes 233-234, 2012, 254-258, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.06.021>
- [125] Pahlavan, F.; Rajib, A.; Deng, S.; Lammers, P.; Fini, E.H.: Investigation of Balanced Feedstocks of Lipids and Proteins to Synthesize Highly Effective Rejuvenators for Oxidized Asphalt. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* 8, 2020, 7656-7667, <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c01100>
- [126] Pahlavan, F.; Oldham, D.; Shakiba, S.; Louie, S.; Fini E.H.: Protein enriched biowaste: A viable feedstock to make durable bio-binders for bituminous composites, *Resources, Conservation and Recycling* 170, 2021, 105576, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105576>
- [127] Al-Sabaei, A.M.; Napiah, M.B.; Sutanto, M.H.; Alaloul, W.S.; Usman, A.: 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>
- [128] Katamine, N. M.: Physical and mechanical properties of bituminous mixtures containing oil shales, *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 126, No. 2, 2000, 178-184, Paper No. 18883, ISSN 0733-947X/00/0002-0178-0184
- [129] He, M.; Tu, C.; Cao, D.W.; Chen, Y.J.: Comparative analysis of bio-binder propertied derived from different sources, *International Journal of Pavement Engineering* 20(7), 2019, <http://dx.doi.org/10.1080/10298436.2017.1347434>
- [130] Yang, X.; You, Z.; Dai, Q.: Performance Evaluation of Asphalt Binder Modified by Bio-oil Generated from Waste Wood Resources, *International Journal of Pavement Research and Technology* 6(4), 2013, 431-439, DOI: 10.6135/ijprt.org.tw/2013.6(4).431
- [131] Nahar, S.; Slaghek, T.M.; van Vliet, D.; Haaksman, I.K.; Gosselink, R.J.A.: Mutual compatibility aspects and rheological assessment of (modified) lignin-bitumen blends as potential binders for asphalt, *Road Materials and Pavement Design*, 2022, <https://doi.org/10.1080/14680629.2022.2146602>
- [132] Bao, D.-X.; Yu, Y.-Y.; Zhao, Q.-M.: Evaluation of the chemical composition and rheological properties of bio-asphalt from different biomass sources, *Road Materials and Pavement Design* 21(7), 2020, 1829-1843, <https://doi.org/10.1080/14680629.2019.1568287>
- [133] Li, R.; Bahadori, A.; Xin, J.; Zhang, K.; Muhunthan, B.; Zhang, J.: Characteristics of bioepoxy based on waste cooking oil and lignin and its effects on asphalt binder, *Construction and Building Materials* 251, 2020, 118926, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118926>
- [134] Jiménez del Barco Carrión, A.; Lo Presti, D.; Pouget, S.; Airey, G.; Chailleux, E.: Linear viscoelastic properties of high reclaimed asphalt content mixes with biobinders, *Road Materials and Pavement Design* 18, Issue sup2: EATA2017, 2017, <http://dx.doi.org/10.1080/14680629.2017.1304253>
- [135] do Nascimento Camargo, I.G.; Bernucci, L.L.B.; Vasconcelos, K.L.: Aging Characterization of Biobinder Produced from Renewable Sources. RILEM 252-CMB 2018: RILEM 252-CMB Symposium pp 9-14, 2019, https://doi.org/10.1007/978-3-030-00476-7_2
- [136] Hemida, A.; Abdelrahman, M.: Component analysis of bio-asphalt binder using crumb rubber modifier and guayule resin as an innovative asphalt replacer, *Resources, Conservation and Recycling* 169, 2021, 105486. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105486>
- [137] Jiang, X.; Li, P.; Ding, Z.; Yue, L.; Li, H.; Bing, H.; Zhang, J.: Physical, chemical and rheological investigation and optimization design of asphalt binders partially replaced by bio-based resins, *Construction and Building Materials* 350, 2022, 128845, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128845>
- [138] Kumar, A.; Choudhary, R.; Narzari, R.; Kataki, R.; Shukla, S.K.: Evaluation of bio-asphalt binders modified with biochar: a pyrolysis by-product of Mesua ferrea seed cover waste, *Cogent Engineering* 5:1, 1548534, <https://doi.org/10.1080/23311916.2018.1548534>
- [139] Alamawi, M.Y.; Khairuddin, F.H.; Yusoff, N.I.M.; Badri, K.; Ceylan, H.: Investigation on physical, thermal and chemical properties of palm kernel oil polyol bio-based binder as a replacement for bituminous binder, *Construction and Building Materials* 204, 2019, 122-131, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.144>
- [140] Dong, Z.; Zhou, T.; Luan, H.; Wang, H.; Xie, N.; Xiao, G.-q.: Performance evaluation of bio-based asphalt and asphalt mixture and effects of physical and chemical modification, *Road Materials and Pavement Design* 21 (6), 2020, 1470-1489, <https://doi.org/10.1080/14680629.2018.1553732>
- [141] Ahmad, K.A.; Abdullah, M.E.; Hassan, N.A.; Usman, N.; Ambak, K.: Investigating the Feasibility of Using Jatropha Curcas Oil (JCO) as Bio Based Rejuvenator in Reclaimed Asphalt Pavement (RAP), *MATEC Web Conf. Volume 103, 2017, International Symposium on Civil and Environmental Engineering 2016 (ISCEE 2016)*, <https://doi.org/10.1051/matecconf/201710309013>
- [142] Yu, J.; Guo, Y.; Peng, L.; Guo, F.; Yu, H.: Rejuvenating effect of soft bitumen, liquid surfactant, and bio-rejuvenator on artificial aged asphalt, *Construction and Building Materials* 254, 2020, 119336. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119336>

- [143] Justino Uchoa, A.F.; da Silva Rocha, W.; Macedo Feitosa, J.P.; Lopes Nogueira, R.; Almeida de Brito, D.H.; Barbosa Soares, J.; de Aguiar Soares, S.: Bio-based palm oil as an additive for asphalt binder: Chemical characterization and rheological properties, Construction and Building Materials 285, 2021, 122883, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122883>
- [144] Nassar, I.M.; Abdel-monem, R.M.; Sayed, M.A.; Ragab, A.A.: Eco-friendly green alternative binder for asphalt from waste oil and waste polymer, Polymer Bulletin 78, 2021, 6887-6909, <https://doi.org/10.1007/s00289-020-03463-2>
- [145] Rahman, M.T.; Hainin, M.R.; Abu Bakar, W.A.W.: Use of waste cooking oil, tire rubber powder and palm oil fuel ash in partial replacement of bitumen, Construction and Building Materials 150, 2017, 95-104, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.216>
- [146] Tayh, S.A.; Muniandy, R.; Hassimc, S.; Jakarni, F.: Aging and Consistency Characterization of Bio-binders from Domestic Wastes, International Journal of Applied Engineering Research, Volume 12, Number 10, 2017, 2613-2622, ISSN 0973-4562

Anhang

A.1 Nicht verwendete Literatur

Anteil > 10 M.-%

- Bukowski, J.; Youtcheff, J.; Harman, T.: An Alternative Asphalt Binder, Sulfur-Extended Asphalt (SEA), U.S. Department of Transportation, 2012, FHWA-HIF-12-037
- Hussein, Z.H.; Yaacob, H.; Idham, M.K.; Hassan, N.A.; Choy, L.J.; Jaya, R.P.: Restoration of Aged Bitumen Properties Using Maltenes, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 713, The 2nd Global Congress on Construction, Material and Structural Engineering 26-27 August 2019, Melaka, Malaysia, 2020, DOI:10.1088/1757-899X/713/1/012014
- Al-Saffar, Z.H.; Yaacob, H.; Saleem, M.K.; Satar, M.K.I.M.; Jaya, R.P.; Bilema, M.; Lai, C.J.; Mahmud, M.Z.H.: A new approach to enhance the reclaimed asphalt pavement features: role of maltene as a rejuvenator, Road Materials and Pavement Design, 23:11, 2022, 2507-2530, <https://doi.org/10.1080/14680629.2021.1984978>
- Bearsley, S.R.; Haverkamp R.G.: Age Hardening Potential of Tall Oil Pitch Modified Bitumen, Road Materials and Pavement Design 8(3), 2007, 467-481, <http://dx.doi.org/10.1080/14680629.2007.9690084>
- Bearsley, S.R.; Haverkamp R.G.: Adhesive Properties of Tall Oil Pitch Modified Bitumen, Road Materials and Pavement Design 8(3), 2007, 449-465, <http://dx.doi.org/10.1080/14680629.2007.9690083>
- Ingram, L.; Mohan, D.; Bricka, M.; Steele, P.; Strobel, D.; Crocker, D.; Mitchell, B.; Mohammad, J.; Cantrell, K.; Pittman Jr., C.U.: Pyrolysis of Wood and Bark in an Auger Reactor: Physical Properties and Chemical Analysis of the Produced Bio-oils, Energy Fuels 2008, 22, 1, 2007, 614-625, <https://doi.org/10.1021/ef700335k>
- Ren, S.; Liu, X.; Zhang, Y.; Lin, R.; Apostolidis, P.; Erkens, S.; Li, M.; Xu, J.: Multi-scale characterization of lignin modified bitumen using experimental and molecular dynamics simulation methods, Construction and Building Materials 287, 2021, 123058, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123058>
- Nayak, P.; Sahoo, U.C.: A rheological study on aged binder rejuvenated with Pongamia oil and Composite castor oil, International Journal of Pavement Engineering 18(7), 2017, 595-607, <http://dx.doi.org/10.1080/10298436.2015.1103851>
- Sihombing, A.V.R.; Subagio, B.S.; Hariyadi, E.S.; Yamin A.: Chemical, morphological, and high temperature rheological behaviour of Bioasbuton as an alternative binder for asphalt concrete in Indonesia, Journal of King Saud University - Engineering Sciences 33, Issue 5, 2021, 308-317, <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2020.07.006>
- Lu, Q.; Xin, C.; Alamri, M.; Alharthai, M.: Development of porous asphalt mixture with bio-based epoxy asphalt, Journal of Cleaner Production 317, 2021, 128404, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128404>
- Meng, Y.; Zhan, L.; Hu, C.; Tang, Y.; Großegger, D.; Ye, X.: Research on modification mechanism and performance of an innovative bio-based polyurethane modified asphalt: A sustainable way to reducing dependence on petroleum asphalt, Construction and Building Materials 350, 2022, 128830, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128830>
- Somé, S.C.; Pavoine, A.; Chailleux, E.: Evaluation of the potential use of waste sunflower and rapeseed oils-modified natural bitumen as binders for asphalt pavement design, International Journal

of Pavement Research and Technology 9(5), 2016, 368-375,
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijprt.2016.09.001>

- Hassan, H.N.; Ahmed, T.M.; Abd, D.M.: Development of Eco-Friendly Bio-Oil-Bitumen from Local Materials, Key Engineering Materials 915, 2022, 145-151, <https://doi.org/10.4028/p-961xij>

Anteil ≤ 10 M.-%

- Chen, M.; Xiao, F.; Putman, B.; Leng, B.; Wu, S.: High temperature properties of rejuvenating recovered binder with rejuvenator, waste cooking and cotton seed oils, Construction and Building Materials 59, 2014, 10-16, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.02.032>
- dos Santos, S.; Kakar, M.R.; Partl, M.N.; Poulikakos, L.D.: Thermal Aging of Bitumen and Biorejuvenator Blends: Triglyceride versus Free Fatty Acids, Journal of Materials in Civil Engineering 34, Issue 7, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0004258](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004258)
- Gawel, I.; Czechowski, F.; Kosno, J.: An environmental friendly anti-ageing additive to bitumen, Construction and Building Materials 110, 2016, 42-47, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.004>
- Guarin, A.; Khan, A.; Butt, A.A.; Birgisson, B.; Kringos, N.: An extensive laboratory investigation of the use of bio-oil modified bitumen in road construction, Construction and Building Materials 106, 2016, 133-139, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.009>
- Xu, X.; Yu, J.; Xue, L.; He, B.; Du, W.; Zhang, H.; Li, Y.: Effect of reactive rejuvenating system on physical properties and rheological characteristics of aged SBS modified bitumen, Construction and Building Materials 176, 2018, 35-42, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.217>
- Jiang, H.; Zhang, J.; Sun, C.; Liu, S.; Liang, M.; Yao, Z.: Experimental assessment on engineering properties of aged bitumen incorporating a developed rejuvenator, Construction and Building Materials 179, 10 2018, 1-10, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.211>
- Tabatabaei, H.A.; Kurth, T.L.: Analytical investigation of the impact of a novel bio-based recycling agent on the colloidal stability of aged bitumen, Road Materials and Pavement Design 18, Issue sup2: EATA 2017, 131-140, <http://dx.doi.org/10.1080/14680629.2017.1304257>
- Radenberg, M.; Boetcher, S.; Sedaghat, N.: Einsatz von Rejuvenatoren bei der Wiederverwendung von Asphalt, 2016; Schlussbericht zum FE 07.0250/2011/LRB
- Schwettmann, K.; Nythus, N.; Radenberg, M.; Stephan, D.: Bitumen reuse: physical and chemical approach to investigate the effectiveness of rejuvenators, Road Materials and Pavement Design 24(4), 2023, 1130-1157, <https://doi.org/10.1080/14680629.2022.2060129>

Asphaltwiederverwendung

- Borhan, M.N.; Suja, F.; Ismail, A.; Rahmat, R.A.O.K.: The Effects of Used Cylinder Oil on Asphalt Mixes, European Journal of Scientific Research Vol.28 No.3, 2009, 398-411, ISSN 1450-216X
- Silva, H.M.R.D.; Oliveira, J.R.M.; Jesus, C.M.G.: Are totally recycled hot mix asphalts a sustainable alternative for road paving?, Resources, Conservation and Recycling 60, 2012, 38-48, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.11.013>
- Mohammad, L.N.; Elseifi, M.A.; Cooper, S.B.; Challa, H.; Naidoo, P.: Laboratory Evaluation of Asphalt Mixtures Containing Bio-Binder Technologies, Transportation Research Record, 2371(1), 2013, 58-65, <https://doi.org/10.3141/2371-07>
- Zaumanis, M.; Mallick, R.B.; Frank, R.: Evaluation of Rejuvenator's Effectiveness with Conventional Mix Testing for 100% Reclaimed Asphalt Pavement Mixtures, Transportation Research Record, 2370(1), 2013, 17-25, <https://doi.org/10.3141/2370-03>

- Zaumanis, M.; Mallick, R.B.; Poulikakos, L.; Frank, R.: Influence of six rejuvenators on the performance properties of Reclaimed, Asphalt Pavement (RAP) binder and 100% recycled asphalt mixtures, Construction and Building Materials 71, 2014, 538-550, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.08.073>
- Zaumanis, M.; Mallick, R.B.; Frank, R.: Evaluation of different recycling agents for restoring aged asphalt binder and performance of 100 % recycled asphalt, Materials and Structures 48, 2015, 2475-2488, <https://doi.org/10.1617/s11527-014-0332-5>
- Hugener, M.; Partl, M.N.; Morant, M.: Cold asphalt recycling with 100% reclaimed asphalt pavement and vegetable oil-based rejuvenators, Road Materials and Pavement Design 15(2), 2014, 239-258, <http://dx.doi.org/10.1080/14680629.2013.860910>
- Im, S.; Zhou, F.; Lee, R.; Scullion, T.: Impacts of rejuvenators on performance and engineering properties of asphalt mixtures containing recycled materials, Construction and Building Materials 53, 2014, 596-603, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.025>
- Pasandín, A.R.; Pérez, I.: Effect of ageing time on properties of hot-mix asphalt containing recycled concrete aggregates, Construction and Building Materials 52, 2014, 284-293, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.050>
- Wistuba, M.P.; Gränniger, J.; Alisov, A.: Biobasierte Verjüngung von Asphaltmischgut mit hohem Anteil an Ausbauasphalt, Straße und Autobahn 67(9), 2016, ISSN: 0039-2162
- Noferini, L.; Simone, A.; Sangiorgi, C.; Mazzotta, F.: Investigation on performances of asphalt mixtures made with Reclaimed Asphalt Pavement: Effects of interaction between virgin and RAP bitumen, International Journal of Pavement Research and Technology 10(4), 2017, 322-332, <https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2017.03.011>
- Nabizadeh, H.; Haghshenas, H.F.; Kim, Y.-R.; Sacramento Aragão, F.T.: Effects of rejuvenators on high-RAP mixtures based on laboratory tests of asphalt concrete (AC) mixtures and fine aggregate matrix (FAM) mixtures, Construction and Building Materials 152, 2017, 65-73, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.101>
- Yin, F.; Kaseer, F.; Arámbula-Mercado, E.; Epps Martins, A.: Characterising the long-term rejuvenating effectiveness of recycling agents on asphalt blends and mixtures with high RAP and RAS contents, Road Materials and Pavement Design 18, Issue sup4: Papers from the 92nd Association of Asphalt Paving Technologists' Annual Meeting, 2017, 273-292, <https://doi.org/10.1080/14680629.2017.1389074>
- Kaseer, F.; Yin, F.; Arámbula-Mercado, E.; Epps Martins, A.: Stiffness Characterization of Asphalt Mixtures with High Recycled Material Content and Recycling Agents, Transportation Research Record, 2633(1), 58-68. <https://doi.org/10.3141/2633-08>
- Kaseer, F.; Garcia Cucalon, L.; Arámbula-Mercado, E.; Epps Martins, A.; Epps J.: Practical Tools for Optimizing Recycled Materials Content and Recycling Agent Dosage for Improved Short-and Long-Term Performance of Rejuvenated Binder Blends and Mixtures, Asphalt Paving Technology: Association of Asphalt Paving Technologists-Proceedings of the Technical Sessions 87(aapt), 10.12783/aapt2018/33816
- Ziari, H.; Moniri, A.; Bahri, P.; Saghafi, Y.: The effect of rejuvenators on the aging resistance of recycled asphalt mixtures, Construction and Building Materials 224, 2019, 89-98, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.181>
- Porot, L.; Gomes, V.: Multi-recycling of asphalt mix with Reclaimed Asphalt and rejuvenator, E&E Congress 2020, 7th Eurasphalt & Eurobitume Congress, 2020, ISBN: 9789080288461

- Mirhosseini, A.F.; Tahami, S.A.; Hoff, I.; Dessouky, S.; Ho, C.-H.: Performance evaluation of asphalt mixtures containing high-RAP binder content and bio-oil rejuvenator, *Construction and Building Materials* 227, 2019, 116465, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.191>
- Devulapalli, L.; Kothandaraman, S.; Sarang, G.: Effect of rejuvenating agents on stone matrix asphalt mixtures incorporating RAP, *Construction and Building Materials* 254, 2020, 119298, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119298>
- Rathore, M.; Haritonovs, V.; Merijs Meri, R.; Zaumanis, M.: Rheological and chemical evaluation of aging in 100% reclaimed asphalt mixtures containing rejuvenators, *Construction and Building Materials* 318, 2022, 126026, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126026>
- Rodríguez-Fernández, I.; Lastra-González, P.; Indacochea-Vega, I.; Castro-Fresno, D.: Recyclability potential of asphalt mixes containing reclaimed asphalt pavement and industrial by-products, *Construction and Building Materials* 195, 2019, 148-155, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.069>
- Rowe, G.M.; Barry, J.; Crawford, K.: Evaluation of a 100% Rap Recycling Project in Fort Wayne, Indiana, In: Canestrari, F., Partl, M. (eds) 8th RILEM International Symposium on Testing and Characterization of Sustainable and Innovative Bituminous Materials. RILEM Bookseries, vol 11. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-017-7342-3_75

A.2 Übersichtstabellen zur systematischen Bewertung

Bewertungskriterien: Vergleichbarkeit zu Bitumen/ Eigenschaften	
++ (Doppelplus)	viel besser
+ (Plus)	besser
O (Null)	vergleichbar
- (Minus)	schlechter
-- (Doppelminus)	viel schlechter

Tab. A-1: Systematische Bewertung der Materialien zur Bitumensubstitution

Material						Wirtschaftliche Kriterien			Technische Kriterien					Nachhaltigkeitskriterien				End-summe	
	Rohstoffquelle	Art/ Name	Modifizierung	Literatur-/Datenquelle	Zielanwendung/ Zugabemenge	Kosten	Rohstoff/ Rohstoff-verfügbarkeit	Herstellungsprozess/ Produktionsaufwand	Chemische Struktur/ Zusammensetzung	Physikalische Bindemittel-eigenschaften- hoher Temperaturbereich	Physikalische Bindemittel-eigenschaften- niedriger Temperaturbereich	Asphalt-eigenschaften	Verarbeitbarkeit	Alterungsverhalten	Umweltverträglichkeit	CO2-Reduktion	Recycling-Optionen/ Wiederverwendbarkeit/ Möglichkeit zur Verjüngung	Arbeitssicherheit	
1	Meeres-biomasse	Mikroalgen-rückstände (hauptsächlich untersucht für die Biodieselproduktion)	keine Modifizierung	Chailleur et al. (2012) [41], Halim et al. (2012) [51], Mofijur et al. (2019) [52], Tan et al. (2018) [54], Rolland et al. (2019) [53]	Vollständiger Bitumenersatz/ 100 %	-	o	o	++	+	o	o	o	k.A.	++	++	k.A.	o	6
2	Ölschiefer	Schieferöl	keine Modifizierung	Katamine (2000) [128]	Teilsubstitution/ 5 %, 7,5 %, 10 %, 15 %	k.A.	--	o	-	+	k.A.	+	o	--	o	--	--	o	-7

Material					Wirtschaftliche Kriterien			Technische Kriterien					Nachhaltigkeitskriterien						
Nr.	Rohstoffquelle	Art/ Name	Modifizierung	Literatur-/Datenquelle	Zielanwendung/ Zugabemenge	Kosten	Rohstoff-/Rohstoffverfügbarkeit	Herstellungsprozess/ Produktionsaufwand	Chemische Struktur/ Zusammensetzung	Physikalische Bindemittelleigenschaften/ hoher Temperaturbereich	Physikalische Bindemittel-eigenschaften/ niedriger Temperaturbereich	Asphalt-eigenschaften	Verarbeitbarkeit	Alterungsverhalten	Umweltverträglichkeit	CO2-Reduktion	Recycling-options/ Wiederverwendbarkeit/ Möglichkeit zur Verjüngung	Arbeits-sicherheit	End-summe
Holz und Holzrückstände																			
3	Pflanzliche Biomasse (Holz)	Kraft-Lignin (am weitesten verbreitet)	keine Modifizierung	van Vliet et al. (2016) [34], Batista et al. (2018) [105], Moretti et al. (2022) [39], Xu et al. (2021) [106], Yao et al. (2022) [107], Gaudenzi et al. (2022) [100], Gaudenzi et al. (2023) [64].	Teilsubstitution/ (üblicherweise 10-12 % aber zunehmend Studien mit 40-60 % Substitution) oder Modifizierung (1 % - 6 %)	o	+	o	o	++	o	+	+	++	o	+	+	o	9
4	Pflanzliche Biomasse (Holz) und gebrauchtes Motoröl	Kraft-Lignin & Altmotoröl (WEO)	keine Modifizierung	Fakhri und Norouzi (2022) [65]	Teilsubstitution/ 4 % WEO, 5 %- 10 % Lignin	k.A.	+	o	+	+	+	k.A.	o	++	o	+	+	o	8
5	Pflanzliche Biomasse (Holz)	Holzbasiertes Bioöl	keine Modifizierung	Ingrassia et al. (2020a) [112], Ingrassia et al. (2020b) [113]	Teilsubstitution/ 5 %, 10 %, 15 %	k.A.	+	k.A.	+	+	k.A.	k.A.	o	++	o	o	++	o	7
6	Pflanzliche Biomasse (Holz-Afball)	Biobinder aus Spänen von japanischem Zedernholz	keine Modifizierung	Yang und Suciptan (2016) [114]	Modifizierung und Teilsubstitution/ 2 %, 8 %, 25 %, 50 %	k.A.	+	+	k.A.	+	+	k.A.	-	++	o	o	++	o	7
7	Pflanzliche Biomasse (Holz)	Klason-Lignin modifiziert mit Polyethylen-glycol und Schwefel	Polyethylen-glycol (2 – 8 %), Schwefel (2 -8 %) zur Verbesserung der Lagerstabilität von Bitumen, (Schwefel führt zur Verschlechterung, PEG zur Verbesserung)	Wu et al. (2020) [121]	Teilsubstitution/ 25 %	k.A.	+	o	+	+	-	-	o	++	o	+	++	o	6

Material						Wirtschaftliche Kriterien			Technische Kriterien						Nachhaltigkeitskriterien				
Nr.	Rohstoffquelle	Art/Name	Modifizierung	Literatur-/Datenquelle	Zielanwendung/ Zugabemenge	Kosten	Rohstoff-/Rohstoffverfügbarkeit	Herstellungsprozess-/Produktionsaufwand	Chemische Struktur/Zusammensetzung	Physikalische Bindemittelleigenschaften hoher Temperaturbereich	Physikalische Bindemittelleigenschaften niedriger Temperaturbereich	Asphalteigenschaften	Verarbeitbarkeit	Alterungsverhalten	Umweltverträglichkeit	CO2-Reduktion	Recyclingoptionen/Wiederverwendbarkeit/Möglichkeit zur Verjüngung	Arbeitssicherheit	Endsumme
8	Pflanzliche Biomasse (Holz)	Lignin und gebrauchtes Sojabohnenöl	keine Modifizierung	Feng et al. (2023) [67]	Modifizierung/ 5 % gebrauchtes Sojabohnenöl, 3 %, 5 %, 7 % Lignin	k.A.	+	k.A.	+	+	+	-	o	++	o	o	+	o	6
9	Wasser und pflanzliche Biomasse	Ligninhaltiger Abfall	keine Modifizierung	Pérez et al. (2020) [99], Pérez et al. (2019) [98] - Asphaltstudie	Teilsubstitution/ 5 %, 10 %, 20 %	+	+	+	-	+	+	++	-	o	o	+	o	-	5
10	Pflanzliche Biomasse (Holz-Abfall)	Bioöl aus Sägemehl weiterverarbeitet mit destilliertem Wasser	keine Modifizierung	Zhang et al. (2017) [91]	Teilsubstitution/ 10%, 15%, 20%, 25% und 30%	k.A.	+	+	o	+	k.A.	k.A.	o	o	o	o	+	o	4
11	Pflanzliche Biomasse (Holz)	Bioöl auf Kiefernbasis wurde aus 30 % sauberem Kiefernholz, 60 % Waldrestholz und 10 % Hybridpappel	2,5 % (bezogen auf Biobinder) Rejuvenatoren zur Verbesserung des Tieftemperaturverhaltens	Barzegari und Solaimanian (2020) [46]	Teilsubstitution/ 35 %	k.A.	k.A.	+	o	o	-	k.A.	o	++	o	o	++	o	4
12	Pflanzliche Biomasse (Holz) und Bau- und Abbruchabfälle	Bioöl aus 45 % sauberem Kiefernholz, 25 % Waldrestholz und 30 % Bau- und Abbruchabfälle	2,5 % (bezogen auf Biobinder) Rejuvenatoren zur Verbesserung des Tieftemperaturverhaltens	Barzegari und Solaimanian (2020) [46]	Teilsubstitution/ 35 %	k.A.	k.A.	+	o	o	-	k.A.	o	++	o	o	++	o	4
13	Pflanzliche Biomasse (Holz)	Bioöl aus Holzabfällen	styrene-butadiene-styrene (SBS) und waste rubber powder als Polymere (2 und 10 %)	Bao et al. (2019) [132]	Teilsubstitution/ 15 %	k.A.	+	+	+	+	o	o	o	k.A.	o	o	k.A.	o	4
14	Pflanzliche Biomasse (Holz)	Biobinder aus Pech, Harz und SBS (keine Angabe zur genauen Zusammensetzung)	SBS	Dalmazzo et al. (2020) [58], Pouget und Loup (2013) [93] - Asphaltstudie	Vollständiger Bitumenersatz 100 %	k.A.	+	+	o	-	k.A.	o	o	+	o	+	o	o	3

Material						Wirtschaftliche Kriterien			Technische Kriterien						Nachhaltigkeitskriterien				
Nr.	Rohstoffquelle	Art/ Name	Modifizierung	Literatur-/Datenquelle	Zielanwendung/ Zugabemenge	Kosten	Rohstoff/ Rohstoffverfügbarkeit	Herstellungsprozess/ Produktionsaufwand	Chemische Struktur/ Zusammensetzung	Physikalische Bindemittelleigenschaften/ hoher Temperaturbereich	Physikalische Bindemittelleigenschaften/ niedriger Temperaturbereich	Asphalteigenschaften	Verarbeitbarkeit	Alterungsverhalten	Umweltverträglichkeit	CO2-Reduktion	Recyclingoptionen/ Wiederverwendbarkeit/ Möglichkeit zur Verjüngung	Arbeitssicherheit	Endsumme
15	Pflanzliche Biomasse (Holz-Abfall)	Bioöl aus Biomasse von verschiedenen Abfallquellen (Klason-Lignin): Kiefern Rinde (PB), Walnuss-schalen (WS), Erdnuss-schalen (PS), Kokosnuss-schalen (CH), Birke (BR), Tanne (FR)	keine Modifizierung	Park et al. (2022) [70]	Modifizierung/ 10 %	k.A.	+	-	o	k.A.	k.A.	k.A.	o	+	o	+	+	o	3
16	Pflanzliche Biomasse (Holz)	Chemische Modifizierung von Kraft Lignin und Organosolv Lignin	Acetyl, Allyl glycidyl ether, Phenyl glycidyl ether, Ethyl hexyl glycidyl ether (Ziel: zur Verbesserung der Kompatibilität in Bitumen sowie zur Verbesserung der viskoelastischen Eigenschaften)	Nahar et al. (2022) [131]	Teilsubstitution/ 25 %	k.A.	o	o	+	+	k.A.	k.A.	o	k.A.	o	+	k.A.	o	3
17	Naturharz	Mischung aus Dammar Naturharz (Puder und Feststoff) (ca. 66 %), gebrauchtem Speiseöl (ca. 30 %) und Latex (4 %)	Latex	Djumari et al. (2017) [96], Setyawan et al. (2017) [57]	Modifizierung/ 2,5 %, 5 %, 7,5 %, 10 %	k.A.	--	+	k.A.	o	k.A.	+	o	k.A.	+	+	k.A.	o	2
18	Pflanzliche Biomasse (Holz-Abfall)	Biobinder aus Kiefernholz, Weidenholz und Pappelholz	keine Modifizierung	He et al. (2017) [129]	Teilsubstitution/ 5%, 10%, 15%, 20%	k.A.	+	+	o	+	-	k.A.	o	k.A.	o	o	k.A.	o	2
19	Pflanzliche Biomasse (Holz)	Bioöl aus Sägemehl	keine Modifizierung	Ding et al. (2021) [32]	Teilsubstitution/ 5 %, 10 %, 15 %, 20 %	k.A.	+	+	+	-	k.A.	k.A.	o	k.A.	o	o	k.A.	o	2

Material						Wirtschaftliche Kriterien			Technische Kriterien						Nachhaltigkeitskriterien				
Nr.	Rohstoffquelle	Art/ Name	Modifizierung	Literatur-/Datenquelle	Zielanwendung/ Zugabemenge	Kosten	Rohstoff-/Rohstoffverfügbarkeit	Herstellungsprozess/ Produktionsaufwand	Chemische Struktur/ Zusammensetzung	Physikalische Bindemittelleigenschaften- hoher Temperaturbereich	Physikalische Bindemittelleigenschaften- niedriger Temperaturbereich	Asphalteigenschaften	Verarbeitbarkeit	Alterungsverhalten	Umweltverträglichkeit	CO2-Reduktion	Recyclingoptionen/ Wiederverwendbarkeit/ Möglichkeit zur Verjüngung	Arbeitssicherheit	Endsumme
20	Pflanzliche Biomasse (Holz)	Organosolv-Lignin	Epoxid (Hydroxylgruppen im Lignin werden blockiert -> Lignin wird hydrophober): aroma-tisch, FGE (Phenylglycidylether) oder alpha-tisch, EGE (Ethylhexylglycidylether)	van Vliet et al. (2016) [34]	Teilsubstitution/ 10 %, 25 %	k.A.	+	o	o	+	-	k.A.	o	k.A.	o	+	k.A.	o	2
21	Pflanzliche Biomasse (Holz)	Klason-Lignin	keine Modifizierung	van Vliet et al. (2016) [34]	Teilsubstitution/ 10 %, 25 %	k.A.	+	-	o	o	+	k.A.	o	k.A.	o	+	k.A.	o	2
22	Pflanzliche Biomasse (Holz)	Organosolv-Lignin	keine Modifizierung	van Vliet et al. (2016) [34]	Teilsubstitution/ 10 %, 25 %	k.A.	+	o	o	+	-	k.A.	o	k.A.	o	+	k.A.	o	2
23	Pflanzliche Biomasse (Holz)	Polymermodifizierter Biobinder aus Eichenholz	Modifizierung mit verschiedenen Thermo plasen (Poly ethylen), 2-4 %	Rauf (2010) [3], Rauf und Williams (2010a) [49], Rauf und Williams (2010b) [50]	Vollständiger Bitumenersatz/ 100 %	k.A.	o	+	+	-	k.A.	k.A.	o	o	o	+	--	o	0
24	Pflanzliche Biomasse (Holz-Abfall)	Bioöl aus Holzabfällen aus verschiedenen Abfallquellen	teilweise Polymermodifizierung (4 % Poly ethylen)	Yang et al (2013) [130], Yang et al (2014) [61] - Asphaltstudie Yang et al (2017) [69]	Modifizierung/ 2 %, 5 % und 10 %	k.A.	+	+	o	+	-	+	o	-	o	o	--	-	-1
25	Pflanzliche Biomasse	Kunstharz (Bioepoxy) aus Kraft-Lignin und gebrauchtem Speiseöl	Nadic methyl anhydride (NMA) wird als Vernetzungsmittel verwendet, um die Verarbeitbarkeit des Epoxids zu steuern.	Li et al. (2020) [133]	Modifizierung, Teilsubstitution/ 7,5 %, 15 %, 22,5 % und 30 %	k.A.	o	-	k.A.	+	-	k.A.	o	k.A.	o	o	k.A.	o	-1

Material						Wirtschaftliche Kriterien			Technische Kriterien						Nachhaltigkeitskriterien				
Nr.	Rohstoffquelle	Art/ Name	Modifizierung	Literatur-/Datenquelle	Zielanwendung/ Zugabemenge	Kosten	Rohstoff-/ Rohstoffverfügbarkeit	Herstellungsprozess/ Produktionsaufwand	Chemische Struktur/ Zusammensetzung	Physikalische Bindemittelleigenschaften/ hoher Temperaturbereich	Physikalische Bindemittel-eigenschaften/ niedriger Temperaturbereich	Asphalteigenschaften	Verarbeitbarkeit	Alterungsverhalten	Umweltverträglichkeit	CO2-Reduktion	Recyclingoptionen/ Wiederverwendbarkeit/ Möglichkeit zur Verjüngung	Arbeitssicherheit	Endsumme
26	Pflanzliche Biomasse (Holz-Abfall)	Bioöl aus Holz modifiziert mit SBS	SBS (1%)	Gao et al. (2018) [63]	Teilsubstitution/ 5 %, 10 %, 30%, zusätzlich jeweils 5 % und 10 % + 1 % SBS	k.A.	+	+	o	o	k.A.	k.A.	o	-	o	o	--	o	-2
27	Pflanzliche Biomasse (Holz-Abfall)	Biobinder aus Holzabfällen	keine Modifizierung	You et al. (2012) [109], Xu et al. (2014) [61]	Modifizierung/ 10 %	k.A.	+	+	o	+	-	o	o	--	o	+	--	-	-2
28	Pflanzliche Biomasse (Holz)	Bioöl aus Holzpellets	keine Modifizierung	Hosseini Nezhad et al. (2015) [55], Hill et al. (2016) [97] (Asphaltstudie)	Vollständiger Bitumenersatz/ 100 % (Bindestudie), Modifizierung/ 5 %, 10 % (Asphaltstudie)	k.A.	o	+	o	-	k.A.	+	o	--	o	o	--	o	-3
29	Biomasse aus Holz (Harz)	Biobinder aus einem Nebenprodukt aus der Verarbeitung von Kiefernholz-Harz	keine Modifizierung	Nascimento Camargo et al. (2019) [135], Espinosa et al. (2020) [59], Espinosa et al. (2021) [60]	Vollständiger Bitumenersatz/ 100 %	k.A.	+	k.A.	k.A.	o	o	-	o	--	k.A.	o	-	o	-3
30	Harz und andere pflanzliche Stoffe	Biobinder aus 80 % Kiefernharz und 20 % Leinsamenöl	keine Modifizierung	Jiménez del Barco Carrón et al. (2017) [134]	Teilsubstitution/ 64 %	k.A.	-	k.A.	k.A.	+	o	-	o	--	o	o	-	o	-4
31	Guayule Harz	Guayule Harz und Reifengummi	Reifengummi (2,3 bis 12,5 % crumb rubber) zur Erweiterung der Plastizitätsspanne	Hemida und Abdelrahman (2021) [136]	Modifizierung, Teilsubstitution/ 25 %, 50 %, 75 %	k.A.	-	k.A.	-	+	k.A.	k.A.	o	--	o	o	-	o	-4

Material						Wirtschaftliche Kriterien			Technische Kriterien						Nachhaltigkeitskriterien				
Nr.	Rohstoffquelle	Art/ Name	Modifizierung	Literatur-/Datenquelle	Zielanwendung/ Zugabemenge	Kosten	Rohstoff-/Rohstoffverfügbarkeit	Herstellungsprozess/ Produktionsaufwand	Chemische Struktur/ Zusammensetzung	Physikalische Bindemittelleigenschaften/ hoher Temperaturbereich	Physikalische Bindemittel-eigenschaften/ niedriger Temperaturbereich	Asphalteigenschaften	Verarbeitbarkeit	Alterungsverhalten	Umweltverträglichkeit	CO2-Reduktion	Recyclingoptionen/ Wiederverwendbarkeit/ Möglichkeit zur Verjüngung	Arbeitssicherheit	Endsumme
Gräser und landwirtschaftliche Pflanzen																			
32	Pflanzliche Biomasse (Gräser)	Rohzuckerrohrmelasse (sugarcane waste molasses)	keine Modifizierung	Van Phuc Le (2021) [115]	Modifizierung, Teilsubstitution/ 10 %	k.A.	++	++	k.A.	+	k.A.	+	o	k.A.	o	+	k.A.	o	7
33	Pflanzliche Biomasse (Gräser)	Rohe Rohzuckerrohrmelasse	keine Modifizierung	Saboo et al. (2023) [120]	Teilsubstitution/ 25 %	k.A.	++	++	+	+	-	o	o	k.A.	o	+	k.A.	o	6
34	Pflanzliche Biomasse (Gräser)	Bioöl aus Zuckerrohr Bagasse (SCB)	keine Modifizierung	Farooq Ahmad et al. (2021) [68]	Modifizierung/ 10 %	k.A.	++	+	o	+	k.A.	+	o	k.A.	o	o	k.A.	o	5
35	Pflanzlich	Fettsäuremethylester (FAME) von Rapsöl	Kobalt-katalysator (0,1%) und Cumol-hydroperoxid (1,0 %) als Polymerisationsinitiatoren	Król et al. (2016) [122], Kowalski et al. (2017) [123]	Modifizierung/ 1,25 %, 2,5 %, 3,75 %, 5,0 %	+	+	-	o	+	+	+	+	k.A.	o	k.A.	k.A.	o	5
36	Harz aus pflanzlicher Biomasse (Gräser)	Phenol-Formaldehyd-Harz (PF) und Bio-Phenol-Formaldehyd-Harz (BPF) aus Weizenstroh	keine Modifizierung	Jiang et al. (2022) [137]	Teilsubstitution/ 30 % BPF, 10 % PF	k.A.	++	o	+	+	k.A.	+	-	k.A.	o	o	k.A.	o	4
37	Pflanzliche Biomasse (Gräser)	Biobinder aus Rutenhirse (Switchgrass)	2,5 % (bezogen auf Biobinder)	Barzegari und Solaimanian (2020) [46]	Teilsubstitution/ 35 %	k.A.	k.A.	+	o	o	-	k.A.	o	++	o	o	++	o	4
38	Pflanzliche Biomasse (Gräser)	Miscanthus	keine Modifizierung	Hosseini Nezhad et al. (2015) [55], Hill et al. (2016) [97] (Asphaltstudie)	Vollständiger Bitumenersatz/ 100% (Binderstudie), Modifizierung/ 5 %, 10 % (Asphaltstudie)	k.A.	++	+	o	+	k.A.	+	o	o	o	-	o	4	

Material						Wirtschaftliche Kriterien			Technische Kriterien						Nachhaltigkeitskriterien				
Nr.	Rohstoffquelle	Art/ Name	Modifizierung	Literatur-/Datenquelle	Zielanwendung/ Zugabemenge	Kosten	Rohstoff-/Rohstoffverfügbarkeit	Herstellungsprozess/ Produktionsaufwand	Chemische Struktur/ Zusammensetzung	Physikalische Bindemittelleigenschaften/ hoher Temperaturbereich	Physikalische Bindemittel-eigenschaften/ niedriger Temperaturbereich	Asphalteigenschaften	Verarbeitbarkeit	Alterungsverhalten	Umweltverträglichkeit	CO2-Reduktion	Recyclingoptionen/ Wiederverwendbarkeit/ Möglichkeit zur Verjüngung	Arbeitssicherheit	Endsumme
39	Pflanzliche Bio-masse (Gräser)	Polymermodifizierter Biobinder aus Maisstroh	Modifizierung mit verschiedenen Thermo-plasen (Poly-ethylen), 2-4 %	Raouf (2010) [3], Raouf und Williams (2010a) [49], Raouf und Williams (2010b) [50]	Vollständiger Bitumenersatz/ 100 %	k.A.	++	+	+	o	k.A.	k.A.	o	-	+	+	-	o	4
40	Pflanzlich (Samen eines Baums)	Biokohle aus den Schalen der Samen der Pflanze Mesuferrea (Baum)	keine Modifizierung	Kumar et al. (2018) [138]	Modifizierung, Teilstubstitution/ 5 %, 10 %, 15 % and 20 %	k.A.	-	+	+	+	k.A.	k.A.	o	+	o	o	+	o	4
41	Pflanzlich	Hydriertes Palmöl-fett (HPF) und hydriertes Palmfett-amid (FAA)	keine Modifizierung	Justino Uchoa et al. (2021) [143]	Modifizierung/ 3 %	o	-	k.A.	+	+	+	+	o	k.A.	o	k.A.	k.A.	+	4
42	Pflanzliche Bio-masse (Gräser)	Bioöl aus Maisrückstand	SBS und waste rubber powder als Polymere (2 und 10 %)	Bao et al. (2019) [132]	Teilstubstitution/ 15 %	k.A.	++	+	o	o	+	-	o	k.A.	o	o	k.A.	o	3
43	Pflanzlich	Sojafettsäuren (soy fatty acids)	keine Modifizierung	Seidel und Haddock (2012) [18]	Rejuvenator/ 1 %, 3 %	k.A.	+	+	k.A.	+	k.A.	k.A.	o	k.A.	o	k.A.	k.A.	o	3
44	Pflanzliche Bio-masse (Gräser)	Polymermodifizierter Biobinder aus Rutenhirse (Switchgrass)	Modifizierung mit verschiedenen Thermo-plasen (Poly-ethylen), 2-4 %	Raouf (2010) [3], Raouf und Williams (2010a) [49], Raouf und Williams (2010b) [50]	Vollständiger Bitumenersatz/ 100 %	k.A.	++	+	+	+	k.A.	k.A.	o	--	-	+	-	o	2
45	Pflanzlich	Bio-Rejuvenator aus 80 % neuartigem Bio-Rejuvenator, 15 % WMA-Zusatz (Evotherm-3G) und 5 % Styrol-Butadien-Kautschuk (SBR)-Latex	keine Modifizierung	Yu et al (2020) [142]	Rejuvenator/ 10 %	k.A.	o	k.A.	k.A.	+	+	k.A.	o	k.A.	o	k.A.	k.A.	o	2

Material						Wirtschaftliche Kriterien			Technische Kriterien						Nachhaltigkeitskriterien				
Nr.	Rohstoffquelle	Art/ Name	Modifizierung	Literatur-/Datenquelle	Zielanwendung/ Zugabemenge	Kosten	Rohstoff-/Rohstoffverfügbarkeit	Herstellungsprozess/ Produktionsaufwand	Chemische Struktur/ Zusammensetzung	Physikalische Bindemittelleigenschaften/ hoher Temperaturbereich	Physikalische Bindemittelleigenschaften/ niedriger Temperaturbereich	Asphalteigenschaften	Verarbeitbarkeit	Alterungsverhalten	Umweltverträglichkeit	CO2-Reduktion	Recyclingoptionen/ Wiederverwendbarkeit/ Möglichkeit zur Verjüngung	Arbeitssicherheit	Endsumme
46	Pflanzliche Biomasse (Gräser)	Maisstroh	keine Modifizierung	HosseiniNezhad et al. (2015) [55], Hill et al. (2016) [97] (Asphaltstudie)	Vollständiger Bitumenersatz/ 100 % (Bindestudie), Modifizierung/ 5 %, 10 % (Asphaltstudie)	k.A.	++	+	o	-	k.A.	+	o	--	o	o	-	o	0
47	Pflanzlich (Samen)	Jatrophaöl	keine Modifizierung	Abdullahi Ahmad et al (2017) [141]	Rejuvenator/ 3-4 %	k.A.	o	k.A.	-	+	+	k.A.	o	k.A.	-	k.A.	k.A.	-	0
48	Pflanzlicher Ursprung (Keine genaue Angabe)	Biophalt (BP), Sylvaroad, Epoxidized Methyl Soyate (EMS)	Biophalt ist mit Polymeren modifiziert	Jiménez del Barco Carrón et al (2017) [134], Manke et al. (2019) [103] - Asphaltstudie, Blanc et al. (2019) – [102] Asphaltstudie	Vollständiger Bitumenersatz und Teilsubstitution/ 50 % (mit RAP), 64 %	k.A.	k.A.	o	k.A.	o	o	+	o	-	o	k.A.	-	o	-1
49	Planzlischer Ursprung sehr stark chemisch aufbereitet	Bioöl aus Palmkernöl Polyol und 2,4-diphenylmethane diisocyanate (MDI) (30 %)	keine Modifizierung	Alamawi et al. (2019) [139]	Teilsubstitution/ 20 %, 40 %, 60 %	k.A.	-	--	k.A.	o	k.A.	k.A.	+	+	k.A.	k.A.	o	o	-1
50	Pflanzlich	Biobinder aus Rückständen von raffiniertem chemischem Alkohol	Physische Modifizierung mit SBS und chemische Modifizierung mit o-Phthalic anhydride with a catalyst of concentrated sulphuric acid (zur Verringerung der löslichen Bestandteile oder Erzeugung neuartiger Stoffe, z. B. durch Veresterung oder Polymerisation)	Dong et al. (2018) [140]	Teilsubstitution/ 10 %, 15 %	k.A.	+	o	-	+	-	-	o	k.A.	o	k.A.	k.A.	o	-1

Material					Wirtschaftliche Kriterien			Technische Kriterien					Nachhaltigkeitskriterien						
Nr.	Rohstoffquelle	Art / Name	Modifizierung	Literatur-/Datenquelle	Zielanwendung/ Zugabemenge	Kos-ten	Rohstoff-/Rohstoffverfügbarkeit	Herstellungsprozess/ Produktionsaufwand	Chemische Struktur/ Zusammensetzung	Physikalische Bindemittel-eigenschaften/ hoher Temperaturbereich	Physikalische Bindemittel-eigenschaften/ niedriger Temperaturbereich	Asphalt-eigenschaften	Verarbeitbarkeit	Alterungsverhalten	Umweltverträglichkeit	CO2-Reduktion	Recycling- optionen/ Wiederverwendbarkeit/ Möglichkeit zur Verjüngung	Arbeitssicherheit	End-summe
51	Planztlicher Ursprung sehr stark chemisch aufbereitet	Synthetische Bindemittel aus polyethyl acrylate (PEA), polymethyl acrylate (PMA), polybutyl acrylate (PBA)	keine Modifizierung	Airey et al. (2008) [47]	Teilsubstitution 25 %, 50 %, 75 %	k.A.	+	--	k.A.	o	k.A.	k.A.	o	k.A.	k.A.	k.A.	o	-1	

Material						Wirtschaftliche Kriterien			Technische Kriterien					Nachhaltigkeitskriterien					
Nr.	Rohstoffquelle	Art/ Name	Modifizierung	Literatur-/Datenquelle	Zielanwendung/ Zugabemenge	Kosten	Rohstoff-/Rohstoffverfügbarkeit	Herstellungsprozess/ Produktionsaufwand	Chemisch Struktur/ Zusammensetzung	Physikalische Bindemittelleigenschaften hoher Temperaturbereich	Physikalische Bindemittel-eigenschaften niedriger Temperatur-bereich	Asphalt-eigenschaften	Verarbeitbarkeit	Alterungsverhalten	Umweltverträglichkeit	CO2-Reduktion	Recycling-options/ Wiederverwendbarkeit/ Möglichkeit zur Verjüngung	Arbeits-sicherheit	End-sum-me
Abfallprodukte (gebrauchtes Speiseöl, alte Reifen, etc.)																			
52	Gebrauchtes Speiseöl	Bioöl aus Birodiesel-Rückständen	keine Modifizierung	Gong et al. (2016) [116]	Rejuvenator/ 2 %	+	+	+	+	o	+	+	o	k.A.	o	+	k.A.	o	7
53	Biomasse aus Kunststoff-abfällen & pflanzlichem Öl	Pyrolyseöl aus Reifen und unverarbeitetem Palmöl	keine Modifizierung	Al-Sabaei et al. (2021) [117]	Modifizierung, Teilsti-substitution/ 5 %, 10 %, 15 % und ein Mix aus beiden Ölen bis 30 %	k.A.	+	+	+	+	k.A.	k.A.	o	+	o	o	+	o	6
54	Pflanzliche und tierische Abfallprodukte	Bioflux	keine Modifizierung	Simonen et al. (2013a) [118], Simonen et al. (2013b) [119]	Teilsti-substitution/ bis 18 %	k.A.	+	o	o	-	+	k.A.	o	++	o	-	++	+	6
55	Gebräuchtes Speiseöl	Altspießeöl	keine Modifizierung	Asli et al. (2012) [71], Zargar et al. (2012) [124]	Rejuvenator/ 3 % bis 5 %	+	k.A.	+	o	+	k.A.	k.A.	o	+	o	o	+	o	5
56	Biomasse aus Hausmüll	Bioöl aus Hausmüll (Bio-oil from domestic waste (DWBO-binders))	keine Modifizierung	Tayh et al. (2017) [146]	Modifizierung/ 3 %, 6 %, 9 %	k.A.	k.A.	+	+	o	k.A.	k.A.	o	o	+	o	o	+	4
57	Biomasse aus pulvrierten Kunststoffabfällen	Bioöl aus Kunststoffabfällen (linear low-density polyethylene - LLDPE)	keine Modifizierung	Nizamuddin et al (2022) [31]	Rejuvenator/ 5 %, 8 %	k.A.	+	+	+	o	k.A.	+	o	k.A.	o	o	k.A.	o	4
58	Gebräuchtes Speiseöl	Gebrauchtes Speiseöl und Styrol-Butadien-Kautschuk (WSBR) und Polystyrol-Abfälle (WPS), (60 % Abfallpolymere und 40 % WCO)	keine Modifizierung	Nassar et al. (2020) [144]	Teilsti-substitution/ 50 %	k.A.	+	+	k.A.	+	k.A.	k.A.	o	k.A.	o	o	k.A.	o	3

Material						Wirtschaftliche Kriterien			Technische Kriterien						Nachhaltigkeitskriterien				
Nr.	Rohstoffquelle	Art/ Name	Modifizierung	Literatur-/Datenquelle	Zielanwendung/ Zugabemenge	Kosten	Rohstoff/ Rohstoffverfügbarkeit	Herstellungsprozess/ Produktionsaufwand	Chemische Struktur/ Zusammensetzung	Physikalische Bindemittelleigenschaften/ hoher Temperaturbereich	Physikalische Bindemittel-eigenschaften/ niedriger Temperaturbereich	Asphalteigenschaften	Verarbeitbarkeit	Alterungsverhalten	Umweltverträglichkeit	CO2-Reduktion	Recyclingoptionen/ Wiederverwendbarkeit/ Möglichkeit zur Verjüngung	Arbeitssicherheit	Endsumme
59	Gebräuchtes Speiseöl	Gebrauchtes Speiseöl (corn oil - Maiskeimöl, und soybean oil - Sojaöl)	keine Modifizierung	Suo et al. (2021) [101]	Rejuvenator/ 3 %, 6 % und 9 % (Asphaltstudie)	k.A.	+	k.A.	o	+	k.A.	o	o	o	o	o	o	o	2
60	Gebräuchtes Speiseöl	Modifiziertes gebrauchtes Speiseöl		Rahman et al. (2017) [145]	Teilsubstitution/ 15 % (5 % WCO, jeweils 5 % Modifizierung)	k.A.	+	+	k.A.	o	k.A.	k.A.	o	k.A.	o	k.A.	o	o	2
61	Biomasse aus Kunststoff-abfällen	Pyrolyseprodukt aus alten Autoreifen und einem geringen Anteil an Kunststoff-abfällen	keine Modifizierung	Avsenik und Tušar (2016) [56]	Teil- und vollständiger Bitumenersatz/ 10 %, 50 %, 100 %	k.A.	+	+	k.A.	o	-	+	o	k.A.	k.A.	o	k.A.	o	2
62	Gebräuchtes Speiseöl	Verarbeitetes gebrauchtes Speiseöl	keine Modifizierung	Wen et al (2013) [21]	Teilsubstitution/ 10 %, 30 %, 60 %	k.A.	+	+	k.A.	-	k.A.	o	o	k.A.	o	o	k.A.	o	1

Material						Wirtschaftliche Kriterien			Technische Kriterien						Nachhaltigkeitskriterien				
Nr.	Rohstoffquelle	Art/ Name	Modifizierung	Literatur-/Datenquelle	Zielanwendung/ Zugabemenge	Kosten	Rohstoff/ Rohstoff-verfügbarkeit	Herstellungsprozess/ Produktionsaufwand	Chemische Struktur/ Zusammensetzung	Physikalische Bindemittelleigenschaften/ hoher Temperaturbereich	Physikalische Bindemittelleigenschaften/ niedriger Temperaturbereich	Asphalteigenschaften	Verarbeitbarkeit	Alterungsverhalten	Umweltverträglichkeit	CO2-Reduktion	Recyclingoptionen/ Wiederverwendbarkeit/ Möglichkeit zur Verjüngung	Arbeitssicherheit	Endsumme
Biomasse tierischen Ursprungs																			
63	Tierische Biomasse	Schweinegülle	keine Modifizierung	Fini et al. (2011) [108], You et al. (2011) [109], Fini et al. (2012) [71], Xiu et al. (2011) [110], Mills-Beale et al. (2014) [73], Aflaki et al. (2014) [111], HosseiniNezhad et al. (2015) [55], Hill et al. (2016) [97] (Asphaltstudie), Pahavan et al. (2018) [74])	Vollständiger Bitumenersatz/ 100 % (Bindestudie, HosseiniNezhad), Modifizierung und Teilsubstitution/ 5 %, 10 % (Asphaltstudie), 2 %, 5 %, 10 % bis 30 % (Bindestudien)	++	++	o	o	+	+	+	o	+	+	o	+	-	9
64	Tierische Biomasse	Schweinegülle kombiniert mit Algae (Swilgae)	keine Modifizierung	Pahavan et al. (2020) [125], Pahavan et al. (2021) [126]	Teilsubstitution/ 50 % Modifizierung/ 10 %	k.A.	o	o	+	+	k.A.	+	o	k.A.	++	+	k.A.	-	5
Summe k.A.						56	5	2	15	1	32	32	0	29	3	9	29	0	

Tab. A-2: Ergebnisse der SWOT-Analyse

Nr. (Tab A-1) Endsumme nach Gewichtung	Material <u>Zielanwendung</u> Zugabemenge bezogen auf Binder	Quelle	Stärken (Strengths)	Schwächen (Weaknesses)	Chancen (Opportunities)	Risiken (Threats)
Nr. 3 9 + 1 = 10	Kraft-Lignin Teilsubstitution und Modifizierung üblicherweise 10 bis 12 M.-%, aber auch zunehmend Studien mit 40 bis 60 M.-%, 1 bis 6 M.-%	van Vliet et al. (2016) [34], Batista et al. (2018) [105], Moretti et al. (2022) [40], Xu et al. (2021) [106], Yao et al. (2022) [107], Gaudenzi et al. (2022) [100], Gaudenzi et al. (2023) [37]	<ul style="list-style-type: none"> Abfallprodukt/ Nebenprodukt aus der Papierindustrie und Holzaufbereitung, geringere Temperaturrempfindlichkeit, tendenzieller Anstieg der Steifigkeit und Veränderung des Phasenwinkels ähnlich wie bei polymermodifiziertem Bitumen, Verbesserung der Spurrinnenbeständigkeit, Vergleichbarkeit zu konventionellem Asphalt im Labor untersucht und bestätigt, Adhäsionseigenschaften werden nicht beeinflusst, geringere Feuchtigkeitsempfindlichkeit, antioxidierende Eigenschaft (auch geringe Zugabemengen führen zu einer Verbesserung der Alterungsbeständigkeit) 	<ul style="list-style-type: none"> Preis für Kraft-Lignin schwankt deutlich zwischen 370 und 700 €/t zu hohe Zugabemenge hat negative Auswirkungen auf Tieftemperaturverhalten und Ermüdungsverhalten 	<ul style="list-style-type: none"> mit Lignin-modifizierter Asphalt kann 30-75% weniger Auswirkungen auf Klimawandel haben als konventioneller Asphalt, antioxidierende Wirkung kann Wiederverwendbarkeit positiv beeinflussen, mit zusätzlicher Modifizierung könnte eine vollständige Bitumensubstitution möglich werden 	<ul style="list-style-type: none"> geeignete Modifizierung/ Kombinationsprodukt für eine vollständige Substitution muss noch erforscht werden, noch nicht getestet im Zusammenhang mit Ausbausphalt, Holz ist ein sehr langsam wachsender Rohstoff und eventuell nicht in so großen Mengen vorhanden für einen vollständigen Ersatz, evtl. Konkurrierende Märkte
Nr. 63 9 - 1 = 8	Bioöl aus Schweinegülle Vollständiger Bitumenersatz 100 M.-% (Binderstudie [55]) Teilsubstitution und Modifizierung 5 M.-%, 10 M.-% (Asphaltstudie), 2 M.-%, 5 M.-%, 10 M.-%, bis 30 M.-% (Binderstudien)	Fini et al. (2011) [108], You et al. (2011) [109], Fini et al. (2012) [71], Xiu et al. (2011) [110], Mills-Beale et al. (2014) [73], Aflaki et al. (2014) [111], Hosseinezhad et al. (2015) [56], Hill et al. (2016) [97] (Asphaltstudie), Pahlevan et al. (2018) [74]	<ul style="list-style-type: none"> tierischer Abfall einer Schweinefarm, geringe Kosten, Reduzierung der Kohlenstoffemissionen im Zusammenhang mit Ausbringung und Lagerung von Dung, Bindereigenschaften bei hohen und tiefen Temperaturen werden verbessert, verbesserte Alterungsverhalten der Proben in der Asphaltstudie, bei Raumtemperatur keinen wahrnehmbaren Geruch, Verringerung der Misch- und Verdichtungstemperaturen, Verbesserung der Verarbeitbarkeit 	<ul style="list-style-type: none"> Asphalt auf Basis von Bioöl aus Schweinegülle riecht leicht unangenehm während Erhitzung 	<ul style="list-style-type: none"> Verringerung der Misch- und Verdichtungstemperaturen reduziert Brennstoffverbrauch und resultierende CO2-Emissionen, Verbesserung der Verarbeitbarkeit des Gemischs, Möglichkeit zur Herabsenkung der Verarbeitungstemperaturen 	<ul style="list-style-type: none"> verfügbare Mengen (evtl. können andere tierische Abfälle ebenfalls in Betracht kommen), evtl. konkurrierende Märkte, Langzeitverfügbarkeit, Akzeptanz Geruch (möglicherweise nicht tolerierbar)

Endsumme nach Gewichtung	Material Zielanwendung Zuagebemenge bezogen auf Binder	Quelle	Stärken (Strengths)	Schwächen (Weaknesses)	Chancen (Opportunities)	Risiken (Threats)
Nr. 4 8 - 1 = 7	Kombination aus Kraft-Lignin & Altmotoröl (WEO) <u>Teilsubstitution und Modifizierung</u> 4 M.-% WEO & 5 M.-% und 10 M.-% Lignin	Fakhri und Norouzi (2022) [65]	<ul style="list-style-type: none"> WEO reduziert die verstiefende Wirkung von Kraft-Lignin, Anstieg der Steifigkeit, bessere Beständigkeit gegen Spurrinnen, Kraft-Lignin hat einen positiven Effekt und WEO einen negativen Effekt auf permanente Verformung, bessere Leistung bei niedrigen Temperaturen 	<ul style="list-style-type: none"> keine Asphaltuntersuchungen durchgeführt 	<ul style="list-style-type: none"> durch Kombination mögliche Erhöhung der Substitutionsmenge, Kombination verbessert insgesamt Alterungsverhalten (Lignin verbessert, WEO verschlechtert) 	<ul style="list-style-type: none"> nachhaltigere Alternative für WEO, Zusatz von WEO darf nicht zu hoch sein, da sonst negative Auswirkungen auf Asphalteigenschaften, Langzeitverfügbarkeit
Nr. 5 7 + 0 = 7	Holzbasiertes Bioöl <u>Teilsubstitution und Modifizierung</u> 5 M.-%, 10 M.-%, 15 M.-%	Ingrassia et al. (2020a) [112], Ingrassia et al. (2020b) [113]	<ul style="list-style-type: none"> Rückstand bei der Verarbeitung von Holz zu Zellstoff und Papier, Temperaturempfindlichkeit wird von nicht beeinflusst, steigert den Phasenwinkel und reduziert den Komplexen Schermodul über einen großen Frequenzbereich, geringere Alterungsanfälligkeit 	<ul style="list-style-type: none"> keine Tieftemperaturuntersuchungen durchgeführt, keine Asphaltuntersuchungen durchgeführt 	<ul style="list-style-type: none"> Biobinder ist wiederverwendbar, geringere Alterungsanfälligkeit 	<ul style="list-style-type: none"> keine Angabe zur Bioöl-Herstellung, keine Angaben zu den Kosten, evtl. konkurrierende Märkte, nur theoretisch große verfügbare Menge
Nr. 6 7 - 2 = 5	Biobinder aus Spänen von japanischem Zedernholz <u>Teilsubstitution und Modifizierung</u> 2 M.-%, 8 M.-%, 25 M.-%	Yang und Suciptan (2016) [114]	<ul style="list-style-type: none"> geringere Temperaturempfindlichkeit bei hoher Zugabemenge, größere Widerstandsfähigkeit gegen dauerhafte Verformung, höherer Widerstand gegen Kälterisse, Alterungsverhalten verbessert 	<ul style="list-style-type: none"> nur lokal verfügbar (Spänen von japanischem Zedernholz), keine Asphaltuntersuchungen durchgeführt, bei hohen Temperaturen kann es zu Entmischung kommen 	<ul style="list-style-type: none"> verbessertes Alterungsverhaltens könnte Basis für eine erfolgreiche Wiederverwendbarkeit sein 	<ul style="list-style-type: none"> Vergleichbarkeit der exotischen Holzart mit anderen nicht bekannt, Mengunsicherheit
Nr. 32 7 - 1 = 6	Rohzuckerrohrmelasse (sugarcane waste molasses, SWM) <u>Modifizierung</u> 10 M.-%	Van Phuc Le (2021) [115]	<ul style="list-style-type: none"> dunkles, süßes und sirupartiges Material, keine weitere Verarbeitung notwendig, positive Auswirkung auf Eigenschaften im hohen Temperaturbereich, Spurrinnenbeständigkeit nimmt mit zunehmendem Anteil zu 	<ul style="list-style-type: none"> Abnahme des Ermüdungswiderstands, keine tiefen Temperaturen untersucht, keine Untersuchung des Alterungsverhaltens 	<ul style="list-style-type: none"> -eventuell als Kombinationsprodukt mit anderen Materialien 	<ul style="list-style-type: none"> Anbau von Zuckerrohr nur in subtropischen/ tropischen Klimaten möglich große Transportwege, keine Informationen zum Alterungsverhalten Witterungsbeständigkeit unbekannt

Endsumme nach Gewichtung	Material Zielanwendung Zuagebemenge bezogen auf Binder	Quelle	Stärken (Strengths)	Schwächen (Weaknesses)	Chancen (Opportunities)	Risiken (Threats)
Nr. 52 7 + 0 = 7	Bioöl aus Biodieselrückständen <u>Rejuvenator</u> 2 M.-%	Gong et al. (2016) [116]	<ul style="list-style-type: none"> Biodiesel aus gebrauchtem Speiseöl, keine Herstellkosten, da Rückstand bei der Biodieselproduktion, Verbesserung der Verarbeitbarkeit Verbesserung der rheologischen Eigenschaften, Verbesserung der Tieftemperaturflexibilität und Tieftemperaturrissbeständigkeit, Verbesserung der Eigenschaften von gealtertem Asphalt, Reduzierung des Energieverbrauchs und der Kohlendioxidemissionen 	<ul style="list-style-type: none"> Wasserempfindlichkeit nimmt zu, Positive Ergebnisse nur für geringe Zugabemengen keine Untersuchung des Alterungsverhaltens 	<ul style="list-style-type: none"> Biodiesel birgt großes Potential: falls Alternative zu Diesel möglich und in größeren Mengen produzierbar, könnte auch die Verfügbarkeit der Rückstände gesichert sein, Verwendung mit Ausbauasphalt möglich, eventuell als Kombinationsprodukt mit anderen Materialien <p style="text-align: center;">+1</p>	<ul style="list-style-type: none"> nur in geringen Mengen einzusetzen, da bei zu hoher Dosierung negative Auswirkungen möglich, kein Bitumensubstitut, sondern ein Zusatzmittel, Unterschiedliche Nutzung des Speiseöls könnte die spätere Zusammensetzung des Bioöls beeinflussen. <p style="text-align: center;">-1</p>
Nr. 53 6 + 0 = 6	Pyrolyseöl aus alten Reifen (TPO) und unverarbeitetem Palmöl (CPO) <u>Teilsubstitution und Modifizierung</u> 5 M.-%, 10 M.-%, 15 M.-% und ein Mix aus beiden Ölen bis 30 M.-%	Al-Sabaei et al. (2021) [117]	<ul style="list-style-type: none"> TPO ist Schlamm, der bei der Umwandlung von Altreifen in Biogas bei der Biokraftstoffherstellung entsteht, keine weitere Verarbeitung des Produkts, bessere Beständigkeit gegen dauerhafte Verformung, erhöhte Ermüdungsfestigkeit Reduzierung der Alterungsanfälligkeit 	<ul style="list-style-type: none"> keine Tieftemperatureigenschaften untersucht, keine Asphalt-eigenschaften untersucht 	<ul style="list-style-type: none"> Nebenprodukt der Biokraftstoffherstellung birgt großes Potential, falls sich die Benutzung durchsetzt und die Produktion steigt, steigt auch die Verfügbarkeit des Nebenprodukts, Reduziert die Alterungsanfälligkeit <p style="text-align: center;">+1</p>	<ul style="list-style-type: none"> Zusammensetzung des Materials könnte schwanken aufgrund der Verarbeitung eines Abfallprodukts und Zusammensetzung der Reifen, Anbau von Ölpalmen umstritten und konkurriert mit Lebensmittelindustrie <p style="text-align: center;">-1</p>
Nr. 54 6 - 1 = 5	Bioflux <u>Teilsubstitution</u> bis 18 M.-%	Simonen et al. (2013a) [118], Simonen et al. (2013b) [119]	<ul style="list-style-type: none"> Aufbereitetes Abfallprodukt ist ein Gemisch aus Pflanzenölen und tierischen Fetten, Reduzierung der Steifigkeit, Verbesserung des Tieftemperaturverhaltens, Alterung scheint geringeren Einfluss zu haben, da Viskosität, Komplexer Schermodul und Phasenwinkel unverändert bleiben, höherer Flamm-Punkt sorgt für sicherere Nutzung 	<ul style="list-style-type: none"> Elastizität und Steifigkeit erhöht (mögliche Ursache Kristallisation der Biofluxbestandteile), keine Asphaltuntersuchungen durchgeführt, Produktion: Wasserstoff für die Hydrierung wird hauptsächlich mittels Dampfreformierung aus Erdgas gewonnen, wobei viel CO₂ freigesetzt wird. 	<ul style="list-style-type: none"> keinen Einfluss auf die Alterung von Bitumen, könnte Basis für eine erfolgreiche Wiederverwendbarkeit sein <p style="text-align: center;">0</p>	<ul style="list-style-type: none"> Material durch ein chemisches Verfahren von Neste Oil (NExBTL) patentiert <p style="text-align: center;">-1</p>
Nr. 33 6 - 1 = 5	Rohe Rohzuckerrohrmelasse <u>Teilsubstitution</u> 25 M.-%	Saboo et al. (2023) [120]	<ul style="list-style-type: none"> Nebenprodukt bei der Zuckergewinnung, keine weitere Verarbeitung notwendig Spurrinnenbeständigkeit vergleichbar mit Bitumen, positive Auswirkung auf Ermüdungsverhalten 	<ul style="list-style-type: none"> keine Untersuchung der Tieftemperatureigenschaften, keine Untersuchung des Alterungsverhaltens 	<ul style="list-style-type: none"> eventuell als Kombinationsprodukt mit anderen Materialien mit hohem Anteil bis zu 25% <p style="text-align: center;">0</p>	<ul style="list-style-type: none"> Anbau von Zuckerrohr nur in subtropischen/ tropischen Klimaten, große Transportwege, keine Informationen zum Alterungsverhalten Witterungsbeständigkeit unbekannt <p style="text-align: center;">-1</p>

Endsumme nach Gewichtung	Material Zielanwendung Zugabemenge bezogen auf Binder	Quelle	Stärken (Strengths)	Schwächen (Weaknesses)	Chancen (Opportunities)	Risiken (Threats)
Nr. 7 6 + 0 = 6	Klason-Lignin modifiziert mit Polyethylenglycol (PEG) und Schwefel <u>Teilsubstitution und Modifizierung</u> 25 M.-% Lignin, 2 und 8 M.-% PEG, 2 und 8 M.-% Schwefel	Wu et al. (2020) [121]	<ul style="list-style-type: none"> PEG zur Verbesserung der Lagerstabilität, Klason-Lignin verhärtet Bitumen und senkt die Temperaturempfindlichkeit, Verbesserung der Langzeitalterung 	<ul style="list-style-type: none"> negative Auswirkung auf die Tieftemperatureigenschaften durch Verhärtung höhere Temperaturen zur Verarbeitbarkeit notwendig, PEG nur bis 150°C thermisch stabil, Schwefel führt zur Verschlechterung 	<ul style="list-style-type: none"> Verbesserung der Langzeitalterung, daher möglicherweise gut Wiederverwendbarkeit eventuell zur weiteren Kombination einsetzbar <p style="text-align: center;">+1</p>	<ul style="list-style-type: none"> Einsatz von PEG konkurriert u.a. mit Pharma- und Kosmetikindustrie <p style="text-align: center;">-1</p>
Nr. 8 6 + 0 = 6	Kombination aus Lignin und gebrauchtem Sojabohnenöl <u>Teilsubstitution und Modifizierung</u> 3 M.-%, 5 M.-%, 7 M.-% Lignin 5 M.-% gebrauchtes Sojabohnenöl	Feng et al. (2023) [67]	<ul style="list-style-type: none"> billige Rohstoffe Lignin verhärtet und das Öl erweicht Bitumen, Erhöhung des Spurinnenwiderstands, Verbesserung der Tieftemperatureigenschaften, Lignin kann die Oxidation verlangsamen, Proben sind weniger alterungsanfällig 	<ul style="list-style-type: none"> im Vergleich zu anderen Ligninstudien geringe Zugabemengen, Zugabe von Öl führt zu einer Verschlechterung der Asphalteigenschaften (z.B. Hafteigenschaften) 	<ul style="list-style-type: none"> erhöhte Beständigkeit gegen Alterung, daher möglicherweise gute Wiederverwendbarkeit gebrauchtes Sojabohnenöl als Alternative zum gebrauchten Motorenöl (Studie von Fakhri und Norouzi (2022) [65]) <p style="text-align: center;">+1</p>	<ul style="list-style-type: none"> Anbau von Soja ist umstritten und konkurriert mit Lebensmittelindustrie Zusammensetzung von gebrauchtem Speiseöl sehr variabel und abhängig von vorheriger Benutzung <p style="text-align: center;">-1</p>
Nr. 1 6 + 0 = 6	Mikroalgen <u>Vollständiger Bitumenersatz</u> 100 M.-%	Chailleux et al. (2012) [42], Halim et al. (2012) [52], Mofijur et al. (2019) [53], Tan et al. (2018) [55], Rolland et al. (2019) [54]	<ul style="list-style-type: none"> Algaenans (unlöslicher Anteil) verbessert die rheologischen Eigenschaften, Temperaturempfindlichkeit ähnlich zu Straßenbaubitumen, stabile Mischungen (Bohrkernentnahme möglich), umweltfreundlich, ungiftig, Potential zur Reduzierung von Treibhausemissionen, Bindung von CO₂ aus Industrieprozessen möglich (für 1 kg Mikroalgenbiomasse werden 1,8 kg CO₂ benötigt) 	<ul style="list-style-type: none"> Anbau und Ernte sehr aufwendig Weiterverarbeitung ist Kombination von mechanischen und chemischen Prozessen: Extraktion der Lipide mit organischem Lösemittel oder mit überkritischem Fluid, Umesterung, kombinierte Lipidextraktion und Umesterung, hydrothermale Verflüssigung (HTL), keine Asphaltuntersuchungen durchgeführt, keine Untersuchung des Alterungsverhaltens 	<ul style="list-style-type: none"> eventuell geeignet für einen vollständigen Bitumenersatz mit zusätzlicher Modifizierung, keine große Konkurrenz mit anderen Industrien zu erkennen <p style="text-align: center;">+1</p>	<ul style="list-style-type: none"> aktuelle Hauptaufgabe: Entwicklung eines energie- und kosteneffizienten Kultivierungssystems, weitere Forschung und Untersuchung in Asphalt notwendig <p style="text-align: center;">-1</p>

Endsumme nach Gewichtung	Material Zielanwendung Zugabemenge bezogen auf Binder	Quelle	Stärken (Strengths)	Schwächen (Weaknesses)	Chancen (Opportunities)	Risiken (Threats)
Nr. 9 5 - 1 = 4	Ligninhaltiger Abfall <u>Teilsubstitution und Modifizierung</u> 5 M.-%, 10 M.-%, 20 M.-%	Pérez et al. (2019) [98] (Asphaltstudie), Pérez et al. (2020) [99]	<ul style="list-style-type: none"> Abfall wird unverarbeitet verwendet, somit kein zusätzlicher Produktionsaufwand und geringe Kosten, Erhöhung des komplexen Schermoduls und Phasenwinkels, Erhöhung der Spurrinnenfestigkeit, bei mittleren Temperaturen sinkt der Phasenwinkel, was die Ermüdungswiderstand des Bindemittels, bei Zugabe von 20 M.-% erfolgt Verbesserung der Asphalt-eigenschaften, Alterungsverhalten unverändert 	<ul style="list-style-type: none"> hoher Wassergehalt 	<ul style="list-style-type: none"> Abfall wird unverändert weiterverwendet, eventueller Einsatz als Kombinationsprodukt, keinen Einfluss auf das Alterungsverhalten, daher mögliche Wiederverwendbarkeit mögliche Alternative zu Zeolith 	<ul style="list-style-type: none"> aufwendiger Mischvorgang aufgrund des hohen Wassergehalts, Wasser verdampft während Mischvorgang, langsame kontinuierliche Erhöhung der Mischtemperatur bis 160°C notwendig,
Nr. 34 5 - 1 = 4	Bioöl aus Zuckerrohrbagasse (SCB) <u>Modifizierung</u> 10 M.-%	Farooq Ahmad et al. (2021) [68]	<ul style="list-style-type: none"> faserigen, gemahlenen Überreste, die bei der Zuckerfabrikation nach dem Auspressen von Zuckerrohr oder bei der Gewinnung von Sirup aus Zuckerhirse zurückbleiben, verbesserter Ermüdungswiderstand, keine höhere Gefahr der Spurrinnenbildung 	<ul style="list-style-type: none"> Weiterverarbeitung der Restprodukte mit Pyrolyse notwendig, Keine Untersuchung der Tieftemperatureigenschaften, keine Untersuchung des Alterungsverhaltens 	<ul style="list-style-type: none"> eventuell als Kombinationsprodukt mit anderen Materialien einsetzbar 	<ul style="list-style-type: none"> Anbau von Zuckerrohr nur in subtropischen/ tropischen Klimaten, große Transportwege wichtige Eigenschaften noch nicht untersucht (Alterung, Tieftemperatureigenschaften), Witterungsbeständigkeit unbekannt
Nr. 35 5 + 0 = 5	Fettsäuremethylester (FAME) von Rapsöl (Kraftstoff) <u>Modifizierung und Rejuvenator</u> 1,25 M.-%, 2,5 M.-%, 3,75 M.-% und 5,0 M.-%	Król et al. (2016) [122], Kowalski et al. (2017) [123]	<ul style="list-style-type: none"> Verringert Erweichungspunkt RuK und senkt komplexen Schermodul, bifunktionelles Material: In der ersten Phase nach Zugabe wirkt es verflüssigend auf Bitumen. In der zweiten Phase findet ein langsamer Polymerisationsprozess in Gegenwart von Sauerstoff statt und führt zu einer teilweisen Wiederherstellung der ursprünglichen Bitumenviskosität (nach zwei Monaten abgeschlossen), verbessert die Tieftemperatureigenschaften trägt zu einer besseren Homogenität der RAP-haltigen Mischungen bei, verbessert den Verdichtungsprozess 	<ul style="list-style-type: none"> keine Untersuchung des Alterungsverhaltens 	<ul style="list-style-type: none"> eventuell als Kombinationsprodukt mit anderen Materialien einsetzbar nur geringe Zugabemengen möglich 	<ul style="list-style-type: none"> konkurriert mit Herstellung von Biokraftstoffprodukten

Endsumme nach Gewichtung	Material Zielanwendung Zuagebemenge bezogen auf Binder	Quelle	Stärken (Strengths)	Schwächen (Weaknesses)	Chancen (Opportunities)	Risiken (Threats)
Nr. 55 5 - 1 = 4	Altspeiseöl Rejuvenator 3 M.-% bis 5 M.-%	Asli et al. (2012) [71], Zargar et al. (2012) [124]	<ul style="list-style-type: none"> keine Kosten, da es sich um ein Abfallprodukt handelt, nur Weiterverarbeitung durch Filterung, verjüngtes Bitumen zeigt geringere Neigung zur Kurzzeitalterung 	<ul style="list-style-type: none"> keine Angaben zum Rohstoff des Speiseöls, keine rheologischen Untersuchungen durchgeführt, keine Asphaltuntersuchungen durchgeführt 	<ul style="list-style-type: none"> eventuell als Kombinationsprodukt mit anderen Materialien zur Wiederverwendung von Ausbauasphalt einsetzbar <p style="text-align: center;">0</p>	<ul style="list-style-type: none"> Bitumeneigenschaften nur anhand konventioneller Methoden untersucht, Zusammensetzung von gebrauchtem Speiseöl sehr variabel, abhängig von vorheriger Benutzung und Weiterverarbeitung, verfügbare Menge -1
Nr. 64 5 + 0 = 5	Schweinegülle kombiniert mit Algae (Swilgæ) Teilsubstitution und Modifizierung 50 M.-%, 10 M.-%	Pahlavan et al. (2020) [125], Pahlavan et al. (2021) [126]	<ul style="list-style-type: none"> proteinreiche Algen und lipidreiche Schweinegülle, Adhäsionseigenschaften werden verbessert, verbessert Widerstand gegen Feuchtigkeit, verbessert rheologische Eigenschaften in hohen Temperaturbereichen 	<ul style="list-style-type: none"> keine Untersuchung des Alterungsverhaltens, keine Untersuchung des Tieftemperaturverhaltens 	<ul style="list-style-type: none"> Kombination als mögliche Alternative, um positive Eigenschaften der beiden einzelnen Produkte zu verbinden, hohe Zugabemengen möglich <p style="text-align: center;">+1</p>	<ul style="list-style-type: none"> wichtige Eigenschaften noch nicht untersucht (Alterung, Tieftemperatoreigenschaften), Akzeptanz Geruch (möglicherweise nicht tolerierbar) -1