

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

FA FGSV 1/2022

Forschungsstelle: Ruhr-Universität Bochum, Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften (Prof. Dr.-Ing. M. Radenberg)

Bearbeiter: Radenberg, M. / Schwettmann, K. / Weigel, S.

Auftraggeber: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V., Köln

Abschluss: Juli 2023

## 1 Einleitung

### 1.1 Problemstellung und Motivation

Die derzeitigen geopolitischen und gesellschaftlichen Entwicklungen werden voraussichtlich den Ausstieg aus der Nutzung von Erdöl als Kraftstoff für Verbrennungsmotoren stark beschleunigen. Das hat große Auswirkungen auf den Asphaltstraßenbau, weil Erdöl auch die Basis für das Bindemittel im Asphalt ist. Um unser Straßennetz und damit unsere Infrastruktur aufrecht erhalten zu können, muss daher auch die Asphaltbranche sowohl lang- als auch kurzfristig erdölonabhängige Wege einschlagen. 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 würde bereits ein teilweiser Ersatz zu einer erheblichen Einsparung von Bitumen führen, der zudem das Sammeln erster Erfahrungen mit alternativen Bindemittelmaterialien erlauben und die Akzeptanz steigern kann.

Das Ziel des Projekts ist die Identifizierung erfolgversprechender Alternativmaterialien für einen Ersatz von Bitumen im Asphaltstraßenbau. Dabei sollen Alternativmaterialien möglichst biobasiert, nachhaltig, klimaschonend, umweltfreundlich und in ausreichender Menge verfügbar beziehungsweise unter angemessenen ökonomischen Bedingungen herstellbar sein.

### 1.2 Vorgehen

Die Bearbeitung des Projekts erfolgte in vier Arbeitspaketen. Im Arbeitspaket 1 wurden die Informationen und Daten zu bisher in der Fachwelt untersuchten Alternativmaterialien zu Bitumen (ca. 180 Literaturquellen) zusammengetragen und in die folgenden vier Gruppen eingeteilt:

- Vollständige Bitumensubstitution
- Teilweise Bitumensubstitution (Anteil > 10 M.-%)
- Modifizierungen (Anteil ≤ 10 M.-%)

- Bitumensubstitution im Rahmen der Asphaltwiederverwendung

Basierend auf der Informations- und Datengrundlage erfolgte im AP 2 die systematische Bewertung der potenziellen Alternativmaterialien. Die Bewertung erfolgte mithilfe eines numerisch eingeteilten qualitativen Bewertungssystems.

Im AP 3 wurden die geeignetsten Alternativmaterialien anhand einer Analyse der Stärken und Schwächen sowie der Chancen und Risiken (SWOT-Analyse) identifiziert. Für die nach dieser SWOT-Analyse zielführendsten Alternativmaterialien wurde abschließend ein theoretisches Konzept erstellt, mit dem die großtechnische Anwendbarkeit in der Praxis nachgewiesen werden konnte. Das AP 4 beinhaltet die Schlussberichtfassung.

## 2 Stand der Kenntnisse

Ein Großteil der Studien zu potenziellen Alternativmaterialien beschäftigt sich mit Modifizierungen und Teilersatzstoffen mit pflanzenbasierten Stoffen (zum Beispiel Lignin oder Bioöl). Daneben finden sich aber auch Stoffe aus Altkunststoffen, Gummi, Speisefette, Kaffeesatzresten oder auch Gülle.

Aus der Gruppe der pflanzenbasierten Stoffe bildet das Biopolymer Lignin einen sehr aussichtsreichen Teilersatzstoff, der bereits von verschiedenen Forschungsgruppen untersucht und als vielversprechend bewertet wurde. Dabei ist zu beachten, dass Lignin aus sehr unterschiedlichen Quellen (zum Beispiel Holz, Mais, Stroh, Eukalyptus, Miscanthus, Zuckerrohr) stammt und mit unterschiedlichen Methoden (Sulfit-, Kraft-, Organosolv-Prozess) gewonnen wird, womit stark variierende Eigenschaften verbunden sein können [40]. Eine weitere vielversprechende Gruppe der pflanzenbasierten Stoffe sind die Bioöle, zu denen auch die sogenannten Rejuvenatoren gezählt werden können. Diese wurden als Teilsubstitution oder Modifizierung von Bitumen untersucht. Wie beim Lignin sind die physikalischen und chemischen Eigenschaften der Bioöle von der pflanzlichen Quelle und von der Aufbereitungsmethode abhängig, wobei diese meist pyrolytisch aufbereitet werden.

Im Gegensatz zu den Teilersatzstoffen sind Ersatzstoffe für eine vollständige Substitution bisher weniger erforscht. Einen vielversprechenden Ansatz bilden in diesem Zusammenhang Rückstände der Mikroalgenaufbereitung, die teilweise ein zum Bitumen ähnliches temperaturabhängiges Verhalten aufweisen. Die vielleicht größte Erfolgsaussicht für eine vollständige Bitumensubstitution scheinen Kombinationen der vorgenannten Stoffe zu haben. Mit dem sogenannten *Instant Bitumen*, das künstlich aus einer Asphaltene- und einer Maltenfraktion gemischt wird, wurden in Deutschland erste Praxiserprobungen durchgeführt. Die Asphaltene werden dabei bergmännisch gewonnen, während es sich bei der Maltenphase um einen Rejuvenator handelt.

Die bereits zahlreichen positiven Erfahrungen mit biobasierten Rejuvenatoren lassen erwarten, dass eine Einbindung der Wiederverwendung von Ausbauasphalt in solche neuen Bindemittelkonzepte möglich ist.

### 3 Informations- und Datensammlung

#### 3.1 Vollständige Bitumensubstitution

Die internationale Recherche anhand von 180 Literaturquellen hat ergeben, dass mit acht verschiedenen Produkten eine vollständige Bitumensubstitution möglich wäre (siehe Tabelle 1).

**Tabelle 1: Produkte zur vollständigen Bitumensubstitution**

Art/ Name
Synthetische Bindemittel aus verschiedenen organischen Polymeren PEA, PMA und PBA
Polymermodifizierte Biobinder aus Eichenholz, Rutenhirse und Maisstroh
Mikroalgen
Vergleich von Bioölen aus verschiedenen Quellen: Schweinegülle, Miscanthus, Holzpellets und Maisstroh
Pyrolyse von Autoreifen, mit einem Anteil an Kunststoffabfällen
Dammar Naturharz, Flugasche, gebrauchtes Speiseöl und Latex
Pech (ein Nebenprodukt der Papierindustrie), Kolophonium und SBS
Nebenprodukt aus der Verarbeitung von Kiefernholzharz

Ein vielleicht besonders vielversprechendes Konzept zur vollständigen Bitumensubstitution scheint die Kombination von Stoffen oder Produkten. 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 im ersten Schritt zu untersuchen.

#### 3.2 Teilweise Bitumensubstitution

Der größte Anteil an Stoffen für eine teilweise Bitumensubstitution mit Zugabeanteilen > 10 M.-% ist den Bioölen aus land- und forstwirtschaftlichen Rückständen zuzuordnen. In den meisten Fällen sind die Viskositäten der Bioöle deutlich geringer als die von Bitumen, sodass diese meist als Rejuvenatoren für die Wiederverwendung eingesetzt wurden. Die rheologischen Eigenschaften der Biobindemittel ändern sich erheblich, wenn Polymere als Modifikatoren hinzugefügt werden.

Im Gegensatz zu den Bioölen hat Lignin eine versteifende Wirkung, wobei die Zugabemenge von Lignin zwischen 10 bis 40 M.-% liegen kann. Um dem entgegenzuwirken, wurden bereits Studien mit modifiziertem Lignin, zum Beispiel in Kombination mit einem Öl, zum Beispiel gebrauchtes Motoröl oder gebrauchtes Sojabohnenöl, durchgeführt.

Eine weitere Stoffgruppe umfasst Materialien mit einem Zugabeanteil < 10 M.-%. Hierunter fällt ein Großteil der Stoffe, die bei der Wiederverwendung von Asphalt als Rejuvenator eingesetzt wurden. Auch in Deutschland wurden zahlreiche Studien durchgeführt und es hat bereits eine Veröffentlichung eines technischen Regelwerks gegeben. Einen großen Anteil machen dabei wiederum die Bioöle aus verschiedenen Biomassequellen aus. Die Zugabemenge ist dabei signifikant abhängig von den Viskositäten des Bioöls und des Bindemittels im Asphaltgranulat sowie von der Zielgröße (resultierendes Bindemittel). Neben den extra hergestellten Bioölen fallen in diese Gruppe auch die gebrauchten Speiseöle (engl. Waste cooking oil, WCO), deren Verwendung häufig mit ihrer einfachen Verfügbarkeit begründet wird und die auch schon in Verbindung mit Ausbauasphalt zu Anwendung gekommen sind. Als weitere Möglichkeit wird ein aus Schweinegülle gewonnener Biobinder gesehen, welcher mittels thermochemischer Verflüssigung hergestellt und mit einer Zugabemenge bis zu 10 M.-% verwendet werden kann.

Die Literaturrecherche hat weiter gezeigt, dass es Materialien gibt, die als Bitumenersatz oder Bitumenmodifikation dem Asphalt zugegeben werden können. Ein großer Fokus liegt hierbei auf zerkleinerten Altkunststoffen. Allerdings hat eine Erprobungsstrecke in Deutschland gezeigt, dass sich das Kälteverhalten solcher Asphalte verschlechtert. Grundsätzlich ist bei diesem Vorgehen, aber auch bei allen anderen Konzepten zu berücksichtigen, dass das sehr gut recyclefähige System "Asphalt" nicht durch den Eintrag von Stoffen so beeinträchtigt wird, dass anschließend eine Wiederverwendung des Asphalts erschwert oder möglicherweise verhindert wird. Weitere Möglichkeiten der Modifizierung und Additivierung von Asphalt zeigt die Tabelle 2.

**Tabelle 2: Materialien zur Verbesserung der Eigenschaften von Bitumenalternativen**

Art/ Name	Ziel
Naturfasern (z.B. aus Jute, Leinen, Hanf, Sisal, Baumwolle)	Verbesserung des Ermüdungsverhaltens, der Stabilität und der Widerstandsfähigkeit gegen Beanspruchung
Synthetische Fasern (PP, PE, Nylon, Glas und Stahlfasern)	Verbesserung des Ermüdungsverhaltens, der Stabilität und der Widerstandsfähigkeit gegen Beanspruchung
Verschiedenste Anti-Ageing-Additive	Verbesserung des Alterungsverhaltens und Erhöhung der Lebensdauer
Mikrokapseln mit Rejuvenatoren oder anderen Ölen	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))	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)	Senkung der Viskosität und somit Verbesserung der Verarbeitung durch Senkung der Verarbeitungstemperatur und somit des Energieverbrauchs

3.3 Bitumensubstitution im Rahmen der Asphaltwiederverwendung

Die Ressource "Altasphalt" ist aufgrund des sehr großen Straßenbestands 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 vorangehenden Kapiteln behandelt wurden. Die in der Tabelle 3 aufgeführten Stoffe und Stoffkombinationen sind als Ergänzung zu den Stoffen in den vorangehenden Kapiteln zu sehen.

Tabelle 3: Übersicht der Asphaltstudien für die systematische Bewertung

Art/ Name	Zugabemenge bezogen auf Binderanteil /Wirkung
Biobinder (Biophalt) aus Nebenprodukten der Forstwirtschaft und weiterer Modifizierung (hochgradig polymermodifizierte Biobinder, HiPMBB)	100 M.-% / Bitumensubstitution
Bioöl aus Holzabfällen: original bio-oil (OBO), dewatered bio-oil (DWBO), polymer-modified bio-oil (i.e., PMBO)	5 M.-%, 10 M.-% OBO, 5 M.-%, 10 M.-% DWBO, 5 M.-%, 10 M.-% PMBO / Bitumensubstitution
Dammar Naturharz	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)	5 und 10 M.-% / Bitumensubstitution
Ligninhaltiger Abfall	5, 10, 20, 40 und 60 M.-% / Bitumensubstitution
Lignin	30 M.-%/ Bitumensubstitution
Rejuvenatoren aus: Maisöl, Sojabohnenöl, Heizöl	3 M.-%, 6 M.-%, 9 M.-% / Rejuvenator
Sylvaroad (Rejuvenator auf Kiefernholzbasis) Biophalt (BP), Epoxidiertes Sojamethylester (EMS)	2 M.-% Sylvaroad, 62 M.-% Biophalt, 3 M.-% Epoxidiertes Sojamethylester / Bitumensubstitution und Rejuvenator
Biophalt (BP)	100 M.-% / Bitumensubstitution

4 Bewertung der Substitute

Für die Bewertung wurden aus den 138 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. Bewertet wurden die in der Tabelle 4 aufgeführten Kriterien.

Die numerische Bewertung der Kriterien erfolgte mit einer Summenbildung der Bewertungspunkte für die in Tabelle 4 aufgeführten Kriterien. Für die nachfolgende SWOT-Analyse wurden die 18 Materialien (orange hinterlegt) mit der besten Bewertung (Endsumme 5 und besser) weiter beachtet (Tabelle 5).

Tabelle 4: Bewertungskriterien für die Auswahl von Stoffen und Konzepten

<b>Wirtschaftliche Kriterien</b>	- Kosten - Rohstoffverfügbarkeit - Herstellungsprozess und Produktionsaufwand
<b>Technische Kriterien</b>	- Chemische Struktur und Zusammensetzung - Physikalische Bindemittleigenschaften im hohen Temperaturbereich - Physikalische Bindemittleigenschaften im niedrigen Temperaturbereich - Asphalteeigenschaften (falls vorhanden) - Verarbeitbarkeit - Alterungsverhalten
<b>Nachhaltigkeitskriterien</b>	- Umweltverträglichkeit (z.B. anhand von Herstellerangaben und der chem. Zusammensetzung) - CO <sub>2</sub> -Reduktion (z.B. anhand der Datenlage) - Recyclingoptionen (z.B. anhand von Alterungs- und Verjüngungseigenschaften) - Arbeitssicherheit (z.B. anhand der chemischen Zusammensetzung und der Verarbeitbarkeit)

Tabelle 5: Numerische Bewertung der Stoffe

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

## 5 Auswahl von Konzepten für eine Praxisumsetzung

Für die SWOT-Analyse wurden die in Tabelle 5 markierten 18 Stoffe und Stoffgruppen mit den höchsten Bewertungen ( $\geq 5$  Punkte) ausgewählt. Die SWOT-Analyse führte teilweise zu Auf- oder zu Abwertungen, die sich in einem Wertebereich von +1 bis -2 bewegen. Das unter Berücksichtigung der SWOT-Analyse berechnete Ranking zeigt die Tabelle 6. Für die Gesamtbewertungszahl hat sich dadurch das Wertespektrum auf 4 bis 10 (vorher 5 bis 9) leicht erweitert.

Nach dem derzeitigen Kenntnisstand ist noch kein einzelnes Material verfügbar, mit dem eine vollständige Bitumensubstitution möglich scheint. 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. Dabei ist das Ziel zu verfolgen, eine Kombination von Materialien zusammenzustellen, dass sich deren positive Effekte auf die Asphalteeigenschaften ergänzen und um negative

Einzelwirkungen auszugleichen. Der hierzu vorgeschlagene Ablaufplan (siehe Bild 1) besteht aus drei Arbeitspaketen: der Materialebene, gefolgt von der Bindemittellebene und der Asphalttebene.

Tabelle 6: Ranking der Stoffe unter Berücksichtigung der SWOT-Analyse

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

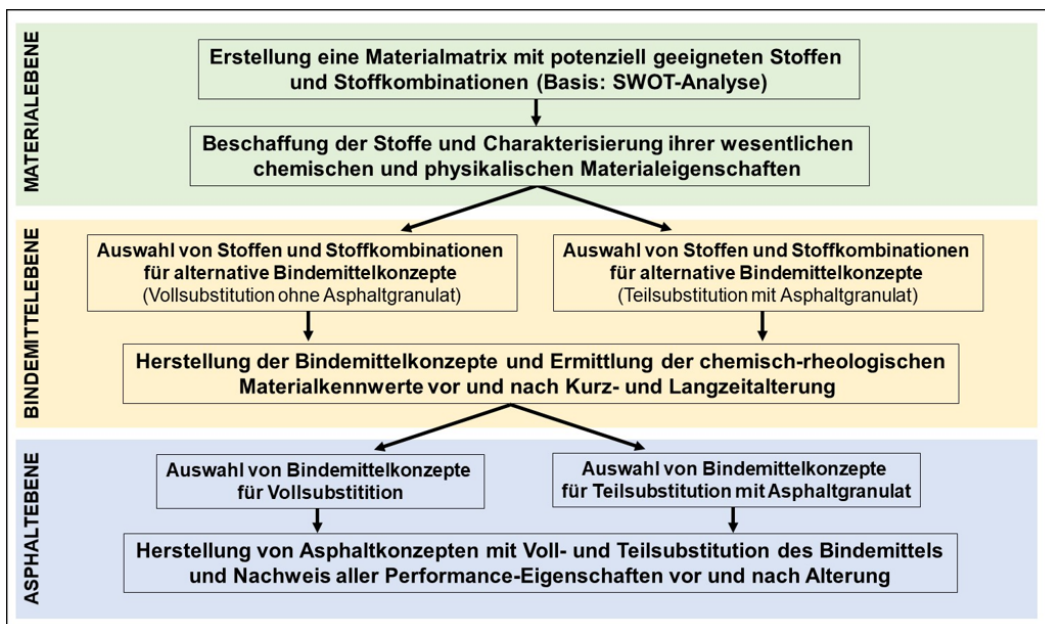


Bild 1: Vorschlag für die wissenschaftliche und experimentelle Fortführung des Themas