

1. Forschungsthema

Untersuchungen zum Einfluss des nachhaltigen und gesteinschonenden Aufbereitungsverfahrens von Asphaltgranulat auf die Wirtschaftlichkeit von Asphaltflächenbefestigungen

Änderungen in blau

2. Wirtschaftliche Relevanz für KMU

2.1 Wissenschaftliche-technische und wirtschaftliche Problemstellung

2.1.1 Wiederverwendung von Asphaltgranulat

Neben dem Neubau von Verkehrsflächen stellen sowohl der grundhafte Ausbau als auch die Erhaltung von Verkehrsflächenbefestigungen die Grundlage für ein leistungsfähiges und an den Bedarf angepasstes Straßennetz dar. Dabei zeichnet sich seit einigen Jahren der Trend ab, dass oberflächennahe Erhaltungsmaßnahmen der Straßeninfrastruktur in den Vordergrund rücken und der Neubau sowie der grundhafte Ausbau rückläufig sind [1]. Der bei den Maßnahmen des grundhaften Ausbaus und der Erhaltung von Asphaltstraßen anfallende Ausbauasphalt ist entsprechend dem Kreislaufwirtschaftsgesetz [2] zu verwerten. Dabei ist eine höchstmögliche Verwertung, die sogenannte Wiederverwendung, bei der „Erzeugnisse oder Bestandteile, die keine Abfälle sind, wieder für denselben Zweck verwendet werden, für den sie ursprünglich bestimmt waren“ [1], anzustreben. Die Wiederverwendung, also die Mitverwendung von Asphaltgranulat bei der Produktion von neuem Asphaltmischgut im Heißverfahren, wird seit dem Jahr 1978 in Deutschland praktiziert [3]. Infolge des technischen Fortschrittes war eine Steigerung der Wiederverwendungsrate des Ausbauasphaltes (Verhältnis wiederverwendeter/ angefallener Ausbauasphalt) von 40 % im Jahr 1987 auf 90 % in den Jahren 2013 bis 2015 möglich [4]. Seit vier Jahren ist jedoch ein Abwärtstrend der Wiederverwendungsrate zu erkennen. 2019 betrug die Wiederverwendungsrate nur noch 82 %. Bei den derzeitigen abnehmenden Entwicklungen, z.B. infolge zunehmender Bitumenalterung und der Veränderung der Gesteinskörnungeigenschaften aufgrund mehrfacher Wiederverwendungen von Asphaltgranulat, ist zukünftig mit einer deutlich geringeren Wiederverwendungsrate zu rechnen. Zudem ist zu berücksichtigen, dass eine Verbesserung der Wiederverwendungsquote von 82 % auf 100 % eine Steigerung der Wiederverwendung von rund. 2,5 Mio. Tonnen Ausbauasphalt bedeutet. Die wieder größer werdende Differenz zwischen angefallenem und wiederverwendetem Ausbaubausphalt trug in einigen Gebieten Deutschlands zum weiteren Anwachsen der Lagerhalden bei. Die Vergrößerung der Lagerhalden an Ausbauasphalt hat verschiedenste Gründe:

- Die maximale Zugabemenge an Asphaltgranulat wird einerseits beschränkt durch die technischen Möglichkeiten an der Asphaltmischanlage und andererseits durch die Regelungen in Vorschriften ([5], [6], [7]) bzw. Bauverträgen, die sich von Bundesland zu Bundesland bzw. von Bauvorhaben zu Bauvorhaben teilweise stark unterscheiden. Dies betrifft insbesondere die Asphaltdeck- und Asphaltbinderschicht stärker im Vergleich zur Asphalttragschicht. Gemäß ZTV Asphalt-StB 07/13 ist eine Zugabe der Asphaltgranulate im Splittmastixasphalt nicht zulässig. Dadurch kann der gewonnene Ausbauasphalt der Wiederverwendung nicht vollumfänglich zugänglich gemacht werden [8]. **Die wesentliche Ursache hierfür ist u.a. die Inhomogenität der Zusammensetzung des Asphaltgranulates, das gealterte Bitumen im Asphaltgranulat sowie die meist unbekanntesten Eigenschaften der Gesteinskörnungen.**
- Der sich seit einigen Jahren abzeichnende Trend des Vorranges von Erhaltungsmaßnahmen der Straßeninfrastruktur bewirkt, dass Ausbauasphalt überwiegend aus dem Bereich der Asphaltdecke anfällt. Dieser besteht aus der Asphaltdeckschicht und gegebenenfalls der Asphaltbinderschicht, und seine Wiederverwendung unterliegt entsprechend den zuvor genannten Beschränkungen. Erschwerend kommt die zunehmend fehlende Möglichkeit der Verwendung von Asphaltgranulat in Asphalttragschichten hinzu, die bei Maßnahmen der Baulichen Erhaltung lediglich eine untergeordnete Rolle spielen, [8]. So werden bei Bauprojekten im Zuge von Bundesfern- und Landesstraßen derzeit durchschnittlich ca. 25 bis 30 % Asphaltgranulat in Asphalttragschichten, ca. 20 bis 25 % in Asphaltbinderschichten und ca. 10 % in Asphaltdeckschichten zugegeben [9].
- Seit dem Beginn der Wiederverwendung von Asphaltgranulat wurden die anfallenden Ausbauasphalte bereits das dritte bis vierte Mal dem neu herzustellenden Asphaltmischgut hinzugefügt. Die im Asphalt verwendeten Bindemittel (Straßenbaubitumen und in verschiedenster Form durch Zusätze modifizierte Bitumen) unterliegen einerseits beim Herstellungs- und Einbauprozess des Asphaltmischgutes und andererseits während der Nutzungsdauer einer Straße einem Alterungsprozess, welcher zu einer Verhärtung bzw. Versprödung des Bindemittels führt [10]. Damit weisen die heutzutage anfallenden Ausbauasphalte **bereits** verhärtete Bindemittel auf, **was zu einer deutlichen Reduzierung der Lebensdauer führt.** Durch die Vorgaben des technischen Regel- und Vorschriftenwerks ([6], [7], [8], [11]) werden Beschränkungen der Zugabemengen von Asphaltgranulat erforderlich. Darüber hinaus wird in einigen Landesvorschriften, wie z.B. den Ausführungsvorschriften zu § 7 des Berliner Straßengesetzes über die Vorbereitung des Ausbaus von Asphaltsschichten im Straßenbau [12], die Wiederverwendung von Asphaltgranulat bei der Herstellung von Asphaltmischgut bei Nichteinhalten vorgegebener Grenzwerte der Eigenschaften des Bindemittels aus dem Asphaltgranulat sogar ausgeschlossen.

- Eine ggf. ungleichmäßige Zusammensetzung des Asphaltgranulates sowie Kornverfeinerungen während der konventionellen Aufbereitung von Asphaltgranulat mit dem Prallbrecher (Standardverfahren) in Kombination mit der Vorgabe des technischen Regel- und Vorschriftenwerks [11], dass die Zugabe von nur einem Asphaltgranulat bei der Herstellung von Asphaltmischgut möglich ist, führen zur Reduzierung der Zugabemenge.

Um die Wiederverwendungsraten von Asphaltgranulat bei der Herstellung von Asphaltmischgut zu steigern, wurden diverse technische Maßnahmen entwickelt (z.B. der Einsatz von Rejuvenatoren und die Zugabe von weichem Bitumen bzw. mehr als einem Asphaltgranulat mit unterschiedlichen Eigenschaften) und Anpassungen des Technischen Regelwerks vorbereitet [8]. Dennoch reichen einige der technischen Maßnahmen nicht aus, um eine Steigerung der Wiederverwendungsraten bewirken.

Das anfallende Asphaltgranulat sollte im Sinne des Kreislaufwirtschaftsgesetzes [2] nach Möglichkeit mit dem Ziel der Schonung von Ressourcen höchstwertig wiederverwendet werden. Zum Beispiel wie im Merkblatt für die Wiederverwendung von Asphalt [7] empfohlen wird, indem Asphaltgranulat aus Asphaltdeckschichten erneut bei der Herstellung einer Asphaltdeckschicht (Horizontalrecycling) verwendet wird. Eine alternative Verwertung darf daher nur zur Anwendung kommen, wenn aus asphaltechnologischen Gründen (z.B. zu starke Alterung des Bindemittels im Asphaltgranulat, Korngrößenverteilung des Asphaltgranulates) keine Wiederverwendung mehr möglich ist. Um den Verlust von wertvollen Ressourcen aus dem Asphaltgranulat möglichst gering zu halten, muss nach alternativen technisch sinnvollen Methoden wie z.B. eines nachhaltiges Aufbereitungsverfahrens von Asphaltgranulat gesucht werden, welche eine möglichst hohe Zugabemenge bei der Herstellung von Asphalt ermöglichen, ohne dabei Nachteile bezüglich Dauerhaftigkeit und Wirtschaftlichkeit der daraus hergestellten Asphaltbefestigungen hinnehmen zu müssen. Im Sinne des Kreislaufwirtschaftsgesetzes [2] muss dabei das Ziel sein, 100 % des Ausbauasphaltes für die Herstellung von Asphaltmischgut wiederzuverwenden.

2.1.2 Konzeption der Asphaltmischgutzusammensetzung mit Asphaltgranulat

Asphaltgranulat kann für die Herstellung von Asphaltmischgut entsprechend Abschnitt 3.1.1 der TL Asphalt-StB [11] verwendet werden, wenn folgende Voraussetzungen erfüllt sind:

- Einhaltung der für die einzelnen Asphaltmischgutsorten festgelegten Anforderungen,
- Berücksichtigung der maschinentechnischen Zugabemöglichkeiten an der Asphaltmischanlage,
- Erfüllung der Eignung (bezüglich Umweltverträglichkeit, Bindemittelleigenschaften, Eigenschaften der Gesteinskörnungen),

- obere Korngröße der im Asphaltgranulat enthaltenen Gesteinskörnungen darf nicht größer sein als die obere Korngröße des Asphaltmischgutes,
- für den Einsatzbereich ausreichende Gleichmäßigkeit.

Eine große Anzahl an Forschungsvorhaben (u.a. [13], [14], [15]) sowie die inzwischen jahrelangen Erfahrungen zeigen, dass Asphaltmischgut mit Zusatz von Asphaltgranulat bei entsprechender Sorgfalt in der Auswahl des Ausbauasphaltes [gemäß TL AG-StB \[6\]](#) und der neuen Baustoffe unter Berücksichtigung der o.g. Voraussetzungen einem Asphaltmischgut aus ausschließlich neuen Baustoffen gleichwertig sein kann.

In Deutschland ist bei der Optimierung der Zusammensetzung des Asphaltmischgutes (Mix-Design) für die Erstellung der Erstprüfung zu berücksichtigen, dass das Asphaltmischgut unter Verwendung von Asphaltgranulat alle Anforderungen der TL Asphalt-StB [11] erfüllen muss. Aus dem Grund kann beispielsweise der Erweichungspunkt Ring und Kugel ([EP RuK](#)) des Bindemittels aus dem Asphaltgranulat die maximal mögliche Zugabemenge begrenzen. Die TL Asphalt-StB [11] in der zurzeit vorliegenden gültigen Fassung geben vor, dass der [EP RuK](#) des resultierenden Bindemittels im Asphaltmischgut $T_{R\&Bmix}$, innerhalb der Sortenspanne des geforderten Bitumens liegen muss. $T_{R\&Bmix}$ wird rechnerisch über den [EP RuK](#) des aus dem Asphaltgranulat zurückgewonnenen Bitumens $T_{R\&B1}$ und den [EP RuK](#) des frisch zugegebenen Bitumens $T_{R\&B2}$ und deren zugehörige Anteile ermittelt. Inwiefern diese Herangehensweise am reinen Bitumen bei der inzwischen vorhandenen Prüftechnik (z.B. DSR - Dynamisches Scherrheometer) noch [sinnvoll](#) ist, muss im Vergleich zur realitätsnäheren Mörteluntersuchungen überprüft werden. Erste Ansätze liefern hier die Arbeiten von EICHLER [16], BÜCHNER et al. [17] und HUURMAN et al. [18], welche Untersuchungen an unterschiedlich zusammengesetzten Mastix- bzw. Mörtelphasen von Asphaltgemischen im DSR durchführten. [Anzumerken ist hier, dass die bisherigen Ansätze sich nur hauptsächlich auf eine Bitumeneigenschaft „Komplexer Schubmodul \$G^*\$ “ beziehen. Mit diesem Kennwert erhält man zwar eine Aussage, ob die Viskosität der zu vergleichenden Bitumen \(z.B. Frischbitumen und resultierendes Bitumen, zusammengesetzt aus dem Bitumen des Asphaltgranulates und Rejuvenatoren\) identisch ist, es fehlt jedoch die Kenntnis darüber, ob auch weitere wesentliche Bitumeneigenschaften, wie z. B. der Phasenwinkel \$\delta\$, vergleichbar sind.](#)

[Wie aus der dynamischen Werkstoffprüfung an Asphalt bekannt ist, stellt sich zwischen dem Maximum der Krafteinleitung und dem Maximum der Reaktion eine zeitliche Differenz \(die Phasenverschiebung, ausgedrückt durch den Phasenwinkel \$\delta\$ \) ein. Das Ausmaß der Phasenverschiebung ist abhängig von den äußeren \(Prüfkörpertemperatur, Belastungsfrequenz\) und von den baustoffspezifischen Rahmenbedingungen \(Größe der mobilisierbaren Verlustenergie\). Dabei gilt, je größer die mobilisierte Verlustenergie unter sonst gleichen](#)

äußeren Rahmenbedingungen ist, desto größer ist das Schädigungspotential des Bitumens. Beide Kenngrößen, Komplexer Schubmodul G^* und Phasenwinkel δ sind daher für die Rheologie des Bitumens von Bedeutung.

2.2 Wirtschaftliche Bedeutung der angestrebten Forschungsergebnisse für KMU

Dem seit ein paar Jahren anhaltenden Trend der Verringerung der Wiederverwendungsraten von Asphaltgranulat bei der Herstellung von Asphaltmischgut muss nicht nur entgegengewirkt werden, vielmehr ist die Wiederverwendungsquote auf nahezu 100 % zu steigern, da nur so natürliche Ressourcen geschont werden können. Demzufolge sollen innovative Methoden zur Erhöhung der Asphaltgranulatzugabemengen gefunden werden. Der Fokus muss dabei auf einer materialschonenden und für den jeweiligen Verwendungszweck gezielten Aufbereitung des Asphaltgranulats, z.B. Horizontalrecycling, liegen, damit eine Erhöhung der Zugabemengen (Verbesserung der Ressourceneffizienz und Reduzierung der CO₂ – Emission) sowie Verbesserung der Asphaltqualität (Gewährleistung dauerhafter Mobilität), insbesondere bei den Asphaltbinder- und Asphaltdeckschichten erreicht werden kann.

Die erfolgsversprechende Wirkungsweise von Rejuvenatoren wurde in einer Vielzahl von Forschungsvorhaben bestätigt (z.B. [18], [19], [10], [20]), jedoch fehlt bisher ein sicheres Design für das Bitumen bzw. den Mörtel (Bitumen und Anteil der Gesteinskörnungen $\leq 2^{\circ}$ mm) auf Basis von Performanceprüfungen, zum Beispiel mit dem dynamischen Scherrheometer (DSR). Wie bereits erwähnt, sind sowohl der Komplexe Schubmodul G^* als auch der Phasenwinkel δ für die Rheologie des Bitumens von Bedeutung. Es gilt zu klären, mit welchen Performance-Kennwerten am Bitumen bzw. den Mörtel sicher auf die Performance-Kennwerte des Asphaltes geschlossen werden kann, denn Untersuchungen mit dem DSR an Bitumen bzw. den Mörtel sind weniger zeit- und kostenintensiv als Untersuchungen am Asphalt. Sicher bedeutet in diesem Zusammenhang, dass das anzuwendende Verfahren des Mix-Designs sowohl für die im Straßenbau verwendeten Bitumen (Straßenbaubitumen und Polymermodifizierte Bitumen) als auch für die zum Größten Teil zum Einsatz kommenden Asphaltmischgüter gültig ist. Asphaltherstellern mit geringen finanziellen Mitteln für Forschung und Entwicklung, wie dies bei KMU der Fall ist, können die dafür erforderlichen umfangreichen Untersuchungen nicht leisten. Darüber hinaus ist anzumerken, dass die Bestimmung der physikalischen Eigenschaften der Gesteine aus dem konventionell aufbereiteten Asphaltgranulat (z.B. Schlagzertrümmerungswert, Frostbeständigkeit, Polierresistenz usw.) im Hinblick auf die Anforderungen der TL AG-StB [11] kaum möglich ist, da zu Einem die Gesteine nach herkömmlicher Aufbereitung mit dem Mörtel behaftet sind und zum anderen die erforderliche Gesteinskörnungsfraction ohne die Extraktionen nicht gewonnen werden kann. Dadurch werden die physikalischen Eigenschaften der

Gesteinskörnungen zurzeit nur subjektiv bestimmt. Eine mangelhafte Beurteilung der Gesteinsqualität kann bei einer höheren Zugabemenge der mehrfach rezyklierten Asphaltgranulate zu Schäden im Asphalt aufgrund der Beanspruchung durch Klima und Verkehr führen und die Lebensdauer erheblich beeinträchtigen.

Die Erhöhung der Zugabemenge an Asphaltgranulat im Asphaltmischgut bewirkt auch eine Preisreduzierung des Asphaltmischgutes und eine Reduzierung der Lagerkapazitäten für Asphaltgranulat. Das heißt, innovative und nachhaltige Aufbereitungstechnologien sowie ein geeignetes Prüfverfahren zum Qualitätsmanagement im Rahmen der Erstprüfung und werkseigenen Produktionskontrolle, mit denen der Zugabeanteil an Asphaltgranulat bzw. der Bestandteile des Ausbausphaltes erhöht werden kann, führen zur Einsparung von Kosten nicht nur für die Asphalthersteller, sondern sie leisten damit ebenso einen bedeutenden volkswirtschaftlichen Beitrag. Für die, im Rahmen dieses Forschungsvorhabens, beabsichtigten innovativen Technologien der Aufbereitung (z.B. [18], [21]) müssen den KMU Handlungshilfen bezüglich der Aufbereitungsmethode und des Qualitätsmanagements zur Verfügung gestellt werden. Auch derlei Handlungsanweisungen sollen im Rahmen des Forschungsvorhabens erarbeitet werden, damit die KMU sowohl bei kleinen als auch bei großen Baumaßnahmen dauerhaft wettbewerbsfähig sein können.

Schlussendlich sollten die erhaltenen Erkenntnisse des Forschungsprojektes Eingang in das deutsche Regelwerk des Straßenbaus mit dem Ziel der Gewährleistung der bauvertraglichen Sicherheit auf der Grundlage des Standes der Technik finden.

3. Wissenschaftlich-technischer Ansatz

3.1 Stand der Forschung und Entwicklung

3.1.1 Aufbereitungstechnologien von Asphaltgranulat

Die herkömmliche Aufbereitungstechnologie von Asphaltgranulat ist das Brechen und Granulieren des durch Fräsen oder Aufbrechen gewonnenen Ausbausphaltes. Bei diesem Verfahren schränken oftmals die Kornverfeinerung der Gesteinskörnungen durch den Aufbereitungsprozess und die Heterogenität in den Zusammensetzungen des aufbereiteten Materials die Zugabemenge ein. Sowohl die Kornverfeinerung als auch die Schwankungen der Korngrößenverteilung und der Bitumengehalte beeinträchtigen die Zugabemenge der Asphaltgranulate, wodurch das Gebrauchsverhalten der Asphaltes, insbesondere der Asphaltdeck- und Asphaltbinderschichten, so stark beeinflusst werden kann, dass deren Qualität und damit deren Nutzungsdauer signifikant schwanken bzw. abnehmen können. Darüber hinaus liegen keine wissenschaftlichen Erkenntnisse zur Veränderung der physikalischen Eigenschaften der Gesteine infolge der Mehrfachwiederverwendung des Asphaltgranulates vor.

Neben dem herkömmlichen Aufbereitungsverfahren von Asphaltgranulat kommen aktuell, insbesondere in den Niederlanden, einerseits die großindustrielle thermische Aufbereitung von Asphaltgranulat und andererseits die Aufspaltung des Asphaltgranulats in die bindemittelreiche Fraktion (Asphaltmörtel) und die bindemittelarme Fraktion (grobe Gesteinskörnungen) zur Anwendung.



Abbildung 1: Rotorschleuderbrecher für die Aufspaltung des Asphaltgranulats in die bindemittelreiche Fraktion und die bindemittelarme Fraktion [22]

Der Grundgedanke für die Entwicklung von thermischen Aufbereitungsanlagen in den Niederlanden war ursprünglich ein anderer. Einige Fahrbahnbefestigungen enthalten Bindemittel auf der Basis von Kohlenteerpech, welches als krebserregend eingestuft ist, da es hochgradig mit polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) und/oder mit Phenolen kontaminiert ist. Dieses Aufbereitungsverfahren soll im Forschungsprojekt daher nicht berücksichtigt werden.

Die Aufbereitungstechnologie der Aufspaltung des Asphaltgranulats in die bindemittelreiche Fraktion (Asphaltmörtel) und die bindemittelarme Fraktion wurde im Rahmen des Forschungsprojektes LE2AP ([18], [19]) von der [Tochtergesellschaft des größten Baukonzernes Royal BAM Group in den Niederlanden](#) „BAM Infra Asphalt“ entwickelt. Bei dieser Aufbereitung wird zunächst der Fräsasphalt in zwei Komponenten abgesiebt, den Anteil $\leq 2^\circ\text{mm}$ mit ca. 10 bis 15 M.-% Bindemittel (Asphaltmörtel) und den Anteil $\geq 2^\circ\text{mm}$. Dieser Granulatanteil $\geq 2^\circ\text{mm}$ wird in einen Rotorschleuderbrecher (siehe Abbildung 1) gegeben, **in dem** es mit hoher Geschwindigkeit gegen eine Stahlwand geschleudert wird. Durch den Aufprall auf die Stahlwand des Rotorschleuderbrechers und durch den Kontakt der Granulatfragmente untereinander wird der noch in dieser Fraktion vorhandene bindemittelreiche Mörtelanteil abgetrennt, so dass schlussendlich der groben Gesteinskörnung nur noch ca. 1 M.-% Bindemittel anhaftet. Dieses „Restbindemittel“ kann sich bei der Herstellung von Asphaltmischgut positiv auswirken, da es als eine Art „Grundierung“ das neue Bindemittel leichter mit den Gesteinskörnungen verbindet. Nach der Aufbereitung liegt das Asphaltgranulat also in unterschiedlichen Fraktionen vor. Die Gesteinskörnungen können durch Absieben wiederum in weitere Fraktionen aufgeteilt werden. Da auf den groben Gesteinskörnungen kaum noch Bitumen vorhanden ist, können sie über die Weißtrommel

aufgegeben und bis zu 100°M.-% bei der Asphaltmischgutherstellung wiederverwendet werden. Der Asphaltmörtel kann, wie bisher auch, entweder kalt im Mischer oder mit **der** heißen Gesteinskörnungen zugegeben werden. Eine Paralleltrommel ist somit nicht erforderlich, um mehr als 40°M.-% Asphaltgranulat zugeben zu können. Bei einer Zugabemenge von 30°M.-% des Asphaltmörtels kann die Zugabe von Frischbitumen um bis zu 90°% reduziert werden. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, dieses Material mit Verjüngungsmittel zu behandeln, als Granulat bzw. als Briketts herzustellen und zielgerecht bei der Asphaltmischgutherstellung zuzugeben [23].

Abbildung 2 zeigt das Ergebnis des beschriebenen Aufbereitungsprozesses. Bisher wurden mit diesem Aufbereitungsverfahren erste Erfahrungen bei der Wiederverwendung von Asphaltgranulat aus offenporigem Asphalt (PA) und Splittmastixasphalt (SMA) **gesammelt** ([18], [19], [21] und [22]).



Abbildung 2: bindemittelreiche Fraktion (links) und die bindemittelarme Fraktion (rechts) des in dem Rotorschleuderbrecher bearbeiteten Asphaltgranulates [18]

Das Aufbereitungsverfahren mit dem Rotorschleuderbrecher wurde maßgeblich vom Großkonzern „BAM Infra Asphalt“ entwickelt. Daher stehen bisher keine wissenschaftlich begleitenden Untersuchungen bzw. kein Forschungsbericht zur Verfügung. Ob die Form der Aufbereitungstechnologie Einfluss auf die wesentlichen Gebrauchseigenschaften von Asphalt ausübt, wie beispielsweise die Steifigkeit und den Widerstand gegen Kälte, Ermüdungsrisse sowie die Spurrinnenbildung, ist unbekannt bzw. steht nicht öffentlich zur Verfügung. Außerdem wurden bisher keine wissenschaftlich begleitenden Untersuchungen zum Einfluss der Aufbereitungstechnologie von Asphaltgranulat auf die Prognose der Spurrinnenbildung sowie der Ermüdungsrissbildung innerhalb der Asphaltdeckschicht sowie der Asphaltbinderschicht durchgeführt, da diese Prognoseverfahren erst in der Entwicklung sind [39]. Diese Prognoseverfahren sind jedoch unmittelbare Voraussetzung für eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung in Form von Lebenszykluskosten [43]. Birbaum [43] untersuchte in seiner Arbeit zwar den Einfluss unterschiedlich zusammengesetzter Asphalt auf die Lebenszykluskosten einer Straße, jedoch bestanden die Asphaltgemische nur aus ungebrauchten Baustoffen. Unterschiedliche Aufbereitungsverfahren von Asphaltgranulat wurden in dieser und anderen Forschungsarbeiten bisher nicht untersucht. Da heute kaum noch

Asphaltbetone ohne Asphaltgranulat hergestellt werden, sind die Erkenntnisse auf Basis frischer Baustoffe gewonnen wurden, nicht realistisch und ohne systematische Vergleichsuntersuchung nicht übertragbar.

Bei der Herstellung von Asphaltmischgut ist sowohl die Qualität des verwendeten Bitumens als auch die Qualität der eingesetzten Gesteinskörnungen für die Performance des Asphaltes von Bedeutung. Hierfür gibt es strenge Vorgaben im technischen Regel- und Vorschriftenwerk (wie zum Beispiel [11]). Damit gilt selbiges für die Verwendung von Asphaltgranulat [6]. Die Kenntnis eventuell vorhandener Unterschiede der Eigenschaften rezyklierter Gesteinskörnungen, welche durch unterschiedliche Aufbereitungsverfahren von Ausbaupasphalt gewonnen werden, ist ebenfalls relevant. Darüber hinaus muss der Einfluss dieser Gesteinskörnung auf die Gebrauchseigenschaften daraus hergestellter Asphaltgemische sowie die Dauerhaftigkeit dieser Asphaltbefestigungen bekannt sein.

3.1.2 Mix Design bei Verwendung von rezyklierten Asphaltgranulat

Das LE2AP-Projekt hatte zum Ziel, qualitativ hochwertige Asphaltmischungen bei Verwendung von rezyklierten Asphaltgranulat herzustellen, die in Bezug auf ihre Performance denen aus frisch produzierten ungebrauchten Baustoffen mindestens gleichwertig sind [18]. Daher wurde in LE2AP der Ansatz der Gleichheit der wesentlichen Gebrauchseigenschaften auf den drei Maßstabsebenen verfolgt:

- Bitumen-Ebene: Skala der Moleküle,
- Mörtel-Ebene: Skala des Bitumens und der kleinen Partikel < 2 mm,
- Asphalt-Ebene: Skala der gesamten Mischung < 22 mm

Der erste Schritt zur Erreichung des LE2AP-Ziels bestand darin, sicherzustellen, dass das Bitumen des produzierten LE2AP-Asphaltmörtels aus rezyklierten Asphaltgranulat (LE2AP-Mörtel) die gleiche Qualität hat wie frisches ungebrauchtes Bitumen [18]. Dafür wurde ein sog. „Bitumen-Design-Verfahren“ auf der Basis von Nadelpenetration-Werten angewendet. Mit diesem Verfahren konnte einerseits die Bitumenqualität durch Kontrolle der Leistungsfähigkeit des zugegebenen frischen Bindemittels und Verjüngungsmittels gewährleistet werden, andererseits wurde die Bitumen-Design-Methode auch zur Kontrolle des Bitumengehalts des Mörtels angewendet.

Unabhängig von der Menge an frischen Materialien, die dem zu konzipierenden Asphaltmörtel zugesetzt wurden, konnte mit dem entwickelten Verfahren die Nadelpenetration sehr genau ($\pm 10 \text{ 1/10 mm}$) berechnet werden (siehe Abbildung 3). Darüber hinaus konzentrierte sich die Forschung darauf, eine Mörtel-Design-Methode zu entwickeln, anhand derer die Leistungsfähigkeit des Mörtels abgeschätzt werden sollte.

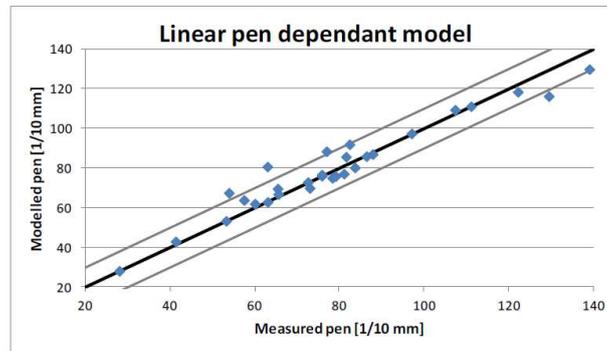


Abbildung 3: Das Bitumen-Designverfahren prognostiziert die Nadelpenetration mit einer Genauigkeit von ± 10 1/10 mm [18]

Bei dem Verfahren des Mörtel-Design wurde von HUURMAN et al. [18] die Steifigkeit (Schubmodul G^*) von frisch hergestellten LE2AP-Mörteln in Bezug auf die Steifigkeit eines frisch hergestellten Mörtels, welcher nur aus ungebrauchten Bestandteilen zusammengesetzt war, abgeleitet. Als Bitumen kamen ausschließlich Straßenbaubitumen zum Einsatz. Die Steifigkeit der Asphaltmörtel wurde im DSR an Probekörpern mit einem Durchmesser von 6 mm und einer Höhe von 20 mm im Temperaturbereich zwischen 10 °C und 40 °C bei verschiedenen Frequenzen bestimmt. Die Ergebnisse (Masterkurven) sind in Abbildung 4 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der Unterschied zwischen den verschiedenen LE2AP-Mörtel, vernachlässigbar ist. Lediglich der Asphaltmörtel, dessen Herstellung nur aus „frischen“ ungebrauchten Bestandteilen (Frisch-Mörtel) erfolgte, wies bei niedrigen Frequenzen einen etwas niedrigeren Schubmodul G^* (fresh G^*) und einen etwas höheren Phasenwinkel δ auf (fresh δ^*) als die LE2AP-Mörtel. Inwiefern die festgestellten Erkenntnisse ebenso für Asphaltmörtel mit „frischen“ ungebrauchten polymermodifizierten Bitumen (PmB) und Baustoffen und rezyklierten PmB und Baustoffen aus Asphaltgranulat gültig sind, wurde nicht untersucht bzw. sind der Öffentlichkeit nicht zugänglich.

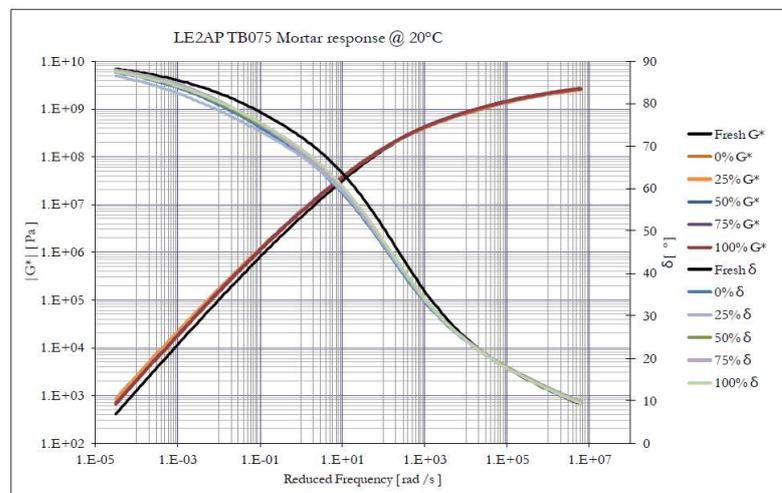


Abbildung 4: Steifigkeit von frisch hergestellten LE2AP-Mörtel in Bezug auf die Steifigkeit von frisch hergestellten Mörtel, welcher nur aus ungebrauchten Bestandteilen zusammengesetzt war [18]

Gemäß der LE2AP-These (Streben nach Äquivalenz auf der Ebene von Bitumen, Mörtel und Asphaltmischgut) führten diese Ergebnisse zu der Schlussfolgerung, dass eine Asphaltmischung, die sog. LE2AP-Mörtel und rezyklierten Gesteinskörnungen aus Asphaltgranulat enthält, Eigenschaften haben sollte, die mindestens denen eines Asphaltgemisches, welches nur aus „frischen“ ungebrauchten Baustoffen besteht, entsprechen. Voraussetzung dafür ist jedoch, dass die Zusammensetzung der beiden Asphaltmischungen bezüglich der Gesteinskörnungen $>2^{\circ}\text{mm}$ und des Mörtels gleich sind. An offenporigen Asphalt (PA), der einen Recyclinganteil aus Asphaltgranulat von 93°M.-% enthielt konnte von HUURMAN et al. [18] den Widerstand gegen Griffigkeitsverlust nachgewiesen werden. Hierzu wurden ungealterte und gealterte Asphaltplatten aus PA hergestellt und zuerst im Aachener Ravelling Test (ARTe) geprüft. Bei diesem Versuch erfolgt die Aufbringung der Reibung über einen vollwertigen Reifen auf die Asphaltplatten. Im Ergebnis wurde die Bitumenbeschichtung der Oberflächensteine abgetragen und die Oberfläche der Testplatten poliert. Mit Hilfe des Skid Resistance Tester (SRT) konnte danach die Griffigkeit der Testplatten gemessen werden, welche zwischen den einzelnen Varianten vergleichbar war. QUI et al. [19] bestätigten die LE2AP-These anhand von Untersuchungen an Splittmastixasphalt. Beide Forschungen ([18], [19]) überprüften nur die Eigenschaften „Griffigkeit“. Weitere wesentliche Gebrauchseigenschaften von Asphalt wurden nicht bestimmt. Folgende wesentliche Gebrauchseigenschaften können aber im Labor zur Beurteilung des Gebrauchs- bzw. Performanceverhaltens von Asphalt und zur Bestimmung der Lebensdauer von Verkehrsflächen mit Asphaltdeckschichten ([34], [39]) ermittelt werden: Verdichtbarkeit, Widerstand gegen Rissbildung bei Kälte, Steifigkeit, Widerstand gegen Rissbildung infolge Ermüdung und Widerstand gegen bleibende Verformung [24]. Diese Performanceeigenschaften wurden allerdings bei den Untersuchungen zur Aufbereitung des Ausbausphaltes im Rotorschleuderbrecher ([18], [19] und [21]) nicht ermittelt bzw. stehen für die Öffentlichkeit nicht zur Verfügung.

Ein Zusammenhang zwischen den Gebrauchseigenschaften der Mastixebene (Bitumen und Füller) und den Gebrauchseigenschaften der Asphaltebene liefern BÜCHNER et al. [17]. Beispielhaft sind die Ergebnisse für den Widerstand gegen Kälte in Abbildung 5 und den Widerstand gegen Ermüdung in Abbildung 6 dargestellt. In den Abbildungen sind stets die Ergebnisse der Asphaltprüfungen in Abhängigkeit von den Ergebnissen der Asphaltmastixprüfungen im DSR zu sehen. Beide Abbildungen zeigen einen signifikanten Zusammenhang zwischen den jeweiligen Kennwerten. Die Untersuchungen sind jedoch an Asphaltmastix und Asphaltmischgut durchgeführt wurden, welche ausschließlich aus ungebrauchten Bitumen und Gesteinskörnungen hergestellt wurden. Ob diese Zusammenhänge zwischen den Performanceeigenschaften der Mastix- bzw. Mörtelenebene und denen der

Asphaltebene unter Verwendung von Asphaltgranulaten genauso gültig sind, ist nicht bekannt und wäre zu überprüfen.

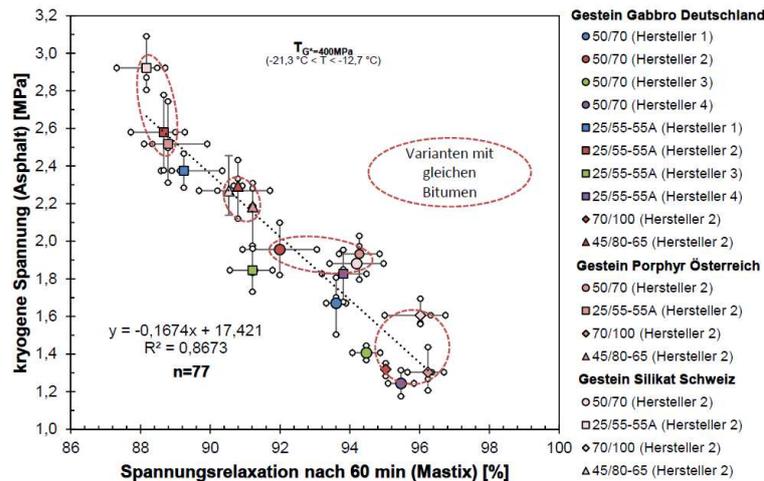


Abbildung 5: Korrelation von Asphaltmastix- und Asphaltvarianten: Kryogene Spannung von Asphalt und Spannungsrelaxation nach 60 Minuten von Asphaltmastix [17]

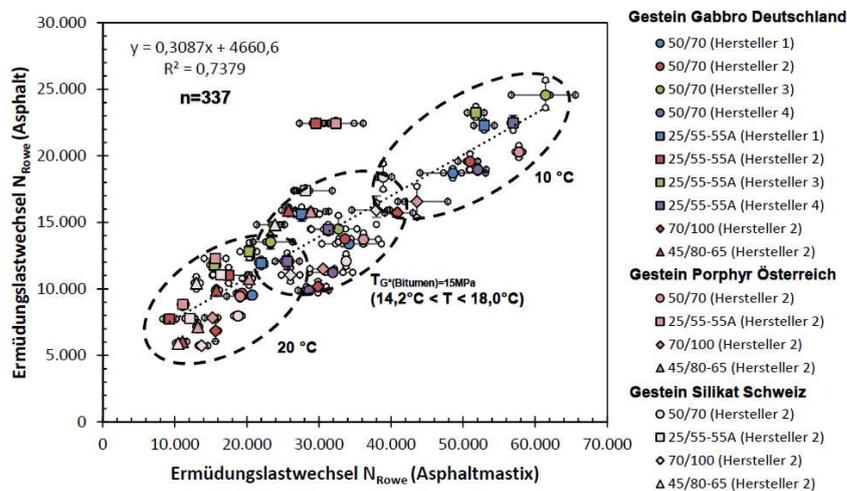


Abbildung 6: Korrelation von Asphaltmastix- und Asphaltvarianten: Ermüdungslastwechsel N_{ROWE} von Asphalt aus Zug-Druck-Wechselast-Versuchen und Ermüdungslastwechsel N_{ROWE} von Asphaltmastix aus Ermüdungsprüfungen [17]

3.2 Arbeitshypothese

Das beantragte Forschungsprojekt soll Erkenntnisse über die Anwendung folgender Aufbereitungsverfahren von Asphaltgranulat bei der Herstellung von Asphaltmischgut bringen:

- **Standardverfahren:** Brechen bzw. Granulieren → Aufbereitungsverfahren 1
- Aufspaltung in die bindemittelreiche Fraktion und die bindemittelarme Fraktion → Aufbereitungsverfahren 2

Im Einzelnen sollen folgende Fragestellungen beantwortet werden:

1. Welchen Einfluss haben die unterschiedlich aufbereiteten Asphaltgranulate auf die **Gesteinskörnungseigenschaften** bzw. Gebrauchseigenschaften (**Verdichtungsverhalten, Ermüdungsrisse, Tieftemperaturverhalten und Spurinnenbildung**) des daraus hergestellten Asphaltmischgutes?

2. Können die Erkenntnisse von HUURMAN et al. [18] und QUI et al. [19] von PA- und SMA-Mischgütern auf andere Bitumensorten und Asphaltarten und -sorten übertragen werden? Kann ggf. bereits für das Bitumen-Design-Verfahren das DSR verwendet werden? **Wenn ja, welche Kennwerte am Bitumen- bzw. Asphaltmörtel sind relevant?**

Können die von BÜCHLER et al. [17] festgestellten Zusammenhänge zwischen den wesentlichen Gebrauchseigenschaften des Asphaltmastix und denen des Asphaltmischgutes für den Vergleich der Asphaltmörtelebene/Asphaltebene auch unter Verwendung von Asphaltgranulat bestätigt werden?

Falls ja, welche Arbeitsschritte sind bei einem Mörtel-Design-Verfahren erforderlich?

3. Welchen Einfluss haben die unterschiedlich aufbereiteten Asphaltgranulate auf die Nutzungsdauer, die Spurrinnenbildung sowie die Ermüdungsrisssbildung innerhalb der Asphaltdecke?
4. Welchen Einfluss haben die unterschiedlich aufbereiteten Asphaltgranulate auf die Wirtschaftlichkeit von daraus hergestellten Asphaltbefestigungen **sowohl für den Asphaltmischguthersteller als auch auf die Lebenszykluskosten von Straßen?**
5. **Können die im Labormaßstab erlangten Erkenntnisse im großmaßstäblichen Versuch an der Misanlage durch den Bau einer Versuchsstrecke bestätigt werden?**

Die Untersuchungen erfolgen an Asphalttrag-, Asphaltbinder- und Asphaltdeckschichtmischgut. Dabei ist der Fokus jeweils auf eine höchstmögliche Wiederverwendungsrate des Asphaltgranulates im Asphaltmischgut zu legen, mit dem Ziel natürliche Ressourcen zu schonen. Dies kann die Zugabe von Rejuvenatoren (Verjüngungsmittel) erfordern. Durch den Einsatz von Rejuvenatoren kann die Alterung des im Asphaltgranulat befindlichen Bitumens aufgehalten bzw. ganz oder teilweise rückgängig gemacht werden. Im Idealfall kann das Bitumen im Asphaltgranulat wieder in seinen rheologischen Ausgangszustand versetzt werden ([10], [20]). Im vorgeschlagenen Forschungsvorhaben soll im Rahmen des Bitumen-Design-Verfahrens (siehe Fragestellung -1) geklärt werden, ob bei den Asphaltmischungen mit Asphaltgranulat die Zugabe eines Rejuvenators notwendig ist und falls ja, in welcher Menge dieser der jeweiligen Asphaltmischung zu zufügen ist, **um die Referenzwerte der Mörtel­eigenschaften zu erreichen.**

4. Lösungsweg

4.1 Bearbeitungsschritte und Personaleinsatz

Für die Bearbeitung des Forschungsvorhabens sind 8 Arbeitspakete vorgesehen. Eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Arbeitspakete erfolgt in den nächsten Abschnitten.

4.1.1 Arbeitspaket A: Vorbereitende Maßnahmen

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes ist die Auswahl und Beschaffung sowie Aufbereitung der für die Laboruntersuchungen notwendigen Baustoffe (Gesteinskörnungen, Bitumen, Asphaltgranulat, Rejuvenator) vorgesehen. Die Auswahl erfolgt in Abstimmung mit dem projektbegleitenden Ausschuss. Es ist von jedem Baustoff für den Zeitraum des Projektes eine ausreichende Menge zu beschaffen und entsprechend vorzuhalten. Die Gesteinskörnungen und Asphaltgranulate werden zuerst homogen aufgeteilt und anschließend die Sieblinie bestimmt. Es wird insgesamt ca. 5 t Material benötigt, um die Prüfkörper für die Laboruntersuchungen in ausreichenden Mengen herzustellen.

Um dem Ziel einer höchstmöglichen Wiederverwendung gerecht zu werden, ist je Asphaltdeckschicht ein horizontales Recycling anzustreben (Stichwort: Asphaltdeckschichtgranulat soll als Asphaltdeckschicht wiedereingebaut werden). Die Untersuchungen sind an Asphaltgranulat möglichst aus einem Splittmastixasphalt und je einem Asphaltbeton aus einer Asphaltdeckschicht, einer Asphaltbinderschicht und einer Asphalttragschicht (entspricht vier Asphaltgranulaten) durchzuführen. Jedes Asphaltgranulat ist sowohl nach dem Aufbereitungsverfahren 1 als auch nach dem Aufbereitungsverfahren 2 für die Untersuchungen aufzubereiten. Die entsprechend für die Prüfungen erforderliche Menge ist dafür zu einer entsprechenden Aufbereitungsanlage zu transportieren, Vorort aufzubereiten und danach an die Forschungsstellen zu bringen.

Alle verwendeten Baustoffe sind hinsichtlich für das Forschungsvorhaben maßgebender Kennwerte/Eigenschaften, welche in Tabelle 1 dargestellt sind, zu charakterisieren. **Dazu wird u.a. eine Klassifizierung der unterschiedlich aufbereiteten Asphaltgranulate vorgenommen. Darüber hinaus werden die Untersuchung diverser Gesteinseigenschaften gemäß TL AG-StB [4] durchgeführt. Dies dient erstens der Überprüfung des Einflusses der Aufbereitung der Ausbauasphalte auf die Performanceeigenschaften der Asphaltgemische. Zweitens wird damit untersucht, ob durch die Wiederverwendung von Ausbauasphalt Auswirkungen auf die Gesteinseigenschaften erkennbar sind.**

Es werden Asphaltdeck-, Asphaltbinder- und Asphalttragschichtmaterialien geprüft. Die jeweiligen Asphaltarten und -sorten sowie Bindemittelsorten werden im projektbegleitenden Ausschuss festgelegt. Je Asphaltart und -sorte erfolgt die Untersuchung der in Tabelle 2 dargestellten Varianten. Als Vergleich dienen Asphaltgemische (**Referenz**), welche ohne Asphaltgranulat, also nur mit ungebrauchten Baustoffen hergestellt werden. Es ergeben sich somit **12+4** Asphaltvarianten. Für die **Referenz**varianten und für die Varianten mit den Asphaltgranulaten, die herkömmlich aufbereitet werden, werden die Erstprüfungen gemäß TL Asphalt-StB 07/13 durchgeführt (siehe Arbeitspaket B). Die Asphaltmischgüter der Varianten mit dem Asphaltgranulat, das mit dem Aufbereitungsverfahren 2 gewonnen wird, werden

identisch zu den Varianten mit den Asphaltgranulaten aus dem Aufbereitungsverfahren 1 zusammengesetzt.

Tabelle 1: Zu bestimmende Kennwerte bzw. Eigenschaften der Baustoffe

Baustoff	Kennwert
Asphaltgranulat	Bindemittelgehalt, Korngrößenverteilung, Erweichungspunkt Ring- und Kugel (Gleichmäßigkeit)
	Rohdichte
	Klassifizierung nach TL AG-StB
	Masterkurve mit dem DSR am zurückgewonnenen Bindemittel
Lieferkörnungen Gesteinskörnungen ¹⁾	Korngrößenverteilung
	Rohdichte
Bindemittel ¹⁾	Erweichungspunkt Ring- und Kugel
	Nadelpenetration
	Masterkurve mit dem DSR
Rejuvenator	Erweichungspunkt Ring- und Kugel
	Nadelpenetration
	Masterkurve mit dem DSR

¹⁾ Weitere Kennwerte über Leistungserklärung des Herstellers

Tabelle 2: Überblick Asphaltvarianten

Asphaltart	Asphaltgranulat	Aufbereitungsverfahren	Variante-Nr.
Splittmastixasphalt SMA	RA SMA	AV1	V01
		AV2	V02
	- *	-	V03
Asphaltbetondeckschicht AC D S	RA AC D	AV1	V04
		AV2	V05
	- *	-	V06
Asphaltbetonbinderschicht AC B	RA AC B	AV1	V07
		AV2	V08
	- *	-	V09
Asphaltbetontragschicht AC T	RA AC T	AV1	V10
		AV2	V11
	- *	-	V12

* - = M.-% Zugabe Asphaltgranulat

Ziele des Arbeitspaketes A: Beschaffung, Charakterisierung der Baustoffe und Gleichmäßigkeit des Asphaltgranulates über die gesamte Zeit des Forschungsprojektes

Personaleinsatz Forschungsstelle 1: 1,25 Monate wissenschaftlicher Mitarbeiter/-in, 8,9 Monate Baustoffprüfer/-in

Personaleinsatz Forschungsstelle 2: 0,8 Monate wissenschaftlicher Mitarbeiter/-in, 0,75 Monate Baustoffprüfer/-in, 0,75 Monate studentische Hilfskraft (40h pro Woche)

Zeitdauer: 11,0 Monate

4.1.2 Arbeitspaket B: Mix-Design

Im Arbeitspaket B ist das Design der zu untersuchenden Asphaltvarianten vorgesehen. Ausgehend von der im Arbeitspaket A durchgeführten Charakterisierung der Baustoffe ist die

Zugabemenge der einzelnen Baustoffkomponenten (Asphaltgranulat, Zugabebindemittel, evtl. Rejuvenatoren und Gesteinskörnungen) festzulegen. Das Mix-Design erfolgt dabei auf drei Ebenen: Der Bitumenebene, der Mörtelenebene und der Asphalteebene. Ziel dieses Mix-Designs ist, dass die Asphaltmischgutvarianten mit Asphaltgranulat Gebrauchseigenschaften haben sollten, die mindestens denen [der jeweiligen](#) entsprechen. Voraussetzung dafür ist, dass die Zusammensetzung der zu vergleichenden Asphaltmischgutvarianten bezüglich des Bitumens, des Mörtels (Bitumen und Anteile Gesteinskörnungen $\leq 2\text{ mm}$) und der Gesteinskörnungen $> 2\text{ mm}$ gleich sind.

Auf der Bitumenebene wird gemäß der zurzeit vorliegenden gültigen Fassung der TL Asphalt-StB [11] der [EP RuK](#) $T_{R\&Bmix}$ des resultierenden Bindemittels im Asphaltmischgut aus den [EP RuK](#) des zum Einsatz kommenden Asphaltgranulates und des Zugabebindemittels sowie deren jeweilige Mengenanteile berechnet. [Zusätzlich wird auch die Nadelpenetration ermittelt und mit den Erkenntnissen aus den Niederlanden verglichen.](#) Im Rahmen des Forschungsvorhabens soll überprüft werden, ob auf der Basis von Ergebnissen aus Versuchen mit dem DSR (z.B. Masterkurve, Äquisteifigkeitstemperatur, Black-Diagramm, [Speichermodul \$G'\$](#) , [der Verlustmodul \$G''\$](#) , [der relative Speichermodul rel. \$G'\$](#) , [der Cross-Over-Index](#)) ein Mix-Design auf der Bitumenebene möglich ist.

Auf der Mörtelenebene erfolgt bisher in Deutschland kein Mix-Design. Beim Mörtel-Designverfahren werden Mörtelvarianten hergestellt, welche aus dem Mörtel des Asphaltgranulates und ggf. aus frisch hinzugegebenen Bestandteilen bestehen. Diese Varianten sollen mindestens gleiche Gebrauchseigenschaften aufweisen wie die Mörtelvariante (je Asphaltmischgutsorte), welche aus ungebrauchtem Bindemittel und ungebrauchten Gesteinskörnungen hergestellt werden. Als Ergebnis erhält man eine Masterkurve [des Komplexen Schubmoduls \$G^*\$ sowie des Phasenwinkels \$\delta\$](#) , das sog. [Black-Diagramm](#) je Mörtelvariante. An den Mörtelvarianten, welche zur Herstellung der Asphaltvarianten verwendet werden, erfolgen die nachfolgend aufgeführten weiteren Versuche mit dem Dynamischen Scherrheometer:

- Scher-Relaxationsversuch anhand erster Forschungsergebnisse von Büchner et al. [17] für die Beurteilung der Kälteeigenschaften
 - Ermüdungsversuche anhand erster Forschungsergebnisse von Büchner et al. [17], Hurman et al. [18] und Wellner et al. [25] für die Beurteilung des Ermüdungsverhaltens
 - Kriechprüfung gemäß Büchner et al. [17] für die Beurteilung des Verformungsverhaltens
- Diese Prüfungen sind erforderlich, um herauszufinden, ob auf einen Zusammenhang zwischen dem Gebrauchsverhalten des Mörtels, bestehend aus dem Mörtel von Asphaltgranulat und frischen Bestandteilen, und dem Gebrauchsverhalten am Asphaltmischgut, welches aus Asphaltgranulat und ungebrauchten Zutaten besteht (siehe Arbeitspaket C), geschlossen

werden kann. Der Grund dafür ist, dass Prüfungen am Asphaltmörtel (ca. 3 Wochen) weitaus weniger aufwendig sind als Prüfungen am Asphaltmischgut (ca. 8 Wochen). Man könnte so den Prüfaufwand im Rahmen der Erstellung einer Asphaltrezeptur (Erstprüfung) erheblich reduzieren (Kosten- und Zeitfaktor).

Auf der Asphalzebene erfolgt in Deutschland derzeit die Erstellung der Rezeptur nach dem „Merkblatt für die Konzeption und die Erstprüfung von Asphaltmischgut für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen“ [26]. Unter Anwendung dieses Regelwerkes sowie der Berücksichtigung der Erkenntnisse aus dem Bitumen- und Mörteldesign werden die Zusammensetzungen der zu untersuchenden Asphaltvarianten, welche möglichst identisch sein sollen, festgelegt.

Ziele des Arbeitspaketes B: Entwicklung eines Mix Designs und Prüfungsverfahrens auf der Bitumenebene und ggf. auf der Asphaltmörtelzebene mit dem DSR bei Verwendung von Asphaltgranulat zur Herstellung von Asphaltmischgut im Vergleich zur konventionellen Methode nach o. g. Merkblatt [26] und Festlegung der Zusammensetzungen der Asphaltvarianten.

Personaleinsatz Forschungsstelle 1: 5,5 Monate wissenschaftlicher Mitarbeiter/-in, 2 Monate studentische Hilfskraft (43 h pro Monat)

Zeitdauer: 10,0 Monate

4.1.3 Arbeitspaket C: Herstellung Asphaltmischgut und Probekörper

Das Asphaltmischgut für die erforderlichen Probekörper des Arbeitspaketes D wird im Labor hergestellt, da nur so unvorhersehbare Schwankungen aus der großtechnischen Asphaltproduktion ausgeschlossen werden können. Einflüsse in der Zusammensetzung des Asphaltmischgutes (Korngrößenverteilung, Bindemittelgehalt) können sich erheblich auf seine Gebrauchseigenschaften auswirken [26]. Unmittelbar nach der Produktion des Asphaltmischgutes erfolgt die Herstellung von Asphaltplatten, aus denen die Probekörper entsprechend den erforderlichen Abmessungen herausgebohrt bzw. gesägt und planparallel geschliffen werden. Ein weiterer vorbereitender Schritt für das Arbeitspaket D ist die Bestimmung der Raumdichte nach TP Asphalt-StB Teil 6 [27] und der Abmessungen der Probekörper nach TP Asphalt-StB Teil 29 [28].

Ziele des Arbeitspaketes C: Herstellung Asphaltmischgut und der erforderlichen Probekörper für das Arbeitspaket D

Personaleinsatz Forschungsstelle 1: 0,4 Monate Baustoffprüfer/-in

Personaleinsatz Forschungsstelle 2: 4,25 Monate Baustoffprüfer/-in, 8,0 Monate studentische Hilfskraft

Zeitdauer: 17,0 Monate

4.1.4 Arbeitspaket D: Bestimmung der Gebrauchseigenschaften Asphaltmischgut

In diesem Arbeitspaket gilt es folgendes zu überprüfen:

Einfluss der Verwendung von Asphaltgranulaten unter Einsatz unterschiedlicher Aufbereitungsverfahren im Vergleich zu **Referenzvariante auf das Gebrauchsverhalten von Asphaltmischgut**.

Es soll ermittelt werden, ob ein Zusammenhang zwischen dem Gebrauchsverhalten des Mörtels im Asphalt (siehe Arbeitspaket B) bei Verwendung von Asphaltgranulat **und dem** Gebrauchsverhalten des aus selbigem Mörtel hergestellten Asphaltmischgutes **existiert**.

Dazu werden folgende Prüfverfahren für Walzasphaltmischgut durchgeführt:

- Bestimmung des Verdichtungsverhaltens: Bestimmung des Construction Energy Index CEI mittels Herstellung von Gyrator-Probekörpern (alle Asphaltvarianten) gemäß DIN EN 12697-31 [29]
- Steifigkeitsverhalten: Bestimmung der Masterkurve mit dem Spaltzug-Schwellversuch (alle Asphaltvarianten) gemäß TP Asphalt-StB, Teil 26 [30]
- Ermüdungsverhalten: Bestimmung der Ermüdungsfunktionen mit dem Spaltzug-Schwellversuch (alle Asphaltvarianten) gemäß TP Asphalt-StB, Teil 24 [31]
- Widerstand gegen bleibende Verformung: Bestimmung der Impulskriechkurven mit dem einaxialen Druckschwellversuch am schlanken Probekörper unter 3-facher Variation der Temperatur und Oberspannung (Asphaltdeck- und Asphaltbinderschichtvarianten) gemäß dem Entwurf AL DSV am schlanken PK [32]
- Tieftemperaturverhalten: Durchführung von Abkühlversuchen und einaxialen Zugversuchen (bei 4 Temperaturen) (alle Asphaltvarianten) gemäß TP Asphalt-StB, Teil 46 A [33]

Anhand der untersuchten Stichproben sind, falls möglich, Tests auf Normalverteilung, Gleichheit der Varianzen, regressions- und varianzanalytische Verfahren durchzuführen, um die Einflüsse der Variation der Aufbereitungsverfahren von Asphaltgranulat in ihren Wirkungen auf das Gebrauchsverhalten (Bitumen, Mörtel, Asphalt) überprüfen zu können.

Ziele des Arbeitspaketes: Wissenschaftliche Erkenntnisse zum Einfluss der Aufbereitungsverfahren von Asphaltgranulat bei höchstmöglichen Zugabeanteilen, wissenschaftliche Erkenntnisse zwischen den Gebrauchseigenschaften von Asphaltmörtel **bei Verwendung von Asphaltgranulat** und den Gebrauchseigenschaften von Asphalt bei Verwendung von Asphaltgranulat.

Personaleinsatz Forschungsstelle 2: 11,5 Monate Baustoffprüfer/-in

Zeitdauer: 16,0 Monate

4.1.5 Arbeitspaket E: Prognoserechnungen Nutzungsdauer, Spurrinnenbildung sowie der Ermüdungsrisssbildung innerhalb der Asphaltdecke

Mit den Versuchsergebnissen aus dem Arbeitspaket D sollen Prognoserechnungen durchgeführt werden, um die Auswirkungen der Variation der Aufbereitungsverfahren von Asphaltgranulat auf Erhaltungs-/Erneuerungsintervalle (Arbeitspaket E) verdeutlichen zu können.

Die Prognoserechnungen beinhalten nicht nur die Nachweisführung der Ermüdung der Asphaltbefestigung an der Unterseite der Asphalttragschicht gemäß den RDO Asphalt [34], sondern auch die Prognose der Spurrinnenbildung [unter Anwendung der Berechnungsverfahren von Kayser et al. \[38\] und Dragon et al. \[37\]](#) sowie der Ermüdungsrisssbildung innerhalb der Asphaltdeckschicht sowie auch der Asphaltbinderschicht [unter Anwendung der Berechnungsverfahren von Zeißler et al. \[39\]](#).

Die Prognoseberechnungen erfolgen mit der Software ADtoPave der IDAV GmbH an der Forschungsstelle 1. Die IDAV GmbH stellt der Forschungsstelle 1 für den Zeitraum der Bearbeitung die Software als Science-Version zur Verfügung.

Ziele des Arbeitspaketes E: Wissenschaftliche Erkenntnisse zum Einfluss der Aufbereitungsverfahren von Asphaltgranulat bei höchstmöglichen Zugabeanteilen auf die Nutzungsdauer von Asphaltbefestigungen, die Spurrinnenentwicklung und Ermüdungsbeständigkeit von Asphaltdecken

Personaleinsatz Forschungsstelle 1: 1,0 Monat wissenschaftlicher Mitarbeiter/-in und Eigenleistung durch KMU

Zeitdauer: 1,0 Monat

4.1.6 Arbeitspaket F: großtechnische Herstellung und Einbau von Asphaltmischgut aus im Rotorschleuderbrecher aufbereiteten Ausbauasphalts in einer Erprobungsstrecke

Im Arbeitspaket F ist für einen anwendungsbezogenen Forschungsansatz eine großtechnische Herstellung und ggf. Einbau vorgesehen. Durch die Auswertung einer Erprobungsstrecke ist der konkrete Nutzen für den Asphaltmischguthersteller des alternativen Aufbereitungsprozesses von Ausbauasphalt mit dem Rotorschleuderbrecher besser abzuschätzen.

Die Untersuchungen in diesem Arbeitspaket haben folgenden Umfang:

- Untersuchung der Ausgangsstoffe entsprechend des Umfanges der Tabelle 1
- Mix-Design entsprechend des Arbeitspaketes B

- Betreuung und Dokumentation der großtechnischen Herstellung und des Einbaus des Asphaltmischgutes
- Untersuchungen zu den Gebrauchseigenschaften entsprechend des Arbeitspaketes D inklusive vorheriger Herstellung der dafür erforderlichen Probekörper aus dem in der Asphaltmischanlage hergestellten Asphaltmischgutes (Variante V13 und V14)
- SARA-Analyse an vier Bitumenproben (Frischbindemittel, Bindemittel RA, zurückgewonnenes Bindemittel aus großtechnisch hergestelltem Asphaltmischgut [Vergleich der Aufbereitungsverfahren]) zur Beurteilung des Alterungsverhaltens

Ziele des Arbeitspaketes F: großtechnische Umsetzung der im Labormaßstab erzielten Erkenntnisse

Personaleinsatz Forschungsstelle 1: 1,75 Monate wissenschaftlicher Mitarbeiter/-in, Monate, 1,7 Monate Baustoffprüfer/-in, 0,5 studentische Hilfskraft (43 h pro Monat)

Personaleinsatz Forschungsstelle 2: 2,75 Monate Baustoffprüfer/-in, 1,5 Monate studentische Hilfskraft

Zeitdauer: 3,0 Monate

4.1.7 Arbeitspaket G: Bewertung der Wirtschaftlichkeit mittels Ermittlung der Herstellungskosten und der Lebenszykluskosten von Straßen

Für den Straßenbaulastträger ist die Abschätzung der monetären Gesamtbilanz von Straßenbefestigungen im Straßennetz ein Grundanliegen [43]. Da der Straßenbaulastträger neben der Verantwortung der Verkehrssicherungspflicht gegenüber den Benutzern und Anliegern auch als Beauftragter der Parlamente die Verantwortung gegenüber den Bürgern für eine angemessene Verwendung der Steuereinnahmen trägt [44], besteht das vordringliche Ziel des Straßenbaulastträgers in der Geringhaltung der Kosten für die Erstellung und Erhaltung von Verkehrswegen mit Blick auf die Kosten über den Lebenszyklus hinweg [43].

Während das Pavement Management System (PMS) das Ziel verfolgt, das Anlagevermögen Straße entsprechend der Erhaltungsziele technisch und wirtschaftlich sinnvoll zu verwalten, zielt eine Lebenszyklusbetrachtung eher auf die optimale Wahl von langfristig wirtschaftlichen baulichen Lösungen im Einzelfall ab [43]. Demzufolge sind solche Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen explizierter als im PMS.

Voraussetzung für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung sind die Ergebnisse der Prognoserechnungen der Nutzungsdauer, der Spurrinnenbildung sowie der Ermüdungsrisssbildung innerhalb der Asphaltdecke. Für die Berechnung der Lebenszykluskosten werden vom Neubau über die Erhaltung bis zum Nutzungsausfall der strukturellen Substanz alle maßnahmebedingten Kosten angesetzt und auf einen Bezugszeitpunkt auf- bzw. abgezinst [43]. Für alle durchzuführenden Berechnungen werden

über die reinen Materialkosten auch die Einbaukosten inklusive aller zur Durchführung der Maßnahmen erforderlichen Baustellen- und Sicherungskosten berücksichtigt. Auf diese Weise wird die Anzahl der Erhaltungsmaßnahmen realitätsbezogen monetär bewertet.

Die Materialkosten berücksichtigen u.a. die Anschaffungs-/ bzw. Mietkosten sowie die Energie- und Betriebskosten der verwendeten Maschinen zur Aufbereitung der Ausbauasphalte sowie die Kosten für die „frischen“ Baustoffe. Damit wird im Rahmen des Projektes ebenso die Fragestellung nach der Wirtschaftlichkeit für den Asphalthersteller geklärt werden können. Dabei wird erwartet, dass allein eine Erhöhung des Zugabeanteils von Asphaltgranulat und der damit einhergehenden Reduzierung der „frisch“ hergestellten Gesteinskörnungen und Bitumen zu einer Einsparung von Kosten führt.

Ziele des Arbeitspaketes G: Abschätzung des wirtschaftlichen Nutzens der aus der rechnerischen Dimensionierung hervorgehenden Bauweisen, besonders bezüglich der unterschiedlichen Aufbereitungsverfahren von Asphaltgranulat bei höchstmöglicher Zugabemenge

Personaleinsatz Forschungsstelle 1: 1,5 Monat wissenschaftlicher Mitarbeiter/-in

Zeitdauer: 3,0 Monate

4.1.8 Arbeitspaket H: Auswertung der Untersuchungsergebnisse, Bericht und Veröffentlichung der Forschungsergebnisse

Während der Bearbeitungszeit erfolgt eine kontinuierliche Auswertung der Ergebnisse, die Vorstellung der Zwischenergebnisse vor dem projektbegleitenden Ausschuss. Die Darstellung des Arbeitstandes des Projektes ist für die Zwischenberichte vorgesehen. Die Forschungsergebnisse und die gewonnenen Erkenntnisse werden im Schlussbericht dargestellt. Außerdem wird im Schlussbericht eine Handlungsanweisung für das Bitumen-/Mörtel-Design von Asphaltmischgut beschrieben, damit die KMU diese direkt anwenden können. Ein weiterer Aspekt ist ein geeignetes Prüfverfahren zum Qualitätsmanagement im Rahmen der werkseigenen Produktionskontrolle (WPK) der im Rotorschleuderbrecher aufbereiteten bindemittelreichen Fraktion (Asphaltmörtel). Hier ist ebenso das Verfassen einer Handlungsanweisung notwendig, damit die Hersteller in der Lage sind bei Einsatz von auf diese Weise rezyklierten Asphaltmörtels ein anforderungsgerechtes Asphaltmischgut zu produzieren. Die Erkenntnisse des Forschungsprojektes werden außerdem im Rahmen von Vorträgen auf nationalen und internationalen Fachtagungen (während und nach Abschluss der Bearbeitung) sowie in Fachartikeln veröffentlicht (nach Abschluss der Bearbeitung) und sollen in den für die Regelwerkerstellung verantwortlichen Gremien der Forschungsgesellschaft für Straße und Verkehr vorgestellt werden.

Ziele des Arbeitspaketes H: Zwischen- und Schlussberichte, Veröffentlichungen im Rahmen von Vorträgen und Fachbeiträgen, ggf. Eingang in das technische Regelwerk

Personaleinsatz Forschungsstelle 1: 13,0 Monate wissenschaftlicher Mitarbeiter/-in, 3,0 Monate studentische Hilfskraft für Diplom- oder Masterabschluss

Personaleinsatz Forschungsstelle 2: 4,6 Monate wissenschaftlicher Mitarbeiter/-in

Zeitdauer: 29,0 Monate

4.2 Arbeitsdiagramm

Im Arbeitsdiagramm (Abb. 1, [siehe Seite 25](#)) sind der geplante zeitliche Ablauf der einzelnen Arbeitspakete und die Zuordnung des jeweils vorgesehenen Personaleinsatzes zu sehen.

5. Umsetzbarkeit und Transfer der Ergebnisse

5.1 Aussagen zur voraussichtlichen industriellen Umsetzung der FuE-Ergebnisse nach Projektende

Voraussetzung für eine Akzeptanz und unmittelbare Anwendung der Forschungsergebnisse an Asphaltmischanlagen bzw. Recyclinganlagen ist eine bereits vorhandene Maschinenteknik. Rotorschleuderbrecher dienen bisher überwiegend zur Zerkleinerung und Veredlung von Gesteinskörnungen und müssen demnach nicht erst entwickelt werden. Klein- und mittelständige Asphaltmischguthersteller mieten zumeist ihre Aufbereitungstechnik an. Es sollte daher von ungeordneter Bedeutung sein, ob der Asphaltmischguthersteller einen Rotorschleuderbrecher oder einen Prallbrecher zur Aufbereitung des Ausbausphaltes mietet. Außerdem ist keine Paralleltrommel an der Asphaltmischanlage erforderlich, da die bitumenarmen Fraktionen über die Weißtrommel aufgegeben und wie üblich erhitzt werden und die bitumenreichen Fraktion entweder kalt in den Mischer oder mit den heißen Gesteinskörnungen zugegeben werden kann.

Zusätzlich besteht die Möglichkeit, den Mörtel des Asphaltgranulates ggf. in einer Verdichtungseinheit (z.B. wie entsprechend der Technologie von der AmoPepper [23]) zu sog. Bitumenbrikettes verarbeiten zu können. Diese Bitumenbriketts bieten eine Reihe von Vorteilen. Durch das Brikett-Format sind sie einfach zu lagern und zu transportieren, so dass eine AmoPepper-Anlage mehrere Asphaltwerke beliefern kann. Die Briketts haben außerdem einen sehr niedrigen Feuchtigkeitsgehalt [23]. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens ist aus zeitlichen Gründen nicht vorgesehen die Bitumenbriketts- Herstellungsmethode anzuwenden. Dennoch besteht die Chance, dass in diesem Zusammenhang neue Geschäftsfelder für KMU auf der Grundlage der Ergebnisse des Forschungsprojektes entstehen.

Die Optimierung der Aufbereitungstechnologie von Asphaltgranulat mittels Rotorschleuderbrecher und Verfahren der Asphaltkonzeption bei Verwendung von

Asphaltgranulat und Rejuvenatoren auf der Basis des Bitumen-/Mörtel-Designs mit dem DSR ist für KMU mit Asphaltmischanlagen, welche über keine eigene Forschungsabteilungen/-budgets verfügen, nicht durchführbar. Für KMU stellen Forschungen in dem Umfang eine nicht zu bewältigende Herausforderung dar. Die Kosten für die Maschinenteknik bzw. Prüftechnik sollten dagegen von den KMU leistbar sein, da ein großer Teil der erforderlichen Maschinenteknik an den Asphaltmischanlagen vorhanden sind bzw. die fehlenden Geräte für den erforderlichen Zeitraum angemietet werden können. Damit tragen die Erkenntnisse des Forschungsvorhabens unmittelbar zur Wettbewerbsfähigkeit von KMU bei ohne, dass für die KMU Entwicklungskosten entstehen.

5.2 Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

5.2.1 Geplante spezifische Transfermaßnahmen während der Projektlaufzeit

Maßnahme	Ziel	Ort/Rahmen	Datum/Zeitraumen
Sitzung des Projektbegleitenden Ausschusses	Einbindung in das Projekt, Austausch, ggf. Input	Dresden/Wuppertal/ Videokonferenz	2 x im Jahr, eintägig
Vortrag auf Fachtagungen	Information der Fachleute über Vorgehensweise und Ziele und erste Ergebnisse	DAV / DAI-Asphaltseminar in Willingen	Jährlich im März, erste Veranstaltung nach Beginn des Projektes
		Deutsche Asphalttage und/oder Dresdner Asphalttage	Mai / Dezember ungerades Jahr
Vorträge in FGSV-Gremien	Einbindung in das nationale technische Regelwerk	unterschiedliche Tagungsort	bei Bedarf, eintägig

5.2.2 Geplante spezifische Transfermaßnahmen nach Abschluss des Vorhabens

Maßnahme	Ziel	Ort/Rahmen	Datum/Zeitraumen
Vortrag auf Fachtagungen	Information der Fachleute über Vorgehensweise, Ziele und Ergebnisse mit Empfehlungen zur Umsetzung	Deutsche Asphalttage und/oder Dresdner Asphalttage	Mai / Dezember ungerades Jahr
		Vereinigung der Straßenbau- und Verkehrsingenieure	Erstmögliche Veranstaltung nach Ende des Projektes
		DAV / DAI-Asphaltseminar in Willingen	Erstmögliche Veranstaltung nach Ende des Projektes
		Eurasphalt & Eurobitumen Conference	Mai ungerades Jahr
Vortrag bzw. Poster Session auf Fachtagungen und Proceedings		International Conference on Maintenance and Rehabilitation of Pavements	Erstmögliche Veranstaltung/Ausgabe nach Ende des Projektes
Publikation der Forschungsergebnisse	Information über die Ergebnisse mit Empfehlungen zur Umsetzung	Zeitschrift „asphalt“ und https://www.asphalt.de/asphaltinstitut/forschungsergebnisse/	Erstmögliche Ausgabe nach Ende des Projektes
Vorträge in FGSV-Gremien	Einbindung in das nationale technische Regelwerk	unterschiedliche Tagungsort	bei Bedarf, eintägig

6. Durchführende Forschungseinrichtungen

Name, Anschrift und Projektleitung der Forschungsstelle 1:

Zentrum für Angewandte Forschung und Technologie e. V. (ZAFT e. V.) an der Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden, PF 120701, 01008 Dresden, Prof. Dr.-Ing Ines Dragon

Prof. Dr.-Ing Ines Dragon

Dresden, 05. Oktober 2021

Name, Anschrift und Projektleitung der Forschungsstelle 2

Bergische Universität Wuppertal, Fakultät für Architektur und Bauingenieurwesen, Lehr- und Forschungsgebiet Straßenbau und Straßenerhaltung, Pauluskirchstraße 7, 42285 Wuppertal, Univ.-Prof. Dr.-Ing. Pahirangan Sivapatham

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Pahirangan Sivapatham

Dresden, 05. Oktober 2021

7. Literaturverzeichnis

- [1] Jähnig, J.; Dr. Lerch, T.; Mansfeld, R., Mühle, R.; Prof. Dr.-Ing. Rauschenbach, V.; Zinkler, S.: Wiederverwendung und Verwertung von Ausbauasphalt, Leitfaden, Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Juni 2019
- [2] Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz – KrWG), 2012
- [3] Wiederverwendung von Asphalt – Neues Regelwerk weist den Weg nach vorn, Deutscher Asphaltverband e.V., Bonn, 2013
- [4] Asphaltproduktion in Deutschland (Stand Mai 2019), https://www.asphalt.de/fileadmin/user_upload/downloads/Asphalt2019neu.pdf (abgerufen 07.02.2020)
- [5] ZTV Asphalt-StB 07/13: „Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen aus Asphalt“, FGSV Verlag GmbH, Köln, Ausgabe 2007, Fassung 2013
- [6] TL AG-StB 09: „Technische Lieferbedingungen für Asphaltgranulat“, FGSV Verlag GmbH, Köln, Ausgabe 2009
- [7] M WA: „Merkblatt für die Wiederverwendung von Asphalt“, FGSV Verlag GmbH, Köln, Ausgabe 2009, Fassung 2013
- [8] Positionspapier „Wiederverwendung von Asphalt und alternative Verwertungskonzepte für Asphaltgranulat zur weiteren Steigerung der Nachhaltigkeit“ des Deutschen Asphaltverbandes, Bonn, 2019
- [9] <https://mil.brandenburg.de/sixcms/detail.php/bb1.c.154357.de> (abgerufen 07.02.2020)
- [10] Radenberg, M.; Bötcher, S.; Sedaghat, N.: Einsatz von Rejuvenatoren bei der Wiederverwendung von Asphaltgranulat“, 1. Teil des Schlussberichtes zum FE 07.0250/2011/LRB, Bochum, 2016
- [11] TL Asphalt-StB 07/13: „Technische Lieferbedingungen für Asphaltmischgut für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen“, FGSV Verlag GmbH, Köln, 2007, Fassung 2013
- [12] Ausführungsvorschriften zu § 7 des Berliner Straßengesetzes über die Vorbereitung des Ausbaus von Asphaltsschichten im Straßenbau, Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt, amtliche Fassung: Amtsblatt für Berlin, Nr.: 23/2015 S. 1205, 21.05.2015
- [13] Leutner, R.; Renken, P.; Lobach, T.: Wirksamkeit der Zugabe von Asphaltgranulat auf die mechanischen Eigenschaften von Asphaltdeckschichten, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 908, Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, 2005
- [14] Renken, P.; Lobach, T.: Einfluss der Zugabe von Ausbauasphalten in Asphaltbinderschichtmischgut mit PmB45, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 954, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, 2007
- [15] Wistuba, M. P.; Grönniger, J.; Renken, P.: Asphaltwiederverwendung auf hohem Wertschöpfungsniveau, Straße und Autobahn, Kirschbaumverlag, Jahrgang 64, Heft 8, 2011, S. 532 – S. 536
- [16] Eichler, J.: Beurteilung der Gebrauchseigenschaften von Asphaltmörtel mit dem Dynamischen Scherrheometer, Dissertation, Fakultät Bau Geo Umwelt der Technischen Universität München, 2018

- [17] Büchner, J.; Wistuba, M. P.: Ansprache der Gebrauchseigenschaften von Asphaltmastix im DSR, 6. DRESDNER ASPHALTTAGE, Fakultät Bauingenieurwesen, Institut für Stadtbauwesen und Straßenbau, Professur für Straßenbau, Dezember 2019
- [18] Huurman, M.; Qiu, J.; Woldekidan, M.; Demmink, E. W.; de Bruin, B.: Low Emission2 Asphalt Pavement, LE2AP, <https://www.h-a-d.hr/pubfile.php?id=1110> (abgerufen am 07.02.2020)
- [19] Qui, J.; Huurman, R.; Demmink, E.; Frunt, M.: Sustainable Warm In-Plant SMA-Mixtures with 80% Recycling an Produced at 115°C, Proceedings of the 5th International Symposium on Asphalt Pavements & Environment, Springer-Verlag, 2020, S. 283 bis S. 293
- [20] Sivapatham, P., Simmleit, N. (2020) Precious Recycling of Reclaimed Asphalt as Hot Mix Asphalt by Use of Rejuvenator, 3rd International Conference on Innovative Technologies for Clean and Sustainable Development, Chandigarh, India
- [21] Huurman, M.; Qiu, J.; Woldekidan, M.; Jacobs, M.; Frunt, M.: Towards sustainable horizontal asphalt recycling, https://www.bamle2ap.com/sites/default/files/domain-456/documents/cew2016_paper_jqi_14-03-2016-456-14685809401369223577.pdf, (abgerufen am 15.01.2021)
- [22] Maarten, J.: Nachhaltigkeit und Asphalt: eine gute Kombination, 1. Siegerner Straßenbautag, 12.07.2017
- [23] „Handling Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) in a Revolutionary Way“ <https://www.amomatic.com/en/technologies/recycling-equipment/amopepper> (abgerufen am 21.01.2021)
- [24] DIN EN 13108-1 (2016): Asphaltmischgut – Mischgutanforderungen – Teil 1: Asphaltbeton; Deutsche Fassung EN 13108-1:2016, Beuth-Verlag
- [25] Wellner, F.; Rochlani, M.; Leischner, S.; Wang, D.; Canon Falla, G.: Abschätzung der performanceorientierten Eigenschaften von Mastix-Gemischen mit dem DSR, Straße und Autobahn, Kirschbaumverlag, Jahrgang 72, Heft 9, 2019, S. 751 – S. 761
- [26] M KEP: „Merkblatt für die Konzeption und die Erstprüfung von Asphaltmischgut für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen“, FGSV Verlag GmbH, Köln, 2012
- [27] TP Asphalt-StB, Teil 6: „Technische Prüfvorschrift für Asphalt Teil 6: „Raumdichte von Asphaltprobekörpern“, FGSV Verlag GmbH, Köln, 2016
- [28] TP Asphalt-StB, Teil 6: „Technische Prüfvorschrift für Asphalt Teil 29: „Maße von Asphaltprobekörpern“, FGSV Verlag GmbH, Köln, 2007
- [29] DIN EN 12697-31: Asphalt Prüfverfahren – Teil 31: „Herstellung von Probekörpern mit dem Gyrator-Verdichter“, DIN-Normenausschuss Bauwesen (NABau), Deutsche Fassung EN 12697-31:2019
- [30] TP Asphalt-StB, Teil 26: „Technische Prüfvorschrift für Asphalt Teil 26: „Spaltzug-Schwellversuch – Bestimmung der Steifigkeit“, FGSV Verlag GmbH, Köln, 2018
- [31] TP Asphalt-StB, Teil 24: „Technische Prüfvorschrift für Asphalt Teil 24: „Spaltzug-Schwellversuch – Beständigkeit gegen Ermüdung“, FGSV Verlag GmbH, Köln, 2018
- [32] AL DSV slim: Arbeitsanleitung Druck-Schwellversuch am schlanken Probekörper, FGSV-Arbeitskreis 4.5.4, Prüfvorschriften für die Dimensionierung, Entwurf, Stand: 03/2019
- [33] TP Asphalt-StB, Teil 46 A: „Technische Prüfvorschrift für Asphalt Teil 46 A: „Kälteeigenschaften Einaxialer Zugversuch und Abkühlversuch“, FGSV Verlag GmbH, Köln, 2013

- [34] RDO Asphalt: „Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung des Oberbaus von Verkehrsflächen mit Asphaltdeckschicht“, FGSV Verlag GmbH, Köln, 2009
- [37] Dragon, I., Wellner, F., Birbaum, J.; Zander, U.: Grundlagen für die Beurteilung der dimensionierungsrelevanten Eigenschaften und der Wirtschaftlichkeit von Oberbaubefestigungen aus Asphalt Entwurf zum Schlussbericht zum Forschungsprojekt FE 07.0236/2010/AGB, Dresden, 2014
- [38] Kayser, S., Zeißler, A., Reinhardt, U.: Spurrinnenprognose für Asphaltbefestigungen unter Berücksichtigung von Zufallsprozessen, Betrag zu den 2. DRESDNER ASPHALTTAGE, Technische Universität Dresden, Dezember 2011
- [39] Zeißler, A.; Weise, Ch.: Möglichkeiten und Perspektiven der rechnerischen Dimensionierungs- und Prognoseverfahren, 6. DRESDNER ASPHALTTAGE, Fakultät Bauingenieurwesen, Institut für Stadtbauwesen und Straßenbau, Professur für Straßenbau, Dezember 2019
- [40] Artikel 34 GG: https://www.gesetze-im-internet.de/gg/art_34.html (abgerufen am 07.02.2020)
- [41] § 839 BGB: https://www.gesetze-im-internet.de/bgb/_839.html (abgerufen am 07.02.2020)
- [42] Zander, U. et al.: Infrastrukturmanagement Straße: Erhaltung Maßnahmenkoordination Wirtschaftlichkeit Vermögensbewertung, 1. Auflage, Kirschbaumverlag, 2018
- [43] Birbaum, J.: Ermittlung eines Verfahrens zur Ermittlung der Lebenszykluskosten von Straßen in Asphaltbauweise, Dissertation, Universität Siegen, Naturwissenschaftlich-Technische Fakultät, 2016
- [44] „Asphalt in Figures 2019“, European Asphalt Pavement Association (EAPA), Version December 2020
- [45] Nolle, B.: „Wiederverwendung von Asphalt“, Vortrag des Web-Seminar – Wiederverwendung von Asphalt, 02.06.2021