



D-A-CH-FORSCHUNGSPROJEKT „MEHRFACHRECYCLING IM STRASSENBAU“

**Institut für Straßenwesen (ISBS), Technische Universität Braunschweig
(TUBS), Deutschland**

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Michael P. Wistuba

Dr.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Jens Grönniger

Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Schweiz

Dr. phil. II Martin Hugener

Dr. Martin Arraigada

**Forschungsbereich Straßenwesen, Institut für Verkehrswissenschaften,
Technische Universität Wien (TUW)**

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Bernhard Hofko

Dipl.-Ing. Daniel Maschauer

**Lehrstuhl für Verkehrswegebau (LVW), Ruhr-Universität Bochum (RUB),
Deutschland**

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Radenberg

Dr.-Ing. Matthias Staschkiewicz

Dr.-Ing. Nina Nytus

**Forschungsprojekt VSS 2018/333 auf Antrag des Schweizerischen Ver-
bands der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)**

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V., Deutschland (FGSV)

Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute in der Schweiz (VSS), mit Unterstützung des Bundesamtes für Strassen (ASTRA)

Österreichische Forschungsgesellschaft Straße-Schiene-Verkehr, mit Unterstützung des Österreichischen Baustoff-Recycling Verbandes (BRV) und der Landesbaudirektionen

Der Inhalt dieses Berichtes verpflichtet nur den (die) vom Bundesamt für Strassen unterstützten Autor(en). Dies gilt nicht für das Formular 3 "Projektabschluss", welches die Meinung der Begleitkommission darstellt und deshalb nur diese verpflichtet.

Bezug: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Le contenu de ce rapport n'engage que les auteurs ayant obtenu l'appui de l'Office fédéral des routes. Cela ne s'applique pas au formulaire 3 « Clôture du projet », qui représente l'avis de la commission de suivi et qui n'engage que cette dernière.

Diffusion : Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)

La responsabilità per il contenuto di questo rapporto spetta unicamente agli autori sostenuti dall'Ufficio federale delle strade. Tale indicazione non si applica al modulo 3 "conclusione del progetto", che esprime l'opinione della commissione d'accompagnamento e di cui risponde solo quest'ultima.

Ordinazione: Associazione svizzera dei professionisti della strada e dei trasporti (VSS)

The content of this report engages only the author(s) supported by the Federal Roads Office. This does not apply to Form 3 'Project Conclusion' which presents the view of the monitoring committee.

Distribution: Swiss Association of Road and Transportation Experts (VSS)

D-A-CH-FORSCHUNGSPROJEKT „MEHRFACHRECYCLING IM STRASSENBAU“

im Auftrag der
Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V., Deutschland (FGSV),
des Schweizerischen Verbands der Strassen- und Verkehrsfachleute in der Schweiz
(VSS) und der Forschungsgesellschaft Straße-Schiene-Verkehr in Österreich (FSV)

Abschlussbericht
Dezember 2022

von

Michael P. Wistuba¹, Jens Grönniger¹, Martin Hugener², Martin Arraigada²,
Bernhard Hofko³, Daniel Maschauer³, Martin Radenberg⁴, Matthias Staschkiewicz⁴,
Dr.-Ing. Nina Nytus⁴

1 Institut für Straßenwesen (ISBS), Technische Universität Braunschweig (TUBS), Deutschland

2 Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Schweiz

3 Forschungsbereich Straßenwesen, Institut für Verkehrswissenschaften, Technische Universität
Wien (TUW)

4 Lehrstuhl für Verkehrswegebau (LVW), Ruhr-Universität Bochum (RUB), Deutschland

1	Begriffe.....	6
2	Ausgangssituation	8
2.1	Überblick.....	8
2.2	Herausforderung Bitumenregeneration.....	9
2.3	Forschungspartner und Projektziel	12
3	Überblick zu den Arbeitspaketen	15
4	AP-1 Stand des Wissens.....	16
4.1	Europäische Normen	20
4.2	Erfahrungen und regulative Vorgaben in Deutschland	21
4.2.1	Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG).....	22
4.2.2	Mantelverordnung für Ersatzbaustoffe und Bodenschutz.....	23
4.2.3	Technische Regelwerke und Empfehlungen.....	23
4.2.4	Bundesländerspezifische Regelungen	30
4.3	Erfahrungen und regulative Vorgaben in Österreich.....	41
4.3.1	Gesetze und Verordnungen.....	42
4.3.2	Bundes-Abfallwirtschaftsplan (BAWP)	44
4.3.3	Richtlinien des Baustoff-Recycling Verbands (BRV)	44
4.3.4	Technische Regelwerke zum Heißmischverfahren.....	45
4.3.5	Technische Regelwerke zum Kaltrecycling.....	47
4.4	Erfahrungen und regulative Vorgaben in der Schweiz.....	48
4.5	Veröffentlichte internationale Erfahrungen	53
4.6	Zusammenfassende Erkenntnisse zum Stand des Wissens.....	55
5	AP-2 Praxisgerechte Bitumenprüfung	56
5.1	Hintergrund: Prüfung der Viskositätsveränderung.....	56
5.2	Bewertung der Wirksamkeit von Regenerationsmitteln (BTSV-Prüfung)	57
5.3	Beurteilung der Dauerhaftigkeit bei der mehrfachen Wiederverwendung	61
5.4	Ermittlung der optimalen Zugabemenge.....	62
5.5	Nachweis der Eignung.....	64
5.5.1	Beständigkeit gegen Alterung	64
5.5.2	Gebrauchsverhalten (Bitumen- und Mastixperformance im DSR).....	65
5.6	Zusammenfassende Erkenntnisse zur praxisgerechten Bitumenprüfung.....	69
6	Auswahl der Baustoffe und Baustoffkomponenten.....	70
6.1	Materialien für die Simulation des Mehrfachrecyclings (AP-3).....	70
6.2	Asphaltgranulate für eine umfassende Charakterisierung (AP-4)	75
7	AP-3 Prüfung der mehrfachen Wiederverwendung im Labor.....	81
7.1	Vorgehensweise und Prüfplan	81
7.2	Mehrfachrecycling im Kleinmassstab	85
7.2.1	Binderschicht AC B 16	85
7.2.2	Deckschicht SMA 11.....	87
7.2.3	Schlussfolgerungen aus dem Mehrfachrecycling im Kleinmassstab	89
7.3	Mehrfachrecycling im Grossmassstab.....	89
7.3.1	Resultate der Bindemitteluntersuchungen	91
7.3.2	Resultate der Untersuchungen an Mischgut und Asphaltprüfkörpern.....	94

7.3.3	Schlussfolgerungen aus dem Mehrfachrecycling im Grossmassstab.....	99
7.4	Beurteilung des Gebrauchsverhaltens von Asphaltmischgut mittels performance-basierten Prüfmethode	99
7.4.1	Widerstand gegen Ermüdung – 4-Punkt-Biegebalken (4PB)	99
7.4.2	Kälteverhalten – Abkühlprüfung (TSRST).....	102
	Empfehlungen zum Gebrauchsverhalten von Asphaltmischgut.....	105
7.5	Validierung mit dem Verkehrslastsimulator	105
8	AP-4 Management und Analyse von Asphaltgranulat	108
8.1	Vorgehensweise und Prüfmethode.....	108
8.1.1	BTSV-Prüfung und Temperatur-Frequenz-Sweep im Dynamischen Scher-Rheometer.....	109
8.1.2	Scher-Relaxationsversuch im Dynamischen Scher-Rheometer	109
8.1.3	Modifikationsdetektion von rückgewonnenen Bindemitteln aus dem Asphaltgranulat.....	111
8.1.4	FTIR-Spektroskopie	113
8.1.5	Morphologische Charakterisierung der Gesteinskörnungen kleiner 1 mm.....	115
8.2	Auswertung der Ergebnisse	116
8.2.1	BTSV-Prüfung und Temperatur-Frequenz-Sweep	116
8.2.2	Scher-Relaxationsversuch	122
8.2.3	FTIR-Spektroskopie	126
8.2.4	Morphologie der Gesteinskörnungen < 1 mm.....	131
8.3	Zusammenfassende Erkenntnisse zum Management und Analyse von Asphaltgranulat.....	134
9	AP 5: Erstellung Recyclingleitfaden	135
10	Zusammenfassung und Schlussfolgerung	136
11	Anhang	138

1 Begriffe

Das D-A-CH Forschungsprojekt *Mehrfachrecycling im Strassenbau* ist eine Kooperation von Forschungsvereinigungen und Forschungsnehmern aus Deutschland, der Schweiz und Österreich. Der technische Sprachgebrauch ist in diesen Ländern uneinheitlich, d. h. vollständige länderübergreifende Regeln zur Verwendung von Fachbegriffen gibt es nicht. Die Autoren dieses Berichts haben sich daher auf ein allgemein verständliches Fachvokabular und auf einheitliche Schreibweisen geeinigt. Dazu zählt auch das schweizerische «ss» für «ß» (Eigennamen ausgenommen). Daher können die in diesem Bericht verwendeten Fachbegriffe und Schreibweisen im Einzelfall von nationalen Regelwerken und Gepflogenheiten abweichen.

Der Titel des Projekts *Mehrfachrecycling im Strassenbau* zielt darauf ab, in wenigen Worten Inhalt und Zielsetzung auszudrücken, ist aber formal nicht einwandfrei. Das Wort „Recycling“ ist ein Lehnwort aus dem Englischen: Das Präfix *Re* steht für *zurück, wieder* (lat.) und *Cycling* kommt von *kýklos* = *Kreis* (griech.). Umgangssprachliche Synonyme für Recycling sind u. a. Rezyklierung, Wiederverwertung, Wiederaufbereitung, Wiederverwendung, u. U. auch Upcycling bzw. Downcycling (neues Produkt ist höherwertig bzw. minderwertig gegenüber dem ursprünglichen Produkt). Strenggenommen steht der Fachbegriff *Recycling* für ein Verwertungsverfahren, das aus Abfall neue Erzeugnisse, Stoffe oder Materialien für den ursprünglichen oder einen anderen Einsatzzweck generiert.

Aufbereiteter Ausbauasphalt ist kein Abfall, sondern ein Rohstoff. Im Zusammenhang mit Asphalt, der aus alten Strassen zurückgewonnen und im Heissmischverfahren für die Herstellung einer neuen Asphalttschicht verwertet wird, ist daher jedenfalls der Begriff *Wiederverwendung* zu bevorzugen, denn das aus dem Altasphalt aufbereitete Asphaltgranulat ist ein hochwertiger Rohstoff, der erneut für denselben Zweck genutzt wird. Somit ist der Ausdruck *Recycling von Asphalt* suboptimal, formal korrekt ist *Wiederverwendung von Asphalt*. Nach der Abfallhierarchie gemäss EU-Vorgaben steht die Wiederverwendung nach der Abfallvermeidung an erster Stelle, gefolgt vom Recycling, von der sonstigen Verwertung und der Beseitigung (siehe Kapitel 4.2.1).

Folgende Begrifflichkeiten werden in den D-A-CH Ländern zum Thema Asphaltrecycling häufig genutzt:

- *Ausbauasphalt* ist Asphalt, der durch Fräsen von Asphalttschichten auf der Baustelle gewonnen wird (Fräsasphalt), durch Zerkleinern von Schollen, die aus Asphalt-Fahrbahnbefestigung herausgebroschen wurden (Aufbruchasphalt) oder stammt aus verworfenem, überschüssigem oder fehlerhaftem Asphalt ⁽¹⁾. Ein Synonym für Ausbauasphalt ist *Altasphalt*. Sinngemäss wird das im Ausbauasphalt enthaltene Bindemittel als *Altbindemittel* oder *Altbitumen* bezeichnet.
- Ein zum Zwecke der Wiederverwendung ausreichend zerkleinerter (granulierter) Ausbauasphalt heisst *Asphaltgranulat*. Eine gute Gleichmässigkeit des Asphaltgranulats wird durch schichtenweises getrenntes Fräsen erzielt. Asphaltgranulat bezeichnet den wiederverwerteten, auf der Baustelle gewonnenen Asphalt, der nach dem Prüfen, der Beurteilung und der Klassifizierung als Bestandteil von Asphalt geeignet und gebrauchsfertig ist ⁽¹⁾. Oft werden die Begriffe Asphaltgranulat, RA (engl. reclaimed (recycled) asphalt), RAP (engl. reclaimed asphalt pavement (oder pavings)) und Ausbauasphalt auch als Synonyme verwendet.

Asphalt hat das Potential, mehrfach wiederverwendet zu werden. Asphalt ist somit ein überaus nachhaltiger Baustoff. Voraussetzung ist, dass beim Prozess der Wiederverwendung dem Asphalt keine Stoffe zugefügt wurden oder werden, die ihrerseits nicht rezyklierbar sind ⁽²⁾. Beispielweise wurden früher anstatt Bitumen auch teer-/pechhaltige Bindemittel im Asphalt eingesetzt (bspw. in Deutschland

¹ Austrian Standards International: ÖNORM EN 13108-8:2016-11-01, Asphaltmischgut – Mischgutanforderungen – Teil 8: Ausbauasphalt.

² Wistuba, M. P. 2019. Straßenbaustoff Asphalt. ISBN 978-3-932164-16-3, Institut für Straßenwesen, Technische Universität Braunschweig.

bis 1984), welche hohe Konzentrationen an krebserregenden Polyzyklischen Aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) enthalten, die bei den Mischtemperaturen im Heissmischverfahren entweichen können⁽³⁾. Daher ist bei der Wiederverwendung im Heissmischverfahren nur unbelastetes, schadstofffreies Asphaltgranulat in neuen Asphaltsschichten wiederverwendbar.

Die einzelnen Staaten haben daher Grenzwerte für PAK und andere potentielle Schadstoffe in Ausbauphphalt sowie Verwendungsverbote für teer-/pechhaltige Ausbaustoffe festgelegt. Vor jeder Wiederverwendung muss sichergestellt sein, dass keine Einbussen in ökologischer Hinsicht, in Bezug auf die Arbeitssicherheit und in den resultierenden Gebrauchseigenschaften hinzunehmen sind.⁽²⁾

³ Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Arbeitsgruppe Asphaltstraßen: Erläuterungen zu den Richtlinien für die umweltverträgliche Verwertung von Ausbaustoffen mit teer-/pechtypischen Bestandteilen sowie für die Verwertung von Ausbauphphalt im Straßenbau – RuVA-Stb 01, Ausgabe 2001/Fassung 2005, FGSV Verlag, Köln.

2 Ausgangssituation

2.1 Überblick

Die Wiederverwendung von Ausbauasphalt ist vor dem Hintergrund einer nachhaltigen Ressourcenbewirtschaftung und der Förderung der Kreislaufwirtschaft eine der drängendsten Fragen im modernen Strassenbau. Es sind strenge Regelungen in der Abfallverordnung zu beachten, gleichzeitig steigt der Anteil an Erhaltungs- und Sanierungsmassnahmen (während Neubaumassnahmen abnehmen) und dadurch auch die anfallenden Massen an Ausbauasphalt.

Die Asphaltindustrie sorgt nachdrücklich dafür, wie kaum ein anderer Industriezweig, die umweltverträgliche Bewirtschaftung von Asphalt im Sinne des Kreislaufwirtschaftsgesetzes im grossen Stil sicherzustellen ⁽⁴⁾.

Die Wiederverwendung von Ausbauasphalt (in Form von Asphaltgranulat) im gebundenen Strassenoberbau wird bereits seit mehreren Jahrzehnten auf einem hohen technischen Niveau vorangetrieben. Während in Fundations- und Tragschichten Zugaberaten an wiederaufbereitetem Ausbauasphalt von bis zu 80 % ohne Qualitätseinbussen prozesssicher möglich sind, sind die Zugaberaten in Asphaltdeck- und -binderschichten deutlich niedriger. Einerseits sind für diese deutlich dünneren Schichten die Qualitätsanforderungen höher, andererseits werden wegen der hohen Anforderungen an Oberbau und Fahrbahnoberfläche oft Spezialbeläge bspw. mit Polymermodifiziertem Bitumen (PmB) und/oder Ausfallkörnung eingesetzt, die eine Wiederverwendung für denselben Anwendungszweck erschweren.

Die Verwendung von PmB für Recyclingbeläge ist noch nicht vollkommen erforscht, ist aber gerade für Asphaltdeck- und -binderschichten für hohe Verkehrsaufkommen wesentlich. Materialien aus Asphaltdeck- und -binderschichten fallen laufend in grossem Umfang an. Folglich ist das Potential für deren Wiederverwendung trotz geringer Schichtdicke gross.

Heute werden bereits zunehmend Ausbauasphalte gewonnen, die bereits vor Jahrzehnten mit Anteilen an Ausbauasphalt hergestellt wurden. Es ist gut vorhersehbar, dass immer grössere Mengen an Ausbauasphalt anfallen werden, die bereits Asphaltgranulat enthalten.

Unter dem Begriff *Mehrfachrecycling* versteht man die Wiederverwendung von einem Ausbauasphalt der zweiten Generation, der bereits früher mit Asphaltgranulat aus einem Ausbauasphalt der ersten Generation hergestellt wurde.

In den D-A-CH Ländern sind die Strategien der Wiederverwertung von Ausbauasphalt, die Mengenströme von Ausbauasphalt und deren Wiederverwendungsraten in Heissmischgut stark unterschiedlich ausgeprägt. Die praktische Umsetzung von Mehrfachrecycling ist daher von den jeweiligen landesspezifischen Vorgaben abhängig und erfolgt heute nicht einheitlich. Dennoch sind einige Fragen zum Mehrfachrecycling in allen Ländern von zentraler Bedeutung, wie beispielweise die Gewinnung (Aufbruch, Fräsen), Lagerung und Aufbereitung von Ausbauasphalt (Fraktionierung, Homogenisierung, Handhabung des Füllerüberschusses), die praxisgerechte Regenerierung des alten verhärteten Bindemittels oder die Vermischung von alten und neuen Baustoffkomponenten an der Asphaltmischanlage (Nachmischzeit).

Grundsätzlich sind unterschiedliche Varianten zur Verwertung von Ausbauasphalt möglich, darunter ⁽²⁾

- die Wiederverwendung im Heissmischverfahren (*Heissrecycling*; Herstellung von Heissmischgut in der Asphaltmischanlage unter Mitverwendung von Asphaltgranulat; oder Recycling ‚in-situ‘ (lat. *am Ort*), indem die Asphaltstrasse direkt auf der Baustelle erwärmt, aufgenommen und nach Zugabe von Gesteinskörnungen, Bindemittel oder neuem Asphalt qualitativ verbessert und wieder eingebaut wird),

⁴ DAV, 2014. Wiederverwenden von Asphalt. Deutscher Asphaltverband (DAV) e. V., Bonn.

- die Wiederverwendung im Kaltmischverfahren (*Kaltrecycling*; z. B. Zugabe von kaltem Asphaltgranulat zu stabilisierten Tragschichten entweder im Zentral- oder im Baumischverfahren)
- und die Verwendung von kaltem Asphaltgranulat *in ungebundenen Tragschichten* sowie für *Damm-schüttungen* (z. B. Lärmschutzwahl).

Nachhaltige Recyclingstrategien zielen auf eine möglichst hochwertige Wiederverwendung ab. Aus wirtschaftlichen und ökologischen Gründen wird vielerorts die Wiederverwendung von Ausbaupasphalt in neuen Asphaltsschichten gegenüber einem *Downcycling* bevorzugt, beispielsweise wenn der Ausbaupasphalt in ungebundenen Schichten verbaut wird. In vielen Ländern ist daher die Wiederverwendung von Fräsasphalt im Heissmischverfahren, also in Asphaltmischanlagen die priorisierte Recyclingvariante. So werden beispielsweise in Deutschland bereits über 80 % des anfallenden Ausbaupasphalts durch Heissrecycling von Asphaltgranulat wiederverwendet. Dabei werden gemäss dem Technischen Regelwerk an Asphalte immer dieselben Anforderungen gestellt, egal ob sie mit oder ohne Mitverwendung von Asphaltgranulat hergestellt wurden. ⁽²⁾

2.2 Herausforderung Bitumenregeneration

Das im Ausbaupasphalt enthaltene Bindemittel ist aufgrund der fortgeschrittenen Bitumenalterung ^(2, 5, 6) nicht ohne Weiteres zur Herstellung eines neuen Asphaltmischguts einsetzbar. Es ist meist versprödet und rissanfällig. Dann sind Klebkraft, Haftvermögen an der Gesteinskörnung sowie Widerstand gegen Kälterissbildung herabgesetzt. Die Bitumenalterung muss durch Massnahmen der Regeneration kompensiert werden. Im Rahmen der Wiederverwendung von Ausbaupasphalt werden daher Mittel eingesetzt, mit dem Ziel, die im rückgewonnenen Bindemittel durch die Alterung verlorengegangenen Komponenten zu ersetzen und damit das resultierende (regenerierte) Bindemittel durch gezieltes Herabsetzen seiner Viskosität weitgehend wieder in den Zustand eines lieferfrischen, ungealterten Bindemittels zu versetzen. ^(2, 7, 8)

Grundsätzlich kann das Regenerieren durch die Zugabe von frischem, weichem Bitumen erfolgen. Je viskoser das gealterte Bindemittel bzw. je höher die Zugaberate an Ausbaupasphalt ist, umso mehr Frischbitumen muss zugegeben werden. Allerdings ist die mögliche Zugabemenge begrenzt: Wenn der Ausbaupasphalt extrem gealtert ist oder in grosser Menge zugegeben werden soll, überschreitet die zur Kompensation theoretisch notwendige Menge an frischem Bitumen den maximal möglichen Bindemittelgehalt, das Asphaltmischgut würde zu weich. Bei hohen Recyclingraten wird daher anstelle des Frischbitumens oder zusätzlich ein spezielles Zusatzmittel (Regenerator, Rejuvenator; amerik. *recycling agent*) in geringer Dosierung zugegeben.

Ein *Rejuvenator* (lateinisch aus Vorsilbe *re* für wieder, und *juvenalis* für jung; also im wortwörtlichen Sinne *Verjüngungsmittel*) ist heute in der Fachwelt ein weit verbreiteter Begriff für ein viskositätssenkendes Zusatzmittel im Zusammenhang mit der Wiederverwendung von Altbitumen. Es zielt nicht ab auf eine Verjüngung im Sinne einer vollständigen „Rückabwicklung“ von alterungsbedingten Bitumenveränderungen auf molekularer Ebene (bspw. die Einlagerung von Sauerstoff infolge Oxidation). Für eine solche Rückabwicklung fehlt heute grundlegendes Wissen sowie praxistaugliche Verfahren. Aus diesem Grund ist der Begriff *Rejuvenator* irreführend. In diesem Bericht wird stattdessen der Begriff *Regenerator* verwendet.

⁵ Hofko, B., Hospodka, M., Blab, R., Eberhardsteiner, L., Füssel, J., Grothe, H. & Handle, F. 2013. Alles altert – Aktuelle Erkenntnisse zum Alterungsverhalten von Bitumen und Asphalt, Vortrag: Gestrata - Herbstveranstaltung, Wien, https://publik.tuwien.ac.at/files/PubDat_222485.pdf.

⁶ Petersen, J. C. 2009. A Review of the Fundamentals of Asphalt Oxidation – Chemical, Physiochemical, Physical Property, and Durability Relationships. Transport Research Circular, E-C140, Washington DC.

⁷ Wistuba, M. P. 2020. Botox für den Asphalt. der asphaltprofi, Fachmagazin der MOAG, Jahrgang 19, Heft April, MOAG Baustoffe Holding AG, St. Gallen, Schweiz.

⁸ Wistuba, M. P. und Büchner, J. 2021. Prüfung von Rejuvenatoren mit dem Dynamischen Scherrheometer, Straße und Autobahn, 8/2021, 621-631, Kirschbaum Verlag, Bonn.

Regeneratoren verringern die Viskosität des gealterten Bitumens stärker als frische Bitumen, bei deutlich geringerer Zugabemenge. Grundsätzlich sollten Regeneratoren eine zu Bitumen ähnliche Zusammensetzung haben bzw. ein Bindemittel nicht so verändern, dass die Eigenschaften des regenerierten Bindemittels im Vergleich zu herkömmlichen Bindemitteln untypisch sind. Und sie sollten sich im Asphaltmischgut vollständig auflösen und sich mit dem Bindemittel vollständig vermischen. ⁽²⁾

Das Angebot an Regeneratoren am Markt ist riesig, doch es mangelt an einer einheitlichen Klassifizierung und der heutige Stand des Wissens zur Regeneration ist nicht in gesammelter Form zugänglich. Anbieter von Regeneratoren geben aus schutzrechtlichen Gründen keinen bzw. kaum Einblick in die Zusammensetzung und die Wirkweise ihrer Produkte. Eine toxikologische Bewertung ist im Zweifel zweckmässig. Zur Markteinführung von Regeneratoren werden heute keine bestimmten Anforderungen gestellt, ein Nachweis der Wirksamkeit aus einer Erprobungsstrecke ist sinnvoll.

Heute am Markt sind beispielweise Regeneratoren in Form von Naturbitumen, Mineralölen oder Fluxölen (tw. aus aufbereiteten Altölen), biogenen Produkten (Pflanzenöle, Fettsäuren, Harze, organische Lösungsmittel) und chemischen Erzeugnissen (Bsp. Siloxane). Teilweise sind die Regeneratoren gleich oder ähnlich den viskositätsverändernden Mitteln. ⁽²⁾

Die Hersteller beschränken die Anwendung bestimmter Produkte teilweise auf eine maximale Verwendungsrate an Asphaltgranulat und bieten oft unterschiedliche Produkte an, je nachdem ob im Asphaltgranulat Strassenbaubitumen oder Polymermodifiziertes Bitumen (PmB) enthalten ist. Die Dosierung wird vom Hersteller ‚eingestellt‘ oder empfohlen, meist in Abhängigkeit vom Erweichungspunkt Ring und Kugel, von der Nadelpenetration und der Menge des im Asphaltgranulat enthaltenen Bindemittels. ⁽²⁾

Obwohl die vollständige rheologische Regenerierung des verhärteten Bitumens im Asphaltgranulat durch Zugabe von Regeneratoren angestrebt wird, sind nicht alle Technologien zur Regeneration ziel-sicher und nicht alle auf dem Markt verfügbaren Regeneratoren sind gleichermassen in der Lage, die rheologischen Eigenschaften des frischen Zielbitumens wiederherzustellen. Insbesondere wenn hohe Anteile an Asphaltgranulat verwendet werden oder der Asphalt mehrmals rezykliert wird, entsteht in der Praxis häufig das Problem, dass das Bindemittel die Anforderungen laut Regelwerk nicht mehr erfüllt. Gerade beim Mehrfachrecycling können sich die Eigenschaften des resultierenden Bitumens im Asphaltmischgut bei jeder Recyclingstufe unvorteilhaft im Vergleich zu den Eigenschaften des ursprünglichen frischen Bitumens verändern, was das resultierende Gebrauchsverhalten des Asphalts nachteilig beeinflussen kann. ⁽⁹⁾

Ferner ist nicht eindeutig nachgewiesen, ob sich das Altbindemittel und der Regenerator im neuen Asphaltmischgut vollständig vermischen. Die Frage ist offen, ob die Bindemittelbestandteile eventuell noch in unterschiedlichen Phasen vorliegen oder ob prozesssicher eine ideale Homogenisierung gelingt. Der tatsächliche Vermischungsgrad des Altbindemittels und des Regenerators im fertigen Asphaltmischgut ist nicht zuverlässig prognostizierbar.

Die Prüfung der resultierenden rheologischen Bindemittelleigenschaften liefert dazu wertvolle Informationen. Dabei sind sich heute viele Experten einig, dass mit Hilfe des Dynamischen Scherrheometers die Prüfung der interessierenden Eigenschaften möglich ist ⁽⁷⁾.

In diesem Forschungsprojekt werden Anwendungen des Dynamischen Scherrheometers (DSR) zur Prüfung der Regeneration vorgestellt. Gleichzeitig ist in vielen Fällen eine Untersuchung des Additivs bzw. des regenerierten Bindemittels auf Basis von spektroskopischen Methoden zweckmässig, um die chemische Zusammensetzung und Auswirkungen auf das Bindemittel zu untersuchen und die Kompatibilität zwischen Additiv und Bindemittel sicherzustellen. Ebenso kann der Alterungszustand damit rasch

⁹ Hugener, M. & Kawakami, A. 2015. Forschungspaket Recycling von Ausbauasphalt in Heissmischgut: EP2: Mehrfachrecycling von Strassenbelägen, VSS 2005/453, Bundesamt für Strassen, Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK), 2015, Bericht 1510, Empa, Dübendorf, Schweiz.

und einfach festgestellt werden. Die Infrarotspektroskopie (FTIR) hat sich dabei in den letzten Jahren als ein geeignetes Verfahren etabliert. Korrelationen zwischen FTIR und DSR sind nachgewiesen.^(10, 11) Zusätzlich können durch eine vergleichende Beurteilung des Einflusses auf das Gebrauchsverhalten des Asphalts Aussagen zur Bindemittelhomogenität getroffen. Zu diesem Zweck sind Performance-Prüfungen an Asphaltprobekörpern im Technischen Regelwerk standardisiert (Kälteresistenz, Verformungsverhalten, Ermüdungsverhalten). Jedoch ist der Prüfaufwand erheblich und wenig praxisgerecht. Alternativ zu aufwändigen Asphaltprüfungen wurden daher jüngst in Deutschland Performance-Prüfungen an Mastixproben mit dem Dynamischen Scherrheometer vorgeschlagen⁽¹²⁾, deren umfangreiche Erprobung anhand von realen Bauprojekten noch aussteht.

Erkenntnisse aus systematischen Untersuchungen zum Mehrfachrecycling sind kaum veröffentlicht (vgl. Kapitel 4.5). Viele Publikationen unter dem Titel Mehrfachrecycling beschränken sich auf Bitumenuntersuchungen nach Regeneration, was aber letztlich jeweils einem ersten Recyclingschritt entspricht^(13, 14, 15).

Die derzeit noch relativ geringe Anzahl an Publikationen zum Mehrfachrecycling ist vermutlich auch darin begründet, dass Mehrfachrecycling erst bei Recyclinganteilen von über 50 % relevant ist, was aber in vielen Ländern noch nicht üblich ist. Unterhalb eines Recyclinganteils von 50 % ist der Anteil an mehrfach rezykliertem Material klein, und entsprechend ist sein Einfluss auf die Mischguteigenschaften gering. Der Einfluss nimmt vermutlich deutlich zu, wenn Zugabebindemittel verwendet werden, die sich chemisch vom ursprünglich verwendeten Bitumen unterscheiden, beispielweise bei Recyclingmischgut mit hochmodifizierten PmB oder bei der Zugabe von Regeneratoren, die nicht erdölbasiert sind.

Insbesondere in den D-A-CH-Ländern wird für Asphaltdeck- und Asphaltbinderschichten zunehmend ein Polymermodifiziertes Bitumen (PmB) als Bindemittel verwendet. Daher fällt in der Praxis vermehrt Asphaltgranulat aus PmB-haltigen Asphaltdeckschichten an. Systematische Untersuchungen dazu, wie ein PmB-haltiges Asphaltgranulat in idealer Weise aufbereitet werden kann, sind nicht öffentlich zugänglich. Vermutlich wurde im Zuge von Herstellung, Einbau und Gebrauch zumindest ein Teil der Polymerketten in einer PmB-haltigen Asphaltschicht geschädigt.

In diesem Forschungsprojekt wird auch das Mehrfachrecycling von PmB-haltigen Asphaltdeck- und -binderschichten untersucht. Es liefert somit Beiträge zur mehrfachen Wiederverwendung von Asphalt mit speziellem Fokus auf Deck- und Binderschichten mit PmB, sowohl mit Bezug zur Forschung als auch zur Praxisanwendung. Damit sollen in den D-A-CH Ländern die Recyclingprozesse verbessert werden, um ein möglichst effizientes Vorgehen in der Praxis zu erreichen und qualitativ hochstehende Recyclingbeläge über mehrere Generationen zu erhalten.

¹⁰ <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119495>

¹¹ Influence of selected reactive oxygen species on the long-term aging of bitumen
Kristina Hofer, Johannes Mirwald, Daniel Maschauer, Hinrich Grothe, Bernhard Hofko; submitted to Materials and Structures (2022)

¹² Büchner, J. 2021. Prüfung von Asphaltmastix im Dynamischen Scherrheometer. Dissertation, Technische Universität Braunschweig, Institut für Straßenwesen, Schriftenreihe Straßenwesen, Heft 38, Braunschweig.

¹³ Yang, S.-H. & Lee, L.-C. 2016. Characterizing the chemical and rheological properties of severely aged reclaimed asphalt pavement materials with high recycling rate. Construction and Building Materials, 111: pp. 139-146.

¹⁴ He, H., Zhang, E., Fatokoun, S. & Shan, L. 2018. Effect of the softer binder on the performance of repeated RAP binder. Construction and Building Materials, 178: pp. 280-287.

¹⁵ Huang, S.-C., Pauli, A. T., Grimes, R. W. & Turner, F. 2014. Ageing characteristics of RAP binder blends – what types of RAP binders are suitable for multiple recycling? Road Materials and Pavement Design, 15:sup1, 113-145, DOI: 10.1080/14680629.2014.926625.

2.3 Forschungspartner und Projektziel

Um bestehende Wissenslücken zu füllen insbesondere zur prozesssicheren Bitumenregeneration und zur mehrfachen Wiederverwendung von Asphaltgranulat mit Polymermodifiziertem Bitumen (PmB), wurden von den nationalen Forschungsgesellschaften der Länder Deutschland, Österreich und Schweiz (D-A-CH-Länder) – das sind die Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V. in Deutschland (FGSV), der Schweizerische Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute in der Schweiz (VSS) und die Forschungsgesellschaft Straße-Schiene-Verkehr in Österreich (FSV) – im Oktober 2019 das D-A-CH Forschungsprojekt *Mehrfachrecycling im Strassenbau* (MARS) gestartet. Die Forschungsnehmer sind (in alphabetischer Reihenfolge): die Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), der Forschungsbereich Straßenwesen des Instituts für Verkehrswissenschaften an der Technischen Universität Wien (TUW), das Institut für Straßenwesen (ISBS) an der Technischen Universität Braunschweig (TUBS) und der Lehrstuhl für Verkehrswegebau (LVW) an der Ruhr-Universität Bochum (RUB).

Ziel des D-A-CH Forschungsprojekts *Mehrfachrecycling im Strassenbau* ist die Simulation der mehrfachen Wiederverwendung von Asphalt mit PmB, um dazu verbleibende technische Fragen im Labormassstab zu klären. Es sollen wesentliche, neue Erkenntnisse zum Mehrfachrecycling gesammelt werden, um in den D-A-CH Ländern ein möglichst effizientes, wissenschaftlich basiertes, prozesssicheres und praxistaugliches Vorgehen bei der mehrfachen Wiederverwendung von Asphalt unter Berücksichtigung der jüngsten Forschungsergebnisse der Forschungsnehmer zu gewährleisten. Ergebnis ist die Erstellung von praxistauglichen Empfehlungen bezüglich der mehrfachen Wiederverwendung von Ausbauasphalt, welche als Grundlage zur Fortschreibung der nationalen Regelwerke in den D-A-CH Ländern herangezogen werden können.

Das Projekt ist auf den Labormassstab fokussiert. Die prinzipielle Vorgehensweise zeigt Abbildung 1. Unter dem Begriff «künstliches RAP» ist Asphaltgranulat zu verstehen, das unter Laborbedingungen erzeugt wird.

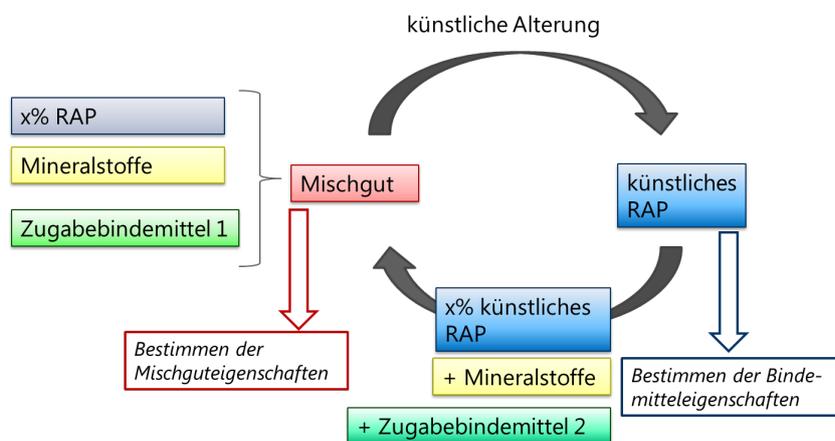


Abbildung 1. Mehrfache Wiederverwendung im Labormassstab (schematisch); RAP...Asphaltgranulat.

Um reale Bedingungen im Labormassstab realitätsnah zu berücksichtigen, werden im Labor zwei grundlegende Veränderungen des Asphaltgranulats bei der mehrfachen Wiederverwendung simuliert: die Bitumenalterung und die Veränderung der Korngrößenverteilung infolge des Fräs- und Brechvorganges.

Die zeittraffende Simulation der Bindemittelalterung im Labor sollte idealerweise zu einer ähnlichen Degeneration des Bindemittels führen, wie sie unter realen, jahrelangen Gebrauchsbedingungen auftritt. Da für die Simulation des Mehrfachrecyclings grössere Mengen an Mischgut (> 100 kg) hergestellt und geprüft werden müssen, ist aus praktischen Gründen nur eine Beschleunigung der Alterung über die

Temperatur an losem Mischgut möglich. Es ist festzuhalten, dass auch die Alterung im Freiland keineswegs einheitlich verläuft und durch unterschiedliche Faktoren wie Klima, Verkehr, Belagseigenschaften beeinflusst wird.

Ferner ist zu berücksichtigen, dass die Mineralstoffe im Zuge der Rückgewinnung von Ausbausphal beim Fräs- und Brechprozess geschädigt werden und dadurch die ursprüngliche Korngrößenverteilung im Asphaltmischgut verändert wird. Untersuchungen bei der Empa⁽⁹⁾ haben gezeigt, dass das Fräsen zu einer Verringerung des Anteils an grober Körnung führt. Es wurde festgestellt, dass das Fräsen kaum Füller erzeugte (bzw. wurde er durch das Fräswasser weggespült), der Anteil an Feinkorn nahezu gleichblieb, während die Sandfraktion die grösste Zunahme aufwies. Hinsichtlich der Kornrundung hast sich gezeigt, dass sich diese bei den groben Körnern kaum veränderte, während der Anteil der vollständig gerundeten Körner, mit Ausnahme der grösseren Kornfraktionen, deutlich abgenommen hat.

In der Praxis werden für das Fräsen üblicherweise grosse Maschinen mit entsprechender Fräsleistung eingesetzt. Kleine Fräsmaschinen (bspw. für Gehsteige) können für grobkörniges Mischgut nicht verwendet werden und produzieren feineres Asphaltgranulat. Weil grosse Fräsmaschinen im Labor nicht eingesetzt werden können und kleine Fräsmaschinen nicht realitätsnah sind, kann die Schädigung der Mineralstoffe im Labor nicht praxisgerecht simuliert werden. In diesem Projekt wird reales Fräsgut nur als Materialzugabe verwendet, das erneute Auffräsen wird nicht simuliert.

Ein weiterer wesentlicher Aspekt bei der Mischgutproduktion im Rahmen der Wiederverwendung ist das Vermischen der Komponenten zum resultierenden Asphaltmischgut. Insbesondere ist darauf zu achten, dass das Mischen bei einer ausreichend hohen Temperatur und über eine ausreichend lange Zeitdauer erfolgt, sodass die feinen Gesteinsfraktionen keine Verklumpungen bilden und das Asphaltgranulat vollständig aufgeschlossen wird. Vom *Black Rock Effekt* spricht man in dem Zusammenhang, wenn Mineralstoffe von sehr hartem Bindemittel umhüllt verbleiben, die nicht durch Zugabebindemittel oder Regeneratoren aufgeschlossen und folglich homogenisiert werden können. Es ist bekannt, dass der Mischprozess im Labor abhängig vom eingesetzten Labormischer, der Mischkinematik und dem Mischwirkungsgrad deutlich von jenem an der Asphaltmischanlage abweichen kann⁽¹⁶⁾.

Beim wiederholten Recycling spielt der Zugabeanteil an Asphaltgranulat eine wichtige Rolle⁽¹⁷⁾. Bei einem Recycling-Anteil von 20 % ist bereits nach dem dritten Recycling-Zyklus nur noch 1 % des Ausgangsmaterials vorhanden, wenn die Recyclingrate konstant gehalten wird. Auch bei einem Anteil von bis zu 40 % ist der Einfluss immer noch von geringer Bedeutung und beträgt weniger als 16 %. Wird die Zugaberate auf 60 % erhöht, sind immerhin 36 % (60 % von 60 %) des Mischguts mehrmals rezykliert worden und erst dann ist ein entsprechend grösserer Einfluss zu erwarten (Abbildung 2). Der Anteil des mehrfach rezyklierten Materials nimmt quadratisch mit dem mittleren Recyclinganteil zu und beträgt bei 70 % Zugabe schon 49 %.

¹⁶ Wistuba, M., Mollenhauer, K. & Walther, A. 2013. Ermittlung der Streuung dimensionierungsrelevanter Eingangsgrößen für Asphalte. Schlussbericht, Institut für Straßenwesen, Technische Universität Braunschweig, Forschungsprojekt FE 04.0204/2006/AGB i. A. des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, erschienen in: Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 1087. Kurzfassung erschienen in Straße und Autobahn, 5.2013, 366-376, Kirschbaum Verlag, Bonn.

¹⁷ Hugener, M. & Kawakami, A. 2015. Forschungspaket Recycling von Ausbausphal in Heissmischgut: EP2: Mehrfachrecycling von Strassenbelägen. VSS 2005/453, Bundesamt für Strassen, Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK), Bericht 1510, Empa, Dübendorf, Schweiz.

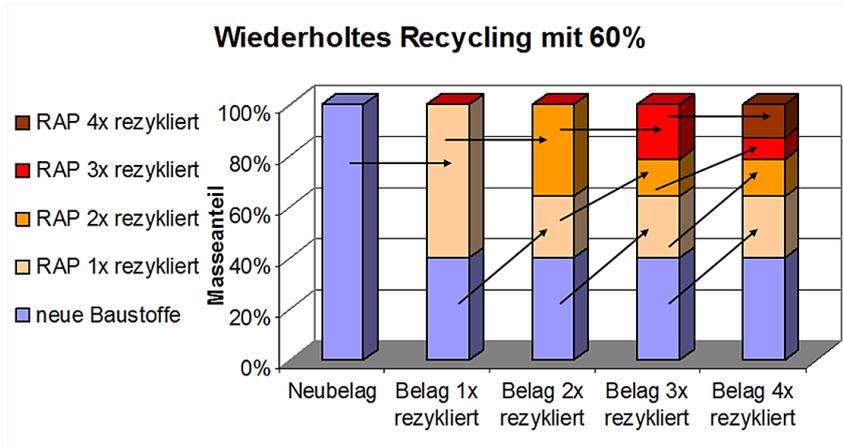


Abbildung 2. Beispiel für Mehrfachrecycling bei konstanter Zugabe von 60 % Asphaltgranulat (RAP).

Es macht für dieses Forschungsprojekt wenig Sinn, Mehrfachrecycling mit einem Recyclinganteil von unter 50 % zu untersuchen, solange die zugegebenen Komponenten immer gleichbleiben. Es wird daher ein Zugabeanteil an Asphaltgranulat von 50 % für die Asphaltdeckschicht und von 70 M.-% für die Asphaltbinderschicht gewählt (siehe Kapitel 6.1).

3 Überblick zu den Arbeitspaketen

Das Forschungsprogramm setzt sich aus fünf Arbeitspaketen zusammen:

- AP-1 Zusammenstellung des Standes des Wissens in den D-A-CH Ländern und der internationalen Literatur unter Berücksichtigung der geltenden nationalen Regelwerke
- AP-2 Identifikation von praxisgerechten Verfahren zur Prüfung wesentlicher Eigenschaften auf Bindemittlebene
- AP-3 Validierung der in Teil 2 ausgewählten Verfahren auf Asphaltebene
- AP-4 RAP-Management und -Analyse
- AP-5 Erstellung eines Leitfadens für Mehrfachrecycling: Der Leitfaden wird zum Projektende als eigenes Dokument ergänzend zum Schlussbericht vorliegen. Er soll praxistaugliche Anleitungen zur «best-practice» geben, insbesondere hinsichtlich des Managements und der Analyse des Asphaltgranulats, des Vorgehens bei der Regeneration des Altbindemittels und bei der grosstechnischen Umsetzung der in diesem Projekt erarbeiteten Lösungen.

Die Zuständigkeiten zu den Arbeitspaketen sind unter den Forschungsnehmern gemäss Tabelle 1 aufgeteilt. Die TUBS übernimmt die Gesamtprojektleitung.

Tabelle 1: Übersicht über die Arbeitspakete mit den beteiligten Forschungsstellen (Leiter der Arbeitspakete sind unterstrichen)

Forschungsstelle	TUW	TUBS (Projektleitung)	Empa	RUB
AP-1 Stand des Wissens	<u>X</u>	X	X	X
AP-2 Bindemittlebene	X	<u>X</u>	-	-
AP-3 Asphaltebene	X	X	<u>X</u>	-
AP-4 RAP-Management und -Analyse	-	-	-	<u>X</u>
AP-5 Erstellung eines Leitfadens	X	<u>X</u>	X	X

4 AP-1 Stand des Wissens

Im Arbeitspaket AP-1 ist der Stand des Wissens zum Asphaltrecycling in den D-A-CH Ländern und in der internationalen Literatur unter Berücksichtigung der geltenden nationalen Regelwerke zusammengestellt.

Übergeordnet sind die Europäischen Regelungen (insbes. europäische Bauproduktenverordnung ⁽¹⁸⁾).

Die gesetzlichen Vorgaben und die Technischen Regelwerke in den D-A-CH Ländern schreiben eine nachhaltige Verwertung von Strassenausbaustoffen im höchst möglichen Ausmass vor. Asphaltrecycling ist in den D-A-CH Ländern durch vielfältige technische Vorschriften umfangreich und im internationalen Vergleich auf hohem Niveau geregelt. Die technischen Vorschriften sind im D-A-CH Ländervergleich insgesamt ähnlich. Eine zusammenfassende Gegenüberstellung der Regelungen zum Asphaltrecycling in den D-A-CH Ländern zeigt Tabelle 2, auf die einzelnen technischen Regelungen wird in den Unterkapiteln näher eingegangen.

In Deutschland gibt es regionale Unterschiede, wo es in einigen Bundesländern eigene landesspezifische Regelungen gibt (ergänzend und teils auch abweichend vom nationalen Regelwerk). So schränken einige Bundesländer die Verwendung von Asphaltgranulat in Heissmischgut ein, während in anderen Bundesländern hohe Recyclinganteile seit vielen Jahren Standard sind (siehe Kapitel 4.2).

In Österreich wird, mangels Asphaltmischanlagen mit Paralleltrommel, der Grossteil des anfallenden Ausbauasphalts für untergeordnete Zwecke wiederverwertet (Downcycling), die Wiederverwendung im Heissmischverfahren ist von untergeordneter Bedeutung und die Zugaberaten sind dann meist unter 20 M.-%. Für Mehrfach-Recycling sind so geringe Zugabemengen kaum von Relevanz, denn Mehrfachrecycling rechnet sich erst bei einer ausreichend grossen Zugabemenge an Asphaltgranulat ⁽⁹⁾.

In der Schweiz gibt es in Ermangelung von Großbaustellen das Problem, dass Ausbaupasphalt fast ausschließlich in Kleinmengen anfällt und daher eine sortenreine Lagerung vielfach nicht praktikierbar ist. Nachholbedarf gibt es auch in der rheologischen Charakterisierung von Bindemitteln, insbesondere im Rahmen der Regeneration.

In allen D-A-CH Ländern besteht in der Praxis für eine hohe Zugaberate auch eine betriebswirtschaftliche Hemmschwelle. Die für eine hohe Zugaberate notwendige Installation einer Paralleltrommel ist teuer und ihr Betrieb aufwendig. Sie erfordert mitunter eine neue Betriebsstätten-Genehmigung (mit entsprechenden Auflagen), rechnet sich erst bei grossen Mengen und ist daher nicht immer eine wirtschaftlich sinnvolle Option für den Produzenten. Mitunter wird daher eine Zugaberate von unter 30 M.-% Asphaltgranulat bei den Asphaltproduzenten als die mittelfristig wirtschaftlichste Lösung gesehen. ⁽²⁾

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Erhöhung der Zugaberate im Heissmischverfahren und die mehrfache Wiederverwendung von hochwertigen Asphaltsschichten im Heissmischverfahren im Sinne der Umsetzung der EU-Vorgaben und der SDGs ⁽¹⁹⁾ in den D-A-CH Ländern weiter forciert werden sollten. Seitens der öffentlichen Hand sollten geeignete Förderungen und Rahmenbedingungen geschaffen werden, um langfristig ein effizientes Mehrfachrecycling mit ausreichend hohen Zugaberaten von Asphaltgranulat erzielen zu können.

¹⁸ Verordnung (EU) Nr. 305/2011 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 9. März 2011 zur Festlegung harmonisierter Bedingungen für die Vermarktung von Bauprodukten und zur Aufhebung der Richtlinie 89/106/EWG des Rates, ABl. Nr. L 88/5 vom 4.4.2011.

¹⁹ Sustainable Development Goals (SDGs), globale Ziele für eine nachhaltige Entwicklung; UN Sustainable Development Summit, New York, 2015.

Tabelle 2: Zusammenfassende Gegenüberstellung zum Asphaltrecycling in Deutschland, Österreich und der Schweiz

		Österreich	Deutschland	Schweiz
Ausbau		<i>Fräsen</i> : keine spezielle Regelung; vertragsrechtliche Bestimmungen im LB-VI RVS 11.03.22: nur einige Hinweise, z. B. lagenweise Fräsen bei trockenem Wetter, Trennung der Schichten	H FA: Hinweise zum <i>Fräsen</i> , Fräsarten, Fräsmaschinen M WA: zusätzliche Hinweise zum Fräsen (lagenweise)	VSS 40 405: Arbeitsschutz; sonst nicht geregelt
	Lagerung	Merkblatt BRV: Lagertypen je nach Baustoff und Lagerdauer RVS 11.03.22: Hinweise (sinngemäss wie in D)	Hinweise in M WA, Abschnitt 4.2: - Schutz vor Feuchtigkeitsaufnahme - Trennung nach Herkunft bzw. Material - Ev. Trennung nach Stückgrösse - Ev. Massnahmen gegen Verkleben	BAFU-Richtlinie
Umwelt und Grenzwerte		AWG (Abfallwirtschaftsgesetz): Grundlagen, Abfallbegriff, Umsetzung EU-Recht	KrWG (Kreislaufwirtschaftsgesetz): Grundlagen, Abfallbegriff, Verwertungsverfahren, Umsetzung EU-Recht	USG (Umweltschutzgesetz): Grundlagen, Abfallvermeidung
		ALSAG (Altlastensanierungsgesetz): ALSAG-Beitrag	RuVA-StB: Für Recycling nur mehr Verwertungsklasse A (PAK \leq 25 mg/kg im RA, Phenolindex \leq 0,1 mg/l im Eluat); ungebundene Verwendung nur in Ausnahmefällen!	VVEA (früher TVA): Grenzwert 250 mg/kg PAK im Asphaltgranulat
		RBV: <i>Qualitätsklassen</i> mit Grenzwerten, u. a. PAK, für Heissmischgut max. 20 mg/kg im Asphaltgranulat bzw. 300 mg/kg, wenn in speziellen Anlagen behandelt und Resultat \leq 20 mg/kg PAK; Phenole kommen nicht vor; Verwendungsverbote/-beschränkungen		BAFU-Richtlinie: Verwendungsbeschränkungen, z. B. keine hydraulische Bindung von Asphaltgranulat
Charakterisierung	Bezeichnung	in Mischgut: EN 13108-8 mit Abweichungen lt. ÖN B 358x (Qualitätsklassen nach RBV) <i>Schema: U RA d/D + Qualitätsklasse</i>	für ungebundene Verwendung: Bezeichnung laut ÖNORM B 3140 Abschnitt 8.2 (inkl. bautechnische Güteklassen)	Nach DIN EN 13108-8 mit den Abweichungen und Ergänzungen aus der TL AG-StB; siehe Formular TL AG-StB Anhang 3.1
	Fremdstoffe	F-Kategorien lt. ÖN EN 13108-8; Asphaltgranulat für Mischgut muss Fremdstoffkategorie F ₅ aufweisen lt. ÖN B 3580-1 und 2	FM-Kategorien laut TL AG-StB, Kategorie-Bezeichnung abweichend von EN	Nach SN EN 13108-8 NA: F1 für Deckschichten und Binder; F5 für Trag- u. Fundationsschichten; zusätzliche, teilweise abweichende Regelungen zu Fremdstoffen lt. BAFU-Richtlinie
Fremdstoff-Gruppen und Grenzen der Fremdstoff-Kategorien laut ÖNORM/DIN/SN EN 13108-8				

			Österreich	Deutschland	Schweiz	
Charakterisierung (fortgesetzt)	Mechanische Eigenschaften	bei Verwendung in Heissmischgut	Gestein muss den Anforderungen der Gesteinsklasse entsprechen (sh. ÖN B 358x) Sonderregelung: Massenanteil gebrochener/gerundeter Körner (C_{tr} -Wert) laut RVS 08.97.05 u. 06 bzw. RVS 11.03.22 für bestimmte Gesteinsklassen.	Zu bestimmende Kennwerte lt. TL AG-StB siehe TL AG-StB Anhang 3.1.	SN 640 431-8a-NA, Ziffer 13/Tabelle 5: Erleichterte Regelungen für Anteil gebrochener Oberflächen in Gesteinskörnung ≥ 4 mm des Asphaltgranulats	
			laut ÖN B 358x: Bindemittel ist nach Erweichungspunkt RuK zu bewerten, bei PmB zusätzlich elastische Rückstellung	Eignung des Bindemittels gemäss Erweichungspunkt RuK laut M WA: im Mittel nicht mehr als 70 °C (Einzelwerte max. 77 °C), sonst weitere Untersuchungen; BTSV ersetzt allmählich Bestimmung von Erweichungspunkt RuK (Regelungen zum Bindemittel nach ZTV Asphalt-StB beachten); rechnerischer EW RuK lt. TL-Asphalt-StB	Erweichungspunkt RuK aus dem zugegebenen Bindemittel und dem Bindemittel aus Asphaltgranulat ist zu bestimmen. Resultierender Erweichungspunkt RuK muss den Anforderungen der ausgewählten Mischgutsorte entsprechen (laut SN 640 431-1-NA)	
			Keine Formeln zur Homogenität des Granulats	Formeln zur Homogenität des Granulats laut TL Asphalt-StB bzw. M WA	Keine Formeln zur Homogenität des Granulats	
	ungebunden	ÖNORM/DIN/SN EN 13242 – Gesteinskörnungen für ungebundene und hydraulisch gebundene Gemische für Ingenieur- und Strassenbau				
		nationale Umsetzung der ÖN EN 13242: ÖNORM B 3132 (CE-Kennzeichnung, Sieblinien, mechanische Anforderungen, ...); zusätzlich ÖNORM B 3140 – Rezyklierte Gesteinskörner für ungebundene und hydraulisch gebundene Anwendung und Beton: <i>Qualitätsklassen</i> lt. RBV und <i>bautechnische Güteklassen</i> – Verwendungsgebiete, Sieblinien, weitere mechanische Anforderungen	Asphaltgranulat soll nur in Ausnahmefällen ungebunden verwendet werden (generell kein Downcycling)	nationale Umsetzung der SN EN 13242-NA		

		Österreich	Deutschland	Schweiz
Recycling	ungebunden	<p><i>ungebundene (Trag-)Schichten:</i> RVS 03.83.63: insbesondere Bautype AS3 RVS 08.15.01: obere und untere ungebundene Tragschichten RVS 08.15.02: Spezifizierung der Anforderungen an die Bautype AS3 ÖN B 3132 ... sh. oben</p>	<p>ungebundene Tragschichten, Frostschutzschichten nur in Ausnahmefällen (RuVA-StB)</p>	<p>Die Recycling Grundnorm SN 670 071 legt Anwendungsgebiete für RA fest: RC-Kiesgemisch A RC-Asphaltgranulatgemisch: EN 13242 iVm SN 670 119-NA</p>
	gebunden	<p><i>Asphaltmischgut:</i> empirische oder GVO Anforderungen. ÖN EN 13108 und ÖN B 358x RVS 08.97.05: Empirisch RVS 08.97.06: am Gebrauchsverhalten orientiert (GVO) RVS Merkblatt 11.03.22: Verwendung höherer RA-Anteile, Mischverfahren, max. Zugabemengen RVS 08.17.01: mit Bindemitteln stabilisierte Tragschichten ZMV; BMV; Schichten ST-Z, ST-T, ST-BZ</p>	<p><i>in plant:</i> <i>Heissmischverfahren:</i> TL Asphalt-StB ZTV Asphalt-StB M WA, TL AG-StB Hinweis aus M WA bzw. TL AG-StB: max. Granulat-Zugabemenge begrenzt durch Homogenität und Mischanlagentyp <i>Kaltmischverfahren:</i> M VB-K <i>Warmmischverfahren:</i> M TA</p>	<p>Gesteinskörnungen für Asphalt: EN 13043 iVm SN 670 103-NA Asphaltmischgut mit Ausbaupasphalt: EN 13108-8 iVm SN 670 431-8-NA, weitere SN+EN-Normen Stabilisierung, bitumengebunden: (SN 640 506), SN 640 490</p>
	Praxis		<p><i>in situ:</i> <i>Kalteinbau</i> – M KRC <i>Rückformen</i> – M RF: Reshape, Remix, Remix compact</p>	
	<p>hauptsächlich ungebunden/nicht hochwertige Wiederverwendung, manchmal auch geringe Granulat-Anteile (um 10%) in Heissmischgut. Wenige Mischanlagen mit Paralleltrommel, die hohe Granulat-Zugaberaten ermöglichen würden.</p>	<p>je nach Bundesland unterschiedliche Regelungen und zulässige Granulat-Zugaberaten. Teilweise sind hohe Anteile, z. B. Hamburg, Baden-Württemberg auch in Deckschichten, zulässig und erprobt</p>	<p>(bei Bundesprojekten) hauptsächlich in Fundationsschichten und Tragschichten, dort aber auch hohe Anteile bis ca. 80% PAK-Belastung zum Teil problematisch.</p>	

4.1 Europäische Normen

Die Europäischen Normen (EN) sind in den D-A-CH Ländern unter den länderspezifischen Bezeichnungen DIN EN (Deutschland), ÖNORM EN (Österreich) und SN EN (Schweiz) national umgesetzt.

Die EN behandeln übergeordnete allgemeine Bestimmungen zur Kreislaufwirtschaft. Detaillierte technische Regeln bezüglich der Wiederverwendung von Asphalt unter besonderer Berücksichtigung der landesspezifischen Gegebenheiten enthalten die nationalen Regelwerke, die von den jeweiligen Forschungsgesellschaften der D-A-CH Länder herausgegeben werden (FGSV, FSV, VSS).

• EN 13108-x

Die EN 13108-x (mit mehreren Teilen) regeln die Anforderungen an das Asphaltmischgut ⁽²⁰⁾.

In Deutschland ist die Verwendung von Asphaltgranulat für die Herstellung von Asphaltmischgut grundsätzlich für alle Asphaltmischgutarten und -sorten zulässig, außer für offenporigen Asphalt. Für Splittmastixasphalt sind gesonderte Nachweise nötig.

In Österreich stellen die ÖNORMen B 3580 bis 3588 die nationalen Regeln zur Umsetzung der EN 13108 dar. Hier ist die Verwendung von Asphaltgranulat für die Herstellung von Asphaltmischgut grundsätzlich für alle Asphaltmischgutarten und -sorten zulässig, ausser für Gussasphalt. Für Offenporigen Asphalt und Splittmastixasphalt sind gesonderte Nachweise nötig. Bei Asphaltbeton, der nach dem empirischen Ansatz konzipiert ist ⁽²¹⁾ (im Gegensatz zum GVO Ansatz ⁽²²⁾), ist die Zugabe zu Deckschichtmischgutsorten der Klassen A2, A3 und A4 unzulässig. Der Massenanteil des zugegebenen Asphaltgranulats ist in Prozent, gerundet auf 5 %, anzugeben. Es muss die Fremdstoffgehalt-Kategorie F₅ gemäss ÖN EN 13108-8 ⁽²³⁾ eingehalten werden. Die Bezeichnung des Asphaltgranulats und Fremdstoffkategorien erfolgt nach ÖN EN 13108-8:

U RA d/D Qualitätsklasse nach RBV (Beispiel: 22 RA 0/16 B-B)

- U* maximale Stückgrösse im Ausbausphalt, angegeben als Siebgrösse, in mm
- RA* Bezeichnung für Asphaltgranulat (engl.: reclaimed asphalt)
- d/D* unterer und oberer Grösstkorndurchmesser der Gesteinskörnung in Asphaltgranulat nach Extraktion, angegeben in mm

Der Fremdstoffgehalt wird in ÖNORM EN 13108-8 erläutert, die Prüfverfahren zur Bestimmung des Fremdstoffgehalts in Ausbausphalt regelt die ÖN EN 12967-42:2013 ⁽²⁴⁾. Die Fremdstoffe werden in 2 Gruppen unterteilt:

- Gruppe 1, z. B.: Zementbeton, einschliesslich Zementprodukte; Ziegel; Materialien der umgebenden Trag-schicht (mit Ausnahme natürlicher Gesteinskörnungen); Zementmörtel und Metall.
- Gruppe 2, z. B.: synthetische Materialien; Holz; Kunststoffe.

Die Klassifizierung in F-Klassen erfolgt nach dem Fremdstoffgehalt:

- Bei der Kategorie F₁ darf der Gehalt an Stoffen der Gruppe 1 nicht grösser als 1 M-% und der Gehalt an Stoffen der Gruppe 2 nicht grösser als 0,1 M-% sein.
- Bei der Kategorie F₅ darf der Gehalt an Stoffen der Gruppe 1 nicht grösser als 5 M-% und der Gehalt an Stoffen der Gruppe 2 nicht grösser als 0,1 M-% sein.
- Bei der Kategorie F_{angegeben} werden der Fremdstoffgehalt und die -art angegeben.

²⁰ Europäische Normenreihe EN 13108-x: Asphaltmischgut – Mischgutanforderungen – Teil 1: Asphaltbeton; Teil 5: Splittmastixasphalt; Teil 6: Gussasphalt; Teil 7: Offenporiger Asphalt.

²¹ . ÖNORM B 3580-1:2018-02-01, Asphaltmischgut – Mischgutanforderungen – Asphaltbeton – Teil 1: Empirische Anforderungen – Regeln zur Umsetzung der ÖNORM EN 13108 1.

²² . ÖNORM B 3580-2:2018-02-01, Asphaltmischgut – Mischgutanforderungen – Asphaltbeton – Teil 2: Gebrauchsverhaltensorientierte Anforderungen – Regeln zur Umsetzung der ÖNORM EN 13108-1.

²³ ÖNORM EN 13108-8:2016-11-01, Asphaltmischgut – Mischgutanforderungen – Teil 8: Ausbausphalt.

²⁴ ÖNORM EN 12697-42:2013-01-15, Asphalt – Prüfverfahren für Heiasphalt – Teil 42: Fremdstoffgehalt in Ausbausphalt.

Abschnitt 5.4 der ÖNORM EN 13108-8 beschreibt allgemein, wie die Homogenität des Asphaltgranulats zu bestimmen ist. Es wird jedoch keine konkrete Formel angeführt und es gibt keine weitere nationale Festlegung in den ÖNORMen B dazu.

Auch in der Schweiz ist die EN 13108-x national umgesetzt. Demnach darf Ausbauasphalt in allen regelwerkskonformen Asphaltmischgutarten und -sorten verwendet werden, ausgenommen sind lärmindernde halb-offene Asphalte und Splittmastixasphalt, für den die Verwendung von Ausbauasphalt nur nach besonderer Vereinbarung der Vertragspartner zulässig ist.

4.2 Erfahrungen und regulative Vorgaben in Deutschland

Neben der Literaturrecherche wurde ein Interview mit einem deutschen Unternehmen geführt, um die entsprechenden Praxiserfahrungen hier aufzuführen (Zusammenfassung des Interviews siehe Anhang)

Insgesamt sind die mineralischen Abfälle mit mehr als 260 Mio. Tonnen (2017) der mengenmäßig größte Abfallstrom in Deutschland. Dieser Abfallstrom unterteilt sich in Bau- und Abbruchabfälle (ca. 215 Mio. Tonnen) sowie die industriellen Nebenprodukte (ca. 48 Mio. Tonnen), zu denen insbesondere Flugaschen aus Kohlekraftwerken und Eisenhüttenschlacken zählen (Quelle: www.bde.de). Die neue Mantelverordnung (siehe Kapitel 4.2.2) soll im Sinne der Kreislaufwirtschaft die Inanspruchnahme natürlicher Ressourcen vermeiden, indem möglichst hohe Verwertungsquoten für mineralische Abfälle erreicht werden.

Aktuell gibt es rund 260 Asphalt produzierende Firmen mit rund 660 stationären Asphaltmischanlagen (rund 1/5 davon sind mit Paralleltrommeln ausgestattet) und rund 3.000 Asphalt einbauende Firmen. In den Jahren 2007 bis 2017 wurden jährlich rund 40 Millionen Tonnen Asphalt produziert (rund 13 % der europäischen Asphaltproduktion), rund 30 % davon als Asphaltdeckschicht-Mischgut (davon rund 3 % als Gussasphalt) und 20 % als Asphaltbinderschicht- sowie 50 % als Asphalttragschicht-Mischgut. Der Bitumenverbrauch betrug in den Jahren 2014 bis 2017 jährlich rund 1,6 Millionen Tonnen, davon rund 30 % in Form von Polymermodifiziertem Bitumen (PmB).

2017 standen rund 13 Millionen Tonnen an Asphaltgranulat zur Verfügung, von denen über 85 % für die Produktion von Asphaltmischgut wiederverwendet wurden. Die restlichen 15 % entziehen sich in der Regel dem Zugriff der Asphaltindustrie. Die Skepsis gegenüber der Wiederverwendung von Asphaltgranulat in Deutschland ist gering und meist nur bei kommunalen Auftraggebern vorhanden, Land und Bund unterstützen das Asphaltrecycling. Die Wiederverwendungsmenge von Ausbauasphalt in Heissmischgut liegt in Deutschland seit annähernd 10 Jahren bei rund 25 % bezogen auf die gesamte Asphaltmischgutproduktion (Quellen: Asphalt in Figures 2017, www.eapa.org; www.asphalt.de).⁽²⁵⁾

Die Aufbereitung des Ausbauasphalts erfolgt durch separate Unternehmen meist durch mobile Aufbereitungsanlagen, die bei den Mischanlagen zum Einsatz kommen. In Ausnahmefällen existieren stationäre Anlagen. Das resultierende Asphaltgranulat wird in verschiedenen Stückgrößenfraktionen (0/8, 8/16 mm oder 0/16 oder 0/32 mm) hergestellt. Eine häufigere lagenweise Gewinnung des Ausbauasphalts wäre ideal. Aktuell gilt dies nur für Deckfräsgut. Allgemein kommt es zu keiner langen Lagerhaltung des Asphaltgranulats. Dies kommt insbesondere nur dann vor, falls das im Asphaltgranulat enthaltene Bindemittel zu hart ist und daher eine Verarbeitung in geringen Mengen von Nöten ist.

Basis für die rheologische Charakterisierung des Bindemittels sind trotz zunehmender Erprobung rheologischer Prüfverfahren noch immer klassische Methoden wie der Erweichungspunkt Ring und Kugel. Untersuchungen mit dem Dynamischen Scherrheometer finden in zentralen Laboren bereits routinemäßig statt, der flächendeckende Einsatz auf Mischanlagen scheint aber bisher noch nicht möglich zu sein (Kosten und Empfindlichkeit der Geräte).

Im Folgenden wird auf die technischen Regeln in Deutschland bezüglich der Wiederverwendung von Asphalt näher eingegangen, einen schematischen Überblick zeigt Abbildung 3.

²⁵ Wistuba, M. P. 2019. Straßenbaustoff Asphalt. Erste Auflage, Technische Universität Braunschweig, Institut für Straßenwesen, Braunschweig, ISBN 978-3-932164-16-3.

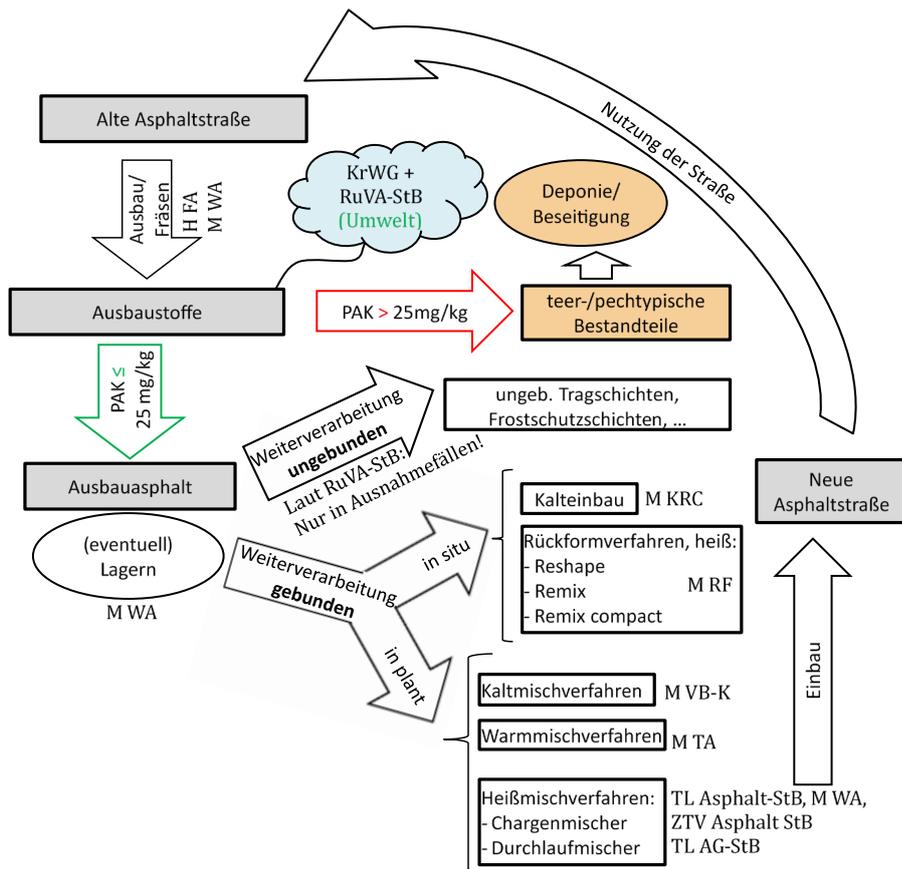


Abbildung 3. Schematischer Überblick zu den Technischen Regeln in Deutschland bezüglich der Wiederverwendung von Asphalt.

4.2.1 Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG)

Das KrWG ⁽²⁶⁾ ist die nationale Umsetzung der EU-Abfallrahmenrichtlinie. Das Gesetz gilt laut § 2 für die Vermeidung von Abfällen, die Verwertung von Abfällen (worunter auch das Recycling fällt), die Beseitigung von Abfällen und die sonstigen Maßnahmen der Abfallbewirtschaftung.

Die Abfallhierarchie der anzuwendenden Maßnahmen, also die Prioritätenfolge, die allen Rechtsvorschriften und politischen Maßnahmen im Bereich der Abfallvermeidung und Abfallbewirtschaftung zugrunde liegt, ist wie folgt (§ 6 KrWG):

- 1) Abfallvermeidung
- 2) Vorbereitung zur Wiederverwertung
- 3) Recycling
- 4) sonstige Verwertung, z. B. energetische Verwertung
- 5) Beseitigung

Es sind die ökologische Zweckmäßigkeit, die technische Machbarkeit und die wirtschaftliche Zumutbarkeit zu beachten. Die entstehenden Mehrkosten dürfen im Vergleich zu anderen Verfahren der Abfallbehandlung nicht unverhältnismäßig sein und es muss ein Markt für die gewonnenen Stoffe vorhanden sein oder geschaffen werden können.

§ 3 KrWG enthält Begriffsbestimmungen. *Abfälle* sind bewegliche Sachen, deren sich der Besitzer entledigen will oder entledigt hat oder deren Sammlung, Lagerung, Beförderung und Behandlung als Abfall erforderlich

²⁶ Kreislaufwirtschaftsgesetz vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212), zuletzt geändert durch Artikel 2 Absatz 9 des Gesetzes vom 20. Juli 2017 (BGBl. I S. 2808), Deutschland.

ist, um die öffentlichen Interessen nicht zu beeinträchtigen. *Recycling* ist jedes Verwertungsverfahren, durch das Abfallmaterialien zu Produkten, Sachen oder Stoffen entweder für den ursprünglichen Zweck oder für andere Zwecke aufbereitet werden (exklusive der energetischen Verwertung und der Aufbereitung zu Materialien, die für die Verwendung als Brennstoff oder zur Verfüllung dienen).

Die Verwertung von Abfällen wird in Anlage 2 KrWG näher bestimmt. Es sind dort die Verwertungsverfahren R 1 bis R 13 beschrieben. Für Asphaltrecycling von Bedeutung sind R 5 (Recycling und Rückgewinnung von anderen anorganischen Stoffen), R 11 (Verwendung von Abfällen, die bei einem der in R 1 bis R 10 aufgeführten Verfahren gewonnen werden) und R 13 (Lagerung von Abfällen bis zur Anwendung eines der in R 1 bis R 12 aufgeführten Verfahren (ausgenommen zeitweilige Lagerung bis zur Sammlung auf dem Gelände der Entstehung der Abfälle)). § 5 KrWG stellt das Ende der Abfalleigenschaft eines Stoffes fest, wenn ein Verwertungsverfahren durchlaufen wurde und

- 1) er üblicherweise für bestimmte Zwecke verwendet wird,
- 2) ein Markt für ihn oder eine Nachfrage nach ihm besteht,
- 3) er alle für seine jeweilige Zweckbestimmung geltenden technischen Anforderungen sowie alle Rechtsvorschriften und anwendbaren Normen für Erzeugnisse erfüllt sowie
- 4) seine Verwendung insgesamt nicht zu schädlichen Auswirkungen auf Menschen oder Umwelt führt.

§ 7 Abs. 2 stellt die Verwertungspflicht von Abfällen fest. Laut dem 2. Satz entfällt dieser Vorrang, wenn die Beseitigung der Abfälle den Schutz von Menschen und Umwelt am besten gewährleistet. Dies trifft z. B. für teer-/pechhaltige Ausbaustoffe zu.

4.2.2 Mantelverordnung für Ersatzbaustoffe und Bodenschutz

Ab 1. August 2023 wird die neue Mantelverordnung für den Umgang mit mineralischen Ersatzbaustoffen, Böden und Abfällen die Verwertung mineralischer Abfälle bundeseinheitlich regeln. Damit sind erstmals die nötigen Standards für die Herstellung und Verwertung mineralischer Ersatzbaustoffe für ganz Deutschland einheitlich festgelegt. Gleichzeitig macht die Mantelverordnung mit der Neufassung der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung erstmals deutschlandweit gültige Vorgaben für die Verfüllung von obertägigen Abgrabungen, wie zum Beispiel ehemaligen Kies- und Sandgruben. ⁽²⁷⁾

4.2.3 Technische Regelwerke und Empfehlungen

• Richtlinien für die umweltverträgliche Verwertung (RuVA-StB)

Die Richtlinien für die umweltverträgliche Verwertung von Ausbaustoffen mit teer-/pechtypischen Bestandteilen sowie für die Verwertung von Ausbauasphalt im Straßenbau (RuVA-StB) und die zugehörigen Erläuterungen regeln die umweltverträgliche Verwertung von Ausbaustoffen mit teer- und pechtypischen Bestandteilen und Ausbauasphalt ^(28, 29).

Die Straßenausbaustoffe werden je nach PAK-Gehalt im Feststoff und dem Phenolindex im Eluat ⁽³⁰⁾ in Verwertungsklassen eingeteilt (Tabelle 3). Zur Herstellung von Asphalt im Heißmischverfahren dürfen nur Ausbaustoffe der Verwertungsklasse A verwendet werden. Aus den der RuVA-StB beigelegten Rundschreiben des

²⁷ <https://www.bvse.de/sachverstand-bvse-recycling/alles-was-recht-ist/rechtsaenderungen/entwurf-mantelverordnung/2634-mantelverordnung-fuer-ersatzbaustoffe-und-bodenschutz.html>; abgerufen am 21. Februar 2022.

²⁸ Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Arbeitsgruppe Asphaltstraßen: Richtlinien für die umweltverträgliche Verwertung von Ausbaustoffen mit teer-/pechtypischen Bestandteilen sowie für die Verwertung von Ausbauasphalt im Straßenbau – RuVA Stb 01, Ausgabe 2001/Fassung 2005, FGSV Verlag, Köln, zuletzt geändert: Dezember 2015.

²⁹ Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Arbeitsgruppe Asphaltstraßen: Erläuterungen zu den Richtlinien für die umweltverträgliche Verwertung von Ausbaustoffen mit teer-/pechtypischen Bestandteilen sowie für die Verwertung von Ausbauasphalt im Straßenbau – RuVA Stb 01, Ausgabe 2001/Fassung 2005, FGSV Verlag, Köln 2005.

³⁰ Eluat: durch Elution herausgelöster Stoff; Elution: Herauslösen von Substanzen aus einer stationären Phase (<https://www.chemie.de/lexikon/Elution.html>, abgerufen am 31.01.2022).

Bundesministeriums für Verkehr ergibt sich, dass Materialien der Verwertungsklassen B und C für die anderen zulässigen Zwecke nicht mehr verwendet werden sollen (bei Bundesfernstrassen).⁽³¹⁾

Tabelle 3: Verwertungsklassen für Strassenausbaustoffe und Zuordnung von Verwertungsverfahren, nach RuVA Stb 01⁽²⁸⁾, Tabelle 1

Verwertungs- klasse	Art der Ausbaustoffe		Gesamtgehalt PAK im Feststoff [mg/kg] *)	Phenolindex im Eluat [mg/l]
A	Ausbauasphalt		≤ 25**)	≤ 0,1**)
B	Ausbaustoffe mit teer- bzw. pechtypi- schen Bestandteilen	vorwiegend steinkohlen- teertypisch	> 25	≤ 0,1
C		vorwiegend braunkohlen- teertypisch	Wert ist anzugeben	> 0,1

*) US Environmental Protection Agency (EPA, dt.: Umweltschutzbehörde)
 **) Der Nachweis kann entfallen, wenn im Einzelfall zweifelsfrei nachgewiesen ist, dass ausschließlich Bitumen oder bitumenhaltige Bindemittel verwendet werden.

Kapitel 4.1 der RuVA-Stb behandelt die Verwertung im Heißmischverfahren, wobei auf das M VAG (veraltetes Vorgängerdokument des M WA, siehe dort) verwiesen wird. Es ist festgelegt, dass Asphaltgranulat den TL AG-StB bzw. den ZTV BEA-StB entsprechen muss (siehe dort).

In Kapitel 4.2 der RuVA-Stb sind Kaltmischverfahren erläutert. Falls Material der Verwertungsklasse B oder C (Tabelle 3) zum Einsatz kommt, sind Grenzwerte im Eluat des Probekörpers für PAK und Phenolindex einzuhalten. Bezüglich der Verwendung von Ausbauasphalt in bitumengebundenen Tragschichten durch Kaltaufbereitung wird auf das Merkblatt M VB-K⁽³²⁾ (siehe dort) verwiesen, bzw. für die Verwendung in Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln auf das Merkblatt FGSV 826⁽³³⁾. Die Kaltverarbeitung ohne Bindemittel regelt Kapitel 4.3 der RuVA-Stb. Diese ist, in Ausnahmefällen zulässig für Straßenbaustoffe der Verwertungsklasse A, »wenn diese in Tragschichten unter wasserundurchlässigen Deckschichten eingebaut werden.« Hinsichtlich des Einbaus nach Kaltaufbereitung wird in Kapitel 6 auf die LAGA Bezug genommen und ein Mindestabstand zum Grundwasserleiter von 1 m genannt.

- **Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für die Bauliche Erhaltung von Verkehrsflächenbefestigungen (ZTV BEA-StB)**

Die ZTV BEA-StB⁽³⁴⁾ regeln u. a., dass Asphaltgranulat für dünne Asphaltdeckschichten in Heißbauweise mit oder ohne Versiegelung nicht verwendet werden darf (Kapitel 3.4.3.3.2).

- **Hinweise für das Fräsen (H FA)**

Die H FA⁽³⁵⁾ ergänzen die ZTV BEA-StB bezüglich des Fräsens von Asphaltbefestigungen und Befestigungen mit teer-/pechtypischen Bestandteilen und beinhaltet Erklärungen zur Vorbereitung von Frästätigkeiten und zum Arbeitsschutz. Insbesondere das Feinfräsen (siehe unten) dient zur Instandhaltung bzw. Instandsetzung nach ZTV BEA-StB oder zur Verbesserung des Profils und/oder Wiederherstellung der Verkehrssicherheit. Es kommen Großfräsen (Fräsbreite > 100 cm) und Kleinfräsen (Fräsbreite ≤ 100 cm) zum Einsatz.

Das Fräsen erfolgt im Kaltfräseverfahren, in einem oder mehreren Arbeitsgängen. Man unterscheidet Standardfräsen (Frästiefe bis ca. 35 cm und Fräsbreite 30 bis 220 cm abhängig vom Maschinentyp; Schnittlinienabstand

³¹ Laut einem der Rundschreiben in der RuVA-StB gelten diese nicht in allen deutschen Bundesländern.

³² Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Arbeitsgruppe Asphaltbauweisen: Merkblatt für die Verwertung von pechhaltigen Straßenausbaustoffen und von Asphaltgranulat in bitumengebundenen Tragschichten durch Kaltaufbereitung in Mischanlagen – M VB K, Ausgabe 2007, FGSV Verlag, Köln 2007.

³³ Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Arbeitsgruppe Asphaltbauweisen: Merkblatt für die Verwendung von Ausbauasphalt und pechhaltigen Straßenaufbruch in Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln, FGSV 826, Ausgabe 2002, FGSV Verlag, Köln 2002.

³⁴ Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Arbeitsgruppe Asphaltbauweisen: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für die Bauliche Erhaltung von Verkehrsflächenbefestigungen- Asphaltbauweisen – ZTV BEA-Stb 09/13, Ausgabe 2009/Fassung 2013, FGSV Verlag, Köln 2013.

³⁵ Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Arbeitsgruppe Asphaltbauweisen: Hinweise für das Fräsen von Asphaltbefestigungen und Befestigungen mit teer-/pechtypischen – H FA, Ausgabe 2010, FGSV Verlag, Köln 2010.

ca. 15 cm), Feinfräsen (Schnittlinienabstand 6 bis 8 mm; Microfeinfräsen 4 bis 5 mm; Microfeinstfräsen 3 bis 4 mm), Schlitz-, Nut- und Grabenfräsen.

- **Technische Lieferbedingungen für Asphaltmischgut (TL Asphalt-StB)**

Die TL Asphalt-StB⁽³⁶⁾ sind die nationale Umsetzung der EN 13108 und legen die Anforderungen an Asphaltmischgut fest. Bezüglich des Asphaltgranulats sind die Anforderungen gemäß TL AG-StB (siehe dort) zu erfüllen.

Kapitel 3.1.1 der TL Asphalt-StB enthält Anforderungen an das Asphaltmischgut bei Verwendung von Asphaltgranulat. Es sind alle Anforderungen an die Baustoffgemische (Kapitel 3.2) einzuhalten, die obere Korngröße des Gesteins im Asphaltgranulat darf nicht grösser sein als die obere Korngröße des Asphaltmischguts. Die Mitverwendung von Asphaltgranulat ist unzulässig bei offenporigem Asphalt.

Die Gleichmäßigkeit des Asphaltgranulates und die sich dadurch ergebende maximale Zugabemenge sind in Anhang D der TL Asphalt-StB erläutert. Die Gleichmäßigkeit ist pro 500 t, jedoch mindestens bei 5 Proben pro Halde zu prüfen und durch die Spannweite zwischen dem größten und kleinsten Messwert zu charakterisieren. Es sind folgende Merkmale des Asphaltgranulates zu bestimmen: Erweichungspunkt Ring und Kugel [°C], Bindemittelgehalt [M.-%], Füllergehalt < 0,063 mm [M.-%], Kornanteil 0,063 bis 2 mm [M.-%] und Kornanteil > 2 mm [M.-%]. Die maximale Zugabemenge aufgrund der Homogenität kann in Abhängigkeit von Spannweite und Gesamtteranz des Merkmals berechnet werden. Der rechnerische Erweichungspunkt Ring und Kugel des Gemisches muss innerhalb der Sortenspanne des geforderten Bindemittels liegen.

Hinsichtlich der maximalen Zugabemenge aus maschinentechnischen Gründen wird Bezug auf das M WA (siehe dort) genommen. Der kleinere Wert aus Homogenität und maschinentechnischen Aspekten ist maßgebend.

- **Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen (ZTV Asphalt-StB)**

Die ZTV Asphalt-StB⁽³⁷⁾ enthalten Vertragsbedingungen zur Herstellung von Verkehrsflächenbefestigungen aus Asphalt. Gemäss Kapitel 2.3.2 der ZTV Asphalt-StB ist bei der Mitverwendung von Asphaltgranulat dessen Art und Menge, die Art und Menge der Zusätze, der Erweichungspunkt Ring und Kugel des aus dem Asphaltgranulat rückgewonnenen Bindemittels und der Erweichungspunkt Ring und Kugel des resultierenden Bindemittelgemisches sowie die Art und Sorte des Zugabebindemittels anzugeben.

Kapitel 3.4.3 der ZTV Asphalt-StB enthält besondere Anforderungen an das Bindemittel bei Mitverwendung von Asphaltgranulat in Asphalttragschichten: »Bei Verwendung von Asphaltgranulat und gefordertem Straßenbaubitumen 70/100 oder 50/70 kann der Auftragnehmer entgegen der ausgeschriebenen Bindemittelsorte auch einen resultierenden Erweichungspunkt Ring und Kugel ($T_{R\&Bmix}$) im Eignungsnachweis angeben, der der nächsten härteren Sorte entspricht. Diese Sorte gilt dann für das Baustoffgemisch als geforderte Bindemittelsorte.« Gemäß Kapitel 3.8.3 darf Asphaltgranulat für Splittmastixasphalt nur «in besonderen Fällen» verwendet werden.

- **Technische Lieferbedingungen für Asphaltgranulat (TL AG-StB)**

Die TL AG-StB⁽³⁸⁾ sind die nationale Umsetzung der EN 13108-8 und regeln Ausbauasphalt der Verwertungsklasse A (RuVA-StB).

In Kapitel 4 der TL AG-StB ist geregelt, wie Ausbauasphalt zu klassifizieren ist und welche Kennwerte zu ermitteln sind. Es werden unterschieden: Asphaltgranulat, Gesteinskörnung im Asphaltgranulat und Bindemittel im Asphaltgranulat.

Der Kennwert U definiert die maximale Stückgröße des Ausbauasphalts (TL AG-StB, Tabelle 2).

³⁶ Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Arbeitsgruppe Asphaltbauweisen: Technische Lieferbedingungen für Asphaltmischgut für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen – TL Asphalt StB, Ausgabe 2007/Fassung 2013, FGSV Verlag, Köln 2013.

³⁷ Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Arbeitsgruppe Asphaltbauweisen: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen aus Asphalt – ZTV Asphalt StB, Ausgabe 2007/Fassung 2013, FGSV Verlag, Köln 2013.

³⁸ Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Arbeitsgruppe Asphaltstraßen: Technische Lieferbedingungen für Asphaltgranulat – TL AG StB, Ausgabe 2009, FGSV Verlag, Köln 2009.

»Bei der Verwertung in ungebundenen, hydraulisch gebundenen oder bitumengebundenen (kaltaufbereiteten) Baustoffgemischen« müssen die Feianteile ($< 0,063$ mm) in M-% bestimmt werden (UF-Klassen nach Tabelle 3 der TL AG-StB). Wenn Asphaltgranulat in ungebundenen Schichten angewendet wird, sind Anforderungen an den Überkornanteil zu beachten (Tabelle 4 der TL AG-StB). Der lösliche Bindemittelgehalt BS ist zu bestimmen. Bezüglich des Fremdstoffgehaltes erfolgt die Unterteilung in die Kategorien $FM_{1/0,1}$, $FM_{5/0,1}$ und $FM_{angegeben}$, wobei die Kategoriengrenzen gemäß EN 13108-8 gelten.

Zur Gesteinskörnung im Asphaltgranulat sind zu bestimmen (falls keine Vorinformationen vorliegen): stoffliche Kennzeichnung (Art der Gesteinskörnung), ggf. vorhandene Zusatzstoffe; Kornverteilung: Durchgangswerte in M-% bei Siebgrößen 1,4D; D; D/2; 2 mm; 0,125 mm und 0,063 mm; Kornform der groben Gesteinskörner ($> 5,6$ mm): Kornformkennzahl (SI-Kategorie), Plattigkeitskennzahl (FI-Kategorie); Anteil an gebrochenen Gesteinskörnungen in der groben Gesteinskörnung (C-Kategorie); Widerstand gegen Zertrümmern von grober Gesteinskörnung: Schlagzertrümmerung (SZ-Kategorie) oder Los-Angeles-Koeffizient (LA-Kategorie); Frostbeanspruchung: Wasseraufnahme (W_{cm} -Kategorie), Frostbeanspruchung (F-Kategorie), Widerstand gegen Frost-Tausalz-Beanspruchung und Widerstand gegen Hitzebeanspruchung.

Die Art des Bindemittels im Asphaltgranulat ist anzugeben, im Regelfall genügt die Bewertung des Bindemittels nach dem Erweichungspunkt RuK, die Nadelpenetration wird in besonderen Fällen ergänzend bestimmt. In der Praxis werden zunehmend die zuverlässigeren BTSV-Kennwerte bestimmt (siehe Kapitel 5.2).

Die Anhänge der TL AG-StB enthalten Tabellen mit den Anforderungen an das Asphaltgranulat je nach Verwendungszweck und beschreiben die anzugebenden Kennwerte, die einzuhaltenden Kategorien bzw. wo keine Anforderungen bestehen. Außerdem wird ein Formblatt zur Klassifizierung von Asphaltgranulat zur Verfügung gestellt.

• Merkblatt für die Wiederverwendung von Asphalt (M WA)

Das Merkblatt M WA ⁽³⁹⁾ bezieht sich ausschließlich auf Ausbauasphalt ohne Ausbaustoffe mit teer- oder pechtypischen Bestandteilen.

Als geeignet für die Wiederverwendung wird Asphaltgranulat gesehen, dessen rückgewonnenes Bindemittel einen Erweichungspunkt Ring und Kugel von im Mittel nicht mehr als 70 °C aufweist (Einzelwerte bis 77 °C erlaubt). Ein oberer Grenzwert für den Erweichungspunkt ist nicht fixiert, da auch spezielle Bindemittel eingesetzt werden, die selbst schon einen hohen Erweichungspunkt aufweisen. Bei einem höheren Erweichungspunkt werden Untersuchungen zum Gebrauchsverhalten (z. B. Rissresistenz bei Kälte) empfohlen im Vergleich mit Mischgut ohne Mitverwendung von Asphaltgranulat.

Für Asphaltmischgut mit PmB als Bindemittel darf auch Ausbauasphalt mit Straßenbaubitumen genutzt werden.

Die Bestimmungen zur Homogenität aus den TL Asphalt-StB sind aufgeführt, zusätzlich stehen nützliche Nogramme und Beispiele zur Verfügung (siehe M WA, Anhang 1).

Hinsichtlich des Fräsens wird auf die H FA (siehe dort) verwiesen. Fräsen soll schichtenweise erfolgen, um ein möglichst hochwertiges Recycling des Ausbauasphalts zu ermöglichen.

Mischungen aus Asphaltgranulaten aus mehreren Asphaltmischgutarten sollen im Regelfall nicht für Asphaltbinder- oder Asphaltdeckschichten verwendet werden.

In Kapitel 5 des M WA sind die grundsätzlichen Möglichkeiten der Zugabe von Asphaltgranulat zu unterschiedlichen Asphaltmischgutarten und -sorten dargestellt (Tabelle 4).

³⁹ Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Arbeitsgruppe Asphaltbauweisen: Merkblatt für die Wiederverwendung von Asphalt – M WA, Ausgabe 2009/Fassung 2013, FGSV Verlag, Köln 2013.

Tabelle 4. Zugabe von Asphaltgranulat zur Herstellung unterschiedlicher Asphaltarten und -sorten, nach M WA, Tabelle 1

Asphaltgranulat aus:	zur Herstellung von Asphaltmischgut für				
	Gussasphalt	Walzasphaltdeckschicht	Asphaltbinderschicht	Asphalttragschicht	Asphalttragdeckschicht
Gussasphalt	++	O	O	+	O
Walzasphaltdeckschicht	-	++*)	++	+	+
Asphaltdeck- ^{†)} und -binderschicht	-	O ^{‡)}	++	+	+
Asphaltbinderschicht	-	O ^{‡)}	++	+	+
Asphalttrag- oder Asphalttragdeckschicht	-	-	-	++	O

++ vorrangig (höchste Wertschöpfungsstufe)

+ möglich, aber ohne volle Ausnutzung der technischen Eigenschaften und der Wirtschaftlichkeit

O bedingt möglich, nach besonderer Prüfung

- nicht möglich

*) nach den TL Asphalt-StB

†) im Regelfall nicht aus Gussasphalt

‡) nach gesonderter Aufbereitung

Kapitel 6 des M WA behandelt die Zugabeverfahren und maschinentechnischen Kriterien in der Asphaltmischanlage (Chargen- und Durchlaufmischanlage). Bei der Chargenmischanlage wird unterschieden, ob das Asphaltgranulat durch die heiße Gesteinskörnung oder gemeinsam mit den Gesteinskörnern (oder auch in Kombination möglich), oder in einer gesonderten Vorrichtung (Paralleltrommel) erwärmt wird.

In der Asphaltmischanlage ohne besondere Einrichtungen können Zugaberaten bis 30 M.-% realisiert werden durch chargenweise Zugabe des Asphaltgranulats in den Mischer, wo das Asphaltgranulat direkt durch die heißen Gesteinskörnungen aufgeheizt wird. Die Zugabe erfolgt dabei entweder (über ein Zwischensilo und) über die Gesteinskörnungswaage oder über eine eigene Chargenwaage. Die frischen Gesteinskörnungen sind höher als herkömmlich aufzuheizen, abgestimmt auf den Feuchtgehalt im Asphaltgranulat (Überdruckventil und Absaugvorrichtung) und die zu erzielende Asphalttemperatur. ⁽⁴⁰⁾

Bild 1 im M WA zeigt den Zusammenhang zwischen Temperatur der Gesteinskörnung, Temperatur des Mischgutes und mögliche Zugaberate an trockenem Asphaltgranulat. Tabelle 2 im M WA gibt Aufschluss darüber, wie die Temperatur bei feuchtem Granulat zu erhöhen ist. (Anmerkung: Die Mitverwendung von bis zu 30 M.-% (auch stark verhärtetem) Asphaltgranulat ist Stand der Technik und für alle regelwerkskonformen Asphaltarten und -sorten realisierbar (Wistuba et al., 2015)⁴¹⁾).

Bis etwa 40 M.-% sind realisierbar durch die gemeinsame Erwärmung der frischen Gesteinskörnungen und des Asphaltgranulats bei kontinuierlicher Zugabe des Asphaltgranulats. Die Zugabe erfolgt entweder in die Siebumgehungs tasche (die Siebe verkleben sonst) oder in den Trockentrommelauslauf bzw. am Beginn des Heißelevators oder, bei Trockentrommeln im Gegenstromprinzip (meistens der Fall) über eine Mittenzugabe. Bei Zugaberaten über 40 M.-% ist wegen des notwendigen Aufheizens des Asphaltgranulats mit Austreiben der Feuchte die Verwendung einer *Paralleltrommel* zusätzlich zur Trockentrommel erforderlich. Eine Paralleltrommel ist eine zweite Heizvorrichtung, die allein für die Erhitzung des Asphaltgranulats sorgt, bevor dieses anschließend in heißem Zustand dem frischen Gestein beigemischt werden kann. Wichtig dabei ist ein schonendes Aufheizen des Asphaltgranulats (möglichst < 130°C zur Minimierung von Bindemittelalterung). (Anmerkung: Maximal ist bei regelwerkskonformer Zusammensetzung des Asphaltmischguts (entsprechend den definierten Asphaltmischgutsorten) ein Recyclinganteil von etwa 90 M.-% realisierbar, weil infolge der Fräs-, Brech- und Siebvorgänge Anteile an grober Gesteinskörnung verloren gehen und diese zur Korrektur der Sieblinie und zum Ausgleich des geringfügigen Bindemittelüberschusses zu ergänzen sind.) ⁽⁴⁰⁾

Eine ausreichende Nachmischzeit ist von besonderer Bedeutung für die Gleichmäßigkeit des Mischguts.

⁴⁰ Wistuba, M. P. 2019. Straßenbaustoff Asphalt. Erste Auflage, Technische Universität Braunschweig, Institut für Straßenwesen, Braunschweig, ISBN 978-3-932164-16-3.

⁴¹ Wistuba, M. P., Grönniger, J. und Isailović, I. 2015. Optimierung des Recyclinganteils in Asphalttrag- und -binderschichten. Forschungsprojekt ‚ORAB‘, Schlussbericht, im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie, der ÖBB-Infrastruktur Aktiengesellschaft und der Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft. Österreichische Verkehrsinfrastrukturforschung (VIF2012), Institut für Straßenwesen, Technische Universität Braunschweig.

Die Wiederverwendung in Durchlaufmischanlagen ist Kapitel 6.2 des M WA erläutert und erfolgt durch eine kontinuierliche Dosierung der einzelnen Mischgutkomponenten in einem Trommelmischer oder einem nachgeschalteten Durchlaufmischer. Nach der Dosierung kann die Homogenität nicht mehr korrigiert werden. Bild 6 des M WA zeigt eine Anlage mit kombinierter Trocken- und Mischtrommel. Es sind Zugaberaten an Asphaltgranulat von bis zu 40 M-% möglich.

- **Merkblatt über die Wiederverwertung von mineralischen Baustoffen als Recycling-Baustoffe (M RC)**

Das Merkblatt M RC ⁽⁴²⁾ behandelt die Wiederverwertung von mineralischen Baustoffen als Recycling-Baustoffe von der Rückbauplanung und der Wiedergewinnung über die Kontrolle bei der Annahme an der Aufbereitungsanlage, die Aufbereitung und die Lagerung bis zur Güteüberwachung am Lieferprodukt hinsichtlich der baustofftechnologischer Eigenschaften wie auch der umweltrelevanten Vorgaben. Die Wiederverwertung von Ausbauasphalt und pechhaltigen Straßenausbaustoffen wird nur allgemein behandelt und es wird auf andere Regelungen verwiesen.

- **Merkblatt für die Verwertung von Asphaltgranulat in bitumengebundenen Tragschichten durch Kaltaufbereitung (M VB-K)**

Das Merkblatt M VB K ⁽⁴³⁾ behandelt die Verwertung von pechhaltigen Straßenausbaustoffen und von Asphaltgranulat in bitumengebundenen Tragschichten durch Kaltaufbereitung in Mischanlagen ("in plant"), im Regelfall unter Mitverwendung von Bitumenemulsion, Schaumbitumen oder hydraulischem Bindemittel. Das so hergestellte Mischgut wird als bitumengebundene Tragschicht unter der Asphalt- bzw. Betonfahrbahn genutzt. Diese Verwertungsart soll nur angewendet werden, wenn die Heißaufbereitung des Asphaltgranulats nicht mehr möglich ist. Für das Baustoffgemisch, das heißt die Mischung aus Granulat, Bindemitteln, ggf. Additiven und Wasser, werden Anforderungen an die Spaltzugfestigkeit, die PAK-Konzentration und den Phenolindex gestellt.

Das Baustoffgemisch wird in einem Zwangsmischer hergestellt. Zuerst wird das Mischgranulat, danach das hydraulische Bindemittel sowie eventuell Wasser und die Bitumenemulsion zugegeben. Schaumbitumen muss als erstes zum Mischgranulat beigegeben werden.

Das Baustoffgemisch kann nicht in Silos zwischengelagert werden und muss binnen einer Stunde transportiert und eingebaut werden (nur bei trockenem Wetter und mindestens 5 °C Lufttemperatur). Der Einbau erfolgt mit dem Fertiger mit hoher Vorverdichtung und die Verdichtung soll mit mindestens 6 Übergängen mit Glattmantelwalzen durchgeführt werden. Für pechhaltige Baustoffgemische sollen spezielle Maßnahme getroffen werden, damit der seitliche Wassereintritt verhindert wird.

- **Merkblatt für Kaltrecycling in situ im Straßenoberbau (M KRC)**

Das Merkblatt M KRC ⁽⁴⁴⁾ beschreibt Verfahren zur Verwertung von Straßenausbaustoffen auf der Baustelle ("in-situ") im Kalteinbau unter Zugabe von Bindemitteln. Es können sowohl ungebundene als auch gebundene Oberbauschichten aufbereitet und verwertet werden (gegebenenfalls sind Frostbeständigkeit und Schlagfestigkeit nachzuweisen).

Das Kaltrecycling-Gemisch (KRC-Gemisch) besteht aus Gesteinskörnern, Bindemittel(n) und Wasser. Abhängig vom Bindemittel und dem resultierenden Steifigkeitsmodul wird unterschieden zwischen hydraulisch-dominanten KRC-Gemischen (Bindungstyp A nur mit hydraulischem Bindemittel) und bitumen-dominanten KRC-Gemischen (Bindungstyp C nur mit bitumenhaltigem Bindemittel; vgl. M VB-K).

Die Herstellung erfolgt auf zwei verschiedene Arten (Geräteangaben siehe Anhang 5 des M KRC):

⁴² Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Arbeitsgruppe Mineralstoffe im Straßenbau: Merkblatt über die Wiederverwertung von mineralischen Baustoffen als Recycling-Baustoffe im Straßenbau – M RC, Ausgabe 2002, FGSV Verlag, Köln 2020.

⁴³ Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Arbeitsgruppe Asphaltbauweisen: Merkblatt für die Verwertung von pechhaltigen Straßenausbaustoffen und von Asphaltgranulat in bitumengebundenen Tragschichten durch Kaltaufbereitung in Mischanlagen – M VB-K, Ausgabe 2007, FGSV Verlag, Köln 2007.

⁴⁴ Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Arbeitsgruppe Mineralstoffe im Straßenbau: Merkblatt für Kaltrecycling in situ im Straßenoberbau – M KRC, Ausgabe 2005, FGSV Verlag, Köln 2005.

- 1) eine Fräse mit konstanter Arbeitsbreite, die gleichzeitig als Mischer dient (Stabilisierer und Fräsrecycler) hat den Nachteil, dass bei variablen Straßenbreiten Überlappungen auftreten.
- 2) eine Fräse mit variabler Arbeitsbreite und Zwangsmischer (Kaltrecycler und Mixpaver) ist zu bevorzugen, da hier Längsnähte vermieden werden können.

Die Schichtdicke beträgt, wegen der Verdichtbarkeit maximal 20 cm und die Einbautemperatur soll 5 °C nicht unterschreiten. Die Verdichtung erfolgt mit Vibrations-Glattmantelwalzen. Als Nachbehandlung ist eine Versiegelung mit Bitumenemulsion und anschließende Splittabstreuerung vorzusehen.

An die Probekörper werden Anforderungen hinsichtlich Hohlraumgehalt, Spaltzugfestigkeit nach 7 und 28 Tagen und Steifigkeitsmodul gestellt. Bei der Eignungsprüfung ist darüber hinaus ein maximaler Abfall der Spaltzugfestigkeit β_{28} nach Wasserlagerung von 30 % nachzuweisen (M KRC). Die Schicht selbst muss den Anforderungen an die Einbaudicke, den Verdichtungsgrad, den Hohlraumgehalt, die Mindesttragfähigkeit vor der Überbauung, der Ebenheit und der profilgereichten Lage genügen (Tabelle 2 M KRC).

- **Merkblatt für das Rückformen von Asphaltchichten (M RF)**

Das Merkblatt M RF ⁽⁴⁵⁾ behandelt Verfahren zum Rückformen (thermische und mechanische Bearbeitung durch Aufheizen, Auflockern, Aufnehmen, Mischen und Wiedereinbauen) von Asphaltchichten der Verwertungsklasse A. Die Verwertung von Gussasphalt wird nicht empfohlen, jene von Schichten mit Einlagen wie Gittern u. dgl. ist ausgenommen. Es sind 3 Bauverfahren beschrieben: (a) *Reshape* (ohne Veränderung der Asphaltzusammensetzung); (b) *Remix* (mit Veränderung der Asphaltzusammensetzung) und (c) *Remix compact* (mit Veränderung der Asphaltzusammensetzung in Verbindung mit dem Einbau einer neuen Deckschicht mit zusätzlichem Fertiger). Die beim Rückformen entstandene Asphaltchicht kann entweder zur späteren Überbauung, zur direkten Befahrung oder zur unmittelbaren Überbauung im Heiß-auf-Heiß-Verfahren dienen.

- **Merkblatt für die Temperaturabsenkung von Asphalt (M TA)**

Im M TA ⁽⁴⁶⁾ selbst sind keine Regelungen für Recyclingasphalt enthalten. Durch die Temperaturabsenkung können jedoch hohe thermische Beanspruchungen des Bindemittels im Asphaltgranulat, verursacht durch die hohen Mischtemperaturen, vermieden werden.

Daher ist die Wiederverwendung von Ausbauasphalt für die Herstellung von Niedrigenergieasphalt eine interessante Option, weil infolge der Temperaturreduktion die Bindemittelalterung während der Asphaltproduktion deutlich reduziert ist und dadurch hohe Recyclingraten erzielbar sind (Dinis-Almeida et al., 2016 ⁽⁴⁷⁾; Sengoz et al., 2017 ⁽⁴⁸⁾; Lu and Saleh, 2016 ⁽⁴⁹⁾; Xiao et al., 2016 ⁽⁵⁰⁾). ⁽⁴⁰⁾

- **Merkblatt für die Verwendung von Ausbauasphalt und pechhaltigen Straßenaufbruch in Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln (FGSV 826)**

Das Merkblatt FGSV 826 ⁽⁵¹⁾ behandelt Baustoffgemische mit einem Mindestanteil an Asphaltgranulat oder an pechhaltigen Straßenausbaustoffen und eventuell mit Anteilen an aufbereitetem Betonaufbruch oder an hydraulisch verfestigten oder ungebundenen Tragschichten oder an gebrochenen Werksteinen.

⁴⁵ Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Arbeitsgruppe Asphaltstraßen: Merkblatt für das Rückformen von Asphaltchichten – M RF, Ausgabe 2002, FGSV Verlag, Köln 2002.

⁴⁶ Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Arbeitsgruppe Asphaltbauweisen: Merkblatt für Temperaturabsenkung von Asphalt – M TA, Ausgabe 2011, FGSV Verlag, Köln 2011.

⁴⁷ Dinis-Almeida, M., Castro-Gomes, J., Sangiorgi, C., Zoorob, S. E., and Lopes Alfonso, M. 2016. Performance of Warm Mix Recycled Asphalt containing up to 100% RAP. Elsevier, Construction and Building Materials Volume 112 Pages 1-6, Covilhã, Portugal.

⁴⁸ Sengoz, B., Topal, A., Oner, J., Yilmaz, M., Aghazadeh Dokandari, P., and Kok, B. 2017. Performance Evaluation of Warm Mix Asphalt Mixtures with Recycled Asphalt Pavement. Periodica Polytechnica Civil Engineering, Vol. 61, No 1, 117-127.

⁴⁹ Lu, D. X., and Saleh, M. 2016. Laboratory evaluation of warm mix asphalt incorporating high RAP proportion by using Evotherm and Sylvaroad additives. Construction and Building Materials, Vol. 114, 580-587, Elsevier.

⁵⁰ Xiao, F., Hou, X., Amirkhanian, S., and Kim, K. W. 2016. Superpave evaluation of higher RAP contents using WMA technologies. Construction and Building Materials Vol. 112, 1080-1087, Elsevier.

⁵¹ Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Arbeitsgruppe Betonstraßen: Merkblatt für die Verwertung Asphaltgranulat und pechhaltigen Straßenausbaustoffen in Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln, Ausgabe 2002, FGSV Verlag, Köln 2002.

Die Verfestigung mit hydraulischen Bindemitteln ist eine Möglichkeit der Wiederverwertung von Ausbauasphalt, wenn das Bindemittel übermäßig verhärtet ist oder der Ausbaupasphalt nicht sortenrein gewonnen wurde. Darüber hinaus wird die Verfestigung mit hydraulischen Bindemitteln bei der Verwertung von pechhaltigen Straßenausbaustoffen angewendet, um die Eluierbarkeit von Schadstoffen aus der fertigen Schicht zu reduzieren.⁽⁵¹⁾

- **Empfehlungen des Deutschen Asphaltverbands (DAV)**

In den Publikationen des DAV (e. V.) zur Wiederverwendung von Asphalt^(52, 53) fasst der Interessenverband der deutschen Asphaltindustrie die geltenden Gesetze und Technischen Regelungen sowie die Mischverfahren für den Praxisgebrauch zusammen und erläutert den aktuellen Stand des Wissens. Beispielweise wird darauf hingewiesen, dass das bei Erhaltungsmaßnahmen anfallende Recycling-Material aus Deck- und Binderschichten auf Grund der technischen Möglichkeiten und der unterschiedlichen Länderregelungen nicht vollständig wiederverwendet werden könne. Der DAV empfiehlt bspw. die Zulassung weicherer Bitumen und Regeneratoren zur Regeneration, einen »doppelten Sortensprung zwischen Zugabemittel und resultierendem Bindemittel« (bei Tragschichten) sowie die Verwendung von Asphaltgranulat in Splittmastixasphalt und offenporigem Asphalt.

4.2.4 Bundesländerspezifische Regelungen

In den einzelnen Bundesländern gelten zum Teil zusätzliche oder vom FGSV Regelwerk abweichende Regelungen. So wird beispielweise die maximale Zugaberate an Asphaltgranulat in manchen Bundesländern beschränkt. Während in Hamburg und Baden-Württemberg hohe Zugaberaten standardisiert sind, ist z. B. in Hessen, Sachsen-Anhalt, Thüringen, Bayern, Saarland, Mecklenburg-Vorpommern, Berlin, Brandenburg und Bremen, ein Maximalrecycling nicht vorgesehen⁽⁵⁴⁾. Im Folgenden sind einige Praxisbeispiele und nachfolgend länderspezifische Regelungen aufgeführt.

In Berlin wurde im Jahr 2000 auf der Heerstraße (B2/B5) zwischen Wilhelmstraße und Sandstraße eine 1.200 m lange Erprobungsstrecke eingerichtet⁽⁵⁵⁾. Auf vier Straßenabschnitten wurden in den Asphaltbinderschichten Zugaberaten an Asphaltgranulat von 20 bis 50 % erprobt. Dabei wurden auch unterschiedliche Bindemittelanteile und -arten verwendet. Die Studie kommt zum Schluss, dass einen Zusammenhang zwischen der Stetigkeit der Sieblinie des Erprobungsfeldes und der erzielten Standfestigkeit abgeleitet werden könne. Auch bei hohen Verkehrsbelastungen sei ein hoher Zugabeanteil in der Binderschicht möglich, es bedürfe aber einer genauen »Voruntersuchung, Klassifizierung, Lagerung« im Sinne der TL AG-StB und dem Einsatz einer Paralleltrommel. Hinsichtlich der wirtschaftlichen Gesichtspunkte wird ausgeführt, dass bei 50 % Zugabeanteil in der Binderschicht Kosten von fast 10 % eingespart werden konnten. Es wurde ein Bitumenpreis von 200 €/t (Stand 2003) und der Binderpreis ohne Granulat von 43 €/t zugrunde gelegt. Berücksichtigung fand nur die Einsparung von Bindemittel und nicht etwa auch die Einsparung von Gestein.

In Baden-Württemberg werden mit der ETV-StB-BW Teil 3⁽⁵⁶⁾ die ZTV und TL Asphalt-StB ergänzt bzw. abgeändert. Dies ermöglicht das Maximalrecycling von Ausbaupasphalt. Es wurden zahlreiche Bauprojekte mit bis zu 90 % Recycling-Anteil in allen Schichten (Maximalrecycling 90), mit 50 % Asphaltgranulat in der Binder- und Deckschicht, sowie 75 % Asphaltgranulat in der Tragschicht (Maximalrecycling 50/75) ausgeführt. Die Verjährungsfristen zur Geltendmachung von Mängelansprüchen wurden bei Maximalrecycling 90 um 50 % und bei Maximalrecycling 50/75 um 25 % gegenüber den Regelungen in den ZTV-Asphalt-StB verlängert.

⁵² Deutscher Asphaltverband (DAV) e. V.: Wiederverwenden von Asphalt, überarbeitet Auflage Juli 2014, Bonn 2014.

⁵³ Deutscher Asphaltverband (DAV) e. V.: Positionspapier: Wiederverwenden von Asphalt und alternative Verwertungskonzepte für Asphaltgranulat zur weiteren Steigerung der Nachhaltigkeit, Stand: Mai 2019, Bonn 2019.

⁵⁴ Keßler, S. 2015. Asphalt – Warum die Bundesländer auf maximales Recycling verzichten. WirtschaftsWoche, Handelsblatt GmbH, Düsseldorf 2015.

⁵⁵ Lehné, R. 2003. Baubericht – Asphaltbinder mit 50 % Asphaltgranulat – neue Erkenntnisse von der Berliner Erprobungsstrecke Heerstraße (B2/B5). Bitumen, 65. Jahrgang, Heft 1, März 2003, Urban-Verlag GmbH, Hamburg/Wien.

⁵⁶ Ministerium für Verkehr Baden-Württemberg: Ergänzungen zu den Technischen Vertragsbedingungen Im Straßenbau Baden-Württemberg – ETV-StB-BW, Teil 3 (Asphalt), Ausgabe 2020, Stuttgart 2010.

In Hamburg existiert seit 1986 der VSVA ⁽⁵⁷⁾, der laut Vereinszweck die sinnvolle Verwendung von Ausbauasphalten unter Berücksichtigung der Umweltschutzelange und der diesbezüglichen Förderung von Wissenschaft und Forschung untersucht, insbesondere auf dem Gebiet des Umweltschutzes. Praxisbeispiele für die Verwendung von Ausbauasphalt siehe Tabelle 5. Beim Projekt Mönckebergstraße wurde die Sanierung innerhalb von 24 Stunden durchgeführt und es konnte durch den Einsatz von Asphaltgranulat eine Kostenersparnis von 30 % erzielt werden.

Tabelle 5: Projekte in Hamburg mit Asphaltgranulat-Zugabe

Pollhornweg, September 2010	Deckschicht AC 11 DS, 91 % Asphaltgranulat-Anteil
Kapellenstraße (Friedhof Ohlsdorf), September 2011	Deckschicht AC 8 DN, 90 % Asphaltgranulat-Anteil
Mönckebergstraße, August 2012	SMA 0/8, 85 % Asphaltgranulat-Anteil

• Schleswig-Holstein

TL Asphalt-StB:

Es darf auch Straßenbaubitumen 160/220 zur Regeneration eingesetzt werden.

Bei Erwärmung des Asphaltgranulats in einer gesonderten Vorrichtung (Paralleltrommel) gilt: Die maximale Zugabemenge an Asphaltgranulat ist 60 % für Asphalttragschichtmischgut, 45 % für Asphaltbinder und 20 % für Asphaltbeton für Asphaltdeckschichten.

Bei Erwärmung des Asphaltgranulats gemeinsam mit der Gesteinskörnung in der Trockentrommel (Stirnwand- oder Mittenzugabe) gilt: Die maximale Zugabemenge von Asphaltgranulat ist 40 % für Asphalttragschichtmischgut und 40 % für Asphaltbinderschichtmischgut.

Für alle anderen Zugabeverfahren (Kaltzugabe) beträgt die maximale Zugabemenge an Asphaltgranulat 30 % für Asphalttragschichtmischgut, 30 % für Asphaltbinder und 20 % für Asphaltbeton für Asphaltdeckschichten.

Im Rahmen der Ermittlung der maximalen Zugabemenge von Asphaltgranulat (TL Asphalt-StB) ist als Merkmal zusätzlich die Nadelpenetration festzustellen und bei der Klassifizierung anzugeben.

Im Rahmen der Erstprüfung sind beim Bindemittel des Asphaltgranulats und beim verwendeten Bindemittel sowohl der Erweichungspunkt Ring und Kugel als auch die Nadelpenetration anzugeben.

ZTV Asphalt-StB, 2.2 Eignungsnachweis:

Zum Eignungsnachweis darf bei Verwendung von Asphaltgranulat der resultierende Erweichungspunkt Ring und Kugel nicht härter als für Straßenbaubitumen 50/70 sein.

• Brandenburg

TL Asphalt-StB / TL AG-StB:

Wird der in der TL AG-StB angegebene Mittelwert für die Einzelwerte des Erweichungspunktes Ring und Kugel von 70 °C (Einzelwerte > 77 °C) überschritten, ist vor einer Heißaufbereitung die Wirksamkeit des Bindemittels durch die zusätzliche Bestimmung des Brechpunktes nach Fraaß (entsprechend DIN EN 12593) nachzuweisen. Wird ein Wert von ≥ 0 °C ermittelt, ist die Wirksamkeit des Bindemittels im Asphaltgranulat nicht mehr gegeben. Vergleichbare Verfahren sind möglich (wie z. B. die Nadelpenetration nach DIN EN 1426).

Grundsätzlich ist eine möglichst hochwertige Verwertung anzustreben. Ausbauasphalt ist als Zusatzmaterial bei der Herstellung von neuem Asphaltmischgut zu verwenden, um das darin enthaltene Bitumen wieder als Bindemittel nutzen zu können. Ausbauasphalt, der wegen einer übermäßigen Verhärtung des Bindemittels bzw. wegen unzureichender Qualität der Gesteinskörnungen die Anforderungen bei der Verwendung im Heißmischgut nicht erfüllt, kann als Verfestigung mit hydraulischen Bindemitteln oder als Verfestigung mit Bitumenemulsion verwendet werden.

Als Hilfe für die Ermittlung der maximal möglichen Zugabemenge an Asphaltgranulat können folgende Tabellen 8 und 9 herangezogen werden.

⁵⁷ Verein zur sinnvollen Verwendung von Ausbauasphalten und Straßenaufbruch, unter Berücksichtigung der Umweltschutz-Belange e. V. (VSVA), Website: <http://www.vsva.de/>, abgerufen am 14.02.2020.

Tabelle 8: Maximal zulässige Spannweiten $a_{max,i}$ der aufgeführten Merkmale für die Ermittlung der Gleichmäßigkeit des Asphaltgranulats bei der Verwendung in Mischgut für Asphaltbeton für Deck- und Binderschichten

Herkunft des Asphaltgranulats	Maximal zulässige Spannweiten $a_{max,i}$ des Asphaltgranulats					max. mögl. Zugabemenge $Z_{mögl}$
	Bindemittelgehalt	Fülleranteil < 0,063 mm	Kornanteil 0,063-2 mm	Kornanteil > 2 mm	Erweichungspunkt Ring und Kugel	
	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	[°C]	[M.-%]
Walzasphalt-deckschichten, Deck- und Binderschicht	2,6	19,8	52,8	52,8	40,0	10
	1,8	13,2	35,2	35,2	26,7	15
	1,3	9,9	26,4	26,4	20,0	20
	1,1	7,9	21,1	21,1	16,0	25
	0,9	6,6	17,6	17,6	13,3	30
	0,8	5,7	15,1	15,1	11,4	35
	0,7	5,0	13,2	13,2	10,0	40
	0,5	4,0	10,6	10,6	8,0	50

Die Berechnung der maximal zulässigen Spannweiten erfolgt nach dem Anhang D der TL Asphalt-StB.

Tabelle 9: Maximal zulässige Spannweiten $a_{max,i}$ der aufgeführten Merkmale für die Ermittlung der Gleichmäßigkeit des Asphaltgranulats bei der Verwertung in Mischgut für Asphalttrag- und Asphalttragdeckschichten

Herkunft des Asphaltgranulats	Maximal zulässige Spannweiten $a_{max,i}$ des Asphaltgranulats					max. mögl. Zugabemenge $Z_{mögl}$
	Bindemittelgehalt	Fülleranteil < 0,063 mm	Kornanteil 0,063-2 mm	Kornanteil > 2 mm	Erweichungspunkt Ring und Kugel	
	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	[°C]	[M.-%]
Asphalttrag- und Asphalttragdeckschichten	5,0	50,0	80,0	90,0	40,0	10
	3,3	33,3	53,3	60,0	26,7	15
	2,5	25,0	40,0	45,0	20,0	20
	2,0	20,0	32,0	36,0	16,0	25
	1,7	16,7	26,7	30,0	13,3	30
	1,4	14,3	22,9	25,7	11,4	35
	1,3	12,5	20,0	22,5	10,0	40
	1,0	10,0	16,0	18,0	8,0	50

Die Berechnung der maximal zulässigen Spannweiten erfolgt nach dem Anhang D der TL Asphalt-StB.

Neben der Gleichmäßigkeit des Asphaltgranulats sind bei den maximal möglichen Zugabemengen die anlagentechnischen Kriterien gemäß nachfolgender Tabelle 10 zu berücksichtigen. Höhere Zugabemengen sind möglich.

Tabelle 10: Maximal mögliche Asphaltgranulat-Zugabemengen in Abhängigkeit von den anlagentechnischen Kriterien

Zugabeverfahren		Max. mögliche Asphaltgranulat-Zugabemengen	
		Chargenmischanlage (Ch)	Durchlaufmischanlage (D)
		$Z_{mög}$	$Z_{mög}$
		[M.-%]	[M.-%]
Kaltzugabe (K)	Erwärmung durch die heiße Gesteinskörnung	max. 30	---
Warmzugabe (W)	Erwärmung gemeinsam mit den Gesteinskörnungen	max. 40	max. 40
Heißzugabe (H)	Erwärmung in gesonderter Vorrichtung	max. 80	---

Im Eignungsnachweis von Asphaltmischgut ist bei der Verwendung von Asphaltgranulat zusätzlich die Rohdichte des resultierenden Gesteinskörnungsgemisches anzugeben. Diese Angabe wird für die Ermittlung des Bindemittelgehaltes benötigt.

Die Erstprüfung behält mit dem neu klassifizierten Asphaltgranulat nur dann ihre Gültigkeit, wenn der Mittelwert und seine Spannweite für Bindemittelgehalt und Erweichungspunkt Ring und Kugel innerhalb der nach Tabelle 8 bzw. 9 für die jeweilige Zugabemenge ($Z_{mög}$) maximal zulässigen Spannweite (a_{max}) liegt. Die maximal zulässige Spannweite ist dabei gleichmäßig um den Mittelwert des Asphaltgranulates zu legen, das bei der Erstprüfung zum Einsatz kam.

Asphaltgranulat aus Asphalttragschichten darf nicht für die Herstellung von Asphaltdeck- und Asphaltbinderschichten verwendet werden. In Gussasphalt findet nur Asphaltgranulat aus Gussasphaltschichten Anwendung. In Splittmastixasphalt ist im Regelfall kein Asphaltgranulat zu verwenden. Ausnahmen sind in der Leistungsbeschreibung zu vereinbaren. Grundvoraussetzung ist, dass es sich dabei um Asphaltgranulat aus Splittmastixasphaltdeckschichten handelt.

● Hessen

TL Asphalt-StB und ZTV Asphalt-StB:

Für Asphaltbinder- und Asphaltdeckschichten ist nachzuweisen, aus welcher Schicht das für die Zugabe vorgesehene Asphaltgranulat gewonnen wurde, die herkunftsbezogene getrennte Lagerung muss gewährleistet sein. Die Zugaberate an Asphaltgranulat ist abhängig von der Asphaltmischgutart. Folgende Vorgaben für die Zugabe von Asphaltgranulat sind zu beachten:

Tabelle 6: Vorgaben für die Zugabe von Asphaltgranulat gemäß Länderregelung Hessen

Asphaltmischgutart	Zugabe von Asphaltgranulat aus
Walzasphaltdeckschicht	Gussasphalt, Walzasphaltdeckschicht, Asphaltbinderschicht nach gesonderter Aufbereitung
Asphaltbinderschicht	Gussasphalt, Walzasphaltdeckschicht, Asphaltbinderschicht

Die Verwendung von Asphaltgranulat ist bei der Herstellung von Asphaltdeckschichten in den Belastungsklassen Bk100 und Bk32 sowie bei Asphaltdeckschichten aus Gussasphalt und Splittmastixasphalt generell ausgeschlossen.

● Sachsen

Kontrollprüfungen: Bei Verwendung von Asphaltgranulat ist eventuell vorhandenes artfremdes Gestein im Prüfbericht anzugeben.

● Nordrhein-Westfalen

Asphaltgranulat darf in Deckschichten aus Asphaltbeton nur bis zu einer maximalen Zugabemenge von 20 M.-% verwendet werden.

Asphaltgranulat darf in Deckschichten aus Gussasphalt nicht verwendet werden.

• Baden-Württemberg

ZTV Asphalt-StB:

Bei Zugaberraten an Asphaltgranulat von ≥ 60 bis 75 M.-% für Asphalttragschichten und für Asphaltbinder-schichten darf als Zugabemittel jede Art und Sorte von Bitumen unabhängig vom ausgeschriebenen Bin-demittel zur Anwendung kommen.

Für Asphalttragschichtmischgut darf der resultierende Erweichungspunkt Ring und Kugel im Eignungsnachweis eine Sorte härter als ausgeschrieben, nicht jedoch härter als ein Bitumen der Sorte 20/30 ausfallen.

Bei Kontrollprüfungen sind die Grenzwerte der Tabelle 16 der ZTV Asphalt für den Erweichungspunkt einzuhal-ten. Hierfür wird die Tabelle 16 um die Sorte 20/30 mit einem Grenzwert für den Erweichungspunkt mit 71°C ergänzt.

Ergänzend zur ZTV Asphalt-StB erfolgt die Beurteilung und die Zuordnung des resultierenden Bindemittels und die Einschätzung der Polymer-Eigenschaften mittels Bitumen-Typisierungs-Schnell-Verfahren (BTSV) nach der AL DSR-Prüfung (BTSV) ⁽⁵⁸⁾. Bei einer Beanstandung der elastischen Rückstellung in der Kontrollprüfung kann somit eine Zuordnung und Bewertung in der fachtechnischen Beurteilung erfolgen.

Für Asphaltbinder darf der resultierende Erweichungspunkt Ring und Kugel im Eignungsnachweis eine Sorte härter als ausgeschrieben, nicht jedoch härter als ein Bitumen der Sorte 20/30 bzw. bei einem vereinbarten po-lymodifizierten Bindemittel nicht härter als die Sorte 10/40-65 ausfallen.

Bei Kontrollprüfungen sind die Grenzwerte der Tabelle 16 der ZTV Asphalt für den Erweichungspunkt einzuhal-ten. Hierfür wird die Tabelle 16 um die Sorte 20/30 mit einem Grenzwert für den Erweichungspunkt mit 71°C ergänzt.

Bei Verwendung von Asphaltgranulat in Asphaltdeckschichten sowie im Falle der Verwendung von PmB in Deckschichten aus Splittmastixasphalt oder Asphaltbeton ist im Rahmen der Erstprüfung eine Bitumenschnell-typisierung gemäß AL DSR-Prüfung (BTSV) ⁽⁵⁸⁾ vorzunehmen.

Die Kennwerte des aus der Versuchsmischung rückgewonnenen Bindemittels müssen sich hierbei innerhalb der nachfolgend tabellarisch angegebenen Grenzbereiche liegen. Im Falle der Verwendung von Asphaltgranulat ist hierbei der Wertebereich des resultierenden Bindemittels heranzuziehen.

Tabelle 7: Grenzbereiche für BTSV-Kennwerte gemäß Länderregelung Baden-Württemberg

Merkmal	Einheit	Prüfmethode	30/45	50/70	70/100	45/80-50 A	25/55-55 A	10/40-65 A
Äquisteifigkeitstemperatur $T_{\text{BTSV}} (G^*=15 \text{ kPa})$ bei 1,59 Hz	°C	AL DSR-Prüfung (BTSV)	58-64	51-58	46-51	50-55	54-63	61-71
Phasenwinkel δ_{BTSV} ($G^*=15 \text{ kPa}$) bei 1,59 Hz	°	AL DSR-Prüfung (BTSV)	i.a.	i.a.	i.a.	71-76	66-76	65-71

i.a. „ist anzugeben“

(Quelle: ISBS Institut für Straßenwesen TU Braunschweig, Werte auf ganze Zahlen angepasst)

Bei der Verwendung von Asphaltgranulat-Mengen ≥ 60 bis 75 M.-% für Asphalttragschichtmischgut und As-phalhbinderschichten ist Folgendes zu beachten: Tabelle 16 wird um die Sorte 20/30 mit einem Grenzwert für den Erweichungspunkt mit 71°C ergänzt. Bei Asphaltbinder mit PmB muss die elastische Rückstellung am rück-gewonnenen Bindemittel bei den Kontrollprüfungen mindestens 30% betragen.

TL Asphalt-StB:

Asphaltgranulat kann für die Herstellung von Asphaltmischgut in den folgenden Mengen bzw. auf Grundlage des M WA zugegeben werden: Bei Asphalttragschichtmischgut und Asphaltbinder (Siebdurchgänge AC B auch analog AC T) 60 bis 75 M.-% Asphaltgranulat bei Verwendung von PmB oder Straßenbaubitumen nach TL Bitu-men-StB. Zur Erzielung der resultierenden Bindemittelsorte kann hierbei jedwedes aufgeführte Bindemittel der

⁵⁸ AL DSR-Prüfung (BTSV), 2017. Arbeitsanleitung zur Bestimmung des Verformungsverhaltens von Bitumen und bitumen-haltigen Bindemitteln im Dynamischen Scherrheometer (DSR) – Teil 4: Durchführung des Bitumen-Typisierungs-Schnell-Verfahrens. Ausgabe 2017, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), FGSV Verlag, Köln.

TL Bitumen-StB verwendet werden. Weiterhin können auch Kombinationen von Bindemittel und Regeneratoren zur Anwendung kommen, wenn der Leistungsnachweis mittels Erstprüfung, Eignungsnachweis in Kombination mit der Beschreibung des Herstellungsprozesses erbracht wurde. Der zu ermittelnde resultierende Erweichungspunkt Ring und Kugel des rückgewonnenen Bindemittels im Rahmen von Kontrollprüfungen ist abhängig vom Erweichungspunkt des Bindemittels im Asphaltgranulat, der Art und Menge an Asphaltgranulat, der Art und Menge des Zugabebindemittels und von der thermischen Exposition bei der Herstellung des Asphaltmischgutes. Hierbei darf die resultierende Bindemittelsorte für Asphalttragschichtmischgut und Asphaltbinder eine Sorte härter, nicht jedoch härter als ein Bitumen der Sorte 20/30 ausfallen. Im Fall eines vereinbarten PmB darf die resultierende Bindemittelsorte bei Asphaltbinderschichten nicht härter als die Sorte 10/40-65 ausfallen. Die elastische Rückstellung ist ergänzend durch das Bitumen-Typisierungs-Schnell-Verfahren (BTSV) mittels AL DSR-Prüfung (BTSV) ⁽⁵⁸⁾, Teil 4 im Rahmen der Erstprüfung am rückgewonnenen Bindemittel nachzuweisen. Bei splittreichen Asphaltbetondeckschichten sind max. 30 M.-% Asphaltgranulat zulässig.

Bei der Anwendung von Maximalrecycling ist in Ergänzung der Tabelle 11 TL Asphalt-StB: „Prüfung der Baustoffe im Rahmen der Erstprüfung“ bei der „Prüfung Asphaltmischgut/Probekörper“ zusätzlich das Verformungsverhalten bei Wärme durch einen einaxialen Druck-Schwellversuch entsprechend TP Asphalt-StB, Teil 25 B1 zu prüfen. Bei Deck-, Binder- und Tragschichtmischgut ist die Zuordnung des Bindemittels nach dem Bitumen-Typisierungs-Schnell-Verfahren (BTSV) nachzuweisen.

- **Bayern**

ZTV Asphalt-StB:

Bei Verwendung von Asphaltgranulat ist durch baustellenbezogene Laborprüfungen des Auftragnehmers nachzuweisen, dass die Kennwerte Erweichungspunkt Ring und Kugel, Bindemittelgehalt und Korngrößenverteilung des für die Baumaßnahme eingesetzten Asphaltgranulats innerhalb der in der Klassifizierung angegebenen Spannweiten liegen und der petrographische Typ übereinstimmt. Der Nachweis kann z. B. durch Prüfergebnisse der werkseigenen Produktionskontrolle des Asphaltmischwerks erfolgen.

Bei Mitverwendung von Asphaltgranulat und gleichzeitigem Einsatz von PmB 25/55-55 A RC oder 10/40-65 A RC darf der Erweichungspunkt Ring und Kugel des aus dem Asphaltmischgut rückgewonnenen Bindemittels um nicht mehr als 8 °C über dem im Eignungsnachweis angegebenen resultierenden Erweichungspunkt Ring und Kugel liegen.

Vom zur Verwendung kommenden Asphaltgranulat sollen Durchschnittsproben, bestehend aus fünf Teilproben von je 3 kg entnommen werden. An jeder Durchschnittsprobe wird die Übereinstimmung der Angaben der zugehörigen Klassifizierung überprüft.

- **Hamburg**

TL AG-StB, Asphalttragschichten:

Der Erweichungspunkt Ring und Kugel des Bindemittels aus dem Asphaltgranulat aus Asphalttragschichten darf 79 °C nicht übersteigen. Bei höheren Erweichungspunkten Ring und Kugel ist im Rahmen der Erstellung des Eignungsnachweises die Wirksamkeit des Bindemittels anhand der technischen Kennwerte zu prüfen und entsprechend zu berücksichtigen. Als frisch zuzugebende Bindemittel können alle Sorten gemäß TL Bitumen-StB 07/13 eingesetzt werden. Die Anforderungen an das resultierende Bindemittel gemäß Tabelle 4.2 bleiben hiervon unberührt. Abweichungen der Gesteinsrohichte zwischen Eignungsnachweis und Kontrollprüfung von über 0,05 g/cm³ stellen keinen Mangel dar.

TL AG-StB, Asphaltbinderschichten:

Bei der Herstellung von Asphaltbinderschichten darf nur Ausbauasphalt aus Walzasphaltdeckschichten und Asphaltbinderschichten verwendet werden.

Abschnitt 4.3.2.1, 3. bis 5. Satz, der TL AG-StB 09 gilt nicht.

Der gesamte Bindemittelgehalt des Asphaltgranulates kann im Rahmen der Erstellung der Eignungsnachweis auf den Bindemittelgehalt des resultierenden Asphaltmischgutes angerechnet werden.

TL AG-StB, Asphaltdeckschichten:

Ausbauasphalt kann abweichend von den ZTV Asphalt-StB 07/13 und den TL Asphalt-StB 07/13 als Asphaltgranulat bei der Herstellung von Asphaltdeckschichtmischgut in den folgenden Anteilen des resultierenden Asphaltmischgutes zugegeben werden:

- Splittmastixasphalt ≤ 30 M.-% Asphaltgranulat aus Asphaltdeckschichten aus Splittmastixasphalt und Offenporigem Asphalt
- Gussasphalt ≤ 30 M.-% Asphaltgranulat aus Asphaltdeck- und Asphaltzuschichtschichten aus Gussasphalt
- Asphaltbeton ≤ 50 M.-% Asphaltgranulat aus Walzasphaltdeckschichten und Asphaltbinderschichten

Im Rahmen der Erstellung des Eignungsnachweises ist die mögliche Zugabemenge gemäß Anhang D, TL Asphalt-StB 07/13 zu ermitteln. Der Eignungsnachweis muss den entsprechenden Nachweis als Anlage enthalten. Bis zu den vorstehenden Grenzwerten ist die maximal mögliche Zugabemenge anzustreben. Nach vorheriger Rücksprache mit dem AG können baumaßnahmenbezogenen Eignungsnachweise mit höheren Zugabemengen eingereicht werden. Die Erteilung des Sichtvermerkes ist an ausreichend große Asphaltgranulathalden besonderer Gleichmäßigkeit geknüpft.

Abschnitt 4.3.2.1, 3. bis 5. Satz, der TL AG-StB 09 gilt nicht.

Der gesamte Bindemittelgehalt des Asphaltgranulates kann im Rahmen der Erstellung des Eignungsnachweises auf den Bindemittelgehalt des resultierenden Asphaltmischgutes angerechnet werden.

- **Rheinland-Pfalz**

TL Asphalt-StB:

Bei Verwendung von Asphaltgranulat in Asphaltmischgut mit PmB sind höher polymermodifizierte Bitumen, z. B. „RC-Bindemittel“, einzusetzen, deren Basisbitumen die Anforderungen nach TL Bitumen-StB 07/13 erfüllen. Abweichend von Abschnitt 3.1.1 der TL Asphalt-StB 07/13 darf für Asphalttragschichtmischgut mit Asphaltgranulat das Zugabebitumen um bis zu zwei Sorten weicher sein als das geforderte Bitumen. Es darf hierzu auch ein weiches Strassenbaubitumen als 70/100 verwendet werden.

- **Sachsen-Anhalt**

Güteüberwachung von Baustoffen und Baustoffgemischen:

Die Mitverwendung von Asphaltgranulat ist gemäß den TL Asphalt-StB und den ZTV Asphalt-StB vorzusehen.

4.1 Verwertung von Asphaltgranulat (Ausbauasphalt) in Asphalttschichten; Heißmischverfahren:

Im Rahmen der Verwertung von Asphaltgranulat in Asphalttschichten sind maßnahmenspezifisch Teile des „Merkblattes für die Wiederverwendung von Asphalt - M WA“ (FGSV-Nr. 754) und der „Technischen Lieferbedingungen für Asphaltgranulat – TL AG-StB“ (FGSV-Nr. 749) vertraglich zu vereinbaren. Der Einsatz von Asphaltgranulat aus teer-/pechhaltigen Ausbauasphalten ist in der Dienstanweisung DA-04/2009-224 vom 28.07.2009 „Richtlinie für die umweltverträgliche Verwertung von Ausbaustoffen mit teer-/pechtypischen Bestandteilen sowie für die Verwertung von Ausbauasphalt im Straßenbau (RuVA-StB 01); Ausgabe 2001, Fassung 2005“ geregelt. Ab einer Zugabemenge von 15 M.-% Asphaltgranulat und einem geforderten Bindemittel 25/55-55 bzw. 10/40-65 A sind vorzugsweise die Sorte 25/55-55 A RC bzw. 10/40-65 A RC zu verwenden.

Pos-Papier Verwendung Asphaltgranulat; 4. Bindemittel im Asphaltgranulat:

Asphaltgranulat, das eine übermäßige Verhärtung des Bindemittels (Mittelwert des Erweichungspunktes Ring und Kugel > 70 °C; Einzelwert > 77 °C) aufweist, darf nur unter nachfolgend aufgeführter gesonderter Nachweisführung für die Herstellung von Asphaltmischgut verwendet werden:

Bei gesicherter Kenntnis (z.B. aus Erst-/Eignungsprüfungen, Bauakte) über die Verwendung von viskositätsveränderten Bindemittel im Ausbauasphalt können die oben genannten Grenzwerte überschritten werden. Das Vorhandensein dieser Zusätze im Asphaltgranulat ist bei dessen Klassifizierung bei der Angabe der Bindemittelart zusätzlich anzugeben.

Bei Mitverwendung von Asphaltgranulat mit viskositätsveränderten Bindemitteln ist dies in der Erstprüfung/im Eignungsnachweis zusätzlich anzugeben. In diesem Falle darf in der Kontrollprüfung der resultierende Erweichungspunkt um nicht mehr als 8 °C über dem im Eignungsnachweis angegebenen Erweichungspunkt Ring und Kugel ($T_{R\&Bmix}$) liegen.

Soll Asphaltgranulat mit einem höheren Erweichungspunkt Ring und Kugel für die Heißverarbeitung verwendet werden, ist die Wirksamkeit des Bindemittels durch die zusätzliche Bestimmung des Brechpunktes nach Fraaß (entsprechend DIN EN 12593) zu bestimmen. Wird ein Wert von ≥ 0 °C ermittelt, ist dieses Asphaltgranulat dafür nicht geeignet.

Können vorgenannte Nachweise nicht erbracht werden, kann Asphaltgranulat verwendet werden:

- in Verfestigungen mit hydraulischen Bindemitteln,
- in Verfestigungen mit Bitumenemulsion,
- in Verfestigungen mit hydraulischen Bindemitteln und Bitumenemulsion,
- in Schichten ohne Bindemittel.

5.2 Anforderungen an Asphaltgranulat für eine Verwendung in Asphaltdeck- und Asphaltbinderschichten gemäß TL Asphalt-StB 09, Abschnitte 3.2.3, 3.2.4 und 3.2.6

Asphaltgranulat, ausgenommen Material aus Asphalttragschichten, das den TL AG-StB entspricht sowie nach Tabelle 1 beurteilt wurde, darf für die Herstellung von Asphaltbeton in Asphaltdeck- und Asphaltbinderschichten verwendet werden.

In Gussasphalt findet nur Asphaltgranulat aus Gussasphaltschichten Anwendung.

Tabelle 1: Maximal zulässige Spannweiten a_{\max} der aufgeführten Merkmale für die Ermittlung der Gleichmäßigkeit des Asphaltgranulates für die Verwendung in Mischgut für Asphaltbeton für Deck- und Binderschichten

Herkunft des Asphaltgranulats	Maximal zulässige Spannweiten a_{\max} des Asphaltgranulats					max. mögl. Zugabemenge $Z_{\text{mögl.}}$
	Bindemittelgehalt	Fülleranteil < 0,063 mm	Kornanteil 0,063-2 mm	Kornanteil > 2 mm	Erweichungspunkt Ring und Kugel	
	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	[°C]	[M.-%]
Walzasphalt-deckschichten,	3,3	19,8	52,8	52,8	40,0	10
Deck- und Binderschicht,	2,2	13,2	35,2	35,2	26,7	15
Binderschicht	1,7	9,9	26,4	26,4	20,0	20
	1,3	7,9	21,1	21,1	16,0	25
	1,1	6,6	17,6	17,6	13,3	30
	0,9	5,7	15,1	15,1	11,4	35
	0,8	5,0	13,2	13,2	10,0	40
	0,7	4,0	10,6	10,6	8,0	50
Die Berechnung der maximal zulässigen Spannweiten erfolgte nach dem Anhang D der TL Asphalt-StB						

5.3 Anforderungen an Asphaltgranulat für eine Verwendung in Asphalttrag- und Asphalttragdeckschichten gemäß TL Asphalt-StB 09, Abschnitte 3.2.1 und 3.2.2

Asphaltgranulat, das den TL AG-StB 09 entspricht sowie nach Tabelle 2 beurteilt wurde, darf für die Herstellung von Mischgut für Asphalttrag- und Asphalttragdeckschichten verwendet werden.

Tabelle 2: Maximal zulässige Spannweiten a_{\max} der aufgeführten Merkmale für die Ermittlung der Gleichmäßigkeit des Asphaltgranulates für die Verwendung in Mischgut für Asphalttrag- und Asphalttragdeckschichten

Herkunft des Asphaltgranulats	Maximal zulässige Spannweiten a_{\max} des Asphaltgranulats					max. mögl. Zugabemenge $Z_{\text{mögl.}}$
	Bindemittelgehalt	Fülleranteil < 0,063 mm	Kornanteil 0,063-2 mm	Kornanteil > 2 mm	Erweichungspunkt Ring und Kugel	
	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	[°C]	[M.-%]
Walzasphaltdeckschichten,	6,0	50,0	80,0	90,0	40,0	10
Deck- und Binderschicht,	4,0	33,3	53,3	60,0	26,7	15
Binderschicht,	3,0	25,0	40,0	45,0	20,0	20
Trag- oder Tragdeckschicht	2,4	20,0	32,0	36,0	16,0	25
	2,0	16,7	26,7	30,0	13,3	30
	1,7	14,3	22,9	25,7	11,4	35
	1,5	12,5	20,0	22,5	10,0	40
	1,2	10,0	16,0	18,0	8,0	50
	0,8	6,3	10,0	11,3	5,0	80

Die Berechnung der maximal zulässigen Spannweiten erfolgte nach dem Anhang D der TL Asphalt-StB

9 Verfahrenstechnische Hinweise

9.1 Lagerung von Asphaltgranulat

In Abhängigkeit vom vorgesehenen Verwendungszweck ist bei der Lagerung folgendes zu berücksichtigen:

- Trennung von Aufbruch- und Fräsasphalt,
- Trennung des Fräsasphaltes nach Asphaltart bei schichtenweisem Fräsen,
- getrennte Lagerung von Gussasphalt und/oder Sondernischgutarten,

- Schutz vor Feuchtigkeitsaufnahme,
- evtl. Trennung von Fräsasphalt aus verschiedenen Gewinnungsorten (z.B. bei großen Ausbaumaßnahmen),
- evtl. Trennung nach der max. Stückgröße,
- evtl. Ergreifen von Maßnahmen gegen Verklebungen.

Durch Umsetzen bei der Lagerung und/oder durch Zerkleinerung und Durchmischung vor der Verarbeitung wird die Gleichmäßigkeit des Asphaltgranulates verbessert.

Tabelle 3: Maximal mögliche Asphaltgranulatzugabemengen in Abhängigkeit von den anlagentechnischen Kriterien nach M WA und Erfahrungswerten in Sachsen-Anhalt (ST)

Mischanlagentyp	Zugabeart des Asphaltgranulats	Kurzbezeichnung	max. mögliche Zugabemenge (Z _{mögl.}) in M.-%	Mengen in ST in M.-%
Chargenmischanlage nach 6.1 M WA	heiß	Ch/h	40	40
	kalt	Ch/k	30	30
	gesonderte Vorrichtung		100 ¹⁾	60
Durchlaufmischanlage	heiß	D/h	40	30

¹⁾ noch keine praktischen Erfahrungen

• **Berlin**

TL Asphalt-St, Abschnitt 3.1.1:

Asphaltgranulat ist mitzuverwenden, soweit es in der erforderlichen Qualität vorhanden und die Zugabe technisch möglich ist. Das Asphaltgranulat muss den Anforderungen der TL AG-StB und dem Merkblatt M WA entsprechen. Dabei gelten folgende Grundsätze:

- Asphaltgranulat aus Asphalttragschichten darf nicht für die Herstellung von Asphaltdeck- und Asphaltbinderschichten verwendet werden.
- Asphaltgranulat aus Gussasphalt sollte vorrangig nur in Gussasphaltschichten eingesetzt werden.
- In Splittmastixasphaltdeckschichten ist im Regelfall kein Asphaltgranulat zu verwenden. Ausnahmen sind in der Leistungsbeschreibung zu vereinbaren. In diesem Fall darf nur Asphaltgranulat aus Splittmastixasphaltschichten verwendet werden.
- Bei der Herstellung von Asphaltmischgut für Asphalttragschichten muss der resultierende Erweichungspunkt Ring und Kugel innerhalb der Sortenspanne des geforderten Bitumens liegen. Hierzu kann entweder ein Bitumen mit derselben Spezifikation wie das geforderte Bitumen oder ein Bitumen, das bis zu zwei Sortenspannen weicher ist, verwendet werden. Ein weicheres Strassenbaubitumen als 160/220 oder Regeneratoren dürfen nur mit Zustimmung der für das Bauen zuständigen Senatsverwaltung verwendet werden. In der Erstprüfung ist bei der Verwendung von Asphaltgranulat zusätzlich die Rohdichte des resultierenden Gesteinskörnungsgemisches für die Ermittlung des Bindemittelgehaltes anzugeben.

4.3 Erfahrungen und regulative Vorgaben in Österreich

In Österreich liegt die jährliche Asphaltmischgutproduktion bei rund 8 Millionen Tonnen (Stand 2017) ⁽⁵⁹⁾. Die jährliche Menge an Ausbaupasphalt beträgt 1,5 bis 2 Mio. Tonnen ^(60, 61). Bis zu 100 % des nicht kontaminierten Ausbaupasphalts werden rezykliert, zum größten Teil für untergeordnete Einsatzzwecke, wie für ungebundene Tragschichten, zur Befestigung von Güterwegen und Banketten (siehe z. B. Projekt »Schöckelstraße« in Graz ⁽⁶²⁾).

Tabelle 8: Ausbaupasphalt in Österreich ⁽⁶¹⁾

	2015	2016	2017	Anmerkung
Ausbau-asphalt	1.860.000 t	2.006.000 t	2.185.500 t	Schlüsselnummer SN 54912 gemäß RBV (sh. unten)
	21.300 t	11.000 t	12.000 t	gefährlich kontaminierter Asphalt, Schlüsselnummer SN 54912-77 gemäß RBV
Verwertung	1.656.000 t	1.937.000 t	2.134.800 t	gebunden/ungebunden
Deponierung	21.000 t	19.600 t	35.000 t	-

Dabei könnten bei einer Wiederverwendung im Asphalt rein rechnerisch bei einer Menge an Ausbaupasphalt von 1,6 Mio. Tonnen und einen angenommenen Bindemittelgehalt im Asphaltgranulat von durchschnittlich 3,5 % jährliche Einsparungen von rund € 40 Mio. erzielt werden (Tabelle 9). ⁽⁵⁹⁾

Tabelle 9: Kalkulationsbeispiel zum Einsparungspotential bei Wiederverwendung von Asphaltgranulat Einsatz ⁽⁵⁹⁾

Aufkommen Ausbaupasphalt (2017)	1.860.000 t
Verwertung Ausbaupasphalt (2017)	1.656.000 t
Produktion Mischgut pro Jahr ca.	8.000.000 t
Bitumeneinsparung ca. 3,5 %, das sind ca.	29 Mio. €
(bezogen auf die anfallende Menge, Annahme: Preis Straßenbaubitumen 450 €/t)	
Gesteineinsparung ca. 10 %, das sind ca.	9,6 Mio. €
(bezogen auf Jahresproduktion Mischgut, Annahme: Gesteinspreis 12 €/t)	
Summe jährliches Einsparungspotential Mischguterzeugung, ca.	40,0 Mio. €

Die ASFINAG ⁶³ fordert bei Bauvorhaben am hochrangigen Straßennetz einen Recyclinganteil von mindestens 20 % in Asphalttrag- und -binderschichten. Die ASFINAG, das österreichische Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, sowie die ÖBB Infrastruktur AG förderten 2015 das Forschungsprojekt »Optimierung des Recyclinganteils in Asphalttrag- und -binderschichten« (ORAB) ⁽⁶⁴⁾, in dem u. a. ein Leitfaden »Asphaltrecycling« unter Einbindung der Erfahrungen in Deutschland erarbeitet wurde.

In Österreich sind heute aber nur wenige Asphaltmischanlagen mit Paralleltrommel ausgerüstet, und bei konventionellen Anlagen können nur maximal 30 % an Asphaltgranulat zugegeben werden ^(60, 65). Erschwerend ist auch der hohe Platzbedarf, den die Lagerung des Asphaltgranulats getrennt nach Korndurchmesser/Fräserschichten erfordert und eine Überdachung der Lagerplätze könnte bei einigen Mischwerken problematisch hinsichtlich gewerberechtl. Genehmigungen sein ⁽⁶⁵⁾.

⁵⁹ Kranz, C. 2019. Verwertung von Ausbaupasphalt. Gestrata-Journal, März 2019, Folge 154, Wien.

⁶⁰ Fegelin F. und Gritsch T. 2009. Ausbaupasphalt im Straßenbau. Gestrata-Journal, April 2009, Folge 124, Wien.

⁶¹ Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus (Hrsg.): Bestandsaufnahme der Abfallwirtschaft in Österreich – Statusbericht, Wien, 2019.

⁶² ORF-Steiermark-Artikel unter <https://steiermark.orf.at/v2/news/stories/2807268/>, o. J., abgerufen am 10.02.2020.

⁶³ Die Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft ist eine österreichische Infrastrukturgesellschaft im vollständigen Eigentum der Republik Österreich.

⁶⁴ Wistuba M., Grönniger J., Isailović I. 2015. Optimierung des Recyclinganteils in Asphalttrag- und -binderschichten (ORAB). Schlussbericht, Forschungsprojekt i. A. des österreichischen Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie, der ASFINAG und der ÖBB Infrastruktur AG, Institut für Straßenwesen, Technische Universität Braunschweig.

⁶⁵ Talkrunde – Klares Bekenntnis zum Recycling. Baublatt Österreich Juli/August 2014, specialmedia.com GmbH, Wien, 2014.

In einem von der OMV AG ⁽⁶⁶⁾ durchgeführten Forschungsprojekt ⁽⁶⁷⁾ wurde auf der Landesstraße L 384 in Laßnitzthal, Steiermark, auf einer ca. 500 m langen Strecke die Asphalttrag- und -deckschicht jeweils mit 15 bzw. 20 % Zugabe an Asphaltgranulat ausgeführt. Als Zugabe-Bindemittel wurde ein von der OMV speziell für Recyclingzwecke entwickeltes, hochmodifiziertes Bitumen verwendet (OMV Starfalt® PmB 45/80 RC).

2018 wurde in Hausleiten, Niederösterreich, von der STRABAG SE ⁽⁶⁸⁾ eine Asphaltmischanlage vom Typ *Benninghoven BA 5000* (Paralleltrommel) in Betrieb genommen, eine Anlage mit Rekuperator, der es ermöglicht, das Recycling-Material zu erhitzen ohne, dass es mit einer offenen Flamme in Berührung kommt. Es sind Zugabemengen an Asphaltgranulat von über 40 % möglich.

Im Folgenden wird auf die Technischen Regeln in Österreich bezüglich der Wiederverwendung von Asphalt näher eingegangen, einen schematischen Überblick zeigt Abbildung 4.

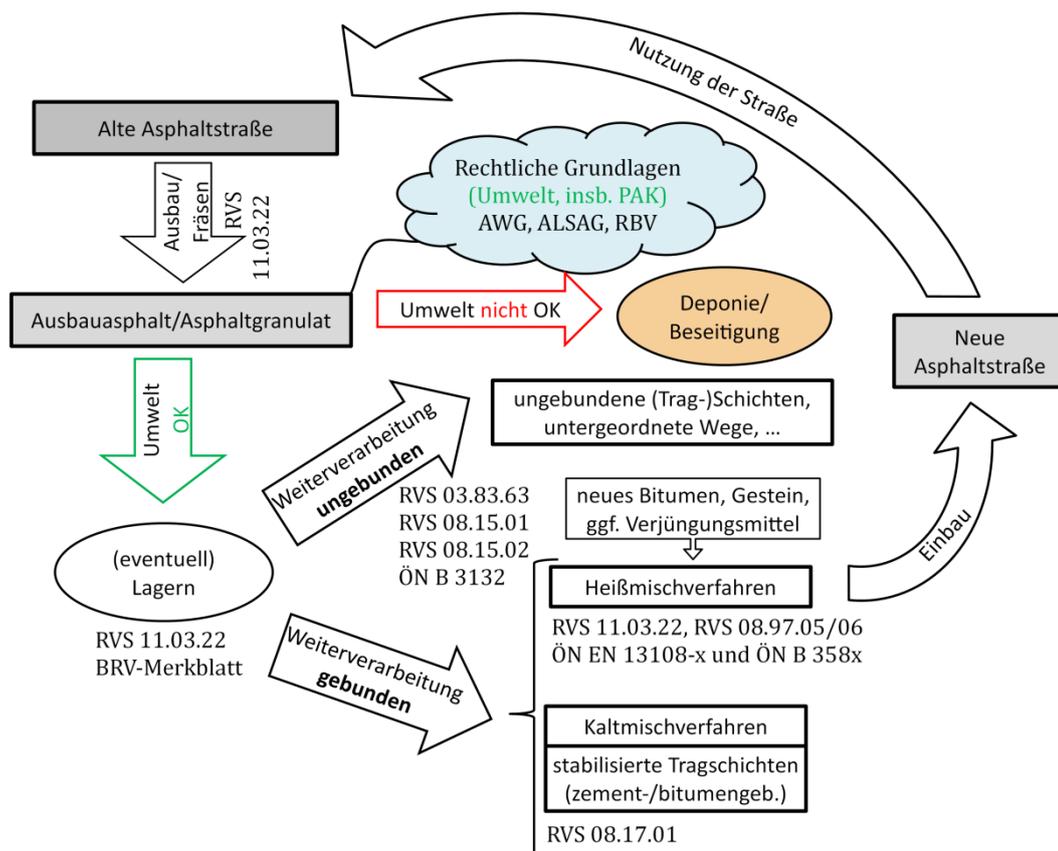


Abbildung 4. Schematischer Überblick zu den Technischen Regeln in Österreich bezüglich der Wiederverwendung von Asphalt.

4.3.1 Gesetze und Verordnungen

• Abfallwirtschaftsgesetz (AWG)

Das AWG ⁽⁶⁹⁾ ist die nationale Umsetzung der EU-Abfallrahmenrichtlinie (entspricht daher weitgehend dem deutschen KrWG). Gemäß § 1 Abs. 1 AWG gilt das Vorsorgeprinzip, § 1 Abs. 2 AWG regelt die Abfallhierarchie

⁶⁶ Die österreichische OMV Aktiengesellschaft ist ein börsennotierter Erdöl-, Erdgas- und Chemiekonzern mit Sitz in Wien.

⁶⁷ Spiegl M. und Kammerer S. 2011. Forschungsprojekt Ausbauasphalt – L384 Laßnitzthal. Gestrata-Journal, Jänner 2011, Folge 131, Wien.

⁶⁸ Die Strabag SE ist ein börsennotiertes Bauunternehmen mit Hauptsitz in Wien und eines der größten Bauunternehmen Europas.

⁶⁹ Bundesgesetz über eine nachhaltige Abfallwirtschaft (Abfallwirtschaftsgesetz 2002 – AWG 2002), BGBl. I Nr. 102/2002 idF I 104/2019, Österreich.

analog zum KrWG. § 1 Abs. 2a Z 1 AWG hält die Vorgabe der wirtschaftlichen Zumutbarkeit und der technischen Machbarkeit fest, analog zum KrWG. § 2 AWG enthält Begriffsbestimmungen, welche sich im Wesentlichen mit den deutschen Erklärungen decken.

- **Altlastensanierungsgesetz (ALSAG)**

Ziel des ALSAG ⁽⁷⁰⁾ ist laut § 1 die Finanzierung der Sicherung und Sanierung von Altlasten. § 3 ALSAG bestimmt, welche Tätigkeiten einem Altlastenbeitrag unterliegen. § 3 Abs. 1 Z 1 lit c ALSAG legt fest, dass ein Beitrag zu entrichten ist für das Verfüllen von Geländeunebenheiten [...] oder das Vornehmen von Geländeanpassungen (u. a. die Errichtung von Dämmen oder Unterbauten von Straßen, Gleisanlagen oder Fundamenten) oder der Bergversatz mit Abfällen. Ebenfalls ist laut § 3 Abs. 1 Z 4 ALSAG ein Beitrag fällig für das Befördern von Abfällen zu einer Tätigkeit [...] außerhalb des Bundesgebietes, auch bei vorgeschalteten Behandlungsschritten. § 3 Abs 1a regelt Ausnahmen von der Beitragspflicht.

Im Zusammenhang mit Recycling sind vor allem die Ziffern 6 und 6a beachtenswert. Nach Z 6 sind Recycling-Baustoffe von der Beitragspflicht im Sinne des § 3 Abs. 1 AWG ausgenommen, die nach den Vorgaben des 3. Abschnitts der Recycling-Baustoffverordnung [...] hergestellt und verwendet werden und im Zusammenhang mit einer Baumaßnahme im unbedingt erforderlichen Ausmaß für eine Tätigkeit gemäß Abs. 1 Z 1 lit. c verwendet werden. Nach Z 6a gilt die Ausnahme auch für Recycling-Baustoffe, die im Einklang mit den Vorgaben des Bundes-Abfallwirtschaftsplans gemäß § 8 AWG 2002 für Aushubmaterialien hergestellt und verwendet werden und im Zusammenhang mit einer Baumaßnahme im unbedingt erforderlichen Ausmaß für eine Tätigkeit gemäß Abs. 1 Z 1 lit. c verwendet werden.

§ 4 ALSAG legt fest, wer den Beitrag zu entrichten hat (Beitragsschuldner). Auf die besonderen Regelungen hinsichtlich des Beitragsschuldners bei Recycling-Baustoffen in § 4 Abs. 2 wird hingewiesen. § 6 ALSAG legt die Höhe des Beitrages fest. Seit 1. Januar 2012 beträgt der Beitrag für Aushubmaterial, Baurestmassen und sonstige mineralische Abfälle, welche die entsprechenden Regelungen der Deponieverordnung 2008 erfüllen, 9,20 Euro pro angefangene Tonne. Für die Ablagerung auf Deponien für Reststoffe oder Deponien für gefährliche Abfälle sind entsprechend höhere Beiträge zu entrichten.

Die Wirtschaftskammer Österreich (WKÖ) hat ein ALSAG-Merkblatt mit praxisrelevanten Beispielen herausgegeben ⁽⁷¹⁾.

- **Recycling-Baustoffverordnung (RBV)**

Die RBV ⁽⁷²⁾ zielt ab auf die Förderung der Kreislaufwirtschaft und Materialeffizienz – insbesondere die Vorbereitung zur Wiederverwendung von Bauteilen und die Sicherstellung einer hohen Qualität von Recycling-Baustoffen (§ 1 RBV) – und erfüllt damit die in der EU-Abfallrahmenrichtlinie ⁽⁷³⁾ genannten Zielvorgaben der Europäischen Union ⁽⁷⁴⁾, wie die 70 %-ige Wiederverwertung von Baurestmassen (Art. 11).

Die festgelegten Pflichten bei Bau- und Abbruchtätigkeiten sind: Schad- und Störstofferkundung (§ 4 RBV), Rückbau (§ 5 RBV) und Trennpflicht (§ 6 RBV).

Die RBV regelt detailliert, welche Abfallarten zu Recycling-Baustoffen verarbeitet werden dürfen und legt auch Recyclingverbote fest (§ 7 RBV), u. a. für Abfälle mit PAK-Verunreinigungen (z. B. Teer), Phenolen oder Mineralölen. Asphalt und Bitumen haben hierbei die Schlüsselnummer SN 54912, schlackenhaltige Ausbausphalte die Schlüsselnummer SN 31498.

⁷⁰ Bundesgesetz vom 7. Juni 1989 zur Finanzierung und Durchführung der Altlastensanierung (Altlastensanierungsgesetz), BGBl. Nr. 299/1989, idF BGBl. I Nr. 104/2019, Österreich.

⁷¹ Geschäftsstelle Bau, WKÖ: ALSAG Merkblatt, Ausgabe 2017, Wien.

⁷² Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über die Pflichten bei Bau- und Abbruchtätigkeiten, die Trennung und die Behandlung von bei Bau- und Abbruchtätigkeiten anfallenden Abfällen, die Herstellung und das Abfallende von Recycling-Baustoffen (Recycling-Baustoffverordnung), BGBl. II Nr. 181/2015 idF BGBl. II Nr. 290/2016, Österreich.

⁷³ Richtlinie 2008/98/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. November 2008 über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien (Text von Bedeutung für den EWR), ABl. Nr. L 312 vom 22.11.2008.

⁷⁴ Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus (Hrsg.): Erläuterungen zur Recycling-Baustoffverordnung, Wien, 2018.

Die Qualitätsanforderungen an Recycling-Baustoffe sind in § 9 RBV geregelt. Für Ausbauasphalt ist Tabelle 3 im Anhang 2 RBV von Interesse. (Anmerkung: Hervorzuheben ist – für den Vergleich mit Deutschland und der Schweiz – der Wert für $\Sigma 16\text{PAK}$ nach EPA).

§ 13 RBV listet die zulässigen Einsatzbereiche von Recycling-Baustoffen auf. § 14 legt das Ende der Abfalleigenenschaft fest. Die Bestimmungen der §§ 13 und 14 RBV sind in den Erläuterungen zur RBV ⁽⁷⁴⁾ übersichtlich dargestellt. Die §§ 16 und 17 RBV enthalten besondere Bestimmungen zu Ausbauasphalt. Hervorzuheben sind die Qualitätsklassen B-B, B-C und B-D, da diese aus Ausbauasphalt bestehen bzw. für Recycling-Asphalt verwendet werden.

4.3.2 Bundes-Abfallwirtschaftsplan (BAWP)

Der BAWP ⁽⁷⁵⁾ ist eine Bestandsaufnahme zur Abfallwirtschaft in Österreich und wird alle 6 Jahre erstellt (zuletzt 2017). Es sollten dadurch die Ziele und Grundsätze des AWG verwirklicht werden. Ergänzt und aktualisiert wurde er durch den Statusbericht 2019 ⁽⁷⁶⁾, wo auch Zahlen zum Asphalt-Recycling genannt werden.

4.3.3 Richtlinien des Baustoff-Recycling Verbands (BRV)

Der Österreichische Baustoff-Recycling Verband (BRV) ist eine freiwillige Vereinigung von Recyclingunternehmen und stellt die Interessenvertretung der Baustoff-Recycling-Wirtschaft dar (www.br.v.at).

- **Richtlinie Recycling-Baustoffe**

In der Richtlinie Recycling-Baustoffe ⁽⁷⁷⁾ sind alle relevanten gesetzlichen und normativen Bestimmungen (RBV, Qualitätsklassen, Güteklassen) zusammengefasst:

- Rückbau-konform: erfüllt ÖNORM B 3151 „Rückbau“
- Umweltrecht-konform: erfüllt Recycling-Baustoffverordnung
- Bautechnik-konform: erfüllt ÖNORM B 3140 „Rezyklierte Gesteinskörnungen“
- Bauprodukt-konform: erfüllt CE-Kennzeichnung
- Europa-konform: erfüllt ÖNORM EN 13242 und ÖNORM EN 12620
- Berücksichtigt die RBV-Novelle
- Ergänzungsblatt zum BAWP 2017

Im Abschnitt A6 der Richtlinie wird das »Gütezeichen für Recycling-Baustoffe« beschrieben, ein freiwilliges Zeichen für die Offenlegung der Qualitätssicherung, das auf die nachvollziehbare Herstellung, hohe Qualität sowie unabhängige Kontrolle von Recycling-Baustoffen hinweist und dessen Kontrolle in periodischen Zeitabständen von einem akkreditierten Labor des Österreichischen Güteschutzverbandes Recycling-Baustoffe (GSV) erfolgt.

- **Merkblatt Verwertung von Ausbauasphalt**

Dieses Merkblatt ⁽⁷⁸⁾ bietet eine Hilfestellung für den Umgang mit Ausbauasphalt entsprechend den gültigen rechtlichen und technischen Vorschriften (RBV, RVS, Richtlinien für Recycling-Baustoffe und ÖNORM B 3580-Serie). Zur umwelttechnischen Einstufung eines Recycling-Baustoffes muss die Qualitätsklasse gemäß Recycling-Baustoffverordnung festgestellt werden. Diese gibt weiterführende Auskünfte über die Inhaltsstoffe (z. B. PAK, Teer) und die künftigen Einsatzbereiche des Baustoffes.

- **Merkblatt Zwischenlager für Baurestmassen**

⁷⁵ Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus (Hrsg.): Bundes-Abfallwirtschaftsplan 2017 Teil 1 und 2, Wien, 2017.

⁷⁶ Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus (Hrsg.): Bestandsaufnahme der Abfallwirtschaft in Österreich – Statusbericht 2019, Wien, 2019.

⁷⁷ Österreichischer Baustoff-Recycling Verband (BRV): Richtlinie Recycling-Baustoffe, Auflage 10, Wien, 2017.

⁷⁸ Österreichischer Baustoff-Recycling Verband (BRV): Merkblatt Verwertung von Ausbauasphalt, 2. Auflage, Wien, 2020.

Dieses Merkblatt ⁽⁷⁹⁾ dient als technische Grundlage zur Planung und Genehmigung von neu zu errichtenden Flächen für zeitweilige Lagerungen sowie Zwischenlagerungen von nicht gefährlichen mineralischen Baurestmassen (Beton, Asphalt, Aushubmaterialien etc.) und ausgewählten nichtmineralischen Baurestmassen. Die im Merkblatt definierten Flächen können auch der mechanischen Aufbereitung verwertbarer Baurestmassen dienen.

Das zeitweilige Lagern auf der Baustelle ist kein Behandlungsverfahren und somit nicht genehmigungspflichtig. Zwischenlager werden in 3 Typen unterteilt; Tabelle 1 des Merkblattes enthält eine Zuordnung von Materialien zu den Lagertypen:

- Typ 1: Rohplanum ohne Wasserhaltung
- Typ 2: Mechanisch stabilisierte Tragschicht mit großflächiger Versickerung
- Typ 3: Dichtfläche mit Rückverrieselung, Versickerung bzw. Einleitung
 - * Dichte Deckschicht (Dichtasphalt) oder
 - * Drainage unter einer durchlässigen Deck- und Tragschicht

4.3.4 Technische Regelwerke zum Heißmischverfahren

• Anforderungen an Asphaltmischgut - empirischer Ansatz (RVS 08.97.05)

Die Richtlinien RVS 08.97.05 ⁽⁸⁰⁾ regeln die nationalen Anforderungen an Asphaltmischgut (zusammengesetzt nach dem empirischen Ansatz) und an Asphaltgranulat (Kapitel 5.4 RVS 08.97.05).

Hervorzuheben sind die Regelungen für Zugaberraten an Asphaltgranulat von mehr als 10 M-% hinsichtlich der zulässigen Masseanteile an gebrochenen und gerundeten Körnern: Bei den Gesteinsklassen G4, G7 und G8 darf der Anteil an vollständig gerundeten Körnern (C_{tr}) maximal 5 M-% betragen.

Bei höheren Zugaberraten an Asphaltgranulat wird auf die Richtlinien RVS 11.03.22 (siehe unten) verwiesen.

• Anforderungen an Asphaltmischgut - fundamentaler Ansatz (RVS 08.97.06)

Die Richtlinien RVS 08.97.06 ⁽⁸¹⁾ behandeln die nationalen Anforderungen an Asphaltmischgut, das nach dem fundamentalen Ansatz mit Hilfe von gebrauchsvorhaltensorientierten Asphaltprüfungen zusammengesetzt ist.

Die Regelung hinsichtlich der Gesteinskategorie gilt analog zu RVS 08.97.05, jedoch nur für die Gesteinskategorie G4.

Bei höheren Zugaberraten an Asphaltgranulat wird auf die Richtlinien RVS 11.03.22 (siehe unten) verwiesen.

• Entscheidungshilfe bei der Verwertung von Asphaltgranulat (RVS-Merkblatt 11.03.22)

Das RVS-Merkblatt 11.03.22 ⁽⁸²⁾ gibt eine Entscheidungshilfe bei der Verwertung von Asphaltgranulat für Asphaltmischgut. Es beschreibt den Weg des Ausbausasphalts von der Gewinnung (Fräsen) über die Lagerung, die maschinentechnischen Kriterien und Anforderungen an das Mischgut bis zur Verwertung in neuem Heißmischgut.

In Kapitel 3 (Grundsätze) wird auf den normativen Hintergrund und das ALSAG eingegangen. Es wird darauf hingewiesen, dass bei der Verwendung von Ausbausasphalt grundsätzlich kein Altlastenbeitrag fällig wird, wenn die genannten baurechtlichen Vorschriften eingehalten werden. Hinsichtlich der Toleranzen bei der Verwendung gerundeter Körner (C_{tr} -Wert) werden die obigen Ausführungen wiederholt. Eine zur ÖNORM zusätzliche Ausnahme besteht hinsichtlich der Mischguttypen AC Binder H1 und H2 für die Verwendung auf Autobahnen und Schnellstraßen.

⁷⁹Österreichischer Baustoff-Recycling Verband (BRV): Merkblatt Zwischenlager für Baurestmassen, 2. Auflage, Wien, 2018.

⁸⁰ Forschungsgesellschaft Straße-Schiene-Verkehr (FSV): RVS 08.97.05 Anforderungen an Asphaltmischgut (Februar 2019), Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen, FSV, Wien, 2019.

⁸¹ Forschungsgesellschaft Straße-Schiene-Verkehr (FSV): RVS 08.97.06 Anforderungen an Asphaltmischgut - Gebrauchsverhaltensorientierter Ansatz (September 2019), Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen, FSV, Wien, 2019.

⁸² Forschungsgesellschaft Straße-Schiene-Verkehr (FSV): RVS Merkblatt 11.03.22 Entscheidungshilfe bei der Verwertung von Asphaltgranulat für Asphaltmischgut (August 2012), Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen, FSV, Wien, 2012.

Das Merkblatt gibt auch Hinweise zum Fräsen. Dies ist insofern interessant, weil es in Österreich keine gesonderten Richtlinien zum Fräsen gibt (Anhaltspunkte gibt die neue Standardisierte Leistungsbeschreibung Verkehr und Infrastruktur ⁽⁸³⁾). Um die Restfeuchte im Fräsgut gering zu halten, sollte das Fräsen möglichst bei trockenem Wetter stattfinden. Es soll schichtenweise gefräst werden, damit die einzelnen Kornfraktionen optimal genutzt werden können. Durch eine geringe Fräsgeschwindigkeit kann eine Schollenbildung vermieden werden. Die Lagerung des Ausbausphalts sollte eine nach folgenden Gesichtspunkten erfolgen: Trennung von Ausbruchstücken und reinem Fräsgut, Trennung des Fräsguts nach Asphaltdeck- und Asphaltbinderschichten sowie Asphalttrag- und Asphalttragdeckschichten. Gussasphalt und Sondermischungen sollten separat gelagert werden. Gegebenenfalls kann auch eine Trennung nach dem Gewinnungsort und nach der maximalen Stückgröße erfolgen. Eventuell sollten auch Massnahmen gegen das Verkleben der einzelnen Stücke ergriffen werden. Zum Abscheiden bzw. Aufbrechen von Agglomerationen können Roste und Klumpenbrecher verwendet werden. Auf eine möglichst trockene Lagerung des Asphaltgranulats für Heißmischgut ist zu achten, um folgende Vorteile bei der weiteren Verarbeitung zu erhalten:

- Die maximale Zugabemenge von RA kann erhöht werden.
- Durch einen geringeren Brennstoffverbrauch sinkt die Umweltbelastung.
- Die Leistung der Mischanlage wird optimiert.
- Bei der Kaltzugabe wird dadurch die Entstehung von Wasserdampf gemindert.

Hinsichtlich der Anforderungen an die Gleichmäßigkeit (Homogenität) wird auf die ÖNORM EN 13108-8 verwiesen. Die Homogenität des Asphaltgranulats kann z. B. durch die genannten Lagermethoden und durch Zerkleinern und Durchmischen vor der Verarbeitung verbessert werden.

Betreffend die Verwendungszwecke wird in der Tabelle 1 der RVS 11.03.22, unter Bezugnahme auf die ÖNORMen, die Zulässigkeit von Ausbausphalt dargestellt.

Das Kapitel 6 der RVS 11.03.22 behandelt Zugabeverfahren und maschinentechnische Kriterien. Die Zugabe von Asphaltgranulat kann sowohl im kalten als auch im erwärmten Zustand erfolgen. Auf die Einhaltung von minimalen und maximalen Erzeugungstemperaturen am Beginn und Ende der Produktion ist besonderes Augenmerk zu legen.

Kapitel 6.1 des Merkblatts beschreibt Mischmethoden, bei denen das Asphaltgranulat durch den Kontakt mit der erhitzten Gesteinskörnung erwärmt wird. Die Feuchtigkeit des Asphaltgranulats und des Gesteins ist bei diesem Verfahren von erheblichem Einfluss. In Abbildung 1 des Merkblatts (siehe folgende Abbildung 5) ist der Zusammenhang zwischen Feuchtigkeit im Asphaltgranulat und der maximal mögliche Anteil an Asphaltgranulat im Mischgut dargestellt.

⁸³ Forschungsgesellschaft Straße-Schiene-Verkehr (FSV): LB-Verkehr und Infrastruktur (LB-VI), Version 6, im Format ÖNORM A 2063:2015, Kennung: FSV-VI, Version: 006, Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen, FSV, Wien, 1. Mai 2021.

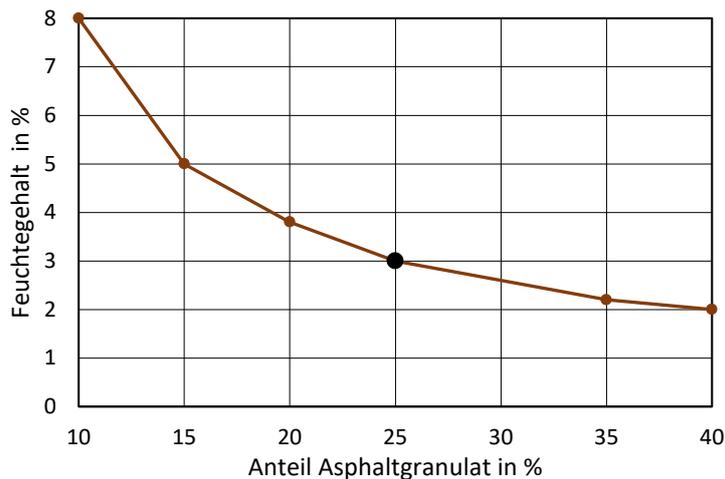


Abbildung 5. Zusammenhang Feuchtegehalt und Asphaltgranulat-Anteil; der schwarze Punkt stellt den Auslegungspunkt dar. ⁽⁸⁴⁾

Die Abbildung 2 im Merkblatt bietet Anhaltswerte für die Temperatur des Gesteinsmaterials, abhängig von Granulat-Anteil und Feuchtigkeit. Beide Diagramme sind auf 25 % Granulat-Anteil und eine Feuchte von 3 M-% ausgelegt. Somit muss die Temperatur des Gesteins ca. 270 °C betragen, damit ein Asphaltmischgut von 170 °C hergestellt werden kann.

Der bei der Zugabe des (feuchten) Asphaltgranulats entstehende Dampf wird über die Dampfabsaugung abgeführt. Der Dampfstoß verändert die Druckverhältnisse in der Anlage erheblich, die Schwankungen können per Drallregler steuerungstechnisch beherrscht werden.

Die Vorerwärmung von Asphaltgranulat auf ca. 130 °C kann mittels Paralleltrommel erfolgen (Kapitel 6.2 des Merkblatts; Warmzugabe/Paralleltrommel). Eine Zwischenlagerung in wärmegeprägten Silos ist möglich. Die Zugabe zu den heißen Gesteinskörnern erfolgt dann chargenweise entweder in der Gesteinskörnungswaage oder im Mischer.

4.3.5 Technische Regelwerke zum Kaltrecycling

• Verwertung für ungebundene Tragschichten (RVS 08.15.01)

Die Richtlinien RVS 08.15.01 ⁽⁸⁵⁾ gelten für ungebundene obere und untere Tragschichten.

In Kapitel 4 der RVS 08.15.01 wird die Verwendung von Ausbauasphalt behandelt. Die möglichen Zugaberaten sind beschränkt, maximal mit 50 M-% (Tabelle 10).

Tabelle 10: Maximale Zugaberaten an Asphaltgranulat in ungebundene Schichten ⁽⁸⁵⁾

Verwendungszweck	Maximaler Granulat-Anteil
ungebundene obere Tragschichten der Lastklassen LK163; LK82; LK42; LK25; LK10 und LK4 für Asphaltbauweisen (gemäß RVS 03.08.63 ⁽⁸⁶⁾)	5 M-%
ungebundene obere Tragschichten der Lastklassen LK1,3; LK0,4; LK0,1 und LK0,05 für Asphaltbauweisen, Pflasterstein und Pflasterplattenbauweise (gemäß RVS 03.08.63)	50 M-%
ungebundene untere Tragschichten (alle Lastklassen)	

• Ungebundene Tragschichten mit Asphaltgranulat (RVS 08.15.02)

⁸⁴ Forschungsgesellschaft Straße-Schiene-Verkehr (FSV): RVS Merkblatt 11.03.22 Entscheidungshilfe bei der Verwertung von Asphaltgranulat für Asphaltmischgut (August 2012), Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen, FSV, Wien, 2012.

⁸⁵ Forschungsgesellschaft Straße-Schiene-Verkehr (FSV): RVS 08.15.01 Ungebundene Tragschichten (Juli 2010; Letzte Änderung: Mai 2017), Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen, FSV, Wien, 2017.

⁸⁶ Forschungsgesellschaft Straße-Schiene-Verkehr (FSV): RVS 03.08.63 Oberbaubemessung (Juni 2016; Letzte Änderung: September 2016), Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen, FSV, Wien, 2016.

Die RVS 08.15.02 ⁽⁸⁷⁾ ist anzuwenden für ungebundene obere Tragschichten (Schichtdicke 10 cm, einlagig) gemäß RVS 03.08.63 für die Bautype AS3 und die Lastklassen LK1,3; LK 0,4; LK0,1 und LK0,05 sowie für ungebundene Tragschichten für Rad- und Gehwege (Schichtdicke maximal 15 cm). Der Granulat-Anteil beträgt in der ungebundenen oberen Tragschicht mindestens 95 M-% und für andere ungebundene Tragschichten mindestens 90 M-%. Unter 10 °C Lufttemperatur oder bei gefrorener Unterlage ist ein Einbau nicht erlaubt.

- **Oberbaubemessung (RVS 03.83.63)**

Die Richtlinien RVS 03.08.63 ⁽⁸⁶⁾ beschreiben standardisierte Straßenaufbauten in Form eines Oberbaukatalogs. Bei den Aufbauten für Asphaltstraßen ist die Bautype AS3 von Interesse, weil für die obere ungebundene Tragschicht Recyclingasphalt verwendet wird.

- **Mit Bindemittel stabilisierte Tragschichten (RVS 08.17.01)**

Die Richtlinien RVS 08.17.01 ⁽⁸⁸⁾ regeln mit Bindemittel stabilisierte Tragschichten, wie mit Zement stabilisierte Tragschichten (ST-Z), mit Tragschichtbinder (hydraulisches Bindemittel mit niedriger Anfangs- und hoher Endfestigkeit) stabilisierte Tragschichten (ST-T) und mit Bitumenemulsion stabilisierte Tragschichten (ST-BZ). Als Gesteinskörnung ist auch Ausbauasphalt zugelassen. Für Stabilisierungen ST-BZ und solche mit mehr als 50 % Granulat-Anteil darf die Lagendicke der einzelnen Schichten 25 cm nicht überschreiten.

4.4 Erfahrungen und regulative Vorgaben in der Schweiz

In der Schweiz sind ca. 157 Millionen Tonnen Asphalt in den Schweizer Straßen verbaut, jährlich werden über fünf Millionen Tonnen Asphalt produziert (Schweiz und Liechtenstein) und es fallen über zwei Millionen Tonnen Ausbauasphalt an. Die Recyclingquote von Ausbauasphalt liegt bei 70 bis 80 %, wovon etwa die Hälfte im Heißmischverfahren wiederverwendet wird und die andere Hälfte für ungebundene Anwendungen, hauptsächlich in den unteren Schichten des Asphaltaufbaus (Tabelle 11). Der Rest wird entsorgt. ^(89, 90)

Das Gro der Schweizer Mischanlagen ist mit modernster Technik ausgestattet: Circa ein Drittel ermöglicht ein Asphaltrecycling von 100% und circa die Hälfte der Anlagen ist mit Paralleltrommeln ausgestattet. Ein aktuelles Hindernis, um höhere Recyclingraten zu erzielen, sind daher nicht die Mischanlagen, sondern die normativen Vorgaben, die beispielsweise hohe Zugaben in Deckschichten verhindern.

Die Herstellung des Ausbauasphalt erfolgt durch Brecher und Aussiebung. Das dabei gewonnene Asphaltgranulat wird je nach Anlage in verschiedenen Stückgrößenfraktionen ausgesiebt (i.d.R. 0/8, 0/16, 0/22 mm). Lange Lagerhaltung kommt durch die fortlaufende Verwendung i.d.R. nicht vor.

Die Korngrößenverteilung des Asphaltgranulats und klassische Bindemitteluntersuchungen wie Erweichungspunkt Ring und Kugel oder Nadelpenetration werden im Allgemeinen alle 500t durchgeführt. Erfahrungen mit dem Dynamischen Scherrheometer sind in der Schweiz nur in geringem Maß vorhanden. Tabelle 12 listet einige Bauprojekte in der Schweiz auf, in denen Ausbauasphalt eingesetzt wurde. Bei Straßen mit hohem Verkehrsaufkommen wird Ausbauasphalt häufig nur in Foundationsschichten, Binderschichten und Tragschichten eingesetzt, jedoch nicht oder nur in geringen Mengen in Deckschichten. Ein Grund für die geringe Recyclingquote in Deckschichten ist, dass oft hohlraumreiche Spezialbeläge mit Ausfallkörpern zum Einsatz kommen.

⁸⁷ Forschungsgesellschaft Straße-Schiene-Verkehr (FSV): RVS 08.15.02 Ungebundene Tragschichten mit Asphaltgranulat (März 2012), Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen, FSV, Wien, 2012.

⁸⁸ Forschungsgesellschaft Straße-Schiene-Verkehr (FSV): RVS 08.17.01 Mit Bindemittel stabilisierte Tragschichten (Oktober 2019), Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen, FSV, Wien, 2019.

⁸⁹ SBK (Autor): Schwarz gehört zu Schwarz. Schweizer Bauwirtschaft – Offizielles Organ des Schweizerischen Baumeisterverbands, Zürich, 2014.

⁹⁰ Paperna, O. & Schütz, R. 2019. Wiederverwertung von Bitumenbelag – Asphalt-Recycling in der Schweiz im europäischen Vergleich. Infrastrukturbau, INT 2/2018, Robe Verlag AG, Küttigen.

Ferner ist bekannt, dass die traditionelle volumetrische Charakterisierung und die Marshall-Prüfung für die Beurteilung von Recyclingmischungen mit hohem Anteil an Ausbausphaltnicht zielführend sind ⁽⁹¹⁾, dies erschwert die routinemäßige Wiederverwendung von Ausbausphaltnicht.

Tabelle 11: Verwertung von Ausbausphaltnicht (RA) in Asphalt-schichten und Fundationsschichten ⁽⁹²⁾

Deckschichten		Tragschichten	
SDA 8-12	Kein RA	AC EME 22 C2	40–50 % RA
AC MR 8 und PA 8	Kein RA	AC T 22 H	50–60 % RA
Binderschichten		Fundationsschichten	
AC EME 22 C1	30–40 % RA	AC F 22 (32)	70–80 % RA
AC B 22 H	50–60 % RA	Kieskoffer und Grabenauffüllungen	(bis 100% Recyclingbeton); 20–30 % RA

Tabelle 12: Auswahl an Bauprojekten in der Schweiz mit Ausbausphaltnicht (RA) ⁽⁹²⁾

N13, Nordspurumlegung Chur		N03/13 Rheineck-St. Margrethen	
AC F 22	85 % RA	AC F 22	70 % RA
Kieskoffer	25 % RA	AC EME 22 C1	40 % RA
		AC EME 22 C2	50 % RA
N06, RUTS		N06, Allmendtunnel	
AC F 22	40 % Betongranulat und 60 % RA	AC F 22 (32)	60 % Betongranulat und 25 % RA

Für den Bau von Fundationsschichten wird u. a. das Kaltrecycling von Asphalt mit Schaumbitumen eingesetzt. Beispielsweise stellt die Schweizer Firma KAMPAG ⁽⁹³⁾, Mülligen im Kanton Aargau, Kaltmischgut mit dem Verfahren »Cold Mixing Concept« (CMC) her, wobei bis zu 100 % Recycling-Anteil realisiert werden können. Als Bindemittel gelangen, je nach Rezept, hydraulische Bindemittel, Bitumenemulsion und Schaumbitumen zum Einsatz. Bei hoher PAK-Belastung des Ausbausphaltnichts können spezielle Bindemittel mit immobilisierendem Effekt eingesetzt werden.

Im Folgenden wird auf die regulativen Vorgaben in der Schweiz bezüglich der Wiederverwendung von Asphalt näher eingegangen, einen schematischen Überblick zeigt Abbildung 6.

⁹¹ Hugener, M. & Kawakami, A. 2015. Forschungspaket Recycling von Ausbausphaltnicht in Heissmischgut: EP2: Mehrfachrecycling von Strassenbelägen, VSS 2005/453, Bundesamt für Strassen, Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK), 2015, Bericht 1510, Empa, Dübendorf, Schweiz.

⁹² Beyeler, H.-P. BAFU – Forum Bauen – Recycling von Asphalt. Vortrag, 22. November 2017, Website: <https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/abfall/fachinfo-daten/Asphaltrecycling%20bei%20Bundesprojekten.pdf.download.pdf/asphaltrecycling-bei-bundesprojekten.pdf>, abgerufen am 13.02.2020.

⁹³ Baustoffgerechtes Recycling von Ausbausphaltnicht, KAMPAG, Mülligen, Website: <http://www.kampag.ch/kampag.pdf>, abgerufen am 04.02.2022.

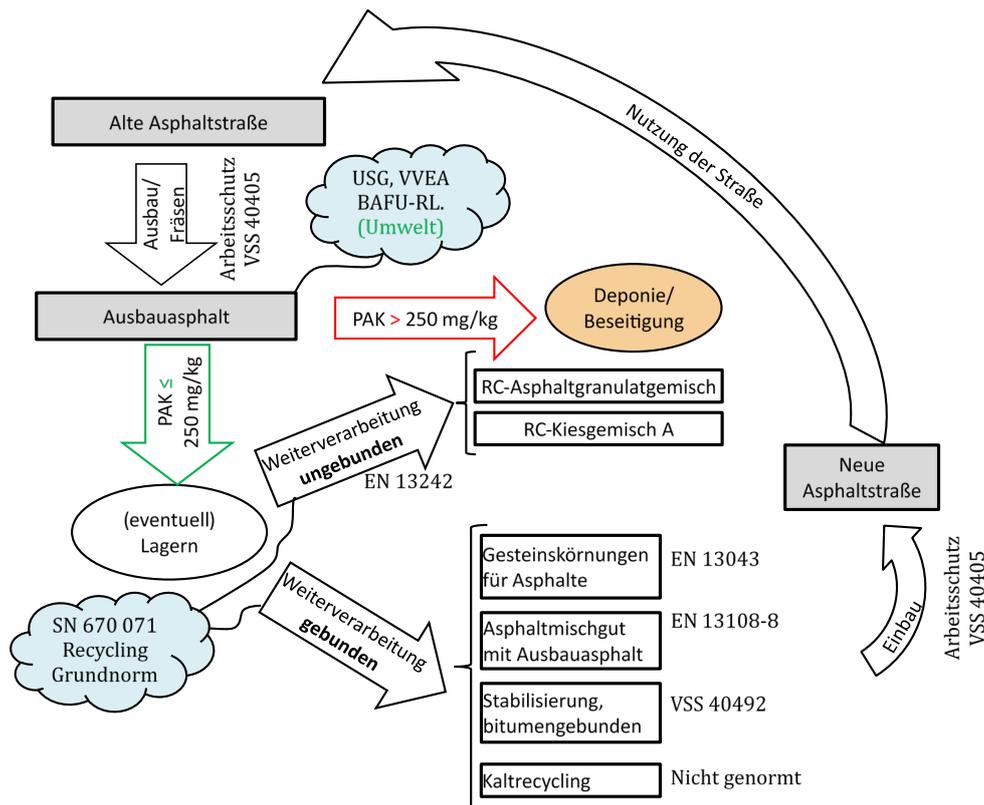


Abbildung 6. Schematischer Überblick zu den regulativen Vorgaben in der Schweiz bezüglich der Wiederverwendung von Asphalt.

- **Bundesgesetz über den Umweltschutz (USG)**

Das USG ⁽⁹⁴⁾ ist die gesetzliche Grundlage für die weiteren Regelungen in Bezug auf (Asphalt-) Recycling. Laut Kapitel 4 Art. 30 und 30a USG ist die Abfallerzeugung zu vermeiden und eine weitestgehende Verwertung anzustreben. Art. 30c sieht für die Behandlung von Abfällen vor, dass diese im Falle einer Ablagerung möglichst wenig organisch gebundenen Kohlenstoff enthalten und möglichst wasserunlöslich sein sollen.

- **Verordnung über die Vermeidung und Entsorgung von Abfällen (VVEA) ⁽⁹⁵⁾**

Die VVEA ⁽⁹⁶⁾ soll die Umweltbelastung durch Abfälle begrenzen und durch eine nachhaltige Verwendung der Rohstoffe die umweltverträgliche Verwertung von Abfällen fördern. Art. 9 VVEA legt ein Vermischungsverbot fest, wenn dieses Vermischen hauptsächlich dazu dient, dass der Schadstoffgehalt durch Verdünnung herabgesetzt wird.

In Art. 12 VVEA wird die allgemeine Verwertungspflicht nach dem Stand der Technik festgeschrieben. Gemäß Art. 16 Abs. 1 VVEA hat der Bauherr/die Bauherrin beim Abbruch von mehr als 200 m³ oder wenn Schadstoffe zu erwarten sind, ein Entsorgungskonzept bei der Baubehörde vorzulegen.

Art. 17 VVEA legt die Trennungspflicht von Bauabfällen fest, auch für Ausbauasphalt. Art. 20 Abs. 1 VVEA verlangt, dass Ausbauasphalt mit einem Gehalt von maximal 250 mg/kg PAK möglichst vollständig als Rohstoff für die Herstellung von Baustoffen zu verwerten ist. Falls dieser Grenzwert überschritten wird, ist eine Verwertung ab dem Jahr 2026 ausgeschlossen. Art. 52 VVEA enthält Übergangsbestimmungen für Ausbauasphalt. So darf

⁹⁴ Bundesgesetz über den Umweltschutz (Umweltschutzgesetz, USG) vom 7. Oktober 1983 (Stand 1. Januar 2018), SR 814.01, Schweiz, 2018.

⁹⁵ Diese Verordnung wurde bis 2015 als »Technische Verordnung über Abfälle (TVA)« bezeichnet. Einige Normen und Regelungen beziehen sich noch auf diesen alten Namen.

⁹⁶ Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen (Abfallverordnung, VVEA) vom 4. Dezember 2015, SR 814.600, Schweiz, 2015.

Ausbauasphalt mit mehr als 250 mg/kg PAK bis zum 31. Dezember 2025 verwendet werden, wenn der Ausbauasphalt maximal 1.000 mg/kg PAK enthält und in adäquaten Anlagen so vermischt wird, dass das fertige Produkt maximal 250 mg/kg PAK enthält oder die kantonale Behörde ihre Zustimmung gibt und keine PAK emittiert werden. Eine Dokumentation über den Einbauort und den PAK-Gehalt ist mindestens 25 Jahre aufzubewahren. Ausbauasphalt mit einem Gehalt von mehr als 250 mg PAK pro kg darf bis zum 31. Dezember 2025 auf einer Deponie des Typs E abgelagert werden.

Das 4. Kapitel VVEA beschreibt Abfallanlagen. Es wird u. a. auf Deponien, Zwischenlager und Verbrennungsanlagen eingegangen. Anhang 1 VVEA enthält Abfallarten und eine Zuordnung zu einem Code. Gemäß Anhang 5 Abs. 2 VVEA darf Ausbauasphalt mit maximal 250 mg/kg PAK auf Deponien des Typs B abgelagert werden.

- **BAFU-Richtlinie**

Die BAFU-Richtlinie ⁽⁹⁷⁾ (vormals BUWAL-Richtlinie ⁽⁹⁸⁾); zwischenzeitlich wieder veraltet, teils im Widerspruch zu neueren EN-Produktenormen) regelt die für eine hochwertige Verwertung erforderlichen Materialqualitäten mineralischer Bauabfälle.

Unter Ziffer 5-3 der Richtlinie sind Qualitätsanforderungen für Asphaltgranulat festgelegt: Mindestens 80 % müssen Ausbauasphalt sein (Hauptmengenanteil). Kies-Sand (nicht extra zugemischt) darf maximal 20 % betragen. Betonabbruch und Mischabbruch dürfen in Summe maximal 2 % betragen. Fremdstoffe dürfen zu maximal 0,3 % vorhanden sein, bei Heißaufbereitung überhaupt nicht.

Falls erforderlich, dürfen zum Recycling-Baustoff andere Materialien (z. B. Kies) zum Erreichen bestimmter Eigenschaften hinzugefügt werden. Dies gilt aber nicht, wenn Asphaltgranulat mit Kies zu Recycling-Kiessand A gemischt werden soll.

Gemäß Ziffer 5-7 der Richtlinie soll eine qualitativ hochwertige Verwendung angestrebt werden. Besonders hervorzuheben ist, dass bitumenhaltiges Material nicht hydraulisch gebunden werden darf und umgekehrt. Es soll sichergestellt werden, dass ein erneutes Recycling und der Einsatz zum selben Zweck erreicht werden können.

Laut Ziffer 5-8 der Richtlinie können Recycling-Baustoffe auch in loser Form, als Granulat, mit oder ohne Deckschicht genutzt werden. Diese Deckschichten sind aus bindemittelgebundenen Schichten (Betonbelag, Asphaltbelag) innerhalb von 3 Monaten auszuführen. Sie sollen verhindern, dass das Recycling-Material durchsickert werden kann. Die Verwendung von Asphaltgranulat in loser Form ohne Deckschicht ist erlaubt, wenn die Schichtstärke maximal 7 cm beträgt und das Asphaltgranulat gewalzt wird.

Ziffer 6 der Richtlinie beschreibt die Anlagen zur Herstellung von Recyclingbaustoffen (Aufbereitungsanlagen), Zwischenlager sowie Materiallager und legt Anforderungen fest. Zu deren Betrieb sind eine Bau- und Betriebsbewilligung erforderlich.

- **Recycling Grundnorm (SN 670071)**

Die Schweizer Norm SN 670071 ⁽⁹⁹⁾ gilt für mineralische Bauabfälle, die beim Ausbauen von bitumengebundenen Schichten, beim Aufbrechen von Straßen und Infrastrukturbauten sowie beim Abbruch oder Rückbau im Hoch- und Tiefbau gewonnen werden. Die Recyclingbaustoffe sollen möglichst hochwertig eingesetzt werden, um deren materialspezifische Eigenschaften bestmöglich zu nutzen.

- **Normen für Asphaltmischgut (SN EN 13108-x)**

Die nationalen Anhänge NA sind die nationale Umsetzung der Europäischen Normen. Die Schweizer Norm SN EN 13108-1-NA ⁽¹⁰⁰⁾ ist die nationale Umsetzung der EN 13108-1/AC und formuliert die Schweizer Mischgut-anforderungen für *Asphaltbeton*.

⁹⁷ Bundesamt für Umwelt BAFU: Richtlinie für die Verwertung mineralischer Bauabfälle – Ausbauasphalt, Strassenaufbruch, Betonabbruch, Mischabbruch; 2. aktualisierte Auflage, Bern, 2006.

⁹⁸ Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL): Richtlinie für die Verwertung mineralischer Bauabfälle – (Ausbauasphalt, Strassenaufbruch, Betonabbruch, Mischabbruch), Bern, 1997.

⁹⁹ Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS): Recycling Grundnorm, SN 670 071, Zürich, November 2010.

¹⁰⁰ Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS): SN EN 13108-1-NA, Asphaltmischgut – Mischgut-anforderungen – Teil 1: Asphaltbeton, Zürich, September 2022.

Hinsichtlich des Bindemittels wird in Ziffer 8 der SN EN 13108-1-NA festgelegt, dass der Erweichungspunkt des Bindemittels aus den Erweichungspunkten des zugegebenen und des aus dem Ausbauasphalt rückgewonnenen Bindemittels zu bestimmen ist und den Anforderungen an den Erweichungspunkt der ausgewählten Mischgutsorte zu entsprechen hat. In Ziffer 10 Tab. 3 sind die zulässigen Anteile an Ausbauasphalt definiert (Tabelle 13). Es sind jedoch, nach Vereinbarung zwischen den Auftragspartnern, höhere RA-Anteile zulässig. Außerdem wird auf die SN EN 13108-8-NA verwiesen (siehe unten).

Tabelle 13: Zulässige Zugabemengen an Ausbauasphalt für die Herstellung von Asphaltbeton in Abhängigkeit von den Schichten, den Mischgutsorten und den Mischguttypen ⁽¹⁰⁰⁾

Mischgutsorte und Mischguttypen für Schichten	Anteil Ausbauasphalt in [M-%]	
	Kaltzugabe	Warmzugabe
Deckschichten		
Asphaltbeton für Deckschichten AC S, AC H und AC MR	0	0
Asphaltbeton für Deckschichten AC N, und AC L	≤ 15	≤ 40
Binderschichten und Hochmodul-Asphaltbeton		
Asphaltbeton für Binderschichten AC B Hochmodul-Asphaltbeton AC EME	≤ 15	≤ 60
Trag- und Sperrschichten		
Asphaltbeton für Tragschichten AC T Asphaltbeton für Sperrschichten AC EME	≤ 25	≤ 80
Fundationsschichten		
Asphaltbeton für Fundationsschichten AC F	≤ 30	≤ 100

Bei den Normen an *offenporigen Asphalt* (SN EN 13108-7 ⁽¹⁰¹⁾), *Splittmastixasphalt* (SN EN 13108-5 ⁽¹⁰²⁾) und *Gussasphalt* (SN EN 13108-6 ⁽¹⁰³⁾) wurden 2022 die bestehenden nationalen Anhänge entfernt, welche die maximale Zugabemenge von Ausbauasphalt geregelt haben. Es ist unklar, ob diese nationalen Anhänge zukünftig wieder eingeführt werden.

Die SN EN 13108-8-NA ⁽¹⁰⁴⁾ ist die nationale Umsetzung der EN 13108-8 und beschäftigt sich mit dem Ausbauasphalt an sich. Die Bezeichnung des Ausbauasphaltes erfolgt nach Ziffer 5:

- U_{RA} Allgemeine Bezeichnung für Ausbauasphalt mit einer Stückgröße von U [mm]
- $U_{RA} d/D$ Bezeichnung für Ausbauasphalt mit einer Stückgrösse von U [mm] und einer Gesteinskörnung von d/D [mm]

Ausbauasphalt der Kategorie F1 darf für Deck- und Binderschichten, Ausbauasphalt der Kategorie F5 für Trag- und Fundationsschichten verwendet werden. In Ziffer 13 der SN 640 431-8a-NA werden Erleichterungen für die gebrochenen Oberflächen in Gesteinskörnungen ≥ 4 mm getroffen. So soll vermieden werden, dass grosse Ausbauasphaltmengen deponiert werden müssten, da sie den normalerweise strengeren Anforderungen für die Asphaltgesteinskörnung nicht genügen.

Die weiteren in der Europäischen Normenserie EN 13108-x genannten Asphaltarten haben in der Schweiz praktisch keine Bedeutung. Auch Offenporige Asphalte werden aufgrund ungenügender Dauerhaftigkeit im Nationalstraßenbau nicht und auf Hauptstraßen selten verwendet. Stattdessen werden halb-offene Asphalte

¹⁰¹ Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS): SN EN 13108-7, Asphaltmischgut – Mischgutanforderungen – Teil 7: Offenporige Asphalte, Zürich, April 2022.

¹⁰² Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS): SN EN 13108-5, Asphalt – Splittmastixasphalt – Mischgutanforderungen, Zürich, April 2022.

¹⁰³ Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS): SN EN 13108-6, Asphaltmischgut – Mischgutanforderungen – Teil 6: Gussasphalt, Zürich, April 2022.

¹⁰⁴ Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS): SN EN 13108-8-NA, Asphaltmischgut – Mischgutanforderungen – Teil 8: Ausbauasphalt, Zürich, November 2019.

gemäß VSS 40436 ⁽¹⁰⁵⁾ insbesondere für die Lärminderung eingesetzt. Die Verwendung von Ausbaupasphalt ist dafür nicht zulässig.

- **Normen für die ungebundene Verwendung und als Stabilisierung**

Für die ungebundene Verwendung von Ausbaupasphalt ist die SN EN 13242 ⁽¹⁰⁶⁾ anzuwenden, für Stabilisierungen die SN 640 490 ⁽¹⁰⁷⁾.

4.5 Ergänzend zur Literaturrecherche wurden zwei Interviews mit Industrievertretern geführt (Zusammenfassung der Interviews siehe Anhang). Veröffentlichte internationale Erfahrungen

- Aus Frankreich sind zwei groß angelegte, nationale Forschungsprojekte dokumentiert, MURE (Warmasphalt in der Praxis) und IMPROVEMURE (Laborforschung) ⁽¹⁰⁸⁾. Ausbaupasphalt wurde zu einem Anteil von 40 % bzw. 70 % zugegeben ¹⁰⁹. Mehrfachrecycling wurde praxisnah nachgestellt und auf Teststrecken validiert, wobei die mehrjährige Alterung der Asphaltdeckschicht zeitraffend mittels mobiler Infrarotstrahler simuliert wurde, wie sie zur Erwärmung des Belages beim in-place Heißrecycling verwendet werden. Projektbegleitende Dissertationen thematisierten die Vermischung von altem und neuem Bitumen, was insbesondere bei Warmasphalt kritisch ist ⁽¹¹⁰⁾, sowie die Simulation des wiederholten Recyclings im Labor inklusive einer Untersuchung der mehrfach rezyklierten Mischungen mit Performance-basierten-Prüfungen (TSRST-Kälteprüfungen, 4-Punkt-Biegeprüfungen) ⁽¹¹¹⁾.
- In den Niederlanden kommt Asphaltgranulat in Heißmischgut im Ausmaß von bis zu 50 % zum Einsatz ⁽¹¹²⁾. Weil es in den Niederlanden an Gesteinsrohstoffen wie Kies und Sand mangelt, gibt es spezielle thermische Reinigungsanlagen für Ausbaustoffe (Verfahren TAG Cleaning ⁽¹¹³⁾), wo auch stark pech- und teerkontaminierter Straßenaufbruch verwertet werden kann. Das Zugabematerial wird auf 850 bis 1000 °C erhitzt, so dass die schädlichen organischen Bestandteile (PAK) verbrennen. Danach wird das Material gesiebt und beispielsweise als Öko-Sand für Asphalt bzw. Öko-Granulat für Beton wiederverwendet. Die Verbrennungsgase werden entsprechend gereinigt ⁽¹¹⁴⁾, außerdem kann Strom bzw. Fernwärme gewonnen werden.

¹⁰⁵ Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS): VSS 40436, Semidichtes Mischgut und Deckschichten; Festlegungen, Anforderungen, Konzeption und Ausführung, Zürich, September 2022.

¹⁰⁶ Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS): SN EN 13242, Gesteinskörnungen für ungebundene und hydraulisch gebundene Gemische für Ingenieur- und Strassenbau – Ungebundene Gemische – Anforderungen, Zürich, November 2021.

¹⁰⁷ Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS): SN 640 490, Gebundene Gemische und stabilisierte Böden: Grundnorm, Zürich, Dezember 2017.

¹⁰⁸ <https://www.pnmure.fr/> Website zu den Projekten MURE und IMPROVEMURE.

¹⁰⁹ Poirier, J.-E. 2019. Presentation of MURE – Multirecycling and warm asphalt mix. Proc., 11th EAPA Symposium, 6 June 2019, Paris.

¹¹⁰ Vassaux, S. Mouillabilité et miscibilité des bitumes : application au recyclage. Thèse de doctorat (Dissertation), Chimie et physico-chimie des matériaux, 2017 Montpellier.

¹¹¹ Pedraza, A. Propriétés thermomécaniques d'enrobés multi-recyclés. Thèse de doctorat (Dissertation), ENTPE, Génie civil, Lyon 2018.

¹¹² Molenaar, A. A. A., Mohajeri, M. & van de Ven, M. F. C. 2014. Hot Recycling in the Netherlands, in Transportation Research Circular Number E-C188: Applications of Reclaimed Asphalt Pavement and Recycled Asphalt Shingles in Hot-Mix Asphalt – National and International Perspectives on Current Practice. Transportation Research Records, pp. 28–41, Washington DC, USA, 2014.

¹¹³ Aufbereitung von Baustoffen und Wiederverwertung e. V.: Website http://www.abw-recycling.de/Lehre/WS_13-14/Modul%20D/2Asphalt.pdf, Weimar o. J., Seite 50, abgerufen am 24.02.2020.

¹¹⁴ Verband für Abbruch und Entsorgung e. V.: Recycling von Straßenaufbruch – zu 100 Prozent sauber! Beitrag vom 21.06.2017, Rostock, Website: <https://www.abbruch-mv.de/2017/06/21/recycling-von-strassenaufbruch-zu-100-prozent-sauber/>, abgerufen am 24.02.2020.

- In der Schweiz wurde Mehrfachrecycling im Rahmen der VSS-Forschung "Recycling von Ausbauasphalt in Heißmischgut" behandelt ^(115, 116). Darin wurde untersucht, wie die Mineralstoffe beim Fräsen eines zweischichtigen Belages mit einer regulären Straßenfräsmaschine geschädigt werden. Die Veränderung des Bindemittels wurde auf Asphaltebene in bis zu drei Recyclingschritten untersucht. Dies beinhaltete die Produktion von künstlichem Asphaltgranulat durch mehrtägige Lagerung im Ofen, die Herstellung von Recyclingmischgut mit Anteilen des künstlichen Asphaltgranulats sowie das Prüfen der Recyclingmischungen an Prüfkörpern unter Anwendung von konventionellen und performance-basierten Prüfmethoden. Bei der Studie mit einem Recyclinganteil von 40 % waren die beobachteten Änderungen nach mehreren Recyclingstufen nicht groß, mit Ausnahme der Wasserempfindlichkeit, die deutlicher zunahm. Bei 100 % Recyclinganteil wurde beobachtet, dass bei gleichbleibender Dosierung des Regenerationsmittels eine zunehmende Versteifung des Bindemittels und des Mischgutes eintritt. Die Verwendung eines PmB als Zugabebindemittel zeigte, dass die Verwendung des Penetrationswertes als Richtwert nicht zielführend war und eine andere Eigenschaft des Bindemittels oder des Mischgutes verwendet werden muss.
- In England behandelte eine Dissertation an der Universität Nottingham die dreifache Wiederverwendung eines dichten Asphaltmischguts mit nicht modifiziertem Bitumen und Asphaltgranulat-Zugabeanteilen zwischen 25 und 70 % ⁽¹¹⁷⁾. Die Konditionierung des Asphaltgranulats erfolgte in einem Trockenschrank bei 125 °C für 65 Stunden. Es wurde festgestellt, dass die meisten Asphaltmischgut- und Bindemittleigenschaften sich nicht oder in nur geringem Masse veränderten. In Ermüdungsversuchen mit dem Spaltzugversuch an zylindrischen Prüfkörpern wurde festgestellt, dass sich das Gebrauchsverhalten kaum veränderte. Bei der Wasserempfindlichkeit wurde festgestellt, dass das Asphaltmischgut mit Asphaltgranulat nicht anfällig auf Feuchtigkeit (moisture damage) reagierte und den schädlichen Einflüssen von Wasser sogar besser standhielt als jenes ohne Asphaltgranulat (Anmerkung: im Widerspruch zu den Erkenntnissen von Hugener und Kawakami ⁽¹¹⁶⁾). Zudem wurde beobachtet, dass die Temperatur und die Art der Zumischung des Asphaltgranulats einen großen Einfluss auf die Qualität des resultierenden Asphaltmischguts hatten.
- Aus Japan ist eine Studie mit zwei Recyclingzyklen bei Zugabe von 70 % Asphaltgranulat dokumentiert ⁽¹¹⁸⁾. Die künstliche Alterung des Mischgutes erfolgte mit reinem Sauerstoff, wodurch die Alterungstemperatur auf 60 °C reduziert werden konnte. Bei gleichen Bindemittleigenschaften wurde für das rezyklierte Asphaltmischgut ein vorteilhaftes Verhalten bezüglich Spurbildungsempfindlichkeit und Kornausbruch festgestellt. Hiroyuki et al. ⁽¹¹⁹⁾ beschäftigten sich mit dem 5-fachen Recycling im Labor und stellten fest, dass die Art des Regenerators starken Einfluss auf die Entwicklung der Bitumeneigenschaften hat und dass sich weiches Zugabebitumen als sehr wirksam zeigte und auch beim 5. Recyclingzyklus noch regenerierend wirkte. Es sei angemerkt, dass Recycling von Asphalt in Japan eine lange Tradition (seit 1970er Jahren) hat. Heute werden über 98 % des Asphalts wiederverwendet ⁽¹¹⁸⁾. Betrachtet man die Verwendung des Anteils an Ausbauasphalt im Straßenbau, zeigt sich ein mittlerer Anteil von über 50 %. In Deckschichten sind Anteile von über 75 % üblich. Die hohen Zugaberaten werden u. a. dadurch möglich, dass 70 % der Mischanlagen in Japan mit Paralleltrommeln ausgestattet sind. Allerdings wird die Anzahl an Recycling-Zyklen nicht routinemäßig erhoben, sodass nicht bekannt ist, wie viel rezykliertes Asphalt in den Straßenaufbauten vorhanden ist. Hervorzuheben ist, dass neben Regeneratoren auch extrem weiches Frischbitumen zur Regeneration

¹¹⁵ Hugener, M., Kawakami, A. Forschungspaket Recycling von Ausbauasphalt in Heißmischgut: EP2: Mehrfachrecycling von Straßenbelägen, VSS 2005/453, Bundesamt für Straßen, Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK), 2015, Bericht 1510, 94 S., Empa, Dübendorf 2015.

¹¹⁶ Hugener, M., Kawakami, A. Simulating repeated recycling of hot mix asphalt. *Road Materials and Pavement Design*, 2017, 18: 76-90.

¹¹⁷ Heneash, U. Effect of the Repeated Recycling on Hot Mix Asphalt Properties. Thesis, University of Nottingham, Faculty of Engineering, 2013.

¹¹⁸ Su, K., Hachiya, Y. & Maekawa, R. Laboratory investigation of possibility of re-recycling asphalt concretes. Proc., 6th ICPT conference, Sapporo, Japan, 2008.

¹¹⁹ Hiroyuki, N., Fumimasa, T., Yoko, K. & Atsushi, K. 2019. Influence of the composition of rejuvenator on properties of repeatedly recycled asphalt. *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. E1 (Pavement Engineering)*, Volume: 75, Issue Number: 1, ISSN: 2185-6559.

herangezogen werden kann, die etwa 2 bis 3 Stunden vor Mischgutproduktion direkt auf das Asphaltgranulat aufgebracht werden, um eine „Reifung“ zu erzielen ⁽¹²⁰⁾.

- Koudelka et al. ⁽¹²¹⁾ von der TU Brunn studierten die Bindemittleigenschaften beim Mehrfachrecycling, testeten eine Vielzahl an Regeneratoren und stellten fest, dass die viskoelastischen Eigenschaften des Bindemittels nicht vollständig wiederhergestellt werden können. Sie stellten sich auch die Frage, ob die Effektivität der Regeneratoren durch mehrmaliges Recyceln vermindert wird.
- Weitere internationale Arbeiten beschränkten sich vielfach auf die Simulation des Mehrfachrecyclings auf der Bindemittlebene ^(122, 123, 124). Blomberg et al. untersuchten Veränderungen an Bindemitteln zufolge fünf Alterungszyklen (RTFOT & PAV; SARA, DSR, GPC). Sie stellten fest, dass die größte Veränderung der Bindemittleigenschaften nach dem ersten Alterungsschritt erfolgte. Mittels GPC beobachteten sie, dass die Molekularstruktur des gealterten Bindemittels nach der Regeneration mit einem sehr weichen Bitumen B800 nicht vollständig zurückgesetzt werden konnte, aber einige physikalische Eigenschaften korrigiert werden konnten. Kawakami et al. ⁽¹²⁵⁾ beobachteten, dass sich die Duktilität eines Bindemittels nach mehrmaligem Recycling nicht zurückbildete, auch wenn Penetrationswert und komplexer E-Modul nahezu unverändert blieben.

4.6 Zusammenfassende Erkenntnisse zum Stand des Wissens

- Die Praxis der Wiederverwendung von Ausbausphalt ist in den D-A-CH Ländern unterschiedlich, die Wiederverwendungsquote im Heißverfahren ist unterschiedlich stark ausgeprägt.
- Das Marktangebot an Regeneratoren ist riesig, es gibt aber keine einheitliche Klassifizierung. Der Stand des Wissens zu Regeneratoren ist nicht in gesammelter Form zugänglich
- International ist der Großteil der Experten einig, dass mit Hilfe des Dynamischen Scherrheometers (DSR) die Prüfung der interessierenden Bindemittleigenschaften möglich ist.
- Der Stand des Wissens zur Wiederverwendung von Asphalt ist in den D-A-CH-Ländern im internationalen Vergleich up-to-date.
- Die zentrale Frage im Rahmen der Wiederverwendung von Asphalt liegt in der rheologischen Charakterisierung des Altbindemittels im Asphaltgranulat und des resultierenden Bindemittelgemisches.
-
- Fazit: Eine schnellstmögliche Anpassung des Regelwerks in den D-A-CH Ländern an Stand des Wissens ist nötig, um die Wiederverwendungsraten auf das mögliche Mass zu steigern.

¹²⁰ West, R. C. & Copeland, A. 2015. High RAP asphalt pavements: Japan practice-lesson learned. No. IS 139.

¹²¹ Koudelka, T., Coufalik, P., Fiedler, J., Coufalikova, I., Varaus, M. & Yin, F. 2019. Rheological evaluation of asphalt blends at multiple rejuvenation and aging cycles. *Road Materials and Pavement Design*, 20:sup1, 2019.

¹²² Blomberg, T., Makowska, M. & Pellinen, T. Laboratory Simulation of Bitumen Aging and Rejuvenation to Mimic Multiple Cycles of Reuse. *Transportation Research Procedia*, 14: pp. 694-703, 2016.

¹²³ Nie, Y., Sun, S., Ou, Y., Zhou, C. & Mao, K. Experimental Investigation on Asphalt Binders Ageing Behavior and Rejuvenating Feasibility in Multicycle Repeated Ageing and Recycling. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018.

¹²⁴ He, H., Zhang, E., Fatokoun, S. & Shan, L. 2018. Effects of the soft binder on the performance of repeated RAP binder, Harbin, China. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061818311735?via%3Dihub>.

¹²⁵ Kawakami, A., Kawashima, Y., Nitta, H. & Yabu, M. An Examination of Property Changes of Repeatedly Recycled Asphalt Bitumen Using Rejuvenator with High Aromatic Content. In: *RILEM 252-CMB Symposium*, Springer International Publishing, RILEM Bookseries, pp. 189-194, 2019.

5 AP-2 Praxisgerechte Bitumenprüfung

Im Arbeitspaket AP-2 werden praxisgerechte Verfahren zur Prüfung der wesentlichen Eigenschaften auf Binde-mittlebene erprobt.

5.1 Hintergrund: Prüfung der Viskositätsveränderung

Das im Asphaltgranulat enthaltene Bindemittel ist gealtert. Dies gilt insbesondere für zuvor sonnenexponierte Streckenabschnitte, für hohlraumreiche und/oder dünne Asphalt-schichten, bei dünnen Bindemittelfilmen und bei Verwendung von Bitumen mit einem hohen Paraffinanteil. Ursache dafür ist die Änderung der physikalischen und chemischen Bitumeneigenschaften mit der Zeit, genauer während der Lagerung, im Zuge von Verarbeitung und Einbau sowie im eingebauten Zustand. Ein Maß für die Bitumenalterung ist beispielweise der Anstieg der Viskosität (das ist die Zähigkeit). Der Viskositätsanstieg wird verursacht durch eine Verschiebung der Anteile an Bitumenkomponenten: Die harten, spröden Bitumenkomponenten nehmen zu und werden verhaltensbestimmend, die weichen ‚geschmeidigen‘ Komponenten nehmen ab. Somit verändert die Alterung die innere Struktur des Bitumens, wie beispielweise anhand von Mikroskopie-Aufnahmen gut erkennbar ist. In der Praxis zeigt sich, dass bindemittelreiche Asphalte mit dicken Bindemittelfilmen deutlich weniger zur Alterung neigen. Hingegen sind hohlraumreiche Asphalte und solche mit porösem Gestein alterungsanfälliger. Dies ist vermutlich auf die Anfälligkeit des Bindemittels gegenüber alterungsbedingten Polaritätsänderungen zurückzuführen. Jedes Bitumen besteht im Wesentlichen aus harten, hochpolaren Asphaltene, die in einer ‚Suppe‘ aus weichen unpolaren Maltenen ‚schwimmen‘. Jeder Asphalt-Kern ist zusätzlich von einem aromatischen ‚Schutz-mantel‘ von wenigen Mikrometern Dicke umgeben. Der Mantel bildet einen allmählichen Übergang zwischen dem hochpolaren Asphalt-Kern und der unpolaren Malten-Suppe. Hochpolare und unpolare Moleküle grenzen somit nicht direkt aneinander. Die Malten-Suppe dürfte weitgehend resistent gegenüber Alterung sein. Aber vermutlich wird der Schutz-mantel infolge von oxidativer Alterung beeinträchtigt. Dringen geeignete Reaktionspartner bis zum Mantel vor, wo die Konzentration von Heteroatomen ansteigt, gewinnt die Oxidation an Stärke. Die Polarität im Mantel steigt an. Dadurch verringert sich die Übergangszone zwischen der unpolaren Malten-Suppe und dem hochpolaren Asphalt-Kern. Das bedeutet, der Schutz-mantel löst sich auf und seine stabilisierende Wirkung geht verloren. Folglich altert das Bindemittel, es wird instabil, spröde und rissanfällig und beginnt zu zerfallen. Im Rahmen der Wiederverwendung von Asphalt ist die Bindemittelalterung durch Maßnahmen der Regeneration zu kompensieren, in dem das gealterte Bindemittel weitgehend wieder in den Zustand eines lieferfrischen, nicht gealterten Bindemittels versetzt wird. Geeignete Regeneratoren sollten so wirken, dass sie die im gealterten Bindemittel verlorengegangenen Komponenten ergänzen und somit den Schutz-mantel wiederherstellen ^(126, 127, 128). Vermutlich funktioniert ein Regenerator optimal, wenn die ursprünglichen Polaritätsverhältnisse zwischen der unpolaren Malten-Suppe und dem hochpolaren Asphalt-Kern wiederhergestellt sind und die Konzentration im stabilisierenden Schutz-mantel dem Ausgangszustand entspricht. So kann das gealterte Bindemittel durch gezieltes Herabsetzen der Viskosität weitgehend wieder in den Zustand eines lieferfrischen, nicht gealterten Bindemittels versetzt werden. ^(129, 130)

Die Prüfung der Viskositätsveränderung infolge der Regeneration und der Vergleich mit der Viskosität eines lieferfrischen Bindemittels ist daher eine einfache und zielsichere Möglichkeit, die Wirkung einer Regeneration

¹²⁶ Handle, F. 2014. Unraveling the bitumen microstructure – towards a new understanding of bitumen ageing. Doctoral thesis, Vienna University of Technology.

¹²⁷ Eberhardsteiner, L., Füssl, J., Hofko, B., Handle, F., Hospodka, M., Blab, R., Grothe, H. 2015. Towards a microstructural model of bitumen aging behavior. *Int. Journal of Pavement Engineering*, 16, 939-949.

¹²⁸ Handle, F., Füssl, J., Neudl, S., Großegger, D., Eberhardsteiner, L., Hofko, B., Blab, R., Grothe, H. 2016. The bitumen microstructure: a fluorescent approach. *Materials and Structures*, 49, 167-180.

¹²⁹ Wistuba, M. P. 2020. Botox für den Asphalt. *der asphaltprofi*, Fachmagazin der MOAG, Jahrgang 19, Heft April, MOAG Baustoffe Holding AG, St. Gallen, Schweiz.

¹³⁰ Wistuba, M. P. und Büchner, J. 2021. Prüfung von Rejuvenatoren mit dem Dynamischen Scherrheometer, *Straße und Autobahn*, 8/2021, 621-631, Kirschbaum Verlag, Bonn.

zu kontrollieren. Aus diesem Grund werden zur Beurteilung von Regeneratoren zunehmend rheologische Prüfverfahren eingesetzt, unter denen die Prüfverfahren mit dem Dynamischen Scherrheometer (DSR) an Bedeutung gewinnen.

Herkömmliche Bitumenkennwerte, wie Nadelpenetration, Erweichungspunkt Ring und Kugel, Brechpunkt nach Fraaß, Kraftduktilität, elastische Rückstellung, wurden vor etwa 100 Jahren zur Charakterisierung der Eigenschaften von Straßenbaubitumen eingeführt. Sie stoßen heute immer deutlicher an ihre Grenzen. Denn der entscheidende Nachteil von herkömmlichen Bitumenprüfungen ist, dass ihre Aussagekraft und Gültigkeit für komplexe, modifizierte Bindemittel nur sehr eingeschränkt gegeben sind. Der Erfahrungshintergrund für reine Destillationsbitumen gilt nicht in gleicher Weise für modifizierte Bitumen. Doch gerade heute nimmt durch den vermehrten Einsatz von Modifikationsmitteln (viskositätsverändernde Mittel, Regeneratoren und andere) die Komplexität von Bindemitteln generell zu, sodass eine ausreichende Differenzierung anhand von konventionellen Bitumenkennwerten nicht mehr zuverlässig möglich ist ⁽¹³¹⁾.

Dabei ist gerade im Rahmen der Wiederverwendung von Asphalt die Wahl und die Bestimmung der geeigneten Dosierung des Regenerators von besonderer Bedeutung, um die Projekt- und Spezifikationsanforderungen des zu produzierenden Asphaltes erfüllen zu können ⁽¹³²⁾.

Daher wurde in den vergangenen Jahrzehnten (ausgehend vom US-amerikanischen Strategic Highway Research Program, 1987 bis 1992) eine Reihe von weiterführenden Prüfverfahren entwickelt und erprobt, insbesondere jene der gebrauchsvorhaltensorientierten Bindemittelprüfung u. a. mit Hilfe des Dynamischen Scherrheometers (DSR) und des Biegebalkenrheometers (BBR) sowie Verfahren zur Ansprache der chemisch-physikalischen Bindemittelleigenschaften auf der Mikro- und Nanoebene. Nach und nach werden heute die empirischen Methoden ergänzt und abgelöst durch fundierte Ansätze der Materialansprache und Materialmodellierung basierend auf physikalisch-mechanischen Wirkzusammenhängen ⁽¹³¹⁾.

5.2 Bewertung der Wirksamkeit von Regenerationsmitteln (BTSV-Prüfung)

Verschiedene Regeneratoren wirken nicht in gleicher chemisch-physikalischer Weise, daher ist auch die optimale Zugabemenge unterschiedlich. Verschiedene Autoren unterscheiden ‚Weichmacher‘, weil sie lediglich die Viskosität reduzieren, von den tatsächlichen ‚Verjüngungsmitteln‘, mit deren Hilfe im eigentlichen Sinne der Regeneration die chemisch-physikalische Materialeigenschaften mehr oder weniger in den rheologischen Ausgangszustand versetzt werden durch Wiederherstellung des Malten-zu-Asphalten-Verhältnisses ^{(133, (134, 135)}. Diese Unterscheidung ist materialtechnologisch nachvollziehbar, aber bislang nicht eindeutig definiert. Weichmacher würden nach dieser Unterscheidung als suboptimal beurteilt werden, was als kritisch gesehen werden könnte. ⁽¹²⁶⁾

Für die Bewertung der Wirksamkeit eines Regenerators (auch als Effizienz bezeichnet) kann das DSR als äußerst vielseitiges, aussagekräftiges rheologisches Prüfgerät gut verwendet werden. Üblicherweise werden die rheologischen Materialkennwerte *komplexer Schermodul* G^* und *Phasenwinkel* δ betrachtet. Weil diese jedoch temperatur- und frequenzabhängig sind, haben sich in Deutschland zur Interpretation der Wirksamkeit eines Regenerators folgende Kennwerte für eine definierte Temperatur und eine definierte Frequenz etabliert: die Äqui-Schermodultemperatur $T(G^*=15\text{kPa})$ (alternativ auch als Äquisteifigkeitstemperatur, Äqui-Modultemperatur, äquivalente Temperatur oder BTSV-Temperatur $T(\text{BTSV})$ bezeichnet) und der zugehörige Phasenwinkel

¹³¹ Wistuba, M. P. 2019. Straßenbaustoff Asphalt. Erste Auflage, Technische Universität Braunschweig, Institut für Straßenwesen, Braunschweig, ISBN 978-3-932164-16-3.

¹³² DAV, 2020. Technisches Informationspapier, Verwendung von Rejuvenatoren bei der Wiederverwendung von Asphalt. Deutscher Asphaltverband e. V. (DAV), Bonn.

¹³³ Gogolin, D. 2019. Wirksamkeit und Performance von Rejuvenatoren, Teil 1: Laboruntersuchungen. Asphalt, Jahrgang 54, Heft 2, 12–17, Deutscher Asphaltverband (DAV) e.V., Bonn.

¹³⁴ Sylvester, T. & Tabatabaee, H. A. 2017. Rejuvenation vs. softening of recycled binders. Illinois Asphalt Pavement Association (IAPA), March 13, 2017, Springfield, IL.

¹³⁵ Wistuba, M. P., Isailović, I. & Büchner, J. 2019. Zur Ermittlung der optimalen Zugabemenge eines Verjüngungsmittels im Rahmen des Asphaltrecyclings. Straße und Autobahn, Jahrgang 70, Heft 11, 959–963, Kirschbaum Verlag, Bonn.

$\delta@T(G^*=15\text{kPa})$ (oder $\delta(\text{BTSV})$) bei einer festgelegten Prüffrequenz von 1,59 Hz. Diese Kennwerte können mit dem von Alisov (2017) ⁽¹³⁶⁾ entwickelten Bitumen-Typisierungs-Schnell-Verfahren (BTSV) nach DIN 52050 (2018) ⁽¹³⁷⁾ für alle bitumenhaltigen Bindemittel zuverlässig ermittelt werden. Alternativ können diese Kennwerte indirekt durch Interpolation aus Temperatur-(Frequenz-)Sweeps gemäss EN 14770 (2012) ⁽¹³⁸⁾ bzw. gemäss AL DSR-Prüfung (T-Sweep) (2020) ⁽¹³⁹⁾ bestimmt werden. ⁽¹²⁶⁾

Das Bitumen-Typisierungs-Schnell-Verfahren (BTSV) wird am DSR im spannungsgeregelten Modus bei kontinuierlich ansteigender Temperatur durchgeführt. Als Prüfgeometrie werden Platte-Platte-Messsysteme mit Plattendurchmesser von 25 mm und einer Spaltweite von 1 mm verwendet (Abbildung 7 links). Die Bindemittelprobe wird kontinuierlich mit einer Frequenz von 1,59 Hz oszillierend beansprucht. Während der Beanspruchung wird die Temperatur in einem Temperaturbereich von 20 °C bis maximal 90 °C kontinuierlich mit einer Temperaturrate von 1,2 K/min erhöht. Der Probekörper wird über die gesamte Prüfdauer (von Beginn der Temperaturrampe) mit einer konstanten Scherspannung von 500 ± 5 Pa in Oszillation beansprucht. Während der Messung werden die Werte des komplexen Schermoduls, des Phasenwinkels und der Temperatur sekundlich aufgezeichnet. Aus den Messwerten werden die Äqui-Schermodultemperatur $T(G^*=15\text{kPa})$ (oder T_{BTSV}) ermittelt, also jene Temperatur, bei der der komplexe Schermodul eine Grösse von $G^* = 15,0 \pm 0,05$ kPa erreicht, sowie der bei dieser Temperatur gemessene Phasenwinkel $\delta@T(G^*=15\text{kPa})$ (oder δ_{BTSV}) (vgl. Abbildung 7 rechts). Das BTSV Diagramm stellt die BTSV-Kennwerte gegenüber: die Äqui-Schermodultemperatur auf der Abszisse und den zugehörigen Phasenwinkel auf der Ordinate (siehe unten).

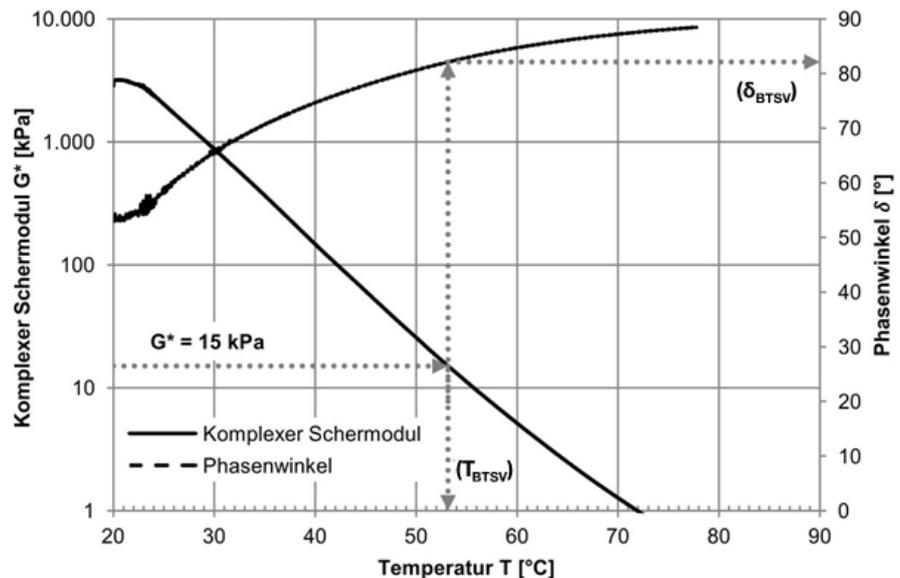


Abbildung 7. Links: Dynamisches Scherrheometer (DSR) mit Prüfgeometrie eines Platte-Platte-Mess-Systems mit einem Plattendurchmesser von 25 mm für den Temperaturbereich von +20 °C bis +90 °C. Rechts: Typischer Verlauf von komplexem Schermodul und Phasenwinkel bei kontinuierlichem Temperaturanstieg zur Ermittlung von T_{BTSV} und δ_{BTSV} . ⁽¹³⁹⁾

¹³⁶ Alisov, A. 2017. Typisierung von Bitumen mittels instationärer Oszillationsrheometrie. Dissertation, Schriftenreihe Straßenwesen, Heft 33, Institut für Straßenwesen, Technische Universität Braunschweig.

¹³⁷ DIN 52050, 2018. Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - BTSV-Prüfung. Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN), Beuth Verlag, Berlin.

¹³⁸ EN 14770, 2012. Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Bestimmung des komplexen Schermoduls und des Phasenwinkels - Dynamisches Scherrheometer (DSR). Europäisches Komitee für Normung (CEN), Beuth Verlag, Berlin.

¹³⁹ AL DSR-Prüfung (T-Sweep), 2020. Arbeitsanleitung zur Bestimmung des Verformungsverhaltens von Bitumen und bitumenhaltigen Bindemitteln im Dynamischen Scherrheometer (DSR) - Teil 1: Durchführung im Temperatursweep, Ausgabe 2014. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), FGSV Verlag, Köln.

Alisov (2017) hat die Äqui-Schermodultemperatur $T(G^*=15\text{kPa})$ und das Bestimmungsverfahren BTSV als Ersatz für den Erweichungspunkt Ring und Kugel entwickelt. Daher entspricht der Kennwert $T(G^*=15\text{kPa})$ für Strassenbaubitumen dem Erweichungspunkt Ring und Kugel. Auch für modifizierte Bitumen ist die Äqui-Schermodultemperatur ein Kennwert, der den Erweichungszustand rheologisch exakt definiert. Weil aber für modifizierte Bitumen der Erweichungspunkt Ring und Kugel nicht zuverlässig bestimmbar ist, kann die für ein modifiziertes Bitumen ermittelte Äqui-Schermodultemperatur vom entsprechenden Erweichungspunkt Ring und Kugel abweichen. Kürzlich haben Zhu et al. (2021) ⁽¹⁴⁰⁾ den Parameter $T(G'/\tan\delta=372\text{Pa})$ vorgeschlagen, mit dem eine Korrelation zwischen Erweichungspunkt und modifizierten Bitumen gelingt. ⁽¹²⁶⁾

Die BTSV-Kennwerte, also Äqui-Schermodultemperatur $T(G^*=15\text{kPa})$ und zugehöriger Phasenwinkel $\delta@T(G^*=15\text{kPa})$, können auch zur Charakterisierung der Wirkungsweise von Regeneratoren herangezogen werden, wie erstmals Alisov (2017) zeigte und später zahlreiche Autoren verifizierten ^(141, 142, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 149). Denn die Alterung des Bindemittels lässt stets den Kennwert $T(G^*=15\text{kPa})$ ansteigen (infolge der Zunahme an Bindemittelsteifigkeit) und den Kennwert $\delta@T(G^*=15\text{kPa})$ sinken (infolge Zunahme des elastischen Verhaltens) (siehe z. B. Alisov, 2017; Schrader & Wistuba, 2018 ⁽¹⁴⁹⁾). Ein idealer Regenerator sollte dieses Verhalten umkehren, so dass die Äqui-Schermodultemperatur auf das Ausgangsniveau sinkt und der korrespondierende Phasenwinkel auf das Ausgangsniveau steigt. So werden die Bindemittleigenschaften wiederhergestellt: das regenerierte Bindemittel hat wieder seine ursprüngliche, d. h. gegenüber dem gealterten Zustand geringere Steifigkeit und auch seine ursprüngliche Viskoelastizität. ⁽¹²⁶⁾

Dies wird im BTSV Diagramm anschaulich. Exemplarisch sind in Abbildung 8 die BTSV-Kennwerte für ein Bindemittel aus Ausbauasphalt (bezeichnet als ‚RAP1‘) vor und nach Zugabe von verschiedenen Regeneratoren in variierenden Zugabemengen dargestellt. Als Regeneratoren wurden in diesem Beispiel frische Bitumen (160/220 und 330/430) und fünf verschiedene marktübliche Regeneratoren verwendet (bezeichnet als REJ1 bis REJ5). Man erkennt, dass die unterschiedlichen Regeneratoren unterschiedliche Regenerationszustände erzielen. Interessant ist die lineare Veränderung der BTSV-Kennwerte in Abhängigkeit der Zugabemenge des jeweiligen Regenerators, erkennbar an den Symbolen auf den gestrichelten Linien (Regenerationslinie), welche jeweils eine definierte Zugabemenge an Regenerator zum gealterten Bindemittel kennzeichnen. Ein lineares Verhalten

¹⁴⁰ Zhu, J., Lu, X., Langfjell, M. & Gudmarsson, A. 2021. Quantitative relationship of fundamental rheological properties of bitumen with the empirical ring and ball softening point. *Road Materials and Pavement Design*, DOI:10.1080/14680629.2021.1900898.

¹⁴¹ Gogolin, D. & Buttgerit, A. 2019. Wirksamkeit und Performance von Rejuvenatoren, Teil 2: Praxiserprobung und Bedeutung für das Erhaltungsmanagement. *Asphalt*, Jahrgang 54, Heft 4, 30–37, Deutscher Asphaltverband (DAV) e.V., Bonn.

¹⁴² Gogolin, D., Buttgerit, A. & Koordt, M. 2020. Zielstellungen, Projektplanung und -vorbereitung, Möglichkeiten und Grenzen - Teil 1. *Asphalt*, Jahrgang 55, Heft 2, 28–35, Deutscher Asphaltverband (DAV) e.V., Bonn.

¹⁴³ Gogolin, D., Buttgerit, A. & Koordt, M. 2021. Baudurchführung und Ergebnisse aus der Qualitätssicherung, Möglichkeiten und Grenzen - Teil 2. *Asphalt*, Jahrgang 56, Heft 1, 14–22, Deutscher Asphaltverband (DAV) e.V., Bonn.

¹⁴⁴ Gogolin, D. & Lümekmann, T. 2019. Wirksamkeit und Performance von Rejuvenatoren, Teil 3: Vergleichsstudie zur Wirkungsweise unterschiedlicher Rejuvenatoren. *Asphalt*, Jahrgang 54, Heft 6, 28–35, Deutscher Asphaltverband (DAV) e.V., Bonn.

¹⁴⁵ Isailović, I. 2019. Praktische Beispiele für den Einsatz von Rejuvenatoren. Vortrag, VSVI Seminar, 5. Februar 2019, Technische Universität Braunschweig.

¹⁴⁶ Nytus, N., Rudi, E., Stutz, B. & Müssenich, H. 2018. Erprobung von zwei Rejuvenatoren mit unterschiedlichen Granulatanteilen in Asphaltdeck- und Asphaltbinderschicht - Teil 2. *Straße und Autobahn*, Jahrgang 69, Heft 6, 488–501, Kirschbaum Verlag, Bonn.

¹⁴⁷ Radenberg, M., Nytus, N., Stephan, D. & Schwettmann, K. 2021. Postcarbone Straße - Der endlose Wiederverwendungskreislauf von Bitumen. *Straße und Autobahn*, Jahrgang 72, Heft 3, 171–180, Kirschbaum Verlag, Bonn.

¹⁴⁸ Rudi, E., Nytus, N. & Müssenich, H. 2018. Erprobung von zwei Rejuvenatoren mit unterschiedlichen Asphaltgranulatanteilen in Asphaltdeck- und Asphaltbinderschicht - Teil 1. *Straße und Autobahn*, Jahrgang 69, Heft 5, 365–375, Kirschbaum Verlag, Bonn.

¹⁴⁹ Schrader, J. & Wistuba, M. P. 2018. Zur Anwendung des neuen Bitumen-Typisierungs-Schnell-Verfahrens (BTSV). *Asphalt*, Jahrgang 53, Heft 5, 11–15, Deutscher Asphaltverband (DAV) e.V., Bonn.

wurde für diverse Regeneratoren auch in anderen Studien beobachtet (siehe u. a. ^(150, 151, 152, 149, 153)). Daraus folgt, dass alle Regeneratoren die Äqui-Schermodultemperatur und damit die Bindemittelsteifigkeit mehr oder weniger stark reduzieren, und dass die jeweilige Art des Regenerators bestimmt, ob der Phasenwinkel absinkt und damit die elastischen Eigenschaften zunehmen oder tatsächlich wieder in Richtung des Niveaus eines nicht gealterten Bindemittels ansteigen. ⁽¹²⁶⁾

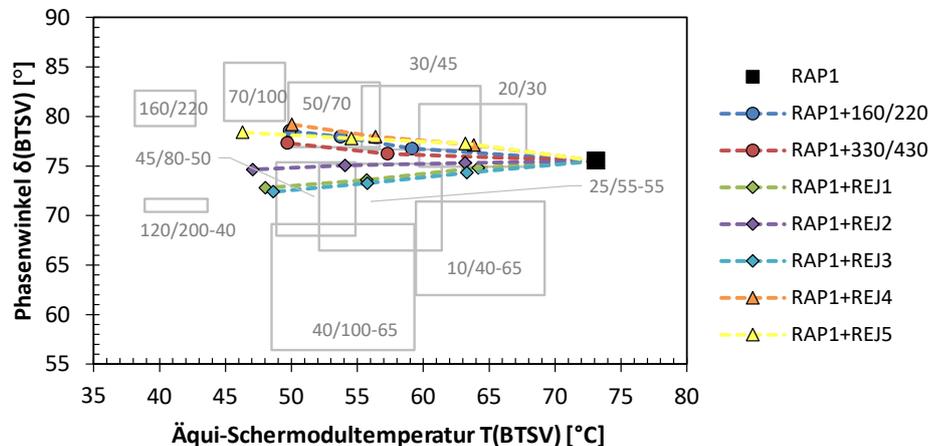


Abbildung 8. Beispiel zur Veränderung von BTSV-Kennwerten durch Zugabe von Regeneratoren (REJ1 bis REJ5) und weichen Bitumen (160/220 und 330/430) zu einem Bindemittel aus Ausbausphalt (RAP1). ⁽¹²⁶⁾

Anhand der Veränderung der BTSV-Kennwerte $T(G^*=15\text{ kPa})$ und $\delta@T(G^*=15\text{ kPa})$ kann somit die Wirkungsweise unterschiedlicher Regeneratoren hinsichtlich der Veränderung der Bindemittelsteifigkeit und seines viskoelastischen Verhaltens im oberen Temperaturbereich differenziert werden. Es ermöglicht Aussagen zur Qualität eines Regenerators. Die BTSV-Kennwerte, also Äqui-Schermodultemperatur $T(G^*=15\text{ kPa})$ und zugehöriger Phasenwinkel $\delta@T(G^*=15\text{ kPa})$ sind geeignet, einen Regenerator in Bezug auf seine rheologische Wirksamkeit und seine Dauerhaftigkeit bei mehrfacher Wiederverwendung des Asphalts zu beurteilen. So kann das bestgeeignete Regenerationsmittel für einen spezifischen Anwendungszweck ausgewählt werden. ⁽¹²⁶⁾

Während die Änderung von $T(G^*=15\text{ kPa})$ über die Zugabemenge gesteuert werden kann, ist die Änderung des Phasenwinkels ein spezifisches Merkmal des Regenerators. Daher kann gemäss dem Arbeitspapier der FGSV die Wirkungsweise eines Regenerators (d. h. verdünnend oder regenerierend) anhand der Veränderung des Phasenwinkels beurteilt werden. Nach heutiger Empfehlung des DAV muss der Phasenwinkel bei Reduzierung der Äqui-Schermodultemperatur mindestens gleich bleiben, um eine zufriedenstellende Wirkungsweise sicherzustellen (DAV, 2020) ⁽¹³²⁾. (Anmerkung: Nach dieser Vorgabe wären die Regeneratoren REJ1, REJ2 und REJ3 in der Abbildung unzureichend.) ⁽¹²⁶⁾

Das BTSV kann auch die Bestimmung der optimalen Zugabemenge an Regenerator zum gealterten Bindemittel unterstützen. Einschränkend ist das Ergebnis aus dem BTSV nur im Bereich der oberen Gebrauchstemperaturen gültig, wodurch bei alleiniger Berücksichtigung der Ergebnisse im Bereich der oberen Gebrauchstemperaturen die Gefahr besteht, dass das resultierende (regenerierte) Bitumen zu weich ist. Aus diesem Grund wird empfohlen, solange kein Verfahren für die Bestimmung der optimalen Zugabemenge im DSR auch für die Bereiche von

¹⁵⁰ Alisov, A. 2017. Typisierung von Bitumen mittels instationärer Oszillationsrheometrie. Dissertation, Schriftenreihe Straßenwesen, Heft 33, Institut für Straßenwesen, Technische Universität Braunschweig.

¹⁵¹ Büchner, J. & Wistuba, M. P. 2020. Evaluating rejuvenator effectiveness using Binder-Fast-Characterisation-Test. Proc., 7th E&E Congress, Version 1.0, Paper 211.

¹⁵² Radenberg, M., Nytus, N., Stephan, D. & Schwettmann, K. 2021. Rejuvenatoren - Bestimmung der optimalen Dosierung und Wirksamkeit. Asphalt, Jahrgang 56, Heft 2, 28–35, Deutscher Asphaltverband (DAV) e.V., Bonn.

¹⁵³ Schrader, J., Wistuba, M. P., Cannone Falchetto, A., Riccardi, C. & Alisov, A. 2019. A new Binder-Fast-Characterization-Test using DSR and its application for rejuvenating reclaimed asphalt binder. J. of Testing and Evaluation, Vol. 48, Issue 1, 52–59, American Society for Testing and Materials (ASTM), DOI: 10.1520/JTE20180893.

mittleren und tiefen Gebrauchstemperaturen entwickelt ist, die ermittelte Dosierung anhand von Performanceprüfungen (idealerweise am grosstechnisch hergestellten Asphaltmischgut oder an der Mastix im DSR) zu evaluieren und gegebenenfalls zu korrigieren. ⁽¹²⁶⁾

5.3 Beurteilung der Dauerhaftigkeit bei der mehrfachen Wiederverwendung

Im Rahmen einer mehrfachen Wiederverwendung von Asphalt („Mehrfachrecycling“) kann das BTSV auch zur Beurteilung der Wirksamkeit von Regenerationsmitteln unter dem Aspekt der Dauerhaftigkeit angewendet werden ^(149, 151).

Das folgende Beispiel dient der Veranschaulichung. Im Beispiel wurde das Ausgangsbitumen 50/70 einer dreifachen Laboralterung mittels RTFOT und PAV ausgesetzt und nach jeder Alterungsstufe regeneriert. RTFOT (Rolling Thin Film Oven Test gemäss EN 12607-1, 2014 ⁽¹⁵⁴⁾) und die Alterung mittels PAV (Pressure Aging Vessel gemäss EN 14769, 2012 ⁽¹⁵⁵⁾) sind etablierte Laboralterungsverfahren. Zur Regeneration des gealterten Bitumens wurden drei verschiedene Regeneratoren und ein weiches Bitumen 160/220 eingesetzt. Abbildung 9 zeigt in den Bildern a, b und c die jeweiligen BTSV-Kennwerte nach Alterung und Regeneration mittels Regenerator, und im Bild d die jeweiligen BTSV-Kennwerte nach Alterung und Regeneration mittels Bitumen 160/220. In allen Bildern zeigt sich, dass die Zugabe unterschiedlicher Anteile an Regeneratoren zu einer quasi-linearen Änderung der BTSV-Kennwerte führt (Regenerationslinie). Für jedes Regenerationsmittel kann eine optimale Zugabemenge gefunden werden, um eine dem Ausgangsbitumen ähnliche Temperatur $T(\text{BTSV})$ zu erzielen. Die Neigung der jeweiligen Regenerationslinie hängt allerdings deutlich vom verwendeten Regenerationsmittel ab. Der Phasenwinkel $\delta(\text{BTSV})$ nimmt nach Zugabe der Regenerationsmittel in den Bildern a und c deutlich ab, was mit einem Anstieg der elastischen Bindemittleigenschaften verbunden ist. Beim Regenerator in Bild b bewirkt die Zugabe kaum eine Änderung des Phasenwinkels, während bei Zugabe von Bitumen 160/220 der Phasenwinkel ansteigt und die Eigenschaften des Ausgangsbitumens weitgehend wiederhergestellt werden (Bild d). Somit kann mit Hilfe des BTSV anhand der Änderung der beiden BTSV-Kennwerte die Wirkungsweise unterschiedlicher Regenerationsmittel im Bereich der oberen Gebrauchstemperatur unter dem Aspekt der Dauerhaftigkeit beurteilt werden. ⁽¹²⁶⁾

¹⁵⁴ EN 12607-1, 2014. Bitumen und Bitumenhaltige Bindemittel - Bestimmung der Beständigkeit gegen Verhärtung unter Einfluss von Wärme und Luft - Teil 1: RTFOT-Verfahren. Europäisches Komitee für Normung (CEN), Brüssel.

¹⁵⁵ EN 14769, 2012. Bitumen und Bitumenhaltige Bindemittel - Beschleunigte Langzeit-Alterung mit einem Druckalterungsbehälter (PAV). Europäisches Komitee für Normung (CEN), Brüssel.

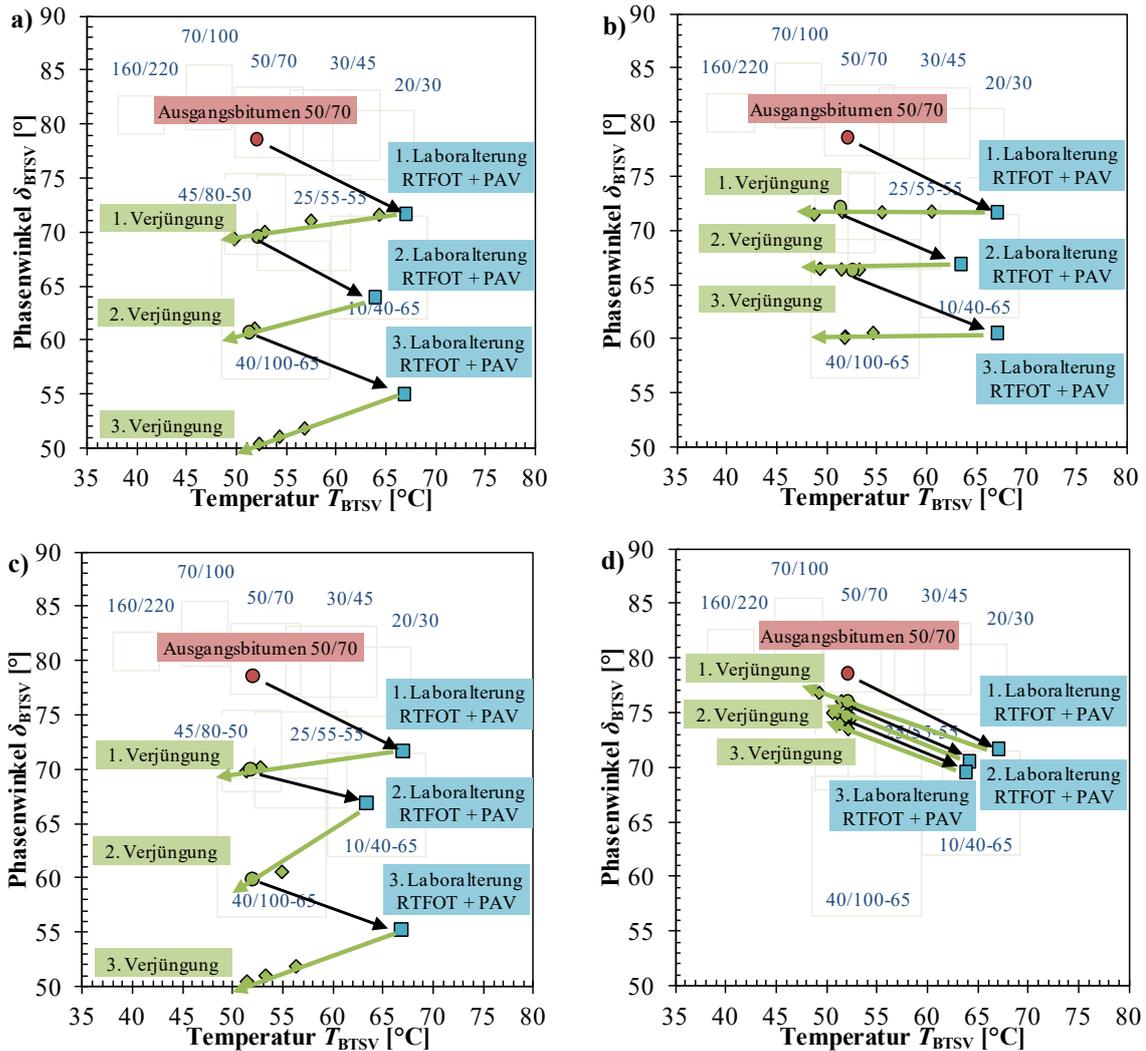


Abbildung 9. Beispiel zur Bewertung der Dauerhaftigkeit eines Regenerationsmittels anhand der Veränderung der BTSV-Kennwerte für ein Ausgangsbitumen (hier 50/70) infolge dreifacher Alterung und Regeneration durch Zugabe eines Regenerators (a, b oder c) oder eines weichen Bitumens (d). ⁽¹²⁶⁾

Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass die rheologischen Effekte im Bindemittel infolge von Alterung und Regeneration bei jeder Alterungsstufe bzw. bei jeder Stufe der Wiederverwendung ähnlich sind. Der Einfluss des Regenerators auf die Alterungsempfindlichkeit des Bindemittels ist gegenüber dem Einfluss des Ausgangsbitumens vernachlässigbar. Zwar ist die Neigung der Regenerationslinie vom Regeneratortyp abhängig und somit unterscheiden sich Regeneratoren in Bezug auf ihre Regenerationswirkung, aber für einen Regenerator bleibt die Neigung der Regenerationslinie in den jeweiligen Alterungsstufen ähnlich, sodass angenommen werden kann, dass bei mehrfacher Wiederverwendung des Asphalts die Effizienz des Regenerators nicht massgeblich verändert wird. ⁽¹²⁶⁾

5.4 Ermittlung der optimalen Zugabemenge

Bisher gibt es kein allgemein gültiges und genormtes Verfahren zu Festlegung der geeigneten Zugabemenge eines Regenerators. Die Hersteller beschränken die Anwendung bestimmter Produkte teilweise auf eine maximale Verwendungsrate an Asphaltgranulat. Die Dosierung wird vom Hersteller ‚eingestellt‘ oder empfohlen, meist in Abhängigkeit vom Erweichungspunkt Ring und Kugel, von der Nadelpenetration und der Menge des

im Asphaltgranulat enthaltenen Bindemittels⁽¹³¹⁾. So ist die Ermittlung der Zugabemenge anhand von konventionellen Bitumenkennwerten in Europa heute weit verbreitet (EAPA, 2018⁽¹⁵⁶⁾).⁽¹²⁶⁾

Die Bestimmung der erforderlichen Zugabemenge im Bereich hoher Gebrauchstemperaturen anhand der Äqui-Schermodultemperatur $T(G^*=15 \text{ kPa})$ wurde erstmals von Alisov (2017)⁽¹⁵⁰⁾. Dabei wird über den Kennwert $T(G^*=15 \text{ kPa})$ ein Zielwert für das regenerierte Bindemittel festgelegt und die Zugabemenge des Regenerators so eingestellt, dass dieser Zielwert erreicht wird. Es könnten hierzu auch Grenzwerte für die Äqui-Schermodultemperatur definiert werden, die jeweils für ein spezifisches Zielbindemittel zu fordern wären (beispielsweise im Rahmen des Eignungsnachweises nach ARS 09/2019⁽¹⁵⁷⁾). Diese Vorgehensweise entspricht der Idee der Festlegung der optimalen Dosierung anhand des Erweichungspunktes Ring und Kugel, mit dem Unterschied, dass die Bestimmung der Äqui-Schermodultemperatur für alle Strassenbaubitumen genauso wie für (wie auch immer) modifizierte bitumenhaltige Bindemittel zuverlässig funktioniert und die Prüfung mit einem DSR erfolgt und daher einen rheologisch Kennwert liefert.⁽¹²⁶⁾

Allerdings ist zu beachten, dass die Äqui-Schermodultemperatur $T(G^*=15 \text{ kPa})$ allein ein Kennwert für das Bitumenverhalten im Bereich hoher Gebrauchstemperaturen ist (weil Alisov diesen Kennwert und das BTSV als Alternative zum Erweichungspunkt Ring und Kugel erdacht hat, siehe oben). Die mittels Äqui-Schermodultemperatur bestimmte erforderliche Zugabemenge gilt daher nur für hohe Gebrauchstemperaturen. Weil die Wirkungsweise von Regeneratoren temperaturabhängig ist (Radenberg et al., 2021⁽¹⁴⁷⁾), sollte die erforderliche Dosierung des Regenerators nicht allein anhand der Äqui-Schermodultemperatur erfolgen, weil dann das resultierende Asphaltmischgut insgesamt zu weich werden könnte. Die Kontrolle einer Probemischung am Asphaltmischwerk ist daher jedenfalls zu empfehlen⁽¹³²⁾ – idealerweise anhand von Prüfungen zum Gebrauchsverhalten (Performance-Prüfungen) im oberen und im unteren Temperaturbereich – und gegebenenfalls ist eine Reduktion der Zugabemenge erforderlich^(158, 159, 148).⁽¹²⁶⁾

Eine zusätzliche Bestimmung der Zugabemenge mittels DSR im Bereich von mittleren Gebrauchstemperaturen wurde erstmals von Isailović et al. (2019)⁽¹⁶⁰⁾ vorgeschlagen, in dem das BTSV sinngemäss bei niedrigeren Temperaturen (-10 bis 40°C) angewandt wird. Isailović et al. (2019) haben eine Äqui-Schermodultemperatur von $T(G^*=5 \text{ MPa})$ als Kennwert untersucht, später Radenberg et al. (2021)⁽¹⁵²⁾ eine Äqui-Schermodultemperatur von $T(G^*=10 \text{ MPa})$. Für beide Kennwerte zeigte sich deutlich, dass die notwendige Zugabemenge für gleichwertige rheologische Eigenschaften zum Frischbindemittel mit abnehmender Temperatur sinkt. Fortführende Untersuchungen dazu sind notwendig. Dabei wäre es im Sinne der Vergleichbarkeit empfehlenswert, mit einem einheitlichen Kennwert weiterzuarbeiten (z. B. $T(G^*=5 \text{ MPa})$ gemäss prEN 14023 (2020)⁽¹⁶¹⁾).⁽¹²⁶⁾

¹⁵⁶ EAPA, 2018. Recommendations for the use of rejuvenators in hot and warm asphalt production. European Asphalt Pavement Association (EAPA), Brussels.

¹⁵⁷ ARS 08/2019, 2019. Allgemeines Rundschreiben Straßenbau Nr. 08/2019, Durchführung von Prüfungen an Straßenbau- und Polymermodifizierten Bitumen. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), Bonn.

¹⁵⁸ Isailović, I., Büchler, S. & Wistuba, M. P. 2018. Gutachten über Prüfungen an Bitumen mit verschiedenen Additiven, Bericht TSW/001-18 vom 01.10.2018, im Auftrag von Freie und Hansestadt Hamburg, Behörde für Wirtschaft, Verkehr und Innovation. Transferzentrum für Straßenwesen (TSW) in der Innovationsgesellschaft Technische Universität Braunschweig mbH.

¹⁵⁹ Krackler, V., Wistuba, M. P. & Bodmer, P. 2021. Grosstechnische Realisierung von Asphaltrecycling mit hohen Zugaberten an Asphaltgranulat. Schlussbericht, Pilotprojekt „RC plus“ mit einer Teststrecke in Küsnacht ZH, Kooperation der ViaTec AG, der TU Braunschweig, der Hüppi AG, der MOAG und der Hochschule Rapperswil im Auftrag der Gemeinde Küsnacht ZH, Schweiz.

¹⁶⁰ Isailović, I. 2019. Praktische Beispiele für den Einsatz von Rejuvenatoren. Vortrag, VSVI Seminar, 5. Februar 2019, Technische Universität Braunschweig.

¹⁶¹ prEN 14023, 2020. Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Rahmenwerk für die Spezifikation von polymermodifizierten Bitumen. Entwurf, Europäisches Komitee für Normung (CEN), Brüssel.

5.5 Nachweis der Eignung

Das Bindemittel beeinflusst massgeblich Bindung und Festigkeit, Gebrauchsverhalten und Dauerhaftigkeit der Asphaltstrasse. Sowohl bei der Verarbeitung (bei Temperaturen von über 110°C bis 230°C) als auch unter Gebrauch (bei rund -20 bis 60°C) muss das Bindemittel leistungsfähig bleiben, insbesondere bei Hitze nicht erweichen (Gefahr der Spurrinnenbildung), bei Kälte nicht spröde reissen und bei mittleren Gebrauchstemperaturen infolge der vielen Belastungsimpulse durch den Schwerverkehr nicht ermüden. ⁽¹²⁶⁾

Dies gilt gleichermaßen für Asphalt mit Anteilen an Asphaltgranulat, dessen Bindemittel mit Regeneratoren modifiziert wurde. Die Eignung des regenerierten Bindemittels und jene des daraus hergestellten Asphalts sind durch Laborprüfungen sicherzustellen. Im DSR kann die Beständigkeit des regenerierten Bindemittels gegen Alterung überprüft werden. Zur Kontrolle des Gebrauchsverhaltens können Performanceprüfungen am laborverdichteten Asphalt herangezogen werden. In den letzten Jahren wurden in Deutschland Prüfungen mit dem DSR zur Ansprache der Gebrauchseigenschaften von Bindemitteln und Bindemittel-Füller-Gemischen entwickelt. ⁽¹²⁶⁾

5.5.1 Beständigkeit gegen Alterung

Das regenerierte Bindemittel sollte nicht schneller altern, als ein vergleichbares frisches Bindemittel. Die Kontrolle kann im Labor anhand von laborgealterten Bindemittelproben erfolgen. Zur Prüfung der Alterungsbeständigkeit eines regenerierten Bindemittels wird meist so vorgegangen, dass das frische Bindemittel gealtert wird, dann mittels eines Regenerators regeneriert und anschliessend wieder gealtert wird. Anschliessend werden die rheologischen Kennwerte des frischen und des regenerierten Bindemittels verglichen. Die relative Veränderung der Kennwerte ist ein Mass für die Alterungsbeständigkeit. ⁽¹²⁶⁾

Der DAV (2020) ⁽¹³²⁾ empfiehlt die systematische Bewertung der Alterungsbeständigkeit auf Basis der BTSV-Kennwerte $T(G^*=15kPa)$ und $\delta@T(G^*=15kPa)$. Demnach wird zuerst das frische Bindemittel mit RTFOT und PAV gealtert (Ausgangsbindemittel) und danach mit einem Regenerator vermischt. Anschliessend werden sowohl das regenerierte Bindemittel als auch das Ausgangsbindemittel erneut mittels PAV gealtert und die rheologischen Kennwerte bestimmt. In Abbildung 10 ist der Zielwirkungsbereich von $T(G^*=15kPa)$ und $\delta@T(G^*=15kPa)$ grün markiert. Dieser besagt, dass ein regeneriertes und anschliessend PAV-gealtertes Bindemittel hinsichtlich der beiden BTSV-Kennwerte mindestens gleichwertige Eigenschaften haben muss wie das PAV-gealterte Ausgangsbindemittel. ⁽¹²⁶⁾

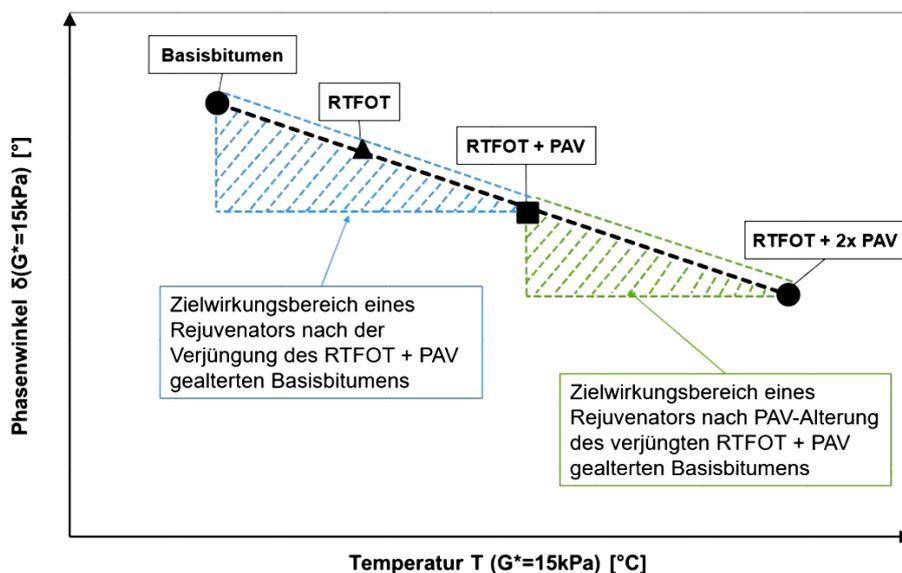


Abbildung 10. Zielwirkungsbereich für regenerierte („verjüngte“) Bindemittel (DAV, 2020 ⁽¹³²⁾). ⁽¹²⁶⁾

Die Veränderung des Bindemittels infolge mehrfacher Wiederverwendung von Asphalt kann ebenfalls im DSR analysiert werden, indem die Veränderung der rheologischen Eigenschaften mittels Vergleichs von DSR Kennwerten nach wiederkehrenden Alterungs- und Regenerationszyklen analysiert wird (Schrader & Wistuba, 2018⁽¹⁴⁹⁾).⁽¹²⁶⁾

Es kann auch eine Laboralterung des Asphalts erfolgen (z. B. mittels Verfahren, die in der TS 12697-52 festgelegt wurden) mit anschließender Prüfung des Asphalts und/oder Extraktion des Bindemittels und dessen Prüfung. Vielfach werden beim Einsatz von Regeneratoren erweiterte Asphaltprüfungen (z. B. Abkühlversuch, Spurbildungs-/Druckschwellversuch) empfohlen (DAV, 2020⁽¹³²⁾). Auch im aktuellen Entwurf des Arbeitspapiers der FGSV wird die Prüfung des Gebrauchsverhaltens vorgeschlagen.⁽¹²⁶⁾

5.5.2 Gebrauchsverhalten (Bitumen- und Mastixperformance im DSR)

• Bitumenperformance im DSR

Neben den Prüfungen mit dem DSR im Bereich linear-viskoelastischen Materialverhaltens (LVE Bereich) von Bitumen, wurde in den letzten Jahren auch die Anwendung des DSR für Prüfungen im nicht linearen Bereich zur Ansprache der Gebrauchseigenschaften von Bindemitteln untersucht. Moderne DSR ermöglichen Prüfungen im Temperaturbereich von ungefähr -40 bis 200°C und im Frequenzbereich von ungefähr 0,1 bis 150 Hz. Je nach Bereich werden aufgrund der temperaturabhängigen Steifigkeit der Messprobe (Bindemittel, Mastix) unterschiedliche Plattendurchmesser und damit Probekörperabmessungen gewählt (Büchner, 2021)⁽¹⁶²⁾. Es werden unterschiedliche Prüfgeometrien im DSR zur Ansprache der Bindemittelleigenschaften in drei Gebrauchstemperaturbereichen eingesetzt. Die Platte/Platte-Messgeometrie mit Durchmesser 4 mm im Temperaturbereich von -40 bis 10°C, mit Durchmesser 8 mm im Temperaturbereich von -10 bis 40°C und mit Durchmesser 25 mm im Temperaturbereich von 30 bis 90°C haben sich als zweckmässig erwiesen (Wistuba und Schrader, 2018⁽¹⁶³⁾).⁽¹²⁶⁾

Die für die einzelnen Temperaturbereiche im Folgenden angegebenen Prüfverfahren am DSR sind für einige in Deutschland eingesetzte bitumenhaltige Bindemittel bereits umfangreich erprobt. Noch unzureichende Erfahrungen mit diesen Prüfverfahren liegen im Zusammenhang mit Regeneratoren vor.⁽¹²⁶⁾

a) Bereich tiefer Gebrauchstemperaturen: Widerstand gegen Kälterissbildung

Das Tieftemperaturverhalten von gealterten Bindemitteln ist wegen der erhöhten Gefahr einer Versprödung und frühzeitigen Rissbildung von besonderem Interesse. Untersuchungen bei einer Prüftemperatur von -10°C zeigen, dass verschiedene Regeneratoren einen stark differenzierenden Einfluss auf das Tieftemperaturverhalten haben^(147, 152).⁽¹²⁶⁾

Prüfungen mit dem DSR im Bereich tiefer Gebrauchstemperaturen können als aussagekräftige Alternative zum Prüfverfahren Brechpunkt nach Fraaß und zur Anwendung des Biegebalken-Rheometers (siehe Riccardi et al., 2017⁽¹⁶⁴⁾; Sui et al., 2011⁽¹⁶⁵⁾) eingesetzt werden.⁽¹²⁶⁾

Zur Untersuchung des Bindemittelverhaltens mit dem DSR im Bereich tiefer Gebrauchstemperaturen wurden Relaxationsprüfungen erarbeitet, um die Relaxationsfähigkeit (also die Fähigkeit abkühlungsbedingte kryogene

¹⁶² Büchner, J. 2021. Prüfung von Asphaltmastix im Dynamischen Scherrheometer. Dissertation, Technische Universität Braunschweig, Institut für Straßenwesen, Schriftenreihe Straßenwesen, Heft 38, Braunschweig.

¹⁶³ Wistuba, M. P. & Schrader, J. 2019. Abschätzung der Performance von Asphalt anhand von Bitumenprüfungen. Straße und Autobahn, Jahrgang 70, Heft 6, 479–489, Kirschbaum Verlag, Bonn.

¹⁶⁴ Riccardi, C., Cannone Falchetto, A., Wistuba, M. P. & Losa, M. 2017. Comparison of DSR and BBR tests for determining the Performance Grade (PG) of asphalt binder at low temperature. Proc., 10th Int. Conf. on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields, 28-30 June 2017, Athens. In: Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields (Eds.: A. Loizos et al.), 267–271, CRC Press.

¹⁶⁵ Sui, C., Farrar, M. J., Harnsberger, P. M., Tuminello, W. H. & Turner, T. F. 2011. New low-temperature performance-grading method. Transportation Research Record: J. of the Transportation Research Board, Vol. 2207, Issue 1, 43–48, Transportation Research Board (TRB), Washington D.C., DOI: 10.3141/2207-06.

Spannungen im Material abzubauen) zu beurteilen (u. a. Büchner, 2021⁽¹⁶²⁾; Radenberg & Staschkiewicz, 2020⁽¹⁶⁶⁾). Folgende Prüfmethodik hat sich an der TU Braunschweig als zweckmässig und zuverlässig erwiesen.⁽¹²⁶⁾

Die Relaxationsprüfung mit dem DSR im Tieftemperaturbereich wird mit der 4 mm Platte/Platte-Messgeometrie durchgeführt, einem Plattenabstand von 2 mm, im Kriechmodus bei einer konstanten Scherdeformation von 0,1 % sowie bei den konstanten Prüftemperaturen -15 und -20°C. Während der Prüfdauer von 60 Minuten fällt die aus der Scherdeformation resultierende Scherspannung infolge Relaxation langsam ab (Abbildung 11). Das Ergebnis ist der zeitliche Abfall der resultierenden Scherspannung (prozentuale Scherspannungsrelaxation nach 60 Minuten), der als Kennwert für die Relaxationsfähigkeit des Bitumens und damit für den Widerstand gegen Kälterissbildung geeignet ist (Büchner, 2021⁽¹⁶²⁾).⁽¹²⁶⁾

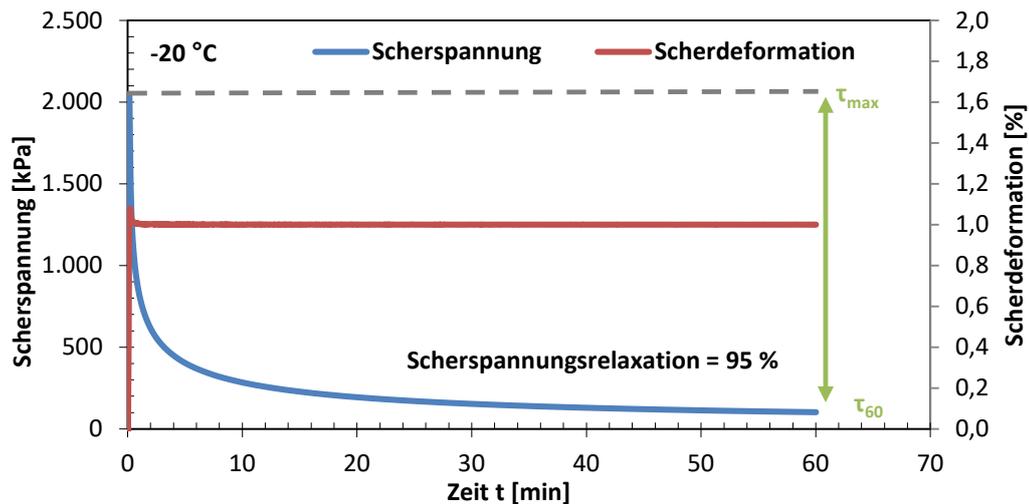


Abbildung 11. Verlauf von Scherdeformation und daraus resultierender Scherspannung während der Relaxationsprüfung von Bitumen im DSR (Beispiel).⁽¹²⁶⁾

b) Bereich mittlerer Gebrauchstemperaturen: Ermüdungswiderstand

Auch das Ermüdungsverhalten kann mit dem DSR zuverlässig geprüft werden (Schrader et al., 2016)⁽¹⁶⁷⁾. Folgende Prüfmethodik hat sich an der TU Braunschweig als zweckmässig und zuverlässig erwiesen.⁽¹²⁶⁾

Die Ermüdungsprüfung im DSR erfolgt mit der 8 mm Platte/Platte-Messgeometrie, 2 mm Plattenabstand, im Oszillationsmodus bei 10 Hz und bei den konstanten Prüftemperaturen 10 und 20°C. Die Prüfung startet mit einer Scherspannung von 50 kPa, welche alle 1.000 Lastwechsel um 10 kPa erhöht wird. Während der Ermüdungsprüfung fällt der komplexe Schermodul (und damit die Materialsteifigkeit) kontinuierlich ab (Abbildung 12). Die Beanspruchung erfolgt bis zum Bruch des Materials. Aus den Wertepaaren des komplexen Schermoduls und der zugehörigen Anzahl an Lastwechseln wird der Verlauf der Energy Ratio nach Rowe & Bouldin (2000)⁽¹⁶⁸⁾ berechnet, welche die während der Prüfung dissipierte Energie ist. Bei Ermüdung erreicht die Energy Ratio ihr Maximum, die zugehörige Lastwechselzahl N_{Rowe} ist die Anzahl an Lastwechselzahl bis zur Materialermüdung.⁽¹²⁶⁾

¹⁶⁶ Radenberg, M. & Staschkiewicz, M. 2020. Rheologische Untersuchungen zur Charakterisierung des Kälteverhaltens von bitumenhaltigen Bindemitteln mit dem Scher-Relaxationsversuch. Straße und Autobahn, Jahrgang 71, Heft 6, 479–485, Kirschbaum Verlag, Bonn.

¹⁶⁷ Schrader, J., Alisov, A. & Wistuba, M. P. 2016. Bewertung des Ermüdungsverhaltens von Straßenbaubitumen. Straße und Autobahn, Jahrgang 67, Heft 10, 783–788, Kirschbaum Verlag, Bonn

¹⁶⁸ Rowe, G. M. & Bouldin, M. G. 2000. Improved Techniques to Evaluate the Fatigue Resistance of Asphalt Mixtures. Proc., 2nd Eurasphalt & Eurobitume Congress, EAPA & Eurobitume, September 20-22, 2000, Barcelona, 754–763.

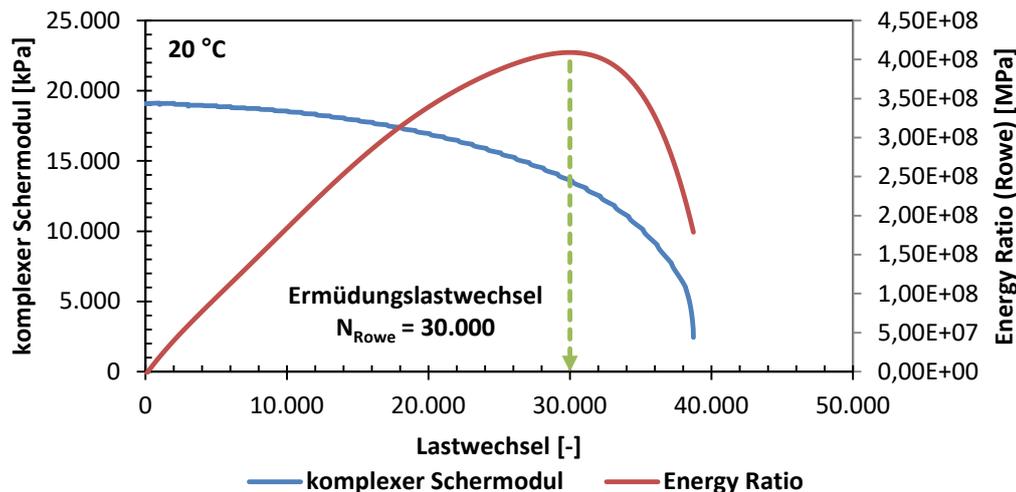


Abbildung 12. Verlauf von komplexem Schermodul und Energy Ratio während der Ermüdungsprüfung von Bitumen im DSR (Beispiel).⁽¹²⁶⁾

c) Bereich hoher Gebrauchstemperaturen: Verformungswiderstand

Im oberen Temperaturbereich werden üblicherweise Kriech-Erholungsprüfungen im DSR angewendet, um den Verformungswiderstand von Bindemitteln zu bewerten. Dabei ist insbesondere der auch in Deutschland standardisierte Multiple Stress Creep and Recovery Test (MSCRT) zu nennen, mit dem die Nachgiebigkeit und die Rückformung eines Materials bestimmt wird (Bahia et al., 2001)⁽¹⁶⁹⁾. Im Zusammenhang mit Regeneratoren ist zu beobachten, dass bei Alterung die Nachgiebigkeit und die Rückformung zunehmen (Erhöhung der elastischen Eigenschaften), während es bei Regeneration genau umgekehrt ist^(142, 144). Allerdings wird der MSCRT aufgrund diverser Schwächen in der internationalen Literatur mittlerweile sehr kritisch gesehen (Büchner, 2021)⁽¹⁶²⁾, und die Anwendung des MSCRT nimmt in Europa deutlich ab. Als Alternative zum MSCRT wurde der Single Shear Creep and Recovery Test (SSCRT) vorgeschlagen (siehe Santagata et al., 2014)⁽¹⁷⁰⁾ der eine verlängerte Kriech-Erholungsprüfung mit nur einer Belastungsstufe ist. Ausgehend vom SSCRT hat sich folgende Kriechprüfung an der TU Braunschweig als zweckmässig und zuverlässig erwiesen.⁽¹²⁶⁾

Die Kriechprüfung mit dem DSR im Hochtemperaturbereich wird mit der 25 mm Platte/Platte-Messgeometrie mit einem Plattenabstand von 1 mm durchgeführt. Die Prüfung erfolgt im Kriechmodus bei einer konstanten Scherspannung von 0,1 kPa und bei einer Prüftemperatur von 60°C. Für Bitumen wird gemäss Büchner et al. (2020) eine Kriechphase von 1 Minute und eine Erholungsphase von 14 Minuten gewählt. Aus der konstanten Scherspannung resultiert eine Deformation anhand deren zeitlichen Verlaufs das Kriechverhalten des Materials bewertet werden kann (Abbildung 13). Denn nach einer gewissen Zeit stellt sich ein Zustand stationären Fließens ein, für den die Kriechrate als charakteristischer Materialkennwert bestimmt wird^{(162), (126)}

¹⁶⁹ Bahia, H. U., Hanson, D. I., Zeng, M., Zhai, H., Khatri, M. A. & Anderson, R. M. 2001. Characterization of modified asphalt binders in Superpave mix design. NCHRP Report 459. Transportation Research Board (TRB), National Academy Press, Washington, D.C.

¹⁷⁰ Santagata, E., Baglieri, O., Alam, M. & Dalmazzo, D. 2014. A novel procedure for the evaluation of anti-rutting potential of asphalt binders. Int. J. of Pavement Engineering, Vol. 16, Issue 4, 287–296, Taylor & Francis, DOI: 10.1080/10298436.2014.942859.

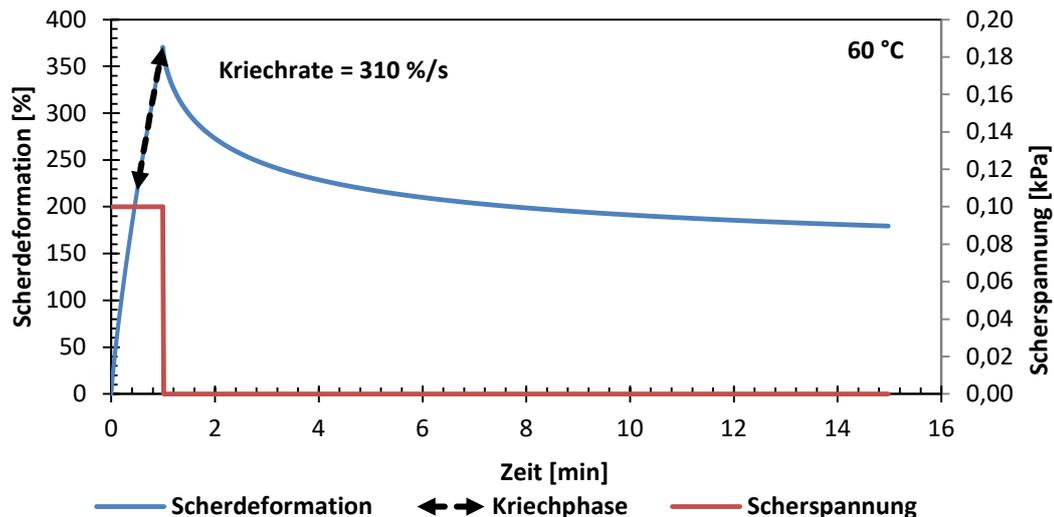


Abbildung 13. Verlauf von Scherspannung und daraus resultierender Scherdeformation während der Kriechprüfung von Bitumen im DSR (Beispiel). ⁽¹²⁶⁾

• Mastixperformance im DSR

Als Mastix wird das Gemisch aus Bindemittel und Füller bezeichnet (*die* oder *der* Mastix). Im Asphalt wirkt Mastix als der eigentliche Klebstoff, denn Bitumen liegt immer als Gemisch mit feinen Gesteinskörnungen vor. Somit ist die Güte des Klebstoffs nicht nur vom Bindemittel abhängig, sondern auch von der spezifischen physikalisch-chemischen Interaktion mit den feinen Gesteinskörnungen. Daher korreliert das Verhalten der Mastix mit dem Verhalten des daraus hergestellten Asphalts. Der Beweis für einen Temperatur übergreifenden, materialtechnologischen Zusammenhang von Mastix und Asphalt innerhalb des LVE Bereichs wurde von Olard und Di Benedetto erbracht (Olard, 2003; Olard & Di Benedetto, 2003) ^(171, 172) der Beweis für einen Zusammenhang ausserhalb des LVE-Bereichs gelang erst kürzlich (Büchner, 2021) ^{(162), (126)}

International und national sind viele verschiedene Prüfmethode zur Charakterisierung der Mastix mit dem DSR in Entwicklung. Eine vollständige Mastix-Analyse über den gesamten Gebrauchstemperaturbereich mit dem DSR wurde erstmals von Büchner und Wistuba vorgestellt (siehe Büchner, 2021 ⁽¹⁶²⁾; Wistuba et al., 2019 ⁽¹⁷³⁾; Wistuba et al., 2021 ⁽¹⁷⁴⁾).

Diese Prüfsystematik wurde bereits umfangreich anhand von realen Asphalten erprobt. Folgende Mastixprüfungen mit dem DSR haben sich als zweckmässig und zuverlässig erwiesen (siehe Büchner, 2021) ⁽¹⁶²⁾ und sind ähnlich zu den oben beschriebenen Bitumenprüfungen in den drei Temperaturbereichen. ⁽¹²⁶⁾

a) Bereich tiefer Gebrauchstemperaturen: Widerstand gegen Kälterissbildung

Die Relaxationsprüfung der Mastix mit dem DSR im Tieftemperaturbereich wird mit der 4 mm Platte/Platte-Messgeometrie durchgeführt, einem Plattenabstand von 2 mm, im Kriechmodus bei einer konstanten Scherdeformation von 0,1 % sowie bei den konstanten Prüftemperaturen -15 und -20°C. Während der Prüfdauer von

¹⁷¹ Olard, F. 2003. Comportement thermomécanique des enrobés bitumineux à basses températures. Relations entre les propriétés du liant et de l'enrobé. Thèse, ENTPE, Université de Lyon, France.

¹⁷² Olard, F. & Di Benedetto, H. 2003. General "2S2P1D" model and relation between the linear viscoelastic behaviours of bituminous binders and mixes. Road Materials and Pavement Design, Vol. 4, Issue 2, 185–224, Taylor & Francis, DOI: 10.1080/14680629.2003.9689946.

¹⁷³ Wistuba, M. P., Büchner, J., Hilmer, T., Steineder, M., Eberhardsteiner, L., Donev, V., Hofko, B., Arrigada, M. & Raab, C. 2019a. Vereinfachung der prüftechnischen Ansprache des Gebrauchsverhaltens von Asphalt (VEGAS). FFG Projektnr. 863063, D-A-CH Kooperation Verkehrsinfrastrukturforschung, Technische Universität Braunschweig, Technische Universität Wien und EMPA/Schweiz.

¹⁷⁴ Wistuba, M. P., Büchner, J. & Sigwarth, T. 2021. Entwicklung einer Methodik zur Bewertung der Bindemittel- und Mastixseigenschaften im Asphaltstraßenbau. Forschungsprojekt „Bit-Q“ i. A. von EIFFAGE Infra-Südwest (vorm. Faber Bau), F. Winkler, KEMNA Bau Andreae, Leonhard Weiss, MATTHÄI Bauunternehmen und STRABAG/TPA.

60 Minuten fällt die aus der Scherdeformation resultierende Scherspannung infolge Relaxation langsam ab. Das Ergebnis ist der zeitliche Abfall der resultierenden Scherspannung (prozentuale Scherspannungsrelaxation nach 60 Minuten) als Kennwert für die Relaxationsfähigkeit des Bitumens und damit für den Widerstand gegen Kälterissbildung. ⁽¹²⁶⁾

b) Bereich mittlerer Gebrauchstemperaturen: Ermüdungswiderstand

Die Ermüdungsprüfung der Mastix im DSR erfolgt mit der 8 mm Platte/Platte-Messgeometrie, 2 mm Plattenabstand, im Oszillationsmodus bei 10 Hz und bei den konstanten Prüftemperaturen 10 und 20°C. Die Prüfung startet mit einer Scherspannung von 100 kPa, welche alle 4.000 Lastwechsel um 50 kPa erhöht wird. Die Beanspruchung erfolgt bis zum Bruch des Materials. Aus den Wertepaaren des komplexen Schermoduls und der zugehörigen Anzahl an Lastwechseln wird der Verlauf der Energy Ratio berechnet, welche die während der Prüfung dissipierte Energie ist. Bei Ermüdung erreicht die Energy Ratio ihr Maximum, die zugehörige Lastwechselzahl N_{Rowe} ist die Anzahl an Lastwechselzahl bis zur Materialermüdung. ⁽¹²⁶⁾

Ein alternatives Verfahren zur Ermüdungsprüfung im DSR erfolgt mit derselben Geometrie, jedoch mit einem Plattenabstand von 3 mm und einer Einschnürung in der Mitte des Probekörpers. Dadurch ist eine Spannungskonzentration im Probekörper sichergestellt und das Versagen erfolgt zuverlässig im Probekörper als Ermüdungsbruch und ein Adhäsionsversagen zur Prüfplatte ist ausgeschlossen. Geprüft wird im Oszillationsmodus bei 30 Hz und +10°C bei 3 Temperaturen und je 3 Schubspannungsamplituden. Bei vergleichenden Untersuchungen auf Mastixebene und Asphalteebene (mit dem 4PBB nach EN 12697-24) zeigt sich eine hohe Korrelation der Ermüdungsparameter der Mastixebene und der Asphalteebene. ¹⁷⁵ Diese Prüfmethode eignet sich daher ausgezeichnet, das Ermüdungsverhalten auf Asphalteebene grossteils durch ein einfaches und rasch durchzuführendes Verfahren auf der Mastixebene abzubilden.

c) Bereich hoher Gebrauchstemperaturen: Verformungswiderstand

Die Kriechprüfung der Mastix mit dem DSR im Hochtemperaturbereich wird mit der 25 mm Platte/Platte-Messgeometrie mit einem Plattenabstand von 1 mm durchgeführt. Die Prüfung erfolgt im Kriechmodus bei einer konstanten Scherspannung von 0,5 kPa und bei einer Prüftemperatur von 60°C. Die Dauer der Kriechphase und der Erholungsphase ist jeweils 60 Minuten. Die Kriechrate im Bereich quasi-stationären Fließens ist ein charakteristischer Materialkennwert für den Verformungswiderstand. ⁽¹²⁶⁾

5.6 Zusammenfassende Erkenntnisse zur praxismgerechten Bitumenprüfung

- Das Bitumen-Typisierungs-Schnell-Verfahren (BTSV) ermöglicht Aussagen zur Qualität eines Regenerators.
- Die BTSV-Kennwerte, also Äqui-Schermodultemperatur $T(G^*=15\text{kPa})$ und zugehöriger Phasenwinkel $\delta@T(G^*=15\text{kPa})$ sind geeignet, einen Regenerator in Bezug auf seine rheologische Wirksamkeit und seine Dauerhaftigkeit bei mehrfacher Wiederverwendung des Asphalts zu beurteilen. So kann das bestgeeignete Regenerationsmittel für einen spezifischen Anwendungszweck ausgewählt werden.
- Das BTSV unterstützt die Bestimmung der geeigneten Zugabemenge an Regenerationsmittel. Einschränkung ist das BTSV im Bereich der oberen Gebrauchstemperaturen gültig (regeneriertes Bitumen evtl. zu weich). Es wird empfohlen, die ermittelte Dosierung anhand von Performanceprüfungen (am großtechnisch hergestellten Asphaltmischgut oder an der Mastix im DSR) zu evaluieren.
- Fazit: Das Dynamische Scherrheometer (DSR) ist hilfreich für alle Fragestellungen im Zusammenhang mit der Regeneration des Bindemittels (tägliche Baupraxis & systematischer Erkenntnisgewinn).

¹⁷⁵ Steineder, M., Donev, V., Hofko, B., Eberhardsteiner, L. 2021. Correlation between Stiffness and Fatigue Behavior at Asphalt Mastic and Asphalt Mixture Level. Journal of Testing and Evaluation, 50 (2021), 1; 1 - 15.

6 Auswahl der Baustoffe und Baustoffkomponenten

6.1 Materialien für die Simulation des Mehrfachrecyclings (AP-3)

Im Rahmen des Projekts wird Mehrfachrecycling exemplarisch für ein Asphaltdeckschichtmischgut und ein Asphaltbinderschichtmischgut im Labor simuliert (Tabelle 15). Tabelle 16 gibt Informationen zur Charakterisierung der Ausgangsmaterialien.

Tabelle 14: Festgelegte Baustoffe für das Mehrfachrecycling (Zielvorgabe)

Asphaltsorte	Asphaltmischgutttyp	Bindemittel	Zugaberate an Asphaltgranulat	Gemäss Technischem Regelwerk
Asphaltdeckschicht	SMA 11	PmB	50 M.-%	EN13108-4 ⁽¹⁷⁶⁾
Asphaltbinderschicht	AC 16 B	PmB	70 M.-%	EN 13108-1 ⁽¹⁷⁷⁾

Tabelle 15: Charakterisierung der Ausgangsmaterialien

	Methode	Forschungspartner
Bindemittelanteil Asphaltgranulat	Löslicher Bindemittelgehalt ⁽¹⁷⁸⁾	RUB
Korngrößenverteilung Asphaltgranulat	Siebung ⁽¹⁷⁹⁾	Empa; RUB
Rheologische Charakterisierung mittels DSR	BTSV ⁽¹⁸⁰⁾ , MSCRT ⁽¹⁸¹⁾ , T-f-Sweep ⁽¹⁸²⁾	TUBS, RUB
Petrografie, Kornform	Kornform ⁽¹⁸³⁾ , Brechkornanteil ⁽¹⁸⁴⁾ , Petrographie ⁽¹⁸⁵⁾	RUB; Empa

RUB...Ruhr Universität Bochum, TUBS...Technische Universität Braunschweig, Empa...Eidgenössische Materialprüfanstalt

Vorab wurden verschiedene Baustoffkomponenten beschafft, untersucht und in Abhängigkeit der Untersuchungsergebnisse folgenderweise zur weiteren Verwendung im Projekt ausgewählt (Tabelle 17).

¹⁷⁶ EN 13108-5 | 2016-12 Asphaltmischgut - Mischgutanforderungen - Teil 5: Splittmastixasphalt; CEN (Europäisches Komitee für Normung), Brüssel.

¹⁷⁷ EN 13108-1 | 2016-11 Asphaltmischgut - Mischgutanforderungen - Teil 1: Asphaltbeton; CEN (Europäisches Komitee für Normung), Brüssel.

¹⁷⁸ EN 12697-1 Asphalt - Prüfverfahren für Heiasphalt - Teil 1: Löslicher Bindemittelgehalt, CEN (Europäisches Komitee für Normung), Brüssel.

¹⁷⁹ EN 12697-2 Asphalt - Prüfverfahren für Heiasphalt - Asphalt - Prüfverfahren - Teil 2: Korngrößenverteilung, CEN (Europäisches Komitee für Normung), Brüssel.

¹⁸⁰ DIN DIN 52050, 2018. Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - BTSV-Prüfung. Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN), Beuth Verlag, Berlin.

¹⁸¹ EN 16659 Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - MSCR-Prüfung (Multiple Stress Creep and Recovery Test), CEN (Europäisches Komitee für Normung), Brüssel.

¹⁸² EN 14770 Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Bestimmung des komplexen Schermoduls und des Phasenwinkels – Dynamisches Scherrheometer (DSR), CEN (Europäisches Komitee für Normung), Brüssel.

¹⁸³ EN 933-3 Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 3: Bestimmung der Kornform - Plattigkeitskennzahl, CEN (Europäisches Komitee für Normung), Brüssel.

¹⁸⁴ EN 933-5 Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 5: Bestimmung des Anteils an gebrochenen Körnern in groben Gesteinskörnungen, CEN (Europäisches Komitee für Normung), Brüssel.

¹⁸⁵ SN 670115 Gesteinskörnungen - Qualitative und quantitative Mineralogie und Petrographie, VSS (Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute), Zürich.

Tabelle 16: Im Projekt verwendete Baustoffkomponenten

Asphaltmischgutttyp	Bezugsquelle	Granulat-Bezeichnung	Zugabebindemittel	Regenerator (Empfehlung RUB) ⁽¹⁸⁶⁾
SMA 11	SMA 8, DEUTAG Hamburg	SMA – HH	PmB 45-80/65 (Grisard, CH) (mittels BTSV-Analyse festgelegt)	Sylvaroad RP 1000 (Kraton, NL)
AC 16 B	AC 16 B, Kemna, Anderten/Hannover	Binder – BS	Styrelf PmB 25-55/55A (Total, D) (gem. Regelwerk)	Iterlene ACF 2000 Green (Iterchimica, I)

Abbildung 14 zeigt beispielhaft die Charakterisierung mittels BTSV des Bindemittels, das zuvor aus dem Asphaltgranulat der Asphaltbinderschicht AC 16 B rückgewonnen wurde. Es wird eine erhebliche Alterung des Bindemittels festgestellt (hoher Wert für T_{BTSV}). Das im Asphaltgranulat enthaltene Bindemittel ist mit hoher Wahrscheinlichkeit ein PmB (erfahrungsgemäss liegt δ_{BTSV} in einem für PmB üblichen Bereich).

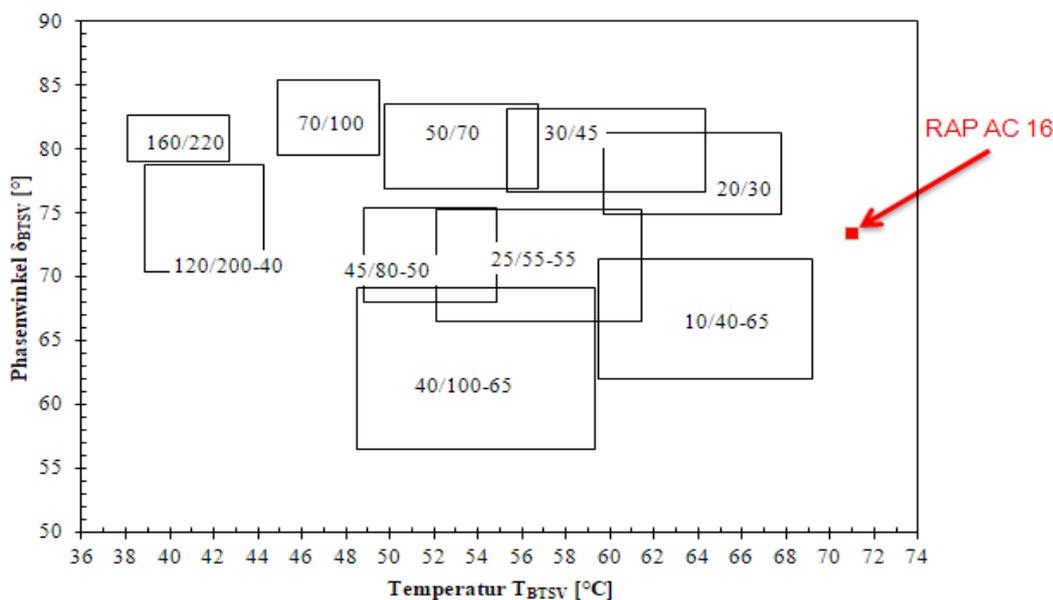


Abbildung 14. BTSV Kennwerte des aus dem AC 16 B Asphaltgranulat extrahierten (stark gealterten) Bindemittels (bezeichnet mit «RAP AC 16»).

Abbildung 15 zeigt die Korngrößenverteilung des AC 16 B Asphaltgranulats. Es ist festzustellen, dass die Sieblinie mit Ausnahme des Fülleranteils innerhalb der Anforderungen inklusive Spannweiten an ein Asphaltbindermischgut AC 16 B N gemäss deutschem Regelwerk liegt. Damit ist sichergestellt, dass trotz des hohen Zugabeanteils an Asphaltgranulat von 70 M.-% durch eine zielgenaue Zugabe von frischer Gesteinskörnung die Anforderungen bezüglich der Sieblinie des resultierenden Mischguts eingehalten werden können.

¹⁸⁶ Radenberg, M., Nytus, N., Stephan, D., Schwettmann, K. 2021. Postcarbone Straße - Der endlose Wiederverwendungskreislauf von Bitumen. Straße + Autobahn, Heft 3/2021, Seite 171 bis 180, Kirschbaum Verlag GmbH, Bonn.

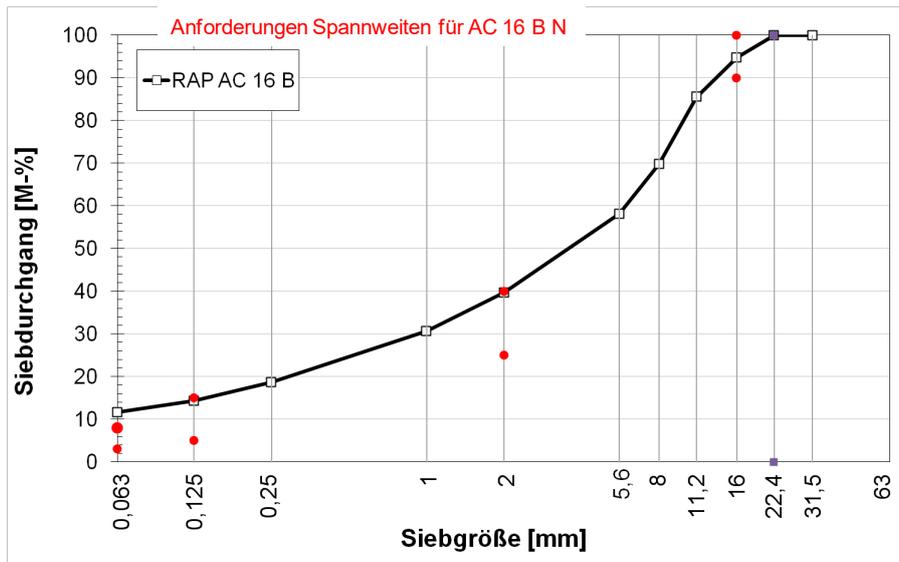


Abbildung 15. Korngrößenverteilung des AC 16 B Asphaltgranulats.

Zur Auswahl des Zugabebindemittels für den SMA 11 wurden zwei PmB aus der Schweiz (PmB 45/80-65 und PmB 45/80-80) in Verbindung mit dem aus dem SMA 8 Asphaltgranulat rückgewonnenen Bitumen mittels BTSV untersucht. Abbildung 16 zeigt die BTSV-Kennwerte für die frischen PmB 45/80-65 und 45/80-80, für das aus dem SMA 8 Asphaltgranulat rückgewonnene Bitumen (RAP SMA8) und nach Vermischung des rückgewonnenen Bitumen RAP SMA8 mit dem jeweiligen PmB (50% RAP+45/80-65 bzw. 50% RAP+45/80-80).

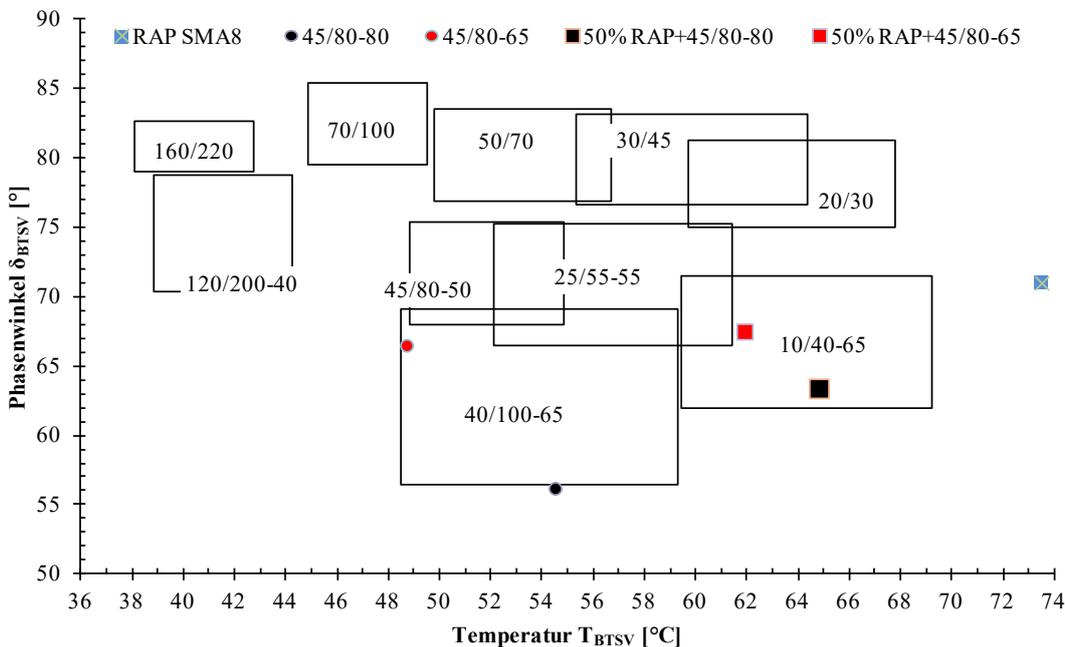


Abbildung 16. Ergebnisse aus der rheologischen Charakterisierung im Hochtemperaturbereich mittels BTSV-Prüfung: BTSV-Kennwerte für die frischen PmB 45/80-65 und 45/80-80, für das aus dem SMA 8 Asphaltgranulat rückgewonnene Bitumen (RAP SMA8) und nach dessen Vermischung mit dem jeweiligen PmB (50% RAP+45/80-65 bzw. 50% RAP+45/80-80).

PmB 45/80-80 ist ein hochpolymermodifiziertes Bitumen, was sich in dem sehr geringen BTSV-Kennwert für δ_{BTSV} zeigt. Die BTSV Kennwerte liegen ausserhalb der Spannweite für die in Deutschland marktüblichen Bitumen (bisheriger Erfahrungshintergrund). Als repräsentatives und praxisrelevantes Bitumen wurde das 45/80-65 für die weiteren Untersuchungen ausgewählt.

Das aus dem SMA 8 Asphaltgranulat rückgewonnene Bitumen (RAP SMA8) weist erwartungsgemäss einen hohen Alterungsgrad auf (deutlich höhere BTSV-Kennwerte für T_{BTSV} und δ_{BTSV} im Vergleich zu den lieferfrischen PmB). Durch die Vermischung des RAP SMA8 mit dem jeweiligen PmB (50% RAP+PmB) wird der Alterung entgegengewirkt (Verringerung von T_{BTSV} und δ_{BTSV}).

Zur Auswahl der Regeneratoren wurde zunächst auf den Erfahrungshintergrund der RUB aus dem DFG Forschungsprojekt Nr. 392670763 "Postcarbone Straße - Der endlose Wiederverwendungskreislauf von Bitumen"⁽¹⁸⁷⁾ zurückgegriffen, in dem eine grosse Bandbreite marktüblicher Produkte untersucht wurde. Basierend auf den Ergebnissen wurden zwei biobasierte Produkte ausgewählt: Iterlene und Sylvaroad. Diese Produkte zeigen, wie in Abbildung 17 zu sehen (Iterlene = R8, Sylvaroad = R1), unterschiedliche rheologische Wirkungsweisen bei der Regeneration. Beide Produkte sind in der Lage bei entsprechender Dosierung der Erhöhung der Bindemittelsteifigkeit infolge von Alterung komplett entgegenzuwirken (Abnahme $T(G^* = 15 \text{ kPa})$). Das Produkt Iterlene erhöht zudem auch die viskosen Verformungsanteile im Bitumen (Erhöhung Phasenwinkel), die Bitumen-Regeneratoren-Gemische mit diesem Produkt weisen jedoch ein schlechteres Alterungsverhalten auf. Zusätzlich bilden beide Produkte unterschiedliche auf dem Markt erhältliche stoffliche Zusammensetzungen ab.

Für das Produkt Sylvaroad liegen darüber hinaus bereits gute Praxiserfahrungen des Auftragnehmers RUB vor^{(188), (189)}

¹⁸⁷ Radenberg, M., Nytus, N., Stephan, D., Schwettmann, K. 2021. Postcarbone Straße - Der endlose Wiederverwendungskreislauf von Bitumen. Straße + Autobahn, Heft 3/2021, Seite 171 bis 180, Kirschbaum Verlag GmbH, Bonn.

¹⁸⁸ Nytus, N., Rudi, E., Stutz, B., Müssenich, H. 2018. Erprobung von zwei Rejuvenatoren mit unterschiedlichen Asphaltgranulat-Anteilen in Asphaltdeck- und binderschicht - Teil 2, Straße und Autobahn, Heft 6/2018, Seite 488 - 501, Kirschbaum-Verlag, Bonn.

¹⁸⁹ Radenberg, M., Nytus, N. 2018. Hohe Zugabemengen von Asphaltgranulat durch Einsatz eines biobasierten Rejuvenators, asphalt, Heft 2/2018, Stein Verlag, Iffelzheim.

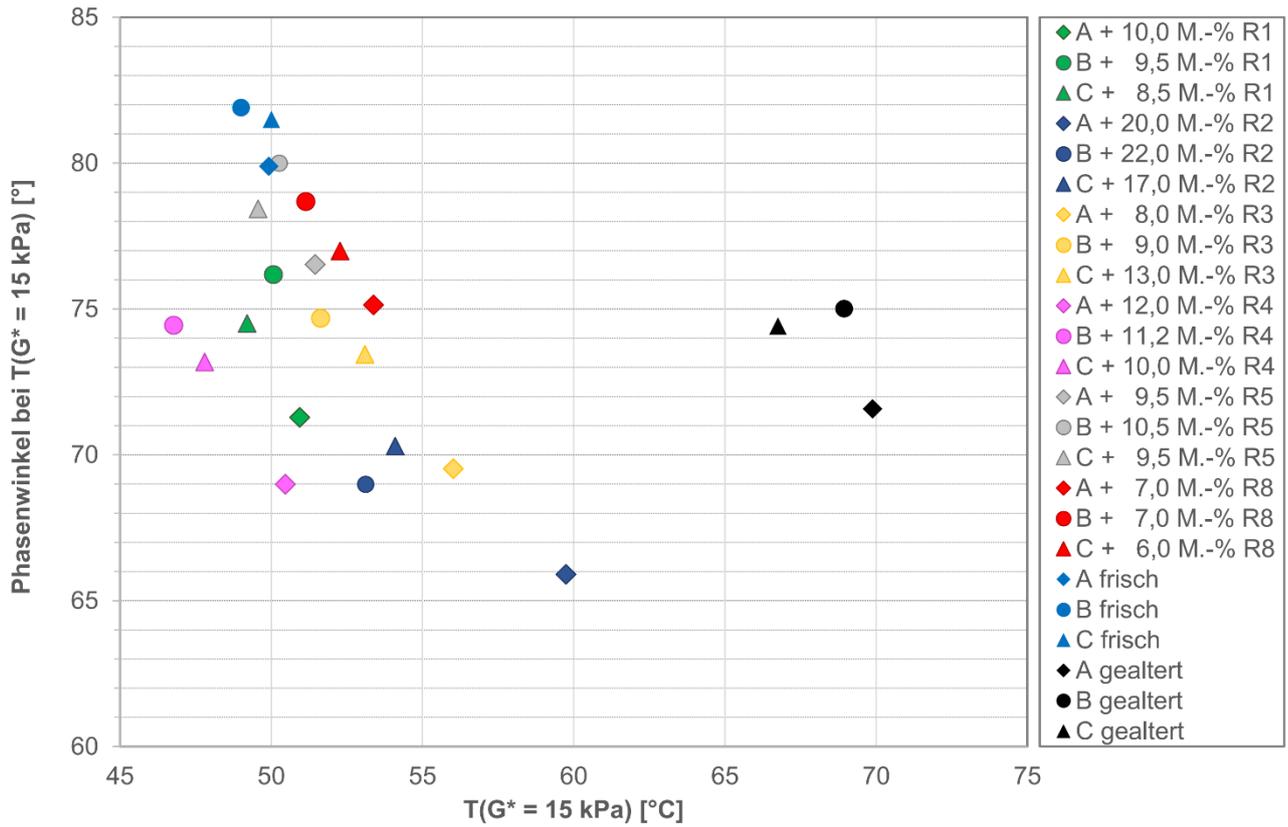


Abbildung 17. Äquisteifigkeitstemperatur $T(G^* = 15 \text{ kPa})$ mit den korrespondierenden Phasenwinkeln der im DFG-Projekt Nr. 392670763 "Postcarbone Straße - Der endlose Wiederverwendungskreislauf von Bitumen" untersuchten Produkte ⁽¹⁹⁰⁾

Die Zugabebindemittel (45/80-65 für den SMA 11 und 25/55-55A für den AC 16) wurden im Labor gealtert (1x RFTOT + 2xPAV) und jeweils mit den Regeneratoren vermischt und mittels BTSV untersucht (Abbildung 18).

¹⁹⁰ Radenberg, M., Nytyus, N., Stephan, D., Schwettmann, K. 2021. Postcarbone Straße - Der endlose Wiederverwendungskreislauf von Bitumen. Straße + Autobahn, Heft 3/2021, Seite 171 bis 180, Kirschbaum Verlag GmbH, Bonn.

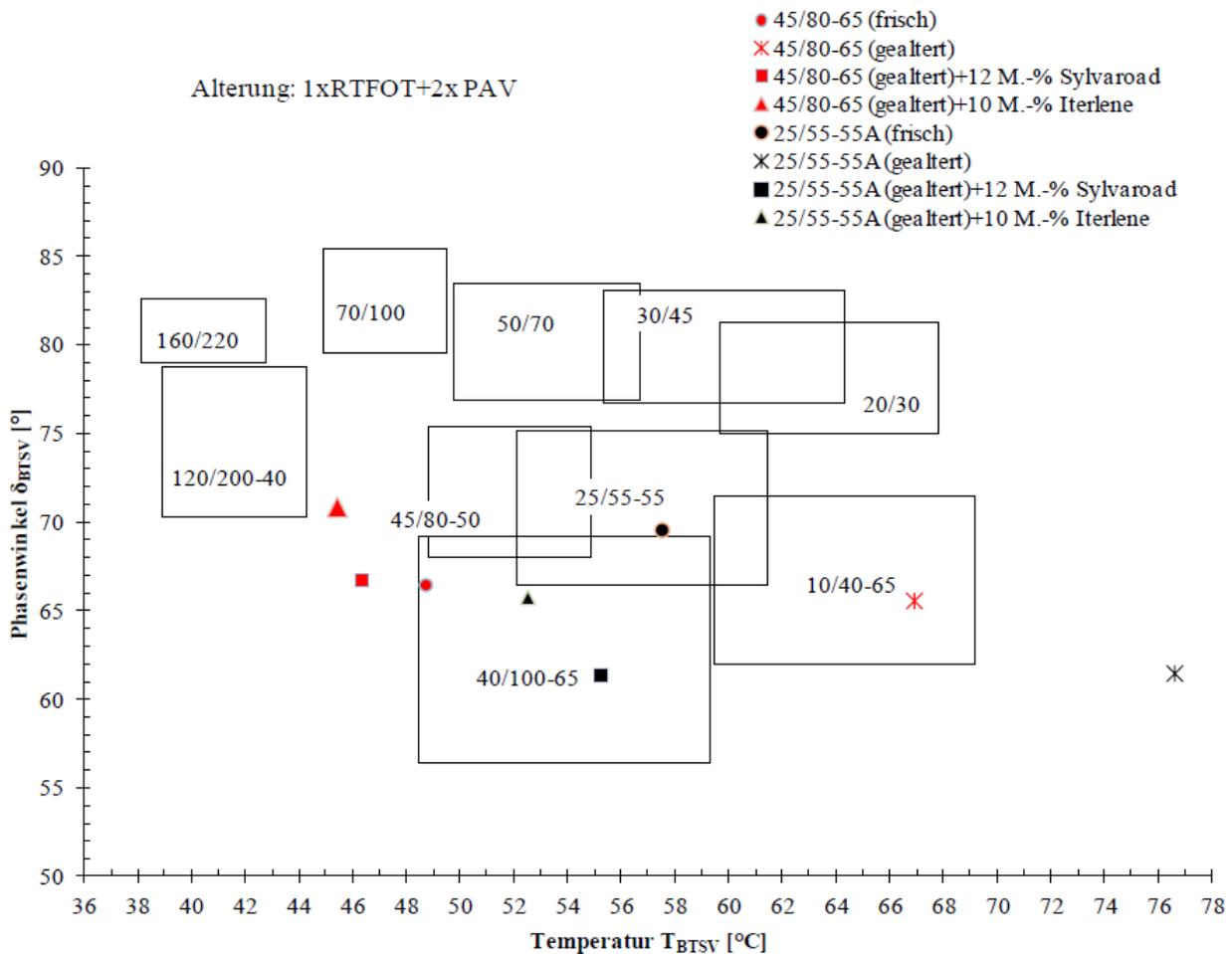


Abbildung 18. BTSV Untersuchungen an Mischungen aus frischen und laborgealterten Zugabebindemitteln (45/80-65 für SMA 11 und 25/55-55A für den AC 16) mit den Regeneratoren.

Es zeigt sich, dass durch die Zugabe des Regenerators Sylvaroad zum laborgealterten 45/80-65 eine sehr gute Regenerationswirkung erreicht werden kann. Der Punkt der Variante "45/80-65 (gealtert)+12 M.-% Sylvaroad" liegt sehr nahe am Punkt der Variante "45/80-65 (frisch)". Daher wurde Sylvaroad als Regenerator für den SMA 11 festgelegt. Somit wurde der verbleibende Regenerator Iterlene für den AC 16 vorgesehen.⁽¹⁹¹⁾

6.2 Asphaltgranulate für eine umfassende Charakterisierung (AP-4)

Bei der Auswahl der im Arbeitspaket AP-4 verwendeten Asphaltgranulate wurde versucht, eine möglichst grosse Bandbreite typischer Asphaltgranulate abzudecken und möglichst umfassende Informationen über deren Vorgeschichte (Erstrecycling oder Mehrfachrecycling) zu erheben. Erschwerend ist, dass in der Praxis oft Mischhalden vorliegen, in denen Asphaltgranulate aus verschiedenen Quellen zusammen gelagert sind, welche zwar ähnliche Eigenschaften haben, aber keine einheitliche Vorgeschichte, bzw. dass Wanderhalden betrieben werden, die unkontrolliert umgelagert werden.

Insgesamt wurden acht verschiedene Asphaltgranulate ausgewählt (Tabelle 18) und für die weiteren Untersuchungen in 35 Fraktionen unterteilt (Tabelle 19).

¹⁹¹ Radenberg, M., Nytus, N., Stephan, D., Schwettmann, K. 2021. Postcarbone Straße - Der endlose Wiederverwendungs-kreislauf von Bitumen. Straße + Autobahn, Heft 3/2021, Seite 171 bis 180, Kirschbaum Verlag GmbH, Bonn.

Tabelle 17: In Arbeitspaket AP-4 verwendete Asphaltgranulate

Nr.	Name	Sorte	Fractionen	Herkunft
1	SMA – HH	11 RA 0/8 SMA	4	Kleinbaustellen im AD A1/A25
2	Binder – BS	22 RA 0/16	5	Einzelmassnahme Raum Hannover
3	SMA – MS	sortenreines Deckschichtfräsgut	4	Deckschichtsanierung B51 Telgte
4	Binder – GE	sortenreines Binderfräsgut	7	Baumassnahme auf der A42
5	Halde 2	22 RA 0/16	6	Mischhalde
6	Halde 11	22 RA 0/16	5	Mischhalde
7	W_0/16	22 RA 0/16	1	Mischhalde
8	W_16/32	32 RA 16/32	3	Mischhalde

Tabelle 18: Bezeichnungen der fraktionierten Asphaltgranulate

Granulat	Fractionen	Granulat	Fractionen
Nr. 1 SMA – HH	HH < 1 mm HH 1 - 5,6 mm HH 5,6 - 8 mm HH > 8 mm	Nr. 5 Halde 2	H2 < 1 mm H2 1 - 5,6 mm H2 5,6 - 8 mm H2 8 - 11,2 mm H2 11,2 - 16 mm H2 > 16 mm
Nr. 2 Binder – BS	BS < 1 mm BS 1 - 5,6 mm BS 5,6 - 8 mm BS 8 - 11,2 mm BS > 11,2 mm	Nr. 6 Halde 11	H11 < 1 mm H11 1 - 5,6 mm H11 5,6 - 8 mm H11 8 - 11,2 mm H11 > 11,2 mm
Nr. 3 SMA – MS	MS < 1 mm MS 1 - 5,6 mm MS 5,6 - 8 mm MS > 8 mm	Nr. 7 W_0/16	W_0/16 11,2 - 16 mm
Nr. 4 Binder – GE	GE < 1 mm GE 1 - 5,6 mm GE 5,6 - 8 mm GE 8 - 11,2 mm GE 11,2 - 16 mm GE 16 - 22,4 mm GE > 22,4 mm	Nr. 8 W_16/32	W_16/32 11,2 - 16 mm W_16/32 16 - 22,4 mm W_16/32 22,4 - 32 mm

Die Proben der beiden sortenreinen Fräsgüter (Nr. 3 SMA – MS und Nr. 4 Binder – GE) wurden im Gegensatz zu den restlichen Proben nicht aus aufbereiteten Halden entnommen, sondern im Verfahrensschritt vor der Aufbereitung zu Asphaltgranulat.

Die Siebungen der Asphaltgranulate ergaben die in Abbildung 19 dargestellten Stückgrößenverteilungen.

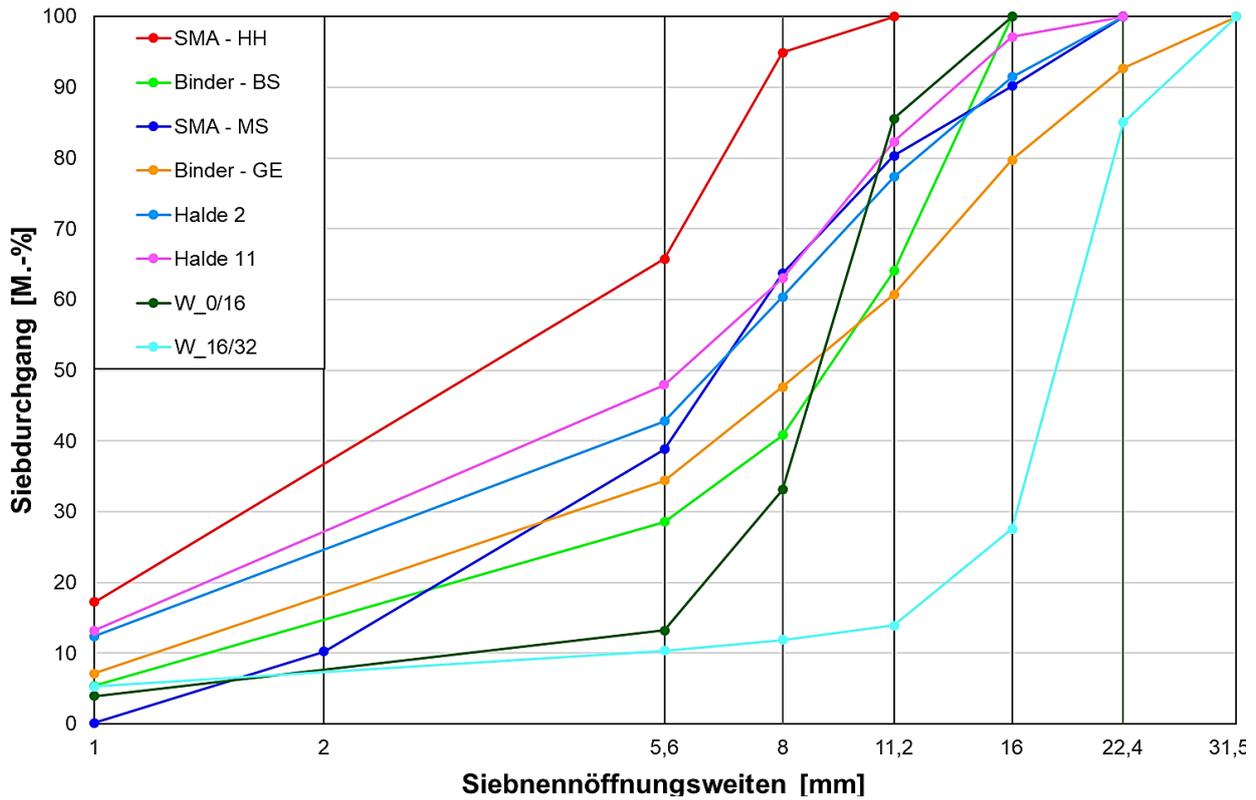


Abbildung 19. Stückgrößenverteilungen der ausgewählten Asphaltgranulate.

Tabelle 20 und Abbildung 20 zeigen die Bindemittelgehalte der Asphaltgranulate (nach Fraktionierung), reichend von 13,5 M.-% (Nr. 1 SMA HH, < 1 mm) bis 2,9 M.-% (Nr. 5 Halde 2, 11,2/16 mm).

Tabelle 19: Bindemittelgehalte der ausgewählten Asphaltgranulate

Fraktion [mm]	< 1	1 – 5,6	5,6 – 8	8 – 11,2	11,2 – 16	16 – 22,4	> 22
Granulat	Bindemittelgehalt [M.-%]						
SMA HH	13,5	6,7	3,5	3,5			
Binder BS	9,2	7,2	4,4	3,7	3,8		
SMA MS	11,9	9,4	5,3	6,7			
Binder GE	8,9	7,2	5,1	4,7	4,8	5,2	6,1
Halde 2	8,8	5	3,5	3,2	2,9	3	
Halde 11	8,8	6,4	4,6	4,1	4,8		
W_0/16					3,3		
W_16/32					4,9	3,9	6,5

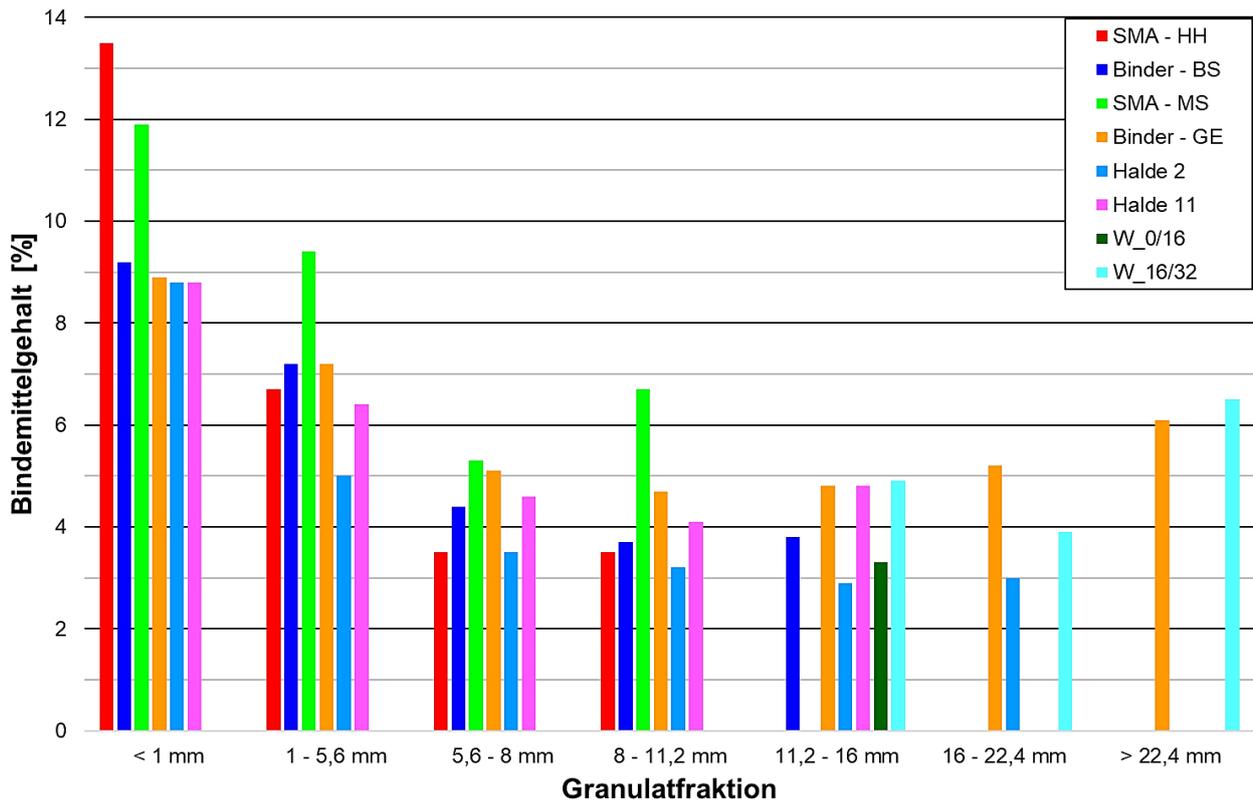


Abbildung 20. Bindemittelgehalte der ausgewählten Asphaltgranulate.

Die Bindemittelgehalte steigen (erwartungsgemäss) mit abnehmender Stückgrösse an, mit den höchsten Werten in der Fraktion < 1 mm. Der mittlere Bindemittelgehalt liegt für die Fraktionen < 1 mm bei 10,2 M.-%, jener für die Fraktionen 5,6/8 mm bei 4,4 M.-%.

Die Rohdichten der Gesteinskörnungen aus den fraktionierten Asphaltgranulaten sind in Abbildung 21 gegenübergestellt. Sie steigen mit zunehmender Stückgrösse tendenziell an und ab 11,2 mm sinken sie wieder.

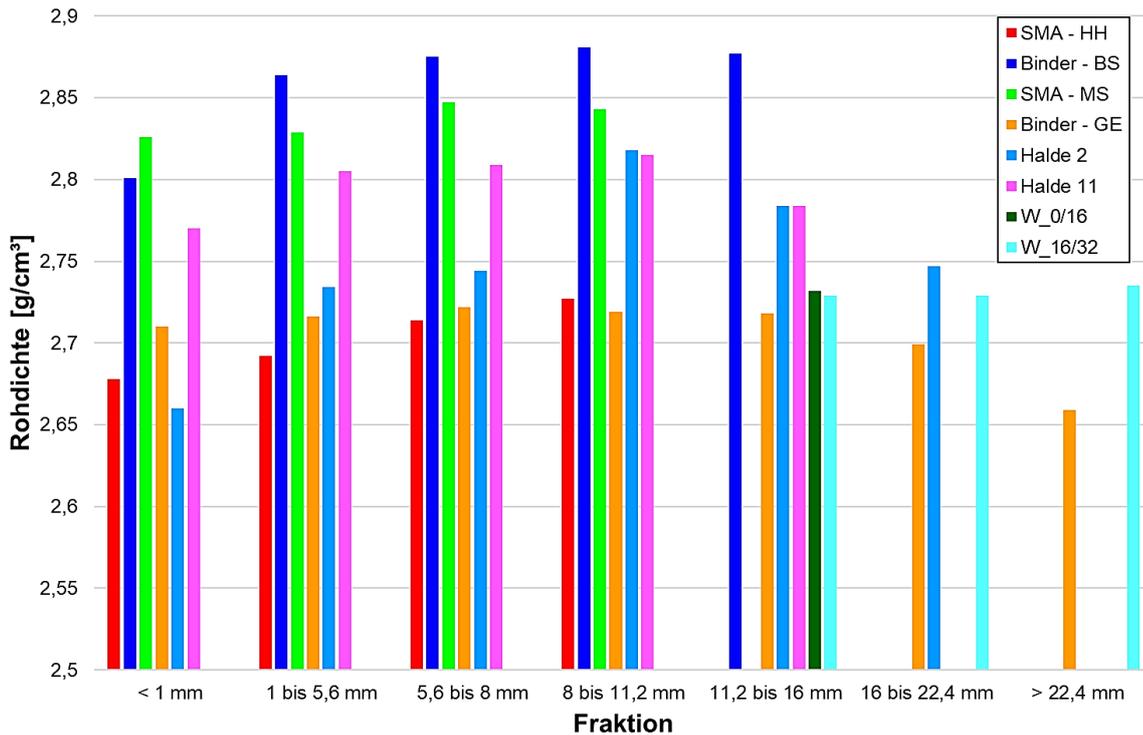


Abbildung 21. Rohdichten der extrahierten Gesteinskörnungen.

Die Plattigkeitskennzahlen (FI) zur Charakterisierung der Kornform zeigen Abbildung 22 für die grobe Gesteinskörnung und Abbildung 23 für die der feinen Gesteinskörnung. Hier liegen die Unterschiede weniger in den abgetrennten Fraktionen eines Asphaltgranulates, sondern vielmehr in den unterschiedlichen Asphaltgranulaten selbst.

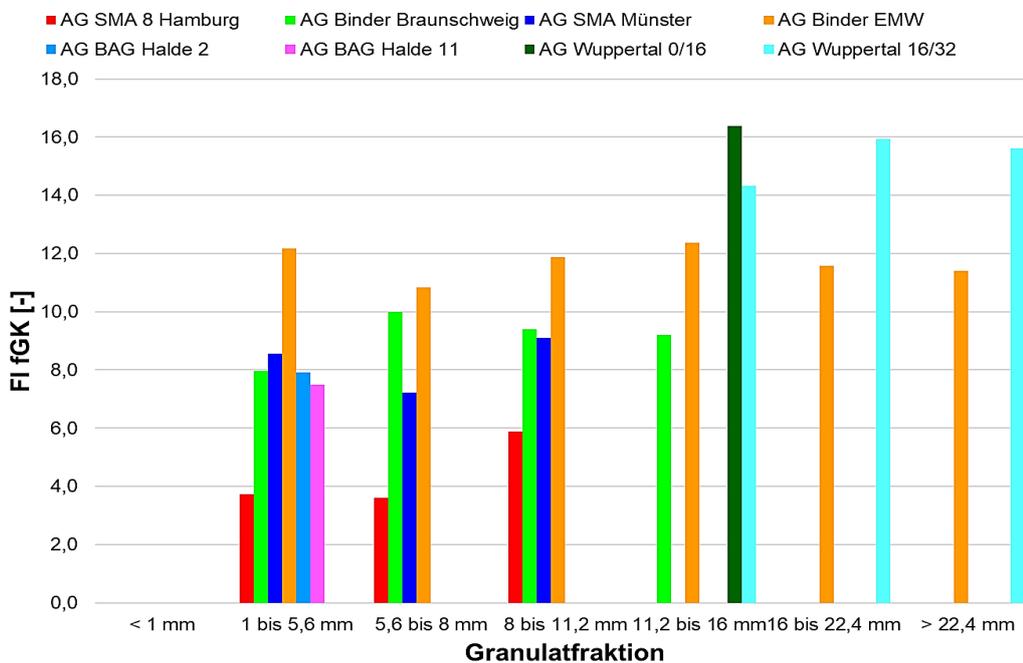


Abbildung 22. Plattigkeitskennzahl (FI) der groben Granulatfraktionen.

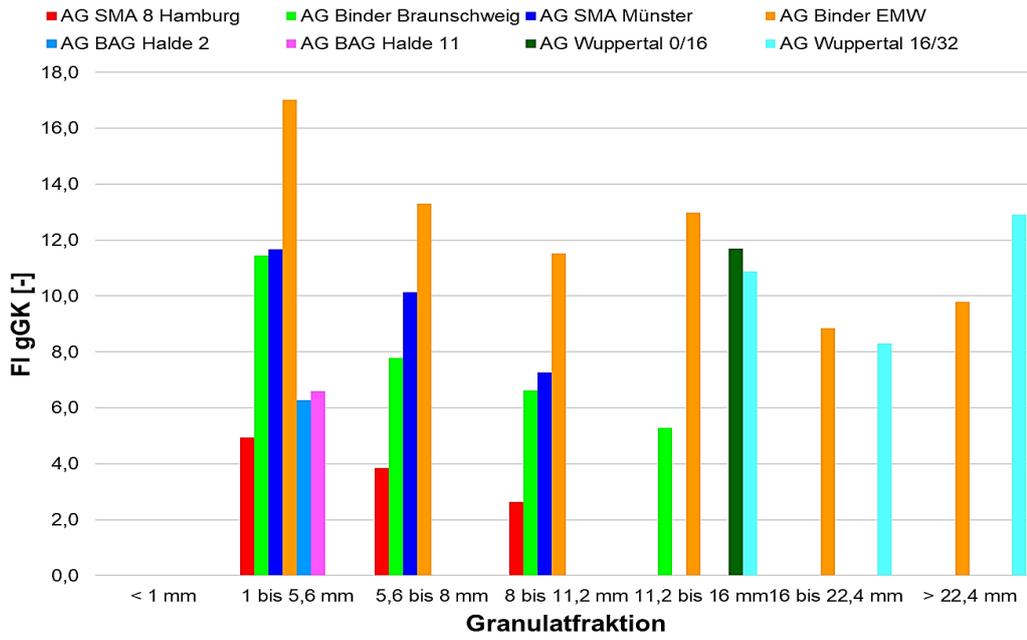


Abbildung 23. Plattigkeitskennzahl (FI) der feinen Granulatfraktionen.

7 AP-3 Prüfung der mehrfachen Wiederverwendung im Labor

7.1 Vorgehensweise und Prüfplan

In Abbildung 24 ist die Vorgehensweise zur Simulation des Mehrfachrecyclings im Labor schematisch dargestellt.

Im ersten Schritt werden die Ausgangsmischungen (M0) aus dem Gestein (A0), dem Asphaltgranulat (R0) und dem Zugabebindemittel (B0) hergestellt. Die Mischungen werden für beide festgelegten Asphaltmischguttypen und für die festgelegten Zugaberaten an Asphaltgranulat bezüglich Korngrößenverteilung der Mineralstoffe, Bindemittelanteil und Hohlraumgehalt optimiert, so dass die massgebenden Anforderungen gemäss Technischem Regelwerk erfüllt sind. Das Zugabebindemittel (B0) wird bezüglich seiner rheologischen Eigenschaften und des optimalen Anteils an Regenerator mittel BTSV (gemäss AP-2) evaluiert.

Im zweiten Schritt wird die Ausgangsmischung (M0) im Labor gealtert, sodass ein künstlich gealtertes Asphaltgranulat (R1) gewonnen wird. Beim gewählten Alterungsverfahren (nach Hugener und Kawakami ⁽¹⁹²⁾, in Anlehnung an RILEM-Alterungsverfahren ⁽¹⁹³⁾ aber von nur halb so langer Dauer) wird das lose Mischgut auf Blechen im Ofen mit einer Schichtdicke von rund 4 cm gealtert. Alterungsdauer und Temperatur 85 oder 95°C werden dem Material angepasst.

Aus dem künstlichen Asphaltgranulat (R1) wird das Bindemittel extrahiert und mittels BTSV geprüft.

Die nach jeder Alterung erhaltene Recyclingmischung (M1 bzw. später M2, M3) wird möglichst ähnlich zum Ausgangsmischgut (M0) hergestellt bezüglich Korngrößenverteilung, Bindemittelgehalt und BTSV-Kennwerte des resultierenden Bindemittels. Die BTSV-Kennwerte des resultierenden Bindemittels werden über die Zusammensetzung und die Menge des Zugabebindemittels (B1 bzw. später B2, B3) eingestellt, welches jeweils aus dem Basisbindemittel (B0) und aus einem weichen Bitumen und/oder einem Regenerator besteht.

Weil die Korngrößenverteilung des Asphaltgranulats (R1 bzw. später R2, R3) nicht identisch ist mit derjenigen des ursprünglichen Asphaltgranulats (R0), müssen die volumetrischen Eigenschaften des Recyclingmischguts (M1 bzw. später M2, M3) analog zum Ausgangsmischgut (M0) überprüft und gegebenenfalls die Korngrößenverteilung durch Zugabe von Mineralstoffen korrigiert werden.

Der Recyclingzyklus wird 2 Mal wiederholt. Das Zugabebindemittel muss bei jedem Zyklus neu bestimmt werden, da sich einerseits das Regenerationsmittel anreichert und andererseits, die künstliche Alterung zu unterschiedlich verhärtetem Asphaltgranulat führen kann. Die zugegebenen natürlichen Mineralstoffe verändern sich hingegen nach dem ersten Recyclingschritt nicht mehr, da der Mischguttyp konstant bleibt. Nur das ursprüngliche Asphaltgranulat (R0) stammt von einem anderen Mischgut. Die Mineralstoffzusammensetzung (hier ist nicht die Korngrößenverteilung gemeint) verändert sich mit jedem Zyklus geringfügig, da bei jedem Zyklus natürliche Mineralstoffe zugegeben werden, die sich mit der Zeit gegenüber den Mineralstoffen aus dem ursprünglichen Asphaltgranulat anreichern.

¹⁹² Hugener, M. & Kawakami, A. 2015. Forschungspaket Recycling von Ausbauasphalt in Heissmischgut: EP2: Mehrfachrecycling von Strassenbelägen, VSS 2005/453, Bundesamt für Strassen, Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK), 2015, Bericht 1510, Empa, Dübendorf, Schweiz.

¹⁹³ Tebaldi, G., Eshan, D., Cannone Falchetto, A., Hugener, M., Perraton, D., Grilli, A., Lo Presti, D., Pasetto, M., Loizos, A., Jenkins, K., Apeageyi, A., Grenfell, J. & Bocci, M. 2018. Recommendation of RILEM TC237-SIB: protocol for characterization of recycled asphalt (RA) materials for pavement applications. *Materials and Structures*, 51(6), 10.1617/s11527-018-1253-5.

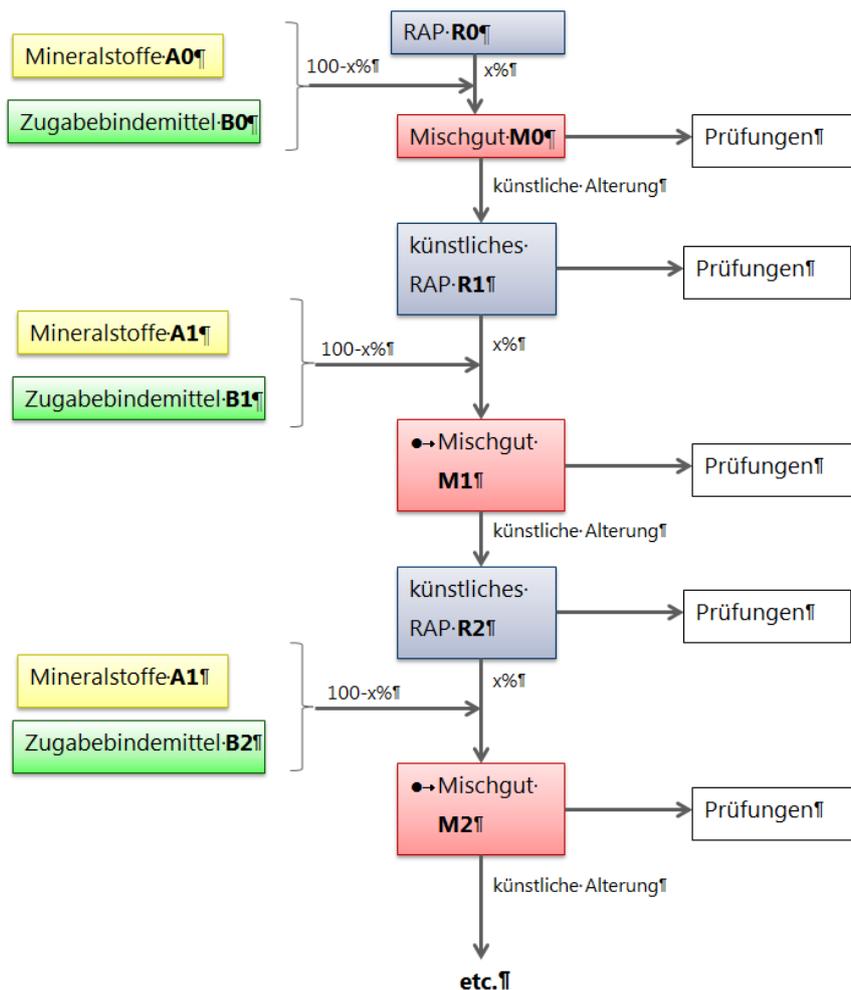


Abbildung 24. Vorgehensweise zur Simulation von Mehrfachrecycling im Labor (schematisch). Legende: Ausgangsmischungen (M0) mit Gestein (A0), RAP Asphaltgranulat (A0) und Zugabebindemittel (B0); Recyclingmischungen (M1, M2, M3) deren Komponenten nach jeder Alterungsstufe fortlaufend nummeriert sind (x = 1, 2, 3): Gestein (Ax), RAP Asphaltgranulat (Rx) und Zugabebindemittel (Bx).

Für jedes Asphaltmischgut wird das Gebrauchsverhalten (Performance) durch zeitraffende Laborversuche überprüft.

Das Gebrauchsverhalten bestimmt den Strassenzustand und wirkt sich damit direkt auf die Verkehrssicherheit, den Fahrkomfort sowie bauliche, betriebliche und wirtschaftliche Belange aus. Die Erreichung eines guten Gebrauchsverhaltens ist das Ziel jedes technisch und wirtschaftlich effizienten Strassenbaus. Ein gutes Gebrauchsverhalten im Sinne einer ausreichenden Leistungsfähigkeit der Strasse resultiert unter den zeitabhängigen Einwirkungen aus Verkehr und Witterung aus der Gesamtheit der strukturellen Eigenschaften des Strassenaufbaus und der Baustoffeigenschaften. ⁽¹⁹⁴⁾

Der Begriff Gebrauchsverhalten von Asphalt bezeichnet den Zustand und die Zustandsveränderungen des Strassenbaustoffs Asphalt unter den jeweiligen Randbedingungen während des Gebrauchs, d. h. während der bestimmungsgemässen Nutzung des fertigen Bauwerks Strasse. Zu den Randbedingungen während des Gebrauchs zählen die Einwirkungen aus mechanischer Last (z. B. Verkehr) und Witterung (z. B. Temperatur, Feuchtigkeit) sowie die langfristigen Klimaeinflüsse (z. B. Alterung). Leistungskriterien für Asphaltstrassen sind beispielsweise: ⁽¹⁹⁴⁾

- die richtige *Dimensionierung* entsprechend der prognostizierten Verkehrsbelastung und der zu erwartenden Witterungseinflüsse; u. a. Wahl der Schichtkombination und der Schichtdicken,

¹⁹⁴ Wistuba, M. P. 2019. Straßenbaustoff Asphalt. ISBN 978-3-932164-16-3, Institut für Straßenwesen, Technische Universität Braunschweig

- anforderungsgerechte *Baustoffqualitäten*; u. a. mechanische und chemische Eigenschaften und Zusammensetzung der Komponenten; daraus resultieren die ‚*Bindemittel-Performance*‘ (u. a. Haften am Gestein, Wasserunempfindlichkeit, Alterungsbeständigkeit) und die ‚*Asphalt-Performance*‘ (u. a. Oberflächeneigenschaften, Tragverhalten, Festigkeit, Widerstand gegen Kälterissbildung, Ermüdungswiderstand, Verformungswiderstand),
- eine gute *Einbauqualität* des Oberbaus (u. a. Verdichtung, innere Struktur, Schichtenverbund) und des Unterbaus (u. a. Tragfähigkeit, Widerstand gegen Verformung, Widerstand gegen Frost- und Tauwirkungen, Filterstabilität).

Im Labor kann das Gebrauchsverhalten von Asphalt anhand der Prüfung folgender Gebrauchseigenschaften am verdichteten Asphaltgemisch (Performance-Eigenschaften) bewertet werden (Begriffsbestimmungen vgl. FGSV, 2014 ⁽¹⁹⁵⁾):

- Verformungswiderstand (Widerstand gegen irreversible Verformungen infolge wiederholter Verkehrsbelastung),
- Steifigkeit (komplexer E-Modul und komplexe Querdehnzahl),
- Ermüdungswiderstand (Widerstand gegen einen langsam voranschreitenden Schädigungsprozess durch Risse),
- Widerstand gegen Kälterissbildung (infolge ver- bzw. behinderten thermischen Schrumpfens).

Wesentliche Gebrauchseigenschaften des Asphalts wie z. B. Steifigkeit, Festigkeit, Viskosität, Kriechverhalten, Ermüdungswiderstand, Alterungsverhalten werden von der Bitumenqualität bzw. Mastixqualität massgeblich gesteuert ⁽¹⁹⁴⁾. Daher kann das Gebrauchsverhalten für regelwerkskonform zusammengesetzte und technisch richtig eingebaute Asphalte näherungsweise auch anhand von Bitumen- bzw. Mastixprüfungen bestimmt werden (siehe dazu Büchner, 2021) ⁽¹⁹⁶⁾. Begleitend erfolgen einige Prüfungen im Kleinmassstab, welche nicht primär für das Mix-Design, sondern für die Qualitätsüberwachung des Mischgutes vorgesehen sind.

In diesem Forschungsprojekt werden Asphaltprüfungen zur Bestimmung des Ermüdungsverhaltens, der Tieftemperatureigenschaften und der plastischen Verformungsneigung durchgeführt. Die folgenden Prüfmethode sind vorgesehen (Tabelle 21), wobei Ermüdungs- und Kälteprüfungen sowie Untersuchungen zur Wasserempfindlichkeit nur am Ausgangs- und Endmischgut des Mehrfachrecyclings durchgeführt werden.

¹⁹⁵ Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), 2014. Begriffsbestimmungen zur Performance von Asphalt (v. 20. Mai 2014). Arbeitsgruppe Asphaltbauweisen, Ad-hoc-Gruppe „Performance Asphalt“ 7.02.

¹⁹⁶ Büchner, J. 2021. Prüfung von Asphaltmastix im Dynamischen Scherrheometer. Dissertation, Technische Universität Braunschweig, Institut für Straßenwesen, Schriftenreihe Straßenwesen, Heft 38, Braunschweig.

Tabelle 20: Prüfplan zur Ansprache von ausgewählten Gebrauchseigenschaften des Asphalts beim Mehrfachrecycling

	Prüfnorm	Probekörper, D...Durchmesser, H...Höhe [mm]	Misch- gut [kg]	Prüflabor
Abkühlversuch (TSRST)	EN 12697-46 ⁽¹⁹⁷⁾	Prismen 200x50x50	30	TUW
Semi-Circular Bending Test (SCB)	AASHTO TP 124-16 ₍₁₉₈₎	Halbzylinder D=150, H=50	20	Empa
Druck-Schwellversuch	EN 12697-25 ⁽¹⁹⁹⁾	3 Zylinder D=150, H=60	10	Empa
Ermüdung (4-Punkt Biegung)	EN 12697-24 ⁽²⁰⁰⁾	Prismen 500x60x60	225	TUW
Steifigkeitsmodul (Spaltzug-Schwellversuch)	AL Sp-Asphalt 09 ⁽²⁰¹⁾	Zylinder D=101.6, H=40	25	Empa
Wasserempfindlichkeit	EN 12697-12 ⁽²⁰²⁾	Zylinder D=101.6	10	Empa
Volumetrische Kennwerte am Marshall-Probekörper nach EN 12697-30 ⁽²⁰³⁾	EN 12697-8 ⁽²⁰⁴⁾	Zylinder D=100, H=63	6	Empa
Beschleunigte Prüfung des Gebrauchsverhaltens mit dem Verkehrslastsimulator (MMLS-3)		Verdichtete Schicht, bis ca. 8 cm Dicke und 2 m Länge	k. A.	Empa
Rheologische Bitumenkennwerte:				
Bitumen-Typisierungs-Schnellverfahren (BTSV-Prüfung)	DIN 52050 ⁽²⁰⁵⁾	-	4	Empa, TUBS
Erweichungspunkt Ring und Kugel	EN 1427 ⁽²⁰⁶⁾			
Multiple Stress Creep and Recovery Test (MSCR-Prüfung)	EN 16659 ⁽²⁰⁷⁾			
gesamt			330	-

Zur Prüfung des Gebrauchsverhaltens unter realitätsnaher Belastung kommt im Projekt ein Verkehrslastsimulator des Typs MMLS-3 (Model Mobile Load Simulator) zum Einsatz. Der Verkehrslastsimulator dient zur beschleunigten Simulation der Verkehrslastüberrollung und zur Bestimmung der mechanischen Gebrauchseigenschaften unter Radlast (insbesondere zur Untersuchung der Spurbildungsneigung). Das Gerät besteht aus einem Stahlrahmen mit vier justierbaren Füßen (siehe Abbildung). Die Belastung wird über vier Räder mit einem Durchmesser von 300 mm und einer Breite von 80 mm aufgebracht, die sich wie bei einer Kettensäge in einer

¹⁹⁷ EN 12697-46 Asphalt - Prüfverfahren für Heiasphalt - Teil 46: Widerstand gegen Klterisse und Tieftemperaturverhalten bei einachsigen Zugversuchen. CEN (Europäisches Komitee für Normung), Brüssel.

¹⁹⁸ AASHTO TP 124-16 Standard Method of Test for Determining the Fracture Potential of Asphalt Mixtures Using the Illinois Flexibility Index Test (I-FIT), AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials), Washington D.C.

¹⁹⁹ EN 12697-25 Asphalt - Prüfverfahren - Teil 25: Druck-Schwellversuch. CEN (Europäisches Komitee für Normung), Brüssel.

²⁰⁰ EN 12697-24 Asphalt - Prüfverfahren für Heiasphalt - Teil 24: Beständigkeit gegen Ermüdung. CEN (Europäisches Komitee für Normung), Brüssel.

²⁰¹ AL Sp-Asphalt 09 Arbeitsanleitung zur Bestimmung des Steifigkeits- und Ermüdungsverhaltens von Asphalten mit dem Spaltzug-Schwellversuch als Eingangsgre in die Dimensionierung. Forschungsgesellschaft für Straen- und Verkehrswesen (FGSV), FGSV-Verlag, Köln.

²⁰² EN 12697-12 Asphalt - Prüfverfahren für Heiasphalt - Teil 12: Bestimmung der Wasserempfindlichkeit von Asphalt-Probekörpern, CEN (Europäisches Komitee für Normung), Brüssel.

²⁰³ EN 12697-30 Asphalt - Prüfverfahren für Heiasphalt - Teil 30: Probenvorbereitung, Marshall-Verdichtungsgerät. CEN (Europäisches Komitee für Normung), Brüssel.

²⁰⁴ EN 12697-8 Asphalt - Prüfverfahren für Heiasphalt - Teil 8: Bestimmung von volumetrischen Charakteristiken von Asphalt-Probekörpern. CEN (Europäisches Komitee für Normung), Brüssel.

²⁰⁵ DIN 52050, 2018. Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - BTSV-Prüfung. Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN), Beuth Verlag, Berlin.

²⁰⁶ EN 1427 Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Bestimmung des Erweichungspunktes - Ring- und Kugel-Verfahren. CEN (Europäisches Komitee für Normung), Brüssel.

²⁰⁷ EN 16659 Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - MSCR-Prüfung (Multiple Stress Creep and Recovery Test), CEN (Europäisches Komitee für Normung), Brüssel.

Richtung auf einem Umlaufriemen bewegen. Die Länge der Prüfstrecke beträgt 1000 mm. Die pro Last wirkende Kraft kann zwischen 1,9 und 2,7 kN geregelt werden. Die maximale Geschwindigkeit der Maschine beträgt 9 km/h, womit etwa 7200 Lastzyklen pro Stunde aufgebracht werden können.

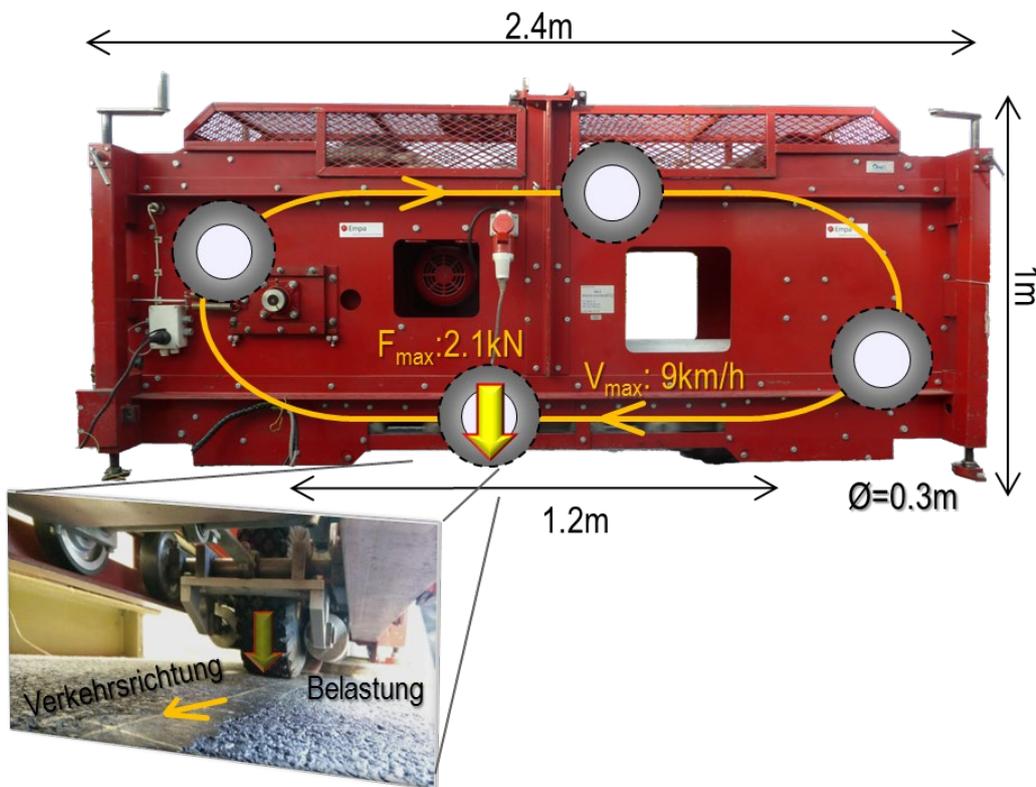


Abbildung 25. Verkehrslastsimulator des Typs MMLS-3.

7.2 Mehrfachrecycling im Kleinmasstab

Das Ziel des Mehrfachrecyclings im Kleinmasstab ist die Überprüfung des Konzeptes zum mehrfachen Recycling, insbesondere der Dosierung von Zugabebindemittel und Regenerator. Dabei wurde auch die Alterungsmethode zur Herstellung des künstlichen RAP überprüft. Deshalb waren die Untersuchungen hauptsächlich auf das Bindemittel beschränkt, wo Erweichungspunkt Ring und Kugel, Penetration und BTSV durchgeführt wurden. Am Asphaltmischgut wurde die Korngrößenverteilung sowie die volumetrischen Kennwerte bestimmt. Die Asphaltmischungen von 20 bis 50 kg wurden in einem Labormischer des Typs Freundl GZM-75 mit einem Fassungsvermögen von 75 kg hergestellt.

7.2.1 Binderschicht AC B 16

Tabelle 22 zeigt die hergestellten Asphaltmischungen und die künstlich gealterten RAP mit den Bindemittelkennwerten.

Tabelle 21 Bindemittleigenschaften von Mischgut und künstlichem RAP

Code	T _{BTSV} (°C)	δ _{BTSV} (°)	Penetration (0,1 mm)	Erw. R+K (°C)	
RAP-R1	68,4	74,1	18	67,8	Ausgangs-RAP
A4-a0	64,2	71,2	28	65,2	Ausgangsmischung
A4-r1	69,3	70,1	19	70,2	künstlich gealtertes RAP 1
A4-a1	58,8	69,7	39	60,4	Mischgut nach 1 Recyclingzyklus
A4-r2	64,3	68,4	29	67,0	künstlich gealtertes RAP 2
A4-a2	56,8	67,7	46	59,4	Mischgut nach 2 Recyclingzyklen
A4-r3	61,3	67,0	33	64,0	künstlich gealtertes RAP 3

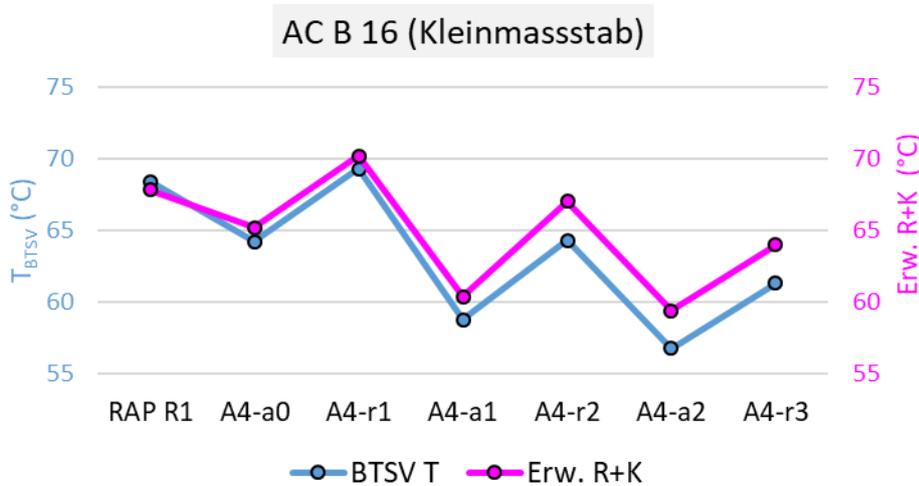


Abbildung 26. Veränderung von T_{BTSV} und Erweichungspunkt Ring und Kugel über die Recyclingzyklen

Wie in Abbildung 26 gut zu sehen ist, stimmen T_{BTSV} und Erweichungspunkt Ring und Kugel am Anfang gut überein. Mit jedem Recyclingzyklus nehmen die Unterschiede aber stetig zu.

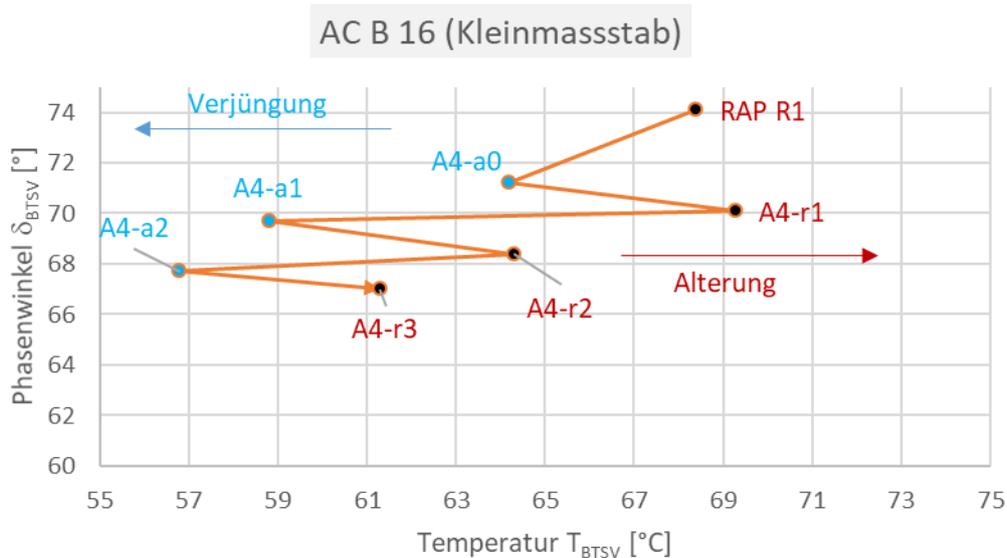


Abbildung 27. Veränderung von T_{BTSV} und δ_{BTSV} über die Recyclingzyklen

Für die Regeneration des RAP wurde in allen Fällen mit der gleichen Menge an Regenerationsmittel gearbeitet, was die BTSV-Kennwerte unterschiedlich beeinflusst. Die Veränderung von T_{BTSV} ist in jedem Recyclingschritt verschieden. Während im ersten Schritt mit dem ursprünglichen RAP-R1 eine Reduktion der BTSV-Temperatur von 4°C beobachtet wurde, war diese im 2. Schritt mit 10°C deutlich grösser, sinkt aber im 2. Schritt auf 7°C. Auch der Phasenwinkel verändert sich unterschiedlich, wo am Anfang die Abnahme mit 3° am grössten war. Im 2. und 3. Recyclingschritt war die Abnahme deutlich geringer mit weniger als einem Grad. Dies zeigt deutlich, dass es vermutlich nicht möglich ist, die Veränderung durch das Regenerationsmittel vorherzusagen. Es ist zu beachten, dass das Original-RAP andere Bindemittel enthält, als das gewählte Zugabebindemittel, weshalb die unterschiedliche Veränderung im ersten Schritt durchaus erklärbar ist (Abbildung 33). Der Unterschied zwischen zweiter und dritter Regeneration ist schwierig zu begründen und kann nicht in der Bindemittelzusammensetzung gefunden werden.

Die Alterung hingegen ergab ähnliche Veränderungen in allen Recyclingphasen. Für T_{BTSV} wurde eine Zunahme von 4-5 °C und für δ_{BTSV} eine Abnahme von 1-1.5° gemessen. Die Alterung der ersten Mischung A4-a0 ergab das künstliche RAP A4-r1 mit einer ähnlichen BTSV-Temperatur wie das Original-RAP R1, aber tieferem Phasenwinkel. Mit jedem Recyclingschritt verringert sich der Phasenwinkel und lässt sich mit dem verwendeten Regenerationsmittel nicht mehr erhöhen.

7.2.2 Deckschicht SMA 11

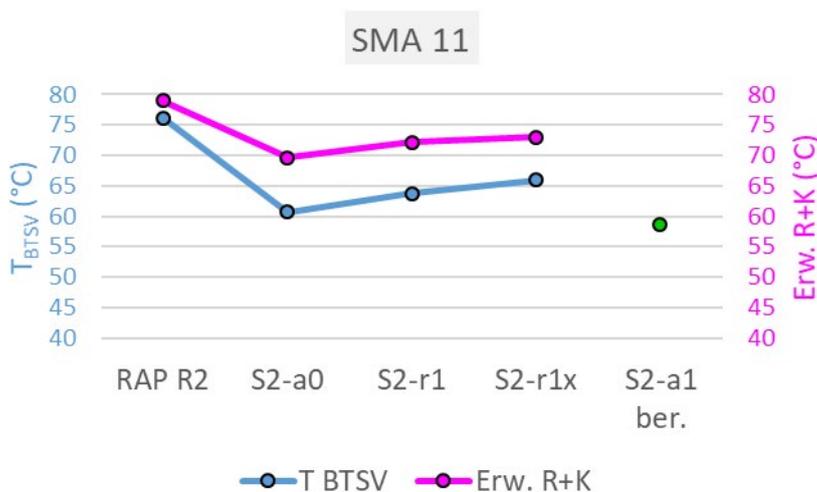


Abbildung 28. Veränderung von T_{BTSV} und Erweichungspunkt Ring und Kugel über einen Recyclingzyklus

Beim SMA 11 wurde festgestellt, dass die Alterung der Ausgangsmischung S2-a0 bedeutend langsamer verläuft als beim AC B 16 und nach der Alterung im Ofen bei 85°C nach 30 Stunden nur eine Erhöhung der BTSV-Temperatur um 4°C ergab (S2-r1). Der Grund hierzu ist vermutlich auf die dichtere Struktur und den höheren Bindemittelgehalt, der einen dickeren Bindemittelfilm ergibt zurückzuführen. Deshalb wurde die Alterung deutlich verschärft indem die Temperatur auf 95°C erhöht und die Alterungszeit auf 7 Tage verlängert wurde. Dies ergab eine Erhöhung der BTSV-Temperatur um 6°C (S2-r1x). Dieser Wert ist immer noch deutlich unterhalb des Wertes des Ausgangs-RAP R2. Da die Temperatur nicht über 100°C erhöht werden sollte und die Zeit für die Herstellung nicht verlängert werden konnte, wurde beschlossen mit dieser verschärften Alterungsprozedur weiterzuarbeiten. Alternativ stand die Verwendung eines härteren PmB zur Diskussion, was verworfen wurde, da dies zu einer weiteren Verzögerung des knappen Zeitplans geführt hätte. Aus demselben Grund wurden auch keine weiteren Alterungsversuche im Kleinmassstab durchgeführt, da keine neuen Erkenntnisse zu erwarten waren.

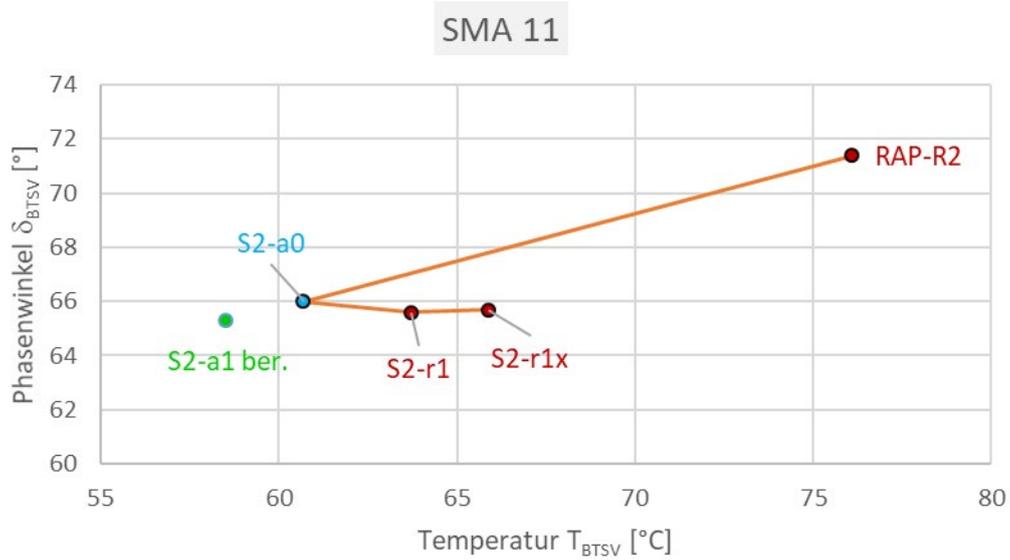


Abbildung 29. Veränderung von T_{BTSV} und δ_{BTSV} über einen Recyclingzyklus

Ergänzend zu den Bindemittelkennwerten wurde das Mischgut untersucht und die volumetrischen Kennwerte der Marshallprüfkörper bestimmt. Allgemein war der Hohlraumgehalt in den Ausgangsmischungen tief, erhöhte sich aber stark nach dem ersten und zweiten Recyclingzyklus bei der Bindermischung.

Tabelle 22 Eigenschaften des Mischgutes im Kleinmassstab

Mischgut		AC B 16			SMA 11
		A4-a0	A4-a1	A4-a2	S2-a0
Lösliche Bindemittelanteile	Masse-%	4,5	4,7	4,5	6,2
Rohdichte	Mg/m ³	2,604	2,583	2,570	2,444
Raumdichte SSD	Mg/m ³	2,523	2,408	2,391	2,380
Hohlraumgehalt	Vol-%	3,1	6,8	7,0	2,6
Hohlraumgehalt bindemittelfrei VMA	Vol-%	14,1	17,8	17,5	16,9
Hohlraumfüllungsgrad VFB	%	78,0	61,9	60,2	84,6
Marshall Stabilität, korrigiert	kN	14,2	11,7	11,3	10,7
Marshall Fließen	mm	4,5	3,9	3,4	4,9
Marshall Quotient	kN/mm	3,2	3,0	3,3	2,2

Tabelle 23 Korngrößenverteilung des Mischgutes im Kleinmassstab

Prüfsieb [mm]	Siebdurchgang	AC B 16			SMA 11
		A4-a0	A4-a1	A4-a2	S2-a0
22,4	Masse-%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
16,0	Masse-%	94,6%	98,5%	98,1%	100,0%
11,2	Masse-%	79,6%	86,7%	83,1%	94,4%
8,0	Masse-%	64,5%	70,0%	63,1%	61,3%
5,6	Masse-%	50,7%	56,6%	51,9%	48,9%
4,0	Masse-%	40,3%	43,7%	41,3%	32,3%
2,8	Masse-%	34,1%	34,6%	33,3%	26,0%
2,0	Masse-%	26,1%	25,5%	25,6%	22,2%
1,4	Masse-%	21,9%	20,5%	20,5%	19,2%
1,0	Masse-%	19,9%	17,9%	17,5%	17,1%
0,500	Masse-%	16,3%	14,0%	12,9%	14,3%
0,250	Masse-%	12,3%	10,4%	8,8%	12,3%
0,125	Masse-%	9,0%	7,6%	5,9%	10,7%
0,063	Masse-%	6,5%	5,8%	4,1%	9,1%

7.2.3 Schlussfolgerungen aus dem Mehrfachrecycling im Kleinmassstab

Folgende Erkenntnisse aus den Versuchen im Kleinmassstab wurden gewonnen:

- Die Dosierung des Regenerationsmittels muss nach jedem Recyclingschritt neu bestimmt werden, da bei konstanter Dosierung die Mischung immer weicher wird.
- Die Verwendung von mehreren RAP- und Mineralstofffraktionen hat sich bewährt für die Herstellung des Asphaltmischgutes im Labormassstab mit gleichbleibender Korngrößenverteilung. Dies dürfte in geringerem Masse für auch Asphaltanlagen zutreffen.

7.3 Mehrfachrecycling im Grossmassstab

Für die Prüfung der Ermüdung und des Tieftemperaturverhaltens im Anfangs- und Endzustand wurden 250 kg Mischgut benötigt. Dieses wurde an der Empa hergestellt und danach an die TU Wien zur Prüfkörperherstellung und zum Prüfen gesandt. Zudem wurde Material für Prüfungen an der Empa benötigt. In Tabelle 25 und Tabelle 26 sind die Berechnungen zur Herstellung der verschiedenen Mischungen für jeden Recyclingschritt angegeben. Für die Anfangs- und Schlussmischung wurden für Prüfungen 330 kg benötigt. Zudem musste für jeden Recyclingzyklus Material für die nächste Mischung reserviert werden. Bei einem Recyclinganteil von 70% war 70% der Mischung aus künstlichem RAP, das aus der vorherigen Mischung durch Alterung hergestellt wurde. Für den SMA 11 mit einem Recyclinganteil von 50% wurde entsprechend weniger RAP benötigt.

Tabelle 24. Berechnung der benötigten Mengen für 3 Recyclingzyklen mit AC B 16

AC B16 70% RAP	Mischmenge [kg]	RAP-Anteil [M-%]	Mischgut für Herstellung künstl. RAP [kg]	Mischgut für Prüfungen [kg]	Rest [kg]	Anzahl Mischungen à 150 kg
Mix A5-a0	550	70%	210	330	10	4
Mix A5-a1	273	70%	210	55	8	2
Mix A5-a2	300	70%	240	50	10	2
Mix A5-a3	343	70%		330	13	3
Total	1466	RAP R1 385.0		Min 440		11

Tabelle 25. Berechnung der benötigten Mengen für 3 Recyclingzyklen mit SMA 11

SMA 50% RAP	Mischmenge [kg]	RAP-Anteil [M-%]	Mischgut für Herstellung künstl. RAP [kg]	Mischgut für Prüfungen [kg]	Rest [kg]	Anzahl Mischungen à 150 kg
Mix S3-a0	450	50%	108	330	12	3
Mix S3-a1	216	50%	120	65	31	2
Mix S3-a2	240	50%	170	65	5	2
Mix S3-a3	340	50%		330	10	3
Total	1246	RAP R2 225		Mineralstoffe 623		10

Die Mischungen wurden im grossen Asphaltmischer mit einer Kapazität von 170 kg durchgeführt. Die Mineralstoffe wurden über Nacht im Ofen bei 205°C vorgeheizt. Das RAP wurde erst kurz vor der Herstellung erwärmt, da festgestellt wurde, dass RAP trotz der schon erfahrenen Alterung in der Strasse beim Aufwärmen nochmals stark altern kann. Sobald das RAP 145°C erreicht hatte, wurde es sofort in den auf 170°C vorgeheizten Asphaltmischer gefüllt, wo die Mineralstoffe vorgelegt wurden. Danach wurde der Regenerator und Bitumen zugegeben und während 10 Minuten gemischt. Das Mischgut wurde danach homogenisiert und portioniert. Das Mischgut für die künstliche Alterung wurde sofort auf Blechen verteilt mit maximaler Schichtdicke von 4 cm und im vorgeheizten Ofen gealtert: AC B 16 wurde für 30 Stunden bei 85°C und SMA 11 während 7 Tagen bei 95°C gealtert, wie dies im Teil Mehrfachrecycling im Kleinmassstab bestimmt wurde. Der SMA 11 war nach der Alterung sehr fest und schwierig zu verarbeiten, weshalb er für kurze Zeit auf 130°C erhitzt wurde. Das gealterte RAP wurde in Kartonschachteln bis zur Herstellung der nächsten Mischung gelagert. An einer Probe wurde das Bindemittel extrahiert und rückgewonnen, um den Erweichungspunkt R + K und die BTSV-Kennwerte zu bestimmen. Ein Teil des Bindemittels wurde benötigt, um die Dosierung der nächsten Mischung zu berechnen. Das Bindemittel aus dem RAP wurde mit neuem Bindemittel und zwei unterschiedlichen Dosierungen an Regeneratoren gemischt. In Abbildung 30 ist als Beispiel die Berechnung der Dosierung für die Mischung A5-a2 dargestellt. Als Zielwert wurde die Temperatur T_{BTSV} der Ausgangsmischung A5-a0 definiert. Der Anteil an Zugabebindemittel ergibt sich als Differenz zwischen Gesamtbindemittelgehalt der Mischung A5-a2 und dem Bindemittelanteil aus dem künstlichen RAP A5-r2. So wird sichergestellt, dass alle Mischungen den gleichen Bindemittelgehalt und BTSV-Temperatur haben.

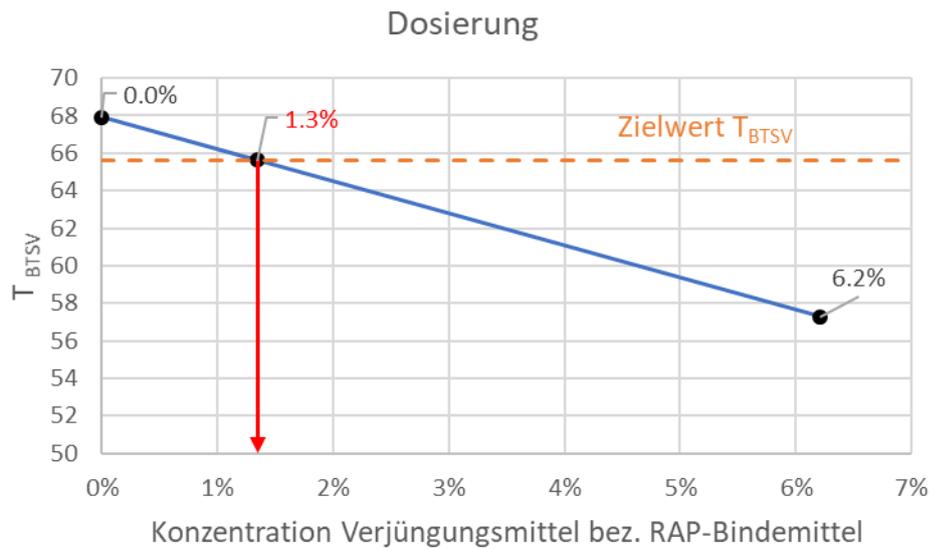


Abbildung 30. Beispiel für die Berechnung der Dosierung der Mischung A5-a2 (AC B 16)

7.3.1 Resultate der Bindemitteluntersuchungen

In Abbildung 31 sind die verschiedenen Dosierungen des Regenerationsmittels V1 aufgeführt und die daraus resultierenden BTSV-Temperaturen von Mischgut und künstlichem RAP. Es wurde festgestellt, dass bei den hergestellten Mischungen die effektiv gemessenen BTSV-Werte stets etwas höher waren als die berechneten Dosierungen. Dies kann auf die Alterung des Mischgutes während der Herstellung zurückgeführt werden, die bei der Berechnung nicht berücksichtigt wurde. Deshalb wurde der Zielwert für die Endmischung um die beobachtete Differenz korrigiert, wodurch die BTSV-Temperatur der Endmischung wieder jene der Anfangsmischung erreichte.

Die Dosierung des Regenerationsmittels V1 für die vier Mischungen weist grosse Schwankungen auf. Am Anfang wird eine grosse Menge an Regenerationsmittel benötigt (6,5%), um das angelieferte RAP zu regenerieren. Für die nächste Mischung A5-a1 wird dann kein Regenerationsmittel mehr benötigt, obwohl T_{BTSV} von RAP R1 und künstlichem RAP A5-r1 gleich sind. Es stellt sich die Frage, ob dies auf Unterschiede zwischen Laboralterung und realer Alterung zurückzuführen ist, oder ob dies durch die unterschiedliche Bindemittelzusammensetzung im RAP verursacht wird. Es ist auch zu beobachten, dass ab der Mischung A5-a1 mit jedem Schritt wieder mehr Regenerationsmittel zugefügt werden muss. Dies könnte darauf hindeuten, dass es doch einen Punkt gibt, ab dem ein Material nicht mehr genügend regeneriert werden kann. Ob dies bei anderen Regenerationsmitteln in gleichem Masse erfolgt, müsste überprüft werden.

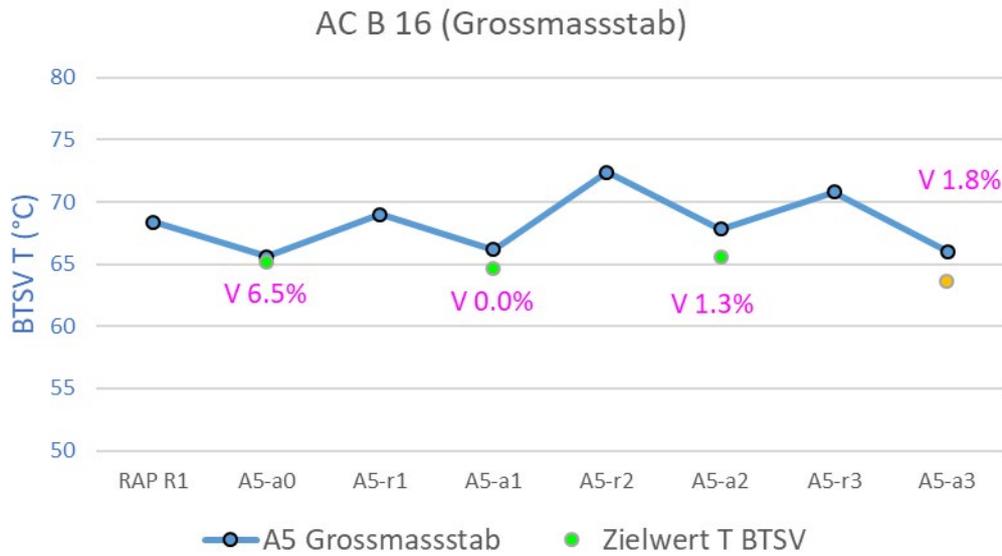


Abbildung 31. Veränderung der BTSV-Temperatur über 3 Recyclingzyklen

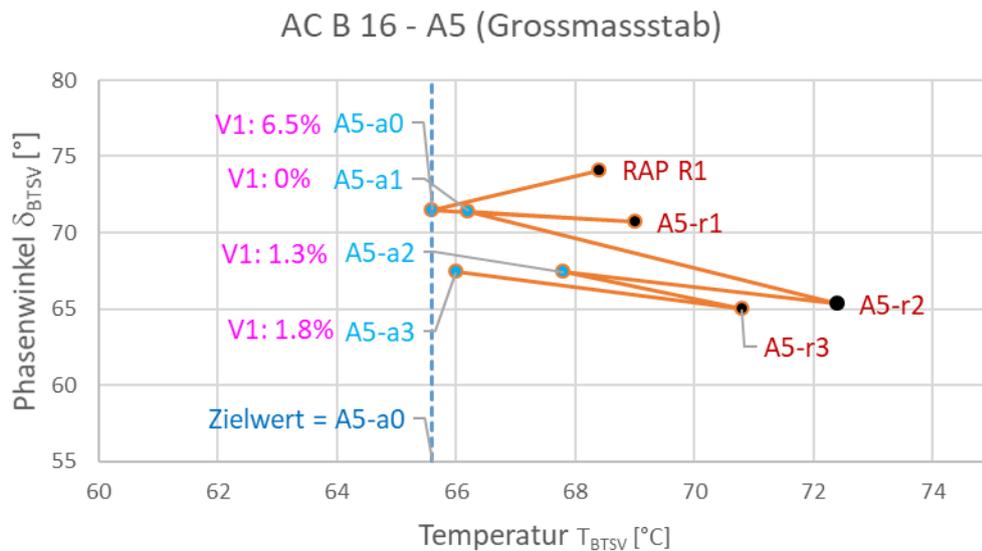


Abbildung 32. Veränderung von T_{BTSV} und δ_{BTSV} über die Recyclingzyklen

Abbildung 32 zeigt die interessante Entwicklung der Bindermischungen als Funktion von T_{BTSV} und dem Phasenwinkel. Die Wiederherstellung der BTSV-Temperatur ist im Prinzip ohne Probleme möglich, der Phasenwinkel ist aber stark von der Regenerationsmitteldosierung abhängig. Im ersten Recyclingsschritt wird eine hohe Menge Regenerationsmittel benötigt, wodurch der Phasenwinkel um 3° abnimmt. Im zweiten Recyclingsschritt hingegen wird kein Regenerationsmittel eingesetzt und der Phasenwinkel wird wieder vollständig regeneriert. Im dritten Recyclingsschritte wird eine geringe Menge an Regenerationsmittel (1 - 2%) zugegeben und der Phasenwinkel wird teilweise, aber nicht vollständig regeneriert. Dies zeigt deutlich, dass die Regeneration mittels Regenerationsmittel und weichem Bindemittel nicht gleichwertig ist. Vermutlich hat auch die Bindemittelzusammensetzung (Abbildung 33) einen Einfluss, was schon bei der Betrachtung der BTSV-Temperatur beobachtet wurde, denn der Abfall des Phasenwinkels im ersten Recyclingsschritt ist bedeutend grösser als in den darauffolgenden Schritten.

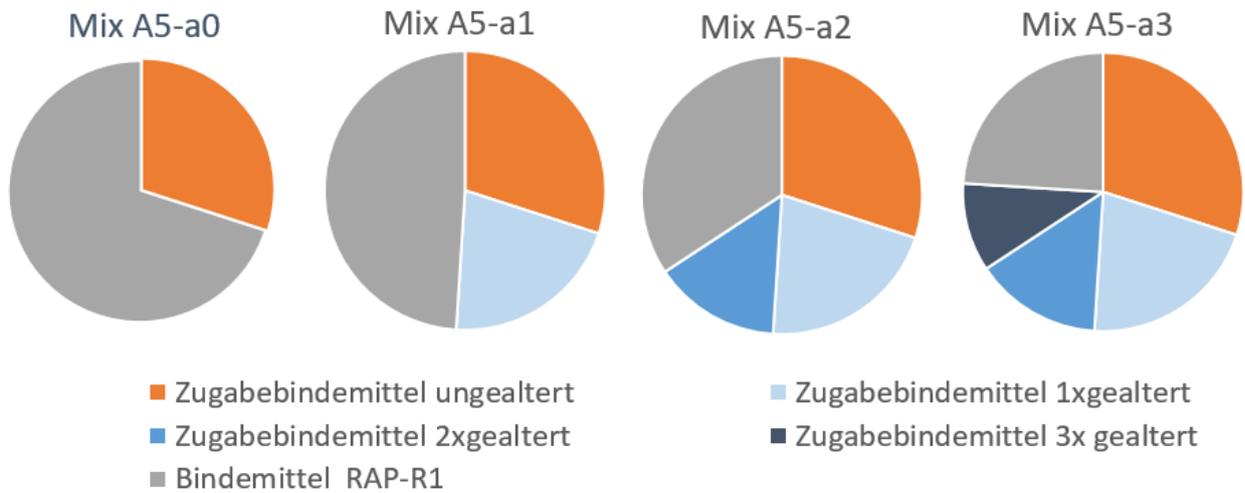


Abbildung 33. Veränderung der Bindemittelzusammensetzung über drei Recyclingzyklen

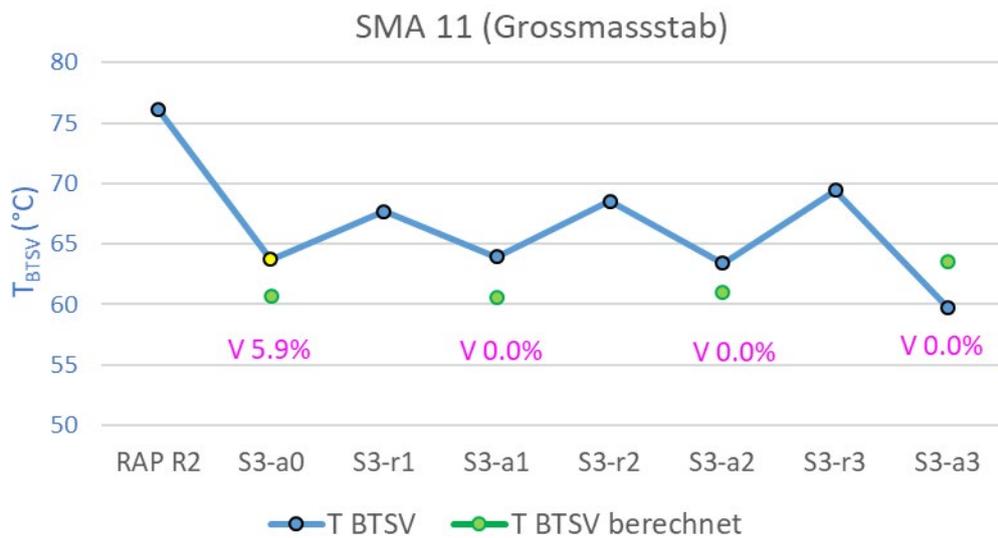


Abbildung 34. Veränderung der BTSV-Temperatur über 3 Recyclingzyklen

Die Abbildung 34 zeigt die Entwicklung der BTSV-Temperatur des SMA 11 über drei Recyclingzyklen. Das Regenerationsmittel V2 wurde nur bei der Ausgangsmischung S3-a0 zugefügt, sonst wurde reines Zugabebindemittel verwendet. Da der Recyclinganteil bei 50% lag, wurde für jede Mischung jeweils 50% neues PmB zugegeben. Dies genügte, um T_{BTSV} wieder auf den Wert der Ausgangsmischung zu bringen, mit Ausnahme der Endmischung, die um 3°C tiefer liegt. Die berechnete Dosierung hätte eigentlich den Einsatz von Regenerationsmittel vorgesehen, aber sogar ohne Zusatz liegt T_{BTSV} tiefer als zuvor, was nicht nachvollziehbar ist. Zudem ist ersichtlich, dass die Alterung bei jedem Schritt leicht zunimmt, die Mischungen aber auch ohne Zusatz von Regenerationsmittel weicher werden. Das Zugabe-PmB B2 überkompensiert den Effekt der künstlichen Alterung.

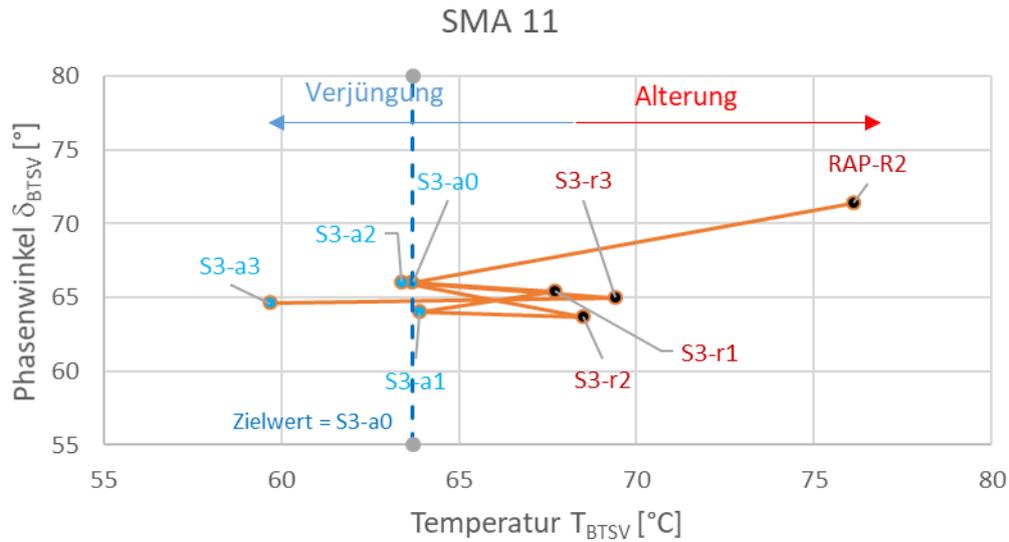


Abbildung 35. Veränderung von T_{BTSV} und δ_{BTSV} über die Recyclingzyklen

Auch beim SMA 11 bleibt der Phasenwinkel innerhalb der Messunsicherheit praktisch unverändert, wenn kein Regenerationsmittel zugegen wird. So hat die Schlussmischung S3-a3 den gleichen Phasenwinkel von 65° wie die Anfangsmischung. Bei der Bindemittelzusammensetzung dominiert von Anfang an das Zugabebindemittel B2 und das Bitumen aus dem Recyclingasphalt R2 hat einen weit geringeren Einfluss (Abbildung 36). In der Schlussmischung besteht das Bindemittel zu 94% aus dem Zugabebindemittel, in ungealtertem und (mehrfach) gealtertem Zustand. Das Bindemittel aus dem ursprünglichen RAP-R2 hat mit einem Anteil von 6% praktisch keinen Einfluss auf die Bindemittleigenschaften.

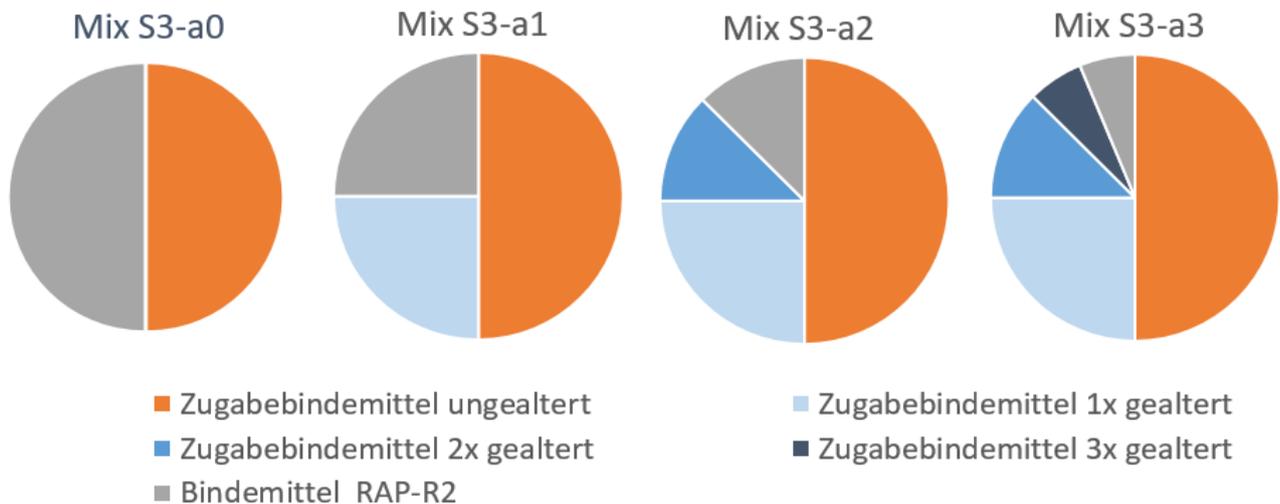


Abbildung 36. Veränderung der Bindemittelzusammensetzung über drei Recyclingzyklen

7.3.2 Resultate der Untersuchungen an Mischgut und Asphaltprüfkörpern

Abbildung 37 und Abbildung 38 zeigen die überlagerten Korngrößenverteilungen der beiden Mischgutsorten in allen Recyclingstufen. Das Mischgut der Binderschicht zeigt vor allem gewisse Unterschiede in den feinen

Fraktionen und für die Ausgangsmischung bei der Korngrösse 11.2 mm. Beim Mischgut SMA 11 ergibt sich eine bessere Übereinstimmung bei den feinen Fraktionen, dafür grössere Unterschiede im Sandbereich 2-4 mm. Insgesamt ist aber die Übereinstimmung bei beiden Mischguttypen gut und ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass nur Recyclingasphalt von einem Objekt verwendet wurde, wodurch eine gute Homogenität erreicht wurde.

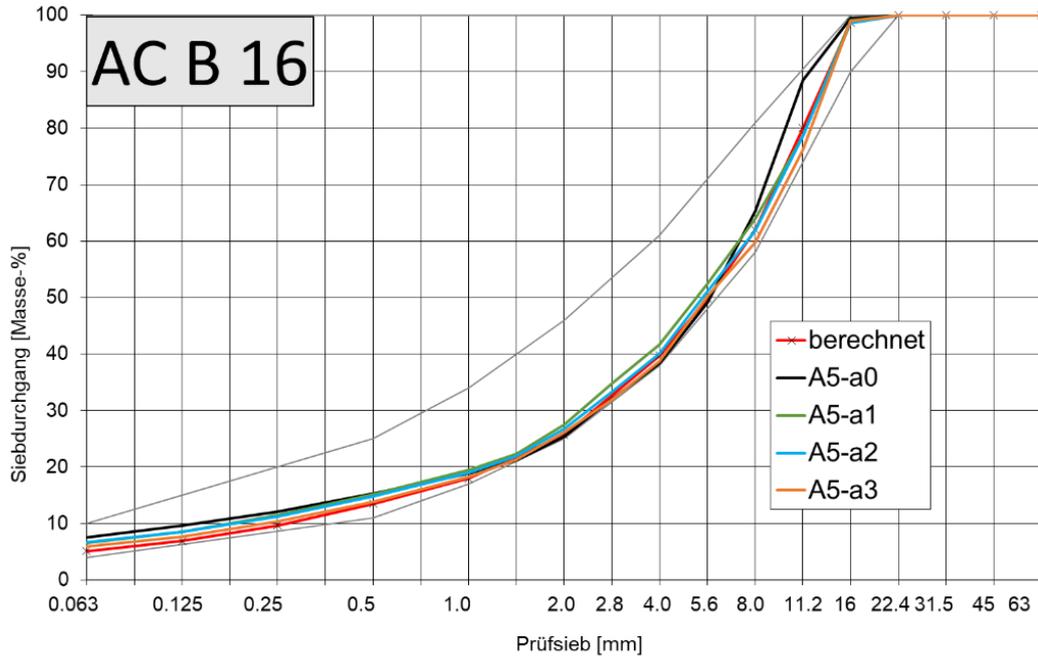


Abbildung 37. Korngrößenverteilung des Mischgutes AC B 16 aller Recyclingstufen

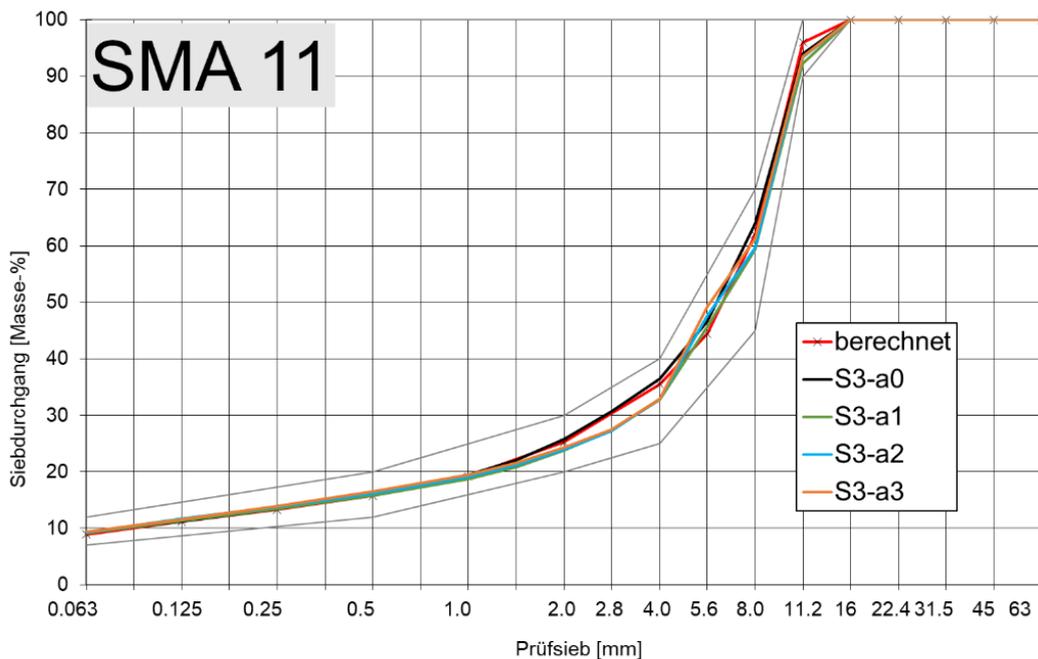


Abbildung 38. Korngrößenverteilung des Mischgutes SMA 11 aller Recyclingstufen

Wasserempfindlichkeit

Die Wasserempfindlichkeit wurde gemäss EN 12697-12 durchgeführt.

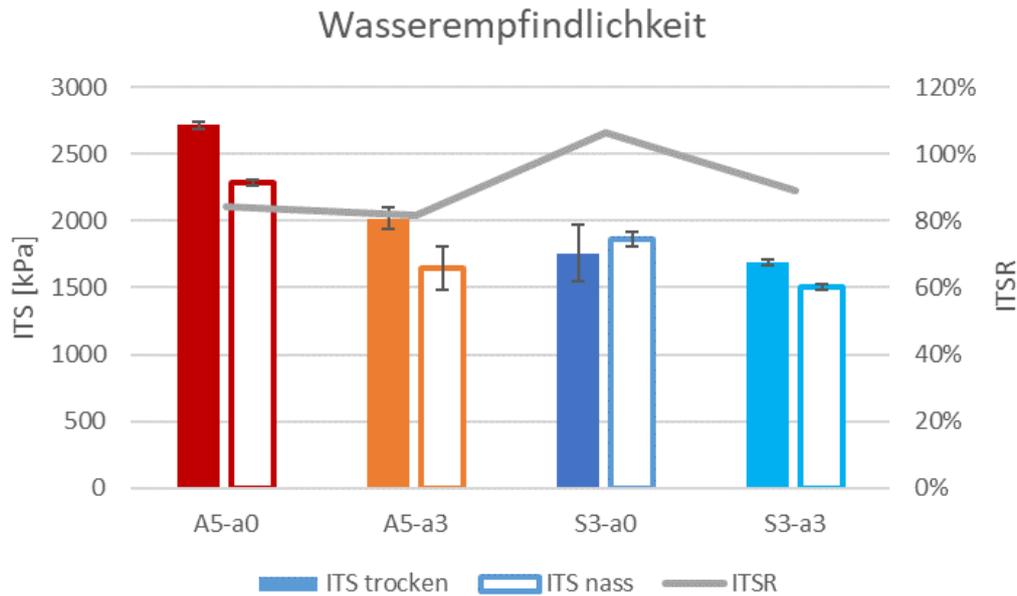


Abbildung 39. Wasserempfindlichkeit des Mischgutes vor und nach drei Recyclingstufen

Beim AC B 16 ist der ITSr-Wert am Anfang und am Schluss identisch hoch, jedoch wird eine deutliche Abnahme der indirekten Zugfestigkeit nach drei Recyclingstufen beobachtet, sowohl im trockenen als auch im nassen Zustand. Grund dafür dürfte auch der höher Hohlraumgehalt bei A5-a3 sein. Beim Mischgut SMA 11 ist nur ein geringer Rückgang der Zugfestigkeit feststellbar.

Druck-Schwellversuch (DSV)

Der Druck-Schwellversuch wurde als Schnellvariante für die Bestimmung der permanenten Verformung bei erhöhten Temperaturen durchgeführt, um diese mit den Ergebnisse der Spurrinnebildung mittels MMLS-3 zu vergleichen. Es wurde eine Variante des Einaxialen Druck-Schwellversuchs mit Behinderung der Querdehnung und Haversine-impulsförmiger Belastung gemäss EN 12697-25 gewählt, jedoch unter Verwendung des Stempels mit 100 mm Durchmesser. Es wurden je zwei Prüfkörper Ø 150 mm und 150 mm Höhe mittels Gyratorverdichtung hergestellt, die in der Mitte entzweigeschnitten und auf eine Höhe von 60 mm poliert wurden, wodurch vier DSV-Prüfkörper erhalten wurden. Die Prüftemperatur betrug 50°C und die Belastungsamplitude 350 kPa bei einer Impulsdauer von 0.2 s gefolgt von 1.5 s Lastpause.

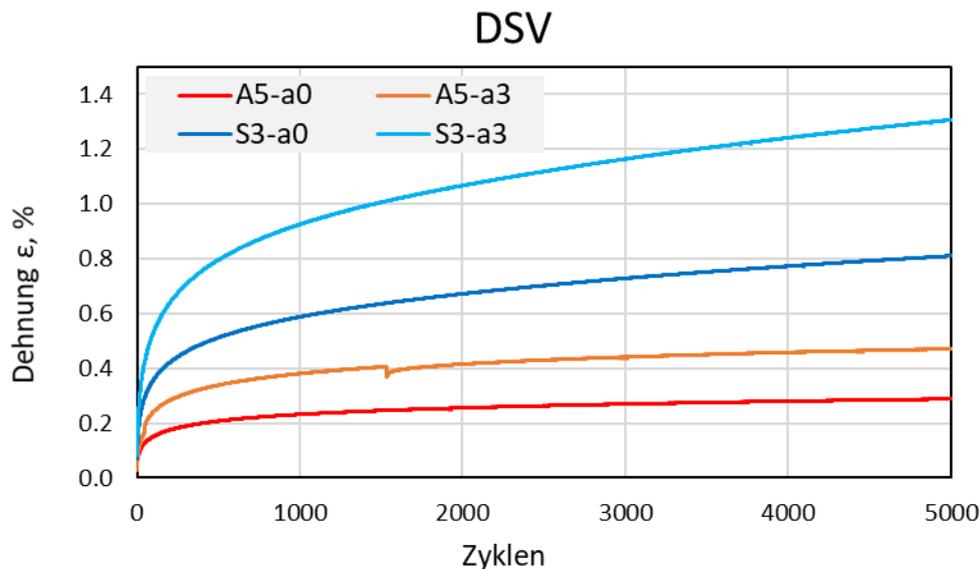


Abbildung 40. Dehnungskurven der beiden Mischungen im Anfangs- und Endzustand

Tabelle 26. Gesamtaxialverformung und Kriechrate der beiden Mischungen

	Mischung	A5-a0	A5-a3	S3-a0	S3-a3
Gesamtaxialverformung @ 5000 Zyklen	%	0,29	0,47	0,81	1,31
Kriechrate @ 5000 Zyklen	$\% \cdot 10^{-4} / n$	11	16	43	73

Das Kriechverhalten der beiden Mischungen im Ausgangsstadium unterscheidet sich deutlich. Nach 5000 Zyklen erreicht der SMA 11 eine Gesamtaxialverformung von 0.81% während jene des AC B 16 mit 0.29% deutlich tiefer liegt. Dieser Trend hat sich bei den dreifach rezyklierten Mischungen noch verstärkt: 0.47% bei A5-a3 und 1.31% bei S3-a3.

Halbzylinder-Biegeversuch (Semi-circular bending test SCB)

Der Halbzylinder-Biegeversuch wurde als Schnelltest für die Rissanfälligkeit durchgeführt und wird mit dem Rissverhalten in der Kälte mittels TSRST verglichen. Die Prüfung wurde gemäss AASHTO TP 124-16 bei einer Prüftemperatur von 25 ° durchgeführt und ist Kennwert für das Potential der Rissausbreitung. Die Prüftemperatur von 25°C ist allerdings weit entfernt von der TSRST-Bruchtemperatur, aber Untersuchungen haben gezeigt, dass bei tieferen SCB-Prüftemperaturen die Spreizung gering und die Streuung der Resultate hoch ist²⁰⁸.

Für die Herstellung von vier Prüfkörpern für den Halbzylinderbiegeversuch wurde ein Gyrotorprüfkörper Ø 150 mm und Höhe 130 mm in der Mitte geteilt und auf eine Höhe von 50 mm geschnitten. Aus den beiden Zylindern wurden durch Halbieren vier SCB-Prüfkörper erhalten.

²⁰⁸ Martins Zaumanis & Arturs Valters (2018): Comparison of two low-temperature cracking tests for use in performance-based asphalt mixture design, International Journal of Pavement Engineering, DOI: 10.1080/10298436.2018.1549323

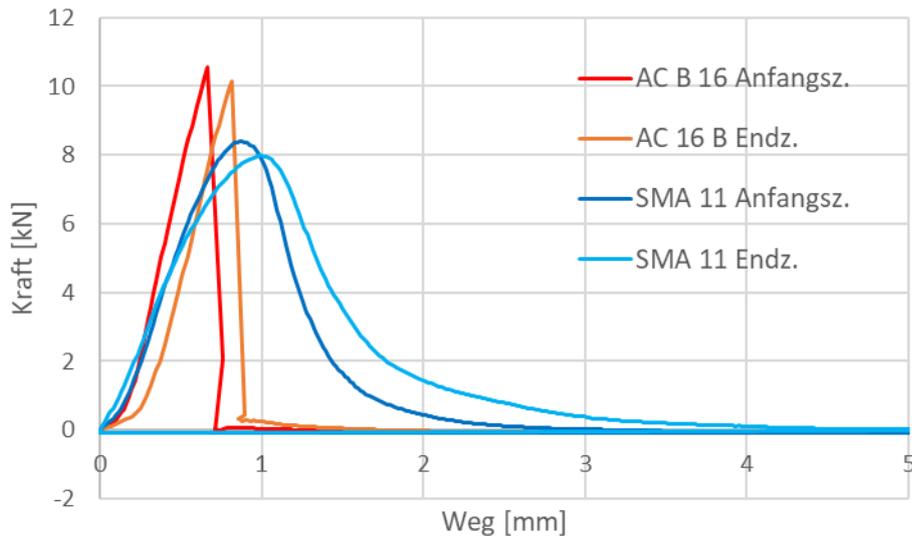


Abbildung 41. Kraft-Wegdiagramm im Anfangs- und Endzustand

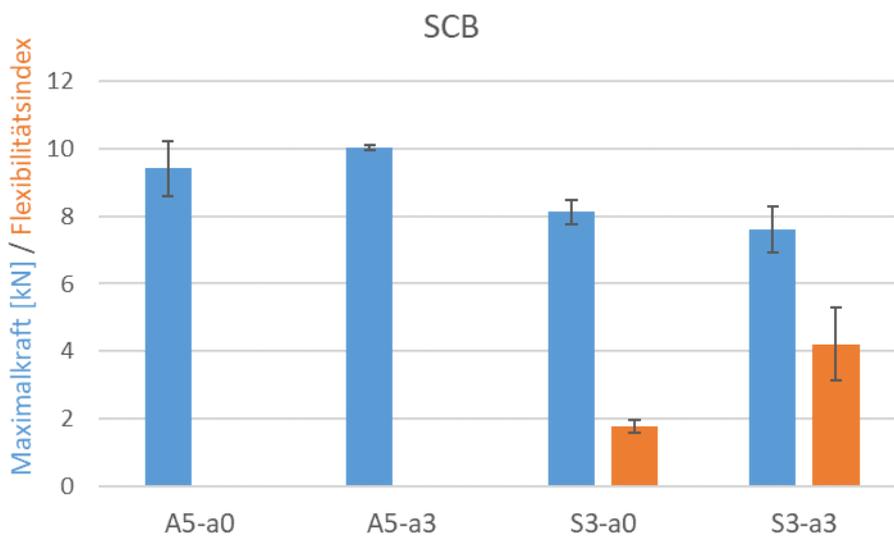


Abbildung 42. Resultate des Halbzylinder-Biegeversuchs im Anfangs- und Endzustand

Die Abbildung 39 zeigt einerseits die Maximalkräfte der Biegeversuche und andererseits den Flexibilitätsindex, der aus der Bruchenergie und der Steigung in der 2. Phase der Kraftkurve beim Wendepunkt berechnet wird. Beim AC B 16 konnte kein Flexibilitätsindex bestimmt werden, da diese Prüfkörper typische Sprödbrüche aufwiesen und noch in der Anstiegsphase versagten (Abbildung 39). Gemäss dieser Prüfung wird eine vorzeitige Versprödung dieser Belagstypen erwartet. Beim SMA 11 ist eine Zunahme des Flexibilitätsindex zu verzeichnen, das heisst nach drei Recyclingzyklen hat sich der Widerstand gegenüber Rissausbreitung erhöht. Ein Vergleich mit dem TSRST-Versuch ist nur bedingt möglich, da die Temperaturen deutlich unterschiedlich sind. Jedoch wurde auch beim TSRST eine relativ hohe Bruchtemperatur für den AC B 16 bestimmt, was eine weiteres Indiz für die Sprödigkeit des AC B 16 darstellt. Allerdings sind die Unterschiede vor und nach dem Recycling gering.

7.3.3 Schlussfolgerungen aus dem Mehrfachrecycling im Grossmasstab

Folgende Erkenntnisse aus den Versuchen im Grossmasstab wurden gewonnen:

- Bei der Dosierung des Regenerationsmittels muss auch die Alterung während der Mischgutherstellung berücksichtigt werden, die 1-2 °C T_{BTSV} beträgt.
- durch die Verwendung von homogenem Ausbausphaltp konnte eine gute Übereinstimmung in der Korngrössenverteilung aller Recyclingstufen erreicht werden
- Beim Mehrfachrecycling von AC B 16 mit einem Recyclinganteil von 70% ist die Verwendung von Regenerationsmittel unumgänglich, während beim SMA 11 mit 50% Recyclinganteil ein weiches PmB mit Ausnahme des ersten Recyclingschrittes mit stark verhärtetem RAP ausreichend ist.
- Die künstliche Alterung im Labor ist bei bindemittelreichem Mischgut beschränkt, wenn eine Alterungstemperatur von 100°C nicht überschritten werden soll.
- Basierend alleine auf Ergebnissen des BTSV lässt sich Mischgut gut mehrfach rezyklieren, was am Beispiel von AC B 16 und SMA 11 gezeigt werden konnte. Beim AC B 16 mit einem Recyclinganteil von 70% erhöht sich aber mit jedem Recyclingschritt der Anteil an Regenerationsmittel.
- Auf der Mischgutebene zeigen einige Prüfungen eine deutliche Veränderung der Gebrauchseigenschaften nach mehreren Recyclingzyklen. Obwohl die Korngrössenverteilung konstant gehalten wurde, haben sich die verschiedene Mischguteigenschaften verändert. Insbesondere zeigen die mehrfach-rezyklierten Mischungen einen geringeren Widerstand gegenüber permanenten Verformungen, was sowohl beim Druckschwellversuch als auch bei der Validierung mittels Verkehrslastsimulator zum Ausdruck kam. Die Gründe hierzu sind nicht klar, aber es ist anzunehmen, dass die Zugabe von neuen Mineralstoffen zu Veränderungen in der Mastixzusammensetzung, der Kantigkeit der Mineralstoffe und dem Hohlraumgehalt führten. Andererseits könnten auch geschädigte Polymere im Bindemittel das Verhalten im Mischgut beeinflussen, obwohl bei den BTSV-Prüfungen keine Veränderungen festgestellt wurden.
- Da bei einigen Prüfverfahren in den Ländern der Forschungspartner noch kein ausreichender Erfahrungshintergrund für die Interpretation der Resultate besteht, sind die Beurteilungen mit Vorsicht aufzunehmen.

7.4 Beurteilung des Gebrauchsverhaltens von Asphaltmischgut mittels performance-basierten Prüfmethoden

Zur Beurteilung des Widerstands gegen Ermüdung und des Kälteverhaltens wurden an der TU Wien gebrauchensorientierte (GVO) Asphaltprüfungen umgesetzt. Es wurden zu Beginn (M0) und am Ende (M3) des künstlichen Mehrfachrecyclings 4-Punktbiegebalken- (4PB) und Abkühlprüfungen (TSRST) durchgeführt. Dazu wurden insgesamt fast 1500 kg Asphaltmischgut von der EMPA an die TU Wien versandt, wo schliesslich die Probekörper gemäß europäischen Prüfnormen (EN 12697-xx) hergestellt und geprüft wurden.

7.4.1 Widerstand gegen Ermüdung – 4-Punkt-Biegebalken (4PB)

Mit dem 4PB können einerseits die temperatur- und frequenzabhängige dynamische Steifigkeit eines Mischguts nach EN 12697-26 ermittelt und andererseits der Widerstand gegen Ermüdung nach EN 12697-24 untersucht werden. In diesem Projekt wurde der Widerstand gegen Ermüdung als wesentliche Kenngröße für die Bemessung und Dauerhaftigkeit analysiert.

Ein prismatischer Probekörper wird einer periodischen, dehnungsgesteuerten 4PB-Prüfung mit freier Rotation und horizontaler Translation an allen Belastungs- und Reaktionspunkten unterzogen. Die Biegung wird durch die Bewegung der mittigen Lastpunkte in vertikaler Richtung senkrecht zur Längsachse des Probekörpers erreicht. Die vertikale Lage der beiden Endpunkte bleibt konstant. Die ausgeübte periodische Verschiebung erfolgt symmetrisch zum Nullpunkt, ist sinusförmig, und die Verschiebungsamplitude muss als Funktion der Zeit konstant sein. Während der Prüfung wird die für die Verformung des Probekörpers erforderliche Kraft als Funktion der Zeit gemessen. Daraus wird der Steifigkeitsmodul des Mischguts berechnet. Als Ergebnis wird der Betrag der dynamischen Steifigkeit $[E^*]$ in MPa, dessen elastischer (E_1) und viskoser (E_2) Anteil und der Phasenwinkel (φ) in Abhängigkeit der Frequenz angegeben. Eine schematische Abbildung des 4PB ist in Abbildung 40 dargestellt.

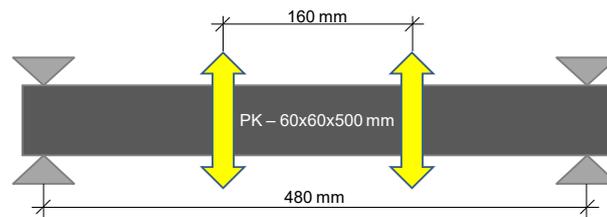


Abbildung 43: Schema des 4-PBB

Die Ermüdungsbeständigkeit wird gemäß EN 12697-24, Anhang D ermittelt. Das Prinzip der Belastung entspricht dem oben beschriebenen Verfahren. Wesentliches Kriterium bei dieser Prüfung ist die Anzahl der Lastwechsel, bis der Probekörper den Zustand der Ermüdung erreicht hat. Dies ist der Fall, wenn der dynamische Steifigkeitsmodul sich auf die Hälfte des Ausgangswerts verringert hat. Der Ausgangswert der dynamischen Steifigkeit wird nach 100 Lastwechsel als $S_{max,0}$ angegeben. Die Anzahl der Lastwechsel bei Erreichen der Ermüdung wird als $N_{f/50}$ bezeichnet.

Die Prüfung wird bei 20°C und 30 Hz durchgeführt. Es werden drei Dehnungsstufen ausgewählt, bei jeder Dehnungsstufe werden mehrere Probekörper geprüft. Die in der Dehnungsstufe angegebene Dehnung bezieht sich auf die maximale horizontale Dehnung an der Unterseite des Probekörpers. Die Dehnungsstufen werden in der Regel so gewählt, dass die Ermüdung nach 10^4 bis $2 \cdot 10^6$ Lastwechsel auftritt.

Die Daten der Einzelversuche werden in einem Diagramm dargestellt, bei dem die Dehnungsstufe über der Anzahl an Lastwechsel bis zur Ermüdung für jeden Einzelversuch eingetragen wird. Es ergibt sich ein logarithmischer Zusammenhang, die so genannte Wöhlerkurve, mit deren Hilfe die Dehnungsstufe bei Dauerhaltbarkeit ϵ_6 ($N_{f/50} = 10^6$ LW) ermittelt werden kann.

Die Detailergebnisse der beiden Mischgüter sind in Abbildung 41 und Abbildung 42 dargestellt, wobei die Daten in Blau die Referenzmischungen (M0) und die Daten in Rot die Mischungen nach 3-facher Simulation von Alterung, Regeneration und Recycling (M3) darstellen. Die Diagramme zeigen die Einzelergebnisse und die Ermüdungskurve. Zudem sind die Ermüdungsfunktion und die Dauerhaltbarkeit jedes Mischguts angegeben.

Beim SMA 11 zeigt sich in beiden Fällen eine hohe Ermüdungsbeständigkeit (Dauerhaltbarkeit). Der ϵ_6 -Wert liegt bei der Referenzmischung bei 238 $\mu\text{m}/\text{m}$ und bei der 3-fach rezyklierten Mischung bei 250 $\mu\text{m}/\text{m}$. Zur besseren Einordnung: Beide Werte liegen klar über den höchsten Anforderungen der Österreichischen GVO-Produktnormen ÖNORMen B 358x-2. Tendenziell führen hohe Belastungen (i.e. hohe Dehnungsamplituden) zu früherem Ermüdungsversagen beim 3-fach rezyklierten Mischgut, geringe Belastungen werden jedoch deutlich länger ertragen.

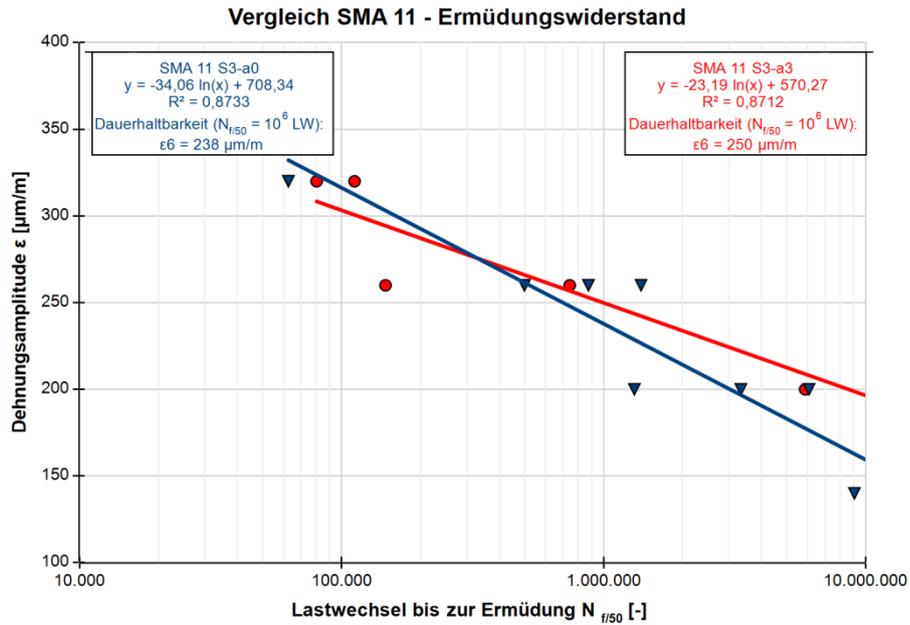


Abbildung 44: Ermüdungswiderstand des SMA 11

Beim AC 16 stellen sich deutlich geringere Ermüdungswiderstände ein, was auf die Mischgutzusammensetzung (härteres Bindemittel, geringerer Bindemittelgehalt, höherer RA-Anteil) zurückzuführen ist. Beide Mischgüter erreichen jedoch die Basisanforderungen der Österreichischen GVO-Produktnormen. Es zeigt sich hier, dass beim 3-fach rezyklierten Mischgut der Ermüdungswiderstand höhere Belastungen günstiger ist, als beim Referenzmischgut.

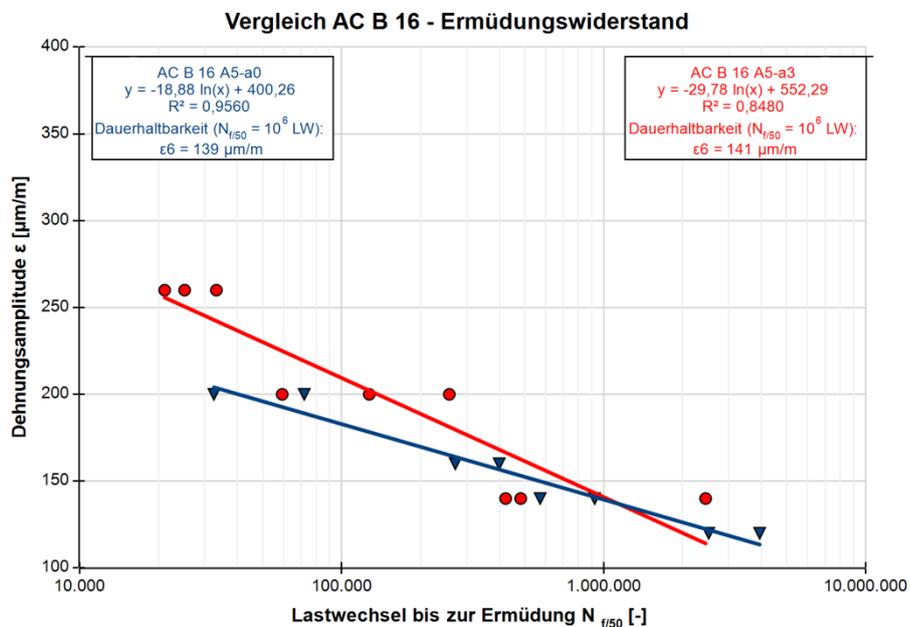


Abbildung 45: Ermüdungswiderstand des AC 16

Wesentlich scheint bei der Untersuchung von neuen Mischgutkonzepten nicht nur die Betrachtung der globalen Ermüdungsfunktion, sondern auch der Verlauf der Ermüdung einzelner Prüfkörper. Hier ergeben sich wesentliche Unterschiede. Abbildung 43 zeigt zwei im Rahmen dieses Forschungsprojekts aufgetretene Verläufe.

Die Diagramme zeigen dabei für einen Probekörper den Verlauf der Spannungen über die Anzahl an aufgetragenen Lastwechsel. Das Ermüdungskriterium ist rot strichliert dargestellt. Das linke Diagramm zeigt einen klassischen (günstigen) Verlauf, der auch die grundlegende Annahme für alle Straßenbemessungen ist; nämlich, dass der Punkt der Ermüdung erreicht wird, während der Probekörper sich noch in der so genannten linearen Ermüdungsphase befindet. Die lineare Ermüdungsphase ist durch eine lineare Abnahme der Steifigkeit mit zunehmender Anzahl an Lastwechseln gekennzeichnet. Dies entspricht der Vorstellung, dass es zu einer stetigen Zunahme von Mikrorissen kommt. Erst nach Erreichung des Ermüdungskriteriums geht der Probekörper in ein rasches Versagen über, indem sich die Mikrorisse zu Makrorissen verbinden. Dies im rechten Teil des linken Diagramms unterhalb des Ermüdungskriteriums ersichtlich.

Im rechten Diagramm ist ein ungünstiger Fall dargestellt, bei dem beim Erreichen des Ermüdungskriteriums schon Makrorisse auftreten und der Probekörper im Zustand des Versagens ist. Umgelegt auf die Straße bedeutet dies, dass die bemessungsrelevante (Trag)-Schicht bereits wesentliche Rissbildung aufweist, wenn die Straße am Ende der technischen Lebensdauer ist. Das Auftreten von Netzzissen und deutlich höherer Erhaltungsaufwand bzw. kürzere Erneuerungsintervalle sind erwartbar.

Materialien, die sich überwiegend wie im linken Bild verhalten, entsprechen also den klassischen Bemessungsansätzen und erreichen mit hoher Wahrscheinlichkeit die technische Lebensdauer, während Materialien, die sich überwiegend wie im rechten Bild verhalten, zu frühzeitigem Ermüdungsversagen auch im Straßenaufbau führen. Für 3 Mischgüter, den SMA 11 im Referenz- und 3-fach rezyklierten Zustand und den AC 16 im 3-fach rezyklierten Zustand treten durchwegs günstige Ermüdungsverläufe auf. Das Mischgut AC 16 im Referenzzustand (70% RA-Anteil) jedoch zeigt bei vier Probekörpern (speziell bei niedrigen Belastungsamplituden) den ungünstigen Ermüdungsverlauf. Damit zeigt sich, dass mit zunehmender Regeneration eine günstige Beeinflussung des Ermüdungsverhaltens erreicht werden kann. Gleichzeitig ist es bei hohen RA-Zugabemengen und wiederholtem Recycling wesentlich, diese für die Dauerhaftigkeit eines Straßenaufbaus wesentlichen Kennwerte im Rahmen der Qualitätskontrolle (Typ- und Abnahmeprüfung) genau zu überprüfen und das Mischgut ggf. durch Zugabe von Additiven oder Reduktion des RA-Anteils zu optimieren.

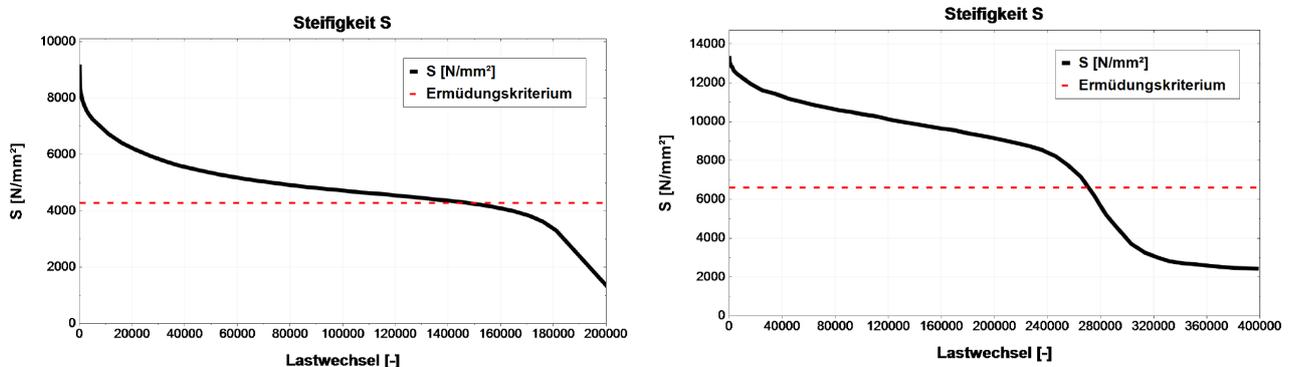


Abbildung 46: Vergleich von Ermüdungsverläufen im günstigen Fall (links) und ungünstigem Fall (rechts)

7.4.2 Kälteverhalten – Abkühlprüfung (TSRST)

Mit dem TSRST gemäß EN 12697-46 wird die Temperatur ermittelt, bis zu der ein Asphaltmischgut kältebedingte (kryogene) Zugspannungen aufnehmen kann, bevor es durch Riss versagt. Während der Prüfung wird der Probekörper, dessen Länge konstant gehalten wird, einer Temperaturabsenkung mit konstanter Rate unterzogen. Aufgrund des verhinderten thermischen Schrumpfens kommt es im Probekörper zu kryogenen Spannungen, die bis zu seinem Ausfall (Bruch) führen. Die Ergebnisse sind der Verlauf der kryogenen Spannungen über die Temperatur $\sigma_{kry}(T)$, die Ausfalltemperatur T_{crack} und die ermittelte Ausfallspannung σ_{crack} . Abbildung 44 zeigt die Versuchsparameter des TSRST schematisch. Zusätzlich kann der Punkt angegeben werden, in dem die Spannungs-

Temperaturkurve in einen linearen Teil übergeht. Oberhalb dieser Temperatur T_t ist Spannungsabbau noch möglich, darunter geht das Material in einen quasi-elastischen Zustand über und Spannungen bauen sich linear auf. Die Prüfung wird bei einer Temperatur von $+10^\circ\text{C}$ gestartet und mit einer Abkühlrate 10 K/h durchgeführt. Das Prüfergebn wird als Mittelwert der Ergebnisse von Einzelprüfungen an drei verschiedenen Probekörpern ermittelt.

Die Prüfung trägt dem Umstand Rechnung, dass es sich bei der Straße um ein Längsbauwerk handelt und in Längsausdehnung eine Einspannung vorherrscht. Bei rascher Temperaturabsenkung kommt es durch die Einspannung zur Ausbildung von kryogenen Spannungen, die bei nicht ausreichender Relaxationsfähigkeit des Mischguts zu Rissbildung führen kann.

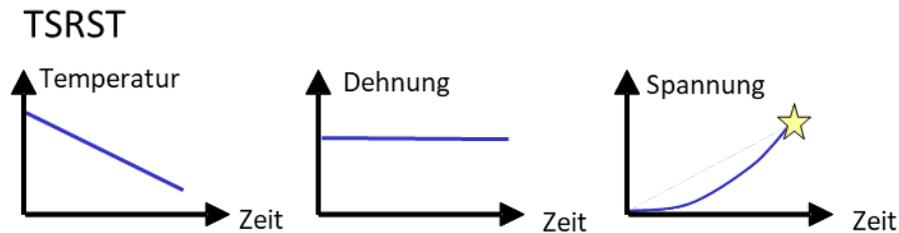


Abbildung 47: Versuchsparameter des TSRST

Abbildung 45 und Abbildung 46 zeigen die wesentlichen Ergebnisse der TSRST Prüfungen an den vier Mischgütern. Die durchgezogenen Linien beschreiben den Mittelwert, die punktierten Linien die Standardabweichung aus jeweils 3 Einzelprüfungen. Die strichlierten Linien zeigen die Verlängerung des linearen (quasi-elastischen) Verhaltens. Der Schnittpunkt dieser strichlierten Linien mit den Mittelwertkurven beschreibt den Punkt T_t , an dem der Übergang vom viskoelastisch (relaxierenden) zum elastisch (nicht relaxierenden) Verhalten auftritt. In Blau sind die Ausgangsmischungen und in Rot die Mischungen nach 3-maligem Altern und Recycling gezeigt.

Zudem finden sich in Tabelle 28 die wesentlichen Ergebnisse als Mittelwerte in der Übersicht.

Beim Deckschicht-Mischgut SMA 11 zeigt sich, dass sich nach 3-maliger Simulation der Alterung und Recycling inkl. Bindemittelregeneration (jeweils 50% RA-Zugabe) ein höherer Widerstand gegen Kälterisse einstellt, da die Bruchtemperatur um etwa 2°C absinkt. Spannungsverlauf mit der Temperatur, sowie Übergang vom viskoelastischen zum elastischen Verhalten bleiben vergleichbar mit dem Referenzmischgut. Die laufende Regeneration des gealterten Bindemittels im RA-Material war hier also so erfolgreich, dass das Kälteverhalten sich mit zunehmenden Recyclingzyklen verbessert.

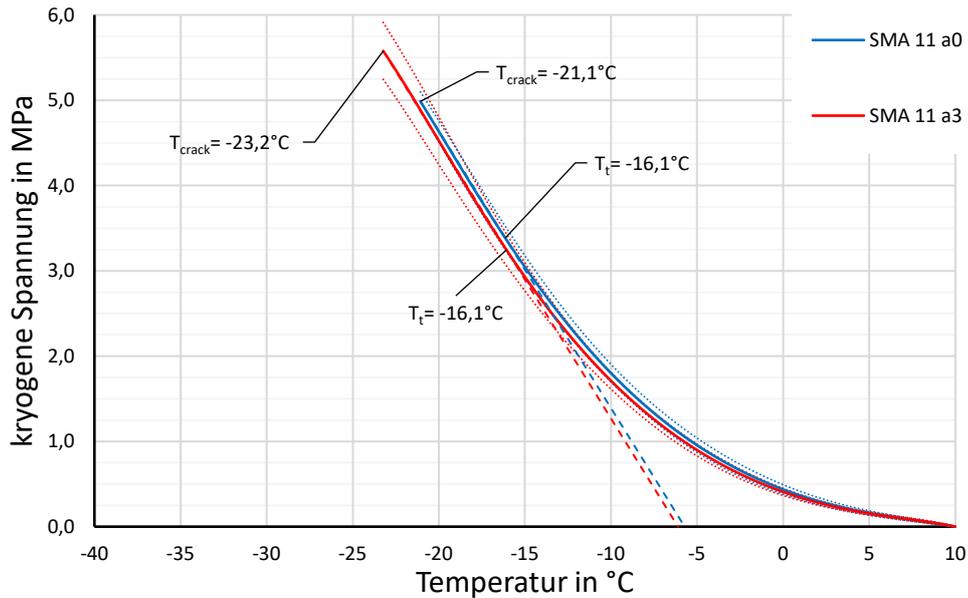


Abbildung 48: Ergebniskurven der TSRST-Versuche am SMA 11

Im Fall des AC 16 zeigt sich, dass nach 3-facher Recyclingsimulation (jeweils 70% RA-Zugabe) ein leichter Abfall der Bruchtemperatur um weniger als 1°C einstellt. Zudem stellt sich auch der Spannungsverlauf nach 3-fachem Recycling etwas anders dar, als im Referenzzustand. Der Spannungsaufbau mit Abnahme der Temperatur ist geringer, jedoch führen auch schon geringere kryogene Spannungen zum Bruch. Damit zeigt sich einerseits, dass die Regeneration des Bindemittels auch hier weitgehend erfolgreich durchgeführt wurde. Der erhöhte RA-Anteil führt jedoch dazu, dass sich das im Tieftemperaturbereich stärker ändert als beim SMA 11, bei dem jeweils 50% RA zugegeben wurde.

Insgesamt zeigt sich sowohl für die Referenzmischungen (denen schon jeweils 50% bzw. 70% RA beigemischt wurde), als auch für die 3-fach rezyklierten Mischungen beider Mischgüter, dass diese zu hohe Bruchtemperaturen aufweisen, um nach aktuell gültigen Österreichischen GVO-Produktnormen klassifizierbar zu sein. Nachdem beide Mischgüter jedoch nicht nach Österreichischen Produktnormen zusammengesetzt wurden, ist die Einordnung nach diesen ÖNORMen nur eingeschränkt möglich.

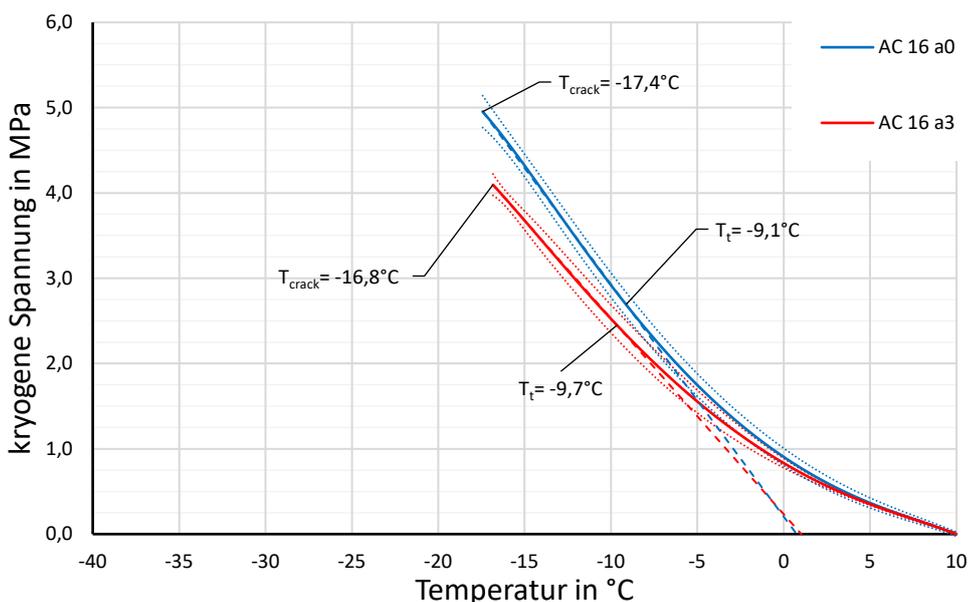


Abbildung 49: Ergebniskurven der TSRST-Versuche am AC B 16

Tabelle 27: Ergebnisse der TSRST-Versuche

Bezeichnung	T_{crack}	σ_{crack}	T_t
SMA 11 a0	-21,1	5,0	-16,1
SMA 11 a3	-23,2	5,6	-16,1
AC B 16 a0	-17,4	5,0	-9,1
AC B 16 a3	-16,8	4,1	-9,7

Empfehlungen zum Gebrauchsverhalten von Asphaltmischgut

Die Untersuchungen des Materialverhaltens auf Mischgutebene zeigen, dass auch mehrfach rezyklierte Mischgüter mit hohem RA-Anteil gutes Gebrauchsverhalten aufweisen können. Gleichzeitig wird aus der Detailanalyse deutlich, dass komplexer werdende Mischgüter auch nicht konventionelles oder nicht erwartbares Verhalten aufweisen können. Das zeigen etwa die Ermüdungsprüfungen an einem Mischgut, bei dem das Versagen bereits vor dem Erreichen des Ermüdungskriteriums eintrat. Andererseits kann durch ausgewogene Regeneration das Materialverhalten auch über mehrere Recyclingzyklen auf gleichbleibendem Niveau gehalten werden, wie die Kälteprüfungen zeigen.

Daher sind ab einer höheren RA-Zugabe bzw. im Fall von mehrfachen Recyclingzyklen im Rahmen der Mischgutoptimierung, der Typ- und Abnahmeprüfungen auch Prüfungen zum Gebrauchsverhalten zweckmässig (siehe Leitfaden).

7.5 Validierung mit dem Verkehrslastsimulator

Die Validierung musste wie auch die Performance-Prüfungen aufgrund der grossen erforderlichen Probenmengen auf die Anfangs- und Schlussmischung beschränkt werden. Sowohl für die Binder- als auch für die Deckschicht wurden nochmals die gleichen Mischungen hergestellt und gealtert wie dies Teil Mehrfachrecycling im Grossmassstab durchgeführt wurde:

- A6-a0 Ausgangsmischung AC B 16
- A7-a3 Endmischung AC B 16
- S4-a0 Ausgangsmischung SMA 11
- S5-a3 Endmischung SMA 11

Von jeder Mischung wurden je zwei verdichtete Probepplatten von 1.6 m Länge, 0.45 m Breite und 5 cm Dicke hergestellt (Abbildung 47, Abbildung 48). Die Probepplatten werden anschliessend mit dem Verkehrslastsimulator MMLS-3 bei einer Temperatur von 40 °C während 64'000 Zyklen auf Spurbildungsneigung geprüft.



Abbildung 50. Mischgut wird in die Form gefüllt (links) und verdichtet (rechts)

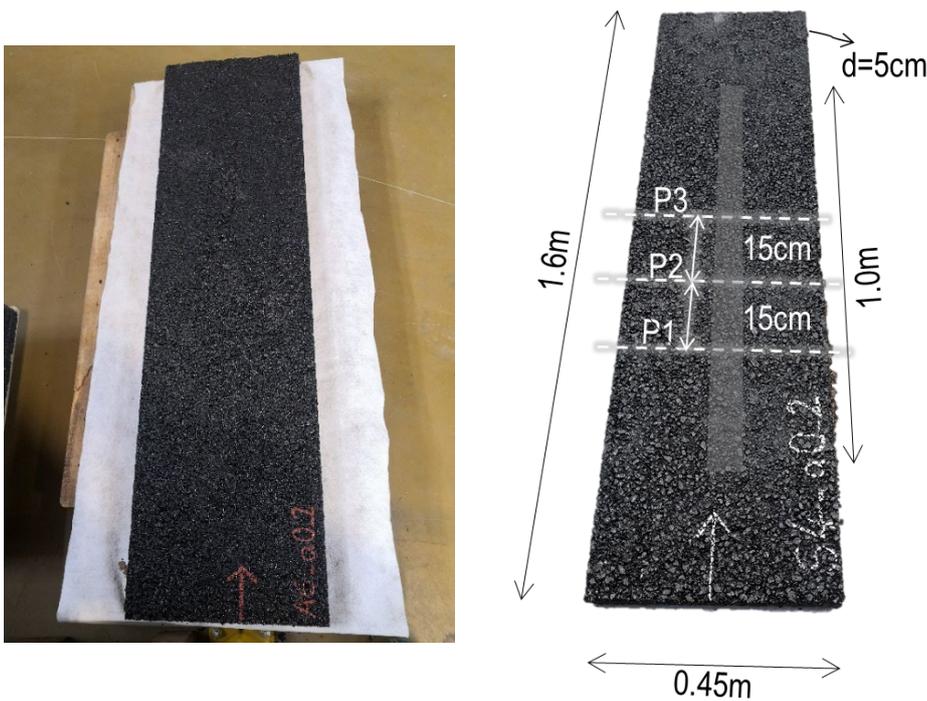


Abbildung 51. MMLS-3 Prüfkörper nach der Verdichtung (links) und nach der Prüfung (rechts)

An den drei Orten P1 ... P3 wurde die Querprofile mit einer Auflösung von 2 mm gemessen (Abbildung 48 rechts). Vor Beginn der Prüfung wurde eine Nullmessung und danach nach 1000, 2000, 4000, 8000, 16000, 32000 und 64000 Zyklen eine Messung der drei Profile durchgeführt (Abbildung 49). Für die Auswertung wurde der Mittelwert der drei Profile pro Prüfkörper verwendet und davon nochmals der Mittelwert als massgebendes Ergebnis für ein Mischgut (Abbildung 50).

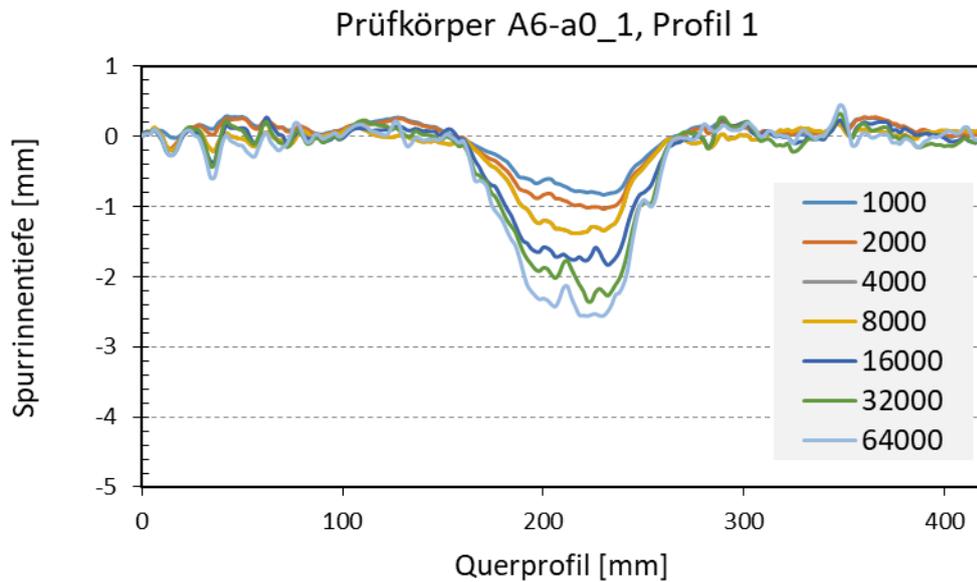


Abbildung 52. Beispiel für einen Verlauf der Spurrinnenbildung von Prüfkörper A6-a0_1 am Profil 1

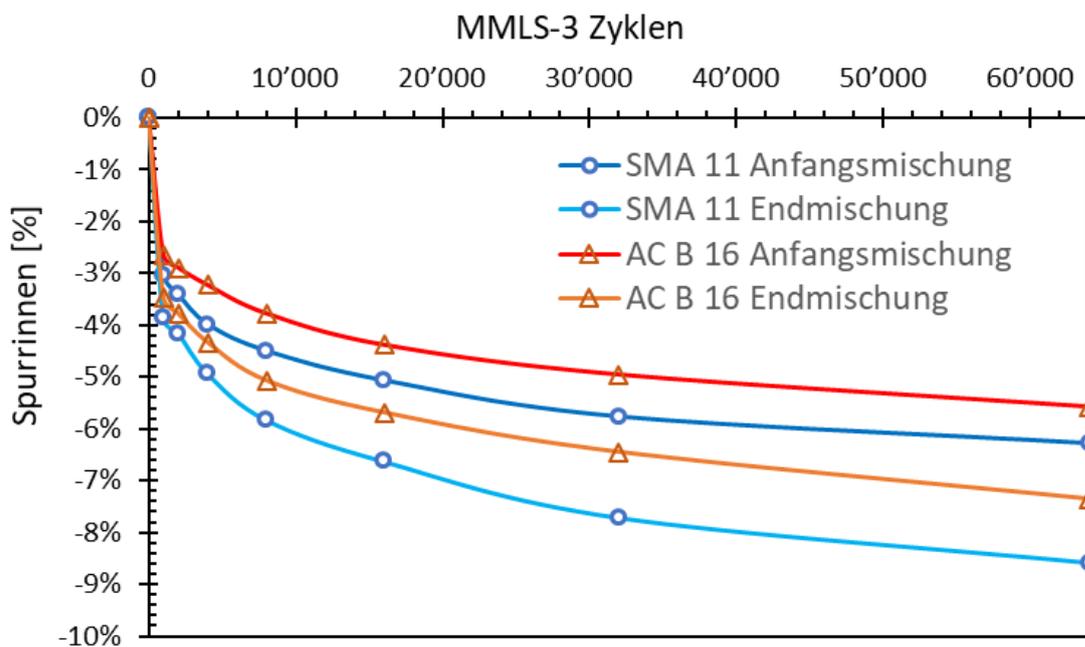


Abbildung 53. MMLS-3 Resultate der Spurrinnenbildung bei den Ausgangs- und Endmischungen (Mittelwert aus 2 Prüfkörpern)

Der Verlauf der Spurrinnenbildung verläuft bei beiden Mischungen im Ausgangszustand ähnlich, wobei die Werte beim SMA 11 etwas höher sind als beim AC B 16. Die Resultate stimmen gut überein mit den Resultaten des Druck-Schwellversuches bei 50°C. Nach drei Recyclingzyklen hat die Spurrinentiefe bei beiden Mischgut-typen deutlich zugenommen. Die Regeneration des Bindemittels war offensichtlich zu hoch und führt zu erhöh-ter Spurrinnenbildung, obwohl die Bindemittleigenschaften im hohen Temperaturbereich optimiert wurden.

8 AP-4 Management und Analyse von Asphaltgranulat

Die baustoffabhängigen Möglichkeiten und Grenzen der mehrfachen Wiederverwendung von Ausbauasphalt sind von dessen Zusammensetzung und Komponenten (Bindemittel, Füller, feine und grobe Gesteinskörnung) abhängig, also von der Korngrößenverteilung der Gesteinskörnung, dem Bindemittelgehalt und dem Alterungsgrad des Bindemittels.

Als vorteilhaft erkannt für einen idealen Stoffstrom, gilt das schichtweise Fräsen von Ausbauasphalt und dessen sortenreine Lagerung. Aus ökonomischen Gründen hat sich an vielen Standorten zumindest eine Auftrennung in eine Halde mit feinkörnigem Asphaltgranulat (z. B. Korngrößen 0/8 oder 0/11) für die Wiederverwendung in Asphaltdeckschichten und eine Halde mit grobkörnigem Asphaltgranulat (z. B. Korngrößen 0/22 oder 0/32) für die Wiederverwendung in anderen Schichten bewährt. In seltenen Fällen werden für höherwertige Schichten (Asphaltbinderschicht) zwei durch Siebung getrennte Fraktionen (0/8 mm und 8/X mm) vorgehalten.

Im Arbeitspaket 4 werden die Möglichkeiten zur Optimierung des Stoffstrom-Managements ausgelotet und systematisch untersucht, ob mit einer verbesserten Fraktionierung des Asphaltgranulats und einer detaillierten Analyse der Komponenten neue Ansätze für eine Asphalzzusammensetzung mit möglichst hohem Anteil an Asphaltgranulat und gleichzeitig hoher Rezepttreue gefunden werden können. Für die praktische Umsetzung ist zu berücksichtigen, dass die Fraktionierung von Asphaltgranulat (insbesondere mit abnehmender Stückgrösse) an ökonomisch-maschinentechnische Grenzen stösst. Teilweise haben daher die gewonnenen Erkenntnisse nur einen perspektivischen Innovationscharakter und sind in ihrer Detailtiefe nicht für eine direkte Umsetzung in die Praxis gedacht.

8.1 Vorgehensweise und Prüfmethode

Die Vorgehensweise im Arbeitspaket 4 zeigt Abbildung 51. Im ersten Schritt werden die Stückgrößenverteilungen der ausgewählten Granulate bestimmt. Anschliessend werden diese über die Siebgrößen 1 mm; 5,6 mm; 8 mm; 11,2 mm; 16 mm und 22,4 mm fraktioniert. Eine Fraktionierung wird allerdings nur dann vorgenommen, wenn der Anteil auf dem jeweiligen Sieb grösser als 5 M.-% ist. Für die auf diese Weise eingeteilten Fraktionen werden der Bindemittelgehalt, die Sieblinie und die Rohdichten der Gesteinskörnungen bestimmt (gemäss Regelwerk ^{(209), (210)}). Von den Fraktionen > 1 mm wird die Plattigkeitskennzahl ermittelt (gemäss Regelwerk ^{(211), (212)}). Die Fraktion < 1 mm wird morphologisch charakterisiert (Morpho-Scan nach Radenberg & Holzwarth, 2021 ⁽²¹³⁾).

Das rückgewonnene Bindemittel wird mit dem Dynamischen Scherrheometer (DSR) auf dessen rheologischen Eigenschaften geprüft (Temperatur-Frequenz-Sweep; Scher-Relaxationsversuch; Modifikationsdetektion). Zusätzlich wird das Bindemittel mittels Fourier-Transformations-Infrarotspektroskopie (FTIR) untersucht.

²⁰⁹ Technische Prüfvorschriften für Asphalt, Teil 1: Bindemittelgehalt, TP Asphalt-StB, Teil 1, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V. (FGSV); FGSV Verlag, Köln, 2020.

²¹⁰ Technische Prüfvorschriften für Gesteinskörnungen im Straßenbau, Teil 3.2.2: Rohdichte, TP Gestein-StB, Teil 3.2.2, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V. (FGSV); FGSV Verlag, Köln, 2017.

²¹¹ Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 3: Bestimmung der Kornform - Plattigkeitskennzahl; Deutsche Fassung EN 933-3, Beuth Verlag, Berlin: 2012.

²¹² Technische Prüfvorschriften für Gesteinskörnungen im Straßenbau, Teil 4.3.3: Bestimmung der Kornform von feinen Gesteinskörnungen durch Stabsiebung - Plattigkeitskennzahl, TP Gestein-StB, Teil 4.3.3, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V. (FGSV); FGSV Verlag, Köln, 2015.

²¹³ Radenberg, M. & Holzwarth, S. 2021. Morpho-chemical characterization of fine and finest rock particles in asphalt. Proc., 7th E&E Congress, 15-17 June 2021 (online), Eurasphalt & Eurobitume.

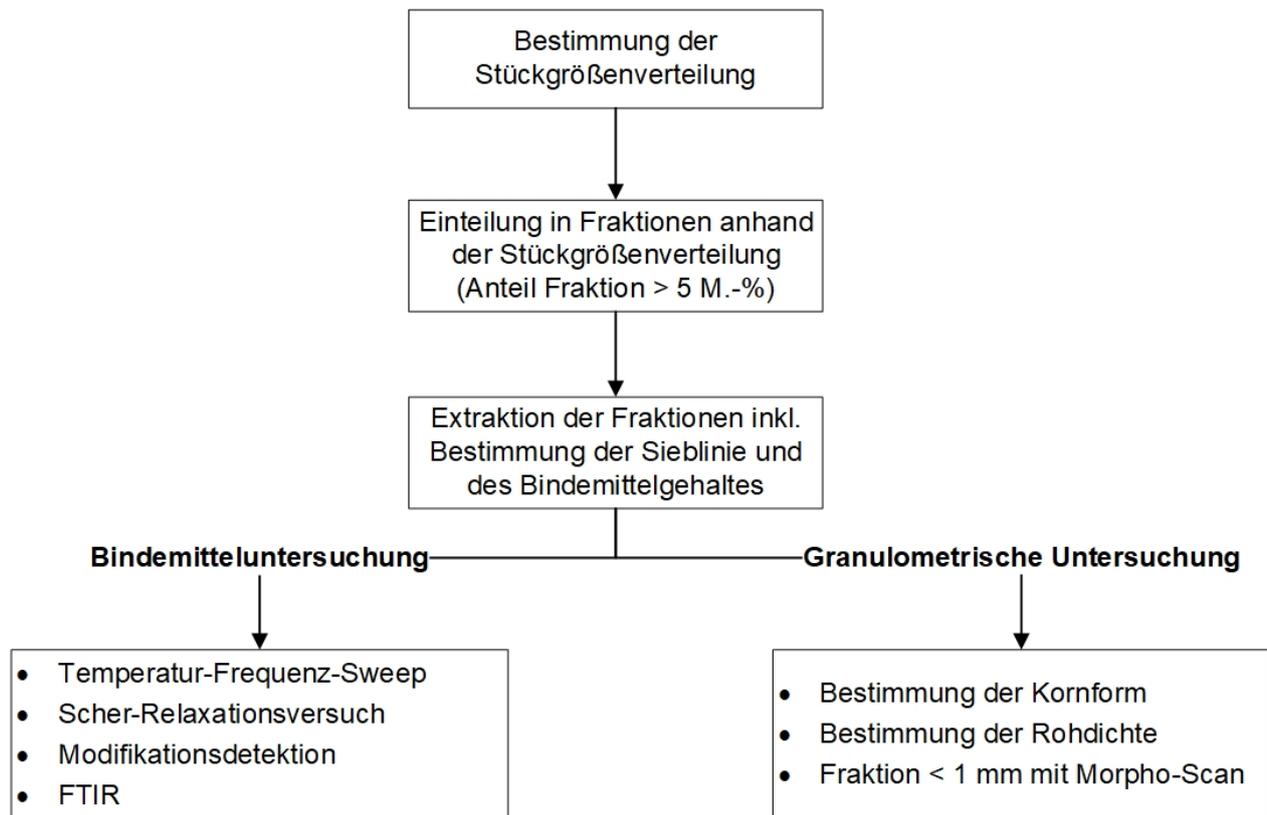


Abbildung 54. Vorgehensweise zur Untersuchung des Asphaltgranulats.

8.1.1 BTSV-Prüfung und Temperatur-Frequenz-Sweep im Dynamischen Scher-Rheometer

Die aus den Asphaltgranulatfraktionen rückgewonnenen Bindemittel werden mit dem Dynamischen Scher-Rheometer (DSR) mittels BTSV (siehe Kapitel 5.2) und mittels Temperatur-Frequenz-Sweep geprüft und die temperatur- und frequenzabhängigen Kennwerte des komplexen Schermoduls $|G^*|$ und des zugehörigen komplexen Phasenwinkels δ ermittelt (gemäss EN 14770 ⁽²¹⁴⁾ mit Temperaturen von – 10 bis 150 °C und den Frequenzen 0,1; 0,3; 1; 1,59; 3; 5; 10 Hz).

Im Temperaturbereich von -10 °C bis +30 °C wird die Prüfgeometrie mit Plattendurchmesser 8 mm und ein Spaltabstand von 2 mm eingesetzt, im Temperaturbereich von +30 °C bis +150 °C die Prüfgeometrie mit Plattendurchmesser 25 mm und ein Spaltabstand von 1 mm.

Aus den Ergebnissen des T-Sweeps bei einer Frequenz von 1,59 Hz werden die Äquisteifigkeitstemperaturen $T(G^* = 15 \text{ kPa})$ (bzw. T_{BTSV}) unter Verwendung einer Exponentialfunktion und der korrespondierende Phasenwinkel linear interpoliert.

8.1.2 Scher-Relaxationsversuch im Dynamischen Scher-Rheometer

Zur Untersuchung des Bindemittelverhaltens mit dem DSR im Bereich tiefer Gebrauchstemperaturen wurden in den letzten Jahren international verschiedene Relaxationsprüfungen erarbeitet, um die Fähigkeit eines Bindemittels zu beurteilen, abkühlungsbedingte kryogene Spannungen selbsttätig in Abhängigkeit von der Zeit abzubauen. Ein rascher Abbau ist vorteilhaft für den Widerstand gegen Rissbildung bei tiefen Temperaturen ⁽²¹⁵⁾.

²¹⁴ EN 14770:2012-08 Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Bestimmung des komplexen Schermoduls und des Phasenwinkels - Dynamisches Scherrheometer (DSR). CEN (Europäisches Komitee für Normung), Brüssel.

²¹⁵ Büchner, J. 2021. Prüfung von Asphaltmastix im Dynamischen Scherrheometer. Dissertation, Technische Universität Braunschweig, Institut für Straßenwesen, Schriftenreihe Straßenwesen, Heft 38, Braunschweig.

²¹⁶. In diesem Projekt wird der Scher-Relaxationsversuch angewandt (nach Gehrke, 2017 ⁽²¹⁷⁾, Gehrke et al., 2019 ⁽²¹⁸⁾; Radenberg & Staschkiewicz, 2020 ⁽²¹⁹⁾, 2021 ⁽²²⁰⁾). Die Versuchsparameter sind in Tabelle 29 zusammengefasst. Zunächst wird die Probe für die Dauer von 45 Minuten spannungsfrei auf -10 °C temperiert (Temperierungsphase), dann wird innerhalb einer Sekunde eine Scherdeformation von 0,1 % auf die Probe aufgebracht und diese dann 30 Minuten lang konstant gehalten (Belastungsphase). Der Abbau der Scherspannung wird für die Dauer von 30 Minuten aufgezeichnet (Relaxationsphase). Kennwerte sind das Integral der Scherspannung über die Zeit während der Relaxationsphase, die Relaxationszeit (um 63,2 % der Startspannung abzubauen) und der Verhältniswert von End- zur Startspannung (REL_{SRV}) (Abbildung 52).

Tabelle 28: Parameter des Scher-Relaxationsversuchs

Messsystem	8 mm-Platte/Platte (PP08)
Prüfart	weggesteuert/rotierend
Probendurchmesser	8 mm
Prüfspalt zu Beginn des Versuchs	2 mm
Prüftemperatur	-10 °C
Dauer Temperierungsphase	45 min
Vorgegebene Scherdeformation	0,1 %
Dauer der Belastungsphase	1 sec
Dauer der Relaxationsphase	30 min

²¹⁶ Wistuba, M. P. & Büchner, J. 2021. Prüfung von Rejuvenatoren mit dem Dynamischen Scherrheometer. Straße und Autobahn, Sonderheft Asphaltrecycling, 08.2021, Kirschbaum Verlag, Bonn.

²¹⁷ Gehrke, M. 2017. Komplexe Charakterisierung bitumenhaltiger Bindemittel anhand temperatur-, frequenz- und belastungsabhängiger Kennwerte. Dissertation, erschienen in: Schriftenreihe Lehrstuhl für Verkehrswegebau, Heft 27, Ruhr Universität Bochum.

²¹⁸ Gehrke, M., Stephan, D. & Weigel, S. 2019. Entwicklung einer Prüfsystematik zur Identifizierung der Bitumenart und der verwendeten Modifizierungsmittel in einem Ausbauasphalt. Schlussbericht, Forschungsprojekt FE 07.0286/2016/EGB, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Straßenbau Heft S 168, Fachverlag NW, Bremen

²¹⁹ Radenberg, M. & Staschkiewicz, M. 2020. Rheologische Untersuchungen zur Charakterisierung des Kälteverhaltens von bitumenhaltigen Bindemitteln mit dem Scher-Relaxationsversuch. Straße und Autobahn, Jahrgang 71, Heft 6, 479–485, Kirschbaum Verlag, Bonn.

²²⁰ Radenberg, M. & Staschkiewicz, M. 2021. Entwicklung eines Prüfverfahrens zur Beurteilung des Kälteverhaltens von Bitumen. Schlussbericht, Forschungsprojekt der Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Verkehrswegebau, i. A. der Bundesanstalt für Straßenwesen; erschienen in: Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft S144, Schünemann Verlag.

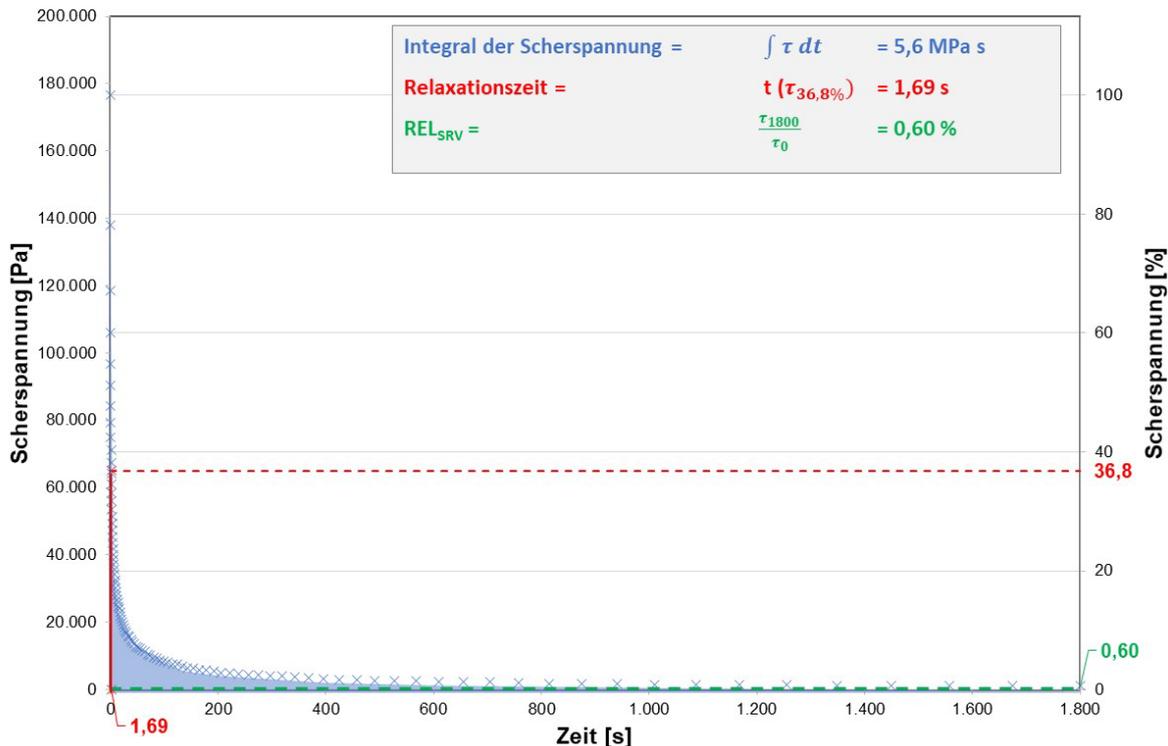


Abbildung 55. Ergebnisdarstellung eines Scher-Relaxationsversuches am Beispiel eines 50/70 Strassenbaubitumen mit den Auswerteparametern «Integral der Scherspannung», «Relaxationszeit» und Verhältniswert von End- zur Startspannung «REL_{SRV}».

8.1.3 Modifikationsdetektion von rückgewonnenen Bindemitteln aus dem Asphaltgranulat

Die Art der Modifizierung und der Alterungsgrad des aus dem Asphaltgranulat rückgewonnenen Bindemittels wird in diesem Projekt mit einer Methode nach Gehrke et al., 2019⁽²¹⁸⁾ bestimmt. Die Modifikationsdetektion wird mittels DSR im deformationsgeregelten Oszillationsmodus durchgeführt, bei dem fünf Beanspruchungsszenarien an jeweils einer Messprobe unmittelbar aufeinander folgen. Zunächst wird die Äqui-Schermodultemperatur ($T(G^* = 15 \text{ kPa})$ bzw. T_{BTSV}) bestimmt (Temperaturtest), dann nach Temperierung bei der Äqui-Schermodultemperatur der Speichermodul bei einer Frequenz von 0,1 Hz (Frequenztest bei T_{BTSV}). Der relative Speichermodul wird mittels Division des Speichermoduls durch die Äquisteifigkeitstemperatur erhalten (Gleichung 1):

$$\text{rel } G' = \frac{G'(T_{BTSV}, 0,1 \text{ Hz})}{T_{BTSV}} \quad \text{Gleichung 1}$$

mit $\text{rel } G'$... relativer Speichermodul [$\text{Pa}/^\circ\text{C}$], $G'(T_{BTSV}, 0,1 \text{ Hz})$... Speichermodul bei T_{BTSV} und 0,1 Hz [Pa] und T_{BTSV} ... Äqui-Schermodultemperatur.

Ferner folgen bei der Äqui-Schermodultemperatur ein Amplitudensweep von 0,1 bis 15 % Scherdeformation zur Identifikation des linearen viskoelastischen (LVE) Bereichs (Amplitudentest bei T_{BTSV}) und ein Multiple Stress Creep and Recovery Test (MSCRT bei T_{BTSV}) gemäss AL DSR-Prüfung (MSCRT)⁽²²¹⁾.

Bei nicht modifizierten Bindemitteln ist der Frequenzeinfluss sehr gering, so dass Werte $> 4 \text{ Pa}/^\circ\text{C}$ auf eine Polymermodifizierung schliessen lassen. Die Höhe des relativen Speichermoduls liefert Erkenntnisse bezüglich einer Modifizierung mit SBS (Styrene-Butadiene-Styrene), während über die Grenze des LVE-Bereichs eine Zuordnung von viskositätsverändernden Zusätzen (Wachsen) möglich ist. Sowohl bei Strassenbaubitumen als

²²¹ AL DSR-Prüfung (MSCRT), 2016. Arbeitsanleitung zur Bestimmung des Verformungsverhaltens von Bitumen und bitumenhaltigen Bindemitteln im Dynamischen Scherrheometer (DSR) – Teil 2: Durchführung der MSCR-Prüfung, FGSV 723, Ausgabe 2016. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), FGSV Verlag, Köln.

auch bei PmB liegt diese Grenze oberhalb von 15 %, bei viskositätsveränderten Bindemitteln dagegen deutlich darunter, wodurch eine Abgrenzung von wachsmodifizierten Bindemitteln erfolgen kann. Tabelle 30 ist eine Zusammenstellung der Prüfparameter für die Modifikationsdetektion, ein Ablaufschema zeigt Abbildung 53.

Tabelle 29: Prüfparameter für die Modifikationsdetektion

Messgeometrie	Platte/Platte
Prüfart	Weggesteuert/oszillierend
Probendurchmesser	25 mm
Spaltabstand	1 mm
Temperaturtest	
Prüffrequenz	1,59 Hz
Deformation	1 %
Prüftemperaturbereich	Von 40 °C bis zu T_{BTSV}
Heizrate	+0,02 K/s
Frequenztest bei T_{BTSV}	
Dauer der Temperierung	10 min
Prüffrequenz	0,1 Hz und 1,59 Hz
Deformation	1 %
Amplitudentest bei T_{BTSV}	
Prüffrequenz	1,59 Hz
Deformation	0,1 % bis 15 %
MSCRT bei T_{BTSV}	
Belastungsdauer	1 s
Entlastungsdauer	9 s
Spannung bei Belastung	3,2 kPa
Anzahl der Belastungszyklen	10

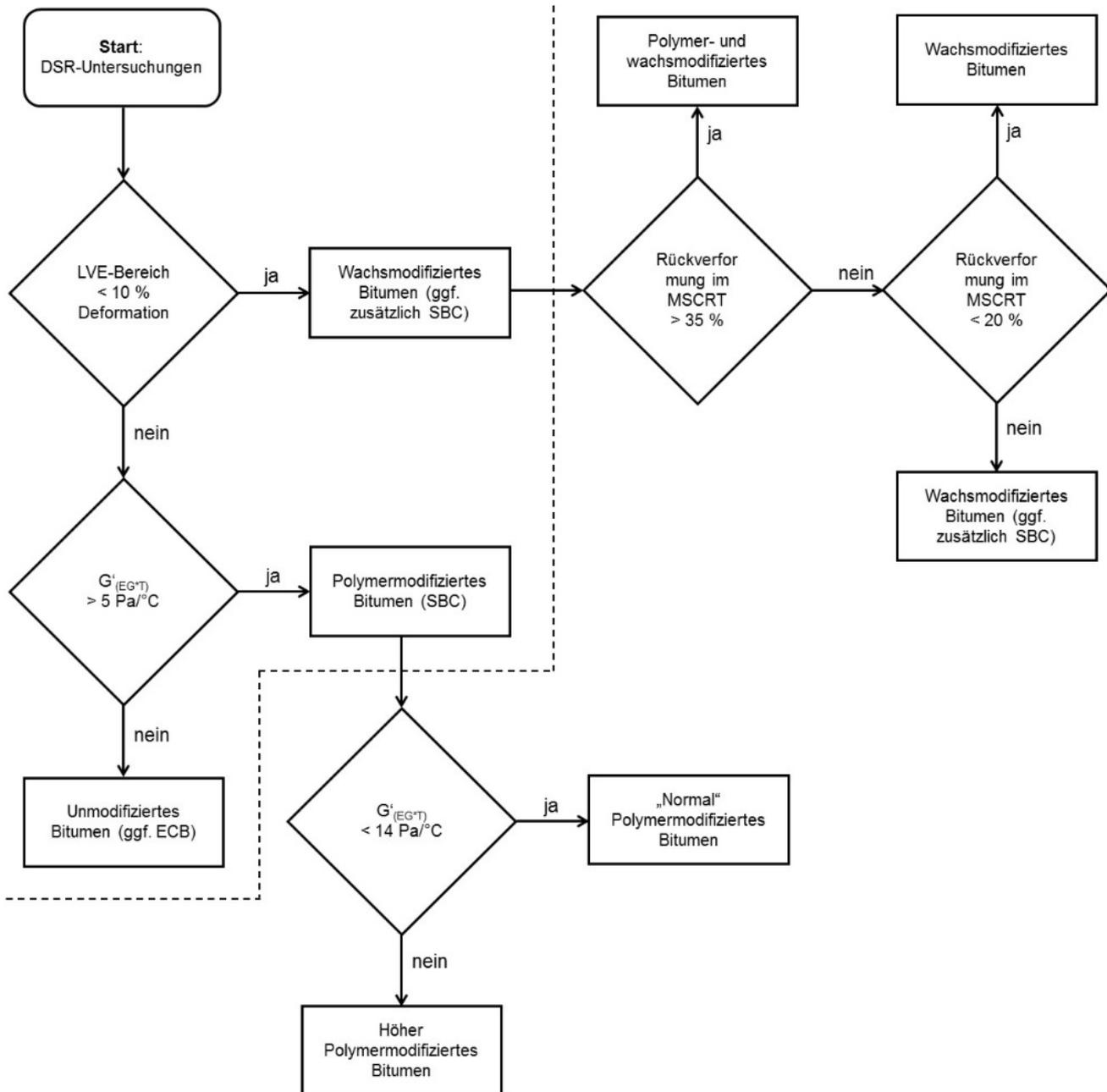


Abbildung 56. Ablaufschema zur Modifikationsdetektion von bitumenhaltigen Bindemitteln. ⁽²¹⁸⁸⁾

8.1.4 FTIR-Spektroskopie

Die FTIR (Fourier-Transformations-Infrarot) Spektroskopie wird zur chemischen Analyse der Bindemittel eingesetzt (auch der aus dem Ausbauspalt rückgewonnenen Bindemittel) indem die im Probenmaterial enthaltenen Moleküle bestimmt werden, mit dem Ziel, den Alterungsgrad, Modifizierungen und weitergehende stoffliche Unterschiede zu erkennen (nach Weigel, 2018 ⁽²²²⁾; Weigel & Stephan, 2018 ⁽²²³⁾).

²²² Weigel, S. 2018. Bitumen und Chemometrie – Innovative Wege der Bitumencharakterisierung mittels FTIR-Spektroskopie und multivariater Analysemethoden. Dissertation, Technische Universität Berlin.

²²³ Weigel, S. & Stephan, D. 2018. Bitumen Characterization with Fourier Transform Infrared Spectroscopy and Multivariate Evaluation: Prediction of Various Physical and Chemical Parameters, Energy Fuels, Vol. 32, S. 10437-10442.

Das Messprinzip aller FTIR-Techniken beruht darauf, dass bestimmte im Probenmaterial enthaltene Moleküle Wechselwirkungen mit bestimmten Wellenlängen der infraroten Strahlung eingehen. Wird ein Molekül mit einer bestimmten Wellenlänge bestrahlt, absorbiert es einen gewissen Anteil an Strahlungsenergie und wandelt diese in Eigenschwingung um. Die hierzu benötigte Energiedifferenz in der entsprechenden Wellenlänge wird detektiert und das so entstandene Transmissions- in ein Extinktionsspektrum umgerechnet⁽²²²²⁾.

Für die Oberflächenuntersuchung von lichtundurchlässigen Stoffen wie Bitumen eignet sich die FTIR-Technik mittels ATR-Einheit, indem die Intensität des reflektierten Lichtes gemessen wird und daraus Rückschlüsse über das absorbierende Medium gezogen werden (attenuated total reflection für ‚abgeschwächte Totalreflexion‘). Die Technik mittels Mehrfachreflexion (Zink-Selenid-Kristall als ATR-Einheit mit 25-facher Reflexion) ist genauer als jene mit Einfachreflexion (Abbildung 54).

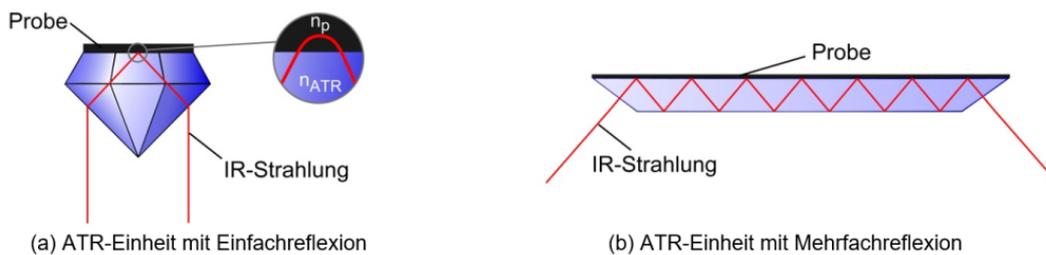


Abbildung 57. FTIR-Spektroskopie mittels ATR-Einheit: schematische Darstellung der Methode mit (a) Einfachreflexion (Diamant) und (b) Mehrfachreflexion^(224, 225, 226).

Abbildung 55 zeigt beispielhaft ein Extinktionsspektrum für ein Strassenbaubitumen inklusive Zuordnung von funktionalen Spektrenbanden (Peaks) zu bestimmten Molekülen.

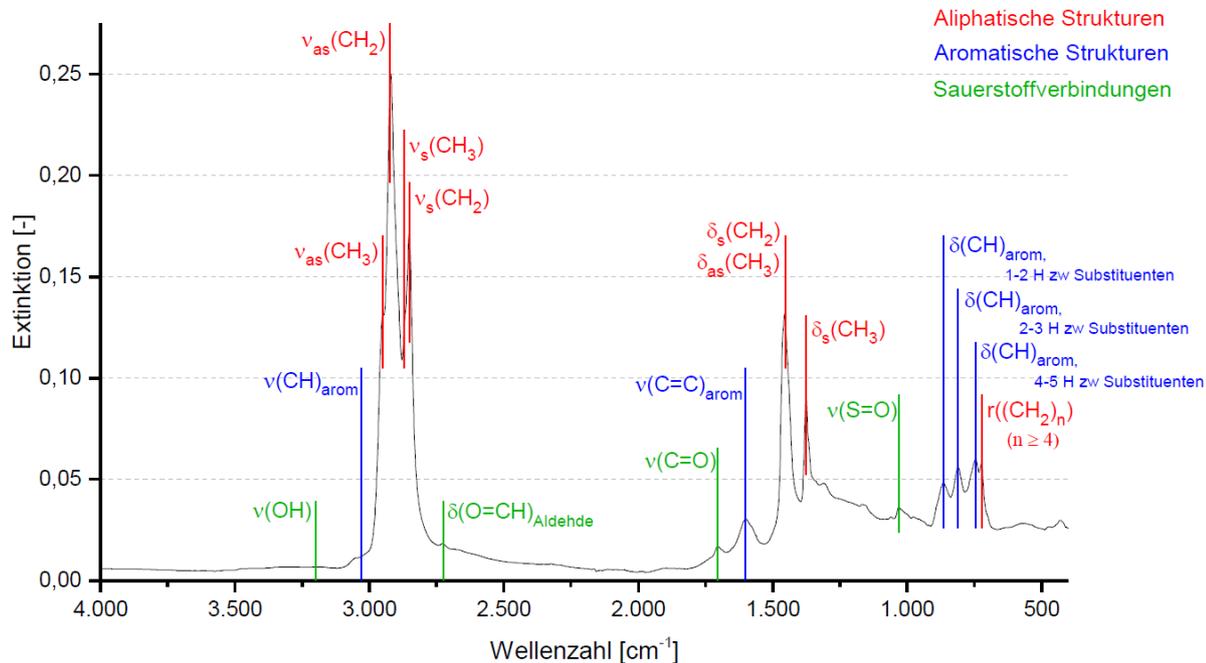


Abbildung 58. FTIR-Spektroskopie: Extinktionsspektrum für ein Strassenbaubitumen.

²²⁴ Harrick, N. J. 1987. Internal Reflection Spectroscopy. Harrick Scientific Corporation, New York.

²²⁵ Gottwald, W. & Wachter, G. 1997. IR-Spektroskopie für Anwender. Wiley-VCH Verlag, Weinheim, Deutschland.

²²⁶ Gorla, F. & Angst, C. 2006. Screening moderner chemisch-physikalischer Analysemethoden für bituminöse Baustoffe. Schweizer Bundesamt für Strassen, IMP Bautest AG, Institut für Materialprüfung, Oberbuchsitzen, Schweiz.

In Abbildung 56 sind die Spektren für die rückgewonnenen Bindemittel aus den Fraktionen mit Korngrösse < 1 mm dargestellt.

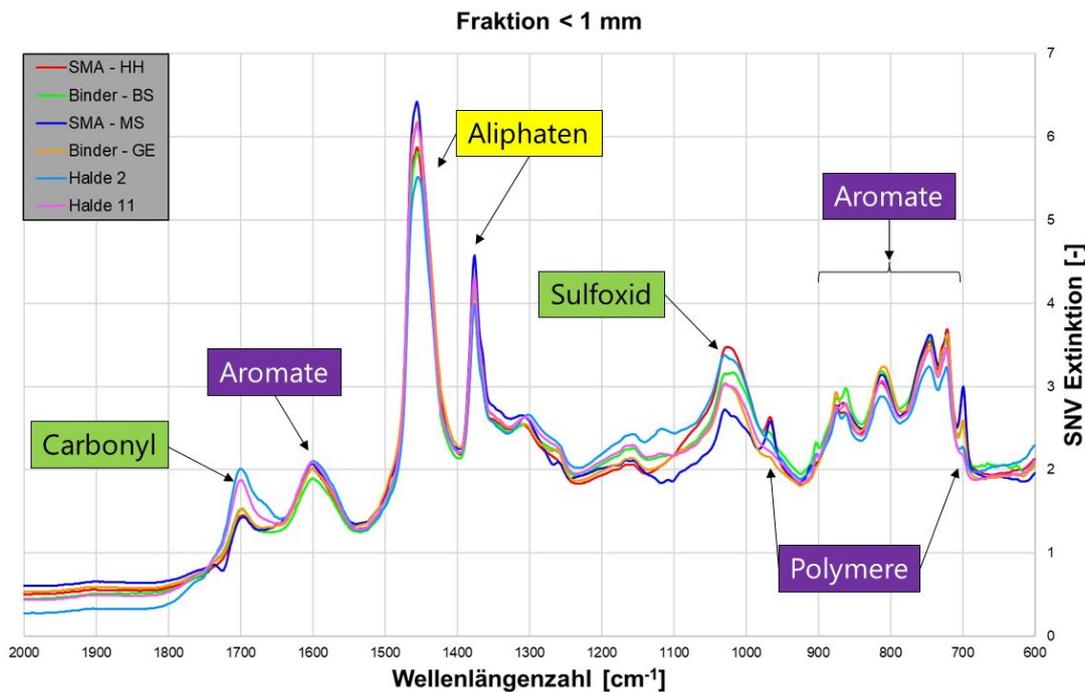


Abbildung 59. Extinktionsspektrum typische Modifikatoren für Strassenbaubitumen

Die Bewertung der Spektren kann rein qualitativ optisch erfolgen, indem beurteilt wird, ob bei einer bestimmten Wellenzahl mit bekannter Stoffzuordnung ein Peak zu erkennen ist oder nicht. Zusätzlich kann die Fläche bestimmt werden (von „Tal zu Tal“), die einem charakteristischen Peak zuzuordnen ist, sodass Spektren auch quantitativ mit einander verglichen werden können.

In diesem Projekt werden die zur Bewertung der Asphaltgranulatfraktionen die Peakflächen der Carbonylgruppe bei einer Wellenzahl von 1700, jene der Sulfoxidgruppe bei einer Wellenzahl von 1030, jene der Polybutanidgruppe bei 966 und jene der Polystyrolgruppe bei 699 ausgewertet. Von besonderem Interesse sind dabei die Flächen der beiden Oxide Kenngrössen (Carbonyl und Sulfoxid): je grösser die jeweilige Fläche ist, umso stärker gealtert ist das Bindemittel. Die beiden Flächen der Aromaten erlauben wiederum den Rückschluss, ob das Bindemittel polymermodifiziert ist. Der Verhältniswert der beiden Aromaten ermöglicht eine Aussage über den Alterungszustand der Polymere⁽²²⁷⁾. Weitere Interpretationsmethoden zur detaillierten Bewertung über Cluster- und Faktorenanalysen mit mathematisch-statistischen Modellen wurden von Weigel⁽²²²⁾ (und Co-Autoren^(223, 2188)) bzw. zur Berücksichtigung von weiteren chemischen Strukturgruppen von Mirwald et al.^{228, 229} vorgeschlagen. Für diese Methoden sind allerdings eine spezielle Software sowie eine grössere Datenbank mit bekannten Bindemitteln zur Validierung der Modelle notwendig.

8.1.5 Morphologische Charakterisierung der Gesteinskörnungen kleiner 1 mm

Für die Analyse der Gesteinskörnungen < 1 mm wird im Projekt ein Morphology G3ID Prüfgerät von Netzsch-Malvern Panalytical eingesetzt.

²²⁷ Chuanqi, Y., Weidong, H., Feipeng, X., Lianfang, W. & Yanwei Li. 2018. Proposing a new infrared index quantifying the aging extent of SBS-modified asphalt. *Road Materials and Pavement Design*, Vol. 19, No. 6, 1406–1421.

²²⁸ Mirwald, J, Werkovits, S., Camargo, I., Maschauer, D., Hofko, B., Grothe, H. 2020. Investigating Bitumen Long-Term-Ageing in the Laboratory by Spectroscopic Analysis of the SARA Fractions. *Construction and Building Materials*, 258 (2020), 1 - 13.

²²⁹ J Mirwald, J, Werkovits, S., Camargo, I., Maschauer, D., Hofko, B., Grothe, H. 2020. Understanding Bitumen Ageing by Investigation of its Polarity Fractions. *Construction and Building Materials*, 250 (2020), 118809; 1 - 10.

Die fotooptische Charakterisierung von ultrafeinen Partikeln (ab 0,5 µm bis 1 mm Korngrösse) kann mittels Morpho-Scans erfolgen. Für die Messung wird eine Probenmenge zwischen 1 und 3 mm³ mittels Druckluft auf einen Linsenträger aufgebracht und durch verschiedene Linsen fotooptisch erfasst, wobei jedem erfassten Partikel eine laufende ID-Nr. zugeordnet wird und hinsichtlich verschiedener Eigenschaften analysiert wird (Bsp. siehe Abbildung 57). Die in der Abbildung enthaltene Liste an möglichen Kennwerten zur geometrischen Beschreibung kleiner bis kleinster Partikel verdeutlicht die vielfältigen Möglichkeiten der Partikelanalyse (linke Spalte). Kennwerte, die für Asphalt von besonderem Interesse sein können und in diesem Forschungsprojekt ausgewertet werden, sind in der rechten Spalte hervorgehoben.

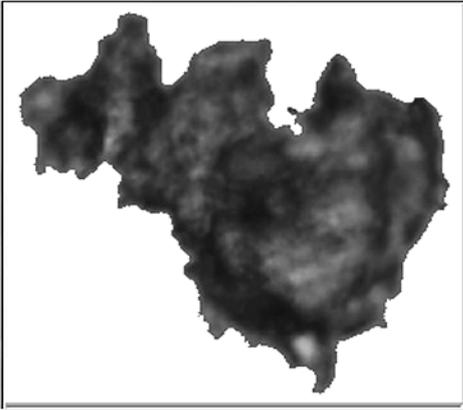
Field	Value			
Area (Pixels)	204229			
Area (µm ²)	15850,19			
Aspect Ratio	0,735			
CE Diameter (µm)	142,06		Area (Pixels)	Anzahl an Pixeln zur Abbildung des Partikels
Centre X Position (µm)	66214,250		CE Diameter	Korndurchmesser in µm
Centre Y Position (µm)	58476,773		Convexity	Oberflächen-(Kanten-)rauigkeit eines Partikels
Circularity	0,569		Circularity	Kennwert, wie nah die Form einem perfekten Kreis entspricht
Convexity	0,683		Circle Equivalent	Der Durchmesser eines Kreises der die gleiche Fläche des Partikels ergibt
Edge stitched particle	0		Aspect-Ratio	Das Verhältnis der Breite zur Länge des Partikels
Elongation	0,265			
Fiber Elongation	-1,000			
Fiber Straightness	-1,000			
Fiber Total Length (µm)	-1,00			
Fiber Width (µm)	-1,00			
HS Circularity	0,323			
Id	85040			
Intensity Mean	66,614			
Intensity SD	21,869			
Length (µm)	185,66			
Magnification	10,00			
Major Axis (°)	35,04			
Max. Distance (µm)	191,52			
Perimeter (µm)	782,34			
SE Volume (µm ³)	1501120,50			
Solidity	0,797			
Width (µm)	136,42			

Abbildung 60. Morpho-Scan: Beispiel für die Erfassung eines Partikels und seiner charakteristischen Werte (Prüfgerät Morphology G3ID, Netzsch-Malvern Panalytical).

8.2 Auswertung der Ergebnisse

Charakteristische Ergebnisse für ausgewählte Asphaltgranulatfraktionen sind exemplarisch dargestellt, sämtliche Ergebnisse liegen auf Datenträger vor.

8.2.1 BTSV-Prüfung und Temperatur-Frequenz-Sweep

Abbildung 58 zeigt die Ergebnisse aus der BTSV-Prüfung im BTSV-Diagramm. Die Farbe kennzeichnet die jeweilige Quelle des Asphaltgranulats, das Symbol die jeweilige Asphaltgranulatfraktion. Wegen beschränkter Materialmenge, wurde bei Granulat Nr. 3 SMA-MS nur eine Mischprobe untersucht.

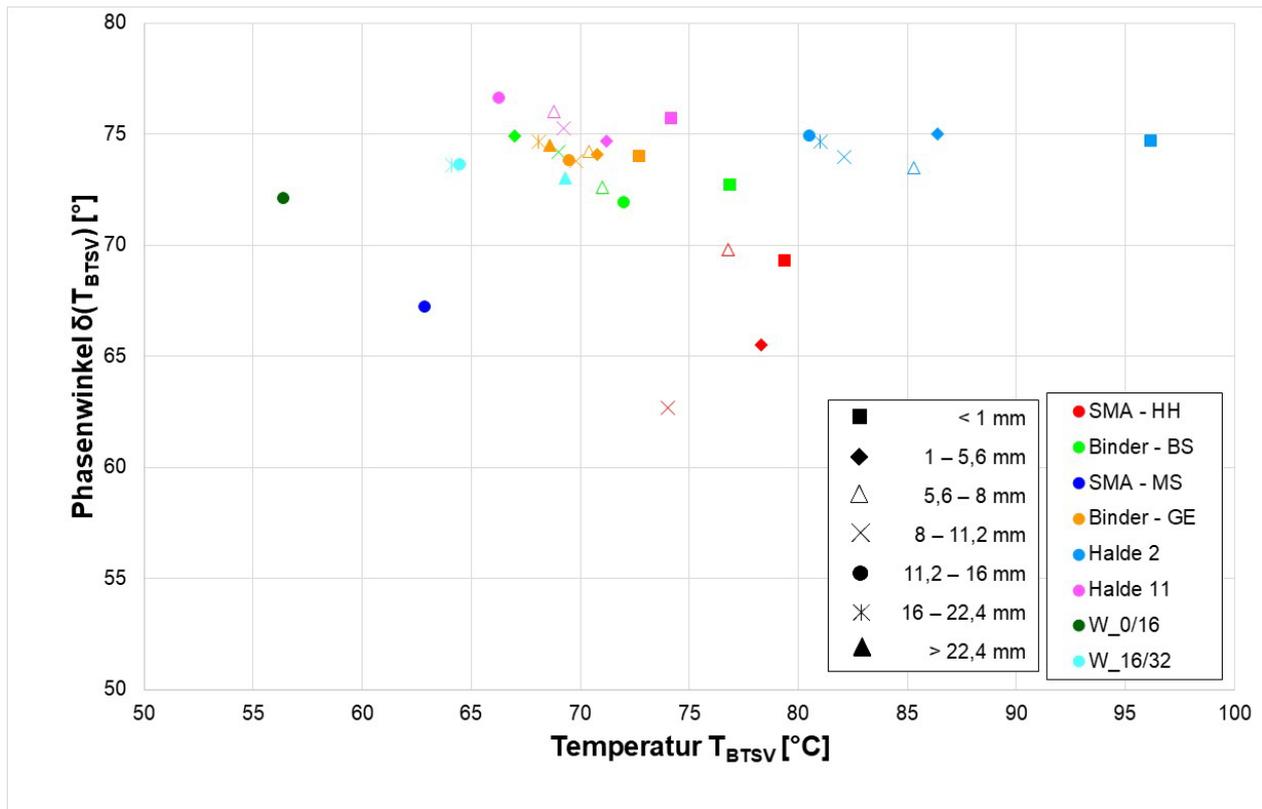


Abbildung 61. BTSV-Kennwerte zu den aus den aus den Asphaltgranulatfraktionen rückgewonnenen Bindemitteln.

Es wird deutlich, dass die feinste Fraktion (< 1 mm) den höchsten Alterungsgrad aufweist. Da in dieser Fraktion systematisch die höchsten Bindemittelgehalte festzustellen sind, ist diese Erkenntnis ein wichtiger Ansatz zur Optimierung des Asphaltgranulat-Managements. Auch die nächst größeren Fraktionen > 1 mm zeigen dies tendenziell bis zu einer gewissen Grenze (ca. 5 bis 8 mm). Inwieweit eine Fraktionierung auch bei so kleinen Stückdurchmessern mit der heutigen Aufbereitungstechnologie ökonomisch ist, muss geklärt werden.

Abbildung 59 zeigt die relativen Speichermodule. Wegen beschränkter Materialmenge, wurde bei Granulat Nr. 3 SMA-MS nur eine Mischprobe untersucht.

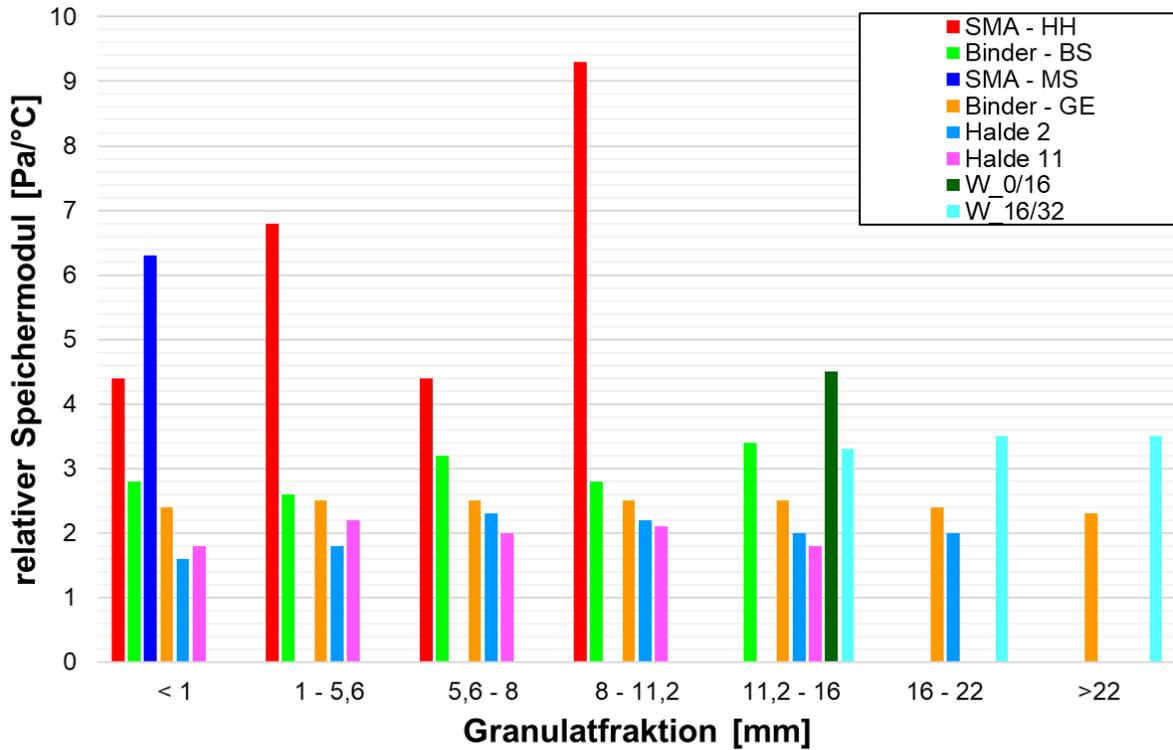


Abbildung 62. Relative Speichermodule der rückgewonnenen Bindemittel aus den Asphaltgranulatfraktionen.

Abbildung 60 und Abbildung 61 stellen exemplarisch für die Asphaltgranulate Nr. 4 Binder - GE und Nr. 5 Halde 2 die komplexen Schermodule und die Phasenwinkel bei einer Prüffrequenz von 1,59 Hz. dar. Die beiden Abbildungen verdeutlichen, dass teilweise ein beachtlicher Unterschied zwischen der Fraktion < 1 mm und den größeren Fraktionen festzustellen ist.

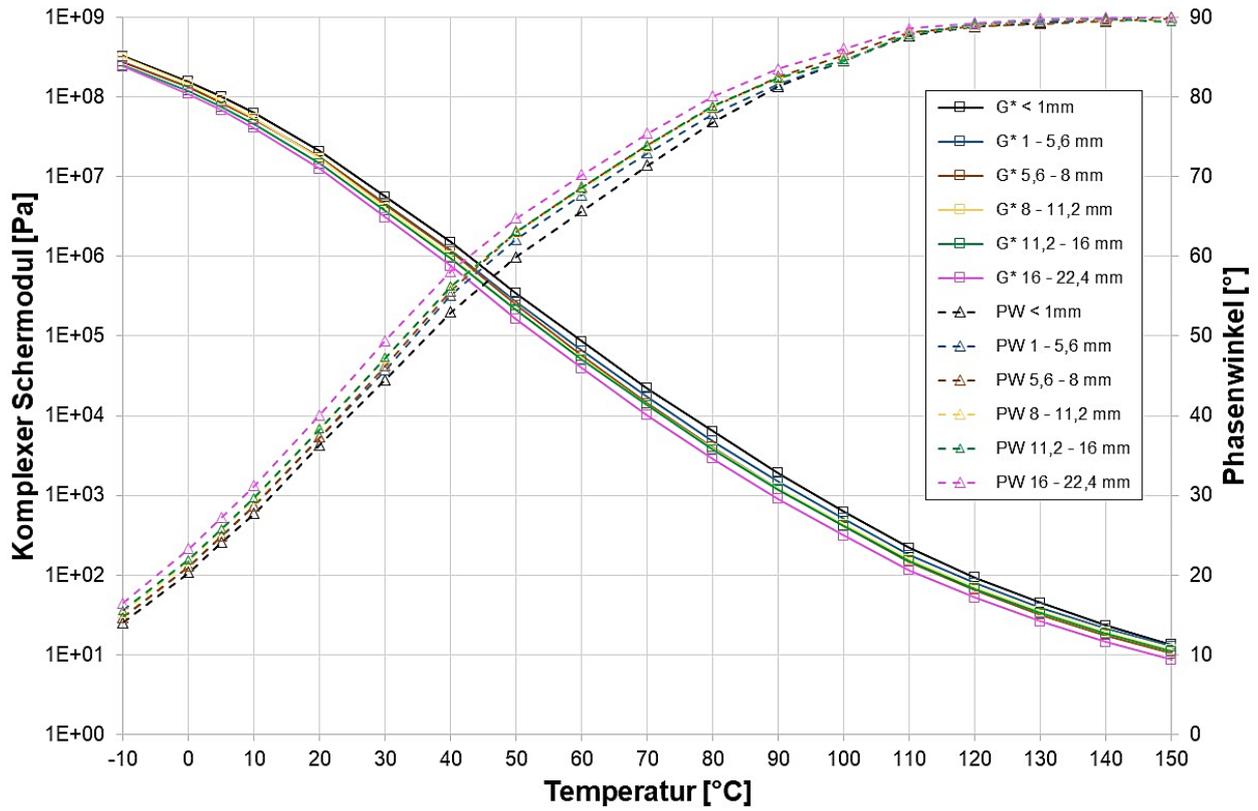


Abbildung 63. Asphaltgranulatfraktion Nr. 4 Binder – GE: Komplexer Schermodul G^* und Phasenwinkel δ bei einer Prüffrequenz von 1,59 Hz.

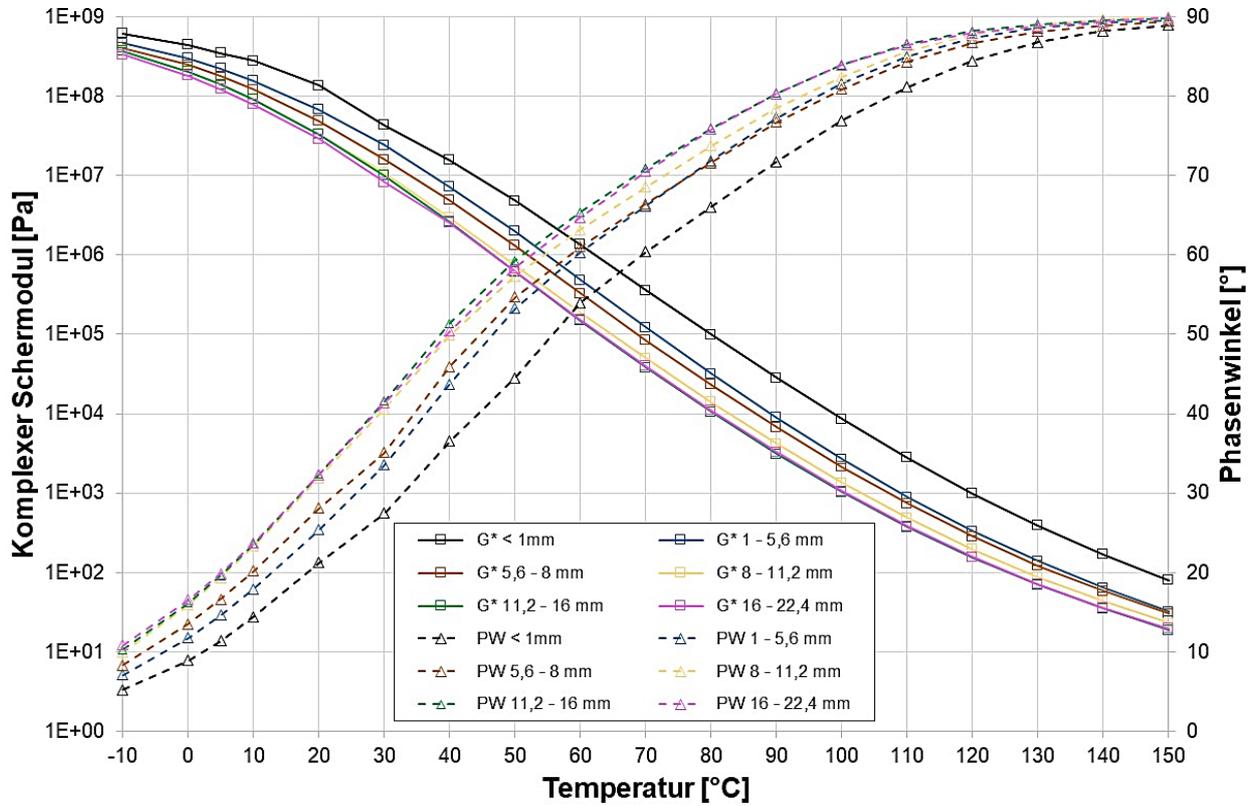


Abbildung 64. Asphaltgranulatfraktion Nr. 5 Halde 2: Komplexer Schermodul G^* und Phasenwinkel δ bei einer Prüffrequenz von 1,59 Hz.

Abbildung 62 und Abbildung 63 zeigen für die Asphaltgranulatfraktion Nr. 4 Binder - GE und Nr. 5 Halde 2 den jeweiligen Verlauf des Schermoduls in Abhängigkeit von Temperatur und Frequenz.

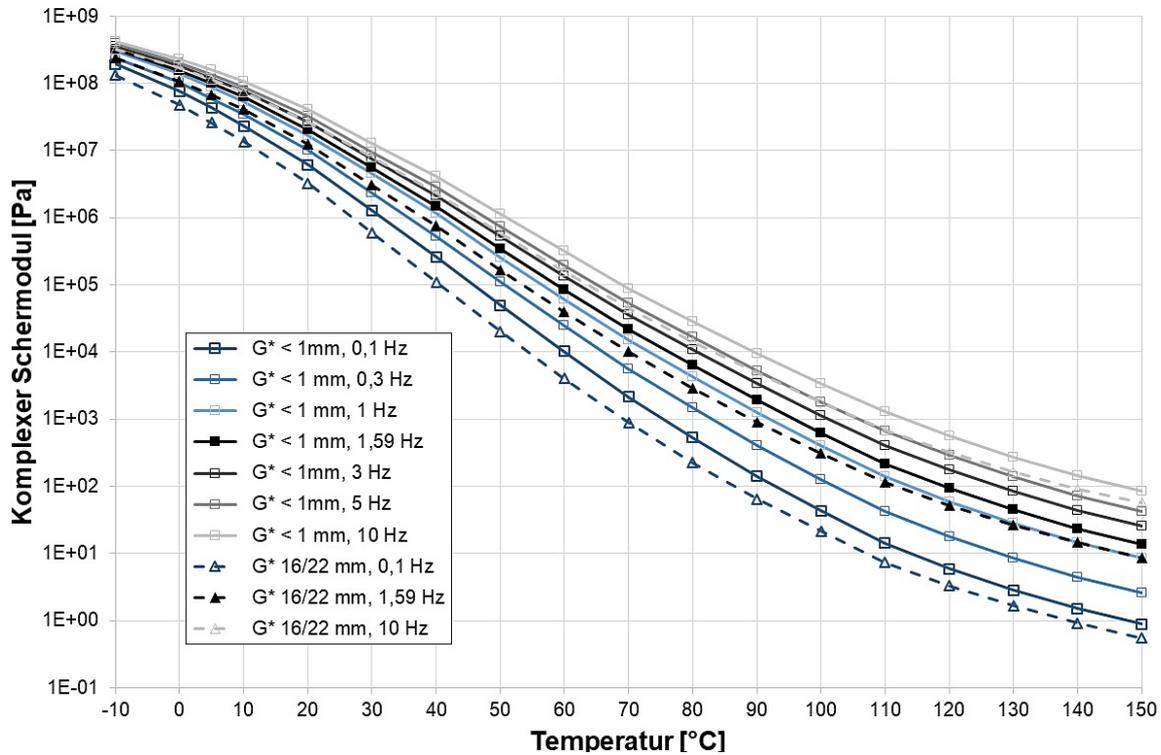


Abbildung 65. Asphaltgranulatfraktion Nr. 4 Binder - GE: Komplexer Schermodul G^* in Abhängigkeit von Temperatur und Prüffrequenz.

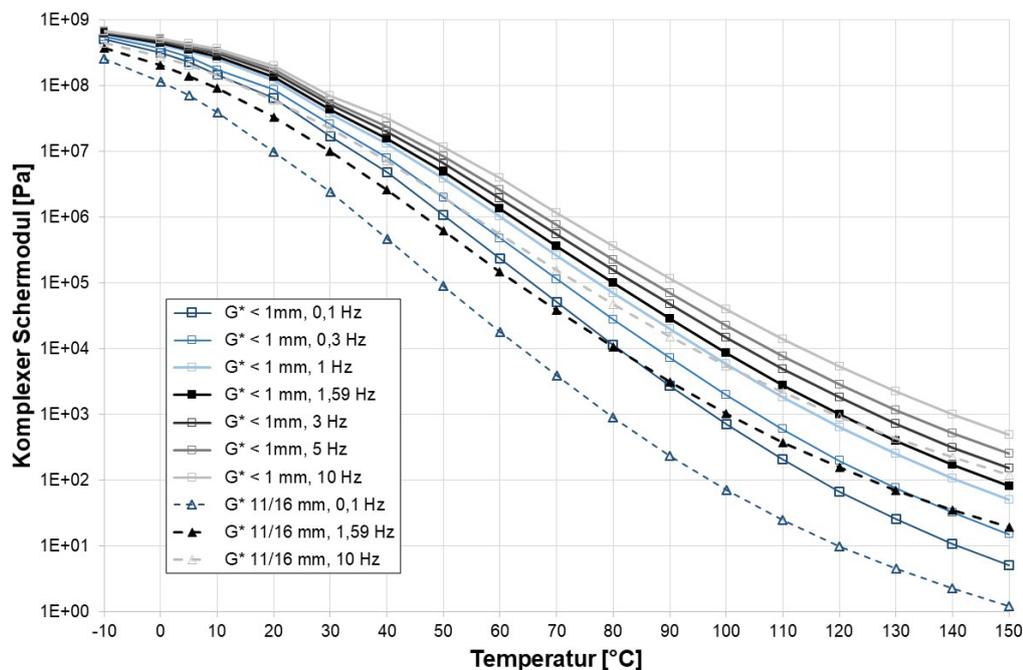


Abbildung 66. Asphaltgranulatfraktion Nr. 5 Halde 2: Komplexer Schermodul G^* in Abhängigkeit von Temperatur und Prüffrequenz.

Die Black-Diagramme zu den rückgewonnenen Bindemitteln sind in Abbildung 64 für die Fraktion $< 1\text{ mm}$ und in Abbildung 65 für die Fraktion $8/11,2\text{ mm}$ dargestellt. Der rheologische Unterschied zwischen dem Bindemittel wird deutlich: Das Bindemittel aus Asphaltgranulat Nr. 1 SMA – HH aus der Fraktion $< 1\text{ mm}$ ist signifikant

härter jenes aus der Fraktion 8/11,2 mm. Ferner scheint die Wirksamkeit der Polymere im Asphaltgranulat mit dem weicheren Bindemittel höher zu sein.

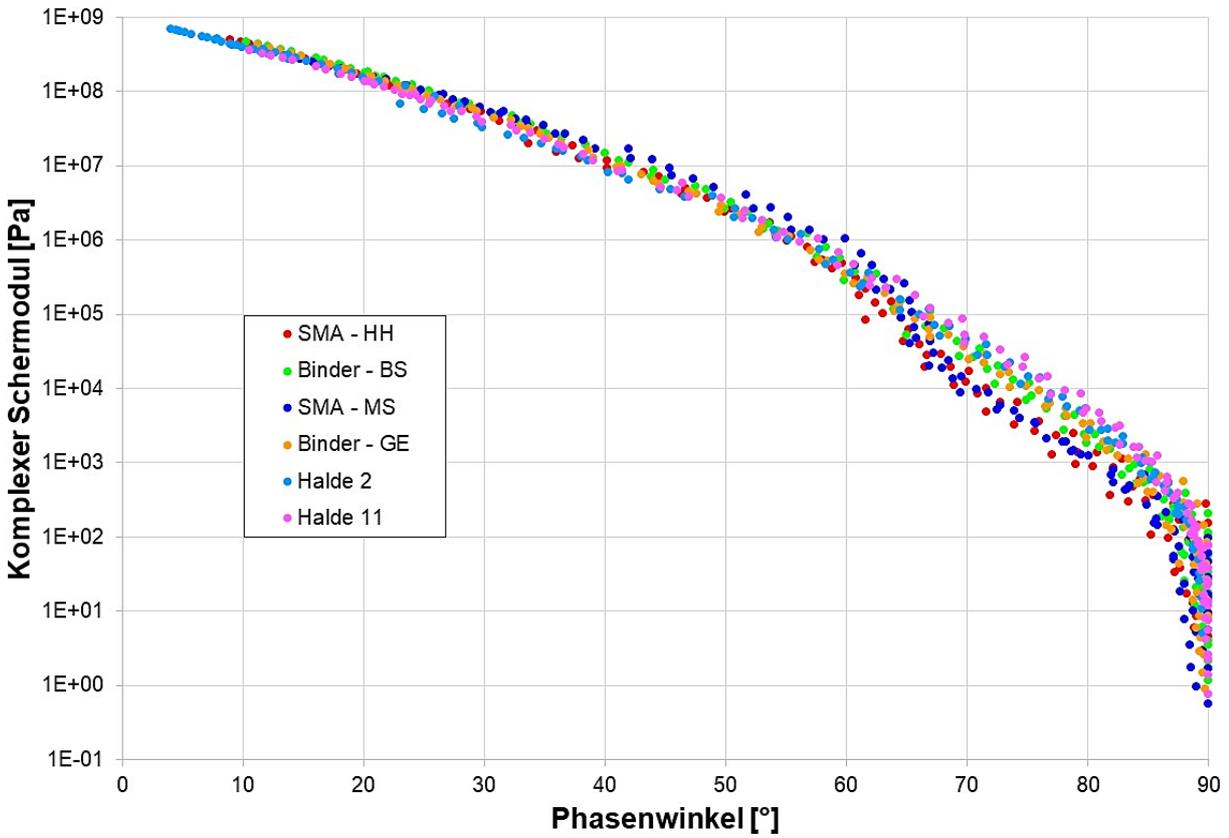


Abbildung 67. Black-Dialogm für Bitumen aus den Fraktionen < 1 mm.

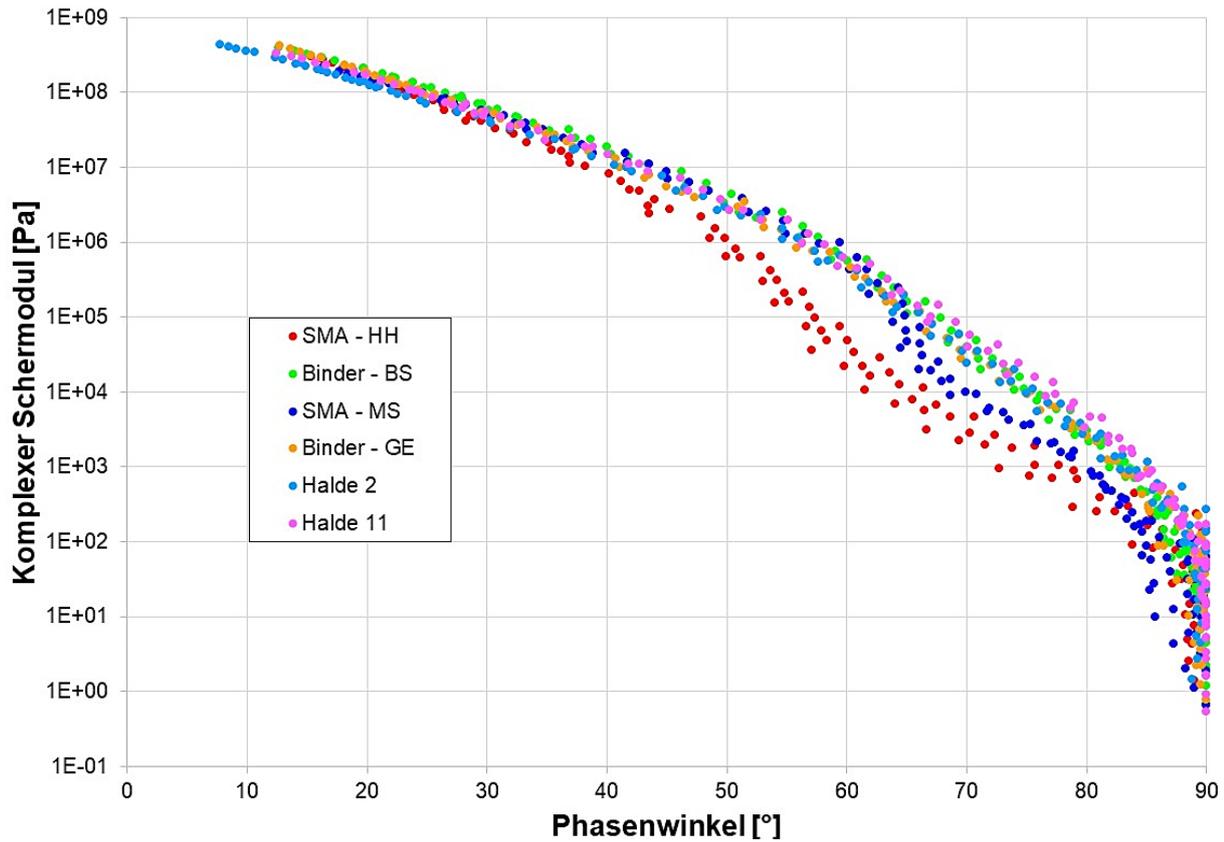


Abbildung 68. Black-Diagramm für Bitumen aus den Fraktionen 8/11,2 mm.

8.2.2 Scher-Relaxationsversuch

Das Kälteverhalten der aus den Asphaltgranulatfraktionen rückgewonnenen Bindemittel wird beurteilt anhand des Scherspannungsabbaus innerhalb einer Relaxationsdauer von 1.800 Sekunden. In Abbildung 66 sind exemplarisch die Scherspannungsverläufe zu den Fraktionen < 1 mm dargestellt, mit deutlichen Unterschieden im Relaxationsverhalten. Während das Bindemittel aus dem Asphaltgranulat Nr. 5 Halde 2 eine Relaxationszeit von rund 490 Sekunden (hellblau) aufweist, beträgt diese beim Bindemittel aus Nr. 3 SMA – MS (dunkelblau) nur 3,3 Sekunden.

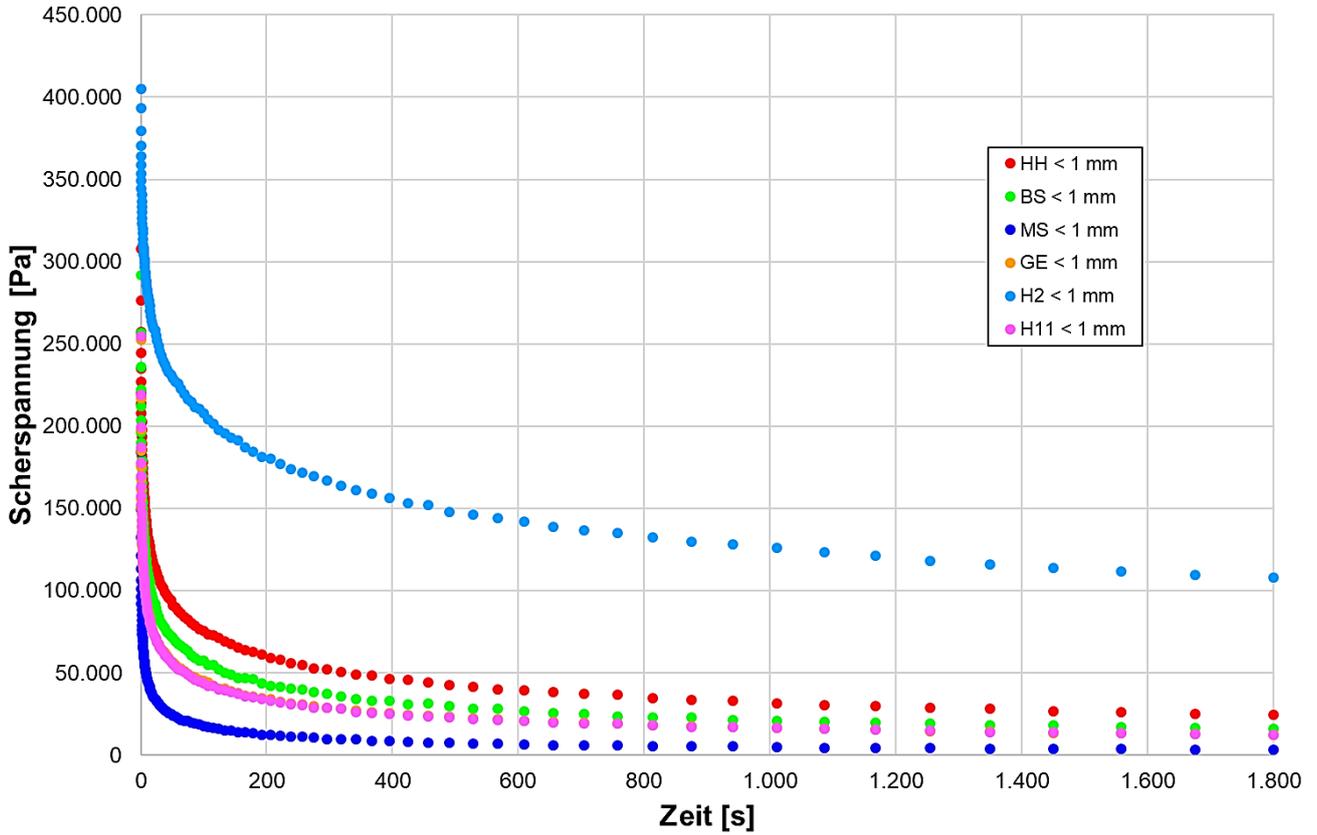


Abbildung 69. Scher-Relaxationsversuch: Zeitliche Veränderung der Scherspannung der rückgewonnenen Bindemittel aus den Fraktionen < 1 mm.

Das Integral der Scherspannung über die Relaxationsdauer ($\text{Integral}_{\text{Rel}}$), die Relaxationszeit für 63,2 % Spannungsabbau (t_{Rel}) und der Verhältniswert von End- zur Startspannung (REL_{SRV}) sind als weitere mögliche Auswerteparameter in Tabelle 31 sowie in Abbildung 69 bis Abbildung 67 angegeben.

Tabelle 30: Kennwerte aus dem Scher-Relaxationsversuch

Asphaltgranulat-Bezeichnung	Integral_{Rel} [MPa s]	t_{Rel} [s]	REL_{SRV} [%]	
Nr. 1 SMA – HH	HH < 1 mm	72,2	23,2	7,96
	HH 1 - 5,6 mm	43,3	10,8	5,63
	HH 5,6 - 8 mm	56,7	17,3	6,98
	HH > 8 mm	17	3,3	3,01
Nr. 2 Binder – BS	BS < 1 mm	50,4	12,9	5,50
	BS 1 - 5,6 mm	21,8	4,3	2,34
	BS 5,6 - 8 mm	24,7	4,9	2,88
	BS 8 - 11,2 mm	27,4	5,4	2,97
	BS > 11,2 mm	25,1	4,9	3,03
Nr. 3 SMA – MS	MS < 1 mm	13,5	3,3	1,85
	MS 1 - 5,6 mm	8,3	2,2	1,38
	MS 5,6 - 8 mm	12,3	3,0	1,66
	MS > 8 mm	13,7	3,2	1,78
Nr. 4 Binder – GE	GE < 1 mm	39,6	9,3	4,90
	GE 1 - 5,6 mm	40,3	9,2	4,63
	GE 5,6 - 8 mm	31,8	8,3	4,35
	GE 8 - 11,2 mm	27,7	6,6	3,68
	GE 11,2 - 16 mm	26,7	6,1	3,61
	GE 16 - 22,4 mm	22,6	4,8	2,76
	GE > 22,4 mm	22,5	4,4	2,77
Nr. 5 Halde 2	H2 < 1 mm	252,1	490,4	26,62
	H2 1 - 5,6 mm	155,4	127,2	16,75
	H2 5,6 - 8 mm	121,8	75,6	13,70
	H2 8 - 11,2 mm	91,7	39,3	10,60
	H2 11,2 - 16 mm	89,6	36,0	9,95
	H2 > 16 mm	87,6	46,8	12,28
Nr. 6 Halde 11	H11 < 1 mm	39,3	8,9	4,88
	H11 1 - 5,6 mm	25,4	4,9	3,07
	H11 5,6 - 8 mm	24,6	5,3	3,04
	H11 8 - 11,2 mm	22,5	4,5	2,71
	H11 > 11,2 mm	19,7	3,9	2,33
Nr. 7 W_0/16	W_0/16 11,2 - 16 mm	1,6	4,6	1,17
Nr. 8 W_16/32	W_16/32 11,2 - 16 mm	16,7	14,0	3,63
	W_16/32 16 - 22,4 mm	16,0	13,6	3,46
	W_16/32 22,4 - 32 mm	24,7	17,6	4,32

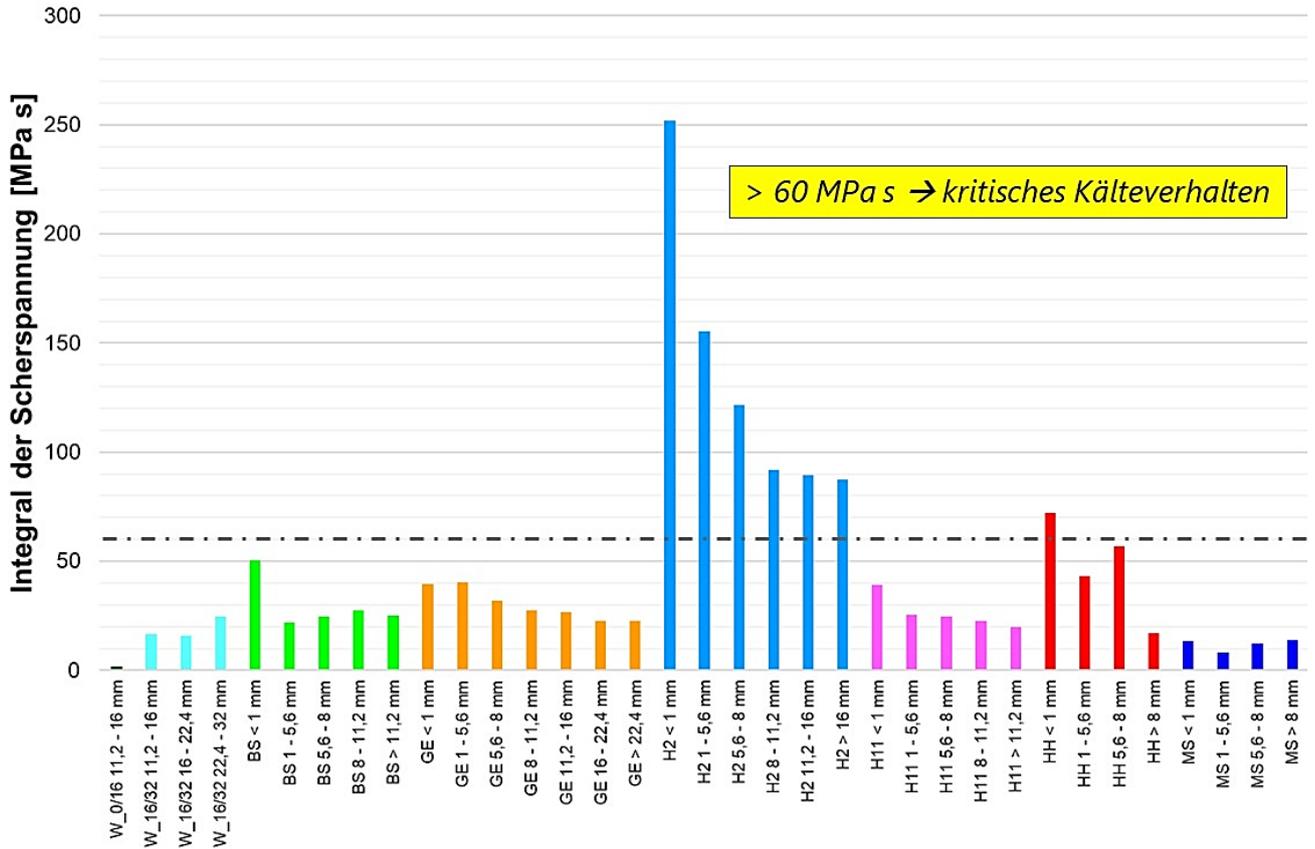


Abbildung 70. Scher-Relaxationsversuch: Integral der Scherspannung über die Relaxationsdauer (Integral_{Rel}).

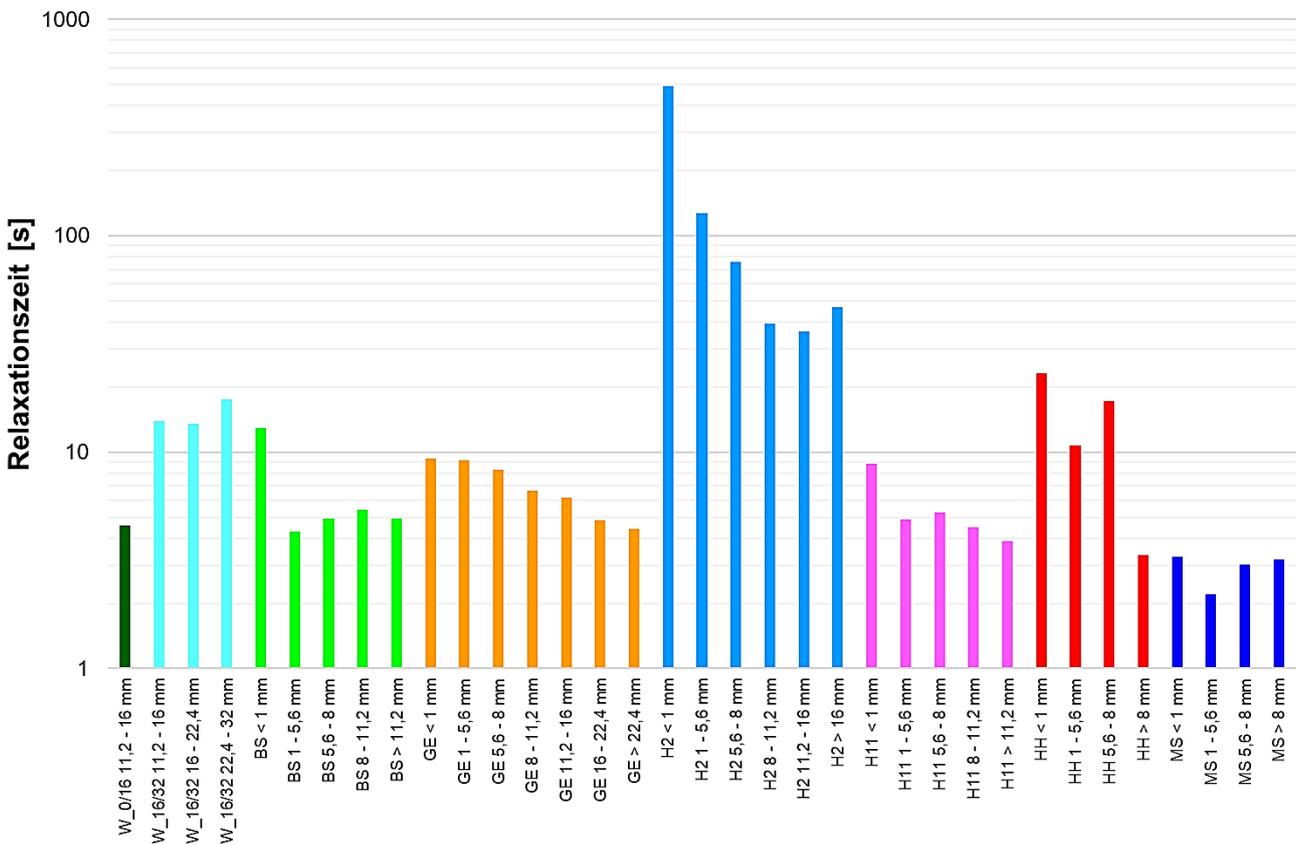


Abbildung 71. Scher-Relaxationsversuch: Relaxationszeit für 63,2 % Spannungsabbau (t_{Rel}).

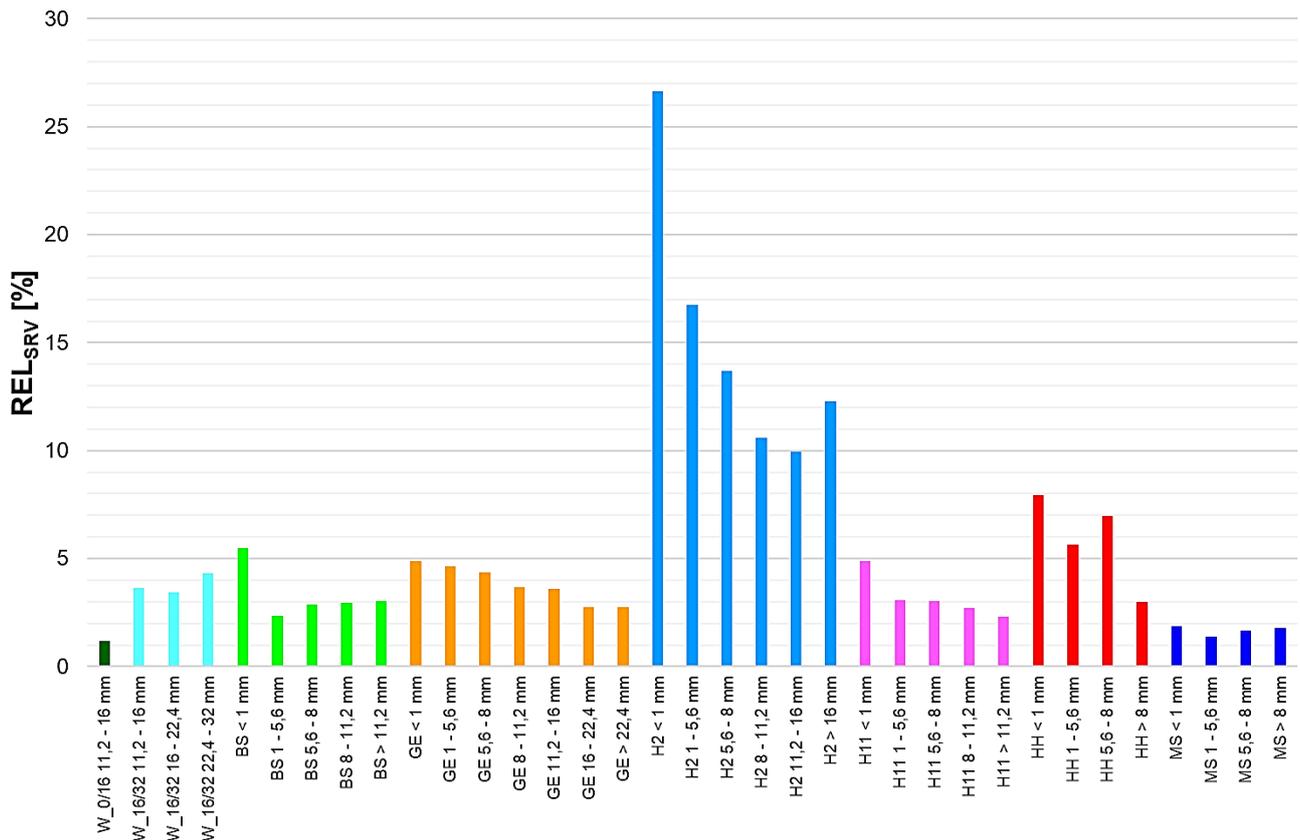


Abbildung 72. Scher-Relaxationsversuch: Verhältniswert von End- zur Startspannung (REL_{SRV}).

Es lässt sich erkennen, dass die kleinsten Fraktionen (< 1 mm) das schlechteste Relaxationsverhalten aufweisen. Nach bisherigem Kenntnisstand bedeutet ein Integral der Scherspannung von > 60 MPa s ein kritisches Kälteverhalten. Eine Reihung der Ergebnisse ist bei allen drei Kennwerten ähnlich, lediglich bei den Asphaltgranulatfraktionen W_0/16 11,2 - 16 mm, W_16/32 11,2 - 16 mm, W_16/32 16 - 22,4 mm, und W_16/32 22,4 - 32 mm würde sich bei Betrachtung der Relaxationszeit eine gegenüber den beiden anderen Kennwerten andere Reihung ergeben.

8.2.3 FTIR-Spektroskopie

Abbildung 70 zeigt die Extinktionen von vier verschiedenen rückgewonnenen Bindemitteln aus den Asphaltgranulaten < 1 mm in dem für Bitumen wichtigen Wellenlängenzahlbereich von 600 bis 1800 cm^{-1} . Markiert sind die massgebenden Wellenlängenzahlen für den Alterungsgrad (Carbonyl- und Sulfoxid-Banden) und für den Nachweis von SBS/SBC (Butadien- und Styrol-Banden) sowie von weiteren Modifikatoren.

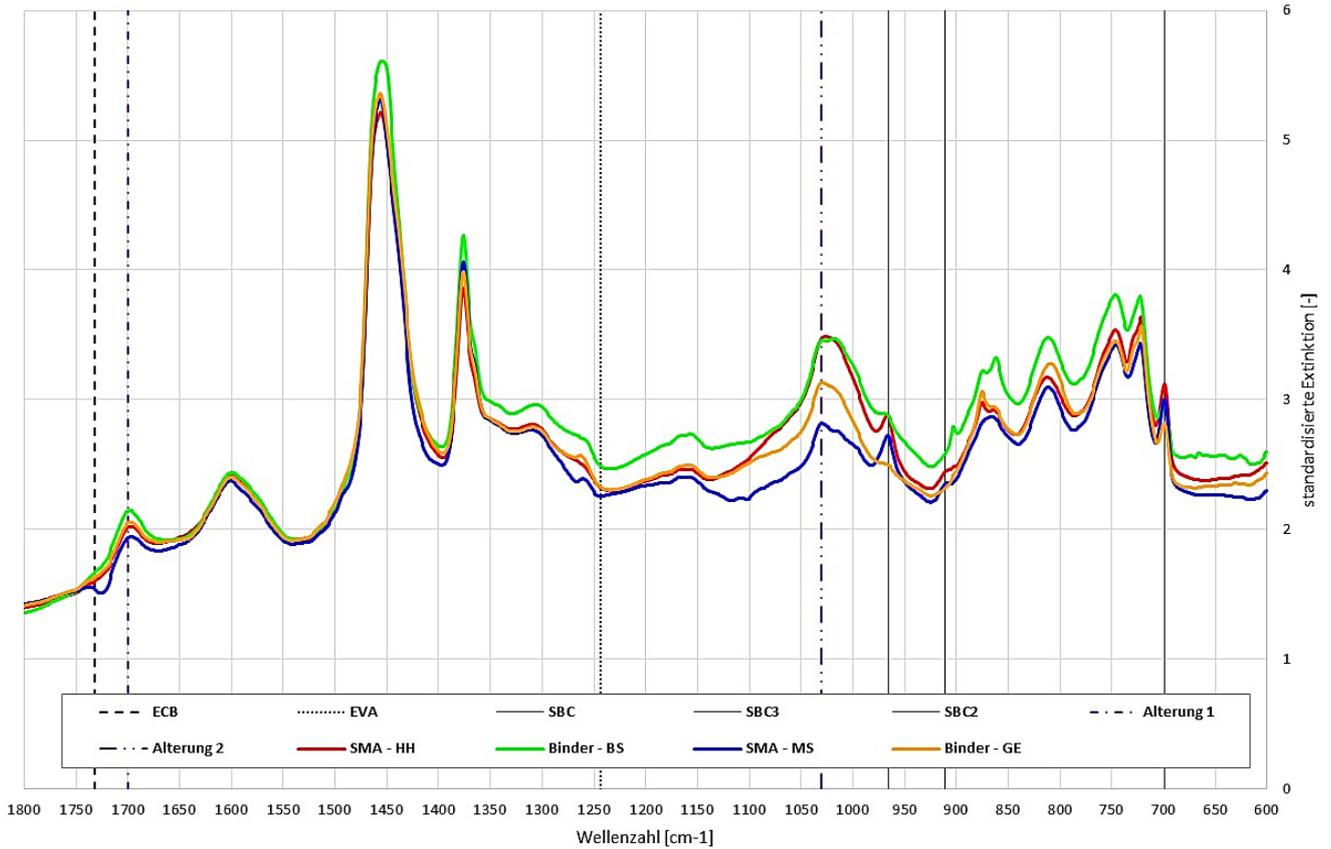


Abbildung 73. Ergebnisse aus der FTIR-Spektroskopie zu den rückgewonnenen Bindemitteln aus den Asphaltgranulaten < 1 mm sowie Kennzeichnung relevanter Wellenlängenzahlen.

Das Bindemittel aus dem Asphaltgranulat Nr. 2 Binder – BS hat den höchsten oxidativen Alterungsgrad und das Bindemittel aus dem Asphaltgranulat Nr. 3 SMA – MS den niedrigsten.

Die Auswertung der Carbonyl-, Sulfoxid-, Styrol- und Butadien-Peakflächen zeigen die Abbildung 71 und die Abbildung 72.

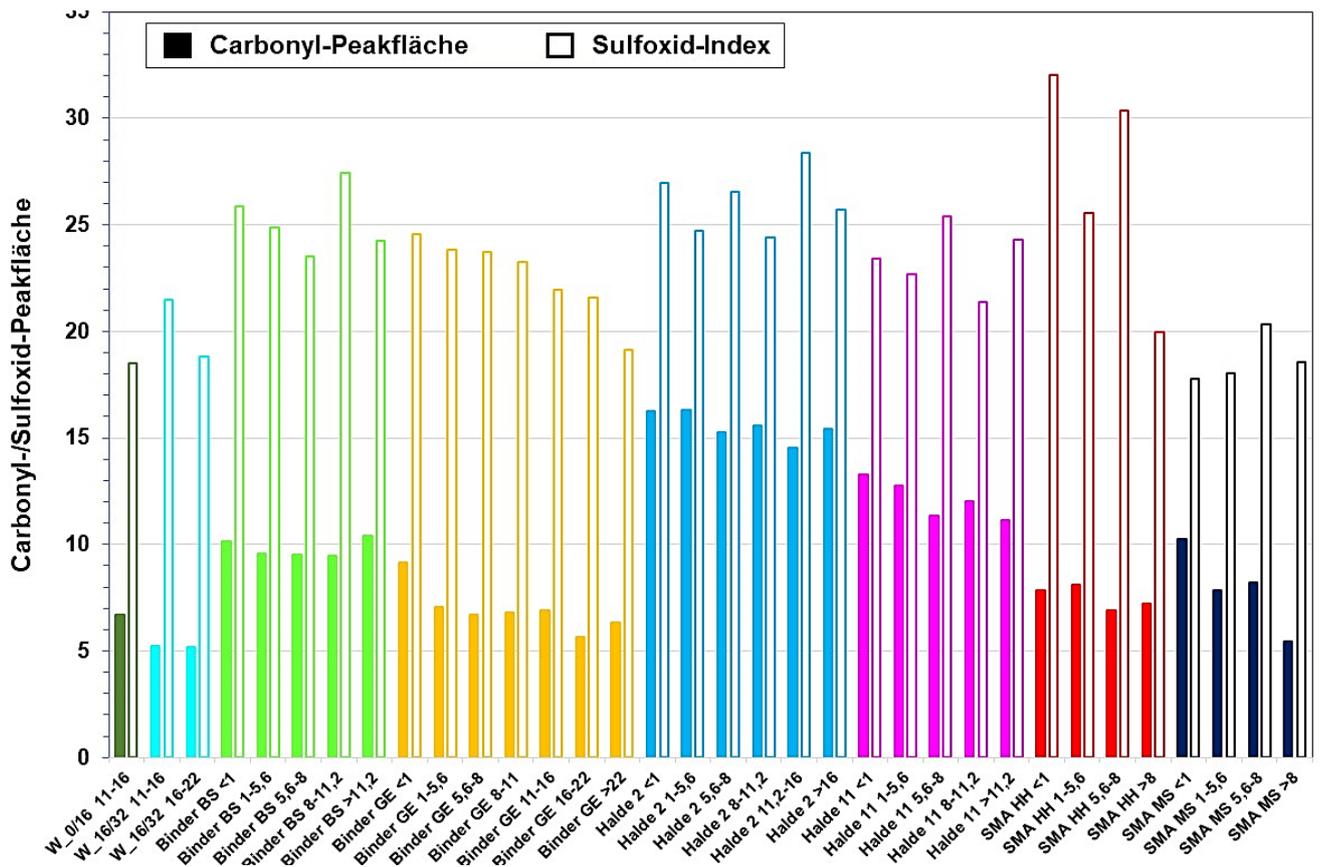


Abbildung 74. FTIR-Spektroskopie: Berechnete Carbonyl- und Sulfoxid-Peakflächen.

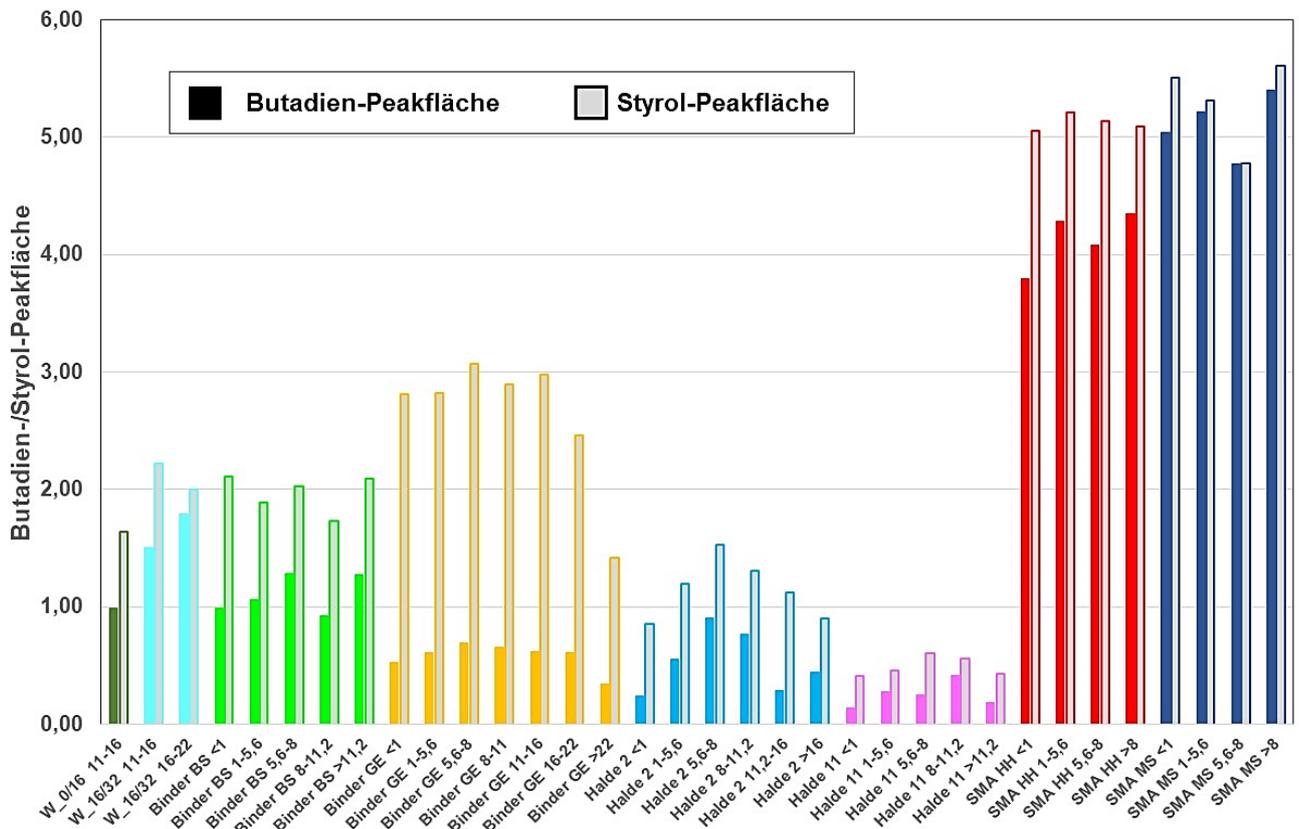


Abbildung 75. FTIR-Spektroskopie: Berechnete Butadien- und Styrol-Peakflächen.

Es lässt sich festhalten, dass der oxidative Alterungsgrad der untersuchten Bindemittel in folgender Reihenfolge abnimmt: Nr. 5 Halde 2 \Rightarrow Nr. 6 Halde 11 \Rightarrow Nr. 2 Binder BS \Rightarrow Nr. 4 Binder GE / Nr. 1 SMA HH / Nr. 3 SMA MS \Rightarrow Nr. 7 W 0/16 \Rightarrow Nr. 8 W 16-32.

Mit den Indikatoren bezüglich einer Polymermodifizierung lassen sich die Asphaltgranulate Nr. 1 SMA HH und Nr. 3 SMA MS als elastomermodifiziert zuordnen. Möglicherweise elastomermodifiziert, aber vermutlich nur geringfügig sind die Asphaltgranulate Nr. 2 Binder BS, Nr. 4 Binder GE und Nr. 8 W 16-32.

Eine Korrelation der chemischen mit den rheologischen Bewertungsparametern gelingt anhand eines Vergleichs der Kennwerte aus der FTIR-Spektroskopie mit den DSR-Prüfungen. In Abbildung 73 ist der grobe Zusammenhang der relativen Speichermodule mit den Butadien- und Styrol-Peakflächen (SBS- oder SBR-Indikatoren) erkennbar und geben einen Hinweis auf Polymermodifizierung. Ein signifikanter Zusammenhang liegt allerdings nur in jenem Bereich vor, der auf ein nicht modifiziertes Bitumen hindeutet (relative Speichermodule $< 4 \text{ Pa}/^\circ\text{C}$).

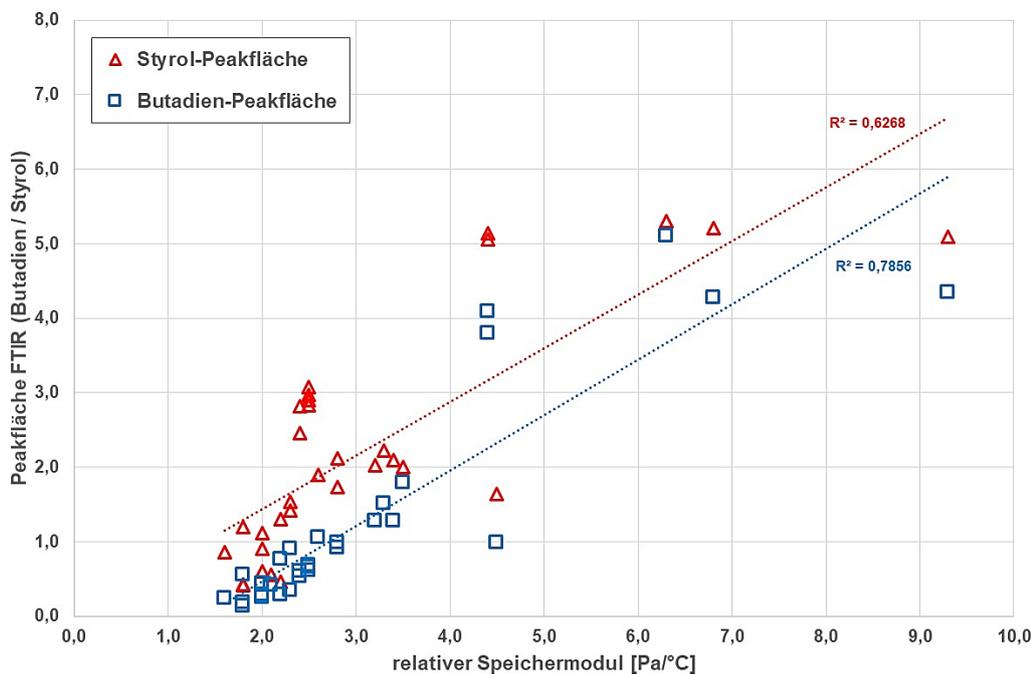


Abbildung 76. Korrelation des relativen Speichermoduls mit Butadien- und Styrol-Peakflächen.

Auch bezüglich der Alterungsneigung korreliert das Integral der Scherspannung mit den Carbonyl- und Sulfoxid-Peakflächen (Abbildung 74). Insbesondere bei Addition der Carbonyl- mit der Sulfoxid-Peakfläche (Abbildung 75, grüne Symbole) ergibt sich ein Zusammenhang, der mit zunehmender Alterung schlechter wird, weil vermutlich Strukturalterungseffekte, die nicht mit den Carbonyl- und Sulfoxid-Banden erfasst werden können, eine bessere Korrelation verhindern.

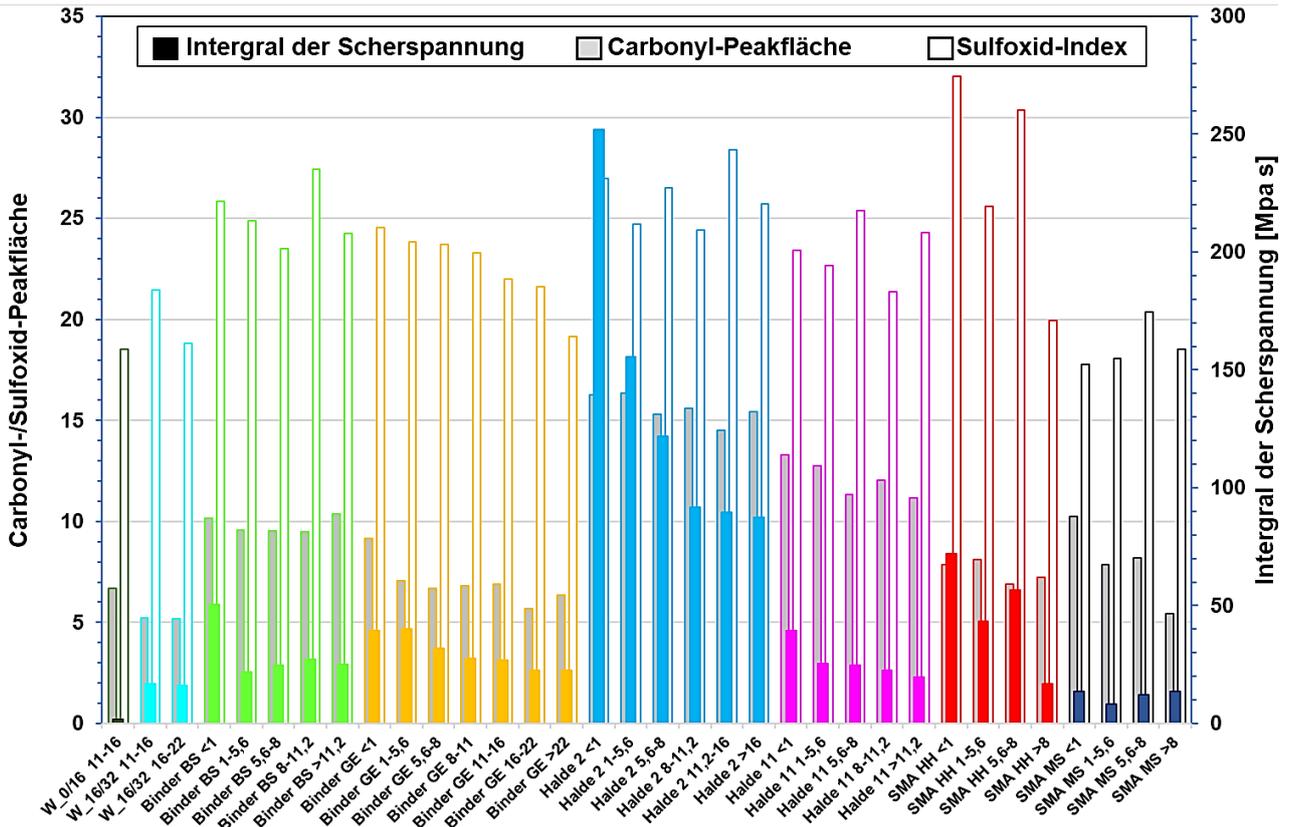


Abbildung 77. Korrelation des Integrals der Scherspannung mit den Carbonyl- und Sulfoxid-Peakflächen.

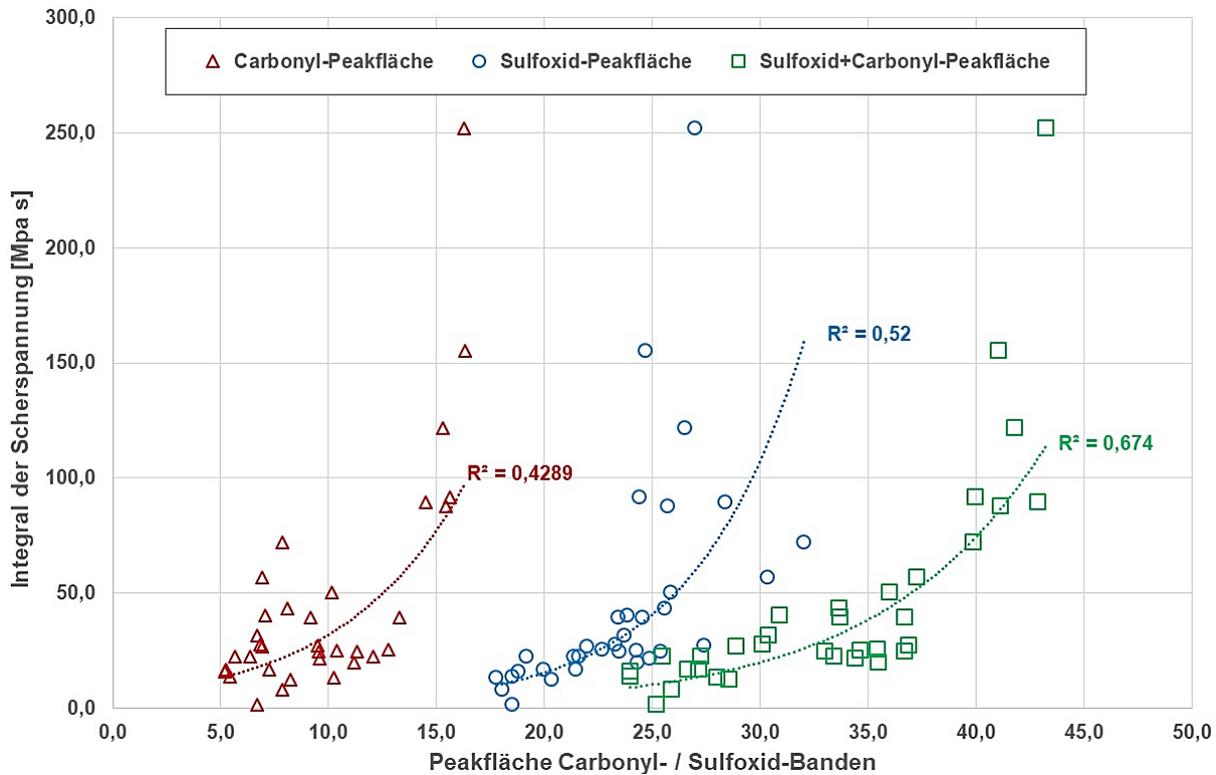


Abbildung 78. Korrelation des Integrals der Scherspannung mit den Carbonyl- und Sulfoxid-Peakflächen.

8.2.4 Morphologie der Gesteinskörnungen < 1 mm

Für die Gesteinskörnungen der Fraktionen < 1 mm liegen die mittels Morpho-Scans ermittelten granulometrischen Kennwerte für die Asphaltgranulate Nr. 1 bis 6 vor (Abbildung 76 bis Abbildung 81).

Area entspricht der Anzahl an Pixeln zur Abbildung eines Gesteinspartikels. Das jeweilige Diagramm oben links (Area) zeigt die Häufigkeitsverteilung der Pixelanzahl der einzelnen Körner. Je höher die Pixelanzahl ist, desto grösser ist das Korn. Das jeweilige Diagramm oben rechts (CE Diameter) zeigt die Häufigkeitsverteilung der Korndurchmesser in μm . Diese beiden Diagramme sind qualitativ vergleichbar.

Die Rundheit der Partikel (Circularity) ist als Häufigkeitsverteilung jeweils unten links aufgeführt. Ein Wert von 1 steht für ein Korn, das in der aufgenommenen Projektion einem Kreis entspricht.

Das vierte Diagramm jeweils unten rechts (Volume Transformation) zeigt die Überlagerung der beiden Diagramme Korndurchmesser (CE Diameter) und Rundheit (Circularity). Mit den unterschiedlichen Blautönen werden die Häufigkeiten von Körnern mit gleichem Durchmesser und gleicher Rundheit abgebildet. So zeigt sich beispielsweise, dass die Gesteinskörnungen aus den Fraktionen < 1 mm der Asphaltgranulate Nr. 2 Binder - BS und Nr. 6 Halde 11 ähnlich sind und im Korngrössenbereich zwischen 1 und 10 μm eine grosse Anzahl an Körnern mit ausgeprägter Rundheit aufweist, während das Gegenteil für den Bereich 0,1 bis 1 μm gilt.

Die Gesteinskörnungsfraction < 1 mm für Asphaltgranulat Nr. 3 SMA - MS unterscheidet sich von allen anderen deutlich. Hier ist zum einen ein sehr hoher Anteil an feinen Körnern auffällig und zum anderen haben hier alle Körner eine mässige bis schlechte Rundheit.

Die Gesteinskörnungsfractionen < 1 mm für die Asphaltgranulate Nr. 1 SMA HH, Nr. 4 Binder GE, Nr. 5 Halde 2 sind untereinander ähnlich und zeigen ein Korngrössenspektrum, das eher durch grössere Körner dominiert wird (> 1 μm). Überwiegend ist die Rundheit ausgeprägt, mit einem Schwerpunkt im Kornbereich zwischen 1 und 10 μm .

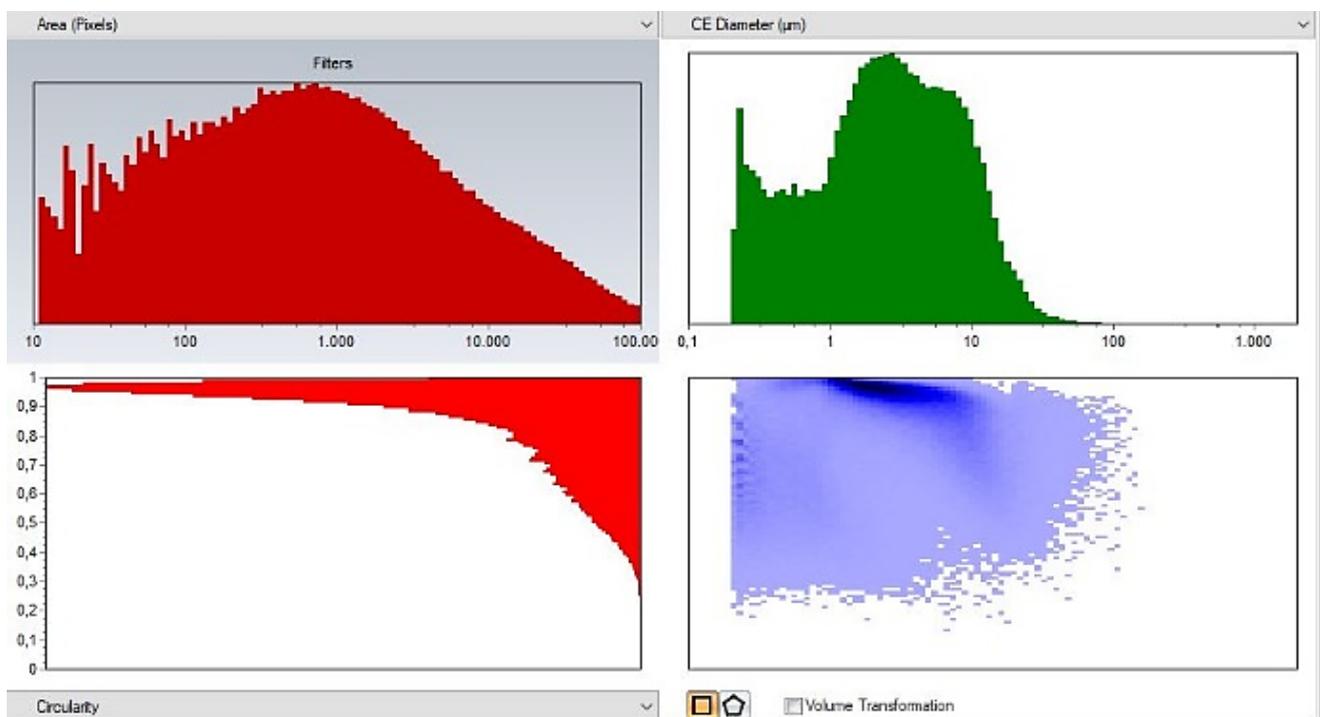


Abbildung 79. Morphologische Charakterisierung der aus Asphaltgranulat Nr. 1 SMA HH extrahierten Gesteinskörnungsfraction < 1 mm.

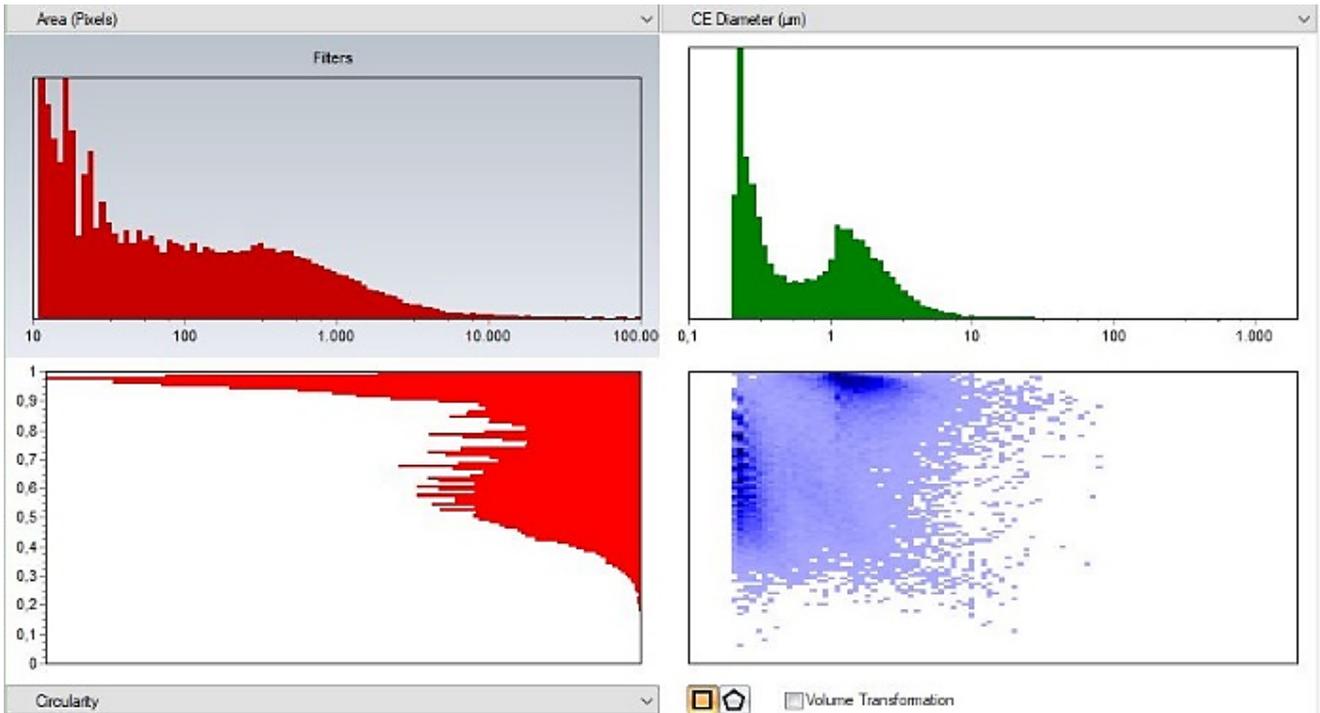


Abbildung 80. Morphologische Charakterisierung der aus Asphaltgranulat Nr. 2 Binder - BS extrahierten Gesteinskörnungsfraction < 1 mm.

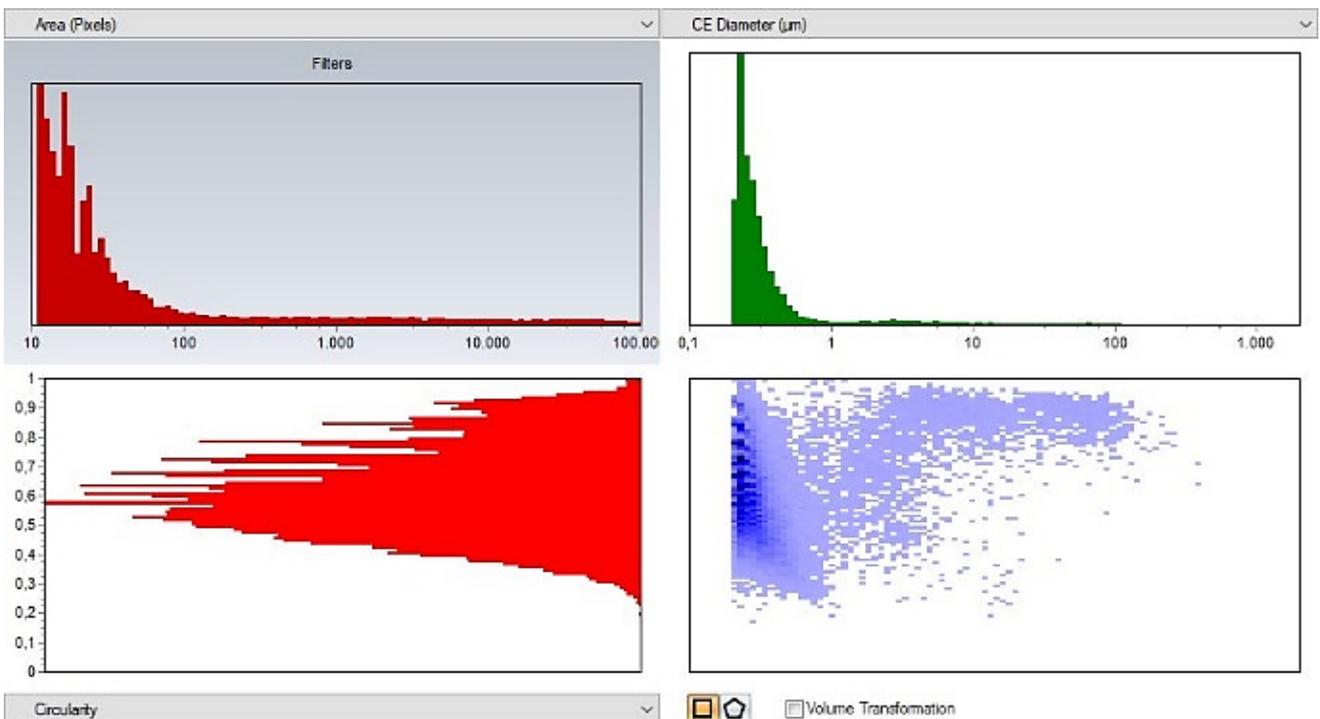


Abbildung 81. Morphologische Charakterisierung der aus Asphaltgranulat Nr. 3 SMA - MS extrahierten Gesteinskörnungsfraction < 1 mm.

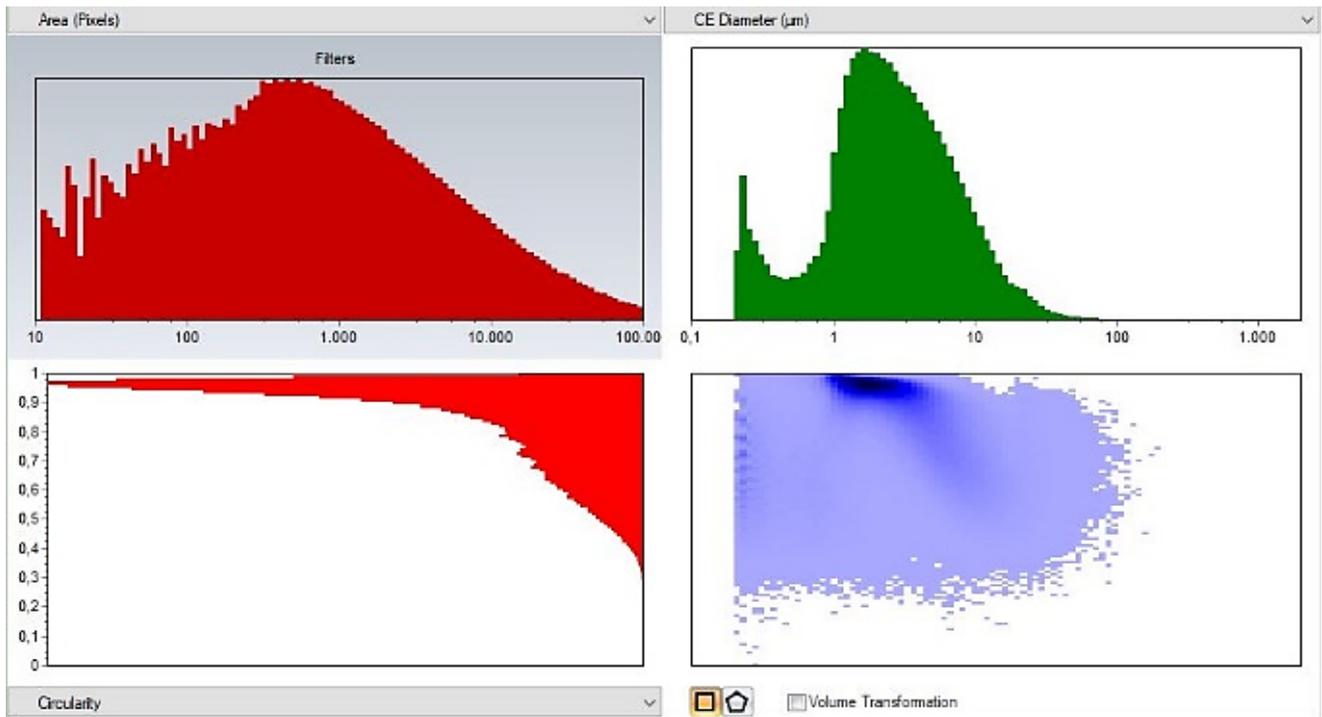


Abbildung 82. Morphologische Charakterisierung der aus Asphaltgranulat Nr. 4 Binder - GE extrahierten Gesteinskörnungsfraction < 1 mm.

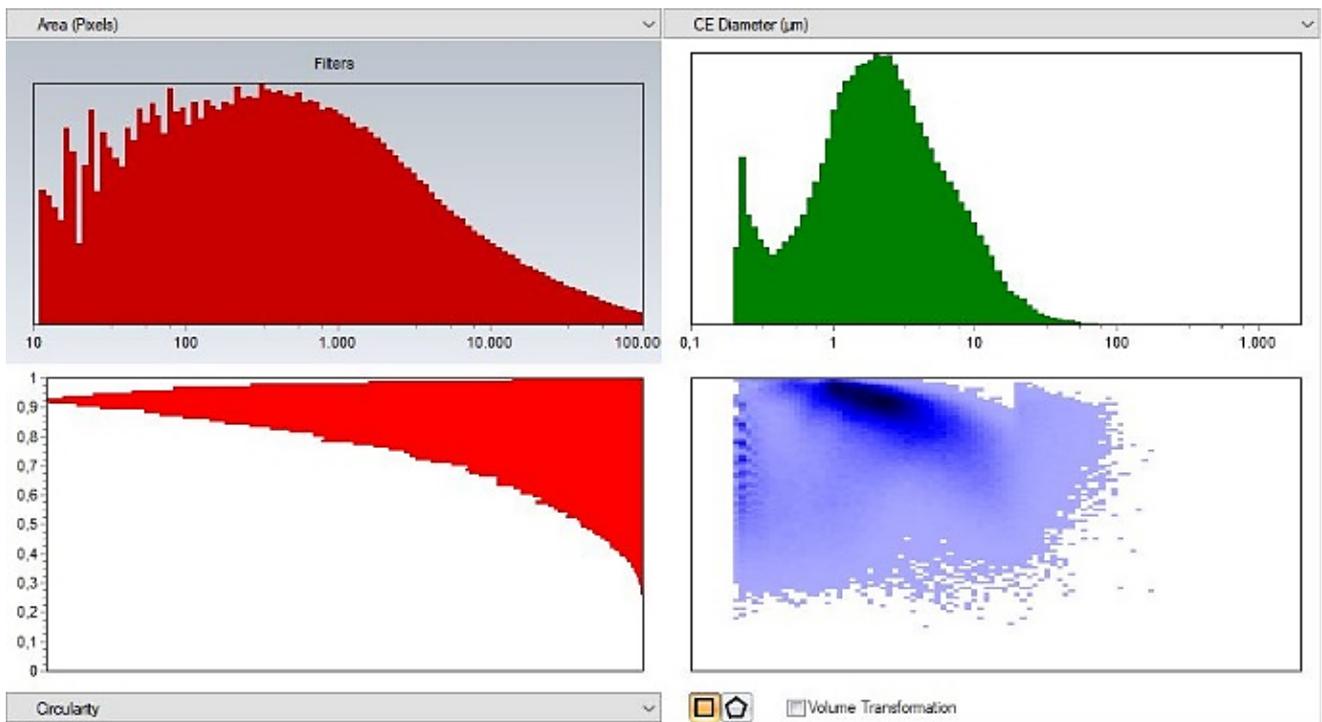


Abbildung 83. Morphologische Charakterisierung der aus Asphaltgranulat Nr. 5 Halde 2 extrahierten Gesteinskörnungsfraction < 1 mm.

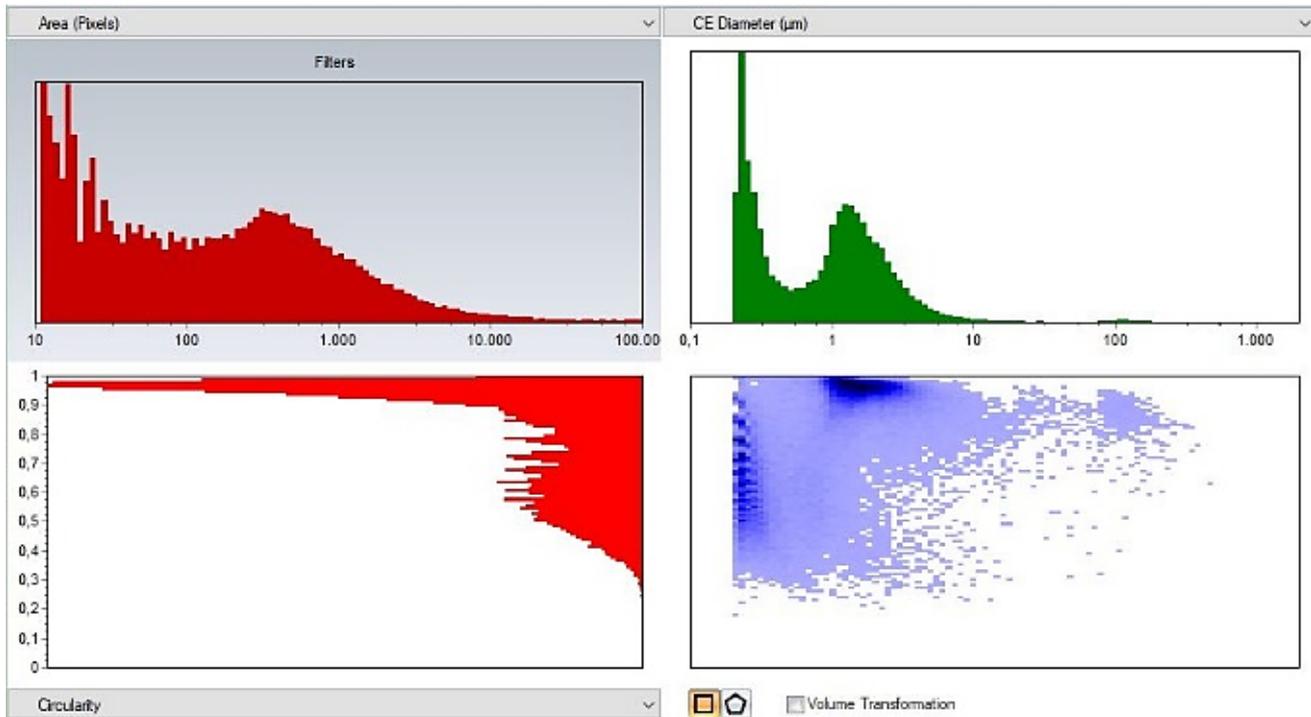


Abbildung 84. Morphologische Charakterisierung der aus den Asphaltgranulaten Nr. 6 Halde 11 extrahierten Gesteinskörnungsfraction < 1 mm.

8.3 Zusammenfassende Erkenntnisse zum Management und Analyse von Asphaltgranulat

Die selektive Gewinnung und Lagerung des Ausbausphaltes (schichtweises Fräsen) ist eine bekanntermaßen wichtige Komponente zur Optimierung des Stoffstrom-Managements und zur Steigerung der Wiederverwendungsanteile, besonders in Asphaltdeckschichten. Eine weitere, bisher weniger genutzte Vorgehensweise zur Optimierung des Stoffstrom-Managements ist die Fraktionierung der Asphaltgranulate. Bisherige Ansätze enden meist bei einer Aufteilung in die Stückgrößengruppen 0/8 mm und 8/X mm. Da mit abnehmender Stückgröße nicht nur der Bindemittelgehalt ansteigt, sondern auch die Bindemittelhärte zunimmt, liegen in einer weitergehenden Fraktionierung hohe Potenziale zur Steigerung der Rezepttreue eines Asphaltmischgutes mit hohen Asphaltgranulatanteilen. Die rheologische Charakterisierung der Bindemittel in den Asphaltgranulaten wird dabei als wichtigste Komponente zur Qualitätssicherung angesehen. Hierfür gibt es einfache und schnelle Prüfmethode im DSR (z. B. AL Identifikation), mit denen die Äquivalenzmodultemperatur bestimmt und vorhandene Modifizierungen identifiziert werden können. Weitergehende Untersuchungen können hilfreich sein (z.B. Kälteeigenschaften des Bindemittels oder Füllereigenschaften), sind aber für das Stoffstrom-Management nicht zwingend notwendig.

9 AP 5: Erstellung Recyclingleitfaden

Im Rahmen des Asphaltrecyclings sind zur Realisierung von möglichst hohen Zugabeanteilen verschiedene Aspekte entlang der gesamten Produktionskette zu berücksichtigen. Beginnend bei der Gewinnung, Aufbereitung und Lagerung des Asphaltgranulats (lagenweises Fräsen, Brechen und Siebung, überdachte Lagerung etc.), sowie des Haldenmanagement (Beurteilung der Gleichmäßigkeit der Halde) folgt die Mischgutkonzeptions (Mix Design) des Asphalts mit hohen Zugabeanteilen des Asphaltgranulats. Weiterhin bestehen anlagentechnische Anforderungen an die Asphaltmischwerke. Beim Mix Design von Asphalt mit Asphaltgranulat sind konventionelle Kriterien (Korngrößenverteilung, Bindemittelgehalt, Erweichungspunkt) zu berücksichtigen. Als entscheidend für ein zielsichereres Mix Design wird die Betrachtung der rheologischen Materialeigenschaften auf Bitumen- / Mastixebene angesehen.

Daher wurde im Rahmen des Forschungsprojekts ein Leitfaden zusammengestellt, der eine systematische Vorgehensweise für das Mixdesign auf Basis rheologischer Untersuchungen darlegt. Die darin enthaltenen Ausführungen zum Heißrecycling mit hohen Zugabeanteilen (bis 70 M.-%) geben Hinweise zur laborpraktischen Umsetzung der rheologischen Charakterisierung des Bindemittels aus Asphaltgranulat und des Bindemitteldesigns für die Herstellung von Asphalt unter Zugabe des Asphaltgranulats und ggf. eines Regenerators. Der Leitfaden liegt als separates Dokument ergänzend zum Schlussbericht vor.

10 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

In diesem Projekt wurde die mehrfache Wiederverwendung von Ausbausphalt im Labor simuliert. Die Untersuchungen erfolgten an zwei Asphaltmischgutsorten über drei Wiederverwendungszyklen, nämlich für Asphaltdeckschichtmischgut aus Splittmastixasphalt des Typs SMA 11 mit 50 % Zugabeanteil an Asphaltgranulat und ein Asphaltbinderschichtmischgut aus Asphaltbeton des Typs AC B 16 mit 70 % Zugabeanteil.

Die selektive Gewinnung und Lagerung des Ausbausphaltes (schichtweises Fräsen) ist eine bekanntermaßen wichtige Komponente zur Optimierung des Stoffstrom-Managements und zur Steigerung der Wiederverwendungsanteile, besonders in Asphaltdeckschichten. Eine weitere, bisher weniger genutzte Vorgehensweise zur Optimierung des Stoffstrom-Managements ist in diesem Bericht angesprochen: die Fraktionierung der Asphaltgranulate. Bisherige Ansätze enden meist bei einer Aufteilung in die Stückgrößengruppen 0/8 mm und 8/X mm. Da mit abnehmender Stückgröße nicht nur der Bindemittelgehalt ansteigt, sondern auch die Bindemittelhärte zunimmt, liegen in einer weitergehenden Fraktionierung hohe Potenziale zur Steigerung der Rezepttreue eines Asphaltmischgutes mit hohen Asphaltgranulatanteilen. Die rheologische Charakterisierung der Bindemittel in den Asphaltgranulaten wird dabei als wichtigste Komponente zur Qualitätssicherung angesehen. Hierfür gibt es einfache und schnelle Prüfmethode im Dynamischen Scherrheometer, mit denen die Äquivalenzmodul-temperatur bestimmt und vorhandene Modifizierungen identifiziert werden können. Weitergehende Untersuchungen können hilfreich sein (z. B. Kälteeigenschaften des Bindemittels oder Füllereigenschaften), sind aber für das Stoffstrom-Management nicht zwingend notwendig.

Die Simulation der mehrfachen Wiederverwendung im Labor inklusive der großtechnischen Validierung der nach dem jeweiligen Regenerationsschritt resultierenden Gebrauchseigenschaften des Asphalts ist überaus material- und arbeitsintensiv. Denn die gewählte Wiederverwendungsrate von 50 bzw. 70 % erfordert die Rückgewinnung einer beachtlichen Menge an Mischgutkomponenten sowie die schrittweise Alterung des Bindemittels im Labor. Daher mussten die Untersuchungen auf die zwei unterschiedlichen Asphaltmischgutsorten und auf drei Wiederverwendungszyklen beschränkt bleiben.

Als Ausgangsprodukt wurde reales Asphaltgranulat verwendet. In jedem Wiederverwendungsschritt wurde das jeweils mit Asphaltgranulat und mit frischen Komponenten vermischte Asphaltmischgut im Ofen gealtert und das so erhaltene laborgealterte Asphaltmischgut als künstliches Asphaltgranulat für den nächsten Wiederverwendungsschritt verwendet. Dieser Zyklus wurde drei Mal wiederholt.

Dieses Vorgehen bildet die realen Verhältnisse nur mit grober Näherung ab. Einerseits ist die Laboralterung zeitraffend und beschränkt auf ausgewählte thermische Effekte. Andererseits erfährt das Material eine andere „Geschichte“, denn es ist in der Wirklichkeit über den langen Zeitraum einer dreifachen Wiederverwendung (z. B. 60 Jahre) nicht möglich, die gleichen Zuschlagstoffe, sowohl Mineralstoffe als auch Bindemittel und Regeneratoren, einzusetzen. Auch die Schädigung der Mineralstoffe durch Brechen und Fräsen, wie dies bei der realen Rückgewinnung von Asphalt erfolgt, kann im Labor nicht in Betracht gezogen werden, sondern primär nur die alterungsbedingten Veränderungen im Bindemittel. Andererseits bietet nur die Laborstudie überhaupt eine Möglichkeit, die mehrfache Wiederverwendung systematisch zu untersuchen.

Die Alterung im Labor von derart grossen Materialmengen ist überaus anspruchsvoll. Beispielweise mussten 550 kg an AC B 16 gealtert werden, um nach 3 Zyklen auch noch ausreichend Material für die gebrauchsvororientierten Asphaltprüfungen vorrätig zu haben. Die Laboralterung von derart grossen Materialmengen ist zeitintensiv. Die Beschleunigung der Alterung im Labor kann praktisch nur durch die Erhöhung der Temperatur erreicht werden, wodurch auch die Reaktionsgeschwindigkeit von Bitumen mit Sauerstoff gegenüber den realen Verhältnissen deutlich erhöht ist. Da aber die Art der chemischen Reaktionen sich mit zunehmender Temperatur ändern, ist nach heutigem Stand des Wissens für die Langzeitalterung die maximale Temperatur unterhalb 100°C zu halten.

Die Simulation der Alterung im Labor durch Ofenalterung hat gezeigt, dass diese bei den zwei Mischguttypen sehr unterschiedlich verlief. Bei AC B 16 führte die Mischgutalterung innerhalb von 30 h bei 85°C wieder zu einem ähnlich versteiften Bindemittel, wie im eingesetzten natürlichen Asphaltgranulat. Hingegen führte die Alterung von SMA 11 unter verschärften Bedingungen während 168 h bei 95°C nicht zu einer vergleichbaren

Verhärtung wie beim eingesetzten Asphaltgranulat. Dies ist vermutlich nicht allein auf den höheren Bindemittelanteil (6 % gegenüber 4.6 %) zurückzuführen, sondern auch auf die Art des Zugabebindemittels und auf den geringeren Zugabeanteil an Asphaltgranulat, wodurch auch mehr Frischbitumen zugegeben werden musste. Aufgrund der reduzierten Alterung ist eine Aussage bezüglich der mehrfachen Wiederverwendung von SMA 11 nur begrenzt möglich, wobei zu berücksichtigen ist, dass bei einer Zugaberate von 50 % der Einfluss des mehrfach gealterten Bindemittels gering ist.

Das Bitumen-Typisierungs-Schnell-Verfahren (BTSV) wurde im Projekt mehrfach eingesetzt. Die BTSV-Kennwerte, also Äqui-Schermodultemperatur $T(G^*=15\text{kPa})$ und zugehöriger Phasenwinkel $\delta@T(G^*=15\text{kPa})$ sind geeignet, einen Regenerator in Bezug auf seine rheologische Wirksamkeit und seine Dauerhaftigkeit bei mehrfacher Wiederverwendung des Asphalts zu beurteilen. So kann das bestgeeignete Regenerationsmittel in Art und Menge für einen spezifischen Anwendungszweck ausgewählt werden.

Für die Dosierung des Zugabebindemittels, mit oder ohne Regenerator, wurde die BTSV-Temperatur als Zielwert definiert. Dieser liess sich zuverlässig erreichen, allerdings musste dazu auch die Alterung des Mischgutes bei der Herstellung berücksichtigt werden. Die Dosierung war hingegen für jeden Schritt unterschiedlich und liess sich nicht basierend auf den Eigenschaften der Ausgangsmaterialien ableiten. Zudem wurde bei AC B 16 als Trend festgestellt, dass für jeden Wiederverwendungsschritt zunehmend mehr Regenerationsmittel benötigt wurde, obwohl die BTSV-Temperatur des künstlichen Asphaltgranulats gleich war. Das Verhalten von natürlich gealtertem und künstlich im Labor gealterten Asphaltgranulat war deutlich unterschiedlich. So waren für die Regeneration des natürlichen Asphaltgranulats deutlich höhere Konzentrationen an Regenerationsmittel notwendig als beim künstlich gealterten Asphaltgranulat.

Wie aus früheren Studien bekannt ist, veränderte das Regenerationsmittel im Vergleich zu einem reinen Bitumen gezielt die Temperatur BTSV, nicht aber den Phasenwinkel. Während ohne Zugabe von Regenerationsmittel der Phasenwinkel vollständig wiederhergestellt werden konnte, war dies bei der Zugabe von Regenerator nicht oder in geringerem Masse möglich. Bei 1 bis 2 % Regeneratorzugabe wurde der Phasenwinkel teilweise regeneriert, dies aber auch weil zusätzlich noch modifiziertes Frischbitumen zugefügt worden ist.

Es ist auch bekannt, dass das: BTSV nur im Bereich der oberen Gebrauchstemperaturen gültig ist (regeneriertes regeneriertes Bitumen evtl. zu weich). Es wird daher empfohlen, die ermittelte Dosierung anhand von Performanceprüfungen (am großtechnisch hergestellten Asphaltmischgut oder an der Mastix im DSR) zu evaluieren.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die Untersuchungsergebnisse im Labor keinerlei Hinweis darauf geben, dass eine mehrfache Wiederverwendung von Asphalt nicht gelingen sollte. Allerdings können aufgrund des eingeschränkten Untersuchungsumfangs und der oben ausgeführten laborpraktischen Vereinfachungen aus den Prüfergebnissen keine allgemeingültigen Aussagen zur mehrfachen Wiederverwendung abgeleitet werden. Es werden aber im Resultat eindeutige Trends aufgezeigt, die als wichtiger Ausgangspunkt für weitere Forschung dienen und auf breiterer Basis analysiert werden müssen. Die Einbeziehung von Pilotstrecken ist dann zweckmäßig.

11 Anhang

Interview mit einem deutschen Unternehmen

	Frage	Antwort
Allgemeines	Haben Sie Probleme mit Ausbauasphalt (Überschuss, Qualität, Verarbeitung, Absatz,)?	Überschüsse an AG gibt es derzeit kaum noch. Regional begrenzt kann dies an wenigen Asphaltmischanlagen (AMA) auftreten. Der vom DAV publizierte Verwertungsanteil (heiß) von 85 % bezieht sich auf die Mengen, die an den MA ankommen. Die verbleibenden 15 % sind i.d.R. nicht im Zugriff der Asphaltindustrie.
	Warum wird nicht mehr recycelt?	
	<ul style="list-style-type: none"> regelwerksbedingt 	Viele Regionen in Deutschland lassen bereits einen 2-Sorten-Sprung zu. Da wo dies noch nicht zulässig ist, kann es auch mal zu Überschüssen kommen.
	<ul style="list-style-type: none"> Skepsis seitens AG 	Skepsis bis hin zum Ausschluss bestehen meist nur bei kommunalen Auftraggebern oder Kreisbehörden. Landes- und Bundesbehörden unterstützen die AG-Verwendung im Allgemeinen.
	<ul style="list-style-type: none"> anlagentechnische Ausstattung 	Mischanlagen mit Kaltzugabe können bei entsprechender AG-Qualität und trockenem Material einen AG-Anteil von bis zu 40 M.-% bei der Mischgutherstellung verarbeiten. Dies reicht meist schon für einen kontinuierlichen Verbrauch des AG aus.
	Was passiert mit den Halden Deponien (Hintergrund, dass große Mengen auf Lager)?	
<ul style="list-style-type: none"> wie lange deponierbar, wie kontrolliert 	Momentan sind meist keine größeren und länger liegenden AG-Halden an den AMA zu verzeichnen. Stellenweise bleibt AG länger liegen, wenn das Bindemittel darin zu hart ist und nur in geringen Mengen verarbeitet werden kann.	
<ul style="list-style-type: none"> thermische Verwertung relevant? / Mengen (einzige Anlage in den NL) --> für AMA stellt sich diese Frage eigentlich nicht, da dies von Behörden entschieden wird 	Mit der thermischen Verwertung/(Entsorgung) beschäftigen sich nur einige wenige Spezial-AMA, die teerhaltiges Material sammeln und meist per Schiff zum Verwerter in NL transportieren. Es müssen entsprechende Genehmigungen und Zertifizierungen vorliegen. Die Kapazitäten in den NL reichen aber nicht aus. Ein entsprechender Standort in D wäre wünschenswert.	

	Wird Downcycling (gezwungenermaßen) praktiziert? beispielsweise auf untergeordnetem Straßennetz	Auch hier gibt es einige wenige Sonder-AMA, die gleichzeitig eine Aufbereitungsanlage für RC-Baustoffe am Standort haben. Sonst nicht, da die 15 % Anteil die nicht heiß verwertet werden auch nicht an die MA kommen.
	Erfahrungen mit Mehrfachrecycling (in der Praxis vermutlich unerheblich, da keine Wahl	Vermutlich ja, aber dies lässt sich allenfalls an der Bindemittelhärte im AG erahnen. Gezielte Untersuchungen erfolgen ja im MARS-Projekt.
	Wie wird der Ausbaupasphalt aufbereitet?	Separate Unternehmen kommen i.d.R. mit mobilen Aufbereitungsanlagen an die AMA und bereiten die gesammelten Massen auf. In Ausnahmefällen gibt es eine laufende Aufbreitung durch stationäre Sieb- oder Brechanlagen. In der Regel werden für die Aufbereitung ein Backenbrecher und eine Siebanlage eingesetzt. Es gibt auch Spezialbrecher (Fräsbrecher / Granulatoren), die aber eine vergleichsweise geringere Leistungsfähigkeit haben.
Vor Einbau - Beurteilung / Auswahl / Aufbereitung / Lagerung	Welche Fraktionen Ausbaupasphalt werden hergestellt	Meist erfolgt eine Aufbereitung in die Stückgrößenfraktionen 0/8 mm, 8/16 mm oder 0/16 mm (für Deck- und Binderschichten) sowie 0/32 mm (für Tragschichten).
	Anreize für besseres Recyclingmanagement (ausschließlich monetär?)	Grundsätzlich wäre für ein besseres Recyclingmanagement eine häufigere lagenweise Gewinnung des Ausbaupasphaltes notwendig. Nur Deckenfräsgut wird allerdings schon öfter angeliefert. Ein umfangreicheres Recyclingmanagement ist aber auch heute schon an vielen AMA vorhanden, um alleine in allen Schichten des Asphaltüberbaus AG einsetzen zu können.
	Gibt es Kriterien für die Annahme von Ausbaupasphalt?	Annahmebedingungen regeln die AGB zur Annahme von Ausbaupasphalt. I.d.R. Voruntersuchungen des AG herangezogen. An der AMA findet an festgelegten Stellen eine Sichtprüfung statt (an der Waage und meist auch beim Abkippen), bei Auffälligkeiten wird der Lack-Test nach AP 27/1 angewendet.
	Gibt es eine Triage für Ausbaupasphalt (z. B. bezüglich Mischgutsorte, Belagsschichte, etc.) oder wird alles auf einem Haufen gelagert.	Das Ziel ist schon, hochwertiges Fräsgut für Deckschichten zu gewinnen, wenn denn ausreichende Baumaßnahmen hierfür vorliegen. Für AMA ist dies aber oft aus Platzgründen eine organisatorische Herausforderung.
	Erfahrungen mit DSR-Kennwerten, DSR-Prüfungen; Erprobung und routinemäßiger Einsatz?	Ja, in zentralen Laboren ist dies schon zu einer gewissen Routine geworden. Ein Einsatz an jeder Mischanlage scheint aber bisher noch nicht möglich zu sein (Empfindlichkeit und Kosten der Geräte).

	Kennwerte zur Bestimmung der Regeneration --> Wie wird dies / kann dies am AMA-Mischgut kontrolliert werden?	Basis ist heute immer noch der EP RuK, der als EPres zur Bewertung in der Erstprüfung, der WPK und der Kontrollprüfung herangezogen. Hier bietet der BTSV zukünftig die bessere Beurteilungsbasis. Es wird noch keine regelmäßige Regeneration mittels sogenannter Regeneratoren (Rejuvenatoren) durchgeführt. Lediglich für Test- und Erprobungsstrecken wurden diese Regenerationsmittel eingesetzt.
Herstellung und Einbau	Welches Recyclingverfahren verwenden Sie (Kaltzugabe, Paralleltrommel, 100%-Recyclingtrommel)	Alle gängigen Verfahren sind an den AMA vorhanden. Kaltzugabe (direkt und über das Becherwerk) Mittenzugabe Paralleltrommel (befeuert, ca. 130 °C und mit Heißgas, ca. 160 °C)
	Verwenden Sie Regenerationsmittel?	Nein, nur Rahmen von Erprobungen (siehe oben)
	Schichtenweise Zugabemenge in der Praxis: routinemäßig vs. Maximal	In Abhängigkeit von der AG-Klassifizierung und der vorhandenen Anlagentechnik wird versucht, den maximal zulässigen Anteil zu nutzen.
Nach Einbau / Qual.kontrolle	Schichtenweise Zugabemenge in der Praxis: routinemäßig vs. Maximal	Über die Kette Erstprüfung-WPK-Kontrollprüfung wird der Einfluss der AG-Zugabe auf die Qualität direkt und indirekt überprüft.
	Was passiert mit den Halden Deponien (Hintergrund, dass große Mengen auf Lager)?	
	<ul style="list-style-type: none"> wie lange deponierbar, wie kontrolliert 	Ggf. wird nach langer Liegedauer noch einmal das Bindemittel überprüft.
	<ul style="list-style-type: none"> thermische Verwertung relevant? / Mengen (einzige Anlage in den NL) --> für AMA stellt sich diese Frage eigentlich nicht, da dies von Behörden entschieden wird... 	s.o.

Interview mit dem Unternehmen MOAG AG

	Frage	Antwort
	Informationen zu den Anlagen	6 Mischanlagen an 5 Produktionsorten, wovon 3 Mischanlagen der neusten Generation (100% Recycling), 3 Anlagen mit Paralleltrommeln jährliche Asphaltproduktion: total 600'000 t (alle Anlagen)
Allgemeines	Haben Sie Probleme mit Ausbauasphalt (Überschuss, Qualität, Verarbeitung, Absatz,)?	es fallen jährlich etwa 10% Überschuss an, 90% können wiederverwertet werden.
	Warum wird nicht mehr recycelt? • regelwerksbedingt	in Deckschichten werden oft Spezialbeläge ohne/geringem Recyclinganteil eingesetzt, wo technische Grenzen (Ausfallkörnung in semidichten lärmarmen Belägen) und normative Grenzen ein höheres Recycling verhindern gesamthaft beträgt der Recyclinganteil im Schnitt 55% bei den 100%-Anlagen und 40% bei den Anlagen mit Paralleltrommeln
	• Skepsis seitens AG	
	• anlagentechnische Ausstattung	die modernen Anlagen würden höhere Recyclingraten ermöglichen
	Was passiert mit den Halden Deponien (Hintergrund, dass große Mengen auf Lager)? • wie lange deponierbar, wie kontrolliert	Ausbauasphalt wird maximal für ein Jahr auf Halde gelagert, bevor es aufbereitet wird.
	• thermische Verwertung relevant? / Mengen (einzige Anlage in den NL) - -> für AMA stellt sich diese Frage eigentlich nicht, da dies von Behörden entschieden wird	wird nicht durchgeführt
	Wird Downcycling (gezwungenermaßen) praktiziert? beispielsweise auf untergeordnetem Straßennetz	es wird nicht sortenrein aufbereitet und das RAP wird für alle Mischgutsorten eingesetzt, wo die Korngrößenverteilung passt

	Erfahrungen mit Mehrfachrecycling (in der Praxis vermutlich unerheblich, da keine Wahl	nicht erkennbar in der Mischanlage
	Wie wird der Ausbauasphalt aufbereitet?	über Brecher und Aussiebung
Vor Einbau - Beurteilung / Auswahl / Aufbereitung / Lagerung	Welche Fraktionen Ausbauasphalt werden hergestellt	Es werden 3 Fraktionen hergestellt: <ul style="list-style-type: none"> • 0/16 mm für Trag/Fundationsschichten • 0/8 mm für Deck/Binderschichten • Sekundärsplitt mit sehr niedrigem Bindemittelgehalt (mit Prallbrecher), Verwendung als Splitt in neuem Mischgut (dies erlaubt eine höhere Dosis an Zugabebindemittel zur Regeneration)
	Anreize für besseres Recyclingmanagement (ausschließlich monetär?)	momentan ist das bestehende Recyclingmanagement ausreichend
	Gibt es Kriterien für die Annahme von Ausbauasphalt?	Folgende Materialien werden nicht angenommen: <ul style="list-style-type: none"> - teerhaltigen Materialien - Gussasphalt - Oberflächenbehandlungen - mit ungebundenem Material verunreinigt
	Gibt es eine Triage für Ausbauasphalt (z. B. bezüglich Mischgutsorte, Belagschichte, etc.) oder wird alles auf einem Haufen gelagert.	nur Deckschichten separat, sonst keine Trennung
	Qualitätskontrolle	das aufbereitete Asphaltgranulat wird alle 500t untersucht (eine Probe: Siebkurve, Bindemittelgehalt, Penetration, Erweichungspunkt R+K am rückgew. Bindemittel). Die Homogenität wird nicht untersucht, Rückschlüsse ergeben sich durch die erhaltenen Werte über die Zeit.
	Erfahrungen mit DSR-Kennwerten, DSR-Prüfungen; Erprobung und routinemäßiger Einsatz?	noch wenig Erfahrung, erst in einigen Projekten durchgeführt

	Kennwerte zur Bestimmung der Regeneration --> Wie wird dies / kann dies am AMA-Mischgut kontrolliert werden?	keine Angaben
Herstellung und Einbau	Welches Recyclingverfahren verwenden Sie (Kaltzugabe, Paralleltrommel, 100%-Recyclingtrommel)	
	Verwenden Sie Regenerationsmittel?	nein
	Schichtenweise Zugabemenge in der Praxis: routinemäßig vs. Maximal	Ausbau und Fräsen liegen ausserhalb der Kontrolle der Mischanlage
Nach Einbau / Qual.kontrolle	Schichtenweise Zugabemenge in der Praxis: routinemäßig vs. Maximal	ausserhalb der Kontrolle der Mischanlage
	Was passiert mit den Halden Deponien (Hintergrund, dass große Mengen auf Lager)?	
	<ul style="list-style-type: none"> • wie lange deponierbar, wie kontrolliert 	
	<ul style="list-style-type: none"> • thermische Verwertung relevant? / Mengen (einzige Anlage in den NL) - -> für AMA stellt sich diese Frage eigentlich nicht, da dies von Behörden entschieden wird... 	

Interview mit dem Unternehmen CATRAM AG

	Frage	Antwort
	Informationen zu den Anlagen	4 Anlagen an 3 Standorten, wovon eine 100%-Recyclinganlage, 2 mit Paralleltrommel und eine nur mit Kaltzugabe. Gesamtproduktion: 200'000t pro Jahr. Alle Anlagen liegen im Kanton Graubünden und sind ausgerichtet auf die Bedürfnisse und Gesetzgebung dieses Kantons
Allgemeines	Haben Sie Probleme mit Ausbauasphalt (Überschuss, Qualität, Verarbeitung, Absatz,)?	es gibt keinen Überschuss, da im Gegensatz zu anderen Kantonen in der Schweiz die Verwendung in ungebundenen Gemischen erlaubt ist.
	Warum wird nicht mehr recycelt? • regelwerksbedingt	Der Einsatz in Deckschichten ist im Kanton nicht erlaubt, in Heissmischfundationsschichten können bis 100% RAP verwendet werden. Der durchschnittliche Recyclinganteil beträgt 35% über alle Anlagen.
	• Skepsis seitens AG	
	• anlagentechnische Ausstattung	<ul style="list-style-type: none"> • bei Anlagen mit Paralleltrommel ist maximal 50% Recyclingzugabe möglich, da sonst die Grenzen der Luftreinhalteverordnung nicht eingehalten werden können. • Graubünden ist ein Bergkanton, wo oft relativ weiches Bitumen 100/150 eingesetzt wird. Das RAP ist trotzdem hart und beschränkt daher den Recyclinganteil bei der Verwendung eines Zugabebitumens 250/300.
	Was passiert mit den Halden Deponien (Hintergrund, dass große Mengen auf Lager)? • wie lange deponierbar, wie kontrolliert	keine grossen Halden, Material wird fortlaufen verwendet
• thermische Verwertung relevant? / Mengen (einzige Anlage in den NL) - -> für AMA stellt sich diese Frage eigentlich nicht, da dies von Behörden entschieden wird	nein, nicht notwendig da kein Überschuss	

	Wird Downcycling (gezwungenermaßen) praktiziert? beispielsweise auf untergeordnetem Straßennetz	ja
	Erfahrungen mit Mehrfachrecycling (in der Praxis vermutlich unerheblich, da keine Wahl	nicht relevant
	Wie wird der Ausbauasphalt aufbereitet?	<ul style="list-style-type: none"> • alles Material wird gebrochen, wobei bei der Beschickung des Brechers mit dem Radlader darauf geachtet wird, dass abwechslungsweise unterschiedliches Material eingefüllt wird. Eine weitere Homogenisierung des gebrochenen Materials entsteht dadurch, dass in der Halle von der einen Seite befüllt und von der anderen Seite entnommen wird.
Vor Einbau - Beurteilung / Auswahl / Aufbereitung / Lagerung	Welche Fraktionen Ausbauasphalt werden hergestellt	<ul style="list-style-type: none"> • es wird nur ein Ausbauasphalt 32 RA 0/22 hergestellt. Da kein RAP in Deckschichten erlaubt ist, kann dieses Material allgemein eingesetzt werden
	Anreize für besseres Recyclingmanagement (ausschließlich monetär?)	zukünftig wird der Einsatz in Deckschichten vermutlich zugelassen, aber dann ist der PSV-Wert ein Problem. Im Gegensatz zur restlichen Schweiz ist die Totalsanierung aller Schichten die Regel und nicht die Sanierung der oberen Schichten
	Gibt es Kriterien für die Annahme von Ausbauasphalt?	<ul style="list-style-type: none"> - kein Gussasphalt - kein Planiermaterial - kein Gussasphalt - keine Dichtungsbahnen
	Gibt es eine Triage für Ausbauasphalt (z. B. bezüglich Mischgutsorte, Belagschichte, etc.) oder wird alles auf einem Haufen gelagert.	es werden drei Halden geführt: <ul style="list-style-type: none"> • Fräsmaterial • Belagsaufbruch (grösster Anteil) • PAK-belastetes Material
	Qualitätskontrolle	gemäss Norm alle 500 t (Korngrößenverteilung, Bindemittelgehalt, Erweichungspunkt R+K, Penetration) nach dem Brechen
	Erfahrungen mit DSR-Kennwerten, DSR-Prüfungen; Erprobung und routinemäßiger Einsatz?	keine

	Kennwerte zur Bestimmung der Regeneration --> Wie wird dies / kann dies am AMA-Mischgut kontrolliert werden?	keine Angaben
Herstellung und Einbau	Welches Recyclingverfahren verwenden Sie (Kaltzugabe, Paralleltrommel, 100%-Recyclingtrommel)	alle drei Verfahren (siehe oben)
	Verwenden Sie Regenerationsmittel?	nein, nicht erlaubt durch Kanton (schlechte Erfahrungen)
	Schichtenweise Zugabemenge in der Praxis: routinemäßig vs. Maximal	
Nach Einbau / Qual.kontrolle	Schichtenweise Zugabemenge in der Praxis: routinemäßig vs. Maximal	
	Was passiert mit den Halden Deponien (Hintergrund, dass große Mengen auf Lager)?	
	<ul style="list-style-type: none"> • wie lange deponierbar, wie kontrolliert 	
	<ul style="list-style-type: none"> • thermische Verwertung relevant? / Mengen (einzige Anlage in den NL) - -> für AMA stellt sich diese Frage eigentlich nicht, da dies von Behörden entschieden wird... 	