

IGF-Vorhaben 22438BG

Schlussbericht

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

Forschungsvereinigung:	Deutsches Asphaltinstitut e.V.
Forschungseinrichtung 1:	Zentrum für angewandte Forschung und Technologie e.V. (ZAFT e.V.) an der HTW Dresden Friedrich-List-Platz 1 01069 Dresden
Projektleitung Forschungseinrichtung 1:	Prof. Dr.-Ing. Ines Dragon
Bearbeitung Forschungseinrichtung 1:	Dipl.-Ing. (FH) Konrad Schmöckel Birsen Bilgili M. Sc.
Forschungseinrichtung 2:	Bergische Universität Wuppertal Lehr- und Forschungsgebiet Straßenbau und Straßenerhaltung Pauluskirchstraße 7 42285 Wuppertal
Projektleitung Forschungseinrichtung 2:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Pahirangan Sivapatham
Bearbeitung Forschungseinrichtung 2:	Panujan Naguleswaran M. Sc.

Das IGF-Vorhaben 22438BG des Deutschen Asphaltinstituts (DAI e.V.) wurde über die DLR im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung.....	1
1.1. Problemstellung	1
1.1.1. Wiederverwendung von Asphaltgranulat	1
1.1.2. Konzeption der Asphaltmischgutzusammensetzung mit Asphaltgranulat	3
1.2. Wirtschaftliche Bedeutung der angestrebten Forschungsergebnisse für KMU	4
1.3. Zielsetzung	6
2. Theoretische Grundlagen	8
2.1 Aufbereitungstechnologien von Asphaltgranulat	8
2.2 Mix Design bei Verwendung von rezyklierten Asphaltgranulat	11
3. Untersuchungsmethodik	15
3.1 Auswahl und Beschaffung der Untersuchungsmaterialien	16
3.2 Untersuchungen im Labor.....	18
3.2.1 Charakterisierung der Baustoffe und Asphaltgranulate.....	18
3.2.1.1 Asphaltgranulat - Vorversuche im Rotorschleuderbrecher	18
3.2.1.2 Asphaltgranulat - Produktion der Untersuchungsvarianten im Rotorschleuderbrecher	20
3.2.1.3 Gesteinskörnungen.....	22
3.2.1.4 Bitumen und zurückgewonnene Bindemittel	22
3.2.2 Rezeptierung der Asphaltgemische	23
3.2.2.1 Bindemittlebene	25
3.2.2.2 Asphaltmörtelebene	26
3.2.2.3 Asphaltmischgutebene	26
3.2.3 Bindemittelperformance	27
3.2.3.1 Masterkurven des Komplexen Schubmoduls und des Phasenwinkels.....	27
3.2.3.2 Ermüdungsfunktionen.....	28
3.2.4 Mörtelperformance	30
3.2.4.1 Probekörperformen- und -abmessungen.....	30
3.2.4.2 Herstellung des Mörtels und der Probekörper	31
3.2.4.3 Masterkurve des Komplexen Schubmoduls und des Phasenwinkels	32

3.2.4.4	Ermüdungsfunktion	34
3.2.4.5	Tieftemperaturverhalten (Abkühlversuch)	36
3.2.4.6	Verformungsverhalten (Single-Stress-Creep-Recovery-Test).....	37
3.2.5	Asphaltperformance.....	38
3.2.5.1	Herstellung der Probekörper.....	38
3.2.5.2	Untersuchungen zur Bestimmung der Asphaltperformance	38
3.3	Großtechnische Herstellung und Einbau von Asphaltmischgut mit Asphaltgranulat aus dem Rotorbrecher	39
3.3.1	Vorversuche zur großtechnischen Aufbereitung	40
3.3.1.1	Zum Einsatz kommende Technik und Rahmenbedingungen.....	40
3.3.1.2	Zerkleinerungsprinzip des Vertikalbrechers	41
3.3.1.3	Untersuchungsvarianten der Vorversuche.....	42
3.3.1.4	Indizes zur Charakterisierung der Aufbereitung von Asphaltgranulat.....	42
3.3.2	Beschreibung der Bauvorhaben für die Untersuchungs- und Referenzstrecke	43
3.3.2.1	Untersuchungsstrecke (VB-Strecke)	44
3.3.2.2	Referenzstrecke	44
3.3.2.3	Zusammenfassung.....	44
3.3.3	Produktion der Asphaltgranulate.....	45
3.3.3.1	Konventionelle Aufbereitung: Technik und Rahmenbedingungen.....	45
3.3.3.2	Aufbereitung im Vertikalbrecher: Technik und Rahmenbedingungen.....	45
3.3.4	Asphaltmischgutherstellung	46
3.3.4.1	Rezeptierung und Zugabemengen	46
3.3.4.2	Produktion und Probenahme.....	47
3.3.5	Einbau der Untersuchungs- und Referenzstrecken	48
3.3.6	Untersuchungsprogramm	49
3.3.6.1	Charakterisierung der Asphaltgranulate	49
3.3.6.2	Bitumen und zurückgewonnene Bindemittel	49
3.3.6.3	Asphaltmischgut und Schichteigenschaften	50
3.3.6.4	Bezeichnung und Systematik der Proben.....	50
3.4	Statistische Auswertemethoden.....	51
3.4.1	Vergleich von Kenngrößen aus Einzelmesswerten.....	51

3.4.2	Vergleich von Funktionen	51
3.5	Prognoserechnungen zur Nutzungsdauer und Spurrinnenbildung	52
3.5.1	Zielstellung und methodischer Hintergrund	52
3.5.2	Verfahren der Nutzungsdauerprognose	52
3.5.3	Verfahren der Spurrinnenprognose	54
3.5.4	Eingangsparameter	56
3.6	Bewertung der Wirtschaftlichkeit mittels Berechnung der Herstellungskosten und der Lebenszykluskosten	57
3.6.1	Kosten für die Herstellung des Asphaltmischguts	57
3.6.2	Lebenszykluskostenanalyse (LZK)	57
3.6.2.1	Theoretische Grundlagen und Berechnungsverfahren	57
3.6.2.2	Eingangsparameter und Festlegungen	59
3.6.2.3	Methodik der Berechnung der Lebenszykluskosten	61
4.	Untersuchungsergebnisse	63
4.1	Untersuchungen im Labor	63
4.1.1	Verwendete Baustoffe	63
4.1.1.1	Asphaltgranulate	63
4.1.1.2	Verwendete Bitumen im Anlieferungszustand	80
4.1.2	Rezeptierung der Asphaltgemische	82
4.1.2.1	Bindemittlebene	82
4.1.2.2	Mörtelebene	85
4.1.2.3	Asphaltebene	89
4.1.3	Bindemittelkennwerte und Performance der Bindemittel	96
4.1.3.1	Bindemittelkennwerte	96
4.1.3.2	Rheologische Charakterisierung mittels Masterkurven	98
4.1.3.3	Ermüdungsverhalten	110
4.1.3.4	Grenzen des konventionellen Bindemitteldesigns und Ausblick auf ein erweitertes Prüfkonzent	115
4.1.4	Performance des Asphaltmörtels	119
4.1.4.1	Rheologische Charakterisierung mittels Masterkurven	119
4.1.4.2	Ermüdungsverhalten	128

4.1.4.3	Tieftemperaturverhalten	133
4.1.4.4	Verformungsverhalten.....	137
4.1.5	Performance des Asphalts	140
4.1.5.1	Steifigkeitsverhalten.....	140
4.1.5.2	Ermüdungsverhalten	146
4.1.5.3	Tieftemperaturverhalten.....	150
4.1.5.4	Verformungsverhalten.....	157
4.1.5.5	Verdichtungsverhalten	161
4.1.5.6	Zusammenfassung der Performance-Ergebnisse und Bewertung des Aufbereitungsverfahrens	164
4.1.6	Zusammenhänge zwischen Mörtelperformance und Asphaltperformance	166
4.1.6.1	Komplexer Schubmodul (Mörtel) und Steifigkeitsmodul (Asphalt).....	166
4.1.6.2	Ermüdungsfunktion	167
4.1.6.3	Tieftemperaturverhalten.....	169
4.1.6.4	Verformungsverhalten.....	170
4.1.6.5	Zusammenfassung.....	170
4.1.7	Methodik für ein performanceorientiertes Mörtel-Design.....	170
4.1.7.1	Relevante Kenngrößen für das Mörteldesign	170
4.1.7.2	Systematik der performanceorientierten Mörtelkonzeption	171
4.2	Großtechnische Herstellung und Einbau von Asphaltmischgut mit Asphaltgranulat aus dem Rotorbrecher	173
4.2.1	Asphaltgranulate der Vorversuche im Vertikalbrecher.....	174
4.2.1.1	Ergebnisse der Vorversuche	174
4.2.1.2	Problematiken während der Vorversuche.....	176
4.2.2	Asphaltgranulate der Produktion im Vertikalbrecher	177
4.2.3	Bindemittelkennwerte und -performance	181
4.2.3.1	Verwendete Bitumen im Anlieferungszustand	181
4.2.3.2	Zurückgewonnene Bindemittel.....	183
4.2.3.3	Ergebnisse der SARA- Analysen und der FTIR-Spektroskopie.....	187
4.2.4	Asphaltmischgut	189
4.2.4.1	Zusammensetzung des Asphaltmischgutes.....	189

4.2.4.2	Steifigkeitsverhalten.....	190
4.2.4.3	Ermüdungsverhalten	192
4.2.4.4	Tieftemperaturverhalten.....	193
4.2.4.5	Verformungsverhalten.....	195
4.2.4.6	Verdichtungsverhalten	197
4.2.5	Eigenschaften der eingebauten Asphaltsschicht.....	198
4.2.6	Zusammenfassende Bewertung der großtechnischen Untersuchungen	199
4.3	Rechnerische Bewertung der funktionalen und strukturellen Dauerhaftigkeit...	200
4.3.1	Prognose der theoretischen Nutzungsdauer infolge Ermüdungsbeanspruchung	200
4.3.1.1	Kalibrierung und Ermittlung der Anpassungsfaktoren.....	200
4.3.1.2	Vergleichende Analyse der theoretischen Nutzungsdauern	201
4.3.2	Prognose des Widerstandes gegen bleibende Verformungen	202
4.3.3	Zusammenfassende Beurteilung der Prognoserechnungen.....	204
4.4	Bewertung der Wirtschaftlichkeit mittels Ermittlung der Kosten für die Asphaltmischgüter und der Lebenszykluskosten von Straßen.....	205
4.4.1	Kosten für die Herstellung der Asphaltmischgüter	205
4.4.2	Lebenszykluskostenanalyse (LZKA).....	207
4.4.2.1	Abfolge der baulichen Maßnahmen	207
4.4.2.2	Darstellung der Kostenentwicklung des Barwertes	209
4.4.2.3	Vergleich der Lebenszykluskosten.....	211
5.	Zusammenfassung und Ausblick.....	214
	Quellen und verwendete Hilfsmittel.....	217
	Quellenverzeichnis	217
	Verwendete Hilfsmittel	225
	Abbildungsverzeichnis	226
	Tabellenverzeichnis.....	235

1. Einleitung

1.1. Problemstellung

1.1.1. Wiederverwendung von Asphaltgranulat

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

- Die maximale Zugabemenge an Asphaltgranulat wird einerseits beschränkt durch die technischen Möglichkeiten an der Asphaltmischanlage und andererseits durch die Regelungen in Vorschriften (5), (6), (7) bzw. Bauverträgen, die sich von Bundesland zu Bundesland bzw. von Bauvorhaben zu Bauvorhaben teilweise stark unterscheiden. Dies betrifft insbesondere die Asphaltdeck- und Asphaltbinderschicht stärker im Vergleich zur Asphalttragschicht. Gemäß ZTV Asphalt-StB (5) ist eine Zugabe der Asphaltgranulate im Splittmastixasphalt nicht zulässig. Dadurch kann der gewonnene Ausbauasphalt der Wiederverwendung nicht vollumfänglich zugänglich gemacht werden (8). Die wesentliche

Ursache hierfür ist u.a. die Inhomogenität der Zusammensetzung des Asphaltgranulates, das gealterte Bitumen im Asphaltgranulat sowie die meist unbekannten Eigenschaften der Gesteinskörnungen.

- Der sich seit einigen Jahren abzeichnende Trend des Vorranges von Erhaltungsmaßnahmen der Straßeninfrastruktur bewirkt, dass Ausbauasphalt überwiegend aus dem Bereich der Asphaltdecke anfällt. Dieser besteht aus der Asphaltdeckschicht und gegebenenfalls der Asphaltbinderschicht, und seine Wiederverwendung unterliegt entsprechend den zuvor genannten Beschränkungen. Erschwerend kommt die zunehmend fehlende Möglichkeit der Verwendung von Asphaltgranulat in Asphalttragschichten hinzu, die bei Maßnahmen der Baulichen Erhaltung lediglich eine untergeordnete Rolle spielen (8). So wurden bei Bauprojekten im Zuge von Bundesfern- und Landesstraßen zur Zeit der Antragstellung durchschnittlich ca. 25 % bis 30 % Asphaltgranulat in Asphalttragschichten, ca. 20 % bis 25 % in Asphaltbinderschichten und ca. 10 % in Asphaltdeckschichten zugegeben.
- Seit dem Beginn der Wiederverwendung von Asphaltgranulat wurden die anfallenden Ausbauasphalte bereits das dritte bis vierte Mal dem neu herzustellenden Asphaltmischgut hinzugefügt. Die im Asphalt verwendeten Bindemittel (Straßenbaubitumen und in verschiedenster Form durch Zusätze modifizierte Bitumen) unterliegen einerseits beim Herstellungs- und Einbauprozess des Asphaltmischgutes und andererseits während der Nutzungsdauer einer Straße einem Alterungsprozess, welcher zu einer Verhärtung bzw. Versprödung des Bindemittels führt (9). Damit weisen die heutzutage anfallenden Ausbauasphalte bereits verhärtete Bindemittel auf, was zu einer deutlichen Reduzierung der Lebensdauer führt. Durch die Vorgaben des technischen Regel- und Vorschriftenwerks (6), (7), (8), (10) werden Beschränkungen der Zugabemengen von Asphaltgranulat erforderlich. Darüber hinaus wird in einigen Landesvorschriften, wie z.B. den Ausführungsvorschriften zu § 7 des Berliner Straßengesetzes über die Vorbereitung des Ausbaus von Asphaltschichten im Straßenbau (11), die Wiederverwendung von Asphaltgranulat bei der Herstellung von Asphaltmischgut bei Nichteinhalten vorgegebener Grenzwerte der Eigenschaften des Bindemittels aus dem Asphaltgranulat sogar ausgeschlossen.
- Eine ggf. ungleichmäßige Zusammensetzung des Asphaltgranulates sowie Kornverfeinerungen während der konventionellen Aufbereitung von Asphaltgranulat mit dem Prallbrecher (Standardverfahren) in Kombination mit der Vorgabe des technischen Regel- und Vorschriftenwerks (10), dass die Zugabe von nur einem Asphaltgranulat bei der Herstellung von Asphaltmischgut möglich ist, führen zur Reduzierung der Zugabemenge.

Um die Wiederverwendungsraten von Asphaltgranulat bei der Herstellung von Asphaltmischgut zu steigern, wurden diverse technische Maßnahmen entwickelt (z.B. der Einsatz von Rejuvenatoren und die Zugabe von weichem Bitumen bzw. mehr als einem Asphaltgranulat mit unterschiedlichen Eigenschaften) und Anpassungen des Technischen Regelwerks

vorbereitet (8). Dennoch reichen einige der technischen Maßnahmen nicht aus, um eine Steigerung der Wiederverwendungsraten bewirken.

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

1.1.2. Konzeption der Asphaltmischgutzusammensetzung mit Asphaltgranulat

Asphaltgranulat kann für die Herstellung von Asphaltmischgut entsprechend Abschnitt 3.1.1 der TL Asphalt-StB (10) verwendet werden, wenn folgende Voraussetzungen erfüllt sind:

- Einhaltung der für die einzelnen Asphaltmischgutsorten festgelegten Anforderungen,
- Berücksichtigung der maschinentechnischen Zugabemöglichkeiten an der Asphaltmischanlage,
- Erfüllung der Eignung (bezüglich Umweltverträglichkeit, Bindemittleigenschaften, Eigenschaften der Gesteinskörnungen),
- obere Korngröße der im Asphaltgranulat enthaltenen Gesteinskörnungen darf nicht größer sein als die obere Korngröße des Asphaltmischgutes,
- für den Einsatzbereich ausreichende Gleichmäßigkeit.

Eine große Anzahl an Forschungsvorhaben, wie z.B. (12), (13), (14) sowie die inzwischen jahrelangen Erfahrungen zeigen, dass Asphaltmischgut mit Zusatz von Asphaltgranulat bei entsprechender Sorgfalt in der Auswahl des Ausbausphaltes gemäß TL AG-StB (6) und der neuen Baustoffe unter Berücksichtigung der o.g. Voraussetzungen einem Asphaltmischgut aus ausschließlich neuen Baustoffen gleichwertig sein kann.

In Deutschland ist bei der Optimierung der Zusammensetzung des Asphaltmischgutes (Mix-Design) für die Erstellung der Erstprüfung zu berücksichtigen, dass das Asphaltmischgut unter Verwendung von Asphaltgranulat alle Anforderungen der TL Asphalt-StB (10) erfüllen muss. Aus dem Grund kann beispielsweise der Erweichungspunkt Ring und Kugel ($T_{R\&B}$) des

Bindemittels aus dem Asphaltgranulat die maximal mögliche Zugabemenge begrenzen. Die TL Asphalt-StB (10) in der zurzeit vorliegenden gültigen Fassung geben vor, dass der EP RuK des resultierenden Bindemittels im Asphaltmischgut $T_{R\&Bmix}$, innerhalb der Sortenspanne des geforderten Bitumens liegen muss. $T_{R\&Bmix}$ wird rechnerisch über den EP RuK des aus dem Asphaltgranulat zurückgewonnenen Bitumens $T_{R\&B1}$ und den EP RuK des frisch zugegebenen Bitumens $T_{R\&B2}$ und deren zugehörige Anteile ermittelt. Inwiefern diese Herangehensweise am reinen Bitumen bei der inzwischen vorhandenen Prüftechnik (z.B. DSR - Dynamisches Scherrheometer) noch sinnvoll ist, muss im Vergleich zur realitätsnäheren Mörteluntersuchungen überprüft werden. Erste Ansätze liefern hier die Arbeiten von EICHLER (15), BÜCHNER et al. (16) und HURRMAN et al. (17), welche Untersuchungen an unterschiedlich zusammengesetzten Mastix- bzw. Mörtelphasen von Asphaltgemischen im DSR durchführten. Anzumerken ist hier, dass die bisherigen Ansätze sich nur hauptsächlich auf eine Bitumeneigenschaft „Komplexer Schubmodul G^* “ beziehen. Mit diesem Kennwert erhält man zwar eine Aussage, ob die Viskosität der zu vergleichenden Bitumen (z.B. Frischbitumen und resultierendes Bitumen, zusammengesetzt aus dem Bitumen des Asphaltgranulates und Rejuvenatoren) identisch ist, es fehlt jedoch die Kenntnis darüber, ob auch weitere wesentliche Bitumeneigenschaften, wie z. B. der Phasenwinkel, vergleichbar sind.

Wie aus der dynamischen Werkstoffprüfung an Asphalt bekannt ist, stellt sich zwischen dem Maximum der Krafteinleitung und dem Maximum der Reaktion eine zeitliche Differenz (die Phasenverschiebung, ausgedrückt durch den Phasenwinkel) ein. Das Ausmaß der Phasenverschiebung ist abhängig von den äußeren (Prüfkörpertemperatur, Belastungsfrequenz) und von den baustoffspezifischen Rahmenbedingungen (Größe der mobilisierbaren Verlustenergie). Dabei gilt, je größer die mobilisierte Verlustenergie unter sonst gleichen äußeren Rahmenbedingungen ist, desto größer ist das Schädigungspotential des Bitumens. Beide Kenngrößen, Komplexer Schubmodul G^* und Phasenwinkel sind daher für die Rheologie des Bitumens von Bedeutung.

1.2. Wirtschaftliche Bedeutung der angestrebten Forschungsergebnisse für KMU

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

Die erfolgsversprechende Wirkungsweise von Rejuvenatoren wurde in einer Vielzahl von Forschungsvorhaben bestätigt, wie z.B. (17), (18), (9), (19), jedoch fehlt bisher ein sicheres Design für das Bitumen bzw. den Mörtel (Bitumen und Anteil der Gesteinskörnungen $\leq 2\text{ mm}$) auf Basis von Performanceprüfungen, zum Beispiel mit dem dynamischen Scherrheometer (DSR). Wie bereits erwähnt, sind sowohl der Komplexe Schubmodul G^* als auch der Phasenwinkel für die Rheologie des Bitumens von Bedeutung. Es gilt zu klären, mit welchen Performance-Kennwerten am Bitumen bzw. den Mörtel sicher auf die Performance-Kennwerte des Asphaltes geschlossen werden kann, denn Untersuchungen mit dem DSR an Bitumen bzw. den Mörtel sind weniger zeit- und kostenintensiv als Untersuchungen am Asphalt. Sicher bedeutet in diesem Zusammenhang, dass das anzuwendende Verfahren des Mix-Designs sowohl für die im Straßenbau verwendeten Bitumen (Straßenbaubitumen und Polymermodifizierte Bitumen) als auch für die zum Größten Teil zum Einsatz kommenden Asphaltmischgüter gültig ist. Asphaltherstellern mit geringen finanziellen Mitteln für Forschung und Entwicklung, wie dies bei KMU der Fall ist, können die dafür erforderlichen umfangreichen Untersuchungen nicht leisten. Darüber hinaus ist anzumerken, dass die Bestimmung der physikalischen Eigenschaften der Gesteine aus dem konventionell aufbereiteten Asphaltgranulat (z.B. Schlagzertrümmerungswert, Frostbeständigkeit, Polierresistenz usw.) im Hinblick auf die Anforderungen der (6) kaum möglich ist, da zu Einem die Gesteine nach herkömmlicher Aufbereitung mit dem Mörtel behaftet sind und zum anderen die erforderliche Gesteinskörnungsfraction ohne die Extraktionen nicht gewonnen werden kann. Dadurch werden die physikalischen Eigenschaften der Gesteinskörnungen zurzeit nur subjektiv bestimmt. Eine mangelhafte Beurteilung der Gesteinsqualität kann bei einer höheren Zugabemenge der mehrfach rezyklierten Asphaltgranulate zu Schäden im Asphalt aufgrund der Beanspruchung durch Klima und Verkehr führen und die Lebensdauer erheblich beeinträchtigen.

Die Erhöhung der Zugabemenge an Asphaltgranulat im Asphaltmischgut bewirkt auch eine Preisreduzierung des Asphaltmischgutes und eine Reduzierung der Lagerkapazitäten für Asphaltgranulat. Das heißt, innovative und nachhaltige Aufbereitungstechnologien sowie ein geeignetes Prüfverfahren zum Qualitätsmanagement im Rahmen der Erstprüfung und werkseigenen Produktionskontrolle, mit denen der Zugabeanteil an Asphaltgranulat bzw. der Bestandteile des Ausbauasphaltes erhöht werden kann, führen zur Einsparung von Kosten nicht nur für die Asphalthersteller, sondern sie leisten damit ebenso einen bedeutenden volkswirtschaftlichen Beitrag. Für die, im Rahmen dieses Forschungsvorhabens, beabsichtigte innovative Technologie der Aufbereitung aus z.B. (17) und (20) müssen den KMU Handlungshilfen bezüglich der Aufbereitungsmethode und des Qualitätsmanagements zur Verfügung gestellt werden. Auch derlei Handlungsanweisungen sollen im Rahmen des Forschungsvorhabens erarbeitet werden, damit die KMU sowohl bei kleinen als auch bei großen Baumaßnahmen dauerhaft wettbewerbsfähig sein können.

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

1.3. Zielsetzung

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

- Standardverfahren: konventionelle Aufbereitung (Brechen bzw. Granulieren) = Aufbereitungsverfahren 1
- Aufspaltung in die bindemittelreiche Fraktion und die bindemittelarme Fraktion = Aufbereitungsverfahren 2

Im Einzelnen sollen folgende Fragestellungen beantwortet werden:

1. Welchen Einfluss haben die unterschiedlich aufbereiteten Asphaltgranulate auf die Gesteinskörnungseigenschaften bzw. Gebrauchseigenschaften (Verdichtungsverhalten, Ermüdungsrisse, Tieftemperaturverhalten und Spurrinnenbildung) des daraus hergestellten Asphaltmischgutes?
2. Können die Erkenntnisse von HUURMAN et al. (17) und QUI et al. (18) von PA- und SMA-Mischgütern auf andere Bitumensorten und Asphaltarten und -sorten übertragen werden? Kann ggf. bereits für das Bitumen-Design-Verfahren das DSR verwendet werden? Wenn ja, welche Kennwerte am Bitumen- bzw. Asphaltmörtel sind relevant? Können die von BÜCHNER et al. (16) festgestellten Zusammenhänge zwischen den wesentlichen Gebrauchseigenschaften des Asphaltmastix und denen des Asphaltmischgutes für den Vergleich der Asphaltmörtelebene/Asphaltebene auch unter Verwendung von Asphaltgranulat bestätigt werden? Falls ja, welche Arbeitsschritte sind bei einem Mörtel-Design-Verfahren erforderlich?
3. Welchen Einfluss haben die unterschiedlich aufbereiteten Asphaltgranulate auf die Nutzungsdauer, die Spurrinnenbildung sowie die Ermüdungsrisssbildung innerhalb der Asphaltdecke?
4. Welchen Einfluss haben die unterschiedlich aufbereiteten Asphaltgranulate auf die Wirtschaftlichkeit von daraus hergestellten Asphaltbefestigungen sowohl für den Asphaltmischguthersteller als auch auf die Lebenszykluskosten von Straßen?
5. Können die im Labormaßstab erlangten Erkenntnisse im großmaßstäblichen Versuch an der Mischanlage durch den Bau einer Versuchsstrecke bestätigt werden?

Die Untersuchungen erfolgen an Asphalttrag-, Asphaltbinder- und Asphaltdeckschichtmischgut. Dabei ist der Fokus jeweils auf eine höchstmögliche Wiederverwendungsrate des Asphaltgranulates im Asphaltmischgut zu legen, mit dem Ziel natürliche Ressourcen zu schonen. Dies kann die Zugabe von Rejuvenatoren (Verjüngungsmittel) erfordern. Durch den Einsatz von Rejuvenatoren kann die Alterung des im Asphaltgranulat befindlichen Bitumens

aufgehalten bzw. ganz oder teilweise rückgängig gemacht werden. Im Idealfall kann das Bitumen im Asphaltgranulat wieder in seinen rheologischen Ausgangszustand versetzt werden (9). Im vorgeschlagenen Forschungsvorhaben soll im Rahmen des Bitumen-Design-Verfahrens (siehe Fragestellung -1) geklärt werden, ob bei den Asphaltmischungen mit Asphaltgranulat die Zugabe eines Rejuvenators notwendig ist und falls ja, in welcher Menge dieser der jeweiligen Asphaltmischung zu zufügen ist, um die Referenzwerte der Mörtel Eigenschaften zu erreichen.

2. Theoretische Grundlagen

2.1 Aufbereitungstechnologien von Asphaltgranulat

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

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

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

Die Aufbereitungstechnologie der Aufspaltung des Asphaltgranulats in die bindemittelreiche Fraktion (Asphaltmörtel) und die bindemittelarme Fraktion wurde im Rahmen des Forschungsprojektes LE2AP (17) von der Tochtergesellschaft des größten Baukonzernes Royal BAM Group in den Niederlanden „BAM Infra Asphalt“ entwickelt. Bei dieser Aufbereitung wird zunächst der Fräsasphalt in zwei Komponenten abgesiebt, den Anteil ≤ 2 mm mit ca. 10 M.-% bis 15 M.-% Bindemittel (Asphaltmörtel) und den Anteil ≥ 2 mm. Dieser Granulatan- teil ≥ 2 mm wird in einen Rotorschleuderbrecher (siehe Abbildung 1) gegeben.

Der Rotorschleuderbrecher ist der Gruppe der Rotorbrecher zuzuordnen. Charakteristisch für diese Brechertypen ist ein auf einer vertikalen Welle gelagerter Rotor, der von einem kreisförmigen Gehäuse umschlossen wird (21). Das zu zerkleinernde Material wird vertikal von oben aufgegeben und trifft auf den mit hoher Drehzahl rotierenden Rotor. Nach einer

Umlenkung der Materialbewegung in die horizontale Ebene wird das Aufgabegut infolge der hohen Umfangsgeschwindigkeit radial nach außen beschleunigt. Die Zerkleinerung erfolgt überwiegend durch einen gezielten Aufprall des Materials auf eine feststehende, ringförmige Prallwand. Der Austrag des zerkleinerten Materials erfolgt anschließend schwerkraftbedingt senkrecht nach unten (vgl. Abbildung 1, links).

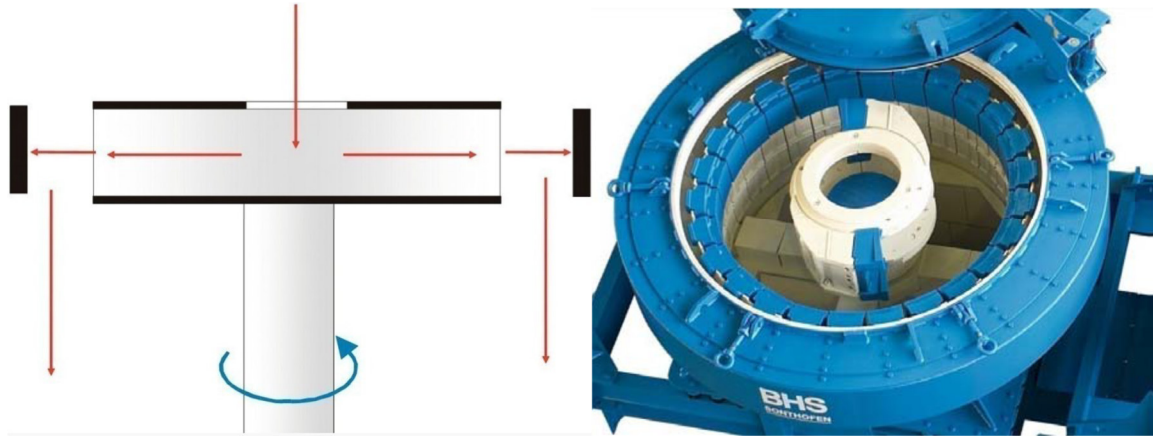


Abbildung 1: Funktionsprinzip Rotorbrecher (links) und Maschinentyp mit 2 Schleuderkammern (rechts) (21)

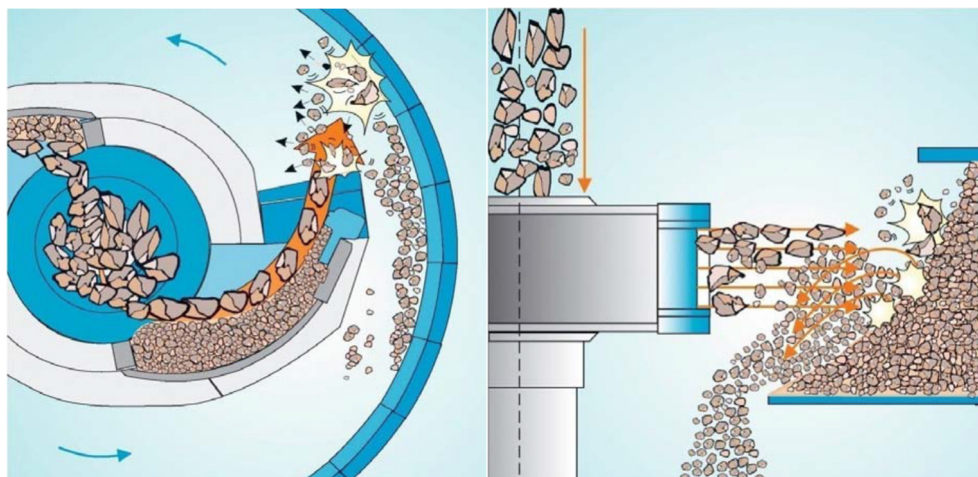


Abbildung 2: Konstruktionsschema des BHS Zweikammer-Rotors, Materialfluss horizontal (links) und Materialfluss vertikal (rechts) (21)

Rotorschleuderbrecher mit einem kompakten Rotor in Schweißkonstruktion, der zwei groß dimensionierte Schleuderkammern aufweist (Abbildung 1, rechts), finden unter anderem Anwendung bei der Zerkleinerung nahezu aller natürlich vorkommenden Gesteinsarten, insbesondere von mittel- bis hochfesten sowie stark verschleißbeanspruchenden Materialien. Das Aufgabegut wird dem Brecher zentral von oben zugeführt und innerhalb des Rotors von den Schleuderkammern aufgenommen. Durch die hohe Umfangsgeschwindigkeit des Rotors wird das Material in den Schleuderkammern intensiv beschleunigt und entsprechend der eingestellten Rotordrehzahl aus dem Rotor ausgeschleudert (vgl. Abbildung 2). Die Zerkleinerung des Materials erfolgt hierbei primär durch einen einmaligen, gerichteten Aufprall

jedes einzelnen Kornes auf eine feststehende, ringförmige Wand, die wahlweise als Ringpanzerung oder als stabiles Materialbett im oberen Gehäusebereich ausgeführt ist (21).

Bei der Aufbereitung von Ausbauasphalt wird durch den Aufprall auf die Wand des Rotorschleuderbrechers und durch den Kontakt der Granulatfragmente untereinander der noch in dieser Fraktion vorhandene bindemittelreiche Mörtelanteil abgetrennt, so dass schlussendlich der groben Gesteinskörnung nur noch ca. 1 M.-% Bindemittel anhaftet. Dieses „Restbindemittel“ kann sich bei der Herstellung von Asphaltmischgut positiv auswirken, da es als eine Art „Grundierung“ das neue Bindemittel leichter mit den Gesteinskörnungen verbindet. Nach der Aufbereitung liegt das Asphaltgranulat also in unterschiedlichen Fraktionen vor. Die Gesteinskörnungen können durch Absieben wiederum in weitere Fraktionen aufgeteilt werden. Da auf den groben Gesteinskörnungen kaum noch Bitumen vorhanden ist, können sie über die Weißtrommel aufgegeben und theoretisch bis zu 100 M.-% bei der Asphaltmischgutherstellung wiederverwendet werden. Der Asphaltmörtel kann, wie bisher auch, entweder kalt im Mischer oder mit der heißen Gesteinskörnungen zugegeben werden. Eine Paralleltrommel ist somit nicht erforderlich, um mehr als 40 M.-% Asphaltgranulat verwenden zu können. Bei einer Zugabemenge von 30 M.-% des Asphaltmörtels kann die Zugabe von Frischbitumen um bis zu 90 % reduziert werden. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, dieses Material mit Verjüngungsmittel zu behandeln, als Granulat bzw. als Briketts herzustellen und zielgerecht bei der Asphaltmischgutherstellung zuzugeben (22).



Abbildung 3: Bindemittelreiche Fraktion (links) und die bindemittelarme Fraktion (rechts) des in dem Rotorschleuderbrecher bearbeiteten Asphaltgranulates (17)

Abbildung 3 zeigt das Ergebnis des beschriebenen Aufbereitungsprozesses. Bisher wurden mit diesem Aufbereitungsverfahren erste Erfahrungen bei der Wiederverwendung von Asphaltgranulat aus offenporigem Asphalt (PA) und Splittmastixasphalt (SMA) gesammelt (17), (18), (20) und (23).

Das Aufbereitungsverfahren mit dem Rotorschleuderbrecher wurde maßgeblich vom Großkonzern „BAM Infra Asphalt“ entwickelt. Daher stehen bisher keine wissenschaftlich begleitenden Untersuchungen bzw. kein Forschungsbericht zur Verfügung. Ob die Form der Aufbereitungstechnologie Einfluss auf die wesentlichen Gebrauchseigenschaften von Asphalt

ausübt, wie beispielsweise die Steifigkeit, den Widerstand gegen Kälte- sowie Ermüdungsrisse und die Spurrinnenbildung, ist unbekannt bzw. steht nicht öffentlich zur Verfügung. Außerdem wurden bisher keine wissenschaftlich begleitenden Untersuchungen zum Einfluss der Aufbereitungstechnologie von Asphaltgranulat auf die Prognose der Spurrinnenbildung sowie der Ermüdungsrisssbildung innerhalb der Asphaltdeckschicht sowie der Asphaltbinderschicht durchgeführt, da diese Prognoseverfahren erst in der Entwicklung sind (24). Diese Prognoseverfahren sind jedoch unmittelbare Voraussetzung für eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung in Form von Lebenszykluskosten (25). BIRBAUM (25) untersuchte in seiner Arbeit zwar den Einfluss unterschiedlich zusammengesetzter Asphalte auf die Lebenszykluskosten einer Straße, jedoch bestanden die Asphaltgemische nur aus ungebrauchten Baustoffen. Unterschiedliche Aufbereitungsverfahren von Asphaltgranulat wurden in dieser und anderen Forschungsarbeiten bisher nicht untersucht. Da heute kaum noch Asphaltbetone ohne Asphaltgranulat hergestellt werden, sind die Erkenntnisse auf Basis frischer Baustoffe gewonnen wurden, nicht realistisch und ohne systematische Vergleichsuntersuchung nicht übertragbar.

Bei der Herstellung von Asphaltmischgut ist sowohl die Qualität des verwendeten Bitumens als auch die Qualität der eingesetzten Gesteinskörnungen für die Performance des Asphaltes von Bedeutung. Hierfür gibt es strenge Vorgaben im technischen Regel- und Vorschriftenwerk, wie z.B. der TL Asphalt-StB (10). Damit gilt selbiges für die Verwendung von Asphaltgranulat (6). Die Kenntnis eventuell vorhandener Unterschiede der Eigenschaften rezyklierter Gesteinskörnungen, welche durch unterschiedliche Aufbereitungsverfahren von Ausbauasphalt gewonnen werden, ist ebenfalls relevant. Darüber hinaus muss der Einfluss dieser Gesteinskörnungen auf die Gebrauchseigenschaften daraus hergestellter Asphaltgemische sowie die Dauerhaftigkeit dieser Asphaltbefestigungen bekannt sein.

2.2 Mix Design bei Verwendung von rezyklierten Asphaltgranulat

Das LE2AP-Projekt hatte zum Ziel, qualitativ hochwertige Asphaltmischungen bei Verwendung von rezyklierten Asphaltgranulat herzustellen, die in Bezug auf ihre Performance denen aus frisch produzierten ungebrauchten Baustoffen mindestens gleichwertig sind (17). Daher wurde in LE2AP der Ansatz der Gleichheit der wesentlichen Gebrauchseigenschaften auf den drei Maßstabsebenen verfolgt:

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

Der erste Schritt zur Erreichung des LE2AP-Ziels bestand darin, sicherzustellen, dass das Bitumen des produzierten LE2AP-Asphaltmörtels aus rezyklierten Asphaltgranulat (LE2AP-Mörtel) die gleiche Qualität hat wie frisches ungebrauchtes Bitumen (17). Dafür wurde ein sog. „Bitumen-Design-Verfahren“ auf der Basis von Nadelpenetration-Werten angewendet.

Mit diesem Verfahren konnte einerseits die Bitumenqualität durch Kontrolle der Leistungsfähigkeit des zugegebenen frischen Bindemittels und Verjüngungsmittels gewährleistet werden, andererseits wurde die Bitumen-Design-Methode auch zur Kontrolle des Bitumengehalts des Mörtels angewendet.

Unabhängig von der Menge an frischen Materialien, die dem zu konzipierenden Asphaltmörtel zugesetzt wurden, konnte mit dem entwickelten Verfahren die Nadelpenetration sehr genau (± 10 1/10 mm) berechnet werden (siehe Abbildung 4). Darüber hinaus konzentrierte sich die Forschung darauf, eine Mörtel-Design-Methode zu entwickeln, anhand derer die Leistungsfähigkeit des Mörtels abgeschätzt werden sollte.

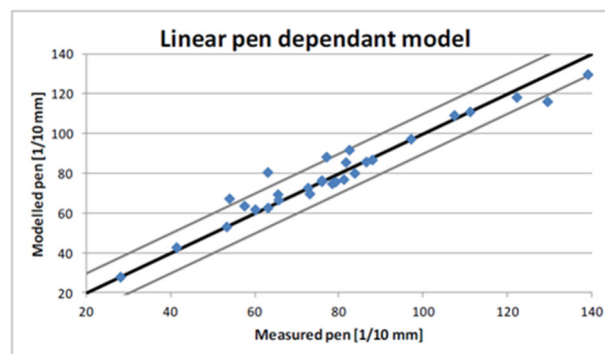


Abbildung 4: Das Bitumen-Designverfahren prognostiziert die Nadelpenetration mit einer Genauigkeit von ± 10 1/10 mm (17)

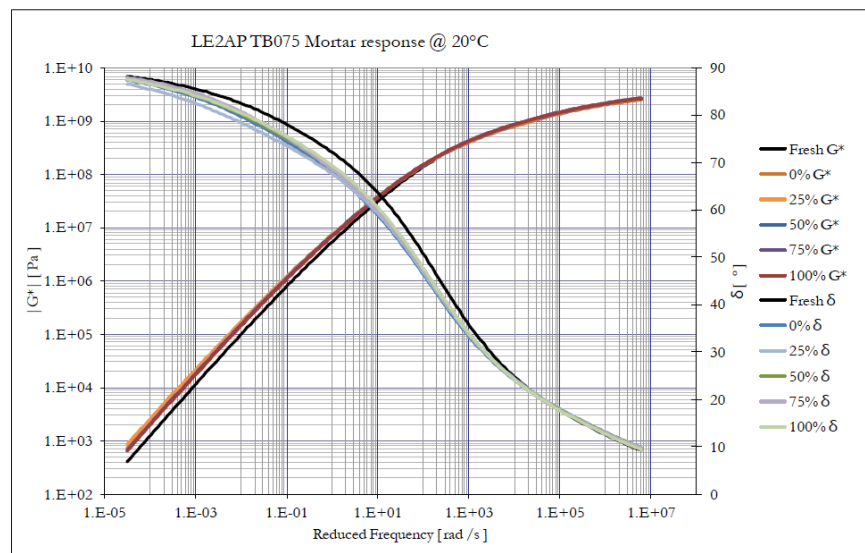


Abbildung 5: Steifigkeit von frisch hergestelltem LE2AP-Mörtel in Bezug auf die Steifigkeit von frisch hergestelltem Mörtel, welcher nur aus ungebrauchten Bestandteilen zusammengesetzt war (17)

Bei dem Verfahren des Mörtel-Design wurde von HURRMAN et al. (17) die Steifigkeit (Schubmodul G^*) von frisch hergestellten LE2AP-Mörteln in Bezug auf die Steifigkeit eines frisch hergestellten Mörtels, welcher nur aus ungebrauchten Bestandteilen zusammengesetzt war, abgeleitet. Als Bitumen kamen ausschließlich Straßenbaubitumen zum Einsatz. Die Steifigkeit der Asphaltmörtel wurde im DSR an Probekörpern mit einem Durchmesser von 6 mm

und einer Höhe von 20°mm im Temperaturbereich zwischen 10 °C und 40 °C bei verschiedenen Frequenzen bestimmt. Die Ergebnisse (Masterkurven) sind in Abbildung 5 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der Unterschied zwischen den verschiedenen LE2AP-Mörteln, vernachlässigbar ist. Lediglich der Asphaltmörtel, dessen Herstellung nur aus „frischen“ ungebrauchten Bestandteilen (Frisch-Mörtel) erfolgte, wies bei niedrigen Frequenzen einen etwas niedrigeren Schubmodul G^* (fresh G^*) und einen etwas höheren Phasenwinkel auf (fresh δ) als die LE2AP-Mörtel. Inwiefern die festgestellten Erkenntnisse ebenso für Asphaltmörtel mit „frischen“ ungebrauchten polymermodifizierten Bitumen (PmB) und Baustoffen und rezyklierten PmB und Baustoffen aus Asphaltgranulat gültig sind, wurde nicht untersucht bzw. sind der Öffentlichkeit nicht zugänglich.

Gemäß der LE2AP-These (Streben nach Äquivalenz auf der Ebene von Bitumen, Mörtel und Asphaltmischgut) führten diese Ergebnisse zu der Schlussfolgerung, dass eine Asphaltmischung, die sog. LE2AP-Mörtel und rezyklierten Gesteinskörnungen aus Asphaltgranulat enthält, Eigenschaften haben sollte, die mindestens denen eines Asphaltgemisches, welches nur aus „frischen“ ungebrauchten Baustoffen besteht, entsprechen. Voraussetzung dafür ist jedoch, dass die Zusammensetzung der beiden Asphaltmischungen bezüglich der Gesteinskörnungen > 2 mm und des Mörtels gleich sind. An offenporigen Asphalt (PA), der einen Recyclinganteil aus Asphaltgranulat von 93 M.-% enthielt, konnte von HURRMAN et al. (17) der Widerstand gegen Griffigkeitsverlust nachgewiesen werden. Hierzu wurden ungealterte und gealterte Asphaltplatten aus PA hergestellt und zuerst im Aachener Ravelling Test (ARTE) geprüft. Bei diesem Versuch erfolgt die Aufbringung der Reibung über einen vollwertigen Reifen auf die Asphaltplatten. Im Ergebnis wurde die Bitumenbeschichtung der Oberflächensteine abgetragen und die Oberfläche der Testplatten poliert. Mit Hilfe des Skid Resistance Testers (SRT) konnte danach die Griffigkeit der Testplatten gemessen werden, welche zwischen den einzelnen Varianten vergleichbar war. QUI et al. (18) bestätigten die LE2AP-These anhand von Untersuchungen an Splittmastixasphalt. Die beiden Forschungsarbeiten überprüften nur die Eigenschaften „Griffigkeit“. Weitere wesentliche Gebrauchseigenschaften von Asphalt wurden nicht bestimmt. Folgende wesentliche Gebrauchseigenschaften können aber im Labor zur Beurteilung des Gebrauchs- bzw. Performanceverhaltens von Asphalt und zur Bestimmung der Lebensdauer von Verkehrsflächen mit Asphaltdeckschichten nach den (26) und (24) ermittelt werden: Verdichtbarkeit, Widerstand gegen Rissbildung bei Kälte, Steifigkeit, Widerstand gegen Rissbildung infolge Ermüdung und Widerstand gegen bleibende Verformung (27). Diese Performanceeigenschaften wurden allerdings bei den Untersuchungen zur Aufbereitung des Ausbauasphaltes im Rotorschleuderbrecher von HURRMAN et al. (17), QUI et al. (18) und HURRMAN et al. (20) nicht ermittelt bzw. stehen für die Öffentlichkeit nicht zur Verfügung.

Ein Zusammenhang zwischen den Gebrauchseigenschaften der Mastixebene (Bitumen und Füller) und den Gebrauchseigenschaften der Asphaltebene liefern BÜCHNER et al. (16). Bei-

spielhaft sind die Ergebnisse für den Widerstand gegen Kälte in Abbildung 6 und den Widerstand gegen Ermüdung in Abbildung 7 dargestellt. In den Abbildungen sind stets die Ergebnisse der Asphaltprüfungen in Abhängigkeit von den Ergebnissen der Asphaltmastixprüfungen im DSR zu sehen. Beide Abbildungen zeigen einen signifikanten Zusammenhang zwischen den jeweiligen Kennwerten. Die Untersuchungen sind jedoch an Asphaltmastix und Asphaltmischgut durchgeführt wurden, welche ausschließlich aus ungebrauchten Bitumen und Gesteinskörnungen hergestellt wurden. Ob diese Zusammenhänge zwischen den Performanceeigenschaften der Mastix- bzw. Mörtel- und denen der Asphaltelebene unter Verwendung von Asphaltgranulaten genauso gültig sind, ist nicht bekannt und wäre zu überprüfen.

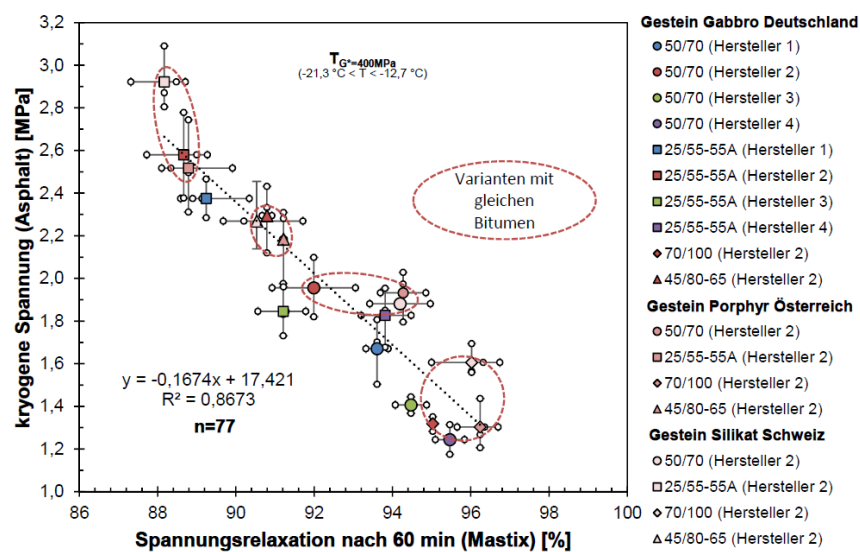


Abbildung 6: Korrelation von Asphaltmastix- und Asphaltvarianten: Kryogene Spannung von Asphalt und Spannungsrelaxation nach 60 Minuten von Asphaltmastix (16)

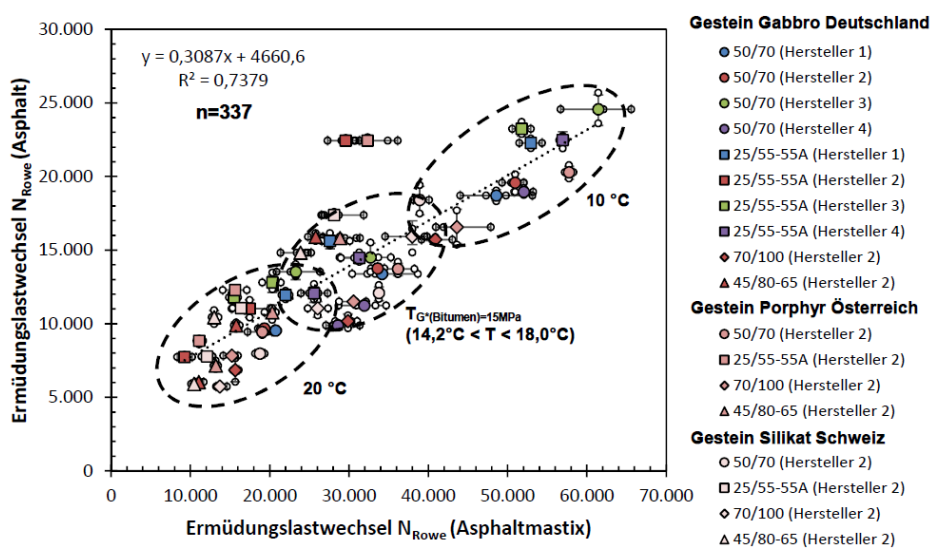


Abbildung 7: Korrelation von Asphaltmastix- und Asphaltvarianten: Ermüdungslastwechsel N_{Rowe} von Asphalt aus Zug-Druck-Wechselast-Versuchen und Ermüdungslastwechsel N_{Rowe} von Asphaltmastix aus Ermüdungsprüfungen (16)

3. Untersuchungsmethodik

Die systematische Bearbeitung des Forschungsvorhabens folgte der in Abbildung 8 dargestellten Struktur, die eine Skalierung von der laborseitigen Grundlagenermittlung bis hin zur großtechnischen Realisierung vorsieht.

Im Arbeitspaket A erfolgte zunächst die Auswahl, Beschaffung und umfassende Charakterisierung der verwendeten Baustoffe (Gesteinskörnungen, Bitumen, Asphaltgranulate, Rejuvenatoren sowie Faserstoffe etc.). Parallel dazu wurden im Technikum der BHS-Sonthofen GmbH gezielte Vorversuche mit dem Rotorschleuderbrecher durchgeführt. Ziel dieser Versuchsreihen war die prozesstechnische Optimierung der Rotorgeschwindigkeit sowie der Brecherauskleidung, um eine definierte Qualität der aufbereiteten Asphaltgranulate für die weiteren Untersuchungen sicherzustellen.

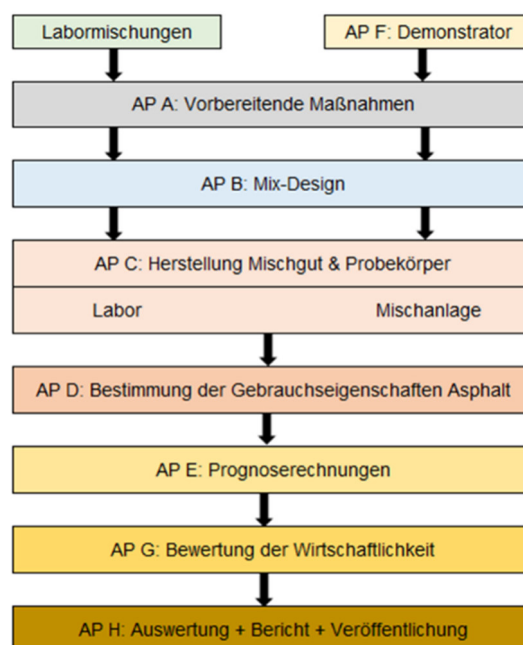


Abbildung 8: Arbeitspakete des Forschungsprojektes

Auf Basis dieser Ergebnisse bildete das Arbeitspaket B das theoretische und praktische Fundament des Mix-Designs. Unter Berücksichtigung der LE2AP-These wurde ein mehrstufiges Äquivalenzprinzip verfolgt, welches die Performance-Eigenschaften auf den Ebenen des Bitumens, des Mörtels und des Asphaltmischgutes synchronisiert. Für jede betrachtete Asphaltsorte wurden dabei drei Varianten gegenübergestellt:

- eine Referenzvariante ohne Asphaltgranulat,
- eine Variante mit konventionell aufbereitetem Asphaltgranulat sowie
- eine Variante mit dem im Rotorschleuderbrecher innovativ aufbereiteten Material.

Die Rezeptierung orientierte sich dabei sowohl an den normativen Vorgaben der TL Asphalt-StB (10) bzw. der H Al Abi (28) sowie AP AC D SP (29) als auch an dem Forschungsziel, eine

maximale Vergleichbarkeit der Asphaltkennwerte innerhalb der jeweiligen Sorten zu gewährleisten.

Im Arbeitspaket C erfolgte die Herstellung der Asphaltmischgüter und die Gewinnung der Probekörper aus im Labor verdichteten Asphalt-Probeplatten. Dies bildete die notwendige Voraussetzung für die nachfolgenden Performance-Untersuchungen.

Im Arbeitspaket D wurden umfassende Laborversuche durchgeführt, um die leistungsbezogenen Asphaltparameter zu bestimmen. Hierbei standen der Steifigkeitsmodul, das Ermüdungs- und Tieftemperaturverhalten, die Verformungsbeständigkeit und die Verdichtbarkeit im Fokus. Diese Untersuchungen dienten dazu, den direkten Einfluss der Aufbereitung des Asphaltgranulats auf die grundlegenden Gebrauchseigenschaften des Asphalts zu quantifizieren.

Auf Basis der in Arbeitspaket D ermittelten Materialkennwerte erfolgte in Arbeitspaket E die rechnerische Abschätzung der funktionalen und strukturellen Dauerhaftigkeit. Ziel war es, eine Prognose über die zu erwartende Nutzungsdauer der einzelnen Asphaltsschichten sowie die Spurrinnenbildung der gesamten Befestigung zu erstellen. So sollte aufgezeigt werden, wie sich das gewählte Aufbereitungsverfahren konkret auf die Dauerhaftigkeit der Straßenbefestigung auswirkt.

Den Transfer in die Praxis bildete schließlich das Arbeitspaket F. Dieses umfasste die großmaßstäbliche Aufbereitung der Asphaltgranulate mittels innovativer Technologie, die anschließende Asphaltproduktion im Mischwerk sowie den Einbau auf einer Versuchsstrecke. In diesem Rahmen wurde ebenfalls der überwiegende Teil der analytischen Laboruntersuchungen (aus Arbeitspaket D) durchgeführt. Abgerundet wurde das Vorhaben im Arbeitspaket G durch eine fundierte Wirtschaftlichkeitsbetrachtung, welche sowohl die Herstellkosten aus Sicht des Produzenten als auch die Lebenszykluskosten der Straßenbefestigung analysierte.

3.1 Auswahl und Beschaffung der Untersuchungsmaterialien

Die Festlegung der Asphaltmischgüter erfolgte in enger Abstimmung mit dem projektbegleitenden Ausschuss. Für das Untersuchungsprogramm wurden vier Asphaltssorten ausgewählt, die speziell für Verkehrsflächen mit besonderer Beanspruchung konzipiert sind:

- Asphaltdeckschichten: Splittmastixasphalt (SMA 11 S) und splittreicher Asphaltbeton (AC 8 D SP)
- Asphaltbinderschicht: stetig gestufter Asphaltbeton (AC 16 B S SG)
- Asphalttragschicht: Asphaltbeton (AC 22 T S)

Gesteinskörnungen und Füller

Die Auswahl der Gesteinskörnungen orientierte sich an der regionalen Verfügbarkeit nahe der Forschungseinrichtung 2 (FE2), um die Logistik für die Arbeitspakete C und D effizient zu gestalten.

- Asphaltdeck- und Asphaltbinderschicht: Verwendung von Diabas (grobe und feine Gesteinskörnung).
- Asphalttragschicht: Verwendung von Kalkstein (grobe und feine Gesteinskörnung).
- Alle Asphaltarten: Verwendung von Kalksteinmehl (Füller).

Asphaltgranulate (RA)

Für jede Sorte war ein spezifisches Asphaltgranulat vorgesehen:

- Für SMA 11 S: Asphaltgranulat aus einer gefrästen SMA-Deckschicht (aufbereitet per Granulator, Herkunft: Schleswig-Holstein).
- Für die weiteren Asphaltarten: Drei Asphaltgranulate aus Asphaltdeck- und Asphalttragschichten (Herkunft: Baden-Württemberg).

Details zu den RA-Sorten, der Aufbereitung und der Probenbezeichnung sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: Verwendete Asphaltgranulate (RA)

Probenbezeichnung	RA-Sorte	Herkunft	Aufbereitung	Maschinenkonfiguration
RA1-1	11 RA 0/8 (SMA)	SH	Granulator	13 mm Sieb Aufgabe
RA2-1	16 RA 0/8	BW	Prallmühle	14 mm Sieb (nachgeschaltet), kontinuierliche Überkornrückführung
RA3-1	22 RA 0/16	BW	Prallmühle	14 mm Sieb (nachgeschaltet), kontinuierliche Überkornrückführung
RA4-1	32 RA 0/16	BW	Prallmühle	14 mm Sieb (nachgeschaltet), kontinuierliche Überkornrückführung

Tabelle 2: Verwendete Bitumen

Probenbezeichnung	Bitumensorte	Verwendung in Asphaltmischgut
B1	25/55-55 A	ohne Asphaltgranulat
B2	25/55-55 RC	mit Asphaltgranulat
B3	10/40-65 A	¹⁾
B4	30/45	ohne Asphaltgranulat
B5	70/100	mit Asphaltgranulat
B6	50/70	ohne Asphaltgranulat

¹⁾ Das Bitumen kam aufgrund seiner festgestellten Eigenschaften im Laufe des Forschungsprojektes nicht zum Einsatz.

Bindemittel und Rejuvenatoren

Bei den Bitumensorten wurde zwischen Asphaltmischgutvarianten mit und ohne Asphaltgranulat differenziert. Die Probenschlüssel der Bitumen finden sich in Tabelle 2. Bei den Asphaltdeckschichtmischgütern unter Verwendung von Asphaltgranulat wurde zusätzlich ein Rejuvenator eingesetzt.

Einschränkung zur großtechnischen Herstellung

Die oben beschriebene Auswahl und Beschaffung bezieht sich ausschließlich auf die grundlegenden Laboruntersuchungen und die Versuche im Technikum der BHS-Sonthofen GmbH. Die Auswahl der Baustoffe für die großtechnische Herstellung und den Einbau (siehe Abschnitt 3.3) unterlag den logistischen und betrieblichen Rahmenbedingungen des ausführenden Mischgutherstellers. Auf die dort verwendeten Gesteinskörnungen, Bindemittelchargen sowie den Ausbauasphalt (Fräsgut) konnte projektseitig kein direkter Einfluss genommen werden.

3.2 Untersuchungen im Labor

3.2.1 Charakterisierung der Baustoffe und Asphaltgranulate

3.2.1.1 Asphaltgranulat - Vorversuche im Rotorschleuderbrecher

Bevor die Asphaltmischgüter für die Laboruntersuchungen (Arbeitspaket D) hergestellt werden konnten, fanden umfangreiche Vorversuche mit dem Rotorschleuderbrecher (RSMX) statt. Ziel war es, die optimalen maschinentechnischen Konfigurationen für die Aufbereitung der vier Asphaltgranulate festzulegen.



Abbildung 9: Rotorschleuderbrecher RSMX mit Auskleidung Ringpanzer (links) und Materialbett (rechts) im Technikum der BHS Sonthofen GmbH

Es wurde davon ausgegangen, dass der Materialaustrag und die Qualität des Asphaltgranulats maßgeblich von zwei Faktoren beeinflusst werden:

1. Auskleidung des Brechers: Vergleich zwischen Ringpanzerung und Materialbett (siehe Abbildung 9).
2. Rotorgeschwindigkeit: Untersuchung verschiedener Geschwindigkeitsstufen.

Eine detaillierte Übersicht über das Ausgangsmaterial, die untersuchten Konfigurationen sowie die zugehörigen Probenbezeichnungen und Farbkodierungen ist in Tabelle 3 aufgeführt.

Durchführung und Probenvorbereitung

Die Vorversuche wurden im Februar 2023 im Technikum der BHS Sonthofen GmbH durchgeführt. Der Prozess gliederte sich in zwei Stufen:

- Technikum (Grobtrennung): Der Materialaustrag nach dem Brechen wurde direkt vor Ort in die Fraktionen $< 2 \text{ mm}$ und $\geq 2 \text{ mm}$ gesiebt.
- Labor (Feintrennung): Die Fraktionen $\geq 2 \text{ mm}$ wurden für die Vorversuche im Labor manuell weiter aufgeteilt. (Hinweis: Bei der späteren Hauptaufbereitung erfolgte diese Absiebung direkt im großtechnischen Maßstab).

Tabelle 3: Asphaltgranulate - Rotorschleuderbrecher: Ausgangsmaterial, Maschinenkonfiguration und Probenbezeichnung für die Vorversuche

Farbe	Probenbezeichnung	Ausgangsmaterial	Maschinenkonfiguration	
			Auskleidung	Rotorgeschwindigkeit [m/s]
	RA1-2 VV1, RA2-2 VV1, RA3-2 VV1, RA4-2 VV1	RA1-1, RA2-1, RA3-1, RA4-1	Ringpanzerung	50,8
	RA1-2 VV2, RA2-2 VV2, RA3-2 VV2, RA4-2 VV2		Ringpanzerung	60,8
	RA1-2 VV3, RA2-2 VV3, RA3-2 VV3, RA4-2 VV3		Ringpanzerung	68,2
	RA1-2 VV4, RA2-2 VV4, RA3-2 VV4, RA4-2 VV4		Materialbett	60,8
	RA1-2 VV5, RA2-2 VV5, RA3-2 VV5, RA4-2 VV5		Materialbett	68,2

Untersuchungsprogramm zur Festlegung der Maschinenkonfiguration

Um die finale Auskleidung und Rotorgeschwindigkeit für die folgenden Arbeitspakete zu bestimmen, wurden die Materialausträge gemäß folgender Kriterien analysiert:

- Stückgrößenverteilung des Materialaustrages (gesamt) aus dem Rotorschleuderbrecher gemäß TP Gestein-StB, Teil 4.1.2 (30),
- Bindemittelgehalte der im Labor abgesiebten Fraktionen 0/2 mm, 2/4 mm, 4/5,6 mm bzw. 4/8 mm und $\geq 5,6 \text{ mm}$ bzw. $\geq 8 \text{ mm}$ aus dem Materialaustrag des Rotorschleuderbrechers gemäß TP Asphalt-StB, Teil 1 (31).

Durch diesen Abgleich konnte sichergestellt werden, wie stark die Anreicherung bzw. Ablösung von Bindemittel in den einzelnen Fraktionen durch die Brechereinstellungen beeinflusst wird.

3.2.1.2 Asphaltgranulat – Produktion der Untersuchungsvarianten im Rotorschleuderbrecher

Nach Abschluss der Vorversuche erfolgte im März 2023 die Hauptaufbereitung der Asphaltgranulate (RA1-2 bis RA4-2) im Technikum der BHS Sonthofen GmbH. Dabei kamen die zuvor optimierten Maschinenkonfigurationen des Rotorschleuderbrechers zum Einsatz.

Aufbereitung und Fraktionierung

Der Materialaustrag wurde in einem zweistufigen Prozess aufgeteilt:

- Trennung in die Fraktionen $< 2 \text{ mm}$ und $\geq 2 \text{ mm}$ (siehe Abbildung 10, links).
- Weitergehende Fraktionierung des Materials $\geq 2 \text{ mm}$ in definierte Teilfraktionen gemäß den in Tabelle 4 aufgeführten Nennöffnungsweiten (siehe Abbildung 10, rechts).



Abbildung 10: Absiebung in Fraktionen $0/2 \text{ mm}$ und $\geq 2 \text{ mm}$ des Materialaustrages aus dem Rotorschleuderbrecher (links) und Absiebung (rechts)

Tabelle 4: Absiebung des Materials $\geq 2 \text{ mm}$ aus dem Rotorschleuderbrecher in weitere Teilfraktionen – Siebnennöffnungsweiten der Siebe (Siebbelegung)

Ausgangsmaterial	Teilfraktionen und Siebnennöffnungsweiten			
RA1-1	RA1-2-1	RA1-2-2	RA1-2-3	RA1-2-4
	$< 2 \text{ mm}$	2 mm bis 4 mm	4 mm bis 6 mm	$\geq 6 \text{ mm}$
RA2-1	RA2-2-1	RA2-2-2	RA2-2-3	RA2-2-4
	$< 2 \text{ mm}$	2 mm bis 4 mm	4 mm bis 6 mm	$\geq 6 \text{ mm}$
RA3-1	RA3-2-1	RA3-2-2	RA3-2-3	RA3-2-4
	$< 2 \text{ mm}$	2 mm bis 4 mm	4 mm bis 8 mm	$\geq 8 \text{ mm}$
RA4-1	RA4-2-1	RA4-2-2	RA4-2-3	RA4-2-4
	$< 2 \text{ mm}$	2 mm bis 4 mm	4 mm bis 8 mm	$\geq 8 \text{ mm}$

Untersuchungsprogramm

Zur umfassenden Charakterisierung der konventionell und mittels Rotorschleuderbrecher aufbereiteten Materialien wurde ein dreigliedriges Untersuchungsprogramm durchgeführt.

1. Eigenschaften der Asphaltgranulate (Gesamtgemisch)

- Stückgrößenverteilung gemäß TP Gestein-StB, Teil 4.1.2 (30),
- Bindemittelgehalte der gemäß TP Asphalt-StB, Teil 1 und 3 (31),
- Rohdichte gemäß TP Asphalt-StB, Teil 5 (31),
- Fremdstoffgehalt gemäß TP Asphalt-StB, Teil 42 (31).

2. Eigenschaften der zurückgewonnenen Gesteinskörnungen an folgenden Kornklassen

- Korngrößenverteilung gemäß TP Asphalt-StB, Teil 2 (31),
- Fließversuch an feinen Gesteinskörnungen gemäß TP Gestein-StB, Teil 4.7.3 (30) - Kornklasse 0,063/2 mm,
- Bestimmung der Kornform von feinen Gesteinskörnungen durch Stabsiebung (Plattigkeitskennzahl) gemäß TP Gestein-StB, Teil 4.3.3 (30) - Kornklasse 1,25/4 mm,
- Bestimmung der Kornform von groben Gesteinskörnungen (Plattigkeitskennzahl) gemäß TP Gestein-StB, Teil 4.3.1 (30) - Kornklasse abhängig vom RA,
- Bestimmung des Anteils gebrochener Körner gemäß TP Gestein-StB, Teil 4.4 (30) - Kornklasse abhängig vom RA,
- Schlagprüfung an Gesteinskörnungen in Anlehnung an TP Gestein-StB, Teil 5.1.4 (30) - Kornklasse 5/8 mm,
- Widerstand von groben Gesteinskörnungen gegen Frost-Tau-Wechsel in Anlehnung an TP Gestein-StB, Teil 6.3.1 (30) - Kornklasse 4/8 mm,
- Widerstand von groben Gesteinskörnungen gegen Frost-Tausalz-Beanspruchung in Anlehnung an TP Gestein-StB, Teil 6.3.4 (30) - Kornklasse 4/8 mm.

3. Eigenschaften der zurückgewonnenen Bindemittel

- Erweichungspunkt Ring und Kugel gemäß DIN EN 1427 (32),
- Nadelpenetration gemäß DIN EN 1426 (33),
- Äqui-Schermodultemperatur $T(G^* = 15 \text{ kPa})$ und korrespondierender Phasenwinkel $\delta(G^* = 15 \text{ kPa})$ mit dem T-Sweep gemäß AL DSR-Prüfung (T-Sweep) (34) und AL DSR-Prüfung (BTSV) (35),
- Masterkurve des komplexen Schubmoduls G^* und Phasenwinkels δ (Beschreibung des Verfahrens siehe Abschnitt 3.2.3.1).

Eine Übersicht über die Probenbezeichnung und die zugehörige Farbkodierung für die Ergebnisdarstellung ist in Tabelle 5 enthalten.

Tabelle 5: Probenbezeichnung und zugehörige Farbkodierung der untersuchten Asphaltgranulate

Farbe	Probenbezeichnung der Asphaltgranulate	Aufbereitungstechnologie
	RA1-1	konventionell
	RA1-2 (bestehend aus RA1-2-1, RA1-2-2, RA1-2-3, RA1-2-4)	Rotorschleuderbrecher
	RA2-1	konventionell
	RA2-2 (bestehend aus RA2-2-1, RA2-2-2, RA2-2-3, RA2-2-4)	Rotorschleuderbrecher
	RA3-1	konventionell
	RA3-2 (bestehend aus RA3-2-1, RA3-2-2, RA3-2-3, RA3-2-4)	Rotorschleuderbrecher
	RA4-1	konventionell
	RA4-2 (bestehend aus RA4-2-1, RA4-2-2, RA4-2-3, RA4-2-4)	Rotorschleuderbrecher

3.2.1.3 Gesteinskörnungen

Die Charakterisierung der für das Laborprogramm beschafften Gesteinskörnungen konzentrierte sich auf die Kennwerte, die für die Asphaltrezeptierung und die Berechnung der volumetrischen Kennwerte am Asphaltmischgut zwingend erforderlich sind.

Folgende Parameter wurden bestimmt:

- Korngrößenverteilung gemäß TP Gestein-StB, Teil 4.1.2 und Teil 4.1.4 (30) und
- Rohdichte gemäß TP Gestein-StB, Teil 3.2.2 (30).

3.2.1.4 Bitumen und zurückgewonnene Bindemittel

In diesem Arbeitsschritt wurden sowohl die eingesetzten Frischbitumen als auch die aus den Asphaltmischgütern rückgewonnenen Bindemittel umfassend charakterisiert. Dies erlaubt einen direkten Vergleich zwischen dem Ausgangszustand und dem Zustand nach der Mischgutproduktion (inkl. der Interaktion mit dem Asphaltgranulat).

Gemeinsames Untersuchungsprogramm (Frischbitumen und zurückgewonnene Bindemittel)

Zur Bestimmung der konventionellen und rheologischen Kennwerte wurden folgende Untersuchungen durchgeführt:

- Erweichungspunkt Ring und Kugel gemäß DIN EN 1427 (32),
- Nadelpenetration gemäß DIN EN 1426 (33),
- Äqui-Schermodultemperatur $T(G^* = 15 \text{ kPa})$ und korrespondierender Phasenwinkel $\delta(G^* = 15 \text{ kPa})$ mit dem T-Sweep gemäß AL DSR-Prüfung (T-Sweep) (34) und AL DSR-Prüfung (BTSV) (35),
- Masterkurve des komplexen Schubmoduls G^* und Phasenwinkels δ (Beschreibung des Verfahrens siehe Abschnitt 3.2.3.1).

Spezifische Untersuchungen an Frischbitumen

- Biegekriechsteifigkeit S und m-Wert gemäß AL BBR-Prüfung (36).

Spezifische Untersuchungen an rückgewonnenen Bindemitteln aus Asphaltmischgut

- Durchschnittlicher nicht rückformbarer Anteil J_{nr} und durchschnittliche prozentuale Rückstellung R_N mit MSCR-Prüfung gemäß AL MSCR-Prüfung (DSR) (37),
- Ermüdungsfunktion (Beschreibung des Verfahrens siehe Abschnitt 3.2.3.2).

Die Zuordnung der verschiedenen Asphaltmischgutvarianten zu den jeweiligen Bindemittelproben sowie die für die Auswertung verwendete Farbkodierung sind in Tabelle 7 dokumentiert.

3.2.2 Rezeptierung der Asphaltgemische

Die Entwicklung der Asphaltmischgüter (Mix-Design) folgte einem systematischen Versuchsplan, um den Einfluss der Aufbereitungsmethode des Asphaltgranulats (RA) auf die Materialeigenschaften isoliert betrachten zu können.

Variantenmatrix

Gemäß Projektantrag wurden für alle vier Asphaltarten grundsätzlich drei Hauptvarianten untersucht:

- Referenz (=AX0): Ohne Asphaltgranulat,
- Konventionell (=AX1): Mit konventionell aufbereitetem Asphaltgranulat,
- Innovativ (RSB, =AX2): Mit Asphaltgranulat, das im Rotorschleuderbrecher aufbereitet und in abgesiebten einzelnen Fraktionen verwendet wurde.

Im Rahmen der projektbegleitenden Ausschusssitzungen wurde das Programm für die Asphalttragschicht um zwei Varianten erweitert:

- Variante A40.2: Herstellung ohne Asphaltgranulat, jedoch mit einem weicheren Straßenbaubitumen 50/70 (statt 30/45), um die Bandbreite der Bindemiteleinflüsse zu prüfen.
- Variante A42.2: Wiederholung der RSB-Variante (A42.1) mit korrigiertem Zugabebindemittelgehalt, um eine exakte Vergleichbarkeit zur konventionellen Variante (A41) sicherzustellen.

Eine detaillierte Übersicht über die Probenbezeichnungen der Asphaltvarianten, der jeweils verwendeten Asphaltgranulatvarianten und -zugabemengen, Bitumensorten sowie den Einsatz von Rejuvenatoren enthält Tabelle 6. Die einheitliche Farbkodierung für die Darstellung der Ergebnisse (gültig für die Bindemittel-, Mörtel- und Asphaltebene) ist in Tabelle 7 festgelegt.

Tabelle 6: Überblick der Untersuchungsvarianten und eingesetzten Baustoffe

Varianten- bezeichnung	Asphaltsorte	RA	RA-Menge [M.-%]	Resultierende Bitumensorte	Zugabebitu- men	Rejuvena- tor
A10	SMA 11 S	-	0	25/55-55A	25/55-55A	nein
A11	SMA 11 S	RA1-1	24,5	25/55-55A	25/55-55A RC	ja
A12	SMA 11 S	RA1-2	30	25/55-55A	25/55-55A RC	ja
A20	AC 8 D SP	-	0	25/55-55A	25/55-55A	nein
A21	AC 8 D SP	RA2-1	40	25/55-55A	25/55-55A RC	ja
A22	AC 8 D SP	RA2-2	40	25/55-55A	25/55-55A RC	ja
A30	AC 16 B S SG	-	0	25/55-55A	25/55-55A	nein
A31	AC 16 B S SG	RA3-1	40	25/55-55A	25/55-55A RC	nein
A32	AC 16 B S SG	RA3-2	40	25/55-55A	25/55-55A RC	nein
A40.1	AC 22 T S	-	0	30/45	30/45	nein
A40.2	AC 22 T S	-	0	50/70	50/70	nein
A41	AC 22 T S	RA4-1	57	30/45	70/100	nein
A42.1	AC 22 T S	RA4-2	57	30/45	70/100	nein
A42.2	AC 22 T S	RA4-2	57	30/45	70/100	nein

Tabelle 7: Überblick der Probenbezeichnung der Varianten auf Bindemittel-, Mörtel- und Asphaltebene mit zugehöriger Farbkodierung

Farbe	Probenbezeichnung der Varianten		
	Bindemittellebene	Mörtellebene	Asphaltebene
	B-A10	M10	A10
	B-A11	M11	A11
	B-A12	M12	A12
	B-A20	M20	A20
	B-A21	M21	A21
	B-A22	M22	A22
	B-A30	M30	A30
	B-A31	M31	A31
	B-A32	M32	A32
	B-A40.1	M40.1	A40.1
	B-A40.2	M40.2	A40.2
	B-A41	M41	A41
	B-42.1	M42.1	A42.1
	-	-	A42.2

Methodik: Drei-Ebenen-Ansatz

Die Rezeptierung und anschließende Prüfung erfolgt – in Anlehnung an die LE2AP-Methodik (17) – auf drei Untersuchungsebenen.

- Bindemittlebene,
- Mörtелеbene,
- Asphaltmischgutebene.

Die folgenden Abschnitte beschreiben die spezifische Vorgehensweise auf den jeweiligen Ebenen.

3.2.2.1 Bindemittlebene

Für das „Mix-Design“ auf der Bindemittlebene wählten die Forschungseinrichtungen einen prädiktiven Ansatz. Ziel war es, die Eigenschaften der resultierenden Bindemittelgemische (Bindemittel aus dem RA + Zugabebitumen) rechnerisch zu bestimmen und darauf basierend über den Einsatz von Additiven zu entscheiden.

Die resultierenden Kennwerte für die Varianten mit Asphaltgranulat wurden auf Basis des Formelansatzes aus Abschnitt 3.1.1 der TL Asphalt-StB (10) berechnet. Dabei wurden sowohl konventionelle als auch rheologische Parameter berücksichtigt:

- Konventionell: Erweichungspunkt Ring und Kugel (EP RuK) sowie Nadelpenetration,
- Rheologisch: Äqui-Schermodultemperatur $T(G^* = 15 \text{ kPa})$ und korrespondierender Phasenwinkel $\delta(G^* = 15 \text{ kPa})$.

Als Referenz dienten die Kennwerte der Frischbitumen, die in den Varianten ohne Asphaltgranulat (A10, A20, A30 und A40.1) verwendet wurden.

Anhand der berechneten Ergebnisse wurde im Vorfeld entschieden, ob ein Rejuvenator zur Optimierung der Bindemittleigenschaften (insbesondere zur Verjüngung des gealterten RA-Bindemittels) eingesetzt werden muss.

Um die Genauigkeit der rechnerischen Prognose zu überprüfen und das Bindemittelverhalten umfassend zu verstehen, wurden an den extrahierten Bindemitteln der hergestellten Asphaltmischgüter folgende Kontrollen durchgeführt:

- Standard-Kennwerte: Alle in Abschnitt 3.2.1.4 genannten Parameter.
- Rheologische Kennwerte: Ermittlung der Masterkurven für den komplexen Schubmodul G^* und den Phasenwinkel δ (siehe Abschnitt 3.2.3.1).
- Dauerhaftigkeit: Bestimmung der Ermüdungsfunktionen (siehe Abschnitt 3.2.3.2), um die Belastbarkeit der Bindemittelphase unter zyklischer Beanspruchung zu bewerten.

Da die Variante A42.2 eine reine Wiederholung der Variante A42.1 darstellt, wurden für diese keine separaten Untersuchungen auf der Bindemittlebene durchgeführt.

3.2.2.2 Asphaltmörtelebene

Die Ableitung der Asphaltmörtelzusammensetzung erfolgte methodisch in Anlehnung an den Entwurf der AL DSR-Prüfung (Mastix) (38). Dabei wurde der Mörtel als repräsentativer Bestandteil der jeweiligen Asphaltmischgutrezeptur definiert.

Die Zusammensetzung der Mörtelvarianten wurde direkt aus den resultierenden Asphaltrezepturen (siehe Abschnitte 3.2.2.3 und 4.1.2.3) sowie den Ergebnissen der Bindemittlebene abgeleitet. Der Berechnungsweg gestaltete sich wie folgt:

- Komponenten: Es wurden die gravimetrischen Anteile der feinen Gesteinskörnungen (Korngröße $\leq 2,0$ mm) sowie des Gesamtbindemittelgehalts herangezogen.
- Mörtel-Bindemittel-Verhältnis: Auf Basis dieser Anteile wurde das spezifische Massenverhältnis zwischen den feinen Gesteinskörnungen und dem Bindemittel ermittelt.
- Abgrenzung: Um eine klare Vergleichbarkeit der Untersuchungsebenen zu gewährleisten, wurden Fülleranteile sowie Anteile $\leq 2,0$ mm, die rechnerisch aus den groben Gesteinskörnungen stammen, in dieser spezifischen Betrachtung nicht berücksichtigt.

Die Untersuchungen auf Mörtелеbene dienten dazu, die angestrebte Äquivalenz der Varianten experimentell zu bestätigen. Hierzu wurden die in Abschnitt 3.2.4 erläuterten rheologischen Prüfverfahren durchgeführt.

Da die Variante A42.2 eine Wiederholung der Variante A42.1 darstellt, wurden für diese ebenso keine separaten Untersuchungen auf der Mörtелеbene durchgeführt.

3.2.2.3 Asphaltmischgutebene

Die Rezeptierung auf der Asphalteebe bildet die Grundlage für die Herstellung der Probekörper in Arbeitspaket D. Das primäre Ziel war es, innerhalb der jeweiligen Asphaltmischgutsorten eine maximale Vergleichbarkeit zu gewährleisten, um die Auswirkungen der verschiedenen Aufbereitungsverfahren des Asphaltgranulats isoliert bewerten zu können.

Um verfälschende Einflüsse durch unterschiedliche Zusammensetzungen auszuschließen, wurden für alle Varianten einer Asphaltmischgutsorte folgende Parameter identisch eingestellt:

- Gesamtbindemittelgehalt: Die Menge des Bindemittels wurde innerhalb einer Asphaltsorte (z.B. alle SMA 11 S-Varianten) konstant gehalten.
- Korngrößenverteilungen der Gesteinskörnungsgemische: Die Zusammensetzung wurde so gewählt, dass die Sieblinien der Varianten mit konventionellem RA, mit RSB-aufbereitetem RA und der Referenz ohne RA möglichst deckungsgleich sind.
- Zugabemengen Asphaltgranulat bzw. Bindemittelgehalt aus Asphaltgranulat (bei den Varianten mit Asphaltgranulat)
- Hohlraumgehalte.

Die Rezeptierung erfolgte für die vier Asphaltarten (siehe Tabelle 6). Wie in der Einleitung zu Abschnitt 3.2.2 bereits erwähnt, wurden die Asphalttragschichten um zwei zusätzliche Varianten erweitert. Während die Sieblinie auch hier konstant blieb, wurde bei der Variante A40.2 die Bindemittelhärte variiert (50/70 statt 30/45). Bei der Variante A42.2 wurde zudem der Zugabebindemittelgehalt präzisiert, um eine exakte Entsprechung zur konventionellen Vergleichsvariante A41 sicherzustellen.

Folgende Kennwerte wurden je Asphaltvariante im Rahmen der Rezeptierung bestimmt:

- Rohdichte gemäß TP Asphalt-StB, Teil 5 (31),
- Raumdichte am Marshall-Probekörper gemäß TP Asphalt-StB, Teil 6 (31),
- Hohlraumgehalt und Hohlraumausfüllungsgrad gemäß TP Asphalt-StB, Teil 8 (31).

Die im Labor hergestellten Asphaltmischgüter dienten als Basis für die Gewinnung der Probekörper. Zur Kontrolle der erzielten Qualitäten wurden die Kenndaten:

- Bindemittelgehalt gemäß TP Asphalt-StB (31), Teil 1 und 3 und
- Korngrößenverteilung gemäß TP Asphalt-StB (31), Teil 2.

ermittelt. Ergänzend erfolgte die Charakterisierung des aus dem Mischgut rückgewonnenen Bindemittels, um die Konformität mit dem rechnerischen Bindemittel-Design zu verifizieren. Die methodische Vorgehensweise ist bereits in Abschnitt 3.2.2.1 beschrieben.

3.2.3 Bindemittelperformance

3.2.3.1 Masterkurven des Komplexen Schubmoduls und des Phasenwinkels

Zur umfassenden Beschreibung des viskoelastischen Verhaltens der Bindemittel wurden Masterkurven für den komplexen Schubmodul G^*_B und den Phasenwinkel δ_B erstellt. Dies erlaubt eine Bewertung des Verformungswiderstandes und des viskoelastischen Verhaltens über einen weiten Frequenzbereich bei einer definierten Referenztemperatur.

Tabelle 8: Versuchsbedingungen Bestimmung der Masterkurve von Bitumen und Bindemittel im DSR

Platte-Platte 25 mm, Spaltbreite = 1,00 ± 0,01 mm					
Temperatur [°C]	50	60	70	80	90
Temperierzeit [min]	15 ± 1	15 ± 1	15 ± 1	15 ± 1	15 ± 1
Platte-Platte 8 mm, Spaltbreite = 2,00 ± 0,01 mm					
Temperatur [°C]	10	20	30	40	50
Temperierzeit [min]	15 ± 1	15 ± 1	15 ± 1	15 ± 1	15 ± 1
Platte-Platte 4 mm, Spaltbreite = 2,00 ± 0,01 mm					
Temperatur [°C]	20	10	0	-10	-15
Temperierzeit [min]	15 ± 1	15 ± 1	20 ± 1	20 ± 1	20 ± 1

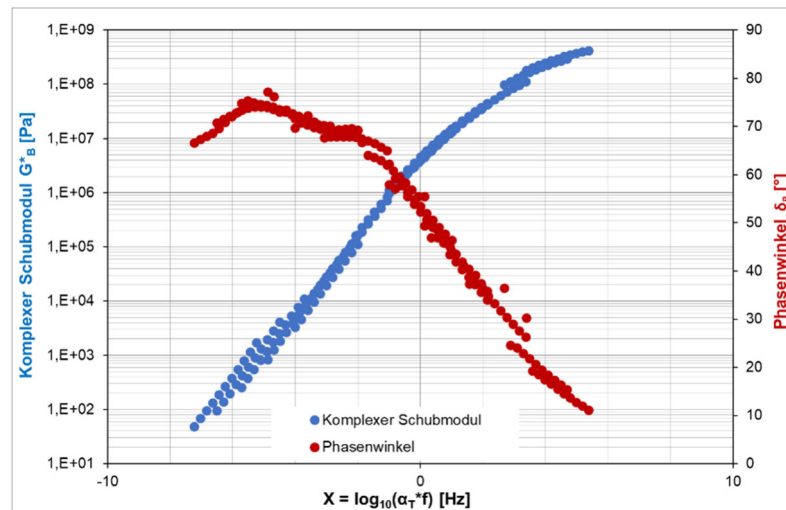


Abbildung 11: Beispiel Masterkurve Komplexer Schubmodul G^*_{δ} und Phasenwinkel δ_{δ} eines Polymermodifizierten Bitumens

Die Messungen erfolgten im Dynamischen Scherrheometer (DSR) in Anlehnung an die AL DSR-Prüfung (T-Sweep) (34). Abweichend zum Standard-Temperatur-Sweep wurde jedoch für jede Prüftemperatur ein Frequenz-Sweep im Bereich von 0,1 Hz bis 10 Hz durchgeführt. Die prüftechnischen Randbedingungen (Prüfsysteme, Temperaturen und Temperierzeiten) sind in Tabelle 8 zusammengefasst. Um eine statistische Absicherung zu gewährleisten, wurden für jede Variante, Temperaturstufe und Frequenz zwei Probekörper geprüft.

Die mathematische Beschreibung der Masterkurve erfolgte durch die Verschiebung der Einzelmesswerte entlang der Frequenzachse nach dem Temperatur-Frequenz-Äquivalenzprinzip unter Anwendung der von MEZGER et al. (39) beschriebenen Vorgehensweise. Als Referenztemperatur wurde $T_0 = 20\text{ °C}$ festgelegt. Durch diese Methode lassen sich die temperaturabhängigen Materialeigenschaften in einer einzigen, kontinuierlichen Funktion darstellen, was den Vergleich zwischen den verschiedenen Varianten (z. B. Referenz vs. konventionell vs. RSB) erleichtert. Ein beispielhafter Kurvenverlauf für ein polymermodifiziertes Bitumen (PmB) ist in Abbildung 11 dargestellt.

3.2.3.2 Ermüdungsfunktionen

Um die Widerstandsfähigkeit der Bindemittel gegen zyklische Beanspruchung zu bewerten, wurden Ermüdungsprüfungen im DSR durchgeführt. Die Untersuchung umfasste die aus den Asphaltmischgutvarianten zurückgewonnenen Bindemittel. Die Versuche erfolgten unter festgelegten Prüfbedingungen:

- Prüfsystem: Platte-Platte-Geometrie (8 mm Durchmesser) mit einem Prüfspalt von $2,00 \pm 0,01\text{ mm}$.
- Temperierung: Konstante Prüftemperatur von 20 °C bei einer Temperierzeit von $15 \pm 1\text{ min}$.
- Belastung: Oszillatorische Scherbeanspruchung mit einer Prüffrequenz von 10 Hz bei variierter Scheramplitude (Scherspannung).

Zur Bestimmung der Ermüdungslastwechselzahl wurde das Konzept des dissipierten Energieverhältnisses angewendet. Zunächst wird die „Energy Ratio“ ER_N als Produkt aus der Lastwechselzahl N und dem zugehörigen komplexen Schubmodul G_N^* berechnet:

$$ER_N = G_N^* \cdot N \quad (\text{Formel 1})$$

mit:

ER_N	Energy Ratio bei der betrachteten Lastwechselzahl N [N/mm ²]
G_N^*	berechneter komplexer Schubmodul G^* bei der betrachteten Lastwechselzahl N [N/mm ²]
N	betrachtete Lastwechselzahl [-]

Die Ermüdungslastwechselzahl $N_{\max}$ ist als das Maximum der Funktion $ER_N = f(N)$ definiert (siehe Abbildung 12). Dieser Punkt markiert den Beginn der Makrorissbildung im Probekörper, wonach eine rapide Abnahme des Verformungswiderstandes (komplexer Schubmodul G^*) bis zum vollständigen Versagen eintritt.

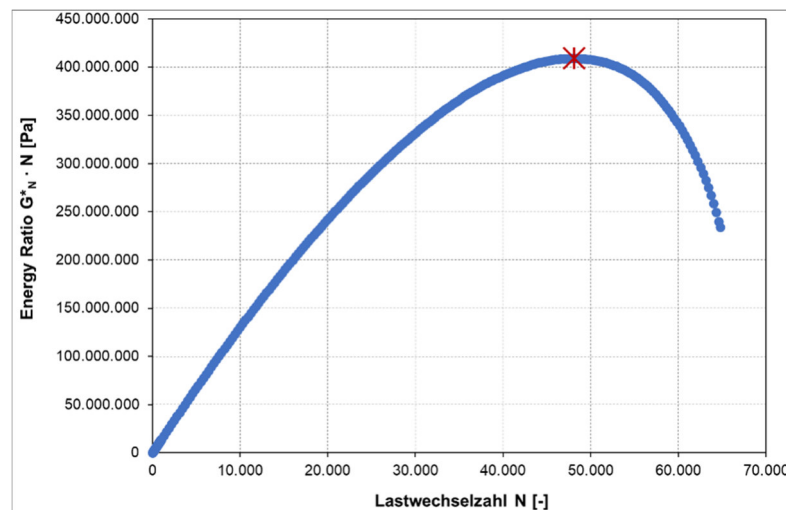


Abbildung 12: Beispiel für die Bestimmung der Lastwechselzahl $N_{\max}$ bis zum Kriterium „Makroriss“ für einen Ermüdungsversuch von Bitumen / Bindemittel im Platte-Platte-System

Die materialspezifische Ermüdungsfunktion beschreibt den Zusammenhang zwischen der anfänglichen Scherdehnung γ_{anf} bei $N = 100$ und der erreichten Lastwechselzahl bis zum Versagen. Zur mathematischen Beschreibung wird der Potenzansatz gewählt:

$$N_{\max} = a \cdot \gamma_{anf}^b \quad (\text{Formel 2})$$

mit:

$N_{\max}$	Anzahl der Lastwechselzahl bis zum Makroriss [-]
γ_{anf}	Scherdehnung bei Lastwechselzahl $N = 100$ [%]
a, b	materialspezifische Parameter der Ermüdungsfunktion des Bitumens bzw. Bindemittels [-]

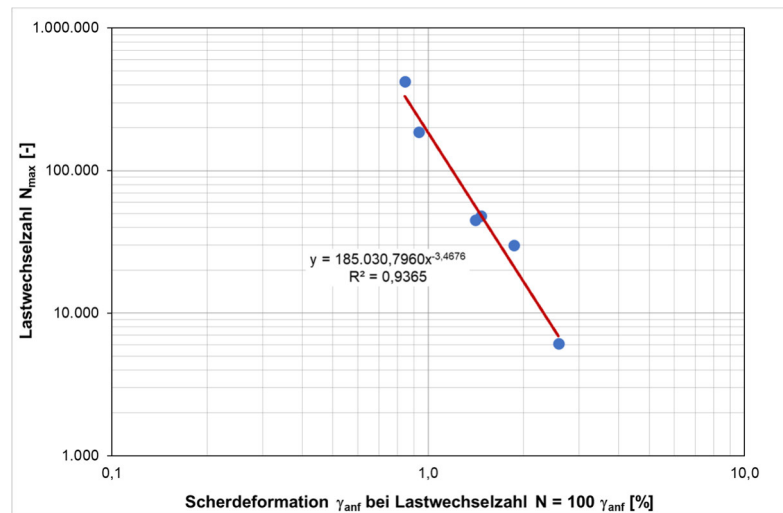


Abbildung 13: Beispiel für eine Ermüdungsfunktion von Bitumen / Bindemittel im Platte-Platte-System

Für eine statistisch belastbare Auswertung wurden je Variante mindestens sechs Probekörper auf verschiedenen Lastniveaus geprüft. Ein Beispiel für eine resultierende Ermüdungsfunktion ist in Abbildung 13 dargestellt.

3.2.4 Mörtelperformance

3.2.4.1 Probekörperperformen- und -abmessungen

Für die Charakterisierung der Asphaltmörtel im DSR existieren derzeit keine normativen Vorgaben. Die Festlegung der Probekörpergeometrien orientierte sich daher an aktuellen Forschungsergebnissen, u.a. SIVAPATHAM et al. (19) und MANGALATH et al. (40), und wurde durch eigene Tastversuche der Projektbearbeiter verifiziert.

Für die Bestimmung der Masterkurven δ (siehe Abschnitt 3.2.4.3), der Ermüdungsfunktionen (siehe Abschnitt 3.2.4.4) sowie der kryogenen Spannungen (Abkühlversuch, siehe Abschnitt 3.2.4.5) kamen zylindrische Probekörper mit einer spezifischen Modifikation zum Einsatz:

- Geometrie: Gekerbte, zylindrische Form mit zwei metallischen Einbauringen.
- Abmessungen: Gesamthöhe von 20 mm, Durchmesser in der Probekörpermitte (Kerbe) von 6 mm. Die Einbauringe weisen eine Höhe von 4 mm und einen Durchmesser von 10 mm auf (siehe Abbildung 14, links).

Durch die Kerbung wird die maximale Spannung gezielt in die Probekörpermitte verlagert. Dies verhindert das Versagen an der Schnittstelle zwischen Einbauring und Mörtel, was insbesondere bei Ermüdungs- und Abkühlversuchen die Ergebnisqualität erheblich verbessert.

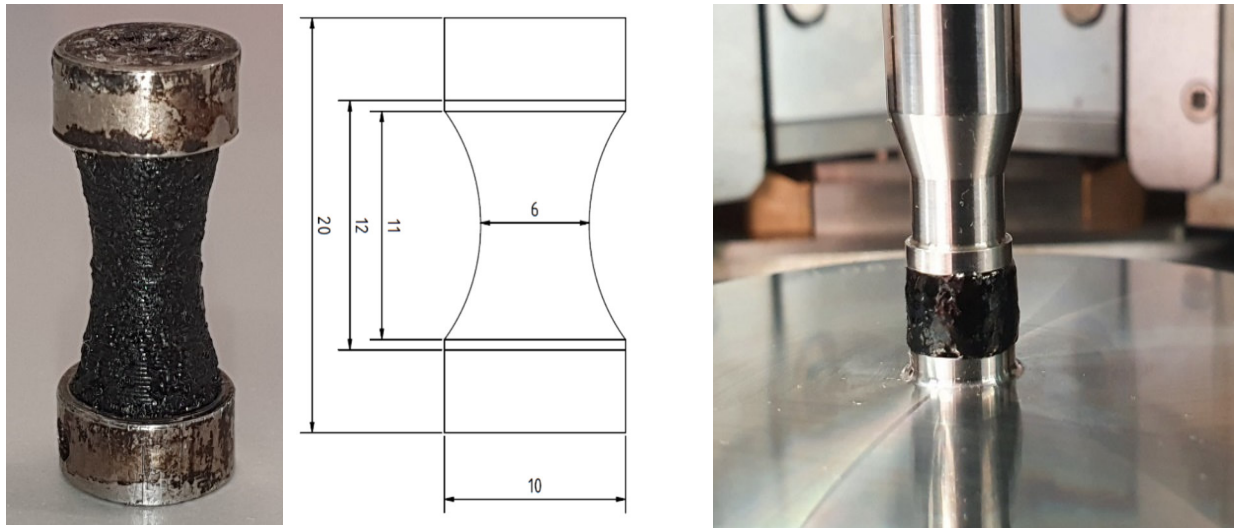


Abbildung 14: Beispiel & Abmessungen gekerbter, zylindrischer DMA-Probekörper (links) und zylindrischer Probekörper, Durchmesser 8 mm und Höhe 6 mm (rechts).

Zur Beurteilung des Verformungswiderstandes mittels Single Stress Creep Recovery Test (siehe Abschnitt 3.2.4.6) wurde eine Platte-Platte-Konfiguration gewählt:

- Prüfsystem: 8 mm Platte-Platte-System.
- Spaltmaß: Unter Berücksichtigung der maximalen Partikelgröße des Mörtels (2,0 mm) wurde ein Spalt von 6,0 mm (3-faches Größtkorn) festgelegt, um Randeinflüsse und Blockaden durch Gesteinspartikel zu minimieren.

Abbildung 14 (rechts) zeigt die Einbausituation eines solchen Probekörpers im DSR.

3.2.4.2 Herstellung des Mörtels und der Probekörper

Die Herstellung der Asphaltmörtel erfolgte auf Basis der in Abschnitt 3.2.2.2 beschriebenen Herleitung der Rezepturen. Dabei wurden zuerst die berechneten Mengen für Füller, feine Gesteinskörnungen (≤ 2 mm), Bindemittel (Frischbitumen und aus dem Asphaltgranulat zurückgewonnene Bindemittel) sowie ggf. Fasern und Rejuvenatoren eingewogen.

Das Herstellverfahren orientierte sich an SIVAPATHAM & SIMMLEIT (19) und wurde für das Projekt wie folgt spezifiziert:

1. Vorwärmen: Erhitzen der mineralischen Komponenten und des Bindemittels auf 180 °C (ca. 45 min).
2. Mischvorgang: Zur Sicherstellung der Homogenität wurde die Gesteinsmischung in mindestens drei Teilmengen unter ständigem Rühren in das Bitumen eingearbeitet.
3. Konditionierung: Kurzes Erhitzen des Gemisches auf 230 °C (max. 30 min), um die für das Gießen erforderliche Viskosität zu erreichen. Parallel wurden die Silikonformen auf 180 °C temperiert.

4. Formgebung: Hohlraumfreies Einfüllen der Mischung in die Silikonformen (für DMA-Probekörper) bzw. Teflonringe (für 8 mm Zylinder).
5. Abkühlphase: Lagerung für 30 min im Kühlschrank und anschließend 2 h bei Raumtemperatur. Diese kontrollierte Abkühlung ist zwingend erforderlich, um plastische Nachverformungen beim Ausschalen zu verhindern.
6. Nachbereitung: Entfernen von Überständen und eine Ruhezeit von mindestens 12 h vor Prüfbeginn.

Trotz der kurzzeitig hohen Temperatur von 230 °C bleibt die oxidative Alterung des Bindemittels in einem für die Praxis repräsentativen Rahmen. Vergleichende Untersuchungen (SIVAPATHAM et al. (19) und SCHNEIDER (41)) an extrahierten Bindemitteln zeigen:

- einen Anstieg des EP RuK von ≤ 6 °C und einen Rückgang der Nadelpenetrationswerte von ≤ 4 [1/10 mm],
- einen Anstieg der Äqui-Schermodultemperatur $T(G^* = 15 \text{ kPa})$ von 1,8 °C und einen Abfall des korrespondierenden Phasenwinkels $\delta(G^* = 15 \text{ kPa})$ von 1,9 °C.
- Diese Veränderungen liegen innerhalb der zulässigen Toleranzen für die Verhärtungsbeständigkeit (42) nach DIN EN 12607-1 (RTFOT-Verfahren).

Damit ist hinreichend nachgewiesen, dass die thermische Belastung während der Mörtelherstellung im Labor der Beanspruchung bei der großtechnischen Asphaltmischgutproduktion entspricht und die Ergebnisse somit übertragbar sind.

In Abbildung 15 sind die verwendeten Formen dargestellt, links die Silikonformen für die gekerbten DMA-Probekörper und rechts die Teflonringe für den Single Creep Recovery Test (SCRT).

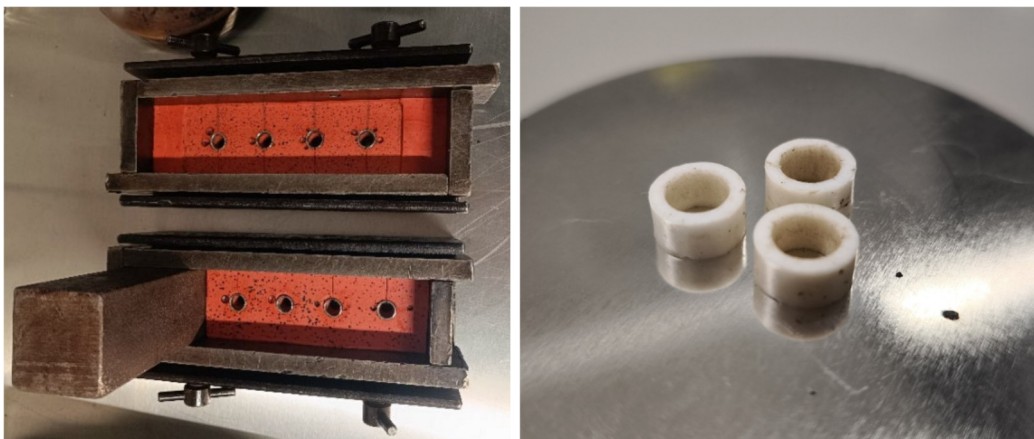


Abbildung 15: Silikonformen zur Herstellung der DMA-Probekörper (links) und Teflon-Ringe zur Herstellung der 8 mm-Zylinder (rechts)

3.2.4.3 Masterkurve des Komplexen Schubmoduls und des Phasenwinkels

Die rheologische Charakterisierung der Asphaltmörtel erfolgte durch die Bestimmung der Masterkurven für den komplexen Schubmodul G_M^* und den Phasenwinkel δ_M . Die Versuche

wurden in Anlehnung an den Entwurf der AL DSR-Prüfung (Mastix) (38) durchgeführt. Die Prüfparameter im DSR waren:

- Belastung: Oszillatorische Scherdeformation innerhalb des linear-viskoelastischen Bereichs (LVE).
- Frequenzbereich: Frequenz-Sweep zwischen 0,1585 Hz und 15,85 Hz.
- Temperierung: Die spezifischen Prüftemperaturen und die zugehörigen Gleichgewichtseinstellungsdauern sind in Tabelle 9 aufgeführt.
- Statistik: Um eine repräsentative Aussage zu treffen, wurden mindestens drei Probekörper pro Variante geprüft.

Tabelle 9: Versuchsbedingungen Bestimmung der Masterkurve von Mörtel im DSR

Temperatur [°C] und zugehörige Temperierzeit [min]					
-15	-10	0	10	20	30
20 ± 1	20 ± 1	20 ± 1	15 ± 1	15 ± 1	15 ± 1

Aufgrund der in Abschnitt 3.2.4.1 gewählten gekerbten Probekörperform können die rheologischen Kennwerte nicht über die Standardformeln für glatte Zylinder ermittelt werden. Um die tatsächlichen physikalischen Zustände an der Kerbspitze abzubilden, wurden Korrekturfaktoren nach MANGALATH et al. (40) angewendet:

1. Kerbscherdeformation γ_n :

$$\gamma_n = K_\gamma \cdot \gamma_{nom} \quad (\text{Formel 3})$$

2. Kerbscherspannung τ_n :

$$\tau_n = K_\tau \cdot \tau_{nom} \quad (\text{Formel 4})$$

3. Komplexer Schubmodul G_n^* :

$$G_n^* = \frac{\tau_n}{\gamma_n} = K_G \cdot G_{nom}^* \quad (\text{Formel 5})$$

mit:

γ_n	Kerbscherdeformation [-]
τ_n	Kerbscherspannung [Pa]
G_n^*	Komplexer Schubmodul des gekerbten Zylinders [Pa]
K_γ	Scherdeformationskorrekturfaktor [-]
K_τ	Schubspannungskorrekturfaktor [-]
K_G	Schubmodulkorrekturfaktor [-]
γ_{nom}	Scherdeformation am Außenrand eines Zylinders
τ_{nom}	Schubspannung am Außenrand eines Zylinders
G_{nom}^*	Komplexer Schubmodul des Zylinders [Pa]

Hierbei stehen die Indizes „nom“ für die nominellen Werte am Außenrand eines fiktiven, ungekerbten Zylinders bei gleichem Drehwinkel bzw. Drehmoment. Die Faktoren K_γ , K_τ und K_G kompensieren die Spannungskonzentration und die veränderte Geometrie im Kerbbereich.

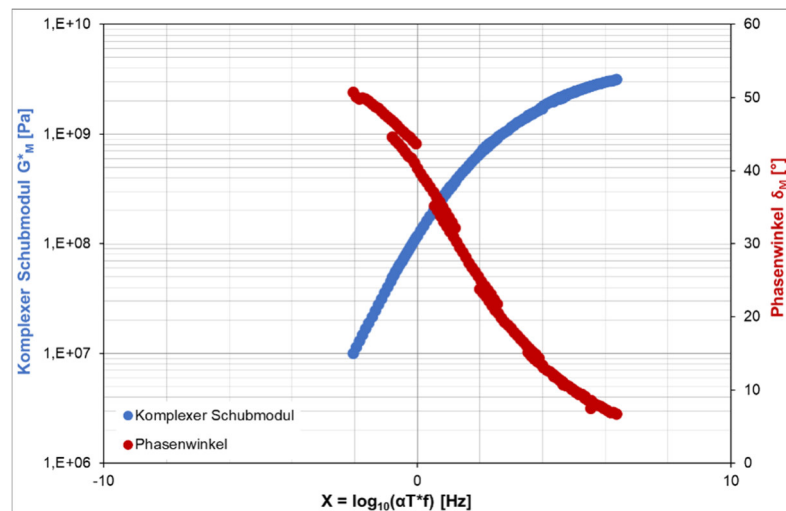


Abbildung 16: Beispiel Masterkurve Komplexer Schubmodul G^*_M und Phasenwinkel δ_M eines Mörtels

Zur Vereinfachung der weiteren Darstellung wird im Ergebnisteil für den korrigierten Modul G^*_n die Bezeichnung G^*_M („Mörtelmodul“) verwendet. Die Konstruktion der Masterkurve erfolgte nach MEZGER et al. (39) für eine Referenztemperatur von $T_0 = 20\text{ °C}$. Ein typisches Beispiel für den Verlauf der Masterkurve (Komplexer Schubmodul und Phasenwinkel) zeigt Abbildung 16.

3.2.4.4 Ermüdungsfunktion

Zur Charakterisierung der Schädigungsentwicklung unter zyklischer Belastung wurden Ermüdungsprüfungen am Asphaltmörtel durchgeführt. Die Versuche erfolgten in Anlehnung an die methodischen Vorgaben für Mastixprüfungen im DSR, wurden jedoch spezifisch auf die Korngrößenverteilung des Mörtels angepasst.

Die Versuche im DSR wurden unter folgenden Randbedingungen durchgeführt:

- Temperierung: Konstante Prüftemperatur von 20 °C bei einer Temperierzeit von $15 \pm 1\text{ min}$.
- Belastung: Oszillatorische Scherbeanspruchung mit einer Prüffrequenz von 10 Hz .

Um eine vollständige Ermüdungsfunktion ableiten zu können, wurde die Scherbeanspruchung über mehrere Lastniveaus variiert. Es wurden mind. 6 Probekörper geprüft.

Die Auswertung erfolgte analog zur methodischen Vorgehensweise auf der Bindemittel-ebene (siehe Abschnitt 3.2.3.2). Zentrales Element ist dabei die Identifikation des Versagenszeitpunktes.

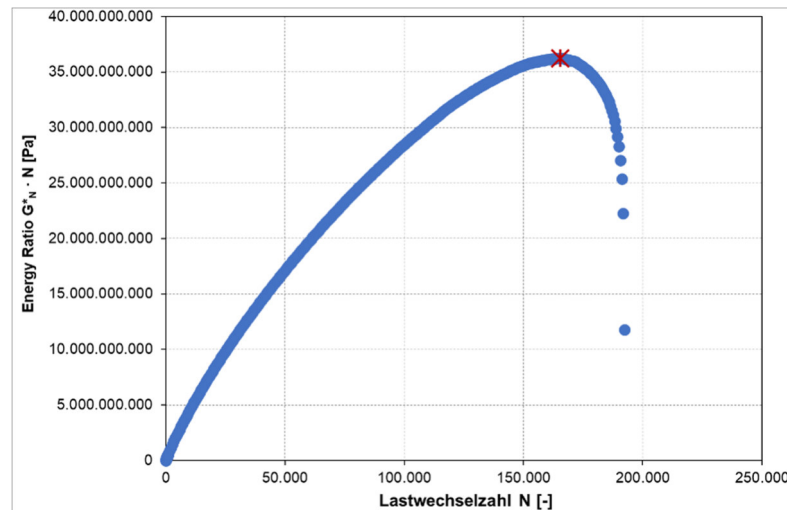


Abbildung 17: Beispiel für die Bestimmung der Lastwechselzahl $N_{\max}$ bis zum Kriterium „Makroriss“ für einen Ermüdungsversuch von Mörtel mit den DMA-Probekörpern

- Kriterium Makroriss ($N_{\max}$): Die Bestimmung der Lastwechselzahl bis zum Versagen basiert auf dem Maximum der "Energy Ratio". An diesem Punkt wird die Entstehung eines Makrorisses definiert, der aufgrund der Probekörpergeometrie gezielt in der Mitte der Kerbe initiiert wird (siehe Abbildung 17).
- Ermüdungsfunktion: Durch die Korrelation der Lastwechselzahlen mit den anfänglichen Scherdehnungen γ_{anf} wird die materialspezifische Ermüdungsfunktion des Mörtels erstellt (siehe Abbildung 18).

Die Verwendung der gekerbt-zylindrischen Probekörper zielt darauf ab, durch eine induzierte Spannungskonzentration in der Kerbe ein Materialversagen im Zentrum des Probekörpers hervorzurufen. Diese methodische Form des Probekörpers dient dazu, den Einfluss von Randeffekten im Bereich der Einbauringe auf das Ermüdungsverhalten zu minimieren und eine Lokalisierung der Schädigung im Mörtelgefüge zu begünstigen.

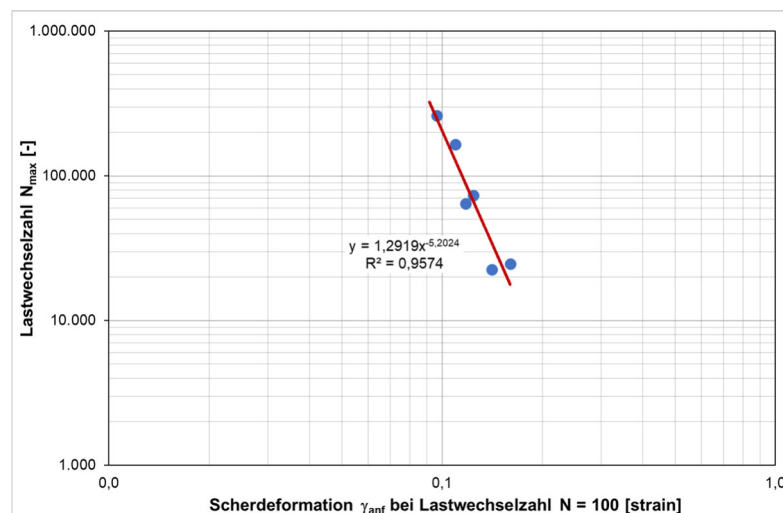


Abbildung 18: Beispiel für eine Ermüdungsfunktion von Mörtel mit den DMA-Probekörpern

3.2.4.5 Tieftemperaturverhalten (Abkühlversuch)

Zur Beurteilung des Tieftemperaturverhaltens der Asphaltmörtel wurde ein Abkühlversuch durchgeführt. Die methodische Umsetzung orientierte sich eng an dem für Asphaltmischgut genormten Verfahren nach TP Asphalt-StB, Teil 46 A (31), wurde jedoch für die Prüfung im DSR adaptiert. Die Prüfparameter im DSR waren:

- Startbedingungen: Die Probekörper wurden zunächst auf eine Ausgangstemperatur von +10 °C temperiert (Temperierzeit: 20 ± 1 min).
- Abkühlrate: Das System kühlte mit einer konstanten Rate von 10 K/h auf eine Zieltemperatur von -15 °C ab.
- Dehnungsbehinderung: Während des gesamten Vorgangs wurde der Probekörper auf konstanter Länge gehalten. Die durch die verhinderte thermische Kontraktion (Schrumpfung) entstehenden Zugkräfte wurden kontinuierlich aufgezeichnet.

Die kryogene Spannung σ_{kryo} resultiert aus der Behinderung der thermischen Verformung. Aufgrund der gewählten Probekörpergeometrie konzentriert sich der Spannungszustand auf den kleinsten Querschnitt:

- Berechnung: Die Spannung σ_{kryo} wird aus der gemessenen Zugkraft dividiert durch die Querschnittsfläche in der Probekörpermitte (Kerbe) berechnet.
- Statistik: Um eine repräsentative Aussage zu treffen, wurden mindestens drei Probekörper pro Variante geprüft.

Das Ergebnis der Messung ist die Funktion der kryogenen Spannung in Abhängigkeit von der Temperatur. Ein typischer Kurvenverlauf, der den Spannungsanstieg bei sinkenden Temperaturen verdeutlicht, ist in Abbildung 19 dargestellt.

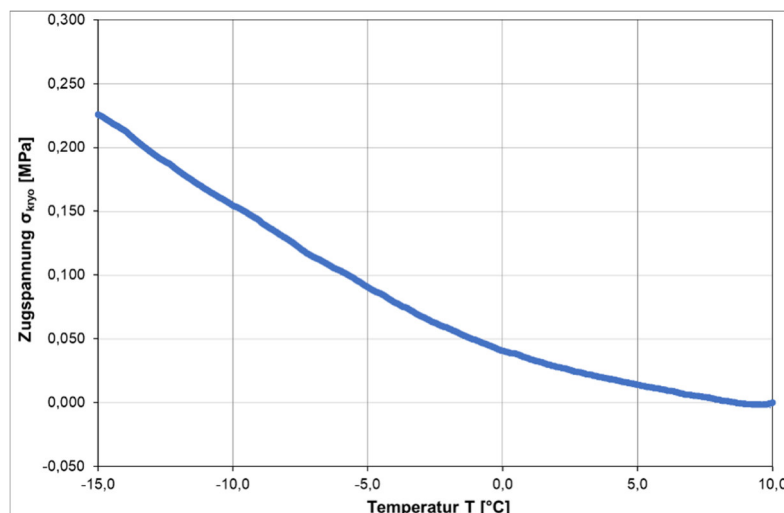


Abbildung 19: Beispielhafte Darstellung der kryogenen Spannung in Abhängigkeit von der Temperatur von Mörtel mit den DMA-Probekörpern

3.2.4.6 Verformungsverhalten (Single-Stress-Creep-Recovery-Test)

Zur Beurteilung des viskoelastischen Verformungsverhaltens bei hohen Temperaturen wurde der Single Stress Creep and Recovery Test (SSCRT) durchgeführt. Dieses Verfahren lehnt sich an den Entwurf der AL DSR-Prüfung (Mastix) (38) an und dient der Quantifizierung des Kriech- und Erholungsverhaltens von Asphaltmörteln.

Die Messungen erfolgten im Platte-Platte-System des DSR. Da die Mörtelprobekörper aufgrund ihrer mineralischen Zusammensetzung eine deutlich raue Oberflächentextur im Vergleich zu reinem Bitumen bzw. Asphaltmastix aufweisen, wurde ein modifizierter Versuchstart gewählt:

- Kraftschluss: Um einen definierten Kontakt zwischen DSR-Messplatte und Probekörper sicherzustellen, wurde vor Beginn der Kriechphase eine Einspannkraft von 0,1 N eingebracht.
- Geometrie: Durchmesser 8,0 mm bei einem Spaltabstand von 6,0 mm.

Die detaillierten Versuchsbedingungen (Temperaturen, Spannungen und Phasenlaufzeiten) sind in Tabelle 10 zusammengefasst.

Die Auswertung erfolgte in Anlehnung an das MSCR-Verfahren (gemäß AL MSCR-Prüfung (37)). Dabei wurden der elastische Rückformungsanteil und die Kriechnachgiebigkeit berechnet:

$$R = \frac{\gamma_c - \gamma_r}{\gamma_c} \cdot 100 \quad (\text{Formel 6})$$

$$J_{nr} = \frac{\gamma_r}{0,1 \text{ kPa}} \quad (\text{Formel 7})$$

mit:

R	Prozentuale Rückstellung [%]
J_{nr}	Kriechnachgiebigkeit [kPa^{-1}]
γ_c	Maximale Verformung durch die Kriechbeanspruchung [-]
γ_r	Verbleibende Verformung durch die Kriechbeanspruchung [-]

Tabelle 10: Versuchsbedingungen des SSCRT im DSR mit Mörtel

Durchmesser des Probekörpers	[mm]	8,0
Höhe des Probekörpers	[mm]	6,0
Prüftemperatur	[°C]	60
Gleichgewichtseinstellungsdauer	[min]	20 ± 1
Kraftschluss zwischen Platte DSR und Probekörper	N	0,1
Kriechspannung	kPa	0,1
Dauer der Kriechphase	h	5
Dauer der Erholungsphase	h	2

Als Prüfergebnis dient jeweils der Mittelwert aus mindestens drei Einzelprüfungen. Ein typischer Kurvenverlauf der Verformung über die Zeit ist in Abbildung 20 dargestellt.

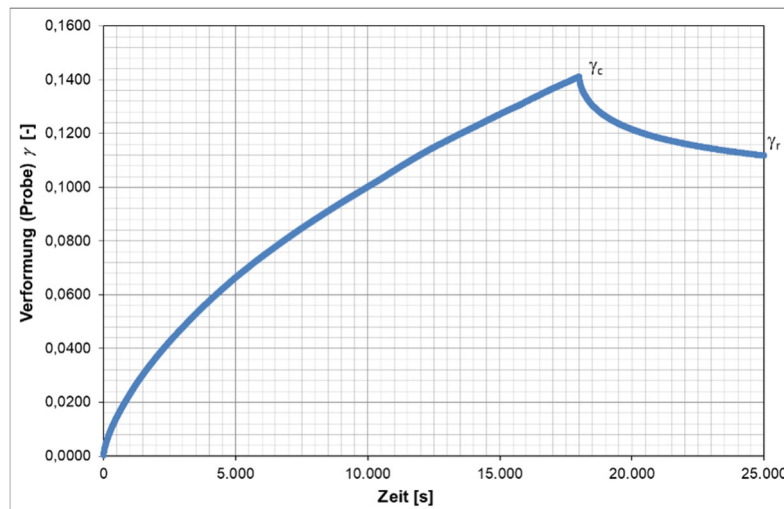


Abbildung 20: Beispielhafter Verlauf der Verformung eines Mörtel-Probekörpers im SSCRT

3.2.5 Asphaltperformance

Basierend auf den Ergebnissen der Rezeptierungen wurden die Asphaltgemische für die Performance-Untersuchungen im Labormaßstab gemischt. Dieser Abschnitt umfasst die Herstellung der Mischgüter sowie die systematische Prüfung der gebrauchsorientierten Eigenschaften.

3.2.5.1 Herstellung der Probekörper

Die Produktion der Asphaltmischgüter erfolgte gemäß TP Asphalt-StB, Teil 35 (31). Zur Gewinnung der erforderlichen Probekörper für die verschiedenen Asphaltvarianten (siehe Tabelle 6) wurden zunächst Asphalt-Probepplatten mittels Walzsegmentverdichter nach TP Asphalt-StB, Teil 33 hergestellt. Aus diesen Platten wurden die Probekörper herausgeschnitten bzw. gebohrt und anschließend planparallel geschnitten bzw. geschliffen (31), (43).

3.2.5.2 Untersuchungen zur Bestimmung der Asphaltperformance

Zur umfassenden Beurteilung der Asphaltgebrauchseigenschaften im Rahmen von Arbeitspaket D wurden folgende genormte Prüfverfahren durchgeführt:

- Steifigkeit: Bestimmung des E-Moduls im Spaltzug-Schwellversuch gemäß TP Asphalt-StB, Teil 26 (31).
- Ermüdungswiderstand: Bestimmung der Beständigkeit gegen Ermüdung im Spaltzug-Schwellversuch gemäß TP Asphalt-StB, Teil 24 (31).
- Tieftemperaturverhalten: Charakterisierung mittels einaxialem Zugversuch und Abkühlversuch gemäß TP Asphalt-StB, Teil 46 A (31).

- Verformungswiderstand: Durchführung von Druck-Schwellversuchen am schlanken Probekörper gemäß AL DSV slim (43).
- Verdichtungsverhalten: Untersuchung mittels Gyrator-Verdichter gemäß DIN EN 12697-31 (44). Die Auswertung der Verdichtbarkeit erfolgte über den Verdichtungswiderstand in Anlehnung an TP Asphalt-StB, Teil 10 B (31), wobei die Probekörperhöhe und die Verdichtungsarbeit (Anzahl der Gyrationen) berücksichtigt wurden.

3.3 Großtechnische Herstellung und Einbau von Asphaltmischgut mit Asphaltgranulat aus dem Rotorbrecher

Im Fokus von Arbeitspaket F stand die Übertragung der im Labor gewonnenen Erkenntnisse auf den industriellen Maßstab. Ziel war die großtechnische Produktion von Asphaltgranulat mittels Rotorbrecher-Technologie sowie die anschließende Herstellung und der Einbau des Asphaltmischguts in einer Erprobungsstrecke.

Im Gegensatz zur Aufbereitung der Ausbauasphalte für das Laborprogramm (siehe Abschnitt 3.2.1.1), bei der ein Rotorschleuderbrecher verwendet wurde, kam in der großtechnischen Phase ein Vertikalbrecher zum Einsatz. Da beide Maschinentypen zur Gruppe der Rotorbrecher zählen, bleibt das physikalische Wirkprinzip – die selektive Zerkleinerung durch Prallenergie – erhalten.

Mit dem im Vertikalbrecher aufbereiteten Asphaltgranulat wurden Asphaltmischgutvarianten produziert und in einer Untersuchungsstrecke eingebaut. Um die Gleichwertigkeit bzw. ggf. die Vorteile des Aufbereitungsverfahrens bewerten zu können, wurde parallel eine Variante mit konventionell aufbereitetem Asphaltgranulat hergestellt und unter möglichst identischen Bedingungen eingebaut.

Die Realisierung dieses Arbeitspaketes in einer realen Erprobungsstrecke wurde erst durch die Initiative und das Engagement einer Gruppe von Akteuren ermöglicht:

- Landeshauptstadt Dresden, Straßen- und Tiefbauamt
- BHS Bau- und Handelsgruppe GmbH & Co. KG
- AMOS Asphalt GmbH und AMSS GmbH & Co. KG
- BISTRA Bau GmbH & Co. KG

Den beteiligten Partnern gilt unser besonderer Dank für die sehr gute Zusammenarbeit, die Bereitstellung der Infrastruktur sowie für die Übernahme der damit verbundenen finanziellen Aufwendungen.

3.3.1 Vorversuche zur großtechnischen Aufbereitung

3.3.1.1 Zum Einsatz kommende Technik und Rahmenbedingungen

Die großtechnische Umsetzung erforderte eine sorgfältige Abstimmung der Maschinenparameter, da die Qualität des Endprodukts – analog zum Labormaßstab – maßgeblich von der Konfiguration des Vertikalbrechers (z. B. Prallwandgeometrie und Rotorgeschwindigkeit) abhängt.

Die Vorversuche zur innovativen Aufbereitung wurden im Februar 2024 auf dem Gelände der Asphaltmischanlage Salzenforst (AMOS Asphalt GmbH) durchgeführt. Die technische Leitung und Bereitstellung der Anlagentechnik erfolgte durch die BHS Bau- und Handelsgruppe GmbH & Co. KG in enger Abstimmung mit den Forschungseinrichtungen.



Abbildung 21: Von links nach rechts angeordnet, das Recyclingsieb SBR 2 Semimobil, der raupenmobile Vertikalbrecher Mag-Impact PTM 2100-2 und die Mobiscreen MSC 703i EVO

Folgende Kernkomponenten kamen zum Einsatz:

- Vertikalbrecher: Raupenmobiler Mag-Impact PTM 2100-2 (Hersteller: PRALL-TEC GmbH). Die Anlage verfügt über eine Antriebsleistung von 200 kW und ist für einen Durchsatz von 80 t/h bis 160 t/h ausgelegt.
- Vorsiebung: Da das Ausgangsmaterial (Deck- und Binderfräsgut der BAB A4) Stückgrößen > 40 mm aufwies, wurde ein semimobiles Baustoff-Recyclingsieb (SBR 2) zur Grobabsiebung vorgeschaltet.
- Nachsiebung: Das gebrochene Material wurde mittels einer mobilen Siebanlage (KLEEMANN Mobiscreen MSC 703i EVO) in vier Fraktionen klassiert. Die Siebbespannung wurde auf 6 mm, 9 mm und 13 mm festgelegt.

Die Aufbereitung fand unter erschwerten Witterungsbedingungen statt. Bei Temperaturen zwischen ca. 2 °C und 10 °C herrschte teils starker Niederschlag vor. Diese Randbedingungen sind bei der späteren Beurteilung der Materialfeuchte und der Trennschärfe der Siebanlage zu berücksichtigen.

Die räumliche Anordnung der gesamten Aufbereitungskette ist in Abbildung 21 dargestellt.

3.3.1.2 Zerkleinerungsprinzip des Vertikalbrechers

Das Funktionsprinzip des Vertikalbrechers ist eng mit dem des im Technikum eingesetzten Rotorschleuderbrechers verwandt. Beide Maschinentypen werden der Gruppe der Rotorbrecher zugeordnet (siehe Abschnitt 2.1). Die Zerkleinerung basiert ebenso auf der Nutzung kinetischer Energie durch gezielte Prallvorgänge.

Das Aufgabegut gelangt zentral in den Rotor, wo es durch die hohen Fliehkräfte der Rotordrehung nach außen beschleunigt wird. Die Schleuderplatten des Rotors lenken das Material mit hoher Umfangsgeschwindigkeit gegen die Rotorauskleidung. Dort trifft das Gut entweder auf fest installierte Prallplatten oder auf ein sich selbst regenerierendes Materialbett. Durch den Aufprall und die daraus resultierenden Mehrfachkollisionen findet eine selektive Zerkleinerung statt. Die Konfiguration der Aufprallzone hat dabei maßgeblichen Einfluss auf das Brechergebnis und den Verschleiß (45):

- Prallplattenring: Das Material trifft auf metallische Platten. Dies führt zu einer höheren Zerkleinerungsenergie und einer schärferen Kornform, erhöht jedoch den Verschleiß bei abrasiven Gesteinen (siehe Abbildung 22, links).
- Materialbettring: Das Gehäuse ist so konstruiert, dass sich eine Schicht aus dem Aufgabegut selbst bildet. Das nachfolgende Material prallt „Stein auf Stein“ (oder hier „Asphaltgranulat“ auf „Asphaltgranulat“), was die Kornform schont und den Verschleiß der Maschine minimiert (siehe Abbildung 22, rechts).



Abbildung 22: Vertikalbrecher mit Prallplattenring (links) und Materialbettring (rechts)
(45)

3.3.1.3 Untersuchungsvarianten der Vorversuche

Um für die anschließende großtechnische Produktion des Asphaltgranulats die ideale Maschinenkonfiguration zu identifizieren, wurde im Rahmen von Vorversuchen eine systematische Variation der Prozessparameter vorgenommen. Ziel war es, eine Konfiguration zu finden, die eine optimale Korngrößenverteilung bei gleichzeitigem Erhalt der Gesteinsqualität und sehr geringem Bindemittelgehalt der größten Fraktionen (max. 1 M.-%) ermöglicht.

Im Fokus der Untersuchungen standen die zwei wesentlichen Stellgrößen des Vertikalbrechers:

- Auskleidung des Ringes: Vergleich zwischen der Zerkleinerung mit Prallplattenring und der Zerkleinerung mit Materialbettring.
- Rotorgeschwindigkeit: Variation der Umfangsgeschwindigkeit des Schleudertisches zur Steuerung der kinetischen Energie beim Aufprall.

Tabelle 11: Maschinenkonfigurationen für die Vorversuche mit dem Vertikalbrecher zur Aufbereitung des Fräsgutes RA5 sowie zugehörige Probenbezeichnung

Farbe	Probenbezeichnung	Ausgangsmaterial	Maschinenkonfiguration	
			Auskleidung	Rotorgeschwindigkeit [m/s]
	RA5-2 VV1	RA5	Prallplatten	45
	RA5-2 VV2		Prallplatten	55
	RA5-2 VV3		Prallplatten	65
	RA5-2 VV4		Materialbett	45
	RA5-2 VV5		Materialbett	55
	RA5-2 VV6		Materialbett	65

Beide Parameter beeinflussen vermutlich den Zerkleinerungsgrad, die resultierende Siebliene sowie die Verteilung der Bindemittelgehalte innerhalb der gewonnenen Fraktionen.

In Abstimmung zwischen der BHS Bau- und Handelsgruppe GmbH & Co. KG und der Forschungseinrichtung 1 (FE 1) wurden die in Tabelle 11 aufgeführten Maschinenkonfigurationen festgelegt. Zur eindeutigen Zuordnung der Proben und Ergebnisse in der späteren Auswertung (siehe Abschnitt 4.2.1) wurde ein Probenschlüssel definiert.

3.3.1.4 Indizes zur Charakterisierung der Aufbereitung von Asphaltgranulat

Um die verschiedenen Maschinenkonfigurationen des Vertikalbrechers objektiv bewerten und vergleichen zu können, wurde die von ZAUMANIS et al. (46) entwickelte Methode herangezogen. Diese basiert auf drei spezifischen Indizes, die den Aufschlussgrad sowie die unerwünschte Kornzertrümmerung mathematisch beschreiben.

Die Berechnung der Indizes erfolgt durch den Vergleich der Stückgrößenverteilung (des Asphaltgranulats) mit der tatsächlichen Korngrößenverteilung (nach der Extraktion des Bindemittels). In Abbildung 23 ist das Prinzip dieser Kennwertermittlung grafisch verdeutlicht. Folgende Kennwerte wurden berechnet (46):

- **Chunk Index (CI):** Dieser Index beschreibt die Differenz zwischen der Stückgröße und der tatsächlichen Korngröße des aufbereiteten Materials. Ein niedriger Chunk Index deutet darauf hin, dass das Asphaltgranulat weitgehend in seine Einzelkomponenten aufgeschlossen wurde und kaum noch als Agglomerat ("Chunks") vorliegt. Dies ist entscheidend für eine schnelle und homogene Durchmischung im Asphaltmischer.
- **Breakdown Index (BI):** Dieser Index quantifiziert die Veränderung der Korngrößenverteilung zwischen dem Ausgangsmaterial (Fräsgut) und dem Endprodukt. Er ist ein direktes Maß für die Kornverfeinerung während des Brechvorgangs.
- **Filler Increase Index (FI):** Dieser Index betrachtet spezifisch den Zuwachs der Fraktion $\leq 0,063$ mm. Da ein zu hoher Fülleranteil die Mastixsteifigkeit negativ beeinflussen kann, ist auch hier ein minimaler Wert anzustreben.

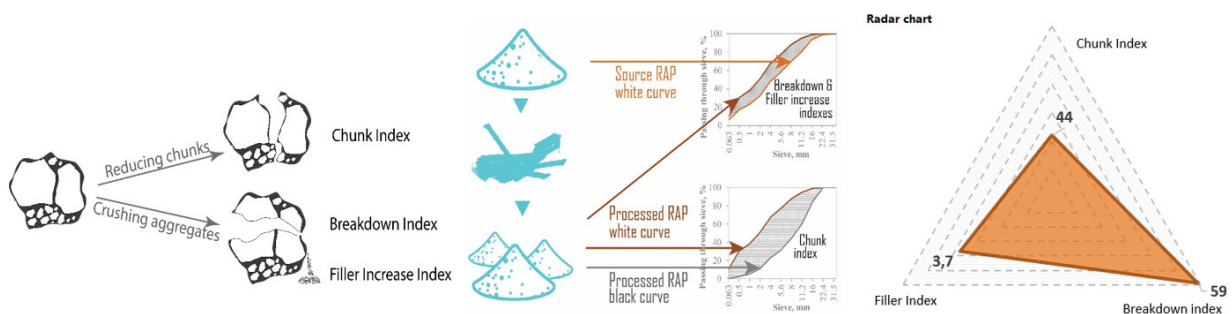


Abbildung 23: Indizes zur Charakterisierung der Verarbeitung von Asphaltaufbereitungsmaterial nach (46)

Für eine hochwertige Aufbereitung gilt also (46), je kleiner die Werte aller drei Indizes, desto effizienter und schonender ist das Verfahren. Ein idealer Aufschluss löst den Verbund (niedriger CI), ohne das ursprüngliche Gesteinsgerüst zu verändern (niedriger BI und FI).

Hinweis: Während diese Methodik für die großtechnischen Versuche im Vertikalbrecher konsequent angewendet wurde, lagen für die vorangegangenen Technikumsversuche (Abschnitt 3.2.1.1 und 3.2.1.2) noch keine ausreichenden Datengrundlagen für eine Berechnung dieser Indizes vor.

3.3.2 Beschreibung der Bauvorhaben für die Untersuchungs- und Referenzstrecke

Die großtechnische Erprobung erfolgte in enger Zusammenarbeit mit dem Straßen- und Tiefbauamt der Landeshauptstadt Dresden. Um eine objektive Bewertung des im Vertikalbrecher aufbereiteten Materials im Vergleich zur konventionellen Aufbereitung zu ermöglichen, wurden zwei räumlich und verkehrstechnisch vergleichbare Bauvorhaben ausgewählt.

3.3.2.1 Untersuchungsstrecke (VB-Strecke)

Die Erprobung des Asphaltmischguts mit im Vertikalbrecher (VB) hergestellten Asphaltgranulats erfolgte im Rahmen des Bauvorhabens „Erneuerung Asphaltoberbau Ullersdorfer Straße zwischen Ullersdorfer Platz und Oybiner Straße in Dresden“ (Dresden-Weißig).

Gemäß Angaben des Baulastträgers entspricht die Belastung der Verkehrsfläche der Klasse Bk1,8. Aufgrund des hohen Busanteils und der Stauneigung in diesem Bereich wurde gemäß RStO 12/24 eine Asphaltbinderschicht vorgesehen.

Der Oberbau erfolgte auf einer vorhandenen Packlage, die im Zuge von Aufgrabungen punktuell durch eine 20 cm starke hydraulisch gebundene Tragschicht (HGT) ersetzt wurde.

Geplanter Schichtaufbau:

3 cm Deckschicht aus Asphaltbeton AC 8 D S mit PmB 25/55-55 A

5 cm Binderschicht AC 16 B S SG mit PmB 25/55-55 A (*Untersuchungsobjekt*)

9 cm Binderschicht AC 16 B S SG mit PmB 25/55-55 A als Profilausgleich

17 cm Gesamtaufbau; auf Packlage

3.3.2.2 Referenzstrecke

Da ein Wechsel der Asphaltmischgutrezeptur innerhalb des Bauvorhabens der Ullersdorfer Straße logistisch nicht sinnvoll war, wurde für das Referenzmischgut (Asphaltmischgut mit konventionell aufbereitetem Asphaltgranulat) das Bauvorhaben „Ausbau der K 6206 Hauptstraße und Bergstraße, 2. Bauabschnitt, 3. Teilabschnitt“ (ebenfalls Dresden-Weißig) genutzt.

Die Strecke ist ebenso einer Belastungsklasse Bk1,8 gemäß RStO 12/24 (47) zugeordnet. Die Wahl des Befestigungsaufbaus erfolgte nach Tafel 4 der RStO 12/24.

Geplanter Schichtaufbau:

4 cm AC 11 D N mit 50/70

6 cm AC 16 B S SG mit PmB 25/55-55 A (*Referenzobjekt*)

24 cm AC 22 T N mit 50/70

34 cm Gesamtaufbau (Vollgebundener Oberbau)

3.3.2.3 Zusammenfassung

Die Bauausführung beider Strecken lag in den Händen der BISTRA Bau GmbH & Co. KG. Die zeitnahe Realisierung im März 2024 gewährleistete vergleichbare klimatische Bedingungen während des Einbaus.

Tabelle 12: Kenndaten der Referenz- und Untersuchungsstrecke zur Validierung der Vertikalbrecher-Technologie

Kenngröße	Referenzstrecke	Untersuchungsstrecke (VB)
Bauvorhaben	K 6206 Haupt-/Bergstraße	Ullersdorfer Straße
Belastungsklasse	Bk1,8	Bk1,8
Asphaltmischgutsorte	AC 16 B S SG mit 25/55-55 A	AC 16 B S SG mit 25/55-55 A
Aufbereitung RA	konventionell	Vertikalbrecher (VB)
Bezeichnung Asphaltvariante	A51	A52
Einbaudatum	27.03.2024	20.03.2024

3.3.3 Produktion der Asphaltgranulate

3.3.3.1 Konventionelle Aufbereitung: Technik und Rahmenbedingungen

Als Ausgangsmaterial für die Referenzvariante diente das Asphaltdeck- und Asphaltbinderschichtfräsgut desselben Ursprungs wie bei den Vorversuchen. Die Aufbereitung erfolgte auf dem Betriebsgelände des Asphaltmischwerkes Salzenforst unter Einsatz eines horizontalen Prallbrechers vom Typ Powerscreen® Trakpactor 320 (siehe Abbildung 24).



Abbildung 24: Powerscreen® Trakpactor 320 für die konventionelle Aufbereitung des Fräsgutes

Dieser Anlagentyp zerkleinert das Material durch horizontale Prallimpulse. Das Fräsgut wurde im geschlossenen Kreislauf prozessiert. Material mit einer Stückgröße > 16 mm wurde nach dem ersten Brechgang automatisch zurückgeführt, bis ein Endprodukt mit einer maximalen Stückgröße von 16 mm vorlag. Das so gewonnene konventionelle Asphaltgranulat wird im weiteren Verlauf als RA5-1 bezeichnet.

3.3.3.2 Aufbereitung im Vertikalbrecher: Technik und Rahmenbedingungen

Für die alternative Aufbereitung wurde identisches Ausgangsmaterial (Asphaltdeck- und Asphaltbinderschichtfräsgut) wie bei den Vorversuchen und der konventionellen Aufbereitung verwendet. In Abstimmung mit der BHS Bau- und Handelsgruppe GmbH & Co. KG wurde

jedoch ein komplexerer, mehrstufiger Aufbereitungsprozess gewählt, um die Vorteile der selektiven Zerkleinerung des Vertikalbrechers gezielt zu nutzen:

1. Vorklassierung: Das Fräsgut wurde zunächst über das Baustoff-Recyclingsieb SBR 2 und anschließend über die Siebanlage Mobiscreen MSC 703i EVO auf 13 mm abgesiebt.
2. Gezielte Zerkleinerung: Lediglich die Grobfraction (13/60 mm) wurde dem Vertikalbrecher Mag-Impact PTM 2100-2 (siehe Abbildung 25) zugeführt. Basierend auf den Ergebnissen der Vorversuche (siehe Abschnitt 4.2.1) wurde die Maschinenkonfiguration Materialbett bei einer Rotorgeschwindigkeit von 65 m/s gewählt.
3. Nachklassierung: Das gebrochene Material wurde abschließend erneut mit der Mobiscreen MSC 703i EVO in vier Fraktionen getrennt (Siebbespannung: 13 mm, 18 mm und 25 mm).

Für die Herstellung des Asphaltbinders in der Untersuchungsstrecke wurden die Fraktionen < 13 mm (RA5-2-1) und 13/18 mm (RA5-2-2) verwendet. Die Fraktionen > 18 mm verblieben außerhalb der weiteren Untersuchungen.



Abbildung 25: Vertikalbrecher Mag-Impact PTM 2100-2

3.3.4 Asphaltmischgutherstellung

Die Produktion des Asphaltmischguts (AC 16 B S SG) erfolgte im Mischwerk Dresden-Heller (AMSS GmbH & Co. KG). Hierfür wurden die zuvor in Salzenforst aufbereiteten Asphaltgranulate RA5-1 (konventionell) sowie RA5-2-1 und RA5-2-2 (VB-Technologie) angeliefert.

3.3.4.1 Rezeptierung und Zugabemengen

Die Erstellung der Erstprüfungen erfolgte durch das Labor der BHS Bau- und Handelsgruppe GmbH & Co. KG. Ein wesentlicher Unterschied zwischen den Varianten liegt in der Aufbereitung der verwendeten Asphaltgranulate und deren Zugabemenge:

- Referenzmischgut (A51): Einsatz von 30 M.-% konventionell aufbereitetem Asphaltgranulat (RA5-1). Die Zugabe erfolgte direkt in den Mischer.

- VB-Mischgut (A52): Einsatz von insgesamt 40 M.-% innovativ aufbereitetem Asphaltgranulat. Dabei wurden 30 M.-% der feineren Fraktion (RA5-2-1) direkt in den Mischer gegeben, während die gröbere Fraktion (10 M.-% RA5-2-2) gemeinsam mit dem frischen Gesteinskörnungen über die Trockentrommel erwärmt und dosiert wurde.

Tabelle 13 zeigt, dass trotz der unterschiedlichen Aufbereitung und der höheren Gesamtzugabemenge des Asphaltgranulats beim VB-Mischgut nahezu identische Zielwerte für die Korngrößenverteilung, den Bindemittelgehalt und den Hohlraumgehalt für das Mischgut beider Asphaltvarianten bei der Erstprüfung erreicht wurden.

Tabelle 13: Gegenüberstellung Ergebnisse Erstprüfung des AC 16 B S SG mit konventionell hergestelltem Asphaltgranulat (RA5-1) und Asphaltgranulat aus dem Vertikalbrecher (RA5-2)

Kennwert	Einheit	EP A51 (mit RA5-1)	EP A52 (mit RA5-2)
Zugabemenge RA	M.-%	30	30 → RA5-2-1 10 → RA5-2-2
Bindemittelgehalt	M.-%	5,0	5,0
Resultierender $T_{R\&B}$	°C	61,7	63,0
Anteil < 0,063 mm	M.-%	7,1	7,1
Anteil < 0,125 mm	M.-%	9,3	9,3
Anteil 0,063 mm bis 0,125 mm	M.-%	26,2	26,2
Anteil > 2,0 mm	M.-%	66,7	66,7
Grobkornanteil	M.-%	20,5	20,5
Hohlraumgehalt MPK	Vol.-%	3,8	3,7

3.3.4.2 Produktion und Probenahme

Um die Performance-Eigenschaften des produzierten Mischguts umfassend untersuchen zu können (siehe Abschnitt 3.3.6), erfolgte direkt am Asphaltmischwerk eine umfangreiche Probenahme durch die Forschungseinrichtungen.

Dabei wurden die folgenden produktionstechnischen Eckdaten erfasst:

- Produktion A51 (Referenzstrecke): Die Herstellung fand am 27.03.2024 mit einer Tonnage von 148 t statt. Hier wurde bei der Probenahme eine Mischguttemperatur von 166 °C gemessen.
- Produktion A52 (VB-Strecke): Die Herstellung erfolgte am 20.03.2024 mit einer Gesamttonnage von 329 t. Das Mischgut wies bei der Probenahme eine Temperatur von 188 °C auf.

Zwischen den beiden Produktionstagen lag ein Zeitraum von einer Woche. Weil das im Werk verwendete Frischbitumen (PmB 25/55-55 A) kontinuierlich angeliefert wird, bestand die begründete Vermutung, dass es sich bei den Chargen (B7f für A52 und B8f für A51) um unter-

schiedliche Lieferchargen handelt. Da die Performance des fertigen Asphalts erfahrungsgemäß maßgeblich vom enthaltenen Frischbitumen beeinflusst wird, wurden gezielt Proben beider Chargen entnommen. Ziel dieser Beprobung und späteren Untersuchung war es, sicherzustellen, dass etwaige Unterschiede in der Asphaltperformance tatsächlich im Aufbereitungsverfahren begründet liegen und nicht auf Schwankungen in der Qualität des zugegebenen Frischbitumens zurückzuführen sind.

3.3.5 Einbau der Untersuchungs- und Referenzstrecken

Die bautechnische Umsetzung beider Bauvorhaben erfolgte durch die BISTRA Bau GmbH & Co. KG. Der Einbau der Asphaltbinderschichten fand auf der VB-Strecke am 20.03.2024 und auf der Referenzstrecke am 27.03.2024 statt.

Klimatische Einbaubedingungen

Die Witterungsverhältnisse an beiden Einbautagen waren für die Verarbeitung von Asphaltmischgut als günstig einzustufen:

- Referenzstrecke (27.03.2024): Die Temperaturen stiegen von morgendlichen 10 °C (bedeckt, leicht windig) im Tagesverlauf auf ca. 15 °C an, bei gleichzeitigem Aufklaren des Himmels.
- VB-Strecke (20.03.2024): Bei Arbeitsbeginn lag die Lufttemperatur bei ca. 10 °C. Der Tag war heiter und nahezu windstill, was eine qualitätsgerechte Verdichtung des Mischguts begünstigte.

Maschinentechnische Ausstattung

Um eine vergleichbare Verdichtungsleistung und Oberflächenqualität sicherzustellen, kam auf beiden Baustellen eine nahezu identische Einbau- und Verdichtungstechnik zum Einsatz (siehe Tabelle 14).

Der Einbauprozess verlief auf beiden Strecken ohne maschinentechnische Störungen. Die optische Beurteilung der eingebauten Asphaltbinderschichten (siehe Abbildung 26) bestätigte ein homogenes Oberflächenbild bei beiden Asphaltvarianten.

Tabelle 14: Eingesetzte Einbautechnik im Vergleich

Gerätetyp	Referenzstrecke	VB-Strecke
Hauptfertiger	Dynapac SD2500WS	Dynapac SD2500CS
Zusatzfertiger	Svedala Demag DF 135 P *	Svedala Demag DF 135 P
Walzeneinsatz	1 x BOMAG BW 154 AP 1 x BOMAG BW 154 ACP 1x BOMAG BW 138 AD	1 x BOMAG BW 154 AP 1 x BOMAG BW 154 ACP 1x BOMAG BW 120 AD

* Einsatz primär im Kreuzungs- und Anschlussbereich



Abbildung 26: Oberflächenstruktur des eingebauten und verdichteten AC 16 B SG, Referenzstrecke (links) und VB-Strecke (rechts)

3.3.6 Untersuchungsprogramm

3.3.6.1 Charakterisierung der Asphaltgranulate

Die Untersuchung der Asphaltgranulate erfolgte in zwei Stufen:

1. Asphaltgranulate der Vorversuche (VB): Zur Optimierung der Maschinenkonfiguration (Auskleidung, Geschwindigkeit) wurden die Stück- und Korngrößenverteilungen des Aufgabegutes (Fräsgutes) und des Gesamtaustrages sowie die Bindemittelgehalte der einzelnen Siebfraktionen (0/6 mm, 6/9 mm, 9/13 mm und ≥ 13 mm) ermittelt.
2. Produzierte Asphaltgranulate: An den finalen Asphaltgranulaten (RA5-1, RA5-2-1, RA5-2-2) wurden die Stück- und Korngrößenverteilungen, Bindemittelgehalte, Rohdichten und Fremdstoffanteile bestimmt. Die Eigenschaften der zurückgewonnenen Gesteinskörnungen sowie die Kennwerte der aus den Asphaltgranulaten extrahierten Bindemittel wurden analog zu den in Abschnitt 3.2.1.2 definierten Prüfverfahren ermittelt.

3.3.6.2 Bitumen und zurückgewonnene Bindemittel

An den Zugabebitumen und an den rückgewonnenen Bindemitteln aus den Asphaltmischgütern erfolgte die Bestimmung der in Abschnitt 3.2.1.4 aufgeführten Kennwerte bzw. Eigenschaften.

Zur vertieften Charakterisierung der im Rahmen der großtechnischen Herstellung verwendeten Bindemittel wurden ergänzend zu den rheologischen Prüfungen chemisch-analytische Untersuchungen an den verwendeten Zugabebitumen bzw. den zurückgewonnenen Bindemitteln aus dem Asphaltmischgut und ergänzend an einem aus dem Asphaltgranulat zurückgewonnenem Bindemittel am Institut für Verkehrswesen der Universität Kassel durchgeführt.

Die Bestimmung der kolloidalen Zusammensetzung erfolgte mittels SARA-Analyse (Saturates = gesättigte Kohlenwasserstoffe, Aromatics = Aromate, Resins = Harze, Asphaltenes = Asphalten) durch selektive Adsorptionschromatografie. Basierend auf den Massenanteilen der vier Fraktionen wurde der Gaestel-Index (I_c) berechnet (Formel 8), um die kolloidale Stabilität (Sol-Gel-Gleichgewicht) zu bewerten (48). Ein höherer Gaestel-Index deutet dabei auf eine stärker ausgeprägte Gel-Struktur und ein potenziell eingeschränktes Relaxationsvermögen hin.

$$I_c = \frac{(\text{Asphaltene} + \text{gesättigte Kohle Wasserstoffe})}{(\text{Aromate} + \text{Harze})} \quad (\text{Formel 8})$$

mit:

I_c Gaestel-Index [-]

Parallel dazu wurde die Fourier-Transform-Infrarot-Spektroskopie (FTIR) eingesetzt, um den oxidativen Alterungszustand der Bitumen bzw. Bindemittel quantitativ zu erfassen. Die Analyse konzentrierte sich auf die Bestimmung der Peak-Areale im Bereich der Wellenzahlen von ca. 1.700 cm^{-1} (Carbonyl-Index $I_{C=O}$) und 1.030 cm^{-1} (Sulfoxid-Index $I_{S=O}$). Diese Indizes dienen als chemische Marker für den Alterungsgrad und ermöglichen Rückschlüsse auf die Versprödungstendenz des Bindemittels und deren Einfluss auf die Performance-Eigenschaften im Asphaltmischgut (49), (50).

3.3.6.3 Asphaltmischgut und Schichteigenschaften

An den am Mischwerk entnommenen Proben wurden zunächst die konventionellen Kennwerte (Rohdichte, Raumdichte, Hohlraumgehalt, Bindemittelgehalt und Korngrößenverteilung) bestimmt.

Zur Beurteilung der Asphaltperformance wurden an im Labor verdichteten Probepplatten die bereits in Abschnitt 3.2.5 beschriebenen Gebrauchseigenschaften (Steifigkeits-, Ermüdungs- und Kälteverhalten sowie Verformungs- und Verdichtungswiderstand) untersucht. Ergänzend erfolgte im Rahmen der Kontrollprüfungen die Ermittlung des Verdichtungsgrades und der Hohlraumgehaltes nach TP Asphalt-StB, Teil 8 (31) der eingebauten Schichten (Bohrkerne).

3.3.6.4 Bezeichnung und Systematik der Proben

Für die Darstellung der Ergebnisse in Kapitel 4 wurde für die Varianten eine eindeutige Probenbezeichnung und Farbkodierung festgelegt. Tabelle 15 gibt einen Überblick über die Zuordnung der Asphaltgranulate, Chargen des Zugabebitumens und Mischgutvarianten.

Tabelle 15: Überblick der Probenbezeichnung der Asphaltgranulatvarianten, Asphaltmischgutvarianten, eingesetzten Zugabebitumen, der zurückgewonnenen Bindemittel aus dem Asphaltmischgut mit zugehöriger Farbkodierung

Farbe	Probenbezeichnung der Varianten				
	Asphaltgranulate	Aufbereitung	Zugabe-bitumen	Asphaltmisch-gut	zurückgewonnenes Bindemittel
	RA5-1	konventionell	B8	A51	B-A51
	RA5-2-1 & RA5-2-2	Vertikalbrecher	B7	A52	B-A52

3.4 Statistische Auswertemethoden

Zur Absicherung der experimentell ermittelten Unterschiede zwischen den Varianten (Bindemittel, Mörtel, Asphalt) sowie zur Überprüfung der laborinternen Wiederholpräzision wurden statistische Prüfverfahren angewendet. Das Signifikanzniveau wurde für alle Tests auf $\alpha = 0,05$ festgelegt.

3.4.1 Vergleich von Kenngrößen aus Einzelmesswerten

Bei Kennwerten, die auf einer begrenzten Anzahl an Einzelmesswerten basieren (z.B. Erweichungspunkt RuK, Nadelpenetration, rheologische Kennwerte aus dem DSR, etc.), wurde zunächst mittels einer einfaktoriellen Varianzanalyse (ANOVA) geprüft, ob signifikante Unterschiede zwischen den Mittelwerten vorliegen (Prüfung der Nullhypothese H_0). Im Falle einer Ablehnung von H_0 erfolgte ein anschließender paarweiser Vergleich der Varianten mittels t-Test für unabhängige Stichproben.

3.4.2 Vergleich von Funktionen

Der statistische Vergleich, z.B. der Ermüdungsfunktionen (Regressionsgeraden im doppelt-logarithmischen Diagramm) erfolgte entsprechend des von DRAGON (51) beschriebenen Verfahrens. Hierbei werden nicht nur die vertikale Lage der Geraden, sondern auch die Steigungen und die Streuungen der Residuen mathematisch auf Gleichheit geprüft. Dieses Verfahren ermöglicht eine belastbare Aussage darüber, ob Bitumen, Asphaltmörtel oder Asphaltmischgüter trotz numerisch unterschiedlicher Regressionsparameter als mechanisch gleichwertig im Ermüdungswiderstand anzusehen sind. Das Prozedere wurde dabei in zwei Stufen unterteilt.

Zunächst wurden alle ermittelten Ermüdungsfunktionen einer Asphaltsorte (i.d.R. 3 bis 5 Einzelgeraden) simultan auf Gleichheit geprüft. Diese Analyse dient der Verifizierung, ob die Einzelergebnisse einer Sorte derselben Grundgesamtheit angehören oder ob signifikante Streuungen innerhalb einer Versuchsreihe vorliegen.

Führte die globale Prüfung der Nullhypothese (H_0 = Gleichheit aller Funktionen) zu einer Ablehnung, wurde ein anschließender paarweiser Vergleich durchgeführt. Dieses Verfahren erlaubt es, signifikante Abweichungen zwischen einzelnen Versuchsreihen mathematisch zu identifizieren, wobei sowohl die Lage als auch die Steigung der Geraden berücksichtigt werden.

3.5 Prognoserechnungen zur Nutzungsdauer und Spurrinnenbildung

3.5.1 Zielstellung und methodischer Hintergrund

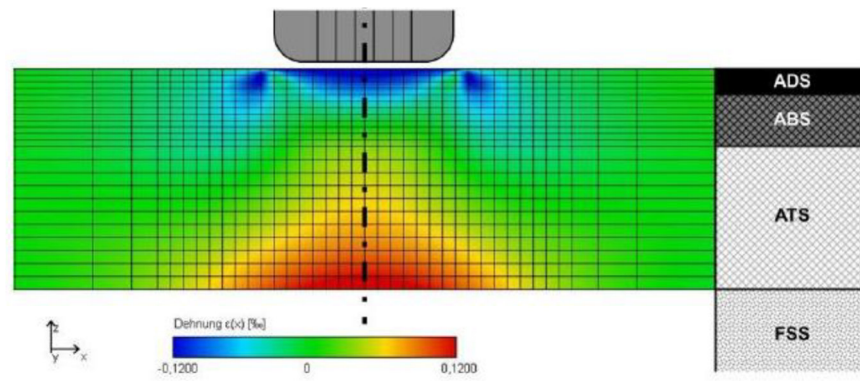
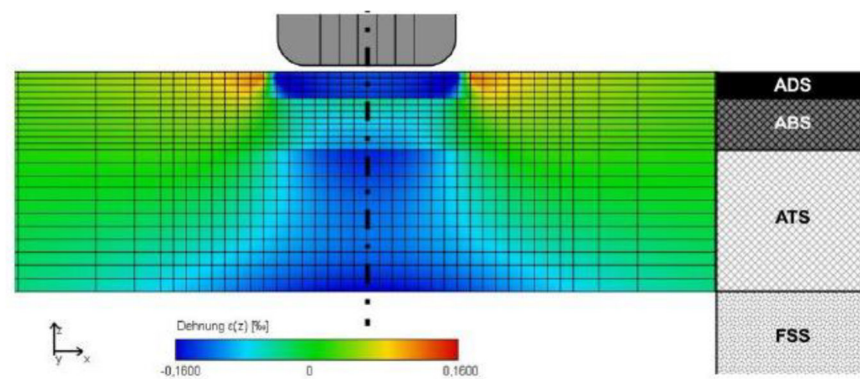
Im Rahmen des Arbeitspaketes E waren Prognoserechnungen zur Nutzungsdauer einer Asphaltbefestigung auf Basis der im Labor ermittelten Materialparameter durchzuführen. Diese Berechnungen umfassen sowohl den Nachweis der Nutzungsdauer der Asphalttragschicht nach den Vorgaben der RDO Asphalt (26) als auch eine erweiterte Bewertung der Nutzungsdauer der Asphaltdeck- und -binderschicht hinsichtlich ihrer Ermüdungsbeständigkeit sowie eine Prognose der Spurrinnenentwicklung.

Für die spätere Wirtschaftlichkeitsanalyse (siehe Abschnitt 3.6.2 und 4.4.2) ist die Festlegung einer technisch begründeten Abfolge von Erhaltungsmaßnahmen erforderlich. Eine pauschale Abschätzung der Nutzungsdauer einer Asphaltschicht über Orientierungswerte, wie sie beispielsweise die RPE-Stra 01 (52) ausweist, ist unzureichend, da wesentliche Einflussgrößen wie die tatsächliche Verkehrsbelastung und spezifische Materialeigenschaften der Asphaltvarianten unberücksichtigt bleiben. Zudem sind moderne Bauweisen wie splittreiche Asphaltbetone in diesen älteren Richtlinien kaum mit Erfahrungshintergrund hinterlegt.

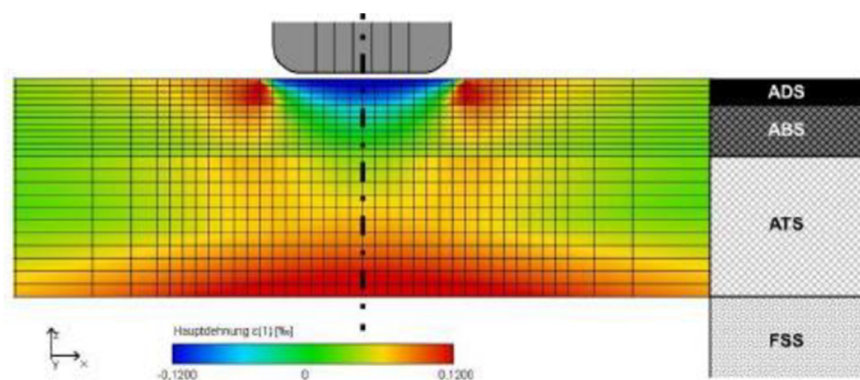
Während die RDO Asphalt (26) bislang für die Asphalttragschicht kalibriert ist, wurde für die Asphaltdeck- und Asphaltbinderschicht eine erweiterte rechnerische Nachweisführung auf Grundlage der Forschungsarbeiten von ZEISSLER (53) und PICHT et al. (54) angewendet. Durch die im Forschungsvorhaben FE 04.0339/2021/MGB (54) sowie dem zugehörigen Arbeitspapier (55) entwickelten Anpassungs- und Sicherheitsfaktoren ist es nun möglich, eine spezifische Lebensdauervorhersage für alle Schichten des Asphaltoberbaus durchzuführen.

3.5.2 Verfahren der Nutzungsdauerprognose

Infolge der Verkehrsbelastungen treten in den Asphaltschichten elastische Zugdehnungen auf, die zur Ermüdungsrissbildung führen können. Während sich das Maximum dieser Dehnungen an der Unterseite der Tragschicht in der Symmetrieachse der Radlast einstellt (siehe Abbildung 27), bilden sich in der Deck- und Binderschicht in der Lastachse nur geringe Dehnungen aus (Abbildung 28). Hier führen jedoch Schubspannungen und Verzerrungen neben der Radaufstandsfläche zu erhöhten Beanspruchungen.

Abbildung 27: Horizontale Dehnung ϵ_x in x-Richtung des Straßenquerschnittes (53)Abbildung 28: Vertikale Dehnung ϵ_z in z-Richtung des Straßenquerschnittes (53)

Die Verzerrungen werden mathematisch so transformiert, dass im Hauptachsensystem lediglich Dehnungen und Stauchungen vorliegen. Für den Ermüdungsnachweis wird die größte Hauptdehnung ϵ_1 maßgebend (Abbildung 29). Diese eignet sich zweckmäßig für die Nachweisführung an allen Schichten, da sie durch die Zusammenlegung des Ursprungskoordinatensystems mit dem Hauptachsensystem der horizontalen Dehnung entspricht. Während der Nachweispunkt der Asphalttragschicht feststeht, liegt der zu betrachtende Bereich für Asphaltdeck- und -binderschicht neben der Rollspur, was durch Untersuchungen an Längsrissen in der Praxis bestätigt wurde (53).

Abbildung 29: Hauptdehnung ϵ_1 im Straßenquerschnitt (53)

3.5.3 Verfahren der Spurrinnenprognose

Zur Prognose der Spurrinnenbildung wird ein numerisches Verfahren verwendet, welches u.a. von ZEISSLER (53) beschrieben wurde und das akkumulative Verformungsverhalten der Asphaltmaterialien beschreibt. Das Verfahren basiert auf einem mechanisch-empirischen Ansatz, der das bleibende Dehnungsverhalten mittels Impulskriechkurven abbildet (Abbildung 30).

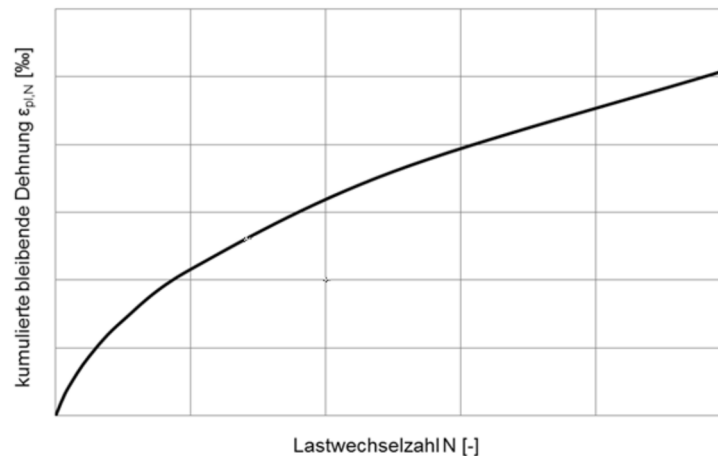


Abbildung 30: Beispiel Impulskriechkurve (53)

Der Akkumulationsprozess (Abbildung 32) berücksichtigt eine zufällige Abfolge der Belastungszustände, welche aus Achslast- und Temperaturzuständen gemäß dem Jahresgang der Fahrbahnoberflächentemperaturen modelliert werden (Abbildung 31).

Die Übertragung der berechneten bleibenden Dehnungen in Verformungen erfolgt über ein diskretisiertes Mehrschichtenmodell (Abbildung 33). Durch die vertikale Akkumulation der Elementverformungen von der Unterseite der Tragschicht bis zur Oberfläche wird die maximale Spurrinnentiefe (MSPT) bestimmt. Diese ergibt sich aus der Differenz zwischen der Einsenkung im Lastbereich und der Aufwölbung neben der Lastachse (Abbildung 34).

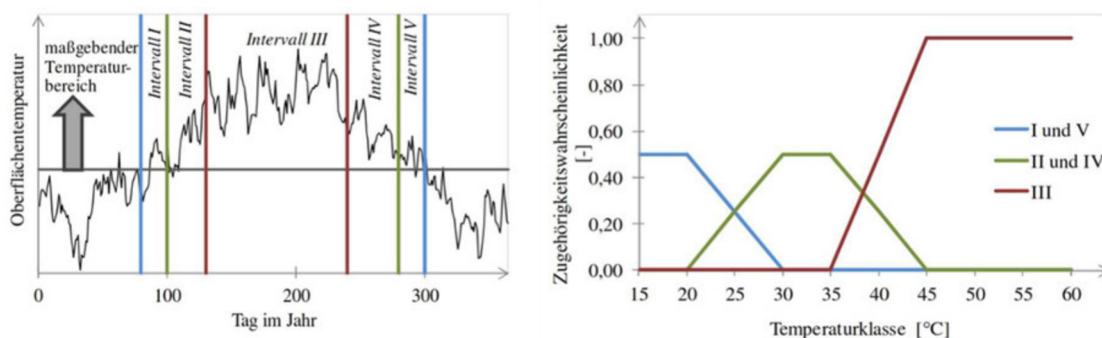


Abbildung 31: Schematische Darstellung der Temperaturintervalle bezogen auf den Jahresgang der Fahrbahnoberflächentemperaturen (links) sowie der Zugehörigkeitsfunktionen bezogen auf Temperaturintervalle (rechts) (56)

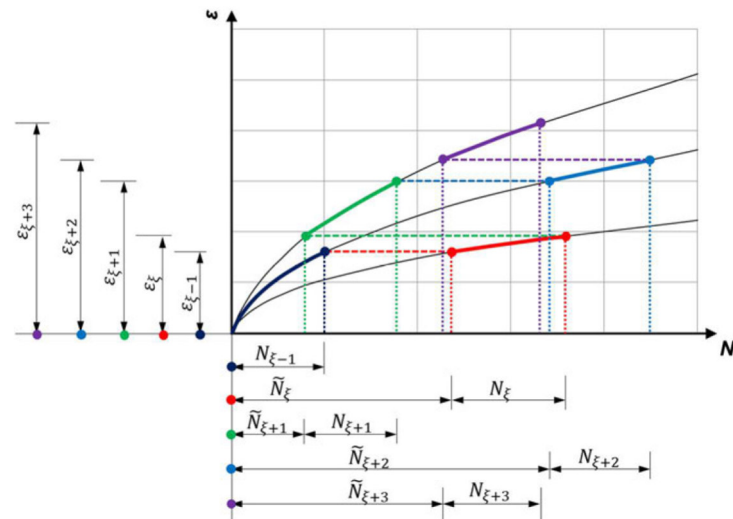


Abbildung 32: Schematische Darstellung des Akkumulationsprozesses der bleibenden Dehnungen (53)

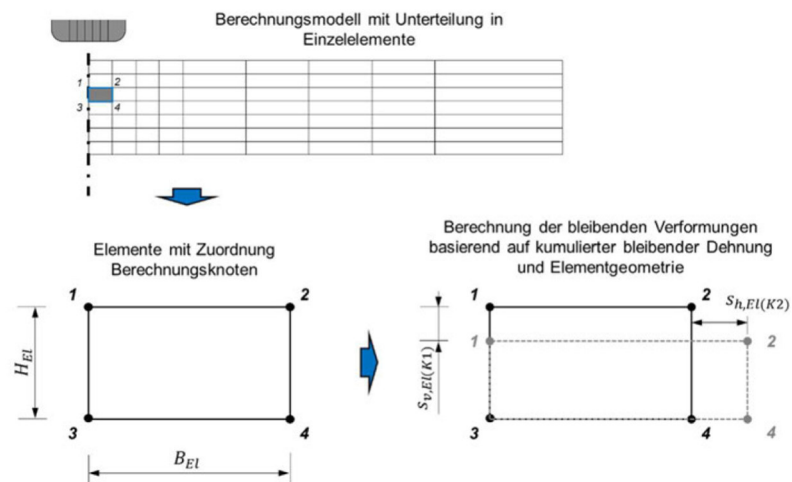


Abbildung 33: Berechnungsmodell für Spurrinnenprognose (53)

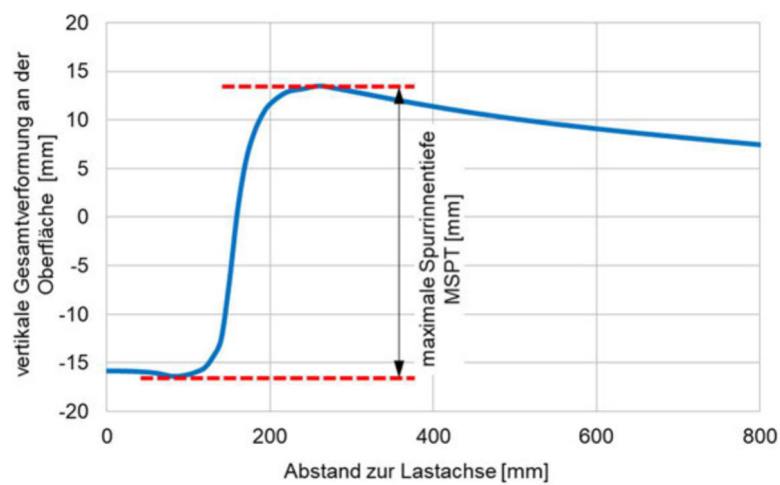


Abbildung 34: Bestimmung der maximalen Spurrinnentiefe MSPT (53)

3.5.4 Eingangsparameter

Die Prognoseberechnungen wurden an einem fiktiven Befestigungsaufbau der Belastungsklasse Bk100 gemäß RStO 12/24 (47) durchgeführt. Dabei wurden nur die nach Abschnitt 3.2.5 ermittelten Materialeigenschaften der Asphaltvarianten variiert, um den Einfluss des Aufbereitungsverfahrens (konventionell vs. Vertikalbrecher) zu isolieren.

Tabelle 16: Überblick der Bezeichnung der Aufbauvarianten für die Prognoseberechnungen der Nutzungsdauer und Spurrinnenentwicklung mit den jeweils verwendeten Materialeigenschaften der untersuchten Asphaltvarianten

Farbkodierung	Bezeichnung Aufbauvariante	Asphaltvariante		
		Asphaltdeckschicht	Asphaltbinderschicht	Asphalttragschicht
	D103040.1	A10	A30	A40.1
	D103040.2	A10	A30	A40.2
	D113141	A11	A31	A41
	D123242.1	A12	A32	A42.1
	D123242.2	A12	A32	A42.2
	D203040.1	A20	A30	A40.1
	D213141	A21	A31	A41
	D223242.2	A22	A32	A42.2
	D115141	A11	A51	A41
	D125242.2	A12	A52	A42.2

Frosteinwirkungszone	III
KiST-Zone Asphalt	3
Durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke des Schwerverkehrs DTV ^(SV) [Kfz/24h]	13.700
Nutzungsdauer [a]	30
Achslastkollektiv	BAB "Fern" (AP KuV)
Frostempfindlichkeitsklasse Boden	F2
Steigungsfaktor f_3	1,0
Anzahl der Fahrstreifen je Fahrtrichtung	3
Achslastfaktor f_A	4,5
Lastkollektivquotient q_{BM}	0,33
Fahrstreifenfaktor f_1	0,45
Fahrstreifenbreitenfaktor f_2	1,0
mittlere jährliche Zunahme des SV (ab 1. Jahr) p	0,03
Belastungsklasse	Bk100
Stärke des frostsicheren Oberbaus [cm]	70

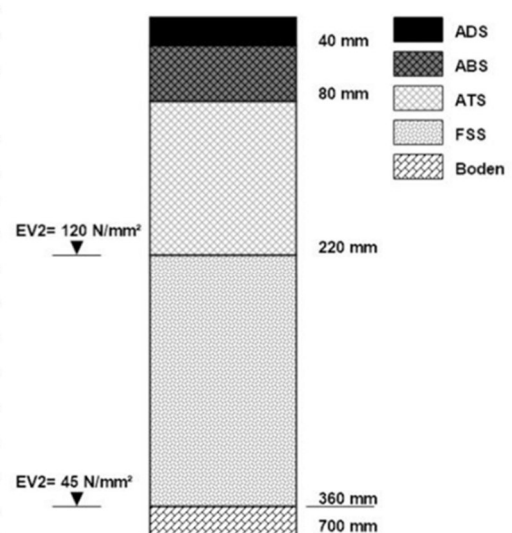


Abbildung 35: Verwendete Eingangsparameter für die Prognoseberechnungen der Nutzungsdauer und Spurrinnenentwicklung

Es wurden ausschließlich Aufbauvarianten untersucht, die materialrein konzipiert sind (Asphaltemischgut aller Asphaltschichten entweder ohne Asphaltgranulat, nur mit konventionell oder nur mit im Vertikal- bzw. Rotorschleuderbrecher aufbereitetem Asphaltgranulat). Die

Systematik der Variantenbezeichnung sowie die verwendeten Eingangsparameter sind in Tabelle 16 und Abbildung 35 dargestellt.

Aus der Bezeichnung der Aufbauvariante können die Asphaltvarianten der jeweiligen Asphaltschicht entnommen werden. So wurde beispielsweise bei der Aufbauvariante D103040.1 die Prognoseberechnungen mit den Materialeigenschaften der Asphaltdeckschichtvariante A10, der Asphaltbinderschichtvariante A30 und der Asphalttragschichtvariante A40.1 durchgeführt.

3.6 Bewertung der Wirtschaftlichkeit mittels Berechnung der Herstellungskosten und der Lebenszykluskosten

Die ökonomische Bewertung der untersuchten Aufbereitungsverfahren erfolgte zweistufig. Zunächst wurden die unmittelbaren Materialkosten der Asphaltmischgutvarianten ermittelt, um anschließend in einer umfassenden Lebenszykluskosten-Analyse (LZK) die langfristige Wirtschaftlichkeit der verschiedenen Aufbauvarianten zu vergleichen.

3.6.1 Kosten für die Herstellung des Asphaltmischguts

Entsprechend dem Arbeitspaket G wurden die Asphaltmischgutkosten unter systematischer Variation der Aufbereitungskosten des Asphaltgranulates (RA) ermittelt. Die hierfür notwendigen Basisdaten (Preise für Gesteinskörnungen, Bitumen sowie konventionelle Aufbereitungskosten) wurden durch die Firma BHS Dresden GmbH & Co. KG bereitgestellt.

Für die Kalkulation der Aufbereitungskosten im Rotorschleuderbrecher (RSB) wurden die im Arbeitspaket F (Abschnitt 3.3.3 und 4.2.2) gewonnenen Erkenntnisse der großtechnischen Produktion mit dem Vertikalbrecher auf den RSB übertragen. Da der Materialdurchsatz pro Stunde einen maßgeblichen Einfluss auf die Kosten für die Herstellung des Asphaltgranulats hat, wurde dieser Parameter in der Berechnung variiert. Die resultierenden Materialkosten für das Asphaltmischgut dienten als Eingangsgröße für die nachfolgenden Lebenszykluskostenberechnungen.

3.6.2 Lebenszykluskostenanalyse (LZK)

3.6.2.1 Theoretische Grundlagen und Berechnungsverfahren

Zur Ermittlung zukünftiger Kosten werden in der Fachliteratur verschiedene statische und dynamische Verfahren unterschieden (57). Da statische Verfahren Werte ohne Zeitbezug aufsummieren, können sie langfristige Zeiträume nicht realistisch abbilden. Daher kam im vorliegenden Projekt ein dynamisches Verfahren, speziell die Barwertmethode (auch Kapitalwertmethode), zum Einsatz (Abbildung 36) (58).

Der Lebenszyklus einer Straße umfasst die Phasen Planung, Entwurf, Bauausführung, Betrieb, Erhaltung und Rückbau. Während die Planungskosten über die HOAI (59) mit ca. 3 %

bis 10 % der anrechenbaren Kosten abgeschätzt werden konnten, basierten die Ansätze für Bau- und Erhaltungsmaßnahmen auf Erfahrungswerten und Datensammlungen wie den „Dynamischen BauDaten“ (60) oder „SIRADOS Baudaten“ (61). Kosten für den laufenden Betrieb und die Instandhaltung wurden durch das „Leistungsheft für den Straßenbetrieb auf Bundesfernstraßen“ (62) sowie im Rundschreiben „Straßenbau Nr. 21/2024 Sachgebiet 10.1: Straßenbetriebsdienst; Betriebsdienst“ (63) definiert. Volkswirtschaftliche Kosten (Umwelt- oder Unfallkosten) wurden im Rahmen dieser Analyse nicht berücksichtigt (64).

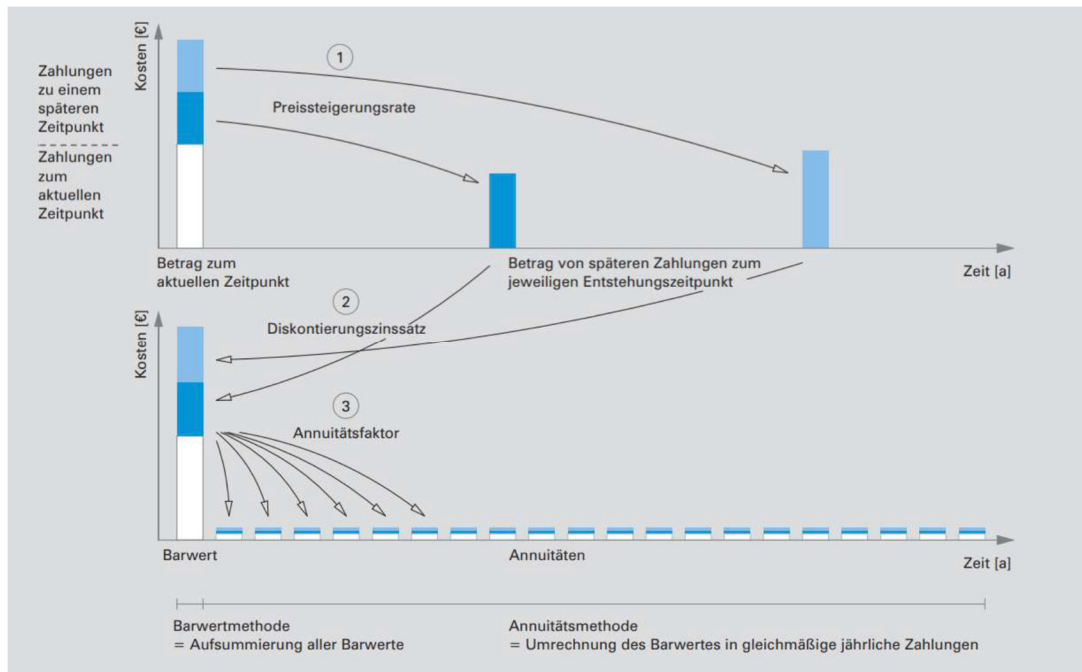


Abbildung 36: Dynamische Berechnungsverfahren nach Architektenkammer Bayern
(58)

Um zukünftige Zahlungen vergleichbar zu machen, ist eine Askontierung (Aufzinsung mittels Baupreisindex) sowie eine anschließende Diskontierung (Abzinsung zum Barwert) erforderlich. Für die Diskontierung ist üblicherweise die Zinsstrukturkurve für börsennotierte Bundeswertpapiere maßgebend (siehe Abbildung 37), (65), (66), (67)).

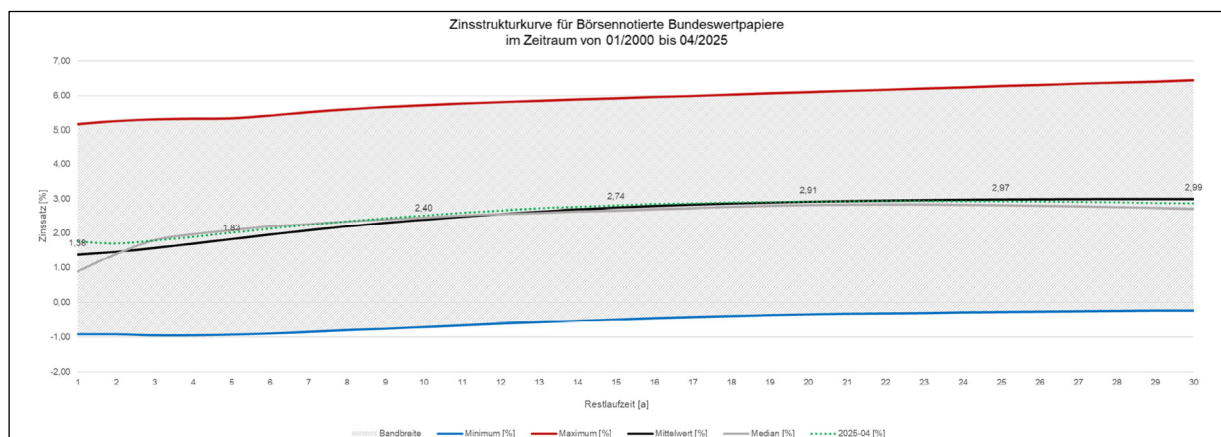


Abbildung 37: Zinsstrukturkurve für börsennotierte Bundeswertpapiere im Zeitraum von 01/2000 bis 04/2025 (57)

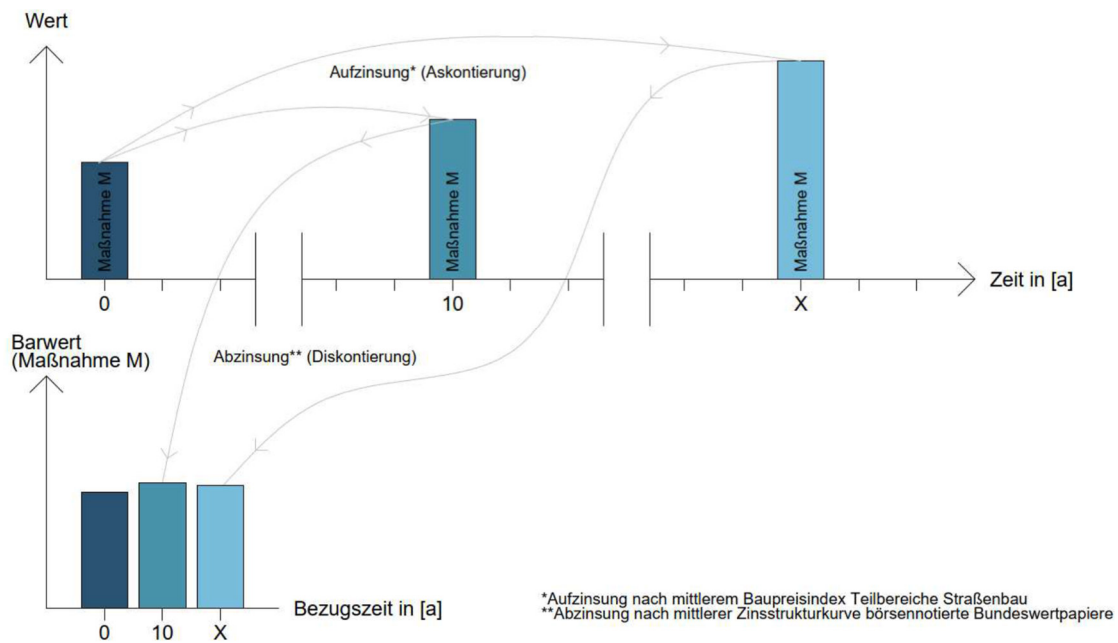


Abbildung 38: Kostenvergleich einer Maßnahme zu verschiedenen Zeitpunkten nach der Barwertmethode (57)

3.6.2.2 Eingangsparameter und Festlegungen

Die LZK-Ermittlung erfolgte an einem fiktiven Bauvorhaben auf der BAB A13 (Bereich südlich Thiendorf). Für den zu betrachtenden Abschnitt wurde eine Länge von einem Kilometer mit einem Regelquerschnitt RQ 36 nach RAA (68) gewählt (siehe Abbildung 39). Die Untergrundverhältnisse (Frostempfindlichkeitsklasse F2) sowie die Entwässerungssituation wurden einheitlich für alle Aufbauvarianten (siehe Tabelle 16) definiert, um eine isolierte Bewertung des Oberbaus der Belastungsklasse Bk100 gemäß RStO 12/24 (47) zu ermöglichen.

RQ 36

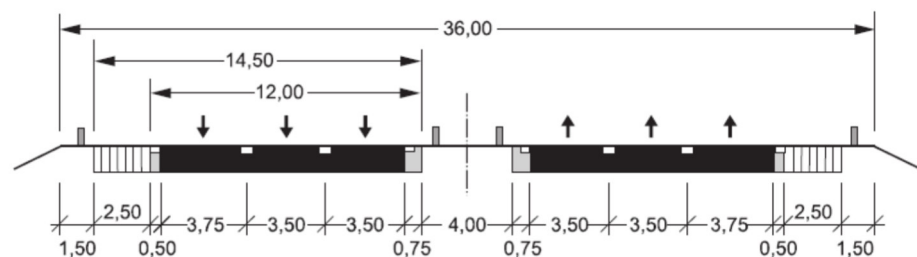


Abbildung 39: RQ 36 nach RAA (68)

Maßnahmen der Instandsetzung und Erneuerung

Für alle untersuchten Aufbauvarianten wurde ein grundhafter Ausbau als Ausgangsmaßnahme festgelegt. Im weiteren Verlauf des Betrachtungszeitraums wurden Folgemaßnahmen aus einem definierten Pool ausgewählt (siehe Tabelle 17). Die Nutzungsdauern der Asphaltschichten wurden dabei aus den Ergebnissen der Prognoserechnungen (vgl. Abschnitt 3.5.2 und 4.3.1.2) abgeleitet, während statische Werte für Ausstattungselemente den RPE-Stra 01 (52) und der ABBV (69) entnommen wurden.

Tabelle 17: Maßnahmen der Instandsetzung und Erneuerung an der Asphaltbefestigung bzw. dem Straßenoberbau und zugehörige Maßnahmekategorien nach RPE-Stra 01 (52)

Maßnahme	Kategorie
Dünnschichtbelag in Heißbauweise	I1 – auf der Deckschicht
Erneuerung Asphaltdeckschicht	I2 – an der Deckschicht
Erneuerung Asphaltdecke	E1 – an der Decke
Grundhafter Ausbau	E2 – an Tragschicht(en) / am Oberbau

Leistungsumfang der baulichen Maßnahmen

In Kooperation mit der Baupraxis wurden realistische Kostenansätze abgestimmt, die sich aus ca. 300 modellhaften Leistungspositionen zusammensetzen. Diese Leistungen basierten auf dem „Leistungsheft für den Straßenbetrieb auf Bundesfernstraßen“ (62). Die folgende Tabelle 18 zeigt die Zuordnung der wesentlichen Teilleistungen zu den jeweiligen Erhaltungsmaßnahmen.

Tabelle 18: Leistungseinteilung der baulichen Maßnahmen (57)

Maßnahmen	Grundhafter Ausbau	Erneuerung Asphaltdecke	Erneuerung Asphaltdeckschicht	Herstellung Dünnschichtbelag	Erneuerung Bankett	Erneuerung Markierung	Erneuerung Beschilderung	Erneuerung Fahrzeugrückhaltesystem	Straßenbetrieb
Leistungen									
Asphaltdeckschicht	✓	✓	✓	!					
Asphaltbinderschicht	✓	✓							
Asphalttragschicht	✓								
Frostschuttschicht	✓								
	✓								
Bankette	✓	✓	✓		✓				
Markierung	✓	✓	✓	✓		✓			
Beschilderung	✓						✓		
Fahrzeugrückhaltesystem	✓							✓	
Straßenbetrieb									✓

✓ Leistung enthalten

! Leistung bedingt enthalten

3.6.2.3 Methodik der Berechnung der Lebenszykluskosten

Die Berechnung der LZK vollzieht sich in einem mehrstufigen Prozess. Zunächst wurden die Mengen auf Basis des festgelegten Querschnitts den Maßnahmen zugeordnet. Durch die Verknüpfung dieser Mengen mit den Leistungspositionen aus Tabelle 18 sowie den spezifischen Preisen der Asphaltvarianten wurden fiktive Herstellungskosten ermittelt. Diese wurden um Baustellengemeinkosten, Zuschläge für Wagnis & Gewinn sowie linear-interpolierte Honorarkosten nach HOAI (59) ergänzt.

Berücksichtigung von Preissteigerung und Zeitwert

Zur Überführung der aktuellen Kosten (K_0) in zukünftige Kostenwerte unter Berücksichtigung der Preissteigerung (Askontierung) wurde ein Baupreisindex von 3,2 % verwendet (Formel 9):

$$K_n = K_0 \cdot (1 + i_a)^n \quad (\text{Formel 9})$$

mit:

K_n	Kostenwert mit Preissteigerung (Askontierung) [€]
K_0	Kostenwert, aktuell [€]
i_a	Zinssatz Askontierung = 3,2 % [%]
n	Jahr [n]

Anschließend erfolgte die Diskontierung zum Barwert mittels eines statischen Zinssatzes von 3,0 % (Formel 10):

$$B = K_n \cdot \frac{1}{(1 + i_d)^n} \quad (\text{Formel 10})$$

mit:

B	Barwert mit Zinssatz (Diskontierung) [€]
K_n	Kostenwert mit Preissteigerung (Askontierung) [€]
i_d	Zinssatz Diskontierung = 3,0 % [%]
n	Jahr [n]

Um die unterschiedlichen Nutzungsdauern am Ende des Bewertungszeitraums objektiv vergleichen zu können, wurde der Restwert (R) der einzelnen Asphaltsschichten über deren verbleibende Restnutzungsdauer (RND) ermittelt. Dieser beschreibt den anteiligen Zeitwert zum Ende des Betrachtungszeitraums (Formel 11):

$$R_{Si} = B_{IM_Si} \cdot p_{IM_Si} \cdot p_{RND_Si} \quad (\text{Formel 11})$$

mit:

R_{Si}	Rechtwert einer Schicht i [€]
B_{IM_Si}	Barwert letzter Maßnahme von Schicht i [€]
p_{IM_Si}	Kostenwert Anteil von Schicht i an letzter Maßnahme [%]
p_{RND_Si}	Anteil verfügbare Restnutzungsdauer von Schicht i [%]

Die finalen Lebenszykluskosten je Aufbauvariante ergeben sich schließlich aus dem kumulierten Barwert abzüglich des ermittelten Restwertes (Formel 12):

$$LZK = B - R \quad \text{(Formel 12)}$$

mit:

LZK	Lebenszykluskosten [€]
B	Barwert [€]
R	Restwert [€]

Die so berechneten LZK bildeten die Grundlage für den abschließenden Vergleich der Wirtschaftlichkeit zwischen konventioneller und innovativer Aufbereitungstechnologie mit dem Rotorschleuderbrecher bzw. Vertikalbrecher.

4. Untersuchungsergebnisse

4.1 Untersuchungen im Labor

4.1.1 Verwendete Baustoffe

4.1.1.1 Asphaltgranulate

Vorversuche im Rotorschleuderbrecher (RSB)

Als Parameter für die Entscheidung, mit welcher Auskleidung des Rotorschleuderbrechers und mit welcher Rotorgeschwindigkeit die Asphaltgranulate aufbereitet werden sollten, wurden die Stückgrößenverteilung des Ausgangsmaterials sowie des Materialaustrages (gesamt) aus dem Brecher und die löslichen Bindemittelgehalte der einzelnen im Labor abgesiebten Fraktionen (0/2 mm, 2/4 mm, 4/5,6 mm bzw. 4/8 mm und $\geq 5,6$ mm bzw. ≥ 8 mm herangezogen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 40 bis Abbildung 47 dargestellt.

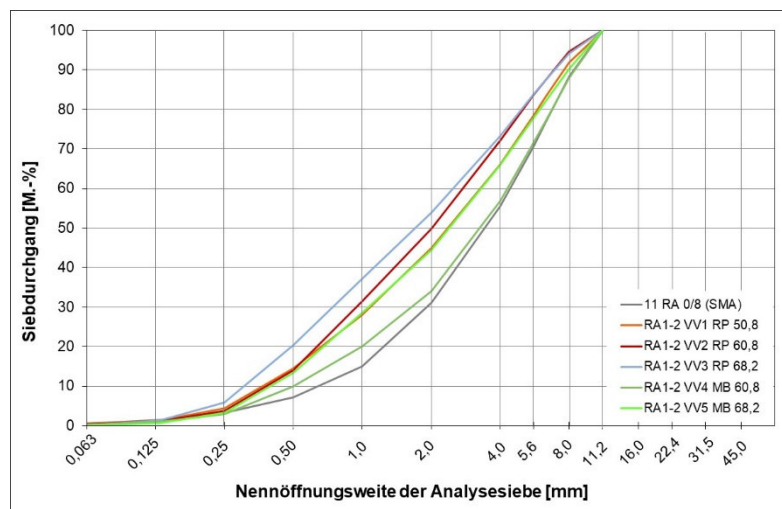


Abbildung 40: Ergebnisse Vorversuche im Rotorschleuderbrecher - Stückgrößenverteilungen RA1-2

Anhand der Ergebnisse der Vorversuche können folgende Erkenntnisse zusammengefasst werden:

- Die Auskleidung mit Materialbett erzeugt gröbere Stückgrößenverteilungen als die Auskleidung mit der Ringpanzerung. Es besteht jedoch eventuell die Gefahr der Materialvermischung bei Verwendung des Materialbettes.
- Mit steigender Rotorgeschwindigkeit nimmt die Verfeinerung der Stückgrößenverteilung größtenteils zu.
- Der Einfluss der Rotorgeschwindigkeit auf den Bindemittelgehalt der einzelnen Fraktionen scheint größtenteils vernachlässigbar zu sein.
- Es besteht die Vermutung, dass die Umgebungstemperatur während des Aufbereitungsprozesses im Rotorschleuderbrecher einen großen Einfluss auf den Bindemittelgehalt der einzelnen Fraktionen ausübt.

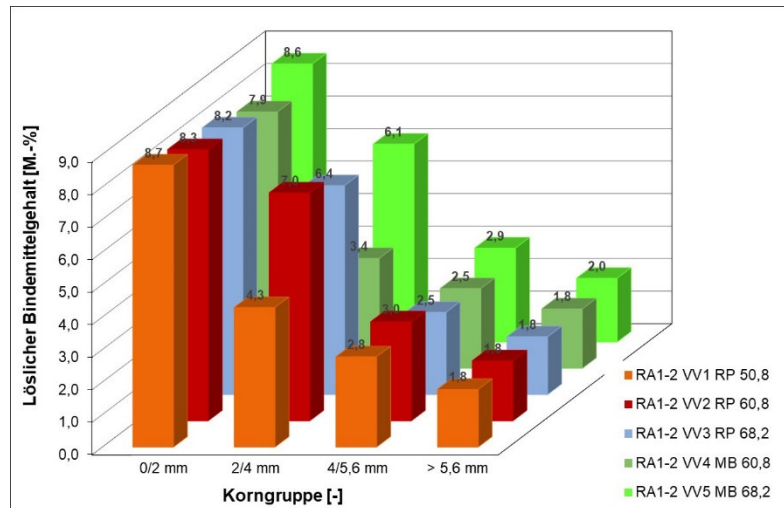


Abbildung 41: Ergebnisse Vorversuche im Rotorschleuderbrecher - lösliche Bindemittelgehalte der abgesiebten Fraktionen von RA1-2

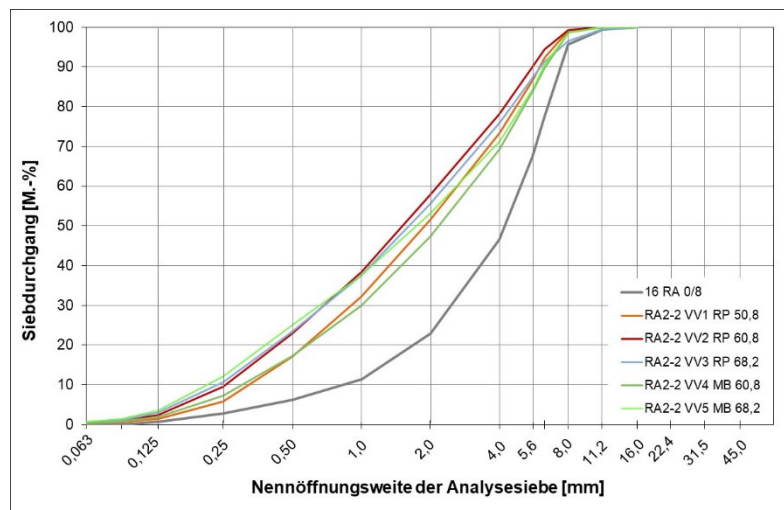


Abbildung 42: Ergebnisse Vorversuche im Rotorschleuderbrecher - Stückgrößenverteilungen RA2-2

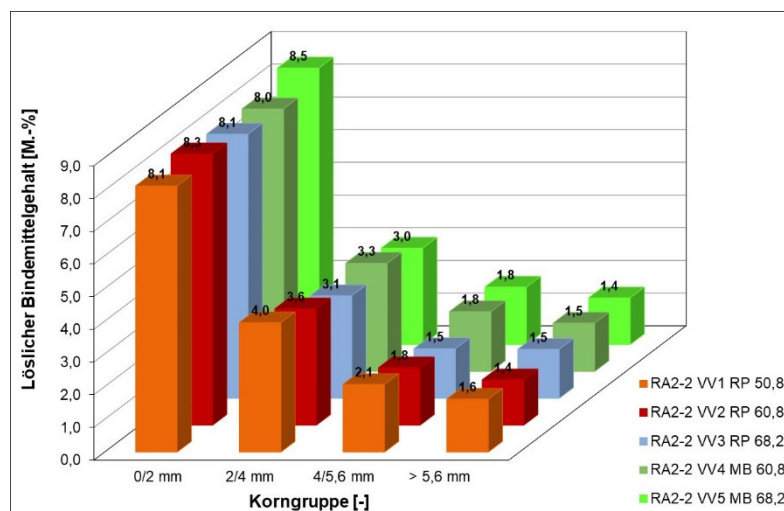


Abbildung 43: Ergebnisse Vorversuche im Rotorschleuderbrecher - lösliche Bindemittelgehalte der abgesiebten Fraktionen von RA2-2

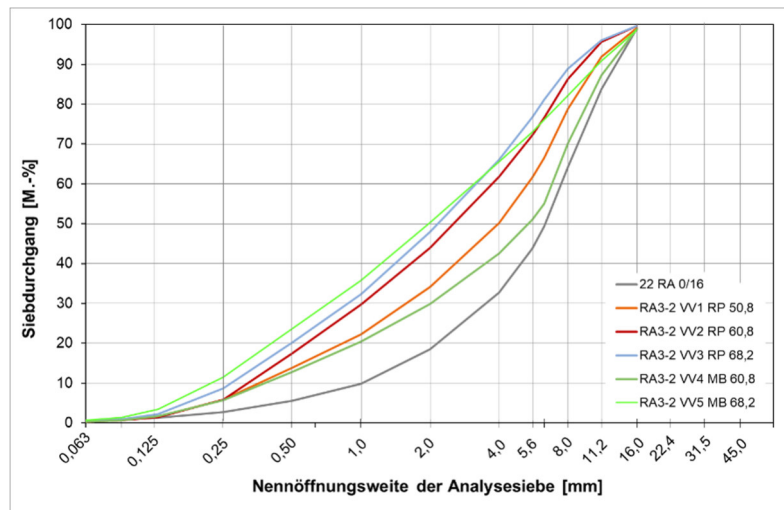


Abbildung 44: Ergebnisse Vorversuche im Rotorschleuderbrecher - Stückgrößenverteilungen RA3-2

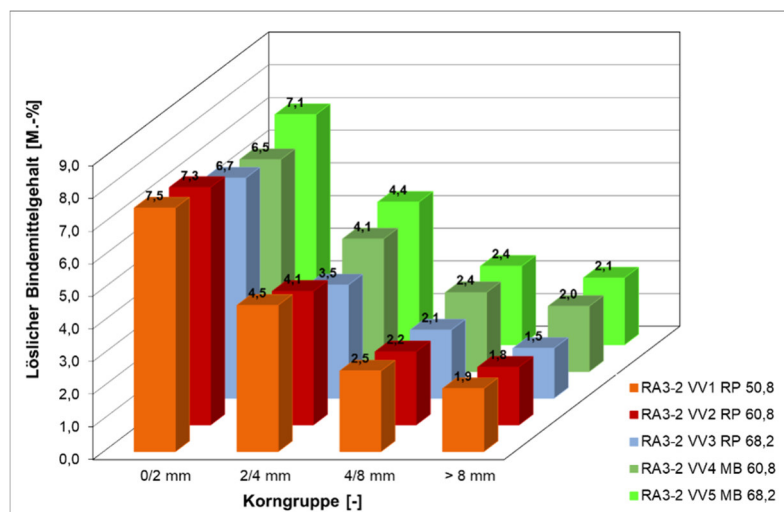


Abbildung 45: Ergebnisse Vorversuche im Rotorschleuderbrecher - lösliche Bindemittelgehalte der abgesiebten Fraktionen von RA3-2

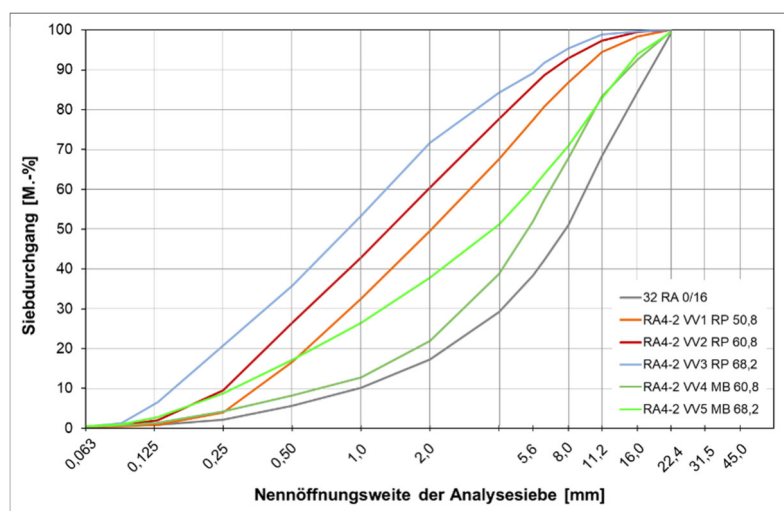


Abbildung 46: Ergebnisse Vorversuche im Rotorschleuderbrecher - Stückgrößenverteilungen RA4-2

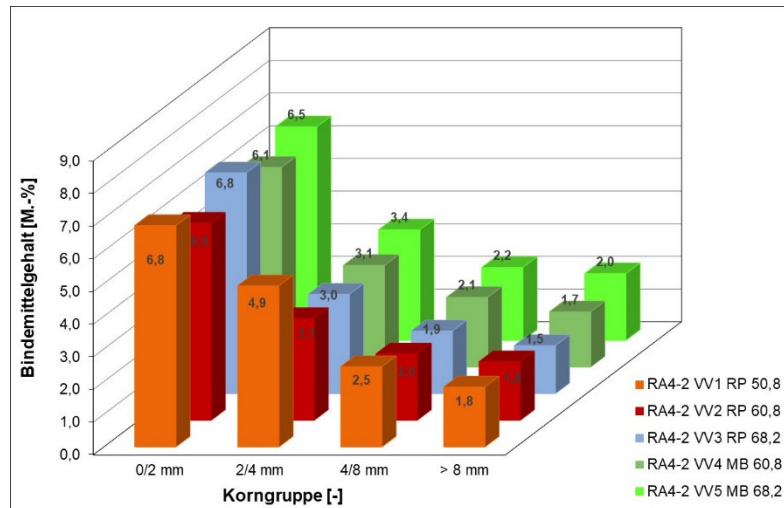


Abbildung 47: Ergebnisse Vorversuche im Rotorschleuderbrecher - lösliche Bindemittelgehalte der abgesiebten Fraktionen von RA4-2

Festlegung der Maschinenkonfigurationen

Aufgrund der gewonnenen Erkenntnisse aus den Vorversuchen erfolgte die Festlegung der Maschinenkonfigurationen für die spätere Aufbereitung des Asphaltgranulates im Rotorschleuderbrecher. Als Auskleidung wurde die Ringpanzerung gewählt, um eine mögliche Materialvermischung des zu produzierenden Asphaltgranulates mit dem Material der Auskleidung zu vermeiden. Die Rotorgeschwindigkeit sollte möglichst gering sein, um einerseits die Verfeinerung in der Stückgrößenverteilung (und damit auch der Korngrößenverteilung) des Austrages zu begrenzen und andererseits den Energieverbrauch, der mit zunehmender Geschwindigkeit ansteigt, zu minimieren.

So wurde für die spätere Aufbereitung des Asphaltgranulates RA1-1 zu RA1-2 eine Geschwindigkeit des Rotors von 50,8 m/s gewählt, für die anderen drei Asphaltgranulate (RA2 bis RA4) eine Geschwindigkeit von 60,8 m/s.

Eigenschaften der hergestellten Asphaltgranulatvarianten

Die Asphaltgranulate (Probenschlüssel für die Kennzeichnung siehe Tabelle 4) wurden hinsichtlich der in Abschnitt 3.2.1.1 aufgeführten Kennwerte klassifiziert.

Die ermittelte Asphaltgranulatsorte sowie die Kennwerte für die maximale Stückgrößenverteilung, den Gehalt an Feinanteilen, den Bindemittelgehalt, die Rohdichte und den Fremdstoffgehalt sind in den in Tabelle 19 bis Tabelle 22 aufgeführt.

Die Zusammensetzung der zurückgewonnenen Gesteinskörnungsgemische aus den Asphaltgranulaten ist in Tabelle 23 bis Tabelle 26 zusammengetragen.

Tabelle 19: Kennwerte am Gemisch der Asphaltgranulate RA1-1 (konventionell) und RA1-2 (RSB)

Kennwert	Einheit	Asphaltgranulatvariante				
		RA1-1	RA1-2-1	RA1-2-2	RA1-2-3	RA1-2-4
Asphaltgranulatsorte	mm	11 RA 0/8	8 RA 0/5	5 RA 0/5	5 RA 0/5	11 RA 0/11
max. Stückgröße	mm	11,2	8,0	5,6	5,6	11,2
Gehalt an Feinanteilen	M.-%	0,1	0,0	0,1	0,1	0,0
Löslicher Bindemittelgehalt	M.-%	6,43	9,12	5,93	2,93	1,74
Bindemittelgehalt	M.-%	6,7	9,5	6,2	3,1	1,9
Rohdichte	g/cm ³	2,431	2,347	2,436	2,560	2,678
Fremdstoffgehalt	-	FM _{angegeben}	FM _{1/0,1}			

Tabelle 20: Kennwerte am Gemisch der Asphaltgranulate RA2-1 (konventionell) und RA2-2 (RSB)

Kennwert	Einheit	Asphaltgranulatvariante				
		RA2-1	RA2-2-1	RA2-2-2	RA2-2-3	RA2-2-4
Asphaltgranulatsorte	mm	16 RA 0/8	8 RA 0/2	5 RA 0/5	5 RA 0/5	11 RA 0/8
max. Stückgröße	mm	16,0	8,0	5,6	5,6	11,2
Gehalt an Feinanteilen	M.-%	0,2	0,6	0,1	0,1	0,1
Löslicher Bindemittelgehalt	M.-%	6,35	8,71	3,80	1,84	1,56
Bindemittelgehalt	M.-%	6,7	9,2	4,0	2,0	1,7
Rohdichte	g/cm ³	2,441	2,348	2,534	2,616	2,622
Fremdstoffgehalt	-	FM _{angegeben}	FM _{1/0,1}			

Tabelle 21: Kennwerte am Gemisch der Asphaltgranulate RA3-1 (konventionell) und RA3-2 (RSB)

Kennwert	Einheit	Asphaltgranulatvariante				
		RA3-1	RA3-2-1	RA3-2-2	RA3-2-3	RA3-2-4
Asphaltgranulatsorte	mm	22 RA 0/16	8 RA 0/5	5 RA 0/5	8 RA 0/8	22 RA 0/16
max. Stückgröße	mm	22,4	8,0	5,6	8,0	22,4
Gehalt an Feinanteilen	M.-%	0,2	2,9	0,8	0,1	0,0
Löslicher Bindemittelgehalt	M.-%	4,58	6,73	3,47	2,06	1,73
Bindemittelgehalt	M.-%	4,9	7,1	3,7	2,2	1,9
Rohdichte	g/cm ³	2,491	2,402	2,533	2,599	2,614
Fremdstoffgehalt	-	FM _{1/0,1}	FM _{1/0,1}			

Das grundlegende Wirkprinzip der Technologie des Rotorschleuderbrechers besteht in der separierenden Zerkleinerung des Asphaltgranulats in eine bindemittelangereicherte Fraktion (Asphaltemörtel) sowie eine vergleichsweise bindemittelarme grobkörnige Fraktion. Die in einschlägigen Forschungsarbeiten sowie von Herstellern angepriesenen Bindemittelgehalte der groben Gesteinskörnungen von unter 1,0 M.-% konnten im Rahmen der durchgeführten Versuche nicht reproduziert werden. Die ermittelten löslichen Bindemittelgehalte

lagen konsistent im Bereich zwischen 1,4 M.-% und 2,1 M.-% (inklusive der Ergebnisse der Vorversuche). Ungeachtet dessen belegen die Ergebnisse eine gezielte Aufbereitung mit signifikanten Anreicherungs- und Ablöseeffekten des Bindemittels.

Tabelle 22: Kennwerte am Gemisch der Asphaltgranulate RA4-1 (konventionell) und RA4-2 (RSB)

Kennwert	Einheit	Asphaltgranulatvariante				
		RA4-1	RA4-2-1	RA4-2-2	RA4-2-3	RA4-2-4
Asphaltgranulatsorte	mm	32 RA 0/16	5 RA 0/2	5 RA 0/5	8 RA 0/5	32 RA 0/16
max. Stückgröße	mm	31,5	5,6	5,6	8,0	31,5
Gehalt an Feinanteilen	M.-%	0,1	2,8	0,3	0,0	0,1
Löslicher Bindemittelgehalt	M.-%	4,06	6,22	2,76	1,87	1,48
Bindemittelgehalt	M.-%	4,3	6,6	3,0	2,0	1,6
Rohdichte	g/cm ³	2,513	2,441	2,576	2,616	2,639
Fremdstoffgehalt	M.-%	FM _{1/0,1}	FM _{1/0,1}			

Tabelle 23: Kennwerte Korngrößenverteilung am Gesteinskörnungsgemisch der Asphaltgranulate RA1-1 (konventionell) und RA1-2 (RSB)

Kennwert	Einheit	Asphaltgranulatvariante				
		RA1-1	RA1-2-1	RA1-2-2	RA1-2-3	RA1-2-4
Siebdurchgang < 0,063 mm	M.-%	14,2	22,8	13,6	5,7	3,9
Siebdurchgang < 0,125 mm	M.-%	17,0	28,0	20,8	6,5	4,4
Siebdurchgang < 2 mm	M.-%	53,0	96,5	52,8	11,9	7,3
Siebdurchgang < 5,6 mm	M.-%	80,1	99,1	100,0	100,0	28,2
Siebdurchgang < 8 mm	M.-%	92,2	100,0	100,0	100,0	70,3
Siebdurchgang < 11,2 mm	M.-%	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Siebdurchgang < 16 mm	M.-%	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Größtkorndurchmesser	mm	8	5,6	5,6	5,6	11,2

Tabelle 24: Kennwerte Korngrößenverteilung am Gesteinskörnungsgemisch der Asphaltgranulate RA2-1 (konventionell) und RA2-2 (RSB)

Kennwert	Einheit	Asphaltgranulatvariante				
		RA2-1	RA2-2-1	RA2-2-2	RA2-2-3	RA2-2-4
Siebdurchgang < 0,063 mm	M.-%	15,6	24,3	9,4	4,1	3,3
Siebdurchgang < 0,125 mm	M.-%	18,3	29,2	10,6	4,4	3,5
Siebdurchgang < 2 mm	M.-%	56,7	96,6	32,8	7,1	5,1
Siebdurchgang < 5,6 mm	M.-%	86,4	100,0	100,0	100,0	46,6
Siebdurchgang < 8 mm	M.-%	99,2	100,0	100,0	100,0	96,7
Siebdurchgang < 11,2 mm	M.-%	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Siebdurchgang < 16 mm	M.-%	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Größtkorndurchmesser	mm	8	2	5,6	5,6	8

Tabelle 25: Kennwerte Korngrößenverteilung am Gesteinskörnungsgemisch der Asphaltgranulate RA3-1 (konventionell) und RA3-2 (RSB)

Kennwert	Einheit	Asphaltgranulatvariante				
		RA3-1	RA3-2-1	RA3-2-2	RA3-2-3	RA3-2-4
Siebdurchgang < 0,063 mm	M.-%	12,6	21,4	8,7	4,6	3,6
Siebdurchgang < 0,125 mm	M.-%	16,2	30,3	10,7	5,5	4,4
Siebdurchgang < 2 mm	M.-%	46,7	97,0	34,9	11,8	9,4
Siebdurchgang < 5,6 mm	M.-%	68,9	99,8	100,0	83,0	13,2
Siebdurchgang < 8 mm	M.-%	85,8	100,0	100,0	100,0	52,1
Siebdurchgang < 11,2 mm	M.-%	94,3	100,0	100,0	100,0	82,4
Siebdurchgang < 16 mm	M.-%	99,0	100,0	100,0	100,0	98,2
Siebdurchgang < 22,4 mm	M.-%	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Größtkorndurchmesser	mm	16	5,6	5,6	8	16

Tabelle 26: Kennwerte Korngrößenverteilung am Gesteinskörnungsgemisch der Asphaltgranulate RA4-1 (konventionell) und RA4-2 (RSB)

Kennwert	Einheit	Asphaltgranulatvariante				
		RA4-1	RA4-2-1	RA4-2-2	RA4-2-3	RA4-2-4
Siebdurchgang < 0,063 mm	M.-%	10,5	19,8	6,5	4,1	3,2
Siebdurchgang < 0,125 mm	M.-%	13,5	23,7	7,9	5,0	3,9
Siebdurchgang < 2 mm	M.-%	44,0	96,9	28,1	11,3	9,5
Siebdurchgang < 5,6 mm	M.-%	64,9	100,0	100,0	87,4	13,4
Siebdurchgang < 8 mm	M.-%	76,3	100,0	100,0	100,0	46,6
Siebdurchgang < 11,2 mm	M.-%	86,1	100,0	100,0	100,0	75,8
Siebdurchgang < 16 mm	M.-%	94,0	100,0	100,0	100,0	93,5
Siebdurchgang < 22,4mm	M.-%	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Größtkorndurchmesser	mm	16	2	5,6	5,6	16

Der Chunk-Index nach ZAUMANIS et al. (46) (Berechnung siehe Abschnitt 3.3.1.3) wurde als Parameter zur Quantifizierung des Agglomerationsgrades herangezogen. Ein hoher Index weist auf eine starke Verklebung der Gesteinskörnungen durch Bindemittel hin. Die Ergebnisse sind Tabelle 27 zu entnehmen.

Tabelle 27: Chunk-Index (46) Asphaltgranulate

Chunk-Index [-] Variante							
RA1-1	RA1-2	RA2-1	RA2-2	RA3-1	RA3-2	RA4-1	RA4-2
37	31	27	17	54	22	59	16

Die Daten zeigen eine deutliche Reduktion des Chunk-Index durch die RSB-Aufbereitung. Die Differenz zwischen dem Chunk-Index des konventionell (RAX-1) und im Rotorschleuderbrecher hergestellten Asphaltgranulats (RAX-2) nimmt von RA1 zu RA4 zu. Während bei der Va-

riante RA1 die Reduktion lediglich $37 - 31 = 6$ [-] beträgt, steigt dieser Effekt bei den grobkörnigeren Varianten deutlich an (RA3 mit einer Differenz von $54 - 22 = 32$ [-] und RA4 mit $59 - 16 = 43$ [-]). Dies belegt, dass die RSB-Aufbereitung besonders bei groben Ausgangskörnungen eine effiziente Trennung der Agglomerate bewirkt. Gründe hierfür könnten die Geschwindigkeit des Rotors, die spezifische Gesteinsmineralogie sowie die Ausgangsstückgrößenverteilung der Asphaltgranulate sein. Eine detaillierte Untersuchung dieser Einflussgrößen war im Rahmen des Forschungsvorhabens nicht vorgesehen, da der Fokus auf anderen Fragestellungen (siehe Abschnitt 1.3) lag.

Ein Vergleich des Breakdown-Index und des Filler-Increase-Index zwischen den Varianten RAX-1 und RAX-2 ist nicht zielführend, da das Ausgangsmaterial bereits als aufbereitetes Asphaltgranulat vorlag und somit die klassischen Kennwerte für die Erstzerkleinerung hier keine Aussagekraft besitzen.

Eigenschaften der Gesteinskörnungen der hergestellten Asphaltgranulatvarianten

Die Eigenschaften der Gesteinskörnungen und die zugehörigen Kategorien nach TL AG-StB (6) bzw. TL Gestein-StB (70) sind in Tabelle 28 bis Tabelle 31 zusammengetragen. Damit für die Eigenschaften zwischen den unterschiedlichen Aufbereitungsverfahren eine Vergleichbarkeit gegeben war, erfolgte die Bestimmung der Eigenschaften jeweils an der gleichen Kornklasse. Bei einigen Prüfungen musste von den in den TP Gestein-StB (30) beschriebenen Verfahrensanweisungen abgewichen werden, da die im Prüfverfahren vorgegebene Kornklasse im Asphaltgranulat entweder gar nicht oder nur in sehr kleinen Anteilen vorhanden war. Außerdem war keine statistische Auswertung möglich, da für die Kennwerte teilweise nur ein Ergebnis gemäß Prüfvorschrift je Asphaltgranulat zu ermitteln ist. Um dennoch eine Beurteilung vornehmen zu können, ob Unterschiede zwischen den Aufbereitungsverfahren bei den verschiedenen Gesteinseigenschaften vorhanden sind, wurde alternativ auf die in den jeweiligen Prüfverfahren angegebenen Verfahrenspräzisionen unter Wiederholbedingung zurückgegriffen. Wenn die Spanne zwischen den Ergebnissen der beiden Aufbereitungsverfahren größer als die jeweilige Wiederholgrenze ist, sind die ermittelten Kennwerte in den nachfolgenden Tabellen fett markiert.

Tabelle 28: Kennwerte Gesteinskörnungen der Asphaltgranulate RA1-1 (konventionell) und RA1-2 (RSB)

Eigenschaft/Merkmal	Einheit	Variante	
		RA1-1	RA1-2
<i>Fließkoeffizient von feinen Gesteinskörnungen</i>			
Kornklasse	mm	0,063/2	0,063/2
Fließkoeffizient	s	31	31
Kategorie E _{CS}	-	E _{CS} 30	E _{CS} 30

Eigenschaft/Merkmal	Einheit	Variante	
		RA1-1	RA1-2
Kornform von feinen Gesteinskörnungen			
Kornklasse	mm	1,25/4	1,25/4
Plattigkeitskennzahl	M.-%	5	4
Kornform von groben Gesteinskörnungen			
Kornklasse	mm	4/12,5	4/12,5
Plattigkeitskennzahl	M.-%	6	5
Kategorie FI	-	FI ₁₅	FI ₁₅
Anteil gebrochener Oberflächen in groben Gesteinskörnungen			
Kornklasse	mm	4/11,2	4/11,2
Vollständig gebrochene Körner C _{tc}	M.-%	92	92
Vollständig gebrochene und gebrochene Körner C _c	M.-%	99	99
Vollständig gerundete Körner C _{tr}	M.-%	0	0
Kategorie C	-	C _{95/1}	C _{95/1}
Widerstand gegen Zertrümmerung von groben Gesteinskörnungen			
Kornklasse	mm	5/8	5/8
Schlagzertrümmerungswert	M.-%	18	17
Kategorie SZ	-	SZ ₁₈	SZ ₁₈
Widerstand gegen Frostbeanspruchung von groben Gesteinskörnungen			
Kornklasse	mm	4/8	4/8
Frostwiderstand (Verlust)	M.-%	0,1	0,1
Kategorie F	-	F ₁	F ₁
Widerstand gegen Frost-Tausalzbeanspruchung von groben Gesteinskörnungen			
Kornklasse	mm	4/8	4/8
Masseverlust	M.-%	0,4	0,3

Tabelle 29: Kennwerte Gesteinskörnungen der Asphaltgranulate RA2-1 (konventionell) und RA2-2 (RSB)

Eigenschaft/Merkmal	Einheit	Variante	
		RA2-1	RA2-2
Fließkoeffizient von feinen Gesteinskörnungen			
Kornklasse	mm	0,063/2	0,063/2
Fließkoeffizient	s	31	31
Kategorie E _{CS}	-	E _{CS} 30	E _{CS} 30
Kornform von feinen Gesteinskörnungen			
Kornklasse	mm	1,25/4	1,25/4
Plattigkeitskennzahl	M.-%	7	5

Eigenschaft/Merkmal	Einheit	Variante	
		RA2-1	RA2-2
<i>Kornform von groben Gesteinskörnungen</i>			
Kornklasse	mm	4/12,5	4/12,5
Plattigkeitskennzahl	M.-%	6	5
Kategorie FI	-	FI ₁₅	FI ₁₅
<i>Anteil gebrochener Oberflächen in groben Gesteinskörnungen</i>			
Kornklasse	mm	4/8	4/8
Vollständig gebrochene Körner C _{tc}	M.-%	72	74
Vollständig gebrochene und gebrochene Körner C _c	M.-%	97	97
Vollständig gerundete Körner C _{tr}	M.-%	0	0
Kategorie C	-	C _{95/1}	C _{95/1}
<i>Widerstand gegen Zertrümmerung von groben Gesteinskörnungen</i>			
Kornklasse	mm	5/8	5/8
Schlagzertrümmerungswert	M.-%	15	14
Kategorie SZ	-	SZ ₁₈	SZ ₁₈
<i>Widerstand gegen Frostbeanspruchung von groben Gesteinskörnungen</i>			
Kornklasse	mm	4/8	4/8
Frostwiderstand (Verlust)	M.-%	0,2	0,2
Kategorie F	-	F ₁	F ₁
<i>Widerstand gegen Frost-Tausalzbeanspruchung von groben Gesteinskörnungen</i>			
Kornklasse	mm	4/8	4/8
Masseverlust	M.-%	0,7	0,7

Tabelle 30: Kennwerte Gesteinskörnungen der Asphaltgranulate RA3-1 (konventionell) und RA3-2 (RSB)

Eigenschaft/Merkmal	Einheit	Variante	
		RA3-1	RA3-2
Fließkoeffizient von feinen Gesteinskörnungen			
Kornklasse	mm	0,063/2	0,063/2
Fließkoeffizient	s	31	31
Kategorie E _{CS}	-	E _{CS} 30	E _{CS} 30
Kornform von feinen Gesteinskörnungen			
Kornklasse	mm	1,25/4	1,25/4
Plattigkeitskennzahl	M.-%	6	4
Kornform von groben Gesteinskörnungen			
Kornklasse	mm	4/25	4/25
Plattigkeitskennzahl	M.-%	7	5
Kategorie FI	-	FI ₁₅	FI ₁₅

Eigenschaft/Merkmal	Einheit	Variante	
		RA3-1	RA3-2
Anteil gebrochener Oberflächen in groben Gesteinskörnungen			
Kornklasse	mm	4/16	4/16
Vollständig gebrochene Körner C _{tc}	M.-%	69	84
Vollständig gebrochene und gebrochene Körner C _c	M.-%	93	94
Vollständig gerundete Körner C _{tr}	M.-%	2	1
Kategorie C	-	C _{50/30}	C _{95/1}
Widerstand gegen Zertrümmerung von groben Gesteinskörnungen			
Kornklasse	mm	5/8	5/8
Schlagzertrümmerungswert	M.-%	16	15
Kategorie SZ	-	SZ ₁₈	SZ ₁₈
Widerstand gegen Frostbeanspruchung von groben Gesteinskörnungen			
Kornklasse	mm	4/8	4/8
Frostwiderstand (Verlust)	M.-%	0,5	0,3
Kategorie F	-	F ₁	F ₁

Für den Fließkoeffizienten wurde für alle 8 Asphaltgranulate ein Wert von 31 s ermittelt, was einer Kategorie E_{CS30} nach TL Gestein-StB (70) entspricht. Während die Plattigkeitskennzahl von feinen Gesteinskörnungen bei den Asphaltgranulaten für das Asphaltbinderschichtmischgut (RA3) und für das Asphalttragschichtmischgut (RA4) durch die weitere Aufbereitung im Rotorschleuderbrecher verkleinert werden konnte, wurde bei den Plattigkeitskennzahlen von groben Gesteinskörnungen keine Unterschiede zwischen den Aufbereitungsverfahren bei allen Asphaltgranulaten festgestellt. Grundsätzlich entsprechen jedoch alle 8 Plattigkeitskennzahlen der Kategorie Fl_{15} und somit sind diese Asphaltgranulate entsprechend des Anhangs 2.2 der TL AG-StB (6) für die jeweiligen Asphaltmischgüter einsetzbar.

Die Anteile der gebrochenen Körner C_{tc} , der vollständig gebrochenen und gebrochenen Körner C_c und der vollständig gerundeten Körner C_{tr} sind zwischen RA1-1 und RA1-2 sowie zwischen RA2-1 und RA2-2 identisch und entsprechen für diese vier Asphaltgranulate der Kategorie $C_{95/1}$. Damit können diese Asphaltgranulate entsprechend des Anhangs 2.2 der TL AG-StB (6) für Asphaltdeckschichten verwendet werden.

Bei dem Asphaltgranulat für die Asphaltbinderschicht und dem für die Asphalttragschicht wurde durch die weitere Aufbereitung im Rotorschleuderbrecher jeweils der Anteil C_{tc} und C_c erhöht und der Anteil C_{tr} verringert. In beiden Fällen konnte dadurch eine Verbesserung der Kategorie von $C_{50/30}$ zu $C_{95/1}$ erzielt werden. Damit wäre das Asphaltgranulat RA3-1 eigentlich nicht für den Einsatz in Asphaltbinderschichtmischgut entsprechend der TL AG-StB (6) möglich. Es wurde dennoch nicht aus den Untersuchungen ausgeschlossen. Eventuell vorhandene Unterschiede in den mechanischen Eigenschaften (siehe Abschnitt 4.1.5) zwischen den Varianten des Asphaltbinders könnten hierauf zurückzuführen sein. RA3-2, RA4-1 und

RA4-2 können aufgrund des Kennwertes für die entsprechenden Verwendungszwecke eingesetzt werden.

Die beobachtete Abnahme des Chunk-Index und die Zunahme der Bruchflächigkeit lassen einen Zusammenhang zwischen beiden Kennwerten vermuten. Durch das Aufbrechen der "Chunks" (Agglomerate) im Rotorbrecher werden nicht nur das Bindemittel von den groben Gesteinskörnungen abgelöst, sondern auch neue Bruchflächen am Gestein erzeugt. Inwieweit dadurch die mechanische Verzahnung im Asphaltmischgut positiv beeinflusst werden kann, sollten die Performance-Eigenschaften des Asphaltmischguts (siehe Abschnitt 4.1.5) zeigen.

Für den Schlagzertrümmerungswert wurde für alle 8 Asphaltgranulate die Kategorie SZ₁₈ nach TL AG-StB (6) ermittelt. Bei den Asphaltgranulaten für die Asphaltdeck- und Asphaltbinderschichten (RA1, RA2 und RA3) konnte durch Aufbereitung im Rotorschleuderbrecher eine geringfügige Verbesserung des Schlagzertrümmerungswertes erreicht werden. Alle Asphaltgranulate sind aufgrund der bestimmten Kategorie SZ₁₈ für das jeweilig vorgesehene Asphaltmischgut verwendbar.

Tabelle 31: Kennwerte Gesteinskörnungen der Asphaltgranulate RA4-1 (konventionell) und RA4-2 (RSB)

Eigenschaft/Merkmal	Einheit	Variante	
		RA4-1	RA4-2
Fließkoeffizient von feinen Gesteinskörnungen			
Kornklasse	mm	0,063/2	0,063/2
Fließkoeffizient	s	31	31
Kategorie E _{CS}	-	E _{CS} 30	E _{CS} 30
Kornform von feinen Gesteinskörnungen			
Kornklasse	mm	1,25/4	1,25/4
Plattigkeitskennzahl	M.-%	7	5
Kornform von groben Gesteinskörnungen			
Kornklasse	mm	4/25	4/25
Plattigkeitskennzahl	M.-%	7	5
Kategorie FI	-	FI ₁₅	FI ₁₅
Anteil gebrochener Oberflächen in groben Gesteinskörnungen			
Kornklasse	mm	4/16	4/16
Vollständig gebrochene Körner C _{tc}	M.-%	60	83
Vollständig gebrochene und gebrochene Körner C _c	M.-%	91	97
Vollständig gerundete Körner C _{tr}	M.-%	3	1
Kategorie C	-	C _{50/30}	C _{95/1}

Eigenschaft/Merkmal	Einheit	Variante	
		RA4-1	RA4-2
Widerstand gegen Zertrümmerung von groben Gesteinskörnungen			
Kornklasse	mm	5/8	5/8
Schlagzertrümmerungswert	M.-%	18	18
Kategorie SZ	-	SZ ₁₈	SZ ₁₈
Widerstand gegen Frostbeanspruchung von groben Gesteinskörnungen			
Kornklasse	mm	4/8	4/8
Frostwiderstand (Verlust)	M.-%	1,0	0,5
Kategorie F	-	F ₁	F ₁

Für alle Asphaltgranulate konnte für den Widerstand gegen Frostbeanspruchung von groben Gesteinskörnungen keine Unterschiede für den Kennwert der Absplitterung im Frost-Tau-Wechselversuch zwischen den Aufbereitungsvarianten festgestellt werden. Die zugehörige Kategorie ist bei allen Asphaltgranulaten F₁ und somit entsprechend der TL AG-StB (6) für das jeweilig vorgesehene Asphaltmischgut einsetzbar.

Bei den für die Asphaltdeckschichten vorgesehenen Asphaltgranulaten (RA1-1, RA1-2, RA2-1 und RA2-2) erfolgte ebenso die Ermittlung des Widerstands gegen Frost-Tausalzbeanspruchung von groben Gesteinskörnungen. Zwischen den Aufbereitungsverfahren konnte kein Unterschied hinsichtlich der Summe der Absplitterungen bestimmt werden. Alle vier Asphaltgranulate sind aufgrund des Kennwertes gemäß TL AG-StB (6) in Asphaltdeckschichten verwendbar.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass durch die selektive Zerkleinerung im Rottorschleuderbrecher eine Reduzierung des Agglomerationsgrades (Chunk-Index) bei gleichzeitiger Steigerung der qualitätsbestimmenden Bruchflächigkeit erzielt werden kann, wodurch die mechanische Gesteinsverzahnung im Vergleich zur konventionellen Aufbereitung gezielt optimiert wird. Wie signifikant diese Effekte sind, scheint jedoch von der Beschaffenheit des Ausgangsmaterials (Ausbauasphalt) abzuhängen. Diese im Technikum der BHS Sonthofen GmbH nachgewiesenen Effekte zur Bindemittelumverteilung und Verbesserung der Bruchflächigkeit dienen als Referenz für die großtechnische Aufbereitung, um die Reproduzierbarkeit der qualitativen Materialaufwertung unter industriellen Produktionsbedingungen zu verifizieren.

Eigenschaften der zurückgewonnenen Bindemittel der hergestellten Asphaltgranulate

Die am zurückgewonnenen Bindemittel der Asphaltgranulate ermittelten Kennwerte sind in Tabelle 32 bis Tabelle 35 zusammenfassend dargestellt.

Für die weiterführenden Untersuchungen am zurückgewonnenen Bindemittel (u.a. Erstellung von Masterkurven gemäß Abschnitt 3.2.3.1 sowie Herstellung von Asphaltmörtel gemäß Abschnitt 3.2.4.2) war zu bewerten, inwieweit die abgesiebte Fraktion $\leq 2,0$ mm (RAX-2-1)

stellvertretend für das Gesamtsystem des im RSB aufbereiteten Asphaltgranulats verwendet werden kann.

Tabelle 32: Kennwerte am zurückgewonnenen Bindemittel der Asphaltgranulate RA1-1 (konventionell) und RA1-2 (RSB)

Kennwert	Einheit	Asphaltgranulatvariante				
		RA1-1	RA1-2-1	RA1-2-2	RA1-2-3	RA1-2-4
Erweichungspunkt Ring und Kugel	°C	69,8	67,2	66,0	65,8	68,2
Nadelpenetration	1/10 mm	14	15	-	-	-
Äqui-Schermodultemperatur $T(G^* = 15 \text{ kPa})$	°C	69,0	68,6	68,2	66,2	68,3
Phasenwinkel $\delta(G^* = 15 \text{ kPa})$	°	77,0	76,9	77,4	77,0	76,1

Die Entscheidung wurde auf Basis des Erweichungspunktes Ring und Kugel (EP RuK) sowie der Äqui-Schermodultemperatur $T(G^* = 15 \text{ kPa})$ getroffen. Methodisch wurde hierbei von der Anwendung der Wiederholpräzisionen nach DIN EN 1427 (32) bzw. der AL DSR-Prüfung (BTSV) (35) abgesehen, da diese für Bitumen im Anlieferungszustand definiert sind. Ebenso erschien eine Varianzanalyse aufgrund der inhärenten Inhomogenität innerhalb einer Asphaltgranulat-Halde nicht zweckmäßig.

Stattdessen wurden die Anforderungen an die Gleichmäßigkeit gemäß TL AG-StB (6) als Bewertungsmaßstab herangezogen. Demnach darf die Differenz sowohl beim EP RuK als auch bei der Äqui-Schermodultemperatur maximal 4,0 K betragen, um eine rechnerische Zugabemenge von 100 M.-% Asphaltgranulat zu ermöglichen.

Tabelle 33: Kennwerte am zurückgewonnenen Bindemittel der Asphaltgranulate RA2-1 (konventionell) und RA2-2 (RSB)

Kennwert	Einheit	Asphaltgranulatvariante				
		RA2-1	RA2-2-1	RA2-2-2	RA2-2-3	RA2-2-4
Erweichungspunkt Ring und Kugel	°C	67,4	66,6	65,4	63,8	66,0
Nadelpenetration	1/10 mm	19	19	-	-	-
Äqui-Schermodultemperatur $T(G^* = 15 \text{ kPa})$	°C	66,3	65,2	65,0	63,7	64,7
Phasenwinkel $\delta(G^* = 15 \text{ kPa})$	°	71,9	72,8	72,5	72,0	71,2

Tabelle 34: Kennwerte am zurückgewonnenen Bindemittel der Asphaltgranulate RA3-1 (konventionell) und RA3-2 (RSB)

Kennwert	Einheit	Asphaltgranulatvariante				
		RA3-1	RA3-2-1	RA3-2-2	RA3-2-3	RA3-2-4
Erweichungspunkt Ring und Kugel	°C	61,4	59,8	60,4	61,4	61,2
Nadelpenetration	1/10 mm	35	30	-	-	-
Äqui-Schermodultemperatur $T(G^* = 15 \text{ kPa})$	°C	60,1	59,0	59,7	60,6	58,7
Phasenwinkel $\delta(G^* = 15 \text{ kPa})$	°	73,3	74,3	73,2	72,6	72,3

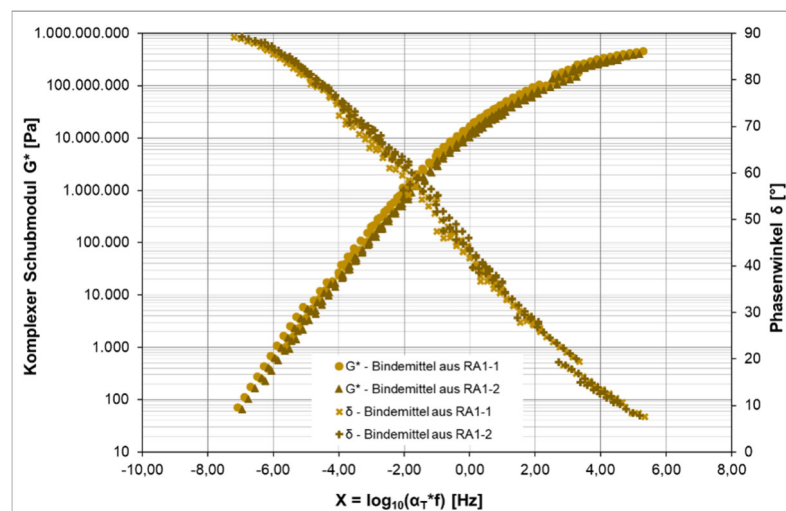
Tabelle 35: Kennwerte am zurückgewonnenen Bindemittel der Asphaltgranulate RA4-1 (konventionell) und RA4-2 (RSB)

Kennwert	Einheit	Asphaltgranulatvariante				
		RA4-1	RA4-2-1	RA4-2-2	RA4-2-3	RA4-2-4
Erweichungspunkt Ring und Kugel	°C	62,8	60,6	59,6	59,8	60,6
Nadelpenetration	1/10 mm	23	24	-	-	-
Äqui-Schermodultemperatur $T(G^* = 15 \text{ kPa})$	°C	63,9	61,1	60,8	61,0	62,0
Phasenwinkel $\delta(G^* = 15 \text{ kPa})$	°	75,2	75,7	75,5	76,0	75,8

Die Differenz zwischen minimalem und maximalem EP RuK der im RSB aufbereiteten Fraktionen beträgt 2,4 K bei RA1-2, 2,8 K bei RA2-2, 1,6 K bei RA3-2 und 1,0 K bei RA4-2. Die Spannweiten der Äqui-Schermodultemperatur $T(G^* = 15 \text{ kPa})$ liegen für RA1-2 bei 2,4 K, für RA2-2 bei 1,5 K, für RA3-2 bei 1,9 K und für RA4-2 bei 1,2 K. Da alle ermittelten Spannweiten deutlich unter dem Grenzwert von 4,0 K liegen, ist die Verwendung der Fraktion $\leq 2,0 \text{ mm}$ für alle weiteren Bindemitteluntersuchungen fachlich gerechtfertigt.

Zur Abschätzung der Bindemittelart wurde der Phasenwinkel $\delta(G^* = 15 \text{ kPa})$ herangezogen. Während Straßenbaubitumen im Regelfall Phasenwinkel $> 75^\circ$ aufweisen, liegen diese bei polymermodifizierten Bitumen (PmB) tendenziell bei $\leq 75^\circ$ (vgl. Anforderungen TL Bitumen-StB (42)).

Unter Berücksichtigung der im Regelwerk für die Alterung zulässigen maximalen Änderungen des Phasenwinkels von bis zu -12° lässt sich auf den ursprünglichen Zustand des im Asphaltgranulat enthaltenen Bitumens rückschließen. Da die gemessenen Phasenwinkel trotz der vorliegenden Alterung (hohe EP RuK-Werte) bei fast allen Varianten nahe oder über 75° liegen, sind die Bindemittel aller untersuchten Asphaltgranulate mit hoher Wahrscheinlichkeit als ursprünglich konventionelle Straßenbaubitumen zu klassifizieren bzw. die Wirkung von verwendeten Polymeren infolge der Alterung nicht mehr vorhanden.

Abbildung 48: Masterkurve des Komplexen Schubmoduls G^* und des Phasenwinkels δ der zurückgewonnenen Bindemittel aus RA1-1 und RA1-2

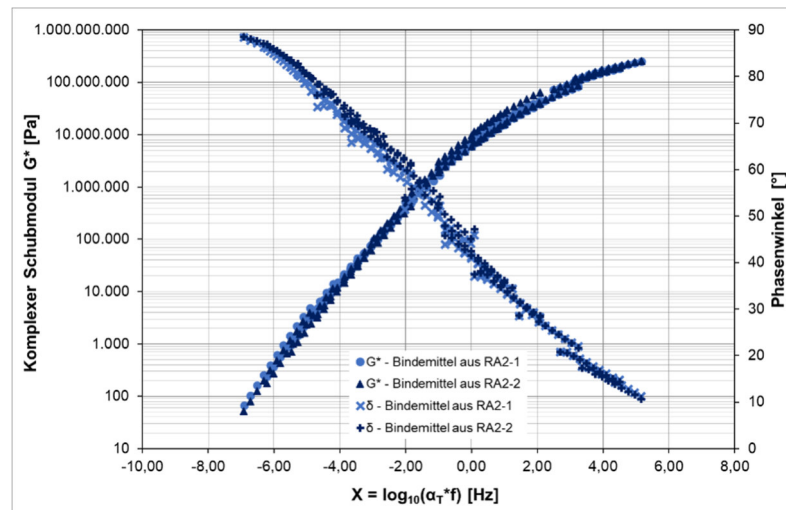


Abbildung 49: Masterkurve des Komplexen Schubmoduls G^* und des Phasenwinkels δ der zurückgewonnenen Bindemittel aus RA2-1 und RA2-2

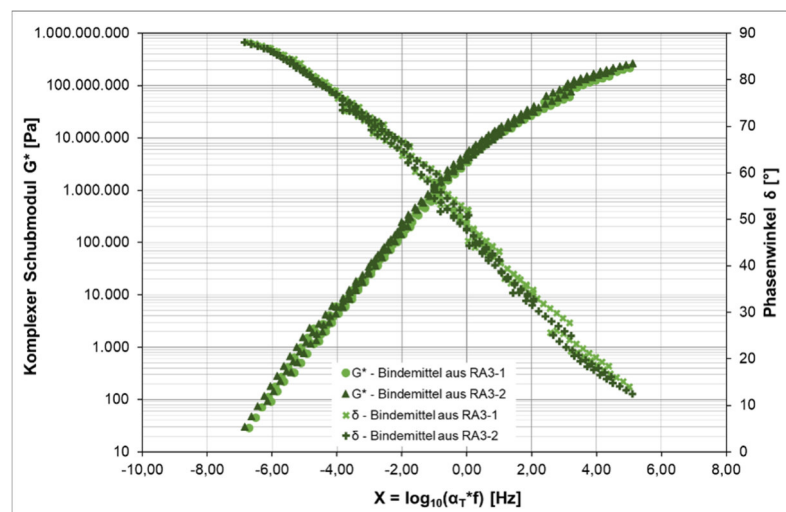


Abbildung 50: Masterkurve des Komplexen Schubmoduls G^* und des Phasenwinkels δ der zurückgewonnenen Bindemittel aus RA3-1 und RA3-2

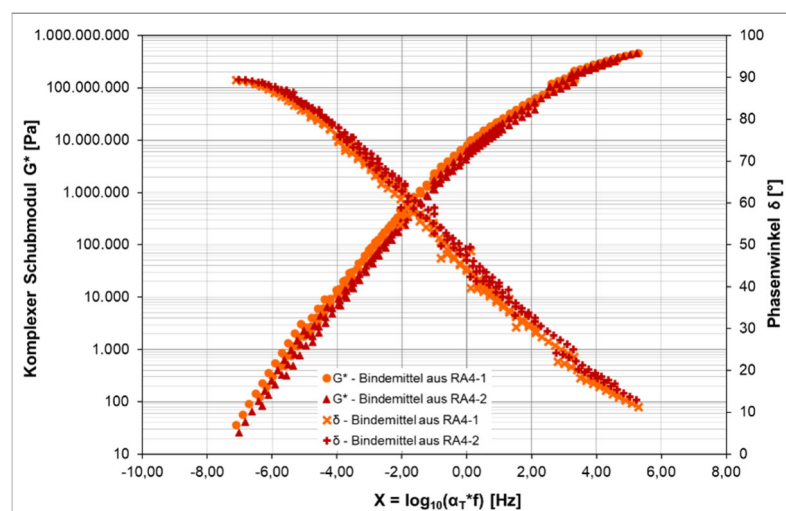


Abbildung 51: Masterkurve des Komplexen Schubmoduls G^* und des Phasenwinkels δ der zurückgewonnenen Bindemittel aus RA4-1 und RA4-2

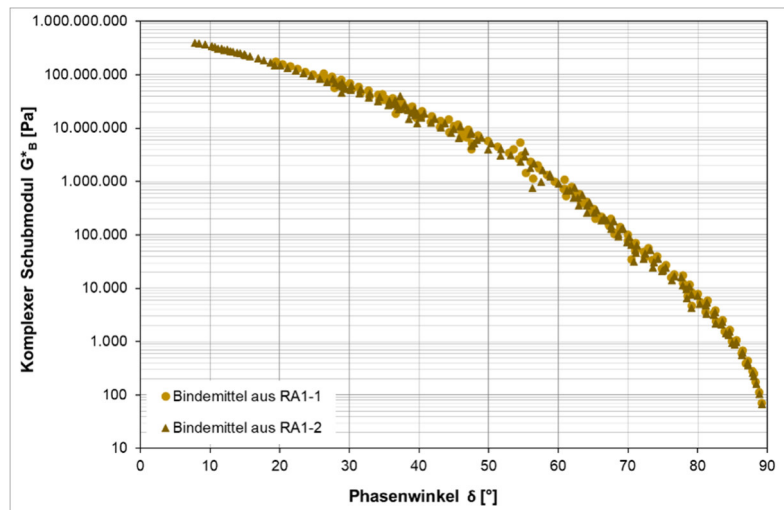


Abbildung 52: Black-Dialogramm der zurückgewonnenen Bindemittel aus RA1-1 und RA1-2

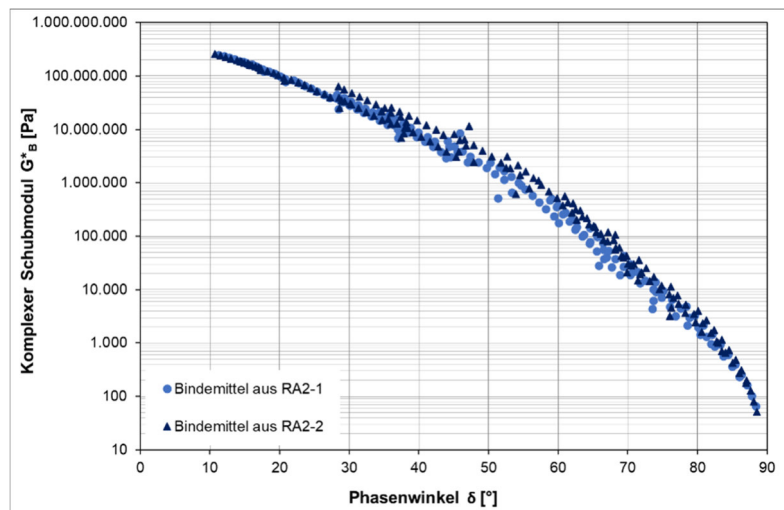


Abbildung 53: Black-Dialogramm der zurückgewonnenen Bindemittel aus RA2-1 und RA2-2

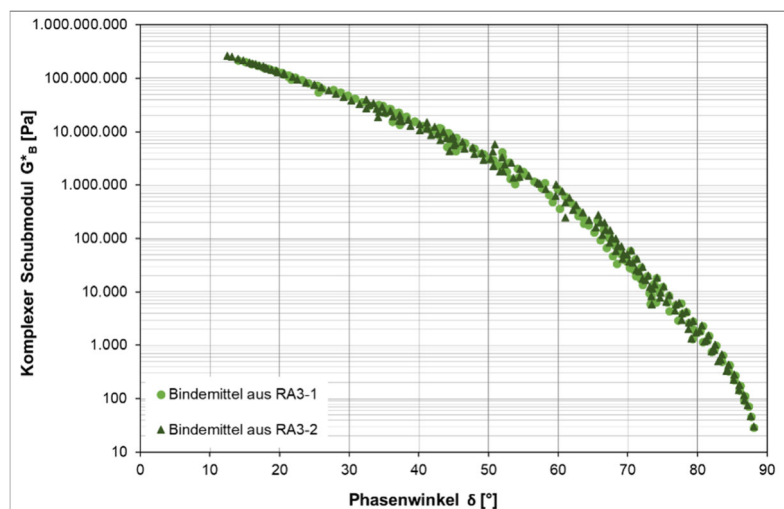


Abbildung 54: Black-Dialogramm der zurückgewonnenen Bindemittel aus RA3-1 und RA3-2

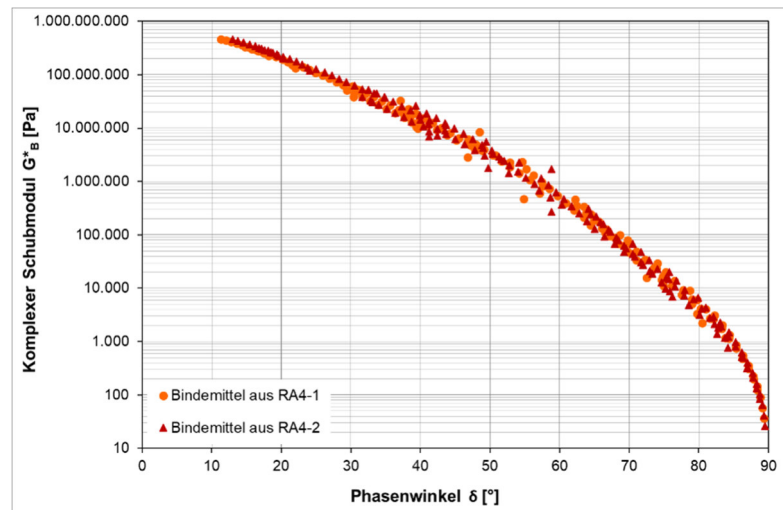


Abbildung 55: Black-Diagramm des zurückgewonnenen Bindemittels aus RA4-1 und RA4-2

Um die Eignung rheologischer Parameter für das Bitumendesign im Sinne der Aufgabenstellung (vgl. Abschnitt 1.3) zu prüfen, wurden Masterkurven des komplexen Schubmoduls G^* und des Phasenwinkels δ sowie Black-Diagramme erstellt.

Die Masterkurven (Abbildung 48 bis Abbildung 51) und die korrespondierenden Black-Diagramme (Abbildung 52 bis Abbildung 55) erlauben eine detaillierte Analyse des viskoelastischen Verhaltens über einen weiten Frequenz- und Temperaturbereich und bilden die Grundlage für die Bewertung des rheologischen Mix-Designs.

4.1.1.2 Verwendete Bitumen im Anlieferungszustand

Die Charakterisierung der im Anlieferungszustand befindlichen Bitumen (Frischbitumen) ist Voraussetzung für die Durchführung des rechnerischen Mix-Designs auf Bitumenebene. Diese Komponenten dienen dazu, die rheologischen Eigenschaften der gealterten Bindemittel aus den Asphaltgranulaten (siehe Abschnitt 4.1.1.1) gezielt zu beeinflussen und einen definierten Ziel-Verformungswiderstand des resultierenden Bindemittelgemisches einzustellen.

Als maßgebender Parameter für die rechnerische Auswahl und Dosierung der Zugabebitumen im ersten Entwurfsschritt wurde die Äqui-Schermodultemperatur $T(G^* = 15 \text{ kPa})$ herangezogen. Dieser Kennwert erlaubt eine präzise Steuerung des Verformungswiderstands bei hohen Temperaturen.

Die für die verschiedenen Asphaltvarianten eingesetzten Bindemittel wurden umfassend untersucht. Die Kennwerte sind in Tabelle 36 zusammengestellt.

Die untersuchten Bitumen entsprechen vollumfänglich den Anforderungen der TL Bitumen-StB (71). Die Proben B1 und B2 sind aufgrund ihrer elastischen Rückstellung ($> 70 \%$) sowie

der Phasenwinkel $\delta(G^* = 15 \text{ kPa})$ von $< 75^\circ$ als polymermodifizierte Bitumen (PmB) ausgewiesen. Die Proben B4 bis B6 zeigen das für Straßenbaubitumen typische viskoelastische Verhalten mit Phasenwinkeln $\delta(G^* = 15 \text{ kPa})$ von $> 75^\circ$.

Tabelle 36: Kennwerte der Bitumen im Anlieferungszustand

Kennwert	Einheit	Bezeichnung Bitumen				
		B1	B2	B4	B5	B6
Bitumensorte	-	25/55-55 A	25/55-55 RC	30/45	70/100	50/70
Erweichungspunkt Ring und Kugel	°C	58,6	59,2	55,0	45,0	47,8
Nadelpenetration	1/10 mm	39	39	37	75	65
Äqui-Schermodultemperatur $T(G^* = 15 \text{ kPa})$	°C	56,0	55,8	57,4	47,7	48,1
Phasenwinkel $\delta(G^* = 15 \text{ kPa})$	°	70,5	70,0	77,1	83,5	84,6
Elastische Rückstellung	%	73	74	-	-	-
Verhalten bei tiefen Temperaturen im Biegebalkenrheometer $T(S = 300 \text{ MPa})$	°C	-17,6	-17,1	-18,0	-19,8	-17,6
$T(m = 0,300)$	°C	-16,6	-16,5	-19,0	-18,9	-19,6

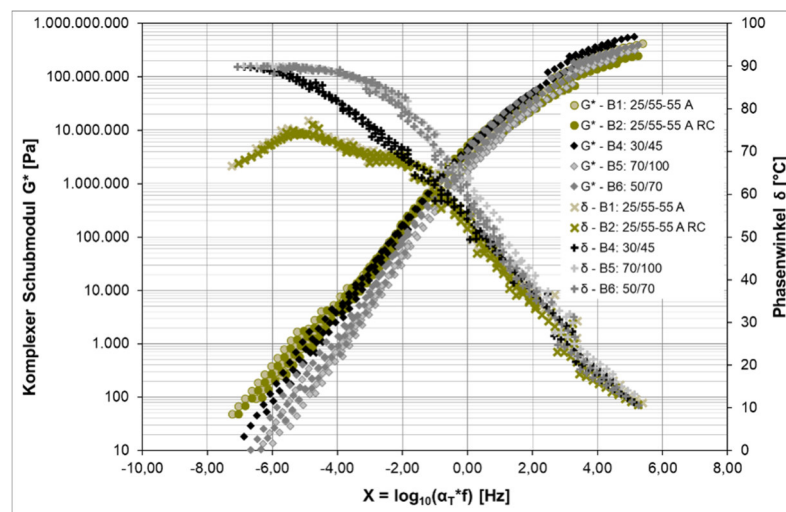


Abbildung 56: Masterkurve des Komplexen Schubmoduls G^* und des Phasenwinkels δ der verwendeten Bitumen im Anlieferungszustand

Zusätzlich zur Bestimmung der Bitumenkennwerte wurden die Masterkurven des komplexen Schubmoduls G^* und des Phasenwinkels δ sowie Black-Diagramme erstellt (siehe Abbildung 56 und Abbildung 57), um das Verhalten über den gesamten Gebrauchstemperatur- und Frequenzbereich abzubilden. Während das initiale Design auf der Äqui-Schermodultemperatur basiert, dienen diese Masterkurven als Referenz für die spätere Bewertung des Gebrauchsverhaltens der resultierenden Bindemittel.

Die in Tabelle 36 aufgeführten Ergebnisse aus dem Biegebalkenrheometer (BBR) verdeutlichen hinsichtlich des Kriteriums $T(S = 300 \text{ MPa})$ das Potenzial des weichen Bindemittels B5 (70/100), das Tieftemperaturverhalten des resultierenden Asphaltmischguts günstig zu be-

einflussen. Interessanterweise liegt der Wert für das 30/45 (B4) mit $-18,0\text{ °C}$ geringfügig niedriger als beim 50/70 (B6) mit $-17,6\text{ °C}$, was die Bedeutung einer detaillierten rheologischen Eingangsprüfung für das präzise Mix-Design unterstreicht.

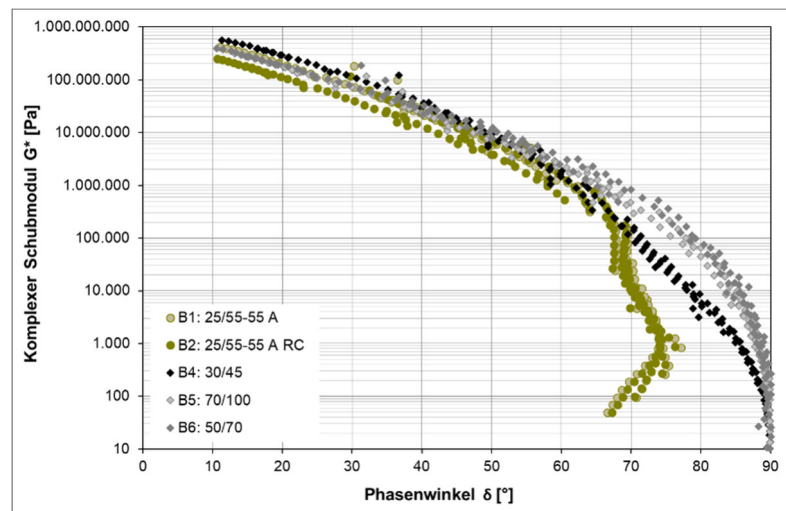


Abbildung 57: Black-Diagramm der verwendeten Bitumen im Anlieferungszustand

4.1.2 Rezeptierung der Asphaltgemische

4.1.2.1 Bindemittlebene

Die rechnerische Ermittlung der resultierenden Bindemittelkennwerte erfolgte gemäß dem Formelansatz nach Abschnitt 3.1.1 der TL Asphalt-StB (10). In den nachfolgenden Tabellen werden die Varianten mit Asphaltgranulat (A11, A12, A21, A22, A31, A32, A41 und A42.1) den jeweiligen Referenzmischgütern ohne Asphaltgranulat (A10, A20, A30 und A40.1) gegenübergestellt.

Tabelle 37: Berechnete resultierende Bindemittelkennwerte für die A1-Mischgutvarianten (SMA 11 S)

Kennwert	Einheit	Asphaltmischgutvariante		
		A10	A11*	A12*
Resultierende Bitumensorte	-	25/55-55 A		
Anteil Bindemittel aus Asphaltgranulat	M.-%	0,00	1,64	1,72
Anteil Zugabebitumen	M.-%	6,50	4,86	4,78
Gesamtbindemittelgehalt	M.-%	6,50	6,50	6,50
Erweichungspunkt Ring und Kugel	°C	58,6	61,9	61,3
Nadelpenetration	1/10 mm	39	33	33
Äqui-Schermodultemperatur $T(G^* = 15\text{ kPa})$	°C	56,0	59,1	59,2
Phasenwinkel $\delta(G^* = 15\text{ kPa})$	°	70,5	71,8	71,8

* Zugabebitumen = 25/55-55 RC (B2)

Bei den Varianten für das A10-, A20- und A30-Mischgut entsprechen die aufgeführten Kennwerte dem Bitumen 25/55-55 A (B1) und bei der Variante für das A40.1-Mischgut dem Bitumen 30/45 (B4).

Die berechneten EP RuK-Werte der SMA 11 S-Gemische A11 und A12 liegen über dem Anforderungswert von ≥ 55 °C. Die Äqui-Schermodultemperaturen $T(G^* = 15 \text{ kPa})$ befinden sich innerhalb der gemäß TL Bitumen-StB (42) geforderten Spanne von 48 °C bis 62 °C. Aufgrund der signifikanten Differenzen zur Referenzvariante A10 – insbesondere beim EP RuK ($\Delta 3,3 \text{ K}$), der Äqui-Schermodultemperatur ($\Delta 3,2 \text{ K}$) und der Nadelpenetration (6 1/10 mm) – wurde für die Varianten A11 und A12 der Einsatz eines Rejuvenators beschlossen. Die Festlegung der Zugabemenge erfolgte in Anlehnung an das H Re WA (72) mit jeweils 0,17 M.-% (bezogen auf das Gesamtgemisch).

Bei den AC 8 D SP-Varianten A21 und A22 liegen die berechneten EP RuK ebenfalls über 55 °C und die Äqui-Schermodultemperaturen im Zielkorridor. Analog zu den SMA-Varianten wurde hier aufgrund der deutlichen Abweichungen zur Referenz (EP RuK: $\Delta 3,6$ bis $4,0 \text{ K}$; Penetration: $\Delta 8$ [1/10 mm], Äqui-Schermodultemperatur: $\Delta 3,9 \text{ K}$ bis $\Delta 4,2 \text{ K}$) eine Rejuvenator-Zugabe von 0,13 M.-% (bezogen auf das Gemisch) definiert.

Tabelle 38: Berechnete resultierende Bindemittelkennwerte für die A2-Mischgutvarianten (AC 8 D SP)

Kennwert	Einheit	Asphaltmischgutvariante		
		A20	A21*	A22*
Resultierende Bitumensorte	-	25/55-55 A		
Anteil Bindemittel aus Asphaltgranulat	M.-%	0,00	2,68	2,81
Anteil Zugabebitumen	M.-%	6,40	3,72	3,59
Gesamtbindemittelgehalt	M.-%	6,40	6,40	6,40
Erweichungspunkt Ring und Kugel	°C	58,6	62,6	62,4
Nadelpenetration	1/10 mm	39	31	31
Äqui-Schermodultemperatur $T(G^* = 15 \text{ kPa})$	°C	56,0	60,2	59,9
Phasenwinkel $\delta(G^* = 15 \text{ kPa})$	°	70,5	70,8	71,2

* Zugabebitumen = 25/55-55 RC (B2)

Für die Asphaltbinderschichtgemische A31 und A32 wurden maximale Differenzen zum Referenzwert von 1,5 K (EP RuK bzw. Äqui-Schermodultemperatur) ermittelt. Da diese Abweichungen als geringfügig eingestuft wurden, erfolgte hier keine Zugabe eines Verjüngungsmittels.

Die resultierenden Kennwerte der Asphalttragschichtvarianten A41 und A42.1 liegen innerhalb der zulässigen Spannen für ein Bitumen 30/45 gemäß TL Bitumen-StB (71), (42). Insbe-

sondere die Nadelpenetration und der Phasenwinkel deuten auf eine vergleichsweise niedrige Viskosität hin. Eine Rejuvenator-Zugabe wurde daher für die Tragschichtvarianten als nicht erforderlich bewertet.

Tabelle 39: Berechnete resultierende Bindemittelkennwerte für die A3-Mischgutvarianten (AC 16 B S SG)

Kennwert	Einheit	Asphaltmischgutvariante		
		A30	A31*	A32*
Resultierende Bitumensorte	-	25/55-55 A		
Anteil Bindemittel aus Asphaltgranulat	M.-%	0,00	1,94	1,93
Anteil Zugabebitumen	M.-%	4,90	4,90	4,90
Gesamtbindemittelgehalt	M.-%	4,90	2,96	2,97
Erweichungspunkt Ring und Kugel	°C	58,6	60,1	59,4
Nadelpenetration	1/10 mm	39	38	36
Äqui-Schermoduletemperatur $T(G^* = 15 \text{ kPa})$	°C	56,0	57,5	57,1
Phasenwinkel $\delta(G^* = 15 \text{ kPa})$	°	70,5	71,3	71,7

* Zugabebitumen = 25/55-55 RC (B2)

Tabelle 40: Berechnete resultierende Bindemittelkennwerte für die A4-Mischgutvarianten (AC 22 T S)

Kennwert	Einheit	Asphaltmischgutvariante		
		A40.1	A41*	A42.1*
Resultierende Bitumensorte	-	30/45		
Anteil Bindemittel aus Asphaltgranulat	M.-%	0,00	2,46	2,11
Anteil Zugabebitumen	M.-%	4,10	4,10	4,10
Gesamtbindemittelgehalt	M.-%	4,10	1,64	1,99
Erweichungspunkt Ring und Kugel	°C	55,0	55,7	53,0
Nadelpenetration	1/10 mm	37	44	49
Äqui-Schermoduletemperatur $T(G^* = 15 \text{ kPa})$	°C	57,4	57,4	54,6
Phasenwinkel $\delta(G^* = 15 \text{ kPa})$	°	77,1	78,5	79,5

* Zugabebitumen = 70/100 (B5)

Inwiefern die hier vorgenommene rechnerische Herleitung der resultierenden Bindemittelkennwerte das komplexe viskoelastische Verhalten der tatsächlichen Bindemittelmischungen in ihrer Gesamtheit widerspiegelt, wird im weiteren Verlauf der Untersuchungen noch

Gegenstand einer detaillierten Betrachtung sein. Die rheologische Analyse der aus dem hergestellten Mischgut rückgewonnenen Bindemittel wird hierbei als ergänzende Informationsquelle herangezogen, um das derzeitige Design-Modell auf Basis von Einzelkennwerten durch weiterführende Daten zu stützen bzw. in Frage zu stellen.

4.1.2.2 Mörtelebene

Basierend auf den zuvor festgelegten Rezepturen der Asphaltmischgüter (siehe Abschnitt 4.1.2.3) erfolgte für jede Variante die rechnerische Ableitung der Asphaltmörtel-Zusammensetzung. Die Bestimmung der Korngrößenverteilung des Anteils $\leq 2,0$ mm sowie der Anteile des Bindemittels und ggf. der Zusätze wurden in Anlehnung an die AL DSR-Prüfung (Mastix) (38) durchgeführt (siehe Abschnitt 3.2.2.2). Die Ergebnisse sind in den nachfolgenden Tabellen und Diagrammen dokumentiert.

In Tabelle 41 ist die berechnete Zusammensetzung der Mörtelvarianten für den Splittmastixasphalt (Varianten M10 bis M12) dargestellt.

Da die Mörtelrezepturen direkt aus dem Mischgutdesign abgeleitet wurden, ergeben sich systembedingte Differenzen in der Mörtelzusammensetzung. Während der Mörtelanteil im A10-Mischgut 20,9 M.-% beträgt, liegt dieser bei den Varianten mit Asphaltgranulat (A11 und A12) mit ca. 20,4 M.-% geringfügig niedriger. Der Gesamtbindemittelgehalt im M10-Mörtel ist zudem um 0,5 M.-% geringer als in den M11- und M12-Varianten.

Hinsichtlich der Korngrößenverteilung (Abbildung 58) zeigt der M10-Mörtel mit 30,9 M.-% einen um ca. 3,7 M.-% niedrigeren Füllergehalt ($< 0,063$ mm) als die Varianten M11 und M12. Trotz dieser prozentualen Verschiebungen können die beiden Asphaltgranulat-Varianten untereinander als nahezu identisch zusammengesetzt betrachtet werden.

Tabelle 41: Berechnete Zusammensetzung der Mörtelvarianten M1 für die A1-Mischgutvarianten (SMA 11 S)

Kennwert	Einheit	Asphaltmörtelvariante		
		M10	M11*	M12*
Resultierende Bitumensorte	-	25/55-55 A		
Anteil Mörtel im Asphaltmischgut	M.-%	20,93	20,37	20,39
Mörtel-Bindemittel-Verhältnis MBV	-	3,22	3,13	3,14
Anteil stabilisierende Zusätze im Mörtel	M.-%	1,43	1,47	1,47
Anteil Bindemittel aus Asphaltgranulat im Mörtel	M.-%	0,00	6,11	6,39
Anteil Zugabebitumen im Mörtel	M.-%	23,70	17,45	17,16
Anteil Bindemittel aus Zusätzen im Mörtel	M.-%	0,00	0,63	0,63
Gesamtbindemittelgehalt im Mörtel	M.-%	23,70	24,19	24,17

* Zugabebitumen = 25/55-55 RC (B2)

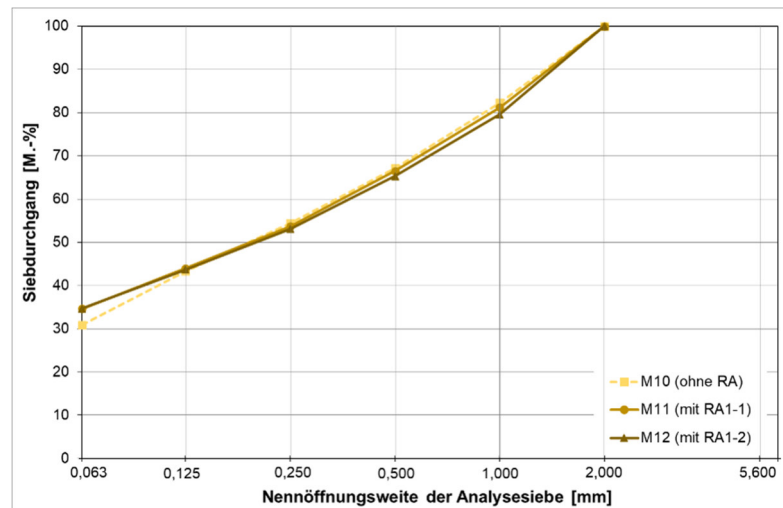


Abbildung 58: Berechnete Korngrößenverteilung der Asphaltmörtelvarianten M1 für die A1-Asphaltmischgutvarianten (SMA 11 S)

Für die AC 8 D SP-Deckschichtvarianten ergeben sich die in Tabelle 42 aufgeführten Kennwerte und in Abbildung 59 dargestellten Korngrößenverteilungen.

Tabelle 42: Berechnete Zusammensetzung der Mörtelvarianten M2 für die A2-Mischgutvarianten (AC 8 D SP)

Kennwert	Einheit	Asphaltmörtelvariante		
		M20	M21*	M22*
Resultierende Bitumensorte	-	25/55-55 A		
Anteil Mörtel im Asphaltmischgut	M.-%	29,09	29,34	30,52
Mörtel-Bindemittel-Verhältnis MBV	-	4,55	4,58	4,77
Anteil stabilisierende Zusätze im Mörtel	M.-%	1,03	1,02	0,98
Anteil Bindemittel aus Asphaltgranulat im Mörtel	M.-%	0,00	7,46	7,60
Anteil Zugabebitumen im Mörtel	M.-%	18,03	10,07	9,37
Anteil Bindemittel aus Zusätzen im Mörtel	M.-%	0,00	0,37	0,37
Gesamtbindemittelgehalt im Mörtel	M.-%	18,03	17,90	17,34

* Zugabebitumen = 25/55-55 RC (B2)

Bei der Variante M22 führt der höhere Mörtelanteil (30,5 M.-%) bei gleichzeitig geringerem Bindemittelgehalt (17,3 M.-%) zu einer Erhöhung des Mörtel-Bindemittel-Verhältnisses (MBV) auf 4,77 im Vergleich zu M20 und M21. Auch bei der Korngrößenverteilung zeigt sich eine Zunahme des Fülleranteils von 20,5 M.-% (M20) auf bis zu 24,4 M.-% (M22), was bei der späteren Interpretation der Steifigkeitswerte zu berücksichtigen ist.

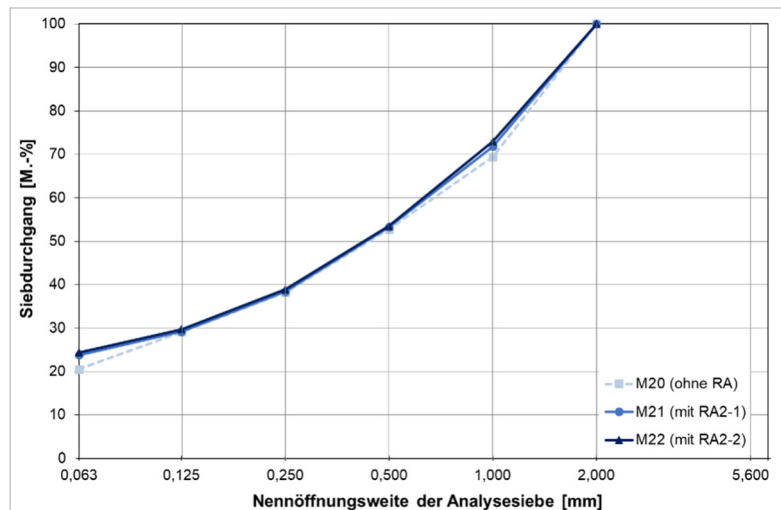


Abbildung 59: Berechnete Korngrößenverteilung der Asphaltmörtelvarianten M2 für die A2-Asphaltmischgutvarianten (AC 8 D SP)

Die Zusammensetzung der Asphaltbinderschichtmörtel ist in Tabelle 43 und Abbildung 60 dargestellt.

Hier liegen die Fülleranteile (< 0,063 mm) zwischen 21,4 M.-% (M30) und 23,4 M.-% (M31). Die geringfügigen Schwankungen im Bindemittelgehalt und in der Sieblinie reflektieren die unterschiedliche Eigenkörnung der eingesetzten Asphaltgranulate.

Tabelle 43: Berechnete Zusammensetzung der Mörtelvarianten M3 für die A3-Mischgutvarianten (AC 16 B S SG)

Kennwert	Einheit	Asphaltmörtelvariante		
		M30	M31*	M32*
Resultierende Bitumensorte	-	25/55-55 A		
Anteil Mörtel im Asphaltmischgut	M.-%	27,86	26,96	27,36
Mörtel-Bindemittel-Verhältnis MBV	-	5,69	5,50	5,58
Anteil Bindemittel aus Asphaltgranulat im Mörtel	M.-%	0,00	5,75	5,66
Anteil Zugabebitumen im Mörtel	M.-%	14,96	9,63	9,53
Gesamtbindemittelgehalt im Mörtel	M.-%	14,96	15,38	15,19

* Zugabebitumen = 25/55-55 RC (B2)

Bei den Asphalttragschichtvarianten wurde zusätzlich der Einfluss verschiedener Bitumensorten (30/45 vs. 50/70) in der Referenz ohne Asphaltgranulat (A40.1/A40.2) berücksichtigt (siehe Tabelle 44).

Die Variante M42.1 weist mit 31,6 M.-% den höchsten Mörtelanteil bei gleichzeitig niedrigstem Bindemittelgehalt auf, was in einem MBV von 7,70 resultiert. Dies deutet auf eine im Vergleich zu den Referenzen deutlich „trockenere“ und füllerreichere Mörtelzusammensetzung hin.

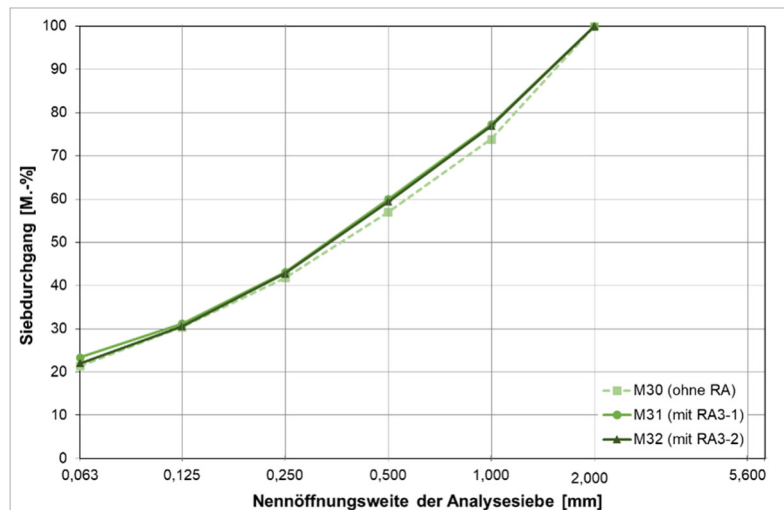


Abbildung 60: Berechnete Korngrößenverteilung der Asphaltmörtelvarianten M3 für die A3-Asphaltemischgutvarianten (AC 16 B S SG)

Tabelle 44: Berechnete Zusammensetzung der Mörtelvarianten M4 für die A4-Mischgutvarianten (AC 22 T S)

Kennwert	Einheit	Asphaltmörtelvariante			
		M40.1	M40.2	M41*	M42.1*
Resultierende Bitumensorte	-	30/45	50/70	30/45	
Anteil Mörtel im Asphaltemischgut	M.-%	28,61	28,61	29,14	31,56
Mörtel-Bindemittel-Verhältnis MBV	-	6,98	6,98	7,11	7,70
Anteil Bindemittel aus Asphaltgranulat im Mörtel	M.-%	0,00	0,00	7,31	5,93
Anteil Zugabebitumen im Mörtel	M.-%	12,53	12,53	5,03	5,57
Gesamtbindemittelgehalt im Mörtel	M.-%	12,53	12,53	12,34	11,50

* Zugabebitumen = 70/100 (B5)

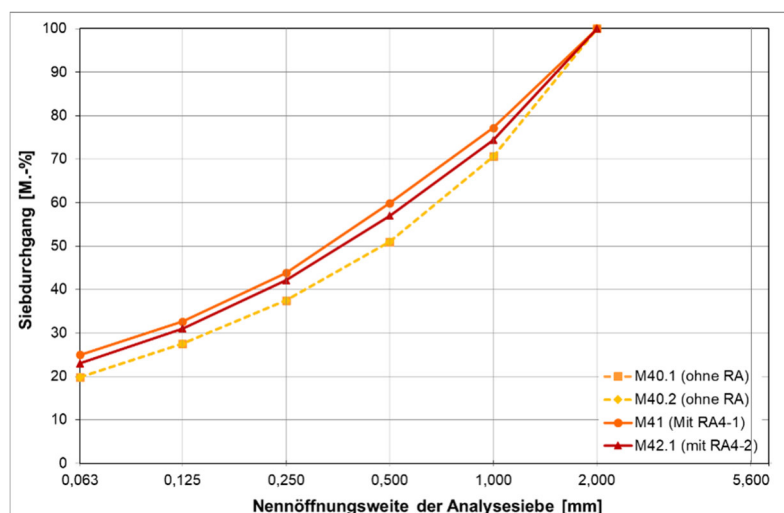


Abbildung 61: Berechnete Korngrößenverteilung der Asphaltmörtelvarianten M4 für die A4-Asphaltemischgutvarianten (AC 22 T S)

Die rechnerische Analyse der Mörtelzusammensetzung verdeutlicht, dass die Integration von Asphaltgranulat – insbesondere bei hohen Zugabemenge – trotz nahezu konstanter Ziel-Sieblinien im Gesamtmischgut zu messbaren Verschiebungen in der Mörtelzusammensetzung führt. Diese äußern sich vorrangig in variierenden Füllergehalten und Mörtel-Bindemittel-Verhältnissen. Inwieweit diese Abweichungen die rheologischen Materialeigenschaften überlagern oder verstärken, wird im Rahmen der Performance-Untersuchungen in Abschnitt 4.1.4 analysiert.

4.1.2.3 Asphaltebene

Wie bereits in Abschnitt 3.2.2.3 dargelegt, erfolgte die Festlegung der Mischgutzusammensetzung unter Einhaltung der technischen Vorgaben der TL Asphalt-StB (10), den H AI ABi (28) sowie dem AP AC D SP (29). Übergeordnetes Ziel war die Erzielung einer maximalen Vergleichbarkeit zwischen den Referenzvarianten und den Varianten mit Asphaltgranulat, um eine belastbare Grundlage für die nachfolgenden Performance-Untersuchungen zu schaffen. Dies schließt insbesondere die Realisierung nahezu identischer Korngrößenverteilungen, Bindemittelgehalte und Hohlraumgehaltscharakteristiken innerhalb einer Asphaltsorte ein.

Die Tabelle 45 bis Tabelle 48 dokumentieren die Zusammensetzung der Gesteinskörnungsgemische. Zur Verifizierung der angestrebten Zielkurven wurde an den im Labor hergestellten Gemischen eine Kontrolle der Korngrößenverteilung nach TP Asphalt-StB, Teil 2 (31) am extrahierten Gestein durchgeführt (Abbildung 62 bis Abbildung 65).

Tabelle 45: Gesteinszusammensetzung der A1-Mischgutvarianten (SMA 11 S)

Zusammensetzung	Einheit	Asphaltmischgutvariante		
		A10	A11	A12
Kalksteinmehl	M.-%	7,5	4,5	4,1
Diabas 0/2, gewaschen	M.-%	17,0	6,3	4,8
Diabas 2/5	M.-%	13,5	5,6	4,3
Diabas 5/8	M.-%	10,5	8,8	7,6
Diabas 8/11	M.-%	51,5	50,3	49,2
11 RA 0/8, Fraktion RA1-1	M.-%	0,0	24,5	0,0
8 RA 0/5, Fraktion RA1-2-1	M.-%	0,0	0,0	11,0
5 RA 0/5, Fraktion RA1-2-2	M.-%	0,0	0,0	6,0
5 RA 0/5, Fraktion RA1-2-3	M.-%	0,0	0,0	4,0
11 RA 0/11, Fraktion RA1-2-4	M.-%	0,0	0,0	9,0
Rohdichte Gesteinskörnungsgemisch	g/cm ³	2,765	2,745	2,746

Tabelle 46: Gesteinszusammensetzung der A2-Mischgutvarianten (AC 8 D SP)

Zusammensetzung	Einheit	Asphaltmischgutvariante		
		A20	A21	A22
Kalksteinmehl	M.-%	6,7	1,0	0,5
Diabas 0/2, gewaschen	M.-%	26,3	8,0	4,0
Diabas 2/5	M.-%	27,6	17,0	20,5
Diabas 5/8	M.-%	39,4	34,0	35,0
16 RA 0/8, Fraktion RA2-1	M.-%	0,0	40,0	0,0
8 RA 0/2, Fraktion RA2-2-1	M.-%	0,0	0,0	28,0
5 RA 0/5, Fraktion RA2-2-2	M.-%	0,0	0,0	1,6
5 RA 0/5, Fraktion RA2-2-3	M.-%	0,0	0,0	1,8
11 RA 0/8, Fraktion RA2-2-4	M.-%	0,0	0,0	8,6
Rohdichte Gesteinskörnungsgemisch	g/cm ³	2,753	2,734	2,726

Tabelle 47: Gesteinszusammensetzung der A3-Mischgutvarianten (AC 16 B S SG)

Zusammensetzung	Einheit	Asphaltmischgutvariante		
		A30	A31	A32
Kalksteinmehl	M.-%	2,5	0,0	0,0
Diabas 0/2, ungewaschen	M.-%	15,8	5,7	3,5
Diabas 0/2, gewaschen	M.-%	15,8	5,7	3,5
Diabas 2/5	M.-%	13,3	6,9	7,4
Diabas 5/8	M.-%	17,1	8,6	13,8
Diabas 8/11	M.-%	2,9	4,1	5,8
Diabas 11/16	M.-%	32,6	29,0	26,0
22 RA 0/16, Fraktion RA3-1	M.-%	0,0	40,0	0,0
8 RA 0/5, Fraktion RA3-2-1	M.-%	0,0	0,0	19,5
5 RA 0/5, Fraktion RA3-2-2	M.-%	0,0	0,0	7,0
8 RA 0/8, Fraktion RA3-2-3	M.-%	0,0	0,0	7,5
22 RA 0/16, Fraktion RA3-2-4	M.-%	0,0	0,0	6,0
Rohdichte Gesteinskörnungsgemisch	g/cm ³	2,754	2,725	2,728

Tabelle 48: Gesteinszusammensetzung der A4-Mischgutvarianten (AC 22 T S)

Kennwert	Einheit	Asphaltmischgutvariante			
		A40.1+2	A41	A42.1	A42.2*
Kalksteinmehl	M.-%	0,5	0,0	0,5	0,0
Kalkstein 0/2	M.-%	33,0	7,0	7,5	1,0
Kalkstein 2/5	M.-%	19,5	6,0	0,0	6,5
Kalkstein 5/8	M.-%	12,0	3,0	6,5	10,4
Kalkstein 8/11	M.-%	8,0	1,0	3,0	2,0
Kalkstein 11/16	M.-%	12,0	10,0	9,5	7,9
Kalkstein 16/22	M.-%	15,0	16,0	16,0	15,2

Kennwert	Einheit	Asphaltemischgutvariante			
		A40.1+2	A41	A42.1	A42.2*
32 RA 0/16, Fraktion RA4-1	M.-%	0,0	57,0	0,0	0,0
5 RA 0/2, Fraktion RA4-2-1	M.-%	0,0	0,0	20,0	25,5
5 RA 0/5, Fraktion RA4-2-2	M.-%	0,0	0,0	10,0	14,5
5 RA 0/5, Fraktion RA4-2-3	M.-%	0,0	0,0	15,0	0,0
32 RA 0/16, Fraktion RA4-2-4	M.-%	0,0	0,0	12,0	17,0
Rohdichte Gesteinskörnungsgemisch	g/cm ³	2,718	2,691	2,707	2,702

* Wiederholung von A42.1, jedoch mit gleichen Bindemittelanteil aus Asphaltgranulat wie A41

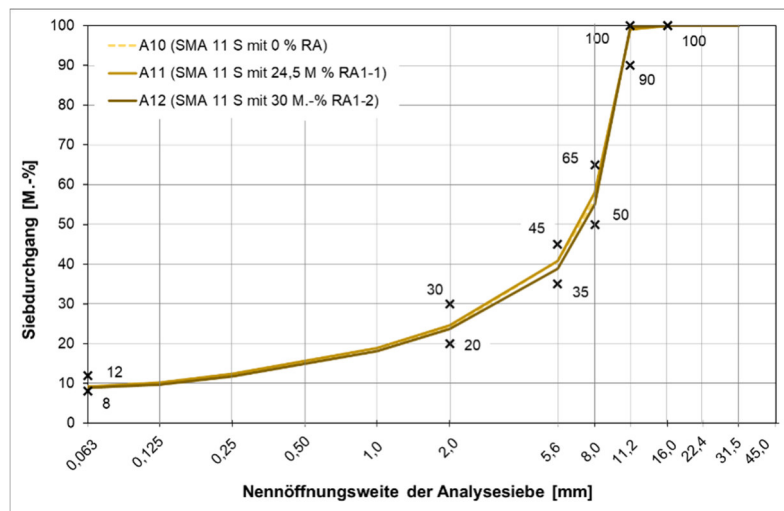


Abbildung 62: Korngrößenverteilungen des extrahierten Gesteinskörnungsgemisches der A1-Asphaltemischgutvarianten (SMA 11 S)

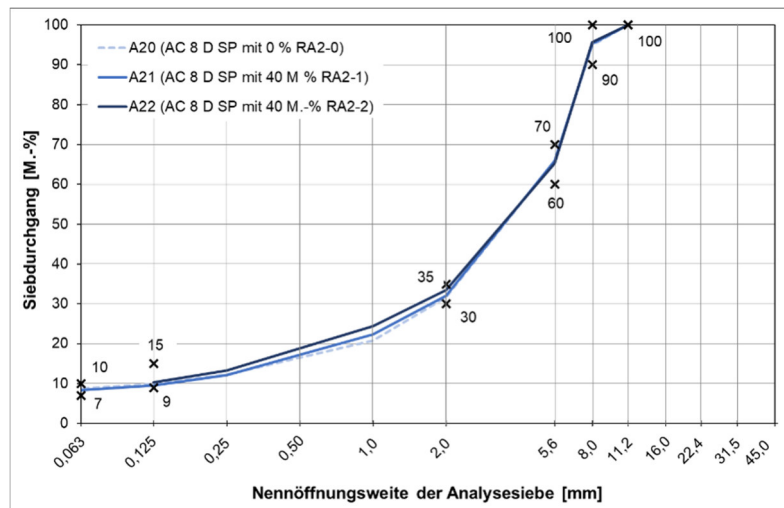


Abbildung 63: Korngrößenverteilungen des extrahierten Gesteinskörnungsgemisches der A2-Asphaltemischgutvarianten (AC 8 D SP)

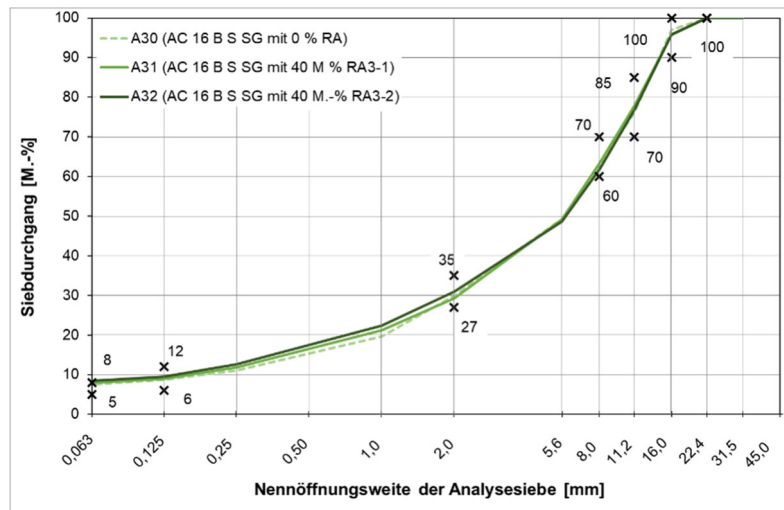


Abbildung 64: Korngrößenverteilungen des extrahierten Gesteinskörnungsgemisches der A3-Asphaltemischgutvarianten (AC 16 B S SG)

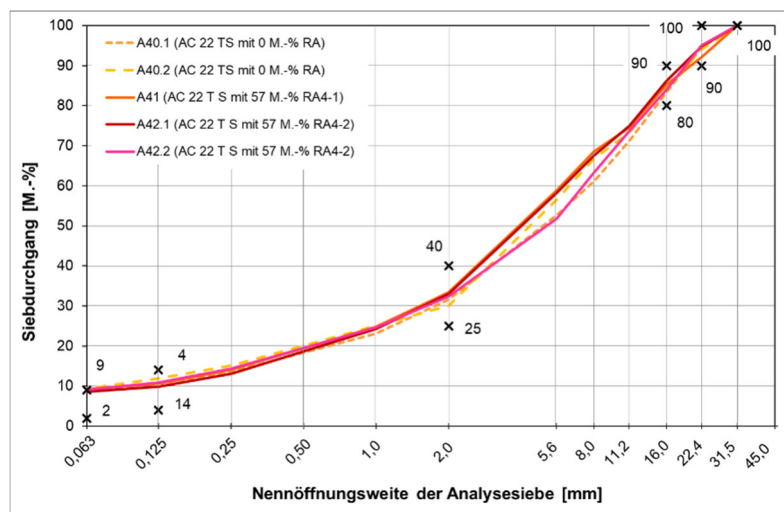


Abbildung 65: Korngrößenverteilungen des extrahierten Gesteinskörnungsgemisches der A4-Asphaltemischgutvarianten (AC 22 T S)

Tabelle 49: Asphaltemischgutzusammensetzung sowie volumetrischen Kenngrößen der A1-Mischgutvarianten (SMA 11 S)

Kennwert	Einheit	Asphaltemischgutvariante		
		A10	A11	A12
Resultierende Bitumensorte	-	25/55-55A		
Anteil Bindemittel aus Asphaltgranulat	M.-%	0,00	1,64	1,72
Anteil Zugabebitumen	M.-%	6,50	4,69	4,61
Anteil Bindemittel aus Zusätzen	M.-%	0,00	0,17	0,17
Mindestbindemittelgehalt	M.-%	6,4	6,5	6,5
Gesamtbindemittelgehalt (SOLL)	M.-%	6,5	6,5	6,5
Gesamtbindemittelgehalt (IST)*	M.-%	6,4	6,5	6,5
Anteil stabilisierende Zusätze	M.-%	0,3	0,3	0,3

Kennwert	Einheit	Asphaltemischgutvariante		
		A10	A11	A12
Rohdichte des Asphaltemischgutes	g/cm ³	2,485	2,470	2,479
Raumdichte am MPK	g/cm ³	2,419	2,407	2,410
Hohlraumgehalt MPK (SOLL)	Vol.-%	2,5 – 3,0		
Hohlraumgehalt MPK (IST)	Vol.-%	2,7	2,6	2,8
Hohlraumausfüllungsgrad	%	85,0	85,6	84,6
Verdichtungstemperatur	°C	145 ± 5	145 ± 5	145 ± 5

* nach TP Asphalt-StB (31), Teil 1 und 3

Tabelle 50: Asphaltemischgutzusammensetzung sowie volumetrischen Kenngrößen der A2-Mischgutvarianten (AC 8 D SP)

Kennwert	Einheit	Asphaltemischgutvariante		
		A20	A21	A22
Resultierende Bitumensorte	-	25/55-55A		
Anteil Bindemittel aus Asphaltgranulat	M.-%	0,00	2,68	2,81
Anteil Zugabebitumen	M.-%	6,40	3,59	3,46
Anteil Bindemittel aus Zusätzen	M.-%	0,00	0,13	0,13
Mindestbindemittelgehalt	M.-%	6,2	6,2	6,2
Gesamtbindemittelgehalt (SOLL)	M.-%	6,4	6,4	6,4
Gesamtbindemittelgehalt (IST)*	M.-%	6,4	6,4	6,5
Anteil stabilisierende Zusätze	M.-%	0,3	0,3	0,3
Rohdichte des Asphaltemischgutes	g/cm ³	2,472	2,457	2,448
Raumdichte am MPK	g/cm ³	2,397	2,377	2,387
Hohlraumgehalt MPK (SOLL)	Vol.-%	2,0 – 3,5		
Hohlraumgehalt MPK (IST)	Vol.-%	3,0	3,3	2,5
Hohlraumausfüllungsgrad	%	83,2	81,7	85,7
Verdichtungstemperatur	°C	145 ± 5	145 ± 5	145 ± 5

* nach TP Asphalt-StB (31), Teil 1 und 3

Tabelle 51: Asphaltemischgutzusammensetzung sowie volumetrischen Kenngrößen der A3-Mischgutvarianten (AC 16 B S SG)

Kennwert	Einheit	Asphaltemischgutvariante		
		A30	A31	A32
Resultierende Bitumensorte	-	25/55-55A		
Anteil Bindemittel aus Asphaltgranulat	M.-%	0,00	1,94	1,93
Anteil Zugabebitumen	M.-%	4,90	2,96	2,97
Mindestbindemittelgehalt	M.-%	4,4	4,5	4,5
Gesamtbindemittelgehalt (SOLL)	M.-%	4,9	4,9	4,9
Gesamtbindemittelgehalt (IST)*	M.-%	5,0	5,1	4,9

Kennwert	Einheit	Asphaltmischgutvariante		
		A30	A31	A32
Rohdichte des Asphaltmischgutes	g/cm ³	2,530	2,516	2,519
Raumdichte am MPK	g/cm ³	2,433	2,441	2,435
Hohlraumgehalt MPK (SOLL)	Vol.-%	3,0 – 4,0		
Hohlraumgehalt MPK (IST)	Vol.-%	3,8	3,0	3,3
Hohlraumausfüllungsgrad	%	75,6	80,2	77,7
Verdichtungstemperatur	°C	145 ± 5	145 ± 5	145 ± 5

* nach TP Asphalt-StB (31), Teil 1 und 3

Parallel zur Überprüfung der Korngrößenverteilungen wurden die Bindemittelgehalte (IST) nach TP Asphalt-StB, Teil 1 und 3 (31) sowie die volumetrischen Kenngrößen an Marshall-Probekörpern (MPK) gemäß TP Asphalt-StB, Teil 8 ermittelt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 49 bis Tabelle 52 zusammengefasst.

Tabelle 52: Asphaltmischgutzusammensetzung sowie volumetrischen Kenngrößen der A4-Mischgutvarianten (AC 22 T S)

Kennwert	Einheit	Asphaltmischgutvariante				
		A40.1	A40.2	A41	A42.1	A42.2
Resultierende Bitumensorte	-	30/45	50/70	30/45	30/45	30/45
Anteil Bindemittel aus Asphaltgranulat	M.-%	0,00	0,00	2,46	2,11	2,38
Anteil Zugabebitumen	M.-%	4,10	4,10	1,64	1,99	1,72
Mindestbindemittelgehalt	M.-%	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8
Gesamtbindemittelgehalt (SOLL)	M.-%	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1
Gesamtbindemittelgehalt (IST)*	M.-%	4,0	4,1	4,2	4,0	4,0
Rohdichte des Asphaltmischgutes	g/cm ³	2,531	2,530	2,528	2,522	2,511
Raumdichte am MPK	g/cm ³	2,366	2,356	2,387	2,385	2,357
Hohlraumgehalt MPK (SOLL)	Vol.-%	5,0 – 7,0				
Hohlraumgehalt MPK (IST)	Vol.-%	6,5	6,9	5,6	5,4	6,1
Hohlraumausfüllungsgrad	%	58,2	57,4	63,5	63,0	59,7
Verdichtungstemperatur	°C	135 ± 5	135 ± 5	135 ± 5	135 ± 5	135 ± 5

* nach TP Asphalt-StB (31), Teil 1 und 3

Die Auswertung der Kontrollprüfungen belegt eine hohe Genauigkeit bei der Umsetzung der theoretischen Mischgutentwürfe. Im Einzelnen lassen sich nachfolgende Schlüsse ziehen.

Korngrößenverteilung

Die Sieblinien der extrahierten Gesteinskörnungsgemische zeigen für alle Asphaltarten eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Referenz- und Asphaltgranulatvarianten. Es war trotz der hohen Recyclingquoten (bis zu 40 M.-% bei Deck- und Binderschicht bzw. 57 M.-% bei der Tragschicht) möglich, die Korngrößenverteilungen nahezu deckungsgleich zur Variante ohne Asphaltgranulat zu produzieren.

Bindemittelgehalte

Die ermittelten IST-Bindemittelgehalte weichen nur geringfügig von den SOLL-Werten ab. Besonders bei den SMA-Varianten mit Asphaltgranulat wurde der SOLL-Wert von 6,5 M.-% erreicht, was die Homogenität der eingesetzten Asphaltgranulate unterstreicht.

Hohlraumgehalt (V) und Hohlraumausfüllungsgrad (VFB)

Das Ziel, innerhalb einer Sorte vergleichbare volumetrische Kenngrößen zu erzielen, wurde größtenteils erfolgreich umgesetzt. Hierbei ist neben dem Hohlraumgehalt am Marshall-Probekörper (MPK) insbesondere der Hohlraumausfüllungsgrad zu betrachten, der den Anteil des mit Bindemittel gefüllten Hohlraums im Gesteinsgerüst (VMA) beschreibt. Die Einordnung erfolgt für den Hohlraumgehalt nach den gültigen Regelwerken und für den Hohlraumausfüllungsgrad nach Erfahrungswerten.

SMA 11 S (A10–A12): Die Hohlraumgehalte liegen mit 2,6 Vol.-% bis 2,8 Vol.-% ideal im Zielbereich (Soll: 2,5 Vol.-% bis 3,0 Vol.-%). Der Hohlraumausfüllungsgrad (VFB) von ca. 85 % (Tabelle 49) entspricht der für SMA-typischen Größenordnung von 80 % – 90 %. Dies gewährleistet die angestrebte hohe Dauerhaftigkeit durch dicke Bindemittelfilme.

AC 8 D SP (A20–A22): Mit Hohlraumgehalten von 2,5 Vol.-% bis 3,3 Vol.-% wird die Anforderung (Soll: 2,0 Vol.-% – 3,5 Vol.-%) sicher erfüllt (Tabelle 50). Die VFB-Werte von 81,7 % bis 85,7 % liegen im oberen Bereich der für Asphaltbetondeckschichten üblichen Spanne von 75 % – 85 %.

AC 16 B S SG (A30–A32): Die Hohlraumgehalte liegen mit 3,0 Vol.-% bis 3,8 Vol.-% (Tabelle 51) im geforderten Bereich (Soll: 3,0 Vol.-% – 4,0 Vol.-%). Der Hohlraumausfüllungsgrad liegt in der für Asphaltbinderschichten üblichen Größenordnung von 65 % – 80 %.

AC 22 T S (A40–A42): Hier wurden Hohlraumgehalte von 5,4 Vol.-% bis 6,9 Vol.-% (Tabelle 52) erzielt (Soll: 5,0 Vol.-% – 7,0 Vol.-%). Die VFB-Werte entsprechen mit 57,4 % bis 63,5 % exakt der für Asphalttragschichten typischen Spanne von 50 % – 70 % und sind essentiell für die Lastabtragung durch das Gesteinskorngerüst.

Die Analyse verdeutlicht, dass die VFB-Werte je nach Mischgutsorte, systembedingt variieren. Ein hoher VFB-Wert korreliert tendenziell mit einem besseren Kälteverhalten und höherem Ermüdungswiderstand, während ein niedrigerer VFB die Verformungsbeständigkeit begünstigt.

Zusammenfassung der Rezeptierung

Die angestrebte stoffliche und volumetrische Vergleichbarkeit wurde erreicht. Für die Interpretation der Asphaltperformance (siehe Abschnitt 4.1.5) ist jedoch festzuhalten, dass die geringfügig höheren Hohlraumausfüllungsgrade (VFB) sowie die minimal kleineren Hohlraumgehalte (V) einiger Asphaltgranulatvarianten (insbesondere bei A22 und A41/A42.1) als

potenzielle Einflussfaktoren berücksichtigt werden müssen. Es wird im weiteren Verlauf kritisch geprüft, ob Performance-Vorteile dieser Varianten stofflich durch die innovative Aufbereitung oder teilweise volumetrisch durch das kompaktere Gefüge bedingt sind.

4.1.3 Bindemittelkennwerte und Performance der Bindemittel

4.1.3.1 Bindemittelkennwerte

Nach der Herstellung der Asphaltmischgutvarianten im Labor wurde das Bindemittel zur Verifizierung der resultierenden Eigenschaften zurückgewonnen. Die Ermittlung der Kennwerte erfolgte sowohl über konventionelle Prüfverfahren (EP RuK, Nadelpenetration) als auch über das DSR (BTSV-Prüfung, MSCR-Test). Die Ergebnisse für die verschiedenen Asphaltarten sind in den Tabellen 51 bis 54 zusammengefasst.

Tabelle 53: Kennwerte am zurückgewonnenen Bindemittel für die A1-Mischgutvarianten (SMA 11 S)

Kennwert	Einheit	Variante des zurückgewonnenen Bindemittels		
		B-A10	B-A11	B-A12
Erweichungspunkt Ring und Kugel	°C	63,6	60,4	60,0
Nadelpenetration	1/10 mm	29	35	37
Äqui-Schermodultemperatur $T(G^*=15\text{kPa})$	°C	60,1	59,2	58,0
Phasenwinkel $\delta(G^*=15\text{kPa})$	°	67,4	68,8	69,6
Nicht rückformbarer Anteil J_{nr}	kPa^{-1}	0,174	0,287	0,359
Prozentuale Erholung R_N	%	56,4	38,5	33,8

Um die Vergleichbarkeit der Varianten innerhalb einer Sorte wissenschaftlich abzusichern, wurde eine einfaktorielle Varianzanalyse (ANOVA) (siehe Abschnitt 3.4.1) mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von $\alpha = 5\%$ durchgeführt. Im Falle einer Ablehnung von H_0 erfolgte ein anschließender paarweiser Vergleich der Varianten.

Für die SMA-Varianten zeigt die Varianzanalyse, dass die Nullhypothese der Gleichheit für sämtliche Bindemittelkennwerte abzulehnen ist. Ein nachgeschalteter paarweiser Vergleich liefert jedoch differenziertere Erkenntnisse (siehe Tabelle 53).

Obwohl die Festlegung der Rejuvenatormenge auf Basis der Äqui-Schermodultemperatur $T(G^* = 15\text{ kPa})$ erfolgte, konnte eine statistische Gleichheit lediglich beim EP RuK zwischen den Asphaltgranulatvarianten B-A11 und B-A12 nachgewiesen werden. Auffällig ist, dass diese Varianten durch die Rejuvenierung eine geringere elastische Erholung (R_N) und einen höheren nicht rückformbaren Anteil J_{nr} aufweisen als die Referenz B-A10 (ohne Asphaltgranulat). Dies deutet darauf hin, dass die Rejuvenierung zwar den Verformungswiderstand im Bereich von $T(G^* = 15\text{ kPa})$ reduziert, die viskoelastische Charakteristik jedoch nicht vollständig auf das Niveau des Bitumens B1, welches für die Herstellung von A10 verwendet wurde,

zurückführt. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die exakte Polymerkonzentration und deren Verteilung im resultierenden Bindemittelgemisch (Anteile aus dem Asphaltgranulat, dem Frischbitumen B2 und dem Rejuvenator) analytisch anhand der bestimmten Kennwerte nicht quantifizierbar ist, was jedoch einen maßgeblichen Einfluss auf das elastische Rückstellvermögen haben kann.

Auch bei den AC 8 D SP-Varianten belegt die statistische Auswertung signifikante Unterschiede zwischen den Varianten (siehe Tabelle 54).

Tabelle 54: Kennwerte am zurückgewonnenen Bindemittel für die A2-Mischgutvarianten (AC 8 D SP)

Kennwert	Einheit	Variante des zurückgewonnenen Bindemittels		
		B-A20	B-A21	B-A22
Erweichungspunkt Ring und Kugel	°C	61,4	62,4	64,6
Nadelpenetration	1/10 mm	25	28	27
Äqui-Schermoduletemperatur $T(G^*=15\text{kPa})$	°C	62,6	63,2	61,3
Phasenwinkel $\delta(G^*=15\text{kPa})$	°	67,7	68,6	69,3
Nicht rückformbarer Anteil J_{nr}	kPa ⁻¹	0,140	0,194	0,247
Prozentuale Erholung R_N	%	53,9	42,0	37,7

Hier ergaben die paarweisen Vergleiche Übereinstimmungen beim EP RuK zwischen B-A20 und B-A21 sowie bei der Nadelpenetration und dem $\delta(G^* = 15 \text{ kPa})$ zwischen den Asphaltgranulatvarianten B-A21 und B-A22. Dass trotz der Auslegung auf Basis von $T(G^* = 15 \text{ kPa})$ keine durchgängige Gleichheit erzielt wurde, unterstreicht die Komplexität der Interaktion zwischen Altbitumen, Zugabebitumen und Rejuvenator sowie den Einfluss der potenziell variierenden Polymergehalte.

Tabelle 55: Kennwerte am zurückgewonnenen Bindemittel für die A3-Mischgutvarianten (AC 16 B S SG)

Kennwert	Einheit	Variante des zurückgewonnenen Bindemittels		
		B-A30	B-A31	B-A32
Erweichungspunkt Ring und Kugel	°C	57,8	61,2	66,2
Nadelpenetration	1/10 mm	32	27	24
Äqui-Schermoduletemperatur $T(G^*=15\text{kPa})$	°C	59,9	60,7	62,7
Phasenwinkel $\delta(G^*=15\text{kPa})$	°	67,5	69,2	69,2
Nicht rückformbarer Anteil J_{nr}	kPa ⁻¹	0,236	0,238	0,184
Prozentuale Erholung R_N	%	52,3	39,6	42,6

Bei den Asphaltbinderschichten, die ohne Rejuvenator hergestellt wurden, zeigt sich ein deutlicher Anstieg des Verformungswiderstandes bei der Variante B-A32 (RSB-Aufbereitung), was sich in einem EP RuK von 66,2 °C widerspiegelt (siehe Tabelle 55).

Statistische Gleichheit zwischen den Asphaltgranulatvarianten (B-A31/B-A32) konnte hier lediglich für die Parameter ($T(G^* = 15 \text{ kPa})$), $\delta(G^* = 15 \text{ kPa})$) sowie die prozentuale Erholung R_N nachgewiesen werden. Die konventionellen Kennwerte divergieren hingegen stark.

Die Asphalttragschichtvarianten weisen ebenfalls statistisch signifikante Differenzen auf (siehe Tabelle 56), wobei zwischen den beiden Asphaltgranulatvarianten B-A41 und B-A42.1 eine Gleichheit beim EP RuK und dem $\delta(G^* = 15 \text{ kPa})$ festgestellt wurde.

Tabelle 56: Kennwerte am zurückgewonnenen Bindemittel für die A4-Mischgutvarianten (AC 22 T S)

Kennwert	Einheit	Variante des zurückgewonnenen Bindemittels			
		B-A40.1	B-A40.2	B-A41	B-A42.1
Erweichungspunkt Ring und Kugel	°C	60,4	51,8	55,8	55,4
Nadelpenetration	1/10 mm	39	27	32	35
Äqui-Schermodultemperatur $T(G^*=15\text{kPa})$	°C	61,7	53,5	57,5	56,7
Phasenwinkel $\delta(G^*=15\text{kPa})$	°	72,8	82,1	77,5	77,5

Die statistische Auswertung verdeutlicht ein zentrales Problem des Bindemitteldesigns nach aktuellem Standard. Die Auslegung auf einen einzelnen Zielwert (hier die Äqui-Schermodultemperatur $T(G^* = 15 \text{ kPa})$) führt nicht zwangsläufig zu einer Angleichung der übrigen rheologischen oder konventionellen Kennwerte.

Insbesondere der MSCR-Test offenbart, dass Varianten, die im Bereich der Äqui-Schermodultemperatur als "gleich" eingestuft werden, sich im Verformungsverhalten (J_{nr}) und im elastischen Rückstellvermögen (R_N) signifikant unterscheiden können. Dies lässt den Schluss zu, dass ein "Ein-Punkt-Design" auf Basis der BTSV-Prüfung zwar den Verformungswiderstand kontrolliert, aber die viskoelastische Gesamtperformance – besonders bei Verwendung hoher Asphaltgranulatanteile und Rejuvenatoren – nur unzureichend abbildet. Eine Erweiterung des Designs um temperatur- und frequenzabhängige Parameter scheint daher für eine präzisere Prognose der Mischgutperformance unumgänglich.

4.1.3.2 Rheologische Charakterisierung mittels Masterkurven

In Tabelle 57 bis Tabelle 60 sind die komplexen Schubmoduln G^* und Phasenwinkel δ sowie die zugehörigen Standardabweichungen der aus dem Asphaltmischgut zurückgewonnenen Bindemittel dokumentiert. Die Darstellung im Bericht erfolgt für die Frequenzen 1,0 Hz und 10,0 Hz in Anlehnung an die Temperaturstufen der AL DSR DSR (Mastix) (36). Die Messgeometrien wurden stoffabhängig gewählt: -15 °C bis 20 °C (Platte-Platte 4 mm, Spalt 2 mm),

30 °C bis 50 °C (Platte-Platte 8 mm, Spalt 2 mm) sowie 60 °C bis 90 °C (Platte-Platte 25 mm, Spalt 1 mm). Die resultierenden Masterkurven ($T_0 = 20$ °C) und Black-Diagramme sind in Abbildung 66 bis Abbildung 73 dargestellt.

Tabelle 57: Mittelwerte (obere Zeile) und Standardabweichungen (untere Zeile) des komplexen Schubmoduls G^* und Phasenwinkels δ der zurückgewonnenen Bindemittel für die A1-Mischgutvarianten (SMA 11 S) für die geprüften Temperaturen T und ausgewählten Frequenzen f

T [°C]	f [Hz]	Variante des zurückgewonnenen Bindemittels					
		B-A10		B-A11		B-A12	
		G^* [kPa]	δ [°]	G^* [kPa]	δ [°]	G^* [kPa]	δ [°]
-15	1,0	190.437	14,0	173.118	16,3	174.492	16,5
		1.315,3	0,20	3.097,1	0,34	17.073,1	0,42
	10,0	256.198	10,3	244.707	12,2	247.915	12,3
		3.386,2	0,13	3.015,7	0,31	22.550,9	0,58
-10	1,0	122.677	18,4	107.218	20,8	106.972	21,2
		415,9	0,36	2.215,0	0,18	11.790,9	0,51
	10,0	184.524	13,9	171.059	16,3	172.107	16,4
		859,6	0,16	2.804,2	0,28	16.760,5	0,20
0	1,0	41.495,4	27,9	33.708,2	30,1	32.399,0	31,1
		1.003,80	0,47	1.277,57	0,28	4.462,11	0,61
	10,0	78.881,6	22,6	56.667,9	25,0	66.728,7	25,7
		893,41	0,13	14.077,29	0,08	8.102,92	0,31
10	1,0	14.193,7	36,3	11.048,9	38,5	10.210,9	39,9
		611,63	0,51	490,27	0,33	1.573,31	0,74
	10,0	32.890,2	30,4	27.134,6	33,0	25.867,1	33,7
		927,20	0,56	1.035,01	0,42	3.510,75	0,80
20	1,0	3.941,06	45,8	2.966,88	47,8	2.623,26	49,6
		176,837	0,34	96,266	0,19	405,305	0,59
	10,0	11.342,9	39,7	9.091,61	41,7	8.387,62	43,2
		351,86	0,37	300,153	0,40	1.166,476	0,69
30	1,0	1.489,27	55,6	795,194	57,0	772,520	58,0
		168,865	0,49	28,6355	0,08	110,3386	0,10
	10,0	4.083,11	49,9	3.077,39	52,1	3.063,94	52,8
		2.474,192	0,60	122,640	0,32	427,746	0,37
40	1,0	278,386	62,6	162,070	62,8	158,282	63,6
		30,0939	0,35	5,7168	0,08	21,8937	0,04
	10,0	1.225,40	58,9	744,451	59,5	743,804	60,1
		148,722	0,45	25,0254	0,00	101,3704	0,06

T [°C]	f [Hz]	Variante des zurückgewonnenen Bindemittels					
		B-A10		B-A11		B-A12	
		G* [kPa]	δ [°]	G* [kPa]	δ [°]	G* [kPa]	δ [°]
50	1,0	61,361	65,6	39,855	66,1	38,449	66,8
		7,1023	0,12	1,3651	0,16	4,8325	0,02
	10,0	309,909	64,1	205,593	64,4	201,987	64,5
		37,2016	0,50	5,499	0,06	26,1596	0,04
60	1,0	12,775	67,7	11,205	69,3	9,736	70,3
		0,0637	0,13	0,0849	0,23	0,3919	0,23
	10,0	67,487	67,1	60,546	67,3	53,570	67,9
		0,1205	0,25	0,0599	0,11	1,9645	0,11
70	1,0	3,878	71,0	3,369	73,6	2,933	74,8
		0,0589	0,17	0,0617	0,02	0,1072	0,28
	10,0	21,818	68,3	19,922	69,7	17,794	70,0
		0,2103	0,37	0,2053	0,30	0,5318	0,11
80	1,0	1,278	74,7	1,071	78,5	0,943	79,5
		0,0233	0,56	0,0142	0,64	0,0321	0,37
	10,0	7,936	70,6	7,127	72,5	6,478	73,5
		0,1566	0,14	0,1162	0,08	0,1748	0,04
90	1,0	0,466	77,5	0,360	83,7	0,326	84,5
		0,0028	1,03	0,0006	0,67	0,0118	0,35
	10,0	3,171	73,5	2,754	77,1	2,564	78,1
		0,0559	0,02	0,0202	0,21	0,0663	0,21

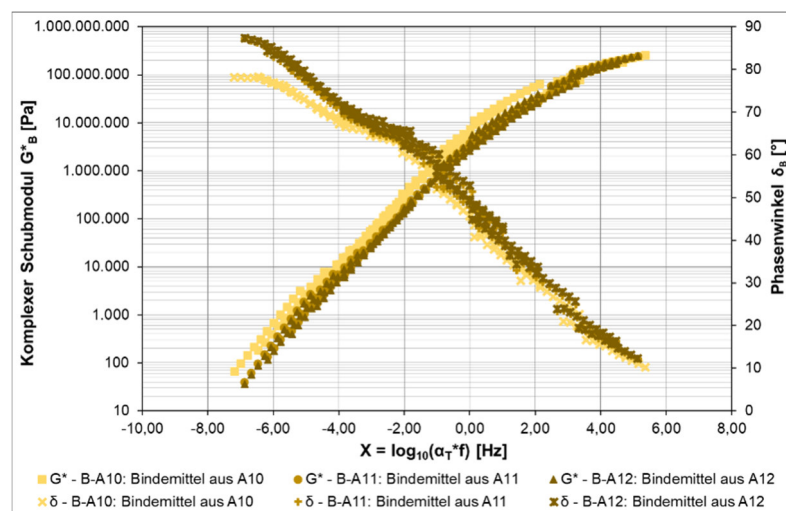


Abbildung 66: Masterkurve des Komplexen Schubmoduls G^* und des Phasenwinkels δ der zurückgewonnenen Bindemittel für die A1-Mischgutvarianten (SMA 11 S)

SMA 11 S (Mischgutvarianten A1, mit Rejuvenator)

Die einfaktorielle Varianzanalyse der A1-Varianten ergab für den Temperaturbereich von -15 °C bis 10 °C bei den komplexen Schubmoduln G^* , dass die Nullhypothese der Gleichheit ($\alpha = 5\%$) beibehalten werden konnte. Bei den Phasenwinkeln δ wurde die Nullhypothese

hingegen abgelehnt. Der paarweise Vergleich belegte eine Gleichheit lediglich zwischen den Asphaltgranulatvarianten B-A11 und B-A12.

Bei 20 °C wurde statistische Gleichheit der G^* -Werte zwischen B-A11 und B-A12 sowie zwischen B-A10 und B-A12 ermittelt. Im Bereich von 30 °C bis 40 °C beschränkte sich die Gleichheit von G^* auf die Varianten B-A11 und B-A12. Ab 50 °C konnte für G^* die Gleichheit zwischen allen Varianten bestätigt werden, während bei den Phasenwinkeln signifikante Unterschiede zwischen B-A10/B-A12 und B-A11/B-A12 auftraten. Im Bereich von 60 °C bis 70 °C wurde die Gleichheit für beide Kennwerte verworfen. Erst bei 90 °C konnte die Nullhypothese für G^* und δ zwischen B-A11 und B-A12 wieder angenommen werden.

In Auswertung der statistischen Untersuchungen kann für die Bindemittel der SMA 11 S-Varianten resümiert werden, dass für die resultierenden rückgewonnenen Bindemittel B-A11 und B-A12 nur im Temperaturbereich zwischen -15 °C bis 20°C sowie bei 90 °C sowohl für G^* als auch für δ keine Unterschiede festgestellt werden konnten. Wenn Unterschiede zwischen den drei Varianten vorhanden sind, besteht folgende Reihung zwischen den drei Varianten für G^* $B-A10 > B-A11 > B-A12$ und für δ $B-A10 < B-A11 < B-A12$.

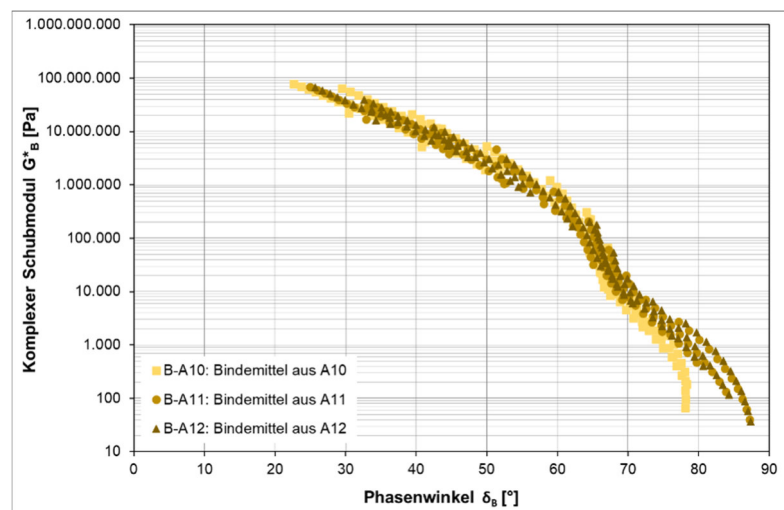


Abbildung 67: Black-Diagramm der zurückgewonnenen Bindemittel für die A1-Mischgutvarianten (SMA 11 S)

Entgegen der ursprünglichen Annahme einer Versteifung durch das RA-Bindemittel zeigt sich bei niedrigen Temperaturen, dass die RA-Varianten (B-A11 und B-A12) durch die Zugabe des Rejuvenators im Vergleich zur Referenz B-A10 ohne RA einen geringeren Verformungswiderstand (G^*) und einen größeren Phasenwinkel δ aufweisen. Dies deutet auf eine erfolgreiche, teils sogar überkompensierende Wirkung des Rejuvenators hin, was theoretisch zu einem tendenziell verbesserten Relaxationsvermögen bei tiefen Temperaturen führt. Anhand des Kurvenverlaufs bei hohen Temperaturen (Black-Diagramm) ist außerdem zu erkennen, dass die elastischen Eigenschaften (kleiner Phasenwinkel) bei den RA-Varianten weniger stark ausgeprägt sind als bei der Referenz B-A10. Dies lässt darauf schließen, dass die ursprüngliche Polymermodifizierung des Zugabebitumens B2 in den RA-Varianten infolge des hohen

Asphaltgranulatanteils und der Rejuvenierung ihre strukturelle Ausprägung teilweise verliert oder sich die Polymer-Bitumen-Rejuvenator-Wechselwirkungen im Gesamtsystem verändern.

AC 8 D SP (Mischgutvarianten A2, mit Rejuvenator)

Im Temperaturbereich -15 °C bis 10 °C konnte die Gleichheit der G^* -Werte für alle A2-Varianten statistisch bestätigt werden. Bei den Phasenwinkeln δ wurde die Nullhypothese abgelehnt, wobei der paarweise Vergleich Gleichheit zwischen B-A21 und B-A22 (Asphaltgranulatvarianten) auswies. Zwischen 20 °C bis 30 °C zeigten die G^* -Werte Gleichheit zwischen B-A21 und B-A22, während δ über alle drei Varianten hinweg als gleich eingestuft wurde.

Bei 50 °C konnte die Nullhypothese für beide Kennwerte über alle Varianten hinweg beibehalten werden. Im Bereich von 60 °C bis 80 °C zeigte sich für G^* Gleichheit zwischen allen Varianten, für δ jedoch nur zwischen den Asphaltgranulatvarianten B-A21 und B-A22.

In der Auswertung lässt sich festhalten, dass B-A21 und B-A22 über den gesamten Bereich nahezu identisch reagieren, während die Referenz B-A20 (ohne RA) bei tiefen Temperaturen einen höheren Komplexen Schubmodul und einen kleineren Phasenwinkel aufweist. Auch hier bestätigt sich die Tendenz, dass durch die Wirkung des Rejuvenators die rheologischen Eigenschaften im Kältebereich in Richtung eines viskoser (weicher) Verhaltens verschoben wurde. Bei hohen Temperaturen hingegen zeigt die Referenz B-A20 durch kleinere Phasenwinkel ein deutlich stärkeres elastisches Verhalten, was auf eine ausgeprägtere Wirkung der Polymere im Vergleich zu den RA-Varianten hindeutet.

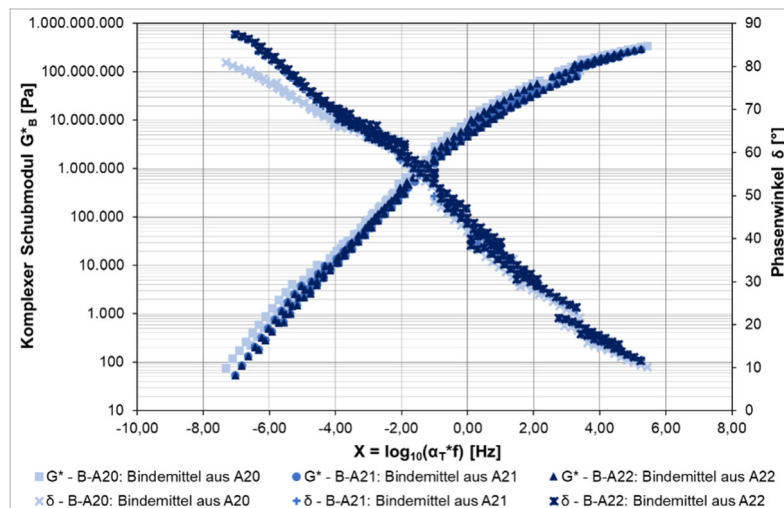


Abbildung 68: Masterkurve des Komplexen Schubmoduls G^* und des Phasenwinkels δ der zurückgewonnenen Bindemittel für die A2-Mischgutvarianten (AC 8 D SP)

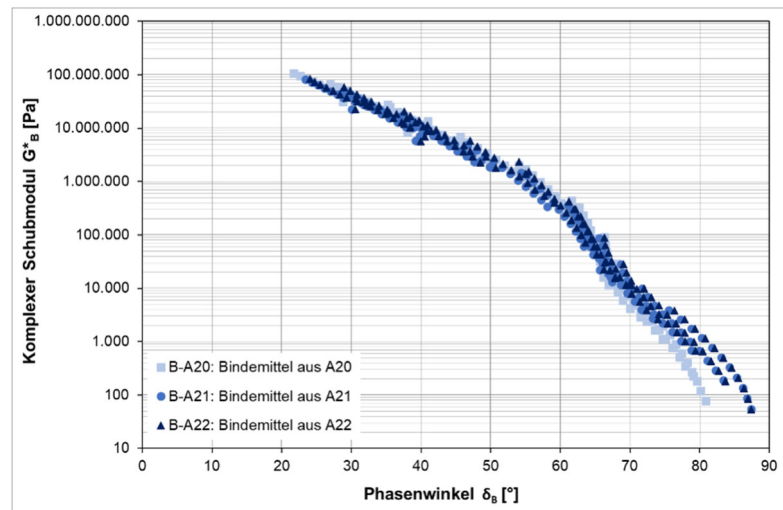


Abbildung 69: Black-Diagramm der zurückgewonnenen Bindemittel für die A2-Mischgutvarianten (AC 8 D SP)

Tabelle 58: Mittelwerte (obere Zeile) und Standardabweichungen (untere Zeile) des komplexen Schubmoduls G^* und Phasenwinkels δ der zurückgewonnenen Bindemittel für die A2-Mischgutvarianten (AC 8 D SP) für die geprüften Temperaturen T und ausgewählten Frequenzen f

T [°C]	f [Hz]	Variante des zurückgewonnenen Bindemittels					
		B-A20		B-A21		B-A22	
		G^* [kPa]	δ [°]	G^* [kPa]	δ [°]	G^* [kPa]	δ [°]
-15	1,0	250.441	13,3	205.555	15,2	212.995	15,3
		6.335,2	0,02	2.943,9	0,03	4.864,7	0,27
	10,0	333.755	10,1	285.930	11,9	296.493	11,6
		7.589,7	0,14	4.259,7	0,04	5.129,4	0,29
-10	1,0	169.237	17,1	132.569	19,1	136.989	19,2
		3.203,6	0,01	1.848,8	0,07	3.657,2	0,28
	10,0	247.981	13,3	203.749	15,2	211.314	15,5
		5.097,6	0,01	2.980,1	0,07	3.917,7	0,28
0	1,0	57.624,1	26,4	42.557,8	28,0	43.083,5	28,4
		498,91	0,16	566,07	0,04	1.417,82	0,35
	10,0	105.577,1	21,7	81.591,6	23,4	83.361,2	24,1
		1.322,83	0,04	1.271,99	0,05	1.972,23	0,33
10	1,0	21.163,6	34,2	15.381,9	35,4	15.410,1	36,0
		128,69	0,23	196,01	0,04	647,66	0,41
	10,0	46.683,9	28,9	35.152,2	30,3	35.631,3	30,6
		414,27	0,11	506,26	0,07	1.122,62	0,35
20	1,0	6.360,9	43,4	4.700,6	44,1	4.601,3	44,9
		14,45	0,30	76,59	0,01	274,57	0,57
	10,0	17.260,7	37,4	13.042,0	38,7	12.999,5	39,2
		8,92	0,48	226,35	0,04	559,10	0,18

T [°C]	f [Hz]	Variante des zurückgewonnenen Bindemittels					
		B-A20		B-A21		B-A22	
		G* [kPa]	δ [°]	G* [kPa]	δ [°]	G* [kPa]	δ [°]
30	1,0	1.996,28	52,0	1.389,67	52,8	1.630,83	52,9
		43,888	0,35	122,508	0,21	89,987	0,27
	10,0	6.878,57	45,7	4.928,79	46,7	5.794,38	47,1
		84,770	0,45	402,040	0,47	289,003	0,13
40	1,0	396,130	60,1	299,968	59,8	351,400	60,0
		15,5764	0,26	26,4618	0,20	17,5772	0,30
	10,0	1.721,42	55,0	1.300,27	55,2	1.532,26	55,4
		54,120	0,21	105,439	0,21	66,849	0,25
50	1,0	87,236	64,7	71,814	64,5	83,176	64,7
		4,9378	0,25	5,9342	0,07	3,6180	0,21
	10,0	443,302	61,6	360,034	61,1	419,913	61,2
		20,7988	0,30	27,8130	0,28	16,4564	0,23
60	1,0	16,678	67,3	16,184	68,0	16,169	68,6
		0,6341	0,07	0,1492	0,09	0,4940	0,19
	10,0	91,048	66,3	88,044	65,6	89,070	66,3
		3,2885	0,29	0,6190	0,36	2,2768	0,17
70	1,0	4,972	70,5	4,712	72,3	4,690	73,0
		0,1639	0,13	0,0370	0,15	0,1151	0,25
	10,0	28,538	68,1	27,850	68,7	28,143	69,1
		0,8745	0,33	0,1844	0,08	0,5776	0,54
80	1,0	1,655	74,1	1,504	77,3	1,470	77,9
		0,0419	0,16	0,0423	0,29	0,0732	0,36
	10,0	10,327	70,1	9,910	71,7	9,864	72,0
		0,2395	0,27	0,2299	0,04	0,4224	0,11
90	1,0	0,604	77,4	0,504	83,1	0,494	83,4
		0,0210	0,15	0,0012	0,18	0,0213	0,24
	10,0	4,122	72,9	3,849	75,6	3,819	76,4
		0,1288	0,19	0,0119	0,16	0,1294	0,06

AC 16 B S SG (Mischgutvarianten A3, ohne Rejuvenator)

Bei den Asphaltbinderschichtvarianten, die ohne Rejuvenator hergestellt wurden, konnte die Gleichheit von G^* im Bereich von -15 °C bis 20 °C bestätigt werden. Bei den Phasenwinkeln δ wurde die Nullhypothese abgelehnt. Hier zeigte der paarweise Vergleich Gleichheit zwischen B-A30 (ohne RA) und B-A31 (mit RA konventioneller Aufbereitung). Im Bereich von 30 °C bis 50 °C blieben die G^* - und δ -Werte für B-A30 und B-A31 gleich. Ab 60 °C bis 90 °C wurden für alle Varianten signifikante Unterschiede von G^* und δ ermittelt.

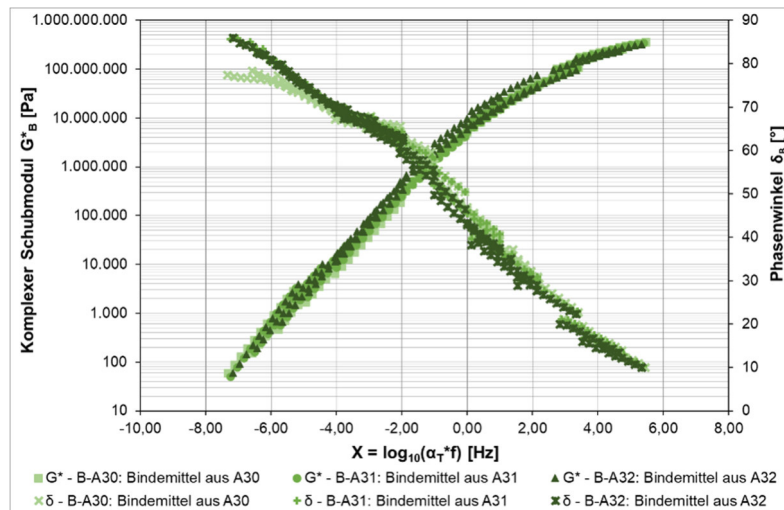


Abbildung 70: Masterkurve des Komplexen Schubmoduls G^* und des Phasenwinkels δ der zurückgewonnenen Bindemittel für die A3-Mischgutvarianten (AC 16 B S SG)

Tabelle 59: Mittelwerte (obere Zeile) und Standardabweichungen (untere Zeile) des komplexen Schubmoduls G^* und Phasenwinkels δ der zurückgewonnenen Bindemittel für die A3-Mischgutvarianten (AC 16 B S SG) für die geprüften Temperaturen T und ausgewählten Frequenzen f

T [°C]	f [Hz]	Variante des zurückgewonnenen Bindemittels					
		B-A30		B-A31		B-A32	
		G^* [kPa]	δ [°]	G^* [kPa]	δ [°]	G^* [kPa]	δ [°]
-15	1,0	259.774,4	14,0	248.412,6	14,3	234.582,8	13,3
		27.137,43	0,16	20.323,86	0,08	8.901,28	0,04
	10,0	358.803,9	10,0	345.314,03	10,4	316.410,6	9,9
		40.462,05	0,09	29.609,48	0,06	13.130,43	0,10
-10	1,0	171.941	18,3	164.036	18,5	156.430	17,4
		15.936,7	0,16	13.629,1	0,02	6.647,8	0,07
	10,0	257.640	13,9	247.638	14,0	230.773	13,4
		25.529,2	0,11	20.602,2	0,11	9.522,8	0,13
0	1,0	56.933,3	28,2	55.301,0	27,7	51.893,5	26,8
		5.459,32	0,21	4.898,85	0,07	1.178,89	0,11
	10,0	108.557	22,7	104.506	22,9	96.174,3	22,3
		10.934,7	0,06	8.930,1	0,04	2.402,31	0,04
10	1,0	18.926,9	36,8	18.711,3	36,0	19.016,7	34,4
		1.559,13	0,35	1.661,18	0,11	490,23	0,13
	10,0	44.625,9	30,6	43.250,2	30,2	42.330,2	29,0
		3.981,7	0,33	3.699,6	0,08	1.164,7	0,11
20	1,0	5.154,77	46,3	5.227,66	45,5	5.856,36	43,3
		390,060	0,49	406,446	0,08	233,685	0,01
	10,0	13.769,3	39,7	15.109,8	39,0	15.934,8	37,5
		844,79	0,38	1.168,07	0,0	606,85	0,25

T [°C]	f [Hz]	Variante des zurückgewonnenen Bindemittels					
		B-A30		B-A31		B-A32	
		G* [kPa]	δ [°]	G* [kPa]	δ [°]	G* [kPa]	δ [°]
30	1,0	1.241,56	56,4	1.166,49	55,5	2.084,11	53,0
		88,608	0,21	20,977	0,68	146,84	0,12
	10,0	4.620,53	50,4	4.185,32	50,5	7.391,07	46,4
		350,882	0,04	149,527	2,07	517,811	0,23
40	1,0	234,115	63,1	236,916	62,1	431,171	60,8
		19,7237	0,21	6,5179	0,23	34,1844	0,06
	10,0	1.070,01	59,6	1.037,71	58,5	1.911,32	55,5
		94,960	0,11	0,755	0,54	150,007	0,40
50	1,0	52,060	66,3	54,841	66,3	94,246	65,4
		3,8901	0,11	4,5983	0,11	7,4123	0,06
	10,0	272,162	64,5	282,331	63,5	486,897	62,3
		23,0093	0,02	18,3535	0,24	38,1334	0,04
60	1,0	10,270	68,4	13,556	69,3	16,644	69,0
		0,7189	0,15	0,3070	0,05	0,2892	0,01
	10,0	56,108	67,8	74,655	67,7	96,649	66,8
		3,7124	0,03	1,5696	0,06	1,4157	0,01
70	1,0	3,199	72,0	4,004	73,6	4,687	73,2
		0,1825	0,17	0,0699	0,03	0,0859	0,04
	10,0	18,650	69,4	23,972	69,7	28,346	69,4
		0,9677	1,06	0,4011	0,04	0,5062	0,18
80	1,0	1,103	74,9	1,283	78,0	1,504	77,4
		0,0455	0,03	0,0182	0,08	0,0178	0,00
	10,0	7,017	70,8	8,554	72,5	10,020	72,0
		0,2699	0,25	0,0915	0,03	0,1123	0,11
90	1,0	0,419	76,4	0,435	83,4	0,516	81,9
		0,0105	0,10	0,0041	0,25	0,0119	0,08
	10,0	2,859	73,7	3,286	76,4	3,848	75,6
		0,0620	0,21	0,0296	0,30	0,0899	0,10

Zusammenfassend zeigen die statistischen Analysen, dass für die resultierenden rückgewonnenen Bindemittel der Varianten mit Asphaltgranulat (B-A31 und B-A32) im gesamten untersuchten Temperaturbereich sowohl für G^* als auch für δ Unterschiede vorhanden sind. Es besteht die Reihung $B-A32 > B-A31 > B-A30$ für den Komplexen Schubmodul G^* und $B-A30 < B-A32 < B-A31$ für den Phasenwinkel δ . Da das mechanische Aufbereitungsverfahren die chemische Beschaffenheit des Bindemittels nicht verändert, wird die rheologische Verhärtung der Variante B-A32 bei Temperaturen über 30 °C auf die Wechselwirkung zwischen Bindemittel aus dem RA und Zugabebitumen zurückzuführen sein.

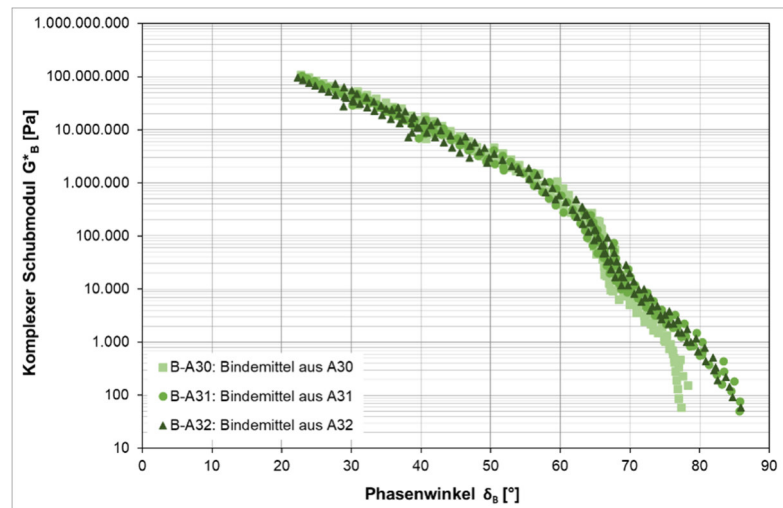


Abbildung 71: Black-Diagramm der zurückgewonnenen Bindemittel für die A3-Mischgutvarianten (AC 16 B S SG)

AC 22 T S (Mischgutvarianten A4, ohne Rejuvenator)

Die statistische Analyse der Tragschichtvarianten (ohne Rejuvenator) liefert ein komplexes Bild. Im Bereich von -15 °C bis 10 °C konnte Gleichheit von G^* zwischen B-A41 und B-A42.1 (beide mit RA) bestätigt werden, während δ bei B-A42.1 signifikant größer war. Zwischen 20 °C bis 50 °C verhielten sich die beiden RA-Varianten rheologisch gleich.

Ab 60 °C divergierten die Werte erneut. B-A41 zeigte hier eine höhere Steifigkeit (G^*) und einen kleineren Phasenwinkel als B-A42.1. Ursächlich hierfür ist vermutlich der um 0,35 M.-% geringere Anteil an Zugabebitumen (70/100) in der Rezeptur von A41.

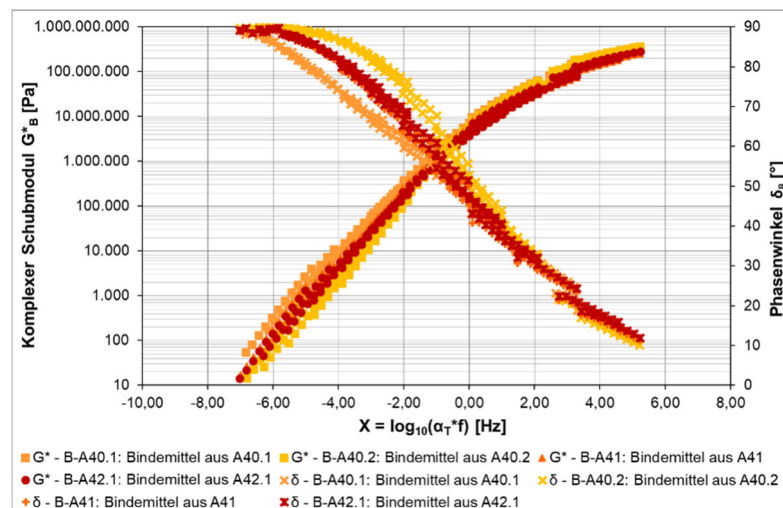


Abbildung 72: Masterkurve des Komplexen Schubmoduls G^* und des Phasenwinkels δ der zurückgewonnenen Bindemittel für die A4-Mischgutvarianten (AC 22 T S)

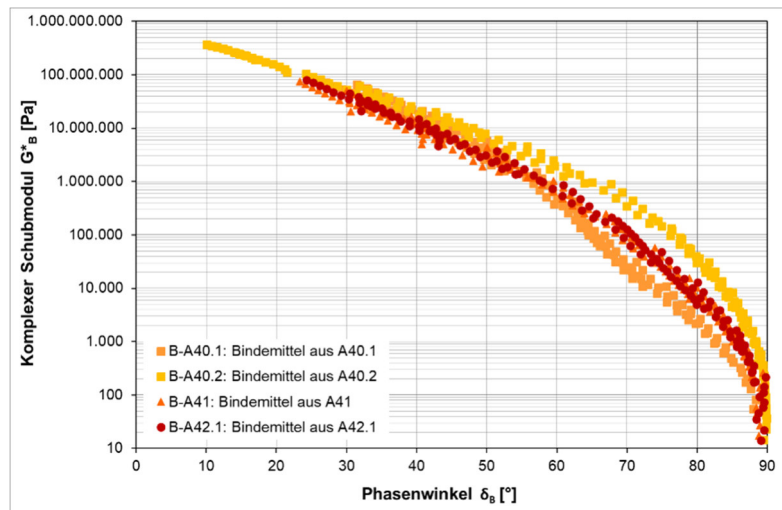


Abbildung 73: Black-Diagramm der zurückgewonnenen Bindemittel für die A4-Mischgutvarianten (AC 22 T S)

Auffällig ist der Vergleich der Varianten ohne Asphaltgranulat. Das Bindemittel der Variante B-A40.1 (30/45) verhält sich bei sehr tiefen Temperaturen (-15 °C und -10 °C) rheologisch „weicher“ (kleineres G^* , größeres δ) als das Bindemittel der Variante B-A40.2 (aus 50/70). Dieses Ergebnis bestätigt die bereits im frischen Zustand der Bitumen mittels BBR festgestellte Tendenz, bei der das 30/45 (B4) mit einem $T(S=300)$ von -18,0 °C einen leicht günstigeren Kennwert aufwies als das 50/70 (B6) mit -17,6 °C. Dies verdeutlicht, dass das Tieftemperaturverhalten überwiegend durch die spezifische Bindemittelcharakteristik und weniger durch die rein konventionelle Sorteneinteilung (EP RuK, Nadelpenetration und $T(G^* = 15 \text{ kPa})$) bestimmt wird. Erst im Bereich über 50 °C stellt sich die erwartete Reihung entsprechend der Bindemittelhärte ein.

Tabelle 60: Mittelwerte (obere Zeile) und Standardabweichungen (untere Zeile) des komplexen Schubmoduls G^* und Phasenwinkels δ der zurückgewonnenen Bindemittel für die A4-Mischgutvarianten (AC 22 T S) für die geprüften Temperaturen T und ausgewählten Frequenzen f

T [°C]	f [Hz]	Variante des zurückgewonnenen Bindemittels							
		B-A40.1		B-A40.2		B-A41		B-A42.1	
		G^* [kPa]	δ [°]	G^* [kPa]	δ [°]	G^* [kPa]	δ [°]	G^* [kPa]	δ [°]
-15	1,0	233.570	15,5	266.017	14,0	185.816	15,2	202.713	16,1
		5.191,2	0,08	9.836,2	0,04	14.474,0	0,22	8.682,4	0,08
	10,0	325.562	11,2	365.801	10,0	252.371	11,3	283.027	11,9
		5.732,6	0,30	12.966,7	0,16	22.217,6	0,37	11.831,2	0,14
-10	1,0	148.643	20,0	175.366	18,4	116.821	19,1	128.168	19,9
		927,3	0,21	7.230,0	0,22	9.297,3	0,08	5.772,9	0,06
	10,0	230.536,6	14,9	260.473,4	14,1	179.417,2	14,8	201.023,7	15,9
		3.133,6	0,14	9.091,0	0,23	14.541,4	0,20	8.257,9	0,12

T [°C]	f [Hz]	Variante des zurückgewonnenen Bindemittels							
		B-A40.1		B-A40.2		B-A41		B-42.1	
		G* [kPa]	δ [°]	G* [kPa]	δ [°]	G* [kPa]	δ [°]	G* [kPa]	δ [°]
0	1,0	45.406,1	30,6	52.522,7	30,0	39.099,0	28,0	40.799,9	29,2
		530,75	0,38	2.595,06	0,18	2.743,07	0,12	1.730,26	0,13
	10,0	91.890,2	24,7	103.959	24,3	74.908,3	23,3	80.531,9	24,3
		219,50	0,11	4.715,1	0,06	5.650,65	0,17	3.375,33	0,01
10	1,0	15.127,7	38,8	16.700,3	40,4	13.704,7	35,9	13.588,6	37,7
		296,78	0,41	992,97	0,23	774,43	0,35	568,73	0,14
	10,0	37.497,3	32,9	42.033,6	32,9	31.680,7	30,4	32.701,4	32,1
		360,29	0,37	2.213,36	0,13	2.020,23	0,51	1.299,83	0,15
20	1,0	4.302,5	47,1	3.973,0	52,9	3.946,6	45,2	3.724,5	47,6
		143,65	0,47	263,13	0,23	138,27	0,86	117,17	0,07
	10,0	13.144,1	41,2	13.439,9	44,0	11.314,3	39,0	11.296,7	40,6
		296,07	0,49	790,43	0,26	625,71	0,52	373,71	0,18
30	1,0	1.598,54	54,8	968,412	65,0	1.172,97	56,7	983,042	58,0
		102,101	0,16	45,8442	0,25	79,512	0,66	104,698	0,10
	10,0	5.822,18	50,0	4.522,01	55,8	4.359,08	50,1	3.754,15	51,5
		408,986	0,06	177,395	0,03	211,723	0,17	369,683	0,21
40	1,0	350,526	60,8	144,730	74,9	219,689	65,5	177,345	66,9
		22,1324	0,06	5,0666	0,10	21,3455	0,84	18,1142	0,11
	10,0	1.505,41	57,1	896,129	67,7	1.032,81	59,6	856,548	60,9
		98,609	0,16	29,7325	0,45	70,401	0,50	77,7478	0,35
50	1,0	85,502	66,2	24,182	81,4	43,370	73,2	35,514	74,2
		4,9996	0,18	0,6699	0,04	5,4422	0,86	3,7599	0,06
	10,0	422,941	62,2	182,646	74,4	250,212	67,0	209,884	67,8
		24,8566	0,06	4,7720	0,11	23,8111	0,81	19,0345	0,28
60	1,0	17,145	71,6	3,632	86,0	8,295	79,5	6,694	80,4
		0,6785	0,14	0,0030	0,07	0,0321	0,18	0,0257	0,01
	10,0	96,528	66,8	31,040	81,7	57,116	74,0	47,513	74,9
		3,5087	0,16	0,0119	0,04	0,4178	0,32	0,1715	0,34
70	1,0	4,836	77,1	0,894	88,3	1,958	84,1	1,581	84,7
		0,1766	0,10	0,022	0,02	0,012	0,10	0,017	0,01
	10,0	31,087	71,3	8,258	85,0	15,498	78,9	12,791	80,0
		1,0565	0,04	0,0124	0,40	0,0335	0,46	0,0294	0,03
80	1,0	1,475	81,5	0,262	89,4	0,539	86,7	0,444	87,4
		0,0407	0,04	0,0010	0,01	0,0036	0,13	0,0037	0,46
	10,0	10,813	75,6	2,521	87,2	4,702	82,6	3,864	83,2
		0,2827	0,03	0,0073	0,01	0,0311	0,02	0,0121	0,10

T [°C]	f [Hz]	Variante des zurückgewonnenen Bindemittels							
		B-A40.1		B-A40.2		B-A41		B-42.1	
		G* [kPa]	δ [°]	G* [kPa]	δ [°]	G* [kPa]	δ [°]	G* [kPa]	δ [°]
90	1,0	0,491	84,8	0,091	89,7	0,171	89,7	0,142	89,5
		0,0095	0,01	0,0004	0,08	0,0044	0,00	0,0103	0,52
	10,0	4,021	79,1	0,909	88,4	1,606	85,6	1,324	86,1
		0,0623	0,21	0,0039	0,21	0,0084	0,13	0,0073	0,06

Zusammenfassende Bewertung der rheologischen Charakterisierung

Zusammenfassend belegen die statistischen Analysen der Masterkurven von G^* und δ , dass eine rein rechnerische Auslegung des Bindemittel-Mix-Designs auf Basis eines Einzelkennwertes (zukünftig T(G = 15 kPa, bisher EP RuK) nicht ausreicht, um eine rheologische Gleichwertigkeit über das gesamte Gebrauchstemperatur- und Frequenzspektrum zu gewährleisten. Besonders die signifikanten Abweichungen zwischen den Referenzbindemitteln B-A10, B-A20 und B-A30 – trotz identischem Ausgangsbitumen (B1f) – verdeutlichen, dass das viskoelastische Endprodukt im Asphaltmischgut massiv durch verfahrenstechnische Einflüsse geprägt wird.

Diese Diskrepanzen könnten einerseits auf die methodische Unzulänglichkeit der aktuell in Deutschland angewandten linearen Mischregeln (TL Asphalt-StB) hindeuten, die komplexen Interaktionen wie die tatsächliche Vermischung zwischen dem Zugabebitumen und dem Bindemittel des Asphaltgranulats sowie die rheologische Wirksamkeit von Rejuvenatoren nur unzureichend erfassen (74). Andererseits könnten sie sich auf den im Projektverlauf notwendigen Wechsel des Lösungsmittels (Tetrachlorethen für A1 und A2-Varianten vs. Toluol für A3- und A4-Varianten) und die damit verbundene selektive Adsorption polarer Bindemittelkomponenten zurückführen lassen.

4.1.3.3 Ermüdungsverhalten

Ergänzend zur rheologischen Charakterisierung wurde das Ermüdungsverhalten der zurückgewonnenen Bindemittel im DSR untersucht. Die methodische Durchführung ist in Abschnitt 3.2.3.2 beschrieben.

Für die statistische Bewertung der Einflüsse des Bindemitteldesigns wurden die Ermüdungsfunktionen in lineare Funktionen der Form $\log_{10}(N_{\max}) = a' + b' \cdot \log_{10}(\gamma_{anf})$ überführt. Um die statistische Gleichheit ($\alpha = 5\%$) der Regressionsparameter a' (Achsenabschnitt) und b' (Steigung) zu prüfen wurden globale F-Tests sowie paarweise Vergleiche durchgeführt (siehe Abschnitt 3.4.2).

SMA 11 S (Mischgutvarianten A1, mit Rejuvenator)

Die Regressionsparameter der linearisierten Ermüdungsfunktionen für die SMA-Varianten sind in Tabelle 61 zusammengefasst und die Ermüdungsfunktionen sind in Abbildung 74 dargestellt.

Tabelle 61: Regressionsparameter der linearisierten Ermüdungsfunktionen, Bestimmtheitsmaße und Standardabweichungen für die zurückgewonnenen Bindemittel der A1-Mischgutvarianten (SMA 11 S)

	Variante des zurückgewonnenen Bindemittels		
	B-A10	B-A11	B-A12
Regressionsparameter a'	11,9839	12,3958	12,3232
Regressionsparameter b'	-4,6402	-4,4072	-3,7775
Bestimmtheitsmaß R^2	0,972	0,984	0,925
Standardabweichung s^2	0,179	0,148	0,337

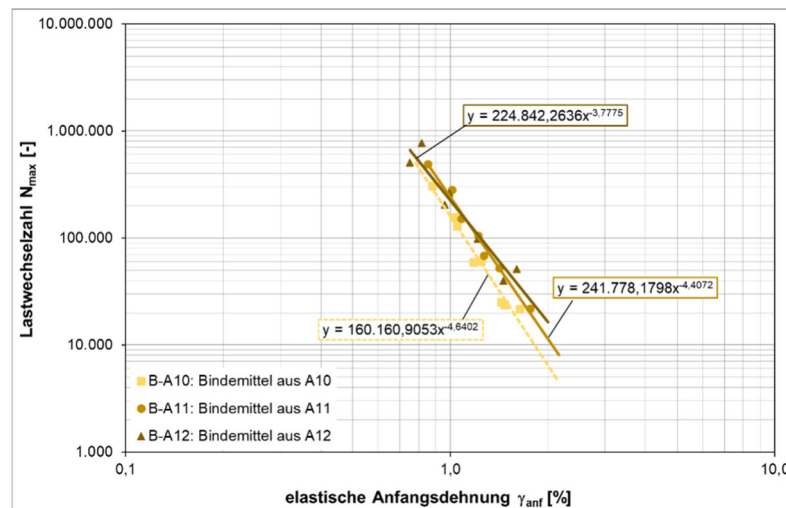


Abbildung 74: Ermüdungsfunktionen der zurückgewonnenen Bindemittel für die A1-Mischgutvarianten (SMA 11 S)

Der statistische Vergleich der Steigungen (b') ergab keine signifikanten Unterschiede zwischen den drei Varianten. Bei der Prüfung der Achsenabschnitte (a') musste die Nullhypothese der Gleichheit jedoch verworfen werden. Die paarweisen Vergleiche zeigten signifikante Unterschiede zwischen der Variante ohne RA (B-A10) und den RA-Varianten (B-A11/B-A12). Zwischen den beiden RA-Varianten (konventionelle Aufbereitung vs. RSB-Aufbereitung) konnte hingegen statistische Gleichheit sowohl für die Steigung als auch für den Achsenabschnitt festgestellt werden.

AC 8 D SP (Mischgutvarianten A2, mit Rejuvenator)

Die statistische Auswertung der AC 8 D SP-Varianten (Tabelle 62, Abbildung 75) lieferte zu den SMA-Varianten ähnliche Ergebnisse. Während die Steigungen der Funktionen als statistisch gleich eingestuft wurden, unterschieden sich die Achsenabschnitte im globalen F-Test

signifikant. Zwischen den beiden Bindemitteln mit Asphaltgranulat (B-A21 und B-A22) konnte kein statistisch signifikanter Unterschied im Ermüdungsverhalten nachgewiesen werden. Dennoch verdeutlicht der Vergleich mit der Referenzvariante, dass das Bindemittel B-A20 (ohne RA) ein signifikant höheres Niveau des Ermüdungswiderstandes aufweist.

Tabelle 62: Regressionsparameter der linearisierten Ermüdungsfunktionen, Bestimmtheitsmaße und Standardabweichungen für die zurückgewonnenen Bindemittel der A2-Mischgutvarianten (AC 8 D SP)

	Variante des zurückgewonnenen Bindemittels		
	B-A20	B-A21	B-A22
Regressionsparameter a'	12,5101	12,0222	12,1457
Regressionsparameter b'	-4,4333	-4,6754	-4,7240
Bestimmtheitsmaß R^2	0,916	0,973	0,951
Standardabweichung s^2	0,255	0,207	0,260

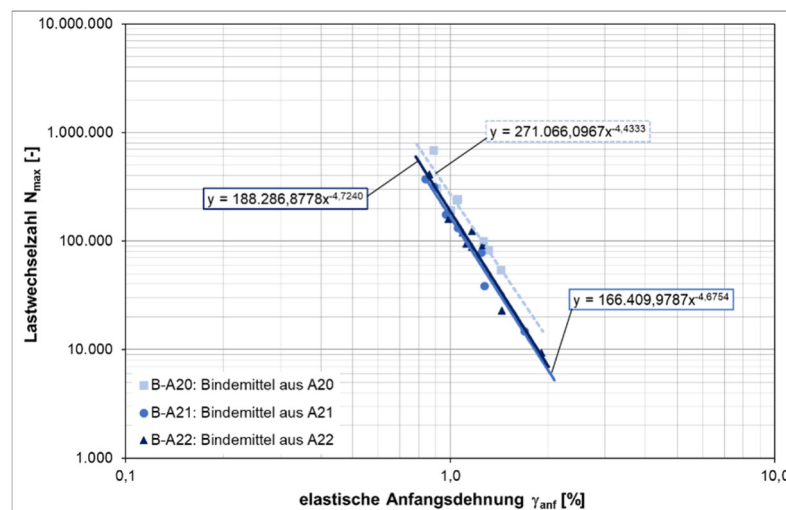


Abbildung 75: Ermüdungsfunktionen der zurückgewonnenen Bindemittel für die A2-Mischgutvarianten (AC 8 D SP)

AC 16 B S SG (Mischgutvarianten A3, ohne Rejuvenator)

Bei den Asphaltbinderschichtvarianten zeigt sich ein abweichendes statistisches Bild (Tabelle 63 und Abbildung 76).

Hier musste die Gleichheit der Steigungen (b') im globalen Test abgelehnt werden, während die Achsenabschnitte (a') als gleich eingestuft wurden. Der paarweise Vergleich belegte signifikante Unterschiede in der Ermüdungsreaktion zwischen B-A30 (ohne RA) und B-A32 (mit RA, Aufbereitung im RSB). Bemerkenswert ist, dass zwischen den beiden Asphaltgranulatvarianten (B-A31/B-A32) trotz fehlendem Rejuvenator keine signifikanten Unterschiede im Ermüdungsverhalten bestehen.

Tabelle 63: Regressionsparameter der linearisierten Ermüdungsfunktionen, Bestimmtheitsmaße und Standardabweichungen für die zurückgewonnenen Bindemittel der A3-Mischgutvarianten (AC 16 B S SG)

	Variante des zurückgewonnenen Bindemittels		
	B-A30	B-A31	B-A32
Regressionsparameter a'	12,5920	12,4963	12,3479
Regressionsparameter b'	-3,6813	-3,9014	-4,1544
Bestimmtheitsmaß R^2	0,985	0,943	0,964
Standardabweichung s^2	0,168	0,297	0,222

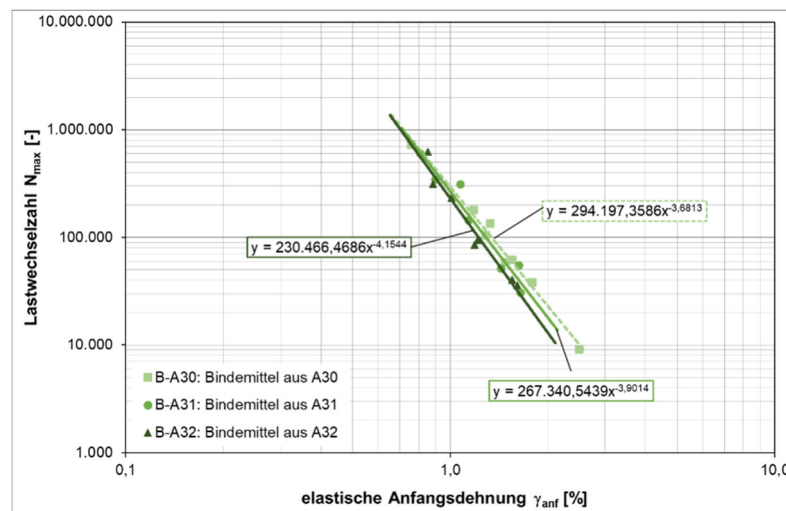


Abbildung 76: Ermüdungsfunktionen der zurückgewonnenen Bindemittel für die A3-Mischgutvarianten (AC 16 B S SG)

AC 22 T S (Mischgutvarianten A4, ohne Rejuvenator)

Bei der Asphalttragschicht konnten die Steigungen aller vier Varianten als gleich angenommen werden (Tabelle 64, Abbildung 77).

Tabelle 64: Regressionsparameter der linearisierten Ermüdungsfunktionen, Bestimmtheitsmaße und Standardabweichungen für die zurückgewonnenen Bindemittel der A4-Mischgutvarianten (AC 22 T S)

	Variante des zurückgewonnenen Bindemittels			
	B-A40.1	B-A40.2	B-A41	B-A42.1
Regressionsparameter a'	12,1362	11,3175	12,0190	12,0479
Regressionsparameter b'	-3,1529	-2,6166	-2,0180	-2,5770
Bestimmtheitsmaß R^2	0,932	0,960	0,911	0,953
Standardabweichung s^2	0,347	0,256	0,261	0,261

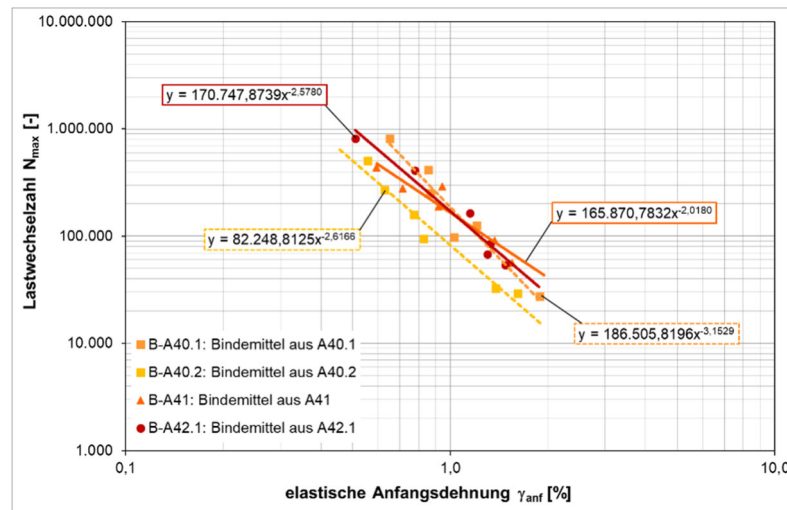


Abbildung 77: Ermüdungsfunktionen der zurückgewonnenen Bindemittel für die A4-Mischgutvarianten (AC 22 T S)

Unterschiede in den Achsenabschnitten ließen sich statistisch nur zwischen den Varianten mit Bitumen 30/45 (B-A40.1, B-A41, B-A42.1) und der weicheren 50/70-Variante (B-A40.2) nachweisen. Zwischen den beiden Asphaltgranulatvarianten (B-A41 und B-A42.1) besteht auch hier rheologische Gleichheit hinsichtlich der Ermüdungsfunktion.

Zusammenfassende Bewertung des Ermüdungsverhaltens

Der Vergleich der Ermüdungsfunktionen mit den rheologischen Kennwerten G^* und δ bei der Prüftemperatur von 20 °C offenbart eine hohe Konsistenz in der Performance-Bewertung, verdeutlicht jedoch auch die unterschiedliche Sensitivität der Prüfparameter gegenüber stofflichen Variationen.

Bei den Asphaltmischgutsorten A1 (SMA 11 S), A2 (AC 8 D SP) und A4 (AC 22 T S) korrespondieren die Vergleiche der Ermüdungsprüfungsergebnisse unmittelbar mit der vorangegangenen rheologischen Charakterisierung (siehe Abschnitt 4.1.3.2). Da zwischen den jeweiligen Asphaltgranulatvarianten (konventionell vs. RSB) bereits bei 20 °C statistische Gleichheit im komplexen Schubmodul G^* sowie im Phasenwinkel δ vorlag, setzt sich diese Parität in den nahezu deckungsgleichen Ermüdungsfunktionen fort. Dies bestätigt, dass das Bindemittel-Design für die Asphalte mit RA unterschiedlicher Aufbereitungsverfahren bei diesen Sorten zu einem rheologisch identischen Endzustand im zurückgewonnenen Bindemittel bei der betrachteten Temperatur führte.

Ein abweichendes Bild zeigt sich bei der Asphaltbinderschicht (A3). Hier wurden bei 20 °C signifikante Unterschiede im rheologischen Profil zwischen B-A31 und B-A32 (RSB-Variante mit kleinerem Phasenwinkel) festgestellt. Trotz dieses erhöhten elastischen Verformungsanteils der RSB-Variante weist die statistische Auswertung der Ermüdungsfunktionen eine Gleichheit der Regressionsparameter aus. Dies lässt darauf schließen, dass die im Bereich der Masterkurven detektierten Unterschiede, welche vermutlich auf die spezifische Interak-

tion zwischen Bindemittel aus RA und Frischbitumen in Abwesenheit eines Rejuvenators zurückzuführen sind, nicht zwangsläufig in eine beschleunigte Schadensakkumulation münden.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die energetische Betrachtung im Ermüdungsversuch (Konzept der Energy Ratio) weniger sensitiv auf geringfügige rheologische Zustandsänderungen zu reagieren scheint als die Masterkurven. Während die Masterkurve von G^* und δ eine Differenzierung der viskoelastischen Eigenschaften erlauben, liefert die Ermüdungsfunktion das kumulative Schädigungsverhalten. Dass die bei der Sorte A3 nachgewiesenen rheologischen Unterschiede bei G^* und δ nicht zu einer statistisch gesicherten Veränderung des Ermüdungswiderstandes führen, unterstreicht, dass Abweichungen bzw. Variationen bei den viskoelastischen Eigenschaften des Bindemittels nicht zwangsläufig die nutzungsdauerrelevante Performance beeinflussen müssen.

4.1.3.4 Grenzen des konventionellen Bindemitteldesigns und Ausblick auf ein erweitertes Prüfkonzzept

Im Einklang mit der Zielsetzung des Forschungsvorhabens (vgl. Abschnitt 1.3) wurde die Eignung rheologischer Kennwerte für ein zukunftsorientiertes Bindemitteldesign untersucht. Während die aktuelle TL Asphalt-StB (71) auf dem Erweichungspunkt Ring und Kugel (EP RuK) basiert, sieht das künftige Regelwerk die Äqui-Schermoduletemperatur $T(G^* = 15 \text{ kPa})$ in Kombination mit dem Phasenwinkel $\delta(G^* = 15 \text{ kPa})$ vor. Die im Projekt gewählte Vorgehensweise, das Bindemitteldesign nach dem künftigen Verfahren durchzuführen und am rückgewonnenen Bindemittel zu verifizieren, ermöglicht eine kritische Analyse der Prognosegüte dieses Modells.

Methodische Begründung der Analytik am extrahierten Bindemittel

Die Entscheidung, die rheologische Charakterisierung im Rahmen des Forschungsvorhabens am extrahierten Bindemittel und nicht an Labormischungen (Zugabebitumen und zurückgewonnenes Bindemittel aus Asphaltgranulat sowie ggf. Rejuvenatoren) durchzuführen, ist für die Performance-Prognose essentiell. Hierfür sprechen vier technisch-wissenschaftliche Gründe:

1. Labor-Mischungen unterstellen eine ideale Homogenisierung. In der Asphaltproduktion findet jedoch oft nur ein Teilmischprozess statt, bei dem das Asphaltgranulatbindemittel das Gestein nur teilweise verlässt. Nur die Extraktion liefert das Bindemittel, welches die Gesteinskörnung im Endprodukt tatsächlich umhüllt (74).
2. Die thermisch-oxidative Belastung während des Mischprozesses im Kontakt mit heißem Gestein lässt sich durch standardisierte Verfahren wie RTFOT nur unzureichend simulieren. Die Extraktion erfasst den tatsächlichen Alterungszustand nach der Interaktion aller Komponenten (75), (76).

3. Polare Bindemittelkomponenten adsorbieren spezifisch an der Gesteinsoberfläche, was die Rheologie des verbleibenden Bindemittels verändert. Dieser Effekt bleibt in reinen Bindemittelmischungen unberücksichtigt (77).
4. Das Design basiert daher auf theoretischen Annahmen. Die stoffliche Analyse des extrahierten „Endprodukts“ ist die einzige Methode, um die Validität dieser rechnerischen Zielwerte im realen Asphaltgefüge zu prüfen.

Statistische Evaluation der Design-Parameter

Der Vergleich der rechnerisch ermittelten Zielwerte mit den am extrahierten Bindemittel bestimmten Kennwerten (Varianten A3/A4 ohne Rejuvenator) zeigt eine signifikante Differenz in der Vorhersagegenauigkeit.

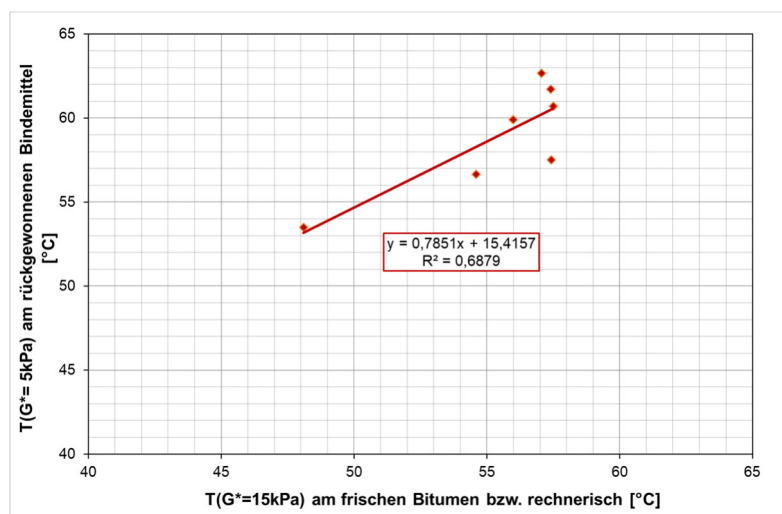


Abbildung 78: Vergleich $T(G^* = 15 \text{ kPa})$, rechnerisch ermittelt und am zurückgewonnenen Bindemittel der Asphaltbinder- und Asphalttragschichtvarianten

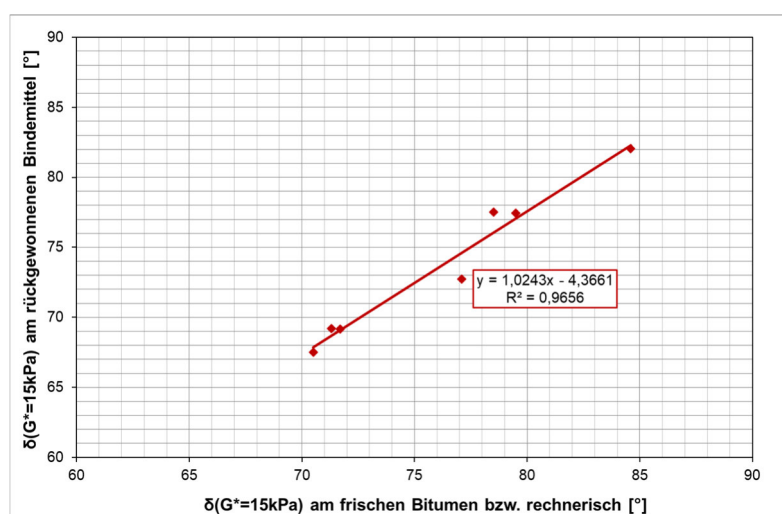


Abbildung 79: Vergleich $\delta(G^* = 15 \text{ kPa})$, rechnerisch ermittelt und am zurückgewonnenen Bindemittel der Asphaltbinder- und Asphalttragschichtvarianten

Die Korrelation für $T(G^* = 15 \text{ kPa})$ weist lediglich ein Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,69$ auf (Abbildung 78). G^* erweist sich somit als hochgradig empfindlich gegenüber verfahrenstechnischen Einflüssen.

Mit $R^2 = 0,97$ (Abbildung 79) zeigt der Phasenwinkel eine wesentlich robustere Korrelation. Dies belegt, dass die viskoelastische Struktur (Phasenbeziehung) weniger stark durch die Rückgewinnung und chemische Artefakte verfälscht wird als das absolute Niveau des komplexen Schubmoduls.

Wissenschaftlich könnte dies damit begründet werden, dass minimale Lösungsmittelrückstände das Volumen des Bindemittels vergrößern und so G^* senken (78), während die Phasenverschiebung δ verhältnismäßig stabil zu bleiben scheint.

Bewertung der Performance-Kennwerte

Die Auswertungen (Abschnitt 4.1.3) belegt, dass eine „Ein-Punkt-Betrachtung“ (wie z.B. $T(G^* = 15 \text{ kPa})$) nicht ausreicht, um das Gebrauchsverhalten über den gesamten Temperaturbereich zu prognostizieren.

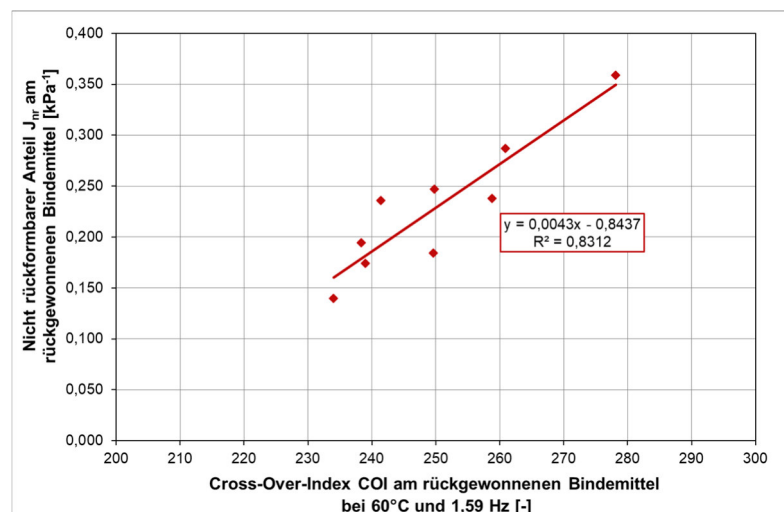


Abbildung 80: Nicht rückformbare Anteile J_{nr} bei 60 °C in Abhängigkeit vom Cross-Over-Index bei 60 °C und 1,59 Hz der zurückgewonnenen Bindemittel

Die signifikantesten Korrelationen zum Verformungswiderstand (MSCR-Test: J_{nr} und R_N) lieferte der Cross-Over-Index (COI). Ein niedriger COI indiziert ein elastisch dominiertes Verhalten, was direkt mit geringeren plastischen Verformungen korreliert (Abbildung 80 und Abbildung 81). Die rechnerische Vorhersagbarkeit des COI ist mit $R^2 = 0,99$ (Abbildung 82) nahezu verlustfrei. Dies könnte den COI als den präzisesten Parameter für die Auslegung bei hohen Temperaturen qualifizieren.

Anhand der Masterkurven (Abschnitt 4.1.3.2) lässt sich feststellen, dass kleine G^* -Werte und hohe δ -Werte bei tiefen Temperaturen essentiell für den Risswiderstand sind. Die Korrelation zwischen DSR (4 mm) und BBR-Kennwerten (S und m-Wert) wird in der Forschung als valide eingestuft (79), (80).

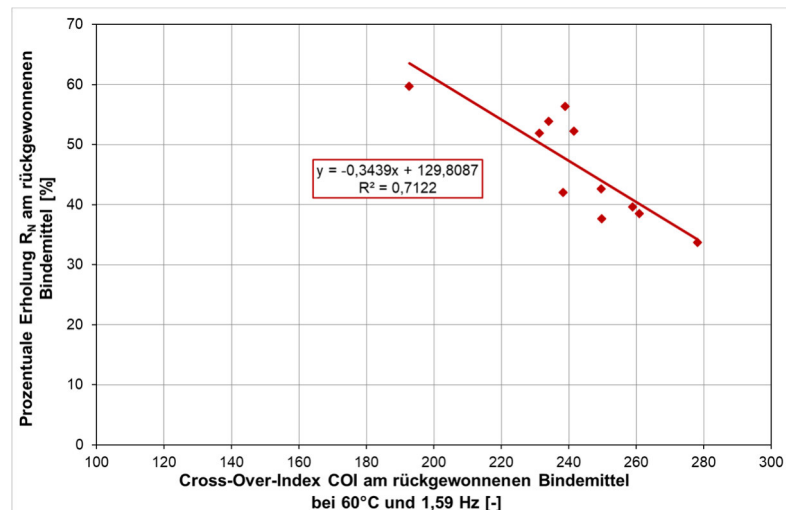


Abbildung 81: Prozentuale Erholungen R_N bei 60 °C in Abhängigkeit vom Cross-Over-Index bei 60 °C und 1,59 Hz der zurückgewonnenen Bindemittel

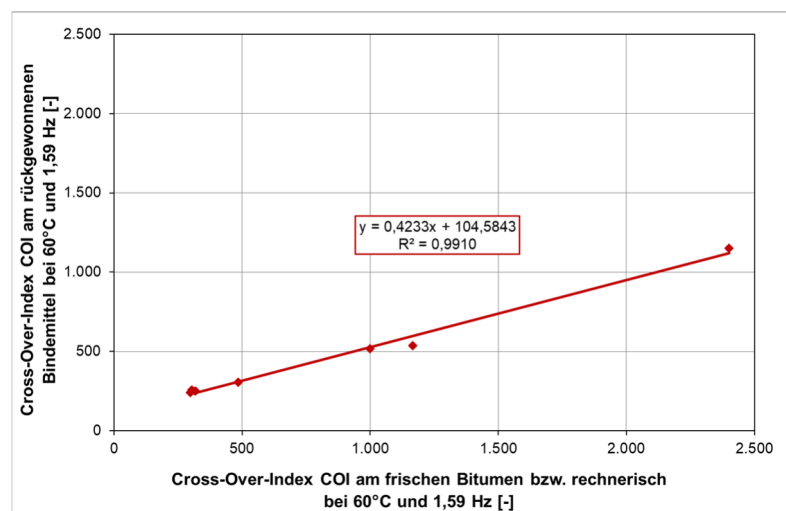


Abbildung 82: Vergleich Cross-Over-Index bei 60 °C und 1,59 Hz des resultierenden Bindemittels, rechnerisch ermittelt und am zurückgewonnenen Bindemittel der Asphaltbinder- und Asphalttragschichtvarianten

Anhand der Masterkurven (Abschnitt 4.1.3.2) lässt sich feststellen, dass kleine G^* -Werte und hohe δ -Werte bei tiefen Temperaturen essentiell für den Risswiderstand sind. Die Korrelation zwischen DSR (4 mm) und BBR-Kennwerten (S und m-Wert) wird in der Forschung als valide eingestuft (79), (80).

Die Ergebnisse zu den Varianten A40.1 (30/45) und A40.2 (50/70) bestätigen, dass eine höhere Grundviskosität (höhere G^* -Werte) bei 20 °C die Ermüdungsbeständigkeit steigert (Abbildung 77). Dies deckt sich mit den Erkenntnissen von Dragon (51), wonach die Steifigkeitsreserve einen maßgeblichen Einfluss auf die Lastwechselzahlen bis zum Bruch hat. Beide Bindemittel weisen bei 20 °C und 10 Hz nahezu identische Verlustmoduln G'' ($G^* \cdot \sin\delta$) auf (13.700 Pa vs. 13.500 Pa). G'' ist allgemein als „Ermüdungsindikator“ bekannt (15). Diese Beobachtungen belegen, dass G'' als LVE-Parameter das nichtlineare Schädigungsverhalten bei

höheren Amplituden nicht erfassen kann – ein Ergebnis, der die Kritik am klassischen Superpave-Ansatz für modifizierte und RA-haltige Bindemittel stützt (81). Für die Ermüdungsbeständigkeit scheint das absolute Steifigkeitsniveau (G^*) bei stabilen Phasenwinkel maßgebender als die reine viskose Energiedissipation.

Zusammenfassung

Die vorliegenden Ergebnisse verdeutlichen, dass ein zukunftsorientiertes Bindemitteldesign, insbesondere unter Berücksichtigung hoher Asphaltgranulatanteile, nicht auf isolierten Ein-Punkt-Anforderungen (z.B. $T(G^* = 15 \text{ kPa})$) beruhen darf. Zwar könnte sich die Auslegung über den Cross-Over-Index (COI) sowie die Analyse vollständiger Masterkurven als zielführende Ansätze erweisen, um die Stabilität des Tieftemperaturverhaltens (79) und das Ermüdungspotenzial über das gesamte viskoelastische Spektrum abzusichern, jedoch resultiert hieraus ein erheblicher Forschungsbedarf.

In Anbetracht der stofflichen Diversität moderner Bindemittelsysteme – bedingt durch unterschiedliche Polymermodifikationen, viskositätsverändernde Zusätze oder den Einsatz chemisch variierender Rejuvenatoren – muss die Übertragbarkeit der hier festgestellten rheologischen Abhängigkeiten in weiterführenden Forschungsarbeiten validiert werden. Da Modifizierungen die Netzwerkstruktur des Bitumens auf unterschiedliche Weise beeinflussen (z.B. durch Ausbildung von Polymergerüsten oder Veränderung der kolloidalen Stabilität), ist ein Ein-Punkt-Design für diese komplexen Interaktionen unzureichend. Die Etablierung eines ganzheitlichen, performance-basierten Designkonzepts bleibt somit eine zentrale wissenschaftliche Aufgabe, um die viskoelastischen Wechselwirkungen modifizierter Bindemittel für Asphalt über den gesamten Gebrauchstemperaturbereich sicher zu erfassen.

4.1.4 Performance des Asphaltmörtels

4.1.4.1 Rheologische Charakterisierung mittels Masterkurven

Zur Beurteilung der viskoelastischen Eigenschaften des Asphaltmörtels wurden Masterkurven des komplexen Schubmoduls G^* und des Phasenwinkels δ ermittelt. Die Tabelle 65 bis Tabelle 68 fassen die Mittelwerte und Standardabweichungen für die Frequenzen 1,0 Hz und 10,0 Hz zusammen, die deckungsgleich mit den Prüfbedingungen auf Bindemittel- und Asphaltebene gewählt wurden. Die grafische Darstellung erfolgt in den Masterkurven ($T_0 = 20 \text{ °C}$) sowie den Black-Diagrammen (Abbildung 83 bis Abbildung 90).

SMA 11 S (Mischgutvarianten A1, mit Rejuvenator)

Die statistische Auswertung ($\alpha = 5 \%$) der SMA-Mörtelvarianten zeigt im Tieftemperaturbereich (-15 °C und -10 °C) eine Gleichheit der komplexen Schubmoduln G^* . Signifikante Unterschiede treten jedoch bei den Phasenwinkeln auf, wobei die Asphaltgranulatvarianten M11 und M12 statistisch äquivalente Werte aufweisen. Auch bei 0 °C , 20 °C und 30 °C besitzen M11 und M12 gleiche G^* - und δ -Werte.

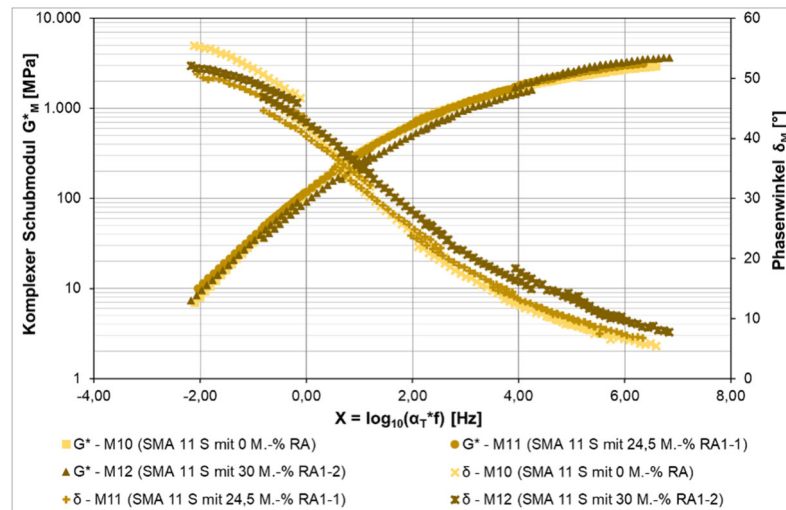


Abbildung 83: Masterkurve des Komplexen Schubmoduls G^* und des Phasenwinkels δ der Asphaltmörtel für die A1-Mischgutvarianten (SMA 11 S)

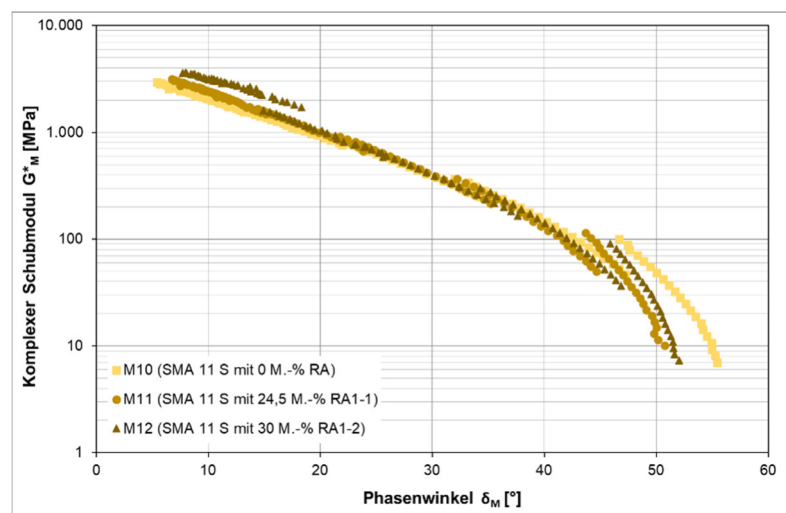


Abbildung 84: Black-Diagramm der Asphaltmörtel für die A1-Mischgutvarianten (SMA 11 S)

Tabelle 65: Mittelwerte (obere Zeile) und Standardabweichungen (untere Zeile) des komplexen Schubmoduls G^* und Phasenwinkels δ der Asphaltmörtel für die A1-Mischgutvarianten (SMA 11 S) für die geprüften Temperaturen T und ausgewählte Frequenzen f

T [°C]	f [Hz]	Variante des Asphaltmörtels					
		M10		M11		M12	
		G^* [MPa]	δ [°]	G^* [MPa]	δ [°]	G^* [MPa]	δ [°]
-15	1,0	2.422,05	8,0	2.512,28	9,4	3.053,57	10,5
		269,085	0,34	26,573	0,59	941,525	0,68
	10,0	2.860,46	5,6	3.060,91	6,9	3.604,01	8,0
		326,775	0,40	68,951	0,24	939,220	0,92
-10	1,0	1.988,23	10,4	2.024,24	12,1	2.336,05	14,4
		189,748	0,52	17,604	0,60	339,602	3,38

T [°C]	f [Hz]	Variante des Asphaltmörtels					
		M10		M11		M12	
		G* [MPa]	δ [°]	G* [MPa]	δ [°]	G* [MPa]	δ [°]
-10	10,0	2.483,03	7,6	2.629,64	8,9	3.147,98	10,5
		248,605	0,30	15,254	0,44	626,089	2,01
0	1,0	1.118,58	17,5	1.044,56	19,4	980,483	20,6
		41,354	0,31	1,326	0,98	75,5285	0,19
	10,0	1.630,71	12,9	1.600,42	14,9	1.497,43	16,1
		71,228	0,49	29,332	0,84	141,362	0,37
10	1,0	442,412	28,7	418,700	29,5	336,432	31,7
		20,959	0,74	25,261	1,12	44,223	1,13
	10,0	842,041	21,8	819,198	23,1	689,880	24,6
		51,6177	0,46	25,3475	0,97	80,7411	0,66
20	1,0	117,092	41,7	119,684	40,3	92,030	42,6
		5,6285	2,02	13,3061	0,98	12,8194	2,13
	10,0	311,310	33,9	310,691	33,7	252,895	35,7
		10,3111	1,31	25,0744	1,15	26,6819	1,38
30	1,0	21,483	53,0	27,928	48,6	20,485	50,4
		1,3792	2,77	3,7014	0,60	3,8836	2,69
	10,0	79,284	47,6	92,303	44,6	72,540	46,8
		1,4785	1,60	10,5388	1,17	9,6283	2,02

Hervorzuheben ist die Charakteristik bei +10 °C (Tabelle 65). Hier ist der komplexe Schubmodul von M12 signifikant kleiner als bei M11. Dies korreliert direkt mit den Ergebnissen der Bindemittlebene (B-A12 wies ebenfalls den geringsten Verformungswiderstand auf).

Die hohen Standardabweichungen der Variante M12 bei -15 °C und -10 °C verdeutlichen aber auch die experimentelle Herausforderung bei der DSR-Prüfung von Mörteln im Glasübergangsbereich, bei dem minimale Inhomogenitäten in der Probenvorbereitung (Erstversuch-Effekt) zu erheblichen Streuungen führen können.

AC 8 D SP (Mischgutvarianten A2, mit Rejuvenator)

Bei den AC 8 D SP-Varianten zeigt sich eine rheologische Parität zwischen den Asphaltgranulatvarianten M21 und M22 lediglich im mittleren Temperaturbereich (10 °C bis 20 °C). In den Randbereichen (Hoch- und Tieftemperatur) liegen statistisch signifikante Unterschiede vor. Bei -15 °C bis 0 °C ist der Phasenwinkel von M22 kleiner als von M21. Bei 30 °C weist M22 einen signifikant höheren komplexen Schubmodul auf als M21 (siehe Tabelle 66).

Tabelle 66: Mittelwerte (obere Zeile) und Standardabweichungen (untere Zeile) des komplexen Schubmoduls G^* und Phasenwinkels δ der Asphaltmörtel für die A2-Mischgutvarianten (AC 8 D SP) für die geprüften Temperaturen T und ausgewählte Frequenzen f

T [°C]	f [Hz]	Variante des Asphaltmörtels					
		M20		M21		M22	
		G* [MPa]	δ [°]	G* [MPa]	δ [°]	G* [MPa]	δ [°]
-15	1,0	3.253,57	7,0	3.130,04	8,1	3.430,24	7,0
		303,748	0,50	197,518	0,41	369,919	0,46
	10,0	3.757,21	5,5	3.702,55	6,5	4.018,85	5,5
		366,852	0,34	263,110	0,53	449,502	0,20
-10	1,0	2.741,35	9,0	2.634,88	10,1	2.979,83	9,1
		295,343	0,29	161,974	0,47	298,047	0,37
	10,0	3.313,35	6,6	3.290,10	8,0	3.623,77	7,1
		368,476	0,38	227,987	0,40	391,579	0,53
0	1,0	1.648,07	14,9	1.539,56	16,3	1.796,32	14,6
		116,364	0,55	91,480	0,83	197,327	0,52
	10,0	2.343,50	11,1	2.209,94	12,5	2.477,80	11,2
		211,865	0,34	128,046	0,44	273,147	0,28
10	1,0	795,171	23,8	683,973	25,6	866,130	22,9
		99,3813	1,39	5,1847	1,26	107,6394	1,12
	10,0	1.346,80	18,1	1.213,05	19,8	1.453,45	18,1
		147,416	0,92	42,664	0,93	145,599	0,69
20	1,0	281,851	33,3	232,258	35,1	331,829	31,4
		57,8512	2,56	7,3147	1,57	49,7893	1,68
	10,0	606,367	27,7	528,979	29,2	690,287	26,2
		91,3666	1,53	15,4776	1,02	80,9736	1,38
30	1,0	80,506	40,3	68,101	42,1	112,800	37,4
		15,6960	2,50	4,6266	2,02	22,7931	1,87
	10,0	216,913	37,0	190,707	38,2	278,158	34,0
		30,6125	1,82	4,1979	1,69	42,7145	1,78

AC 16 B S SG (Mischgutvarianten A3, ohne Rejuvenator)

Bei den AC 16 B S SG-Varianten ohne Rejuvenator wurde eine statistische Gleichheit der Asphaltgranulatvarianten (M31/M32) für die G^* - und δ -Werte über den gesamten Temperaturbereich (-15 °C bis 30 °C) nachgewiesen.

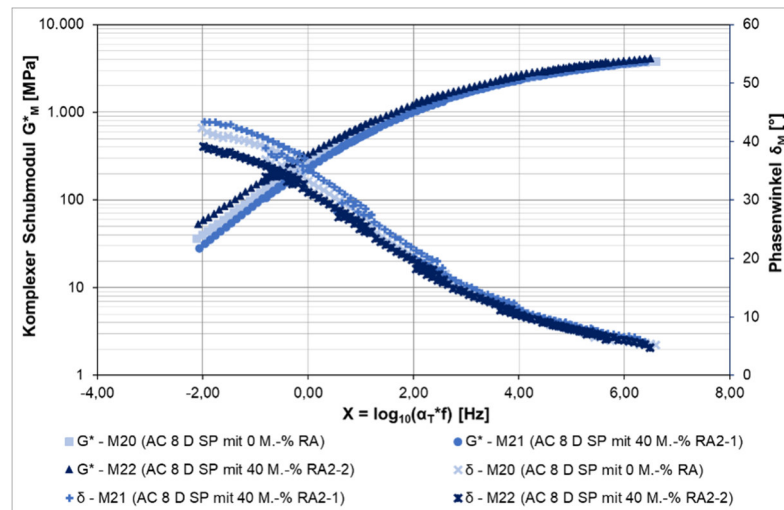


Abbildung 85: Masterkurve des Komplexen Schubmoduls G^* und des Phasenwinkels δ der Asphaltmörtel für die A2-Mischgutvarianten (AC 8 D SP)

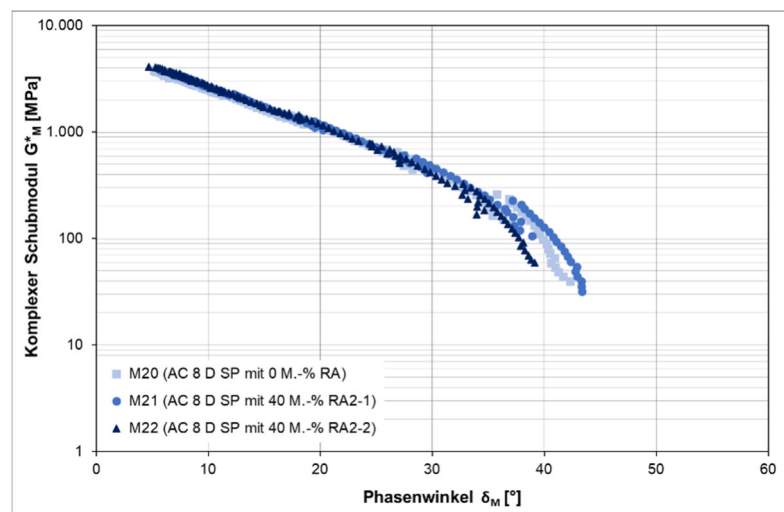


Abbildung 86: Black-Diagramm der Asphaltmörtel für die A2-Mischgutvarianten (AC 8 D SP)

Tabelle 67: Mittelwerte (obere Zeile) und Standardabweichungen (untere Zeile) des komplexen Schubmoduls G^* und Phasenwinkels δ der Asphaltmörtel für die A3-Mischgutvarianten (AC 16 B S SG) für die geprüften Temperaturen T und ausgewählte Frequenzen f

T [°C]	f [Hz]	Variante des Asphaltmörtels					
		M30		M31		M32	
		G^* [MPa]	δ [°]	G^* [MPa]	δ [°]	G^* [MPa]	δ [°]
-15	1,0	4.026,14	5,3	4.065,76	6,3	3.785,63	6,3
		518,846	0,16	322,570	0,41	614,635	0,13
	10,0	4.469,05	4,2	4.658,36	4,9	4.277,13	4,7
		602,046	0,22	381,075	0,45	689,330	0,27

T [°C]	f [Hz]	Variante des Asphaltmörtels					
		M30		M31		M32	
		G* [MPa]	δ [°]	G* [MPa]	δ [°]	G* [MPa]	δ [°]
-10	1,0	3.565,12	6,8	3.524,73	8,1	3.270,94	8,1
		426,12	0,34	295,926	0,34	530,958	0,21
	10,0	4.091,14	5,1	4.208,61	6,2	3.872,29	6,1
		499,225	0,25	381,909	0,42	618,925	0,47
0	1,0	2.505,25	10,9	2.278,16	13,4	2.085,62	13,5
		287,730	0,84	178,195	0,60	364,076	0,89
	10,0	3.156,37	8,4	3.031,98	10,1	2.812,86	10,3
		383,228	0,44	257,806	0,54	457,038	0,33
10	1,0	1.370,46	17,7	1.148,02	22,1	1.019,75	23,3
		180,664	1,50	58,741	1,02	192,404	1,15
	10,0	2.039,91	13,6	1.839,91	16,6	1.649,10	17,2
		248,550	1,02	96,385	0,69	260,468	0,62
20	1,0	601,068	25,3	428,167	32,8	353,592	35,3
		100,7760	2,39	20,2483	1,78	78,4960	0,97
	10,0	1.090,04	20,7	899,951	25,8	778,987	27,3
		145,749	1,87	42,8474	1,31	155,2695	1,06
30	1,0	227,390	31,3	126,394	41,3	92,990	45,5
		53,5164	2,43	11,2172	3,25	23,8115	1,17
	10,0	493,831	28,2	344,311	36,1	276,098	38,9
		91,3696	2,60	13,3959	2,16	61,0942	1,26

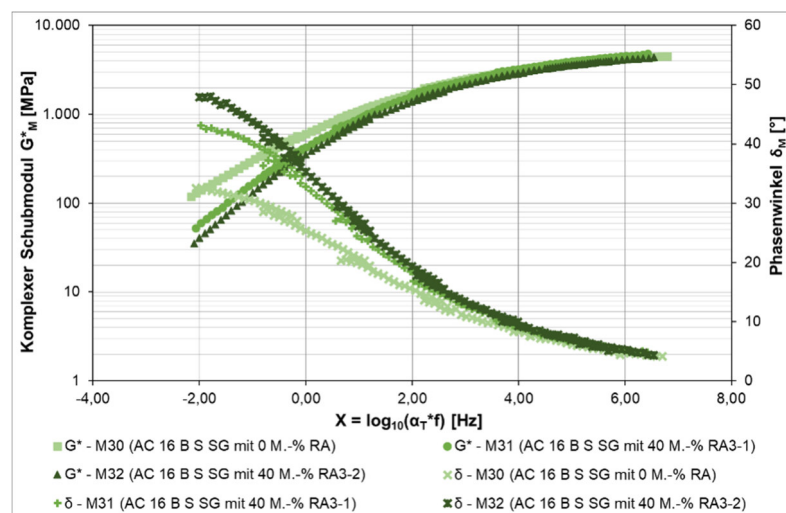


Abbildung 87: Masterkurve des Komplexen Schubmoduls G^* und des Phasenwinkels δ der Asphaltmörtel für die A3-Mischgutvarianten (AC 16 B S SG)

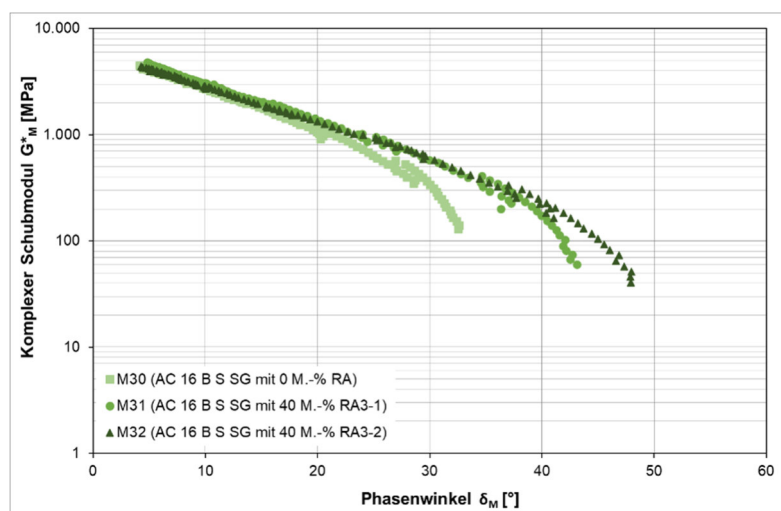


Abbildung 88: Black-Diagramm der Asphaltmörtel für die A3-Mischgutvarianten (AC 16 B S SG)

Insofern signifikante Unterschiede zwischen den Mörtelvarianten mit und ohne Asphaltgranulat (M30) vorliegen, ergibt sich für G^* die Reihung $M30 > M31 = M32$ und für δ $M30 < M31 = M32$ (siehe Tabelle 67).

Obwohl numerische Tendenzen im Kurvenverlauf bei tiefen Temperaturen den Einfluss des Asphaltgranulats andeuten (siehe Abbildung 87), konnte diese Abweichung zwischen den RA-Varianten M31 und M32 statistisch nicht abgesichert werden.

AC 22 T S (Mischgutvarianten A4, ohne Rejuvenator)

Die statistischen Untersuchungen ergaben für die Mörtel der AC 22 T S-Varianten, dass im gesamten untersuchten Temperaturbereich von -15 °C bis 30 °C zwischen den Varianten mit Asphaltgranulat (M41 und M42.1) keine signifikanten Unterschiede sowohl für G^* als auch für δ vorhanden sind.

Tabelle 68: Mittelwerte (obere Zeile) und Standardabweichungen (untere Zeile) des komplexen Schubmoduls G^* und Phasenwinkels δ der der Asphaltmörtel für die A4-Mischgutvarianten (AC 22 T S) für die geprüften Temperaturen T und ausgewählte Frequenzen f

T [°C]	f [Hz]	Variante des Asphaltmörtels							
		M40.1		M40.2		M41		M42.1	
		G^* [MPa]	δ [°]	G^* [MPa]	δ [°]	G^* [MPa]	δ [°]	G^* [MPa]	δ [°]
-15	1,0	4.519,03	5,3	3.966,63	6,5	4.628,82	6,6	4.111,11	5,6
		252,023	0,46	450,104	0,48	263,919	0,69	545,176	0,40
	10,0	5.031,82	4,0	4.585,80	5,0	5.319,22	5,1	4.593,02	4,1
		302,039	0,40	486,936	0,54	246,190	0,70	634,033	0,51
-10	1,0	4.107,41	6,6	3.577,06	8,5	4.061,85	8,5	3.607,13	7,3
		166,432	0,65	307,450	0,66	297,791	0,57	381,058	0,51

T [°C]	f [Hz]	Variante des Asphaltmörtels							
		M40.1		M40.2		M41		M42.1	
		G* [MPa]	δ [°]	G* [MPa]	δ [°]	G* [MPa]	δ [°]	G* [MPa]	δ [°]
-10	10,0	4.721,41	5,2	4.229,36	6,4	4.897,83	6,6	4.195,74	5,3
		259,996	0,37	392,030	1,13	234,972	0,44	520,038	0,46
0	1,0	2.954,97	9,0	2.266,58	14,0	2.618,48	13,4	2.423,84	12,0
		77,321	1,62	180,250	0,79	214,716	0,68	196,943	0,75
	10,0	3.700,97	8,4	3.061,93	10,7	3.501,03	10,3	3.173,54	9,1
		113,995	0,85	258,275	0,99	194,684	0,47	263,989	0,58
10	1,0	1.725,37	16,5	1.051,46	24,1	1.311,77	21,8	1.268,53	20,9
		126,528	2,24	65,535	1,53	117,299	0,96	80,994	1,00
	10,0	2.484,47	12,7	1.771,33	18,0	2.157,09	16,6	1.949,89	15,3
		79,678	1,38	118,758	0,78	126,377	0,87	154,665	0,83
20	1,0	838,907	24,2	339,770	37,5	523,765	31,5	500,108	30,8
		95,3528	2,91	40,2766	2,94	61,4713	2,06	42,9495	0,88
	10,0	1.473,41	19,1	783,696	29,2	1.064,97	25,0	1.010,19	24,2
		91,569	2,39	43,6523	1,93	89,532	1,42	75,739	0,79
30	1,0	339,678	31,1	92,354	48,0	173,503	40,3	152,923	39,8
		64,4520	2,84	13,1693	3,13	34,2516	3,71	9,5557	1,40
	10,0	709,889	26,6	288,054	41,2	444,819	34,4	402,917	34,7
		78,5386	2,84	16,1663	3,45	58,0032	2,58	22,3260	0,96

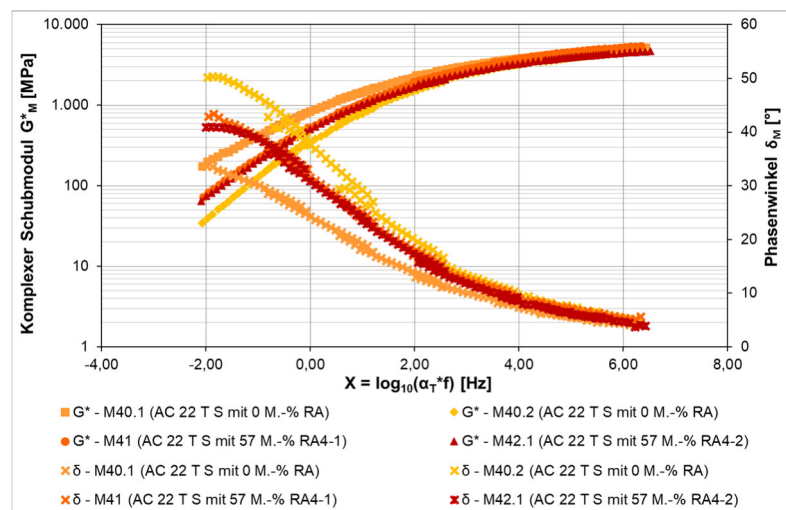


Abbildung 89: Masterkurve des Komplexen Schubmoduls G^* und des Phasenwinkels δ der Asphaltmörtel für die A4-Mischgutvarianten (AC 22 T S)

Beim Vergleich mit den Varianten ohne Asphaltgranulat (M40.1 und M40.2) zeigt sich eine konsistente Reihung insofern signifikante Unterschiede vorliegen. Für den komplexen Schubmodul ergibt sich die Abfolge $M40.1 > M41 = M42.1 > M40.2$ und für den Phasenwinkel

$M40.1 < M41 = M42.1 < M40.2$ (Tabelle 68). Damit ordnen sich die Varianten mit Asphaltgranulat rheologisch zwischen den beiden Mörteln ohne Asphaltgranulat (aus 30/45 bzw. 50/70) ein.

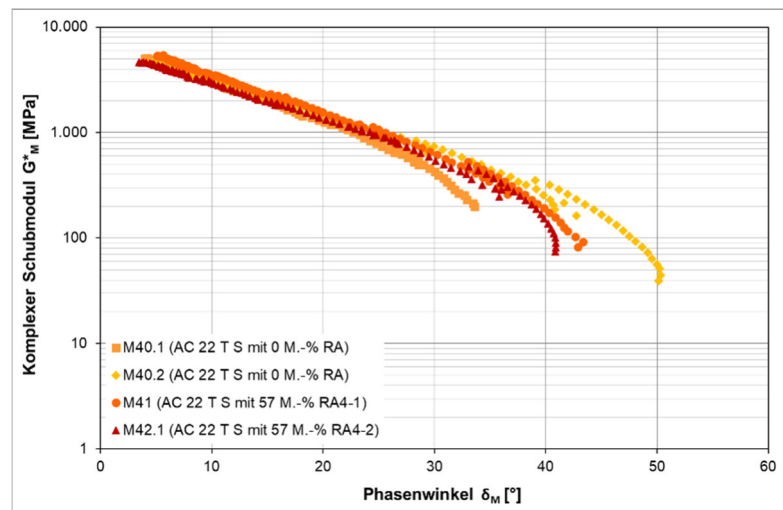


Abbildung 90: Black-Diagramm der Asphaltmörtel für die A4-Mischgutvarianten (AC 22 T S)

Analyse der ebenenübergreifenden rheologischen Zusammenhänge

Der Vergleich zwischen Bindemittel- und Mörtелеbene ermöglicht eine Plausibilisierung der rheologischen Kennwerte unter Berücksichtigung der Probenbeschaffenheit (extrahiertes Bindemittel vs. originaler Verbund im Mörtel).

So wurde auf Bindemittelsebene z.B. für B-A40.1 (30/45) bei tiefen Temperaturen ein geringerer komplexer Schubmodul und ein höherer Phasenwinkel (siehe Abschnitt 4.1.3.2) ermittelt als für B-A40.2 (50/70). Dies steht im Widerspruch zu den nahezu identischen BBR-Kennwerten der Frischbitumen (vgl. Abschnitt 4.1.1.2). Die statistische Auswertung der Mörtelvarianten M40.1 und M40.2 zeigt hingegen keine signifikanten Unterschiede für G^* und δ .

Ein bedeutendes Ergebnis der ebenenübergreifenden Betrachtung ist die rheologische Äquivalenz der Aufbereitungsvarianten. Obwohl die RSB-Aufbereitung bei den Asphaltgranulaten (RA3 und RA4) zu einer nachweislich kubischeren Kornform der feinen Gesteinskörnung führt (vgl. Abschnitt 4.1.1.1), resultiert dies auf Mörtелеbene nicht in einer statistisch signifikanten Änderung der viskoelastischen Parameter. Wissenschaftlich könnte dies durch den gewählten Prüfbereich begründet werden. Bei den im DSR verwendeten geringen Deformationen (LVE-Bereich) scheint der Widerstand hauptsächlich durch die Viskosität des Bindemittels und des Mörtel-Bindemittel-Verhältnis bestimmt zu werden. Die Vorteile der RSB-Körnung (verbesserte mechanische Verzahnung) werden eventuell im Mörtelverbund bei kleinsten Dehnungen noch nicht mobilisiert. Eine weitere Begründung könnte sein, dass die Standardabweichungen bei den rheologischen Mörtelprüfungen verfahrensbedingt noch zu hoch waren. Geringfügige rheologische Vorteile durch eine verbesserte Kornform wurden in diesem „Rauschen“ der Erstversuche statistisch nivelliert.

Zusammenfassende Bewertung der rheologischen Skalierung (Bindemittel- und Mörtel-ebene)

Die Zusammenführung der Ergebnisse verdeutlicht, dass die Bindemittel- und Mörtelanalytik komplementäre Aussagen für das Asphalt-Design liefern kann.

Die Bindemittellebene ist für die Charakterisierung der stofflichen Interaktion zwischen RA-Bindemittel und Frischbitumen sowie Additiven (z.B. Rejuvenatoren) erforderlich und bildet die Basis für das anfängliche Mix-Design.

Die Mörtel-Analytik dient hingegen der mechanischen Plausibilisierung der Bindemittelbefunde unter Einbeziehung der Gesteinskomponenten (Füller und Sand). Die Mörtelprüfung kann dabei helfen, analytisch bedingte Varianzen der Extraktion stofflich einzuordnen.

Für den Vergleich der Aufbereitungstechniken lässt sich resümieren, dass die rheologische Parität auf der Mörtel Ebene die stoffliche Gleichwertigkeit der RSB-Aufbereitung zu belegen scheint. Etwaige Performance-Unterschiede infolge einer optimierten Kornform oder einer höheren Bruchflächigkeit der Gesteinskörnungen im RSB-Asphaltgranulat sind daher auf der Ebene des Asphaltmischguts zu erwarten, wo die mechanische Verzahnung im Gesteinsgerüst eine dominierende Rolle einnimmt.

Die Untersuchungen verdeutlichen jedoch auch einen erheblichen Forschungsbedarf zur weiteren Standardisierung der Mörtelprüfung im DSR, um das Potenzial dieser Ebene für das Asphalt-Design voll ausschöpfen zu können.

4.1.4.2 Ermüdungsverhalten

Die Ermüdungsfunktionen der Asphaltmörtel (Abbildung 91 bis Abbildung 94) wurden analog zum Verfahren nach Dragon (51) statistisch untersucht. Hierzu wurden die experimentell ermittelten Lastwechselzahlen bis zum Versagen über eine Regressionsrechnung in lineare Funktionen der Form $\log_{10}(N_{\max}) = a' + b' \cdot \log_{10}(\gamma_{\text{anf}})$ überführt. Die zugehörigen Regressionsparameter a' (Achsenabschnitt) und b' (Steigung) sowie die statistischen Kenngrößen sind in Tabelle 69 bis Tabelle 72 zusammengefasst. Die statistische Auswertung erfolgte mittels globaler F-Tests und anschließender paarweiser Vergleiche bei einem Signifikanzniveau von $\alpha = 5\%$.

SMA 11 S (Mischgutvarianten A1, mit Rejuvenator)

Für die SMA-Mörtel konnte die Nullhypothese (H_0) der Gleichheit der Steigungen (b') angenommen werden, während die globalen Achsenabschnitte (a') statistisch differierten.

Obwohl der paarweise Vergleich keine statistisch abgesicherten Unterschiede zwischen den Varianten M10, M11 und M12 ausweist, zeigt der visuelle Verlauf in Abbildung 91 eine deutliche Abgrenzung der Referenz M10 von den Asphaltgranulatvarianten. Die Regressionspa-

parameter deuten darauf hin, dass die Mörtel M11 und M12 (mit Rejuvenator) höhere Lastwechselzahlen erreichen als die Referenz M10. Dies korrespondiert mit den Ergebnissen der Bindemittlebene (vgl. Abschnitt 4.1.3.3), wo die Varianten B-A11 und B-A12 ebenfalls eine überlegene Ermüdungsresistenz gegenüber B-A10 aufwiesen. Die fehlende statistische Signifikanz im Mörtel könnte auf die hohen Standardabweichungen (s^2 bis 0,539) zurückzuführen sein, die aus der initialen Laborroutine bei der Probekörperherstellung resultieren.

Tabelle 69: Regressionsparameter der linearisierten Ermüdungsfunktionen, Bestimmtheitsmaße und Standardabweichungen für die Asphaltmörtel der A1-Mischgutvarianten (SMA 11 S)

	Variante des Asphaltmörtels		
	M10	M11	M12
Regressionsparameter a'	4,4565	5,1869	5,4058
Regressionsparameter b'	-4,7381	-5,3626	-4,8472
Bestimmtheitsmaß R^2	0,958	0,954	0,920
Standardabweichung s^2	0,471	0,379	0,539

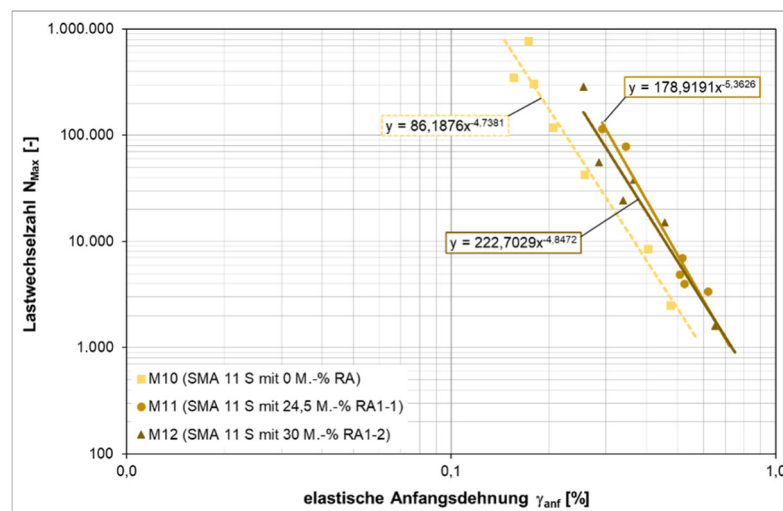


Abbildung 91: Ermüdungsfunktionen der Asphaltmörtel für die A1-Mischgutvarianten (SMA 11 S)

AC 8 D SP (Mischgutvarianten A2, mit Rejuvenator)

Bei den AC 8 D SP-Mörteln (Tabelle 70) zeigt sich ein ähnliches Bild. Es liegt statistische Gleichheit der Steigungen, aber Divergenz der Achsenabschnitte im globalen F-Test vor.

Trotz der paarweisen Akzeptanz von H_0 zeigt Abbildung 92, dass die Variante M22 (RSB-Asphaltgranulat) visuell unter dem Niveau von M20 und M21 liegt. Dies ist bemerkenswert, da auf Bindemittlebene (B-A21/B-A22) kein solcher Abfall erkennbar war.

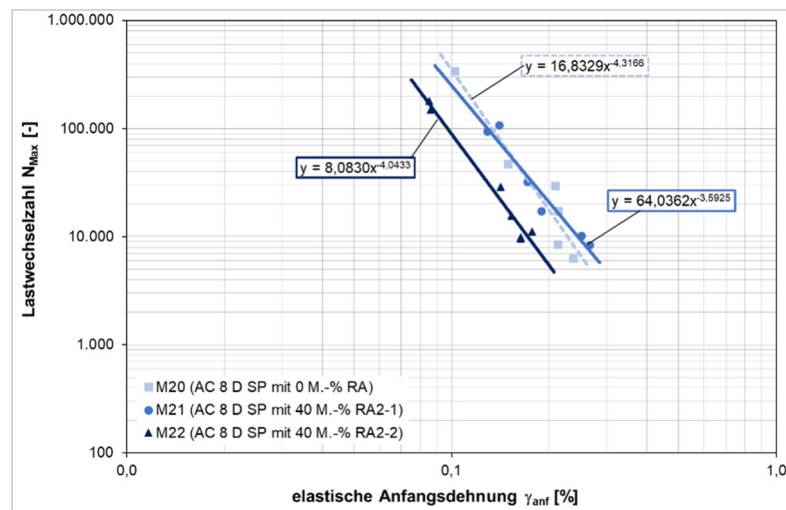


Abbildung 92: Ermüdungsfunktionen der Asphaltmörtel für die A2-Mischgutvarianten (AC 8 D SP)

Tabelle 70: Regressionsparameter der linearisierten Ermüdungsfunktionen, Bestimmtheitsmaße und Standardabweichungen für die Asphaltmörtel der A2-Mischgutvarianten (AC 8 D SP)

	Variante des Asphaltmörtels		
	M20	M21	M22
Regressionsparameter a'	2,0898	4,1594	2,8233
Regressionsparameter b'	-4,0433	-3,5925	-4,3166
Bestimmtheitsmaß R^2	0,974	0,945	0,908
Standardabweichung s^2	0,224	0,288	0,488

AC 16 B S SG (Mischgutvarianten A3, ohne Rejuvenator)

Die Asphaltbinderschichtmörtel (Tabelle 71) weisen zwischen den Varianten im globalen F-Test eine statistische Übereinstimmung bei den Steigungen, aber nicht bei den Achsenabschnitten auf.

Wie bei den vorangegangenen Mörteln konnten im paarweisen Vergleich trotz der globalen Unterschiede der Achsenabschnitte keine signifikanten Differenzen zwischen M30, M31 und M32 nachgewiesen werden (Abbildung 93).

Tabelle 71: Regressionsparameter der linearisierten Ermüdungsfunktionen, Bestimmtheitsmaße und Standardabweichungen für die Asphaltmörtel der A3-Mischgutvarianten (AC 16 B S SG)

	Variante des Asphaltmörtels		
	M30	M31	M32
Regressionsparameter a'	1,0966	0,0720	0,2561
Regressionsparameter b'	-5,0248	-5,0968	-5,2024
Bestimmtheitsmaß R^2	0,931	0,989	0,907
Standardabweichung s^2	0,305	0,198	0,337

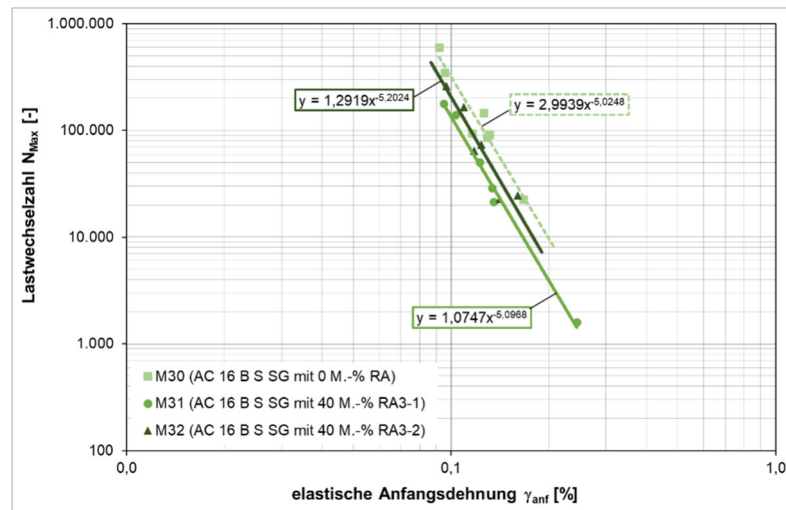


Abbildung 93: Ermüdungsfunktionen der Asphaltmörtel für die A3-Mischgutvarianten (AC 16 B S SG)

AC 22 T S (Mischgutvarianten A4, ohne Rejuvenator)

Ein interessantes Ergebnis ergibt sich bei der Asphalttragschicht (Tabelle 72). Hier konnte für alle Varianten statistische Gleichheit für Steigungen und Achsenabschnitte im globalen F-Test angenommen werden.

Tabelle 72: Regressionsparameter der linearisierten Ermüdungsfunktionen, Bestimmtheitsmaße und Standardabweichungen für die Asphaltmörtel der A4-Mischgutvarianten (AC 22 T S)

	Variante des Asphaltmörtels			
	B-A40.1	B-A40.2	B-A41	B-A42.1
Regressionsparameter a	1,8413	0,8613	2,4975	2,0715
Regressionsparameter b	-4,0162	-4,3035	-3,6196	-3,7702
Bestimmtheitsmaß R^2	0,931	0,931	0,979	0,962
Standardabweichung s^2	0,299	0,274	0,187	0,248

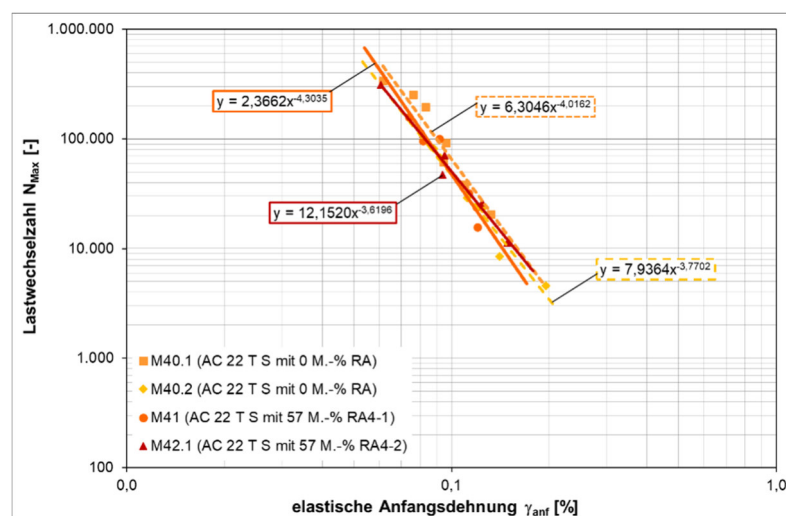


Abbildung 94: Ermüdungsfunktionen der Asphaltmörtel für die A4-Mischgutvarianten (AC 22 T S)

Dieses Ergebnis ist insofern unerwartet, als dass sich die Mörtel ohne Asphaltgranulat M40.1 (30/45) und M40.2 (50/70) stofflich durch das Zugabebitumen unterscheiden. Auf Bindemittelsebene führte dieser Unterschied zu signifikant differenzierenden Ermüdungsfunktionen (vgl. Abschnitt 4.1.3.3). Dass der Mörtel diesen Effekt statistisch nivelliert, ist ein deutliches Indiz für die hohe Streubreite der Erstversuche im DSR-Mörtel-System, welche die stofflichen Einflüsse der Bitumenhärte überlagert.

Beurteilung der Einflussfaktoren auf das Mörtel-Ermüdungsverhalten

Die Auswertung der Ermüdungsversuche am Mörtel lässt unter Berücksichtigung der materialtechnischen Rahmenbedingungen folgende Schlussfolgerungen zu.

Die untersuchten Mörtel weisen ein in Abhängigkeit von der Asphaltart hohes Mörtel-Bitumen-Verhältnis (MBV) auf. Dennoch fallen die Steigungen (b) im Vergleich zur Bindemittelsebene steiler aus, da der Füller und die feine Gesteinskörnung als Spannungskonzentratoren wirken und den kumulativen Schädigungsfortschritt beschleunigen.

Obwohl die RSB-Varianten (A3, A4) eine kubischere Kornform in der feinen Gesteinskörnung besitzen, lässt sich daraus kein statistisch gesicherter Vorteil in der Ermüdungsresistenz der Mörtel ableiten. Eine verbesserte Verzahnung des Feinkorns scheint bei den gewählten Dehnungsamplituden im DSR noch nicht das maßgebliche Kriterium für die Lebensdauer zu sein.

Die zum Teil widersprüchlichen Befunde zwischen visueller Abgrenzung und statistischer Gleichheit können auf die hohen Standardabweichungen der Regressionsparameter zurückzuführen sein. Da die Versuche im Rahmen der Etablierung eines neuen Prüfverfahrens durchgeführt wurden (Erstversuche), unterliegen die Probekörperherstellung und die Zentrierung im DSR einer prozessbedingten Streuung, die feine stoffliche Unterschiede (z.B. 30/45 vs. 50/70 bei A4) statistisch überlagern kann.

Zusammenfassende Bewertung der Prüfung des Ermüdungsverhaltens von Mörtel

Das angewendete Prüfverfahren zur Bestimmung der Ermüdungsfunktionen am Asphaltmörtel wird grundsätzlich als geeignet eingestuft, um die energetische Schadensakkumulation auf dieser Skalenebene zu erfassen. Die statistische Gleichwertigkeit der Ergebnisse zwischen den Asphaltgranulatvarianten über alle Mischgutsorten hinweg scheint zu belegen, dass die RSB-Aufbereitung zu einem Ermüdungswiderstand des Mörtels führt, der mindestens dem Niveau der konventionellen Aufbereitung entspricht.

Um die Trennschärfe des Prüfverfahrens zukünftig zu erhöhen und auch geringfügige stoffliche Unterschiede (z.B. in der Bindemittelsorte, der Kornverteilung oder -form) sicher abzubilden, besteht Forschungsbedarf hinsichtlich der weiteren Standardisierung der Probekörperherstellung und der Reduktion verfahrensbedingter Streuungen.

4.1.4.3 Tieftemperaturverhalten

Die Charakterisierung des Tieftemperaturverhaltens erfolgte über die Bestimmung der kryogenen Spannungen σ_{kryo} in Abhängigkeit von der abfallenden Temperatur. In Tabelle 73 bis In der Gruppe der Asphalttragschichtvarianten (Tabelle 76, Abbildung 98) konnte die Nullhypothese der Gleichheit ebenfalls für alle Varianten beibehalten werden.

Tabelle 76 sind die Mittelwerte der kryogenen Spannungen für die Temperatur von -15 °C sowie die zugehörigen Standardabweichungen zusammengefasst. Die vollständigen Spannungsverläufe über den untersuchten Temperaturbereich sind in Abbildung 95 bis Abbildung 98 grafisch dargestellt.

SMA 11 S (Mischgutvarianten A1, mit Rejuvenator)

Für die SMA-Varianten (Tabelle 73, Abbildung 95) konnte statistisch kein signifikanter Einfluss der Verwendung von Rejuvenatoren oder des Aufbereitungsverfahrens auf die kryogenen Spannungen bei -15 °C nachgewiesen werden.

Tabelle 73: Mittelwerte und Standardabweichungen der kryogenen Spannung σ_{kryo} für die Asphaltmörtel der A1-Mischgutvarianten (SMA 11 S) für -15 °C

Variante des Asphaltmörtels					
M10		M11		M12	
σ_{kryo} [MPa]	s^2 [MPa]	σ_{kryo} [MPa]	s^2 [MPa]	σ_{kryo} [MPa]	s^2 [MPa]
0,216	0,0225	0,161	0,0244	0,192	0,049

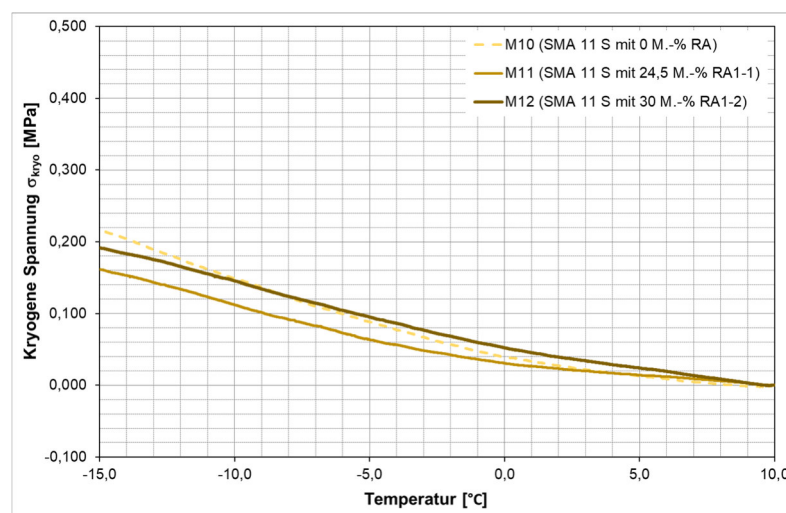


Abbildung 95: Verlauf der kryogenen Spannung σ_{kryo} in Abhängigkeit von der Temperatur für die Asphaltmörtel der A1-Mischgutvarianten (SMA 11 S)

AC 8 D SP (Mischgutvarianten A2, mit Rejuvenator)

Auch für die AC 8 D SP-Varianten (Tabelle 74, Abbildung 96) war statistisch kein signifikanter Einfluss der Verwendung von Rejuvenatoren oder des Aufbereitungsverfahrens auf die kryogenen Spannungen bei -15 °C nachweisbar.

Tabelle 74: Mittelwerte und Standardabweichungen der kryogenen Spannung σ_{kryo} für die Asphaltmörtel der A2-Mischgutvarianten (AC 8 D SP) für -15 °C

Variante des Asphaltmörtels					
M20		M21		M22	
σ_{kryo} [MPa]	s^2 [MPa]	σ_{kryo} [MPa]	s^2 [MPa]	σ_{kryo} [MPa]	s^2 [MPa]
0,183	0,0067	0,172	0,0260	0,202	0,0007

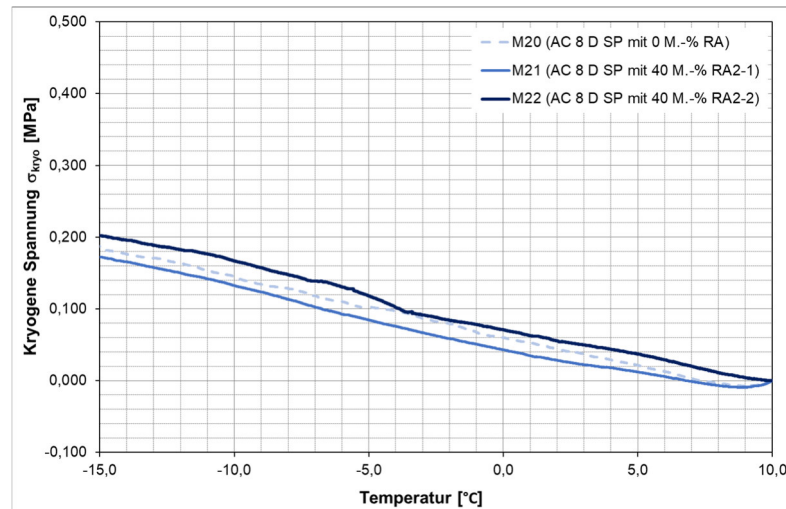


Abbildung 96: Verlauf der kryogenen Spannung σ_{kryo} in Abhängigkeit von der Temperatur für die Asphaltmörtel der A2-Mischgutvarianten (AC 8 D SP)

AC 16 B S SG (Mischgutvarianten A3, ohne Rejuvenator)

Bei den Mörteln der Asphaltbinderschicht (Tabelle 75, Abbildung 97) zeigt die statistische Analyse aufgrund der vorliegenden Standardabweichungen ebenso keine statistisch signifikanten Unterschiede der Varianten M30, M31 und M32.

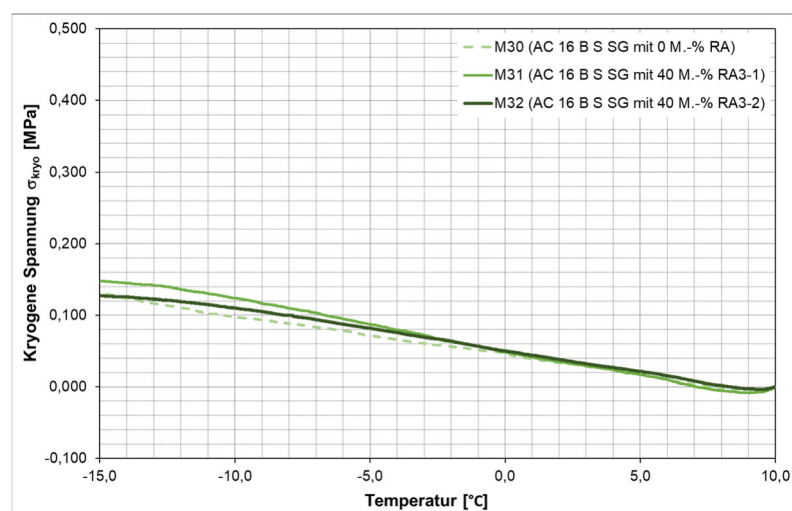


Abbildung 97: Verlauf der kryogenen Spannung σ_{kryo} in Abhängigkeit von der Temperatur für die Asphaltmörtel der A3-Mischgutvarianten (AC 16 B S SG)

Tabelle 75: Mittelwerte und Standardabweichungen der kryogenen Spannung σ_{kryo} für die Asphaltmörtel der A3-Mischgutvarianten (AC 16 B S SG) für -15 °C

Variante des Asphaltmörtels					
M30		M31		M32	
σ_{kryo} [MPa]	s^2 [MPa]	σ_{kryo} [MPa]	s^2 [MPa]	σ_{kryo} [MPa]	s^2 [MPa]
0,132	0,0279	0,148	0,0425	0,128	0,0506

AC 22 T S (Mischgutvarianten A4, ohne Rejuvenator)

In der Gruppe der Asphalttragschichtvarianten (Tabelle 76, Abbildung 98) konnte die Nullhypothese der Gleichheit ebenfalls für alle Varianten beibehalten werden.

Tabelle 76: Mittelwerte und Standardabweichungen der kryogenen Spannung σ_{kryo} für die Asphaltmörtel der A4-Mischgutvarianten (AC 22 T S) für -15 °C

Variante des Asphaltmörtels							
M40.1		M40.2		M41		M42.1	
σ_{kryo} MPa]	s^2 [MPa]	σ_{kryo} MPa]	s^2 [MPa]	σ_{kryo} MPa]	s^2 [MPa]	σ_{kryo} MPa]	s^2 [MPa]
0,127	0,0041	0,098	0,0094	0,114	0,0195	0,122	0,0345

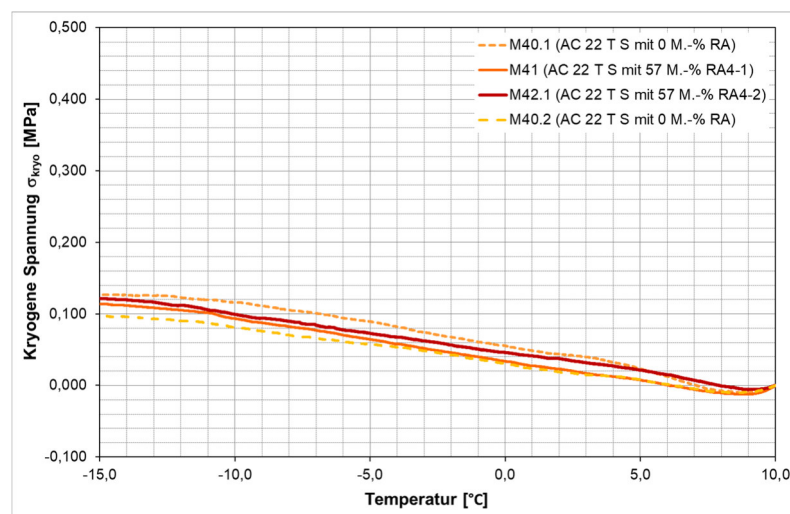


Abbildung 98: Verlauf der kryogenen Spannung σ_{kryo} in Abhängigkeit von der Temperatur für die Asphaltmörtel der A4-Mischgutvarianten (AC 22 T S)

Beurteilung der Einflussfaktoren auf das Mörtel-Tieftemperaturverhalten

Die Analyse der kryogenen Spannungen am Mörtel lässt unter Berücksichtigung der materialtechnischen Rahmenbedingungen folgende Schlussfolgerungen zu.

Die statistische Auswertung ergab für alle untersuchten Mörtelvarianten je Asphaltart (A1 bis A4), dass die Nullhypothese hinsichtlich der Gleichheit der kryogenen Spannungen bei -15 °C beibehalten werden konnte. Somit liegen innerhalb der jeweiligen Asphaltarten keine statistisch gesicherten Unterschiede im kältebedingten Spannungsaufbau vor.

Die statistische Gleichheit der kryogenen Spannungen zwischen den Varianten ohne Asphaltgranulat M40.1 und M40.2 (30/45 vs. 50/70) scheint nicht primär auf Messungenauigkeiten, sondern auf die stoffliche Identität der verwendeten Bitumen im Kältebereich (siehe Abschnitt 4.1.1.2) zurückzuführen. Die Mörtelprüfung verifiziert somit wahrscheinlich erfolgreich, dass diese Tieftemperatur-Äquivalenz im Mörtel erhalten bleibt.

Da die Kälteeigenschaften im Mörtel maßgeblich durch die thermische Kontraktion und das Relaxationsvermögen der viskoelastischen Phase bestimmt werden, dominiert die Bindemittelmatrix etwaige Unterschiede bei den feinen Gesteinspartikeln (82). Dies könnte erklären, warum trotz der nachgewiesenen Unterschiede in der Kornform der RSB-Asphaltgranulate (kubischeres Feinkorn) keine statistisch gesicherten Abweichungen im kryogenen Spannungsaufbau gegenüber der konventionellen Aufbereitung feststellbar sind.

Die Mörtelergebnisse korrespondieren mit den rheologischen Feststellungen der Bindemitttelebene (Beziehung der beiden Skalen). Der Mörtel kann hierbei als Bindeglied zwischen Bindemittel und Asphaltebene auftreten, da er die Interaktion mit den mineralischen Bestandteilen (Füller und Sand) ohne die analytischen Risiken einer chemischen Extraktion erfasst.

Die zum Teil erheblichen Standardabweichungen resultieren auch hier aus der Etablierung des neuen Prüfverfahrens (Erstversuche). Die prozessbedingte Streuung bei der Herstellung der filigranen Probekörper kann aktuell noch feinere stoffliche Differenzierungen überlagern.

Zusammenfassende Bewertung der Prüfung des Tieftemperaturverhaltens von Mörtel

Das angewendete Prüfverfahren zur Bestimmung kryogener Spannungen am Asphaltmörtel kann grundsätzlich als geeignet eingestuft werden, um das kältebedingte Gebrauchsverhalten auf dieser Skalenebene abzubilden. Die statistische Gleichwertigkeit der Ergebnisse – insbesondere zwischen den Varianten mit konventionell und im RSB aufbereitetem Asphaltgranulat – scheint zu belegen, dass das Aufbereitungsverfahren keinen negativen Einfluss auf das Tieftemperaturverhalten des Mörtelgefüges hat.

Die Übereinstimmung der Mörtelergebnisse (M40.1 mit M40.2) mit den BBR-Prognosen der Bindemitttelebene (30/45 vs. 50/70) unterstreicht die hohe Plausibilität des skalenübergreifenden Prüfansatzes. Zur Steigerung der Trennschärfe besteht jedoch weiterer Forschungsbedarf hinsichtlich der Standardisierung der Probekörperherstellung, um die verfahrensbedingten Streuungen zu minimieren und die Sensitivität für Einflüsse der Zusammensetzung zu erhöhen.

4.1.4.4 Verformungsverhalten

Die Beurteilung des Verformungswiderstandes bei hohen Gebrauchstemperaturen erfolgte für die Asphaltdeck- und Asphaltbindermörtel bei einer Prüftemperatur von 60 °C. Als zentrale Kennwerte wurden die Kriechnachgiebigkeit J_r sowie die prozentuale Rückstellung R_N ermittelt. Die Mittelwerte und Standardabweichungen sind in Tabelle 77 bis Tabelle 79 zusammengefasst. Abbildung 99 bis Abbildung 101 zeigen die Verläufe der plastischen Verformungen über die Belastungszeit.

Tabelle 77: Mittelwerte x^* und Standardabweichungen s^2 der Kriechnachgiebigkeit J_{nr} und der Prozentualen Rückstellung R_N für die Asphaltmörtel der A1-Mischgutvarianten (SMA 11 S)

Kennwert	Variante des Asphaltmörtels					
	M10		M11		M12	
	x^*	s^2	x^*	s^2	x^*	s^2
$J_{nr} [kPa^{-1}]$	0,1157	0,02053	1,1157	0,65157	1,0684	0,34917
$R_N [\%]$	27,8	3,03	21,5	2,56	25,4	1,06

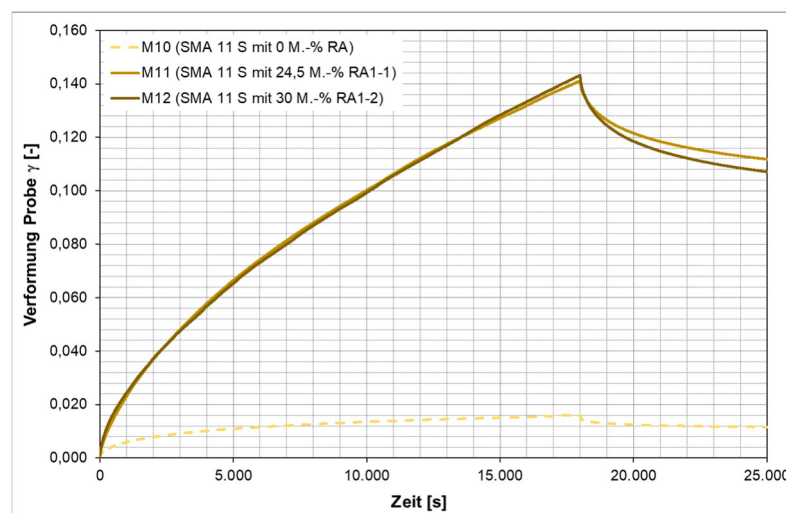


Abbildung 99: Verlauf der plastischen Verformungen im SSCRT γ für die Asphaltmörtel der A1-Mischgutvarianten (SMA 11 S)

SMA 11 S (Mischgutvarianten A1, mit Rejuvenator)

Die statistische Analyse (ANOVA, $\alpha = 5 \%$) der SMA-Mörtel (Tabelle 77, Abbildung 99) ergab signifikante Unterschiede sowohl für die Kriechnachgiebigkeit J_{nr} als auch für die Rückstellung R_N .

Die paarweisen Vergleiche belegen, dass die Kriechnachgiebigkeit der Referenzvariante M10 wesentlich geringer ausfällt als die der Varianten mit Asphaltgranulat (M11 und M12). Zwischen den beiden Asphaltgranulatvarianten (konventionell vs. RSB) konnte hingegen kein statistisch signifikanter Unterschied für J_{nr} festgestellt werden. Hinsichtlich der prozentualen

Rückstellung R_N weist M11 den geringsten Wert auf, während M10 und M12 statistisch gleichwertig einzustufen sind.

AC 8 D SP (Mischgutvarianten A2, mit Rejuvenator)

Bei den AC 8 D SP-Varianten (Tabelle 78, Abbildung 100) konnte die Nullhypothese der Gleichheit für J_{nr} und R_N über alle Varianten hinweg beibehalten werden.

Tabelle 78: Mittelwerte $\bar{x}^*$ und Standardabweichungen s^2 der Kriechnachgiebigkeit J_{nr} und der Prozentualen Rückstellung R_N für die Asphaltmörtel der A2-Mischgutvarianten (AC 8 D SP)

Kennwert	Variante des Asphaltmörtels					
	M20		M21		M22	
	$\bar{x}^*$	s^2	$\bar{x}^*$	s^2	$\bar{x}^*$	s^2
J_{nr} [kPa^{-1}]	0,0195	0,00396	0,0122	0,01173	0,0160	0,00757
R_N [%]	32,5	5,55	48,4	17,47	35,9	11,27

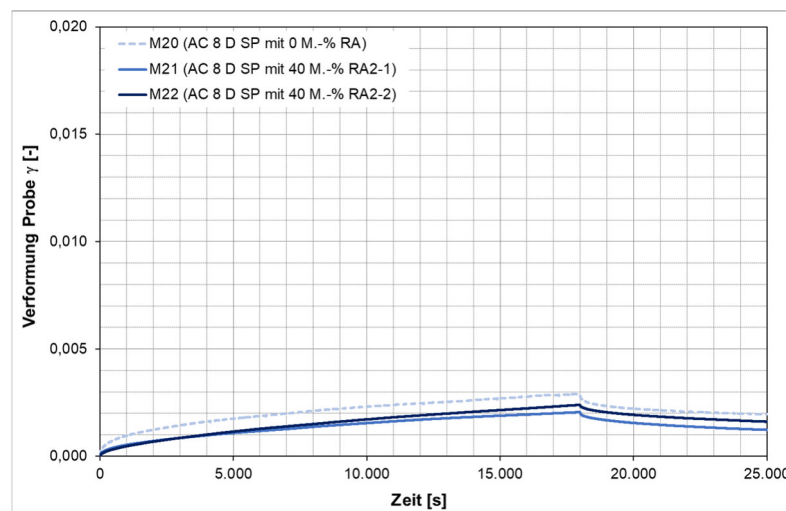


Abbildung 100: Verlauf der plastischen Verformungen im SSCRT γ für die Asphaltmörtel der A2-Mischgutvarianten (AC 8 D SP)

AC 16 B S SG (Mischgutvarianten A3, ohne Rejuvenator)

Im Gegensatz zu den AC 8 D SP-Varianten zeigten die Varianten der Asphaltbinderschichtmörtel (A3) signifikante Unterschiede in der Kriechnachgiebigkeit (Tabelle 79, Abbildung 101).

Für diese Varianten belegen die Ergebnisse, dass die Kriechnachgiebigkeit der Referenz M30 signifikant niedriger ist als die der Varianten M31 und M32. Zwischen den beiden Asphaltgranulatvarianten besteht jedoch auch hier statistische Gleichheit für J_{nr} . Die prozentuale Rückstellung R_N weist für alle A3-Varianten keine signifikanten Unterschiede auf.

Tabelle 79: Mittelwerte x^* und Standardabweichungen s^2 der Kriechnachgiebigkeit J_{nr} und der Prozentualen Rückstellung R_N für die Asphaltmörtel der A3-Mischgutvarianten (AC 16 B S SG)

Kennwert	Variante des Asphaltmörtels					
	M30		M31		M32	
	x^*	s^2	x^*	s^2	x^*	s^2
J_{nr} [kPa ⁻¹]	0,0087	0,00289	0,0459	0,02280	0,0655	0,00525
R_N [%]	35,0	8,64	29,5	10,75	23,0	3,38

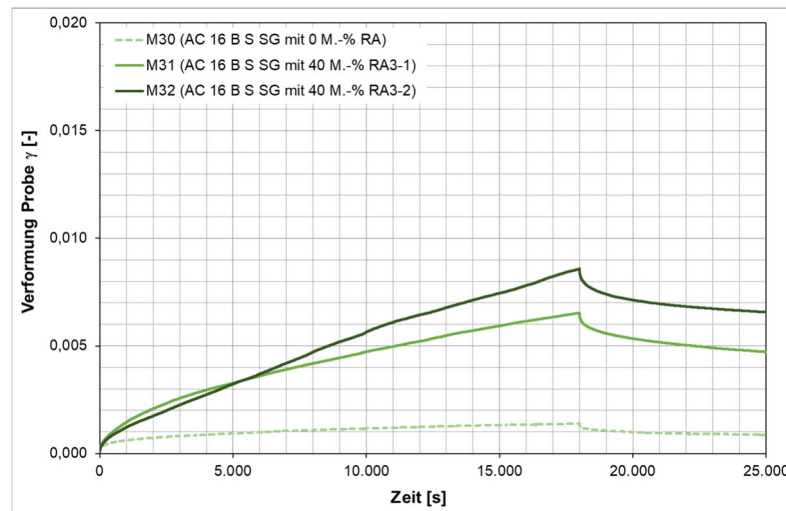


Abbildung 101: Verlauf der plastischen Verformungen im SSCRT γ für die Asphaltmörtel der A3-Mischgutvarianten (AC 16 B S SG)

Beurteilung der Einflussfaktoren auf das Verformungsverhalten

Die Analyse der Kriech- und Rückstellungsparameter am Asphaltmörtel verdeutlicht, dass das Verformungsverhalten auf der Mörtелеbene scheinbar durch das Mörtel-Bindemittel-Verhältnis (MBV) und die damit verbundene Dominanz der Bindemittelphase beeinflusst wird.

Bei den SMA-Varianten (MBV im Mittel über alle drei Varianten ca. 3,2 [-]) korrespondieren die Ergebnisse der Mörtелеbene mit den Kennwerten der Bindemittellebene. Der signifikant höhere Verformungswiderstand der Variante ohne RA (M10 gegenüber M11/M12) spiegelt die rheologischen Eigenschaften des verwendeten Frischbitumens im Vergleich zu den Varianten mit RA und Rejuvenator (vgl. Tabelle 53 und Tabelle 57 bei 60 °C) wider. In diesem bindemittelreichen System scheinen die rheologischen Eigenschaften des Mörtels (viskoelastisches Verhalten) das Kriechverhalten des Mörtels zu bestimmen.

Bei den Asphaltbeton-Mörteln mit deutlich höheren MBV-Werten (bei M2 im Mittel ca. 4,6 [-] und bei M3 im Mittel 5,6 [-]) scheint eine Entkopplung der Skaleneffekte einzutreten. In der Sorte A2 führt der höhere Anteil an Füller und feinen Gesteinskörnungen dazu, dass die im MSCR-Test des Bindemittels nachgewiesenen Unterschiede (siehe Tabelle 54) statis-

tisch nivelliert werden. Bei der Sorte A3 kehrt sich der Trend sogar um. Trotz des Bindemittels mit dem höchsten Verformungswiderstand bei 60 °C (B-A32, Tabelle 55 und Tabelle 59) weist der entsprechende Mörtel (M32) die höchste Kriechnachgiebigkeit auf. Dies könnte belegen, dass bei steigendem MBV die rein bindemittelbezogenen Kennwerte (J_{nr}) ihre Prognosegüte verlieren, da strukturelle Einflüsse im Verbund mit den Gesteinskörnungen und die lokale Bindemittelverteilung im Mörtelsystem an Bedeutung gewinnen.

Die statistische Interpretation der Ergebnisse wird dennoch durch die zum Teil sehr hohen Standardabweichungen (insbesondere bei den Varianten M11, M21 und M31) erschwert. Da diese Untersuchungen im Rahmen der Etablierung eines neuen Prüfverfahrens durchgeführt wurden (Erstversuche), unterliegen auch hier sowohl die Herstellung der Probekörper als auch die präzise Zentrierung und Prüfung im DSR einer prozessbedingten Streuung.

Zusammenfassende Bewertung der Prüfung des Verformungsverhaltens von Mörtel

Das angewendete Prüfverfahren zur Bestimmung der Kriechnachgiebigkeit J_r und der prozentualen Rückstellung R_N am Asphaltmörtel wird als grundsätzlich geeignet beurteilt, um Unterschiede im Verformungspotenzial bei hohen Temperaturen abzubilden. Die derzeit vorliegenden z.T. hohen Versuchsstreuungen limitieren jedoch aktuell die Trennschärfe des Verfahrens noch erheblich. Eine abschließende Beurteilung der Auswirkungen unterschiedlicher Aufbereitungstechniken (konventionell vs. RSB) auf die Mörtelperformance ist daher auf Basis der vorliegenden statistischen Datenlage noch schwierig. Es besteht demnach auch hier deutlicher Forschungsbedarf, um die Reproduzierbarkeit der Probekörperherstellung und der Durchführung zu erhöhen, damit zukünftig eine belastbare Differenzierung stofflicher Parameter auf dieser Skalenebene erreicht werden kann.

4.1.5 Performance des Asphalts

4.1.5.1 Steifigkeitsverhalten

Die Charakterisierung des Steifigkeitsverhaltens erfolgte über die Bestimmung der Steifigkeitsmoduln $|E^*|$ nach TP Asphalt-StB, Teil 26 (31). Zur Gewährleistung der skalenübergreifenden Vergleichbarkeit zwischen der Bindemittel-, Mörtel- und Asphaltebene sind in Tabelle 80 bis Tabelle 83 die Mittelwerte und Standardabweichungen nur für die Frequenzen 1,0 Hz und 10,0 Hz zusammengefasst. Die Auswahl der dargestellten Frequenzen ermöglicht eine konsistente Analyse der viskoelastischen Eigenschaften über alle drei Ebenen hinweg. Die zugehörigen Masterkurven ($T_0 = 20\text{ °C}$) sind in Abbildung 102 bis Abbildung 105 dargestellt.

SMA 11 S (Mischgutvarianten A1, mit Rejuvenator)

Die einfaktorielle Varianzanalyse ($\alpha = 5\%$) für die SMA-Varianten zeigt im Temperaturbereich von -10 °C bis +20 °C signifikante Unterschiede.

Während zwischen der Variante A10 (ohne Asphaltgranulat) und der Asphaltgranulatvariante A12 (mit RA1-2) für die Steifigkeitsmoduln statistische Gleichheit besteht, weicht die Variante A11 (mit RA1-1) signifikant ab. Dabei ist festzustellen, dass $|E^*|$ von A11 kleiner als $|E^*|$ von A12 über den gesamten untersuchten Bereich gilt (Tabelle 80, Abbildung 102).

Tabelle 80: Mittelwerte $|E^*|$ und Standardabweichungen s^2 des Steifigkeitsmoduls für die A1-Mischgutvarianten (SMA 11 S) für die Temperaturen T und ausgewählte Frequenzen f

T [°C]	f [Hz]	Asphaltvariante					
		A10		A11		A12	
		$ E^* $ [MPa]	s^2 [MPa]	$ E^* $ [MPa]	s^2 [MPa]	$ E^* $ [MPa]	s^2 [MPa]
-10	1,0	16.069	335,5	14.764	294,9	16.456	113,6
	10	19.054	413,0	18.148	262,1	19.656	91,8
0	1,0	13.833	483,3	12.376	325,6	13.365	113,0
	10	18.610	593,8	17.451	387,2	18.479	205,2
10	1,0	8.106	449,2	7.027	162,1	7.655	119,6
	10	13.015	601,1	11.840	306,3	12.414	254,5
20	1,0	3.809	162,9	3.379	216,8	3.886	69,3
	10	7.472	319,7	6.886	331,6	7.591	137,2

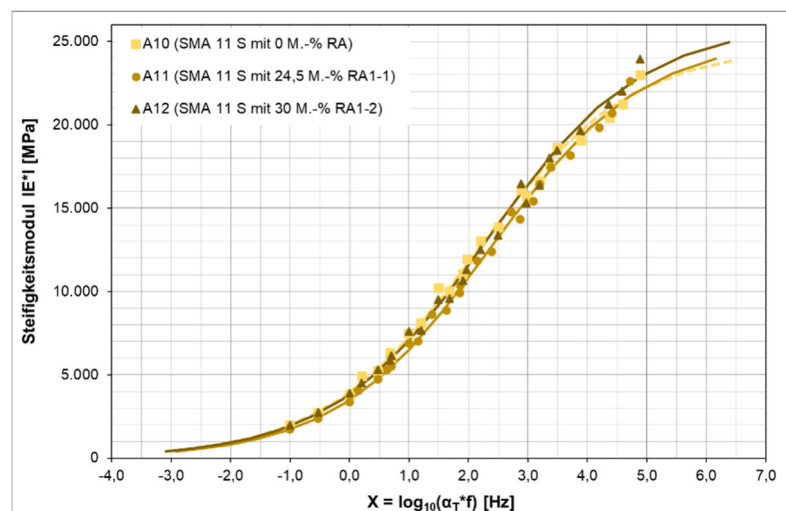


Abbildung 102: Masterkurve des Steifigkeitsmoduls $|E^*|$ der A1-Mischgutvarianten (SMA 11 S)

AC 8 D SP (Mischgutvarianten A2, mit Rejuvenator)

Bei den Asphaltbeton-Deckschichten konnte die statistische Gleichheit bei 20 °C bestätigt werden, während sie in den übrigen Temperaturbereichen zu verwerfen war (Tabelle 81, Abbildung 103).

Die paarweisen Vergleiche zwischen den Asphaltgranulatvarianten A21 (konventionell) und A22 (RSB) ergaben keine signifikanten Unterschiede bezüglich $|E^*|$, was die Gleichwertigkeit der Aufbereitungsverfahren belegt. Im Vergleich zur Variante A20 (ohne RA) zeigt sich eine

Umkehrung der Steifigkeit. Während im Tieftemperaturbereich (-10 °C bis 0 °C) die Reihung $A20 < A21 \approx A22$ vorliegt, gilt im Bereich mittlerer Temperaturen (10 °C bis 20 °C) $A20 > A21 \approx A22$. Obwohl die Abweichung bei -10 °C statistisch signifikant ist, liegt die numerische Differenz von ca. 2 % innerhalb der Prüfstreuung und ist für die bautechnische Praxis als nachrangig einzustufen.

Tabelle 81: Mittelwerte $|E^*|$ und Standardabweichungen s^2 des Steifigkeitsmoduls für die A2-Mischgutvarianten (AC 8 D SP) für die Temperaturen T und ausgewählte Frequenzen f

T [°C]	f [Hz]	Asphaltvariante					
		A20		A21		A22	
		$ E^* $ [MPa]	s^2 [MPa]	$ E^* $ [MPa]	s^2 [MPa]	$ E^* $ [MPa]	s^2 [MPa]
-10	1,0	18.473	76,6	19.321	325,1	19.093	119,9
	10	22.598	153,7	22.958	462,9	23.148	72,3
0	1,0	14.222	162,4	13.572	242,4	13.459	451,7
	10	18.643	256,9	18.382	330,5	18.191	549,8
10	1,0	8.807	174,2	7.806	117,7	8.036	331,3
	10	13.563	313,0	12.457	141,9	12.758	404,5
20	1,0	4.440	141,3	4.057	160,0	4.099	272,6
	10	8.305	58,1	7.634	203,7	7.769	331,9

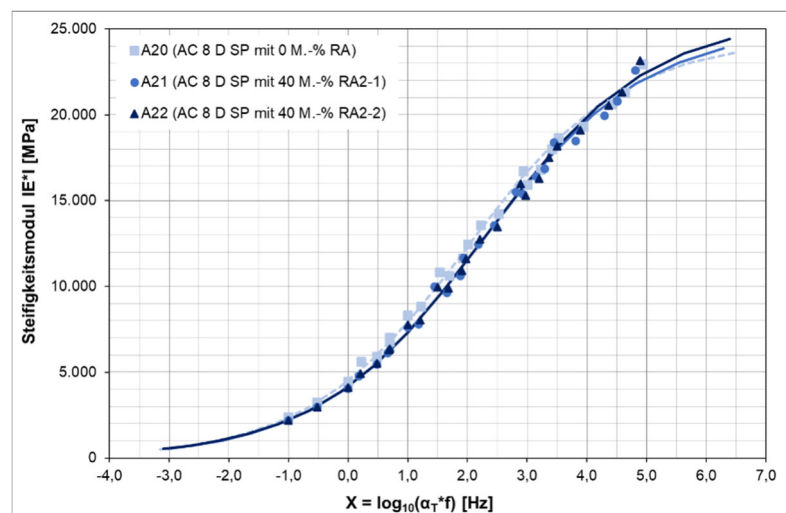


Abbildung 103: Masterkurve des Steifigkeitsmoduls $|E^*|$ der A2-Mischgutvarianten (AC 8 D SP)

AC 16 B S SG (Mischgutvarianten A3, ohne Rejuvenator)

Die Asphaltbinderschichtvarianten zeigen über das gesamte Temperaturspektrum statistisch signifikante Unterschiede ($\alpha = 5\%$).

Eine Gleichheit der Steifigkeitsmoduln konnte zwischen keiner der Varianten nachgewiesen werden. Dabei etabliert sich die strikte Abfolge für $|E^*|$: A32 > A31 > A30 (Tabelle 82, Abbildung 104). Diese Ergebnisse stützen die der Bindemittlebene, bei der B-A32 ebenfalls die höchste Steifigkeit aufwies.

Tabelle 82: Mittelwerte $|E^*|$ und Standardabweichungen s^2 des Steifigkeitsmoduls für die A3-Mischgutvarianten (AC 16 B S SG) für die Temperaturen T und ausgewählte Frequenzen f

T [°C]	f [Hz]	Asphaltvariante					
		A30		A31		A32	
		$ E^* $ [MPa]	s^2 [MPa]	$ E^* $ [MPa]	s^2 [MPa]	$ E^* $ [MPa]	s^2 [MPa]
-10	1,0	21.860	1.004,0	26.046	178,4	27.060	333,9
	10	25.910	1.026,2	30.673	177,5	31.743	463,2
0	1,0	16.288	426,1	19.923	515,9	21.342	363,2
	10	21.335	637,9	25.780	506,2	27.221	526,0
10	1,0	10.399	408,6	12.746	469,3	14.081	541,0
	10	16.037	636,2	19.404	450,6	20.716	761,5
20	1,0	5.220	206,4	6.849	293,2	7.702	231,4
	10	9.719	337,2	12.591	450,3	13.638	316,4

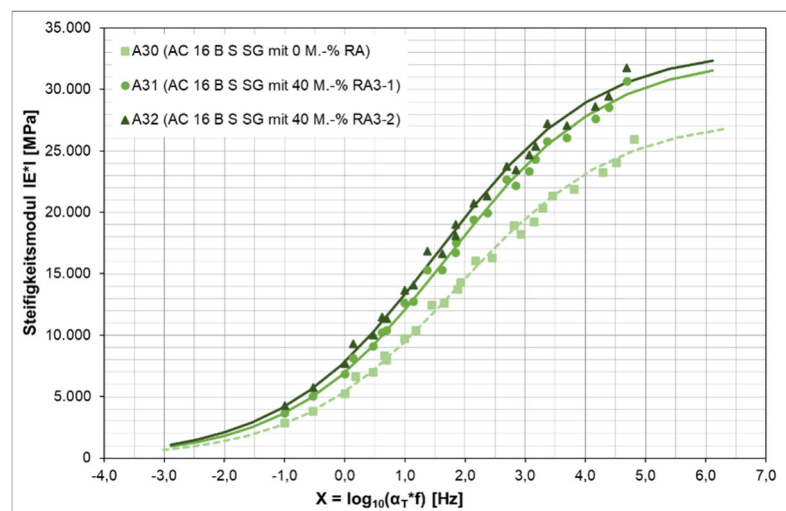


Abbildung 104: Masterkurve des Steifigkeitsmoduls $|E^*|$ der A3-Mischgutvarianten (AC 16 B S SG)

AC 22 T S (Mischgutvarianten A4, ohne Rejuvenator)

Die Asphalttragschichtvarianten (Tabelle 83, Abbildung 105) wurden einer detaillierten statistischen Prüfung unterzogen, um neben dem Einfluss des Aufbereitungsverfahrens auch den Einfluss der Bitumensorte und des Zugabebindemittelgehalts zu untersuchen.

Erwartungsgemäß unterscheidet sich die Variante A40.2 (Bitumen 50/70) signifikant von allen Varianten mit dem resultierenden Zielbindemittel 30/45 (A40.1, A41, A42.1, A42.2).

Tabelle 83: Mittelwerte $|E^*|$ (oberer Wert) und Standardabweichungen s^2 (unterer Wert) des Steifigkeitsmoduls für die A4-Mischgutvarianten (AC 22 T S) für die Temperaturen T und ausgewählte Frequenzen f

T [°C]	f [Hz]	Asphaltvariante				
		A40.1 $ E^* / s^2$ [MPa]	A40.2 $ E^* / s^2$ [MPa]	A41 $ E^* / s^2$ [MPa]	A42.1 $ E^* / s^2$ [MPa]	A42.2 $ E^* / s^2$ [MPa]
-10	1,0	23.379	19.233	24.753	22.983	23.689
		448,6	2.020,4	674,4	335,1	178,0
	10	27.387	21.713	28.971	27.201	27.736
		441,4	1.931,5	753,5	407,4	121,9
0	1,0	18.659	14.122	19.533	17.286	18.584
		633,0	1.606,6	1.407,1	822,9	976,4
	10	23.639	18.368	24.561	21.588	23.342
		604,8	1.825,0	1.793,4	1.304,3	1.006,4
10	1,0	13.240	9.087	13.299	11.736	13.136
		773,4	876,6	1.215,3	524,7	728,9
	10	18.968	14.111	19.327	17.495	18.837
		966,3	1.355,4	1.380,5	660,8	732,8
20	1,0	8.002	5.230	8.025	6.866	7.988
		682,2	452,0	860,2	314,0	400,2
	10	13.662	9.439	13.668	12.070	13.365
		976,3	852,5	1.247,8	378,4	776,8

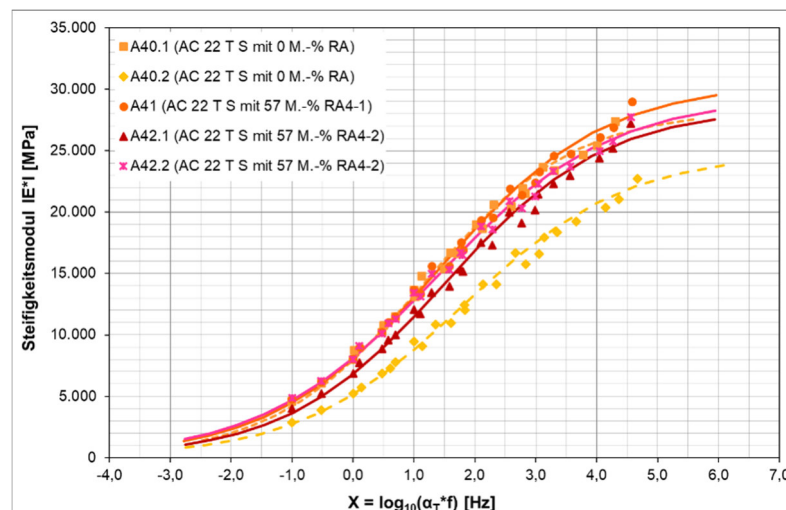


Abbildung 105: Masterkurve des Steifigkeitsmoduls $|E^*|$ der A4-Mischgutvarianten (AC 22 T S)

Zwischen der konventionellen Variante A41 und der RSB-Variante mit korrigiertem Zugabebindemittelgehalt (A42.2) konnte im gesamten Temperaturbereich kein statistisch signifikanter Unterschied nachgewiesen werden, während beim Vergleich von A41 mit A42.1 (RSB, ur-

sprüngliches Design) statistische Gleichheit hingegen nur im Bereich von 0 °C bis 20 °C festgestellt wurde. Dies belegt, dass durch eine präzise Abstimmung des Bindemitteldesigns eine vollständige Parität zwischen konventioneller und RSB-Aufbereitung auf Asphaltebene erzielt werden kann.

Beurteilung der Einflussfaktoren auf das Steifigkeitsverhalten der Asphalte

Die skalenübergreifende Analyse der Steifigkeit vom Bindemittel über den Mörtel bis zum Asphalt erlaubt folgende materialtechnische Einordnungen.

Die Ergebnisse der Asphalttragschichten (Mischgutgruppe A4) belegen, dass die Steifigkeit des Asphalts wesentlich durch die rheologische Charakteristik des (resultierenden) Bindemittels bestimmt wird. Der signifikante Unterschied zwischen der Variante A40.2 (Straßenbaubitumen 50/70) und den Varianten mit dem Zielbindemittel 30/45 verdeutlicht, dass die viskoelastische Antwort des Gesamtsystems maßgeblich von der Härte des resultierenden Bindemittelgemisches gesteuert wird.

Während bei den Asphalttragschichten (A4) und den Asphaltbetondeckschichten (A2) eine weitgehende Gleichheit zwischen den Asphaltgranulatvarianten erzielt wurde, zeigen die Mischgutsorten der Gruppen A1 (SMA) und A3 (Asphaltbinder) deutliche Abweichungen. Besonders bei der Gruppe A3 lässt sich die beobachtete Performance direkt auf die Bindemittalebene zurückführen. Die höhere Steifigkeit der RSB-Variante (A32) gegenüber der konventionellen Aufbereitung (A31) setzt sich konsistent von der Rheologie des extrahierten Bindemittels bis in das fertige Asphaltgefüge fort.

Unterschiede in der Steifigkeit zwischen den Aufbereitungsverfahren trotz identischem Zielbindemittel (z.B. A11 vs. A12) können häufig auf volumetrische Kenngrößen zurückzuführen sein. Abweichungen im Hohlraumgehalt oder in der Packungsdichte des Gesteinsgerüsts verändern die Lastabtragung. Da der Steifigkeitsmodul sensitiv auf Veränderungen in der Zusammensetzung und den volumetrischen Kenndaten reagiert, können bereits geringfügige Inhomogenitäten in der Probekörperherstellung zu messbaren Unterschieden führen.

Zusammenfassende Bewertung für das Steifigkeitsverhalten der Asphalte

Im direkten Vergleich zwischen der konventionellen Aufbereitung und dem Rotorschleuderschleuderbrecher-Verfahren (RSB) lässt sich resümieren, dass das RSB-Verfahren hinsichtlich des Steifigkeitsverhaltens mindestens gleichwertige Ergebnisse liefert. Bei den Asphaltarten der Mischgutgruppen A2 und A4 konnte eine statistische Gleichwertigkeit der Steifigkeitsmoduln nachgewiesen werden. Die Untersuchungen zeigen außerdem, dass eine präzise Abstimmung des Bindemitteldesigns (wie z.B. A42.2) etwaige aufbereitungsbedingte Unterschiede nivellierte und zu einer identischen mechanischen Performance im fertigen Asphaltmischgut führte.

4.1.5.2 Ermüdungsverhalten

Die Ermüdungsfunktionen der Asphaltvarianten sind getrennt nach Mischgutgruppen in Abbildung 106 bis Abbildung 109 dargestellt und wurden analog zum Verfahren nach Dragon (51) statistisch untersucht. Hierzu wurden ebenso die experimentell ermittelten Lastwechselzahlen bis zum Versagen über eine Regressionsrechnung in lineare Funktionen der Form $\log_{10}(N_{\max}) = n' + k' \cdot \log_{10}(\varepsilon_{el,anf})$ überführt. Die Regressionsparameter n' (Achsenabschnitt) und k' (Steigung), die Bestimmtheitsmaße R^2 sowie die Standardabweichungen s^2 der linearisierten Ermüdungsfunktionen sind in Tabelle 84 bis Tabelle 87 zusammengefasst. Alle statistischen Prüfungen basieren auf einer Irrtumswahrscheinlichkeit von $\alpha = 5 \%$.

SMA 11 S (Mischgutvarianten A1, mit Rejuvenator)

Für die SMA-Varianten konnte die Nullhypothese (H_0) hinsichtlich der Gleichheit der Steigungen (k') im globalen Test beibehalten werden. Die Prüfung der Achsenabschnitte (n') führte hingegen zur Ablehnung der Gleichheit (Tabelle 84, Abbildung 106).

Tabelle 84: Regressionsparameter der linearisierten Ermüdungsfunktionen, Bestimmtheitsmaße und Standardabweichungen der A1-Mischgutvarianten (SMA 11 S)

	Asphaltvariante		
	A10	A11	A12
Regressionsparameter n'	2,4257	2,1065	2,2548
Regressionsparameter k'	-3,4946	-3,5085	-3,3619
Bestimmtheitsmaß R^2	0,992	0,998	0,996
Standardabweichung s^2	0,148	0,069	0,099

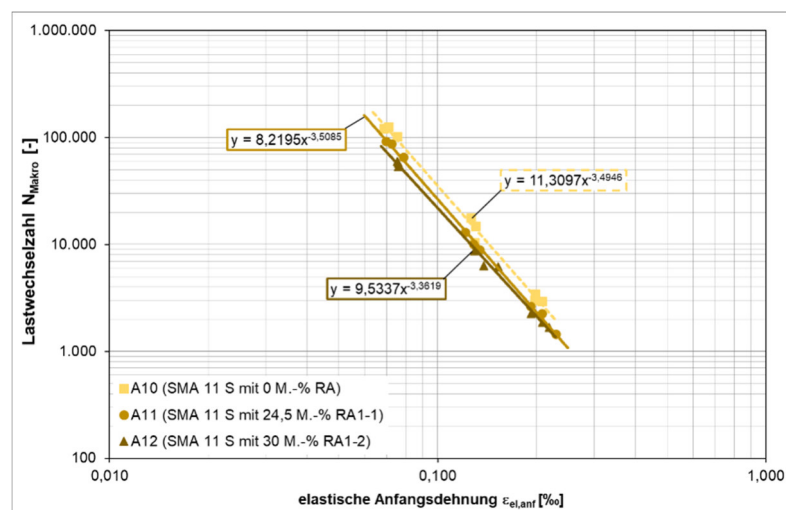


Abbildung 106: Ermüdungsfunktionen der A1-Mischgutvarianten (SMA 11 S)

Die nachgeschalteten paarweisen Vergleiche belegen signifikante Unterschiede zwischen allen drei Varianten (A10, A11 und A12). Damit unterscheiden sich auch die beiden Asphaltgranulatvarianten A11 und A12 statistisch gesichert in ihrem Ermüdungsverhalten. Basierend auf den Regressionsparametern ergibt sich für die zu erwartenden Lastwechselzahlen die

Reihung $A10 > A11 > A12$. Die Referenz ohne Asphaltgranulat weist somit die höchste Ermüdungsresistenz auf.

AC 8 D SP (Mischgutvarianten A2, mit Rejuvenator)

Bei den Asphaltbetondeckschichten ergab die globale Prüfung der Steigungen eine Ablehnung von H_0 , während die Achsenabschnitte statistisch als gleich eingestuft wurden (Tabelle 85, Abbildung 107).

Tabelle 85: Regressionsparameter der linearisierten Ermüdungsfunktionen, Bestimmtheitsmaße und Standardabweichungen der A2-Mischgutvarianten (AC 8 D SP)

	Asphaltvariante		
	A20	A21	A22
Regressionsparameter n'	2,1759	1,4841	1,0239
Regressionsparameter k'	-3,6969	-3468	-4,2271
Bestimmtheitsmaß R^2	0,994	0,998	0,992
Standardabweichung s^2	0,180	0,101	0,224

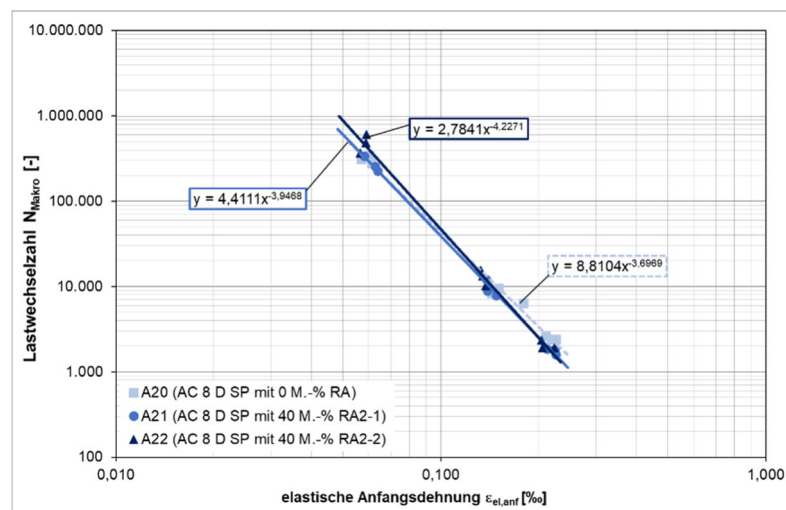


Abbildung 107: Ermüdungsfunktionen der A2-Mischgutvarianten (AC 8 D SP)

Im paarweisen Vergleich zeigte sich zwischen der Variante ohne Asphaltgranulat A20 und der RSB-Variante A22 ein signifikanter Unterschied in der Steigung. Zwischen A20 und A21 sowie zwischen den beiden Asphaltgranulatvarianten A21 und A22 konnten hingegen keine statistisch gesicherten Differenzen ermittelt werden. Für eine elastische Dehnung von $\varepsilon \leq 0,1 \text{ ‰}$ ergibt sich die Reihung, dass A20 geringere Lastwechselzahlen erzielt als A22.

AC 16 B S SG (Mischgutvarianten A3, ohne Rejuvenator)

Die globale Prüfung der Asphaltbinderschichtvarianten führte bei den Steigungen zur Ablehnung der Nullhypothese. Die Achsenabschnitte wurden in allen Fällen als statistisch gleich bewertet (Tabelle 86, Abbildung 108).

Der paarweise Vergleich identifizierte den Unterschied in der Steigung zwischen A30 (ohne RA) und A32 (RSB-Granulat) als signifikant. Zwischen A30/A31 sowie A31/A32 wurde hingegen Gleichheit der Steigungen angenommen. Analog zur Mischgutsorte A2 führt dies bei geringen Dehnungen ($\varepsilon \leq 0,1 \text{ ‰}$) zu einer Reihung, bei der die Referenz A30 niedrigere Lastwechselzahlen aufweist als die RSB-Variante A32.

Tabelle 86: Regressionsparameter der linearisierten Ermüdungsfunktionen, Bestimmtheitsmaße und Standardabweichungen der A3-Mischgutvarianten (AC 16 B S SG)

	Asphaltvariante		
	A30	A31	A32
Regressionsparameter n'	0,9054	-0,0598	-1,0429
Regressionsparameter k'	-3,8953	-4,2550	-4,7340
Bestimmtheitsmaß R^2	0,987	0,991	0,991
Standardabweichung s^2	0,229	0,221	0,218

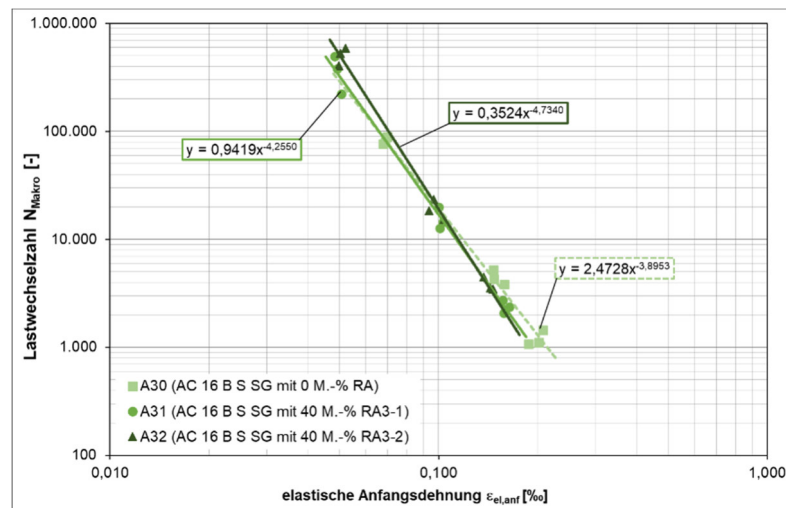


Abbildung 108: Ermüdungsfunktionen der A3-Mischgutvarianten (AC 16 B S SG)

AC 22 T S (Mischgutvarianten A4, ohne Rejuvenator)

Der globale F-Test der fünf Asphalttragschichtvarianten bestätigte die Gleichheit der Steigungen, lehnte jedoch die Gleichheit der Achsenabschnitte ab (Tabelle 87, Abbildung 109).

Tabelle 87: Regressionsparameter der linearisierten Ermüdungsfunktionen, Bestimmtheitsmaße und Standardabweichungen der A4-Mischgutvarianten (AC 22 T S)

	Asphaltvariante				
	A40.1	A40.2	A41	A42.2	A42.1
Regressionsparameter n'	-1,3943	-2,6352	-2,1039	-1,0405	-1,5526
Regressionsparameter k'	-4,6291	-4,5717	-4,6861	-4,2357	-4,5002
Bestimmtheitsmaß R^2	0,955	0,965	0,994	0,984	0,966
Standardabweichung s^2	0,311	0,328	0,117	0,188	0,233

Die paarweise Analyse identifizierte zwei Hauptursachen für die globale Abweichung:

- Der Vergleich der Variante A40.2 (50/70) mit allen Varianten auf Basis des Zielbindemittels 30/45 (A40.1, A41, A42.1, A42.2).
- Der Vergleich der Referenz A40.1 mit den drei Asphaltgranulatvarianten (A41, A42.1, A42.2).

Das wichtigste Ergebnis für die Asphalttragschicht ist, dass zwischen den drei Varianten mit Asphaltgranulat (A41, A42.1 und A42.2) kein statistisch signifikanter Unterschied in den Ermüdungsfunktionen besteht. Gemäß Abbildung 109 ergibt sich folgende Reihung der Lastwechselzahlen: $A40.2 < A41 \approx A42.1 \approx A42.2 < A40.1$.

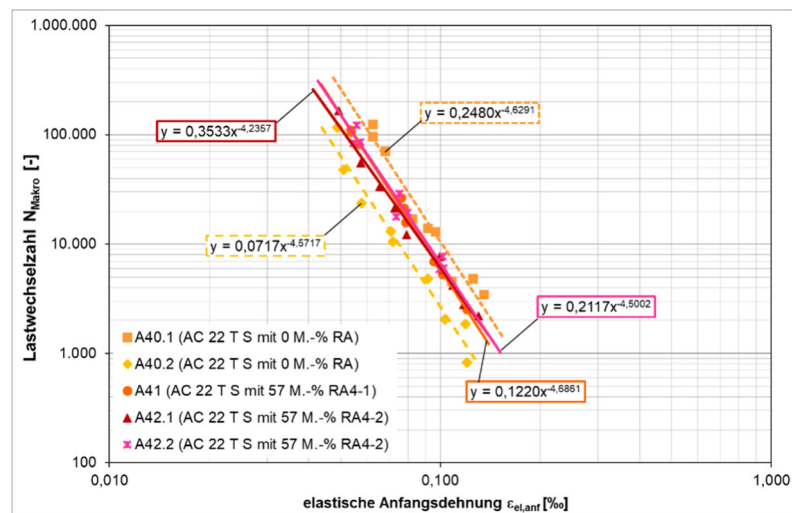


Abbildung 109: Ermüdungsfunktionen der A4-Mischgutvarianten (AC 22 T S)

Beurteilung der Einflussfaktoren auf das Ermüdungsverhalten der Asphalte

Die Analyse der Ermüdungsfunktionen im Asphalt erlaubt unter Einbeziehung der vorangegangenen Untersuchungsebenen (Bindemittel und Mörtel) sowie im Hinblick auf den Vergleich der Aufbereitungsverfahren folgende materialtechnische Einordnung.

Ein wesentliches Ergebnis ist die statistisch belegte Gleichwertigkeit der Aufbereitungsmethoden. Bei den Mischgutsorten A2, A3 und A4 konnten keine signifikanten Unterschiede im Ermüdungswiderstand zwischen der konventionellen Aufbereitung und dem RSB-Verfahren (bei abgestimmtem Bindemitteldesign) nachgewiesen werden. Dies belegt, dass die mechanische Zerkleinerung im Rotorschleuderbrecher keine negativen Auswirkungen auf die Dauerhaftigkeit des Asphaltgefüges hat.

Im Vergleich zur Mörtелеbene (Abschnitt 4.1.4.2) weist die Prüfung am Asphaltmischgut eine deutlich höhere Trennschärfe auf. Mit Bestimmtheitsmaßen von $R^2 > 0,98$ wird deutlich, dass die beobachtete Gleichwertigkeit zwischen RSB- und konventioneller Variante nicht auf Prüfstreuungen (wie im Mörtel), sondern auf einer tatsächlichen performance-bezogenen Äquivalenz der Asphaltgemische beruht.

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass der Ermüdungswiderstand der untersuchten Varianten maßgeblich von der rheologischen Qualität des resultierenden Bindemittels und weniger von der morphologischen Beschaffenheit des Asphaltgranulats (Kornform, Bruchflächigkeit) beeinflusst zu werden scheint. Die bei den SMA-Varianten (A11 und A12) kann die beobachtete Reduktion der Ermüdungsresistenz gegenüber der Referenzvariante A10 sowohl auf die komplexe Interaktion in der Bindemittelphase (RA-Bindemittel/Zugabebitumen/Rejuvenator) als auch auf Unterschiede in den volumetrischen Eigenschaften zurückgeführt werden.

Zusammenfassende Bewertung für das Ermüdungsverhalten der Asphalte

Im direkten Vergleich der Aufbereitungsverfahren lässt sich konstatieren, dass die mit dem Rotorschleuderbrecher (RSB) aufbereiteten Untersuchungsvarianten eine zum konventionellen Verfahren gleichwertige Ermüdungsperformance aufweisen.

Obwohl das RSB-Verfahren durch die Erhöhung der Kubizität der feinen Gesteinskörnungen und der Bruchflächigkeit der groben Gesteinskörnungen (A3 und A4) theoretisch Vorteile in der inneren Reibung erwarten lassen würde, führte dies hier bei der Ermüdungsresistenz nicht zu einer statistisch gesicherten Überlegenheit.

Für die Praxis kann außerdem resümiert werden, dass die Ermüdungsresistenz vielmehr vorrangig durch die rheologische Einstellung des Zielbindemittels, die Korngrößenverteilung und den Hohlraumgehalt des Asphaltmischguts determiniert wird (51).

4.1.5.3 Tieftemperaturverhalten

Die Charakterisierung des Tieftemperaturverhaltens erfolgte über die Bestimmung der Bruchtemperatur T_F , der Bruchspannungen $\sigma_{kryo,F}$ (aus dem Abkühlversuch/TSRST) sowie der Zugfestigkeiten $\beta_{t(T)}$ (aus dem Zugversuch/UTST). In Tabelle 88, Tabelle 90, Tabelle 92 und Tabelle 94 sind die Mittelwerte und Standardabweichungen für die jeweiligen Asphaltmischgutsorten zusammengefasst. Die Abbildung 110 bis Abbildung 113 illustrieren die Verläufe der kryogenen Spannungen, der Zugfestigkeiten sowie der daraus resultierenden Zugfestigkeitsreserven $\Delta\beta_{t(T)}$. Die zugehörigen Regressionsparameter der Funktionen der kryogenen Spannung in Abhängigkeit von der Temperatur sind in Tabelle 89, Tabelle 91, Tabelle 93 und Tabelle 95 aufgeführt.

SMA 11 S (Mischgutvarianten A1, mit Rejuvenator)

Für die SMA-Varianten (Tabelle 88) konnte mittels einfaktorieller Varianzanalyse ($\alpha = 5 \%$) statistische Gleichheit für die Parameter T_F und $\sigma_{kryo,F}$ sowie für $\beta_{t(T)}$ bei 20 °C, 5 °C und -25 °C festgestellt werden.

Bei der Temperatur -10 °C wurde die Nullhypothese, dass die Zugfestigkeiten gleich sind, abgelehnt. Der paarweise Vergleich zeigt signifikante Unterschiede zwischen der Referenz

A10 und den Asphaltgranulatvarianten A11/A12, wobei A10 geringere Zugfestigkeiten aufweist.

Tabelle 88: Mittelwerte x^* und Standardabweichungen s^2 der Bruchtemperaturen T_F , der Bruchspannungen $\sigma_{kryo,F}$ und der Zugfestigkeiten $\beta_{t(T)}$ bei 20 °C, 5 °C, -10 °C und -25 °C für die A1-Mischgutvarianten (SMA 11 S)

Kennwert	Einheit	Asphaltvariante					
		A10		A11		A12	
		x^*	s^2	x^*	s^2	x^*	s^2
T_F	°C	-24,8	0,25	-25,1	0,40	-25,9	0,71
$\sigma_{kryo,F}$	MPa	4,637	0,0689	4,744	0,0771	4,621	0,0779
$\beta_{t(20\text{ °C})}$	MPa	0,926	0,0736	0,807	0,0613	0,885	0,0698
$\beta_{t(5\text{ °C})}$	MPa	3,736	0,2774	3,799	0,0047	3,671	0,0924
$\beta_{t(-10\text{ °C})}$	MPa	4,888	0,0912	5,589	0,1800	5,394	0,2417
$\beta_{t(-25\text{ °C})}$	MPa	4,348	0,0804	4,281	0,3083	4,414	0,4414

Tabelle 89: Regressionsparameter für die Funktion der kryogenen Spannung σ_{kryo} in Abhängigkeit von der Temperatur für die A1-Mischgutvarianten (SMA 11 S)

Regressionsparameter	Asphaltvariante		
	A10	A11	A12
C_1	$1,6746 \cdot 10^{-7}$	$-3,4101 \cdot 10^{-7}$	$-5,2485 \cdot 10^{-7}$
C_2	$-9,1862 \cdot 10^{-5}$	$-8,3846 \cdot 10^{-5}$	$-8,8776 \cdot 10^{-5}$
C_3	0,00327631	+0,00336736	0,00320883
C_4	-0,04541463	-0,04857335	-0,03892774
C_5	0,28348522	0,32128701	0,23831022

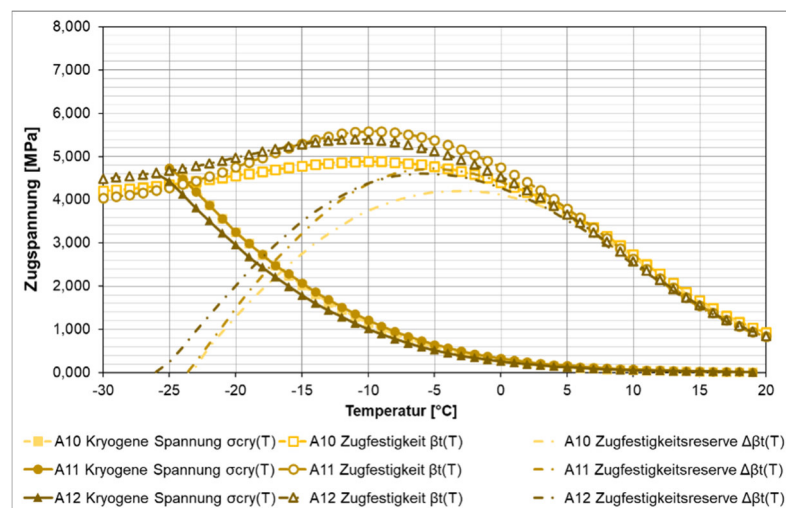


Abbildung 110: Verlauf der kryogenen Spannung $\sigma_{kryo(T)}$, der Zugfestigkeiten $\beta_{t(T)}$ und der Zugfestigkeitsreserven $\Delta\beta_{t(T)}$ in Abhängigkeit von der Temperatur der A1-Mischgutvarianten (SMA 11 S)

Zwischen den Asphaltgranulatvarianten A11 und A12 bestehen keine signifikanten Unterschiede. Die Verwendung von Asphaltgranulat führt hier tendenziell zu einer Erhöhung der Zugfestigkeit im mittleren Kältebereich, ohne die Bruchtemperatur negativ zu beeinflussen.

AC 8 D SP (Mischgutvarianten A2, mit Rejuvenator)

Die Asphaltbetondeckschichten (Tabelle 90) weisen eine hohe statistische Homogenität auf. Bruchtemperaturen, Bruchspannungen und Zugfestigkeiten sind über fast alle Prüftemperaturen hinweg als gleichwertig einzustufen.

Tabelle 90: Mittelwerte $\bar{x}^*$ und Standardabweichungen s^2 der Bruchtemperaturen T_F , der Bruchspannungen $\sigma_{kryo,F}$ und der Zugfestigkeiten $\beta_{t(T)}$ bei 20 °C, 5 °C, -10 °C und -25 °C für die A2-Mischgutvarianten (AC 8 D SP)

Kennwert	Einheit	Asphaltvariante					
		A20		A21		A22	
		$\bar{x}^*$	s^2	$\bar{x}^*$	s^2	$\bar{x}^*$	s^2
T_F	°C	-25,1	1,86	-25,2	0,95	-26,5	0,72
$\sigma_{kryo,F}$	MPa	4,637	0,4608	4,636	0,2853	5,038	0,2155
$\beta_{t(20\text{ °C})}$	MPa	1,249	0,0726	1,131	0,1248	1,266	0,0142
$\beta_{t(5\text{ °C})}$	MPa	4,543	0,1035	4,091	0,0390	4,319	0,0741
$\beta_{t(-10\text{ °C})}$	MPa	5,685	0,2313	6,147	0,7512	6,364	0,4246
$\beta_{t(-25\text{ °C})}$	MPa	4,745	0,1836	4,834	0,4589	5,138	0,2231

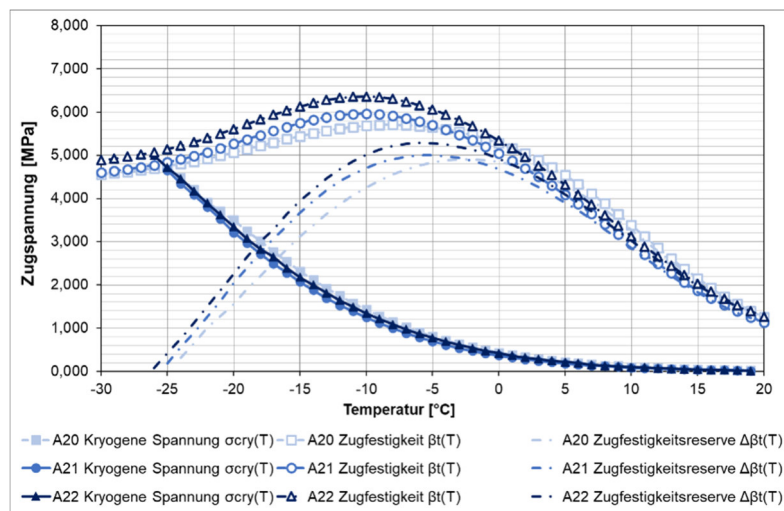


Abbildung 111: Verlauf der kryogenen Spannung $\sigma_{kryo(T)}$, der Zugfestigkeiten $\beta_{t(T)}$ und der Zugfestigkeitsreserven $\Delta\beta_{t(T)}$ in Abhängigkeit von der Temperatur der A2-Mischgutvarianten (AC 8 D SP)

Lediglich bezüglich der Zugfestigkeit bei 5 °C differieren alle drei Varianten signifikant mit der Reihung A20 > A22 > A21.

Das Tieftemperaturverhalten wird durch die Asphaltgranulatzugabe und das Aufbereitungsverfahren statistisch also hier nicht maßgeblich verändert.

Tabelle 91: Regressionsparameter für die Funktion der kryogenen Spannung σ_{kryo} in Abhängigkeit von der Temperatur für die A2-Mischgutvarianten (AC 8 D SP)

Regressionsparameter	Asphaltvariante		
	A20	A21	A22
C_1	$-1,4557 \cdot 10^{-6}$	$-3,2654 \cdot 10^{-7}$	$-7,5446 \cdot 10^{-7}$
C_2	$-6,9145 \cdot 10^{-5}$	$-7,5969 \cdot 10^{-5}$	$-7,1772 \cdot 10^{-5}$
C_3	0,00378966	0,00323545	0,00339524
C_4	-0,05968232	-0,05038405	-0,05533968
C_5	0,41889215	0,35618672	0,40747336

AC 16 B S SG (Mischgutvarianten A3, ohne Rejuvenator)

Bei den Asphaltbinderschichtvarianten (Tabelle 92) zeigt sich ein differenzierteres Bild. Während die Bruchspannungen $\sigma_{kryo,F}$ statistisch gleich sind, wurde die Nullhypothese für die Bruchtemperaturen T_F abgelehnt.

Tabelle 92: Mittelwerte $\bar{x}^*$ und Standardabweichungen s^2 der Bruchtemperaturen T_F , der Bruchspannungen $\sigma_{kryo,F}$ und der Zugfestigkeiten $\beta_{t(T)}$ bei 20 °C, 5 °C, -10 °C und -25 °C für die A3-Mischgutvarianten (AC 16 B S SG)

Kennwert	Einheit	Asphaltvariante					
		A30		A31		A32	
		$\bar{x}^*$	s^2	$\bar{x}^*$	s^2	$\bar{x}^*$	s^2
T_F	°C	-23,5	0,25	-21,8	0,57	-20,9	0,75
$\sigma_{kryo,F}$	MPa	5,191	0,0719	5,788	0,2745	5,554	0,5404
$\beta_{t(20\text{ °C})}$	MPa	1,221	0,0054	1,804	0,0685	2,127	0,0435
$\beta_{t(5\text{ °C})}$	MPa	4,532	0,0991	5,481	0,1852	5,682	0,0067
$\beta_{t(-10\text{ °C})}$	MPa	5,991	0,0711	7,060	0,1422	6,792	0,2628
$\beta_{t(-25\text{ °C})}$	MPa	5,042	0,1912	4,909	0,1528	4,952	0,0954

Tabelle 93: Regressionsparameter für die Funktion der kryogenen Spannung σ_{kryo} in Abhängigkeit von der Temperatur für die A3-Mischgutvarianten (AC 8 D SP)

Regressionsparameter	Asphaltvariante		
	A30	A31	A32
C_1	$-1,2391 \cdot 10^{-6}$	$-1,6267 \cdot 10^{-6}$	$-1,8423 \cdot 10^{-6}$
C_2	$-7,9094 \cdot 10^{-5}$	$-8,1680 \cdot 10^{-5}$	$-6,8858 \cdot 10^{-5}$
C_3	0,00439946	0,00537956	0,00546935
C_4	-0,07291375	-0,09798447	-0,10794076
C_5	0,49820628	0,69869368	0,80555196

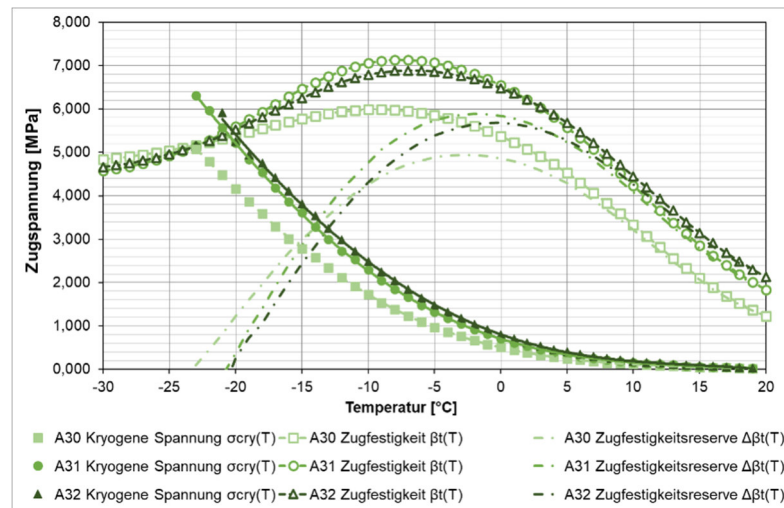


Abbildung 112: Verlauf der kryogenen Spannung $\sigma_{kryo(T)}$, der Zugfestigkeiten $\beta_{t(T)}$ und der Zugfestigkeitsreserven $\Delta\beta_{t(T)}$ in Abhängigkeit von der Temperatur der A3-Mischgutvarianten (AC 16 B S SG)

Die Variante ohne Asphaltgranulat A30 weist mit $-23,5\text{ °C}$ eine signifikant tiefere (günstigere) Bruchtemperatur auf als die Asphaltgranulatvarianten A31 ($-21,8\text{ °C}$) und A32 ($-20,9\text{ °C}$).

Außer bei -25 °C wurden signifikante Unterschiede für $\beta_{t(T)}$ festgestellt. Die Asphaltgranulatvarianten A31 und A32 verhalten sich bei 5 °C und -10 °C jedoch statistisch gleich und weisen höhere Zugfestigkeiten als die Variante A30 auf.

AC 22 T S (Mischgutvarianten A4, ohne Rejuvenator)

Die Asphalttragschichtvarianten (Tabelle 94) zeigen komplexe statistische Abhängigkeiten. Während die Bruchspannungen $\sigma_{kryo,F}$ über alle Varianten hinweg als gleich anzusehen sind, differieren die Bruchtemperaturen T_F signifikant.

Zwischen den Asphaltgranulatvarianten ergibt sich bezüglich der Bruchtemperatur die Reihung $A42.1 < A41 = A42.2$. Bemerkenswert ist, dass die Variante A42.1 (RSB) mit $-22,7\text{ °C}$ die günstigste Bruchtemperatur der Asphaltgranulatvarianten aufweist.

Tabelle 94: Mittelwerte $\bar{x}^*$ (oberer Wert) und Standardabweichungen s^2 (unterer Wert) der Bruchtemperaturen T_F , der Bruchspannungen $\sigma_{kryo,F}$ und der Zugfestigkeiten $\beta_{t(T)}$ bei 20 °C , 5 °C , -10 °C und -25 °C für die A4-Mischgutvarianten (AC 22 T S)

Kennwert	Einheit	Asphaltvariante				
		A40.1 $\bar{x}^* / s^2$	A40.2 $\bar{x}^* / s^2$	A41 $\bar{x}^* / s^2$	A42.1 $\bar{x}^* / s^2$	A42.2 $\bar{x}^* / s^2$
T_F	$^{\circ}\text{C}$	-19,3	-21,9	-20,3	-22,7	-18,2
		0,62	1,53	0,42	0,31	0,71
$\sigma_{kryo,F}$	MPa	3,033	2,953	4,318	3,555	3,421
		0,1986	0,4420	0,2392	1,0052	1,1264
$\beta_{t(20\text{ °C})}$	MPa	1,564	0,842	1,705	1,085	1,716
		0,1314	0,1002	0,3209	0,2083	0,0714

Kennwert	Einheit	Asphaltvariante				
		A40.1 x^* / s^2	A40.2 x^* / s^2	A41 x^* / s^2	A42.1 x^* / s^2	A42.2 x^* / s^2
$\beta_{t(5^\circ\text{C})}$	MPa	3,283	3,370	3,397	3,165	4,423
		0,4036	0,052	0,3198	0,2451	0,0552
$\beta_{t(-10^\circ\text{C})}$	MPa	4,272	3,573	4,532	4,099	5,438
		0,4108	0,2089	0,7977	0,5254	0,4243
$\beta_{t(-25^\circ\text{C})}$	MPa	3,398	2,784	3,800	3,824	3,369
		0,2582	0,1917	0,7449	0,6575	0,6194

Tabelle 95: Regressionsparameter für die Funktion der kryogenen Spannung σ_{kryo} in Abhängigkeit von der Temperatur für die A4-Mischgutvarianten (AC 22 T S)

Regressionsparameter	Asphaltvariante				
	A40.1	A40.2	A41	A42.1	A42.2
C_1	$-1,8857 \cdot 10^{-6}$	$-4,7678 \cdot 10^{-8}$	$-2,4621 \cdot 10^{-6}$	$-1,9047 \cdot 10^{-6}$	$-2,9703 \cdot 10^{-6}$
C_2	$-3,8842 \cdot 10^{-5}$	$-6,3813 \cdot 10^{-5}$	$-4,1518 \cdot 10^{-5}$	$-4,8171 \cdot 10^{-5}$	$-9,3358 \cdot 10^{-6}$
C_3	0,00339675	0,00266188	0,00448294	0,00340753	0,00435222
C_4	-0,06255890	-0,03994834	-0,09183000	-0,05506902	-0,10506812
C_5	0,48427180	0,25023924	0,73542275	0,38075368	0,90884170

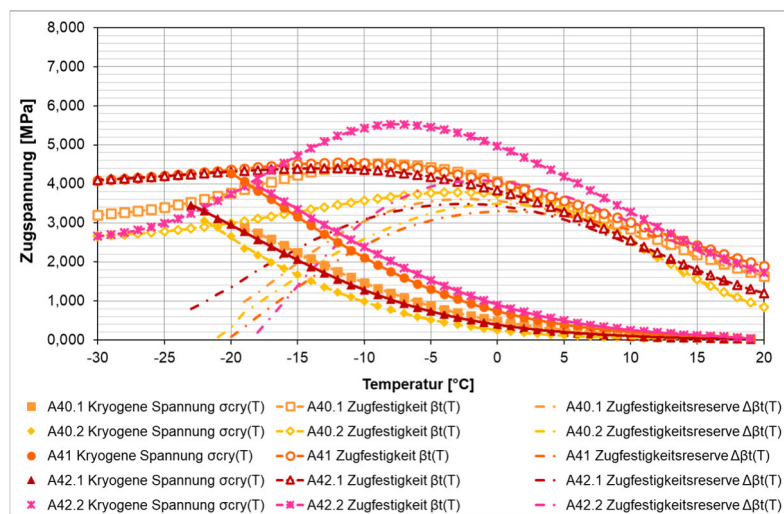


Abbildung 113: Verlauf der kryogenen Spannung $\sigma_{kryo(T)}$, der Zugfestigkeiten $\beta_{t(T)}$ und der Zugfestigkeitsreserven $\Delta\beta_{t(T)}$ in Abhängigkeit von der Temperatur der A4-Mischgutvarianten (AC 22 T S)

Die Ergebnisse der Zugfestigkeiten sind temperaturabhängig. Bei -10°C und $+5^\circ\text{C}$ sticht die Variante A42.2 durch signifikant höhere Zugfestigkeiten gegenüber den anderen Asphaltgranulatvarianten und der Referenz A40.1 hervor.

Ein wesentliches Ergebnis ist, dass zwischen den Varianten ohne Asphaltgranulat A40.1 (30/45) und A40.2 (50/70) trotz der unterschiedlichen Bitumenhärte keine statistisch signifikanten Unterschiede im Tieftemperaturverhalten (Bruchtemperatur und -spannung) vorliegen. Lediglich bei der Zugfestigkeit bei 20°C zeigt sich die stofflich erwartete Differenzierung.

Beurteilung der Einflussfaktoren auf das Tieftemperaturverhalten der Asphalte

Die skalenübergreifende Analyse der Kälteeigenschaften liefert unter Berücksichtigung der materialtechnischen Ergebnisse folgende Erkenntnisse.

Dass zwischen den Asphalttragschichtvarianten A40.1 (30/45) und A40.2 (50/70) keine signifikanten Unterschiede in der Bruchtemperatur T_F auftreten, ist die direkte Bestätigung der auf Bindemittlebene ermittelten BBR-Daten. Da beide Bitumensorten nahezu identische Temperaturen $T(S = 300 \text{ MPa})$ aufweisen (siehe Abschnitt 4.1.1.2), resultiert daraus eine konsistente Tieftemperatur-Performance im Asphaltgefüge. Dies belegt, dass die Kälteflexibilität des Bindemittels und nicht die nominelle Bitumensorte das Relaxationsvermögen im Asphalt determiniert.

Bei den A1- und A2-Varianten bleibt das Kälteverhalten trotz hoher Recyclinganteile durch den Einsatz von Rejuvenatoren stabil. Dies deutet darauf hin, dass die RSB-Aufbereitung die Kälteeigenschaften des Bindemittels im Vergleich zur konventionellen Technik mindestens gleichwertig erhält.

Bei den Asphaltbinderschichten führt die Verwendung von Asphaltgranulat ohne Rejuvenierung zu einer signifikanten Verschlechterung der Bruchtemperatur. Die Viskosität des resultierenden Bindemittels überlagert hierbei etwaige Einflüsse aus dem Aufbereitungsverfahren und begrenzt die viskoelastische Relaxation.

Der Vergleich innerhalb der RSB-Varianten der Asphalttragschichten verdeutlicht die Sensitivität gegenüber der Zugabemenge des Frischbitumens. Während die Variante A42.1 durch einen höheren Zugabebindemittelgehalt (70/100) das günstigste Relaxationsvermögen (tiefste T_F) aufweist, führt die Reduktion dieses Anteils (A42.2) auf das Maß von A41 auch zu einem Anstieg der Bruchtemperatur auf das Niveau der konventionellen Variante A41. Dies belegt, dass die Mengenanteile des weichen Frischbitumens eine deutlich stärkere Hebelwirkung auf das Kälteverhalten ausüben als das gewählte mechanische Aufbereitungsverfahren (RSB vs. konventionell).

Im Gegensatz zur Mörtелеbene weisen die Ergebnisse am Asphaltmischgut eine deutlich höhere Trennschärfe auf. Die Minimierung verfahrensbedingter Streuungen durch die standardisierte Probekörperherstellung und Prüfung erlaubt es, stoffliche und dosierungstechnische Einflüsse nun statistisch gesichert zu differenzieren.

Zusammenfassende Bewertung für das Tieftemperaturverhalten der Asphalte

Die zusammenfassende Beurteilung des Tieftemperaturverhaltens belegt die technologische Gleichwertigkeit zwischen dem RSB-Verfahren und der konventionellen Aufbereitung. Die Untersuchungen zeigen, dass etwaige prozessbedingte Unterschiede gegenüber den Einflüssen der Mischgutkonzeption (insbesondere der Rejuvenierung und der Dosierung des Zugabebindemittels) in den Hintergrund treten.

Das RSB-Verfahren ist somit als geeignet einzustufen, um Asphaltgranulat so aufzubereiten, dass die resultierenden Mischgüter – bei fachgerechter Abstimmung des Zugabebindemittels – ein zur konventionellen Aufbereitung mindestens gleichwertiges Kälteverhalten aufweisen.

4.1.5.4 Verformungsverhalten

Zur Bestimmung des Widerstandes gegen bleibende Verformungen wurde der einaxiale Druck-Schwellversuch an schlanken Probekörpern gemäß AL DSV slim (43) durchgeführt. Dieses Prüfverfahren erlaubt die Charakterisierung des plastischen Verformungsverhaltens von Asphalten unter zyklischer Belastung.

Die Auswertung nach AL DSV slim basiert auf einem Regressionsmodell, dessen Parameter A^* und B die Verformungskurve beschreiben. In Abbildung 114 ist exemplarisch die Korrelation zwischen dem Parameter A^* (temperaturunabhängig) bzw. A^*_T (temperaturabhängig) und der vertikalen elastischen Anfangsdehnung $\epsilon_{el,anf,vert}$ für die Referenzvariante A10 (SMA ohne Asphaltgranulat) dargestellt.

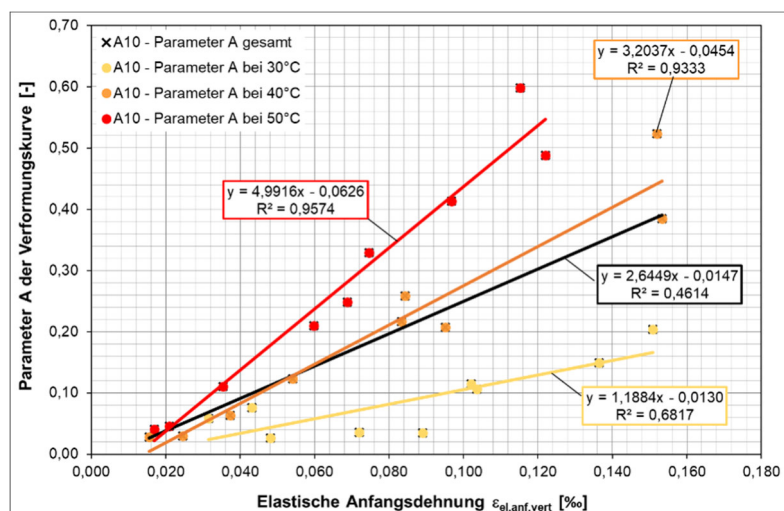


Abbildung 114: Korrelation zwischen Parameter A^* (temperaturunabhängig) und A_i (temperaturabhängig) und der vertikalen elastischen Anfangsdehnung $\epsilon_{el,anf,vert}$ für die A1-Mischgutvariante (SMA 11 S)

Dabei zeigt sich, dass die Zusammenfassung aller Prüftemperaturen (30 °C, 40 °C und 50 °C) in einer temperaturunabhängigen Funktion zu erheblichen Streuungen führt ($R^2 = 0,46$). Die Parameter weisen eine eindeutige Temperaturabhängigkeit auf, was eine belastbare, temperaturübergreifende Interpretation erschwert. Da ähnliche Streuungen beim Parameter B beobachtet wurden (Abbildung 115), ist ein direkter Variantenvergleich bzgl. des Einflusses der Aufbereitungsart auf Basis dieser Modellparameter nur eingeschränkt bzw. nicht möglich.

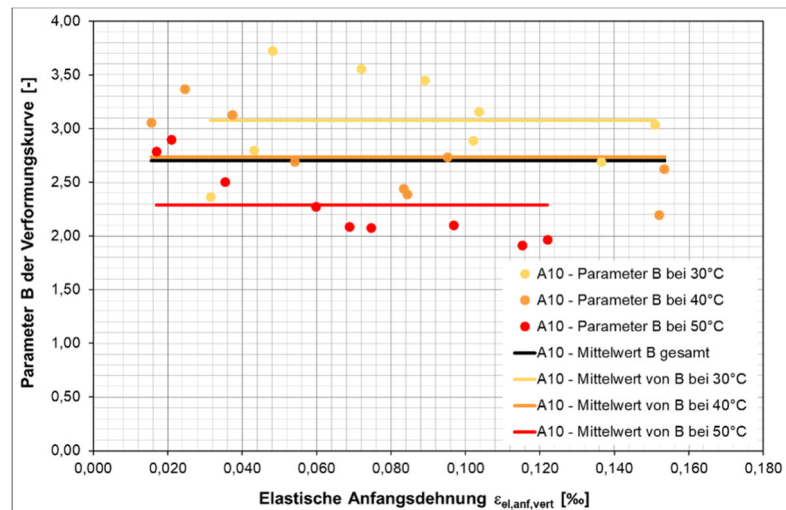


Abbildung 115: Korrelation zwischen Parameter B* (temperaturunabhängig) und B_i (temperaturabhängig) und der vertikalen elastischen Anfangsdehnung $\varepsilon_{el,anf,vert}$ für die A1-Mischgutvariante (SMA 11 S)

Aufgrund der methodischen Grenzen der Standardparameter nach AL DSV slim wird für den Variantenvergleich ein Ansatz nach DRAGON et al. (83) gewählt. Hierbei wird die kumulierte vertikale plastische Verformung $\varepsilon_{plast,vert}$ als Funktion der vertikalen elastischen Anfangsdehnung $\varepsilon_{el,anf,vert}$ betrachtet. Die statistische Untersuchung erfolgt über die linearisierte Form der Potenzfunktion: $\ln(\varepsilon_{plast,vert}) = a' + b' \cdot \ln(\varepsilon_{el,anf,vert})$. Die statistische Absicherung erfolgte wieder mittels globaler F-Tests auf einem Signifikanzniveau von $\alpha = 5 \%$ sowie anschließenden paarweisen Vergleichen (51).

SMA 11 S (Mischgutvarianten A1, mit Rejuvenator)

Der globale F-Test führte zur Annahme der Nullhypothese H_0 bzgl. der Gleichheit der Steigungen (b'), jedoch zur Ablehnung von H_0 bzgl. der Gleichheit der Achsenabschnitte (a'). Im paarweisen Vergleich zeigte sich, dass die Referenz A10 statistisch identisch mit A11 und A12 ist. Zwischen den Aufbereitungsvarianten A11 (konventionell) und A12 (RSB) wurde jedoch ein signifikanter Unterschied im Achsenabschnitt festgestellt, während die Steigungen gleichblieben (siehe Tabelle 96).

Tabelle 96: Regressionsparameter der linearisierten Funktionen für den Zusammenhang zwischen der kumulierten vertikalen plastischen Dehnung $\varepsilon_{plast,vert}$ und der vertikalen elastischen Anfangsdehnung $\varepsilon_{el,anf,vert}$, Bestimmtheitsmaße und Standardabweichungen der A1-Mischgutvarianten (SMA 11 S)

	Asphaltvariante		
	A10	A11	A12
Regressionsparameter a'	4,0587	4,1754	3,9586
Regressionsparameter b'	0,7568	0,8107	0,6754
Bestimmtheitsmaß R^2	0,726	0,918	0,893
Standardabweichung s^2	0,269	0,180	0,161

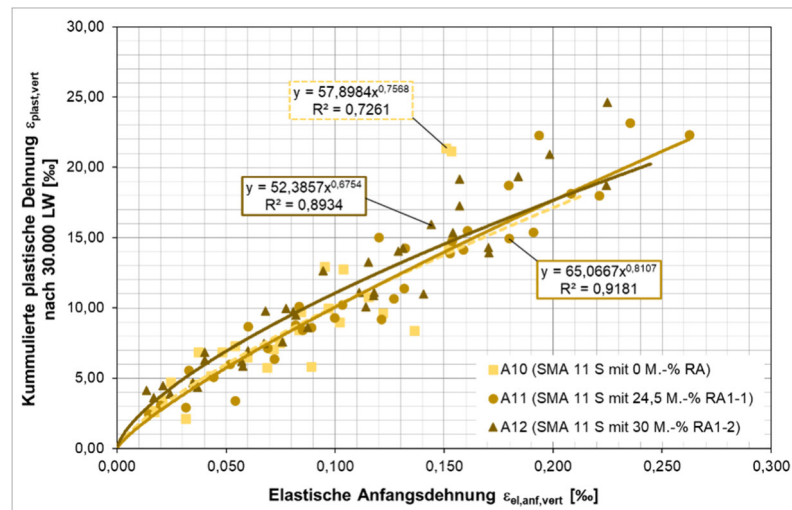


Abbildung 116: Funktionaler Zusammenhang zwischen der kumulierten vertikalen plastischen Dehnung $\epsilon_{\text{plast,vert}}$ und der vertikalen elastischen Anfangsdehnung $\epsilon_{\text{el,anf,vert}}$ für die A1-Mischgutvariante (SMA 11 S)

Tabelle 97: Regressionsparameter der linearisierten Funktionen für den Zusammenhang zwischen der kumulierten vertikalen plastischen Dehnung $\epsilon_{\text{plast,vert}}$ und der vertikalen elastischen Anfangsdehnung $\epsilon_{\text{el,anf,vert}}$, Bestimmtheitsmaße und Standardabweichungen der A2-Mischgutvarianten (AC 8 D SP)

	Asphaltvariante		
	A20	A21	A22
Regressionsparameter a'	4,2942	3,9362	4,5210
Regressionsparameter b'	0,9145	0,7808	1,0285
Bestimmtheitsmaß R^2	0,901	0,949	0,943
Standardabweichung s^2	0,184	0,138	0,255

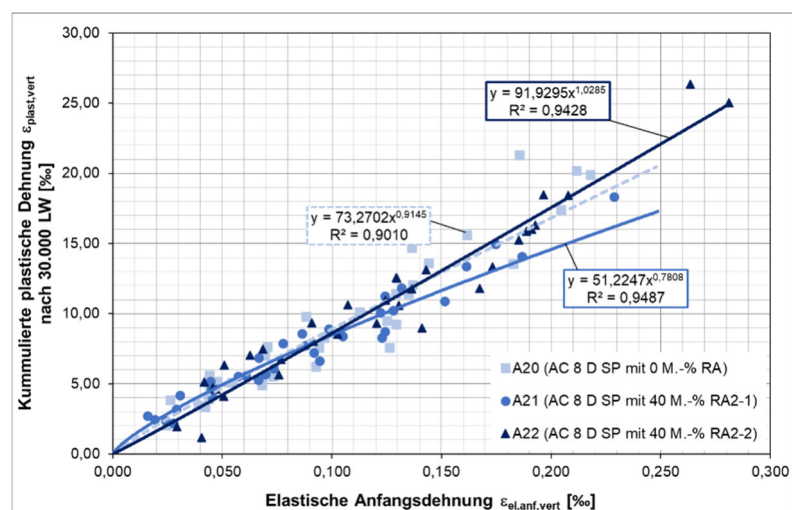


Abbildung 117: Funktionaler Zusammenhang zwischen der kumulierten vertikalen plastischen Dehnung $\epsilon_{\text{plast,vert}}$ und der vertikalen elastischen Anfangsdehnung $\epsilon_{\text{el,anf,vert}}$ für die A2-Mischgutvariante (AC 8 D SP)

AC 8 D SP (Mischgutvarianten A2, mit Rejuvenator)

Hier wurde im globalen F-Test die Gleichheit der Steigungen (b') abgelehnt, während die Achsenabschnitte (a') als statistisch gleich bewertet wurden. Die paarweisen Vergleiche bestätigten, dass die Referenz A20 keine signifikanten Unterschiede zu A21 oder A22 aufweist. Ein signifikanter Unterschied ergab sich ausschließlich zwischen A21 (konventionell) und A22 (RSB) hinsichtlich der Steigung der Regressionsgeraden (siehe Tabelle 97).

AC 16 B S SG (Mischgutvarianten A3, ohne Rejuvenator)

Der globale F-Test bestätigte die Gleichheit der Steigungen (b'), lehnte jedoch die Gleichheit der Achsenabschnitte (a') ab. Die paarweisen Vergleiche ergaben, dass die Referenz A30 statistisch identisch mit der RSB-Variante A32 ist, sich jedoch signifikant von der konventionellen Variante A31 unterscheidet. Zudem wurde ein signifikanter Unterschied im Achsenabschnitt zwischen den beiden Aufbereitungsvarianten A31 und A32 nachgewiesen).

Tabelle 98: Regressionsparameter der linearisierten Funktionen für den Zusammenhang zwischen der kumulierten vertikalen plastischen Dehnung $\varepsilon_{\text{plast,vert}}$ und der vertikalen elastischen Anfangsdehnung $\varepsilon_{\text{el,anf,vert}}$, Bestimmtheitsmaße und Standardabweichungen der A3-Mischgutvarianten (AC 16 B S SG)

	Asphaltvariante		
	A30	A31	A32
Regressionsparameter a'	1,0731	0,9642	1,0803
Regressionsparameter b'	4,4347	4,4083	4,4991
Bestimmtheitsmaß R^2	0,973	0,873	0,945
Standardabweichung s^2	0,137	0,238	0,293

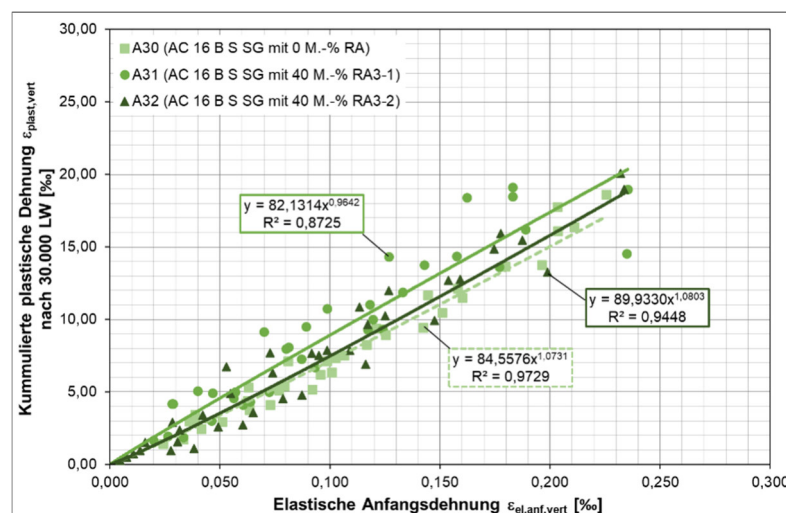


Abbildung 118: Funktionaler Zusammenhang zwischen der kumulierten vertikalen plastischen Dehnung $\varepsilon_{\text{plast,vert}}$ und der vertikalen elastischen Anfangsdehnung $\varepsilon_{\text{el,anf,vert}}$ für die A3-Mischgutvariante (AC 16 B S SG)

Beurteilung der Einflussfaktoren auf das Verformungsverhalten der Asphalte

Die statistische Analyse deutet darauf hin, dass die Art der Asphaltgranulataufbereitung (konventionell vs. RSB) das Verformungsverhalten der untersuchten Asphaltmischgüter beeinflussen kann. In den drei betrachteten Sorten (A1 bis A3) konnten im Druck-Schwellversuch signifikante Unterschiede zwischen den Varianten A11 vs. A12, A21 vs. A22 und A31 vs. A32 identifiziert werden.

Es ist jedoch eine differenzierte Betrachtung der Kausalität erforderlich. Da bei zahlreichen anderen Materialeigenschaften, welche im Rahmen des Forschungsprojektes bestimmt wurden, größtenteils kein statistisch signifikanter Einfluss der Aufbereitungsart nachgewiesen werden konnte, sollte die Interpretation hier mit Vorsicht erfolgen. Die festgestellten Differenzen im Verformungswiderstand zwischen konventioneller Aufbereitung und dem Einsatz des Rotorschleuderbrechers müssen nicht zwangsläufig allein auf die mechanische Aufbereitung des Asphaltgranulats zurückzuführen sein. Es ist nicht auszuschließen, dass überlagernde Einflussgrößen wie das Bindemitteldesign (insbesondere die Interaktion zwischen RA-Bindemittel, Zugabebitumen und ggf. Rejuvenator) sowie geringfügige Schwankungen im Hohlraumgehalt der Probekörper eine maßgebliche Rolle spielen. Die statistische Signifikanz im Verformungsverhalten könnte somit auch ein Resultat der kumulierten Wirkung dieser Parameter sein.

Zusammenfassende Bewertung für das Verformungsverhalten der Asphalte

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass das gewählte Aufbereitungsverfahren (RSB gegenüber konventionell) eine statistisch nachweisbare Einflussgröße auf das im Labor ermittelte Verformungsverhalten der im Forschungsprojekt untersuchten Asphalte darstellt. Dennoch wird dieser Einfluss als sekundär eingestuft. Die Ergebnisse legen nahe, dass die verfahrenstechnischen Unterschiede der Asphaltgranulataufbereitung im Vergleich zur grundlegenden Mischgutkonzeption und den dominierenden Parametern des Bindemitteldesigns sowie des Hohlraumgehaltes eine untergeordnete Rolle für die Verformungsbeständigkeit des Asphalts spielen. Ein signifikanter, isolierter Effekt der Aufbereitungstechnik auf die funktionale Dauerhaftigkeit lässt sich aufgrund der potenziellen Überlagerungen durch die genannten Rezepturparameter nicht zweifelsfrei ableiten.

4.1.5.5 Verdichtungsverhalten

Die Evaluation der Verdichtbarkeit des Asphaltmischguts erfolgte auf Grundlage der während des Verdichtungsprozesses im Gyrator aufgezeichneten Daten. Der Verdichtungs-widerstand T_{Gyrator} wurde in Anlehnung an die TP Asphalt-StB, Teil 10 B (31) unter Berücksichtigung der Probekörperhöhe und der spezifischen Verdichtungsarbeit (Anzahl der Gyrationen) berechnet. In Tabelle 99 bis Tabelle 102 sind die statistischen Kenngrößen der Verdichtungsversuche für die jeweiligen Asphaltarten zusammengefasst.

SMA 11 S (Mischgutvarianten A1, mit Rejuvenator)

Die Verdichtungsprüfungen der SMA-Varianten wurden bei einer Temperatur von 145 °C durchgeführt. Die einfaktorielle Varianzanalyse ($\alpha = 5\%$) ergab keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen den Varianten A10, A11 und A12 hinsichtlich des Verdichtungswiderstands.

Obwohl die Mittelwerte eine tendenzielle Zunahme des Widerstands von der Referenz A10 (68,4) hin zur RSB-Variante A12 (87,5) suggerieren, verhindert die sehr hohe Standardabweichung insbesondere bei A12 ($s^2 = 15,50$) eine statistische Differenzierung.

Tabelle 99: Mittelwerte $\bar{x}^*$ und Standardabweichungen s^2 des Verdichtungswiderstandes T_{Gyrator} bei 145 °C für die A1-Mischgutvarianten (SMA 11 S)

Kennwert	Einheit	Asphaltvariante					
		A10		A11		A12	
		$\bar{x}^*$	s^2	$\bar{x}^*$	s^2	$\bar{x}^*$	s^2
T_{Gyrator}	[-]	68,4	2,10	74,0	2,39	87,5	15,50

AC 8 D SP (Mischgutvarianten A2, mit Rejuvenator)

Bei den AC 8 D SP-Varianten ergab die Prüfung auf Gleichheit der Mittelwerte von T_{Gyrator} bei einer Verdichtungstemperatur von 145 °C eine Ablehnung der Nullhypothese ($\alpha = 5\%$).

Tabelle 100: Mittelwerte $\bar{x}^*$ und Standardabweichungen s^2 des Verdichtungswiderstandes T_{Gyrator} bei 145 °C für die A2-Mischgutvarianten (AC 8 D SP)

Kennwert	Einheit	Asphaltvariante					
		A20		A21		A22	
		$\bar{x}^*$	s^2	$\bar{x}^*$	s^2	$\bar{x}^*$	s^2
T_{Gyrator}	[-]	93,1	9,07	63,9	3,83	62,0	10,01

Der paarweise Vergleich belegt signifikante Unterschiede zwischen der Variante A20 ohne Asphaltgranulat und den beiden Asphaltgranulatvarianten A21 und A22. Die Variante A20 weist mit einem T_{Gyrator} von 93,1 einen deutlich höheren Verdichtungswiderstand auf als die Varianten A21 (63,9) und A22 (62,0). Zwischen den beiden Aufbereitungsverfahren konnte kein signifikanter Unterschied festgestellt werden.

Tabelle 101: Mittelwerte $\bar{x}^*$ und Standardabweichungen s^2 des Verdichtungswiderstandes T_{Gyrator} bei 145 °C für die A3-Mischgutvarianten (AC 16 B S SG)

Kennwert	Einheit	Asphaltvariante					
		A30		A31		A32	
		$\bar{x}^*$	s^2	$\bar{x}^*$	s^2	$\bar{x}^*$	s^2
T_{Gyrator}	[-]	74,1	8,55	58,1	5,43	62,7	0,46

AC 16 B S SG (Mischgutvarianten A3, ohne Rejuvenator)

Auch für die Asphaltbinderschichtvarianten musste die Nullhypothese der Gleichheit von T_{Gyrator} für bei einer Verdichtungstemperatur von 145 °C verworfen werden.

Der paarweise Vergleich ergab statistische Unterschiede zwischen den beiden Asphaltgranulatvarianten A31 und A32. Für die konventionell aufbereitete Variante A31 wurde ein geringerer Verdichtungswiderstand (58,1) ermittelt als für die RSB-Variante A32 (62,7).

AC 22 T S (Mischgutvarianten A4, ohne Rejuvenator)

Die Varianten der Asphalttragschicht wurden bei einer Verdichtungstemperatur von 135 °C geprüft. Die statistische Analyse konnte keine signifikanten Unterschiede zwischen den Varianten A40.1, A40.2, A41 und A42.1 nachweisen.

Tabelle 102: Mittelwerte $\bar{x}^*$ und Standardabweichungen s^2 des Verdichtungswiderstandes T_{Gyrator} bei 135 °C für die A4-Mischgutvarianten (AC 22 T S)

Kennwert	Einheit	Asphaltvariante							
		A40.1		A40.2		A41		A42.1	
		$\bar{x}^*$	s^2	$\bar{x}^*$	s^2	$\bar{x}^*$	s^2	$\bar{x}^*$	s^2
T_{Gyrator}	[-]	89,8	7,78	89,1	14,35	93,7	0,63	83,6	0,64

Beurteilung der Einflussfaktoren auf das Verdichtungsverhalten

Die Analyse der Verdichtungswiderstände im Gyrator erlaubt unter Berücksichtigung der viskoelastischen Bindemittleigenschaften (84) sowie der verfahrenstechnischen Grenzen folgende Einordnung.

Ein wesentlicher Faktor scheint die Bindemittelart bei Verdichtungstemperatur zu sein. Während polymermodifizierte Bindemittel eine ausgeprägte „Klebewirkung“ entfalten, wirkt das bei den Asphalttragschichten resultierende Straßenbaubitumen bei 135 °C vorrangig als „Schmierstoff“.

Dass die bessere Kornform der feinen Gesteinskörnungen und die höhere Bruchflächigkeit der groben Gesteinskörnungen in der RSB-Variante (A32) bei der Binderschicht zu einem höheren Widerstand im Vergleich zur konventionellen Variante (A31) führt, bei der Tragschicht (A4) hingegen nicht, scheint eine Grenze des Gyrator-Verfahrens zu verdeutlichen. Die mechanischen Vorteile der „optimierten“ Gesteinskörnung des RSB-RA werden hier durch den effektiven Schmierfilm des weichen Bindemittels „maskiert“. Der Gyrator scheint in diesem Fall nicht sensitiv genug, um die granulometrische Verbesserung der Gesteinskörnungen innerhalb des Asphaltmischgutes abzubilden.

Entsprechend den Praxiserfahrung müsste Asphaltmischgut mit Asphaltgranulat eine tendenziell leichtere Verdichtbarkeit aufweisen als Mischgut ohne. Bei den Varianten der Mischgutvarianten A2 ist dieser Effekt statistisch signifikant (A20 vs. A21/A22). Auch bei A3 ist eine entsprechende Tendenz zu niedrigeren Verdichtungswiderständen bei den Asphaltgranulatvarianten erkennbar, wenngleich diese statistisch nicht abgesichert werden konnte. Eine Ausnahme bilden die Asphalttragschichten (A4), bei denen weder signifikante Unterschiede

noch eine klare Tendenz hinsichtlich des Asphaltgranulateinflusses auf die Verdichtbarkeit ausgemacht werden konnten.

Anzumerken ist, dass die zum Teil erheblichen Standardabweichungen die statistische Trennschärfe begrenzen. Diese Streuungen resultieren aus der systembedingten Sensitivität des Gyrator-Verfahrens gegenüber geringfügigen Inhomogenitäten in der Mischgutstichprobe. Die Tatsache, dass trotz deutlicher Mittelwertdifferenzen (z.B. bei A1) statistische Gleichheit festgestellt wurde, unterstreicht die Notwendigkeit, stoffliche Trends stets im Kontext der vorliegenden Varianzen zu bewerten. Zudem ist festzuhalten, dass der im Labor ermittelte Verdichtungswiderstand T_{Gyrator} primär die Verarbeitbarkeit (Einbaubarkeit) unter Laborbedingungen beschreibt. Eine Korrelation zur späteren Verformungsbeständigkeit muss nicht zwingend gegeben sein (84).

Zusammenfassende Bewertung für das Verdichtungsverhalten der Asphalte

Die Untersuchung des Verdichtungsverhaltens liefert zwar ein Bild, dass eine weitgehende technologische Äquivalenz zwischen der RSB-Aufbereitung und den konventionellen Verfahren (A1, A2 und A4) aufzeigt. Dennoch muss auf die beschränkte statistische Trennschärfe aufgrund der zum Teil festgestellten erheblichen Standardabweichungen hingewiesen werden, welche die Belastbarkeit dieser Aussage im Einzelfall einschränken kann. Im Hinblick auf die Verarbeitbarkeit in der Praxis lässt sich jedoch konstatieren, dass das RSB-Verfahren ein Gesteinsgerüst liefert, welches die Einbaubarkeit nicht zu behindern scheint.

4.1.5.6 Zusammenfassung der Performance-Ergebnisse und Bewertung des Aufbereitungsverfahrens

In diesem Abschnitt werden die Einzelergebnisse der Untersuchungen zum Gebrauchsverhalten der Asphaltvarianten zusammengeführt, um die zentrale Forschungsfrage nach dem Einfluss des Aufbereitungsverfahrens (RSB vs. konventionell) auf die Asphaltperformance (siehe Abschnitt 1.3) zu beantworten. Dabei wird evaluiert, ob das RSB-Verfahren eine gleichwertige oder verbesserte Performance ermöglicht und in welchem Maße andere Einflussgrößen das Gesamtergebnis dominieren.

Die statistische Auswertung über die verschiedenen Skalen (Mörtel und Asphalt) zeigt für die untersuchten Asphalttragschichten sowie Asphaltdeck- und Asphaltbinderschichten, dass zwischen der konventionellen Aufbereitung und dem RSB-Verfahren weitestgehend keine systematischen signifikanten Unterschiede in den wesentlichen Performance-Parametern bestehen.

Beim Steifigkeitsverhalten konnte für die Variante A22 und für die Variante A42.2 (RSB mit korrigiertem Bindemittelgehalt) eine vollständige Deckungsgleichheit zur jeweils konventionellen Variante nachgewiesen werden.

Im Ermüdungsverhalten belegen die statistischen Analysen für die Mischgutsorten AC 8 D SP (A2), AC 16 B S SG (A3) und AC 22 T S (A4) eine Gleichwertigkeit der Ermüdungsfunktionen.

Das Tieftemperaturverhalten zeigt zwischen dem RSB-Verfahren und der konventionellen Aufbereitung von Asphaltgranulat bei den meisten Parametern keine signifikanten Unterschiede (A1 und A2). Tendenziell sind sogar günstigere Bruchtemperaturen als bei der konventionellen Aufbereitungsvariante möglich (A42.1 vs. A41).

Hinsichtlich des Verformungsverhaltens wurden im Druck-Schwellversuch zwar statistisch signifikante Differenzen zwischen den Aufbereitungsvarianten identifiziert; diese werden jedoch vor dem Hintergrund potenzieller Überlagerungen durch das Bindemitteldesign und den Hohlraumgehalt der Probekörper als sekundär bewertet, da sie die grundlegende technologische Gleichwertigkeit des RSB-Verfahrens bezüglich der Verformungsbeständigkeit nicht infrage stellen.

Beim Verdichtungsverhalten konnte für die Mischgutsorten SMA 11 S (A1), AC 8 D SP (A2) und AC 22 T S (A4) technologische Gleichwertigkeit zwischen der RSB-Aufbereitung und den konventionellen Verfahren festgestellt werden. Es muss jedoch kritisch angemerkt werden, dass die Aussagekraft des Verdichtungswiderstandes T_{Gyrator} aufgrund festgestellter hoher Standardabweichungen und mangelnder Plausibilität zum Gebrauchsverhalten hier methodisch begrenzt ist.

Ein wesentliches Ergebnis der Untersuchung ist, dass die Asphaltperformance weitaus stärker durch die Bindemittelcharakteristik (Härte des resultierenden Bindemittels, Einsatz von Rejuvenatoren) beeinflusst wird als durch die Art der mechanischen Aufbereitung des Asphaltgranulats. Die beobachteten Performance-Unterschiede scheinen demnach vorrangig auf die komplexe stoffliche Interaktion zwischen Zugabebitumen, evtl. Rejuvenatoren und RA-Bindemittel zurückzuführen zu sein und nicht auf das Aufbereitungsverfahren des Asphaltgranulats.

Die Hypothese, dass die Aufbereitung im Rotorschleuderbrecher (RSB) eine zur konventionellen Aufbereitung technologisch gleichwertige Performance erzeugt, kann unter Berücksichtigung der spezifischen Sensitivitäten (Verformungs- und Verdichtungswiderstand) weitestgehend gestützt werden. Das RSB-Verfahren ermöglicht eine qualitativ hochwertige Integration hoher Asphaltgranulatanteile, sofern die rheologischen Eigenschaften des resultierenden Bindemittelgemisches durch ein präzises Bindemittel-Design auf die jeweilige Asphaltsorte abgestimmt sind.

4.1.6 Zusammenhänge zwischen Mörtelperformance und Asphaltperformance

Im Rahmen der Zielsetzung des Forschungsvorhabens (vgl. Abschnitt 1.3) wart u.a. auch zu klären, inwieweit die von BÜCHNER et al. (16) postulierten Korrelationen zwischen den Gebrauchseigenschaften von Asphaltmastix und Asphaltmischgut auch auf der Ebene der Asphaltmörtel unter Einbeziehung von Asphaltgranulat verifiziert werden können.

Der methodische Ansatz folgt hierbei dem Upscaling-Prozess im Rahmen des Mehrskalensmodells „Bindemittel-Asphaltmastix-Asphaltmörtel-Asphaltmischgut-Asphaltschicht“ (85). Ziel dieses Modells ist es, die auf der Mörtelzebene ermittelten mechanischen Kennwerte durch eine erfolgreiche Homogenisierung auf das Gebrauchsverhalten des Asphalts zu übertragen. Für die Generierung der hierfür erforderlichen Modellansätze wurden Verfahren der Künstlichen Intelligenz (KI) implementiert. Die identifizierten Modelle werden nachfolgend beschrieben. Auf eine explizite Darstellung der spezifischen Regressionsparameter wird jedoch aufgrund der aktuell noch fehlenden Standardisierung der Prüfverfahren auf der Mörtelzebene bewusst verzichtet. Dies begründet sich vorrangig durch:

- Für die Versuchsdurchführung zur Ermittlung der verschiedenen Materialeigenschaften des Asphaltmörtels im DSR existiert bislang kein etabliertes Prüfverfahren.
- Es bestehen unterschiedliche Ansätze hinsichtlich des eingesetzten Prüfsystems (Platte-Platte oder DMA) sowie der Fixierung der Probekörper im Prüfgerät.
- Ein einheitliches Verfahren zur Herstellung des Asphaltmörtels und der Probekörper ist derzeit nicht verfügbar.
- Mit dem Jahr 2026 erfolgt die Umstellung des Asphaltregelwerkes auf temperaturabgesenkten Asphalt.

Allgemeingültige Modellansätze können daher erst nach einem genormten Prüfverfahren und umfassenden Validierung verschiedener Asphaltarten und Zusammensetzungen (z.B. Gesteinsart und -sorte, Korngrößenverteilung, Bindemittelart und -sorte unter Einsatz von Zusätzen, Asphaltgranulat usw.) formuliert werden.

4.1.6.1 Komplexer Schubmodul (Mörtel) und Steifigkeitsmodul (Asphalt)

Die Prognose des Steifigkeitsverhaltens von Asphalt auf Basis der Kenngrößen G^* und δ des Mörtels war bereits Gegenstand früherer Untersuchungen. RICARDI (86) fokussierte sich dabei auf die Übertragung des komplexen Schubmoduls unter Anwendung des Modells nach BARI & WITCZAK (87). Da dieses Modell aber auf Straßenbaubitumen beschränkt ist, im vorliegenden Vorhaben jedoch auch polymermodifizierte Bitumen (PmB) sowie Asphaltgranulat eingesetzt wurden, wurde auf Basis von 104 Wertepaaren ein erweitertes Modell mittels KI-gestützter polynomialer Regression (2. Ordnung) mit Lasso-Regularisierung entwickelt. Die mathematische Struktur folgt der (Formel 13):

$$|E|_{pred}^* = \beta_0 + \sum_i \beta_i x_i + \sum_{i \leq j} \beta_{ij} (x_i \cdot x_j) \quad (\text{Formel 13})$$

mit:

$ E^* _{pred}$	Berechneter Steifigkeitsmodul [MPa]
β_0, β_i	Regressionsparameter
x_i, x_j	Modellvariablen aus den nachfolgenden Parametern...
$\log_{10} \eta^* $	komplexe Viskosität aus G^* und Frequenz f [MPa · s]
δ	Phasenwinkel [rad]
$\log_{10}(f)$	Frequenz [Hz]
T	Temperatur [°C]
V	Hohlraumgehalt Asphalt [Vol.-%]
B	Bindemittelgehalt Asphalt [M.-%]
d_i	Siebdurchgänge der Korngrößenverteilung [M.-%]

In Abbildung 119 ist die Gegenüberstellung der berechneten Moduln $|E^*|_{pred}$ und der experimentell bestimmten Werte $|E^*|$ bei 1,0 Hz und 10 Hz (siehe Abschnitt 4.1.5.1) dargestellt. Das Modell erreicht eine Bestimmtheit von ca. 99,6 % der Varianz für die untersuchten Varianten (exklusive A42.2, da es hierzu keine Ergebnisse am Mörtel gibt). Die zusätzliche Validierung durch weitere Datensätze (grüne Messpunkte in Abbildung 119) bestätigt die grundsätzliche Anwendbarkeit des Modells für die gewählten Probekörperformen und Materialzusammensetzungen.

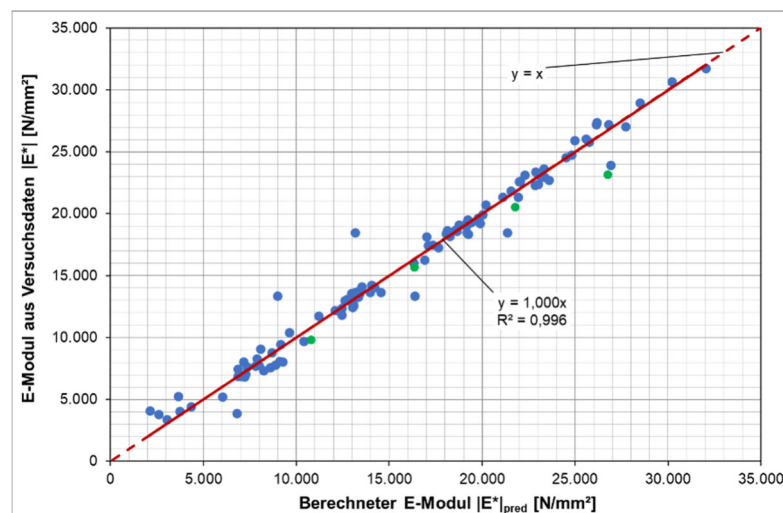


Abbildung 119: Gegenüberstellung der berechneten E-Moduln $|E^*|_{pred}$ und der zugehörigen versuchstechnisch bestimmten E-Moduln $|E^*|$

4.1.6.2 Ermüdungsfunktion

Zur Prognose der Modellparameter n_{pred} und k_{pred} der Asphalt-Ermüdungsfunktion (siehe Abschnitt 4.1.5.2) wurde ein Random-Forest-Regressor eingesetzt. Als Eingangsgrößen dienten

der Bindemittelgehalt B, der Hohlraumgehalt V und die Siebdurchgänge d_i der Korngrößenverteilungen der Asphaltmischgutvarianten sowie die mörtelspezifischen Parameter a und b der Ermüdungsfunktionen (vgl. Abschnitt 4.1.4.2). Die Modellierung erfolgt gemäß den (Formel 14) und (Formel 15).

$$k_{pred} = \beta_{0k} + \sum_i \beta_{ik} \cdot x_i \quad (\text{Formel 14})$$

$$n_{pred} = \beta_{0n} + \sum_i \beta_{in} \cdot x_i \quad (\text{Formel 15})$$

Dabei sind x_i die Eingangsgrößen (Modellvariablen) a, b, B, V, alle Siebkennwerte d_i (in der definierten Reihenfolge) und β_{0k} , β_{0n} , β_{ik} und β_{in} die Regressionskoeffizienten.

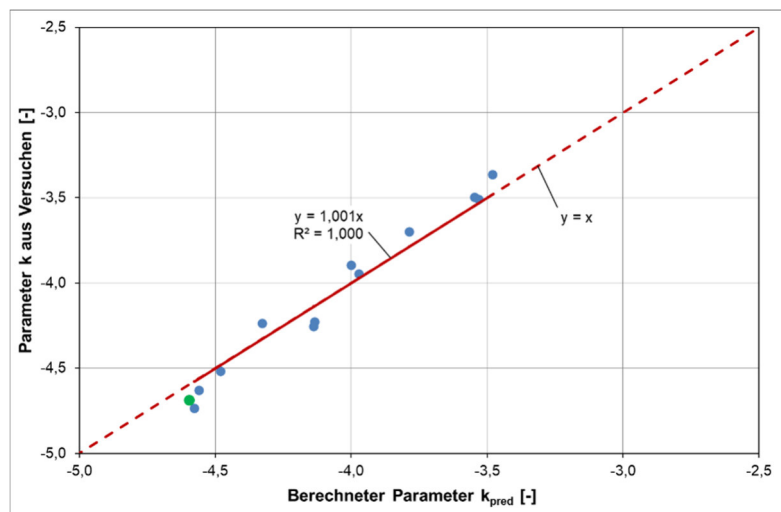


Abbildung 120: Gegenüberstellung der berechneten Regressionsparameter k_{pred} und der zugehörigen versuchstechnisch bestimmten Regressionsparameter k der Ermüdungsfunktionen der untersuchten Asphalte

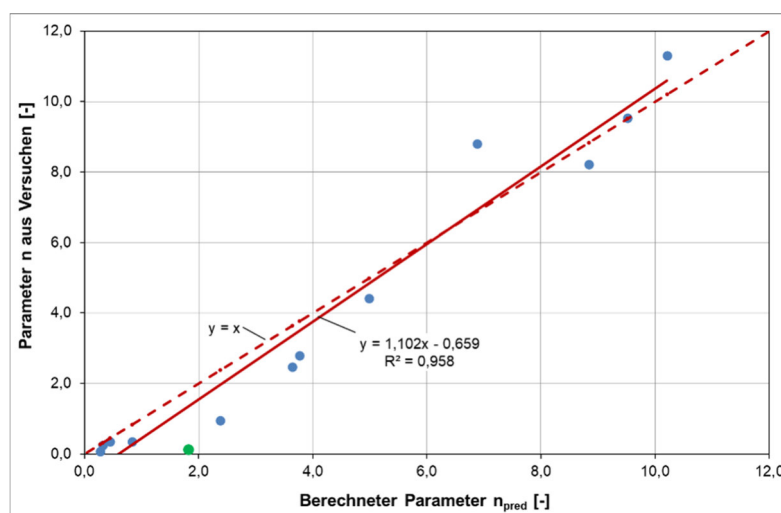


Abbildung 121: Gegenüberstellung der berechneten Regressionsparameter n_{pred} und der zugehörigen versuchstechnisch bestimmten Regressionsparameter n der Ermüdungsfunktionen der untersuchten Asphalte

Die Ergebnisse in Abbildung 120 zeigen für den Parameter k eine nahezu vollständige Übereinstimmung (100 % Varianzaufklärung). Für den Parameter n ergibt sich gemäß Abbildung 121 eine Varianzaufklärung von 97,4 %. Trotz der exzellenten Anpassung an die vorliegenden 12 Wertepaare ist die statistische Belastbarkeit aufgrund der geringen Datenmenge kritisch zu hinterfragen und bedarf weiterer Verifizierungen.

4.1.6.3 Tieftemperaturverhalten

Die Ableitung der kryogenen Spannungen des Asphalts ($\sigma_{kryo,A}$) aus den entsprechenden Mörtelwerten erfolgte unter Verwendung eines Ridge-Modells. Hierbei wurden 60 Wertepaare (stützend auf die Temperaturen 5 °C bis -15 °C) herangezogen. Der Modellansatz nach (Formel 16) berücksichtigt neben den Haupteinflüssen auch nichtlineare Wechselwirkungen zwischen Temperatur, Bindemittelgehalt und Gesteinskörnungen. Die allgemeine Formel lautet:

$$\sigma_{kryo,A,pred} = 10^{(\beta_0 + \sum_{j=1}^m \beta_j \cdot x_j + \sum_{j=1}^m \beta_{jj} \cdot x_j^2 + \sum_{j < k} \beta_{jk} \cdot x_j \cdot x_k)} \quad (\text{Formel 16})$$

mit:

$\sigma_{kryo,A,pred}$	Berechnete kryogene Spannung im Asphalt [MPa]
$\beta_0, \beta_j, \beta_{jj}, \beta_{jk}$	Regressionsparameter
x_j, x_k	Modellvariablen aus...
$\sigma_{kryo,M}$	Kryogene Spannung im Mörtel [MPa]
T	Temperatur [°C]
V	Hohlraumgehalt Asphalt [Vol.-%]
B	Bindemittelgehalt Asphalt [M.-%]
d_i	Siebdurchgänge der Korngrößenverteilung [M.-%]

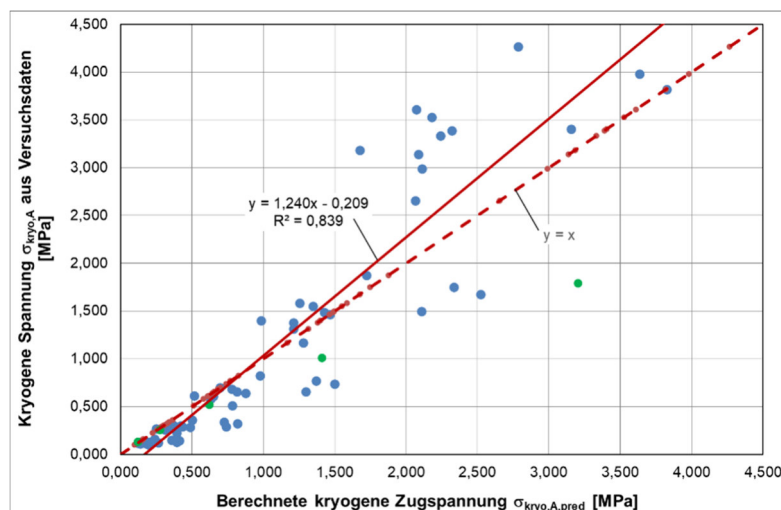


Abbildung 122: Gegenüberstellung der berechneten kryogenen Spannung $\sigma_{kryo,A,pred}$ und der zugehörigen versuchstechnisch bestimmten kryogenen Spannung $\sigma_{kryo,A}$ der untersuchten Asphalte

Wie Abbildung 122 verdeutlicht, erklärt das Modell ca. 83,9 % der Varianz. Es ist jedoch festzustellen, dass insbesondere im Bereich hoher kryogener Spannungen signifikante Abweichungen zwischen berechneten und gemessenen Werten auftreten. Die Gültigkeit dieses Ansatzes ist daher unter Berücksichtigung der in der Einleitung genannten Randbedingungen (Herstellungsprozess, Prüfpräzision) weiter zu untersuchen.

4.1.6.4 Verformungsverhalten

Auf eine Modellierung der Verformungskennwerte des Asphalts aus den Ergebnissen der Single-Stress-Creep-Recovery-Tests (SSCRT) am Mörtel wurde bewusst verzichtet. Die Ursache liegt in der systemischen Diskrepanz der Belastungsarten. Während der Mörtel beim SSCRT einer rein statischen Beanspruchung unterliegt, wird der Asphalt einer zyklischen Druck-Schwellbeanspruchung ausgesetzt, was eine direkte Korrelation der Regressionsparameter fachlich nicht rechtfertigt.

4.1.6.5 Zusammenfassung

Die identifizierten Modellansätze bestätigen, dass die von BÜCHNER et al. (16) beschriebenen mechanischen Zusammenhänge zwischen Asphaltmastix- und Asphaltmischgutebene grundsätzlich auch auf die Skalierung von Asphaltmörtel zu Asphaltmischgut übertragen werden können – selbst unter Einbeziehung von Asphaltgranulat und PmB. Dennoch unterstreichen die Ergebnisse den erheblichen Forschungsbedarf hinsichtlich der Standardisierung der Versuche am Asphaltmörtel, um künftig allgemeingültige und präzise Materialmodelle bereitstellen zu können.

4.1.7 Methodik für ein performanceorientiertes Mörtel-Design

Die vorangegangenen Untersuchungen haben verdeutlicht, dass die alleinige Betrachtung des Bindemittels unzureichend ist, um das komplexe Verhalten des Asphaltmischgutes unter thermischer und mechanischer Beanspruchung vollständig abzubilden. Die Brücke zwischen der Bindemittelcharakterisierung und der Asphaltperformance bildet die Mörtelebene. In diesem Abschnitt wird die methodische Grundlage für ein performanceorientiertes Mörtel-Design formuliert. Ziel ist es, durch die Einbeziehung der Füller-feine Gesteinskörnung-Bindemittel-Interaktion und der volumetrischen Skalierung ein Prognoseverfahren zu schaffen, das bereits in der Entwurfsphase eine gezielte Steuerung der späteren Asphalteigenschaften ermöglicht.

4.1.7.1 Relevante Kenngrößen für das Mörteldesign

Die Festlegung maßgeblicher Kenngrößen für ein performanceorientiertes Mörteldesign orientiert sich wesentlich an der Zielstellung, das linear-viskoelastische Materialverhalten über einen weiten Temperatur- und Frequenzbereich quantifizierbar zu machen. Als wesentliches

Element sind hierbei die Masterkurven des komplexen Schubmoduls G^* sowie des Phasenwinkels δ heranzuziehen. Diese Wahl ist fachlich dadurch begründet, dass die Masterkurve den rheologischer „Fingerabdruck“ des Mörtels darstellt und – wie bereits in Abschnitt 4.1.6.1 im Rahmen der Modellierung des Steifigkeitsmoduls $|E^*|$ dargelegt – die präziseste Grundlage für den Upscaling-Prozess auf die Asphaltebene bildet. Durch die Anwendung des Zeit-Temperatur-Superpositionsprinzips lassen sich aus diesen Verläufen fundamentale Kennwerte für das Tieftemperatur- und Verformungsverhalten ableiten, die über die bloße Bindemittelcharakterisierung hinausgehen.

Dieser methodische Ansatz wird durch internationale Forschungsarbeiten gestützt. So unterstreicht beispielsweise die Arbeit von LI et al. (88) die Korrelation von Mörtel- und Mischguteigenschaften. Auf der Mörtелеbene wird eine deutlich sensitivere Identifikation stofflicher Interaktionen ermöglicht als die isolierte Betrachtung des Bindemittels. Da das in diesem Forschungsvorhaben entwickelte Modell (vgl. (Formel 13)) bereits erfolgreich auf der Verknüpfung von Mörtel-DSR-Daten mit der Asphaltperformance basiert, könnte die Masterkurve die technologische Schnittstelle für ein gezieltes Materialdesign bei Anwendung des Performanceansatzes bilden. Die Masterkurve erlaubt es, kritische Zustände wie die Rissanfälligkeit bei Kälte oder den Verformungswiderstand bei hohen Temperaturen bereits in der Entwurfsphase des Mörtels zu bewerten, indem spezifische Punkte der Kurve oder daraus abgeleitete Kenngrößen als Zielgrößen definiert werden.

4.1.7.2 Systematik der performanceorientierten Mörtelkonzeption

Die Entwicklung eines Mörtel-Designs, das die mechanischen Verhältnisse der Asphalteben repräsentativ abbildet, erfordert eine systematische Abstimmung der volumetrischen und stofflichen Randbedingungen. Um eine belastbare Übertragbarkeit der Ergebnisse sicherzustellen, werden folgende Arbeitsschritte als maßgebend bewertet.

1. Definition der Mörtel-Skala und stoffliche Auswahl

Zunächst erfolgt die Festlegung der oberen Korngröße für die Mörtelphase, welche in Übereinstimmung mit der Zusammensetzung des Asphaltmischgutes in der Regel auf $d \leq 2,0$ mm festgesetzt wird. Parallel dazu wird das Bindemittel – basierend auf den Erkenntnissen des Bindemittel-Designs – ausgewählt und geprüft. Bei der Einbeziehung von Asphaltgranulat umfasst dieser Schritt zwingend die Anwendung stoffspezifischer Mischungsregeln zwischen dem gealterten RA-Bindemittel und dem Frischbitumen, ggf. unter Verwendung von Rejuvenatoren, um die Zielviskosität der resultierenden Mörtelmatrix zu definieren (siehe Abschnitt 4.1.3.4).

2. Volumetrische Skalierung über das Mörtel-Bitumen-Verhältnis (MBV)

Als kritischer Schritt für die Skalierbarkeit gilt die Bestimmung des Mörtel-Bindemittel-Verhältnisses (MBV). Dieses muss den Anteil widerspiegeln, der im realen Asphaltmischgut vorliegt, da das MBV die volumetrische Verbindung darstellt. Nur durch die genaue Abbildung dieses Verhältnisses bleibt die Interaktion zwischen der festen Phase (Füller und feine Gesteinskörnungen) und der flüssigen Phase (Bindemittel) auf der Mörtelzebene repräsentativ für das Asphaltgefüge.

3. Herstellung, Homogenisierung und Probekörperfertigung

Die Herstellung der Mörtelgemische erfordert ein spezifisches Mischprotokoll, das eine vollständige Benetzung der Feinpartikel garantiert, um Inhomogenitäten oder Artefakte im Gefüge zu vermeiden. Da der Hohlraumgehalt die mechanische Antwort maßgeblich beeinflusst, ist die Verdichtung so zu steuern, dass eine homogene Verteilung der Bestandteile innerhalb des Probekörpers gewährleistet ist.

4. Rheologische Prüfung und modellbasierte Validierung

Die finale Charakterisierung erfolgt durch Frequenz-Temperatur-Sweeps im DSR zur Generierung der Kennwerte G^* und δ . Die Validierung des Designs erfolgt anschließend durch den Vergleich der experimentell ermittelten Daten mit den Rückrechnungen aus analytischen Modellen, um die Prognosegüte hinsichtlich der Dauerhaftigkeit zu verifizieren (siehe Abschnitt 4.1.6.1).

Die Relevanz des MBV als beeinflussende Größe wird durch die Untersuchungen an den Varianten M10, M20 und M30 untermauert. Da diese Varianten mit einem identischen Bindemittel (PmB 25/55-55 A) hergestellt wurden, lässt sich der isolierte Einfluss des MBV auf die rheologischen Eigenschaften unmittelbar quantifizieren.

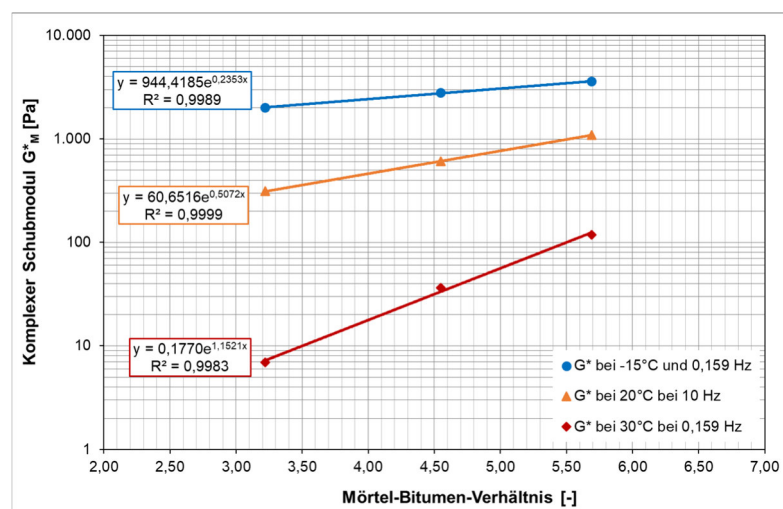


Abbildung 123: Komplexer Schubmodul G^* für ausgewählte Temperaturen und Frequenzen in Abhängigkeit vom MBV der Asphaltmörtel A10, A20 und A30

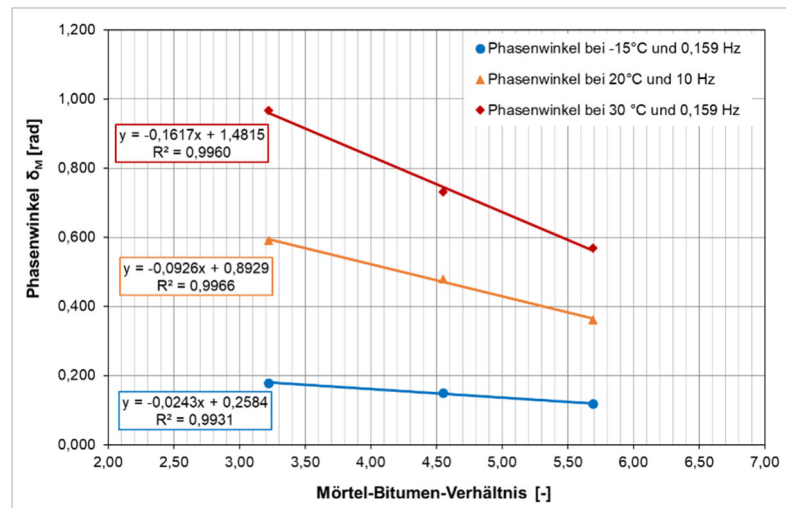


Abbildung 124: Phasenwinkel δ für ausgewählte Temperaturen und Frequenzen in Abhängigkeit vom MBV der Asphaltmörtel A10, A20 und A30

In Abbildung 123 und Abbildung 124 ist die Entwicklung des komplexen Schubmoduls G^* und des Phasenwinkels δ für ausgewählte Temperaturen und Frequenzen in Abhängigkeit vom MBV dargestellt. Die grafischen Darstellungen verdeutlichen, dass das MBV eine mathematische Beschreibung beider Kenngrößen mit einer sehr guten Korrelationsgüte von $R^2 \geq 0,99$ erlaubt. Dies bestätigt, dass das Mörtel-Bitumen-Verhältnis die zentrale Stellgröße für die gezielte Einstellung der mechanischen Performance auf der Mörtелеbene darstellt.

4.2 Großtechnische Herstellung und Einbau von Asphaltmischgut mit Asphaltgranulat aus dem Rotorbrecher

Basierend auf den Ergebnissen der Vorversuche zur Optimierung der Maschineneinstellungen des Vertikalbrechers (Rotorbrechers) wurde das Asphaltgranulat für die großtechnische Anwendung aufbereitet. Während in den Vorversuchen die technologischen Parameter zur Optimierung der Stück- und Korngrößenverteilung sowie des Bindemittelgehalts der groben Fraktionen im Vordergrund standen, fokussierten die weiteren Untersuchungen auf die Übertragbarkeit dieser Ergebnisse auf die Asphaltproduktion im Mischwerk sowie auf das Performance-Verhalten der resultierenden Asphaltsschichten.

Ziel der Untersuchungen war es, im direkten Vergleich zwischen einer konventionellen Aufbereitung (Referenzstrecke A51) und der optimierten Vertikalbrecher-Aufbereitung (VB-Strecke A52) zu verifizieren, inwieweit das Gesteinsgerüst die Gebrauchseigenschaften des Gesamtsystems Asphalt beeinflussen. Hierzu wurden neben der Mischgutzusammensetzung die mechanischen Eigenschaften hinsichtlich Steifigkeit, Ermüdungsresistenz, Tieftemperaturverhalten und Verformungsbeständigkeit sowie dem Verdichtungsverhalten im Labor analysiert und die Einhaltung der Anforderungen an den Verdichtungsgrad und Hohlraumgehalt in der hergestellten Schicht untersucht.

4.2.1 Asphaltgranulate der Vorversuche im Vertikalbrecher

4.2.1.1 Ergebnisse der Vorversuche

Im Rahmen der Voruntersuchungen wurden sechs Konfigurationen des Vertikalbrechers vergleichend analysiert (siehe Tabelle 103). Die Probenahme erfolgte systematisch an zwei Zeitpunkten: unmittelbar nach dem Brechvorgang (vor der Klassierung) sowie nach der Fraktionierung durch die Siebanlage Mobiscreen MSC 703i EVO. Die vor der Absiebung entnommenen Proben dienen der Feststellung der materialspezifischen Kennwerte Chunk Index, Breakdown Index und Filler Increase Index (siehe Abschnitt 3.3.1.4). Durch den Siebvorgang wurden die Varianten der Vorversuche (vgl. Tabelle 11) in die Korngruppen 0/6 mm, 6/9 mm, 9/13 mm und > 13 mm fraktioniert. An diesen Teilproben wurden anschließend der Bindemittelgehalt sowie die Korngrößenverteilung laboranalytisch bestimmt.

Der Vergleich zwischen den experimentellen Varianten (RA5-2 VV1 bis RA5-2 VV6) und der konventionellen Referenzaufbereitung (RA5-1) ist in Tabelle 103 dokumentiert. Abbildung 125 visualisiert die berechneten Indizes und Abbildung 126 die extrahierten Bindemittelgehalte der einzelnen Korngruppen.

Tabelle 103: Ermittelte Chunk, Breakdown und Filler Increase Indizes des Ausgabematerials der 6 Varianten der Vorversuche zur Aufbereitung im Vertikalbrecher im Vergleich zum Ausgabematerial aus der konventionellen Aufbereitung

	RA5-1	RA5-2 VV1	RA5-2 VV2	RA5-2 VV3	RA5-2 VV4	RA5-2 VV5	RA5-2 VV6
Auskleidung	-	Prallplattenring			Materialbett		
Rotorgeschwindigkeit	-	45 m/s	55 m/s	65 m/s	45 m/s	55 m/s	65 m/s
Chunk Index	23	44	26	20	48	31	26
Breakdown Index	46	59	59	55	30	51	43
Filler Increase Index	3,4	3,7	6,5	2,9	2,3	3,9	2,6

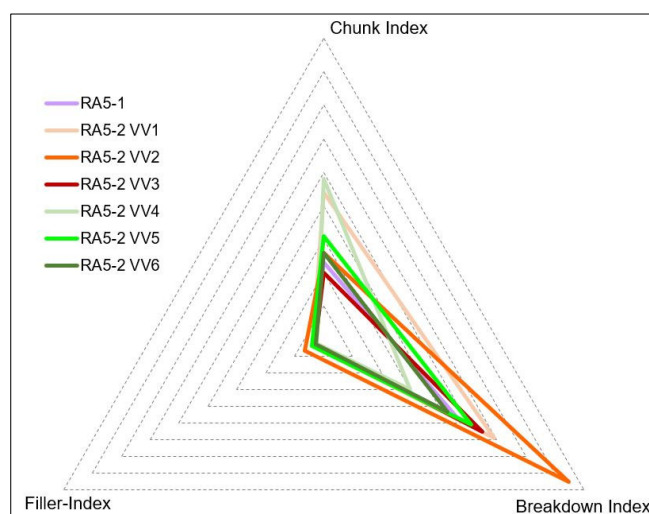


Abbildung 125: Chunk, Breakdown und Filler Increase Indizes des Ausgabematerials der 6 Varianten der Vorversuche zur Aufbereitung im Vertikalbrecher im Vergleich zum Ausgabematerial aus der konventionellen Aufbereitung

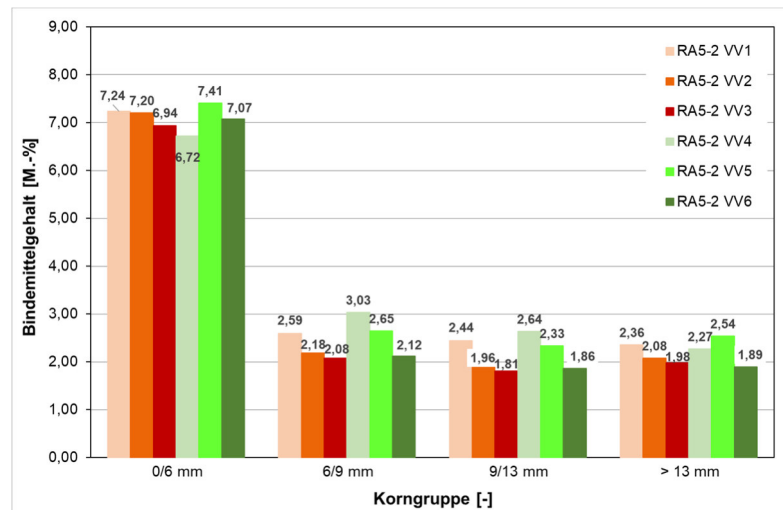


Abbildung 126: Lösliche Bindemittelgehalte der einzelnen Korngruppen je Variante der Vorversuche

Die Ergebnisse zeigen, dass bei Verwendung einer Materialbettauskleidung die Gesteinskörnungen besser erhalten bleiben und nach der Aufbereitung weniger Füller entsteht als bei Einsatz eines Prallplattenringes. Gleichzeitig resultieren hierbei jedoch etwas größere Stückgrößen des Asphaltgranulats. Unabhängig von der Art der Ringauskleidung führt eine Erhöhung der Rotorgeschwindigkeit zu kleineren Stückgrößen des Asphaltgranulats.

Darüber hinaus scheint der Fülleranteil im Asphaltgranulat, beschrieben über den Filler Increase Index, mit zunehmender Rotorgeschwindigkeit zunächst anzusteigen, bevor er bei weiteren Geschwindigkeitssteigerungen wieder abnimmt. Ein vergleichbares Verhalten ist auch für die Verfeinerung der Gesteinskörnungen, ausgedrückt durch den Breakdown Index, zu beobachten. Mit einer Materialbettauskleidung und einer Rotorgeschwindigkeit von 65 m/s lassen sich Stück- und Korngrößenverteilungen erzielen, die denen einer konventionellen Aufbereitung ähneln.

Für die Korngruppen > 6 mm ist überwiegend eine Abnahme des Bindemittelgehaltes mit steigender Rotorgeschwindigkeit festzustellen. Der Vergleich der Bindemittelgehalte gleicher Korngruppen > 6 mm zwischen Prallplatten- und Materialbettring zeigt lediglich geringe Unterschiede. Ein Bindemittelgehalt unter 1 M.-% konnte bei den Korngruppen > 6 mm bei keiner der untersuchten Maschineneinstellungen erreicht werden.

Die beobachtete Abnahme des Breakdown- und des Filler-Increase-Index bei einer Steigerung der Rotorgeschwindigkeit von 55 m/s auf 65 m/s deutet darauf hin, dass die Effektivität der Gesteinszerkleinerung bei Überschreiten einer kritischen Geschwindigkeit abnimmt. Technisch könnte sich dies durch das temperatur- und frequenzabhängige Materialverhalten des bituminösen Bindemittels begründen lassen. Bei den sehr hohen Aufprallgeschwindigkeiten wird ein signifikanter Teil der kinetischen Energie in Deformations- und Dissipationsenergie umgewandelt (89). Die daraus resultierende lokale thermische Beanspruchung

im Bereich der Kontaktzonen könnte zu einer kurzzeitigen Reduktion der Bindemittelsprödigkeit führen. In diesem viskoelastisch gedämpften Zustand absorbiert der Bindemittelfilm die Schlagenergie, wodurch ein sprödes Abplatzen von Feinanteilen oder das Zerschlagen der Gesteinskörnung behindert wird. Während die Energie noch ausreicht, um die Verklebungen der Asphaltbrocken zu lösen (stetige Abnahme des Chunk Index), scheint die Zerkrümmung des Gesteinsgefüges durch diesen Dämpfungseffekt effektiv begrenzt zu werden.

4.2.1.2 Problematiken während der Vorversuche

Während der Durchführung der Vorversuche sowie der anschließenden Aufbereitung des Ausbauasphalts für die Versuchsstrecke traten mehrere praktische Herausforderungen auf, die nachfolgend kurz zusammengefasst werden.

Der Einfülltrichter des Vertikalbrechers wies mit einer Breite von 40 cm eine zu geringe Dimension für das Fräsgut auf, sodass ein zusätzliches Vorabsieben mittels Baustoff-Recycling-sieb SBR2 erforderlich wurde. Dieses Problem könnte sich jedoch durch den Einsatz eines größer dimensionierten Einfülltrichters vermeiden lassen.

Die Aufgabe des Fräsgutes erfolgte mittels Radlader in den Aufgabebunker des Brechers, dessen Fassungsvermögen jedoch nicht ausreichte, um das Volumen einer vollständigen Radladerschaufel aufzunehmen. Zudem verhinderten die flach ausgeführten Wände sowie die Bandschutzbrücke des Aufgabebunkers ein ausreichendes Nachrutschen des Materials, wodurch kein kontinuierlicher Materialfluss gewährleistet war.

Am letzten Arbeitstag (nach insgesamt zehn Betriebstagen) führten Anbackungen von Feinbestandteilen im Brechraum zu einer Blockierung des Rotors. Darüber hinaus traten Anbackungen am Brecherauslass auf, die bei fortgesetzter Produktion zu einer Verstopfung geführt hätten. Diesen Effekten kann durch regelmäßige Reinigungsintervalle entgegengewirkt werden. Für den Wechsel von Prallplattenring auf Materialbettring ist der Einsatz eines Baggers erforderlich; dieser Umstand wird jedoch als weniger kritisch bewertet, da ein häufiger Wechsel der Ringausskleidung nicht zu erwarten ist.



Abbildung 127: Verklebte Quadrat-Maschensiebe (links), Konglomerate nicht aufgebrochenen Materials bei den Fraktionen > 9 mm (Mitte und rechts)

Wie bereits erwähnt (vgl. Abschnitt 3.3.1), herrschten während der Vorversuche und der Aufbereitung überwiegend regnerische Witterungsbedingungen, teilweise mit starkem Niederschlag. Infolgedessen war das aufzubereitende Material stark durchfeuchtet, was ein rasches Zusetzen der Siebe begünstigte (vgl. Abbildung 127 links). Der Einsatz von Langsieb-Maschen in der Siebanlage anstelle von Quadratmaschensieben könnte dieses Problem reduzieren. Schließlich wurden in den abgesiebten Korngruppen > 9 mm Konglomerate nicht vollständig aufgebrochenen Materials festgestellt (vgl. Abbildung 127 Mitte und rechts). Diese werden als mögliche Ursache dafür angesehen, dass der angestrebte Bindemittelgehalt von < 1 M.-% in diesen Fraktionen nicht erreicht werden konnte.

4.2.2 Asphaltgranulate der Produktion im Vertikalbrecher

Die Klassifizierung der unterschiedlich aufbereiteten Asphaltgranulate (Probenschlüssel für die Kennzeichnung siehe Tabelle 4) erfolgte auf Basis der in Abschnitt 3.2.1.2 definierten Prüfverfahren. Da die Überprüfung der Materialgleichmäßigkeit im Rahmen der werkseigenen Produktionskontrolle in der Verantwortung des Herstellers lag, sind diese Ergebnisse nicht Bestandteil des vorliegenden Berichts. Zur Sicherstellung repräsentativer Kennwerte wurden sämtliche Asphaltgranulatproben vor Versuchsbeginn homogenisiert und die Probenvorbereitung gemäß TP Gestein-StB (30) durchgeführt.

Eigenschaften der hergestellten Asphaltgranulate

In Tabelle 104 sind die Asphaltgranulatsorten und die zugehörigen Kennwerte (Stückgröße, Feinanteil, Bindemittelgehalt, Rohdichte und Fremdstoffgehalt) dokumentiert. Zur besseren Einordnung der im Folgenden diskutierten Ergebnisse werden die Varianten wie folgt differenziert:

- RA5-1 stellt die konventionelle Aufbereitung dar und dient als Referenzvariante für alle Vergleiche.
- RA5-2-1 und RA5-2-2 repräsentieren die großtechnische Aufbereitung im Vertikalbrecher (RSB). Die Variante RA5-2-1 umfasst dabei die feinere Fraktion mit einer Stückgröße < 13 mm. Die Variante RA5-2-2 bildet die gröbere Fraktion im Bereich 13/18 mm ab.

Die Zusammensetzung der zurückgewonnenen Gesteinskörnungsgemische aus den Asphaltgranulaten ist in Tabelle 105 zusammengetragen.

Die Ergebnisse belegen wie zuvor (vgl. Abschnitt 4.1.1.1 und 4.2.1.1) ebenso eine gezielte Aufbereitung mit signifikanten Anreicherungs- und Ablöseeffekten des Bindemittels, gleichwohl die in einschlägigen Forschungsarbeiten sowie von Herstellern angegebenen Bindemittelgehalte der groben Gesteinskörnung von unter 1,0 M.-% für die Fraktion RA5-2-2 mit einem ermittelten Wert von 2,13 M.-% wieder nicht erreicht wurde.

Tabelle 104: Kennwerte am Gemisch der Asphaltgranulate RA5-1 (konventionell) und RA5-2 (Vertikalbrecher)

Kennwert	Einheit	Asphaltgranulatvariante		
		RA5-1	RA5-2-1	RA5-2-2
Asphaltgranulatsorte	mm	16 RA 0/11	22 RA 0/11	22 RA 0/16
max. Stückgröße	mm	16,0	22,4	22,4
Gehalt an Feinanteilen	M.-%	0,0	0,3	0,0
Löslicher Bindemittelgehalt	M.-%	5,40	5,78	2,13
Bindemittelgehalt	M.-%	5,64	6,07	2,38
Rohdichte	g/cm ³	2,500	2,472	2,624
Fremdstoffgehalt	-	FM _{1/0,1}	FM _{1/0,1}	

Tabelle 105: Kennwerte Korngrößenverteilung am Gesteinskörnungsgemisch der Asphaltgranulate RA5-1 (konventionell) und RA5-2 (Vertikalbrecher)

Kennwert	Einheit	Asphaltgranulatvariante		
		RA5-1	RA5-2-1	RA5-2-2
Siebdurchgang < 0,063 mm	M.-%	12,3	13,2	4,3
Siebdurchgang < 0,125 mm	M.-%	15,6	17,1	5,3
Siebdurchgang < 2 mm	M.-%	49,0	53,4	11,8
Siebdurchgang < 5,6 mm	M.-%	71,7	77,8	14,9
Siebdurchgang < 8 mm	M.-%	86,6	92,8	17,8
Siebdurchgang < 11,2 mm	M.-%	99,6	99,8	22,8
Siebdurchgang < 16 mm	M.-%	100,0	100,0	82,2
Siebdurchgang < 22,4 mm	M.-%	100,0	100,0	100,0
Größtkorndurchmesser	mm	11,2	11,2	16

Eigenschaften der Gesteinskörnungen der hergestellten Asphaltgranulate

Die Eigenschaften der Gesteinskörnungen und die zugehörigen Kategorien nach TL AG-StB (6) bzw. TL Gestein-StB (70) sind in Tabelle 106 zusammengetragen. Wenn die ermittelten Kennwerte in den nachfolgenden Tabellen fett markiert sind, so ist die Spanne zwischen den Ergebnissen der beiden Aufbereitungsverfahren größer als die jeweilige Wiederholgrenze des Prüfverfahrens (siehe Abschnitt 4.1.1.1).

Hinsichtlich des Fließkoeffizienten wurde für beide Asphaltgranulate ein Wert von 33 s ermittelt, was der Kategorie E_{cs}30 gemäß TL Gestein-StB (70) entspricht. Auch bei der Plattigkeitskennzahl der feinen und groben Gesteinskörnungen ließen sich keine verfahrensbedingten Differenzen feststellen. Bei der Plattigkeitskennzahl der groben Gesteinskörnungen erfüllten beide Varianten die Anforderungen der Kategorie FI₁₅.

Signifikante Unterschiede ergaben sich jedoch bei der Bruchflächigkeit. Das im Vertikalbrecher aufbereitete Material (RA5-2) wies im Vergleich zum im horizontalen Prallbrecher bear-

beiteten Granulat (RA5-1) höhere Anteile an gebrochenen (C_{tc}) sowie vollständig gebrochenen Körnern (C_c) auf. Durch die Aufbereitung im Vertikalbrecher konnte somit eine Optimierung der Kategorie von $C_{95/1}$ auf $C_{100/0}$ erzielt werden.

Tabelle 106: Kennwerte Gesteinskörnungen der Asphaltgranulate RA5-1 (konventionell) und RA5-2 (Vertikalbrecher)

Eigenschaft/Merkmal	Einheit	Variante	
		RA5-1	RA5-2
Fließkoeffizient von feinen Gesteinskörnungen			
Kornklasse	mm	0,063/2	0,063/2
Fließkoeffizient	s	33	33
Kategorie E _{CS}	-	E _{CS} 30	E _{CS} 30
Kornform von feinen Gesteinskörnungen			
Kornklasse	mm	1,25/4	1,25/4
Plattigkeitskennzahl	M.-%	3	3
Kornform von groben Gesteinskörnungen			
Kornklasse	mm	4/12,5	4/12,5
Plattigkeitskennzahl	M.-%	4	4
Kategorie FI	-	FI ₁₅	FI ₁₅
Anteil gebrochener Oberflächen in groben Gesteinskörnungen			
Kornklasse	mm	4/11,2	4/11,2
Vollständig gebrochene Körner C _{tc}	M.-%	79	90
Vollständig gebrochene und gebrochene Körner C _c	M.-%	98	100
Vollständig gerundete Körner C _{tr}	M.-%	0	0
Kategorie C	-	C _{95/1}	C _{100/0}
Widerstand gegen Zertrümmerung von groben Gesteinskörnungen			
Kornklasse	mm	5/8	5/8
Schlagzertrümmerungswert	M.-%	17	18
Kategorie SZ	-	SZ ₁₈	SZ ₁₈
Widerstand gegen Frostbeanspruchung von groben Gesteinskörnungen			
Kornklasse	mm	4/8	4/8
Frostwiderstand (Verlust)	M.-%	0,1	0,1
Kategorie F	-	F ₁	F ₁

Die Schlagzertrümmerungswerte lagen mit 17 M.-% (RA5-1) und 18 M.-% (RA5-2) im Bereich der Kategorie SZ_{18} nach TL AG-StB (6). Ebenso zeigten sich beim Widerstand gegen Frostbeanspruchung (Absplitterung im Frost-Tau-Wechselversuch) keine nennenswerten Unterschiede zwischen den Aufbereitungsverfahren. Sämtliche Asphaltgranulate wurden der Kategorie F_1 zugeordnet.

Zusammenfassend lässt sich konstatieren, dass beide Aufbereitungstechnologien im Ergebnis Asphaltgranulate liefern, die gemäß Anhang 2.2 der TL AG-StB (6) uneingeschränkt für die Verwendung in Asphaltmischgut für Asphaltbinderschichten geeignet sind. Dabei kann

die Aufbereitung im Vertikalbrecher (RSB) jedoch signifikante qualitative und verfahrenstechnische Vorteile gegenüber der konventionellen Methode bieten. Durch den selektiven Prallaufschluss kann eine gezielte Optimierung der physikalischen Gesteinseigenschaften erreichbar sein, was sich insbesondere in der verbesserten Bruchflächigkeit und der Einstufung in die höchste Kategorie C_{100/0} widerspiegelt. Des Weiteren ermöglicht das RSB-Verfahren durch die Steuerung der Rotorgeschwindigkeit eine Kontrolle der angestrebten Sieblinie. Dabei wird ein effektiver Aufschluss der Asphaltaggregate erzielt, während gleichzeitig eine ungewollte Kornverfeinerung des ursprünglichen Gesteinsgerüsts minimiert wird. Dies resultiert in einem qualitativ hochwertigeren Asphaltgranulat.

Eigenschaften der zurückgewonnenen Bindemittel der hergestellten Asphaltgranulate

Die ermittelten Kennwerte am zurückgewonnenen Bindemittel der Asphaltgranulate sind nachfolgend in Tabelle 107 zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 107: Kennwerte am zurückgewonnenen Bindemittel der Asphaltgranulate RA5-1 (konventionell) und RA5-2 (Vertikalbrecher)

Kennwert	Einheit	Asphaltgranulatvariante		
		RA5-1	RA5-2-1	RA5-2-2
Erweichungspunkt Ring und Kugel	°C	68,2	69,0	69,8
Nadelpenetration	1/10 mm	22	23	-
Äqui-Schermoduletemperatur T(G*=15kPa)	°C	66,0	69,7	69,8
Phasenwinkel δ (G*=15kPa)	°	70,0	70,7	68,8

Zunächst wurden die Kennwerte EP RuK und T(G* = 15 kPa) der aus dem Asphaltgranulat zurückgewonnenen Bindemittel analysiert. Zwischen den abgesiebten Fraktionen RA5-2-1 und RA5-2-2 (Vertikalbrecher) betrug die Differenz des EP RuK lediglich 0,8 °C, während die Abweichung der Äqui-Schermoduletemperatur T(G* = 15 kPa) bei nur 0,1 °C lag. Da die ermittelten Spannweiten beider Kennwerte bei den untersuchten zwei Asphaltgranulaten unterhalb der Grenze von 4,0 °C lagen (zu den methodischen Hintergründen siehe Abschnitt 4.1.1.1), konnte die Repräsentativität der Fraktion RA5-2-1 bestätigt werden. Infolgedessen wurden sämtliche weiterführenden Bindemitteluntersuchungen, wie die Bestimmung der Nadelpenetration sowie die Erstellung von Masterkurven, stellvertretend an den zurückgewonnenen Bindemitteln der abgesiebten Fraktionen ≤ 13,0 mm (RA5-2-1) durchgeführt. Basierend auf den ermittelten Phasenwinkeln δ (G* = 15 kPa) ist davon auszugehen (vgl. Abschnitt 4.1.1.1), dass es sich bei dem im Asphaltgranulat enthaltenen Bindemittel überwiegend um Straßenbaubitumen handelt bzw. die Wirkung von verwendeten Polymeren infolge der Alterung nicht mehr vorhanden ist.

Die entsprechend Abschnitt 3.2.3.1 bestimmten Masterkurven des komplexen Schubmoduls G^* und des Phasenwinkels δ der zurückgewonnenen Bindemittel aus den beiden Asphaltgranulaten können Abbildung 128 und die Black-Diagramme Abbildung 129 entnommen werden.

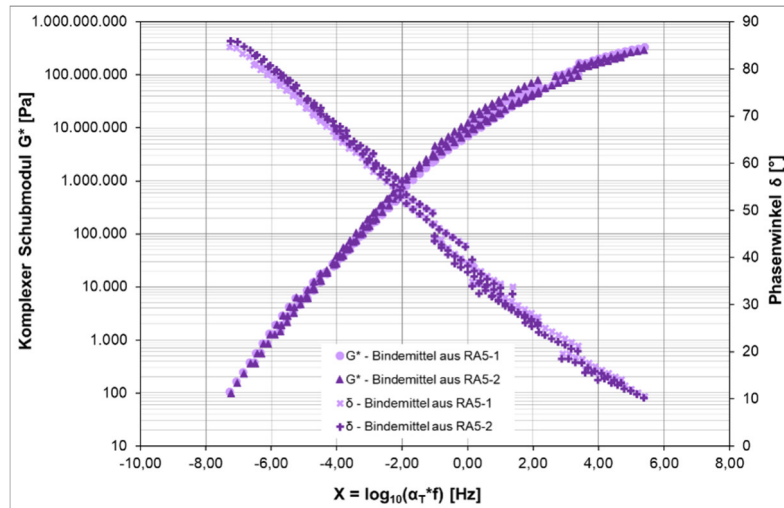


Abbildung 128: Masterkurve des komplexen Schubmoduls G^* und des Phasenwinkels δ der zurückgewonnenen Bindemittel aus RA5-1 und RA5-2

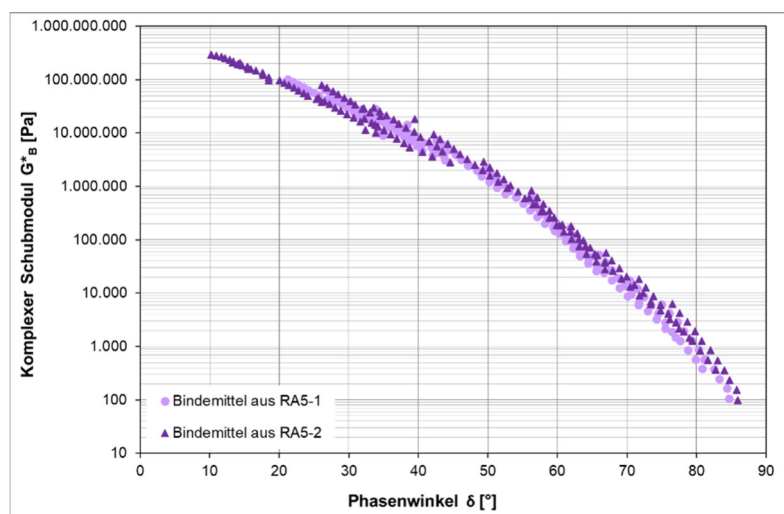


Abbildung 129: Black-Diagramm der zurückgewonnenen Bindemittel aus RA5-1 und RA5-2

4.2.3 Bindemittelkennwerte und -performance

4.2.3.1 Verwendete Bitumen im Anlieferungszustand

Wie in Abschnitt 3.3.2 dargelegt, erfolgte die Produktion des Asphaltmischguts für die Referenzstrecke und die VB-Strecke in einem zeitlichen Abstand von einer Woche. Da zwischenzeitliche Schwankungen in den Bindemittleigenschaften einen signifikanten Einfluss auf die späteren Performance-Eigenschaften des Asphalts haben können, wurden Proben des je-

weils eingesetzten PmB 25/55-55 A gezogen. Diese werden im Folgenden als B7 (für Asphaltmischgut A52 der VB-Strecke) und B8 (für Asphaltmischgut A51 der Referenzstrecke) bezeichnet.

Tabelle 108: Kennwerte der Bitumen im Anlieferungszustand für die Herstellung des Asphaltmischgutes der Referenzstrecke (A51) und der VB-Strecke (A52)

Kennwert	Einheit	Bezeichnung Bitumen	
		B8 (für A51)	B7 (für A52)
Bitumensorte	-	25/55-55 A	25/55-55 A
Erweichungspunkt Ring und Kugel	°C	59,6	57,2
Nadelpenetration	1/10 mm	51	39
Äqui-Schermodultemperatur $T(G^* = 15 \text{ kPa})$	°C	53,0	55,9
Phasenwinkel $\delta(G^* = 15 \text{ kPa})$	°	64,7	71,8
Elastische Rückstellung	%	80	70
Temperatur bei einer Biegekriechsteifigkeit von 300 MPa	°C	-23,6	-17,8
Temperatur bei einem m-Wert von 0,300	°C	-22,3	-16,4

Die im Anlieferungszustand ermittelten konventionellen Kennwerte sind in Tabelle 108 dokumentiert. Zur weiterführenden rheologischen Charakterisierung wurden der komplexe Schubmodul G^* sowie der Phasenwinkel δ entsprechend Abschnitt 3.2.3.1 bestimmt. Die daraus resultierenden Masterkurven sowie die entsprechenden Black-Diagramme sind in Abbildung 130 und Abbildung 131 grafisch dargestellt. Sämtliche geprüften Merkmale der eingesetzten Bindemittel erfüllen die Anforderungen der TL Bitumen-StB (71) vollumfänglich.

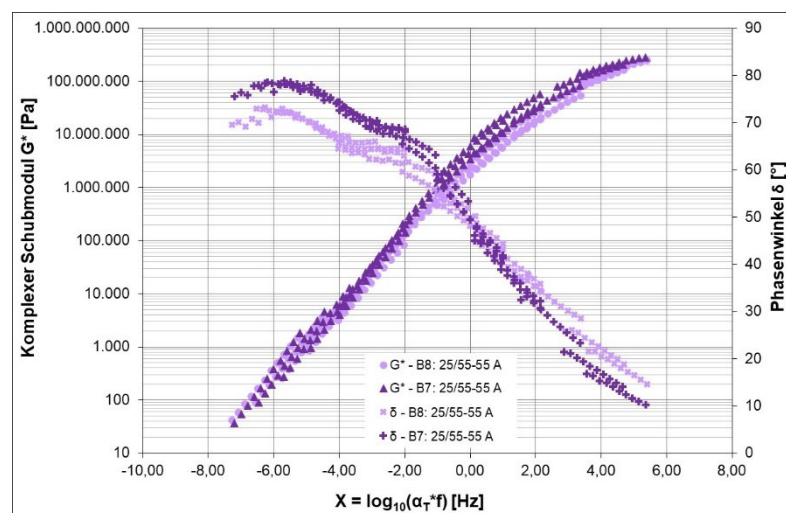


Abbildung 130: Masterkurve des Komplexen Schubmoduls G^* und des Phasenwinkels δ der verwendeten Bitumen im Anlieferungszustand für die Herstellung des Asphaltmischgutes der Referenzstrecke (A51) und der VB-Strecke (A52)

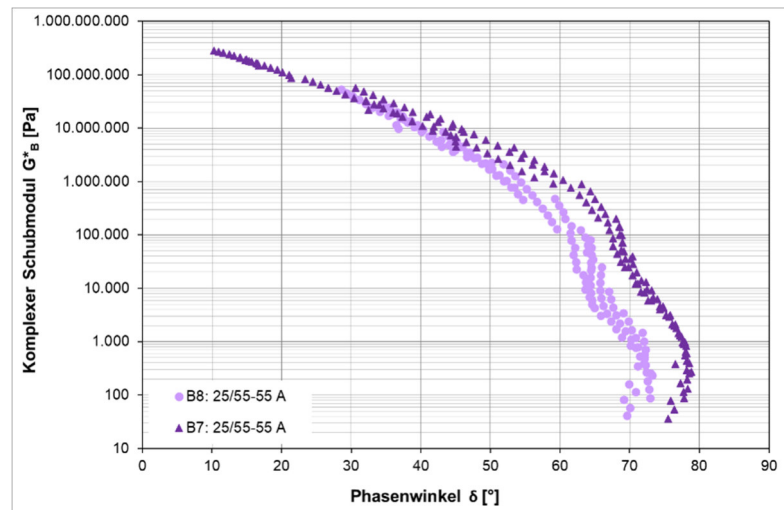


Abbildung 131: Black-Diagramm der verwendeten Bitumen im Anlieferungszustand für die Herstellung des Asphaltmischgutes der Referenzstrecke (A51) und der VB-Strecke (A52)

Die statistische Auswertung mittels einfaktorieller Varianzanalysen belegte für die Mehrheit der untersuchten Bindemittelparameter signifikante Unterschiede zwischen den Bitumen B7 und B8. Dies betrifft sowohl die konventionellen Kennwerte als auch die rheologischen Parameter G^* und δ über weite Teile des Temperaturspektrums.

Lediglich für die Phasenwinkel δ bei 20 °C sowie den komplexen Schubmoduln G^* bei 50 °C konnten keine statistisch signifikanten Differenzen nachgewiesen werden. Infolge der signifikanten Varianz zwischen den beiden Zugabebitumen ist davon auszugehen, dass die Gebrauchseigenschaften der daraus resultierenden Asphaltvarianten A51 und A52 ebenfalls eine entsprechende Variabilität aufweisen werden.

4.2.3.2 Zurückgewonnene Bindemittel

Die Kennwerte der aus den großtechnisch hergestellten Asphaltvarianten A51 (mit konventionell aufbereitetem Asphaltgranulat) und A52 (mit VB-Asphaltgranulat) zurückgewonnenen Bindemittel sind in Tabelle 109 zusammenfassend dargestellt. Die statistische Auswertung der konventionellen Bindemitteldaten der A5-Varianten AC 16 B S SG ergab, dass die Nullhypothese hinsichtlich der Gleichheit der jeweiligen Kennwerte bei einem Signifikanzniveau von $\alpha = 5 \%$ für alle untersuchten Parameter abgelehnt werden musste.

In Analogie zur methodischen Herangehensweise in Abschnitt 4.1.3.2 sind die komplexen Schubmoduln G^* und die Phasenwinkel δ sowie die zugehörigen Standardabweichungen für die Frequenzen 1,0 Hz und 10,0 Hz in Tabelle 110 dokumentiert. Die entsprechenden Masterkurven und Black-Diagramme zur rheologischen Charakterisierung sind in Abbildung 132 und Abbildung 133 grafisch aufbereitet.

Tabelle 109: Kennwerte am zurückgewonnenen Bindemittel für die A5-Mischgutvarianten (AC 16 B S SG)

Kennwert	Einheit	Variante des zurückgewonnenen Bindemittels	
		B-A51	B-A52
Erweichungspunkt Ring und Kugel	°C	66,2	65,4
Nadelpenetration	1/10 mm	32,7	27,7
Äqui-Schermodultemperatur $T(G^* = 15 \text{ kPa})$	°C	62,3	64,4
Phasenwinkel $\delta(G^* = 15 \text{ kPa})$	°	63,4	68,3
Nicht rückformbarer Anteil J_{nr}	kPa ⁻¹	0,111	0,089
Prozentuale Erholung R_N	%	59,8	52,0

Tabelle 110: Mittelwerte x^* und Standardabweichungen s^2 des komplexen Schubmoduls G^* und Phasenwinkels δ der zurückgewonnenen Bindemittel für die A5-Mischgutvarianten (AC 16 B S SG) für die Temperaturen T und ausgewählte Frequenzen f

T [°C]	f [Hz]	Variante des zurückgewonnenen Bindemittels							
		B-A51				B-A52			
		G^*		δ		G^*		δ	
		x^*	s^2	x^*	s^2	x^*	s^2	x^*	s^2
-15	1,0	183.715	8.679,7	16,2	0,12	200.567	6.904,4	14,3	0,07
	10,0	263.065	14.495,6	12,9	0,19	274.218	8.089,7	11,0	0,30
-10	1,0	116.372	6.949,9	19,5	0,04	134.697	5.860,4	17,7	0,30
	10,0	183.223	11.053,5	16,0	0,30	201.313	7.513,1	14,2	0,33
0	1,0	38.692,0	2.073,14	26,5	0,16	47.273,9	3.336,09	25,7	0,53
	10,0	73.370,0	4.114,60	23,3	0,18	86.012,6	4.937,39	21,5	0,70
10	1,0	14.009,9	664,95	32,6	0,25	17.464,2	1.504,52	32,8	0,68
	10,0	30.513,7	1.602,09	28,7	0,17	37.494,9	2.661,95	28,1	0,32
20	1,0	4.333,27	174,690	39,7	0,40	5.475,44	537,116	41,2	0,81
	10,0	11.091,37	521,022	35,9	0,31	14.158,90	1.154,973	36,0	0,72
30	1,0	1.472,70	20,766	47,3	0,13	2.548,11	268,974	47,7	1,31
	10,0	4.375,69	46,873	43,7	0,18	7.443,53	522,054	42,5	1,30
40	1,0	347,049	8,6353	54,2	0,25	584,545	73,6015	55,6	1,11
	10,0	1.190,54	25,705	51,1	0,13	2.040,04	185,755	51,4	0,85
50	1,0	87,099	2,4560	60,3	0,81	141,729	17,4345	61,3	0,71
	10,0	348,708	7,5228	56,7	0,19	591,354	54,8343	57,6	1,06
60	1,0	18,376	0,4485	63,3	0,38	33,755	1,3804	65,6	0,12
	10,0	83,449	1,0951	60,4	0,24	162,475	5,3346	62,4	0,39
70	1,0	5,555	0,1994	67,0	0,33	9,457	0,3594	69,3	0,11
	10,0	28,307	0,6814	63,8	0,37	50,666	1,5548	66,3	0,24
80	1,0	1,810	0,0597	71,1	0,22	2,857	0,1224	73,6	0,13
	10,0	10,313	0,2579	67,7	0,19	16,898	0,6068	69,7	0,17

T [°C]	f [Hz]	Variante des zurückgewonnenen Bindemittels							
		B-A51				B-A52			
		G*		δ		G*		δ	
		χ^*	S^2	χ^*	S^2	χ^*	S^2	χ^*	S^2
90	1,0	0,623	0,0169	76,0	0,08	0,915	0,0312	78,6	0,13
	10,0	4,003	0,0797	71,3	0,06	6,126	0,1170	73,1	0,45

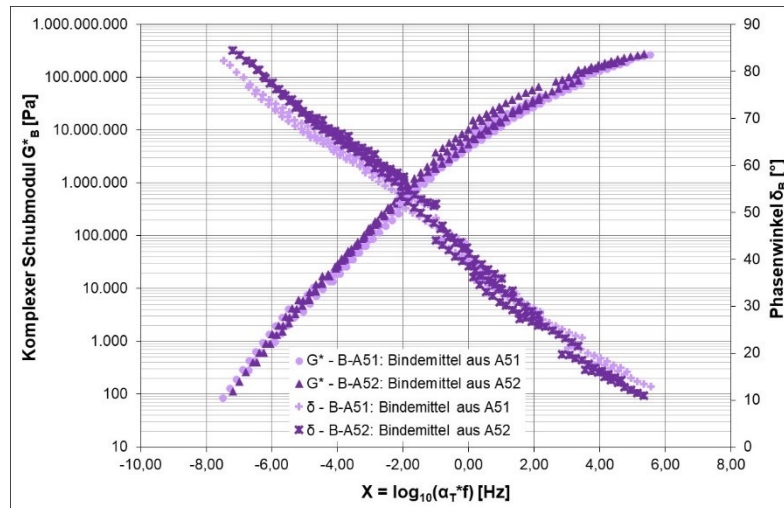


Abbildung 132: Masterkurve des Komplexen Schubmoduls G^* und des Phasenwinkels δ der zurückgewonnenen Bindemittel für die A5-Mischgutvarianten (AC 16 B S SG)

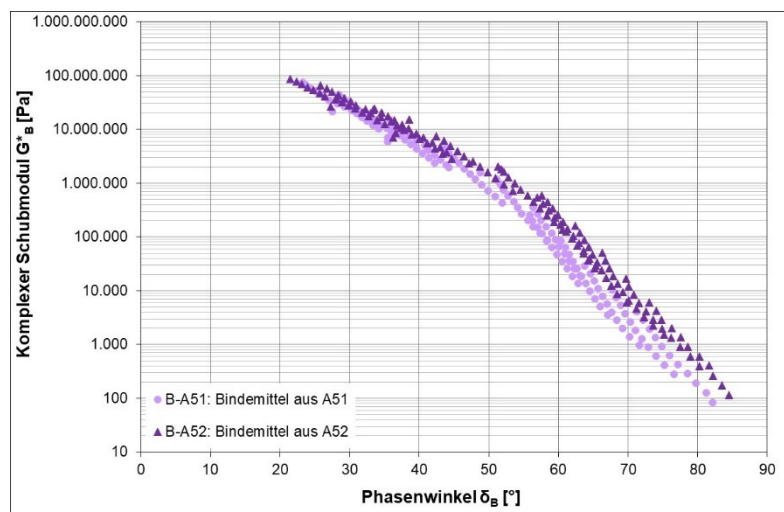


Abbildung 133: Black-Diagramm der zurückgewonnenen Bindemittel für die A5-Mischgutvarianten (AC 16 B S SG)

Die detaillierte statistische Analyse der rheologischen Parameter in Abhängigkeit von der Temperatur ergab im Tieftemperaturbereich (-15 °C bis -10 °C), dass für den komplexen Schubmodul G^* die Nullhypothese der Gleichheit beibehalten werden konnte, während sie für den Phasenwinkel δ verworfen wurde. Im mittleren Temperaturbereich (0 °C bis 20 °C) zeigten sich keine signifikanten Unterschiede, da die Nullhypothese für beide Kennwerte angenommen wurde. Im Bereich erhöhter Temperaturen (30 °C bis 50 °C) stellten sich signifi-

kante Differenzen bei G^* ein, wogegen δ statistisch gleichwertig blieben. Im Hochtemperaturbereich (60 °C bis 90 °C) musste die Gleichheit schließlich sowohl für G^* als auch für δ abgelehnt werden.

Die Ermüdungsfunktionen der zurückgewonnenen Bindemittel sind in Abbildung 134 dargestellt, während die zugehörigen Regressionsparameter a' und b' , die Bestimmtheitsmaße R^2 sowie die Standardabweichungen s^2 der linearisierten Funktionen in Tabelle 111 aufgeführt sind. Die statistische Überprüfung der Regressionsparameter ergab, dass sowohl die Nullhypothese hinsichtlich der Gleichheit der Steigungen (b') als auch der Achsenabschnitte (a') bei einem Signifikanzniveau von 5 % verworfen werden musste.

Tabelle 111: Regressionsparameter der linearisierten Ermüdungsfunktionen, Bestimmtheitsmaße und Standardabweichungen für die zurückgewonnenen Bindemittel der A5-Mischgutvarianten (AC 16 B S SG)

	Variante des zurückgewonnenen Bindemittels	
	B-A51	B-A52
Regressionsparameter a'	13,0746	12,6714
Regressionsparameter b'	-7,0574	-9,7924
Bestimmtheitsmaß R^2	0,989	0,949
Standardabweichung s^2	0,030	0,116

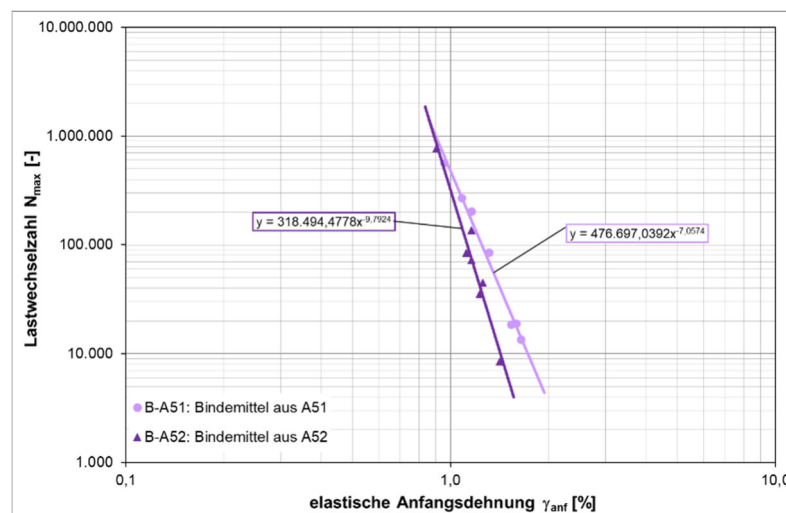


Abbildung 134: Ermüdungsfunktionen der zurückgewonnenen Bindemittel für die A5-Mischgutvarianten (AC 16 B S SG)

In der zusammenfassenden Beurteilung belegen die statistischen Analysen, dass die untersuchten zurückgewonnenen Bindemittel der großtechnisch hergestellten Asphaltvarianten für die Referenzstrecke (A51) und für die VB-Strecke (A52) trotz punktueller Übereinstimmungen im mittleren Temperaturbereich ihrer rheologischen Eigenschaften signifikante Unterschiede in ihrem Ermüdungsverhalten aufweisen. Die im Vergleich zur Referenz deutlich steilere Ermüdungsfunktion der Variante B-A52 lässt auf eine höhere Schadensanfälligkeit der Bindemittelphase bei dehnungsinduzierten Belastungen schließen.

Die materialspezifische Schwäche von B-A52 kann dabei vermutlich auf die Überlagerung zweier stofflicher Faktoren zurückgeführt werden. Zum einen wies bereits das für diese Variante eingesetzte Zugabebitumen B7 im Vergleich zum Bitumen B8 (Referenz) eine geringere rheologische Qualität im Anlieferungszustand auf (vgl. Abschnitt 4.2.3.1). Zum anderen resultiert aus der um 10 M.-% höheren Asphaltgranulatzugabe in der Variante A52 (Gesamt-RA-Anteil = 40 M.-%) ein rechnerisch größerer Anteil an gealtertem RA-Bindemittel im resultierenden Bindemittel. Es ist demnach davon auszugehen, dass die Kombination aus einer qualitativ schwächeren Frischbitumencharge und einem erhöhten Anteil RA-Bindemittel die Ermüdungswiderstandsfähigkeit der Bindemittelphase in der Variante A52 reduziert hat.

4.2.3.3 Ergebnisse der SARA- Analysen und der FTIR-Spektroskopie

Zur detaillierten Untersuchung der stofflichen Zusammensetzung und der chemischen Alterungsmerkmale wurden SARA-Fraktionierungen sowie FTIR-spektroskopische Analysen an den Frischbitumen (B7, B8), den extrahierten Bindemitteln (B-A51, B-A52) und dem RA-Bindemittel RA5-2 am Institut für Verkehrswesen der Universität Kassel durchgeführt.

SARA-Analyse und kolloidale Stabilität

Die SARA-Analyse (siehe Tabelle 112) liefert wichtige Hinweise auf den kolloidalen Aufbau, welcher die Rheologie des Bindemittels (vgl. Abschnitt 4.2.3.1 und 4.2.3.2) maßgeblich beeinflusst. Gemäß dem kolloidalen Modell nach LESUEUR (49) bestimmt das Gleichgewicht zwischen den dispergierten Asphaltenen und der solvatisierenden Maltenphase (Harze und Aromaten) das viskoelastische Verhalten.

Tabelle 112: Fraktionsanteile in den Zugabebitumen sowie den zurückgewonnenen Bindemitteln

	Einheit	Probenbezeichnung				
		B7	B8	B-A51	B-A52	RA5-2
Anteil Asphaltene	M.-%	22,36	22,53	12,30	7,58	14,6
Anteil Harze	M.-%	30,10	26,57	38,84	45,24	56,09
Anteil Aromaten	M.-%	41,63	46,33	43,18	41,61	25,61
Anteil ges. Kohlenwasserst.	M.-%	5,91	4,56	5,69	5,58	3,71
Gaestel-Index I_c	-	0,394	0,372	0,219	0,151	0,224

Beim Vergleich der Zugabebitumen weist B7 für A52 mit einem Gaestel-Index (I_c) von 0,394 einen höheren Wert auf als B8 für A51 ($I_c = 0,372$). Da der Asphaltengehalt beider Proben nahezu identisch ist (22,36 M.-% bzw. 22,53 M.-%), resultiert die Differenz im I_c primär aus dem geringeren Aromatenanteil in B7 (siehe (Formel 8) in Abschnitt 3.3.6.2). Ein höherer I_c deutet auf eine geringere Solvatisierungskapazität der Maltenphase hin, was die Ausbildung eines stärker vernetzten „Gel-Charakters“ begünstigt (90). Dies korreliert mit den rheologischen Ergebnissen, wonach B7 einen höheren komplexen Schubmodul G^* und bei tiefen

Temperaturen geringere Phasenwinkel δ (stärker elastisches Verhalten) aufweist. Die chemische Zusammensetzung stützt somit die im BBR gemessenen ungünstigeren Kältekennwerte des Bitumens B7 im Vergleich zu B8 (Tabelle 108 im Abschnitt 4.2.3.1).

Bei den aus dem Asphaltmischgut zurückgewonnenen Bindemitteln zeigen sich deutliche Verschiebungen. In beiden Varianten (B-A51 und B-A52) ist ein massiver Anstieg der Harzfraction (von ca. 27 M.-% – 30 M.-% auf bis zu ca. 46 M.-%) zu verzeichnen, was auf den stofflichen Eintrag aus dem RA-Bindemittel (RA5-2 mit 56,1 M.-% Harzen) zurückzuführen ist. Dies führt zu einer signifikanten Senkung des Gaestel-Index (I_c sinkt auf 0,219 bzw. 0,151), was theoretisch eine Verschiebung hin zu einem stabileren „Sol-Zustand“ bedeutet. Dass B-A52 trotz des niedrigsten I_c oberhalb von 30 °C eine höhere Steifigkeit als B-A51 besitzt, deutet darauf hin, dass die rheologische Performance hier nicht allein durch die Stoffgruppenanteile, sondern auch durch die nachfolgend beschriebenen Oxidations- und Vernetzungseffekte beeinflusst sein könnte.

FTIR-Spektroskopie: Oxidation und Polymerdegradation

Die FTIR-Ergebnisse (Tabelle 113) quantifizieren die oxidative Beanspruchung. Die Zugabebitumen B7 und B8 weisen erwartungsgemäß nahezu keine Carbonyl-Indizes auf. Durch die Mischgutproduktion steigen diese Werte in B-A51 und B-A52 auf ca. 2,8 % an.

Tabelle 113: Ergebnisse der FTIR-Spektroskopie an den Zugabebitumen sowie den zurückgewonnenen Bindemitteln aus den Mischgütern A51 und A52 und dem Asphaltgranulat RA5-2

Indexwerte für	Einheit	Probenbezeichnung				
		B7	B8	B-A51	B-A52	RA5-2
Styrol	%	2,55	2,48	2,22	2,81	1,38
Butadien	%	3,95	3,87	3,03	3,65	1,40
Carbonyl	%	-0,13	-0,08	2,81	2,86	5,00
Sulfoxid	%	3,18	3,79	14,54	13,83	23,67

Besonders hervorzuheben ist der hohe Oxidationsgrad des RA-Bindemittels (Carbonyl: 5,0 %; Sulfoxid: 23,7 %). Der Einfluss dieser RA-Komponente wirkt sich unmittelbar auf das chemische Profil der resultierenden Bindemittel aus. Die Bildung polarer Carbonyl- ($C=O$) und Sulfoxid-Gruppen ($S=O$) führt laut PETERSEN (50) zu verstärkten intermolekularen Wechselwirkungen (Dipol-Dipol-Kräfte). Diese chemisch induzierte „Strukturierung“ schränkt die molekulare Mobilität ein. In der Konsequenz wird das viskose Fließen behindert, was das Relaxationsvermögen in der Kälte reduziert. Diese chemischen Effekte könnten erklären, warum die Variante A52 (auf Basis des bereits steiferen B7) im Tieftemperaturbereich ungünstigere Eigenschaften als A51 zeigt (siehe Abschnitt 4.2.4.4).

Hinsichtlich der Polymermodifikation liegen die Styrol- und Butadien-Indizes der Frischbitumen auf einem hohen Niveau (ca. 2,5 % bzw. 3,9 %). Während in B-A51 ein Rückgang der

Indizes zu verzeichnen ist, weist B-A52 einen bemerkenswert stabilen Styrol-Restgehalt (2,81 %) auf. Dies deutet auf eine hohe thermische Stabilität der verwendeten Polymercharge hin (49). Die Kombination aus der verbleibenden elastischen Polymerstruktur und der gleichzeitigen oxidativen Versteifung (hohe Polarität) betont die elastische Komponente bei tiefen Temperaturen (50). Die gemessenen kleineren Phasenwinkel bei -10 °C und -15 °C sind der messtechnische Beleg für diese Versteifung, die das Risiko für thermisch induzierte Rissbildung im Winter erhöht.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die chemischen Analysen die rheologischen Ergebnisse validieren. Die Performance-Unterschiede zwischen B-A51 und B-A52 und später auch in den Asphaltgemischen resultieren aus der Wirkung der Ausgangsbitumeneigenschaften und der oxidativen Beanspruchung während der großtechnischen Herstellung unter RA-Zugabe.

4.2.4 Asphaltmischgut

4.2.4.1 Zusammensetzung des Asphaltmischgutes

Die Ergebnisse der Überprüfungen zur Bestimmung der Asphaltmischgutzusammensetzung für die Varianten A51 (Referenz: mit Asphaltgranulat aus konventioneller Aufbereitung) und A52 (mit Asphaltgranulat aus dem Vertikalbrecher) sind in Tabelle 114 zusammengefasst. Zur Beurteilung der Übereinstimmung zwischen der Produktion im Asphaltmischwerk und der Rezeptierung sind in Abbildung 135 die Korngrößenverteilungen der entnommenen Proben den jeweiligen Sieblinien der Erstprüfungen (vgl. Abschnitt 3.3.4) gegenübergestellt.

Tabelle 114: Ergebnisse der Überprüfung am Asphaltmischgut für die im Mischwerk hergestellten A5-Mischgutvarianten (AC 16 B S SG)

Kennwert	Einheit	Asphaltvariante		Toleranz gemäß ZTV ¹⁾	
		A51	A52	untere	obere
Bindemittelgehalt	M.-%	5,1	5,2	4,6	5,4
Anteil < 0,063 mm	M.-%	6,4	6,5	4,1	10,1
Anteil < 0,125 mm	M.-%	7,7	8,0	6,3	12,3
Anteil 0,063 bis 2,0 mm	M.-%	23,7	25,6	18,2	34,2
Anteil > 2,0 mm	M.-%	69,9	67,9	58,7	74,7
Grobkornanteil	M.-%	24,4	20,0	11,5	29,5
Hohlraumgehalt MPK	Vol.-%	2,7	2,8	1,0	5,0

¹⁾ ZTV Asphalt-StB, Entwurf Stand 31.10.2025

Die Analysen belegen für beide Varianten eine hohe Konformität, sowohl im direkten Vergleich untereinander als auch in Bezug auf die Sollvorgaben der Erstprüfung. Eine systematische Abweichung wurde lediglich beim Hohlraumgehalt im Marshall-Probekörper (MPK) festgestellt. Dieser lag bei beiden großtechnisch hergestellten Varianten um ca. 1,0 Vol.-% unter dem im Rahmen der Erstprüfung ermittelten Wert.

Besonders hervorzuheben ist, dass durch die Verwendung der im Vertikalbrecher aufbereiteten Asphaltgranulate (RA5-2-1 und RA5-2-2) die angestrebte Korngrößenverteilung der Erstprüfung mit hoher Genauigkeit reproduziert werden konnte, obwohl eine höhere Asphaltgranulatzugabe im Vergleich zur Referenzvariante gewählt wurde. Dies deutet darauf hin, dass die spezifische Aufbereitungstechnologie eine homogenere und gezieltere Steuerung der Mischgutzusammensetzung im Vergleich zu konventionellen Verfahren unterstützen kann.

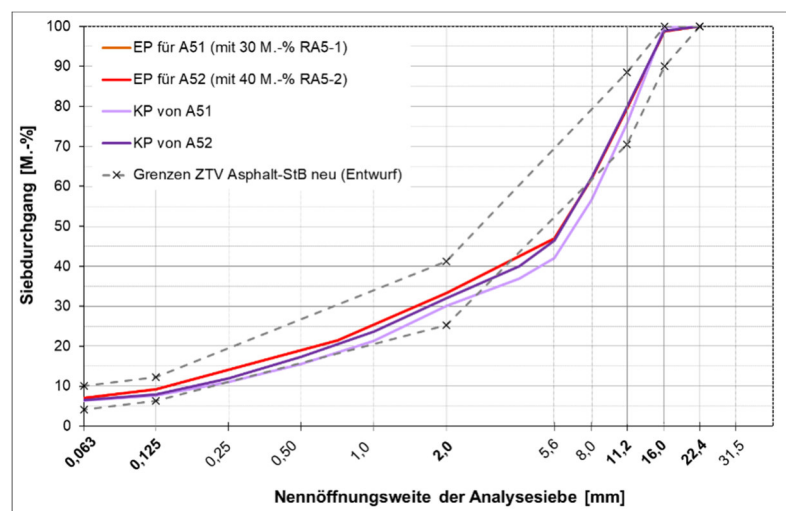


Abbildung 135: Korngrößenverteilungen der A5-Mischgutvarianten (AC 16 B S SG) und Gegenüberstellung zur Korngrößenverteilung der jeweiligen Erstprüfung

4.2.4.2 Steifigkeitsverhalten

Zur Charakterisierung des Gebrauchsverhaltens wurden die Steifigkeitsmoduln $|E^*|$ der Asphaltvarianten A51 und A52 in einem weiten Temperatur- und Frequenzspektrum ermittelt. Die statistische Auswertung mittels Varianzanalyse ergab für alle untersuchten Temperatur-Frequenz-Kombinationen signifikante Unterschiede zwischen den beiden Varianten.

In Tabelle 115 sind die Ergebnisse für die geprüften Temperaturen (-10 °C, 0 °C, 10 °C und 20 °C) sowie die Prüffrequenzen 1,0 Hz und 10,0 Hz zusammenfassend dargestellt. Die entsprechenden Masterkurven sind in Abbildung 136 grafisch aufbereitet.

Trotz der angestrebten Identität bezüglich der Zusammensetzung und des Hohlraumgehaltes der Varianten weist die Variante A52 (mit Vertikalbrecher-RA) über den gesamten Temperaturbereich ein höheres Steifigkeitsniveau auf als die Referenzvariante A51 (mit konventionell aufbereitetem RA). Bei der Ursachenanalyse dieser Steifigkeitsunterschiede zeigt sich ein komplexes Bild, bei dem stoffliche und prozesstechnische Faktoren eng miteinander interagieren.

Obwohl die Variante A52 einen höheren Anteil an Asphaltgranulat und damit theoretisch einen höheren Anteil an gealtertem RAP-Bitumen besitzt, ist ein alleiniger Rückschluss auf die Bindemittelcharakteristik rheologisch nicht haltbar. Die Untersuchungen an den zurück-

gewonnenen Bindemitteln B-A51 und B-A52 (siehe Abschnitt 4.2.3.2) belegen, dass im prüf-relevanten Bereich zwischen -15 °C und 20 °C keine statistisch signifikanten Differenzen im komplexen Schubmodul G^* vorliegen. Da das rheologische Verformungsverhalten der Bindemittel somit in diesem Temperaturbereich als faktisch gleichwertig einzustufen ist, muss die Ursache für das differierende Steifigkeitsverhalten des Asphalts höchstwahrscheinlich in der Beschaffenheit des Gesteinsgerüsts und dessen volumetrischer Einbindung liegen.

Tabelle 115: Mittelwerte und Standardabweichungen s^2 des Steifigkeitsmoduls für die A5-Mischgutvarianten (AC 16 B S SG) für die Temperaturen T und ausgewählte Frequenzen f

T [°C]	f [Hz]	Asphaltvariante			
		A51		A52	
		IEI* [MPa]	s^2 [MPa]	IEI* [MPa]	s^2 [MPa]
-10	1,0	23.259	406,0	26.115	370,6
	10	28.881	347,0	31.170	398,5
0	1,0	15.713	340,6	19.964	369,7
	10	21.729	375,5	25.900	423,6
10	1,0	9.465	302,2	12.534	384,3
	10	15.172	388,4	18.726	272,3
20	1,0	4.480	259,8	6.691	368,8
	10	8.408	586,2	12.055	338,3

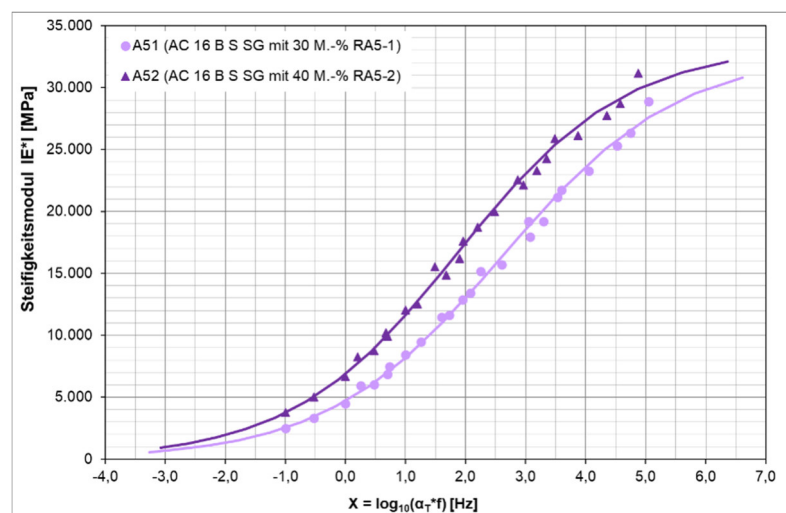


Abbildung 136: Masterkurve des Steifigkeitsmoduls IE^*I der A5-Mischgutvarianten (AC 16 B S SG)

Hierbei ist festzustellen, dass die Einflüsse aus der spezifischen Aufbereitung des Asphaltgranulats und der resultierenden Mischgutzusammensetzung im großtechnischen Maßstab zusammenwirken. Die Variante A52 zeichnet sich durch optimierte Gesteinseigenschaften aus – Kategorie $C_{100/0}$ resultierend aus der selektiven Aufbereitung im Rotorbrecher –, was eine stabilere mechanische Verzahnung innerhalb des Mischgutes begünstigt. Zusätzlich

weist die Überprüfung des Mischgutes für A52 eine tendenziell feinere Korngrößenverteilung sowie einen etwas niedrigeren Hohlraumgehalt der Probekörper auf (Differenz ca. 1,0 Vol.-%).

In der zusammenfassenden Beurteilung führt diese Überlagerung aus verbesserten Eigenschaften der Gesteinskörnung, der Sieblinie und veränderten volumetrischen Kennwerten zu der beobachteten signifikanten Erhöhung des Steifigkeitsmoduls. In Übereinstimmung mit den Erkenntnissen aus den Technikumsvarianten (Abschnitt 4.1) bestätigt sich damit auch unter großtechnischen Bedingungen, dass die Asphaltperformance durch die Interaktion im Gesamtgefüge bestimmt wird. Die RSB-Aufbereitungstechnik trägt ergänzend zur Optimierung der mechanischen Eigenschaften bei.

4.2.4.3 Ermüdungsverhalten

Zur Bestimmung des Ermüdungsverhaltens wurden Spaltzug-Schwellversuche an den Asphaltvarianten A51 und A52 durchgeführt. Die ermittelten linearisierten Regressionsparameter sind für beide Varianten in Tabelle 116 gegenübergestellt. Die entsprechenden Ermüdungsfunktionen sind in Abbildung 137 grafisch aufbereitet.

Die statistische Überprüfung mittels varianzanalytischer Verfahren (51) ergab bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von $\alpha = 5\%$, dass keine signifikanten Unterschiede zwischen den Achsenabschnitten (k') und den Steigungen (n') der Ermüdungsfunktionen der Asphaltvarianten A51 und A52 vorliegen.

Dieses Ergebnis ist besonders im Vergleich zu den vorangegangenen rheologischen Untersuchungen am extrahierten Bindemittel (vgl. Abschnitt 4.2.3.2) von Bedeutung. Auf Binde-mittelebene wies die Variante B-A52 eine statistisch signifikant steilere Steigung der Ermüdungsfunktion auf (vgl. Tabelle 111), was isoliert betrachtet auf eine höhere Schadensanfälligkeit der Bindemittelphase in A52 hindeutet.

Tabelle 116: Regressionsparameter der linearisierten Ermüdungsfunktionen, Bestimmtheitsmaße und Standardabweichungen der A5-Mischgutvarianten (AC 16 B S SG)

	Asphaltvariante	
	A51	A52
Regressionsparameter k	0,7327	0,2699
Regressionsparameter n	-3,8965	-4,0609
Bestimmtheitsmaß R^2	0,981	0,996
Standardabweichung s^2	0,225	0,123

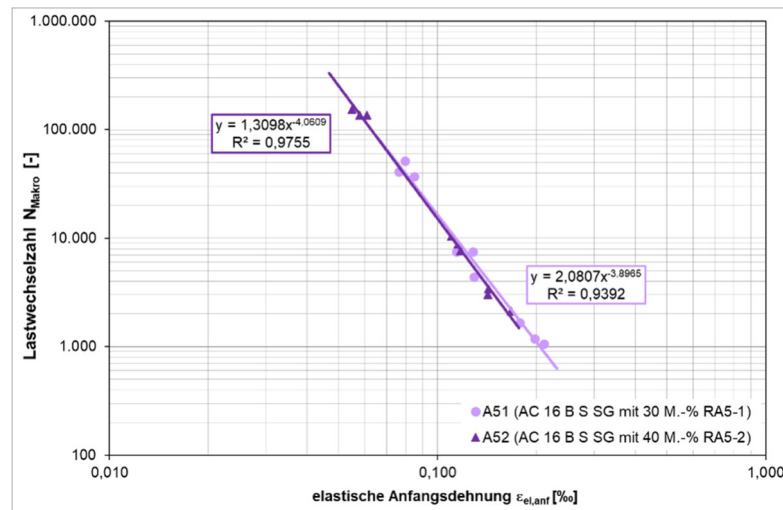


Abbildung 137: Ermüdungsfunktionen der A3-Mischgutvarianten (AC 16 B S SG)

Dass sich diese ungünstigere Charakteristik des resultierenden Bindemittels nicht unmittelbar auf das Ermüdungsverhalten des Asphalts überträgt, deutet auf einen wirksamen Kompensationseffekt innerhalb des Asphaltgefüges der Variante A52 hin. In der zusammenfassenden Beurteilung kann vermutet werden, dass die im Vergleich zur Referenz mit konventionell aufbereitetem Asphaltgranulat (A51) veränderte Mischgutstruktur der Variante A52 die rheologischen Nachteile der Bindemittelphase nivelliert. Die im Rotorbrecher erzielte höhere Bruchflächigkeit der Gesteinskörnung (Kategorie C_{100/0}) stellt hierbei einen potenziell begünstigenden Faktor dar, der im Zusammenwirken mit der feineren Sieblinie und dem leicht erhöhten Bindemittelgehalt zur Stabilisierung des Gefüges beigetragen haben könnte.

Obwohl zur abschließenden statistischen Absicherung des isolierten Einflusses der Gesteinseigenschaften weiterführende Versuchsreihen erforderlich wären, deuten die vorliegenden Ergebnisse darauf hin, dass das mechanisch stabilere Korngerüst in Verbindung mit dem geringfügig höheren Bindemittelgehalt die Dehnungsbeanspruchung der Bindemittelphase verringert. Das Ergebnis verdeutlicht somit, dass die Ermüdungsresistenz des Gesamtsystems Asphalt maßgeblich durch das Zusammenspiel aller Gefügekomponten bestimmt wird und eine isolierte Betrachtung der Bindemittelkennwerte für eine Performance-Prognose im Falle hochstandfester Mischgüter nur bedingt ausreichend ist.

4.2.4.4 Tieftemperaturverhalten

Die Beurteilung der Widerstandsfähigkeit gegen kälteinduzierte Rissbildung erfolgte über einaxiale Zugversuche bei variierenden Temperaturen sowie Abkühlversuche zur Ermittlung der kryogenen Spannungsverläufe. Die statistische Analyse der in Tabelle 117 dokumentierten Kennwerte liefert ein differenziertes Bild, welches die rheologischen Eigenschaften der Bindemittelphase auf das Asphaltmischgut überträgt.

Die Variante A52 (VB-RA) weist mit einer Bruchtemperatur T_F von $-18,0\text{ °C}$ ein signifikant schlechteres Kälteverhalten auf als die Referenzvariante A51 ($-23,5\text{ °C}$). Diese Differenz von

5,5 K belegt ein deutlich reduziertes Relaxationsvermögen der RSB-Variante unter kryogener Beanspruchung.

Tabelle 117: Mittelwerte x^* und Standardabweichungen s^2 der Bruchtemperaturen T_F , der Bruchspannungen $\sigma_{kryo,F}$ und der Zugfestigkeiten $\beta_{t(T)}$ bei 20 °C, 5 °C, -10 °C und -25 °C für die A5-Mischgutvarianten (AC 16 B S SG)

Kennwert	Einheit	Asphaltvariante			
		A51		A52	
		x^*	s^2	x^*	s^2
T_F	°C	-23,5	0,92	-18,0	0,58
$\sigma_{kryo,F}$	MPa	4,866	0,0827	4,340	0,2466
$\beta_{t(20\text{ °C})}$	MPa	1,194	0,0488	1,854	0,0467
$\beta_{t(5\text{ °C})}$	MPa	3,769	0,0771	5,137	0,1103
$\beta_{t(-10\text{ °C})}$	MPa	5,694	0,3209	5,969	0,3107
$\beta_{t(-25\text{ °C})}$	MPa	4,415	0,3426	4,300	0,1520

Tabelle 118: Regressionsparameter für die Funktion der kryogenen Spannung σ_{kryo} in Abhängigkeit von der Temperatur für die A5-Mischgutvarianten (AC 16 B S SG)

Regressionsparameter	Asphaltvariante	
	A51	A52
C_1	$-3,4101 \cdot 10^{-7}$	$-5,2485 \cdot 10^{-7}$
C_2	$-8,3846 \cdot 10^{-5}$	$-8,8776 \cdot 10^{-5}$
C_3	0,00336736	0,00320883
C_4	-0,04857335	-0,03892774
C_5	0,32128701	0,23831022

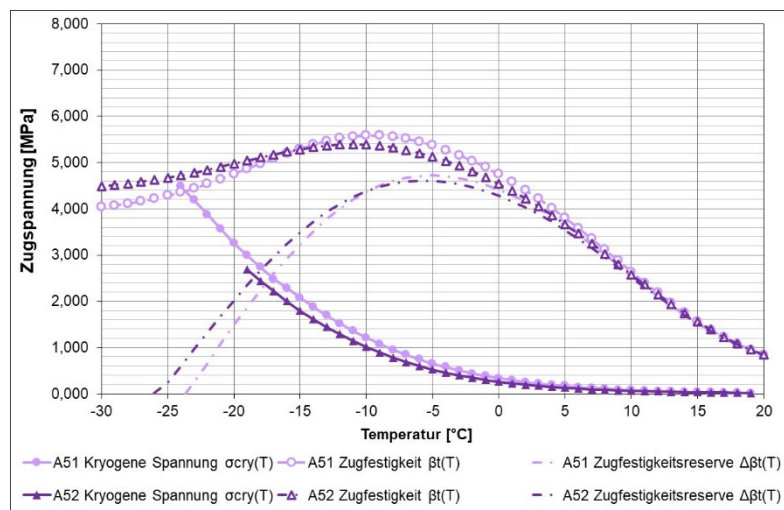


Abbildung 138: Verlauf der kryogenen Spannung $\sigma_{kryo(T)}$, der Zugfestigkeiten $\beta_{t(T)}$ und der Zugfestigkeitsreserven $\Delta\beta_{t(T)}$ in Abhängigkeit von der Temperatur der A5-Mischgutvarianten (AC 16 B S SG)

Diese Beobachtung korrespondiert mit dem technologischen Zusammenhang, wonach eine Erhöhung des Anteils an gealtertem Bindemittel zwar die Steifigkeit und damit den Verformungswiderstand steigern kann, jedoch zulasten der Kälteflexibilität geht – insbesondere, wenn dieser Effekt nicht durch eine gezielte Anpassung der Bitumenfilmdicke oder durch die Zugabe eines geeigneten Rejuvenators kompensiert wird.

Die Ursachenanalyse verdeutlicht, dass im Tieftemperaturbereich das Zusammenwirken von Gesteinsgerüst und Bindemittelvolumen an seine Grenzen stößt. Während die optimierte Bruchflächigkeit des Rotorbrecher-Materials und der etwas höhere Bindemittelgehalt des A52-Asphalts bei moderaten Temperaturen (20 °C bis 5 °C) noch zu signifikant höheren Zugfestigkeiten β_t führen, kehrt sich dieser Effekt bei sinkenden Temperaturen um. Da die Bruchspannungen beider Varianten statistisch gleichwertig sind, resultiert das frühzeitige Versagen der Variante A52 vorrangig aus dem steileren Aufbau der kryogenen Spannungen σ_{kryo} bei gleichzeitig eingeschränkter viskoser Entspannung.

Die Begründung für dieses Verhalten liegt in der Charakteristik des resultierenden Bindemittels B-A52. Wie bereits in den chemischen Analysen (Abschnitt 4.2.3.3) hergeleitet, betont die Kombination aus verbleibender elastischer Polymerstruktur und der gleichzeitigen oxidativen Versteifung (hohe Polarität) die elastische Komponente bei tiefen Temperaturen (50). In der Folge können thermisch induzierte Spannungen infolge kältebedingter Schrumpfung weniger durch viskoses Fließen relaxieren.

Im Unterschied zum Ermüdungs- und Steifigkeitsverhalten, bei denen das Gesteinskörnungsgerüst ungünstige Eigenschaften der Bindemittelphase teilweise ausgleichen konnte, wird das Tieftemperaturverhalten maßgeblich durch die rheologischen Eigenschaften des Bindemittels bestimmt. Das stabilere Gesteinskörnungsgerüst der Variante A52 führt zwar zu einer höheren Festigkeit im mittleren Temperaturbereich, vermag die mit sinkender Temperatur zunehmende Rissanfälligkeit der Bindemittelphase bei sehr niedrigen Temperaturen jedoch nicht auszugleichen. Die Ergebnisse zeigen daher, dass die thermische Rissbeständigkeit in erster Linie von der gezielten Zusammensetzung der Bindemittelkomponenten abhängt und weniger von der mechanischen Aufbereitung des Asphaltgranulats.

4.2.4.5 Verformungsverhalten

Hinsichtlich der methodischen Auswertung und der statistischen Grundlagen zur Charakterisierung des Widerstandes gegen bleibende Verformungen wird auf die detaillierten Ausführungen in Abschnitt 4.1.5.4 verwiesen. In Analogie zum dort beschriebenen Verfahren wurde für die großtechnisch hergestellten Varianten A51 und A52 der funktionale Zusammenhang zwischen der kumulierten vertikalen plastischen Dehnung $\epsilon_{plast,vert}$ und der vertikalen elastischen Anfangsdehnung $\epsilon_{el,anf,vert}$ untersucht.

Die Ergebnisse der Regressionsanalyse sowie die statistischen Kenngrößen sind in Tabelle 119 zusammengefasst. Die grafische Darstellung der Funktionen findet sich in Abbildung 139.

Tabelle 119: Regressionsparameter der linearisierten Funktionen für den Zusammenhang zwischen der kumulierten vertikalen plastischen Dehnung $\varepsilon_{\text{plast,vert}}$ und der vertikalen elastischen Anfangsdehnung $\varepsilon_{\text{el,anf,vert}}$, Bestimmtheitsmaße und Standardabweichungen der A5-Mischgutvarianten (AC 16 B S SG)

	Asphaltvariante	
	A51	A52
Regressionsparameter a'	4,3215	4,3976
Regressionsparameter b'	0,9818	1,0195
Bestimmtheitsmaß R^2	0,861	0,892
Standardabweichung s^2	0,298	0,310

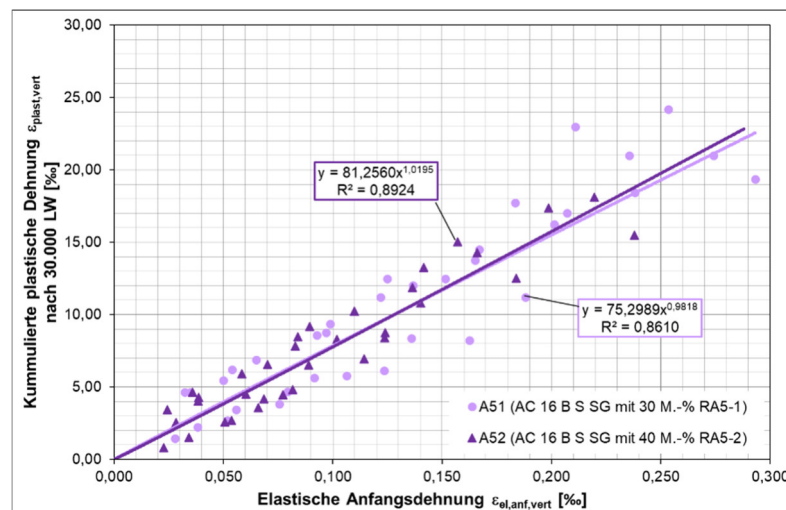


Abbildung 139: Funktionaler Zusammenhang zwischen der kumulierten vertikalen plastischen Dehnung $\varepsilon_{\text{plast,vert}}$ und der vertikalen elastischen Anfangsdehnung $\varepsilon_{\text{el,anf,vert}}$ für die A5-Mischgutvariante (AC 16 B S SG)

Die statistische Überprüfung der Regressionsparameter mittels globaler F-Tests auf einem Signifikanzniveau von $\alpha = 5 \%$ ergab, dass die Nullhypothese (H_0), wonach sowohl die Steigungen (b') als auch die Achsenabschnitte (a') der beiden Funktionen für die Varianten A51 und A52 statistisch gleich sind, angenommen wurde.

Das Ergebnis belegt eine technologische Gleichwertigkeit zwischen der konventionellen Aufbereitung und der Aufbereitung im Rotorbrecher hinsichtlich des Widerstandes gegen bleibende Verformungen. Diese statistische Gleichheit ist im Kontext der sich überlagernden Material- und volumetrischen Parameter zu interpretieren.

Rheologisch weist das zurückgewonnene Bindemittel B-A52 im verformungsrelevanten Temperaturbereich (30 °C bis 50 °C) einen signifikant höheren komplexen Schubmodul G^* sowie

eine geringere Kriechnachgiebigkeit J_{nr} auf (vgl. Abschnitt 4.2.3.2). Zusammen mit der optimierten Bruchflächigkeit des Rotorbrecher-Materials (Kategorie C_{100/0}) liegen hier Voraussetzungen für einen theoretisch höheren Verformungswiderstand vor.

Dass dieser Vorteil am Asphaltgemisch A52 bezüglich des Verformungsverhaltens nicht zu einer signifikanten Überlegenheit führt, lässt sich in der veränderten Mischgutzusammensetzung begründen. Die feinere Sieblinie und der geringfügig höhere Bindemittelgehalt der Variante A52 (vgl. Kontrollprüfung in Abschnitt 4.2.4.1) wirken tendenziell begünstigend auf die plastischen Verformungen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die stofflichen Vorteile (steiferes Bindemittel und bessere Gesteinsverzahnung), feiner Sieblinie und der höherer Bindemittelanteil zu einem Zustand des gegenseitigen Ausgleichs führten. Dies bestätigt die Robustheit des innovativen Aufbereitungsverfahrens im Rotorbrecher, da es trotz dieser komplexen Wechselwirkungen ein genauso standfestes Mischgut liefert wie bei der Verwendung von konventionell aufbereiten Asphaltgranulat.

4.2.4.6 Verdichtungsverhalten

Zur Beurteilung der Verarbeitbarkeit der großtechnisch hergestellten Mischgüter wurde der Verdichtungswiderstand ($T_{Gyrator}$) mittels Gyrator-Verdichtung ermittelt. Die Ergebnisse der Varianten A51 (konventionell) und A52 (RSB) sind in Tabelle 120 gegenübergestellt.

Tabelle 120: Mittelwerte $\bar{x}^*$ und Standardabweichungen s^2 des Verdichtungswiderstandes $T_{Gyrator}$ bei 145 °C für die A5-Mischgutvarianten (AC 16 B S SG)

Kennwert	Einheit	Asphaltvariante			
		A51		A52	
		$\bar{x}^*$	s^2	$\bar{x}^*$	s^2
$T_{Gyrator}$	[-]	73,4	6,20	65,3	4,28

Für die Referenzvariante A51 ergab sich ein mittlerer Verdichtungswiderstand von 73,4, während für die RSB-Variante A52 ein numerisch niedrigerer Wert von 65,3 ermittelt wurde. Die statistische Überprüfung mittels Varianzanalyse zeigt jedoch, dass dieser Unterschied bei einem Signifikanzniveau von $\alpha = 5 \%$ nicht statistisch signifikant ist.

Die fachliche Interpretation dieses Ergebnisses muss unter Berücksichtigung der viskoelastischen Eigenschaften der Mörtelmatrix bei 145 °C erfolgen. Da beide Varianten mit PmB hergestellt wurden, liegt im Gegensatz zu reinem Straßenbaubitumen eine ausgeprägte „Klebewirkung“ vor (84). Wie bereits bei den im Labor hergestellten Varianten (Abschnitt 4.1.5.5) dargelegt, führt diese Klebewirkung dazu, dass Unterschiede in der Gesteinskörnung im Gyrator eigentlich aktiviert und als höherer Widerstand messbar werden sollten.

Dass die Variante A52 trotz der besseren Bruchflächigkeit (Kategorie C_{100/0}) und des rheologisch steiferen Bindemittels B-A52 (höherer komplexer Schubmodul G^* (vgl. Abschnitt

4.2.3.2) keinen signifikant höheren Verdichtungswiderstand aufweist, könnte auf einen Zustand des gegenseitigen Ausgleichs zurückzuführen sein. In Analogie zum Verformungsverhalten (Abschnitt 4.2.4.5) wirken hier wahrscheinlich die veränderten Mischgutparameter der Variante A52 – insbesondere der um 10 M.-% höhere RA-Anteil, die feinere Sieblinie und der geringfügig höhere Bindemittelgehalt (vgl. Kontrollprüfung in Abschnitt 4.2.4.1) – prozessbegünstigend. Dieses „verdichtungswilligere“ Mischgut könnte damit den mechanischen Widerstand, der durch die hochwertigeren groben Gesteinskörnungen und das steifere Bindemittel theoretisch induziert wird, kompensieren.

In der zusammenfassenden Beurteilung lässt sich zwar für die Baupraxis eine weitgehende technologische Gleichwertigkeit zwischen der VB-Aufbereitung (A52) und dem konventionellen Verfahren (A51) konstatieren, es muss jedoch hinsichtlich der methodischen Einordnung, wie bereits bei den im Labor hergestellten Varianten in Abschnitt 4.1.5.5 kritisch angemerkt, auf die begrenzte statistische Trennschärfe des Verfahrens hingewiesen werden. Die zum Teil erheblichen Standardabweichungen, die aus der systembedingten Sensitivität der Gyrtor-Probekörperherstellung gegenüber geringfügigen Inhomogenitäten resultieren, schränken die Belastbarkeit der Aussage im Einzelfall ein. Die vorliegenden Daten liefern somit ein Bild einer weitgehenden technologischen Äquivalenz zwischen der RSB-Aufbereitung und dem konventionellen Verfahren, wobei stoffliche Trends stets im Kontext dieser verfahrenstechnischen Varianzen bewertet werden müssen.

4.2.5 Eigenschaften der eingebauten Asphaltsschicht

Um die Übertragbarkeit der Laborergebnisse auf die bautechnische Praxis zu verifizieren, wurden im Rahmen von Kontrollprüfungen Bohrkerne aus den hergestellten Schichten entnommen. Die Probenahme erfolgte an der Referenzstrecke (Station 0+460, Variante A51 mit konventionellem Asphaltgranulat) sowie an zwei Stationen der VB-Strecke (Stationen 0+100 und 0+250, Variante A52 mit im Vertikalbrecher aufbereitetem Asphaltgranulat).

Die Ergebnisse zur Bestimmung des Verdichtungsgrades und des Hohlraumgehaltes sind in Tabelle 121 zusammengefasst.

Tabelle 121: Ergebnisse der Kontrollprüfung für die A5-Mischgutvarianten (AC 16 B S SG)

Kennwert	Einheit	A51	A52		Toleranz gemäß ZTV ¹⁾	
		St. 0+460	St. 0+100	St. 0+250	untere	obere
Verdichtungsgrad	%	98,9	98,2	98,4	98,0	-
Hohlraumgehalt	Vol.-%	4,9	5,1	5,5	1,0	5,5

¹⁾ ZTV Asphalt-StB, Entwurf Stand 31.10.2025

An der Station 0+460 der Referenzstrecke (Variante A51) wurde ein Verdichtungsgrad von 98,9 % bei einem Hohlraumgehalt von 4,9 Vol.-% erzielt. An Station 0+100 der VB-Strecke (Variante A52) ergab sich ein Verdichtungsgrad von 98,2 % (Hohlraumgehalt 5,1 Vol.-%) und

an Station 0+250 ein Verdichtungsgrad von 98,4 % (Hohlraumgehalt 5,2 Vol.-%). Gemäß dem Entwurf der neuen Ausgabe der ZTV Asphalt-StB erfüllen beide Varianten somit die Anforderungen (Verdichtungsgrad $\geq 98,0$ % und Hohlraumgehalt 1,0 Vol.-% und 5,5 Vol.-%) vollumfänglich.

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass die Verwendung des im Vertikalbrecher aufbereiteten Asphaltgranulates (RA5-2) trotz der stofflichen Besonderheiten der Variante A52 (höhere Bruchflächigkeit der Gesteinskörnungen, höherer Anteil RA, rheologisch steiferes Bindemittel) keine negativen Auswirkungen auf die Qualität der eingebauten Schicht hat. Dies korrespondiert mit der in Abschnitt 4.2.4.6 aufgestellten Hypothese zum Zustand des gegenseitigen Ausgleichs, wonach die prozessbegünstigenden Mischgutparameter der Variante A52 (feinere Sieblinie und etwas höherer Bindemittelgehalt) die theoretisch erschwerenden Faktoren während des Einbaus kompensieren.

In der zusammenfassenden Bewertung erfahren damit die im Gyrator ermittelten Befunde zur technologischen Äquivalenz der Aufbereitungsverfahren durch die In-situ-Ergebnisse der Versuchsstrecke eine Validierung. Auf Basis der vorliegenden Daten kann die Praxistauglichkeit des RSB-Verfahrens für den Einbau hochstandfester Binderschichten somit positiv beurteilt werden.

4.2.6 Zusammenfassende Bewertung der großtechnischen Untersuchungen

Die großtechnischen Untersuchungen bestätigen die Eignung der Aufbereitung im Rotorbrecher (hier Vertikalbrecher – VB) zur Herstellung qualitativ hochwertiger Asphalte. Im direkten Vergleich zur konventionellen Aufbereitung kann das VB-Verfahren eine gezielte Optimierung der Gesteinseigenschaften ermöglichen, was die Gebrauchseigenschaften des Mischguts unterstützen kann.

Als wesentlicher Vorteil des VB-Verfahrens ist die Erzielung einer höheren Bruchflächigkeit (Kategorie C_{100/0}) hervorzuheben. Die Ergebnisse legen nahe, dass dieses mechanisch stabilere Gesteinskörnungsgerüst in der Lage sein kann, stoffliche Defizite der Bindemittelphase (hier bedingt durch die Bindemittelcharge und den erhöhten RA-Anteil) auszugleichen. Besonders beim Ermüdungsverhalten deutete sich an, dass die optimierte Verzahnung im Zusammenwirken mit der angepassten Zusammensetzung (Sieblinie, Bindemittelgehalt) eine Kompensation der rheologischen Schwächen ermöglichte. Das innovative Aufbereitungsverfahren scheint somit das Potenzial zu bieten, die Abhängigkeit der Asphaltperformance von der reinen Bindemittelqualität zu verringern.

Hinsichtlich des Tieftemperaturverhaltens zeigen die vorliegenden Ergebnisse jedoch die Grenzen dieser mechanischen Wirkung auf. Es war zu beobachten, dass die gesteigerte Gesteinsverzahnung die kälteinduzierte Sprödigkeit eines oxidativ vorbelasteten Bindemittels

diesem Fall nicht vollständig kompensieren konnte. Dies deutet darauf hin, dass die rheologische Charakteristik des resultierenden Bindemittels bei extremen Minustemperaturen die dominierende Einflussgröße für die thermische Rissbeständigkeit bleibt.

Bei der Verarbeitbarkeit belegen sowohl die Laboruntersuchungen als auch die In-situ-Ergebnisse der Untersuchungsstrecke eine technologische Gleichwertigkeit der Aufbereitungsverfahren. Der theoretisch höhere Verformungswiderstand des kantigeren VB-Materials wurde durch die Mischgutzusammensetzung ausgeglichen.

Zusammenfassend stellt die innovative Aufbereitung durch einen Vertikalbrecher im Vergleich zur konventionellen Technik ein effektives Instrument zur qualitativen Aufwertung von Asphaltgranulat dar. Während die Einbaueigenschaften auf einem vergleichbar hohen Niveau stabilisiert werden, kann das Verfahren ein mechanisch leistungsfähigeres Gesteinsgerüst generieren, welches das Gebrauchsverhalten des Asphalts stärkt.

4.3 Rechnerische Bewertung der funktionalen und strukturellen Dauerhaftigkeit

Die rechnerische Prognose der Nutzungsdauer und der Spurrinnentiefe dient der Überführung der labortechnisch ermittelten Materialkennwerte in ein reales Beanspruchungsszenario. Ziel ist es, die Auswirkungen der Aufbereitungsverfahren (konventionell vs. RSB/VB) auf die langfristige Substanzentwicklung des Straßenoberbaus zu bewerten. Die methodischen Grundlagen der verwendeten Berechnungsmodelle wurden bereits in Abschnitt 3.5 definiert. In den nächsten Abschnitten erfolgt die Darstellung und vergleichende Analyse der Ergebnisse.

4.3.1 Prognose der theoretischen Nutzungsdauer infolge Ermüdungsbeanspruchung

4.3.1.1 Kalibrierung und Ermittlung der Anpassungsfaktoren

Um eine belastbare Prognose der Nutzungsdauern für die verschiedenen Asphaltsschichten des Oberbaus zu gewährleisten, wurden zunächst schichtspezifische Anpassungsfaktoren (AF) abgeleitet. Die Ermittlung erfolgte nach dem im Forschungsvorhaben FE04.0339/2021/MGB (54) sowie im AP EADA (55) beschriebenen Verfahren.

Grundlage hierfür bildete die Definition von Ziel-Nutzungsdauern je Asphaltsschicht (siehe Tabelle 117), welche sich an den wirtschaftlichen Erhaltungszyklen und den Dimensionierungsvorgaben orientieren. Als Referenz für die Kalibrierung dienten:

- für die Asphaltdeckschicht (ADS) die Variante A10 (SMA),
- für die Asphaltbinderschicht (ABS) die Variante A31,
- für die Asphalttragschicht (ATS) der Standard-Kalibrierasphalt gemäß RDO Asphalt (26) bzw. AP EADA.

Tabelle 122: Ziel-Nutzungsdauern der Asphaltschichten, gewählte Asphalte und ermittelte Anpassungsfaktoren zur Kalibrierung

Schicht	Ziel-Nutzungsdauer [a]	Gewählter Kalibrierasphalt	Festgelegter AF
ADS	10	A10	20
ABS	20	A31	35
ATS	30	siehe RDO Asphalt	700

Die Kalibrierrechnungen wurden an Standardaufbauten der RStO (47), (Tafel 1, Zeile 1) für die Belastungsklassen Bk100, Bk32 und Bk10 durchgeführt. Durch den Abgleich der rechnerisch ermittelten Schadenssummen mit den angestrebten Ziel-Nutzungsdauern konnten die für die weitere Bewertung erforderlichen Anpassungsfaktoren (siehe Tabelle 122) bestimmt werden. Diese Faktoren bilden die methodische Basis für die im folgenden Abschnitt dargestellten vergleichenden Analysen.

4.3.1.2 Vergleichende Analyse der theoretischen Nutzungsdauern

Die theoretischen Nutzungsdauern der untersuchten Asphaltvarianten, wie sie in Tabelle 123 dokumentiert sind, erlauben eine differenzierte Bewertung der Sensitivität des Gesamtsystems gegenüber dem gewählten Aufbereitungsverfahren. Ein wesentlicher Fokus liegt dabei auf der Quantifizierung der verfahrenstechnischen Einflüsse der Aufbereitung von Asphaltgranulat bei ansonsten relativ vergleichbaren Mischgutkonzeptionen.

Tabelle 123: Theoretische Nutzungsdauern der Asphaltvarianten

Aufbau-variante	Asphaltvariante			Nutzungsdauer* [a]		
	ADS	ABS	ATS	ADS	ABS	ATS
D103040.1	A10	A30	A40.1	8	12	52
D103040.2	A10	A30	A40.2	6	10	8
D113141	A11	A31	A41	6	11	31
D123242.1	A12	A32	A42.1	5	13	28
D123242.2	A12	A32	A42.2	7	14	32
D203040.1	A20	A30	A40.1	10	12	53
D213141	A21	A31	A41	13	12	32
D223242.2	A22	A32	A42.2	17	14	32
D115141	A11	A51	A41	5	10	29
D125242.2	A12	A52	A42.2	5	6	32

* Nutzungsdauern entsprechen ca. einer B-Zahl von 163,7 Mio. äquivalenten 10 t AÜ

Der Vergleich innerhalb der SMA-Varianten zeigt zwischen der konventionellen Aufbereitung (A11) und der RSB-Aufbereitung (A12) nur geringfügige Abweichungen, wobei die rechnerischen Nutzungsdauern je nach Aufbau zwischen 5 und 7 Jahren variieren.

Im Gegensatz dazu führt der Wechsel des Aufbereitungsverfahrens bei den Asphaltbetondeckschichten von der Variante A21 (konventionell) hin zur Variante A22 (RSB) hier zu einer deutlichen Steigerung der theoretischen Nutzungsdauer von 13 auf 17 Jahre.

Auch bei den im Labor hergestellten Asphaltbinderschichten zeichnet sich eine positive Tendenz ab. Während für die konventionell aufbereitete Variante A31 Nutzungsdauern zwischen 11 und 12 Jahren ermittelt wurden, erreicht die RSB-Variante A32 Werte von 13 bis 14 Jahren, was einen moderaten Vorteil für das Aufbereitungsverfahren im RSB unterstreicht.

Zwischen A41 (31-32 Jahre) und A42.2 (32 Jahre) ist praktisch kein Unterschied durch das Aufbereitungsverfahren feststellbar. Ein Sonderfall stellt die Variante A42.1 dar, die mit 28 Jahren geringfügig unter der Zielvorgabe von 30 Jahren liegt. Diese Variante enthält mehr Zugabebitumen 70/100 als die Variante A42.2 (siehe Abschnitt 3.2.2).

Ein hiervon abweichendes Bild zeigt sich bei den großtechnisch hergestellten Asphaltbinderschichten der Untersuchungsstrecke. Der Wechsel von der Referenz A51 zur VB-Variante A52 führt rechnerisch zu einer Reduktion der Nutzungsdauer von 10 auf lediglich 6 Jahre. Wie jedoch die vorangegangenen Analysen der Bindemittelphase in Abschnitt 4.2.3 belegen, scheint dieses Ergebnis vorrangig auf die ungünstige Kombination aus der qualitativ schwächeren Frischbitumencharge B7 und dem um 10 M.-% höheren Anteil an RA-Bindemittel in der Variante A52 zurückzuführen zu sein. Die rechnerische Prognose bildet an dieser Stelle somit die rheologischen Eigenschaften des resultierenden Bindemittels ab und ist nicht als grundsätzliches Manko des Aufbereitungsverfahrens zu bewerten.

Ergänzend verdeutlichen die Ergebnisse an den Asphalttragschichtvarianten A40.1 und A40.2 die ausgeprägte Sensitivität des Rechenmodells gegenüber der gewählten Bindemittelhärte. Während die Variante mit einem härteren Bindemittel (30/45, A40.1) eine theoretische Nutzungsdauer von 52 Jahren erzielt, reduziert sich dieser Wert bei Verwendung einer weicheeren Bitumensorte (50/70, A40.2) auf lediglich 8 Jahre. Diese erhebliche Differenz unterstreicht, dass die konzeptionelle Festlegung des Bindemittels innerhalb der rechnerischen Dimensionierung oft einen dominanteren Einfluss auf die prognostizierte Dauerhaftigkeit ausübt als die Beschaffenheit des Gesteinsgerüsts. An dieser Stelle ist jedoch einschränkend festzuhalten, dass derart geringe Nutzungsdauern für Asphalttragschichten bei einer regelkonformen Bauausführung in der Praxis äußerst selten auftreten. Das rechnerische Ergebnis ist daher vorrangig als Ausdruck der spezifischen Modellcharakteristik zu interpretieren, die in diesem Fall die tatsächliche Substanzentwicklung der Schicht im Vergleich zur ggf. Realität möglicherweise unterschätzt.

4.3.2 Prognose des Widerstandes gegen bleibende Verformungen

Die Durchführung der Prognose der bleibenden Verformungen erfolgte nach dem in Abschnitt 3.5.3 dargelegten Verfahren, wobei die Eingangsparameter konsistent zu den Berechnungen der theoretischen Nutzungsdauer gewählt wurden. Aufgrund der noch ausstehenden Validierung des Berechnungsverfahrens zur Spurrinnenprognose werden die Ergebnisse als Relativwerte ausgewiesen, wobei die für die Aufbauvariante D103040.1 nach einer

Nutzungsdauer von 10 Jahren prognostizierte Spurrinnentiefe als Bezugsbasis dient. In Abbildung 140 sind die relativen Verformungen der untersuchten Varianten gegenübergestellt.

Die rechnerische Analyse bestätigt zunächst, dass die Variation der Asphalttragschicht (beispielsweise beim Vergleich der Aufbauten D103040.1 zu D103040.2) erwartungsgemäß nahezu keinen Einfluss auf die Verformungsbeständigkeit des Oberbaus hat. Dies ist auf die tiefere Lage der Tragschicht innerhalb des Temperaturgradienten zurückzuführen, wodurch diese Schicht im Vergleich zu den Schichten der Asphaltdecke deutlich geringeren thermischen Belastungen ausgesetzt ist.

Im Zentrum der Untersuchung steht die Frage, inwieweit das Aufbereitungsverfahren des Asphaltgranulats (konventionell gegenüber RSB/VB) die Verformungsbeständigkeit des Gesamtsystems beeinflusst.

Der Vergleich der SMA-Deckschichtvarianten (z.B. D114131 zu D123242.1 bzw. D123242.2 und D115141 zu D125242.2) verdeutlicht einen vernachlässigbaren Einfluss der verfahrenstechnischen Aufbereitung auf die prognostizierte relative Spurrinnentiefe. Bei den AC 8 D SP-Deckschichten ist hingegen eine geringfügige Verbesserung der Verformungsbeständigkeit durch die Verwendung von Asphaltgranulat aus dem RSB im Vergleich zur konventionellen Aufbereitung erkennbar (vgl. Varianten D213141 zu D223242.2).

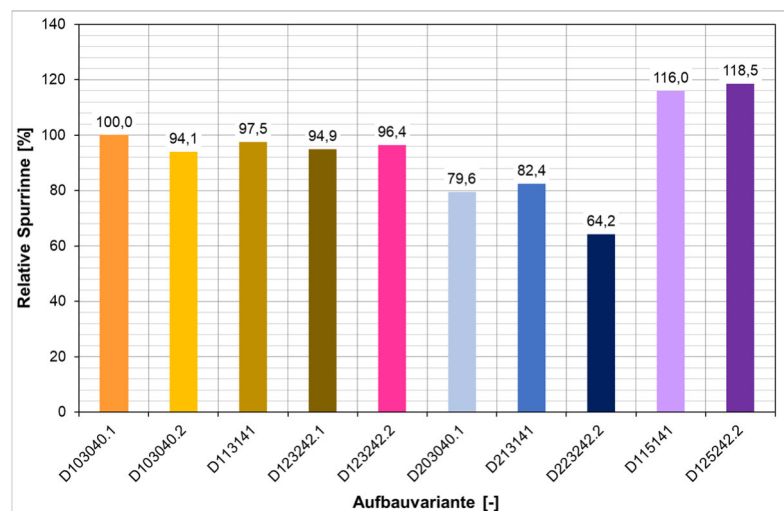


Abbildung 140: Relative Spurrinnentiefe nach 10 Jahren der Fahrbahnkonstruktion unter Variation der Asphaltdeck-, Asphaltbinder- und Asphalttragschichtgemische

Hinsichtlich der Verformungsbeständigkeit der Asphaltbinderschichten ergibt sich ein differenziertes Bild. Bei den im Labor hergestellten Varianten weist die RSB-Variante A32 mit einem relativen Verformungswert von 94,9 % bzw. 96,4 % eine hohe Gleichwertigkeit zur Variante A31 (94,5 %) auf, mit einer leichten Tendenz zu einem verbesserten Verformungswiderstand. Beim Vergleich der großtechnisch hergestellten Asphaltbinderschichten der Versuchsstrecke liegen die relativen Spurrinnentiefen für die Referenzvariante A51 bei 116 %

und für die VB-Variante A52 bei 118,5 %. Trotz der in den vorangegangenen Abschnitten beschriebenen stofflichen Unterschiede erweist sich die Verformungsbeständigkeit im Gesamtsystem als nahezu identisch.

Abschließend ist festzuhalten, dass ein direkter Rückschluss von den Ergebnissen der Druckschwellversuche am Einzelmaterial auf die im System berechneten Spurrinnentiefen nur bedingt möglich ist. Dies begründet sich aus der komplexen Interaktion der Materialeigenschaften im Verbund der Schichten des Asphaltoberbaus sowie dem temperaturabhängigen Materialverhalten, welches in der Schichtenfolge bei der Prognose der Spurrinnentiefe nicht in jedem Fall vollständig abgebildet wird.

4.3.3 Zusammenfassende Beurteilung der Prognoserechnungen

Die Zusammenführung der Ergebnisse aus den Prognoserechnungen zur theoretischen Nutzungsdauer (Abschnitt 4.3.1) und zum Widerstand gegen bleibende Verformungen (Abschnitt 4.3.2) erlaubt eine abschließende Bewertung der untersuchten Aufbereitungsverfahren (konventionell vs. Rotorbrecher = Rotorschleuderbrecher und Vertikalbrecher) im Hinblick auf die rechnerische Dauerhaftigkeit.

Im direkten Vergleich der Aufbereitungsverfahren erweisen sich die funktionalen Eigenschaften über alle untersuchten Schichten hinweg als technologisch gleichwertig bis leicht überlegen. Bei den im Labor hergestellten Varianten (A1, A2, A3) führt die Aufbereitung im Rotorbrecher (RSB) zu einer stabilen bis verbesserten Performance. Besonders hervorzuheben ist die Asphaltbetondeckschicht (A22), bei der rechnerisch eine Steigerung der theoretischen Nutzungsdauer ermöglicht wird, während die Verformungsbeständigkeit auf einem hohen Niveau gewahrt bleibt.

Ein differenzierteres Bild ergibt sich bei der Evaluation der großtechnischen Varianten der Untersuchungsstrecke (A51 vs. A52). Während beide Varianten hinsichtlich der Verformungsbeständigkeit eine nahezu identische Performance aufweisen (116 % zu 118,5 %), zeigt die Variante A52 in der Ermüdungsprognose einen deutlichen Abfall der theoretischen Nutzungsdauer. In Übereinstimmung mit den vorangegangenen stofflichen Analysen belegt die rechnerische Bewertung hierbei, dass die rheologische Qualität des Bindemittels (Charge B7 und erhöhter RA-Anteil) die bestimmende Größe für dieses Defizit darstellt. Die Aufbereitung mit dem Vertikalbrecher selbst liefert zwar ein mechanisch hochwertiges Gesteinskörnungsgerüst (Bruchflächigkeit Kategorie C_{100/0}), dessen stabilisierende Wirkung jedoch die signifikanten rheologischen Unterschiede des resultierenden Bindemittels im Berechnungsmodell nicht vollständig kompensieren kann.

Die Ergebnisse zeigen, dass das Aufbereitungsverfahren gezielt zur Beeinflussung der technischen Eigenschaften des Asphaltgranulats eingesetzt werden kann. Der Einsatz eines Rotorbrechers kann zu einem günstigeren und mechanisch stabileren Gesteinskörnungsgerüst

beitragen. Die rechnerische Nutzungsdauer und die Verformungsbeständigkeit werden jedoch in erster Linie durch die Mischgutzusammensetzung und die Wahl des Bindemittels bestimmt. Dies wird insbesondere durch das Leistungsgefälle zwischen den verschiedenen Mischgutttypen (z.B. SMA 11 S zu AC 8 D SP) sowie durch die Sensitivität gegenüber der Bindemittelhärte in den Asphalttragschichten (30/45 vs. 50/70) verdeutlicht.

Abschließend lässt sich konstatieren, dass die innovative Aufbereitung in einem Rotorbrecher zur Herstellung von Asphaltgranulat eine leistungsfähige Alternative zur konventionellen Aufbereitung darstellt. Die rechnerischen Prognosen validieren, dass die verfahrenstechnischen Vorteile dieser Aufbereitungstechnologie die Dauerhaftigkeit des Gesamtaufbaus einer Asphaltbefestigung unterstützen, sofern sie in eine leistungsfähige Mischgutkonzeption mit qualitativ hochwertigen Bindemittelkomponenten eingebettet sind.

4.4 Bewertung der Wirtschaftlichkeit mittels Ermittlung der Kosten für die Asphaltmischgüter und der Lebenszykluskosten von Straßen

4.4.1 Kosten für die Herstellung der Asphaltmischgüter

Die ökonomische Bewertung in diesem Abschnitt befasst sich mit der Bestimmung der Kosten für die Herstellung der verschiedenen Mischgutsorten und -varianten. Im Fokus steht dabei die Fragestellung, inwieweit innovative Aufbereitungsverfahren – namentlich der Rotorschleuderbrecher (RSB-RA) sowie der Vertikalbrecher (VB-RA) – bereits im Stadium der Mischgutherstellung Kostenvorteile oder signifikante Mehrkosten gegenüber der konventionellen Aufbereitung generieren. Die hier ermittelten Asphaltmischgutkosten dienen zudem als Eingangsgröße für die anschließende Lebenszykluskostenanalyse (LZKA) in Abschnitt 4.4.2.

Die Kalkulation der Asphaltmischgutpreise basiert auf den aktuellen Marktpreisen für Füller, Gesteinskörnungen und Bitumen sowie den durchschnittlichen spezifischen Kosten der konventionellen Aufbereitung des Herstellers für Asphaltgranulat. Da es sich bei dem Einsatz des Vertikalbrechers um einen großtechnischen Demonstrator-Versuch handelte, wurden dessen Kosten auf Basis einer zweiwöchigen Mietdauer inklusive der anfallenden Geräte-, Personal- und Nebenkosten kalkuliert. Für das im Rotorschleuderbrecher aufbereitete Material (RSB-RA) wurde ein analoger Kostenansatz gewählt, da beide Verfahren eine vergleichbare technische Charakteristik in der Bereitstellung aufweisen.

Um die Sensitivität der Mischgutkosten gegenüber der Anlageneffizienz zu bewerten, wurde der Materialdurchsatz beim RSB/VB variiert. Hierbei wurden Szenarien mit 80 t/h (realer Durchsatz während des Demonstrator-Versuchs), 130 t/h (mittlerer Industriestandard) und 160 t/h (technische Obergrenze) berücksichtigt. Zur Wahrung von Betriebsgeheimnissen er-

folgt die Darstellung in Tabelle 124 in relativen Werten, bezogen auf ein jeweiliges Referenzmischgut je Asphaltart (SMA 11 S = A10, AC 8 D SP = A21, AC 16 B S SG = A31 bzw. A51 und AC 22 T S = A41).

Die Analyse verdeutlicht, dass der Bindemittelgehalt erwartungsgemäß den dominierenden Kostenfaktor bei der Herstellung von Asphaltmischgut darstellt. Da Bitumen die hochpreisigste Komponente im Mischgut ist, führen bereits geringfügige Variationen im Bindemittelanteil zu deutlicheren Preisveränderungen als die Wahl des eigentlichen Aufbereitungsverfahrens. Die Materialkosten überlagern hierbei die prozesstechnischen Kosten der Asphaltgranulataufbereitung.

Gleichzeitig zeigt die Variation des Durchsatzes beim Rotorschleuderbrecher von 80 t/h auf 160 t/h einen signifikanten Effekt der Fixkostendegression. Eine Steigerung des Durchsatzes reduziert den anteiligen Kostenblock für Miete und Vorhaltung pro Tonne Asphaltmischgut erheblich. Dieser Effekt ist entscheidend, um die systembedingten Mehrkosten der innovativen Aufbereitungstechnologie gegenüber dem Standardverfahren zu kompensieren. Im direkten Vergleich zeigt sich, dass die innovativen Verfahren im Demonstratorstadium (bei 80 t/h) zunächst zu leicht höheren Mischgutkosten führen, die sich jedoch im niedrigen einstelligen Prozentbereich bewegen.

Tabelle 124: Zusammenstellung Materialpreis Asphaltmischgut (Lieferung ab Werk) in Abhängigkeit von den Aufbereitungskosten des Asphaltgranulates (RA)

Asphalt-variante	Asphalt-sorte	RA-Variante	RA-Anteil [M.-%]	Anteil Zugabebitumen [M.-%]	Materialpreis [%]		
					für Materialdurchsatz von 80 t/h	130 t/h	160 t/h
A10	SMA 11 S ¹	-	0	6,50	100,0	-	-
A11	SMA 11 S ¹	RA1-1	24,5	4,72	86,3	-	-
A12	SMA 11 S ¹	RA1-2	30	4,65	85,7	84,7	84,4
A20	AC 8 D SP ¹	-	0	6,40	135,8	-	-
A21	AC 8 D SP ¹	RA2-1	40	3,60	100,0	-	-
A22	AC 8 D SP ¹	RA2-2	40	3,46	100,7	98,8	98,3
A30	AC 16 B S SG	-	0	4,90	132,9	-	-
A31	AC 16 B S SG	RA3-1	40	3,07	100,0	-	-
A32	AC 16 B S SG	RA3-2	40	3,08	102,8	100,6	99,9
A40.1	AC 22 T S	-	0	4,10	153,4	-	-
A40.2	AC 22 T S	-	0	4,10	150,1	-	-
A41	AC 22 T S	RA4-1	57	1,67	100,0	-	-
A42.1	AC 22 T S	RA4-2	57	1,99	108,2	104,0	102,7
A42.2	AC 22 T S	RA4-2	57	1,72	104,0	99,8	98,5
A51	AC 16 B S SG	RA5-1	30	3,17	100,0	-	-
A52	AC 16 B S SG	RA5-2	40	3,16	99,8	97,7	97,1

¹⁾ mit Rejuvenator

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass das Aufbereitungsverfahren selbst – sofern die Durchsatzmengen in einem industriellen Maßstab ab ca. 130 t/h liegen – einen geringen relativen Einfluss auf den Gesamtpreis pro Tonne Asphaltmischgut hat. Die Wirtschaftlichkeit wird vorrangig durch den Bindemittelanteil und die Effizienz der Anlagenauslastung bestimmt.

4.4.2 Lebenszykluskostenanalyse (LZKA)

Im Mittelpunkt dieses Abschnitts steht der Vergleich der Wirtschaftlichkeit der verschiedenen Aufbauvarianten gemäß Tabelle 16 über den gesamten Lebenszyklus eines fiktiven Streckenabschnitts einer Autobahn. Während die Materialkosten (vgl. Abschnitt 4.4.1) lediglich eine Momentaufnahme für die Kosten des Asphaltmischguts darstellen, ermöglicht die Lebenszykluskostenanalyse eine ganzheitliche ökonomische Bewertung unter Berücksichtigung der zeitlich versetzten Erhaltungsaufwendungen.

Für die vergleichende Analyse wurde die Aufbauvariante D103040.1 mit der Asphalttragschicht aus Straßenbaubitumen 50/70 (theoretische Nutzungsdauer von 8 Jahren) explizit ausgeschlossen. Diese Entscheidung begründet sich darin, dass derart geringe Nutzungsdauern für Asphalttragschichten bei regelkonformer Ausführung in der Baupraxis als äußerst untypisch einzustufen sind. Eine Einbeziehung dieses Ausreißers würde die Sensitivität der LZKA verzerren und die Vergleichbarkeit der praxisrelevanten Varianten einschränken.

Auf Basis der in Abschnitt 4.3.1.2 (Tabelle 123) ermittelten theoretischen Nutzungsdauern wurde der Betrachtungszeitraum für die LZKA auf 60 Jahre festgesetzt. Diese Zeitspanne wurde so gewählt, dass für jede untersuchte Aufbauvariante mindestens ein vollständiger Zyklus bis hin zur grundhaften Erneuerung des Oberbaus rechnerisch abgebildet wird. Nur durch diesen erweiterten Horizont können die langfristigen wirtschaftlichen Vorteile langlebiger Mischgutkonzeptionen gegenüber den reinen Materialkosten objektiv bewertet werden.

4.4.2.1 Abfolge der baulichen Maßnahmen

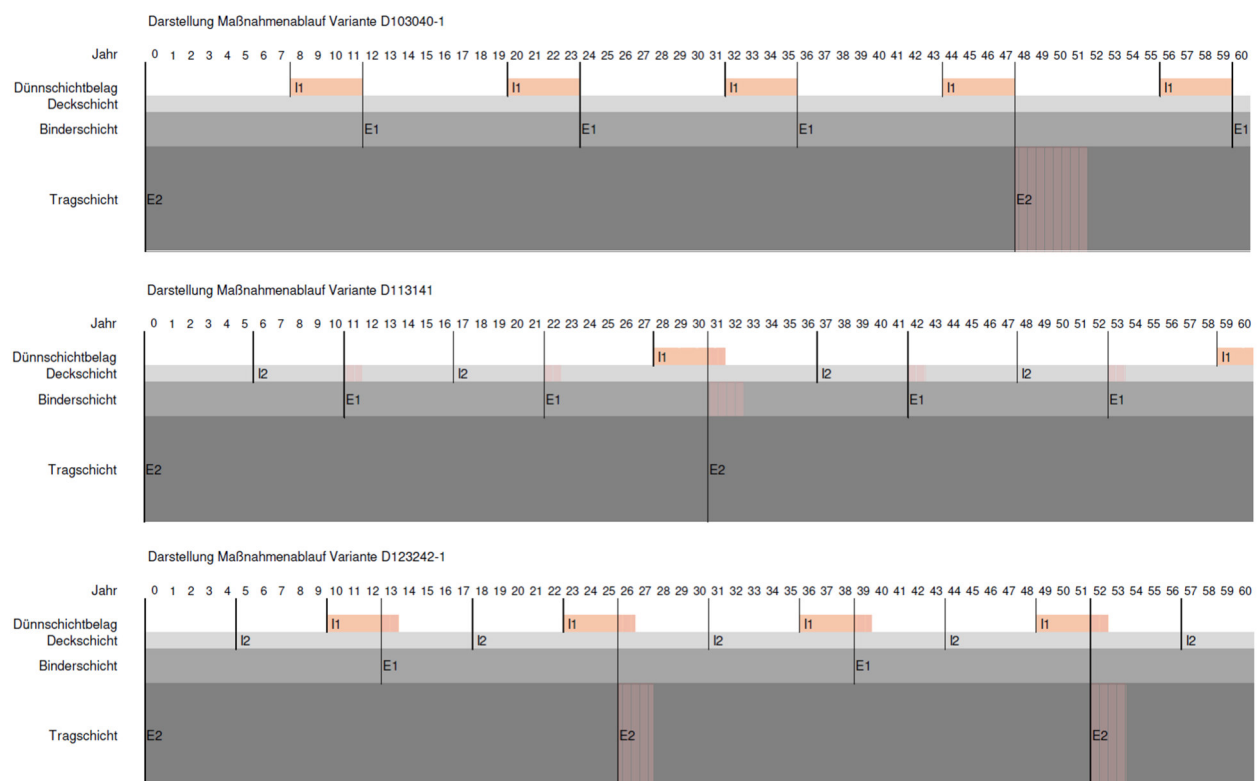
Die Modellierung der Lebenszykluskosten erfordert die Definition einer technisch plausiblen und ökonomisch optimierten Abfolge von Erhaltungsmaßnahmen. Als Grundlage hierfür dienen die in Abschnitt 4.3.1.2 ermittelten schichtspezifischen Nutzungsdauern für die Asphalt-schichten und für alle anderen Bestandteile der Straße die Angaben in den RPE-Stra 01 (52) und der ABBV (69).

Da die theoretische Nutzungsdauer der einzelnen Varianten der Schichten (Asphaltdeck-, Asphaltbinder- und Asphalttragschicht) stark differieren kann, waren bei einigen Aufbauvarianten verschiedene Szenarien für die Abfolge der baulichen Maßnahmen denkbar. In Fällen, in denen die optimale zeitliche Kombination von Maßnahmen (z.B. isolierter Deckschichter-

satz versus kombinierter Deck- und Binderschichtersatz) unklar war, erfolgte ein Variantenvergleich innerhalb der LZKA. Für die abschließende Bewertung wurde jeweils nur diejenige Abfolge berücksichtigt, die im Ergebnis das wirtschaftlichste Szenario darstellte.

Die für den Betrachtungszeitraum von 60 Jahren festgelegten Maßnahmenabfolgen sind in Abbildung 141 visualisiert (57). Die Darstellung nutzt die Indizes gemäß Tabelle 17 zur eindeutigen Identifikation der baulichen Eingriffe. Eine Besonderheit der Darstellung betrifft den Umgang mit rechnerischen Restsubstanzen. Erfordert die Instandsetzung einer tieferliegenden Schicht (z.B. der Asphaltbinderschicht) den vorzeitigen Ausbau einer darüberliegenden Schicht, deren theoretische Nutzungsdauer noch nicht vollständig ausgeschöpft ist, so wird diese potenzielle Restnutzungsdauer in Abbildung 141 rot-schraffiert gekennzeichnet. Diese methodische Vorgehensweise macht die „verlorene“ Substanz transparent, die aus bautechnischen Zwängen resultiert.

Durch die Wahl des 60-jährigen Betrachtungszeitraums wird sichergestellt, dass bei jeder untersuchten Aufbauvariante mindestens eine grundhafte Erneuerung erfasst wird. Damit liegt jeder Berechnung ein abgeschlossener Lebenszyklus zugrunde. Da das Erreichen des Zustands einer grundhaften Erneuerung einen definierten Endpunkt darstellt, kann die hier gewählte Maßnahmenabfolge im Sinne einer stationären Erhaltungsstrategie prinzipiell endlos wiederholt werden, was die langfristige Vergleichbarkeit der Varianten gewährleistet.



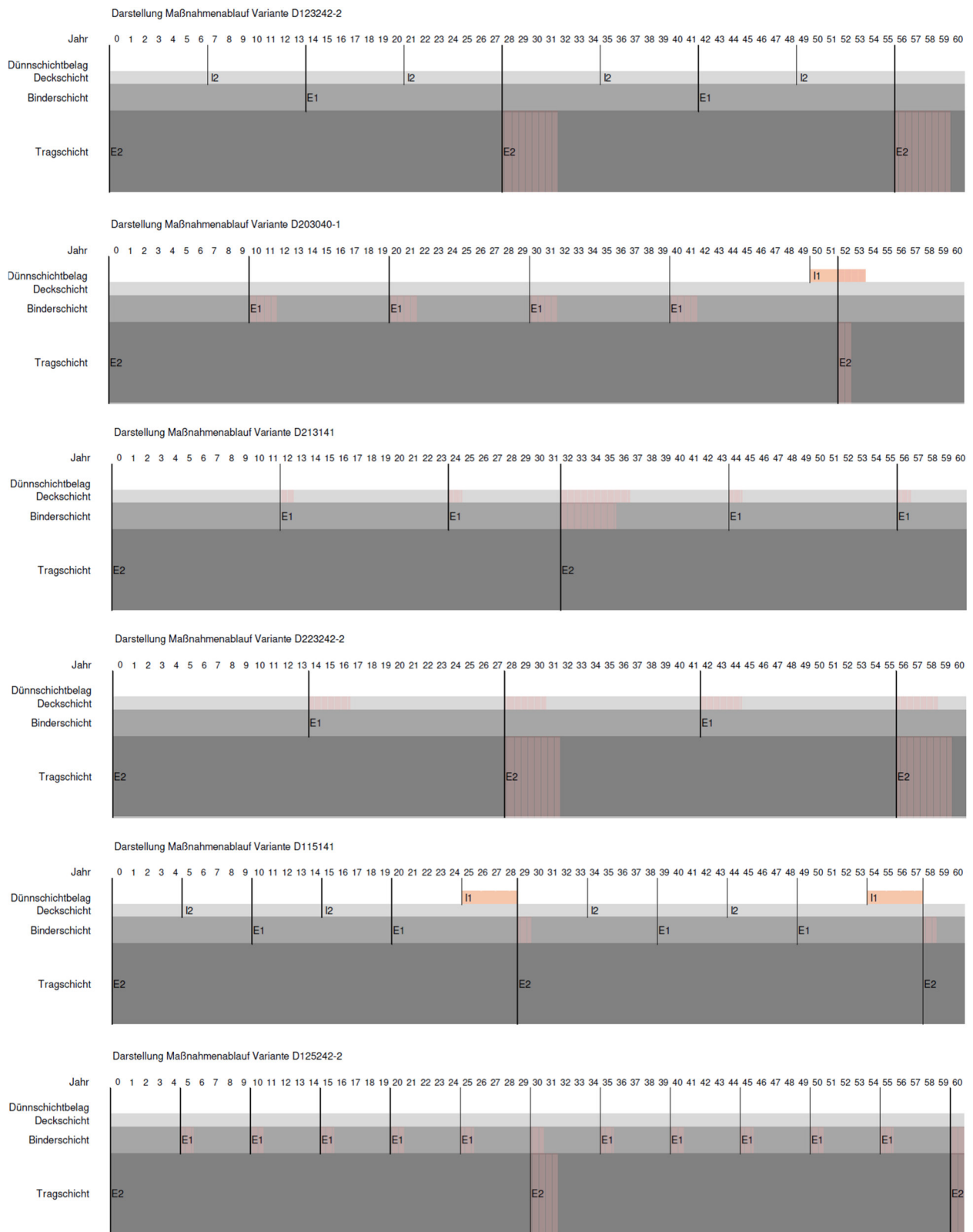


Abbildung 141: Darstellung der Abfolge der baulichen Maßnahmen (57)

4.4.2.2 Darstellung der Kostenentwicklung des Barwertes

Die zeitliche Entwicklung des kumulierten Barwertes (siehe (Formel 10)) über den 60-jährigen Betrachtungszeitraum wurde für die verschiedenen Aufbauvarianten grafisch aufbereitet.

Diese Form der Darstellung ermöglicht eine erste visuelle Analyse der ökonomischen Dynamik unter Berücksichtigung der in Abschnitt 3.6.2.3 definierten Zinssätze für die As- und Diskontierung.

Für die grafische Darstellung wurde das Szenario mit einer Durchsatzmenge bei der Aufbereitung von 80 t/h im Rotorschleuderbrecher bzw. Vertikalbrecher gewählt. Analysen der höheren Durchsatzmengen (130 t/h und 160 t/h) zeigten eine so geringe visuelle Abweichung im Kurvenverlauf, dass eine separate Darstellung keine zusätzliche Informationstiefe für die vergleichende Betrachtung geliefert hätte.

Um die Vertraulichkeit der Kostendaten zu wahren und gleichzeitig die Vergleichbarkeit zu maximieren, erfolgt die Abbildung in relativen Werten [%]. Als Bezugsgröße (100 %) dient der höchste kumulierte Barwert, der innerhalb des gesamten Variantenraums über den Zeitraum von 60 Jahren auftritt.

Der Verlauf der Graphen ist maßgeblich von der Gewichtung zwischen As- und Diskontierung abhängig. Die resultierenden Barwertkurven (Abbildung 142) bilden somit die kalkulatorische Ausgangslage für die ökonomische Bewertung der Erhaltungsstrategien ab.

Die grafische Auswertung der Barwertverläufe verdeutlicht die Komplexität der wirtschaftlichen Bewertung im Straßenbau. Es zeigt sich, dass eine belastbare Aussage über die Vorzüge einzelner Varianten allein auf Basis der grafischen Darstellung kaum möglich ist. Die Graphen der verschiedenen Aufbauvarianten weisen zahlreiche Schnittpunkte auf, was bedeutet, dass sich die ökonomische Reihung („Rangfolge“) der Varianten in Abhängigkeit vom gewählten Zeitpunkt innerhalb des Lebenszyklus wiederholt verschiebt.

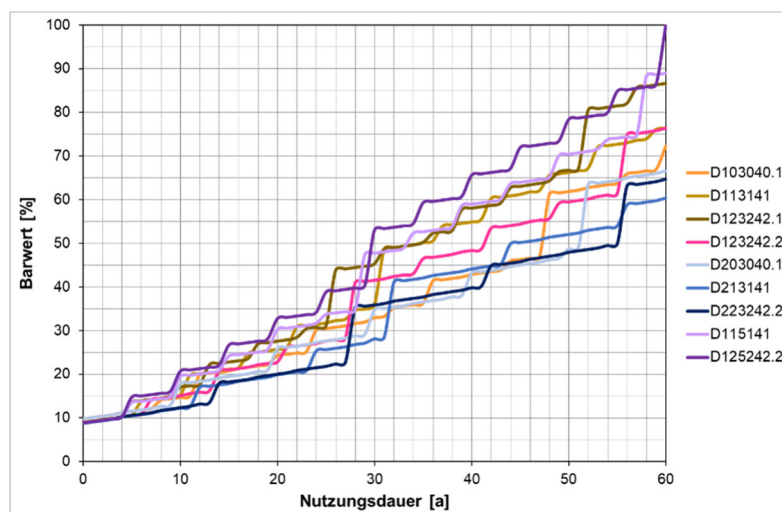


Abbildung 142: Vergleich Barwert der Aufbauvarianten

Dennoch lässt sich eine erste Tendenz feststellen. Durch die farbliche Zuordnung der Varianten wird ersichtlich, dass insbesondere Aufbauten mit Asphaltbeton-Deckschichten (D2...) im Vergleich zu den SMA- Deckschichten (D1...) tendenziell günstigere Kostenkorridore belegen. In diesem Kontext repräsentieren Kurvenverläufe mit geringeren relativen Barwerten die ökonomisch vorteilhafteren Szenarien.

Während die Vorteile bestimmter Deckschichtkonzeptionen somit bereits visuell deutlich werden, reicht die grafische Darstellung der Barwertentwicklung nicht aus, um den Einfluss der verschiedenen Aufbereitungsverfahren des Asphaltgranulats (RSB/VB vs. konventionell) hinreichend differenziert zu bewerten. Aufgrund der geringen preislichen Differenzen in der Herstellung und der komplexen zeitlichen Staffelung der Erhaltungsmaßnahmen sind die Abstände in den Kurvenverläufen zu marginal für eine abschließende Reihung der Aufbereitungsverfahren. Für eine belastbare Entscheidungsgrundlage hinsichtlich der wirtschaftlichsten Aufbereitungstechnik ist daher der direkte numerische Vergleich der Lebenszykluskosten am Ende des Betrachtungszeitraums im folgenden Abschnitt maßgebend.

4.4.2.3 Vergleich der Lebenszykluskosten

In Abbildung 143 werden der kumulierte Barwert sowie der um den Restwert nach (Formel 11) modifizierte Barwert – welcher die finalen Lebenszykluskosten (LZK) nach (Formel 12) definiert – vergleichend dargestellt. Die Datenvisualisierung erfolgt mittels eines Balkendiagramms sowie einer nach Rangfolge sortierten Datentabelle (Tabelle 125).

Die Analyse bezieht sich auf den definierten Betrachtungszeitraum von 60 Jahren. Um die Aufbauvarianten verständlich gegenüberzustellen, wurde eine prozentuale Darstellungsform gewählt. Als Bezugsgröße (100 %) fungiert die Aufbauvariante D125242.2, welche im gewählten Szenario den höchsten Kostenwert sowohl für den Barwert als auch die LZK aufweist.

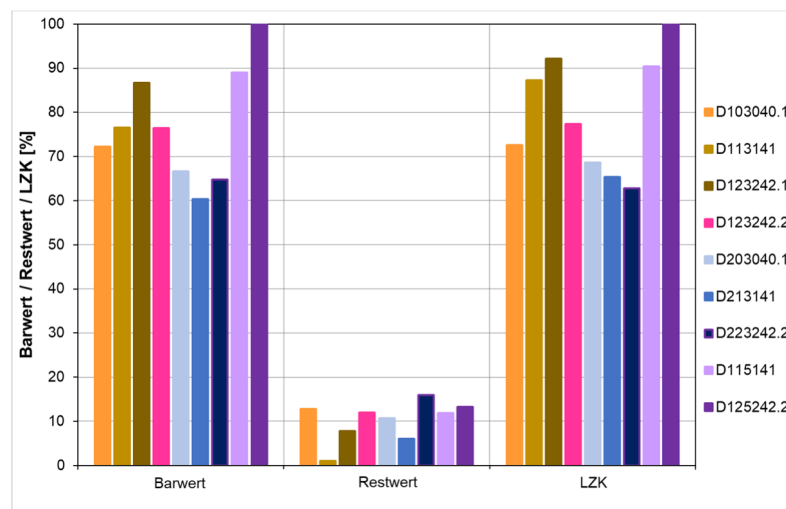


Abbildung 143: Vergleich der Wirtschaftlichkeit der Aufbauvarianten mittels Barwertes und LZK für einen RSB-Durchsatz von 80 t/h (57)

Ein zentrales Ergebnis der ökonomischen Untersuchung ist die Relevanz des rechnerischen Restwertes am Ende des Betrachtungszeitraums. Der Vergleich zwischen dem reinen Barwert und den finalen Lebenszykluskosten (LZK) verdeutlicht, dass die verbleibende Substanz die Rangfolge der Varianten beeinflusst. So führt die Berücksichtigung der Substanzwerte am Ende des 60-jährigen Zyklus zu einem „Platztausch“ zwischen den Aufbauvarianten D213141 und D223242.2 sowie zwischen D115141 und D123242.1. Dies belegt, dass eine

isolierte Betrachtung der Ausgabenzeitpunkte ohne Einbeziehung der Restnutzungsdauern zu Fehlinterpretationen der tatsächlichen langfristigen Wirtschaftlichkeit führen würde.

Tabelle 125: Vergleich der Wirtschaftlichkeit der Aufbauvarianten mittels Barwertes und LZK für einen RSB-Durchsatz von 80 t/h (57)

Reihung Aufbauvarianten - Barwert			Reihung Aufbauvarianten - LZK		
Aufbauvariante	Barwert [%]	Reihung	Aufbauvariante	LZK [%]	Reihung
D213141	60,3	1.	D223242.2	62,8	1.
D223242.2	64,8	2.	D213141	65,3	2.
D203040.1	66,6	3.	D203040.1	68,6	3.
D103040.1	72,3	4.	D103040.1	72,6	4.
D123242.2	76,4	5.	D123242.2	77,4	5.
D113141	76,5	6.	D113141	87,2	6.
D123242.1	86,7	7.	D115141	90,4	7.
D115141	89,0	8.	D123242.1	92,1	8.
D125242.2	100,0	9.	D125242.2	100,0	9.

Wie bereits bei der Beurteilung der funktionalen und strukturellen Dauerhaftigkeit in Abschnitt 4.3 festgestellt, stellen die Aufbauvarianten mit der untersuchten Asphaltbetondeckschicht (AC 8 D SP, Mischgutvarianten A2) die wirtschaftlich günstigsten Varianten dar. Die ersten drei Plätze der Rangfolge werden durchgehend von diesen Varianten belegt, während die Konstruktionen mit Splittmastixasphaltdeckschichten (SMA 11 S, Mischgutvarianten A1) erst ab Reihungsplatz 4 folgen. Ursächlich hierfür ist die signifikant längere theoretische Nutzungsdauer der splittreichen Asphaltbetondeckschichten, welche die Erhaltungsintervalle streckt und dadurch die diskontierten Kosten im Lebenszyklus maßgeblich reduziert.

Ein signifikanter Unterschied in den LZK zeigt sich zudem beim Vergleich der Asphaltbinder-schichten, die einerseits unter Laborbedingungen (A3) und andererseits großtechnisch (A5) hergestellt wurden. Die Laborvarianten verfügen bei ansonsten identischem Schichtaufbau über geringere LZK, was direkt aus deren höheren rechnerischen Nutzungsdauern resultiert (z.B. D123242.2 vs. D125242.2). Diese Performanceunterschiede liegen nicht im Herstellungsverfahren (Labor vs. Mischanlage) begründet, sondern unterstreichen vielmehr die Notwendigkeit einer präzisen Abstimmung der Asphaltrezeptur innerhalb des Schichtenpaketes, da bereits geringfügige Änderungen in der Zusammensetzung (z.B. Mineralogie, Sieblinie oder der Bindemittel usw.) die Wirtschaftlichkeit der gesamten Befestigung beeinflussen können.

Hinsichtlich der Aufbereitungstechnik des Asphaltgranulats ergibt sich ein differenziertes Bild, welches die Sensitivität des Gesamtsystems verdeutlicht. Bei den Aufbauvarianten D113141 und D123242.2 sowie D213241 und D223242.2 erweist sich die Aufbereitung im Rotorschleuderbrecher (RSB / RAX-2) als vorteilhaft gegenüber der konventionellen Methode. Im Fall der großtechnischen Varianten schneidet die konventionelle Aufbereitung (D115141) rechnerisch besser ab als der Vertikalbrecher (D125242.2). Dieser Umstand ist

jedoch vorrangig auf die bereits diskutierten rheologischen Defizite des Bindemittels in der Variante A52 (Bitumencharge B7 und erhöhter RA-Anteil) zurückzuführen, welche die mechanischen Vorteile des hochwertigen Gesteinskörnungsgerüsts im Berechnungsmodell überlagern.

Insgesamt belegt die LZKA, dass die Wirtschaftlichkeit von Asphaltbefestigungen durch ein komplexes Zusammenspiel von Mischgutkonzeption, Aufbereitungstechnik und Erhaltungsstrategie bestimmt wird. Dabei zeigt sich eine klare Hierarchie der Einflüsse. Eine optimierte Asphaltrezeptur und die Wahl der Asphaltart (z. B. hier AC 8 D SP statt SMA 11 S) haben eine stärkere Hebelwirkung auf die Lebenszykluskosten als das gewählte Aufbereitungsverfahren des Asphaltgranulats allein. Eine konzeptionell schwächere Rezeptur führt zwangsläufig zu höheren LZK, unabhängig von der Qualität der Aufbereitungstechnologie. Dennoch validieren die Ergebnisse, dass die innovative Aufbereitung in einem Rotorbrecher eine leistungsfähige Alternative darstellt, die zusätzliche strukturelle Reserven aktivieren kann. Sofern diese Technik in ein leistungsoptimiertes Mixdesign eingebettet ist, unterstützt sie die Dauerhaftigkeit und damit die langfristige ökonomische Performance des Gesamtaufbaus.

Letztendlich ist dennoch einschränkend festzuhalten, dass diese Ergebnisse spezifisch für die im Forschungsprojekt untersuchten Asphaltmischgutvarianten, Aufbauvarianten und die gewählten kalkulatorischen Parameter gelten. Die ermittelten theoretischen Nutzungsdauern stellen eine Modellrechnung dar. Bei einer Veränderung der Eingangsvariablen oder der wirtschaftlichen Rahmenbedingungen sind abweichende Reihungen möglich. Dennoch liefern die Ergebnisse eine valide Entscheidungsgrundlage für die Implementierung innovativer Aufbereitungstechniken in Verbindung mit leistungsoptimierten Mischgutrezepturen.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Das Forschungsvorhaben zielte darauf ab, die Potenziale nachhaltiger und gesteinschonender Aufbereitungstechnologien für Asphaltgranulat – namentlich des Rotorschleuderbrechers (RSB) und des Vertikalbrechers (VB) – im Vergleich zur konventionellen Aufbereitung umfassend zu bewerten. Im Fokus stand dabei die Fragestellung, inwieweit die veränderte mechanische Beanspruchung die Gesteinseigenschaften des Asphaltgranulats, die Performance der daraus resultierenden Asphalte sowie die langfristige Wirtschaftlichkeit beeinflusst. Aufgrund der Untersuchung von insgesamt fünf spezifischen Asphaltarten im Labor- und großtechnischen Maßstab liefern die Ergebnisse fundierte Indikatoren für die Leistungsfähigkeit dieser innovativen Aufbereitungsverfahren innerhalb des untersuchten Parameter-raums.

Die im Labormaßstab durchgeführten Untersuchungen belegen für alle betrachteten Mischgutsorten eine weitgehende technologische Gleichwertigkeit zwischen der konventionellen Aufbereitung und dem RSB-Verfahren hinsichtlich der wesentlichen Performance-Parameter Steifigkeit, Ermüdung, Kälteverhalten und Verdichtungswiderstand. Dabei verdeutlichen die Ergebnisse, dass die Asphaltperformance weitaus stärker durch die gewählte Bindemittelcharakteristik, die Asphaltzusammensetzung sowie den Hohlraumgehalt beeinflusst wird als durch die Art der mechanischen Aufbereitung des Asphaltgranulats. Die großtechnische Erprobung im Rahmen des Demonstrators bestätigte die zuvor festgestellten Zusammenhänge und lieferte ergänzende Erkenntnisse zum Einfluss des Gesteinskörnungsgerüsts. Die durch die Aufbereitung im Rotorbrecher verbesserten Gesteinseigenschaften, insbesondere der höhere Anteil gebrochener Kornoberflächen, begünstigen eine stärkere Verzahnung der Gesteinskörnungen. Dadurch können Schwankungen der Bindemittelleigenschaften teilweise ausgeglichen werden. Die Ergebnisse zum Tieftemperaturverhalten zeigen jedoch, dass dieser Einfluss begrenzt scheint. Bei sehr niedrigen Temperaturen wird die thermische Rissbeständigkeit offenbar weiterhin maßgeblich durch die rheologischen Eigenschaften des resultierenden Bindemittels bestimmt.

Hinter der nachgewiesenen technologischen Gleichwertigkeit im Gebrauchsverhalten verbergen sich jedoch prozesstechnische und strategische Vorteile, die den systematischen Einsatz der Rotorbrecher-Technologie insbesondere für kleine und mittelständische Unternehmen (KMU) rechtfertigen. Im Gegensatz zur ggf. unkontrollierten Kornzertrümmerung konventioneller Brecher ermöglicht die selektive Trennung im RSB/VB eine stoffliche Aufwertung des Sekundärrohstoffs auf Primärgesteinsniveau. Die gezielte mechanische Abreicherung des Bitumens in den groben Fraktionen führt zu „saubereren“ Gesteinskörnungen, was eine präzisere Steuerung des Bindemittelgehalts bei der Mischgutherstellung erlaubt und das Risiko von Inhomogenitäten reduzieren kann. Für Mischwerke ohne Paralleltrommel könnte dieses Verfahren eine bedeutende verfahrenstechnische Alternative bieten, da das aufbereitete Grobkorn ähnlich wie Primärgestein behandelt und dem Prozess zugeführt werden

kann. Im Kontext steigender CO₂-Bepreisungen könnte die energetische Bilanz des Verfahrens einen weiteren Wettbewerbsvorteil darstellen. Während die Erwärmung in Paralleltrommeln einen erheblichen Einsatz fossiler Brennstoffe erfordert, nutzt der Rotorschleuderbrecher bzw. Vertikalbrecher mechanische Energie in Form von elektrischer Antriebsleistung. Dies könnte nicht nur zu einer signifikanten Reduktion der direkten CO₂-Emissionen am Standort führen, sondern durch den Einsatz von regenerativ erzeugtem Strom eine nahezu klima-neutrale Aufbereitung des Sekundärrohstoffs ermöglichen.

Die rechnerische Bewertung der Nutzungsdauer und der Lebenszykluskosten zeigt, dass die Mischgutkonzeption den maßgebenden Einfluss auf die wirtschaftliche Dauerhaftigkeit einer Verkehrsflächenbefestigung ausübt. Das Aufbereitungsverfahren trägt hingegen dazu bei, das Asphaltgranulat technisch geeignet in das Mischgut einzubinden. Die innovative Aufbereitung kann im Demonstratorstadium zunächst mit moderaten Mehrkosten verbunden sein. Mit zunehmender Durchsatzmenge verringert sich dieser Kostennachteil jedoch infolge der industriellen Skalierung und der Verteilung der Fixkosten. Ab einem Durchsatz von etwa 130 t/h kann von einer wirtschaftlich konkurrenzfähigen Aufbereitung ausgegangen werden. Darüber hinaus verbessert sich die Wirtschaftlichkeit durch die Sicherung geeigneter Gesteinskörnungen aus Asphaltgranulat und den geringeren Bedarf an hochwertigen Primär-gesteinskörnungen.

Zukünftiger Forschungsbedarf besteht insbesondere in der weiteren Optimierung der Maschineneinstellungen, um das Ziel eines Bindemittelgehalts von unter 1,0 M.-% in den groben Fraktionen auch großtechnisch prozesssicher zu erreichen.

Ein vielversprechender Ansatz liegt in der Verwendung der bindemittelarmen Fraktionen der groben Gesteinskörnungen für die Herstellung von offenporigen Asphalten, in denen die verbesserten Gesteins- und Haftungseigenschaften besonders wirksam zur Verformungsbeständigkeit beitragen könnten.

Darüber hinaus sollte der Fokus in der Forschung verstärkt auf die Ebene des Asphaltmörtels gerichtet werden, um die dort ermittelten mechanischen Kennwerte durch geeignete Homogenisierungsansätze auf das Gebrauchsverhalten des Asphalts zu übertragen. Erste im Rahmen dieses Vorhabens implementierte Verfahren der Künstlichen Intelligenz (KI) bieten hierfür eine wertvolle Basis, bedürfen jedoch einer flächendeckenden Standardisierung der Prüf- und Auswerteprozeduren mittels DSR. Erschwerend kommen hierbei die ab dem Jahr 2026 vorgesehenen Änderungen im Asphaltregelwerk hinsichtlich temperaturabgesenkter Asphalte hinzu, die neue Randbedingungen für künftige Modellierungen schaffen.

Zusammenfassend bietet das Vorhaben den wissenschaftlich fundierten Nachweis, dass eine innovative gesteinschonende Aufbereitungstechnik die notwendige Voraussetzung ist, um Asphaltgranulat als hochwertiges Wirtschaftsgut im Kreislauf zu führen. Die technologi-

sche Sicherheit, die durch die nachgewiesene Gleichwertigkeit der Materialeigenschaften erzielt wurde, bildet die Grundlage für eine breite Marktimplementierung dieser effizienten Aufbereitungstechnologie.

Quellen und verwendete Hilfsmittel

Quellenverzeichnis

- (1) Jähnig, J.; Dr. Lerch, T.; Mansfeld, R., Mühle, R.; Prof. Dr.-Ing. Rauschenbach, V.; Zinkler, S. (2019): *Wiederverwendung und Verwertung von Ausbauasphalt*. Leitfaden, Dresden: Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie.
- (2) KrWG (2012): Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen. Ausfertigungsdatum: 24.02.2012, <https://www.gesetze-im-internet.de/krwg/KrWG.pdf>.
- (3) Deutscher Asphaltverband e. V. (DAV) (2013): *Wiederverwendung von Asphalt – Neues Regelwerk weist den Weg nach vorn*, Bonn: Deutscher Asphaltverband e. V.
- (4) Deutscher Asphaltverband e. V. (DAV) (2019): Asphaltproduktion in Deutschland. [online] https://www.asphalt.de/fileadmin/user_upload/downloads/Asphalt2019neu.pdf [07.02.2020]
- (5) Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (2007/2013): *ZTV Asphalt-StB – Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen aus Asphalt*, Köln: FGSV Verlag GmbH.
- (6) Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (2009): *TL AG-StB – Technische Lieferbedingungen für Asphaltgranulat*, Köln: FGSV Verlag GmbH.
- (7) Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (2009/2013): *M WA – Merkblatt für die Wiederverwendung von Asphalt*, Köln: FGSV Verlag GmbH.
- (8) Deutscher Asphaltverband e. V. (DAV) (2019): *Wiederverwendung von Asphalt und alternative Verwertungskonzepte für Asphaltgranulat zur weiteren Steigerung der Nachhaltigkeit*. Positionspapier, Bonn: Deutscher Asphaltverband.
- (9) Radenberg, M., Bötcher, S. und Sedaghat, N. (2016): *Einsatz von Rejuvenatoren bei der Wiederverwendung von Asphaltgranulat*. 1. Teil des Schlussberichtes zum FE 07.0250/2011/LRB, Bochum.
- (10) Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (2007/2013): *TL Asphalt-StB – Technische Lieferbedingungen für Asphaltmischgut für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen*, Köln: FGSV Verlag GmbH.
- (11) Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt (2015): Ausführungsvorschriften zu § 7 des Berliner Straßengesetzes über die Vorbereitung des Ausbaus von Asphaltschichten im Straßenbau. Amtliche Fassung, in: Amtsblatt für Berlin, Nr. 23/2015, S. 1205.

-
- (12) Leutner, R., Lobach, T. und Renken, P. (2005): *Wirksamkeit der Zugabe von Asphaltgranulat auf die mechanischen Eigenschaften von Asphaltdeckschichten*, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 908, Bonn: Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen.
- (13) Renken, P. und Lobach, T. (2007): *Einfluss der Zugabe von Ausbauasphalten in Asphaltbinderschichtmischgut mit PmB 45*, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 954, Bonn: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung.
- (14) Wistuba, M. P., Grönninger, J. und Renken, P. (2011): Asphaltwiederverwendung auf hohem Wertschöpfungsniveau, in: Straße und Autobahn, Jg. 64, Heft 8, S. 532–536, Kirschbaumverlag.
- (15) Eichler, J. (2018): *Beurteilung der Gebrauchseigenschaften von Asphaltmörtel mit dem Dynamischen Scherrheometer*. Dissertation, Fakultät Bau Geo Umwelt, Technische Universität München, München.
- (16) Büchner, J. und Wistuba, M. P. (2019): *Ansprache der Gebrauchseigenschaften von Asphaltmastix im DSR*, in: 6. Dresdner Asphalttage, Fakultät Bauingenieurwesen, Institut für Stadtbauwesen und Straßenbau, Professur für Straßenbau, Dresden.
- (17) Huurman, M., Qui, L., Woldekidan, M., Demmink, E. W., de Bruin, B. (2020): Low Emission² Asphalt Pavement (LE2AP), [online] <https://www.h-a-d.hr/pubfile.php?id=1110> [07.02.2020].
- (18) Qui, J., Hurrman, R., Demmink, E. W., Frunt, M. (2020): *Sustainable Warm In-Plant SMA-Mixtures with 80 % Recycling and Produced at 115 °C*, in: Proceedings of the 5th International Symposium on Asphalt Pavements & Environment, Springer-Verlag, P. 283–293.
- (19) Sivapatham, P., Simmleit, N. (2020): *Precious Recycling of Reclaimed Asphalt as Hot Mix Asphalt by Use of Rejuvenator*, in: 3rd International Conference on Innovative Technologies for Clean and Sustainable Development, Chandigarh, India.
- (20) Huurman, M., Qiu, J., Woldekidan, M., Jacobs, M., Frunt, M. (2021): Towards sustainable horizontal asphalt recycling, [online] https://www.bamle2ap.com/sites/default/files/domain-456/documents/cew2016_paper_jqi_14-03-2016-456-14685809401369223577.pdf [15.01.2021].
- (21) Guldán, D. und Däschlein, A. (2009): *Auf Linie gebracht – Rotorbrecher zur Herstellung von Sand und Feinsand*, in: AT Mineral Processing, Heft 11/2009, Gütersloh: Bauverlag BV GmbH.
- (22) Amomatic Oy (2021): Handling Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) in a Revolutionary Way. [online] <https://www.amomatic.com/en/technologies/recycling-equipment/amopepper> [15.01.2021].

-
- (23) Maarten, J. (2017): *Nachhaltigkeit und Asphalt: eine gute Kombination*, in: 1. Siegener Straßenbautag, Siegen.
- (24) Weise, C. und Zeißler, A. (2019): *Möglichkeiten und Perspektiven der rechnerischen Dimensionierungs- und Prognoseverfahren*, in: 6. Dresdner Asphalttage, Fakultät Bauingenieurwesen, Institut für Stadtbauwesen und Straßenbau, Professur für Straßenbau, Dresden.
- (25) Birbaum, J. (2016): *Ermittlung eines Verfahrens zur Ermittlung der Lebenszykluskosten von Straßen in Asphaltbauweise*. Dissertation, Naturwissenschaftlich-Technische Fakultät, Universität Siegen, Siegen.
- (26) Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (2009/2024): *RDO Asphalt – Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung des Oberbaus von Verkehrsflächen mit Asphaltdeckschicht*, Köln: FGSV Verlag GmbH.
- (27) DIN-Normenausschuss Bauwesen (2016): *DIN EN 13108-1 – Asphaltmischgut – Mischgutanforderungen – Teil 1: Asphaltbeton; Deutsche Fassung EN 13108-1:2016*, Berlin: Beuth-Verlag.
- (28) Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (2015): *H A I A B i – Hinweise für die Planung und Ausführung von alternativen Asphaltbinderschichten*, Köln: FGSV Verlag GmbH.
- (29) Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (2019): *AP AC D SP – Arbeitspapier für die Planung und Ausführung von Asphaltdeckschichten aus splittreichem Asphaltbeton für den Einsatz in Verkehrsflächen mit besonderen Beanspruchungen*, Köln: FGSV Verlag GmbH.
- (30) Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV): *TP Gestein-StB – Technische Prüfvorschriften für Gesteinskörnungen im Straßenbau*, Köln: FGSV Verlag GmbH.
- (31) Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV): *TP Asphalt-StB – Technische Prüfvorschriften für Asphalt*, Köln: FGSV Verlag GmbH.
- (32) DIN-Normenausschuss Bauwesen (2015): *DIN EN 1427 – Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung des Erweichungspunktes – Ring- und Kugel-Verfahren; Deutsche Fassung EN 1427:2015*, Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- (33) DIN-Normenausschuss Bauwesen (2015): *DIN EN 1426 – Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung der Nadelpenetration; Deutsche Fassung EN 1426:2015*, Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- (34) Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (2014): *AL DSR-Prüfung (T-Sweep) – Arbeitsanleitung zur Bestimmung des Verformungsverhaltens von Bitumen*

und bitumenhaltigen Bindemitteln im Dynamischen Scherrheometer (DSR) – Durchführung im Temperatur-Sweep, Köln: FGSV Verlag GmbH.

- (35) Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (2017): *AL DSR-Prüfung (BTSV) – Arbeitsanleitung zur Bestimmung des Verformungsverhaltens von Bitumen und bitumenhaltigen Bindemitteln im Dynamischen Scherrheometer – Teil 4: Durchführung des Bitumen-Typisierungs-Schnell-Verfahrens*, Köln: FGSV Verlag GmbH.
- (36) Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (2017): *AL BBR-Prüfung – Arbeitsanleitung zur Bestimmung des Verhaltens von Bitumen und bitumenhaltigen Bindemitteln bei tiefen Temperaturen im Biegebalkenrheometer (BBR)*, Köln: FGSV Verlag GmbH.
- (37) Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (2012): *AL MSCR-Prüfung (DSR) – Arbeitsanleitung zur Bestimmung des Verformungsverhaltens von Bitumen und bitumenhaltigen Bindemitteln im Dynamischen Scherrheometer (DSR) – Durchführung der MSCR-Prüfung (Multiple Stress Creep and Recovery Test)*, Köln: FGSV Verlag GmbH.
- (38) Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (2025): *AL DSR-Prüfung (Mastix) – Arbeitsanleitung für die Prüfung von Mastix im Dynamischen Scherrheometer (DSR)*, Köln: FGSV Verlag GmbH.
- (39) Mezger, Th. G. und Rochlani, M. R. (2024): *Bitumen Rheology*, 2. Aufl., Anton Paar GmbH (Hrsg.), Graz, Austria: Anton Paar GmbH.
- (40) Mangalath Shine, A., Canon Falla, G., Kamratowsky, E., Wellner, F. (2023): *Fatigue testing on bitumen binder using different column specimen shapes*, in: Road Materials and Pavement Design, Volume 24, Issue 1, P. 654–671, DOI: 10.1080/14680629.2023.2181067.
- (41) Schneider, V. (2024): *Einfluss der Zusammensetzung des Mörtels im Gussasphalt auf sein Gebrauchsverhalten*. Diplomarbeit, Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden (HTWD), Dresden.
- (42) Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (2025): *TL Bitumen-StB – Technische Lieferbedingungen für Straßenbaubitumen und gebrauchsfertige Polymer-modifizierte Bitumen*, Köln: FGSV Verlag GmbH.
- (43) Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (2024): *AL DSV slim – Arbeitsanleitung Druck-Schwellversuch am schlanken Probekörper*, Köln: FGSV Verlag GmbH.
- (44) DIN-Normenausschuss Bauwesen: *DIN EN 12697 – Asphalt – Prüfverfahren*, Berlin: Beuth Verlag GmbH.

-
- (45) PRALL-TEC GmbH: Broschüre für die raupenmobile Vertikalprallmühle mit PTM-Mag Impact, Lengerich: PRALL-TEC GmbH. [online] https://www.prall-tec.de/wp-content/uploads/2025/07/14072025_Broschuere_PTM_2100_DE.pdf [07.09.2023].
- (46) Zaumanis, M., Boesinger, L., Kunz, B., Mazzoni, H., Bruhin, P., Mazor, S., Poulikakos, L. (2021): Three indexes to characterise crushing and screening of reclaimed asphalt pavement, Taylor & Francis Group [online] <https://doi.org/10.1080/10298436.2021.1990287> [03.11.2021]
- (47) Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (2012/2024): *RStO – Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen*, Köln: FGSV Verlag GmbH.
- (48) Gaestel, C., Smadja, R. und Lamminan, K. A. (1971): *Contribution à la connaissance des propriétés des bitumes routiers*, in: Revue Générale des Routes et des Aérodrômes, Band 466.
- (49) Lesueur, D. (2009): *The colloidal structure of bitumen: Consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification*, in: Advances in Colloid and Interface Science, Band 145, P. 42-82.
- (50) Petersen, J. C. (2009): *A review of the fundamentals of asphalt oxidation as it relates to performance-related properties and relevant test methods*, in: Transportation Research Circular, Number E-C140, Washington: Transportation Research Board.
- (51) Dragon, Ines (2015): *Einfluss der Zusammensetzung von Asphaltgemischen auf die Ermüdungsbeständigkeit von Verkehrsflächenbefestigungen aus Asphalt*. Dissertation, Fakultät Bauingenieurwesen, Technische Universität Dresden, Dresden.
- (52) Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (2001): *RPE-Stra – Richtlinie für die Planung von Erhaltungsmaßnahmen an Straßenbefestigungen*, Köln: FGSV Verlag GmbH.
- (53) Zeißler, A. (2021): *Grundlagen zur Struktur- und Materialoptimierung von Asphaltbefestigungen. Habilitationsschrift*, Fakultät Bauingenieurwesen, Technische Universität Dresden, Dresden.
- (54) Picht, A., et al. (2025): *Rechnerische Potentialermittlung bezüglich der Ermüdungs- und Verformungsresistenz von Decken aus Asphalt*. Schlussbericht zum FE 04.0339/2021/MGB, Technische Universität Dresden.
- (55) Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (2022): *AP EADA – Arbeitspapier Ermittlung von Anpassungs- und Sicherheitsfaktoren für die Dimensionierung von Asphaltbefestigungen*, Köln: FGSV Verlag GmbH.

-
- (56) Kayser, S., Zeißler, A. und Reinhardt, U. (2011): *Spurrinnenprognose für Asphaltbefestigungen unter Berücksichtigung von Zufallsprozessen*, in: Dresdner Asphalttage, Dresden.
- (57) Ickrath, T. (2025): *Bewertung der Wirtschaftlichkeit unterschiedlicher Aufbereitungsverfahren von Asphaltgranulat – Ermittlung der Lebenszykluskosten von Straßen*. Diplomarbeit, Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden, Dresden.
- (58) Bayerische Architektenkammer: Lebenszykluskostenberechnung, Bayerische Architektenkammer [online] https://www.byak.de/data/Nachhaltigkeit_gestalten/BA_NG_Infobox_S-106ff_Lebenszykluskostenberechnung.pdf [03.06.2026].
- (59) HOAI (2013): Verordnung über die Honorare für Architekten- und Ingenieurleistungen (Honorarordnung für Architekten und Ingenieure), Berlin: Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz. [online] https://www.gesetze-im-internet.de/hoai_2013/BJNR227600013.html [03.06.2025].
- (60) Dr. Schiller & Partner GmbH (2025): Dynamische BauDaten. [online] <https://www.dbd.de/dbd-kostenansaetze/live-app/> [03.06.2025].
- (61) SIRADOS (2025): „SIRADOS Baudaten“, WEKA Media GmbH & Co. KG, 2025. [Online] Available: <https://www.sirados.de/> [03.06.2025].
- (62) Länderfachgruppe Straßenbetrieb, erarbeitet vom Bund/Länder-Arbeitskreis BEKORS (2023): *Betriebskostenrechnung im Straßenbetriebsdienst. Leistungsheft für den Straßenbetrieb auf Bundesfernstraßen*. Bonn: Bundesministerium für Digitales und Verkehr.
- (63) Länderfachgruppe Straßenbetrieb und Bundesministerium für Digitales und Verkehr (2024): *Allgemeines Rundschreiben Straßenbau Nr. 21/2024, Sachgebiet 10.1: Straßenbetriebsdienst; Betriebsdienst*. Bonn: Bundesministerium für Digitales und Verkehr.
- (64) Umweltbundesamt (2024): Gesellschaftliche Kosten von Umweltbelastungen, veröffentlicht am 26. November 2024 [Online] <https://www.umweltbundesamt.de/daten/umweltwirtschaft/gesellschaftlichekosten-von-umweltbelastungen#gesamtwirtschaftliche-bedeutung-derumweltkosten> [03.06.2025].
- (65) Bundesministerium für Verkehr (2023): Methodik einer ÖPP-Wirtschaftlichkeitsuntersuchung, veröffentlicht am 19. Oktober 2023. [online] <https://www.bmv.de/Shared-Docs/DE/Artikel/StB/oepp-wirtschaftlichkeitsuntersuchung-methodik.html> [03.06.2025]
- (66) Deutsche Bundesbank (2023): *Zinsstrukturkurven in der volkswirtschaftlichen Analyse*, Frankfurt am Main: Deutsche Bundesbank.
- (67) Deutsche Bundesbank (2025): Tägliche Zinsstruktur für börsennotierte Bundeswertpapiere, veröffentlicht am 28. Mai 2025. [online] <https://www.bundesbank.de/de/statistiken/geld-und-kapitalmaerkte/zinssaetze-und-renditen/taegliche-zinsstruktur-fuer-boersennotierte-bundeswertpapiere-650724> [03.06.2025]

-
- (68) Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (2014): *RAA – Richtlinien für die Anlage von Autobahnen*, Köln: FGSV Verlag GmbH.
- (69) ABBV (2010): Verordnung zur Berechnung von Ablösungsbeträgen nach dem Eisenbahnkreuzungsgesetz, dem Bundesfernstraßengesetz und dem Bundeswasserstraßengesetz (Ablösebeträge-Berechnungsverordnung) vom 12. Juli 2010, Jahrgang 2010, Teil I, Nr. 35, Bonn: Bundesanzeiger Verlag, S. 857–871.
- (70) Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (2004/2023): *TL Gestein-StB – Technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau*, Köln: FGSV Verlag GmbH.
- (71) Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (2007/2013): *TL Bitumen-StB – Technische Lieferbedingungen für Straßenbaubitumen und gebrauchsfertige Polymermodifizierte Bitumen in Verbindung mit ARS 08/2019*, Köln: FGSV Verlag GmbH.
- (72) Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (2022): *H Re WA – Hinweise zur Anwendung von Rejuvenatoren bei der Wiederverwendung von Asphalt*, Köln: FGSV Verlag GmbH.
- (73) Wistuba, M. P. (2024): *Straßenbaustoff Asphalt*, 2. Aufl., Bonn: Kirschbaum Verlag GmbH, ISBN 978-3-7812-2152-9.
- (74) Mc Daniel, R. und Anderson, R. M. (2001): *Recommended Use of Reclaimed Asphalt Pavement in the Superpave Mix Design Method. Technician's Manual*, in: NCHRP Report 452, American Association of State Highway and Transportation Officials in Cooperation with the Federal Highway Administration, Washington, D. C.: National Academy Press.
- (75) Jing, R., Varveri, A., Liu, X., Scarpas, A., & Erkens, S. (2019): *Laboratory and Field Aging Effect on Bitumen Chemistry and Rheology in Porous Asphalt*, in: Transportation Research Record, Band 2673, Heft 3, P. 365–374, Transportation Research Board.
- (76) Abouelsaad, A., White, G. und Jamshidi, A. (2024): *State of the Art Review of Ageing of Bituminous Binders and Asphalt Mixtures: Ageing Simulation Techniques, Ageing Inhibitors and the Relationship between Simulated Ageing and Field Ageing*, in: Infrastructures, Volume 9, Issue 1, 8. Article, Basel: MDPI AG.
- (77) Wu, J. (2009): The Influence of Mineral Aggregates and Binder Volumetrics on Bitumen Ageing. Dissertation, The University of Nottingham, Nottingham.
- (78) Burr, B. L., Davison, R. R., Glover, C. J., Bullin, J. A. (1990): *Solvent Removal from Asphalt*, in: Transportation Research Record 1269, Texas: Transportation Research Board, P. 1-8.
- (79) Lu, X., Uhlback, P. und Soenen, H. (2017): *Investigation of bitumen low temperature properties using a dynamic shear rheometer with 4 mm parallel plates*, in: International Journal of Pavement Research and Technology, Volume 10, Issue 1, P. 15-22.

-
- (80) Hajj, R., Filonzi, A. und Bhasin, A. (2019): *Improving the Performance-Graded Asphalt Binder Specification: Final Report*. Technical Report 0-6925-1, Mai 2019, Austin: Center for Transportation Research at The University of Texas at Austin.
- (81) 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, Washington, D. C.: National Academy Press.
- (82) Grönniger, J. (2018): *Ansprache der inneren Struktur von Asphalt und Einfluss auf ausgewählte Asphalteeigenschaften*. Dissertation, Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Braunschweig.
- (83) Dragon, I., Birbaum, J., Buch, M., Weller, F., Zander, U. (2014): *Grundlagen für die Beurteilung der dimensionierungsrelevanten Eigenschaften und der Wirtschaftlichkeit von Oberbaubefestigungen aus Asphalt*. Unveröffentlichter Abschlussbericht zum Forschungsprojekt FE 07.0236/2010/AGB, Dresden: Technische Universität Dresden, Professur für Straßenbau.
- (84) Wallner, Bernd (2003): *Bewertung von Asphalt mit dem Gyrator*. Dissertation, Lehrstuhl für Baustoffkunde und Werkstoffprüfung, Technische Universität München, München.
- (85) Blab, R. und Ebersteiner, J. (2005.): *Methoden der Strukturoptimierung flexibler Straßenbefestigungen. Tätigkeitsbericht des Christian Doppler Labors 2006 bis 2007*, Institut für Straßenbau und Straßenerhaltung, TU Wien.
- (86) Riccardi, Ch. (2017): *Mechanistic modeling of bituminous mortars to predict performance of asphalt mixtures containing RAP*. Dissertation, Technische Universität Dresden, Dresden.
- (87) Witczak, M. W. und Bari, J. (2006): *Development of a new revised version of the Witczak E* Predictive Model for hot mix asphalt mixtures*, in: Journal of the Association of Asphalt Paving Technologist. Volume 75, Georgia: Association of Asphalt Paving Technologist.
- (88) Li, S., Shi, X., Si, CH., Bao, B., Hu, M. (2023): *Correlation between the Rheological Properties of Asphalt Mortar and the High-Temperature Performance of Asphalt Mixture*, in: Coatings, Volume 13, Issue 6, Basel: MDPI AG.
- (89) Rychel, R. (2001): *Modellierung des Betriebsverhaltens von Rotorschleuderbrechern*. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Verfahrens- und Energietechnik, Technische Universität Bergakademie Freiberg, Freiberg.
- (90) Velayati, Arian (2021): *Introducing A Model Emulsion Replicating SAGD Reservoir Emulsion Features*. Dissertation, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Alberta, Alberta.

-
- (91) Landeshauptstadt Dresden, Straßen- und Tiefbauamt (2015): *TR Stra Dresden – Technisches Regelwerk für Straßenbauarbeiten*, Dresden: Landeshauptstadt Dresden, Straßen- und Tiefbauamt.
- (92) Landeshauptstadt Dresden, Straßen- und Tiefbauamt (2023): *Baubeschreibung zum Bauvorhaben „Ullersdorfer Straße/Landstraße Ullersdorfer Straße von Höhe Haus-Nr. 6 bis Oybiner Straße sowie Sanierung Schächte Ullersdorfer Platz“*, Dresden: Landeshauptstadt Dresden, Straßen- und Tiefbauamt.

Verwendete Hilfsmittel

Die Dimensionierungssoftware ADtoPave wurde der FE1 für die Prognoserechnungen (Arbeitspaket E) und der FE2 für die Auswertung der Performance-Untersuchungen (Arbeitspaket D) als Sachleistung von der IDAV GmbH zur Verfügung gestellt. Die Anwendung der Software erfolgte durch die jeweiligen Forschungseinrichtungen gemäß den projektspezifischen Fragestellungen.

Zur Unterstützung bei der Textformulierung wurden generative KI-Tools eingesetzt. Sämtliche durch KI-Unterstützung erzeugten Inhalte wurden durch die Projektbearbeiter vollumfänglich fachlich geprüft und eigenverantwortlich in den bautechnischen Kontext eingeordnet.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Funktionsprinzip Rotorbrecher (links) und Maschinentyp mit Schleuderkammern (rechts) (21).....	9
Abbildung 2: Konstruktionsschema des BHS Zweikammer-Rotors, Materialfluss horizontal (links) und Materialfluss vertikal (rechts) (21).....	9
Abbildung 3: Bindemittelreiche Fraktion (links) und die bindemittelarme Fraktion (rechts) des in dem Rotorschleuderbrecher bearbeiteten Asphaltgranulates (17).....	10
Abbildung 4: Das Bitumen-Designverfahren prognostiziert die Nadelpenetration mit einer Genauigkeit von $\pm 10 \text{ } 1/10 \text{ mm}$ (17).....	12
Abbildung 5: Steifigkeit von frisch hergestelltem LE2AP-Mörtel in Bezug auf die Steifigkeit von frisch hergestelltem Mörtel, welcher nur aus ungebrauchten Bestandteilen zusammengesetzt war (17)	12
Abbildung 6: Korrelation von Asphaltmastix- und Asphaltvarianten: Kryogene Spannung von Asphalt und Spannungsrelaxation nach 60 Minuten von Asphaltmastix (16).....	14
Abbildung 7: Korrelation von Asphaltmastix- und Asphaltvarianten: Ermüdungslastwechsel N_{ROWE} von Asphalt aus Zug-Druck-Wechselast-Versuchen und Ermüdungslastwechsel N_{ROWE} von Asphaltmastix aus Ermüdungsprüfungen (16).....	14
Abbildung 8: Arbeitspakete des Forschungsprojektes.....	15
Abbildung 9: Rotorschleuderbrecher RSMX mit Auskleidung Ringpanzer (links) und Materialbett (rechts) im Technikum der BHS Sonthofen GmbH	18
Abbildung 10: Absiebung in Fraktionen 0/2 mm und $\geq 2 \text{ mm}$ des Materialaustrages aus dem Rotorschleuderbrecher (links) und Absiebung (rechts)	20
Abbildung 11: Beispiel Masterkurve Komplexer Schubmodul G^*_B und Phasenwinkel δ_B eines Polymermodifizierten Bitumens.....	28
Abbildung 12: Beispiel für die Bestimmung der Lastwechselzahl N_{Max} bis zum Kriterium „Makroriss“ für einen Ermüdungsversuch von Bitumen / Bindemittel im Platte-Platte-System	29
Abbildung 13: Beispiel für eine Ermüdungsfunktion von Bitumen / Bindemittel im Platte-Platte-System.....	30
Abbildung 14: Beispiel & Abmessungen gekerbter, zylindrischer DMA-Probekörper (links) und zylindrischer Probekörper, Durchmesser 8 mm und Höhe 6 mm (rechts).....	31
Abbildung 15: Silikonformen zur Herstellung der DMA-Probekörper (links) und TeflonRinge zur Herstellung der 8 mm-Zylinder (rechts)	32

Abbildung 16: Beispiel Masterkurve Komplexer Schubmodul G^*_M und Phasenwinkel δ_M eines Mörtels	34
Abbildung 17: Beispiel für die Bestimmung der Lastwechselzahl N_{Max} bis zum Kriterium „Makroriss“ für einen Ermüdungsversuch von Mörtel mit den DMA-Probekörpern	35
Abbildung 18: Beispiel für eine Ermüdungsfunktion von Mörtel mit den DMA-Probekörpern	35
Abbildung 19: Beispielhafte Darstellung der kryogenen Spannung in Abhängigkeit von der Temperatur von Mörtel mit den DMA-Probekörpern	36
Abbildung 20: Beispielhafter Verlauf der Verformung eines Mörtel-Probekörpers im SSCRT	38
Abbildung 21: Von links nach rechts angeordnet, das Recyclingsieb SBR 2 Semimobil, der raupenmobile Vertikalbrecher Mag-Impact PTM 2100-2 und die Mobiscreen MSC 703i EVO	40
Abbildung 22: Vertikalbrecher mit Prallplattenring (links) und Materialbettring (rechts) (45)	41
Abbildung 23: Indizes zur Charakterisierung der Verarbeitung von Asphaltaufbereitungsmaterial nach (46)	43
Abbildung 24: Powerscreen® Trakpactor 320 für die konventionelle Aufbereitung des Fräsgutes	45
Abbildung 25: Vertikalbrecher Mag-Impact PTM 2100-2	46
Abbildung 26: Oberflächenstruktur des eingebauten und verdichteten AC 16 B SG, Referenzstrecke (links) und VB-Strecke (rechts)	49
Abbildung 27: Horizontale Dehnung ϵ_x in x-Richtung des Straßenquerschnittes (53)	53
Abbildung 28: Vertikale Dehnung ϵ_z in z-Richtung des Straßenquerschnittes (53)	53
Abbildung 29: Hauptdehnung ϵ_1 im Straßenquerschnitt (53)	53
Abbildung 30: Beispiel Impulskriechkurve (53)	54
Abbildung 31: Schematische Darstellung der Temperaturintervalle bezogen auf den Jahresgang der Fahrbahnoberflächentemperaturen (links) sowie der Zugehörigkeitsfunktionen bezogen auf Temperaturintervalle (rechts) (56)	54
Abbildung 32: Schematische Darstellung des Akkumulationsprozesses der bleibenden Dehnungen (53)	55
Abbildung 33: Berechnungsmodell für Spurrinnenprognose (53)	55
Abbildung 34: Bestimmung der maximalen Spurrinnentiefe MSPT (53)	55

Abbildung 35: Verwendete Eingangsparameter für die Prognoseberechnungen der Nutzungsdauer und Spurrinnenentwicklung	56
Abbildung 36: Dynamische Berechnungsverfahren nach Architektenkammer Bayern (58).....	58
Abbildung 37: Zinsstrukturkurve für börsennotierte Bundeswertpapiere im Zeitraum von 01/2000 bis 04/2025 (57)	58
Abbildung 38: Kostenvergleich einer Maßnahme zu verschiedenen Zeitpunkten nach der Barwertmethode (57).....	59
Abbildung 39: RQ 36 nach RAA (68)	59
Abbildung 40: Ergebnisse Vorversuche im Rotorschleuderbrecher - Stückgrößenverteilungen RA1-2.....	63
Abbildung 41: Ergebnisse Vorversuche im Rotorschleuderbrecher - lösliche Bindemittelgehalte der abgesiebten Fraktionen von RA1-2	64
Abbildung 42: Ergebnisse Vorversuche im Rotorschleuderbrecher - Stückgrößenverteilungen RA2-2.....	64
Abbildung 43: Ergebnisse Vorversuche im Rotorschleuderbrecher - lösliche Bindemittelgehalte der abgesiebten Fraktionen von RA2-2	64
Abbildung 44: Ergebnisse Vorversuche im Rotorschleuderbrecher - Stückgrößenverteilungen RA3-2.....	65
Abbildung 45: Ergebnisse Vorversuche im Rotorschleuderbrecher - lösliche Bindemittelgehalte der abgesiebten Fraktionen von RA3-2	65
Abbildung 46: Ergebnisse Vorversuche im Rotorschleuderbrecher - Stückgrößenverteilungen RA4-2.....	65
Abbildung 47: Ergebnisse Vorversuche im Rotorschleuderbrecher - lösliche Bindemittelgehalte der abgesiebten Fraktionen von RA4-2	66
Abbildung 48: Masterkurve des Komplexen Schubmoduls G^* und des Phasenwinkels δ der zurückgewonnenen Bindemittel aus RA1-1 und RA1-2	77
Abbildung 49: Masterkurve des Komplexen Schubmoduls G^* und des Phasenwinkels δ der zurückgewonnenen Bindemittel aus RA2-1 und RA2-2	78
Abbildung 50: Masterkurve des Komplexen Schubmoduls G^* und des Phasenwinkels δ der zurückgewonnenen Bindemittel aus RA3-1 und RA3-2	78
Abbildung 51: Masterkurve des Komplexen Schubmoduls G^* und des Phasenwinkels δ der zurückgewonnenen Bindemittel aus RA4-1 und RA4-2	78
Abbildung 52: Black-Diagramm der zurückgewonnenen Bindemittel aus RA1-1 und RA1-2.....	79

Abbildung 53: Black-Diagramm der zurückgewonnenen Bindemittel aus RA2-1 und RA2-2	79
Abbildung 54: Black-Diagramm der zurückgewonnenen Bindemittel aus RA3-1 und RA3-2	79
Abbildung 55: Black-Diagramm des zurückgewonnenen Bindemittels aus RA4-1 und RA4-2	80
Abbildung 56: Masterkurve des Komplexen Schubmoduls G^* und des Phasenwinkels δ der verwendeten Bitumen im Anlieferungszustand	81
Abbildung 57: Black-Diagramm der verwendeten Bitumen im Anlieferungszustand	82
Abbildung 58: Berechnete Korngrößenverteilung der Asphaltmörtelvarianten M1 für die A1-Asphaltmischgutvarianten (SMA 11 S)	86
Abbildung 59: Berechnete Korngrößenverteilung der Asphaltmörtelvarianten M2 für die A2-Asphaltmischgutvarianten (AC 8 D SP)	87
Abbildung 60: Berechnete Korngrößenverteilung der Asphaltmörtelvarianten M3 für die A3-Asphaltmischgutvarianten (AC 16 B S SG)	88
Abbildung 61: Berechnete Korngrößenverteilung der Asphaltmörtelvarianten M4 für die A4-Asphaltmischgutvarianten (AC 22 T S)	88
Abbildung 62: Korngrößenverteilungen des extrahierten Gesteinskörnungsgemisches der A1-Asphaltmischgutvarianten (SMA 11 S)	91
Abbildung 63: Korngrößenverteilungen des extrahierten Gesteinskörnungsgemisches der A2-Asphaltmischgutvarianten (AC 8 D SP)	91
Abbildung 64: Korngrößenverteilungen des extrahierten Gesteinskörnungsgemisches der A3-Asphaltmischgutvarianten (AC 16 B S SG)	92
Abbildung 65: Korngrößenverteilungen des extrahierten Gesteinskörnungsgemisches der A4-Asphaltmischgutvarianten (AC 22 T S)	92
Abbildung 66: Masterkurve des Komplexen Schubmoduls G^* und des Phasenwinkels δ der zurückgewonnenen Bindemittel für die A1-Mischgutvarianten (SMA 11 S)	100
Abbildung 67: Black-Diagramm der zurückgewonnenen Bindemittel für die A1-Mischgutvarianten (SMA 11 S)	101
Abbildung 68: Masterkurve des Komplexen Schubmoduls G^* und des Phasenwinkels δ der zurückgewonnenen Bindemittel für die A2-Mischgutvarianten (AC 8 D SP)	102
Abbildung 69: Black-Diagramm der zurückgewonnenen Bindemittel für die A2-Mischgutvarianten (AC 8 D SP)	103
Abbildung 70: Masterkurve des Komplexen Schubmoduls G^* und des Phasenwinkels δ der zurückgewonnenen Bindemittel für die A3-Mischgutvarianten (AC 16 B S SG)	105

Abbildung 71: Black-Diagramm der zurückgewonnenen Bindemittel für die A3-Mischgutvarianten (AC 16 B S SG).....	107
Abbildung 72: Masterkurve des Komplexen Schubmoduls G^* und des Phasenwinkels δ der zurückgewonnenen Bindemittel für die A4-Mischgutvarianten (AC 22 T S)	107
Abbildung 73: Black-Diagramm der zurückgewonnenen Bindemittel für die A4-Mischgutvarianten (AC 22 T S)	108
Abbildung 74: Ermüdungsfunktionen der zurückgewonnenen Bindemittel für die A1-Mischgutvarianten (SMA 11 S)	111
Abbildung 75: Ermüdungsfunktionen der zurückgewonnenen Bindemittel für die A2-Mischgutvarianten (AC 8 D SP)	112
Abbildung 76: Ermüdungsfunktionen der zurückgewonnenen Bindemittel für die A3-Mischgutvarianten (AC 16 B S SG).....	113
Abbildung 77: Ermüdungsfunktionen der zurückgewonnenen Bindemittel für die A4-Mischgutvarianten (AC 22 T S)	114
Abbildung 78: Vergleich $T(G^* = 15 \text{ kPa})$, rechnerisch ermittelt und am zurückgewonnenen Bindemittel der Asphaltbinder- und Asphalttragschichtvarianten	116
Abbildung 79: Vergleich $\delta(G^* = 15 \text{ kPa})$, rechnerisch ermittelt und am zurückgewonnenen Bindemittel der Asphaltbinder- und Asphalttragschichtvarianten	116
Abbildung 80: Nicht rückformbare Anteile J_{nr} bei 60 °C in Abhängigkeit vom Cross-Over-Index bei 60 °C und 1,59 Hz der zurückgewonnenen Bindemittel	117
Abbildung 81: Prozentuale Erholungen R_N bei 60 °C in Abhängigkeit vom Cross-Over-Index bei 60 °C und 1,59 Hz der zurückgewonnenen Bindemittel	118
Abbildung 82: Vergleich Cross-Over-Index bei 60 °C und 1,59 Hz des resultierenden Bindemittels, rechnerisch ermittelt und am zurückgewonnenen Bindemittel der Asphaltbinder- und Asphalttragschichtvarianten.....	118
Abbildung 83: Masterkurve des Komplexen Schubmoduls G^* und des Phasenwinkels δ der Asphaltmörtel für die A1-Mischgutvarianten (SMA 11 S).....	120
Abbildung 84: Black-Diagramm der Asphaltmörtel für die A1-Mischgutvarianten (SMA 11 S)	120
Abbildung 85: Masterkurve des Komplexen Schubmoduls G^* und des Phasenwinkels δ der Asphaltmörtel für die A2-Mischgutvarianten (AC 8 D SP).....	123
Abbildung 86: Black-Diagramm der Asphaltmörtel für die A2-Mischgutvarianten (AC 8 D SP)	123

Abbildung 87: Masterkurve des Komplexen Schubmoduls G^* und des Phasenwinkels δ der Asphaltmörtel für die A3-Mischgutvarianten (AC 16 B S SG)	124
Abbildung 88: Black-Diagramm der Asphaltmörtel für die A3-Mischgutvarianten (AC 16 B S SG)	125
Abbildung 89: Masterkurve des Komplexen Schubmoduls G^* und des Phasenwinkels δ der Asphaltmörtel für die A4-Mischgutvarianten (AC 22 T S)	126
Abbildung 90: Black-Diagramm der Asphaltmörtel für die A4-Mischgutvarianten (AC 22 T S)	127
Abbildung 91: Ermüdungsfunktionen der Asphaltmörtel für die A1-Mischgutvarianten (SMA 11 S)	129
Abbildung 92: Ermüdungsfunktionen der Asphaltmörtel für die A2-Mischgutvarianten (AC 8 D SP)	130
Abbildung 93: Ermüdungsfunktionen der Asphaltmörtel für die A3-Mischgutvarianten (AC 16 B S SG)	131
Abbildung 94: Ermüdungsfunktionen der Asphaltmörtel für die A4-Mischgutvarianten (AC 22 T S)	131
Abbildung 95: Verlauf der kryogenen Spannung σ_{kryo} in Abhängigkeit von der Temperatur für die Asphaltmörtel der A1-Mischgutvarianten (SMA 11 S)	133
Abbildung 96: Verlauf der kryogenen Spannung σ_{kryo} in Abhängigkeit von der Temperatur für die Asphaltmörtel der A2-Mischgutvarianten (AC 8 D SP)	134
Abbildung 97: Verlauf der kryogenen Spannung σ_{kryo} in Abhängigkeit von der Temperatur für die Asphaltmörtel der A3-Mischgutvarianten (AC 16 B S SG)	134
Abbildung 98: Verlauf der kryogenen Spannung σ_{kryo} in Abhängigkeit von der Temperatur für die Asphaltmörtel der A4-Mischgutvarianten (AC 22 T S)	135
Abbildung 99: Verlauf der plastischen Verformungen im SSCRT γ für die Asphaltmörtel der A1-Mischgutvarianten (SMA 11 S)	137
Abbildung 100: Verlauf der plastischen Verformungen im SSCRT γ für die Asphaltmörtel der A2-Mischgutvarianten (AC 8 D SP)	138
Abbildung 101: Verlauf der plastischen Verformungen im SSCRT γ für die Asphaltmörtel der A3-Mischgutvarianten (AC 16 B S SG)	139
Abbildung 102: Masterkurve des Steifigkeitsmoduls $ E^* $ der A1-Mischgutvarianten (SMA 11 S)	141
Abbildung 103: Masterkurve des Steifigkeitsmoduls $ E^* $ der A2-Mischgutvarianten (AC 8 D SP)	142

Abbildung 104: Masterkurve des Steifigkeitsmoduls $ E^* $ der A3-Mischgutvarianten (AC 16 B S SG)	143
Abbildung 105: Masterkurve des Steifigkeitsmoduls $ E^* $ der A4-Mischgutvarianten (AC 22 T S)	144
Abbildung 106: Ermüdungsfunktionen der A1-Mischgutvarianten (SMA 11 S)	146
Abbildung 107: Ermüdungsfunktionen der A2-Mischgutvarianten (AC 8 D SP)	147
Abbildung 108: Ermüdungsfunktionen der A3-Mischgutvarianten (AC 16 B S SG)	148
Abbildung 109: Ermüdungsfunktionen der A4-Mischgutvarianten (AC 22 T S)	149
Abbildung 110: Verlauf der kryogenen Spannung $\sigma_{kryo(T)}$, der Zugfestigkeiten $\beta_{t(T)}$ und der Zugfestigkeitsreserven $\Delta\beta_{t(T)}$ in Abhängigkeit von der Temperatur die A1-Mischgutvarianten (SMA 11 S)	151
Abbildung 111: Verlauf der kryogenen Spannung $\sigma_{kryo(T)}$, der Zugfestigkeiten $\beta_{t(T)}$ und der Zugfestigkeitsreserven $\Delta\beta_{t(T)}$ in Abhängigkeit von der Temperatur die A2-Mischgutvarianten (AC 8 D SP)	152
Abbildung 112: Verlauf der kryogenen Spannung $\sigma_{kryo(T)}$, der Zugfestigkeiten $\beta_{t(T)}$ und der Zugfestigkeitsreserven $\Delta\beta_{t(T)}$ in Abhängigkeit von der Temperatur die A3-Mischgutvarianten (AC 16 B S SG)	154
Abbildung 113: Verlauf der kryogenen Spannung $\sigma_{kryo(T)}$, der Zugfestigkeiten $\beta_{t(T)}$ und der Zugfestigkeitsreserven $\Delta\beta_{t(T)}$ in Abhängigkeit von der Temperatur die A4-Mischgutvarianten (AC 22 T S)	155
Abbildung 114: Korrelation zwischen Parameter A^* (temperaturunabhängig) und A_i (temperaturabhängig) und der vertikalen elastischen Anfangsdehnung $\varepsilon_{el,anf,vert}$ für die A1-Mischgutvariante (SMA 11 S)	157
Abbildung 115: Korrelation zwischen Parameter B^* (temperaturunabhängig) und B_i (temperaturabhängig) und der vertikalen elastischen Anfangsdehnung $\varepsilon_{el,anf,vert}$ für die A1-Mischgutvariante (SMA 11 S)	158
Abbildung 116: Funktionaler Zusammenhang zwischen der kumulierten vertikalen plastischen Dehnung $\varepsilon_{plast,vert}$ und der vertikalen elastischen Anfangsdehnung $\varepsilon_{el,anf,vert}$ für die A1-Mischgutvariante (SMA 11 S)	159
Abbildung 117: Funktionaler Zusammenhang zwischen der kumulierten vertikalen plastischen Dehnung $\varepsilon_{plast,vert}$ und der vertikalen elastischen Anfangsdehnung $\varepsilon_{el,anf,vert}$ für die A2-Mischgutvariante (AC 8 D SP)	159
Abbildung 118: Funktionaler Zusammenhang zwischen der kumulierten vertikalen plastischen Dehnung $\varepsilon_{plast,vert}$ und der vertikalen elastischen Anfangsdehnung $\varepsilon_{el,anf,vert}$ für die A3-Mischgutvariante (AC 16 B S SG)	160

Abbildung 119: Gegenüberstellung der berechneten E-Moduln $ E^* _{\text{pred}}$ und der zugehörigen versuchstechnisch bestimmten E-Moduln $ E^* $	167
Abbildung 120: Gegenüberstellung der berechneten Regressionsparameter k_{pred} und der zugehörigen versuchstechnisch bestimmten Regressionsparameter k der Ermüdungsfunktionen der untersuchten Asphalte.....	168
Abbildung 121: Gegenüberstellung der berechneten Regressionsparameter n_{pred} und der zugehörigen versuchstechnisch bestimmten Regressionsparameter n der Ermüdungsfunktionen der untersuchten Asphalte.....	168
Abbildung 122: Gegenüberstellung der berechneten kryogenen Spannung $\sigma_{\text{kryo,A,pred}}$ und der zugehörigen versuchstechnisch bestimmten kryogenen Spannung $\sigma_{\text{kryo,A}}$ der untersuchten Asphalte	169
Abbildung 123: Komplexer Schubmodul G^* für ausgewählte Temperaturen und Frequenzen in Abhängigkeit vom MBV der Asphaltmörtel A10, A20 und A30	172
Abbildung 124: Phasenwinkel δ für ausgewählte Temperaturen und Frequenzen in Abhängigkeit vom MBV der Asphaltmörtel A10, A20 und A30	173
Abbildung 125: Chunk, Breakdown und Filler Increase Indizes des Ausgabematerials der 6 Varianten der Vorversuche zur Aufbereitung im Vertikalbrecher im Vergleich zum Ausgabematerial aus der konventionellen Aufbereitung.....	174
Abbildung 126: Lösliche Bindemittelgehalte der einzelnen Korngruppen je Variante der Vorversuche.....	175
Abbildung 127: Verklebte Quadrat-Maschensiebe (links), Konglomerate nicht aufgebrochenen Materials bei den Fraktionen > 9 mm (Mitte und rechts).....	176
Abbildung 128: Masterkurve des Komplexen Schubmoduls G^* und des Phasenwinkels δ der zurückgewonnenen Bindemittel aus RA5-1 und RA5-2	181
Abbildung 129: Black-Diagramm der zurückgewonnenen Bindemittel aus RA5-1 und RA5-2	181
Abbildung 130: Masterkurve des Komplexen Schubmoduls G^* und des Phasenwinkels δ der verwendeten Bitumen im Anlieferungszustand für die Herstellung des Asphaltmischgutes der Referenzstrecke (A51) und der VB-Strecke (A52).....	182
Abbildung 131: Black-Diagramm der verwendeten Bitumen im Anlieferungszustand für die Herstellung des Asphaltmischgutes der Referenzstrecke (A51) und der VB-Strecke (A52).	183
Abbildung 132: Masterkurve des Komplexen Schubmoduls G^* und des Phasenwinkels δ der zurückgewonnenen Bindemittel für die A5-Mischgutvarianten (AC 16 B S SG).....	185
Abbildung 133: Black-Diagramm der der zurückgewonnenen Bindemittel für die A5-Mischgutvarianten (AC 16 B S SG).....	185

Abbildung 134: Ermüdungsfunktionen der zurückgewonnenen Bindemittel für die A5-Mischgutvarianten (AC 16 B S SG).....	186
Abbildung 135: Korngrößenverteilungen der A5-Mischgutvarianten (AC 16 B S SG) und Gegenüberstellung zur Korngrößenverteilung der jeweiligen Erstprüfung	190
Abbildung 136: Masterkurve des Steifigkeitsmoduls IE^*I der A5-Mischgutvarianten (AC 16 B S SG)	191
Abbildung 137: Ermüdungsfunktionen der A3-Mischgutvarianten (AC 16 B S SG).....	193
Abbildung 138: Verlauf der kryogenen Spannung $\sigma_{kryo(T)}$, der Zugfestigkeiten $\beta_{t(T)}$ und der Zugfestigkeitsreserven $\Delta\beta_{t(T)}$ in Abhängigkeit von der Temperatur die A5-Mischgutvarianten (AC 16 B S SG)	194
Abbildung 139: Funktionaler Zusammenhang zwischen der kumulierten vertikalen plastischen Dehnung $\varepsilon_{plast,vert}$ und der vertikalen elastischen Anfangsdehnung $\varepsilon_{el,anf,vert}$ für die A5-Mischgutvariante (AC 16 B S SG).....	196
Abbildung 140: Relative Spurrinnentiefe nach 10 Jahren der Fahrbahnkonstruktion unter Variation der Asphaltdeck-, Asphaltbinder- und Asphalttragschichtgemische	203
Abbildung 141: Darstellung der Abfolge der baulichen Maßnahmen (57)	209
Abbildung 142: Vergleich Barwert der Aufbauvarianten	210
Abbildung 143: Vergleich der Wirtschaftlichkeit der Aufbauvarianten mittels Barwertes und LZK für einen RSB-Durchsatz von 80 t/h (57).....	211

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Verwendete Asphaltgranulate (RA)	17
Tabelle 2: Verwendete Bitumen	17
Tabelle 3: Asphaltgranulate - Rotorschleuderbrecher: Ausgangsmaterial, Maschinenkonfiguration und Probenbezeichnung für die Vorversuche	19
Tabelle 4: Absiebung des Materials ≥ 2 mm aus dem Rotorschleuderbrecher in weitere Teilfraktionen – Siebnennöffnungsweiten der Siebe (Siebbelegung)	20
Tabelle 5: Probenbezeichnung und zugehörige Farbkodierung der untersuchten Asphaltgranulate	22
Tabelle 6: Überblick der Untersuchungsvarianten und eingesetzten Baustoffe	24
Tabelle 7: Überblick der Probenbezeichnung der Varianten auf Bindemittel-, Mörtel- und Asphaltebene mit zugehöriger Farbkodierung	24
Tabelle 8: Versuchsbedingungen Bestimmung der Masterkurve von Bitumen und Bindemittel im DSR.....	27
Tabelle 9: Versuchsbedingungen Bestimmung der Masterkurve von Mörtel im DSR	33
Tabelle 10: Versuchsbedingungen des SSCRT im DSR mit Mörtel.....	37
Tabelle 11: Maschinenkonfigurationen für die Vorversuche mit dem Vertikalbrecher zur Aufbereitung des Fräsgutes RA5 sowie zugehörige Probenbezeichnung.....	42
Tabelle 12: Kenndaten der Referenz- und Untersuchungsstrecke zur Validierung der Vertikalbrecher-Technologie	45
Tabelle 13: Gegenüberstellung Ergebnisse Erstprüfung des AC 16 B S SG mit konventionell hergestelltem Asphaltgranulat (RA5-1) und Asphaltgranulat aus dem Vertikalbrecher (RA5-2)	47
Tabelle 14: Eingesetzte Einbautechnik im Vergleich	48
Tabelle 15: Überblick der Probenbezeichnung der Asphaltgranulatvarianten, Asphaltmischgutvarianten, eingesetzten Zugabebitumen, der zurückgewonnenen Bindemittel aus dem Asphaltmischgut mit zugehöriger Farbkodierung	51
Tabelle 16: Überblick der Bezeichnung der Aufbauvarianten für die Prognoseberechnungen der Nutzungsdauer und Spurrinnenentwicklung mit den jeweils verwendeten Materialeigenschaften der untersuchten Asphaltvarianten	56
Tabelle 17: Maßnahmen der Instandsetzung und Erneuerung an der Asphaltbefestigung bzw. dem Straßenoberbau und zugehörige Maßnahmekategorien nach RPE-Stra 01 (52)..	60
Tabelle 18: Leistungseinteilung der baulichen Maßnahmen (57)	60

Tabelle 19: Kennwerte am Gemisch der Asphaltgranulate RA1-1 (konventionell) und RA1-2 (RSB).....	67
Tabelle 20: Kennwerte am Gemisch der Asphaltgranulate RA2-1 (konventionell) und RA2-2 (RSB).....	67
Tabelle 21: Kennwerte am Gemisch der Asphaltgranulate RA3-1 (konventionell) und RA3-2 (RSB).....	67
Tabelle 22: Kennwerte am Gemisch der Asphaltgranulate RA4-1 (konventionell) und RA4-2 (RSB).....	68
Tabelle 23: Kennwerte Korngrößenverteilung am Gesteinskörnungsgemisch der Asphaltgranulate RA1-1 (konventionell) und RA1-2 (RSB)	68
Tabelle 24: Kennwerte Korngrößenverteilung am Gesteinskörnungsgemisch der Asphaltgranulate RA2-1 (konventionell) und RA2-2 (RSB)	68
Tabelle 25: Kennwerte Korngrößenverteilung am Gesteinskörnungsgemisch der Asphaltgranulate RA3-1 (konventionell) und RA3-2 (RSB)	69
Tabelle 26: Kennwerte Korngrößenverteilung am Gesteinskörnungsgemisch der Asphaltgranulate RA4-1 (konventionell) und RA4-2 (RSB)	69
Tabelle 27: Chunk-Index (46) Asphaltgranulate	69
Tabelle 28: Kennwerte Gesteinskörnungen der Asphaltgranulate RA1-1 (konventionell) und RA1-2 (RSB)	70
Tabelle 29: Kennwerte Gesteinskörnungen der Asphaltgranulate RA2-1 (konventionell) und RA2-2 (RSB)	71
Tabelle 30: Kennwerte Gesteinskörnungen der Asphaltgranulate RA3-1 (konventionell) und RA3-2 (RSB)	72
Tabelle 31: Kennwerte Gesteinskörnungen der Asphaltgranulate RA4-1 (konventionell) und RA4-2 (RSB)	74
Tabelle 32: Kennwerte am zurückgewonnenen Bindemittel der Asphaltgranulate RA1-1 (konventionell) und RA1-2 (RSB).....	76
Tabelle 33: Kennwerte am zurückgewonnenen Bindemittel der Asphaltgranulate RA2-1 (konventionell) und RA2-2 (RSB).....	76
Tabelle 34: Kennwerte am zurückgewonnenen Bindemittel der Asphaltgranulate RA3-1 (konventionell) und RA3-2 (RSB).....	76
Tabelle 35: Kennwerte am zurückgewonnenen Bindemittel der Asphaltgranulate RA4-1 (konventionell) und RA4-2 (RSB).....	77
Tabelle 36: Kennwerte der Bitumen im Anlieferungszustand	81

Tabelle 37: Berechnete resultierende Bindemittelkennwerte für die A1-Mischgutvarianten (SMA 11 S)	82
Tabelle 38: Berechnete resultierende Bindemittelkennwerte für die A2-Mischgutvarianten (AC 8 D SP)	83
Tabelle 39: Berechnete resultierende Bindemittelkennwerte für die A3-Mischgutvarianten (AC 16 B S SG)	84
Tabelle 40: Berechnete resultierende Bindemittelkennwerte für die A4-Mischgutvarianten (AC 22 T S)	84
Tabelle 41: Berechnete Zusammensetzung der Mörtelvarianten M1 für die A1-Mischgutvarianten (SMA 11 S)	85
Tabelle 42: Berechnete Zusammensetzung der Mörtelvarianten M2 für die A2-Mischgutvarianten (AC 8 D SP)	86
Tabelle 43: Berechnete Zusammensetzung der Mörtelvarianten M3 für die A3-Mischgutvarianten (AC 16 B S SG)	87
Tabelle 44: Berechnete Zusammensetzung der Mörtelvarianten M4 für die A4-Mischgutvarianten (AC 22 T S)	88
Tabelle 45: Gesteinszusammensetzung der A1-Mischgutvarianten (SMA 11 S)	89
Tabelle 46: Gesteinszusammensetzung der A2-Mischgutvarianten (AC 8 D SP)	90
Tabelle 47: Gesteinszusammensetzung der A3-Mischgutvarianten (AC 16 B S SG)	90
Tabelle 48: Gesteinszusammensetzung der A4-Mischgutvarianten (AC 22 T S)	90
Tabelle 49: Asphaltmischgutzusammensetzung sowie volumetrischen Kenngrößen der A1-Mischgutvarianten (SMA 11 S)	92
Tabelle 50: Asphaltmischgutzusammensetzung sowie volumetrischen Kenngrößen der A2-Mischgutvarianten (AC 8 D SP)	93
Tabelle 51: Asphaltmischgutzusammensetzung sowie volumetrischen Kenngrößen der A3-Mischgutvarianten (AC 16 B S SG)	93
Tabelle 52: Asphaltmischgutzusammensetzung sowie volumetrischen Kenngrößen der A4-Mischgutvarianten (AC 22 T S)	94
Tabelle 53: Kennwerte am zurückgewonnenen Bindemittel für die A1-Mischgutvarianten (SMA 11 S)	96
Tabelle 54: Kennwerte am zurückgewonnenen Bindemittel für die A2-Mischgutvarianten (AC 8 D SP)	97

Tabelle 55: Kennwerte am zurückgewonnenen Bindemittel für die A3-Mischgutvarianten (AC 16 B S SG)	97
Tabelle 56: Kennwerte am zurückgewonnenen Bindemittel für die A4-Mischgutvarianten (AC 22 T S)	98
Tabelle 57: Mittelwerte (obere Zeile) und Standardabweichungen (untere Zeile) des komplexen Schubmoduls G^* und Phasenwinkels δ der zurückgewonnenen Bindemittel für die A1-Mischgutvarianten (SMA 11 S) für die geprüften Temperaturen T und ausgewählten Frequenzen f	99
Tabelle 58: Mittelwerte (obere Zeile) und Standardabweichungen (untere Zeile) des komplexen Schubmoduls G^* und Phasenwinkels δ der zurückgewonnenen Bindemittel für die A2-Mischgutvarianten (AC 8 D SP) für die geprüften Temperaturen T und ausgewählten Frequenzen f	103
Tabelle 59: Mittelwerte (obere Zeile) und Standardabweichungen (untere Zeile) des komplexen Schubmoduls G^* und Phasenwinkels δ der zurückgewonnenen Bindemittel für die A3-Mischgutvarianten (AC 16 B S SG) für die geprüften Temperaturen T und ausgewählten Frequenzen f	105
Tabelle 60: Mittelwerte (obere Zeile) und Standardabweichungen (untere Zeile) des komplexen Schubmoduls G^* und Phasenwinkels δ der zurückgewonnenen Bindemittel für die A4-Mischgutvarianten (AC 22 T S) für die geprüften Temperaturen T und ausgewählten Frequenzen f	108
Tabelle 61: Regressionsparameter der linearisierten Ermüdungsfunktionen, Bestimmtheitsmaße und Standardabweichungen für die zurückgewonnenen Bindemittel der A1-Mischgutvarianten (SMA 11 S)	111
Tabelle 62: Regressionsparameter der linearisierten Ermüdungsfunktionen, Bestimmtheitsmaße und Standardabweichungen für die zurückgewonnenen Bindemittel der A2-Mischgutvarianten (AC 8 D SP)	112
Tabelle 63: Regressionsparameter der linearisierten Ermüdungsfunktionen, Bestimmtheitsmaße und Standardabweichungen für die zurückgewonnenen Bindemittel der A3-Mischgutvarianten (AC 16 B S SG)	113
Tabelle 64: Regressionsparameter der linearisierten Ermüdungsfunktionen, Bestimmtheitsmaße und Standardabweichungen für die zurückgewonnenen Bindemittel der A4-Mischgutvarianten (AC 22 T S)	113
Tabelle 65: Mittelwerte (obere Zeile) und Standardabweichungen (untere Zeile) des komplexen Schubmoduls G^* und Phasenwinkels δ der Asphaltmörtel für die A1-Mischgutvarianten (SMA 11 S) für die geprüften Temperaturen T und ausgewählte Frequenzen f	120

Tabelle 66: Mittelwerte (obere Zeile) und Standardabweichungen (untere Zeile) des komplexen Schubmoduls G^* und Phasenwinkels δ der Asphaltmörtel für die A2-Mischgutvarianten (AC 8 D SP) für die geprüften Temperaturen T und ausgewählte Frequenzen f	122
Tabelle 67: Mittelwerte (obere Zeile) und Standardabweichungen (untere Zeile) des komplexen Schubmoduls G^* und Phasenwinkels δ der Asphaltmörtel für die A3-Mischgutvarianten (AC 16 B S SG) für die geprüften Temperaturen T und ausgewählte Frequenzen f	123
Tabelle 68: Mittelwerte (obere Zeile) und Standardabweichungen (untere Zeile) des komplexen Schubmoduls G^* und Phasenwinkels δ der der Asphaltmörtel für die A4-Mischgutvarianten (AC 22 T S) für die geprüften Temperaturen T und ausgewählte Frequenzen f	125
Tabelle 69: Regressionsparameter der linearisierten Ermüdungsfunktionen, Bestimmtheitsmaße und Standardabweichungen für die Asphaltmörtel der A1-Mischgutvarianten (SMA 11 S)	129
Tabelle 70: Regressionsparameter der linearisierten Ermüdungsfunktionen, Bestimmtheitsmaße und Standardabweichungen für die Asphaltmörtel der A2-Mischgutvarianten (AC 8 D SP)	130
Tabelle 71: Regressionsparameter der linearisierten Ermüdungsfunktionen, Bestimmtheitsmaße und Standardabweichungen für die Asphaltmörtel der A3-Mischgutvarianten (AC 16 B S SG)	130
Tabelle 72: Regressionsparameter der linearisierten Ermüdungsfunktionen, Bestimmtheitsmaße und Standardabweichungen für die Asphaltmörtel der A4-Mischgutvarianten (AC 22 T S)	131
Tabelle 73: Mittelwerte und Standardabweichungen der kryogenen Spannung σ_{kryo} für die Asphaltmörtel der A1-Mischgutvarianten (SMA 11 S) für -15 °C	133
Tabelle 74: Mittelwerte und Standardabweichungen der kryogenen Spannung σ_{kryo} für die Asphaltmörtel der A2-Mischgutvarianten (AC 8 D SP) für -15 °C	134
Tabelle 75: Mittelwerte und Standardabweichungen der kryogenen Spannung σ_{kryo} für die Asphaltmörtel der A3-Mischgutvarianten (AC 16 B S SG) für -15 °C	135
Tabelle 76: Mittelwerte und Standardabweichungen der kryogenen Spannung σ_{kryo} für die Asphaltmörtel der A4-Mischgutvarianten (AC 22 T S) für -15 °C	135
Tabelle 77: Mittelwerte x^* und Standardabweichungen s^2 der Kriechnachgiebigkeit J_{nr} und der Prozentualen Rückstellung R_N für die Asphaltmörtel der A1-Mischgutvarianten (SMA 11 S)	137

Tabelle 78: Mittelwerte x^* und Standardabweichungen s^2 der Kriechnachgiebigkeit J_{nr} und der Prozentualen Rückstellung R_N für die Asphaltmörtel der A2-Mischgutvarianten (AC 8 D SP)	138
Tabelle 79: Mittelwerte x^* und Standardabweichungen s^2 der Kriechnachgiebigkeit J_{nr} und der Prozentualen Rückstellung R_N für die Asphaltmörtel der A3-Mischgutvarianten (AC 16 B S SG)	139
Tabelle 80: Mittelwerte $ E ^*$ und Standardabweichungen s^2 des Steifigkeitsmoduls für die A1-Mischgutvarianten (SMA 11 S) für die Temperaturen T und ausgewählte Frequenzen f	141
Tabelle 81: Mittelwerte $ E^* $ und Standardabweichungen s^2 des Steifigkeitsmoduls für die A2-Mischgutvarianten (AC 8 D SP) für die Temperaturen T und ausgewählte Frequenzen f	142
Tabelle 82: Mittelwerte $ E^* $ und Standardabweichungen s^2 des Steifigkeitsmoduls für die A3-Mischgutvarianten (AC 16 B S SG) für die Temperaturen T und ausgewählte Frequenzen f	143
Tabelle 83: Mittelwerte $ E^* $ (oberer Wert) und Standardabweichungen s^2 (unterer Wert) des Steifigkeitsmoduls für die A4-Mischgutvarianten (AC 22 T S) für die Temperaturen T und ausgewählte Frequenzen f	144
Tabelle 84: Regressionsparameter der linearisierten Ermüdungsfunktionen, Bestimmtheitsmaße und Standardabweichungen der A1-Mischgutvarianten (SMA 11 S)	146
Tabelle 85: Regressionsparameter der linearisierten Ermüdungsfunktionen, Bestimmtheitsmaße und Standardabweichungen der A2-Mischgutvarianten (AC 8 D SP)	147
Tabelle 86: Regressionsparameter der linearisierten Ermüdungsfunktionen, Bestimmtheitsmaße und Standardabweichungen der A3-Mischgutvarianten (AC 16 B S SG)	148
Tabelle 87: Regressionsparameter der linearisierten Ermüdungsfunktionen, Bestimmtheitsmaße und Standardabweichungen der A4-Mischgutvarianten (AC 22 T S)	148
Tabelle 88: Mittelwerte x^* und Standardabweichungen s^2 der Bruchtemperaturen T_F , der Bruchspannungen $\sigma_{kryo,F}$ und der Zugfestigkeiten $\beta_{t(T)}$ bei 20 °C, 5 °C, -10 °C und -25 °C für die A1-Mischgutvarianten (SMA 11 S)	151
Tabelle 89: Regressionsparameter für die Funktion der kryogenen Spannung σ_{kryo} in Abhängigkeit von der Temperatur für die A1-Mischgutvarianten (SMA 11 S)	151
Tabelle 90: Mittelwerte x^* und Standardabweichungen s^2 der Bruchtemperaturen T_F , der Bruchspannungen $\sigma_{kryo,F}$ und der Zugfestigkeiten $\beta_{t(T)}$ bei 20 °C, 5 °C, -10 °C und -25 °C für die A2-Mischgutvarianten (AC 8 D SP)	152

Tabelle 91: Regressionsparameter für die Funktion der kryogenen Spannung σ_{kryo} in Abhängigkeit von der Temperatur für die A2-Mischgutvarianten (AC 8 D SP)	152
Tabelle 92: Mittelwerte x^* und Standardabweichungen s^2 der Bruchtemperaturen T_F , der Bruchspannungen $\sigma_{\text{kryo},F}$ und der Zugfestigkeiten $\beta_{t(T)}$ bei 20 °C, 5 °C, -10 °C und -25 °C für die A3-Mischgutvarianten (AC 16 B S SG)	153
Tabelle 93: Regressionsparameter für die Funktion der kryogenen Spannung σ_{kryo} in Abhängigkeit von der Temperatur für die A3-Mischgutvarianten (AC 8 D SP)	153
Tabelle 94: Mittelwerte x^* (oberer Wert) und Standardabweichungen s^2 (unterer Wert) der Bruchtemperaturen T_F , der Bruchspannungen $\sigma_{\text{kryo},F}$ und der Zugfestigkeiten $\beta_{t(T)}$ bei 20 °C, 5 °C, -10 °C und -25 °C für die A4-Mischgutvarianten (AC 22 T S)	154
Tabelle 95: Regressionsparameter für die Funktion der kryogenen Spannung σ_{kryo} in Abhängigkeit von der Temperatur für die A4-Mischgutvarianten (AC 22 T S)	155
Tabelle 96: Regressionsparameter der linearisierten Funktionen für den Zusammenhang zwischen der kumulierten vertikalen plastischen Dehnung $\varepsilon_{\text{plast,vert}}$ und der vertikalen elastischen Anfangsdehnung $\varepsilon_{\text{el,anf,vert}}$, Bestimmtheitsmaße und Standardabweichungen der A1-Mischgutvarianten (SMA 11 S)	158
Tabelle 97: Regressionsparameter der linearisierten Funktionen für den Zusammenhang zwischen der kumulierten vertikalen plastischen Dehnung $\varepsilon_{\text{plast,vert}}$ und der vertikalen elastischen Anfangsdehnung $\varepsilon_{\text{el,anf,vert}}$, Bestimmtheitsmaße und Standardabweichungen der A2-Mischgutvarianten (AC 8 D SP)	159
Tabelle 98: Regressionsparameter der linearisierten Funktionen für den Zusammenhang zwischen der kumulierten vertikalen plastischen Dehnung $\varepsilon_{\text{plast,vert}}$ und der vertikalen elastischen Anfangsdehnung $\varepsilon_{\text{el,anf,vert}}$, Bestimmtheitsmaße und Standardabweichungen der A3-Mischgutvarianten (AC 16 B S SG)	160
Tabelle 99: Mittelwerte x^* und Standardabweichungen s^2 des Verdichtungswiderstandes T_{Gyrator} bei 145 °C für die A1-Mischgutvarianten (SMA 11 S)	162
Tabelle 100: Mittelwerte x^* und Standardabweichungen s^2 des Verdichtungswiderstandes T_{Gyrator} bei 145 °C für die A2-Mischgutvarianten (AC 8 D SP)	162
Tabelle 101: Mittelwerte x^* und Standardabweichungen s^2 des Verdichtungswiderstandes T_{Gyrator} bei 145 °C für die A3-Mischgutvarianten (AC 16 B S SG)	162
Tabelle 102: Mittelwerte x^* und Standardabweichungen s^2 des Verdichtungswiderstandes T_{Gyrator} bei 135 °C für die A4-Mischgutvarianten (AC 22 T S)	163
Tabelle 103: Ermittelte Chunk, Breakdown und Filler Increase Indizes des Ausgabematerials der 6 Varianten der Vorversuche zur Aufbereitung im Vertikalbrecher im Vergleich zum Ausgabematerial aus der konventionellen Aufbereitung	174

Tabelle 104: Kennwerte am Gemisch der Asphaltgranulate RA5-1 (konventionell) und RA5-2 (Vertikalbrecher)	178
Tabelle 105: Kennwerte Korngrößenverteilung am Gesteinskörnungsgemisch der Asphaltgranulate RA5-1 (konventionell) und RA5-2 (Vertikalbrecher).....	178
Tabelle 106: Kennwerte Gesteinskörnungen der Asphaltgranulate RA5-1 (konventionell) und RA5-2 (Vertikalbrecher).....	179
Tabelle 107: Kennwerte am zurückgewonnenen Bindemittel der Asphaltgranulate RA5-1 (konventionell) und RA5-2 (Vertikalbrecher).....	180
Tabelle 108: Kennwerte der Bitumen im Anlieferungszustand für die Herstellung des Asphaltmischgutes der Referenzstrecke (A51) und der VB-Strecke (A52)	182
Tabelle 109: Kennwerte am zurückgewonnenen Bindemittel für die A5-Mischgutvarianten (AC 16 B S SG)	184
Tabelle 110: Mittelwerte x^* und Standardabweichungen s^2 des komplexen Schubmoduls G^* und Phasenwinkels δ der zurückgewonnenen Bindemittel für die A5-Mischgutvarianten (AC 16 B S SG) für die Temperaturen T und ausgewählte Frequenzen f	184
Tabelle 111: Regressionsparameter der linearisierten Ermüdungsfunktionen, Bestimmtheitsmaße und Standardabweichungen für die zurückgewonnenen Bindemittel der A5-Mischgutvarianten (AC 16 B S SG)	186
Tabelle 112: Fraktionsanteile in den Zugabebitumen sowie den zurückgewonnenen Bindemitteln	187
Tabelle 113: Ergebnisse der FTIR-Spektroskopie an den Zugabebitumen sowie den zurückgewonnenen Bindemitteln aus den Mischgütern A51 und A52 und dem Asphaltgranulat RA5-2	188
Tabelle 114: Ergebnisse der Überprüfung am Asphaltmischgut für die im Mischwerk hergestellten A5-Mischgutvarianten (AC 16 B S SG).....	189
Tabelle 115: Mittelwerte und Standardabweichungen s^2 des Steifigkeitsmoduls für die A5-Mischgutvarianten (AC 16 B S SG) für die Temperaturen T und ausgewählte Frequenzen f	191
Tabelle 116: Regressionsparameter der linearisierten Ermüdungsfunktionen, Bestimmtheitsmaße und Standardabweichungen der A5-Mischgutvarianten (AC 16 B S SG)	192
Tabelle 117: Mittelwerte x^* und Standardabweichungen s^2 der Bruchtemperaturen T_F , der Bruchspannungen $\sigma_{kryo,F}$ und der Zugfestigkeiten $\beta_{(T)}$ bei 20 °C, 5 °C, -10 °C und -25 °C für die A5-Mischgutvarianten (AC 16 B S SG)	194

Tabelle 118: Regressionsparameter für die Funktion der kryogenen Spannung σ_{kryo} in Abhängigkeit von der Temperatur für die A5-Mischgutvarianten (AC 16 B S SG).....	194
Tabelle 119: Regressionsparameter der linearisierten Funktionen für den Zusammenhang zwischen der kumulierten vertikalen plastischen Dehnung $\varepsilon_{\text{plast,vert}}$ und der vertikalen elastischen Anfangsdehnung $\varepsilon_{\text{el,anf,vert}}$, Bestimmtheitsmaße und Standardabweichungen der A5-Mischgutvarianten (AC 16 B S SG)	196
Tabelle 120: Mittelwerte x^* und Standardabweichungen s^2 des Verdichtungswiderstandes T_{Gyrator} bei 145 °C für die A5-Mischgutvarianten (AC 16 B S SG)	197
Tabelle 121: Ergebnisse der Kontrollprüfung für die A5-Mischgutvarianten (AC 16 B S SG)	198
Tabelle 122: Ziel-Nutzungsdauern der Asphaltsschichten, gewählte Asphalte und ermittelte Anpassungsfaktoren zur Kalibrierung	201
Tabelle 123: Theoretische Nutzungsdauern der Asphaltvarianten	201
Tabelle 124: Zusammenstellung Materialpreis Asphaltmischgut (Lieferung ab Werk) in Abhängigkeit von den Aufbereitungskosten des Asphaltgranulates (RA).....	206
Tabelle 125: Vergleich der Wirtschaftlichkeit der Aufbauvarianten mittels Barwertes und LZK für einen RSB-Durchsatz von 80 t/h (57)	212