

AllBack2Pave - Hohe Recyclingraten in Deckschichtgemischen

A. Blasl

Technische Universität Dresden, Dresden, Deutschland

J. Kraft & F. Wellner

Technische Universität Dresden, Dresden, Deutschland

Der Anteil an Ausbauasphalt in Asphaltdeckschichten ist in Europa noch immer sehr begrenzt. Es bestehen grundsätzliche Bedenken, dass die für Deckschichten einzuhaltenden Qualitätsanforderungen nicht erreicht werden, sobald Recyclingmaterial die Hauptvolumenkomponente eines Deckschichtgemisches ausmacht. Im Rahmen des länderübergreifenden Forschungsvorhabens AllBack2Pave wurde die Machbarkeit der vollständigen Wiederverwendung von Ausbauasphalt in neue Asphaltdeckschichten anhand umfangreicher Laboruntersuchungen exemplarisch für 2 Asphaltdeckschichtvarianten mit jeweils unterschiedlichen Recyclinganteilen experimentell und theoretisch analysiert. Grundlage dieses Beitrages bilden die während der Projektlaufzeit an der Technischen Universität Dresden durchgeführten Spaltzug- und Druck-Schwellversuche zur Ansprache des Steifigkeitsverhaltens, der Ermüdungs- und der plastischen Verformungsbeständigkeit der im Rahmen des Forschungsprojektes hergestellten Asphaltgemische. Des Weiteren werden ausgewählte Simulationsergebnisse, bestimmt mit der Finite-Elemente-Methode, zusammengefasst, die das Spannungs- und Dehnungsverhalten von hochbelasteten Asphaltbefestigungen mit den untersuchten Asphaltgemischen, im Modell eingesetzt als Deckschichtmaterial, zeigen. Abschließend folgen auf Grundlage der durchgeführten Simulationsrechnungen Dimensionierungsergebnisse.

1 EINLEITUNG

Angesichts der heutigen gesellschaftlichen Anliegen hinsichtlich Umweltschutz und nachhaltiger Entwicklung in einem postfossilen Zeitalter, arbeiten Straßenbauverwaltungen europaweit zusammen, um den Ausbau und „End-of-Life-Strategien“ von Asphaltbefestigungen energieeffizienter zu gestalten. In diesem Zusammenhang ist die Menge der Wiederverwendung von Ausbauasphalt in neue Asphaltbefestigungen soweit angewachsen, dass es nicht mehr nur um eine einfache „grüne Alternative“ geht, sondern bereits zu einer gängigen Praxis in fast ganz Europa geworden ist. Aufgrund steigender Kosten für bituminöse Bindemittel, wurden in den letzten Jahren merkliche Anstrengungen unternommen, um die Menge von in neuen Asphaltbefestigungen wiederverwendetem Ausbauasphalt zu erhöhen. Mehrere interdisziplinäre länderübergreifende Forschungsprojekte mit dem Schwerpunkt der Wiederverwendung von Ausbauasphalt in Heißmischasphalt wurden in Europa im letzten Jahrzehnt durchgeführt [Direkt-MAT, 2011, Re-Road, 2012]. Die Ergebnisse dieser Projekte haben gezeigt, dass die Dauerhaftigkeit von Asphaltgemischen mit recycelten Komponenten als zufriedenstellend bewertet werden kann. Grundsätzlich ist jedoch der Anteil der Verwertung von Ausbauasphalt in neue Asphaltschichten geringer als es technisch möglich wäre.

Straßenbaubehörden arbeiteten mit der Asphaltindustrie zusammen, um neue Methoden und Herangehensweisen zu entwickeln und um den Anteil von Recyclingmaterialien in neuen Straßenbefestigungen bzw. im Rahmen von Sanierungsmaßnahmen zu erhöhen. Wirtschaftliche und ökologische Vorteile sind aktuell die treibenden Kräfte in puncto Forschung auf dem Gebiet des Recyclings von Asphaltstraßen. Die ökologischen Vorteile zeigen sich primär in reduzierten Emissionen und vermindertem Energieverbrauch in der Produktion und dem Transport von Primärrohstoffen sowie

in der reduzierten Nachfrage nicht nachwachsender Ressourcen. Hiermit verbunden sind auch die ökonomischen Vorteile, vor allem hinsichtlich der Reduzierung der Verwendung von natürlichen nicht nachwachsenden Rohstoffen.

Trotz der voran genannten Vorteile ist der Anteil an Ausbauasphalt in Asphaltdeckschichten in Europa sehr begrenzt. Es bestehen grundsätzliche Bedenken, dass die für Deckschichten einzuhaltenen Qualitätsanforderungen nicht erreicht werden, sobald Recyclingmaterial die Hauptvolumenkomponente eines Asphaltgemisches ausmacht. Hintergrund hierfür stellt die oft wahrgenommene Heterogenität von Asphaltgranulat dar, die wiederum in einem hohen Maße von der Instandsetzungshistorie der ursprünglichen Befestigung, der für den Ausbau verwendeten Technik, den Lagerbedingungen des Ausbaasphaltes (usw.) abhängt und meist noch keine Berücksichtigung in Standardrezepturverfahren gefunden hat.

Welche Techniken und Verfahren auch immer verwendet werden, die Mischgutkonzeption ist und bleibt das maßgebende Kriterium, um Asphaltgemische mit recycelten Komponenten so herzustellen, dass deren Gebrauchseigenschaften denen konventioneller Materialein entsprechen. Insbesondere zählen hierzu: Verarbeitbarkeit und Verdichtungswilligkeit während des Mischens und des Einbaus; Ermüdungsbeständigkeit und Beständigkeit gegenüber Spurrinnenbildung.

In diesem Beitrag werden ausgewählte Ergebnisse eines Forschungsvorhabens über die Machbarkeit der vollständigen Wiederverwendung von Ausbauasphalt in neue Asphaltdeckschichten, mittels Variation des Asphaltgranulatanteils, zusammengefasst. Die Untersuchungen erfolgten im Rahmen des knapp zweijährigen (11/13-09/15) „CEDR Transnational Road Research“ Projektes (CEDR Transnationales Verkehrsforschungsprojekt) AllBack2Pave (AllBack2Pave - Toward a sustainable 100% recycling of reclaimed asphalt in road pavements), koordiniert von der Technischen Universität Dresden (TUD, Deutschland) in Zusammenarbeit mit der Universität von Nottingham (UNOTT, UK) und der Universität von Palermo (UNIPA, Italien).

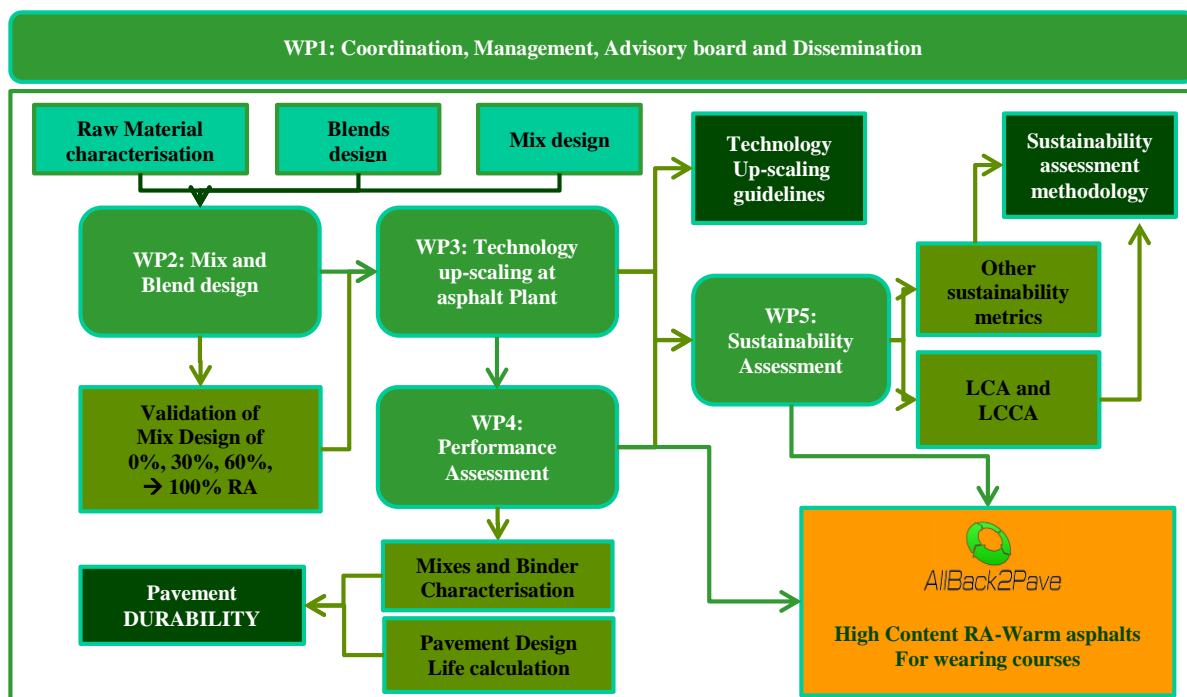


Abbildung 1: Projektstruktur

Für die Untersuchungen wurden typische für hochbelastete Straßen einsetzbare Deckschichtgemische, repräsentativ für Deutschland (Splittmastixasphalt (SMA) mit polymermodifiziertem Bitumen) und Italien (Asphaltbeton (AC) mit Straßenbaubitumen), ausgewählt. Der Anteil an Asphaltgranulat in den Mischungen jeder Asphaltart variierte von 0% (Kontrollmischung) bis zur maximal möglichen Zugabemenge.

Der Vergleich labortechnisch bestimmter mechanischer Materialeigenschaften der Kontrollmischungen und der Gemische mit zunehmendem Recyclinganteil diente u.a. der Identifizierung maßgebender Einflussfaktoren hinsichtlich des zu erwartenden Gebrauchsverhaltens einer jeden Gemischvariante. Die durchgeführten Laboruntersuchung umfassten umfangreiche

Bitumenuntersuchungen sowie Untersuchungen des Steifigkeits- und Ermüdungsverhaltens, der Spurrinnenanfälligkeit, des plastischen Verformungsverhaltens sowie Untersuchungen zur Feuchtebeständigkeit der Gemische.

Die Hauptziele des Projekts sind - durch Laboruntersuchungen an Bindemitteln und Asphaltmischungen festzustellen (Arbeitspaket 4), ob die Verwendung von hohen Recyclingraten in Deckschichtgemischen auch mit einer ausreichenden Performance der Gemische einhergeht sowie die Bereitstellung eines "AllBack2Pave Endnutzer-Handbuches" mit umfassenden Hinweisen zur kostengünstigen Produktion qualitativ hochwertiger Asphaltmischungen mit hohen Recyclinganteilen (Arbeitspaket 3). Ergänzt wird dies durch eine Nachhaltigkeitsbewertung des Einsatzes von Asphaltdeckschichtgemischen mit Recyclingmaterial anhand ausgewählter europäischer Fallstudien, um die wirtschaftlichsten Lösungen zusammen mit deren umweltrelevanten Auswirkungen über den gesamten Lebenszyklus der einbezogenen Fahrbahnen zu identifizieren (Arbeitspaket 5).

Die innovative Idee des Forschungsvorhabens ist - im Gegensatz zur üblichen Praxis - die Verwendung von relativ hohen Recyclinganteilen in Asphaltdeckschichtgemischen, die einer ständigen durch Klima und Verkehr induzierten Belastung ausgesetzt sind.

Grundlage dieses Beitrages bilden die während der Projektlaufzeit an der Technischen Universität Dresden durchgeführten Spaltzug- und Druck-Schwellversuche zur Ansprache des Steifigkeitsverhaltens, der Ermüdungs- und der plastischen Verformungsbeständigkeit der im Rahmen des Forschungsprojektes hergestellten Asphaltgemische.

2 UNTERSUCHTE MATERIALIEN

Für die Untersuchungen wurden zwei typische Deckschichtgemische, ein Splittmastixasphalt (SMA 8 S) mit polymermodifiziertem Bitumen (PmB 25/55-55), repräsentativ für Deutschland, und ein Asphaltbeton (AC 16) mit Straßenbaubitumen (50/70), repräsentativ für Italien, ausgewählt.

2.1 *Mischgutkonzeption und Herstellung*

Die im Rahmen der Mischgutkonzeption zunächst durchgeführten Bitumenuntersuchungen an Frischbitumen, an Bitumen extrahiert aus zur Verfügung stehenden Asphaltgranulaten sowie an Mischungen aus beiden erfolgten an der Universität von Nottingham und beinhalteten u.a. Untersuchungen zur Notwendigkeit bzw. Möglichkeit des Einsatzes von Additiven (hier eine Mischung aus Rejuvenatoren und Warmmischadditiv). Im Anschluss an die Bitumenuntersuchungen erfolgte die Mischgutkonzeption der SMA-Varianten an der Technischen Universität Dresden, die der Asphaltbetonvarianten hingegen an der Universität von Palermo auf Sizilien in Italien. Für jede Asphaltvariante war jeweils ein Gemisch als Referenzvariante ohne Recyclinganteil und 3 Gemische mit unterschiedlichen Recyclinganteilen herzustellen.

Für die Herstellung der SMA-Gemische mit Recyclingmaterial stand zum Zeitpunkt der Mischgutkonzeption an der kooperierenden Mischanlage ein relativ junger Ausbauasphalt zur Verfügung, laut Information seitens der Mitarbeiter der Mischanlage ebenfalls ein SMA mit polymermodifiziertem Bitumen. Die Mischgutkonzeption ergab, dass als maßgebendes Kriterium zur Limitierung der maximalen Zugabemenge an Asphaltgranulat (RA) die Korngrößenverteilung des Granulates anzusetzen ist. Verglichen hierzu konnte bei der Mischgutkonzeption der AC-Gemische auf einen relativ jungen Ausbauasphalt zurückgegriffen werden, so dass sich hier als maßgebendes Kriterium die Bindemittleigenschaften des im Granulat vorhandenen gealterten Bitumens ergaben. Um nun qualitativ gleichwertige AC-Gemische mit unterschiedlichen Recyclinganteilen zu konzipieren, war der Einsatz von Rejuvenatoren unumgänglich. Eine sehr ausführliche Beschreibung des Prozesses der Mischgutkonzeption aller im Projekt verwendeten Materialien kann nachgelesen werden im Projektbericht „D2.1 - High-content RA asphalt mixture design“ (verfügbar unter <http://allback2pave.fehrl.org/>).

Als Ergebnis der Mischgutkonzeption wurden neben der SMA-Kontrollvariante mit 0% Recyclingmaterial zwei Varianten mit 30% und 60% Recyclingmaterial konzipiert. Eine Zugabe von beispielsweise 90% Recyclingmaterial war aufgrund der relativ ungünstigen Korngrößenverteilung des bestmöglichen zur Verfügung stehenden Asphaltgranulates nicht möglich. Folglich wurde für das vierte Gemisch eine „experimentelle“ Variante gewählt – ebenfalls mit einem Recyclingmaterial von 60% jedoch mit Zugabe von Additiven (Mischung aus Rejuvenatoren und Warmmischadditiv). Die Mischgutkonzeption der Asphaltbetonvarianten erlaubte hingegen, neben der Herstellung der AC-

Kontrollvariante mit 0% Recyclingmaterial, die Herstellung von drei Varianten mit 30%, 60% und 90% Recyclinganteil, wobei in jedem Fall die Präsenz von Rejuvenatoren gefordert wurde.

Die vier SMA-Varianten wurden im August 2014 in der Asphaltmischanlage der Richard-Schulz-GmbH & Co in Gilchingen hergestellt und in Eimern palettenweise an alle Projektpartner versendet. Kriterium für die Auswahl gerade dieser Mischanlage war zum einen das Vorhandensein einer Paralleltrommel und zum anderen die Bereitschaft des Mischanlagenbetreibers auch die für das Forschungsvorhaben benötigte relative geringe Menge an Asphaltmischgut herzustellen.

Die Herstellung der Asphaltbetonvarianten erfolgte im Dezember 2014 an der Mischanlage Ferrara-Accardi & F. s.r.l. in Catania auf Sizilien in Italien. Aufgrund der hier vorhandenen technischen Gegebenheiten (Nichtvorhandensein einer Paralleltrommel, wodurch die erforderliche Mischtemperatur nicht erreicht wurde) wurde die Asphaltvariante mit 90% Recyclingmaterial im Nachgang unter Laborbedingungen hergestellt, was nach aktuellem Kenntnisstand als kritisch zu bewerten ist, da hier infolge anderer Rahmenbedingungen i.d.R. andere Gemischeigenschaften bei Asphaltgemischen mit Recyclingkomponenten hervorgerufen werden als dies bei einer großmaßstäblichen Herstellung mittels Asphaltmischanlage der Fall ist.

Obwohl es in Deutschland bereits gängige Praxis ist, in Deckschichtgemische mit polymermodifiziertem Bitumen Recyclingmaterial in geringen Mengen beizumengen, so sei an dieser Stelle dennoch auf die EU Norm EN 13108-4 mit folgenden Restriktionen hinsichtlich des Recyclinganteils in Asphaltgemischen mit polymermodifiziertem Bitumen hingewiesen: *“when using reclaimed asphalt from mixtures in which a modified bitumen and/or a modifier additive has been used, and/or the mixture itself contains a modified bitumen and/or a modifier additive, the amount of reclaimed asphalt shall not exceed, (unless otherwise agreed between client and manufacturer), 10% of the surface courses by mass of the total mixture and 20% for the others”*. Dies bedeutet, dass die Verwendung der hier beschriebenen SMA-Varianten mit rel. hohen Recyclinganteilen stets eine entsprechende Vereinbarung zwischen dem Auftraggeber und dem Auftragnehmer erfordert.

2.2 Finale Zusammensetzung der untersuchten Materialien

Nach der finalen Herstellung der acht Asphaltgemische in der Mischanlage bzw. im Labor wurden für alle Gemische Kontrollprüfungen an der Technischen Universität Dresden wie auch an der Universität Palermo durchgeführt. Die Untersuchungen führten zu ähnlichen Ergebnissen. In Abbildung 2 und Abbildung 3 sind die Korngrößenverteilungen der acht untersuchten Asphaltgemische dargestellt. Weitere Angaben zur Gemischzusammensetzung sind in Tabelle 1 aufgelistet.

Ziel war es, jeweils vier Asphaltgemische mit nahezu ähnlicher Korngrößenverteilung herzustellen. Offensichtliche Abweichungen zwischen den einzelnen Sieblinien können primär auf eine inhomogene Zusammensetzung der verwendeten Asphaltgranulate zurückzuführen sein. Es wird vermutet, dass das für die Konzeption der Asphaltgemische verwendete Recyclingmaterial eine andere Korngrößenverteilung besaß, als dies zum Mischprozess der Fall war. Neben dem schichtweisen Ausbau und entsprechender Lagerung, vorzugsweise nach Fraktionen getrennt, ist vor Allem die Charakterisierung des Asphaltgranulates von besonderer Bedeutung in Hinblick auch die Konzeption von Asphaltgemischen mit Asphaltgranulat. Detaillierte Empfehlungen können dem Projektbericht „D3.1 – AllBack2Pave – End-User-Manual“ (verfügbar unter <http://allback2pave.fehrl.org/>) entnommen werden.

Tabelle 1: Ergebnisse der Kontrollprüfungen (Auswahl)

	SMA 8 mit 0% RA	SMA 8S mit 30% RA	SMA 8S mit 60% RA	SMA 8S mit 60% RA + Additive
Bindemittelgehalt [M.-%]	7,29	7,19	7,02	7,64
EP Ring & Kugel [°C]	67,9	74,1	82,5	61,8
Raumdicke gewählt [g/cm ³]	2,331	2,357	2,344	2,354
	AC 16 mit 0% RA	AC 16 mit 30% RA + Additive	AC 16 mit 60% RA + Additive	AC 16 mit 90% RA + Additive
Bindemittelgehalt [M.-%]	6,10	6,00	5,73	4,40
EP Ring & Kugel [°C]	52,0	60,7	77,05	65,15
Raumdicke gewählt [g/cm ³]	2,509	2,503	2,554	2,420

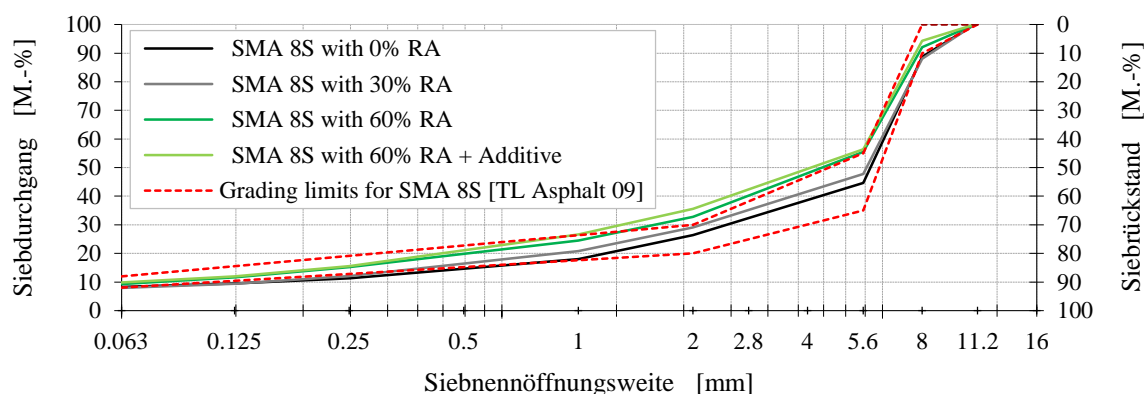


Abbildung 2: Korngrößenverteilung der Splittmastixgemische sowie Sieblinienbereich für SMA 8 S gemäß [TL Asphalt-StB 07]

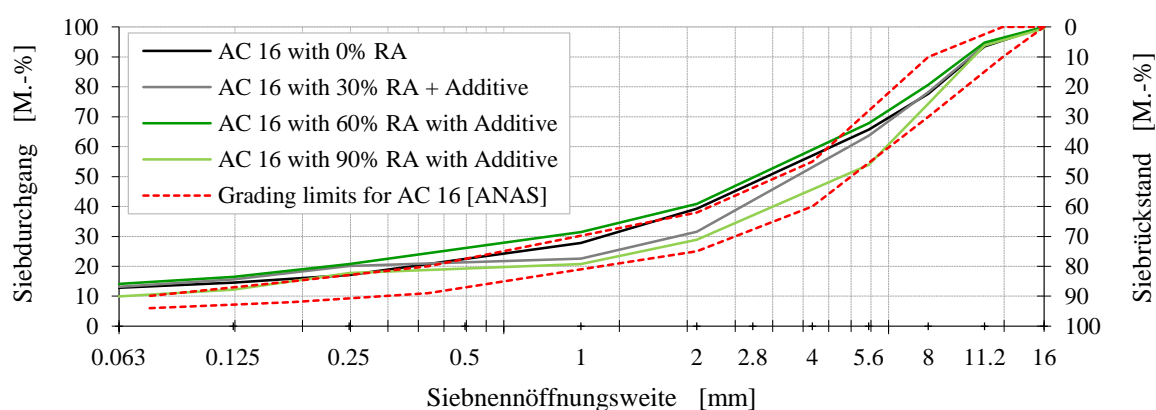


Abbildung 3: Korngrößenverteilung der Asphaltbetongemische sowie Sieblinienbereich für AC 16 gemäß [ANAS 2010]

3 PERFORMANCEORIENTIERTE ASPHALTUNTERSUCHUNGEN

Grundlage der nachfolgend aufgeführten Untersuchungsergebnisse bilden die während der Projektlaufzeit an der Technischen Universität Dresden durchgeführten Spaltzug- und Druck-Schwellversuche zur Ansprache des Steifigkeitsverhaltens, der Ermüdungs- und der plastischen Verformungsbeständigkeit der acht im Rahmen des Forschungsprojektes hergestellten Asphaltgemische.

3.1 Spaltzug-Schwellversuche

Der Spaltzug-Schwellversuch gilt als ein relativ einfaches, schnelles und kostengünstiges dynamisches Prüfverfahren, verglichen beispielsweise mit dem Drei- oder Vierpunkt-Biegeversuch. Mittels des Spaltzug-Schwellversuches können Eingangparameter für die Dimensionierung von Asphalt Schichten bei Anwendung der deutschen *Richtlinie für die rechnerische Dimensionierung des Oberbaus von Verkehrsflächen mit Asphaltdeckschichtgemischen* [RDO Asphalt 09] bzw. für eine Bewertung der strukturellen Substanz von Asphaltbefestigungen bestimmt werden.

3.1.1 Versuchsdurchführung

Die Durchführung der Spaltzug-Schwellversuche erfolgte in Anlehnung an die *Arbeitsanleitung zur Bestimmung des Steifigkeits- und Ermüdungsverhaltens von Asphalten mit dem Spaltzug-Schwellversuch* [AL Sp-Asphalt 09]. Auf eine detaillierte Beschreibung der Versuchsdurchführung wird an dieser Stelle verzichtet. Gemäß Vertrag mit dem Auftraggeber waren an den acht hergestellten Deckschichtgemischen sowohl das Steifigkeits- als auch das Ermüdungsverhalten zu untersuchen. Letzteres ist insbesondere im Rahmen von Überlegungen zu Rissmechanismen von Bedeutung.

In Tabelle 2 sind die maßgebenden Versuchsbedingungen zusammengefasst.

Tabelle 2: Versuchsbedingungen gemäß [AL Sp-Asphalt 09]

Untersuchungskriterium	Steifigkeit	Ermüdung
Temperatur [°C]	-10 / 0 / 10 / 20	20
Frequenz [Hz]	0,1 / 1 / 5 / 10	10
Unterspannung [MPa]	0,035	0,035
Zulässige horizontale Anfangsdehnung [%]	0,05 bis 0,10	0,05 bis 0,30
Anzahl an Wiederholungen [-]	3	3

Als Ergebnis der Spaltzug-Schwellversuche erhält man Steifigkeitsmodul-Temperaturfunktionen bzw. Masterkurven (Hauptkurven) sowie Ermüdungsfunktionen.

3.1.2 Versuchsauswertung

Zur Vernachlässigung nicht erwünschter Diskontinuitäten in den aufgezeichneten Signalreihen (Mess- und Kraftsignal) erfolgte vor Auswertung der jeweiligen Datenreihen eine Regression der auszuwertenden Lastwechsel mittels folgendem Sinus-Ansatz:

$$f(t) = a + b_1 + \sin(2\pi ft + c) + dt \quad [\text{Hz}] \quad (1)$$

mit a = absolutes Glied (Verschiebung zur x-Achse); b_1 = Amplitude (halbe Schwingweite); c = Phasenwinkel; d = linearer Term; f = Frequenz der Schwingung [1/s]; t = Zeitindex [s].

Anschließend galt es, je nach Untersuchungskriterium, eine geeignete Form der Auswertung festzulegen.

Steifigkeitsverhalten

Die Formulierung des Steifigkeitsverhaltens der untersuchten Asphaltgemische erfolgte bedingt in Anlehnung an die [AL Sp-Asphalt 09]. Mittels des Zeit-Temperatur-Superpositionsprinzips und des Ansatzes nach Arrhenius (Gleichung 2) erfolgte die Bestimmung der Masterkurve für eine Referenztemperatur T_{Ref} von 20°C. Der Verschiebungsfaktor a_T ergibt sich demnach zu:

$$\log a_T = \frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{Ref}} \right) \quad [\text{Hz}] \quad (2)$$

mit E_a = Aktivierungsenergie [J/mol]; R = universelle Gaskonstante mit $R = 8.314$ J/mol; T = absolute Temperatur [K]; T_0 = absolute Referenztemperatur [K].

Nach [AL Sp-Asphalt 09] kann für den Term $m=E_a/R$ für Asphaltgemische mit Straßenbaubitumen der Wert 25.000 angesetzt werden. Aussagen zur Größenordnung des Wertes m für Asphaltgemische mit polymermodifiziertem Bitumen werden jedoch nicht getroffen. Im Rahmen des Forschungsvorhabens AllBack2Pave wurde daher von den Autoren beschlossen, die Bestimmung der Masterkurven sowohl unter Verwendung eines „konstanten Faktors“ $m=25.000$ für alle untersuchten Materialien sowie für einen „variablen“ materialspezifischen Faktor m , der das materialspezifische frequenzabhängige Verhalten berücksichtigt, durchzuführen. Für Letzteren erfolgte zunächst die Bestimmung eines minimalen und maximalen Steifigkeitsmoduls anhand des formellen Zusammenhanges zwischen im Versuch aufgezeichnetem Phasenwinkel und anhand aufgebrachter Belastung und gemessener Verformung ermitteltem Steifigkeitsmodul, exemplarisch dargestellt in Abbildung 4.

Als mögliche Regressionsansätze werden von ZEIBLER [ZEISSLER 2015] die Ansätze nach Gleichung 3 und 4 vorgeschlagen und diskutiert. Da die Durchführung von Spaltzug-Schwellversuchen nach [AL Sp-Asphalt 09] zur Untersuchung des Steifigkeitsverhaltens von Asphaltgemischen eine maximale Prüftemperatur von nur 20°C vorsieht, wird eine Bestimmung des minimalen Steifigkeitsmoduls nach Gleichung 4 nur bedingt als erfolgsversprechend eingestuft.

$$\hat{\varphi} = f(\log_{10}(|E|)) = b_1 \cdot E + b_0 \quad (3)$$

$$\hat{\varphi} = f(\log_{10}(|E|)) = b_1 \cdot e^{b_2 \cdot (b_3 + \log_{10}(|E|))^2} + b_4 \quad (4)$$

Die Anwendung beider Ansätze zeigte, dass für die vier SMA-Varianten mit polymermodifiziertem Bitumen die Regression des Phasenwinkels mittels Gleichung 4 durchweg zu geringfügig besseren

Bestimmtheitsmaßen führte. Für die Auswertung der AC-Gemische lieferte hingegen Gleichung 3 stets das größere Bestimmtheitsmaß.

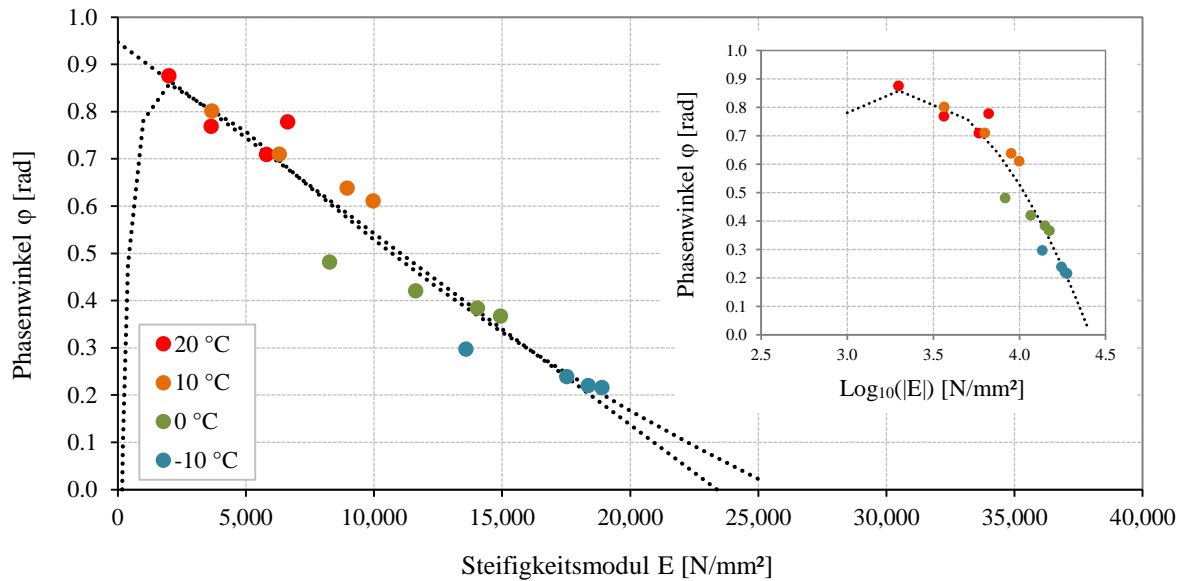


Abbildung 4: Phasenwinkel φ in Abhängigkeit des Steifigkeitsmoduls $|E|$ (nach Gleichung 3 und 4)) und $\log_{10} |E|$, exemplarisch für die Asphaltvariante SMA 8 S mit 30% Recyclinganteil

Für eine bessere Vergleichbarkeit und Weiternutzung der entwickelten Masterkurven sind geeignete Regressionsansätze zu wählen. Die Bestimmung der Regressionsparameter für einen konstanten Faktor m erfolgte nach [AL Sp-Asphalt 09] anhand einer Sigmoidfunktion:

$$E^* = y_0 + \frac{w}{1 + e^{-\frac{(x-x_0)}{z}}} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (5)$$

mit y_0 = Schnittpunkt der Funktion mit der Ordinatenachse [MPa]; x_0 = Schnittpunkt der Funktion mit der Abszissenachse [MPa]; x = beliebiger Wert auf der Abszissenachse, $x = \log(\alpha_T \cdot f)$ [Hz]; w und z = Materialparameter [MPa].

Für die Bestimmung der Regressionsfunktion mit materialspezifischem Faktor m kann Gleichung 5 in Gleichung 6 umgeformt werden. Für eine ausführliche Herleitung wird auf [ZEISSLER 2015] verwiesen.

$$|E|(\log_{10}(\alpha_T \cdot f)) = |E|_{min} + \frac{|E|_{max} - |E|_{min}}{1 + e^{\frac{-(\log_{10}(\alpha_T \cdot f) - b_5)}{b_6}}} \quad (6)$$

mit b_5 und b_6 = Materialparameter [MPa], und

$$\alpha_T = \frac{1}{e^{-m \cdot \left(\frac{1}{T+273.15} - \frac{1}{T_{Ref}+273.15} \right)}} \quad (7)$$

mit T = absolute Temperatur, für die der zu berechnende Steifigkeitsmodul bestimmt wird [K]; T_0 = Referenztemperatur, für die die Masterkurve bestimmt werden soll [K].

Die Anwendung von Gleichung 6 im Rahmen der Auswertung von Spaltzug-Schwellversuchen soll zu höheren Steifigkeitsmoduln führen.

Für die Regression der Steifigkeitsmodul-Temperaturfunktionen für eine beliebige Frequenz wurde ein Polynom 5. Grades verwendet.

Ermüdungsverhalten

Zur Beschreibung des Ermüdungsverhaltens eines Asphaltgemisches sind im Laborversuch die bis zum Versagen eines Prüfkörpers ertragbaren Belastungszyklen zu ermitteln. Der Zeitpunkt des Versagens, auch Ermüdungszeitpunkt genannt, wird unterschiedlich definiert. Nach [AL Sp-Asphalt 09] ist das Ermüdungskriterium Makroriss nach ROWE zu nutzen (Abbildung 5). ROWE nutzt den Graphen des

gemessenen reduzierten dissipativen Energieverhältnisses und interpretiert das Maximum als den Zeitpunkt der Makrorissbildung. Eine umfassende Herleitung dieses Interpretationsansatzes kann nachgelesen werden in [BLASL 2008]. Ein weiteres Versagenskriterium stellt das Kriterium des 50%igen Steifigkeitsabfalls dar, wonach ein Probekörper ermüdet ist, wenn dessen Steifigkeitsmodul auf 50% des Anfangswertes gefallen ist. Dieses in der EU-Norm [EN 12697-24] geforderte Kriterium fand neben dem in der [AL Sp-Asphalt 09] beschriebenen Kriterium im Rahmen des diesem Beitrag zugrunde liegenden Forschungsvorhabens Berücksichtigung. Der Vergleich beider Verfahren führte zu annähernd identischen Ergebnissen, so dass nachfolgend lediglich das Makrorisskriterium nach Rowe weiter diskutiert wird. Ergänzende Informationen zum Kriterium des 50%igen Steifigkeitsabfalls können dem Projektbericht „D4.1 – Mechanical properties of designed binders and mixes“ (verfügbar unter <http://allback2pave.fehrl.org/>) entnommen werden.

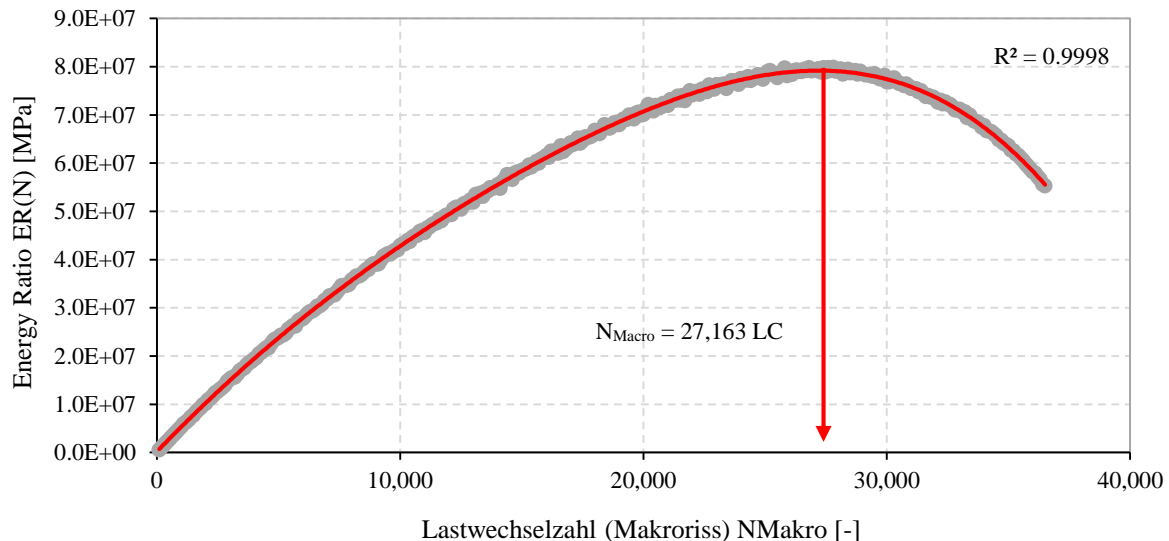


Abbildung 5: Beispiel einer "Energy Ratio Kurve" für SMA 8S mit 0% RA

Unabhängig vom Versagenskriterium ist abschließend die zum definierten Versagenszeitpunkt ermittelte Lastwechselzahl N der jeweils dazugehörigen elastischen Anfangsdehnung $e_{el,anf}$, i.d.R. definiert als die Dehnung zum Zeitpunkt des 100 Lastwechsels, in doppellogarithmischer Darstellung gegenüberzustellen. Als Regressionsfunktion für die daraus zu bildenden Ermüdungsfunktionen empfiehlt sich folgender Ansatz:

$$N = k_1 \cdot e_{el,anf}^{k_2} \quad (8)$$

mit k_1 und k_2 = Materialparameter [-].

3.2 Druckschwellversuche

Die auf der Oberseite von Asphaltbefestigung auftretenden bleibenden Verformungen in den Radspuren werden als Spurrinnen bezeichnet. Neben anderen Asphalteeigenschaften wie Steifigkeit und Ermüdungsrissbildung ist auch die Spurringefährdung bzw. der Widerstand gegen bleibende Verformung ein wichtiges Kriterium für die Beurteilung der Gebrauchseigenschaften eines Asphaltdeckschichtgemisches. Um das plastische Verformungsverhalten der acht Deckschichtgemische mit unterschiedlichen Recyclinganteilen zu charakterisieren, wurden einaxiale Druck-Schwellversuche (DSV) in Anlehnung an das von DRAGON [Dragon et al. 2014] beschriebene Verfahren, jedoch weitestgehend in Multi-Stage-Form durchgeführt, ausgewertet.

Die Durchführung der Versuche erfolgte, entgegen den Vorgaben der TP Asphalt-StB 07, Teil 25 B1 [TP Asphalt-StB 07], in Anwendung „schlanker Probekörper“ mit einem Durchmesser von 100 mm und einer Höhe von 200 mm, herausgebohrt aus mit dem Walzsektorverdichter hergestellten Asphaltplatten, und unter 3-facher Variation der Prüftemperatur. Zur Belastung der Probekörper wurde eine kraftgeregelte, harmonische Sinusschwellbelastung in vertikaler Richtung aufgebracht - ohne Lastpausen mit definierter Ober- und Unterspannung bei einer Prüffrequenz von 10 Hz. Die aufbrachten Spannungen wurden in Abhängigkeit des zu untersuchenden Materials und der

Prüf­temperatur gewählt. Dabei wurde die Oberspannung bis zu einem maximal möglichen Wert schrittweise erhöht. Die Unterspannung betrug stets 0,02 MPa. Tabelle 3 fasst die gewählten Kombinationen aus Temperatur und Belastung zusammen.

Tabelle 3: Versuchsbedingungen

Material		σ_1 bei 30 °C [MPa]	σ_1 bei 40 °C [MPa]	σ_1 bei 50 °C [MPa]
SMA 8 S	0% RC	0,100 - 0,800	0,100 - 0,450	0,100 - 0,350
	30% RC	0,100 - 0,900	0,100 - 0,550	0,100 - 0,400
	60% RC	0,100 - 0,800	0,100 - 0,600	0,100 - 0,400
	60% RC + Additive	0,100 - 0,800	0,100 - 0,500	0,100 - 0,350
AC 16	0% RC	0,100 - 0,500	0,100 - 0,325	0,100 - 0,250
	30% RC + Additive	0,100 - 0,800	0,100 - 0,400	0,100 - 0,250
	60% RC + Additive	0,100 - 0,925	0,100 - 0,800	0,100 - 0,425
	90% RC + Additive	0,100 - 0,925	0,100 - 0,900	0,100 - 0,500

Während des Versuchs wurde die axiale Gesamtverformung der Probekörper mit zwei, um 180° versetzt angebrachten Induktiven Wegaufnehmern oberhalb der oberen Lastplatte gemessen und über die Zeit aufgezeichnet.

Die Dauer eines Versuches war entweder durch Erreichen der maximal möglichen Verformung, welche auf 30 mm begrenzt wurde, oder durch Aufbringen der maximalen Anzahl an Lastwechseln limitiert. Für die im Multi-Stage-Verfahren durchgeführten Versuche bedeutet dies 90.000 LW je Multi-Stage-Versuch, wobei je Lastniveau 30.000 Lastwechsel aufgebracht wurden ($\sigma_1, \text{Stufe 1} < \sigma_1, \text{Stufe 2} < \sigma_1, \text{Stufe 3}$).

Für die Auswertung der Versuche wird die Dehnung als Verhältnis aus gemittelter Längenänderung und gemittelter Ausgangslänge des jeweiligen Probekörpers berechnet und über den dazugehörigen Lastwechsel aufgetragen. Anschließend werden die Ergebnisse mittels Regression unter Anwendung der Methode der kleinsten Fehlerquadrate approximiert. Als funktioneller Ansatz für die Impulskriechfunktion, welche das Ergebnis eines Multi-Stage-Versuchsabschnittes ist, wird der unter Gleichung 9 angegebene Zusammenhang verwendet. Unter der Annahme, dass die Verformungen in jeder Belastungsstufe bei Null beginnen, werden im letzten Auswertungsschritt die Ergebnisse aus Lastniveau 2 und 3 des Multi-Stage-Versuchs derart transformiert, dass die Impulskriechfunktion für alle drei Laststufen eines Multi-Stage-Versuches im Koordinatenursprung beginnt. Die Durchführung vergleichender Single-Stage-Versuche führte zu nahezu gleichen Impulskriechkurven verglichen mit jenen, die mittels Multi-Stage-Versuch und anschließender Transformation bestimmt wurden. Das Multi-Stage-Verfahren kann somit als geeignete zeit- und kostenreduzierende Alternativmethode zu Single-Stage-Versuchen zur Bestimmung des plastischen Verformungsverhaltens genutzt werden.

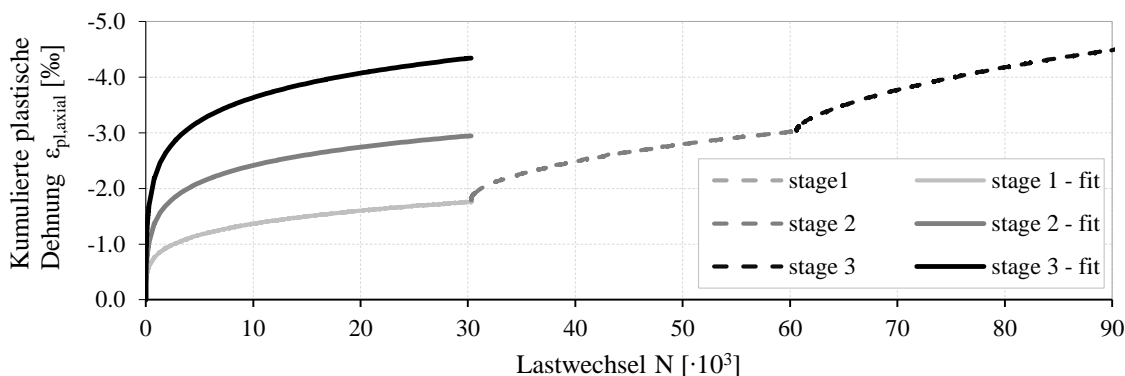


Abbildung 6: Beispiel eines Versuchsergebnisses der durchgeführten Druckschwellversuche

Abbildung 6 zeigt beispielhaft ein Ergebnis der durchgeführten Druck-Schwellversuche in Multi-stage-Form und Abbildung 7 stellt die funktionale Auswertung der Multi-Stage-Versuche dar.

$$\varepsilon_{pl,axial}(N) = a \log_{10}(N + 1)^b \quad (9)$$

mit: $\varepsilon_{pl,axial}(N)$ = akkumulierte axiale plastische Dehnung; N = Lastwechsel; a und b = Regressionsparameter der Impulskriechfunktion.

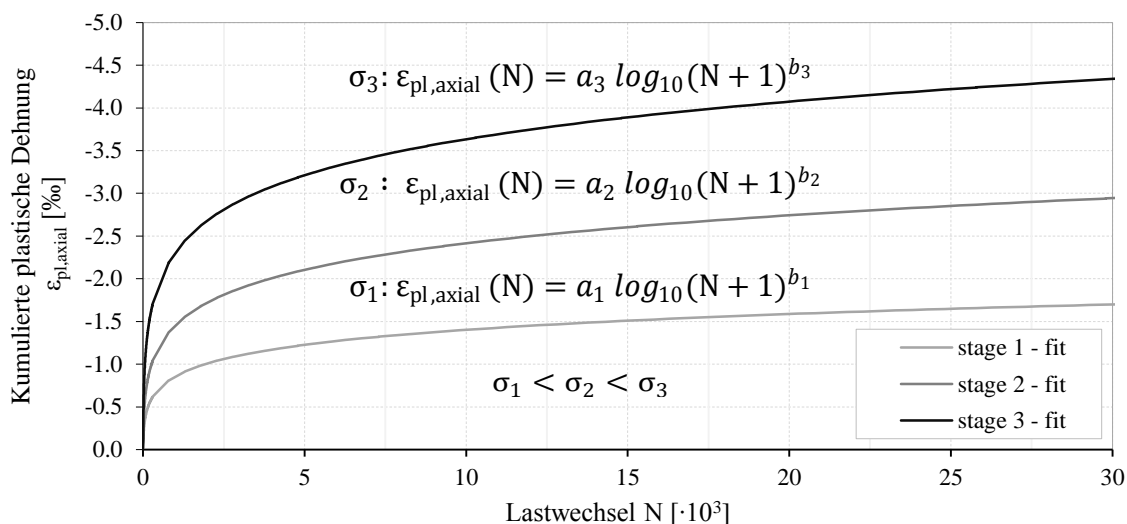


Abbildung 7: Prinzip der Auswertung der durchgeführten Druckschwellversuche

4 PERFORMANCE DER ASPHALTGEMISCHE

Um den Einfluss von Recyclingmaterial auf das elastische und plastische Verformungsverhalten von Asphaltdeckschichtgemischen zu untersuchen, erfolgte unter anderem die Durchführung von Spaltzug- und Druckschwellversuchen.

4.1 Spaltzug-Schwellversuche

Steifigkeitsverhalten

Die Ergebnisse der Spaltzug-Schwellversuche zur Untersuchung des Steifigkeitsverhaltens der acht in die Untersuchungen einbezogenen Asphaltgemische sind in Tabelle 4 und Tabelle 5 zusammengefasst. Auf Grundlage dieser Daten erfolgte die Ermittlung der Masterkurven sowohl für einen konstanten Verschiebungsfaktor wie auch für einen materialspezifischen Verschiebungsfaktor m . Zum besseren Vergleich der Materialien und der Auswertungsvarianten untereinander wird in diesem Beitrag gezielt auf die klassische doppellogarithmische Darstellung verzichtet (dargestellt jedoch im Projektbericht „D4.1 – Mechanical properties of designed binders and mixes“).

Tabelle 4: Steifigkeitsmoduln und Phasenwinkel für SMA 8 S - Varianten

Temp. [°C]	Frequ. [Hz]	SMA 8 S mit 0% RA		SMA 8 S mit 30% RA		SMA 8 S mit 60% RA		SMA 8 S mit 60% RA + Add.	
		Stiffness [MPa]	Phase [°C]	Stiffness [MPa]	Phase [°C]	Stiffness [MPa]	Phase [°C]	Stiffness [MPa]	Phase [°C]
-10	0,1	12911	0,293	13579	0,297	10882	0,263	10025	0,298
-10	1	16277	0,256	17517	0,239	13639	0,218	13184	0,248
-10	5	18125	0,227	18358	0,220	15668	0,193	15668	0,216
-10	10	19294	0,229	18888	0,216	16668	0,189	17017	0,211
0	0,1	7059	0,442	8265	0,481	9698	0,466	6870	0,545
0	1	10061	0,380	11618	0,420	13207	0,411	9400	0,479
0	5	11915	0,380	14037	0,384	15649	0,372	11916	0,441
0	10	12645	0,384	14926	0,367	16735	0,357	12820	0,426
10	0,1	3817	0,637	3657	0,801	5085	0,674	3205	0,803
10	1	6134	0,575	6302	0,710	8084	0,565	5459	0,722
10	5	8274	0,564	8952	0,638	10440	0,491	7813	0,652
10	10	9068	0,560	9962	0,611	11934	0,484	8740	0,617
20	0,1	1958	0,938	1985	0,876	2377	0,832	1797	0,919
20	1	3665	0,817	3639	0,768	4181	0,708	3196	0,805
20	5	5690	0,722	5804	0,709	6268	0,621	4663	0,753
20	10	6508	0,672	6626	0,778	7123	0,570	5272	0,792

Tabelle 5: Steifigkeitsmoduln und Phasenwinkel für AC 16 - Varianten

Temp. [°C]	Frequ. [Hz]	AC 16 mit 0% RA		AC 16 mit 30% RA + Add.		AC 16 mit 60% RA + Add.		AC 16 mit 90% RA + Add.	
		Stiffness [MPa]	Phase [°C]	Stiffness [MPa]	Phase [°C]	Stiffness [MPa]	Phase [°C]	Stiffness [MPa]	Phase [°C]
-10	0,1	11460	0,322	17758	0,212	17517	0,207	13683	0,197
-10	1	16122	0,228	20657	0,166	20113	0,163	16492	0,159
-10	5	19003	0,179	21188	0,135	20819	0,137	18414	0,137
-10	10	19991	0,163	21706	0,130	21148	0,131	19265	0,130
0	0,1	17981	0,220	11607	0,283	11150	0,309	10382	0,243
0	1	20905	0,164	15834	0,204	15477	0,230	13472	0,192
0	5	21739	0,132	18740	0,165	18354	0,189	15657	0,170
0	10	22194	0,114	19847	0,148	18990	0,181	16612	0,164
10	0,1	5320	0,589	5422	0,523	5900	0,507	6167	0,404
10	1	9669	0,415	9418	0,382	9773	0,380	8923	0,326
10	5	13247	0,322	12672	0,303	13036	0,309	11477	0,285
10	10	14738	0,288	14121	0,279	14570	0,291	12992	0,276
20	0,1	2036	0,868	2114	0,771	2820	0,561	3745	0,488
20	1	4341	0,685	4721	0,617	4637	0,613	6014	0,405
20	5	7284	0,554	7626	0,503	7397	0,481	8144	0,345
20	10	8735	0,509	9016	0,470	9490	0,425	9367	0,324

Die finalen Masterkurven (mit konstantem und materialspezifischem Verschiebungsfaktor m) sind in Abbildung 8 bis Abbildung 11 vergleichend gegenüber gestellt. Die Zusammenfassung der für die Bildung der Masterkurven bestimmten Regressionsparameter erfolgt in Tabelle 6 bis Tabelle 9.

Die Ergebnisse der SMA-Gemische lassen auf einen Zusammenhang zwischen Steifigkeitsmodul und Recyclinganteil schließen. Mit Zunahme des Recyclinganteils nimmt auch die Steifigkeit der Asphaltgemische zu, wenn auch nur relativ geringfügig. Die SMA – Variante mit 60% Asphaltgranulat und Additiven zeigt eine deutlich geringe Steifigkeit als die Vergleichsvariante ohne Additive. Dies kann zum einen durch die Wirkung der beigemenigten Additive oder durch den im Rahmen der Kontrollprüfungen festgestellten zu hohen Bindemittelgehalt zurückzuführen sein. An dieser Stelle sei nochmals darauf hingewiesen, dass laut Michgutkonzeption keine Zugabe von Additiven für die Herstellung der SMA - Variante mit 60% Asphaltgranulat erforderlich war.

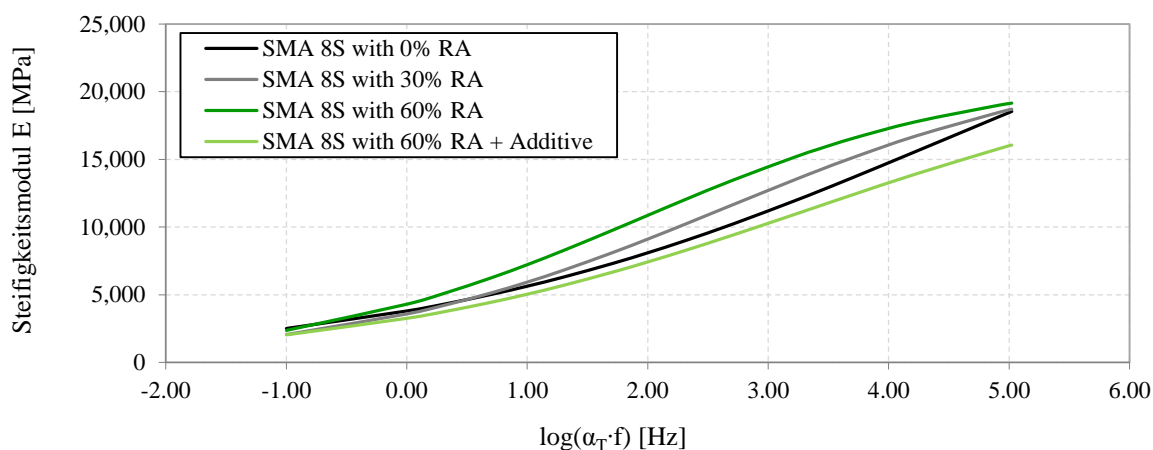


Abbildung 8: Masterkurven der SMA 8 S – Asphaltvarianten, für eine Referenztemperatur von $T_{Ref}=20^{\circ}C$ und $m=25.000$

Die Mischgutkonzeption der AC – Varianten zeigte jedoch die Notwendigkeit der Zugabe von Additiven zu allen mit Asphaltgranulat angereicherten Gemischvarianten. Die Zugabemenge wurde in Abhängigkeit der beizumengenden Asphaltgranulatmenge sowie dessen Eigenschaften bestimmt.

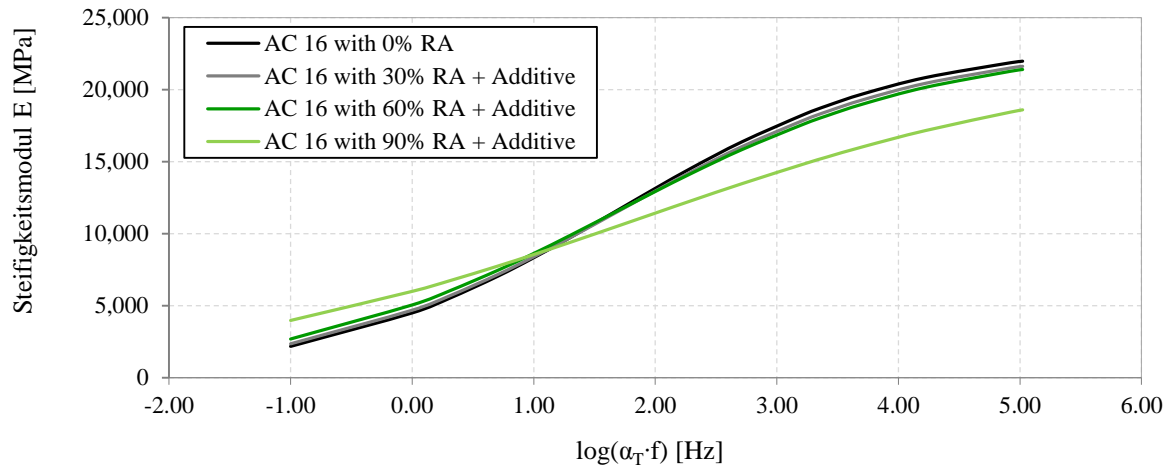


Abbildung 9: Masterkurven der AC 16 – Asphaltvarianten, für eine Referenztemperatur von $T_{\text{Ref}} = 20^{\circ}\text{C}$ und $m=25.000$

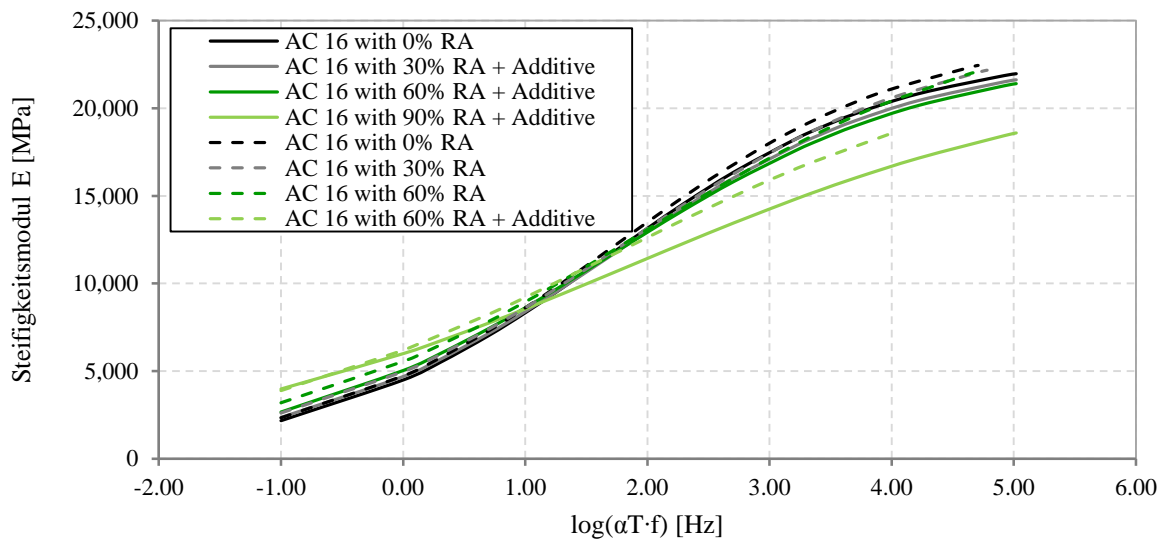


Abbildung 10: Masterkurven der SMA 8 S – Asphaltvarianten, für eine Referenztemperatur von $T_{\text{Ref}} = 20^{\circ}\text{C}$ und $m=25.000$ (durchgezogene Linie) bzw. m =variabel (unterbrochene Linie)

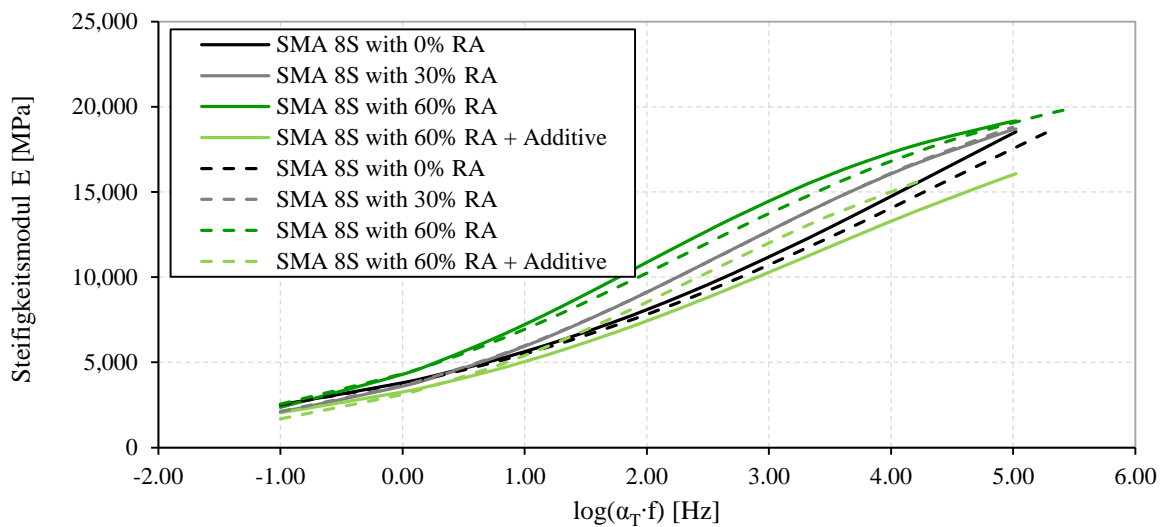


Abbildung 11: Masterkurven der AC 16 – Asphaltvarianten, für eine Referenztemperatur von $T_{\text{Ref}} = 20^{\circ}\text{C}$ und $m=25.000$ (durchgezogene Linie) bzw. m =variabel (unterbrochene Linie)

Die Ergebnisse zeigen nahezu keine Unterschiede hinsichtlich der Steifigkeitsmoduln der Gemische mit 0%, 30% und 60% Asphaltgranulatanteil. Auch hier zeigt die Variante 4 mit einer deutlich geringeren Steifigkeit ein abweichendes Verhalten. Dies kann erklärt werden durch deren vergleichsweise großen Hohlraumgehalt und die Tatsache, dass diese Variante im Labor hergestellt wurde.

Die vergleichende Gegenüberstellung der Ergebnisse bestimmt mit unterschiedlichen Verschiebungsfaktoren macht deutlich, dass unter Umständen, die qualitative Reihung der Materialien durch die Wahl der Auswertungsmethode beeinflusst werden kann. Dies betrifft im vorliegenden Fall den SMA 8 S mit 60% Recyclinganteil und einem gewissen Anteil an „bindemittelverjüngenden“ Additiven.

Tabelle 6: Parameter der Masterkurven der SMA 8 S – Asphaltvarianten, für eine Referenztemperatur von $T_{\text{Ref}}=20^{\circ}\text{C}$ und $m=25.000$

Material	SMA 8 S mit 0% RA	SMA 8 S mit 30% RA	SMA 8 S mit 60% RA	SMA 8 S mit 60% RA + Add.
m [-]	25000	25000	25000	25000
y_0 [MPa]	0,0000	65,8573	0,0000	0,0000
w [MPa]	32524,3512	22678,4263	21349,3499	22644,4113
x_0 [Hz]	4,4070	2,6380	1,9481	3,3455
z [-]	2,1816	1,5597	1,4135	1,8755
R^2 [-]	0,928	0,995	0,930	0,991

Tabelle 7: Parameter der Masterkurven der SMA 8 S – Asphaltvarianten, für eine Referenztemperatur von $T_{\text{Ref}}=20^{\circ}\text{C}$ und m =variabel

Material	SMA 8 S mit 0% RA	SMA 8 S mit 30% RA	SMA 8 S mit 60% RA	SMA 8 S mit 60% RA + Add.
E_{min} [MPa]	0,0953	174,1745	16,4293	102,3467
E_{max} [MPa]	31536,1233	25836,7134	28858,8179	22848,7884
m [-]	26454,4029	25279,9377	28056,8592	20877,1614
b_1 [-]	-0,4454	-0,5568	-0,4988	-0,6217
b_0 [-]	2,0000	1,7769	1,6662	1,8037
R^2 [-]	0,988	0,992	0,992	0,996

Tabelle 8: Parameter der Masterkurven der AC 16 – Asphaltvarianten, für eine Referenztemperatur von $T_{\text{Ref}}=20^{\circ}\text{C}$ und $m=25.000$

Material	AC 16 mit 0% RA	AC 16 mit 30% RA + Add.	AC 16 mit 60% RA + Add.	AC 16 mit 90% RA + Add.
m [-]	25000	25000	25000	25000
y_0 [MPa]	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
w [MPa]	23293,3844	23094,7084	23120,8411	22125,3548
x_0 [Hz]	1,6946	1,6939	1,6866	1,8751
z [-]	1,1825	1,2386	1,3204	1,8950
R^2 [-]	0,999	0,997	0,995	0,987

Tabelle 9: Parameter der Masterkurven der AC 16 – Asphaltvarianten, für eine Referenztemperatur von $T_{\text{Ref}}=20^{\circ}\text{C}$ und m =variabel

Material	AC 16 mit 0% RA	AC 16 mit 30% RA + Add.	AC 16 mit 60% RA + Add.	AC 16 mit 90% RA + Add.
E_{min} [MPa]	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
E_{max} [MPa]	24426,6549	24498,5923	25633,0072	23477,1246
m [-]	23438,1310	23813,3926	20857,2033	19852,5183
b_1 [-]	-0,8202	-0,7580	-0,6972	-0,5901
b_0 [-]	1,4282	1,3704	1,6979	1,0284
R^2 [-]	0,998	0,996	0,996	0,995

Ermüdungsverhalten

Die Ermüdungsfunktionen der acht in die Untersuchungen einbezogenen Asphaltgemische sind in Abbildung 12 und Abbildung 13 einander gegenüber gestellt. Eine Zusammenfassung der Regressionsparameter erfolgt in Tabelle 10.

Die SMA-Gemische zeigen im Vergleich zu den AC-Gemischen eine deutlich bessere Ermüdungsbeständigkeit. Unabhängig davon, kann resümiert werden, dass mit zunehmendem Anteil an Recyclingmaterial die Anzahl ertragbarer Lastwechsel (bis zum Makroriss) zunimmt. Je größer jedoch die anfängliche elastische Dehnung ist, desto geringer scheint der Einfluss des Recyclinganteils zu sein.

Ausnahme bildet auch hier wieder die jeweils vierte Gemischvariante. Ein positiver Einfluss der Zugabe von Additiven kann nicht abgeleitet werden.

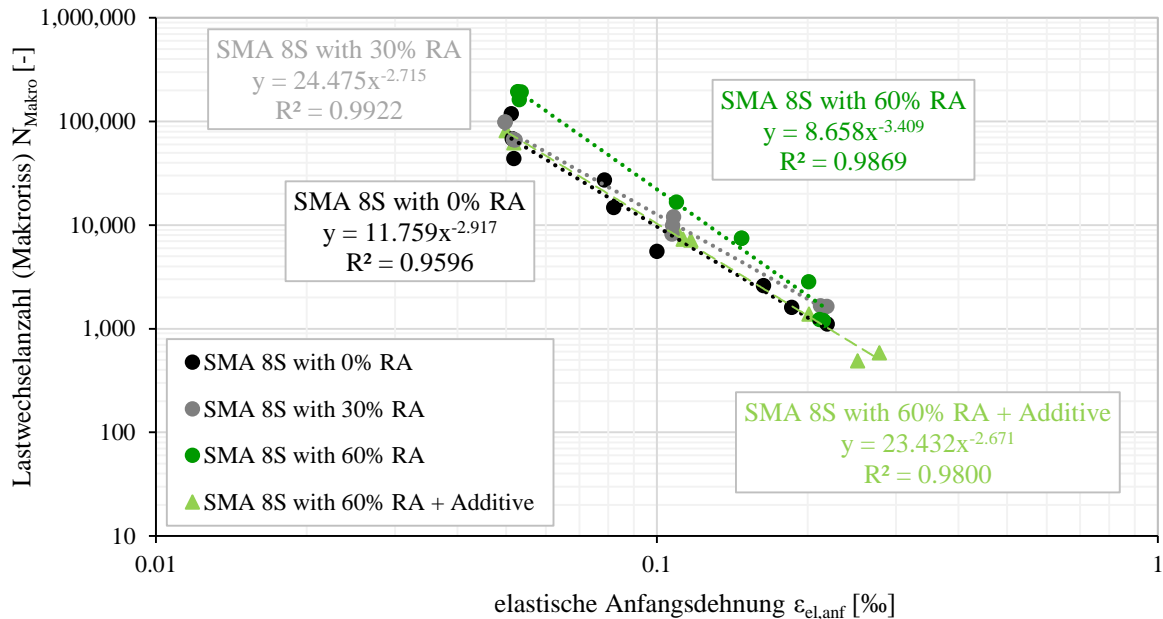


Abbildung 12: Ermüdungsfunktionen der SMA 8 S – Asphaltvarianten

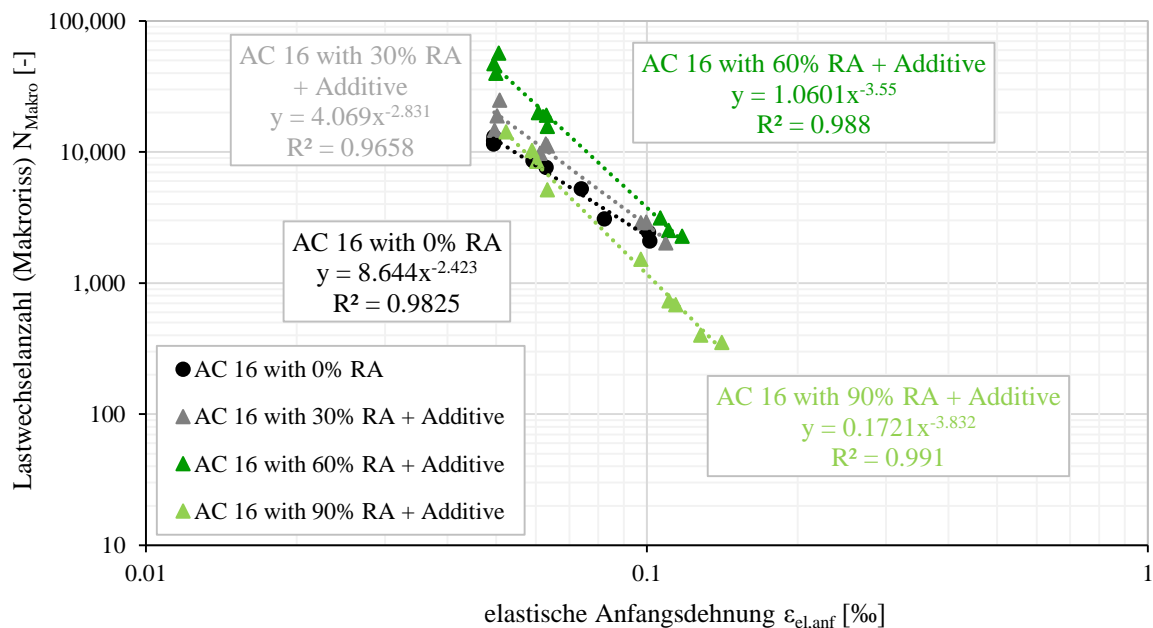


Abbildung 13: Ermüdungsfunktionen der AC 16 – Asphaltvarianten

Tabelle 10: Parameter der Ermüdungsfunktionen der untersuchten Asphaltgemische

Material		Parameter (@ 20°C; 10 Hz)		Bestimmtheitsmaß
		K_1	K_2	R^2
SMA 8S	0% RA	11,759	-2,917	0,96
	30% RA	24,475	-2,715	0,99
	60% RA	8,658	-3,409	0,99
	60% RA + Additive	23,432	-2,671	0,98
AC 16	0% RA	8,644	-2,423	0,98
	30% RA + Additive	4,069	-2,831	0,97
	60% RA + Additive	1,060	-3,550	0,99
	90% RA + Additive	0,172	-3,832	0,99

4.2 Druck-Schwellversuche

4.2.1 Einfluss von Belastungsniveau und Temperatur auf das plastische Verformungsverhalten

Sowohl das Belastungsniveau als auch die Prüftemperatur haben einen signifikanten Einfluss auf das plastische Verformungsverhalten. Abbildung 14 zeigt die kumulierte plastische Dehnung der SMA-Gemische mit 30% Recyclinganteil in Abhängigkeit der Lastwechselzahl bei einer Prüftemperatur von 40°C und drei unterschiedlichen Oberspannungen. Dabei werden die plastischen Dehnungen mit steigender Belastung erwartungsgemäß deutlich größer. Gleiches gilt für den Einfluss der Temperatur. Abbildung 15 verdeutlicht die Zunahme der kumulierten plastischen Dehnungen mit steigender Prüftemperatur bei gleichbleibender Belastung.

Darüber hinaus konnte beobachtet werden, dass die einzelnen Prüftemperaturen zu unterschiedlichem Deformations- und Bruchverhalten der Probekörper führten. Abbildung 16 zeigt exemplarisch 4 Probekörper eines Asphaltgemisches, die bei verschiedenen Temperaturen belastet wurden. Der linke Probekörper steht für einen unbeprobten Zustand. Die weiter rechts angeordneten Probekörper wurden, von links nach rechts, bei den Prüftemperaturen 30°C, 40°C und 50°C beprobt. Obwohl die vertikale Gesamtverformung der geprüften Probekörper nahezu gleich ist, unterscheidet sich das Bild der beprobten Probekörper deutlich voneinander, bedingt durch Volumenänderung und Rissbildung. Während sich die Mantelform des bei 30 °C geprüften Probekörpers nur leicht verändert, wird die seitliche Aufwölbung bei höheren Temperaturen immer deutlicher. Des Weiteren nahm mit Zunahme der Prüftemperatur auch deutlich die Rissentstehung zu. Diese Beobachtung konnte bei allen SMA und AC Materialien mit unterschiedlichem Anteil Recyclingmaterial und unabhängig von der Zugabe von Additiven beobachtet werden.

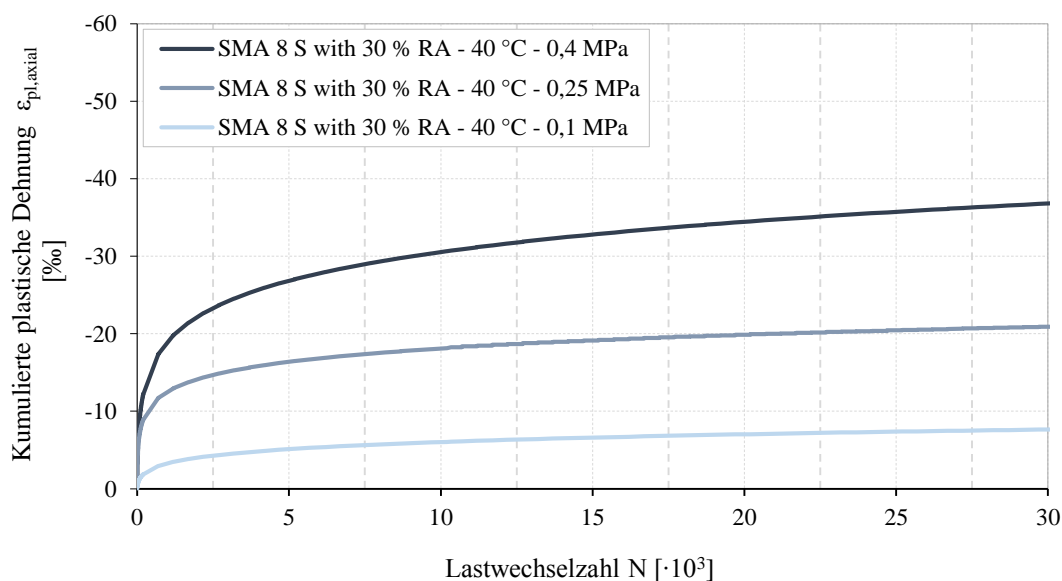


Abbildung 14: Einfluss des Belastungsniveaus auf das plastische Verformungsverhalten (Beispiel: SMA 8 S mit 30% Recyclinganteil)

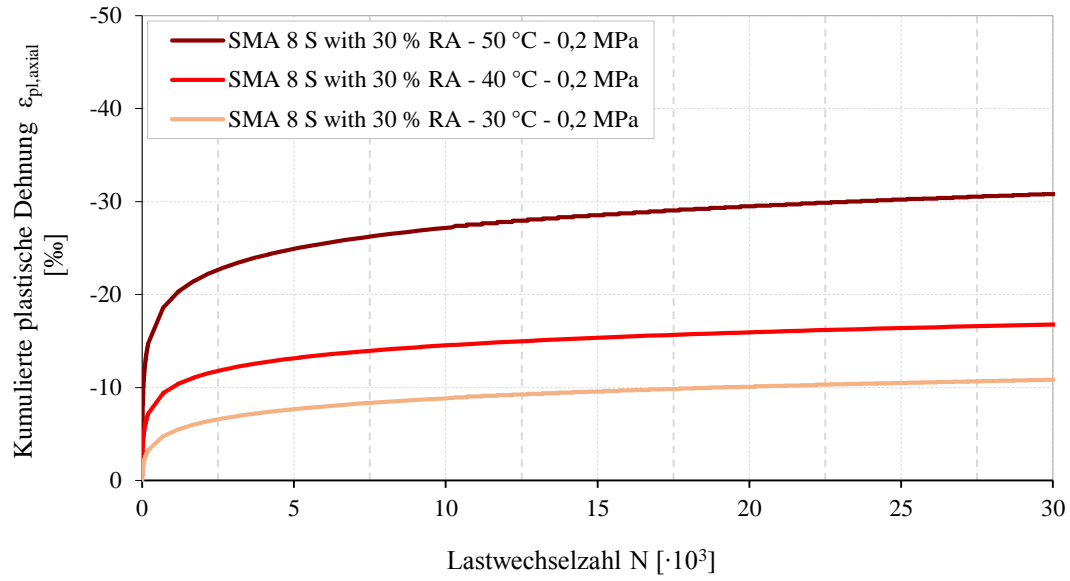


Abbildung 15: Einfluss der Temperatur auf das plastische Verformungsverhalten (Beispiel: SMA 8 S mit 30% Recyclinganteil)



Abbildung 16: Temperaturabhängiges Verformungsverhalten der Probekörper

4.2.2 Einfluss des Recyclinganteils auf das plastische Verformungsverhalten

Abbildung 17 und Abbildung 18 zeigen die Ergebnisse der Druck-Schwellversuche für die SMA 8 S und die AC 16 Asphaltgemische bei definierten Temperatur- und Belastungsbedingungen, um den Einfluss des RC-Anteils auf das plastische Verformungsverhalten bewerten zu können. Hinsichtlich der SMA 8 S Gemische kann kein signifikanter Einfluss des RC-Anteils festgestellt werden. Die Variante mit 60% RA und Additiven hat gemäß Kontrollprüfung einen höheren Bindemittelanteil. Es ist zu vermuten, dass dies zu den deutlich größeren plastischen Dehnungen führt. Es kann somit keine eindeutige Verbindung zwischen den hier verwendeten Additiven und den im Versuch ermittelten größeren Dehnungen hergestellt werden. In Bezug auf die AC 16 Materialien kann allerdings eine deutliche Abnahme der plastischen Dehnungen mit steigendem RC-Anteil beobachtet werden.

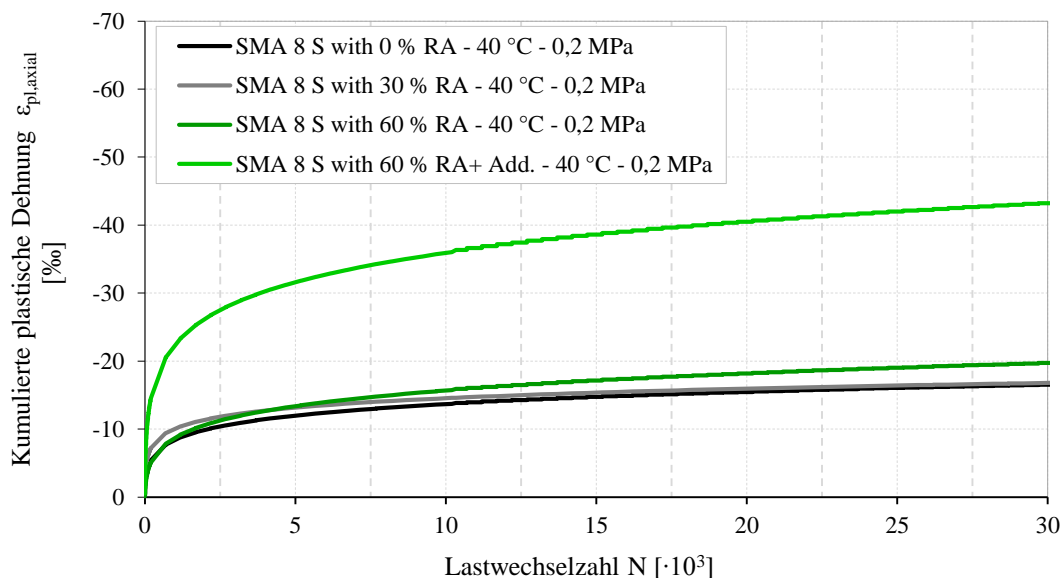


Abbildung 17: Einfluss des Recyclinganteils auf das plastische Verformungsverhalten der SMA 8 S – Asphaltvarianten

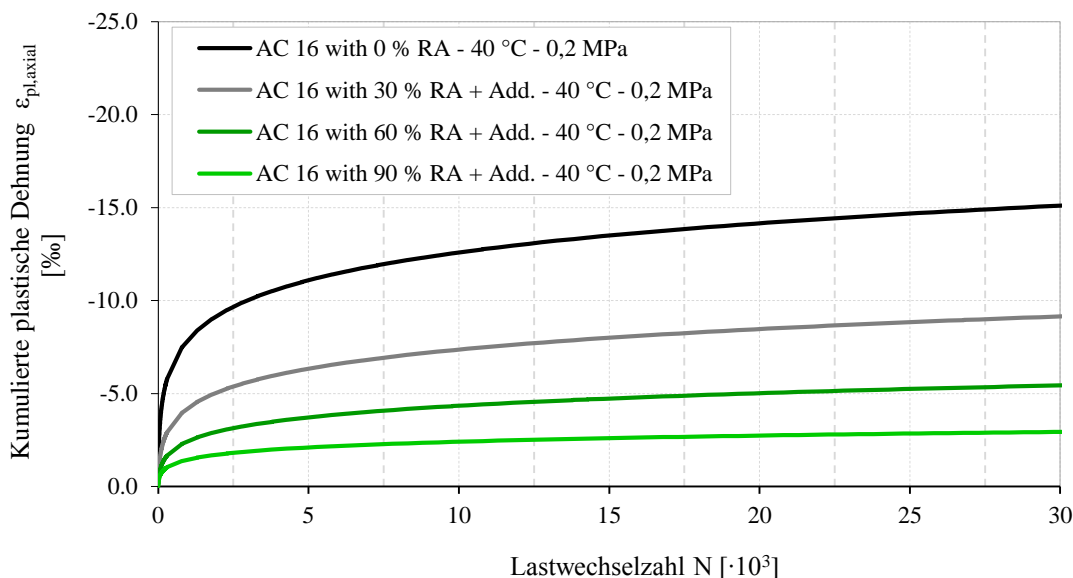


Abbildung 18: Einfluss des Recyclinganteils auf das plastische Verformungsverhalten der AC 16 – Asphaltvarianten

4.2.3 Beziehung zwischen elastischen und plastischen Dehnungen

Im nächsten Auswertungsschritt wurde untersucht, ob der Ansatz von [DRAGON et al. 2014] den Zusammenhang zwischen elastischer und plastischer Anfangsdehnung über eine Potenzfunktion zu

beschreiben, für die vorliegenden Deckschichtgemische übernommen werden kann. Dafür war es zunächst erforderlich, zu überprüfen, ob die Größe der plastischen Anfangsdehnung von der Größe der axialen elastischen Anfangsdehnung $\epsilon_{el,anf}$ abhängig ist. Diesen Ansatz, über elastische Verformungen auf bleibende Verformungen zu schließen, wendete bereits [BECKEDAHL 1988] für die Prognose von Spurrinnen an. In Abbildung 19 ist die Abhängigkeit der plastischen Dehnung von der elastischen Anfangsdehnung dargestellt. Die Größe der bleibenden axialen Dehnungen beim 100. Lastwechsel wurde aus den Versuchsergebnissen ermittelt. Die Bestimmung der elastischen Anfangsgröße erfolgte entsprechend dem in der [AL Sp-Asphalt 09] beschriebenen Verfahren. Wie Abbildung 19 zeigt, kann der Zusammenhang zwischen elastischer und plastischer Anfangsdehnung über die angegebene Potenzfunktion formuliert werden. Außerdem ist zu erkennen, dass die plastischen Dehnungen bei gleicher elastischer Anfangsdehnung aber höheren Versuchstemperaturen im Mittel größer sind als bei niedrigeren Temperaturen.

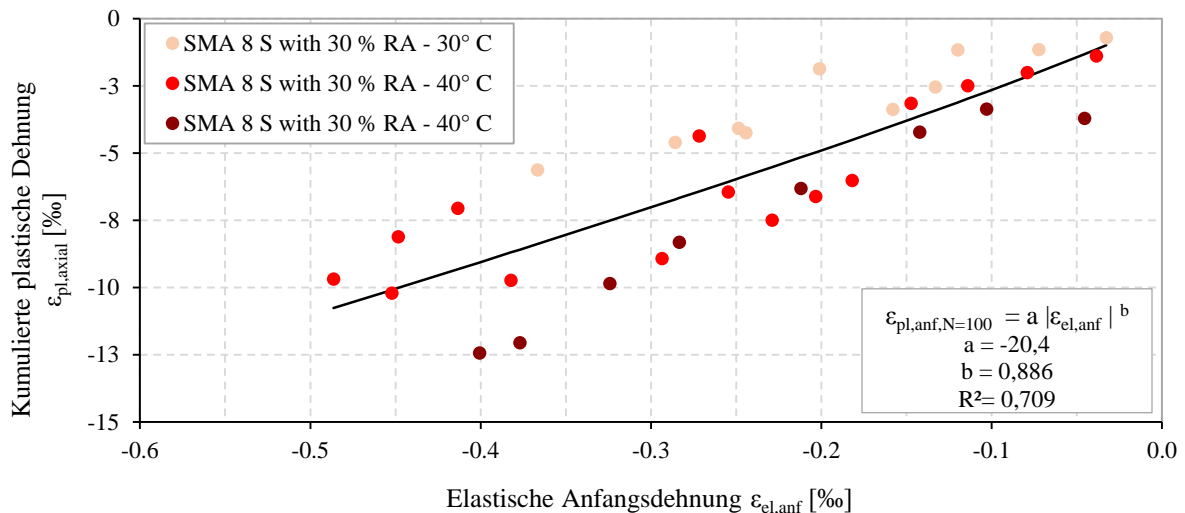


Abbildung 19: Funktionaler Zusammenhang zwischen kumulierter axialer Dehnung und elastischer Anfangsdehnung beim 100. Lastwechsel, exemplarisch für die SMA 8 S – Asphaltvariante mit 30% Recyclingmaterial

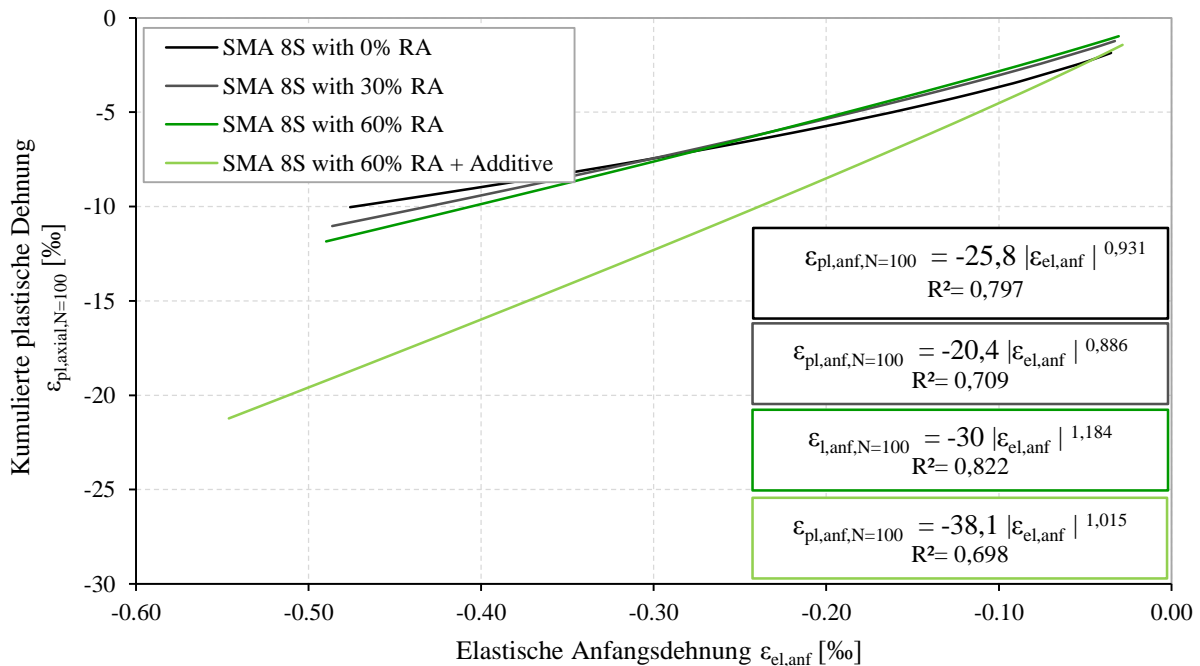


Abbildung 20: Abhängigkeit der kumulierten axialen Dehnung von der elastischen Anfangsdehnung beim 100. Lastwechsel der SMA 8 S – Asphaltvarianten

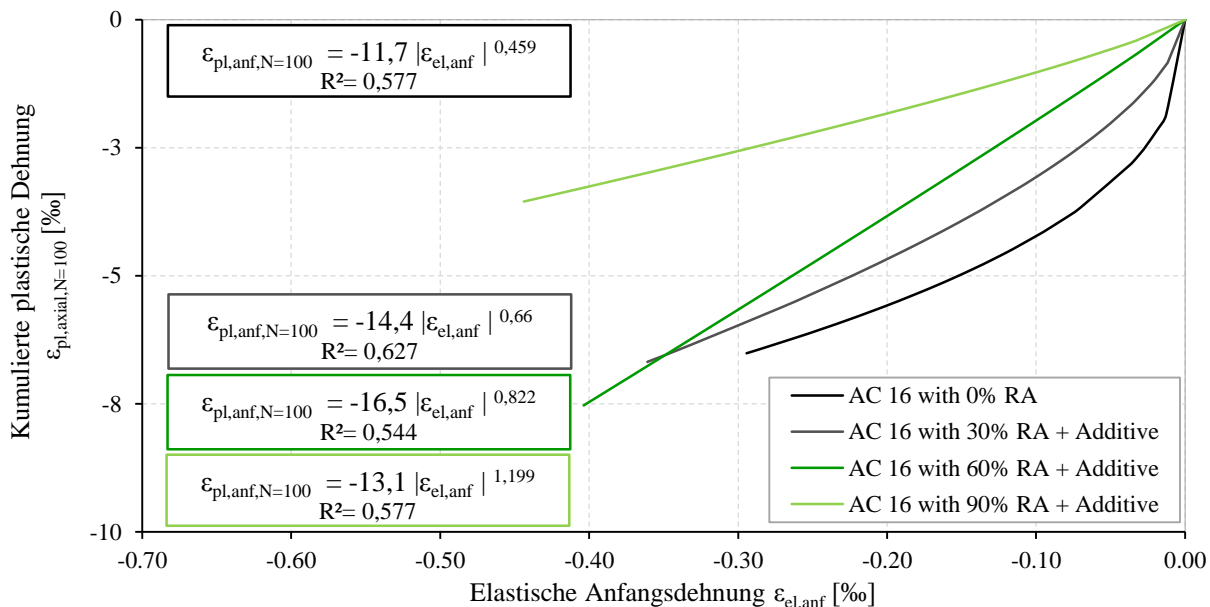


Abbildung 21: Abhängigkeit der kumulierten axialen Dehnung von der elastischen Anfangsdehnung beim 100. Lastwechsel der AC 16 – Asphaltvarianten

Abbildung 20 und Abbildung 21 zeigen für die untersuchten SMA- und AC-Gemische die voran beschriebene Potenzfunktion, die den funktionalen Zusammenhang zwischen der kumulierten plastischen und der jeweiligen elastischen Anfangsdehnung beim 100. Lastwechsel beschreibt. Es ist darauf zu verweisen, dass das Ranking der Materialien mit dem der klassischen Gegenüberstellung bei definierten Testbedingungen (vergleiche Abbildung 17 und Abbildung 18) übereinstimmt.

Aufgrund der in Abbildung 20 und Abbildung 21 angegebenen niedrigen Bestimmtheitsmaße (im Mittel: $R^2=0,669$) wurden im Weiteren Überlegungen zur Verbesserung der Regressionsergebnisse angestellt.

Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass das Anpassen der Lastplatten an den Probekörper zu Versuchsbeginn und mögliche Nachverdichtungsprozesse zu Beginn eines jeden neuen Belastungsniveaus sowie die verwendete Messtechnik (Messung der Verformung per Extensometer direkt am Probekörper oder Messung der Gesamtverformung oberhalb der oberen Lastplatte) einen Einfluss auf das Messergebnis haben kann, wurden im nächsten Schritt die plastischen Dehnungen beim 10.000, 20.000 und 30.000 Lastwechsel zugrunde gelegt.

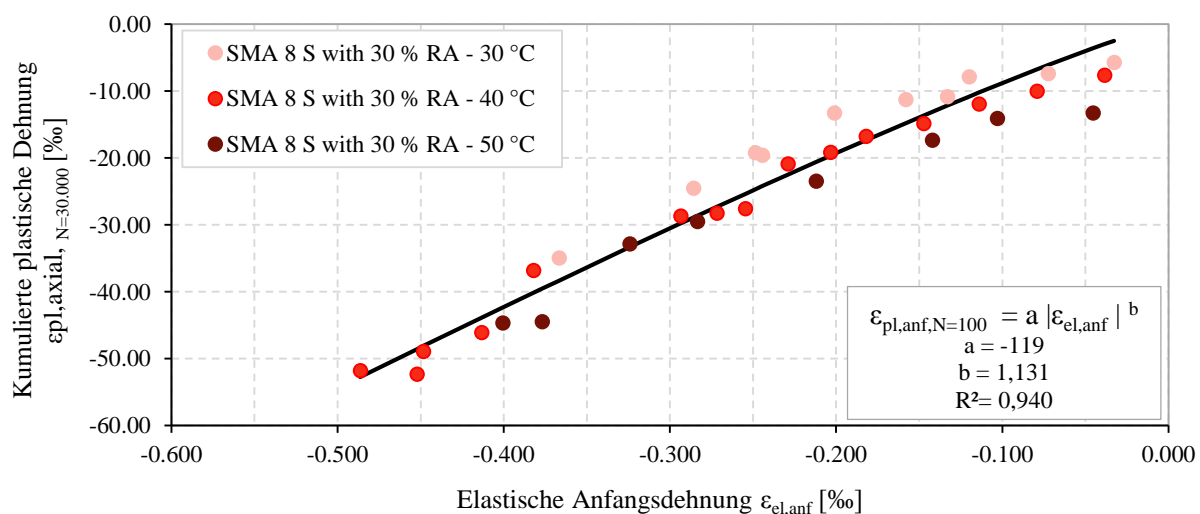


Abbildung 22: Funktionaler Zusammenhang zwischen kumulierter axialer Dehnung und elastischer Anfangsdehnung beim 30.000. Lastwechsel, exemplarisch für die SMA 8 S – Asphaltvariante mit 30% Recyclingmaterial

Exemplarisch ist für den 30.000. Lastwechsel der funktionale Zusammenhang zwischen kumulierter axialer Dehnung und elastischer Anfangsdehnung in Abbildung 22 dargestellt.

Wie in Abbildung 23 und Abbildung 24 für eine plastische Dehnung, bestimmt beim 30.000. Lastwechsel, dargestellt ist, können so für die zur Verfügung stehenden Versuchsdaten höhere Bestimmtheitsmaße für die Regressionsfunktionen erzielt werden. Tabelle 11 fasst die ermittelten Regressionsparameter und zugehörigen Bestimmtheitsmaße für alle untersuchten Asphaltgemische sowohl beim 100. als auch 30.000. Lastwechsel zusammen.

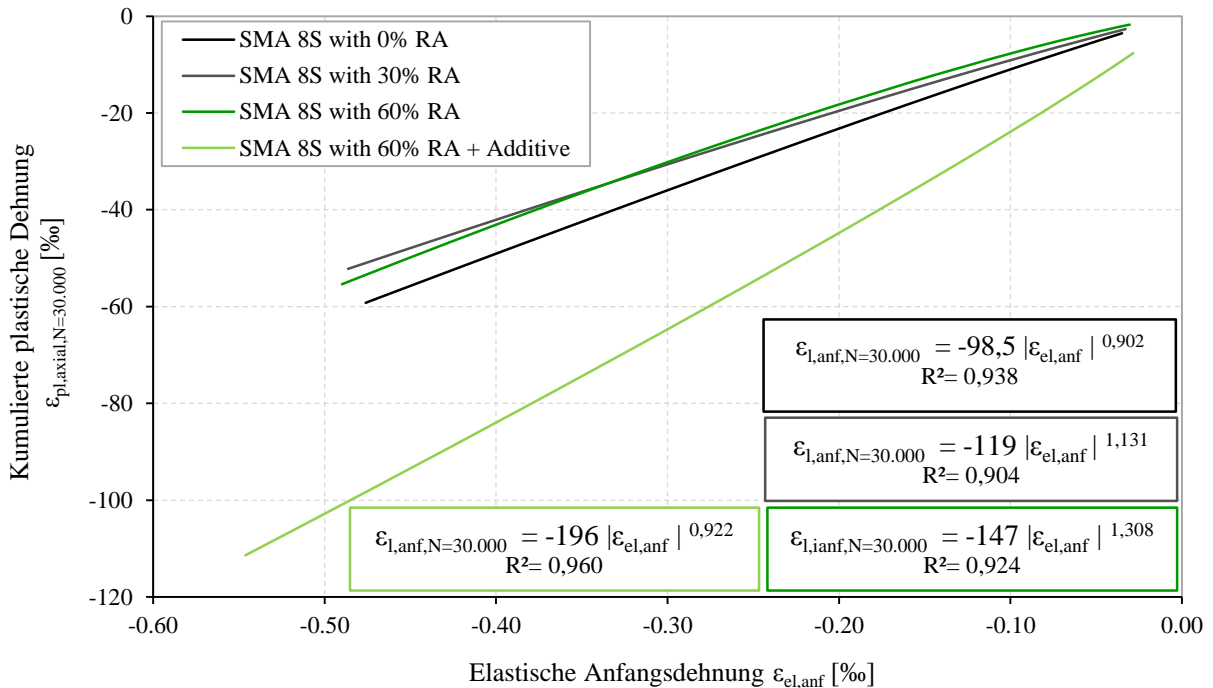


Abbildung 23: Abhängigkeit der kumulierten axialen Dehnung von der elastischen Anfangsdehnung bei den 30.000 Lastwechseln der SMA 8 S – Asphaltvarianten

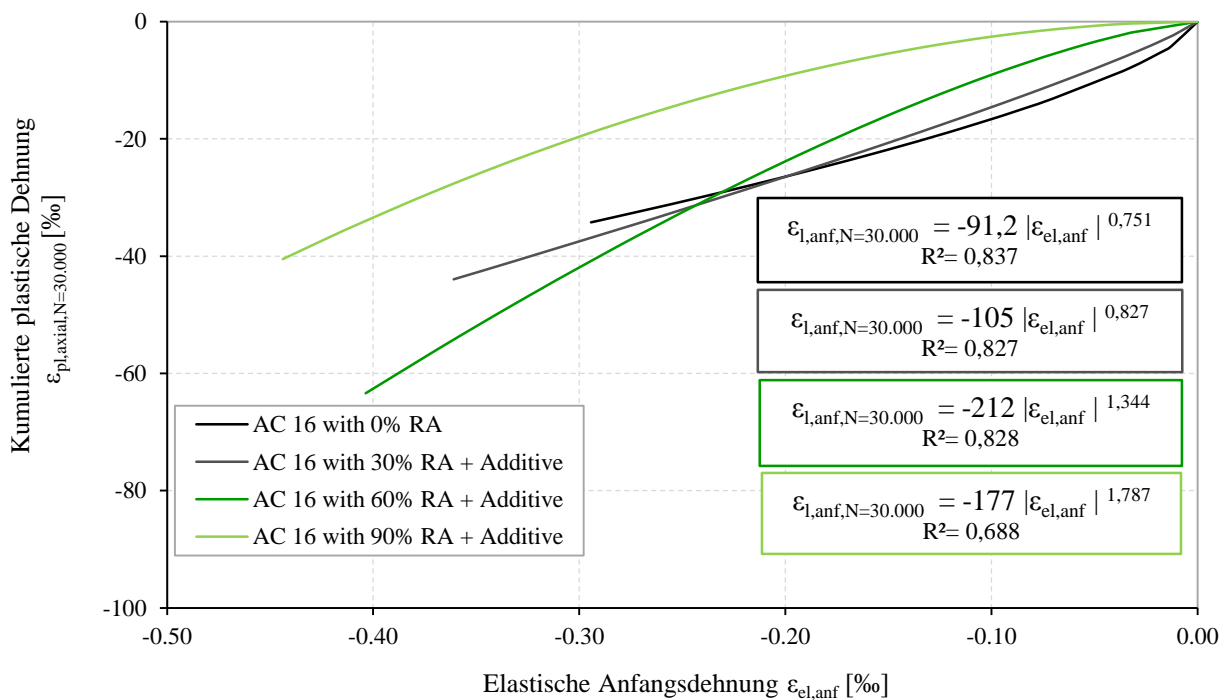


Abbildung 24: Abhängigkeit der kumulierten axialen Dehnung von der elastischen Anfangsdehnung bei den 30.000 Lastwechseln der AC 16 – Asphaltvarianten

Gemäß des von DRAGON [DRAGON et al. 2014] beschriebenen Verfahrens könnte abschließend anhand der über die elastische Anfangsdehnung ermittelten Parameter a und b der Impulskriechfunktion eine Spurrinnenprognose erfolgen.

Tabelle 11: Parameter der Potenzfunktion zur Beschreibung des Zusammenhangs zwischen elastischen und plastischen Dehnungen der untersuchten Asphaltgemische

Material		mit $\epsilon_{pl,axial,N=100}$			mit $\epsilon_{pl,axial,N=30.000}$		
		Parameter		R^2	Parameter		R^2
		a	b		a	b	
SMA 8S	0% RA	-25,8	0,931	0,797	-98,5	0,902	0,938
	30% RA	-20,4	0,886	0,709	-119,0	1,131	0,904
	60% RA	-30,0	1,184	0,822	-147,0	1,308	0,924
	60% RA + Additive	-38,1	1,015	0,698	-196,0	0,922	0,960
AC 16	0% RA	-11,7	0,459	0,577	-91,2	0,751	0,837
	30% RA + Additive	-14,4	0,660	0,627	-105,0	0,827	0,827
	60% RA + Additive	-16,5	0,822	0,544	-212,0	1,344	0,828
	90% RA + Additive	-13,1	1,199	0,577	-177,0	1,787	0,688

Zusammenfassend lässt sich bestätigend festhalten, dass der Zusammenhang zwischen elastischen und plastischen Dehnungen über die angegebene Potenzfunktion beschrieben werden kann. Allerdings führten die bei einer höheren Lastwechselzahl ermittelten plastischen Dehnungen zu einem besseren Regressionsergebnis als die gemäß [DRAGON et al. 2014] beim 100. Lastwechsel bestimmten Dehnungen. Darüber hinaus gilt es zu prüfen, ob die Berücksichtigung des Einflusses der Temperatur die Ergebnisse der Spurrinnenprognose auf Grundlage des statistischen Materialmodells zur Bestimmung der Materialparameter der Impulskriechfunktion von [DRAGON et al. 2014] verändert und ggf. realitätsnähere Prognosewerte liefert.

5 PERFORMANCE DER UNTERSUCHTEN ASPHALTGEMISCHE IN DER BEFESTIGUNG

Die in diesem Beitrag zusammengestellten Untersuchungsergebnisse hinsichtlich des elastischen und plastischen Verformungsverhaltens von Asphaltgemischen mit unterschiedlichen Recyclinganteilen können zum Beispiel als Eingangsdaten für Dimensionierungs- und Prognoserechnungen (Ermüdungs- und Spurrinnenanfälligkeit) verwendet werden. Bestandteil des zugrunde liegenden Forschungsvorhabens waren jedoch lediglich Dimensionierungsrechnungen. Auf eine ausführliche Beschreibung der nach den [RDO Asphalt 09] durchgeführten Dimensionierungsberechnungen wird an dieser Stelle verzichtet und auf den Projektbericht „D4.2 – Performance Prediction“ verwiesen. Nachfolgend soll anhand von Finite-Elemente Simulationen exemplarisch das Spannungs- und Dehnungsverhalten von hochbelasteten Asphaltbefestigungen mit unterschiedlichen Recyclinganteilen in der Asphaltdeckschicht verbildlicht werden.

Nach den [RSTO 12] wurde ein Aufbau bestehend aus 4 cm Asphaltdeckschicht, 8 cm Asphaltbinderschicht, 22 cm Asphalttragschicht und 51 cm ungebundener Tragschicht gewählt und mittels Finite-Elemente Programm (COMSOL Multiphysics) als rotationssymmetrisches Modell mit einem Modellradius von 1 m und einem Belastungsradius von 0,15 m nachgebildet. Für die Asphaltdeckschicht wurden die Materialparameter aus Tabelle 8 und Tabelle 9 in das Finite Elemente Modell eingebunden. Für die Asphaltbinder- und die Asphalttragschicht wurden die Parameter der Kalibrierasphalte nach den [RDO Asphalt 09] neu bestimmt [OESER 2014] und ebenfalls implementiert (Tabelle 12). Gemäß den [RDO Asphalt 09] wurden die maßgebenden Asphaltsteifigkeiten in Abhängigkeit der Tiefe innerhalb der Befestigung berechnet.

Da bei einem Asphaltpaket mit einer Dicke von 34 cm das nichtlineare Verhalten der darunter liegenden ungebundenen Tragschicht bei Annahme eines vollen Verbundes zwischen den Asphaltsschichten nicht zum Tragen kommt, wurde für die ungebundene Tragschicht jeweils eine konstante Schichtsteifigkeit von 150 MPa festgelegt. Die durchgeführten Berechnungen haben gezeigt, dass eine Änderung dieses Wertes (in realistischen Größenordnungen) zu keiner merklichen Änderung der in der Asphaltbefestigung auftretenden Spannungen und Dehnungen führt. Der unter der ungebundenen Tragschicht angeordnete Boden wurde mit einer Dicke von 100 cm und einer ebenfalls konstanten Schichtsteifigkeit von 45 MPa modelliert.

Unter der Voraussetzung, dass für die Asphaltsschichten vereinfacht ein linear elastisches Verhalten und für die ungebundenen Schichten eine konstante Schichtsteifigkeit angesetzt wird, kann die Anzahl der für die Dimensionierung nach den [RDO Asphalt 09] zu berechnenden Belastungszustände (13 Oberflächentemperaturen, 11 Achslasten) merklich reduziert werden. D.h. es genügt die Einbeziehung einer einzigen Achslast, beispielsweise einer Tonne. Die benötigten Dehnungen für alle weiteren Zustände können dann durch Extrapolation der bei einer Radauflast von einer Tonne berechneten Dehnung bestimmt werden. Die nachfolgend aufgeführten Rechnungen wurden exemplarisch für eine Radauflast von einer Tonne durchgeführt.

Tabelle 12: Parameter der Masterkurven der Kalibrierasphalte, für eine Referenztemperatur von $T_{\text{Ref}}=20^{\circ}\text{C}$ und $m=\text{variabel}$

Material	Kalibrierasphalt (Binderschicht)	Kalibrierasphalt (Tragschicht)
E_{min} [MPa]	0,0	0,0
E_{max} [MPa]	31308,00	31536,12
m [-]	25000	25000
b_1 [-]	-0,7861	-0,6706
b_0 [-]	1,8774	2,2713

5.1 Spannungen und Dehnungen in der Befestigung

Abbildung 25 zeigt exemplarisch für eine Oberflächentemperatur von 17°C und einer aufgetragenen Radauflast von einer Tonne die im Asphaltbau vorhandene Spannungs- und Dehnungsverteilung am Beispiel einer Befestigung mit der SMA 8 S-Variante mit 0% Recyclingmaterial eingesetzt als Deckschichtmaterial.

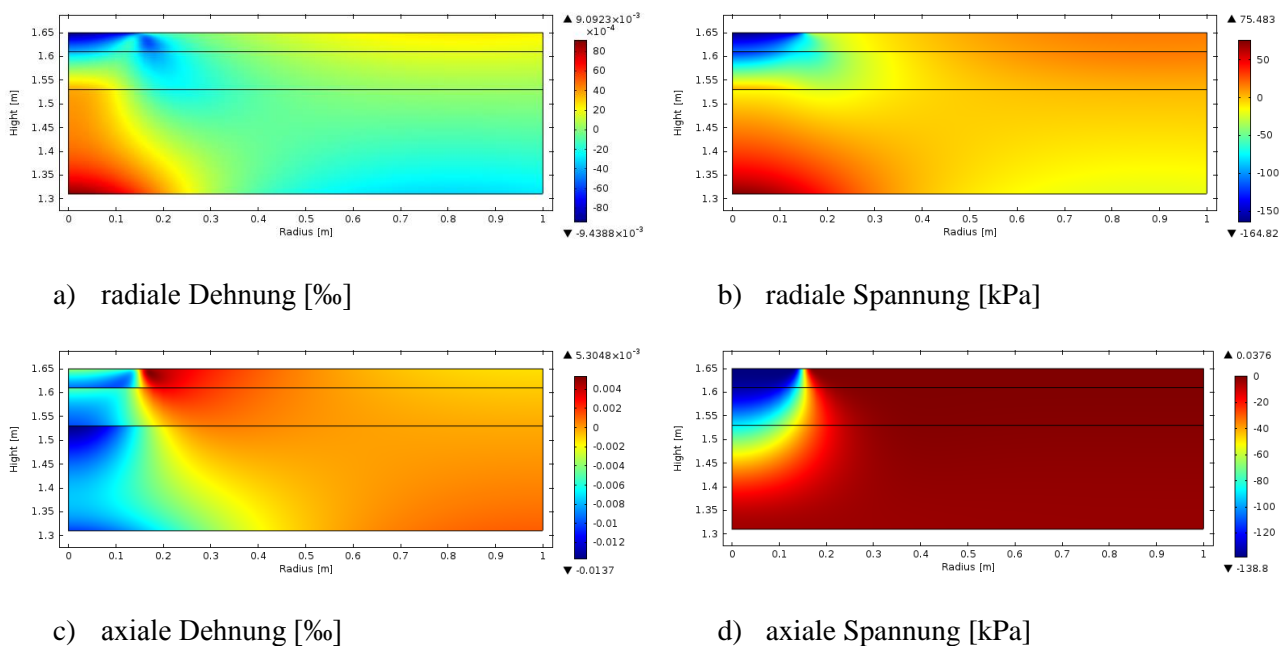


Abbildung 25: Spannungs- und Dehnungsverteilung in den Asphaltsschichten; exemplarisch für die SMA 8 S-Variante mit 0% Recyclingmaterial- eingesetzt als Deckschichtmaterial bei eine Oberflächentemperatur von $17,5^{\circ}\text{C}$ und einer aufgetragenen Radauflast von einer Tonne

Für die Beurteilung von Asphaltbefestigungen im Rahmen der rechnerischen Dimensionierung nach den [RDO Asphalt 09] sind für die Nachweisführung des Asphaltpaketes die maximalen verkehrslast- und temperaturinduzierten Zugdehnungen an der Unterseite der Asphalttragschicht maßgebend. Abbildung 26 zeigt exemplarisch die radialen Dehnungen an der Unterseite der Asphalttragschicht am Beispiel der voran genannten Befestigung jedoch unter Einfluss unterschiedlicher Oberflächentemperaturen.

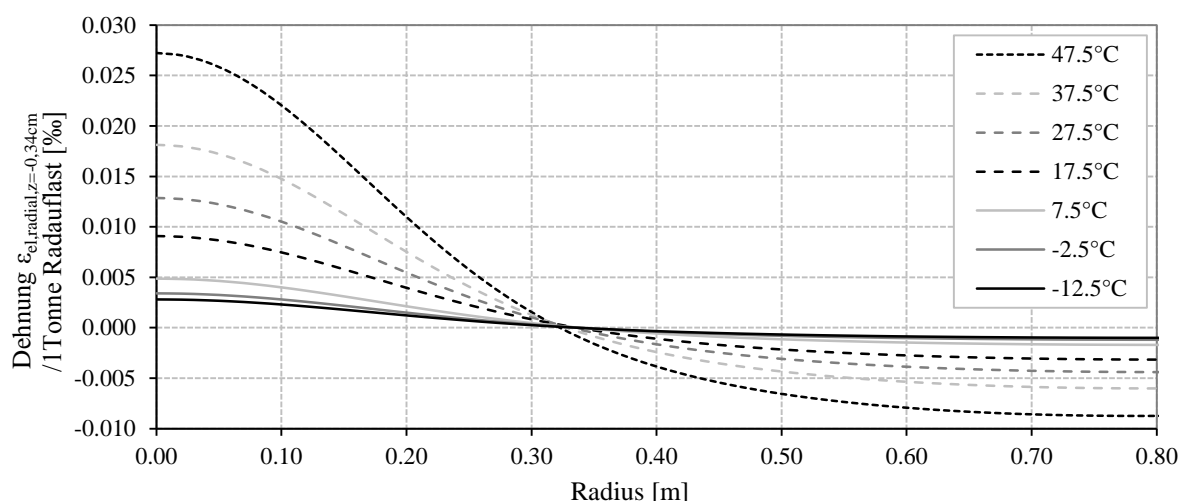


Abbildung 26: radiale Dehnung $\epsilon_{e,radial}$ an der Unterseite der Asphalttragschicht, exemplarisch für die SMA 8 S-Variante mit 0% Recyclingmaterial- eingesetzt als Deckschichtmaterial für unterschiedliche Oberflächentemperaturen von $-12,5^{\circ}\text{C}$ bis $47,5^{\circ}\text{C}$ und einer aufgetragenen Radauflast von einer Tonne

In Abbildung 27 sind für die oben beschriebenen Asphaltbefestigung unter Verwendung der acht untersuchten Asphaltgemische, im Modell als Deckschichtmaterial deklariert, die maximalen horizontalen Biegezugdehnungen an der Unterseite der Asphalttragschicht in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur (gemäß den [RDO Asphalt 09] von $-12,5^{\circ}\text{C}$ bis $47,5^{\circ}\text{C}$) der Befestigung für eine Radauflast von einer Tonne dargestellt. Sieben der acht untersuchten Deckschichtmaterialien bedingen im Modell nahezu identische Biegezugdehnungen an der Unterseite der Asphalttragschicht. Lediglich das AC-Gemisch mit 90% Recyclinganteil zeigt mit zunehmender Oberflächentemperatur etwas geringere Dehnungen.

Betrachtet man im Vergleich hierzu das theoretische Dehnungsverhalten an der Oberseite der untersuchten Asphaltbefestigungen, so zeigt sich ein annähernd gleiches Bild (Abbildung 28 und Abbildung 29), wobei die maximalen Zugdehnungen an der Oberseite (radiale und axiale Dehnungen einbezogen) ca. ein Drittel der maximalen Dehnungen an der Unterseite des Asphaltüberbaus betragen.

Sieben der acht untersuchten Deckschichtmaterialien führen zu einem ähnlichen Dehnungsverhalten. Das AC-Gemisch mit 90% Recyclinganteil zeigt mit zunehmender Oberflächentemperatur jedoch deutlich geringere Dehnungen als die anderen Materialien.

Des Weiteren ist auffällig, dass an der Oberseite der untersuchten Asphaltbefestigungen die maximalen axialen Zugdehnungen die radialen Zugdehnungen deutlich übersteigen. Diesem Punkt gilt besondere Bedeutung beizumessen bei der Betrachtung von Rissmechanismen sowie im Rahmen der rechnerischen Dimensionierung.

Abbildung 30 zeigt die relative Abweichung zwischen den maximalen radialen und axialen Zugdehnungen an der Oberseite der Asphaltbefestigung in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur und der in der Deckschicht verwendeten Asphaltvarianten. Die AC-Gemische liefern größere Abweichungen als die SMA-Gemische. Bei mittleren Temperaturen werden Abweichungen von bis zu 75% ermittelt. Bei Anwendung anderer als für diese Untersuchungen implementierter Materialdaten für die Asphaltbinder – und die Asphalttragschicht können ggf. Dehnungen und Abweichungen in anderen Größenordnungen bestimmt werden. Dies gilt es jedoch noch zu prüfen.

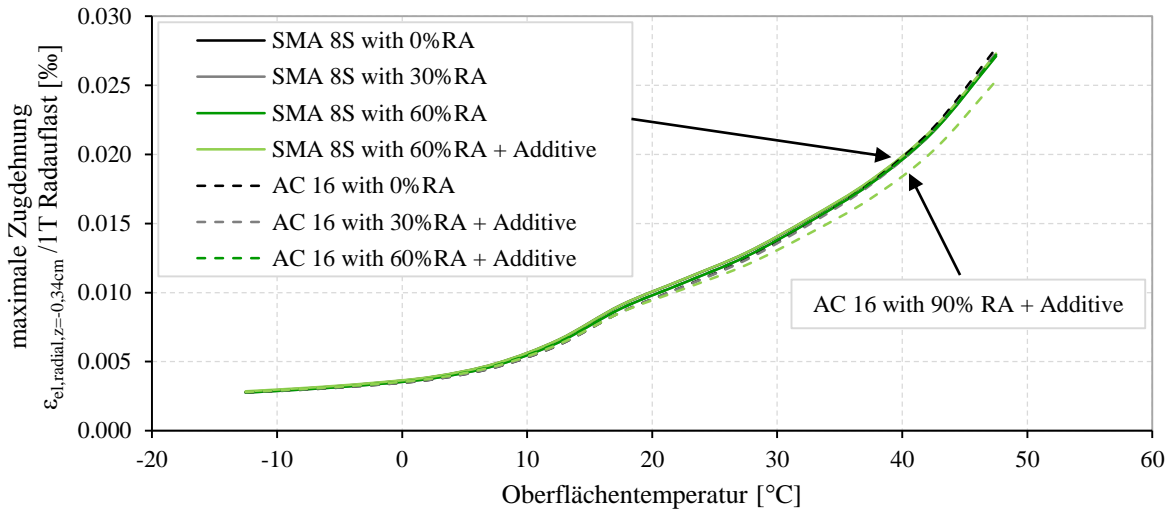


Abbildung 27: maximale radiale Zugdehnungen an der Unterseite der Asphalttragschicht in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur der Befestigung und der in der Deckschicht verwendeten Asphaltvarianten

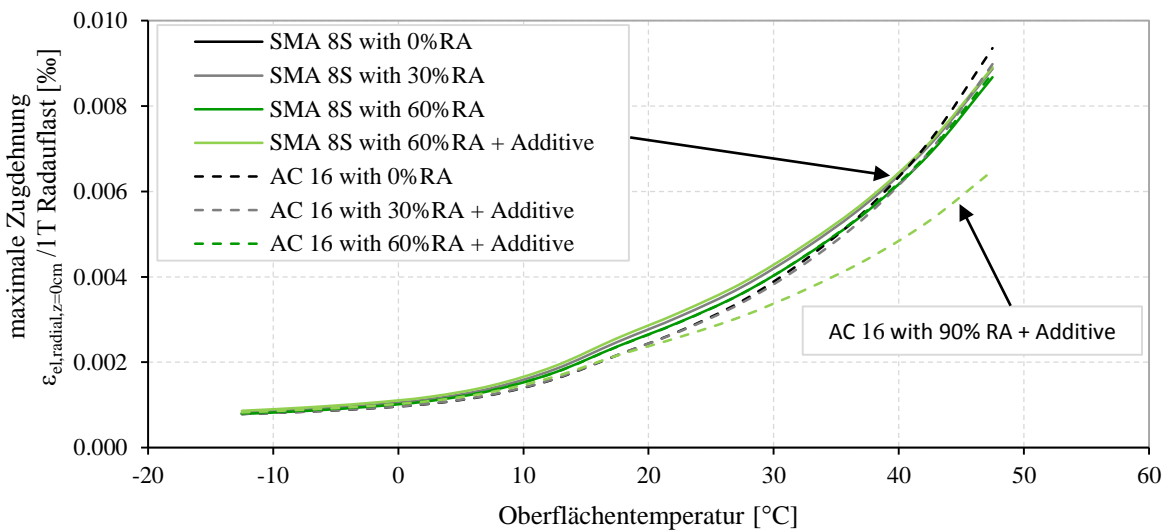


Abbildung 28: maximale radiale Zugdehnungen an der Oberseite der Asphaltdeckschicht in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur der Befestigung und der in der Deckschicht verwendeten Asphaltvarianten

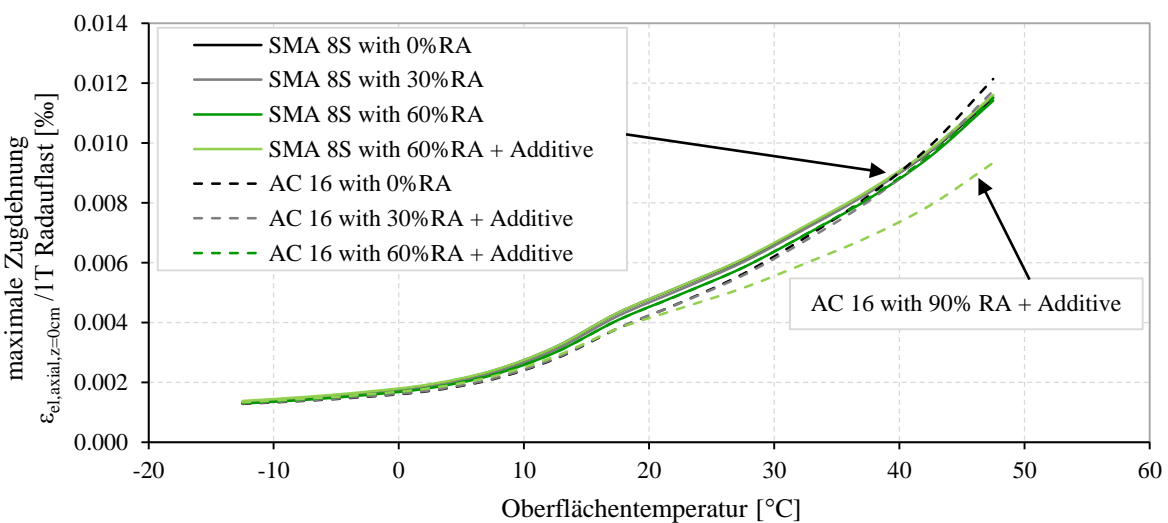


Abbildung 29: maximale axiale Zugdehnungen an der Oberseite der Asphaltdeckschicht in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur der Befestigung und der in der Deckschicht verwendeten Asphaltvarianten

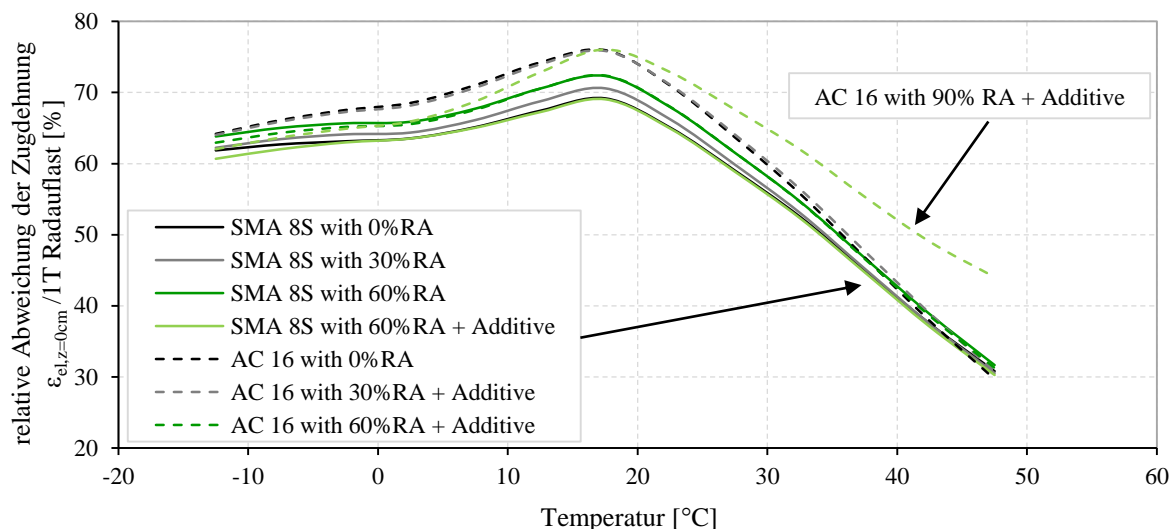


Abbildung 30: relative Abweichung zwischen den maximalen radialen und axialen Zugdehnungen an der Oberseite der Asphaltdeckschicht in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur der Befestigung und der in der Deckschicht verwendeten Asphaltvarianten

Zusammenfassend kann formuliert werden, dass bis auf das AC-Gemisch mit 90% Recyclinganteil (rel. großer Hohlraumgehalt und im Labor hergestellt) sowohl die einbezogenen Deckschichtvarianten wie auch die Variation der Zugabe an Recyclingmaterial bis 60% keinen signifikanten Einfluss auf das Dehnungsverhalten der Asphaltsschichten der untersuchten Befestigungsaufbauten haben.

5.2 Dimensionierungsergebnisse

In Anlehnung an die in der *Richtlinie für die rechnerische Dimensionierung des Oberbaus von Verkehrsflächen mit Asphaltdeckschichtgemischen* [RDO Asphalt 09] definierten Dimensionierungsrichtlinien wurden für den voran genannten Befestigungsaufbau Dimensionierungsberechnungen durchgeführt.

Als Eingangsdaten dienten die mittels Finite-Elemente-Programm berechneten maximalen Zugdehnungen sowie die Parameter der Ermüdungsfunktion für den Kalibrierasphalt, definiert als Kalibriermaterial für die Asphalttragschicht (Tabelle 13).

Tabelle 13: Parameter der Ermüdungsfunktionen des Kalibrierasphaltes (Kalibriermaterial für Asphalttragschicht)

Material	Parameter (@ 20°C; 10 Hz)	
	K_1	K_2
Kalibrierasphalt (Tragschicht)	2,829	- 4,194

Aus dem voran definierten Befestigungsaufbau und dessen Anwendung für hochbelastete Straßen ergeben sich nach der [RSTO 12] die nachfolgend aufgelisteten Parameter zur Berechnung der dimensionierungsrelevanten Beanspruchung B.

Tabelle 14: Parameter zur Berechnung der dimensionierungsrelevanten Beanspruchung B

p	f_A	f_1	f_2	f_3	q_{Bm}
0,03	4,5	0,45	1	1,05	0,33

Für die Berechnungen wird eine Zunahme des Schwerverkehrsanteils bereits ab dem ersten Jahr angenommen. Als Nutzungszeitraum werden für die Dimensionierungsberechnungen 30 Jahre anberaumt. Der Sicherheitsbeiwert nach [RDO Asphalt 09] Tabelle 8.2 wurde mit 2,1 festgelegt.

In Tabelle 15 und Tabelle 16 sind die nach den [RDO Asphalt 09] gewählten Häufigkeitsverteilungen für Achslasten und Oberflächentemperaturen zusammengefasst.

Abbildung 31 und Abbildung 32 zeigen den nach den [RDO Asphalt 09] berechneten Ermüdungsstatus nach 30 Jahren für den Punkt der maximalen Biegezugdehnungen an der Unterseite der Asphalttragschicht in Abhängigkeit des DTV_{SV} bzw. der dimensionierungsrelevanten Beanspruchung B (repräsentativ für eine Belastungsklasse BK100) und der in der Deckschicht verwendeten Asphaltvarianten.

Tabelle 15: Achslastklassen und zugeordnete Häufigkeiten (BAB Fernverkehr)

Achslastklasse (statische Achslast) [t]										
0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	19-20	>20
Häufigkeit der jeweiligen Achslast [%]										
2,8396	21,467	26,4848	30,7195	11,7032	4,9098	1,654	0,2087	0,0126	0,0007	0,0001

Tabelle 16: Oberflächentemperaturen und zugeordnete Häufigkeiten (Temperaturzone 1)

Oberflächentemperatur [°C]												
-12,5	-7,5	-2,5	2,5	7,5	12,5	17,5	22,5	27,5	32,5	37,5	42,5	47,5
Häufigkeit der jeweiligen Oberflächentemperatur [%]												
0,009	0,015	0,086	0,174	0,176	0,186	0,140	0,084	0,055	0,038	0,025	0,006	0,006

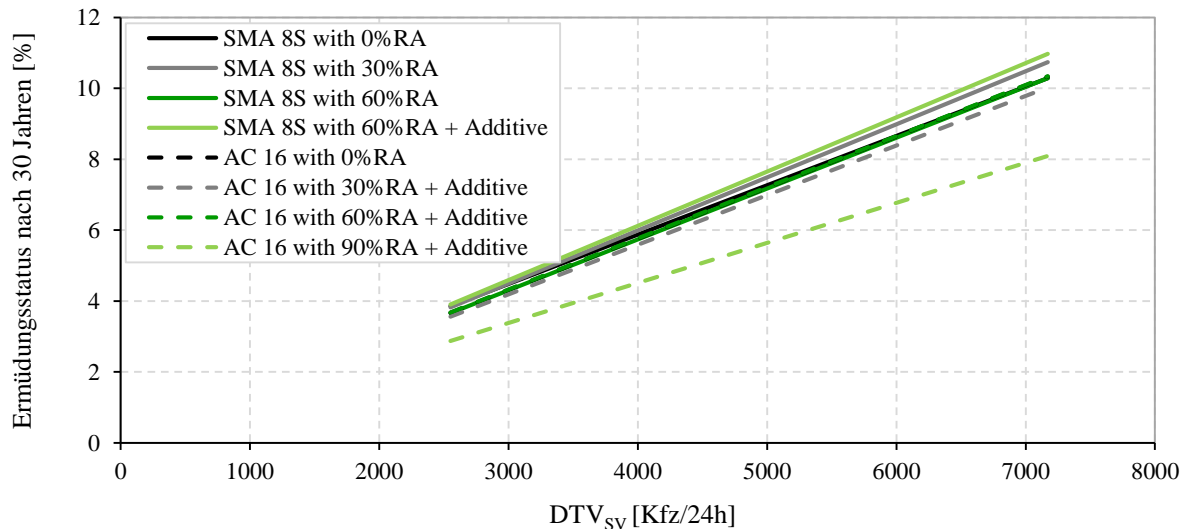


Abbildung 31: Ermüdungsstatus nach 30 Jahren für den Punkt der maximalen Biegezugdehnungen an der Unterseite der Asphalttragschicht in Abhängigkeit des DTV_{SV} und der in der Deckschicht verwendeten Asphaltvariante (Einbeziehung Steifigkeit)

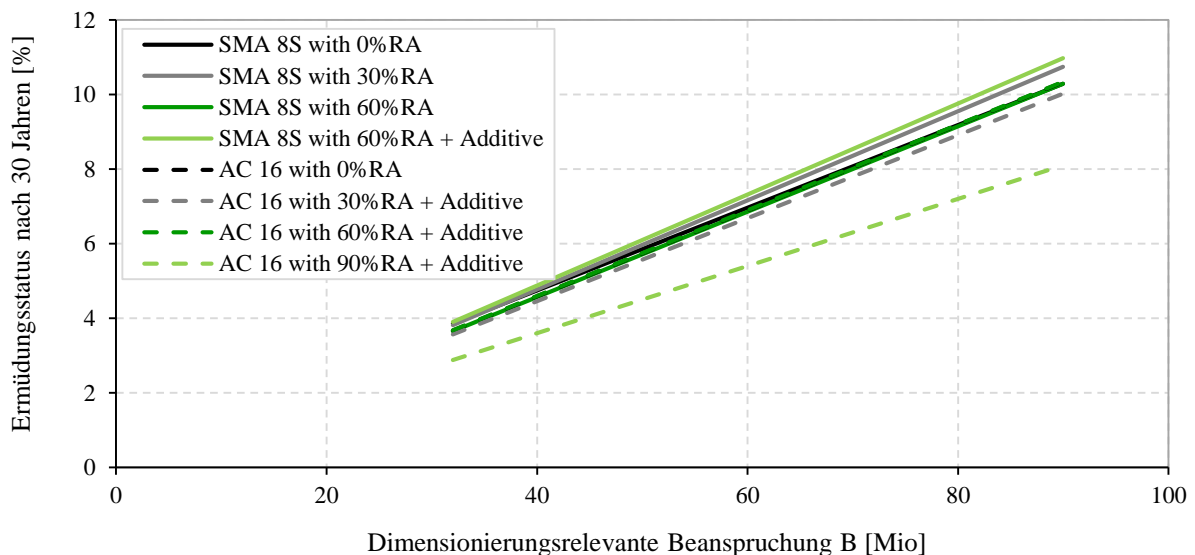


Abbildung 32: Ermüdungsstatus nach 30 Jahren für den Punkt der maximalen Biegezugdehnungen an der Unterseite der Asphalttragschicht in Abhängigkeit der dimensionierungsrelevanten Beanspruchung B (repräsentativ für eine Belastungsklasse BK100) und der in der Deckschicht verwendeten Asphaltvariante (Einbeziehung Steifigkeit)

Die Verwendung aller acht untersuchten Asphaltgemische als Deckschichtmaterial bedingt einen sehr ähnlichen guten Ermüdungsstatus für den für alle Befestigungsvarianten identischen Nachweispunkt in der Lastachse an der Unterseite der Asphalttragschicht. Ein Einsatz des AC-Gemisches mit 90% Recyclinganteil begünstigt theoretisch das Ermüdungsverhalten der Asphalttragschicht noch weiter. Dies lässt sich auf das labortechnisch bestimmte Steifigkeitsverhalten des AC-Gemisches mit 90% Recyclinganteil zurückführen. Völlig unberücksichtigt bleibt hier jedoch das materialspezifische Ermüdungsverhalten der acht untersuchten Deckschichtgemische.

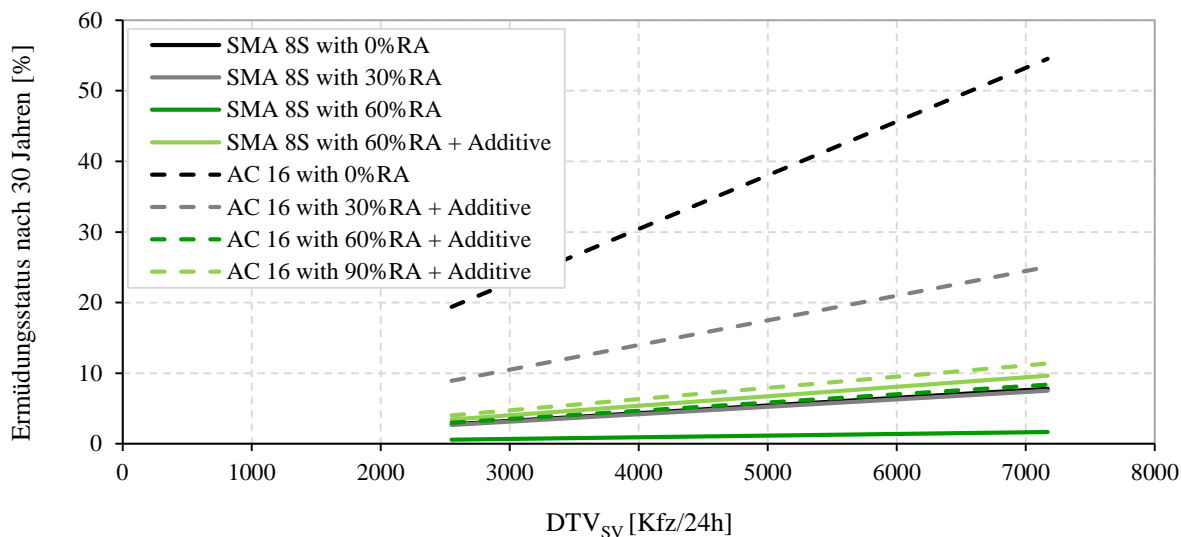


Abbildung 33: Ermüdungsstatus nach 30 Jahren für den Punkt der maximalen Biegezugdehnungen an der Oberseite der Asphaltdeckschicht in Abhängigkeit des DTV_{SV} und der in der Deckschicht verwendeten Asphaltvariante (Einbeziehung Steifigkeit und Ermüdung)

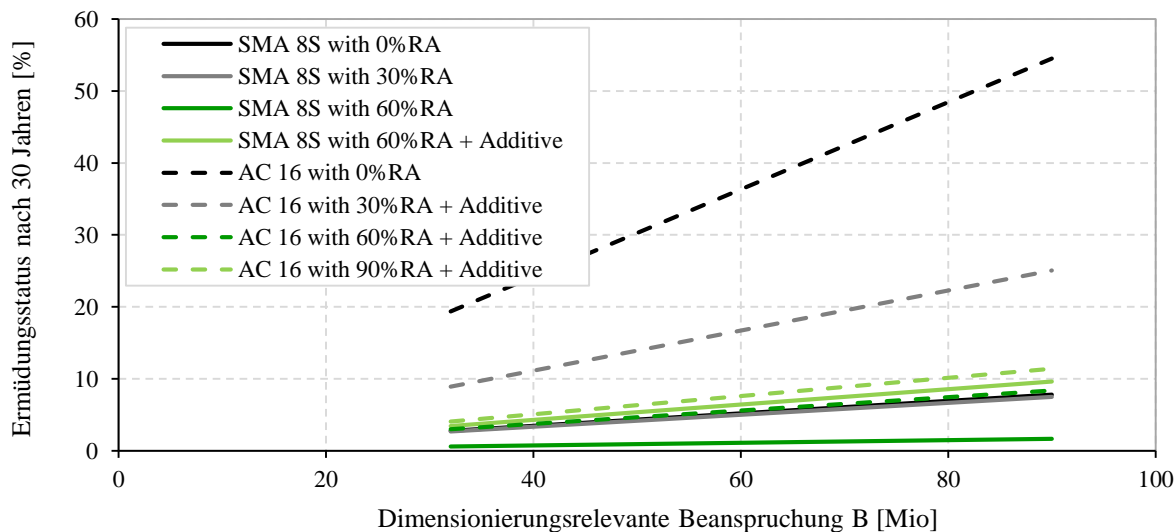


Abbildung 34: Ermüdungsstatus nach 30 Jahren für den Punkt der maximalen Biegezugdehnungen an der Oberseite der Asphaltdeckschicht in Abhängigkeit der dimensionierungsrelevanten Beanspruchung B (repräsentativ für eine Belastungsklasse BK100) und der in der Deckschicht verwendeten Asphaltvariante (Einbeziehung Steifigkeit und Ermüdung)

Um eine weitere Bewertungsmöglichkeit für die acht einbezogenen Asphaltgemische zu schaffen, wurden anschließend Dimensionierungsrechnungen auf Grundlage der maximalen Zugdehnungen an der Oberseite der Asphaltdeckschicht durchgeführt. Bisher wurden hierfür lediglich die radialen und axialen Dehnungen einbezogen. Es gilt zu überlegen, ob an der Oberseite ggf. die Hauptdehnungen maßgebend sind, da sich hier der dimensionierungsrelevante Nachweispunkt nicht in der Lastachse befindet und somit die radiale bzw. die axiale Dehnung nicht der Hauptdehnung entspricht.

Abbildung 33 und Abbildung 34 zeigen den nach den [RDO Asphalt 09] berechneten Ermüdungsstatus nach 30 Jahren für die Punkte der maximalen Zugdehnungen an der Oberseite der Asphaltdeckschicht (hier axiale Zugdehnung) in Abhängigkeit des DTV_{SV} bzw. der dimensionierungsrelevanten Beanspruchung B (repräsentativ für eine Belastungsklasse BK100) und der in der Deckschicht verwendeten Asphaltvarianten.

Im Gegensatz zu den vorangegangenen Dimensionierungsergebnissen zeigt sich hier ein sehr deutlicher Einfluss des verwendeten Deckschichtmaterials. Die Asphaltbetonvarianten, insbesondere jene mit 0% und 30% Recyclinganteil zeigen das schlechteste Ermüdungsverhalten, bis zu fünfmal schlechter als jenes der SMA-Gemische und der AC-Gemische mit größeren Anteilen an Asphaltgranulat. Mit Zunahme des Recyclinganteils verbessert sich das Ermüdungsverhalten deutlich.

Das unter Laborbedingungen im Spaltzug-Schwellversuch bestimmte Ermüdungsverhalten der acht Asphaltgemische hat hier für die Dimensionierung einen deutlich größeren Einfluss als das Steifigkeitsverhalten, im Gegensatz zu den vorangegangenen Berechnungen zur Ermüdungsbeständigkeit der Asphalttragschichten.

Zur gezielten Untersuchung des Einflusses großer Recyclinganteile in Asphaltdeckschichtgemischen sollten neben „klassischen“ Dimensionierungsrechnungen nach den [RDO Asphalt 09] auch Berechnungen gezielt für die Deckschicht durchgeführt werden. In die Überlegungen besonders mit einzubeziehen sind u.a. auch Prognoserechnungen hinsichtlich der Ausfallwahrscheinlichkeit von Asphaltdeckschichten mit Asphaltgranulat. Dies könnte durchaus einen geeigneteren Bewertungsansatz bieten.

6 FAZIT

Im Rahmen des länderübergreifenden Forschungsvorhabens AllBack2Pave wurde die Machbarkeit der vollständigen Wiederverwendung von Ausbauasphalt in neue Asphaltdeckschichten anhand umfangreicher Laboruntersuchungen exemplarisch für 2 Asphaltdeckschichtvarianten, repräsentativ für hochbelastete Straßen in Deutschland und Italien, mit jeweils unterschiedlichen Recyclinganteilen experimentell und theoretisch analysiert.

Es konnte gezeigt werden, dass auch größere Anteile an Recyclingmaterial in Deckschichtgemischen die Qualität der Gemische nicht negativ beeinflussen muss und die für Deckschichten einzuhaltenen Qualitätsanforderungen erreicht werden können.

Voraussetzung hierfür ist eine umfassende bzw. ausreichende Charakterisierung des beizumengenden Recyclingmaterials.

Grundsätzlich sollte auf eine entsprechende Homogenität des Asphaltgranulates geachtet werden. Diese wird insbesondere durch die Instandsetzungshistorie der ursprünglichen Befestigung, der für den Ausbau verwendeten Technik und den Lagerbedingungen des Ausbauasphaltes beeinflusst.

Eine besondere Bedeutung ist außerdem den technischen Möglichkeiten der auszuführenden Mischanlage und der klimatischen Randbedingungen während der Herstellung und des Einbaus beizumessen.

7 DANKSAGUNG

“The research presented in this report was carried out as part of the CEDR Transnational Road research Programme Call 2012. The funding for the research is provided by the national road administrations of Denmark, Finland, Germany, Ireland, Netherlands and Norway.”

8 QUELLEN

[Direkt-MAT, 2011]

Direct-MAT - Dismantling and Recycling Techniques for road Materials, <http://www.direct-mat.eu/>

[Re-Road, 2012]

Re-Road: End of Life Strategies of Asphalt Pavements, <http://re-road.fehrl.org/>

[AL Sp-Asphalt 09]

Arbeitsanleitung zur Bestimmung des Steifigkeits- und Ermüdungsverhaltens von Asphalten mit dem Spaltzug-Schwellversuch als Eingangsgröße in die Dimensionierung, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, FGSV Verlag GmbH, Köln, 2009

[ANAS 2010]

Capitolato speciale d'appalto – Norme Tecniche, Azienda Nazionale Autonoma delle Strade, Nationales Regelwerk Italien, 2010

[EN 12697-24]

Asphalt - Prüfverfahren für Heißasphalt - Teil 24: Beständigkeit gegen Ermüdung; Deutsche Fassung EN 12697-24:2012, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, 2012

[RDO Asphalt 09]

Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung des Oberbaus von Verkehrsflächen mit Asphaltdeckschicht, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, FGSV Verlag GmbH, Köln, 2009

[RStO 12]

Richtlinie für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, FGSV Verlag GmbH, Köln, 2012

[TL Asphalt-StB 07]

Technische Lieferbedingungen für Asphaltmischgut für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen FGSV Verlag GmbH, Köln, 2007

[TP Asphalt-StB 07]

Technische Prüfvorschriften für Asphalt im Straßenbau, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen FGSV Verlag GmbH, Köln, 2007

[BECKEDAHL 1988]

Beckedahl, H.

Möglichkeiten zur Prognose von Spurrinnenentwicklungen, Straße und Autobahn, 39. Jahrgang, Heft 5, S. 173-178, Kirchbaum-Verlag, Bonn, 1988

[BLASL 2008]

Blasl, A.

Einfluss der Probekörpergeometrie auf die Versuchsergebnisse im Einaxialen Zugschwellversuch Diplomarbeit, Technische Universität Dresden, Fakultät Bauingenieurwesen, Institut für Stadtbauwesen und Straßenbau, Dresden, 2008

[DRAGON et al. 2014]

Dragon, I.; Birbaum, J.; Wellner, F.; Zander, U.

Grundlagen für die Beurteilung der dimensionierungsrelevanten Eigenschaften und der Wirtschaftlichkeit von Oberbaubefestigungen aus Asphalt, Schlussbericht des vom BMWI über die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) geförderten Forschungsvorhabens FE 07.0236/2010/AGB, 2014

[OESER2014]

Oeser, M.; Wang, D.; Liu, P.; Wellner, F.; Reinhardt, U.

Verbesserung der Sicherheit und Wirtschaftlichkeit der rechnerischen Dimensionierung von Asphaltbefestigungen über ein Finite Elemente Modell, Schlussbericht des vom BMWI über die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) geförderten Forschungsvorhabens FE 04.0259/2012/NGB, 2014

[ZEISSLER 2015]

Zeißler, A.

Untersuchungen zum spannungsabhängigen Materialverhalten von Asphalt, Dissertation, Technische Universität Dresden, Fakultät Bauingenieurwesen, Institut für Stadtbauwesen und Straßenbau, Dresden, 2015, http://www.qucosa.de/fileadmin/data/qucosa/documents/16797/Diss_Zeissler_2015_02_10.pdf