

**Schlussbericht
zum
FE 07.0250/2011/LRB**

„Einsatz von Rejuvenatoren bei der Wiederverwendung von Asphalt“

Ruhr-Universität Bochum
Fakultät für Bau- und
Umweltingenieurwissenschaften
Lehrstuhl für Verkehrswegebau

Prof. Dr.-Ing. Martin Radenberg
Dr.-Ing. Sabine Boetcher
Dipl.-Ing. Natasha Sedaghat

Technische Universität Braunschweig
Institut für Straßenwesen

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Michael P. Wistuba
Dr.-Ing. Axel Walther
Dr.-Ing. Stephan Büchler

Basalt Actien-Gesellschaft, Linz
Dipl.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Hans Schmidt
Dr.-Ing. Reha Çetinkaya

April 2016

Vorwort

Das Forschungsvorhaben „Einsatz von Rejuvenatoren bei der Wiederverwendung von Asphalt“ (FE 07.0250/2011/LRB) wurde als Kooperationsprojekt der Forschungspartner Ruhr-Universität Bochum, Technische Universität Braunschweig und Basalt Actien-Gesellschaft bearbeitet. Die wissenschaftlich experimentellen Arbeiten wurden bereits mit der Angebotserstellung in zwei in sich geschlossene Arbeitspakete aufgeteilt. Die physikalisch-rheologischen Grundlagen der Bindemittleigenschaften wurden von der Ruhr-Universität Bochum bearbeitet und die performance-basierten asphalttechnologischen Untersuchungen von der Technischen Universität Braunschweig. Die Beschaffung der erforderlichen Untersuchungsmaterialien sowie die material- und bautechnische Planung und Begleitung der projektabschließenden Erprobungsstrecke erfolgte durch die Basalt Actien-Gesellschaft.

Aufgrund der zwei in sich geschlossenen Arbeitspakete ist der hier vorliegende Forschungsbericht in zwei separate Berichtsteile aufgeteilt, die strukturell jeweils unabhängig sind, in ihren wissenschaftlich experimentellen Inhalten aber aufeinander aufbauen. Die material- und bautechnischen Zuarbeiten sind an den entsprechenden Stellen jeweils in die beiden Berichtsteile eingearbeitet worden.

Ich danke den Projektpartnern für die kooperative Zusammenarbeit und der Bundesanstalt für Straßenwesen für die Beauftragung und das damit verbundene Vertrauen in die Forschergruppe.

M. Radenberg (Projektleiter)

**Schlussbericht
zum
FE 07.0250/2011/LRB**

**„Einsatz von Rejuvenatoren bei der
Wiederverwendung von Asphalt“**

Teil 1

Ruhr-Universität Bochum

Fakultät für Bau- und
Umweltingenieurwissenschaften
Lehrstuhl für Verkehrswegebau

Prof. Dr.-Ing. Martin Radenberg

Dr.-Ing. Sabine Boetcher

Dipl.-Ing. Natasha Sedaghat

Inhalt Teil 1 – Ruhr-Universität Bochum

1	Einleitung und Problemstellung	11
2	Zielsetzung	12
3	Stand der Kenntnisse	13
3.1	Struktur des Bitumens	13
3.2	Bitumenalterung	15
3.3	Einsatz von Rejuvenatoren	16
3.3.1	Physikalische und rheologische Wirkungsweise von Rejuvenatoren	16
3.3.2	Chemische Wirkungsweise von Rejuvenatoren	17
3.3.3	Stand der Erfahrungen mit Rejuvenatoren	18
3.4	Chemische Analyseverfahren für Bitumen	19
3.4.1	Elementaranalyse	19
3.4.2	Analyse der Kolloidstruktur durch Abtrennung der Asphaltene	20
3.4.3	Zentrifugenmethode nach Zenke	20
3.4.4	Analyse der Maltene	22
3.4.5	Bestimmung der inneren Stabilität von Bitumen	22
4	Beschreibung der durchgeführten Versuche	24
4.1	Untersuchungsprogramm	24
4.2	Beschaffung der Rejuvenatoren und Asphaltgranulate	25
4.3	Untersuchung der Asphaltgranulate	26
4.3.1	Extraktion	26
4.3.2	Gesteinsuntersuchungen	26
4.3.3	Bindemitteluntersuchungen	26
4.4	Untersuchung der Rejuvenatoren	26
4.4.1	Bestimmung der Zugabemengen	27
4.4.2	Zugabe zu einem frischen Straßenbaubitumen	27
4.5	Zugabe der Rejuvenatoren zu Asphaltgranulat und Untersuchung der Gemische	28
4.6	Dünnschliffe zur Charakterisierung von Doppelumhüllung	29
4.6.1	Dünnschliffherstellung	29
4.6.2	Dünnschliffgerät	30
4.6.3	Auswahl an Klebstoffen	30
4.6.4	Sägen der Asphaltproben	33
4.6.5	Anschleifen der Asphaltproben	33
4.6.6	Kleben der Asphaltproben	34
4.6.7	Sägen der geklebten Asphaltproben	34
4.6.8	Schleifen der geklebten Probe	35
4.6.9	Ansätze zur Verringerung des Verschmierens von Bitumen während des Schleifprozesses	35
4.6.10	Zusammenfassung und Erkenntnisse	36
4.7	Ansätze zur Bestimmung des Alterungsgrades von Bitumen	36

5	Ergebnisse und Auswertung der Wirksamkeitsuntersuchungen in Bitumen	38
5.1	Charakterisierung der Asphaltgranulate	38
5.1.1	Orientierende Untersuchungen der extrahierten Bitumen	38
5.1.2	Auswahl von zehn Asphaltgranulaten	42
5.1.3	Kältespezifischen Eigenschaften der zehn Asphaltgranulate	42
5.1.4	Bestimmung der dynamischen Viskosität der zehn Asphaltgranulate	44
5.1.5	Bestimmung der Kraftduktilität der zehn Asphaltgranulate	45
5.1.6	Chemische Analyse der zehn Asphaltgranulate	45
5.1.7	Rolling-Bottle-Tests an zehn Asphaltgranulaten	46
5.1.8	Auswahl von fünf Asphaltgranulaten	47
5.2	Untersuchung der Rejuvenatoren	47
5.2.1	Differenzierung der Rejuvenatoren	47
5.2.2	Charakterisierung der Rejuvenatoren über Herstellerangaben	48
5.2.3	Erweichungspunkt Ring und Kugel und Nadelpenetration der Gemische aus Rejuvenatoren und Straßenbaubitumen 20/30	49
5.2.4	Auswahl von zehn Rejuvenatoren	53
5.2.5	Prüfung der Dauerhaftigkeit der Gemische	53
5.2.6	Ermittlung der Zugabemengen der Rejuvenatoren zu den rückgewonnenen Bindemitteln der ausgewählten Asphaltgranulate	54
5.2.7	Untersuchung der Gemische aus Rejuvenatoren und AG 4	57
5.2.8	Untersuchung der Gemische aus Rejuvenatoren und AG 7	66
5.2.9	Untersuchung der Gemische aus Rejuvenatoren und AG 9	73
5.2.10	Untersuchung der Gemische aus Rejuvenatoren und AG 18	74
5.2.11	Untersuchung der Gemische aus Rejuvenatoren und AG 20	81
5.2.12	Untersuchung der Gemische aus Rejuvenatoren und AG 21	87
5.3	Zusammenfassende Bewertung der Wirksamkeitsuntersuchungen an Bitumen	91
5.3.1	Bewertung der Wirkungsweise der Rejuvenatoren	91
5.3.2	Toxikologische Bewertung der Rejuvenatoren	91
5.3.3	Ermittlung optimaler Zugabemengen von Rejuvenatoren	93
5.4	Alterungsneigung von Bindemittel-Rejuvenatoren-Gemischen	95
5.5	Mikrostruktureller Nachweis der Wirkung der Rejuvenatoren	99
5.6	Entwicklung eines Laborverfahrens	102
5.6.1	Ansatz zur Durchführung des Laborverfahrens	102
5.6.2	Erprobung der Trübheitsmessungen	103
5.6.3	Erprobung des Photometers	103
5.6.4	Erprobung des Turbidimeters	103
5.6.5	Prüfung der Homogenität der Lösung	105
5.6.6	Variation der Randbedingungen zur Optimierung des Verfahrens	106
5.6.7	Variation des Fällungsmittels	106
5.6.8	Variation der Löse- und Fällungszeit	108
5.6.9	Variation der Temperatur	109

5.6.10	Optimierung der Abtrennung der ausgefällten Bestandteile.....	110
5.6.11	Trübheitsmessung vor der Fällungsmittelzugabe.....	114
5.6.12	Zusammenfassende Anleitung zur Durchführung des vereinfachten Laborverfahrens	115
5.6.13	Validierung des Verfahrens	116
6	Zusammenfassung und Ausblick	118
7	Literatur	120
Anhang A:	Verfahrensbeschreibung zum Nachweis der funktionalen rheologischen Wirksamkeit eines Rejuvenators bei der Wiederverwendung von Asphalt (Eignungsuntersuchung).....	125
Teil 2	Technische Universität Braunschweig.....	129

1 Einleitung und Problemstellung

Seit ungefähr vier Jahrzehnten wird Ausbauasphalt im gebundenen Straßenoberbau wiederverwendet. Dabei wurden die Technologien stetig weiter entwickelt, so dass in den vergangenen 10 Jahren die Wiederverwendungsmenge in etwa konstant bei rund 12 Mio. t Ausbauasphalt lag [DAV e.V., 2014]. Aufgrund seiner Alterung und der damit verbundenen Zunahme der Viskosität kann dabei das im Ausbauasphalt vorhandene Bindemittel nur in einem begrenzten Maße bei der Herstellung eines neuen Asphaltmischgutes eingebracht werden. Darüber hinaus werden die in Zukunft anfallenden Ausbauasphalte zunehmend bereits mit Asphaltgranulat hergestellt worden sein, sodass folglich mit zunehmenden Alterungsgraden der Bindemittel zu rechnen ist. Die Wiederverwendungsmenge lässt sich vermutlich nur noch geringfügig steigern, da die Verwertungsquote bereits ca. 90 % beträgt. Entscheidender ist, die qualitative Einbindung der Ausbauasphalte in die Wiederverwendungskonzepte zu verbessern.

Letztendlich zeigen auch die im Regelwerk formulierten Bedingungen die allgemeinen Grenzen der heute zugelassenen Machbarkeit auf. So heißt es in Kapitel 3.1.1 der [TL Asphalt-StB 07/13]:

„Bei der Zugabe von Asphaltgranulat muss $T_{R\&Bmix}$ innerhalb der Sortenspanne des geforderten Bitumens liegen. Hierzu kann entweder ein Bitumen mit derselben Spezifikation wie das geforderte Bitumen oder ein Bitumen, das höchstens eine Sorte weicher ist als das geforderte Bitumen, verwendet werden. Ein weicherer Straßenbaubitumen als 70/100 darf – mit Ausnahme von Asphalttragdeckschichtmischgut – nicht verwendet werden.“

Die [TL AG-StB 09] ergänzen in Kapitel 4.3.2.1 die Anforderungen bezüglich der Eigenschaften des Bindemittels im Asphaltgranulat wie folgt:

„Als Ergebnis ist der Mittelwert der Einzelwerte des Erweichungspunktes Ring und Kugel anzugeben. Der Mittelwert darf 70 °C nicht überschreiten. Die Einzelwerte für den Erweichungspunkt Ring und Kugel dürfen nicht größer als 77 °C sein. Für Bindemittel mit größerem Mittelwert oder größeren Einzelwerten kann die Eignung durch gesonderten Nachweis im Rahmen der Erstprüfung des unter Einsatz dieses Asphaltgranulates herzustellenden Asphaltmischgutes erbracht werden.“

Durch Zugabe von Rejuvenatoren (Verjüngungsmittel) sollen diese Alterungsprozesse aufgehalten bzw. umgekehrt und das Bitumen im Ausbauasphalt idealerweise wieder in seinen rheologischen Ausgangszustand versetzt werden. Bisher wird ein Großteil der bitumengebundenen Straßenausbaustoffe für Asphalttragschichten verwendet. Eine Verbesserung der Bitumeneigenschaften mittels gezieltem Einsatz von Rejuvenatoren kann zukünftig auch den vermehrten Einsatz des Asphaltgranulats in Binder- und Deckschichten ermöglichen.

2 Zielsetzung

Ziel des Vorhabens ist die Bereitstellung und Erprobung einer Technologie zum gezielten Einsatz von Rejuvenatoren (Verjüngungsmitteln) bei der Wiederverwendung von Asphalt.

Dazu wird eine materialbeschreibende Marktanalyse durchgeführt, mit der die Stoffeigenschaften der angebotenen Rejuvenatoren vergleichend betrachtet werden. Dazu sind die Wirkmechanismen in bitumenhaltigen Bindemitteln mit unterschiedlichem Alterungsgrad zu beschreiben. Neben den Rejuvenatoren sollen auch Produkte wie weiche Straßenbaubitumen und Bitumenadditive, die primär nicht für den Einsatz als Verjüngungsmittel produziert werden, untersucht werden.

Weiterhin sollen die Einsatzmöglichkeiten solcher Rejuvenatoren definiert werden. Neben der Wirksamkeit wird deshalb auch die Dauerhaftigkeit der „Verjüngung“ durch simulierte Alterungsprozesse (Kurz- und Langzeitalterung) ermittelt. Die rheologische Wirksamkeit der Rejuvenatoren und die Empfindlichkeit der verjüngten Bindemittel auf die erneute Alterung werden beschrieben.

Nach eingehender Charakterisierung der Art und Dauer der Wirkung der Rejuvenatoren wird in Abhängigkeit von diesen Ergebnissen eine Auswahl für weitergehende Asphaltuntersuchungen getroffen. Mit drei Produkten soll eine umfassende Untersuchung der Auswirkungen auf die performance-orientierten Asphalteigenschaften erfolgen. Hierzu werden Laboruntersuchungen und im Anschluss daran Erprobungen im Rahmen einer Straßenbaumaßnahme durchgeführt, wissenschaftlich begleitet und dokumentiert.

Neben der Untersuchung von Rejuvenatoren soll, resultierend aus allen physikalischen und chemischen Bindemitteluntersuchungen, ein praxisgerechtes Laborverfahren zur Bestimmung des Alterungsgrades von Bitumen erarbeitet werden. Damit soll ein Instrument für die regelmäßige Qualitätsüberwachung von Asphaltgranulaten bzw. bei der Asphaltproduktion geschaffen werden, das keine chemischen Analysen erfordert.

3 Stand der Kenntnisse

3.1 Struktur des Bitumens

Bitumen besteht zu mindestens 90 % aus Kohlenwasserstoffverbindungen. Die genaue Konzentration ist abhängig von der Provenienz des verarbeiteten Erdöls. Der restliche Anteil sind Heteroatome wie Stickstoff, Schwefel und Sauerstoff, sowie diverse Metalle, anhand derer die Provenienz eines Rohöls bestimmt werden kann [READ, J. & WHITE-OAK, D, 2003]. Hierbei können die unterschiedlichen ketten- und ringförmigen Kohlenwasserstoffverbindungen basierend auf ihrer Polarität in Substanzgruppen unterteilt werden, was in Tab. 3-1 dargestellt ist.

Bitumen kann in die Gruppen der Asphaltene, Erdölharze, und Öle unterteilt werden, die vereinfacht einer asphaltenen und einer maltene Phase zugeordnet werden können. Wie [NEUMANN und RAHIMIAN 1973] zusammenfassend darstellten, besitzt Bitumen demnach eine Kolloidstruktur. Es existieren diverse Theorien zum Aufbau dieser kolloidalen Bitumenstruktur [NELLENSTEYN, 1923], [DICKIE, YEN, 1967], [REDELIUS, SOE-NEN, 2005], von denen zwei die nach heutigem Stand des Wissens gängigsten und ausführlichsten Erklärungen liefern.

[NELLENSTEYN, 1923] beschreibt die Struktur von Bitumen als Kolloidsystem mit kolloid-dispersen Anteilen aus hochmolekularen (Asphaltene) und niedermolekularen (Erdölharze) Kohlenwasserstoffen. Hierbei bilden die Erdölharze eine Art "Schutzkolloid" um die Asphaltene. Diese Mizellen "schwimmen" in der öligen, maltene Phase aus Erdölharzen und Ölen (siehe hierzu Bild 3-1).

Tab. 3-1: In Bitumen vorhandene Substanzgruppen [HIRSCH, 2005]

Substanzgruppe	Beschreibung	Polarität
Aliphate	Kohlenwasserstoffe, z. B. n-Alkane, Iso- und Cycloalkane	unpolar
Aromaten	Alkylsubstituierte Aromaten einkernig zweikernig mehrkernig	schwach
Polare Verbindungen	Vorwiegend aroma- tische Verbindungen, mit Heteroatomen wie z.B.: Sauerstoff Schwefel Stickstoff	stark
Asphaltene	Meist höhermolekulare Verbindungen	stark

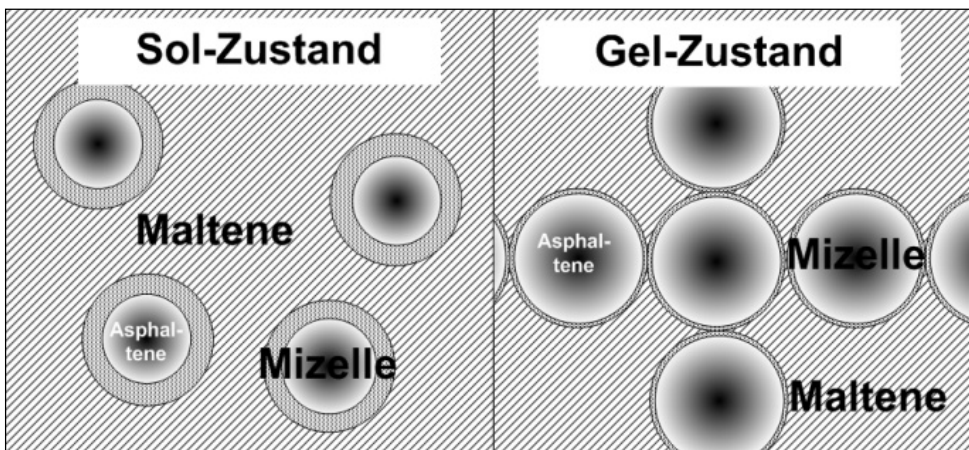


Bild 3-1: Temperaturabhängige Zustandsänderung von Bitumen [NÖSLER, 2000]

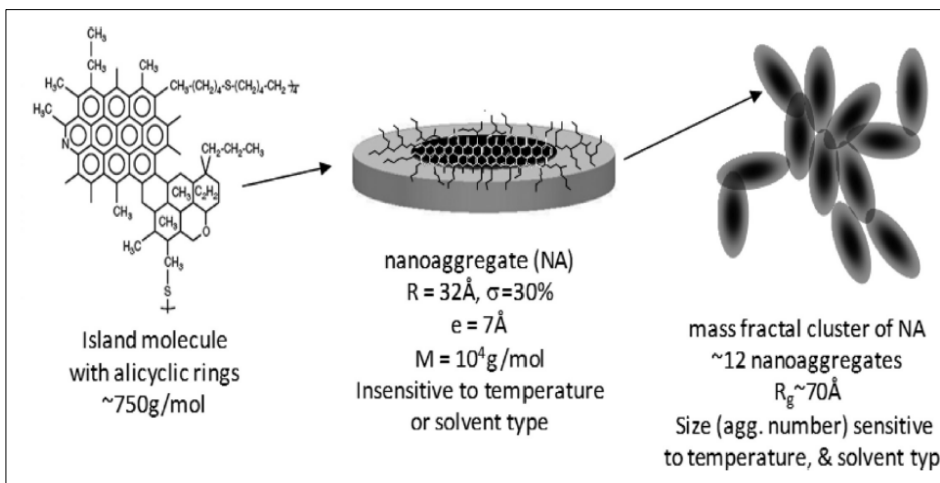


Bild 3-2: Yen-Mullins-Modell [MULLINS et al., 2012]

Die Viskosität von Bitumen ist abhängig von seiner Mizellen-Konzentration. Diese ist stark temperaturabhängig. Mit zunehmender Temperatur verkleinern sich die Mizellen und die Maltene werden größer (Sol-Zustand), was mit einer Viskositätssenkung einhergeht [NÖSLER, 2000]. Bitumen bewegt sich somit zwischen folgenden drei Zuständen: Sol (Asphaltengehalt bei $< 20\%$), Sol-Gel (Asphaltengehalt bei $20\% - 40\%$), Gel (Asphaltengehalt bei $> 40\%$) [NEUMANN, 1995]. Veranschaulicht werden Sol- und Gelzustand in Bild 3-1. Der Übergang zwischen den Zuständen ist fließend.

Das zweite Modell zur chemischen Struktur von Bitumen stellt das bis heute stetig weiterentwickelte Yen-Modell bzw. Yen-Mullins-Modell basierend auf [DICKIE, YEN, 1967] dar. Hierbei wird nicht von einem Mizell-Modell mit einzelnen umhüllten Asphaltene ausgegangen. Laut Yen-Modell verbinden sich bis zu zehn Asphaltene zu scheibenförmigen Nanoaggregaten, die wiederum Verbindungen in Form von sogenannten Clustern eingehen können. Die Harze werden in diesem Modell als frei in der maltene Phase verteilt beschrieben [MULLINS, 2010]. Das Yen-Mullins-Modell ist in Bild 3-2 skizziert.

Unabhängig vom Strukturmodell für Bitumen wird vermutet, dass die Asphaltene maßgebend für die Viskosität eines Bitumens sind. Nach [ZENKE, 1991] ist die abnehmende Bewegungsfreiheit der Asphaltene im Kolloidsystem der Grund für die Viskositätszunahme und die Zunahme des elastischen Verformungsanteils von Bitumen.

3.2 Bitumenalterung

Der Begriff der „Alterung“ umschreibt eine Veränderung der physikalischen und chemischen Eigenschaften eines Stoffes [Radenberg et al., 2013]. Im Falle des Bitumens wird nach Mizell-Modell damit der zunehmende Übergang in den Gel-Zustand bezeichnet. Grundsätzlich bedeutet die Alterung von Bitumen die Vergrößerung der kolloidal dispergierten Teilchen [NEUMANN, 1992]. Dies geschieht zeitabhängig in drei verschiedenen Prozessen:

- oxidative Alterung
- destillative Alterung
- Strukturalterung [NEUMANN, 1992]

Oxidative Alterung

Bei der oxidativen Alterung reagieren die Kohlenwasserstoffverbindungen des Bitumens mit Luftsauerstoff. Diese Form der Alterung findet somit an Kontaktflächen zur Luft, die außerdem UV-Strahlung ausgesetzt sind, statt. Hierbei entstehen Hydroperoxide, welche wiederum mit Radikalmechanismen in Kettenreaktionen zu Zwischenprodukten wie Ketonen, Alkoholen, Phenolen, Aldehyden und Carbonsäuren weiterreagieren [NEUMANN, 1987]. Am Ende dieser Reaktionskette steht die Bildung von Asphaltene [NEUMANN, 1995].

Die irreversible Oxidation beginnt langsam und wird mit ansteigender Konzentration an gebildeten Radikalen immer schneller [NEUMANN, 1995].

Destillative Alterung

Die destillative Bitumenalterung (Verdunstungsalterung) resultiert weitgehend aus dem Übergang leicht siedender Bitumenkomponenten an der Grenzfläche zu Luft und Gestein in die Gasphase [RICHTER, 1989]. Hierdurch wird eine Viskositätserhöhung bewirkt. Zunächst verdunsten dabei Komponenten mit einer niedrigen Molekülmasse. Dies sind Dispersionsmittel, also leicht flüchtige Maltene, die einen niedrigeren Siedepunkt haben als Asphaltene.

Strukturalterung

Die dispergierten Teilchen im Bitumen koagulieren zu größeren Aggregaten, was mit der Vergrößerung der kolloidal dispergierten Phase einhergeht. Dieser Veränderung der kolloidalen Strukturen wird als Strukturalterung oder auch Sol-Gel-Übergang bezeichnet. Die hierbei auftretenden Wechselwirkungen zwischen den Kolloidmizellen sind stärker, je größer der Asphaltanteil im Bitumen ist [NEUMANN, 1992]. [SCHLAME, 2002] erklärt die Strukturalterung mit dem Bestreben des Bitumens, ein thermisches Gleichgewicht zu erlangen, für das sich zunächst ein Zwei- oder Mehrphasensystem einstellen muss. Zusammenfassend kann die Alterung von Bitumen als ein Prozess umschrieben werden, in dem sich der Anteil der Asphaltene erhöht und der Anteil der Maltene verringert wird. Das Verhältnis von Asphaltene zu Maltenen, das die Viskosität und das viskoelastische Verformungsverhalten des Bitumens definiert, verschiebt sich somit zu Gunsten der Asphaltene. Die Alterung verursacht folglich eine Viskositätssteigerung und eine Zunahme des elastischen Verformungsanteils im Bitumen.

3.3 Einsatz von Rejuvenatoren

Der Begriff Rejuvenation entstammt dem Englischen und bedeutet Verjüngung. Rejuvenatoren sind somit Additive, die das im Asphaltgranulat enthaltene Bitumen, welches über seine Liegedauer Alterungs- und somit Erhärtungsprozessen unterliegt, möglichst wieder in den Ursprungszustand zurückführen soll [SHEN et al, 2007]. Physikalisch wird ein Rejuvenator als ein Stoff definiert, der die Viskosität eines verhärteten Bitumens verringert, indem es den Erweichungspunkt Ring und Kugel senkt. Die ersten Erfahrungen mit solchen Additiven wurden in den 1950er Jahren in den USA gemacht, damals in Form einer Oberflächenbehandlung bzw. Versiegelung für Asphaltdecken [BROWNRIDGE, 2010]. In Deutschland spielen Rejuvenatoren erst seit einigen Jahren eine signifikante Rolle. Inzwischen existieren zahlreiche Produkte mit der Bezeichnung Rejuvenator auf dem nationalen und internationalen Markt. Die meisten davon sind für die Zugabe zu Asphaltgranulat im Zuge der Wiederverwendung gedacht. Bei Rejuvenatoren wird unterschieden zwischen Versiegelungen, die (in situ) auf fertige Deckschichten aufgebracht werden, und Additiven, die bei der Mischgutherstellung mit Asphaltgranulatzugabe (in plant) beigegeben werden.

Die Versiegelungen dienen der Prävention von Schadensbildung in der Deckschicht, die aus alterungsbedingter Versprödung des Bitumens hervorgeht. Das Produkt wird hierfür einige Jahre nach Einbau auf die Deckschicht aufgebracht und soll das Bitumen soweit erweichen, dass eine Versprödung zurückgeführt wird. Der Prozess der Rejuvenation soll mehrfach durchgeführt werden können, empfohlen wird ein Zyklus von drei bis fünf Jahren [BOYER, 2000].

Die Zugabe von Rejuvenatoren in Form von Additiven zu Asphaltgranulat dient dem Zweck der Reaktivierung des im Asphaltgranulat enthaltenen Bindemittels. Hierdurch sollen höhere Zugabemengen von Asphaltgranulat zu Asphaltmischgut ermöglicht werden. Die Zugabe erfolgt entweder zum gesamten Mischgut oder, unter Verwendung einer Paralleltrommel, direkt zum Asphaltgranulat, wie von [SHEN et. al, 2006] beschrieben.

3.3.1 Physikalische und rheologische Wirkungsweise von Rejuvenatoren

Maßgebende Ursache für die Ausbildung von Schadensmerkmalen an Asphaltdecken ist die zunehmende Versprödung des Bitumens über seine Nutzungsdauer, die durch Alterungsprozesse im Bitumen bedingt ist (siehe dazu Kap. 3.2). Dies äußert sich über den Anstieg der Viskosität und die Zunahme der elastischen Anteile und kann sowohl über konventionelle Prüfmethode, als auch mit Hilfe von rheologischen Prüfungen festgestellt werden. Durch die Zugabe von Rejuvenatoren sollen diese Bitumeneigenschaften beeinflusst werden, indem eine Reduktion des Erweichungspunktes Ring und Kugel bzw. eine Zunahme der Nadelpenetration sowie rheologisch die Senkung der Viskosität und die verhältnismäßige Erhöhung der viskosen Verformungsanteile bewirkt wird [BOYER, 2000]. In Bild 3-3 ist beispielhaft das physikalische Verhalten von Bitumen unter Rejuvenatorzugabe dargestellt. Bild 3-4 zeigt die rheologische Wirkungsweise eines Rejuvenators an einem Straßenbaubitumen 50/70.

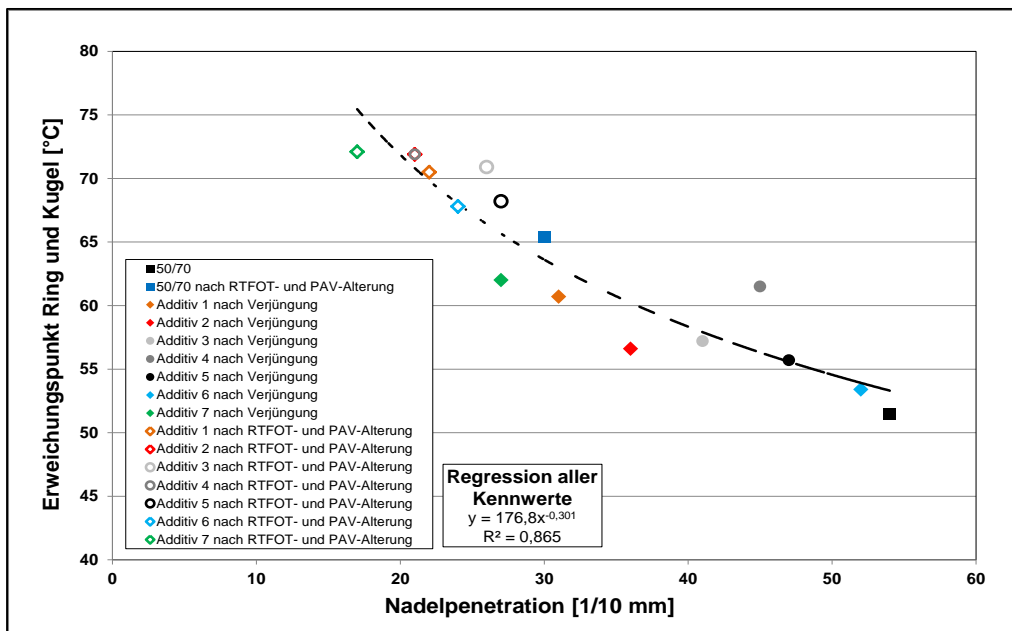


Bild 3-3: Beispielhafte Darstellung des physikalischen Verhaltens von Bitumen unter Rejuvenatorzugabe [BAG; 2011]

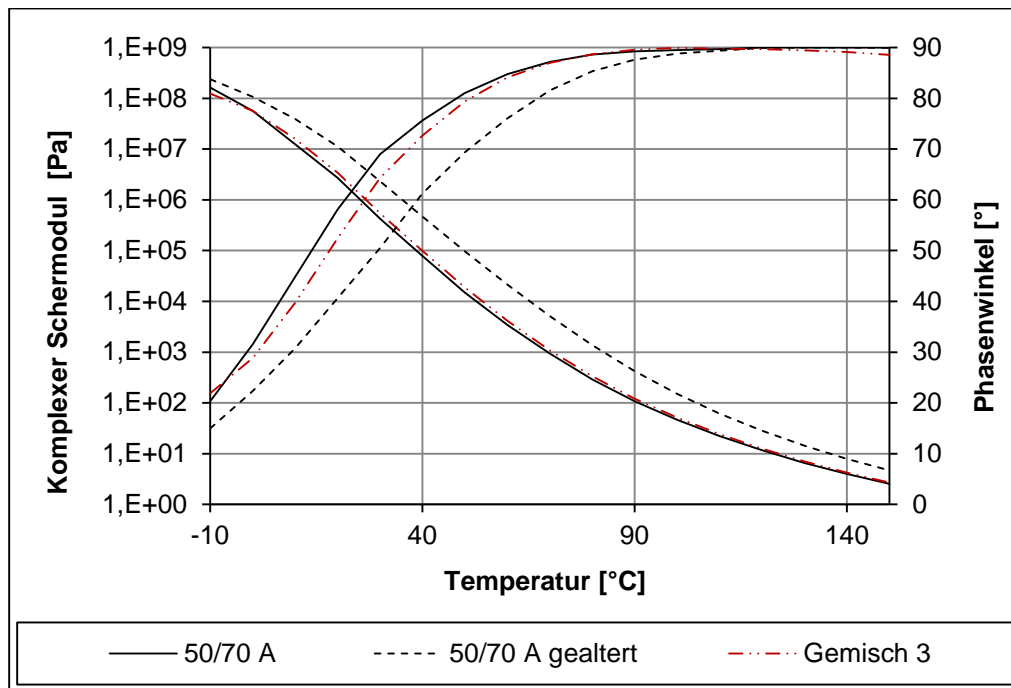


Bild 3-4: Beispielhafte Darstellung der rheologischen Wirkungsweise von Rejuvenatoren [RUB, 2014]

3.3.2 Chemische Wirkungsweise von Rejuvenatoren

[BROWNRIDGE, 2010] beschreibt Rejuvenatoren als kationische Öle, die überwiegend aus Kohlenwasserstoffverbindungen bestehen und wahlweise die Aromaten, Aliphaten oder Harze der maltene Phase ergänzen. Je nach Zugabemenge kann ein definierter Zustand des Bitumens hergestellt werden. Rejuvenatoren sind in seinem Sinne somit Additive, die die durch Alterung geringer werdende maltene Phase im Bitumen ergänzen sollen, um ein Verhältnis zwischen Asphaltene und Maltenen herzustellen (Erhöhung des Dispersionsvolumens), das einem weicheren Bitumen gleichkommt. Dies soll geschehen indem der Rejuvenator sich vollständig mit dem Bitumen vermischt, ohne die

Adhäsionskraft und die Stabilität dessen zu beeinflussen. Bild 3-5 veranschaulicht die ergänzende Wirkungsweise dieser Rejuvenatoren. Die Additivierung von Bitumen geht damit einher, dass Rejuvenatoren zur Gewährleistung einer dauerhaften Wirkung bitumenähnliche Eigenschaften aufweisen müssen. Da das mit Rejuvenatoren aufbereitete Bitumen erneut Alterungsprozessen ausgesetzt wird, ist es wichtig, dass der Rejuvenator unter diesen Bedingungen bitumenähnliches Verhalten aufweist, damit das additivierte Bitumen nach Alterung keine für Bitumen untypischen Eigenschaften besitzt, die dieses dann unbrauchbar machen.

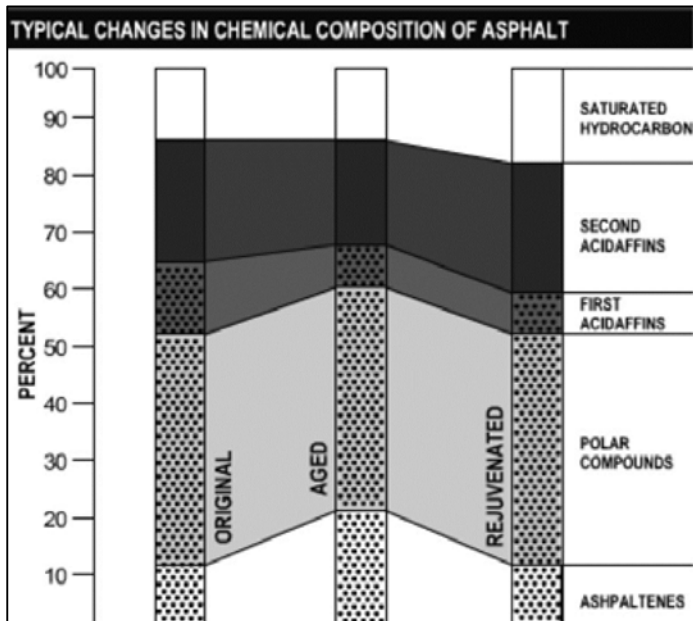


Bild 3-5: Wirkungsweise von Rejuvenatoren durch Ergänzung der Maltene [BROWNRIDGE, 2010]

In den letzten Jahren wurden Rejuvenatoren entwickelt, deren Wirkungsweise sich von den ergänzenden Additiven unterscheiden soll. Diese Produkte sind ausschließlich für die Zugabe zu Asphaltgranulat geeignet. Der Rejuvenator geht hierbei eine chemische Reaktion mit den Elementen im Bitumen dahingehend ein, dass die durch Oxidation aus den Maltene entstandenene Zwischenprodukte eine rückläufige Reaktion (Reduktion) erfahren und bestenfalls wieder in ihre ursprünglichen Bestandteile zerlegt werden [LOPEZ et al., 2011]. Wie genau diese Reaktion chemisch gesehen erfolgen soll, ist weitgehend unbekannt.

3.3.3 Stand der Erfahrungen mit Rejuvenatoren

Die ersten Wirksamkeitsuntersuchungen zu Rejuvenatoren wurden in den 1970er Jahren durchgeführt. [ROSTLER und WHITE, 1970] untersuchten die Wirksamkeit eines versiegelnden Rejuvenators im Labormaßstab und stellten fest, dass durch Aufbringen eines Rejuvenators die Bindemittelviskosität gesenkt und der Kornverlust in Abriebversuchen reduziert wird. Diese Erkenntnisse wurden durch praxisorientierte Forschungsprojekte in den nachfolgenden Jahren ergänzt [VALUE ENGINEERING, 1973], [AFCEC-76-3, 1976]. [CHIU und LEE, 2006] bestätigten die gewonnenen Erkenntnisse zur Wirksamkeit eines weiteren versiegelnden Rejuvenators.

Bis heute wurden zahlreiche Untersuchungen zu Rejuvenatoren und ihren Eigenschaften an einzelnen Produkten durchgeführt. [SHEN et al.] untersuchten 2006 und 2007 die Auswirkungen einzelner Rejuvenatoren auf die Asphaltperformance durch Zugabe dieser zu

Asphaltgranulat und stellten fest, dass Rejuvenatoren auch Verbesserungen der performance-orientierten Eigenschaften von Asphaltgranulat bewirken.

Das Niedrigtemperaturverhalten von verjüngtem Asphaltgranulat wurde von [ZAUMANIS et al, 2013] für neun verschiedene Rejuvenatoren untersucht, von denen sieben positive Effekte auf das Asphaltgranulat ausübten. Diese sieben Rejuvenatoren waren Öle, die überwiegend als Restprodukte anfielen.

[MOGAWER et al., 2013] zeigten, dass durch die Verwendung von Rejuvenatoren auch rezyklierte Dachbahnen in höheren Zugabemengen wiederverwendet werden können.

Durch spektroskopische Untersuchungen zeigten [KARLSSON und ISACSSON, 2002], dass die Alterung eines Bitumen-Rejuvenator-Gemisches keinen Einfluss auf die Homogenität dieses Gemisches ausübt.

[GARCÍA et al., 2010] erforschten die Zugabe von in Kapseln eingeschlossenen Rejuvenatoren zu frischem Mischgut. Der Grundgedanke war, dass die Kapseln ab einer bestimmten Zug- oder Drucklast zerbrechen und der Rejuvenator sich von Innen im Bitumen verteilt. Die Methode erwies sich in Ansätzen als sinnvoll, muss aber noch näher untersucht werden, um u. a. die Parameter Kapselhüllendicke, optimale Viskosität des Rejuvenators und Einfluss der Kapseln auf die Steifigkeit des Asphaltpaketes zu definieren.

[JIMÉNEZ DEL BARCO CARRION et al., 2015] konnten zeigen, dass bei der Auswahl geeigneter Rejuvenatoren die Zugabemenge von Asphaltgranulat deutlich gesteigert werden kann, wobei der realisierbare Anteil an Asphaltgranulat stark von den ursprünglichen Eigenschaften des Bitumens im Asphaltgranulat abhängig ist.

Die unterschiedlichen chemophysikalischen Mechanismen und Wirksamkeiten von zwei Rejuvenatoren konnten mit Hilfe eines Rastermikroskops und rheologischen und physikalischen Untersuchungen von [NAHAR et al., 2014] nachgewiesen werden.

Alle genannten Untersuchungsreihen wurden mit ausgewählten Rejuvenatoren durchgeführt. Eine übergreifende Beurteilung aller chemischen und physikalischen Auswirkungen von Rejuvenatoren in Asphaltgranulat, die produktunabhängig allgemeingültige Aussagen zulässt, wurde bisher nicht durchgeführt.

3.4 Chemische Analyseverfahren für Bitumen

Es existieren diverse Ansätze zur chemischen Analyse von Bitumen. Hierbei liegt der Fokus meist auf verschiedenen Bestandteilen des Bitumens. Differenziert wird zwischen Methoden mit denen die chemischen Elemente im Bitumen quantifiziert werden und Methoden zur Analyse der Kolloidstruktur.

3.4.1 Elementaranalyse

Bei der Elementaranalyse werden die Bestandteile Kohlenstoff, Wasserstoff, Schwefel, Stickstoff und Sauerstoff des Bitumens quantifiziert. Dies geschieht mittels katalytischer Verbrennung mit reinem Sauerstoff, oder aber durch die Gaschromatographie mit Massenspektroskopie. Auch die Abgeschwächte Totalreflexion Infrarotspektroskopie (ATR-FTIR) dient der Elementaranalyse von Bitumen. Darüber hinaus wird diese Methode auch zur gezielten Bestimmung von Wachsadditiven verwendet [THIMM, 2009]. Für die Quantifizierung der metallischen Elemente, die im Bitumen nur in geringen Mengen vorliegen, eignet sich die Röntgenfluoreszenzmikroskopie (XRF).

3.4.2 Analyse der Kolloidstruktur durch Abtrennung der Asphaltene

Die chemische Analyse des Kolloidsystems von Bitumen erfolgt meist durch die Bestimmung des Asphaltengehaltes. Dies geschieht über die Löslichkeit des Bitumens in n-Heptan. Asphaltene sind definiert als die in n-Heptan unlöslichen, aber in Toluol löslichen Bestandteile des Bitumens. Nach [DIN 51595] werden über die Mischung von Bitumen mit n-Heptan Asphaltene ausgefällt, die durch ein Filter abgetrennt und nach Trocknung gewichtsmäßig erfasst werden. Neben n-Heptan sind auch Lösemittel wie n-Pentan oder Isooctan gebräuchlich. Die Ausfällungsraten differieren allerdings je Lösemittel, sodass je nach verwendetem Lösemittel ein entsprechender Index beim Asphaltengehalt zu berücksichtigen ist.

3.4.3 Zentrifugemethode nach Zenke

[ZENKE, 1989] differenzierte in seiner Dissertation Asphaltene nach dem Löslichkeitsgrad in leicht-, mittel-, und schwerlöslich. Hierbei gilt, dass oxidative Alterungsprozesse sowie die Strukturalterung eine Entwicklung der Asphaltene hin zu den schwerlöslichen bewirken. Die schwerlöslichen Asphaltene stellen somit das fortgeschrittenste Stadium der Asphaltbildung während der Bitumenalterung dar. Die Löslichkeitsgrade, nach denen hier unterschieden wird, werden über verschiedene Konzentrationsverhältnisse der Lösemittel Isooctan und Cyclohexan erreicht.

Die Ermittlung des Lösemittelverhältnisses erfolgt basierend auf dem Hildebrand'schen Parameter δ_0 der Lösemittel. Dieser Parameter ist ein Materialwert, der zur Prognose von Mischbarkeiten dient und einen Ausdruck für die Kohäsionsenergiedichte e , definiert als dessen Quadratwurzel, darstellt. [BURKE, 1984]

Die resultierenden Löslichkeitsparameter verschiedener Cyclohexan-Isooctan-Mischungen sind in Tab. 3-2 dargestellt. Bei der Methode der Bestimmung des Asphaltengehaltes nach [ZENKE, 1989] werden je nach Bitumenart 2 bis 4 g Bitumen zunächst in Cyclohexan gelöst. Die Lösung wird bis zum Siedepunkt erwärmt und 15 Minuten bei dieser Temperatur gehalten. Nach Abkühlen wird dem Gemisch Isooctan als Fällfänger zugesetzt und die Lösung ebenfalls auf den Siedepunkt erwärmt. Die Zugabemenge beträgt hier insgesamt 100 ml, wobei das Verhältnis von Cyclohexan zu Isooctan abhängig von den auszufällenden Asphaltene variiert.

Die optimalen Zugabeanteile für die Ausfällung von leicht-, mittel-, und schwerlöslichen Asphaltene sind in Bild 3-6 dargestellt. Leichtlösliche Asphaltene lassen sich demnach durch reine Mischung des Bitumens mit Isooctan ausfällen, mittellösliche Asphaltene hingegen bei einem Mischungsverhältnis von 80 M.-% Cyclohexan zu 20 M.-% Isooctan.

Die Fällung von schwerlöslichen Asphaltene erfolgt bei einem Zugabeverhältnis von 1: 1 der beiden Lösemittel.

Nachdem das Bitumen gelöst und ausgefällt ist, werden die Gläser, die die Lösungen beinhalten, über Nacht ohne Lichtzutritt gelagert. In dieser Zeit kann der Ausfällungsprozess stattfinden und die ausgefällten Partikel setzen sich auf dem Glasboden ab. Zusätzlich werden die Lösungen danach für 60 min zentrifugiert, sodass die ausgefällten Anteile abgetrennt werden. Die Lösung wird anschließend dekantiert und die Fällungsausbeute gewogen.

Der Prozess des Lösens, Fällens und Zentrifugierens kann bis zu dreimal für eine Lösung wiederholt werden, um möglichst exakte Asphaltengehalte feststellen zu können.

Tab. 3-2: Effektive Löslichkeitsparameter von Mischungen aus Isooctan und Cyclohexan [ZENKE, 1989]

Vol.-%	Gew.-% (M.-%)	Mol.-%	$\delta_{0 \text{ eff.}}$
i C ₈ : c-C ₆	i C ₈ : c-C ₆	i C ₈ : c-C ₆	$\sqrt{MJ/m^2}$
100 : 0	100,0 : 0	100,0 : 0	14,02
95 : 5	94,41 : 5,60	92,56 : 7,44	14,23
90 : 10	88,89 : 11,11	85,5 : 14,5	14,42
80 : 20	78,05 : 21,95	72,35 : 27,65	14,78
70 : 30	67,47 : 32,53	60,43 : 39,57	15,11
60 : 40	57,14 : 42,86	49,55 : 50,45	15,42
50 : 50	47,06 : 52,94	39,58 : 60,42	15,69
40 : 60	37,21 : 62,79	30,41 : 69,59	15,94
30 : 70	27,59 : 72,41	21,89 : 78,11	16,18
20 : 80	18,18 : 81,82	14,06 : 85,94	16,39
10 : 90	8,99 : 91,01	6,81 : 93,19	16,59
5 : 95	4,47 : 95,53	3,32 : 96,68	16,69
0 : 100	0 : 100,0	0 : 100,0	16,78

Anhand dieser Methode können genaue Aussagen zu anteiligen, aber auch absoluten Anteilen an leicht-, mittel-, und schwerlöslichen Asphaltenen in einem Bitumen getroffen werden. Allerdings ist diese Methode mit einem hohen Zeitaufwand, sehr exaktem Arbeiten und einer speziellen Laborausstattung mit u. a. einer feuerfesten Zentrifuge verbunden.

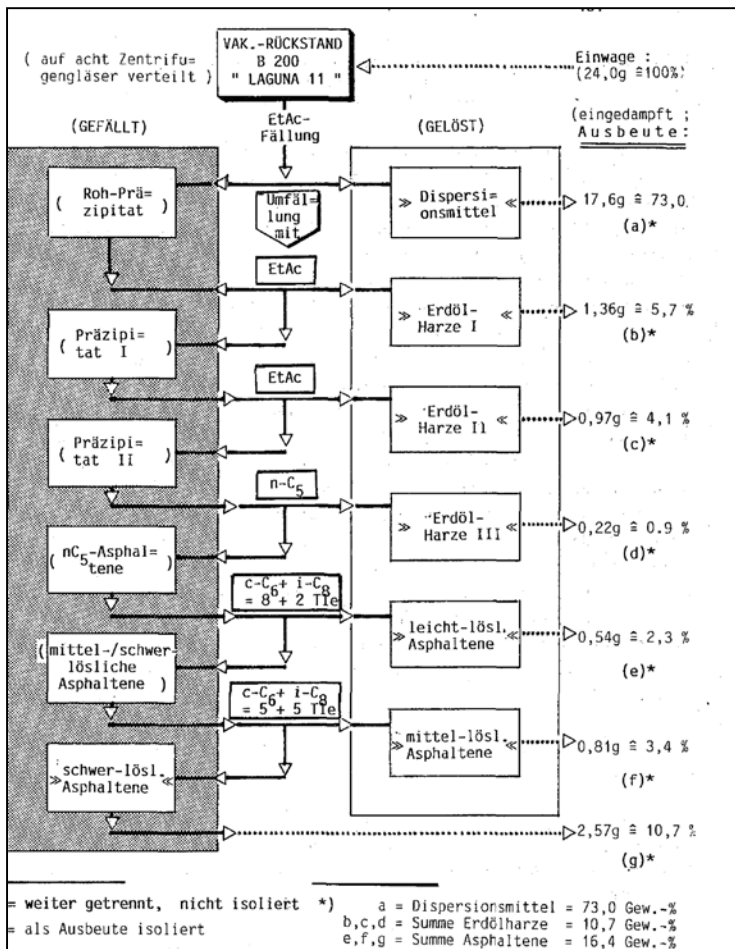


Bild 3-6: Darstellung der Trennung eines Präzipitats mittels Zentrifugenfällung [ZENKE, 1989]

3.4.4 Analyse der Maltene

Die Analyse der Bestandteile des Bitumens, die der maltene Phase zugeordnet werden, geschieht meist über chromatographische Analysen, wie u.a. die Hochleistungsflüssigkeitschromatographie (HPLC) und die Dünnschichtchromatographie (TLC-FID). Am häufigsten findet die sogenannte SARA-Analyse Anwendung. Mit dieser Methode wird das Bitumen in Abhängigkeit von den Parametern Löslichkeit und Polarität in vier Bestandteile aufgetrennt:

- Aliphate (Saturates)
- Aromaten (Aromatics)
- Polare Verbindungen/ Harze (Resins)
- Asphaltene (Asphaltenes)

Zunächst erfolgt die Abtrennung der Asphaltene mit einem geeigneten Lösemittel. Anschließend wird die maltene Phase mittels Flüssigkeitschromatographie analysiert. Eine Prinzipskizze der in der US-amerikanischen [ASTM D 4124] standardisierten Untersuchungsmethode ist in Bild 3-7 dargestellt. [SEBOR et al., 1999] ergänzten das Verfahren durch eine zusätzliche Aufteilung der Aromaten in Mono-, Di- und Polyaromaten.

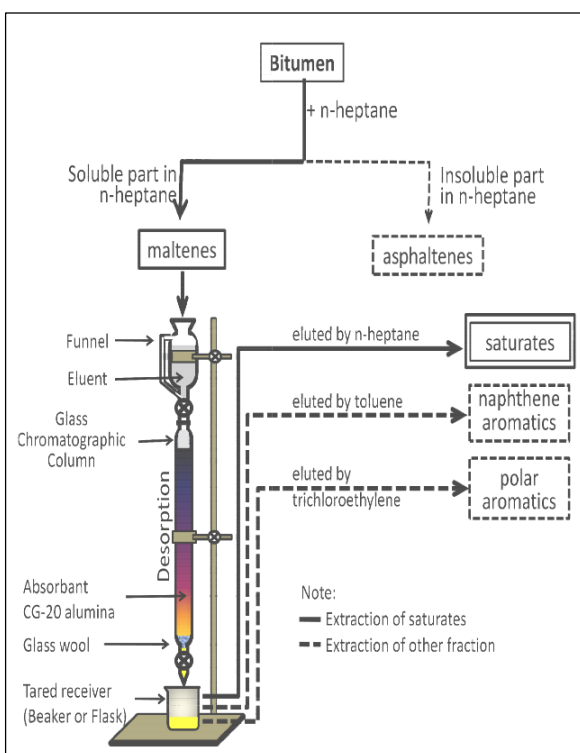


Bild 3-7: Auftrennung von Bitumen in seine Komponenten mittels SARA-Analyse [HERMADI et al., 2012]

3.4.5 Bestimmung der inneren Stabilität von Bitumen

Eine weitere Methode zur Analyse der chemischen Zusammensetzung eines Bitumens ist die Bestimmung der Xylolzahl. Hierbei werden keine absoluten Anteile an Asphaltene oder Maltene quantifiziert, sondern die innere Stabilität eines Bitumens durch Darstellung des qualitativen Verhältnisses zwischen der asphaltene und der maltene Phase bewertet (Dispersionsmittelreserve).

Xylole sind Lösungsmittel, die entweder aus Steinkohlenteer oder Erdöl (durch Cracken) gewonnen werden. Sie dienen in der Industrie zum Lösen von Lacken, Kleb- und Kunststoffen. Außerdem werden sie Kraftstoffen zur Erhöhung der Oktanzahl beigemischt.

Als Fällfänger wird in diesem Verfahren n-Heptan verwendet.

Zur Bestimmung der Xylolzahl werden 2 g Bitumen mit 18 g einer Xylol-Heptan-Mischung übergossen und bei Raumtemperatur bis zur vollständigen Auflösung des Bitumens geschwenkt. Hierfür wird zunächst eine Mischung aus 40 M.-% Xylol und 60 M.-% Heptan verwendet. Unmittelbar nach Auflösung des Bitumens werden ca. 3 Tropfen der Lösung auf ein Filterpapier gegeben. Je nach Verhältnis des Asphaltens zum Maltengehalt eines Bitumens bilden sich unterschiedliche Arten eines Fleckes auf diesem Filterpapier. Je höher der Gehalt an Asphaltenen ist, umso deutlicher zeichnet sich ein Kontrast zwischen einer dunklen Mitte des Fleckes und einem deutlich helleren Rand ab. Durch Variation des Xylol-Heptan-Verhältnisses ändert sich die Farbgebung des Fleckes. Ziel dieser Untersuchung ist es, das Xylol-Heptan-Verhältnis zu finden, bei dem der Kern und der Rand des besagten Fleckes die gleiche Farbe haben, sich somit ein homogener Fleck bildet. Dieses Verhältnis ist die sogenannte Xylolzahl. Die Xylolzahl lässt somit Rückschlüsse auf den Maltengehalt eines Bitumens zu. Allerdings sind nur qualitative Schlüsse über den chemischen Aufbau eines Bitumens zu ziehen. Das Verfahren wurde von [POTSCHKA, 1989] erarbeitet.

4 Beschreibung der durchgeführten Versuche

4.1 Untersuchungsprogramm

Das Forschungsprojekt „Einsatz von Rejuvenatoren bei der Wiederverwendung von Asphalt“ dient der Charakterisierung der Wirkungsweise und Wirksamkeit eines Rejuvenators, sowie der Entwicklung von Anwendungshinweisen für die Praxis. Außerdem soll parallel zu diesen Untersuchungen eine Labormethode zur einfachen Bestimmung des Alterungszustandes von Bitumen über den Anteil an schwerlöslichen Asphaltenen entwickelt werden. Das Ablaufschema des Untersuchungsprogramms ist zusammenfassend in Bild 4-1 dargestellt.

Zunächst werden auf dem Markt angebotene Rejuvenatoren, sowie 20 bis 25 Asphaltgranulate mit unterschiedlichem Alterungsgrad beschafft. Die Asphaltgranulate werden extrahiert und die Eigenschaften des Bitumens untersucht. Basierend auf diesen Ergebnissen werden verschiedene Rejuvenatoren zu fünf Asphaltgranulaten mit einer möglichst großen Bandbreite des Alterungsgrades hinzugegeben. Die Wirkungsweisen der Rejuvenatoren werden hier sowohl im frischen, als auch gealterten Zustand bestimmt. Nach der Detektion geeigneter Rejuvenatoren werden diese gezielt mit optimaler Zugabemenge mit Asphaltgranulat vermischt und performance-orientierten Untersuchungen durchgeführt.

Im letzten Schritt werden Demonstratoren mit einer repräsentativen Zugabemenge an Asphaltgranulat gebaut. Beim Einbau der Flächen werden Proben in ausreichendem Maße für performance-orientierte Prüfungen gesichert.

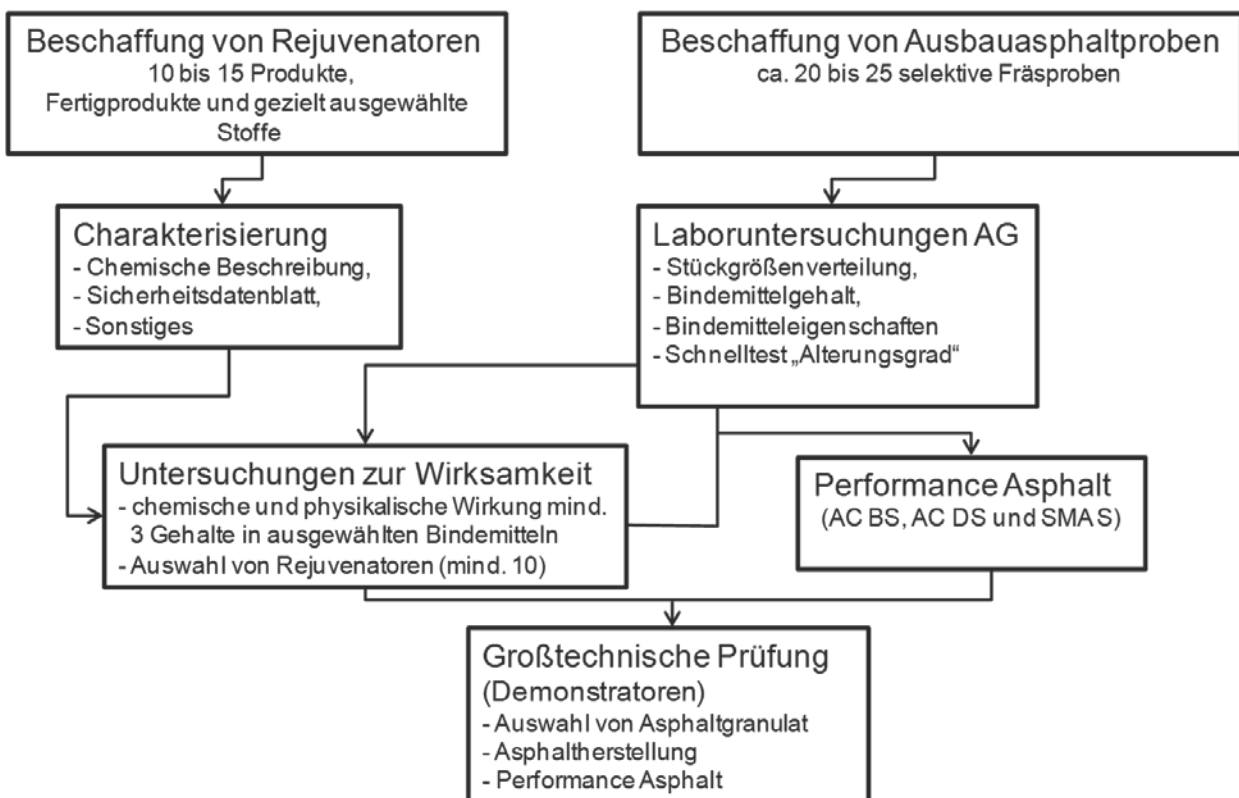


Bild 4-1: Ablaufschema des Untersuchungsprogramms

4.2 Beschaffung der Rejuvenatoren und Asphaltgranulate

Für die Wiederverwendung von Asphalt werden zunehmend Produkte unter dem Begriff "Rejuvenator" angeboten. Trotz gleicher Bezeichnung unterscheiden sich viele dieser Produkte grundlegend in ihren Wirkungsweisen. Für eine umfassende Beurteilung der Wirksamkeit und Wirkungsweise von Rejuvenatoren wurde im Rahmen dieses Forschungsvorhabens ein Großteil der auf dem Markt angebotenen Produkte angefragt. Mit Ausnahme eines Produktes wurden alle angefragten Produkte zur Verfügung gestellt. Eine Übersicht ist in Tab. 4-1 gegeben.

Als Alternativen zu den Rejuvenatoren wurden vier weiche Straßenbaubitumen der Sorten 160/220, 250/330, 500/650, 650/900 in das Untersuchungsprogramm aufgenommen, sodass insgesamt 25 Verjüngungsmittel zur Verfügung standen. Zur Vereinfachung fallen diese Straßenbaubitumen im Folgenden ebenfalls unter den Begriff "Rejuvenator".

Bei der Beschaffung von Asphaltgranulaten wurde angestrebt, eine möglichst große Bandbreite an Alterungsgraden abzudecken. Insgesamt wurden 22 Asphaltgranulate von verschiedenen Mischwerken und Unternehmen zur Verfügung gestellt. Die Herkunft dieser Granulate war nicht immer nachvollziehbar, sodass keine genauen Aussagen zur tatsächlichen Liegedauer und somit zum erwarteten Alterungsgrad getroffen werden konnten. Vielmehr konnte der Alterungszustand erst durch die Extraktion und Untersuchung des rückgewonnenen Bindemittels beurteilt werden.

Tab. 4-1: Auflistung der verwendeten Rejuvenatoren

Produktbezeichnung	Hersteller
Storflux	Storimpex
Storflux nature	
Storflux plus	
Storflux premium	
Storbit	
Storbit nature	
Storbit plus	
Storbit premium	
RheoFalt HP-EM	Ventraco
Regemac RCs	Fenixfalt
Regemac RCn	
Regefalt	ASI
RapBond 240	
RapBond 5	
Tego Addibit EM 20	Evonik
Tego 1	
Tego 2	
Vestenamer	
Stardope ACF 20	Starasphalt
Stardope ACF 100	
Stardope RG	

4.3 Untersuchung der Asphaltgranulate

4.3.1 Extraktion

Die Extraktion und Rückgewinnung des Bindemittels erfolgte in einer geschlossenen Anlage mit Trichlorethen als Lösungsmittel gemäß [TP Asphalt-StB Teil 1 bzw. Teil 3].

4.3.2 Gesteinsuntersuchungen

Am Gestein wurde jeweils die Korngrößenverteilung nach [TP Gestein-StB 07, Teil 4.1.2] bestimmt.

4.3.3 Bindemitteluntersuchungen

Zunächst wurden die materialspezifischen Eigenschaften aller vorhandenen Bindemittel aus den Asphaltgranulaten durch folgende Kennwerte bestimmt:

- Nadelpenetration nach [DIN EN 1426]
- Erweichungspunkt Ring und Kugel nach [DIN EN 1427]
- Phasenwinkel und Schubmodul im DSR mit Temperatursweep von -10 °C bis 150 °C nach [DIN EN 14770]

Anhand dieser Ergebnisse wurde eine Vorauswahl von zehn Bindemitteln aus Asphaltgranulat getroffen, die folgenden weiteren rheologischen Untersuchungen unterzogen wurden:

- Bestimmung der Kraftduktilität nach [DIN EN 13589] bei 15 °C
- Bestimmung der Biegekriechsteifigkeit im BBR bei -25 °C, -16 °C und -10 °C nach [DIN EN 14771]
- Bestimmung der dynamischen Viskosität im DSR in Anlehnung an [DIN EN 13702]

Außerdem wurden die chemischen Zusammensetzungen der Bindemittel mittels SARA-Fraktionierung [SEBOR, 1999] und durch Bestimmung des Asphaltgehaltes nach Zenke [ZENKE, 1989] ermittelt. Die SARA-Fraktionierung diente der Quantifizierung der Anteile an Asphaltene, Erdöl-Harzen, Aromaten und Aliphaten im Bitumen. Durch die Bestimmung des "Asphaltgehaltes nach Zenke" kann weiterhin der Anteil an Asphaltene in leicht-, mittel- und schwerlöslich gegliedert werden.

In einem weiteren Schritt wurden Rolling-Bottle-Tests gemäß [DIN EN 12697-11] zur Beurteilung des Adhäsionsverhaltens durchgeführt. Als Gesteinskörnung wurde als haftkritisch einzustufender Quarzit der Kornklasse 5/8 mm verwendet. Der Umhüllungsgrad wurde nach 6, 24 und 48 h bestimmt. Auf eine Ermittlung des Umhüllungsgrades nach 72 h wurde verzichtet, da bei dieser Prüfdauer der mechanische Einfluss sehr hoch ist. Die visuelle Bestimmung des Umhüllungsgrades wurde durch eine fotooptische Auswertung unterstützt. Fotooptische Aufnahmen wurden dazu mit Hilfe des Bildverarbeitungstools „Image Processing Toolbox“ des Programms MATLAB® ausgewertet.

Basierend auf diesen detaillierten Kenntnissen der Bitumeneigenschaften wurden im Anschluss fünf Bindemittel aus Asphaltgranulat für den weiteren Untersuchungsablauf ausgewählt.

4.4 Untersuchung der Rejuvenatoren

Um eine Differenzierung der Additive zu ermöglichen, wurden diese zunächst basierend auf ihren erwarteten Wirkungsweisen in rheologisch wirksame und chemisch wirksame

unterteilt. Soweit möglich, wurden sie dann innerhalb dieser Gruppen weiter untergliedert, sodass letztendlich mehrere Gruppen an Rejuvenatoren mit gleicher oder sehr ähnlicher Wirkungsweise vorlagen, aus denen Produkte für den weiteren Untersuchungsablauf ausgewählt werden konnten. Die Additive deckten die gesamte Bandbreite an vorhandenen Produkten und Wirkungsweisen bzw. -mechanismen ab.

Die Differenzierung erfolgte zunächst durch die Auswertung der Herstellerinformationen und Datenblätter zu den einzelnen Produkten. Die überwiegend mangelnden Angaben der Hersteller bezüglich der zu verwendenden Zugabemengen machten zusätzlich einen zweiten Schritt erforderlich, in dem Voruntersuchungen durch Zugabe der einzelnen Rejuvenatoren zu einem frischen Straßenbaubitumen 20/30, das im Vorfeld chemisch analysiert wurde, durchgeführt wurden. Über die Bestimmung der Nadelpenetration und des Erweichungspunktes Ring und Kugel konnten erste Aussagen zur Wirksamkeit der Additive getroffen werden. Basierend auf diesen Ergebnissen wurden zehn Rejuvenatoren zur Zugabe zu fünf Bindemitteln aus Asphaltgranulat ausgewählt.

4.4.1 Bestimmung der Zugabemengen

Für den ersten Vergleich der Wirksamkeit und Wirkungsweise der Rejuvenatoren müssen die Produkte, soweit möglich, unter den gleichen Bedingungen angewendet werden, hierzu gehört auch die Herstellung der Bitumen-Rejuvenatoren-Gemische mit gleichen Zugabeanteilen an Rejuvenatoren. Nach Rücksprache mit einigen Herstellern wurden die Zugabemengen 3,0 M.-%, 5,0 M.-% und 7,0 M.-% sowohl für die Rejuvenatoren, als auch aus Gründen der Vergleichbarkeit für die weichen Straßenbaubitumen, ausgewählt. Für die weichen Straßenbaubitumen wurden zusätzlich Gemische mit einer Zugabemenge von 1,0 M.-% untersucht. Bei zwei Produkten wurde die vom Hersteller zwingend geforderte Zugabemenge verwendet.

Die Storbit-Produkte sind Kombinationen des jeweiligen Storflux-Produktes und einem Fischer-Tropsch-Wachs. Bei den Zugabemengen soll der Verwender sich laut Herstellerempfehlung an den Zugabemengen des jeweiligen Öls orientieren und zusätzlich basierend auf der gewünschten Mischguttemperatur die Zugabemenge des reinen Wachses bestimmen. Durch Addition der beiden Zugabemengen ergibt sich die geforderte Zugabemenge für die jeweilige Additivkombination Storbit.

4.4.2 Zugabe zu einem frischen Straßenbaubitumen

Die Additive wurden mit einem Straßenbaubitumen 20/30 mit bekannter chemischer Zusammensetzung gemischt, um an den Gemischen anschliessend die physikalischen Eigenschaften zu bestimmen. Dies erfolgte für alle Additive gleichermaßen in einem Becherglas mit 100 ml Bitumen unter ständigem Rühren bei 150 °C Bitumentemperatur. Die Gemische wurden mit einer mehrblättrigen Schraube (s. Bild 4-2) 10 Minuten vermengt und unmittelbar nach Beendigung des Rührvorgangs mit einem Holzstäbchen für eine optimale Verteilung innerhalb des Becherglases manuell nachgerührt. Der Rührvorgang ist in Bild 4-3 dargestellt. Ziel des Mischvorgangs war das Erreichen eines augenscheinlich homogenen Gemisches. Anschließend erfolgte die Abfüllung der Proben für die Ermittlung des Erweichungspunktes Ring und Kugel und der Nadelpenetration.

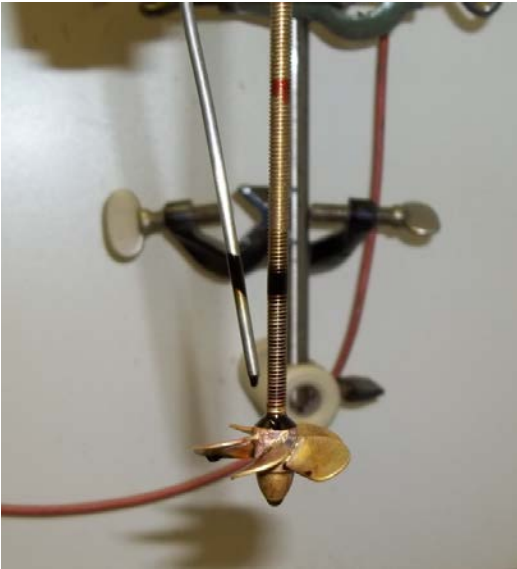


Bild 4-2: Rührvorrichtung zur Herstellung der Bitumen-Rejuvenator-Gemische



Bild 4-3: Rührvorgang beim Mischen des Straßenbaubitumens mit einem Additiv

4.5 Zugabe der Rejuvenatoren zu Asphaltgranulat und Untersuchung der Gemische

Basierend auf den Untersuchungsergebnissen der Gemische aus Rejuvenatoren und Straßenbaubitumen 20/30 wurden zehn Rejuvenatoren für die Zugabe zu den fünf Bindemitteln aus dem Asphaltgranulat ausgewählt. Dabei war darauf zu achten, dass Rejuvenatoren unterschiedlicher Wirkungsart nicht aussortiert, sondern weiter im Programm berücksichtigt wurden. Die Untersuchungsergebnisse dienen weiterhin der Bestimmung von bis zu zwei Zugabemengen je Additiv. Die Herstellung der Rejuvenatoren-Bitumen-Gemische erfolgte analog zu 4.4.2. Die Gemische werden auf die in 4.3.3 angesprochenen physikalischen und rheologischen Eigenschaften untersucht.

Neben der Analyse der Gemische unmittelbar nach der Herstellung (frischer Zustand) sollten bis zu 20 ausgewählte Gemische zu einem späteren Zeitpunkt im gealterten Zustand untersucht werden. Es wurden drei Methoden zur Simulation der Kurz- und der Langzeitalterung angewendet:

- RTFOT nach [DIN EN 12607] Teil 1,
- RTFOT mit dreifacher Prüfdauer und
- RTFOT und anschließende PAV-Alterung nach [DIN EN 14769].

Durch die simulierte Alterung können Aussagen zum einen zur Wirkungsdauer der Rejuvenatoren und zum anderen zum physikalischen und rheologischen Verhalten von Bitumen-Rejuvenator-Gemischen nach Alterungsprozessen getroffen werden.

Darüber hinaus sollte die physikalische Wirkung der Rejuvenatoren exemplarisch mit Hilfe der Fluoreszenzmikroskopie nachgewiesen werden.

4.6 Dünnschliffe zur Charakterisierung von Doppelumhüllung

Zur Analyse einer eventuell vorhandenen Doppelumhüllung wurden Marshall-Probekörper aus unterschiedlichen Asphaltmischgutarten/-sorten hergestellt, die sich des Weiteren in ihrer Gesteinsart (Gabbro, Granit, Quarzolith und Kalkstein) unterscheiden.

Anhand von Vorversuchen wurde besonderes Augenmerk auf die Klebetechnik bzw. auf eine geeignete Wahl des Klebers (Zweikomponentenkleber, Kanadabalsam, etc.) gelegt. Durch die Verwendung eines zusätzlichen Kühlsystems konnten Dünnschliffe hergestellt werden [ACHILLES, 2014].

Jedoch konnte – wahrscheinlich aufgrund des Herstellungsprozesses beim Schleifvorgang - keine eindeutige Ansprache einer eventuell vorhandenen Doppelumhüllung mittels Mikroskopie nachgewiesen werden.

Nachfolgend wird der Prozess zur Herstellung von Dünnschliffen und der am ISBS erarbeitete Erfahrungshintergrund zusammenfassend erläutert.

4.6.1 Dünnschliffherstellung

Die Dünnschliffherstellung wird in der Geologie am häufigsten angewandt. Dort werden Gesteine oder Mineralien zunächst in Klötzchen gesägt und bei 90 °C getrocknet. Um die Gesteine auf einen Glasobjektträger kleben zu können, werden sie einseitig plangeschliffen. Dies geschieht oftmals per Hand. Danach wird der Probekörper gereinigt und bei 90 °C getrocknet. Das Kleben des Probekörpers auf den Glasobjektträger wird ebenfalls bei dieser Temperatur umgesetzt. Als Klebstoff dient hierbei oft Kanadabalsam oder Epoxidharz. Sobald der Klebstoff getrocknet ist, wird der Probekörper planparallel abgesägt. Danach wird er maschinell geschliffen bis der Probekörper eine Dicke von ca. 30 µm aufweist [FISCHER, 1996/97].

Auch in der Asphaltforschung wird die Dünnschliffherstellung angewandt. Dort werden aus Asphaltprobekörpern oder Bohrkernen kleine Stücke ausgesägt, welche zur Fixierung auf Glasobjektträger geklebt werden. Die Asphaltprobe wird so gesägt, dass Probe und Glas noch mindestens 14 mm Dicke aufweisen. Mittels Epoxidharz wird die Probe unter Vakuum ausgegossen und nach Trocknung wiederum abgesägt. Nach Schleifen und Polieren wird ein zweiter Glasobjektträger auf die polierte Fläche geklebt. Der erste Glasobjektträger wird abgesägt und die Probenoberfläche geschliffen und poliert bis eine Probendicke von 20 µm erreicht ist. Alle diese Schritte erfolgen immer bei -5 °C. Zudem wird beim Sägen, Schleifen und Polieren Eiswasser auf die Asphaltprobekörper gesprüht, um ein Verschmieren des Bindemittels zu verhindern [WEGAN, BRULÉ; 2000].

4.6.2 Dünnschliffgerät

Die am ISBS verwendete Dünnschliffmaschine GMN MPS 1 kann zum Einsatz, nachdem die Asphalt- oder Gesteinsprobe gesägt wurde. Es kann in 0,01 mm-Schritten Material abgetragen werden. Dabei wird die Schleifscheibe von innen mit Wasser gekühlt und die Oberfläche der Probe gleichzeitig gereinigt. Die Proben werden mittels Vakuum fixiert. Links neben der Dünnschliffmaschine befindet sich das Kühlwasserbecken mit eingebauter Kühlwasserpumpe. Das Kühlwasser wird im Kreislauf geführt, wobei durch Herauspritzen immer Wasser verloren geht, so dass es vor jedem Schleifen wieder aufgefüllt werden sollte.

Da das Kühlwasser ohne Kühlung nur Raumtemperatur hat, wurde zusätzlich ein Kühlaggregat angebaut. Dazu wurde ein Kupferrohr mit mehreren Windungen um die Kühlwasserpumpe im Kühlwasserbecken eingebaut. Dadurch entstanden zwei Kühlwasserkreisläufe. Vom Kühlaggregat fließt so ein Alkohol-Wasser-Gemisch mit -10 °C durch das Kupferrohr und kühlt das Kühlwasser der Dünnschliffmaschine auf ca. 5 °C (am Schleifkopf) herunter. Da während des Schleifens ein feiner Wassernebel entsteht, wurde hier reines Wasser verwendet. Weiterhin wurden alle Rohre wärmeisoliert.



Bild 4-4: Dünnschliffgerät des ISBS (links), Probeversuche von Dünnschliffen aus unterschiedlichen Gesteinsarten und Asphaltmischungen (rechts)

4.6.3 Auswahl an Klebstoffen

Es wurden verschiedene Klebstoffe, die Asphalt-, Bitumen- oder Gesteinsproben auf dem Objektträger festkleben, auf ihre Verwendbarkeit untersucht (siehe Tab. 4-2).

Tab. 4-2: Übersicht der untersuchten Klebstoffe

Klebstoffsorte	Transparenz	Bitumenverträglichkeit
Kanadabalsam	optisch rein	löst Bitumen an
UHU Endfest 300	gepunktete Struktur	keine Einschränkung
UHU Schnellfets	transparent, wenn ungeschliffen	keine Einschränkung
UHU Sofortfest	transparent, wenn ungeschliffen	keine Einschränkung

(a) Kanadabalsam

Kanadabalsam wird aus dem Harz der in Nordamerika und Kanada vorkommenden Balsamtanne hergestellt. In der Geologie wird er wegen seiner besonderen Eigenschaften als Klebstoff und Eindeckmittel bei der Herstellung von Gesteinsdünnschliffen verwendet. Nach dem Trocknen ist Kanadabalsam wie transparenter Hartlack. Der Brechungsindex ist annähernd gleich dem von Glas [OMIKRON GMBH NATURWAREN, 2013].

Bei der Herstellung von Asphalt-Dünnschliffen erwies sich Kanadabalsam als nicht einsetzbar. Da die Proben wegen des Bitumens nicht bei 90 °C getrocknet werden konnten, wurden sie bei Raumtemperatur getrocknet. Dies erwies sich zum einen als langwierig und zum anderen blieb der Kanadabalsam zähflüssig, so dass sich bei den folgenden Arbeitsschritten die Probe vom Objektträger löste. Desweiteren zeigte sich beim Eindecken der Asphaltproben, dass Kanadabalsam das Bitumen anlöst und es sich so verschmieren lässt (siehe Bild 4-5).

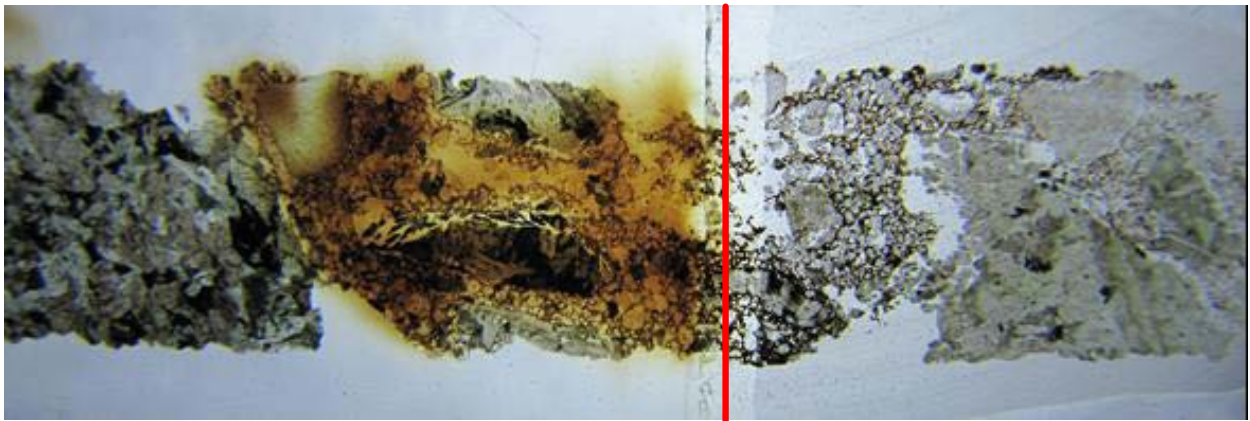


Bild 4-5: Asphalt-Dünnschliff, Makrofoto im Durchlicht: mit Kanadabalsam und Glasplättchen eingedeckte Probe(links), nicht abgedeckte Probe (rechts)

(b) UHU Plus Endfest 300

UHU Plus Endfest 300 ist ein auf Epoxidharzbasis bestehender Zweikomponentenkleber. Er beinhaltet kein Lösungsmittel. Die Komponenten sind opak (Binder) und honigfarben (Härter). Nach 24 h erreicht der Klebstoff seine Endfestigkeit mit 1200 N/cm². Seine Funktionsfestigkeit erreicht er bereits nach 12 h [UHU GMBH & CO. KG, 2014].

Da der Klebstoff unter dem Mikroskop eine charakteristische Struktur aufweist, wurde versucht, den Klebstoff nur am Rand der Probe aufzubringen, um die Probenmitte unter dem Mikroskop besser untersuchen zu können. Allerdings erwies sich dies als unpraktisch, da beim Sägen und Schleifen alle nicht geklebten Körner abgetragen wurden. Wegen seiner charakteristischen Struktur wurde dieser Klebstoff als nicht geeignet angesehen.

(c) UHU Sofortfest

UHU Plus Sofortfest ist ein auf Epoxidharzbasis bestehender Zweikomponentenkleber. Er beinhaltet kein Lösungsmittel. Die Komponenten sind farblos, klar. Die Verarbeitungszeit beträgt 1 bis 2 Minuten. Seine Endfestigkeit (1000 N/cm²) erhält dieser Klebstoff bei Raumtemperatur nach 12 Stunden, funktionsfähig ist er bereits nach einer Stunde. Er ist laut Hersteller transparent [UHU GMBH & CO. KG, 2014].

Dieser Klebstoff ist, wenn er nicht angeschliffen wird, unter dem Mikroskop transparent. Jedoch ist die Verarbeitungszeit sehr kurz, weswegen er als nicht geeignet angesehen wurde. Auch ist die Bildung von Luftbläschen während des Verrührens der Komponenten ein Problem.

(d) UHU Schnellfest

UHU Plus Schnellfest ist ein auf Epoxidharzbasis bestehender Zweikomponentenkleber. Er beinhaltet kein Lösungsmittel. Die Komponenten sind farblos, klar. Die Verarbeitungszeit beträgt 5 Minuten. Nach 12 Stunden erreicht der Klebstoff seine Endfestigkeit mit ca. 1000 N/cm^2 und ist transparent. Seine Funktionsfestigkeit erreicht er bereits nach einer Stunde [UHU GMBH & CO. KG, 2014].

Solange der ausgehärtete Klebstoff nicht angeschliffen wird, ist er auch unter dem Mikroskop transparent. In der Anwendung erwies sich die Luftbläschenbildung beim Verrühren der zwei Komponenten als Problem, da beim Aufkleben des Probekörpers auf den Glasobjektträger Luftbläschen zwischen den beiden Medien verblieben. Diese sind bei der Mikroskopie als dunkle Kreise zu erkennen (siehe Bild 4-6).

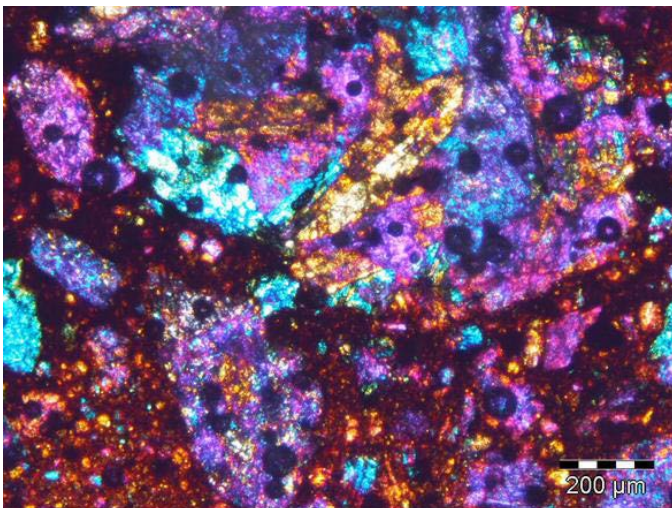


Bild 4-6: Asphaltdünnsschliff, erste Versuche am Polarisationsmikroskop, Institut für Pharmazeutische Technologie der TU BS

Laut Anleitung des Klebstoffherstellers sollten Objekte nicht angedrückt werden. Die Luftblasenbildung konnte durch Hin und Herbewegen des Probekörpers und leichten Druck auf diesen beim Positionieren auf dem Glasobjektträger gelöst werden. Die Luftblasen wurden so „herausmassiert“.

Im Vergleich zum UHU Sofortfest bietet dieser Klebstoff als zusätzlichen Vorteil eine längere Verarbeitungszeit. Daher wurde dieser Klebstoff bei der weiteren Herstellung von Dünnsschliffen eingesetzt.

Auch das Eindecken der Asphalt-Dünnsschliffe wurde mit diesem Epoxidharzkleber erprobt. Dies erwies sich als praktikabel, wie Bild 4-7 zeigt. Es ergab sich aber das gleiche Problem mit den Luftbläschen, die „herausmassiert“ werden mussten. Das Eindecken von Proben wird gemacht, um diese haltbar zu machen und um Kontraste zu erhöhen. Trotzdem wurde diese Technik nicht weiter angewandt, da die Asphalt-Dünnsschliffe zum großen Teil nachgeschliffen werden mussten und die Aufnahmen mit dem Mikroskop direkt nach dem Schleifen erfolgten.

Im Zuge der Bearbeitung wurden verschiedene Splitmastixasphaltgemische (SMA 8 S) hergestellt, aus denen Marshall-Probekörper hergestellt wurden. In den Asphaltgemischen kamen verschiedene Gesteinsarten, zwei unterschiedliche Bitumenarten und jeweils ein Anteil von 50 M.-% Asphaltgranulat zum Einsatz, um mögliche Doppelumhüllungseffekte zu detektieren. Als Füller wurde in allen Asphaltgemischen Kalksteinmehl zugegeben.

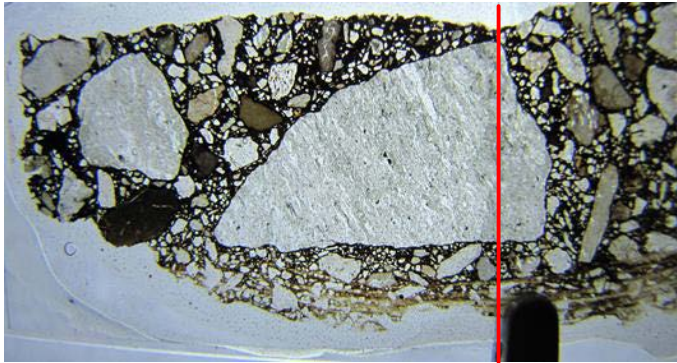


Bild 4-7: Asphalt-Dünnschliff, Makrofoto im Durchlicht: mit UHU Schnellfest und Glasplättchen eingedeckte Probe (links), nicht eingedeckte Probe (rechts)

4.6.4 Sägen der Asphaltproben

Aus den Marshall-Probekörpern wurde zunächst eine Scheibe von 1 cm Dicke herausgesägt. Aus diesen Asphaltstreifen wurden mittels Kreissäge vier 2 cm breite Streifen geschnitten, da die üblicherweise verwendeten Glasobjektträger eine Breite von 2 cm haben (siehe Bild 4-8). Die Asphaltstreifen wurden dabei mittels Schraubstock unter die Vakuumhalterung gespannt. Die Asphaltstreifen bilden nun mit ihrer Länge die Höhe des Marshall-Probekörpers ab, welche gleichzeitig die Verdichtungsrichtung des Marshallhammers darstellt.



Bild 4-8: Marshall-Probekörper nach dem Sägen, rechts: Asphalt-Scheibe vor (unten) und nach (oben) dem Schleifen

4.6.5 Anschleifen der Asphaltproben

Die Asphaltklötzchen werden nun einseitig angeschliffen, damit sie später mit der geschliffenen Fläche auf den Glasobjektträger geklebt werden können. Wichtig ist, dass die

Fläche vollkommen plan geschliffen wird, da mit jeder Unebenheit (Dicke des Dünnschliffs beträgt später 0,02 mm) der Dünnschliff teilweise weggeschliffen wird oder zur Überprüfung mittels Mikroskopie zu dick bleibt.

Zunächst muss der Schraubstock auf die Vakuumhalterung der Dünnschliffmaschine gelegt werden, damit diese mittels Vakuumpumpe angesaugt werden kann. Dabei ist darauf zu achten, dass sich zwischen der Plexiglasplatte des Schraubstocks und der Vakuumhalterung kein Staub befindet. Die Asphaltprobe wird möglichst waagrecht in dem Schraubstock eingeklemmt. Die Probe sollte dick genug sein, dass sie auf den Kanten der Backen des Schraubstocks aufliegen kann. So ist sichergestellt, dass sie waagrecht liegt. Darauf folgend wird die Einstellung der Höhe des Schleifkopfes vorgenommen. Die Probe wird so lange geschliffen, bis keine Unebenheit, Rauheit oder größere Hohlräume festzustellen sind. Nach dem Schleifen wird der Asphaltprobekörper gründlich abgewaschen und getrocknet.

4.6.6 Kleben der Asphaltproben

Der getrocknete Asphaltprobekörper wird vor dem Aufkleben auf einen Glasobjektträger zusammen mit diesem auf ihre Dicke hin vermessen. Auch der Glasobjektträger wird einzeln vermessen. Sobald der Klebstoff getrocknet ist, werden Asphaltprobekörper und Objektträger wiederum vermessen, um so die Dicke der Klebstoffschicht zu bestimmen. Beim späteren Schleifen der Probe ist es wichtig zu wissen, wie dick die Klebstoffschicht ist, um nicht zu viel Material abzuschleifen.

Die Klebstoffdicke kann dabei durchaus variieren. Dies resultiert aus den kreisenden Bewegungen, um die Luftbläschen zu eliminieren, und dem Andrücken des Asphaltprobekörpers auf den Glasobjektträger. Zusätzlich ist darauf zu achten, dass die Probe gleichmäßig über die gesamte Fläche angedrückt wird. Schon minimale Wölbungen im Asphaltprobekörper führen später beim Schleifen dazu, dass bspw. der mittlere Bereich komplett weggeschliffen wird, da die Klebstoffdicke dort größer war (siehe Bild 4-9).

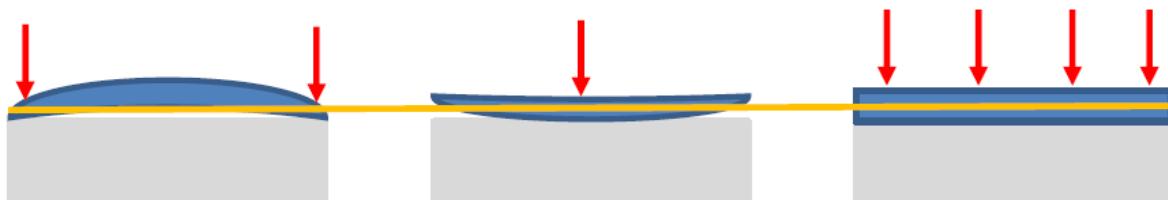


Bild 4-9: Darstellung des Andrückens eines Asphaltprobekörpers (blau) auf einen Glasobjektträger (grau), die roten Pfeile zeigen die Punkte des Andrückens, die orangefarbene Linie bis wohin geschliffen wird

4.6.7 Sägen der geklebten Asphaltproben

Nach 24 Stunden ist der Klebstoff (UHU Schnellfest) vollständig durchgetrocknet und der Asphaltprobekörper kann gesägt werden. Dazu wird die auf dem Glasobjektträger befestigte Asphaltprobe an der Vakuumhalterung der Kreissäge befestigt. Die Probe soll nach dem Sägen eine Dicke von ca. 100 µm aufweisen. Dazu wird die Probe mit dem Rad zur horizontalen Einstellung soweit an das Sägeblatt herangeführt, dass der Glasobjektträger fast vom Sägeblatt berührt wird. Nach dem Sägen wird die Probe unter fließendem Wasser abgespült. Die gesägte Probe wird nun hinsichtlich ihrer Dicke inkl. des Glasobjektträgers vermessen.

4.6.8 Schleifen der geklebten Probe

Der gesägte Asphaltprobekörper wird nun auf die Vakuumhalterung der Dünnschliffmaschine gelegt und mittels Vakuumpumpe fixiert. Nach dem Schleifprozess weist der Asphaltprobekörper eine Dicke von 20 bis 30 μm auf. Um diese Solldicke zu erzielen, bedarf es vieler Schleifübergänge.

Am Beispiel des Asphalt-Dünnschliffs 1a-1 ist im folgenden Bild 4-10 zu erkennen, dass der Schleifvorgang wegen des Verschmierens des Bitumens frühzeitig abgebrochen wurde, um die Probe nicht zu zerstören. Nach der Aufnahme des linken Bildes, wurde ein zweiter Schleifvorgang vorgenommen und im Bild 4-10 rechts ist zu erkennen, dass dadurch ein großer Bereich der Probe weggeschliffen wurde.

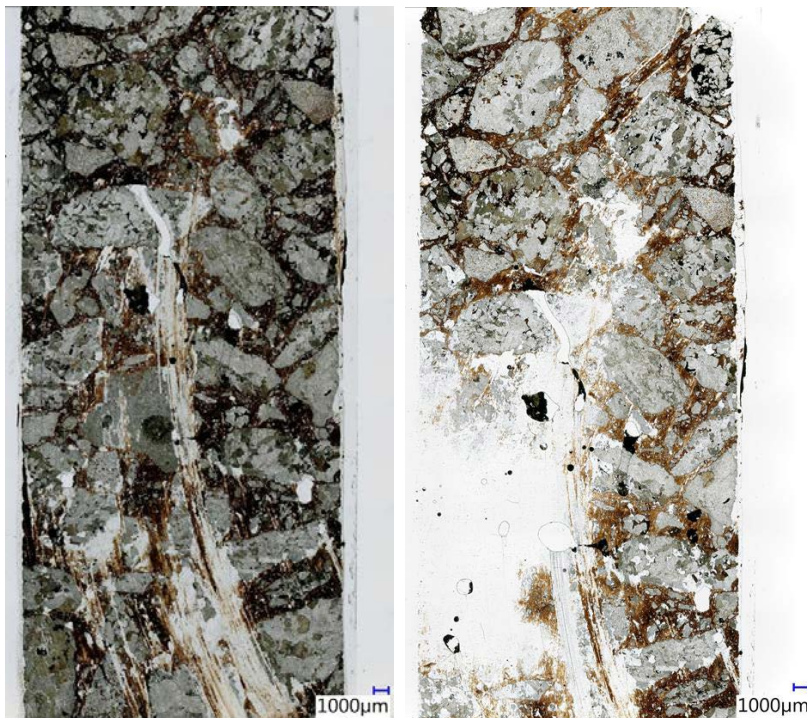


Bild 4-10: Asphalt-Dünnschliff 1a-1; (links) nach erstem Schleifvorgang, (rechts) nach zweiten Schleifvorgang

4.6.9 Ansätze zur Verringerung des Verschmierens von Bitumen während des Schleifprozesses

Um das Verschmieren des Bitumens zu verhindern, wurde zunächst versucht, die Proben einzufrieren, um so eine gewisse Härte des Bitumens zu gewährleisten. Da die Proben vor dem Schleifvorgang aber nur noch wenige Millimeter Dicke aufweisen, waren die Proben nach kurzer Zeit wieder auf Raumtemperatur.

Das zusätzlich zur Verwendung kommende Kühlaggregat sollte das Wasser am Schleifkopf soweit herunter kühlen, dass das Bitumen nicht verschmiert. Dies ist ansatzweise geglückt.

Allerdings besteht dort noch erheblicher Verbesserungsbedarf, da auch weichere Asphalte geschliffen werden können sollten.

Der Einsatz eines anderen Kühlmittels, wie im betreuenden Ausschuss angeregt (z. B. Silikonöl) war mittels der eingesetzten Hardware nicht zielführend. Weitere Untersuchungen diesbezüglich werden empfohlen.

4.6.10 Zusammenfassung und Erkenntnisse

Es wurde im Rahmen des Projektes die Herstellung von Dünnschliffen erprobt und teilweise optimiert. Der Schleifvorgang stellte sich demnach als problematisch heraus. Jeder Schleifvorgang führt zu einer Veränderung der Probenoberfläche und dadurch zu einem „Verschmieren“ des Bitumenfilms. Weil ein Einfluss des Schleifvorgangs auf die resultierende Oberflächenstruktur nicht ausgeschlossen werden kann, erwies sich die Analyse hinsichtlich der Doppelumhüllung in diesem Projekt ohne ein weiterführendes Untersuchungsprogramm als nicht zielführend. Die Studie wurde an dieser Stelle beendet.

4.7 Ansätze zur Bestimmung des Alterungsgrades von Bitumen

Die Bestimmung des Alterungszustandes von Bitumen erfolgt zurzeit lediglich über den Erweichungspunkt Ring und Kugel. Aufgrund der komplexen Bitumenchemie, der vielfältigen Modifizierungsmittel und der unterschiedlichen Alterungsprozesse ist der Erweichungspunkt allerdings nicht ausreichend, um den tatsächlichen Alterungszustand eines Bitumens zu erfassen. In Anbetracht der Wichtigkeit des Einsatzes von großen Mengen an Asphaltgranulat bei der Mischgutherstellung ist es für einen gezielten Einsatz des Granulates notwendig, einen brauchbaren Kennwert zur Bewertung des Alterungszustandes des Bitumens zu kennen. Dies kann über die Bestimmung des Gehaltes an Asphaltene im Bitumen erfolgen.

Unter Ausnutzung der umfassenden Kenntnisse über die physikalischen, rheologischen und chemischen Eigenschaften der Bitumen wurde im Rahmen dieses Projektes ein Laborverfahren zur Bestimmung des Alterungsgrades von Bitumen entwickelt. Insbesondere die bekannte chemische Zusammensetzung der untersuchten Proben ist zur Validierung des Verfahrens genutzt worden. Hierbei sollten bekannte Methoden in ihren Ansätzen übernommen und so variiert werden, dass der technische Aufwand, auch im Sinne der Wirtschaftlichkeit, minimiert wird.

Aus der Bitumenchemie geht hervor, dass die plausibelsten Aussagen über den Alterungszustand eines Bitumens über den Anteil der maltene und/ oder asphaltene Phase des Bitumens getroffen werden können. Während der Alterungsprozesse schreitet hauptsächlich die Bildung von mehr und größeren Asphaltene voran, sodass der Anteil an schwerlöslichen Asphaltene zunimmt. Dieser Anteil ist somit maßgebend für den Alterungszustand eines Bitumens und kann daher als eine den Alterungszustand beschreibende Eigenschaft gesehen werden. Eine Quantifizierung des Anteils an schwerlöslichen Asphaltene ist in Anlehnung an die Bestimmung des Asphaltengehaltes nach [ZENKE, 1989] möglich. Dies sollte im ersten Ansatz erprobt werden.

Wie [ZENKE, 1989] in seiner Dissertation zeigte, eignen sich Cyclohexan als Löser und Isooctan als Fällner am besten. Die Ausfällung schwerlöslicher Asphaltene erfolgt nach ZENKE über ein Löser-Fällner-Verhältnis von 1:1. Um die Durchführbarkeit der Analyse zu erproben, wurde zunächst nach der "vorläufigen Anleitung zum Zentrifugenverfahren" [ZENKE, 1989] wie folgt vorgegangen:

- Lösung von 2 g Bitumen in 50 ml siedendem Cyclohexan.
- Zugabe von 50 ml Isooctan nach Abkühlen und erneute Erwärmung auf Siedetemperatur für 30 min.
- Verschließen der Gläser und Aufbewahrung über Nacht zum Absetzen der ausgefällten Anteile.

Zusätzlich ist zur Beschleunigung dieser Prozesse der Einsatz weiterer Additive und eines Ultraschallbades erprobt worden. Im Rahmen der Untersuchungen wurde versucht,

den Lösungs- und den Ausfällungsprozess mit möglichst einfachen Mitteln zu beschleunigen.

Die Quantifizierung der ausgefällten Asphaltene erfolgte fotometrisch. Hierzu wurden Geräte, wie u. a. ein Fotometer und ein Trübheitsmessgerät verwendet. Im Zuge dessen stand die Anpassung des Trübheitsgrades der Lösung durch Variation des Verhältnissen Löser/ Fällner zu Bitumen im Vordergrund.

5 Ergebnisse und Auswertung der Wirksamkeitsuntersuchungen in Bitumen

Die Wirksamkeit und die Wirkungsweise der Rejuvenatoren musste zunächst an einem harten Straßenbaubitumen untersucht werden. Zudem wurden Asphaltgranulate beschafft und deren Bindemittleigenschaften bestimmt. Von fünf ausgewählten Asphaltgranulaten wurde eine ausreichende Menge Bindemittel extrahiert und rückgewonnen. Den rückgewonnenen Bindemitteln wurden Rejuvenatoren hinzugegeben und umfassende Bitumenuntersuchungen durchgeführt. Hierdurch konnte die Wirksamkeit der Additive bewertet werden, um so drei geeignete Produkte für die weiteren Untersuchungen auszuwählen.

5.1 Charakterisierung der Asphaltgranulate

5.1.1 Orientierende Untersuchungen der extrahierten Bitumen

Im ersten Schritt des Untersuchungsprogramms wurden 22 Asphaltgranulate beschafft und extrahiert. Die Ergebnisse der Extraktionen sind in Tab. 5-1 dargestellt.

Die Eigenschaften der extrahierten Bindemittel sind hier von besonderer Bedeutung. Die Erweichungspunkte Ring und Kugel und die Nadelpenetrationen sind Bild 5-1 zu entnehmen. Bild 5-2 bis Bild 5-5 zeigen die Ergebnisse der Untersuchungen mit dem DSR. Zur Zuordnung der Ergebnisse erfolgte die Bezeichnung der Bindemittel aus dem Asphaltgranulat entsprechend der Bezeichnungen der Asphaltgranulate.

Bild 5-1 zeigt deutlich, dass mit den untersuchten Bindemitteln eine große Bandbreite an unterschiedlichen Alterungszuständen eines Bitumens abgedeckt wurde. Die Untersuchung weiterer Asphaltgranulate war hier nicht notwendig. Die Schubmodule und Phasenwinkel (Bild 5-2 bis Bild 5-5) bestätigen dies. Den Diagrammen sind Anhaltswerte in Form von Kurven eines frischen Straßenbaubitumens 50/70, sowie Ausbauproben mit bekannter Nutzungsdauer beigefügt, um eine Einordnung der Ergebnisse der untersuchten Asphaltgranulate zu ermöglichen. Das Spektrum an Alterungszuständen erstreckt sich hier von Zuständen, die dem eines frischen Straßenbau-bitumens 50/70 entsprechen (AG 5) bis hin zu deutlich stärker gealterten als ein Straßenbaubitumen nach 35 Jahren Liegedauer (AG 9).

Tab. 5-1: Ergebnisse der Extraktionen der Asphaltgranulate

Mischgut	Füllergehalt	Gehalt feine Gesteinskörnung	Gehalt grobe Gesteinskörnung	Bindemittel- gehalt
	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]
AG 1	10,2	49,9	39,9	4,5
AG 2	12,0	48,5	39,4	8,1
AG 3	10,5	50,3	39,2	2,2
AG 4	14,7	73,3	12,0	6,6
AG 5	17,5	72,7	9,7	6,5
AG 6	15,5	63,3	21,2	6,8
AG 7	18,0	80,3	1,7	6,7
AG 8	18,3	64,5	17,2	6,6
AG 9	9,5	47,5	43,0	4,0
AG 10	14,0	47,9	38,1	7,0
AG 11	9,0	34,8	56,2	6,0
AG 12	8,4	15,6	76,0	5,6
AG 13	10,6	56,8	32,7	4,0
AG 14	8,1	57,0	34,9	5,1
AG 15	7,8	45,9	46,3	4,2
AG 16	11,3	56,9	31,8	5,7
AG 17	7,9	48,2	43,8	5,7
AG 18	21,4	72,8	5,8	6,6
AG 19	12,5	62,5	25,0	4,4
AG 20	7,6	37,3	55,1	5,4
AG 21	10,0	22,3	67,8	6,6
AG 22	4,9	38,9	56,2	3,7

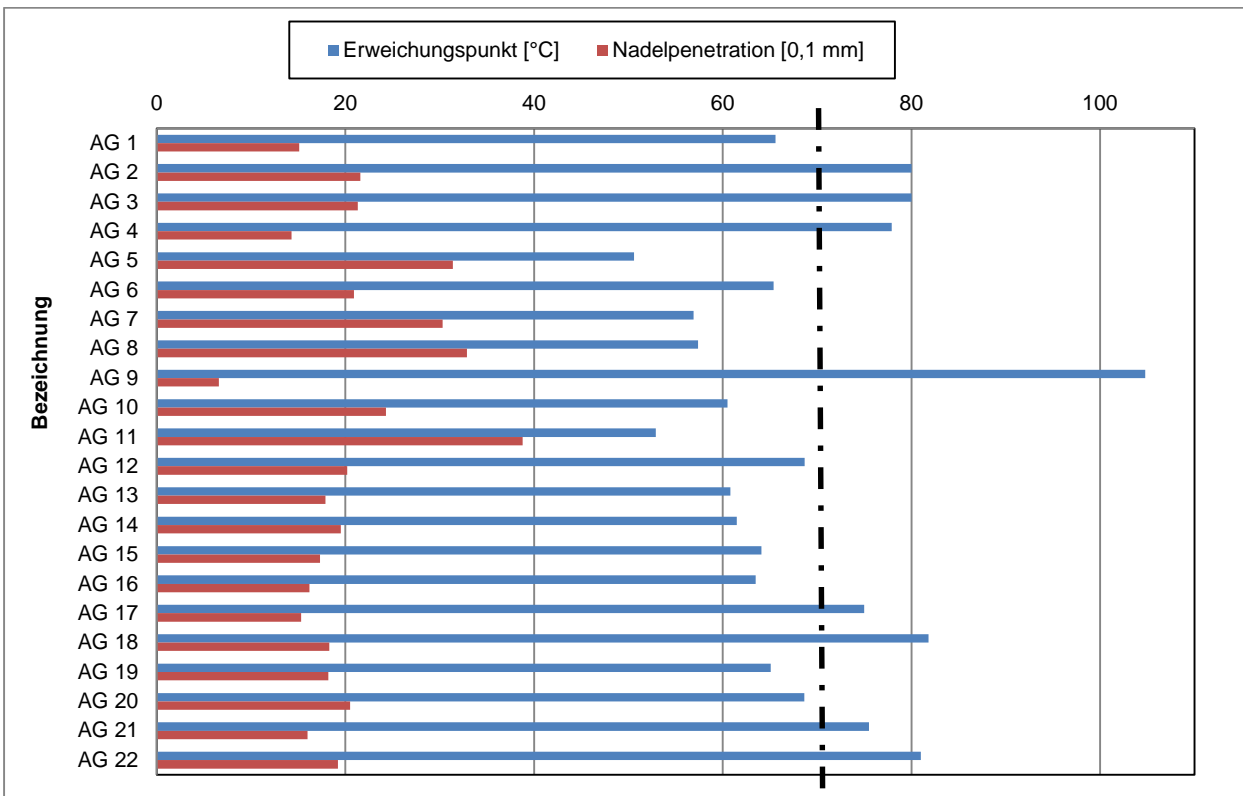


Bild 5-1: Erweichungspunkte und Nadelpenetrationen der rückgewonnenen Bitumen aus den Asphaltgranulaten

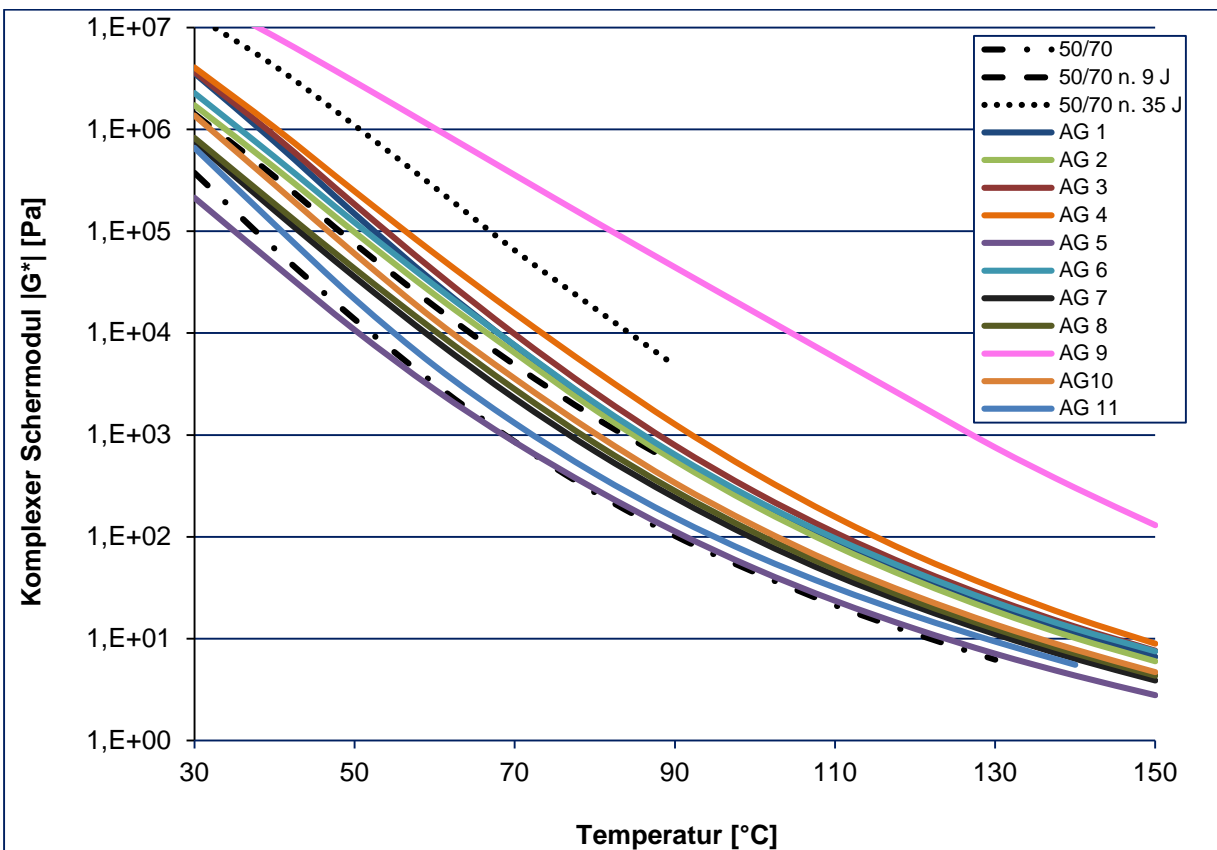


Bild 5-2: Komplexe Schermodule der Asphaltgranulate AG 1 bis AG 11 sowie Vergleichswerte

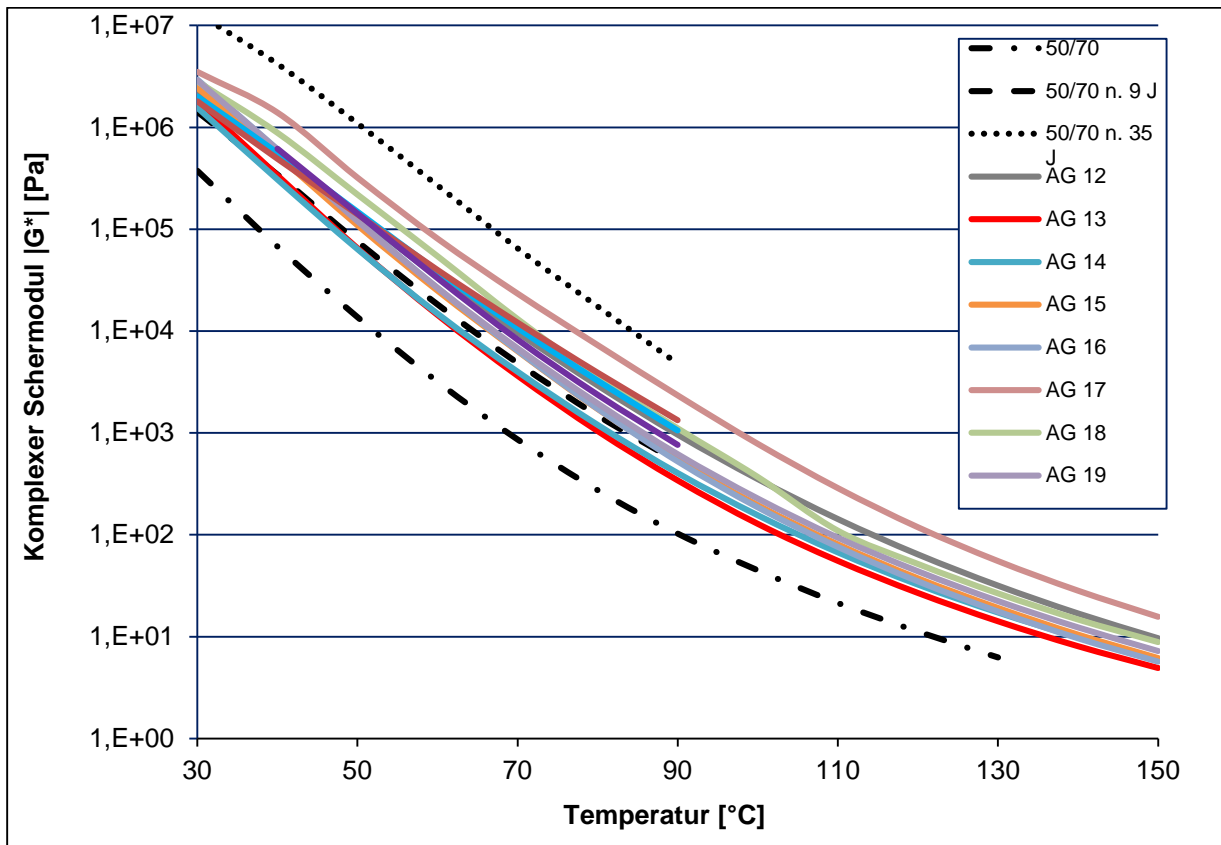


Bild 5-3: Komplexe Schermodul der Asphaltgranulate AG 12 bis AG 22 sowie Vergleichswerte

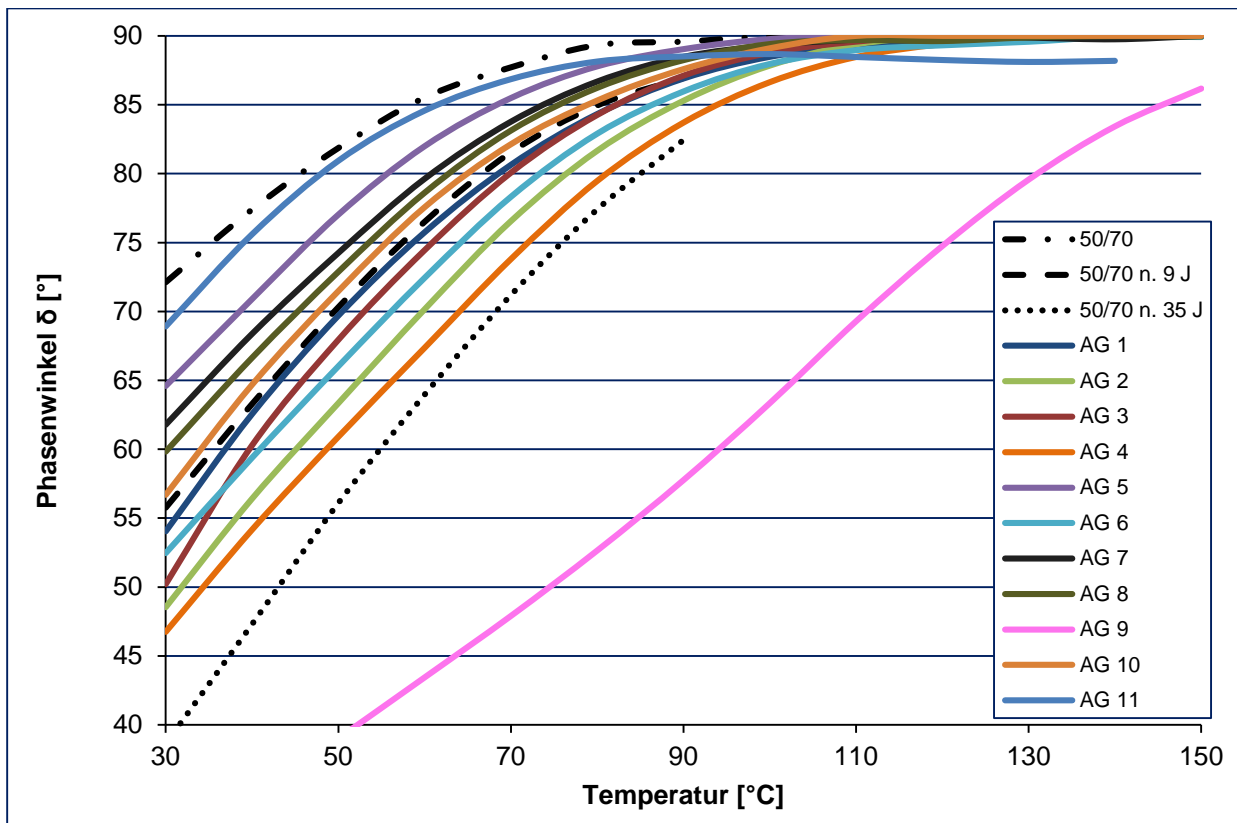


Bild 5-4: Phasenwinkel der Asphaltgranulate AG 1 bis AG 11

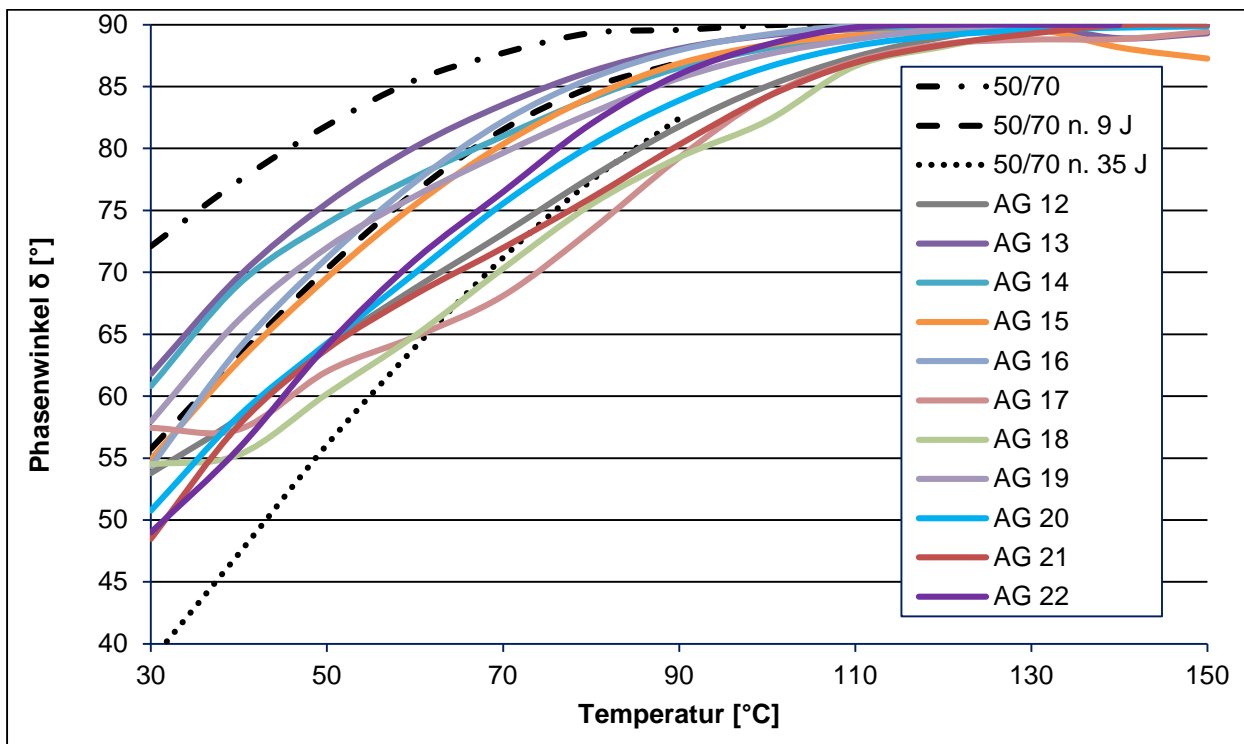


Bild 5-5: Phasenwinkel der Asphaltgranulate AG 12 bis AG 22

5.1.2 Auswahl von zehn Asphaltgranulaten

Aus den untersuchten 22 Asphaltgranulaten wurden zehn ausgewählt, deren Kälteverhalten und Kraftduktilitäten zusätzlich untersucht wurden. Außerdem wurden die Bindemittel aus den Asphaltgranulaten chemisch analysiert. Um das vorhandene, breite Spektrum an Alterungszuständen weiterhin repräsentieren zu können, wurden zunächst die Asphaltgranulate AG 5 und AG 9 ausgewählt. Die weiteren Asphaltgranulate wurden gleichmäßig verteilt wie folgt ausgewählt: AG 4, AG 6, AG 7, AG 12, AG 18, AG 20, AG 21, AG 22. Die Bitumen aus AG 20, AG 21, und AG 22 stammten von Asphaltgranulaten, die in ausreichend großen Mengen für anschließende performance-orientierte Untersuchungen am Asphalt sichergestellt wurden. Die konventionellen physikalischen Eigenschaften Erweichungspunkt Ring und Kugel und Nadelpenetration der ausgewählten Bitumen sind in Tab. 5-2 aufsteigend nach den Erweichungspunkten nochmals zusammengefasst.

5.1.3 Kältespezifischen Eigenschaften der zehn Asphaltgranulate

Das Kälteverhalten der Bitumen wurde bei den Temperaturen -10 °C , -16 °C und -25 °C im Bending Beam Rheometer (BBR) untersucht. Die m -Werte der Bindemittel aus den Asphaltgranulaten sind in dem Bild 5-6 im Vergleich mit einem Bitumen 50/70 dargestellt, zusätzlich enthält die Tab. 5-3 die ermittelten Biegekreuchsteifigkeiten $S(t)$ für $t = 60\text{ s}$. Aufgrund des hohen Alterungsgrades AG 9 konnten keine verwertbaren Ergebnisse im BBR gemessen werden.

Erwartungsgemäß unterscheiden sich Steifigkeiten und m -Werte der Asphaltgranulate deutlich. Grundsätzlich wird ein möglichst hoher m -Wert als Kriterium für ein ausreichend gutes Tieftemperaturverhalten angesehen. Näherungsweise wird die Temperatur, bei der

ein m-Wert von $\geq 0,300$ vorliegt, als noch unkritisch für eine beginnende Rissbildung angesehen. Die niedrigsten m-Werte erreichte AG 18, welches sich auch bei allen Prüftemperaturen durch die höchsten Steifigkeiten auszeichnete. Ähnliche Steifigkeiten zeigten sich am Bindemittel aus AG 22. Die geringsten Steifigkeiten wurden am Bindemittel aus AG 5 ermittelt.

Tab. 5-2: Erweichungspunkt Ring und Kugel und Nadelpenetration ausgewählter Asphaltgranulate

Bitumen	Erweichungspunkt Ring und Kugel	Nadelpenetration
	[°C]	[0,1 mm]
AG 5	50,6	31
AG 7	57,0	30
AG 6	65,4	21
AG 12	68,8	20
AG 20	68,8	21
AG 21	75,5	16
AG 4	78,0	14
AG 22	81,0	19
AG 18	82,0	18
AG 9	105,0	7

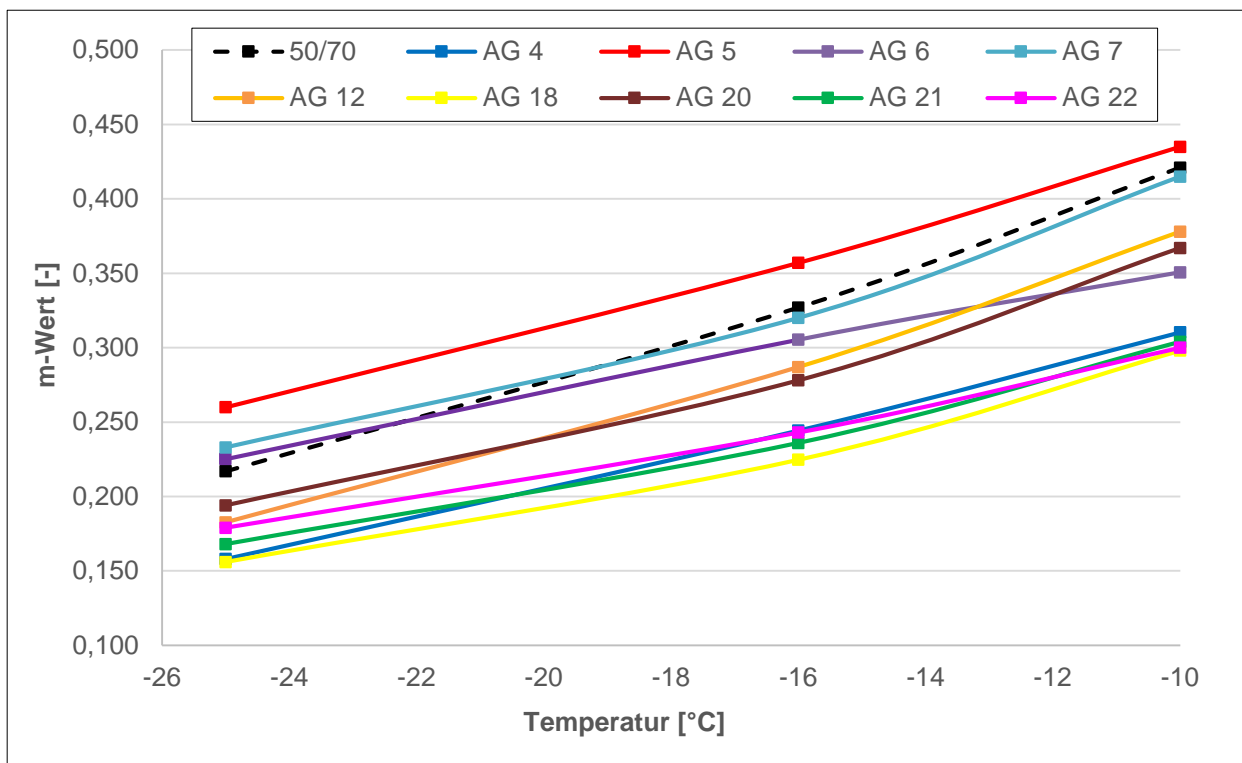


Bild 5-6: m-Werte der zehn Asphaltgranulate

Tab. 5-3: Biegekriechsteifigkeiten der zehn Bindemittel aus Asphaltgranulat

Bitumen	Biegekriechsteifigkeit [MPa]		
	-25 °C	-16 °C	-10 °C
AG 4	849	381	206
AG 5	745	289	124
AG 6	766	295	178
AG 7	759	331	154
AG 12	778	304	181
AG 18	987	491	286
AG 20	804	325	195
AG 21	834	356	203
AG 22	967	476	277

5.1.4 Bestimmung der dynamischen Viskosität der zehn Asphaltgranulate

Die dynamischen Viskositäten wurden in Anlehnung an [DIN EN 13702] nach dem Platte-Kegel-Verfahren mit rotierendem Kegel bestimmt. Die Ergebnisse enthält Bild 5-7, wobei für AG 9 aufgrund der hohen Steifigkeiten keine Messung möglich war.

Die ermittelten dynamischen Viskositäten lassen sich hinsichtlich ihrer Verläufe in drei Gruppen trennen. AG 5 und AG 7 mit den beiden niedrigsten Erweichungspunkten Ring und Kugel bilden eine Gruppe mit niedrigen Viskositäten zwischen 50 °C und 150 °C. Daran schließen sich alle weiteren Asphaltgranulate mit ähnlichen Kurvenverläufen an. Eine Ausnahme bildet nur AG 18, welches entsprechend dem höchsten Erweichungspunkt auch die höchsten Viskositäten über den Messzeitraum besitzt.

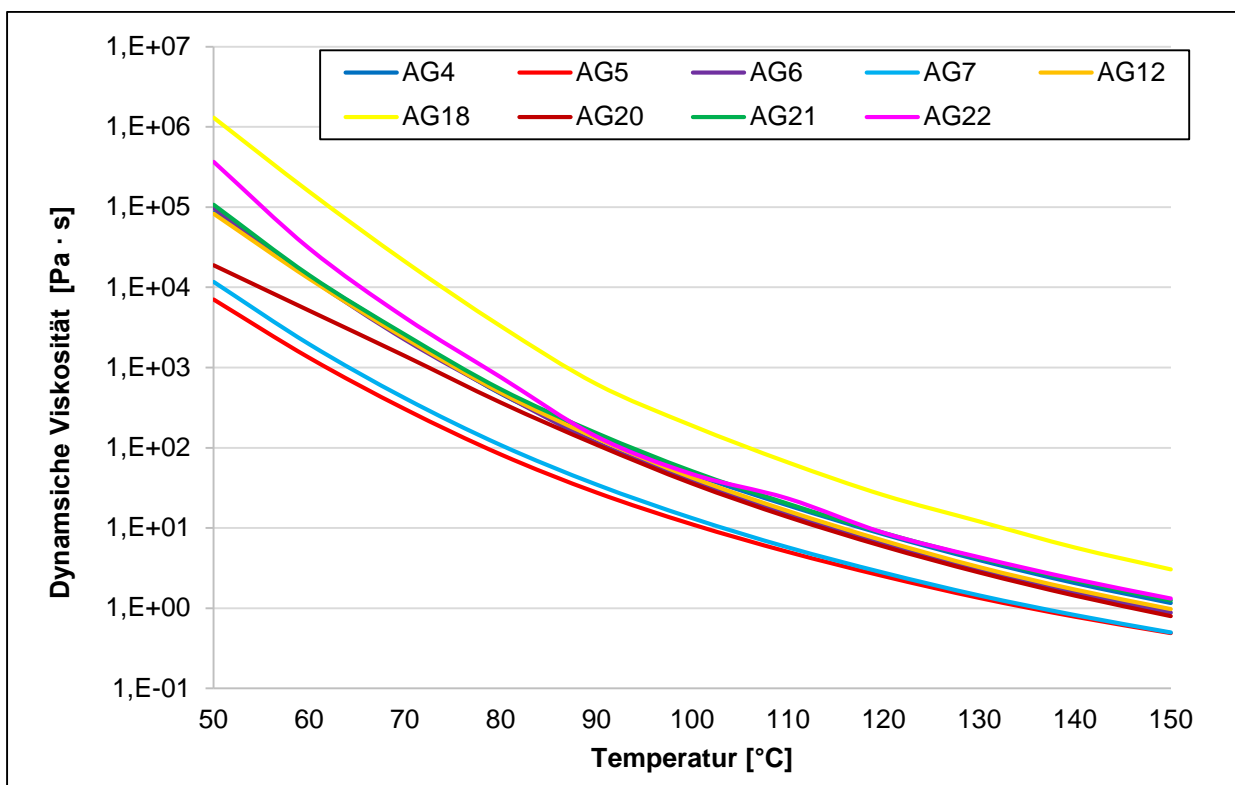


Bild 5-7: Dynamische Viskositäten der zehn Asphaltgranulate

5.1.5 Bestimmung der Kraftduktilität der zehn Asphaltgranulate

Gemäß [DIN EN 13589] wurde die Kraftduktilität der zehn Asphaltgranulate bei 10 °C bestimmt. In Bild 5-7 sind deren Kraft-Dehnungs-Kurven dargestellt. Die in [DIN EN 13703] vorgesehene Auswertungsmethode der Berechnung der Formänderungsarbeit $E_{0,2-0,4}$ konnte nicht angewendet werden, da die 200 mm bzw. die 400 mm nicht von allen Asphaltgranulaten erreicht wurden.

Die qualitativen Verläufe der Kurven deuten darauf hin, dass das Bindemittel aus AG 21 und AG 22, möglicherweise auch aus AG 6 polymermodifiziert ist.

AG 18 bricht kurz nach Versuchsbeginn, auch AG 6 und AG 21 zeigen ein ausgeprägt sprödes Verhalten mit hohen Kräften bei geringer Dehnung bis zum Bruch, was in Korrelation zu den Erweichungspunkten und anderen bisher ermittelten Ergebnissen steht. Alle anderen weisen eher ein „fließendes“ Verhalten auf, welches bei AG 4, AG 7 und AG 12 am deutlichsten ausgeprägt ist und dem Verhalten eines Destillationsbitumens entspricht.

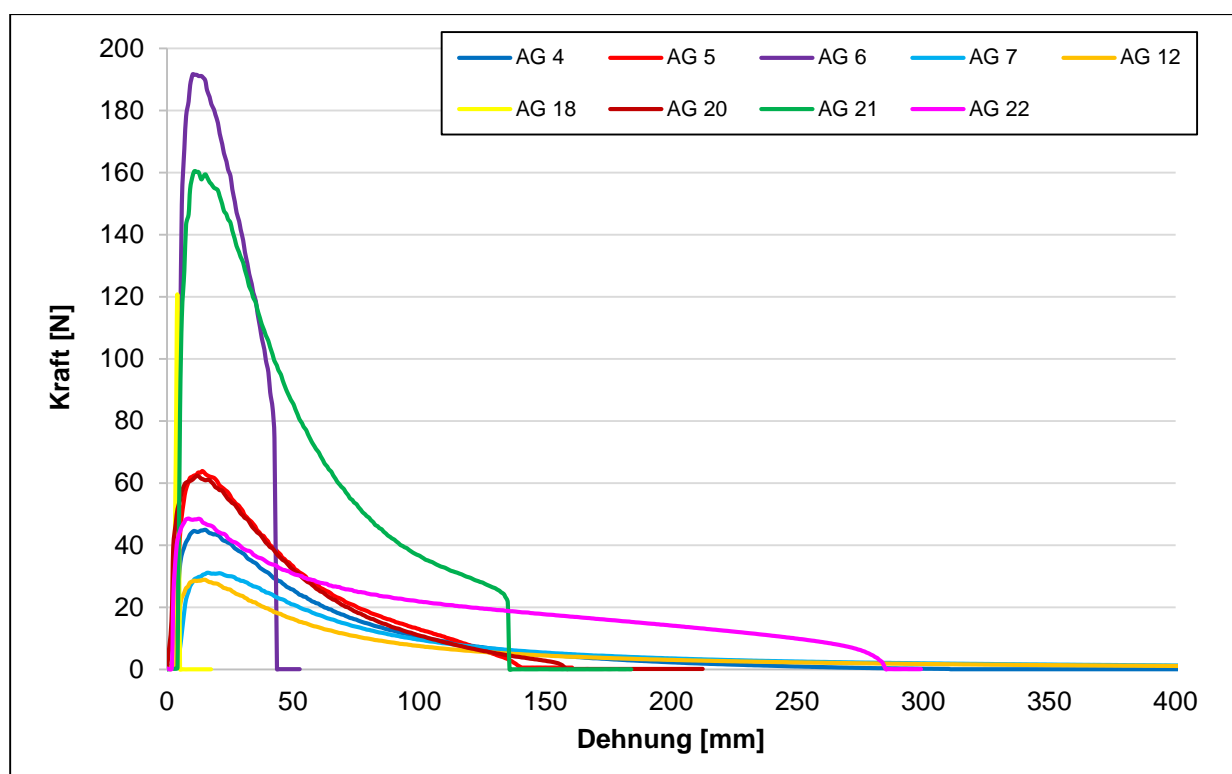


Bild 5-8: Kraft-Dehnungs-Kurven der zehn Asphaltgranulate

5.1.6 Chemische Analyse der zehn Asphaltgranulate

Die zehn Bindemittel aus den Asphaltgranulaten wurden zur genaueren Charakterisierung mittels SARA-Fraktionierung und Bestimmung des Asphaltstatus nach [ZENKE, 1989] chemisch analysiert. Die Ergebnisse dieser Analysen sind in Tab. 5-4 zusammengefasst. Für AG 9 konnten wiederum keine Ergebnisse ermittelt werden. Es fällt auf, dass sich signifikante Unterschiede in den physikalischen Eigenschaften nicht durchgehend mit der chemischen Zusammensetzung erklären lassen. Dennoch ist ein hoher Maltengehalt eher bei den weicheren Bindemitteln z.B. AG 7 festzustellen.

Auch die höchsten Anteile an Asphaltene wurden an AG 18, vor AG 22 und AG 21 gemessen, welche alle einen Erweichungspunkt > 70 °C aufweisen.

Tab. 5-4: Ergebnisse der chemischen Analysen mittels SARA-Fraktionierung und der Bestimmung des Asphaltgehaltes

Bitumen	Maltene [M.-%]						Asphaltene [M.-%]			
	Aliphaten	Aromaten			polare Verbindungen	Summe	Leicht-löslich	Mittel-löslich	Schwer-löslich	Summe
		Mono-	Di-	Poly-						
AG 4	11,02	10,59	8,59	11,06	28,10	69,36	2,77	9,37	12,98	25,12
AG 5	10,73	11,22	9,62	12,44	27,17	71,18	3,06	7,04	14,68	24,78
AG 6	8,67	11,44	11,10	14,67	29,14	75,02	2,66	8,69	14,59	25,94
AG 7	11,91	13,11	10,02	11,08	32,45	78,57	4,33	6,99	12,79	24,11
AG 12	8,52	9,77	8,57	11,08	32,30	70,24	2,85	12,08	7,23	22,16
AG 18	7,56	9,76	7,77	11,47	25,12	61,68	0,03	10,88	23,46	34,37
AG 20	5,95	9,89	16,35	11,61	30,52	74,32	0,63	12,87	11,51	25,01
AG 21	7,13	9,07	8,32	9,57	32,79	66,88	2,03	17,44	10,93	30,40
AG 22	7,60	10,48	8,98	11,66	26,63	65,35	3,50	12,04	17,22	32,76

5.1.7 Rolling-Bottle-Tests an zehn Asphaltgranulaten

Die Ergebnisse des Rolling-Bottle-Tests nach 6 h, 24 h und 48 h sind in Bild 5-9 dargestellt. Für Bindemittel aus AG 9 konnten keine Versuche durchgeführt werden.

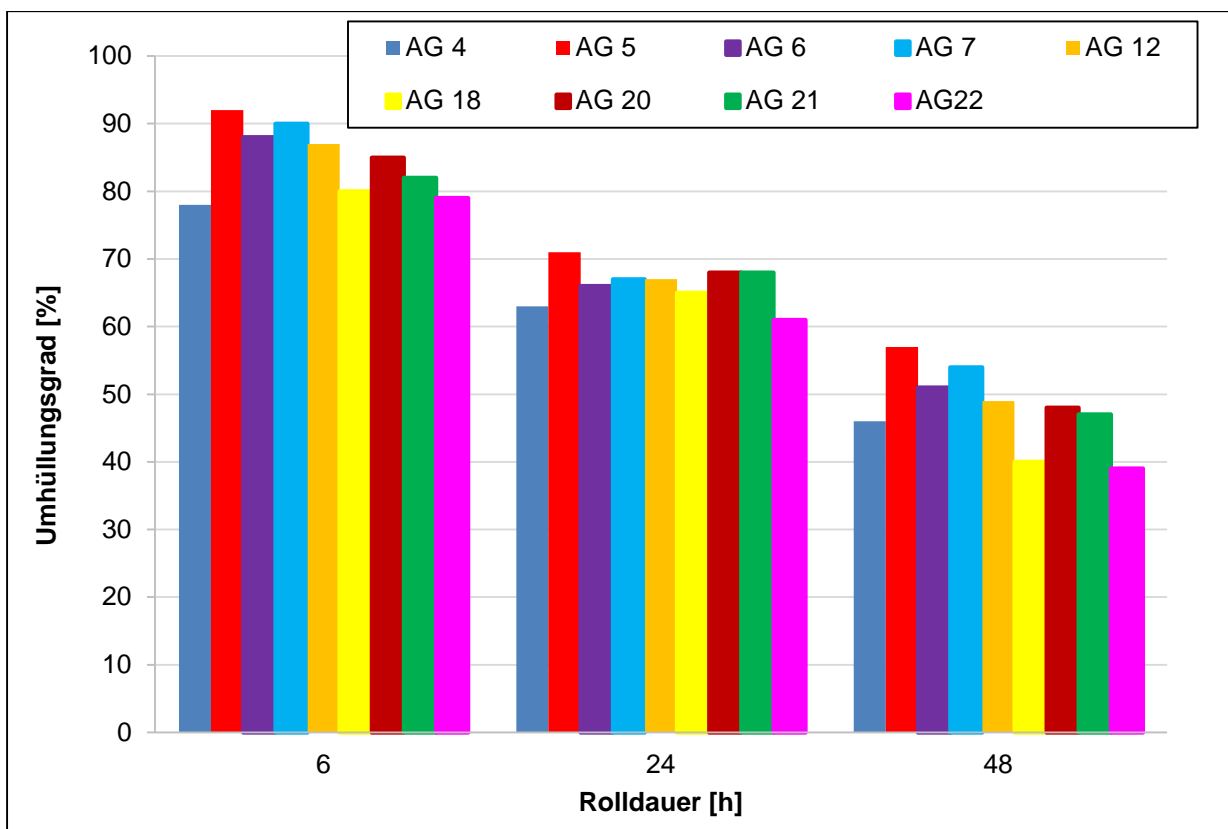


Bild 5-9: Ergebnisse der Rolling-Bottle-Tests der zehn Asphaltgranulate

Mit zunehmender Rollzeit nehmen für alle Asphaltgranulate die Umhüllungsgrade ab, wobei AG 5 zu jedem Zeitpunkt die höchsten Umhüllungsgrade erreicht. Die Bindemittel aus

AG 4, AG 18 und AG 22 zeigen tendenziell ein schlechteres Haftverhalten, wobei die Unterschiede grundsätzlich gering sind.

5.1.8 Auswahl von fünf Asphaltgranulaten

Das Untersuchungsprogramm sah vor, dass aus den zehn Asphaltgranulaten fünf für eine Rejuvenatorenzugabe ausgewählt werden sollten. AG 9 wurde zunächst aufgrund des starken Alterungsgrades mit ausgewählt. Im Gegensatz dazu wurde als wenig gealtertes Bitumen das AG 7 gewählt. An diesem würde aufgrund seines niedrigen Erweichungspunktes Ring und Kugel von 57,0 °C in der Praxis vermutlich keine Zugabe von Rejuvenatoren erfolgen. Da AG 9 höchstwahrscheinlich eine eher ungewöhnliche Ausnahme darstellt und im Regelfall kein derartig gealtertes Fräsgut anfällt, wurden für die Erprobung realer Umstände weiterhin die Asphaltgranulate AG 4 und AG 18 ausgewählt. Das fünfte Asphaltgranulat war AG 20, dessen Eigenschaften denen von üblicherweise anfallendem und in Asphaltsschichten wiederverwendetem Asphaltgranulat entsprechen.

5.2 Untersuchung der Rejuvenatoren

Bei der Darstellung der Untersuchungsergebnisse wurden die Rejuvenatoren anonymisiert.

5.2.1 Differenzierung der Rejuvenatoren

Zur besseren Beurteilung wurden die untersuchten Rejuvenatoren in drei (bzw. vier) Gruppen unterteilt. Diese Unterteilung erfolgt einerseits aufgrund der Wirkungsweise, andererseits in Abhängigkeit vom eigentlichen Verwendungszweck des Produktes. Die meisten Produkte sind rheologisch wirksam, einige wenige auch chemisch. Die rheologisch wirksamen Produkte können weiterhin unterteilt werden in Rejuvenatoren und Additive, die primär zu einem anderen Zweck produziert wurden, jedoch sekundär auch als Rejuvenator funktionieren sollen. Eine vierte Gruppe unter den Rejuvenatoren stellen die weichen Bitumen, die ebenfalls rheologisch wirken, dar. Tab. 5-5 enthält die Rejuvenatoren in anonymisierter Form in Abhängigkeit von ihrer Wirkungsgruppe.

Tab. 5-5: Anonymisierte Bezeichnung der untersuchten Rejuvenatoren

Rheologisch wirksam			Chemisch wirksam (C)
Rejuvenatoren (A)	Sonstige Produkte (B)	Weiche Bitumen	
A.1	B.1	160/220	C.1
A.2	B.2	250/330	C.2
A.3	B.3	500/650	C.3
A.4	B.4	650/900	
A.5*			
A.6*			
A.7*			
A.8			
A.9			
A.10			
A.11			
A.12			
A.13			

* = zusätzliche Modifizierung durch Wachs

5.2.2 Charakterisierung der Rejuvenatoren über Herstellerangaben

Zu den Rejuvenatoren lagen Nutzungshinweise und Produktdatenblätter seitens der Hersteller vor. Außerdem standen vereinzelt Werbesprospekte, in denen die Wirksamkeit der Produkte beschrieben wurde, zur Verfügung. Nachfolgend werden die anonymisierten Produkte, soweit über die Herstellerangaben möglich, charakterisiert. Um die Anonymität zu wahren, werden keine Literaturhinweise genannt. Die Quellen sind im Literaturverzeichnis (Teil 2, TU BS) nachzulesen.

A.1 bis A.4

Die Produkte A.1 bis A.4 stammen von einem Hersteller. Sie werden als Fluxöle bezeichnet, die aus raffiniertem Altöl aufbereitet werden. Lediglich A.2 soll rein natürlichen Ursprungs sein. Zum Teil wurden diese Fluxöle in der Vergangenheit bereits zum Anblasen (Fluxen) von Bitumen verwendet.

Auffällig ist, dass A.1 laut Produktdatenblatt einen geringen Gehalt an PAK aufweist.

Der Hersteller empfiehlt hier die Dosierung von 1 M.-% Rejuvenator je 1 °C zu erreichender Senkung des Erweichungspunktes Ring und Kugel.

A.5 bis A.7

Die Produkte A.5 bis A.7 sind wachsmodifizierte Äquivalente zu den o.g. Additiven. Durch die Zugabe von Wachs sollen neben der Verjüngung auch Effekte, wie z. B. die Senkung der Einbautemperatur, erzielt werden.

A.8

Der in den Niederlanden hergestellte Rejuvenator ist rein natürlichen Ursprungs und wird aus der Schale von Cashewkernen extrahiert. Ursprünglich wurde das Produkt zur Ergänzung von Lacken und Farbmitteln hergestellt. A.8 besteht laut Hersteller überwiegend aus Kohlenwasserstoffen in Form von Harzen und kleinen Mengen an Aromaten und besitzt somit eine bitumenähnliche Struktur. Mit der Wiederherstellung des Asphalt-Malten-Verhältnisses durch die Ergänzung von Harzen soll neben einer Verjüngung des Grundbitumens auch die erneute Alterung dessen reduziert werden.

A.9 und A.10

Die Produkte A.9 und A.10 stammen aus den USA und werden industriell aus Naturasphalt (Gilsonit) und weiteren öligen Bestandteilen hergestellt. Ähnlich wie A.8, wird auch bei diesen Produkten eine bitumenähnliche chemische Struktur beschrieben.

Der Hersteller unterscheidet A.9 und A.10 aufgrund der Intensität ihrer Wirkung.

Zur Ermittlung der erforderlichen Zugabemengen des Produktes muss der Hersteller mit Angaben zum Erweichungspunkt Ring und Kugel und der Nadelpenetration des im Asphaltgranulat befindlichen Bindemittels kontaktiert werden. Die Berechnung der Zugabemenge erfolgt nur durch den Hersteller persönlich.

A.11, A.12 und A.13

Diese drei Produkte eines Herstellers bestehen aus aromatischen Kohlenwasserstoffen. Die genaue Differenzierung zwischen den Rejuvenatoren ist nicht bekannt, jedoch können bei Verwendung der drei Produkte unterschiedliche maximale Zugabemengen an Asphaltgranulat dosiert werden. Nur A.13 eignet sich demnach für ein „100 %-iges“ Recycling.

C.1, C.2 und C.3

Die chemisch wirksamen Rejuvenatoren stammten von einem Hersteller aus Frankreich. Über die Beschaffenheit der Produkte wird nicht viel bekannt gegeben. Es wird jedoch erläutert, dass diese dem Asphaltgranulat in Form eines Granulates hinzugegeben werden und eine chemische Reaktion auslösen sollen, bei der die durch oxidative Alterung entstandenen Reaktionen wieder „rückgängig“ gemacht werden sollen und eine erneute Alterung verhindert werden soll.

Es wird zwischen Produkten zur Zugabe zu Asphaltgranulaten mit einfachem Straßenbaubitumen (C.3) und polymermodifiziertem Bitumen (C.1 und C.2) unterschieden. Der Hersteller weist darauf hin, dass durch diese Produkte die maximale Zugabemenge von Asphaltgranulat bei 70 M.-% liegt. Außerdem wird bei Verwendung von Asphaltgranulaten mit einem Erweichungspunkt Ring und Kugel deutlich über 60 °C die zusätzliche Nutzung von öligen Additiven empfohlen.

Der Hersteller gibt explizite Hinweise für die Art und Menge der Addition der Rejuvenatoren zum Asphaltgranulat.

Für die Zugabemengen je Tonne Asphaltgranulat gilt folgendes:

$$\text{C.1/C.2} \quad X = 50 * N_B \text{ [kg/t]}$$

$$\text{C.3} \quad X = 36 * N_{RC} * N_B \text{ [kg/t]}$$

mit: N_{RC} = Anteil des Asphaltgranulates am Mischgut

N_B = Bitumengehalt im Asphaltgranulat

B.1 bis B.4

Die Produkte B.1 bis B.4 stammen vom gleichen Hersteller. Alle Produkte sind ursprünglich zu einem anderen Zweck als der Bitumenverjüngung hergestellt worden. B.1 ist ein Additiv für die Produktion von Schaumbitumen und besteht größtenteils aus Rizinusöl. B.2 und B.3 sind Produkte, die sich in der Testphase befinden und aus Siloxanen bestehen. B.4 dient eigentlich als Additiv zur Herstellung von gummi-modifiziertem Bitumen. Der Einsatz dieser Produkte als Rejuvenatoren wird vom Hersteller als möglich angesehen, aus diesem Grund wurden diese in das Untersuchungsprogramm aufgenommen

5.2.3 Erweichungspunkt Ring und Kugel und Nadelpenetration der Gemische aus Rejuvenatoren und Straßenbaubitumen 20/30

Um eine Vergleichbarkeit zwischen den Produkten und somit eine objektive Bewertung dieser zu erzielen, wurden alle Additive einem frischen Bitumen 20/30 hinzugegeben. Die ermittelten Erweichungspunkte Ring und Kugel und Nadelpenetrationen sind in Bild 5-10 bis Bild 5-14 zusammengestellt.

In allen Darstellungen sind die Erweichungspunkte Ring und Kugel und Nadelpenetrationen im Verhältnis zu einander aufgezeichnet. Neben den Rejuvenatoren ist in allen Diagrammen das Referenzbitumen 20/30 als schwarzer quadratischer Punkt gekennzeichnet.

Je Additiv sind bis zu drei Punkte erkennbar (drei Zugabemengen), wobei allgemeingültig gesagt werden kann, dass mit zunehmender Zugabemenge auch der Abstand zur Referenzvariante steigt. So stellt der nächste Punkt zur Referenzvariante immer die Werte der kleinsten Zugabemenge dar und der entfernteste Punkt die Werte, die aus der maximalen erprobten Zugabemenge resultieren.

Durch diese Darstellungen konnten die jeweiligen Produkte einer Gruppe verglichen und aus diesen mindestens ein Additiv für den weiteren Untersuchungsablauf ausgewählt werden.

In Bild 5-10 sind die Werte der Gemische aus Bitumen 20/30 und den Rejuvenatoren A.1 bis A.7 zu dargestellt. Es ist deutlich erkennbar, dass die Erweichungspunkte Ring und Kugel mit zunehmender Zugabemenge bei allen Additiven sinken. Bei einigen Produkten sind Schwankungen bei der Nadelpenetration zu sehen. Dies resultiert vor allem aus der Tatsache, dass sich die Einmischung dieser Additive besonders bei Zugabemengen von 7,0 M.-% in den geringen Mengen als schwierig erwies und durchaus eine Phasentrennung, bzw. ein Absetzen von überschüssigem, nicht mehr einmischbarem Rejuvenator auf der Oberfläche des Gemisches stattfand. Insgesamt ist bei allen Mischungen eine Viskositätsminderung festzustellen. Die Wirkungsweise und -intensität ist als sehr unterschiedlich einzustufen.

Anders verhält es sich mit den wachsversetzten Additivkombinationen. Aufgrund des Wachsgehaltes liegen die ermittelten Untersuchungswerte deutlich über denen der Gemische ohne Wachs. Eine Viskositätsminderung ist hier aufgrund des Erweichungspunktes Ring und Kugel kaum feststellbar, bei einem Produkt erhöht sich der Erweichungspunkt sogar.

In Bild 5-11 sind die Untersuchungsergebnisse der weiteren rheologisch wirksamen Produkte dargestellt. Bei allen Produkten ist eine gleichmäßige Viskositätsminderung mit zunehmender Zugabemenge an Additiven zu erkennen. Bei Produkten gleicher Hersteller sind keine markanten Unterschiede in den Untersuchungsergebnissen zu erkennen, wie z. B. bei A.11 und A.12. Im Vergleich zu den Rejuvenatoren aus Bild 5-10, ist die gleichmäßige Viskositätsänderung in Bild 5-11 auch über die Nadelpenetration nachvollziehbar.

Die Erweichungspunkte Ring und Kugel und die Nadelpenetrationen der Gemische mit chemisch wirksamen Additiven sind in Bild 5-12 dargestellt. Es ist klar erkennbar, dass die Zugabe dieser Additive eine deutliche Viskositätserhöhung bewirkt. Dies kann durch die Tatsache, dass diese Additive pulverförmig sind und somit optisch keine Auflösung im heißen Bitumen erkennbar war, begründet werden. Eine rejuvenierende Wirkung ist hier nicht festzustellen.

Allerdings sollen chemisch wirkende "Rejuvenatoren" in erster Linie die durch Oxidation entstandenen Moleküle verändern. Eine Untersuchung dieser Additive durch Zugabe zu stark gealtertem Bitumen, welches eine deutliche oxidative Alterung erfahren hat, wäre somit sinnvoll, um die Wirksamkeit des Additivs zu erproben.

Die erwarteten Verhaltensweisen wurden bei Zugabe von weichem Bindemittel als Rejuvenator festgestellt (Bild 5-13). Allerdings sind die Differenzen in Erweichungspunkt Ring und Kugel und Nadelpenetration im Vergleich zur Referenzvariante deutlich niedriger als bei Verwendung von Rejuvenatoren mit gleichen Zugabemengen. Für die Mischung mit Bindemitteln aus dem Asphaltgranulat musste somit eine Erhöhung der Zugabemengen von weichem Bindemittel in Betracht gezogen werden.

Die Untersuchungsergebnisse der Mischungen mit Additiven, die in erster Linie nicht als "Rejuvenator" produziert wurden, sind in Bild 5-14 zusammengefasst. Eine Wirksamkeit, basierend dem auf Erweichungspunkt Ring und Kugel und der Nadelpenetration, ist bei

zwei der vier Produkte zu erkennen. B.4, ein kugelförmiges Granulat, steigert die Viskosität allerdings erheblich. In Anbetracht seiner ursprünglich vorgesehenen Einsatzform und seines Aggregatzustandes war dies allerdings vorhersehbar.

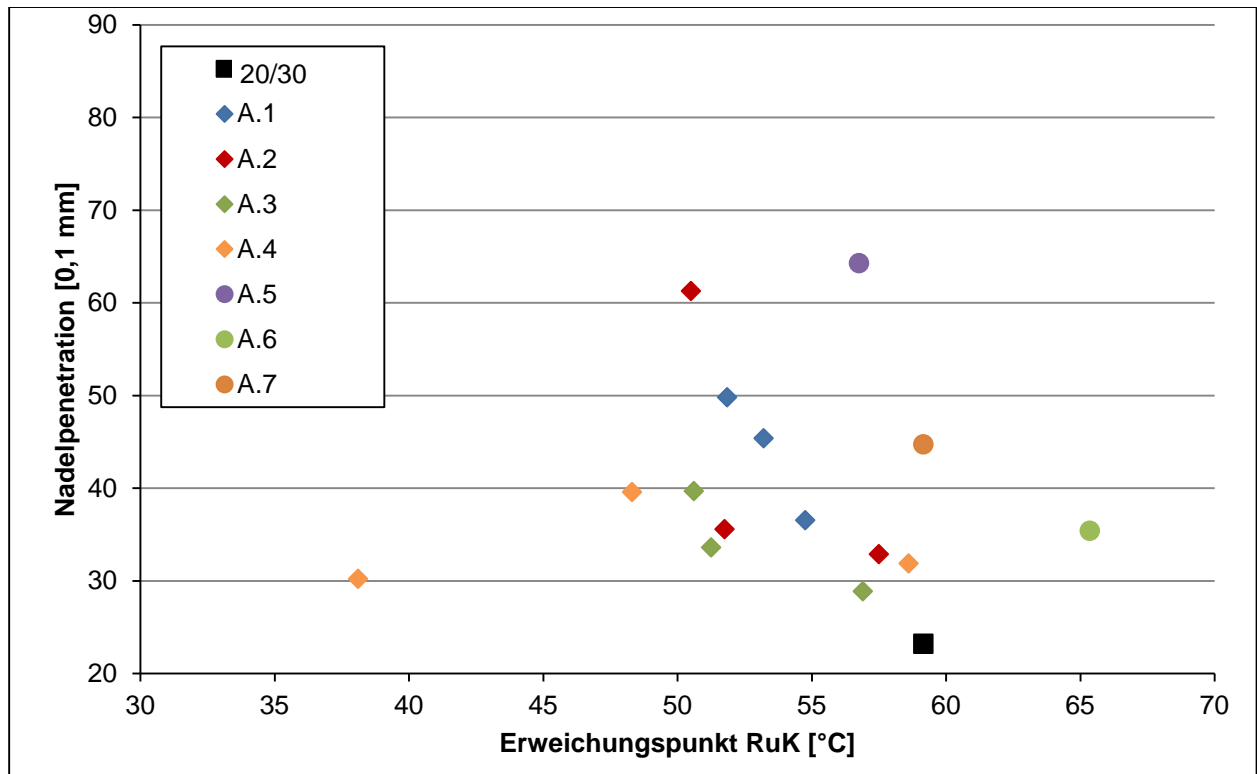


Bild 5-10: Erweichungspunkte Ring und Kugel und Nadelpenetrationen der Gemische aus Bitumen 20/30 und den rheologisch wirksamen Rejuvenatoren A.1 bis A.7

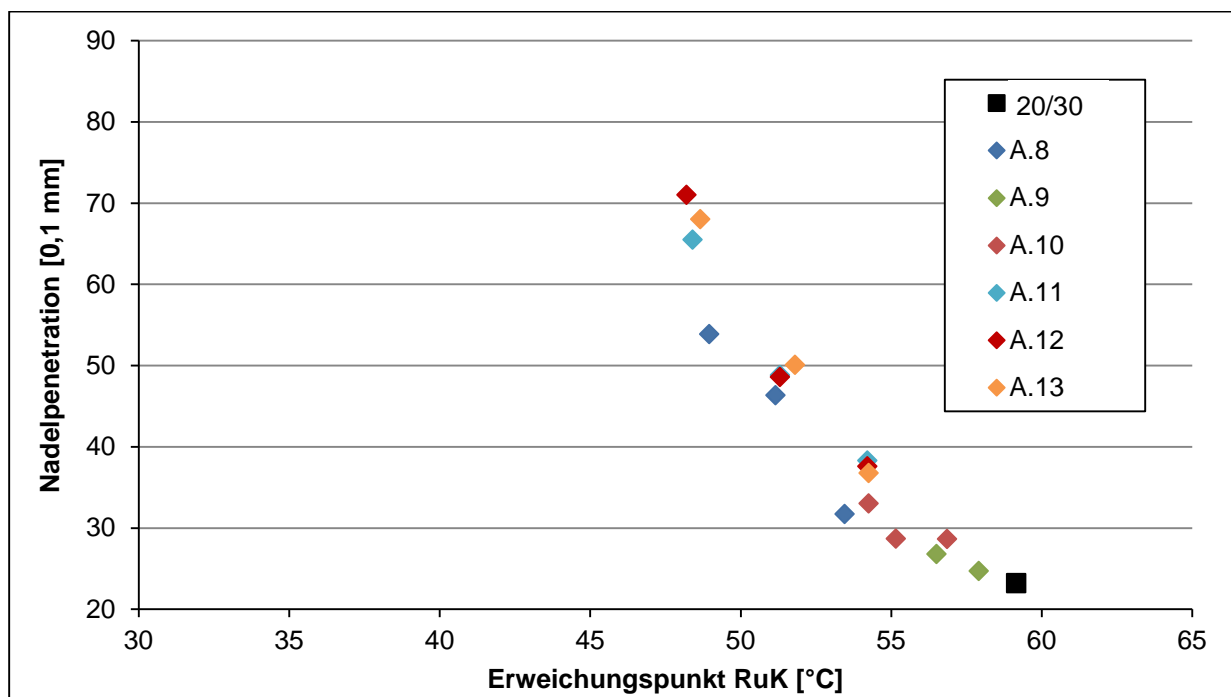


Bild 5-11: Erweichungspunkte Ring und Kugel und Nadelpenetrationen der Gemische aus Bitumen 20/30 und den rheologisch wirksamen Rejuvenatoren A.8 bis A.13

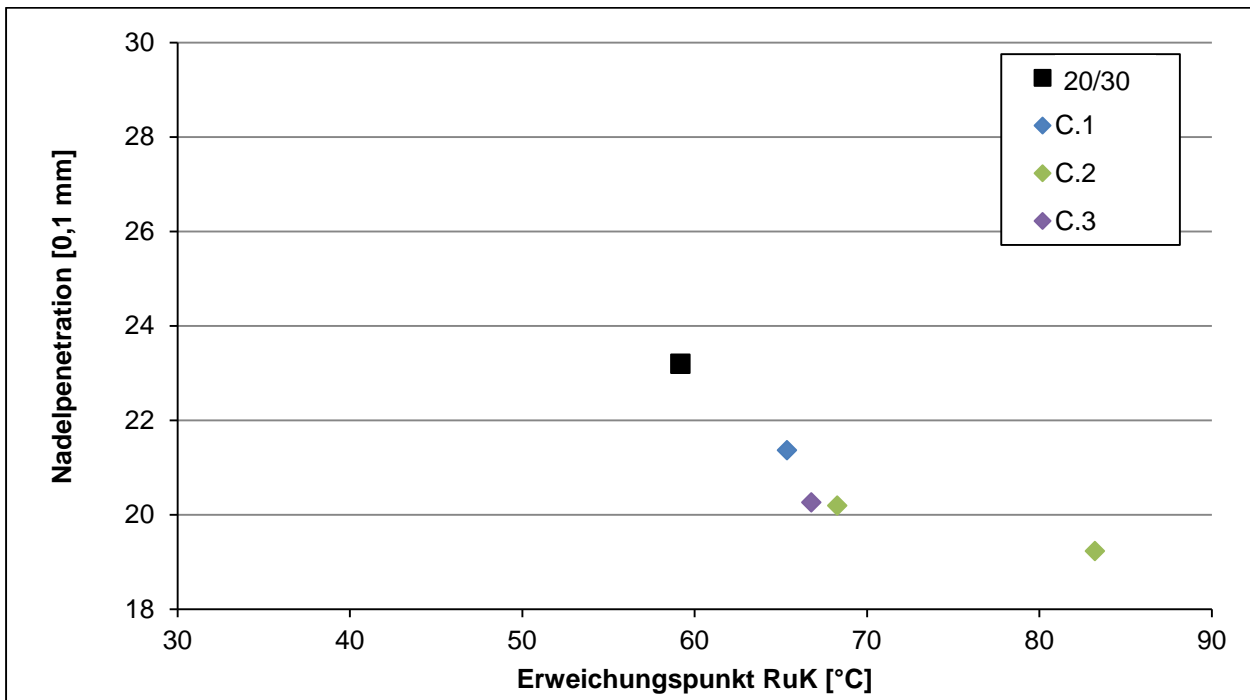


Bild 5-12: Erweichungspunkte Ring und Kugel und Nadelpenetrationen der Gemische aus Bitumen 20/30 und den chemisch wirksamen Rejuvenatoren C.1 bis C.3

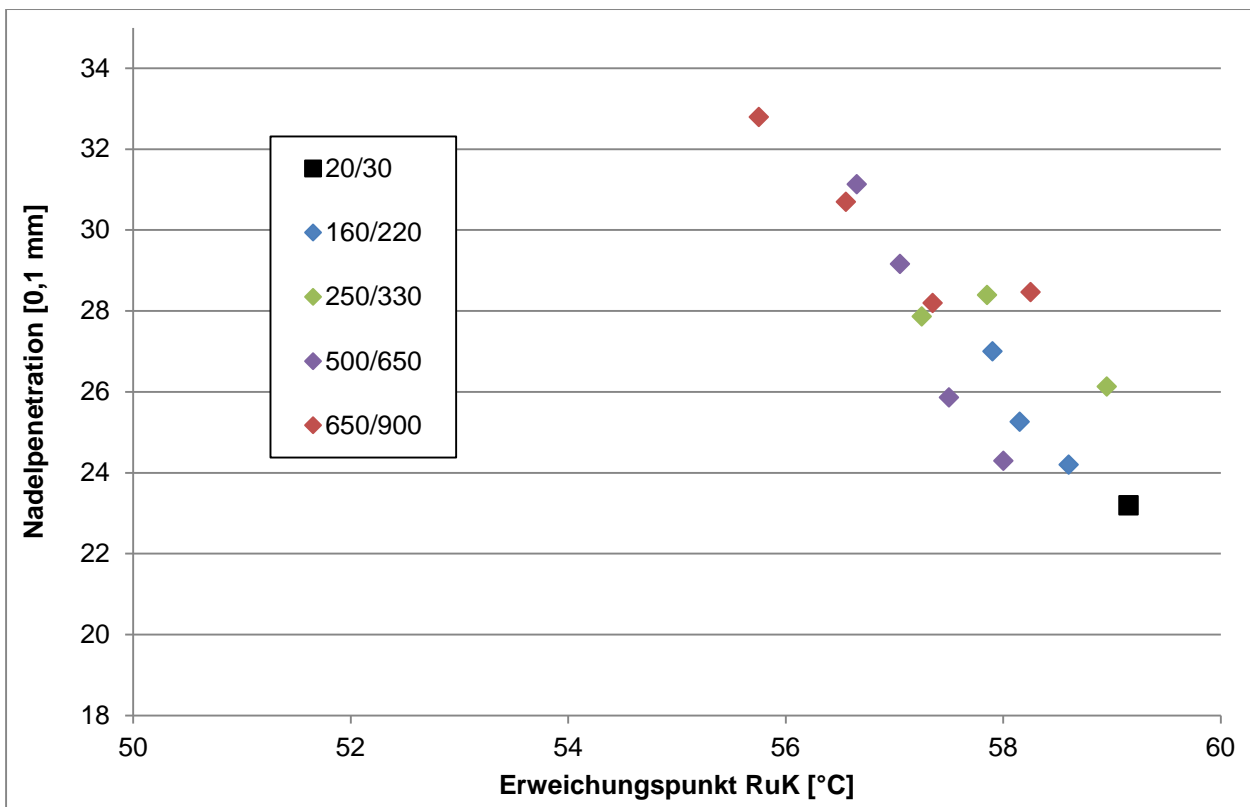


Bild 5-13: Erweichungspunkte Ring und Kugel und Nadelpenetrationen der Gemische aus Bitumen 20/30 und weichen Bindemitteln

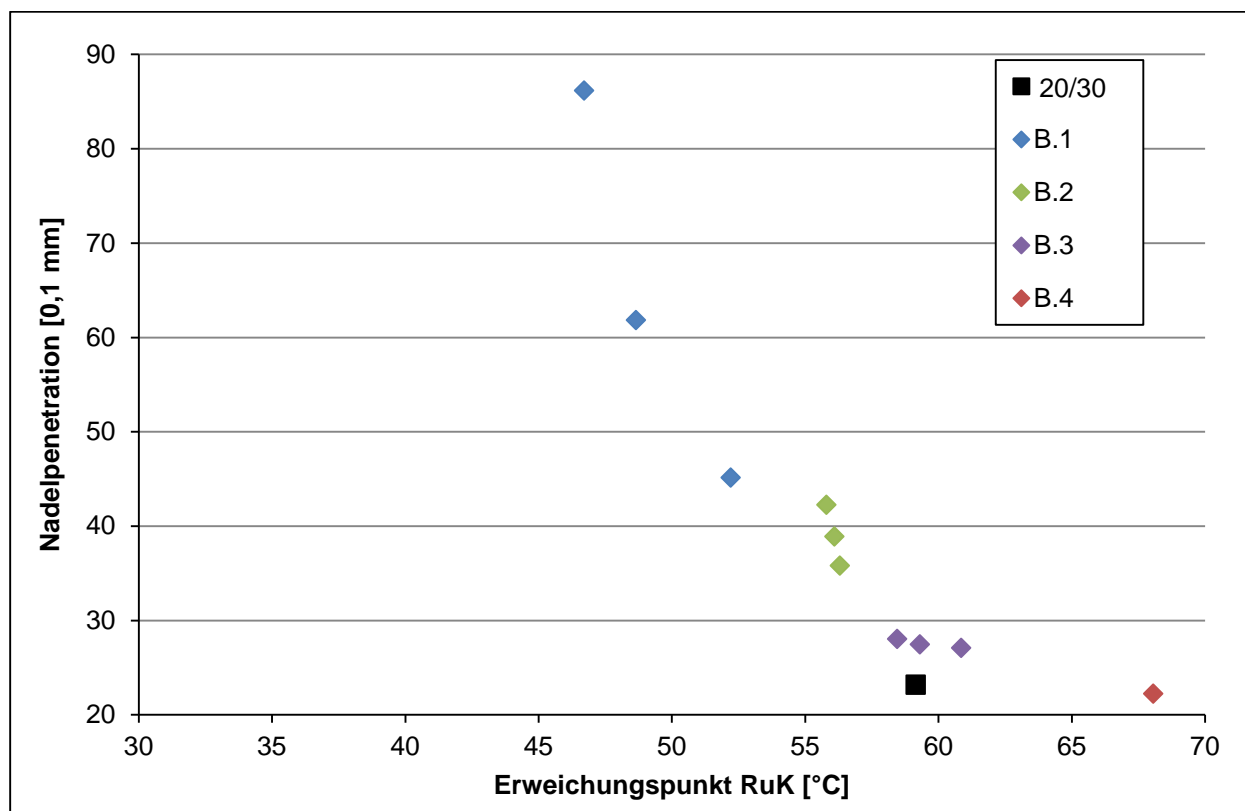


Bild 5-14: Erweichungspunkte Ring und Kugel und Nadelpenetrationen der Gemische aus Bitumen 20/30 und sonstigen Additiven

5.2.4 Auswahl von zehn Rejuvenatoren

Aus den untersuchten Rejuvenatoren und weichen Straßenbaubitumen wurden zehn Produkte für die Herstellung von Gemischen mit Bindemittel aus Asphaltgranulat ausgewählt. Hierbei wurde zunächst darauf geachtet, dass gleichmäßig viele Produkte aller vier Gruppen von Rejuvenatoren gewählt wurden. Da größtenteils mehrere Produkte von einem Hersteller stammen, wurde weiterhin versucht, mindestens ein Produkt jedes Herstellers weiter zu untersuchen. Insgesamt wurden so sieben auf dem Markt vorhandene Fertigprodukte der rheologisch wirksamen Rejuvenatoren, ein chemisch wirksamer Rejuvenator und zwei weiche Straßenbaubitumen (160/220 und 650/900) ausgewählt. Im weiteren Verlauf werden diese Produkte mit R 1 bis R 10 gekennzeichnet, wobei R 1 bis R 7 rheologisch wirksame Rejuvenatoren sind, R 8 und R 9 weiche Straßenbaubitumen und R 10 ein chemisch wirksamer Rejuvenator.

5.2.5 Prüfung der Dauerhaftigkeit der Gemische

Im Rahmen der Voruntersuchungen wurden über 60 Gemische aus Straßenbaubitumen 20/30 und verschiedenen Rejuvenatoren hergestellt. Diese Gemische wurden in offenen Gläsern, die in Kartons gesammelt wurden, unter Raumtemperaturbedingungen gelagert. Nach einer Dauer von ca. einem Jahr wurde an jeweils einer Probe der Gemische der zehn ausgewählten Rejuvenatoren und Straßenbaubitumen 20/30 der Erweichungspunkt Ring und Kugel bestimmt und mit dem Erweichungspunkt, der unmittelbar nach Herstellung des Gemisches ermittelt wurde, verglichen. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in Bild 5-15 dargestellt.

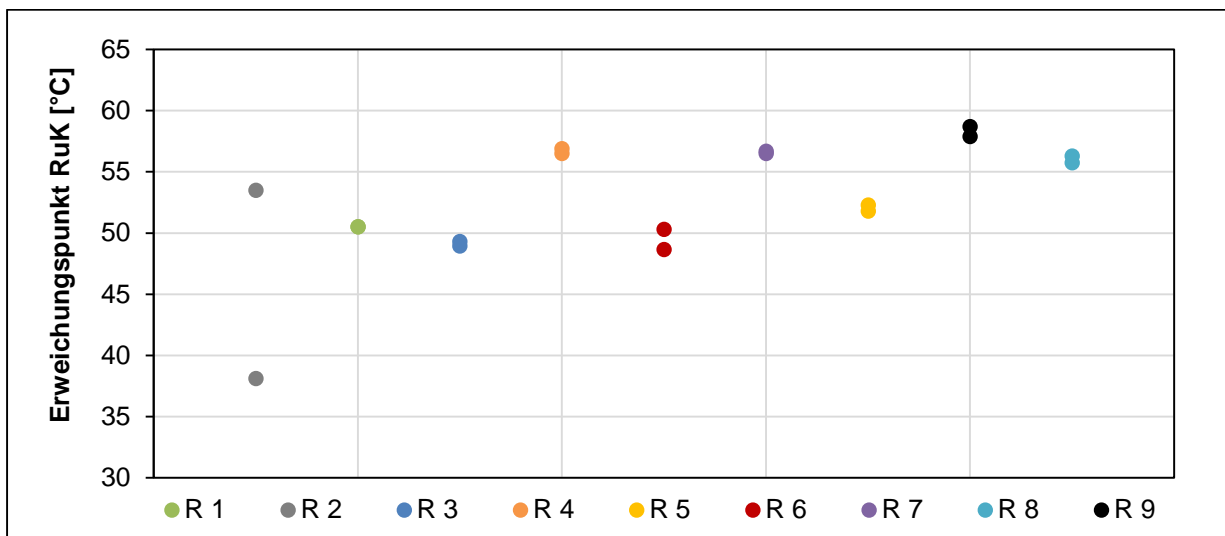


Bild 5-15: Erweichungspunkte Ring und Kugel der Gemische aus Straßenbaubitumen 20/30 und R 1 bis R 9 unmittelbar nach Herstellung und nach einjähriger Lagerung

Da die Gemische mit den Produkten R 1 und R 3 bis R 9 nur geringe Differenzen in den Erweichungspunkten aufweisen, die innerhalb der Prüftoleranzen liegen, kann von einer guten Dauerhaftigkeit der Gemische über den Beobachtungszeitraum ausgegangen werden. Nur bei R 2 ist eine signifikante Verringerung von 12 °C festzustellen. Dies lässt darauf schließen, dass in diesem Gemisch eine Phasentrennung stattfand und R 2 verdunstete.

5.2.6 Ermittlung der Zugabemengen der Rejuvenatoren zu den rückgewonnenen Bindemitteln der ausgewählten Asphaltgranulate

Für die zehn ausgewählten Rejuvenatoren wurden Zugabemengen zu den fünf ausgewählten Asphaltgranulaten bestimmt. Dies sollte basierend auf den Erfahrungswerten aus 5.2.3 unter Berücksichtigung der Herstellerangaben geschehen. Hierzu wurden in Bild 5-16 die an den Gemischen mit dem Straßenbaubitumen 20/30 ermittelten Erweichungspunkte Ring und Kugel in Abhängigkeit von der Zugabemenge dargestellt. Bei allen Rejuvenatoren ist eine lineare Änderung des Erweichungspunktes Ring und Kugel bei steigender Zugabemenge festzustellen. Aufgrund dessen wurden die Zugabemengen für die fünf rückgewonnenen Altbindemittel zunächst in Abhängigkeit vom jeweiligen Erweichungspunkt und dem zu erreichenden Erweichungspunkt inter- bzw. extrapoliert. Dies bestätigte die Anweisungen der Hersteller, die überwiegend ebenfalls eine Bestimmung der Zugabemenge über den Erweichungspunkt Ring und Kugel empfehlen. Es wurde angestrebt, durch die Rejuvenatorenzugabe bei allen Bindemitteln aus den Asphaltgranulaten physikalisch und chemisch den Zustand eines Straßenbaubitumens 50/70 nach [TL Bitumen-StB 07] zu erreichen.

Nicht immer waren die Ergebnisse aus den Gemischen mit dem Straßenbaubitumen 20/30 eindeutig, sodass nach der Untersuchung der Gemische mit der ersten Zugabemenge die Bestimmung der Zugabemengen in einem zweiten Schritt über rheologische Parameter mit Hilfe von DSR-Messungen erfolgte, auch, um letztlich eine optimale Zugabemenge bestimmen zu können.

Die Anforderungen an die konventionellen physikalischen Kennwerte eines 50/70 sind in Tab. 5-6 dargestellt.

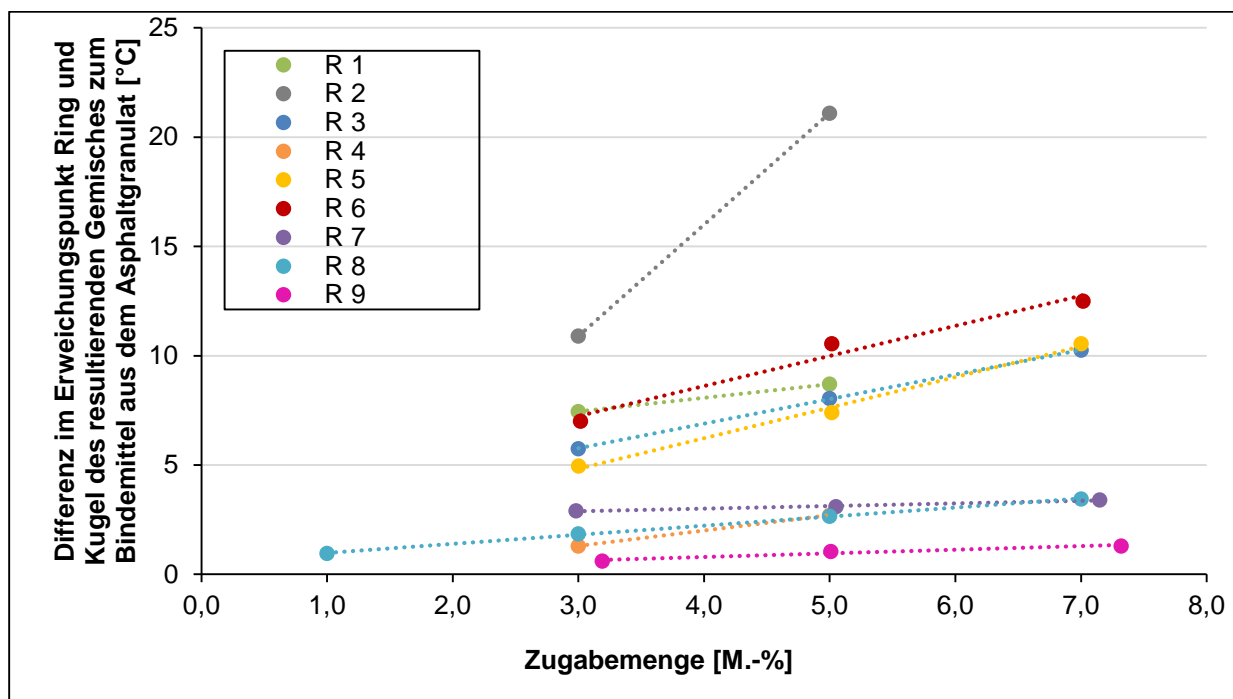


Bild 5-16: Resultierende Differenzen des Erweichungspunktes Ring und Kugel der einzelnen Gemische zum Bindemittel aus Asphaltgranulat in Abhängigkeit von der Zugabemenge

Tab. 5-6: Anforderungen an Straßenbaubitumen 50/70 nach [TL Bitumen-StB 07]

Bitumensorte	Erweichungspunkt Ring und Kugel [°C]	Nadelpenetration bei 25 °C [0,1 mm]
50/70	46,0 bis 54,0	50 bis 70

Die resultierenden Zugabemengen sind in Tab. 5-7 zusammengefasst. Hierbei fällt auf, dass für einige Produkte mit AG 9 eine Zugabemenge von bis zur vierfachen der Bitumenmenge (R 7) erforderlich wäre.

Dies ist weder technisch und noch wirtschaftlich sinnvoll. Von den drei rot markierten Rejuvenatoren wurde lediglich die Variante mit R 9 untersucht. Bei der Ermittlung der zweiten Zugabemenge wurde AG 9 durch AG 21 ersetzt (s. Kap. 5.2.9). Das AG 9 musste aufgrund seiner hohen Viskosität bei einer erhöhten Temperatur von 180 °C gemischt werden. Mit Ausnahme des Gemisches aus AG 9 und R 9 wurde grundsätzlich eine maximale Zugabemenge von 50 M.-% festgelegt. Die resultierenden Erweichungspunkte Ring und Kugel und die Nadelpenetrationen der zehn Gemischen aus Rejuvenatoren mit AG 4, AG 7, AG 9, AG 18, AG 20 und AG 21 sind qualitativ in Bild 5-17 (Zugabemenge 1) und in Bild 5-18 (Zugabemenge 2) dargestellt. Außerdem ist hier der Bereich, in dem die Anforderungen an ein Straßenbaubitumen 50/70 liegen, gekennzeichnet. Die quadratischen Markierungen zeigen jeweils die Werte der Bindemittel aus den Asphaltgranulaten ohne Zugabe und die runden Markierungen die Werte der rejuvenierten Gemische. Es ist zu erkennen, dass alle Rejuvenatoren eine Verminderung der Bindemittelhärte erreichen, was auch am Straßenbaubitumen 20/30 festgestellt wurde.

Tab. 5-7: Erforderliche Zugabemengen der Rejuvenatoren zu den Asphaltgranulaten AG 4, AG 7, AG 9, AG 18, AG 20 und AG 21

	AG 4	AG 7	AG 9	AG 18	AG 20	AG 4	AG 7	AG 18	AG 20	AG 21
	Zugabemenge 1 [M.-%] Δ EP RuK					Zugabemenge 2 [M.-%] DSR/ Äquiviskositätstemperatur				
R 1	24	3	40	25	14	9,5	5	10	10	13
R 2	24	3	40	20	10	15,5	11	23	13	25
R 3	20	5	40	15	10	12,5	5	13	13	16
R 4	31	5	40	35	19	27,5	10	38	25	30
R 5	20	3	30	18	10	18	5	20	15	17
R 6	20	3	35	25	15	15	8	20	18	21
R 7	20	7	400	25	15	22,5	15	15	18	16
R 8	50	20	120	50	40	39,5	32	45	42	50
R 9	50	10	80	45	35	35	10	43	35	45
R 10	3,6*	3,6*	3,6*	3,6*	3,6*	-	-	-	-	-

* = Herstellervorgabe

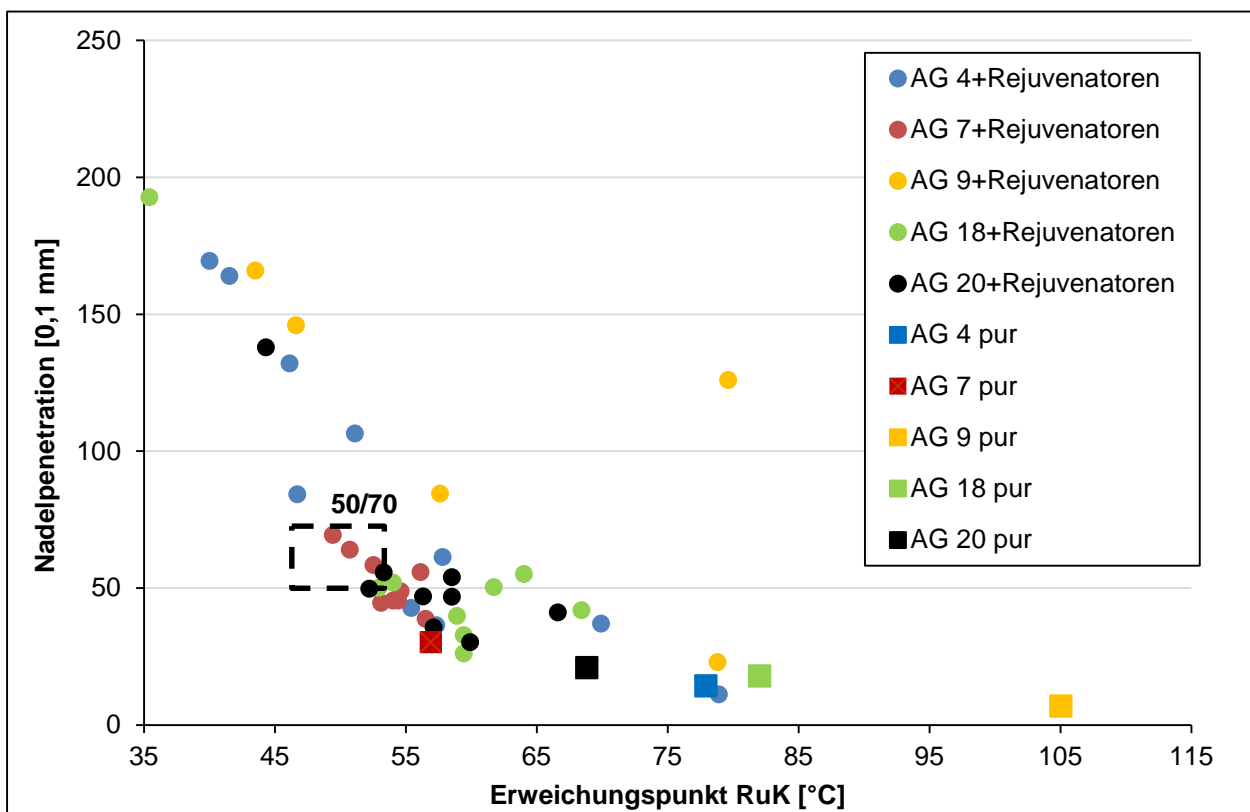


Bild 5-17: Qualitative Darstellung der Erweichungspunkte Ring und Kugel und Nadelpenetrationen der Gemische aus Rejuvenatoren und den Asphaltgranulaten AG 4, AG 7, AG 9, AG 18 und AG 20 sowie der Anforderungen an ein Straßenbaubitumen 50/70 (Zugabemenge 1)

Lediglich bei zwei Gemischen (AG 4 (1. Zugabemenge) und AG 20 (2. Zugabemenge)) war eine geringfügige Zunahme des Erweichungspunktes Ring und Kugel und eine Reduktion der Nadelpenetration (AG 4) festzustellen, bei allen weiteren Produkten wurde

der gewünschte Effekt erzielt. Allerdings werden die Anforderungen an ein Straßenbaubitumen 50/70, wie als Grundlage für die Ermittlung der Zugabemengen angenommen, überwiegend nicht erfüllt.

Weiterhin ist zu sehen, dass die Gemische mit AG 4 und AG 9 größere Streuungen in ihren resultierenden Nadelpenetrationen bzw. Erweichungspunkten Ring und Kugel aufzeigen, als die Gemische mit den Bindemitteln aus den anderen Granulaten. Schlussfolgernd bedeutete dies, dass eine Ermittlung der Zugabemenge für Rejuvenatoren anhand einer linearen Prognose des Erweichungspunktes unzutreffend ist und dass die zielgenaue Dosierung von Rejuvenatoren mit zunehmender Zugabemenge und variierendem Alterungsgrad deutlich komplexer ist. Vermutlich liefert die Bestimmung der Zugabemenge über rheologische Parameter (Zugabemenge 2) höhere Genauigkeiten für das Einstellen eines Erweichungspunktes, wobei die Anforderungen an die Nadelpenetration größtenteils nicht eingehalten werden können.

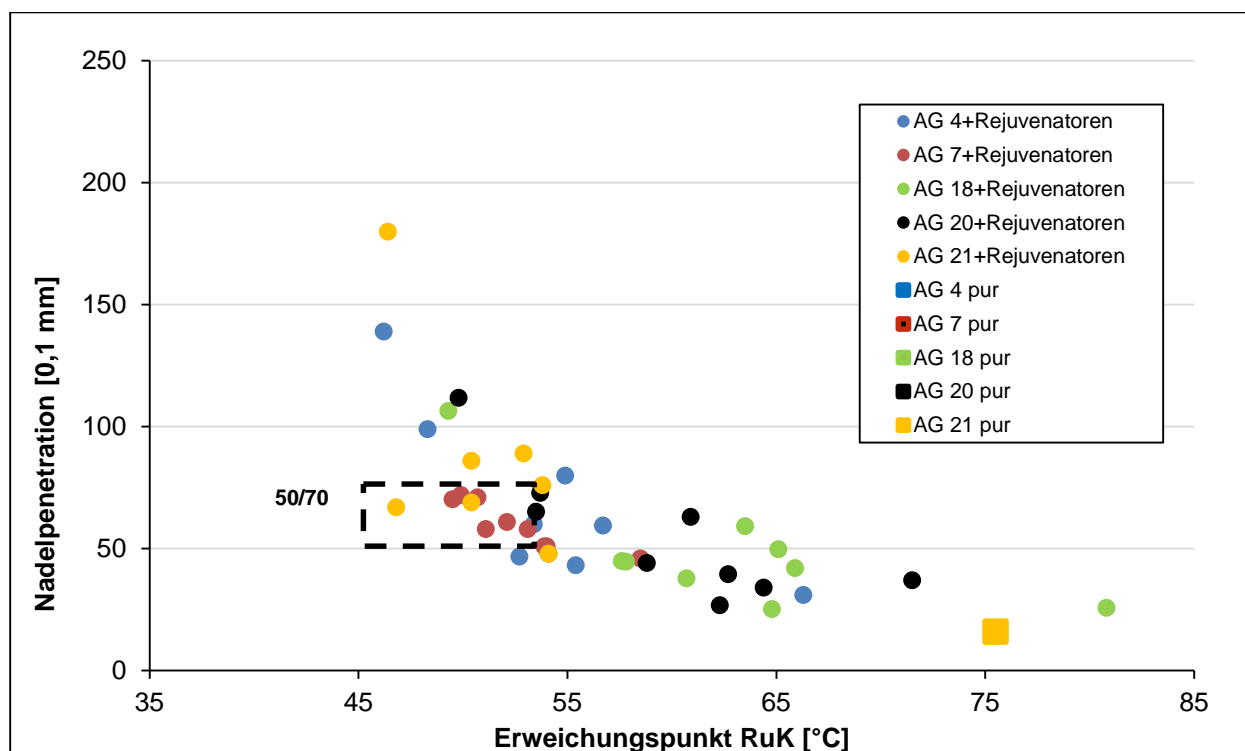


Bild 5-18: Qualitative Darstellung der Erweichungspunkte Ring und Kugel und Nadelpenetrationen der Gemische aus Rejuvenatoren und den Asphaltgranulaten AG 4, AG 7, AG 18, AG 20 und AG 21 sowie der Anforderungen an ein Straßenbaubitumen 50/70 (Zugabemenge 2)

Im weiteren Verlauf werden die Gemische mit zwei Zahlen in der Form X.Y bezeichnet. X ist hierbei von der Bezeichnung des Bindemittels aus Asphaltgranulat hergeleitet und Y der jeweils hinzugemischte Rejuvenator.

5.2.7 Untersuchung der Gemische aus Rejuvenatoren und AG 4

Das rückgewonnene Bindemittel aus AG 4 mit den zehn Rejuvenatoren und den beiden Zugabemengen ergab die in Tab. 5-8 und Tab. 5-9 zusammengefassten Ergebnisse für den Erweichungspunkt Ring und Kugel und die Nadelpenetration. Die grau hinterlegten Werte entsprechen nicht den Anforderungen an ein Straßenbaubitumen 50/70.

Eine Senkung des Härtegrades des Bindemittels aus AG 4 ist durch Anwendung der Rejuvenatoren 1 bis 9 grundsätzlich erfolgt, wie auch in Bild 5-16 und Bild 5-17 sichtbar wird.

R 10 (Probe 4.10) bewirkte hingegen eine Verhärtung des Bitumens. Dieses pulverförmige Additiv, welches chemisch wirken soll, reagierte nicht wie erwartet. Da diese Ergebnisse den Resultaten der Voruntersuchungen am Straßenbaubitumen 20/30 entsprachen, wurde dieser Rejuvenator bei den weiteren Untersuchungen nicht weiter verwendet.

Tab. 5-8: Erweichungspunkte Ring und Kugel (EP RuK) und Nadelpenetrationen (PEN) der Gemische aus den Rejuvenatoren 1 bis 10 und AG 4 (Zugabemenge 1)

Probe	Zugabemenge 1	EP RuK	PEN
	[M.-%]	[°C]	[0,1 mm]
AG 4	-	77,9	14,3
4.1	24,0	51,1	106,5
4.2	24,0	46,1	132,1
4.3	20,0	40,0	169,5
4.4	31,0	57,3	36,5
4.5	20,0	41,5	164,0
4.6	20,0	57,8	61,3
4.7	20,0	69,9	37,0
4.8	50,0	46,7	84,3
4.9	50,0	55,4	42,8
4.10	3,6	78,9	11,2

Tab. 5-9: Erweichungspunkte Ring und Kugel (EP RuK) und Nadelpenetrationen (PEN) der Gemische aus den Rejuvenatoren 1 bis 9 und AG 4 (Zugabemenge 2)

Probe	Zugabemenge 2	EP RuK	PEN
	[M.-%]	[°C]	[0,1 mm]
AG 4	-	77,9	14,3
4.1	9,5	56,7	59,5
4.2	15,5	48,3	99,1
4.3	12,5	52,7	46,8
4.4	27,5	55,4	43,2
4.5	18,0	46,2	139,0
4.6	15,0	54,9	80,0
4.7	22,5	66,3	31,2
4.8	39,5	54,1	48,0
4.9	35,0	53,4	60,4

Außerdem fällt zunächst auf, dass bei der Zugabemenge 1 die Gemische 4.1, 4.2 und 4.8 nur die Anforderung an den Erweichungspunkt, aber nicht die an die Nadelpenetration erfüllen. Bei Gemisch 4.6 liegt die Nadelpenetration im gewünschten Bereich, der Erweichungspunkt Ring und Kugel jedoch nicht. Bei der Zugabemenge 2 erfüllt das Gemisch 4.9 die Anforderungen an ein Straßenbaubitumen 50/70, während die Gemische 4.2, 4.3, 4.5 und 4.6 nur die Anforderungen an den Erweichungspunkt erfüllen. Gemisch 4.1 hingegen liegt im Bereich der geforderten Nadelpenetration.

Grundsätzlich ist zu erkennen, dass die optimale Zugabemenge der Rejuvenatoren vermutlich nur unzureichend über die Parameter Erweichungspunkt Ring und Kugel ermittelt werden kann.

Die Gemische wurden ergänzend im DSR und BBR untersucht sowie die Kraftduktilität bestimmt. Auf die Untersuchung von 4.10 wurde aufgrund der nicht erfolgten Verjüngung verzichtet. Die Ergebnisse der Untersuchungen mit dem DSR sind im folgenden als Black-Diagramm dargestellt.

Nach bisherigen Erkenntnissen kann der verjüngende Effekt, der durch die Rejuvenatoren auf rheologischer Ebene erzielt werden soll, in einem Black-Diagramm umfassender und differenzierter dargestellt werden. Im Black-Diagramm wird der komplexe Schermodul gegen den Phasenwinkel aufgetragen. Hierdurch können die rheologischen Eigenschaften unabhängig von Temperatur oder Frequenz bewertet werden [LEISUEUR, 1996].

Der Vorteil der Darstellung im Black-Diagramm ist somit ein sortenunabhängiger Vergleich der rheologischen Kenndaten (Verhältnis zwischen elastischen und viskosen Anteilen). Bei Bitumenproduktionen aus einem Rohöl liegen die Kurvenverläufe der unterschiedlichen Sorten weitgehend übereinander auf einer Linie. Die unterschiedlichen Härtegrade der Bitumensorten lassen sich durch einen verschobenen Beginn bzw. verschobenes Ende der einzelnen Kurven erkennen. Somit kann der Phasenwinkel bei einem definierten komplexen Schermodul ein sortenunabhängiger Kennwert sein.

Eine gleichmäßig verlaufende Kurve beschreibt im Black-Diagramm ein unmodifiziertes Bitumen, wohingegen Ungleichmäßigkeiten im Kurvenverlauf auf eine Modifizierung des Bitumens hindeuten. [PLANCHE et.al., 1996]

Die (oxidative) Alterung von Bitumen äußert sich durch das Ansteigen des komplexen Schermoduls und die Senkung des Phasenwinkels. Rheologisch wird somit die Steifigkeit des Bitumens erhöht und der elastische Anteil dessen vergrößert. In der Regel gilt, dass eine Verschiebung einer Kurve im Black-Diagramm zu einem niedrigeren Phasenwinkel bei gleichbleibendem Schermodul die Bitumenalterung beschreibt. [AIREY, 1998] Eine Verjüngung auf rheologischer Ebene müsste sich folglich durch eine Erhöhung des Phasenwinkels bei gleichbleibendem Schermodul äußern.

Die Lage der Kurve des Bitumens 50/70 im Vergleich zu der des AG 4 in Bild 5-19 und Bild 5-20 bestätigt dies. In Bild 5-20 sind die komplexen Schermoduln und Phasenwinkel der Gemische 4.1 bis 4.9, sowie des AG 4 und eines 50/70 einander für die Zugabemenge 1 und in Bild 5-20 für die Zugabemenge 2 gegenübergestellt. Bei Betrachtung der Kurvenverläufe der einzelnen Gemische wird deutlich, dass nicht alle Rejuvenatoren den erwarteten Effekt auf das Bindemittel aus dem Granulat ausüben und sich unabhängig von den beiden Zugabemengen Tendenzen in der Wirkungsweise bestätigen. Die Verläufe der Gemische 4.1, 4.2, 4.6 und 4.7 deuten in beiden Diagrammen vielmehr auf eine „Alterung“ auf rheologischer Ebene hin. Gemisch 4.7 weist zudem einen ungewöhnlichen und ungleichmäßigen Kurvenverlauf auf. Dieser könnte in einer Entmischung der Probe begründet sein. Bei Betrachtung der Silikonformen, in denen die DSR-Proben vorbereitet wurden, konnte ein öliger Rückstand festgestellt werden (Bild 5-19), welcher auf eine Phasentrennung im Gemisch hindeutete. In Anbetracht dessen, dass der Rejuvenator ursprünglich farblos war, lag außerdem die Vermutung nahe, dass das Grundbitumen aus AG 4 in diesem Gemisch angelöst wurde. Ähnliches Verhalten wurde auch bei Gemisch 4.6 festgestellt. Hier äußerte sich die visuell erkennbare Phasentrennung aber nicht in den Untersuchungsergebnissen.

Gemisch 4.5 entspricht annähernd dem Verlauf des AG 4, hier hat keine rheologische Verlagerung der Kurve stattgefunden. Bei einer äquivalenten Steifigkeitsbetrachtung

($G^* = 100 \text{ kPa}$) schwanken die Phasenwinkel der rejuвениerten Bindemittel insgesamt zwischen 50 und 73 °.



Bild 5-19: Zur Herstellung von DSR-Proben des Gemischs 4.7 genutzte Silikonformen

Eine Verschiebung der Kurve in die Richtung typischer frischer Bitumen ist nur bei den vier Gemischen 4.3, 4.4, 4.8 und 4.9 erkennbar, so dass diese einen rheologisch verjüngenden Effekt haben. Gemisch 4.3 erreicht hierbei den gewünschten Zustand eines Straßenbaubitumens 50/70 bei Zugabemenge 1 am besten. Die Kurven der Gemische 4.3, 4.4, 4.8 und 4.9 verlaufen ähnlich bzw. nahezu parallel zu der des Bindemittels aus AG 4.

Eine Verjüngung aus rheologischer Sicht wird am AG 4 somit nur durch die beiden weichen Straßenbaubitumen R 8 und R 9 und die Rejuvenatoren R 3 und R 4 erreicht.

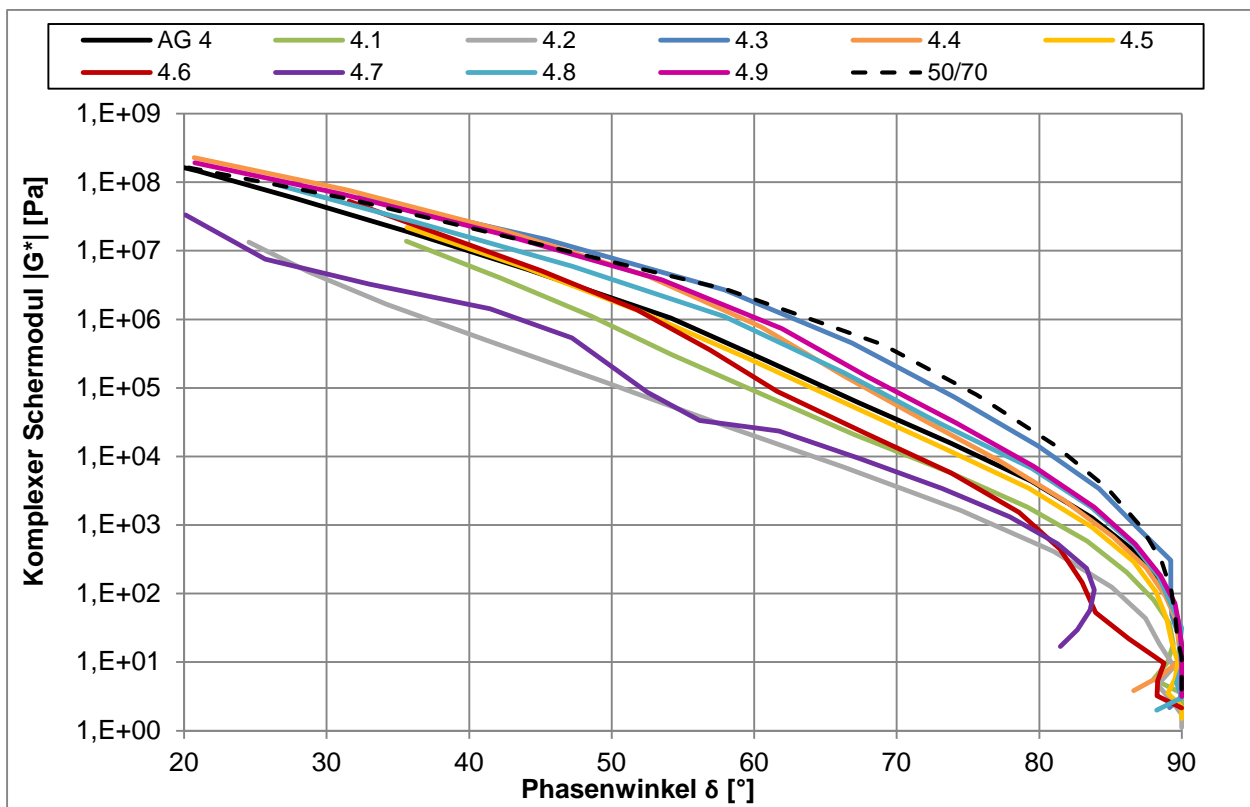


Bild 5-20: Black-Dialogramm der Gemische mit AG 4 (Zugabemenge 1) sowie die Referenzwerte eines 50/70

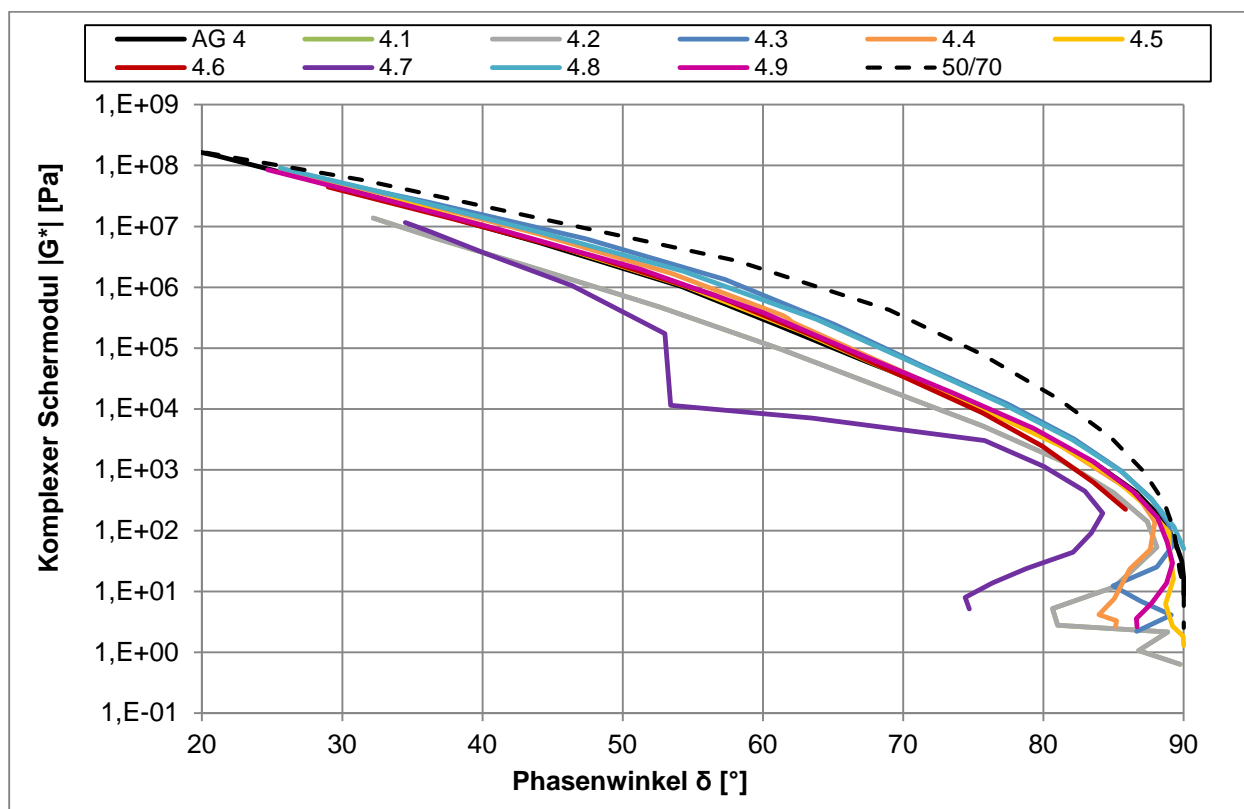


Bild 5-21: Black-Diagramm der Gemische mit AG 4 (Zugabemenge 2) sowie die Referenzwerte eines 50/70

Das Kälteverhalten der Gemische wurde im BBR untersucht. Die Gemische 4.6 und 4.7 wurden aufgrund der nicht plausiblen Ergebnisse im DSR (4.7) und einer visuell offensichtlichen Phasentrennung nicht geprüft. Die Biegekriechsteifigkeiten sind in Tab. 5-10 und Tab. 5-11 zusammengefasst. Die Untersuchungen wurden bei den Temperaturen -10 °C , -16 °C und -25 °C durchgeführt. Zum Vergleich sind zusätzlich die Biegekriechsteifigkeiten am Bitumen aus AG 4 aufgeführt. Wiederum lassen sich unabhängig von der Zugabemenge generelle Aussagen treffen. Die gemessenen Biegekriechsteifigkeiten der Gemische 4.1, 4.2 und 4.5 waren bei -25 °C Prüftemperatur so niedrig, dass auf eine Untersuchung dieser Gemische bei den beiden anderen Temperaturen verzichtet wurde. Die Ergebnisse in Tab. 5-10 und Tab. 5-11 lassen erkennen, dass die Rejuvenatoren auch eine Senkung der Steifigkeit im Tieftemperaturbereich bewirken, die bei den Gemischen 4.1, 4.2 und 4.5 bei einer Prüftemperatur von -25 °C besonders stark und bei der gleichen Temperatur beim Gemisch 4.4 am wenigsten ausgeprägt ist.

Bei Betrachtung der Prüfbalken der Gemische 4.1 und 4.2 nach der Untersuchung wurde deutlich, dass diese Gemische kein bitumenähnliches Verhalten aufwiesen.

Während die Viskosität von Bitumen temperaturabhängig ist und bei Tieftemperaturen ein zunehmend sprödes Verhalten aufweist, sodass ein Bitumenbalken durch leichten Druck zerbricht, konnten die Biegebalken der Gemische 4.1 und 4.2 auch bei sehr niedrigen Temperaturen durchgebogen werden (siehe dazu Bild 5-24 und Bild 5-25).

Die Rejuvenatoren R 1 und R 2 verhalten sich somit nicht bitumenähnlich. Dies ist durch ihre ölige Substanz und eine vermeintlich unzureichende Homogenisierbarkeit in Bitumen zu begründen. Die m-Werte der Gemische sowie des Bitumens aus dem Granulat AG 4 sind in Bild 5-22 Bild 5-23 in Abhängigkeit von der Temperatur dargestellt.

Tab. 5-10: Biegekriechsteifigkeiten der Gemische mit AG 4 und Rejuvenatoren (Zugabemenge 1)

Gemisch	Biegekriechsteifigkeit [MPa]		
	-25 °C	-16 °C	-10 °C
AG 4	849	381	223
4.1	33	-*	-*
4.2	32	-*	-*
4.3	116	37	-*
4.4	779	206	126
4.5	57	-*	-*
4.8	289	82	15
4.9	614	231	131

* = nicht bestimmt worden

Tab. 5-11: Biegekriechsteifigkeiten der Gemische mit AG 4 und Rejuvenatoren (Zugabemenge 2)

Gemisch	Biegekriechsteifigkeit [MPa]		
	-25 °C	-16 °C	-10 °C
AG 4	849	381	223
4.1	47	-*	-*
4.2	25	-*	-*
4.3	327	102	54
4.4	760	199	111
4.5	63	-*	-*
4.8	380	98	32
4.9	222	61	15

* = nicht bestimmt worden

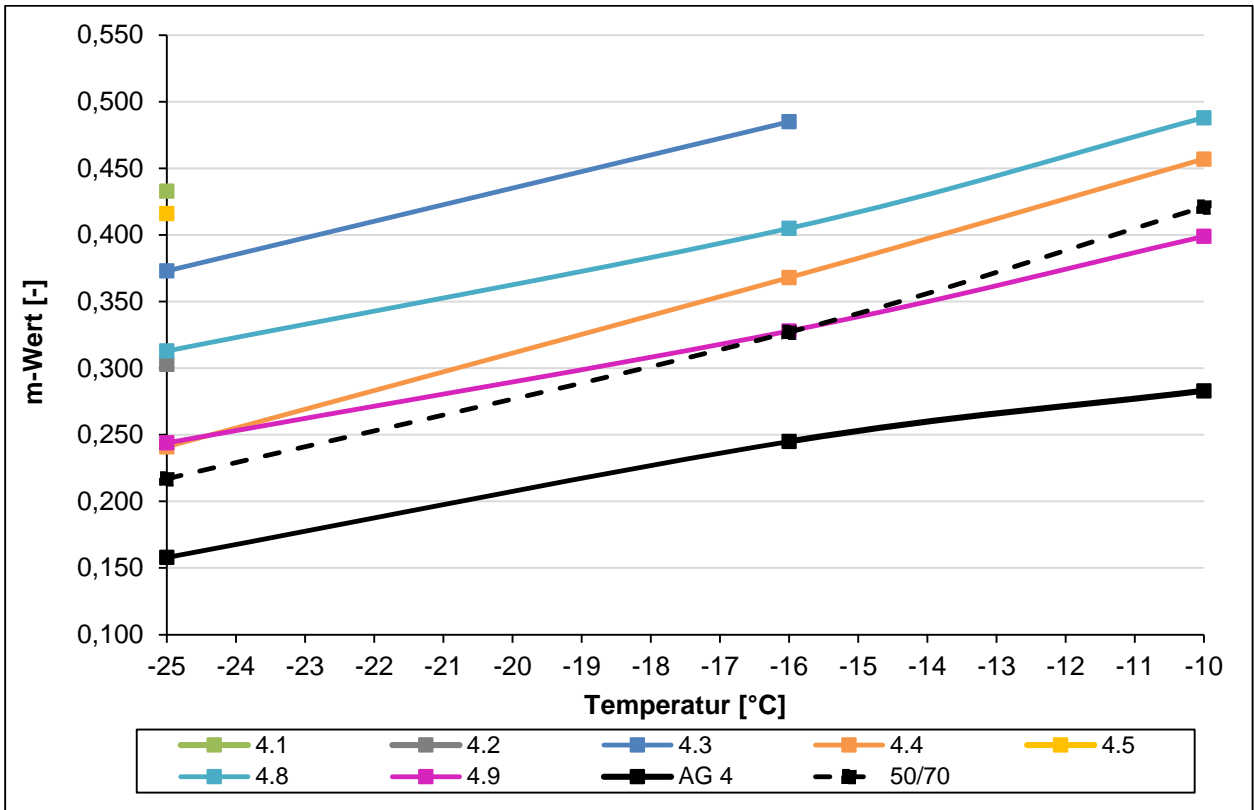


Bild 5-22: m-Werte der Gemische 4.1 bis 4.9, des Bindemittels aus AG 4 und eines 50/70 (Zugabemenge 1)

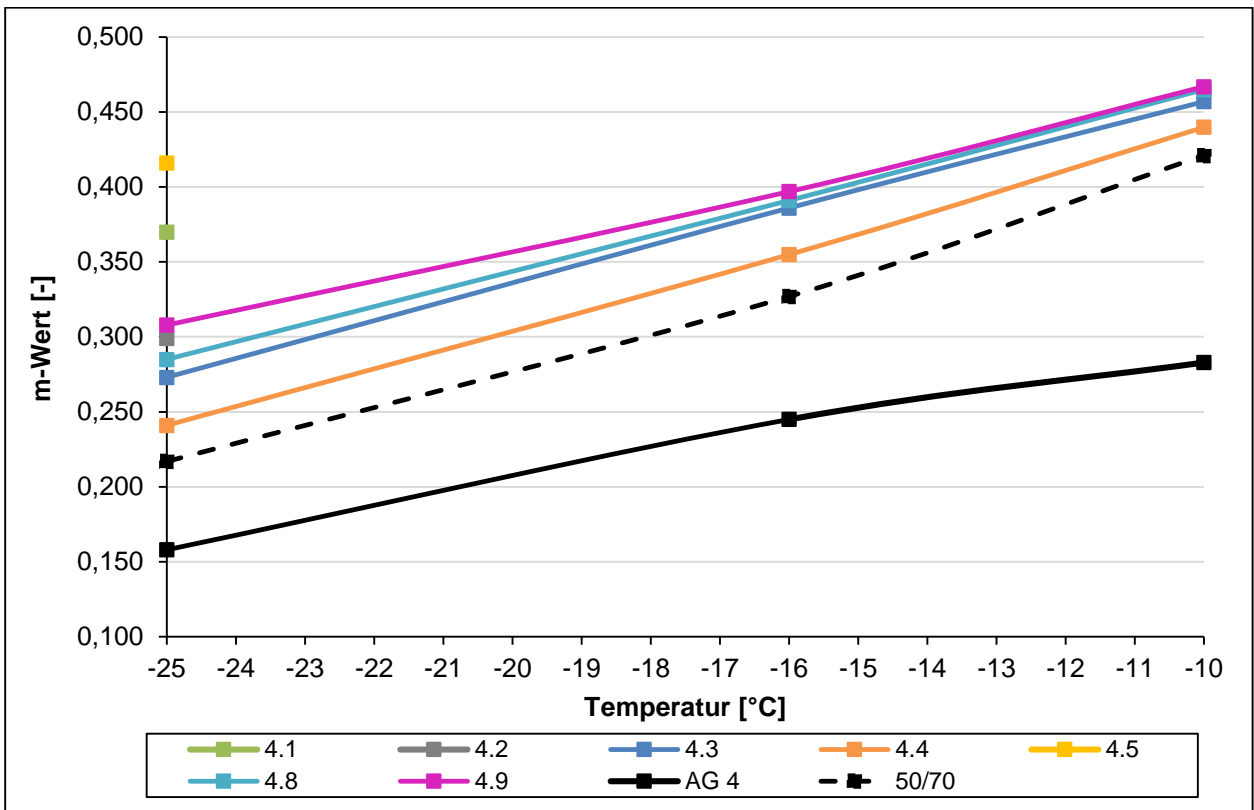


Bild 5-23: m-Werte der Gemische 4.1 bis 4.9, des Bindemittels aus AG 4 und eines 50/70 (Zugabemenge 2)



Bild 5-24: Biegebalken des Gemisches 4.2 unmittelbar nach Prüfung bei -25 °C



Bild 5-25: Biegebalken des Gemisches 4.1 unmittelbar nach Prüfung bei -25 °C

Des Weiteren wurden die Kraftduktilitäten der Gemische (mit Ausnahme von 4.7 aufgrund der Phasentrennung) bei 15 °C bestimmt. Die Ergebnisse für die maximale Zugkraft und die Formänderungsarbeit sind für die beiden Zugabemengen in Tab. 5-12 und in Tab. 5-13 zusammengestellt.

Wie bereits bei den anderen Untersuchungen unterscheiden sich zwar die Ergebnisse aufgrund der Zugabemengen, dennoch lassen sich generelle Aussagen über die Wirksamkeit der verwendeten Rejuvenatoren treffen.

Frischbitumen hat in der Regel einen geringen Verformungswiderstand, was gleichbedeutend mit einer geringen Viskosität ist. Durch Alterungsprozesse entsteht bei steigender Viskosität auch ein höherer Verformungswiderstand. Dies ist durch eine steigende maximale Zugkraft zu erkennen. Außerdem sinkt die Dehnungslänge des Bitumens, d.h. es reißt schneller. Durch die Zugabe von Rejuvenatoren sollte folglich idealerweise die maximale Zugkraft gesenkt werden und die Dehnungslänge bis zum Fadenriss erhöht werden.

Tab. 5-12: Ergebnisse der Kraftduktilitätsprüfung für Gemische mit AG 4 (Zugabemenge 1)

Gemisch	Max. Zugkraft	Formänderungsarbeit		
	[N]	E'_{ges} [J/cm ²]	E'_{0-200} [J/cm ²]	$E_{200-400}$ [J/cm ²]
AG 4	45,0	3,17	3,07	0,10
4.1	5,57	0,53	0,46	0,07
4.2	4,97	0,41	0,37	0,04
4.3	21,33	1,67	1,55	0,12
4.4	13,56	1,22	1,11	0,11
4.5	2,67	0,22	0,18	0,04
4.6	4,01	0,32	0,30	0,02
4.8	20,55	1,55	1,38	0,17
4.9	16,98	1,41	1,33	0,08

Tab. 5-13: Ergebnisse der Kraftduktilitätsprüfung für Gemische mit AG 4 (Zugabemenge 2)

Gemisch	Max. Zugkraft	Formänderungsarbeit		
	[N]	E'_{ges} [J/cm ²]	E'_{0-200} [J/cm ²]	$E_{200-400}$ [J/cm ²]
AG 4	45,0	3,17	3,07	0,10
4.1	5,01	0,45	0,39	0,06
4.2	4,89	0,39	0,35	0,04
4.3	17,51	1,40	1,24	0,16
4.4	12,54	1,24	1,14	0,10
4.5	2,88	0,25	0,22	0,03
4.6	4,18	0,29	0,28	0,01
4.8	17,82	1,38	1,26	0,12
4.9	13,02	0,92	0,90	0,02

Für die Gemische 4.1, 4.2, 4.5 und 4.6 wurden eine sehr geringe max. Zugkraft mit $\leq 5,57$ N und geringe Formänderungsarbeiten aufgezeichnet. Diese Werte spiegeln wie bei den Untersuchungen im BBR keine bitumenähnlichen Verhaltensweisen wieder, wobei dies bei dem Gemisch 4.6 aus der augenscheinlichen Phasentrennung resultierte. Die Gemische 4.3, 4.4, 4.8 und 4.9 zeigen in der Kraftduktilitätsprüfung eine signifikante Reduzierung der maximale Zugkraft gegenüber AG 4 und eine hinreichende Streckbarkeit (> 400 mm), was auch im Bild 5-26 und Bild 5-27 deutlich wird, welche zusätzlich den Kurvenverlauf eines Straßenbaubitumens 50/70 enthalten.

Die rheologische Wirksamkeit der Rejuvenatoren R 3, R 4, R 8 und R 9 kann somit auch durch diesen Versuch bestätigt werden.

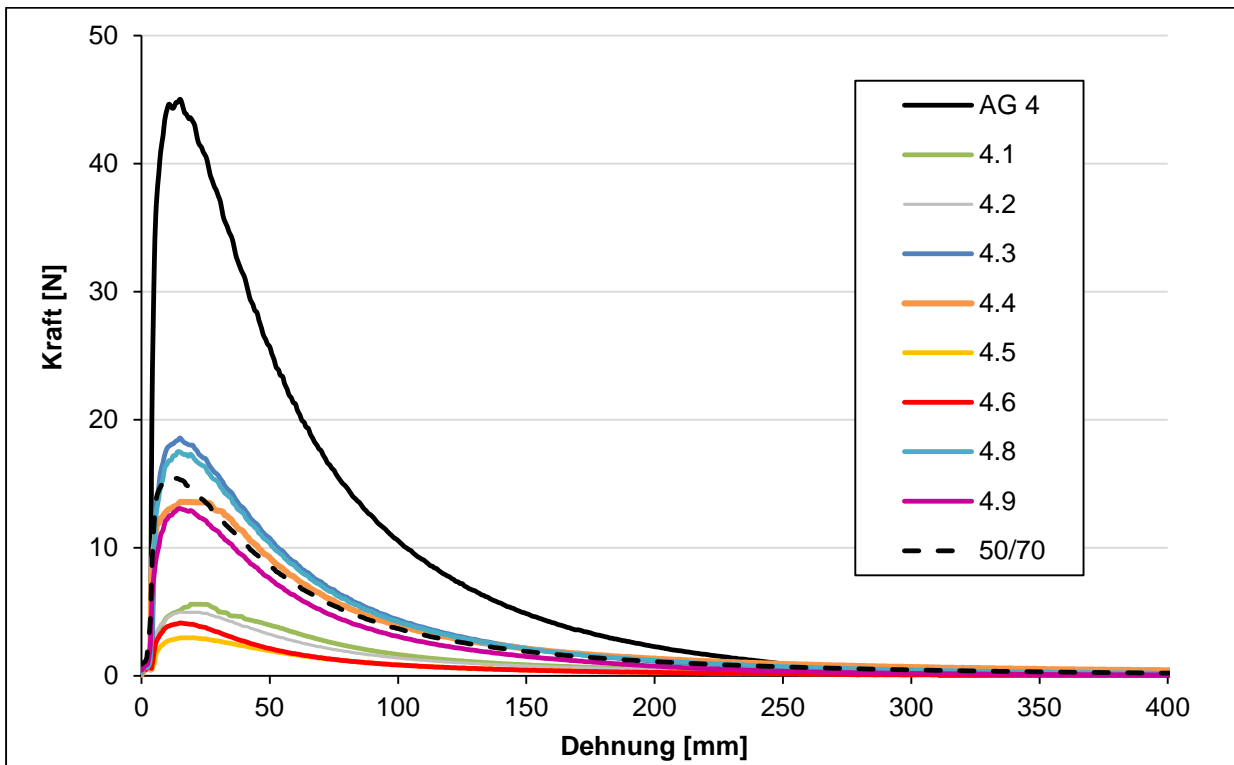


Bild 5-26: Kraft-Dehnungs-Kurven der Gemische mit AG 4 (Zugabemenge 1)

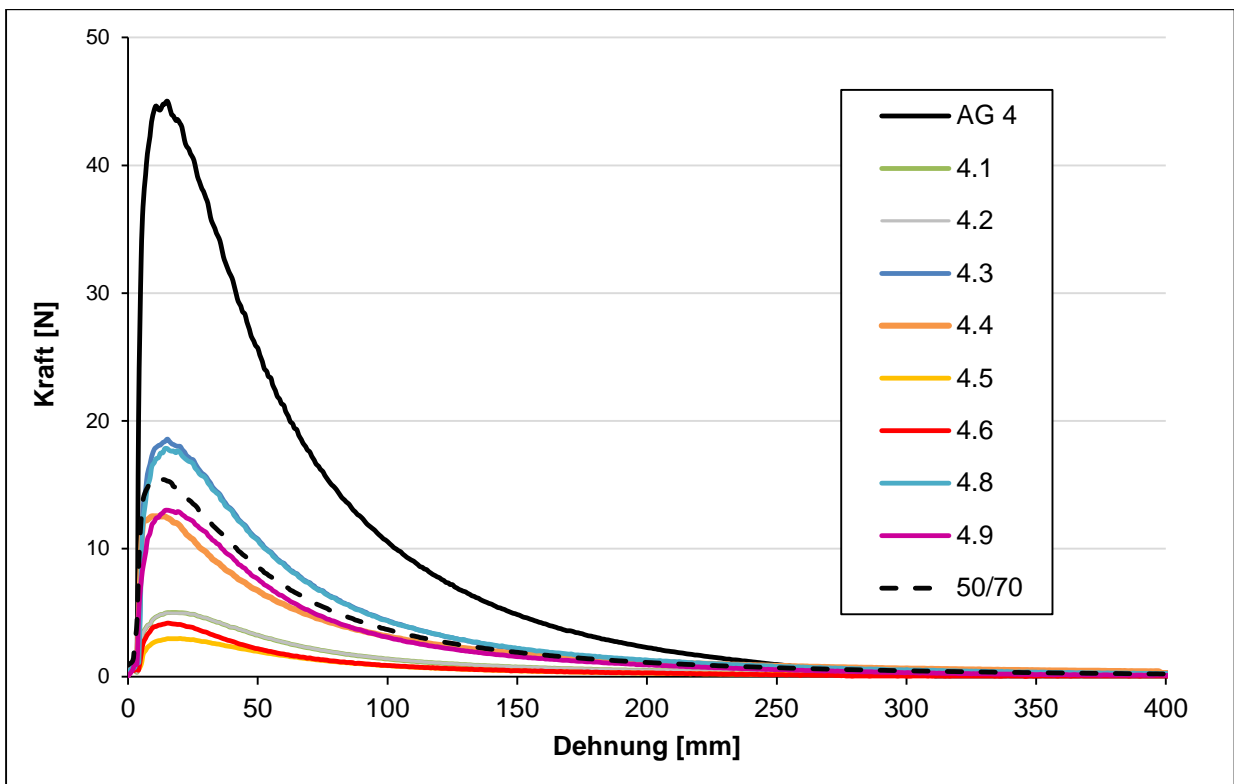


Bild 5-27: Kraft-Dehnungs-Kurven der Gemische mit AG 4 (Zugabemenge 2)

5.2.8 Untersuchung der Gemische aus Rejuvenatoren und AG 7

Die Erweichungspunkte Ring und Kugel und Nadelpenetrationen der Gemische aus den Rejuvenatoren R 1 bis R 9 und dem Bindemittel aus Granulat AG 7 sind für die beiden

Zugabemengen in Tab. 5-14 und Tab. 5-15 zusammengefasst. Wie auch schon aus Bild 5-16 und Bild 5-17 hervorging, wurden die Zielwerte, also die Grenzwerte eines Straßenbaubitumens 50/70, mit AG 7 als Bindemittel aus Granulat deutlich besser erreicht. Lediglich zwei Gemische, 7.4 und 7.7, wiesen zu hohe Erweichungspunkte auf. Die Nadelpenetration von 7.7 war bei Zugabemenge 1 allerdings ausreichend, bei 7.4 war die Zugabemenge 1 offensichtlich zu gering. Mit einer erhöhten Zugabemenge 2 liegt auch der Erweichungspunkt Ring und Kugel für Gemisch 7.4 im Anforderungsbereich. Während mit Zugabemenge 1 die Werte der Nadelpenetration für die Gemische 7.1, 7.4, 7.5, 7.8 und 7.9 im Vergleich mit einem Straßenbaubitumen 50/70 unterschritten werden, liegen sie mit Zugabemenge 2 - bis auf Gemisch 7.7 - bei den Gemischen 7.1, 7.2 und 7.6 geringfügig über dem geforderten Bereich.

Tab. 5-14: Erweichungspunkte Ring und Kugel (EP RuK) und Nadelpenetrationen (PEN) der Gemische aus den Rejuvenatoren 1 bis 9 und AG 7 (Zugabemenge 1)

Probe	Zugabemenge 1	EP RuK	PEN
	[M.-%]	[°C]	[0,1 mm]
AG 7	-	56,9	30,3
7.1	3,0	54,6	48,8
7.2	3,0	52,5	58,4
7.3	5,0	50,7	64,0
7.4	5,0	56,5	38,8
7.5	3,0	54,0	45,5
7.6	3,0	49,4	69,4
7.7	7,0	56,1	55,9
7.8	10,0	53,1	44,6
7.9	20,0	54,4	45,5

Tab. 5-15: Erweichungspunkte Ring und Kugel (EP RuK) und Nadelpenetrationen (PEN) der Gemische aus den Rejuvenatoren 1 bis 9 und AG 7 (Zugabemenge 2)

Probe	Zugabemenge 2	EP RuK	PEN
	[M.-%]	[°C]	[0,1 mm]
AG 7	-	56,9	30,3
7.1	5,0	50,7	71,0
7.2	11,0	49,9	72,0
7.3	5,0	53,1	58,0
7.4	10,0	54,0	51,0
7.5	5,0	52,1	61,0
7.6	8,0	49,5	70,2
7.7	15,0	58,5	46,0
7.8	32,0	51,1	58,0
7.9	10,0	53,9	51,0

Die ersten Zugabemengen zum Bindemittel AG 7 liegen, bis auf die weichen Straßenbaubitumen, innerhalb des am Straßenbaubitumen 20/30 erprobten Bereiches. Es besteht die Möglichkeit, dass die Wirkungsweise der Rejuvenatoren für kleine Zugabemengen

gen linear darstellbar ist, mit zunehmender Zugabemenge bzw. zunehmender Bindemittelhärte jedoch keine linearen Zusammenhänge mehr gegeben sind. R 7 scheint in seiner Wirkungsweise zudem noch durch die Eigenschaften des Bindemittel aus Granulat beeinflusst zu werden, wobei eine Phasentrennung, wie bei den Gemischen mit AG 4, nicht visuell zu erkennen war. Ein Grund könnten die vergleichsweise niedrigeren Zugabemengen sein, mit denen sich noch homogene Gemische herstellen lassen. Allerdings führt Zugabemenge 2 mit 15 M.-% zu einer Erhöhung des Erweichungspunktes gegenüber des ursprünglichen Bindemittels aus dem Asphaltgranulat, was sich auch in der Nadelpenetration niederschlägt. Mit Zugabemenge 1 lässt sich der Erweichungspunkt Ring und Kugel von Gemisch 7.7 nur geringfügig ändern.

Die Ergebnisse der Untersuchungen im DSR sind als Black-Diagramm in Bild 5-28 und Bild 5-29 dargestellt. Aufgrund der grundsätzlich geringeren Viskosität des Bindemittels aus AG 7 im Vergleich zum Bindemittel des AG 4 und den geringeren Zugabemengen an Additiven, sind die Abweichungen zwischen den einzelnen Kurven nicht sehr groß mit Ausnahme von Gemisch 7.2 bei Zugabemenge 2. Auch hier ist der typische Verlauf eines 50/70 aufgetragen. Bei Betrachtung der Ergebnisse von Gemisch 7.7 ist zu erkennen, dass R 7 auch da, wo augenscheinlich keine Phasentrennung stattfindet, das Bindemittel aus Granulat nicht positiv beeinflusst. Auch die Gemische 7.1, 7.2, 7.5 und 7.9 können die rheologischen Eigenschaften des Bindemittel aus Granulats gar nicht, bzw. nur in sehr geringem Maße beeinflussen. Im Gegensatz zum AG 4, zeigt das R 6 am AG 7 mit Zugabemenge 1 eine rheologische Wirkung, die jedoch bei Zugabemenge 2 nicht zu erkennen ist. Möglicherweise ist auch hier - ähnlich wie bei R 7 - ab einer gewissen Zugabemenge die Herstellung homogener Gemische problematisch, was eine schlechtere rheologische Wirksamkeit zur Folge hat. Die weiteren Gemische verhalten sich analog zu den Gemischen mit AG 4.

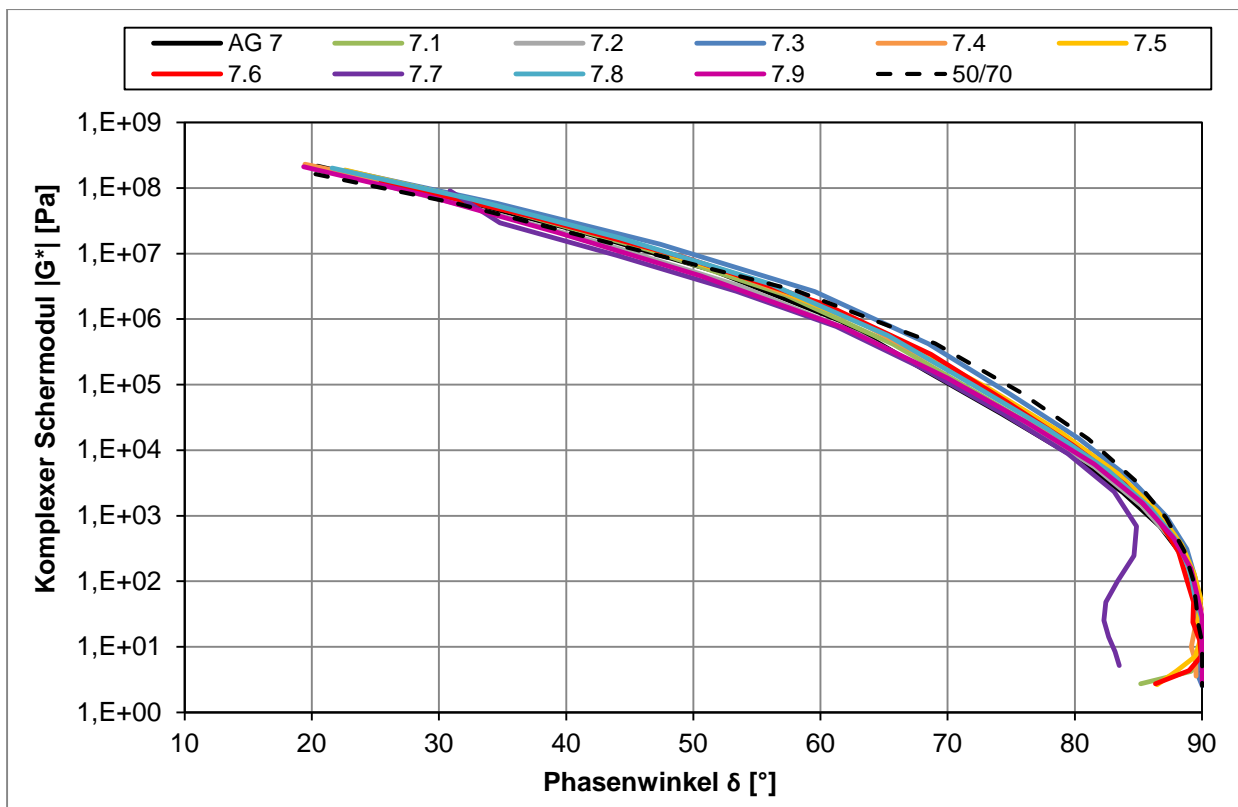


Bild 5-28: Black-Diagramm der Gemische mit AG 7 (Zugabemenge 1) sowie die Referenzwerte eines 50/70

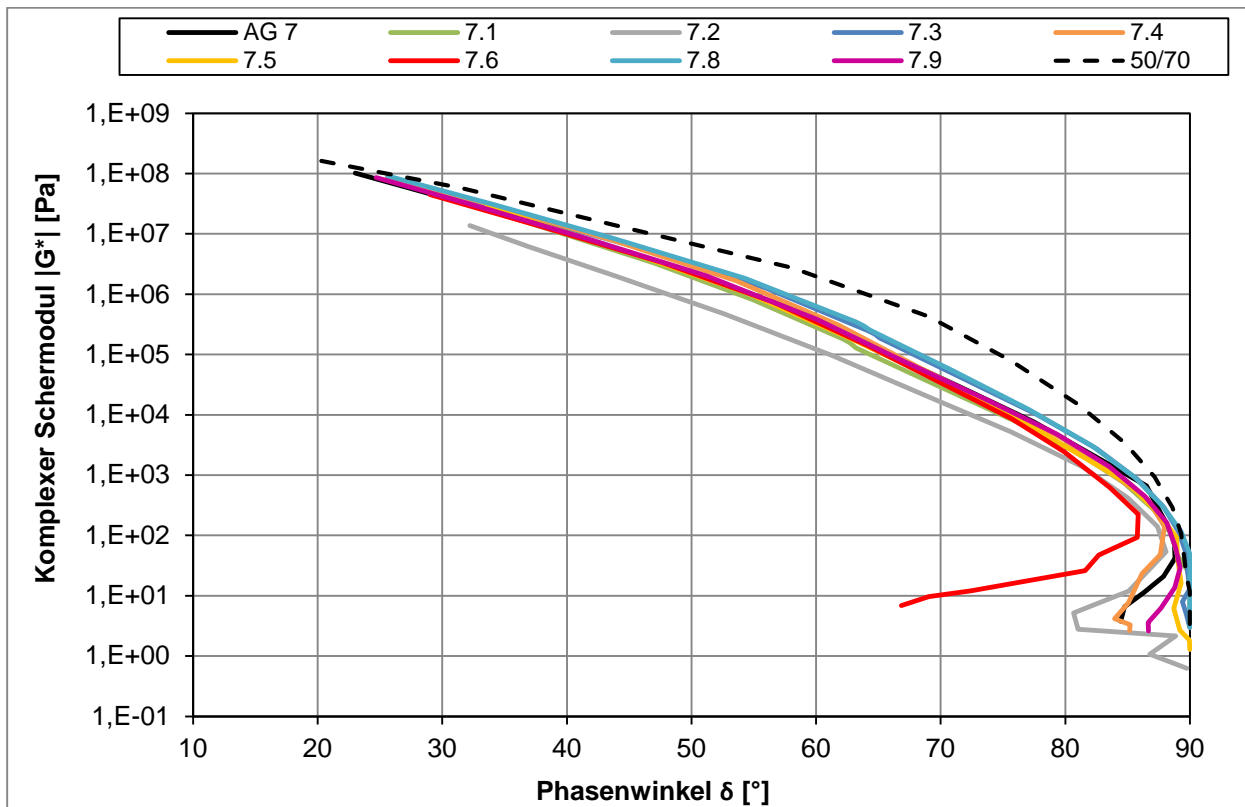


Bild 5-29: Black-Diagramm der Gemische mit AG 7 (Zugabemenge 2) sowie die Referenzwerte eines 50/70

Das Gemisch 7.3 erfüllt die Anforderungen an den Verjüngungsgrad am besten. Im BBR sind die Steifigkeiten aller Gemische niedriger als die des Bindemittels aus AG 7 (s. Tab. 5-16 und Tab. 5-17), wobei sie bei den Gemischen mit den fast ausschließlich höheren zweiten Zugabemengen wesentlich geringer sind. Lediglich Gemisch 7.7 und 7.9 weisen nur geringfügige Änderungen im Vergleich zum Bindemittel aus AG 7 auf. Wegen der vermuteten Phasentrennung bei Zugabemenge 2 wurden für die Gemische 7.6 und 7.7 keine Werte ermittelt.

Tab. 5-16: Biegekriechsteifigkeiten der Gemische mit AG 7 und Rejuvenatoren (Zugabemenge 1)

Gemisch	Biegekriechsteifigkeit [MPa]		
	-25 °C	-16 °C	-10 °C
AG 7	708	209	107
7.1	424	94	46
7.2	479	128	67
7.3	524	125	71
7.4	579	206	76
7.5	537	120	99
7.6	567	82	15
7.7	687	212	105
7.8	583	163	76
7.9	673	205	100

* = nicht bestimmt worden

Tab. 5-17: Biegekriechsteifigkeiten der Gemische mit AG 7 und Rejuvenatoren (Zugabemenge 2)

Gemisch	Biegekriechsteifigkeit [MPa]		
	-25 °C	-16 °C	-10 °C
AG 7	708	209	107
7.1	33	-*	-*
7.2	32	-*	-*
7.3	116	37	-*
7.4	434	111	79
7.5	57,4	-*	-*
7.8	289	82	31
7.9	654	201	99

* = nicht bestimmt worden

Aufgrund der ersten deutlich geringeren Zugabemengen im Vergleich zu AG 4, konnten hier auch verwertbare Ergebnisse mit R 1, R 2, R 5 ermittelt werden. Ähnlich wie bei AG 4 gab es bei den höheren zweiten Zugabemengen Probleme bei der Prüfung der Biegebalken für die Gemische 7.1 und 7.2, so dass für diese nur sehr geringe Biegekriechsteifigkeiten bei -25 °C ermittelt werden konnten.

Bei Betrachtung der m-Werte in Bild 5-30 und Bild 5-31 ist zu erkennen, dass bereits das Bindemittel aus Granulat AG 7 geringere Steifigkeiten aufweist als das Referenzbitumen 50/70. Eine Beeinflussung der Eigenschaften hin zu geringeren Steifigkeiten war hier somit gar nicht erforderlich. Die Gemische 7.1, 7.2 (Zugabemenge 1) und 7.8 verlaufen parallel zu AG 7 und bewirken keine Änderung.

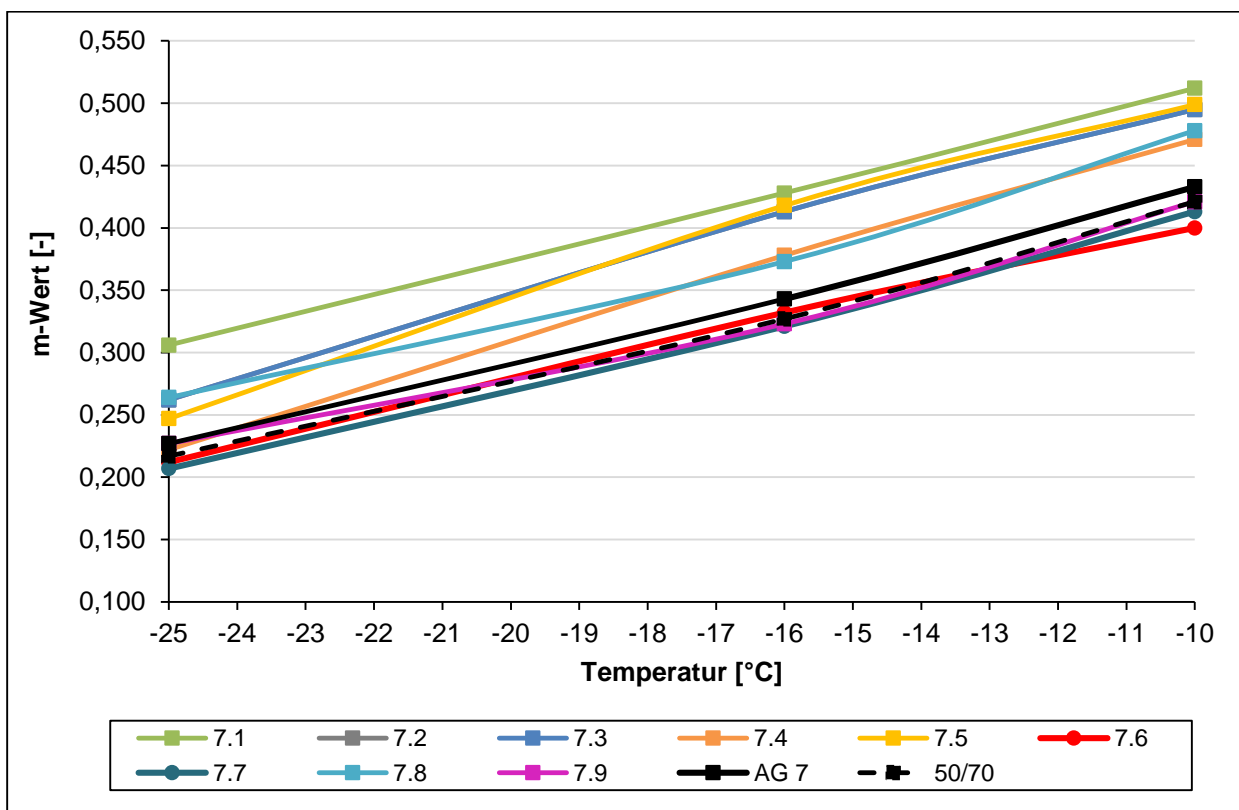
Darüber hinaus wurden die Kraftduktilitäten der Gemische (mit Ausnahme von 7.7 aufgrund visueller Phasentrennung bei Zugabemenge 2) bei 15 °C bestimmt. Die Ergebnisse der Kraftduktilitätsprüfung sind für die beiden Zugabemengen in Tab. 5-18 und Tab. 5-19 und in Bild 5-32 und Bild 5-33 zusammengestellt. Bei der Zugabemenge 1 erzielen alle Additive einen verjüngenden Effekt, wenn auch 7.9 den geringsten. Dies gilt auch für die Gemische mit Zugabemenge 2, bei der mit Ausnahme von Gemisch 7.9 ebenfalls die maximale Zugkraft reduziert wird.

Tab. 5-18: Ergebnisse der Kraftduktilitätsprüfung für Gemische mit AG 7 (Zugabemenge 1)

Gemisch	Max. Zugkraft	Formänderungsarbeit		
	[N]	E' ges [J/cm ²]	E' 0-200 [J/cm ²]	E 200-400 [J/cm ²]
AG 7	31,1	3,05	2,57	0,48
7.1	16,75	1,99	1,85	0,14
7.2	15,89	1,89	1,79	0,22
7.3	20,67	2,84	2,73	0,11
7.4	18,79	2,99	2,88	0,11
7.5	14,67	2,44	2,34	0,10
7.6	23,65	2,95	2,81	0,14
7.7	14,76	1,79	1,63	0,16
7.8	18,76	2,43	2,33	0,10
7.9	28,56	2,54	2,48	0,06

Tab. 5-19: Ergebnisse der Kraftduktilitätsprüfung für Gemische mit AG 7 (Zugabemenge 2)

Gemisch	Max. Zugkraft	Formänderungsarbeit		
	[N]	E'_{ges} [J/cm ²]	E'_{0-200} [J/cm ²]	$E'_{200-400}$ [J/cm ²]
AG 7	31,1	3,05	2,57	0,48
7.1	9,57	0,87	0,65	0,22
7.2	10,92	0,94	0,81	0,13
7.3	18,09	2,56	2,38	0,18
7.4	19,47	2,32	2,64	0,14
7.5	7,99	0,88	0,78	0,10
7.6	6,67	0,75	0,59	0,16
7.8	19,56	2,33	1,99	0,12
7.9	37,34	2,78	2,17	0,14


Bild 5-30: m-Werte der Gemische 7.1 bis 7.9, des Bindemittels aus Granulat AG 7 und eines 50/70 (Zugabemenge 1)

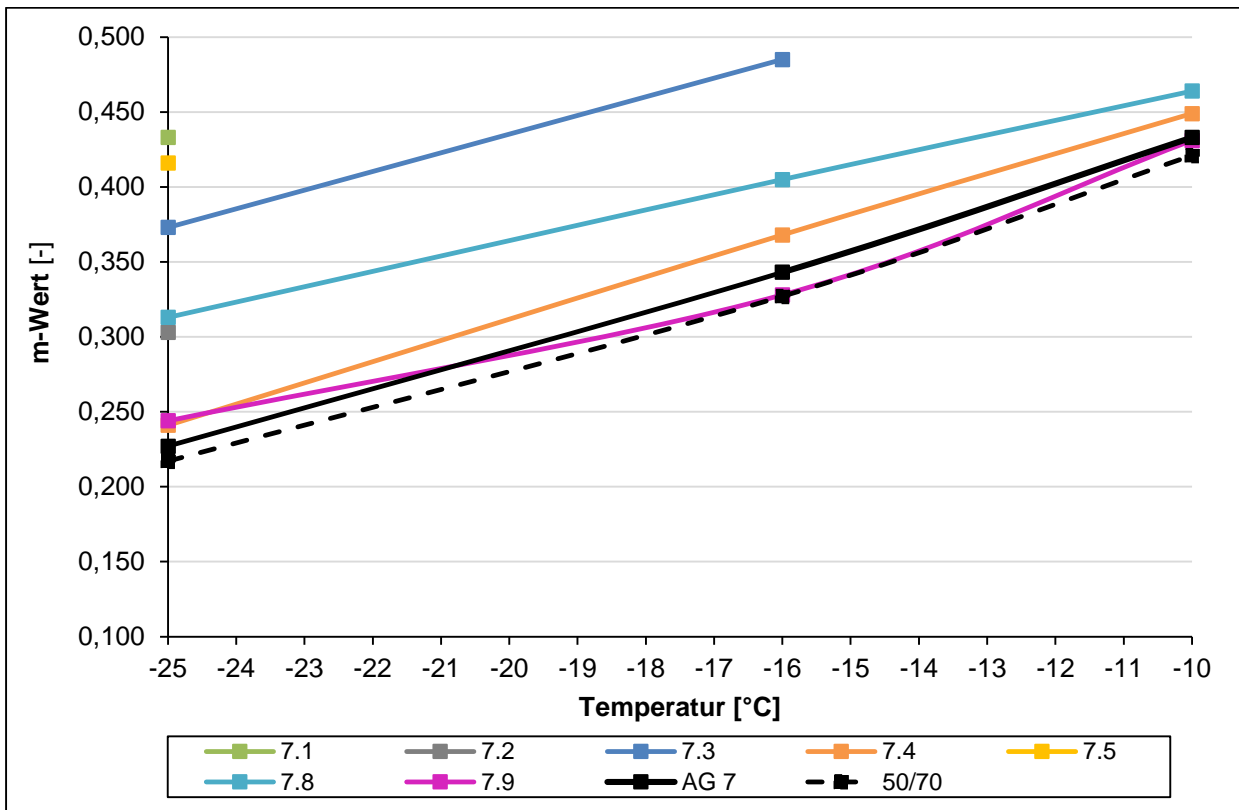


Bild 5-31: m-Werte der Gemische 7.1 bis 7.5, 7.8 und 7.9, des Bindemittels aus Granulat AG 7 und eines 50/70 (Zugabemenge 2)

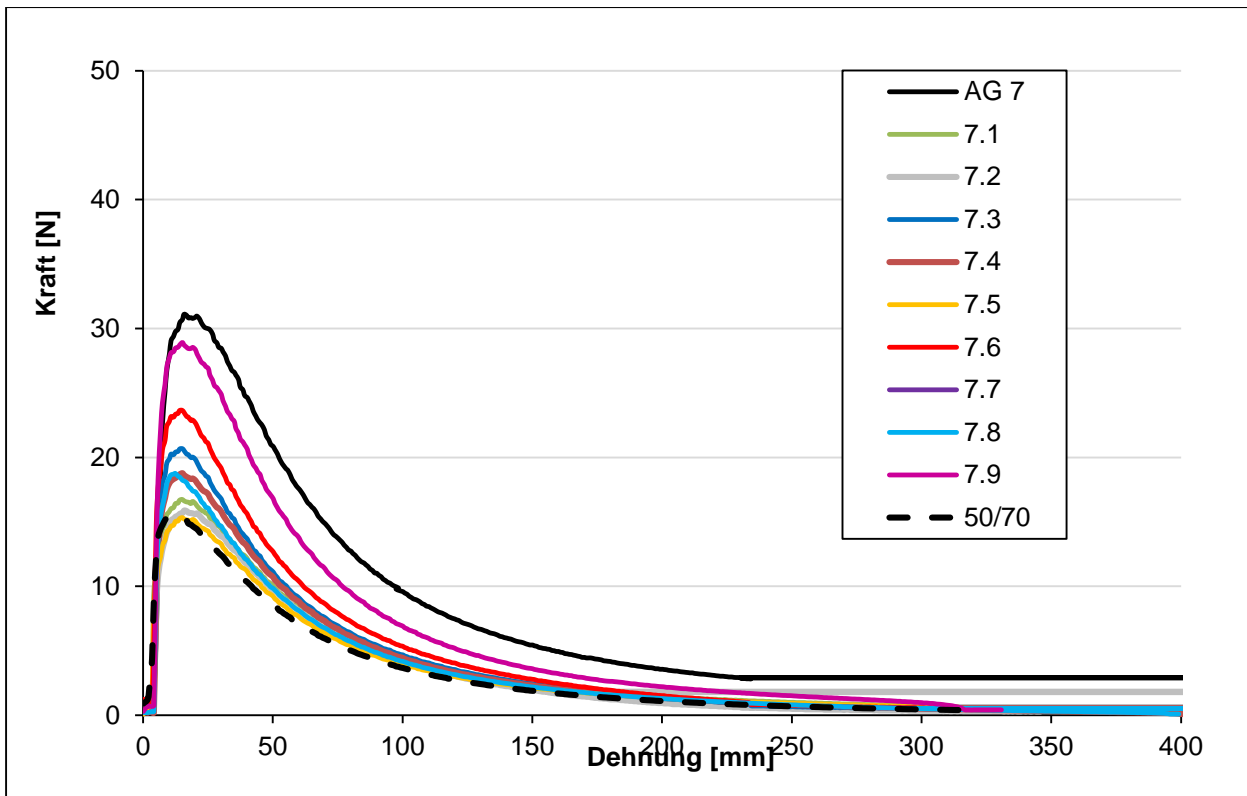


Bild 5-32: Kraft-Dehnungs-Kurven der Gemische mit AG 7 (Zugabemenge 1)

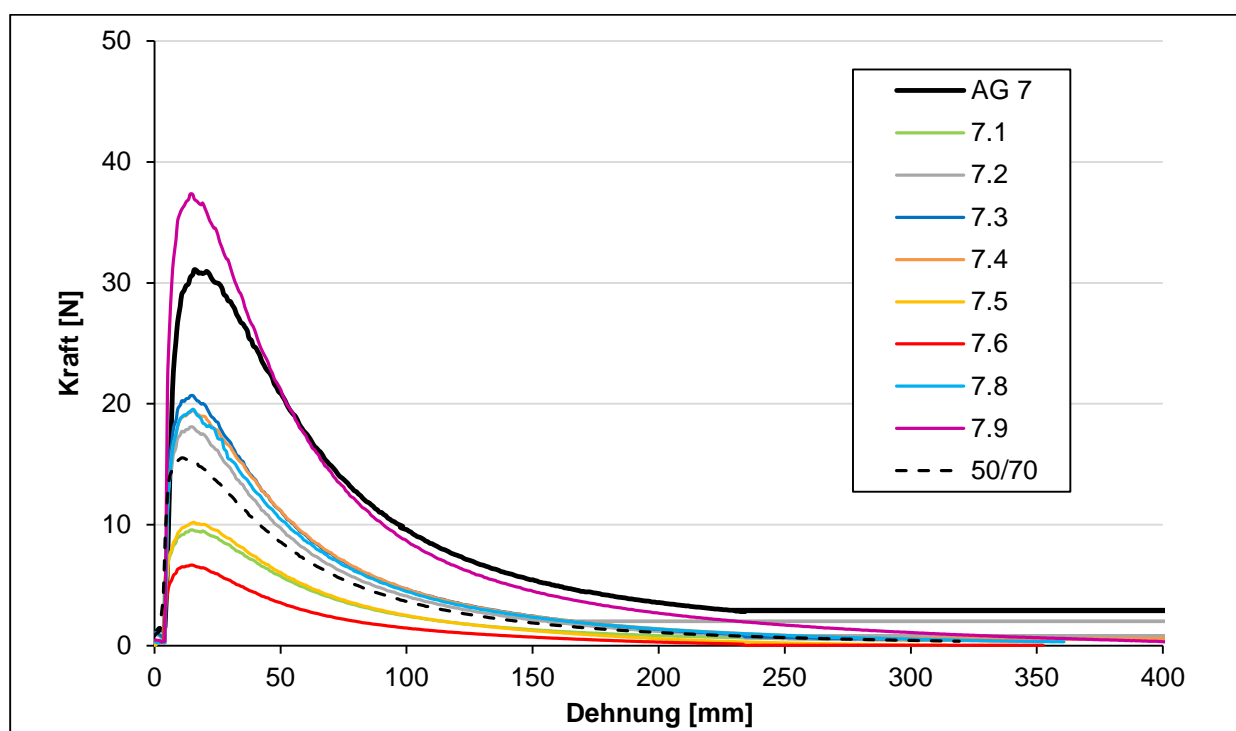


Bild 5-33: Kraft-Dehnungs-Kurven der Gemische mit AG 7 (Zugabemenge 2)

5.2.9 Untersuchung der Gemische aus Rejuvenatoren und AG 9

Das Bindemittel aus AG 9 hat den höchsten Härtegrad der fünf ausgewählten Ausbauphalte. Mit einem Erweichungspunkt von 105 °C und einer Nadelpenetration von 7 x 0,1 mm entsprach es nicht den üblicherweise anfallenden Asphaltgranulaten. Die erforderlichen Zugabemengen, die in Tab. 5-7 dargestellt sind, waren z. T. > 100 %. Es wurden lediglich Gemische mit den Rejuvenatoren R 1 bis R 6 und R 9 hergestellt, wobei auch hier die Zugabemengen deutlich höher waren, als in der Praxis sinnvoll umsetzbar. Tab. 5-20 stellt die Erweichungspunkte Ring und Kugel und Nadelpenetrationen der Gemische aus dem Bindemittel aus AG 9 und den Rejuvenatoren dar. Es ist zu erkennen, dass lediglich der Erweichungspunkt des Gemisches 9.3 den Anforderungen an ein 50/70 entspricht, die Streuung der weiteren Ergebnisse ist sehr groß.

Tab. 5-20: Erweichungspunkte Ring und Kugel (EP RuK) und Nadelpenetrationen (PEN) der Gemische aus den Rejuvenatoren 1 bis 19 und AG 9

Probe	Zugabemenge 1	EP RuK	PEN
	[M.-%]	[°C]	[0,1 mm]
AG 9	-	105,0	7,0
9.1	40,0	79,6	126,0
9.2	40,0	92,8	207,0
9.3	40,0	46,6	146,0
9.4	40,0	78,8	23,0
9.5	30,0	57,6	84,5
9.6	35,0	-*	-*
9.9	80,0	43,5	165,3

* = nicht mischbar

Beim Mischvorgang selbst bildeten sich bei den meisten Gemischen Verklumpungen, so dass nicht sichergestellt werden kann, dass ausreichend homogene Gemische entstanden sind. Bereits die Beschaffenheit des AG 9 entsprach nicht dem Bild der übrigen Asphaltgranulate (Bild 5-34). In Untersuchungen mit dem DSR und dem BBR und bei der Bestimmung der Kraftduktilität konnten keine verwertbaren Ergebnisse ermittelt werden.

Gemische mit Bindemittel aus AG 9 wurden daher nicht weiter betrachtet. Stattdessen wurde AG 21 aufgrund des erhöhten Erweichungspunktes $> 70\text{ °C}$ („Wiederverwendungsgrenze“, s. Kap. 1) und der Tatsache, dass dieses Asphaltgranulat auch auf Asphaltenebene untersucht wurde, ausgewählt.



Bild 5-34: Oberfläche des rückgewonnenen AG 9

5.2.10 Untersuchung der Gemische aus Rejuvenatoren und AG 18

Die Erweichungspunkte Ring und Kugel und Nadelpenetrationen der Gemische aus den Rejuvenatoren R 1 bis R 9 und dem Bindemittel aus Granulat AG 18 sind für die beiden Zugabemengen in Tab. 5-21 und

Tab. 5-22 zusammengefasst. Im Gegensatz zu AG 7 ist es aufgrund des höheren Erweichungspunktes von AG 18 ähnlich wie bei AG 4 trotz hoher und variiertes Zugabemengen schwierig, mit den Gemischen den Anforderungsbereich für ein Straßenbaubitumen 50/70 zu erreichen. Dies kann auch im hohen Asphaltengehalt begründet sein. Nur für die Gemische 18.3 und 18.9 mit Zugabemenge 1 gelingt es für beide Kennwerte. Mit den Rejuvenatoren R 1 und R 6 werden bei der Zugabemenge 1 auch gute Werte für die Nadelpenetration erzielt, für R 2 gilt dies für beide Zugabemengen. Mit Zugabemenge 2 erreicht das Gemisch 18.5 einen Erweichungspunkt Ring und Kugel im Anforderungsbereich.

Die Ergebnisse der Untersuchungen im DSR sind als Black-Diagramm in Bild 5-35 und Bild 5-36 dargestellt.

Nach dem Mischen von AG 18 mit R 7 fiel bei Zugabemenge 1 wiederum eine Phasentrennung auf, so dass diese Gemische keinen weiteren Prüfungen unterzogen wurden. Bei reduzierter Zugabemenge 2 war jedoch das Herstellen eines homogenen Gemisches möglich.

Analog zu den Gemischen mit AG 4 gelingt es den Rejuvenatoren R 3, R 4, R 8 und R 9 eine rheologisch verjüngende Wirkung in Richtung der Kurve des Straßenbaubitumens 50/70 zu erzielen. Dieser Effekt ist beim Gemisch mit R 3 am größten, was konform mit den erreichten Erweichungspunkten ist. Der Verlauf des Graphen von 18.4 ist

im Vergleich zu den anderen steiler abfallend, dies lässt auf eine Modifikation des Bitumens neben der Verjüngung schließen, welche sich auf den Anstieg des Phasenwinkels auswirkt. Rheologisch betrachtet erreichen die anderen Gemische kaum eine Veränderung im Vergleich zum AG 18 bzw. sogar eine „Alterung“ mit Verschiebung zu niedrigeren Phasenwinkeln bei äquivalenter Steifigkeitsbetrachtung. Diese ist besonders beim Gemisch 18.2 erkennbar, welches zudem mit Zugabemenge 2 einen ungewöhnlichen Kurvenverlauf besaß.

Tab. 5-21: Erweichungspunkte Ring und Kugel (EP RuK) und Nadelpenetrationen (PEN) der Gemische aus den Rejuvenatoren 1 bis 9 und AG 18 (Zugabemenge 1)

Probe	Zugabemenge 1	EP RuK	PEN
	[M.-%]	[°C]	[0,1 mm]
AG 18	-	82,0	18,0
18.1	25,0	35,4	192,7
18.2	20,0	61,7	50,4
18.3	15,0	54,0	52,0
18.4	35,0	59,4	32,8
18.5	18,0	58,9	39,8
18.6	35,0	64,0	55,1
18.7	25,0	68,4	42,0
18.8	50,0	59,4	26,2
18.9	45,0	52,9	50,1

Tab. 5-22: Erweichungspunkte Ring und Kugel (EP RuK) und Nadelpenetrationen (PEN) der Gemische aus den Rejuvenatoren 1 bis 9 und AG 18 (Zugabemenge 2)

Probe	Zugabemenge 2	EP RuK	PEN
	[M.-%]	[°C]	[0,1 mm]
AG 18	-	82,0	7,0
18.1	10,0	65,9	42,1
18.2	23,0	63,5	59,2
18.3	13,0	57,8	44,6
18.4	38,0	60,7	37,9
18.5	20,0	49,3	106,5
18.6	20,0	65,1	49,8
18.7	15,0	80,8	25,8
18.8	45,0	64,8	25,2
18.9	43,0	57,6	44,9

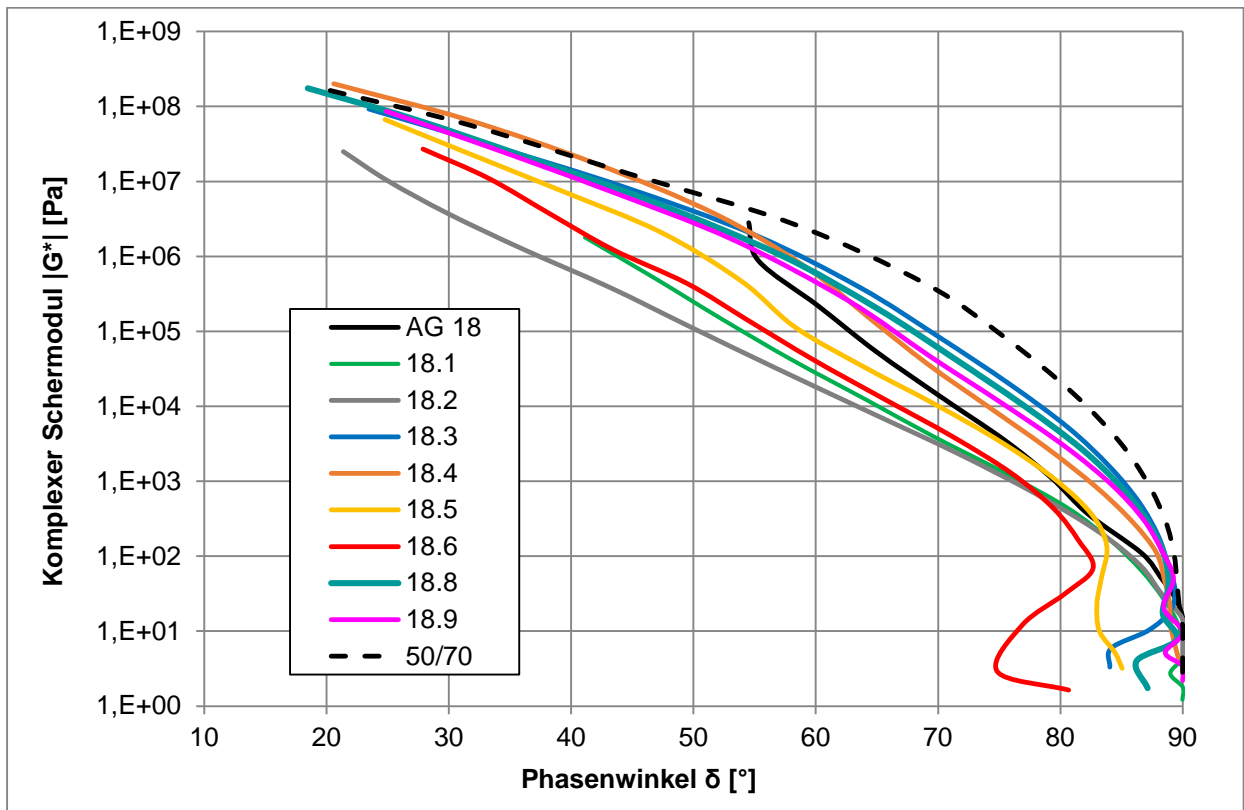


Bild 5-35: Black-Dialogramm der Gemische mit AG 18 (Zugabemenge 1) sowie die Referenzwerte eines 50/70

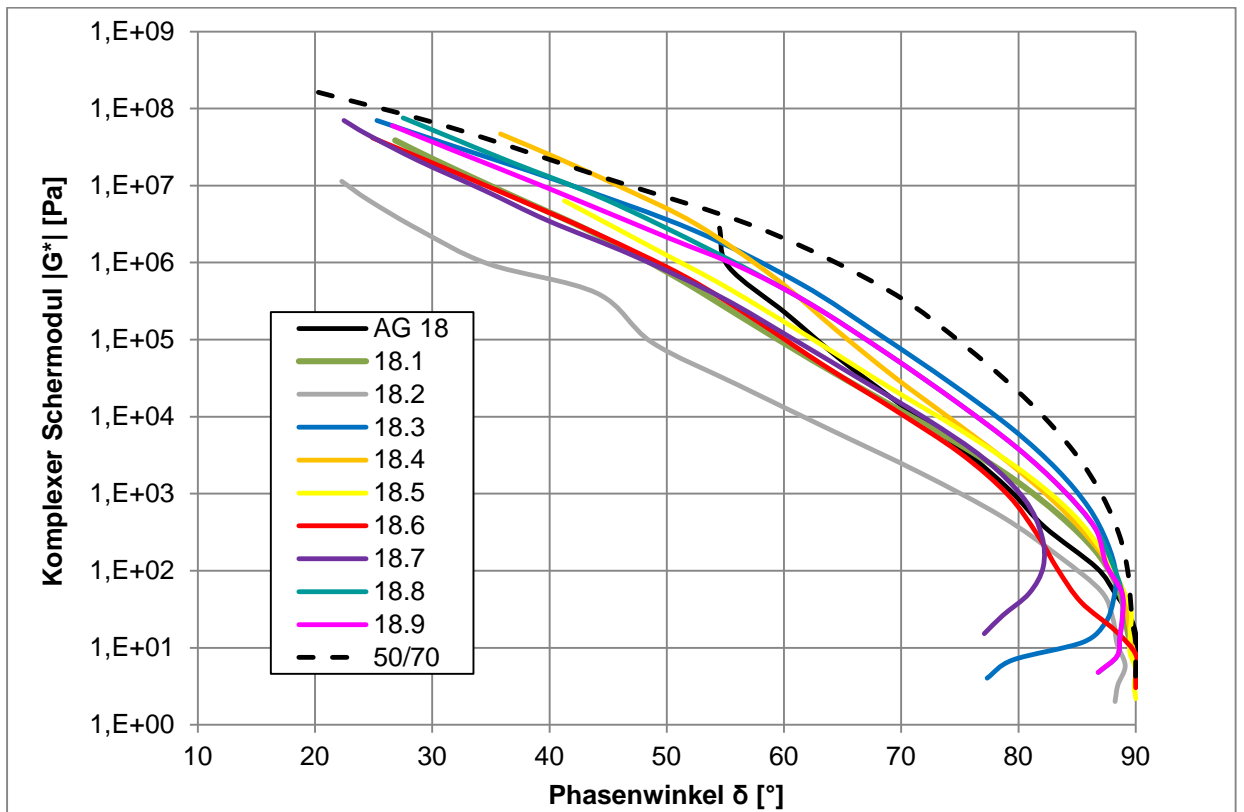


Bild 5-36: Black-Dialogramm der Gemische mit AG 18 (Zugabemenge 2) sowie die Referenzwerte eines 50/70

Im BBR sind die Steifigkeiten aller Gemische niedriger als die des Bindemittels aus AG 18 (s. Tab. 5-23 und Tab. 5-24). Neben Gemisch 18.7 konnten aufgrund der Beschaffenheit des Gemischs keine Werte für 18.1 bei der Zugabemenge 1 ermittelt werden. Aufgrund der geringen Anfangssteifigkeiten konnten für die Gemische 18.2 und 18.5 nur Werte bei 25 °C ermittelt werden.

Es ist zu erkennen, dass das Relaxationsvermögen der Gemische vermutlich zunimmt.

Tab. 5-23: Biegekriechsteifigkeiten der Gemische mit AG 18 und Rejuvenatoren (Zugabemenge 1)

Gemisch	Biegekriechsteifigkeit [MPa]		
	-25 °C	-16 °C	-10 °C
AG 18	1050	492	271
18.1	-*	-*	-*
18.2	489	121	65
18.3	326	109	71
18.4	680	189	99
18.5	214	78	35
18.6	171	61	11
18.8	644	264	153
18.9	344	101	75

* = nicht bestimmt worden

Tab. 5-24: Biegekriechsteifigkeiten der Gemische mit AG 18 und Rejuvenatoren (Zugabemenge 2)

Gemisch	Biegekriechsteifigkeit [MPa]		
	-25 °C	-16 °C	-10 °C
AG 18	1050	492	271
18.1	185	64	-*
18.2	65	-*	-*
18.3	413	131	54
18.4	694	179	95
18.5	73	-*	-*
18.6	241	90	35
18.8	767	224	146
18.9	444	142	78

* = nicht bestimmt worden

Bei Betrachtung der m-Werte in Bild 5-38 ist die Steigung für Gemisch 18.8 ähnlich zu der des Bindemittels aus AG 18, was auf ein nicht verbessertes Tieftemperaturverhalten schließen lässt. Auch die Kurven der Gemische 18.5 und 18.6 verlaufen parallel zu AG 18 und bewirken keine Änderung. Analog zu den Ergebnissen an AG 4 und AG 7 kann jedoch ein vermutlich besseres Relaxationsvermögen für Gemisch 18.3 und 18.4 und darüber hinaus für 18.9 und 18.2 festgestellt werden.

Die m-Werte in Bild 5-40 bestätigen dies teilweise. Hier kann neben 18.3, 18.4 und 18.9 auch Gemisch 18.8 ein vermutlich verbessertes Relaxationsverhalten aufweisen.

Darüber hinaus wurden die Kraftduktilitäten der Gemische bei 10 °C bzw. 15 °C bestimmt. Die Ergebnisse für die maximale Zugkraft und die Formänderungsarbeit sind für die beiden Zugabemengen in Tab. 5-25 und Tab. 5-26 dargestellt. Bild 5-37 und Bild 5-38 zeigen die Kraft-Dehnungs-Kurven der Gemische.

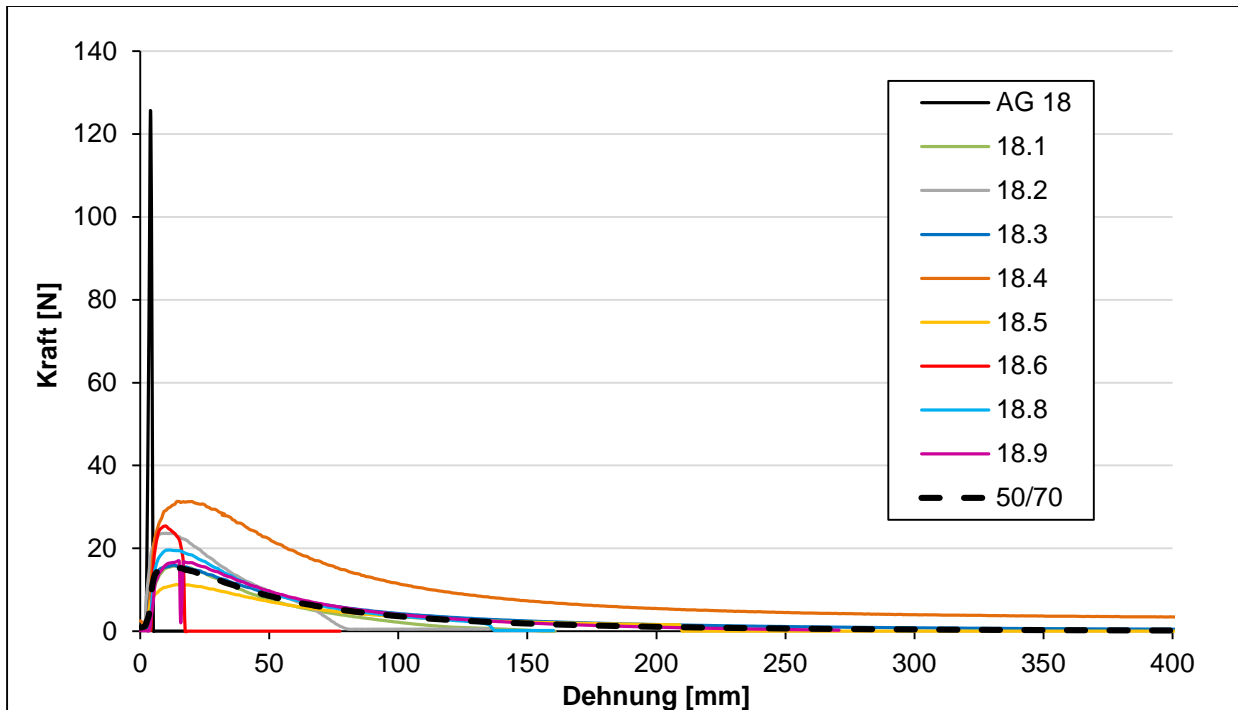


Bild 5-37: Kraft-Dehnungs-Kurven der Gemische mit AG 18 (Zugabemenge 1)

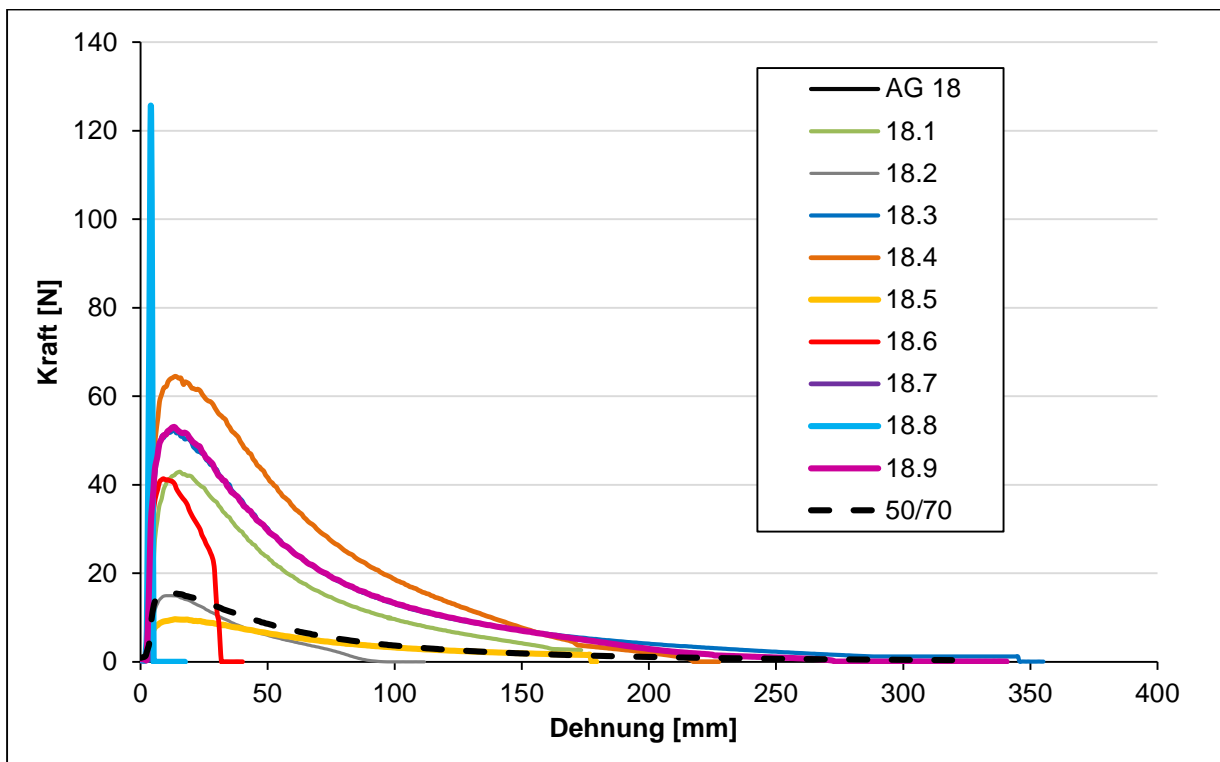


Bild 5-38: Kraft-Dehnungs-Kurven der Gemische mit AG 18 (Zugabemenge 2)

Da alle Proben verwertbare Messergebnisse aufweisen, ist davon auszugehen, dass die Zugabe von Rejuvenatoren Einfluss auf die Dehnung, die Duktilität und die Formänderungsarbeit hat. Bis auf Gemisch 18.8 bei Zugabemenge 2 werden die max. Zugkräfte und die Formänderungsarbeit reduziert. Bei Zugabemenge 2 erreichen die Gemische 18.3, 18.4 und 18.9 zudem größere Dehnungslängen, so dass von einem verjüngenden Effekt ausgegangen werden kann. Dies bestätigt die Ergebnisse der weiteren Untersuchungen am AG 18 und bestätigt wiederum die auch an den anderen Bindemitteln aus Asphaltgranulaten nachgewiesene rheologische Wirkungsweise von R 3 und R 4.

Tab. 5-25: Ergebnisse der Kraftduktilitätsprüfung für Gemische mit AG 18 (Zugabemenge 1)

Gemisch	Max. Zugkraft	Formänderungsarbeit		
	[N]	E'_{ges} [J/cm ²]	E'_{0-200} [J/cm ²]	$E_{200-400}$ [J/cm ²]
AG 18	119,2	3,03	3,03	-
18.1	15,82	0,84	0,84	-
18.2	23,57	0,92	0,92	
18.3	16,00	0,86	0,86	-
18.4	31,64	2,97	2,63	0,34
18.5	11,28	0,69	0,69	-
18.6	25,39	0,57	0,57	-
18.8	19,66	1,06	1,06	
18.9	16,99	0,98	0,98	

Tab. 5-26: Ergebnisse der Kraftduktilitätsprüfung für Gemische mit AG 18 (Zugabemenge 2)

Gemisch	Max. Zugkraft	Formänderungsarbeit		
	[N]	E'_{ges} [J/cm ²]	E'_{0-200} [J/cm ²]	$E_{200-400}$ [J/cm ²]
AG 18	126,4	3,76	3,76	-
18.1	42,91	1,13	1,13	-
18.2	18,41	0,48	0,48	-
18.3	52,39	3,90	3,62	0,27
18.4	64,70	4,85	4,82	0,02
18.5	9,6	0,26	0,26	-
18.6	40,83	0,54	0,54	-
18.8	123,58	3,11	3,11	-
18.9	53,08	3,84	3,74	0,10

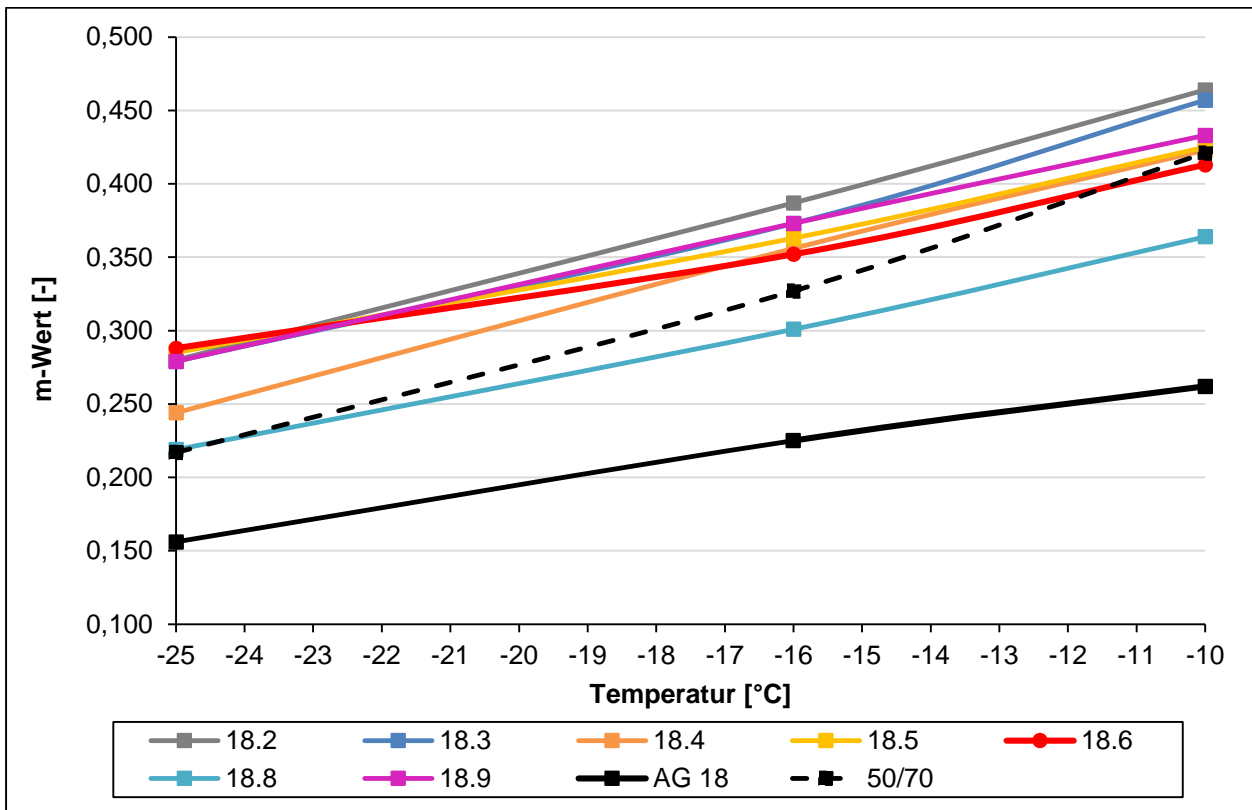


Bild 5-39: m-Werte der Gemische 18.2 bis 18.6, 18.8 und 18.9, des Bindemittels aus Granulat AG 18 und eines 50/70 (Zugabemenge 1)

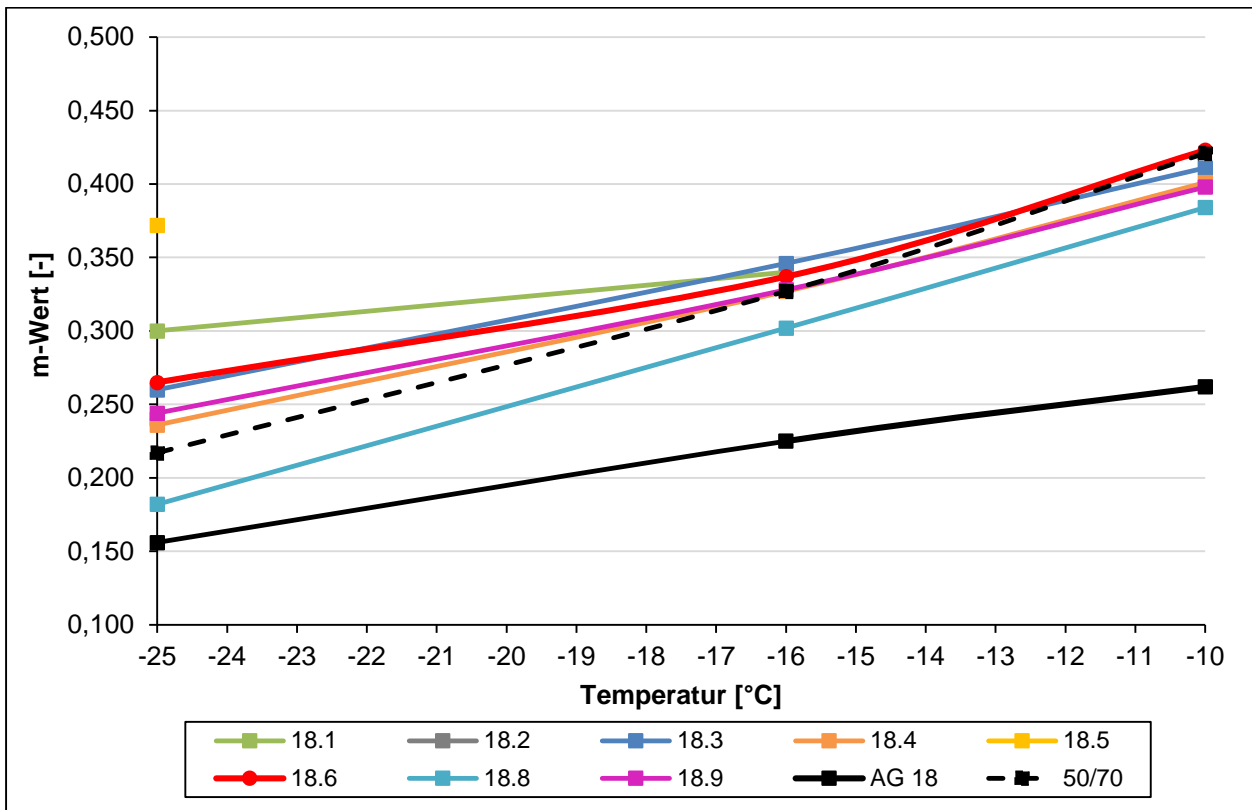


Bild 5-40: m-Werte der Gemische 18.1 bis 18.6, 18.8 und 18.9, des Bindemittels aus Granulat AG 18 und eines 50/70 (Zugabemenge 2)

5.2.11 Untersuchung der Gemische aus Rejuvenatoren und AG 20

Die Erweichungspunkte Ring und Kugel und Nadelpenetrationen der Gemische aus den Rejuvenatoren R 1 bis R 9 und dem Bindemittel aus Granulat AG 20 sind getrennt nach Zugabemengen in Tab. 5-27 und Tab. 5-28 zusammengefasst.

Tab. 5-27: Erweichungspunkte Ring und Kugel (EP RuK) und Nadelpenetrationen (PEN) der Gemische aus den Rejuvenatoren 1 bis 9 und AG 20 (Zugabemenge 1)

Probe	Zugabemenge 1	EP RuK	PEN
	[M.-%]	[°C]	[0,1 mm]
AG 20	-	68,8	21,0
20.1	14,0	44,3	137,9
20.2	10,0	56,3	47,0
20.3	10,0	52,2	49,8
20.4	19,0	59,9	30,3
20.5	10,0	53,3	55,7
20.6	15,0	58,5	46,8
20.7	15,0	66,6	41,1
20.8	40,0	57,1	35,6
20.9	35,0	58,5	54,0

Tab. 5-28: Erweichungspunkte Ring und Kugel (EP RuK) und Nadelpenetrationen (PEN) der Gemische aus den Rejuvenatoren 1 bis 9 und AG 20 (Zugabemenge 2)

Probe	Zugabemenge 2	EP RuK	PEN
	[M.-%]	[°C]	[0,1 mm]
AG 20	-	68,8	21,0
20.1	10,0	53,7	72,9
20.2	13,0	62,7	39,5
20.3	13,0	53,5	65,1
20.4	25,0	64,4	34,0
20.5	15,0	49,8	111,8
20.6	18,0	60,9	63,1
20.7	18,0	71,5	37,0
20.8	42,0	62,3	26,8
20.9	35,0	58,8	44,1

Bei der ersten Zugabemenge liegt Gemisch 20.5 im Anforderungsbereich für ein Straßenbaubitumen 50/70. Gemisch 20.3 erreicht einen Erweichungspunkt im gewünschten Bereich und Gemisch 20.9 eine Nadelpenetration zwischen 50 und 70 1/10 mm. Bei den Proben mit zweiter Zugabemenge zeigt sich ein ähnliches Bild. Nur ein Gemisch (20.3) entspricht den Anforderungen an ein Straßenbaubitumen 50/70 für alle physikalischen Eigenschaften. Insgesamt drei Gemische, 20.1, 20.3 und 20.5 erreichen den Bereich des Erweichungspunktes eines Bitumens 50/70 und nur zwei Proben (20.3 und 20.6) liegen im Bereich der Nadelpenetration eines Bitumens 50/70.

Die Ergebnisse der Gemische mit Rejuvenator R 7 haben kaum Einfluss oder insofern einen negativen Einfluss auf den Erweichungspunkt, als beim Gemisch 20.7 (zweite Zugabemenge) sogar eine Erhöhung zu verzeichnen ist. Allerdings konnte eine Phasentrennung, wie teilweise bei anderen Bindemitteln aus Asphaltgranulaten, nicht beobachtet werden.

Auch bei AG 20 zeigt sich, ähnlich wie bei AG 4 und AG 18, dass die Bestimmung der Zugabemengen der Rejuvenatoren zum Erreichen eines gewissen Anforderungsbereiches nicht trivial ist und komplexen Zusammenhängen unterliegt.

Die Ergebnisse der Untersuchungen im DSR sind als Black-Diagramm in Bild 5-41 und Bild 5-42 dargestellt. Unabhängig von der Zugabemenge können folgende Aussagen getroffen werden: Positiv verjüngend wirken R 3 (größte Wirkung), R 8 und R 9, wobei im Bereich $> 50^{\circ}\text{C}$ die Eigenschaften eines Straßenbaubitumens 50/70 nicht erreicht werden. Kaum wirksam ist das Produkt R 4. Alle anderen Additive verändern auch die Eigenschaften des Bindemittels, erzielen aber rheologisch gesehen eher eine unerwünschte Alterung als eine Verjüngung durch die Verschiebung zu niedrigeren Phasenwinkeln bei gleichem Schermodul.

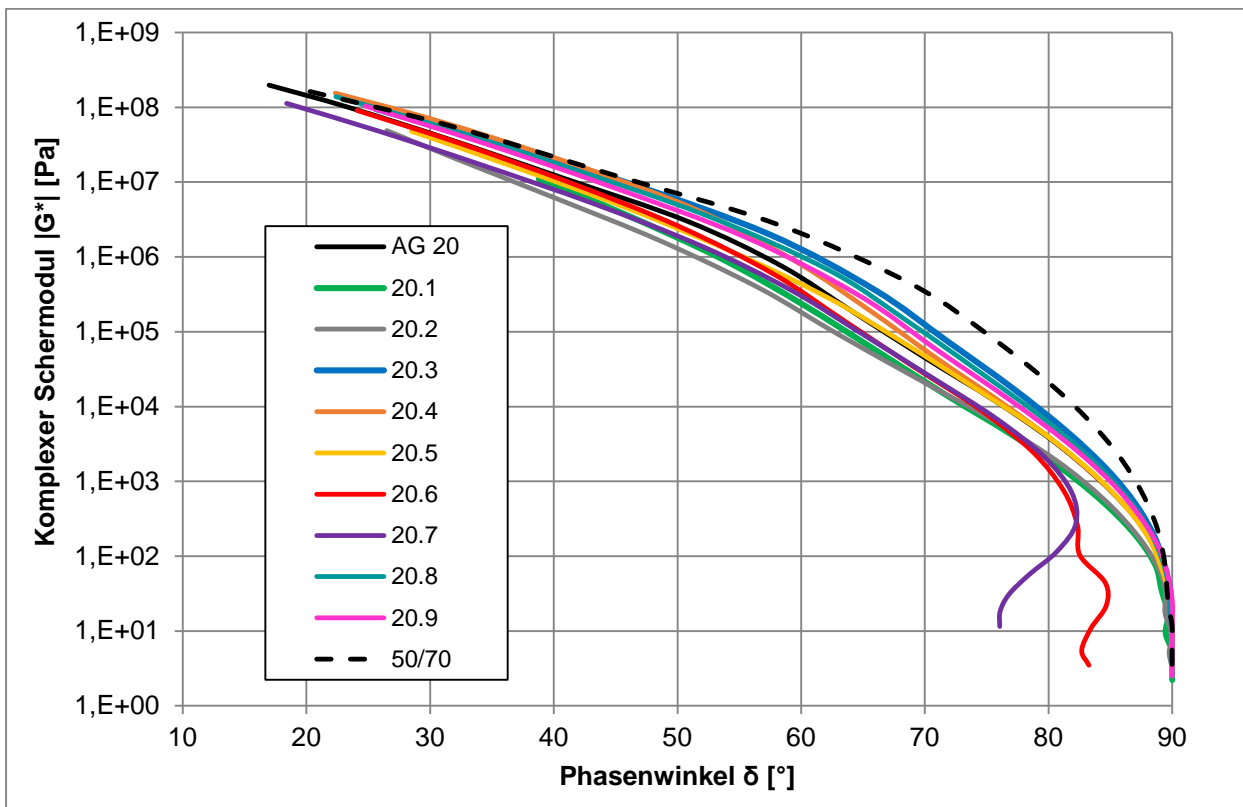


Bild 5-41: Black-Diagramm der Gemische mit AG 20 (Zugabemenge 1) sowie die Referenzwerte eines 50/70

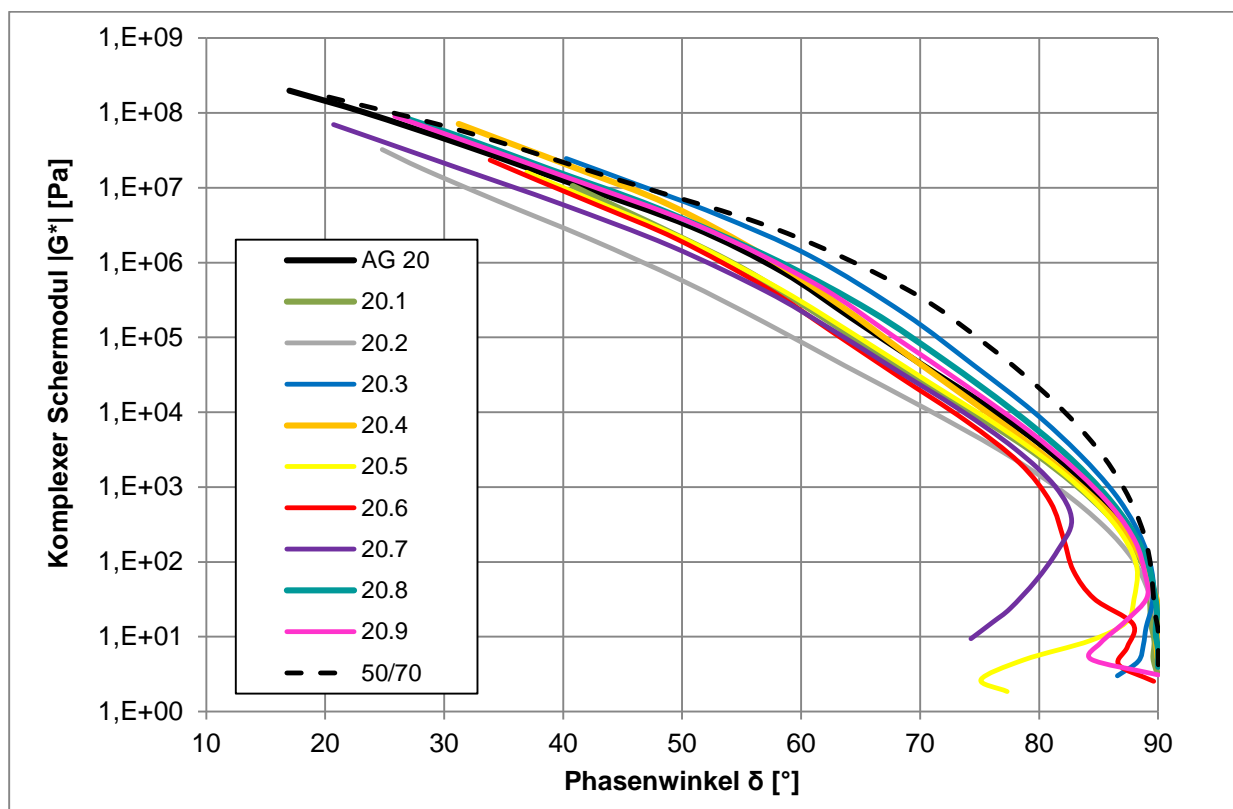


Bild 5-42: Black-Diagramm der Gemische mit AG 20 (Zugabemenge 2) sowie die Referenzwerte eines 50/70

Die Gemische 20.5 zeigen trotz der guten erreichten Anpassung der Erweichungspunkte Ring und Kugel keine Veränderung der rheologischen Eigenschaften. Gemisch 20.4 weist wie bei AG 4 und AG 18 einen steileren Verlauf des Graphen auf, was auf eine Modifikation des Bindemittels des Asphaltgranulats hinweist.

Die im BBR bestimmten Biegekriechsteifigkeiten sind in Tab. 5-29 und Tab. 5-30 zusammengestellt. Alle Additive bewirken eine Verringerung der Biegekriechsteifigkeiten. Ähnlich wie bei AG 4 und AG 7 konnten für die Gemische mit R 1 und R 2 nur geringe Biegekriechsteifigkeiten ermittelt werden. Bei der zweiten Zugabemenge weist Gemisch 20.9 nur geringe Veränderungen zum Ausgangsmaterial auf.

Bei Betrachtung der m-Werte in Bild 5-43 und Bild 5-44 wird deutlich, dass die Kurven der Gemische 20.3, 20.4 und 20.8 mit beiden Zugabemengen steiler verlaufen, was ein Hinweis auf ein besseres Relaxationsvermögen sein könnte. Für Gemische mit R 9 gilt dies nur bei Zugabemenge 1. Alle anderen Rejuvenatoren erzeugen nicht die gewünschte Wirkung. Bei Zugabemenge 2 tritt für R 9 in Korrelation zur Erhöhung des Erweichungspunktes Ring und Kugel offensichtlich eine Verschlechterung ein.

Darüber hinaus wurden die Kraftduktilitäten der Gemische bei 15 °C bestimmt. Die Ergebnisse für die maximale Zugkraft und die Formänderungsarbeit sind für die beiden Zugabemengen in Tab. 5-31 und in Tab. 5-32 dargestellt. Darüber hinaus sind die Kraft-Dehnungs-Kurven der Gemische in Bild 5-45 und Bild 5-46 dargestellt. Bei beiden Zugabemengen erzielen bis auf R 4 und R 8 alle Rejuvenatoren einen verjüngenden Effekt. Beim Gemisch 20.4 erhöhen sich maximale Zugkraft und Dehnungslänge, so dass auch hier vermutet werden kann, dass R 4 eine Modifikation des Bitumens hervorruft. Besonders die Gemische 20.7 zeichnen sich durch sehr niedrige max. Zugkräfte und Formänderungsarbeiten aus.

Tab. 5-29: Biegekriechsteifigkeiten der Gemische mit AG 20 und Rejuvenatoren (Zugabemenge 1)

Gemisch	Biegekriechsteifigkeit [MPa]		
	-25 °C	-16 °C	-10 °C
AG 20	838	380	199
20.1	42	-*	-*
20.2	183	58	-*
20.3	374	96	23
20.4	701	210	112
20.5	249	66	-*
20.6	374	105	76
20.7	443	156	98
20.8	623	195	103
20.9	441	114	15

* = nicht bestimmt worden

Tab. 5-30: Biegekriechsteifigkeiten der Gemische mit AG 20 und Rejuvenatoren (Zugabemenge 2)

Gemisch	Biegekriechsteifigkeit [MPa]		
	-25 °C	-16 °C	-10 °C
AG 20	838	380	199
20.1	121	39	-*
20.2	164	64	-*
20.3	369	100	37
20.4	777	306	157
20.5	339	111	47
20.6	280	91	23
20.7	414	191	107
20.8	708	276	145
20.9	509	152	76

* = nicht bestimmt worden

Tab. 5-31: Ergebnisse der Kraftduktilitätsprüfung für Gemische mit AG 20 (Zugabemenge 1)

Gemisch	Max. Zugkraft	Formänderungsarbeit		
	[N]	E' ges [J/cm ²]	E' 0-200 [J/cm ²]	E 200-400 [J/cm ²]
AG 20	62,38	3,96	3,95	0,01
20.1	1,68	0,23	0,16	0,07
20.2	18,58	1,32	1,31	0,01
20.3	13,59	1,18	1,03	-
20.4	75,24	5,81	5,51	-
20.5	25,14	2,25	1,93	0,32
20.6	36,94	0,94	0,94	-
20.7	0,96	0,01	0,01	-
20.8	65,66	4,58	4,48	0,10
20.9	20,76	1,78	1,56	0,21

Tab. 5-32: Ergebnisse der Kraftduktilitätsprüfung für Gemische mit AG 20 (Zugabemenge 2)

Gemisch	Max. Zugkraft	Formänderungsarbeit		
	[N]	E'_{ges} [J/cm ²]	E'_{0-200} [J/cm ²]	$E'_{200-400}$ [J/cm ²]
AG 20	62,38	3,96	3,95	0,01
20.1	16,03	3,86	0,97	2,89
20.2	35,09	1,24	1,24	-
20.3	42,18	2,07	1,80	0,27
20.4	232,58	3,13	3,13	-
20.5	8,47	0,73	0,65	0,08
20.6	41,38	0,91	0,91	-
20.7	0,96	0,01	0,01	-
20.8	119,9	0,49	0,49	-
20.9	66,95	3,52	3,52	-

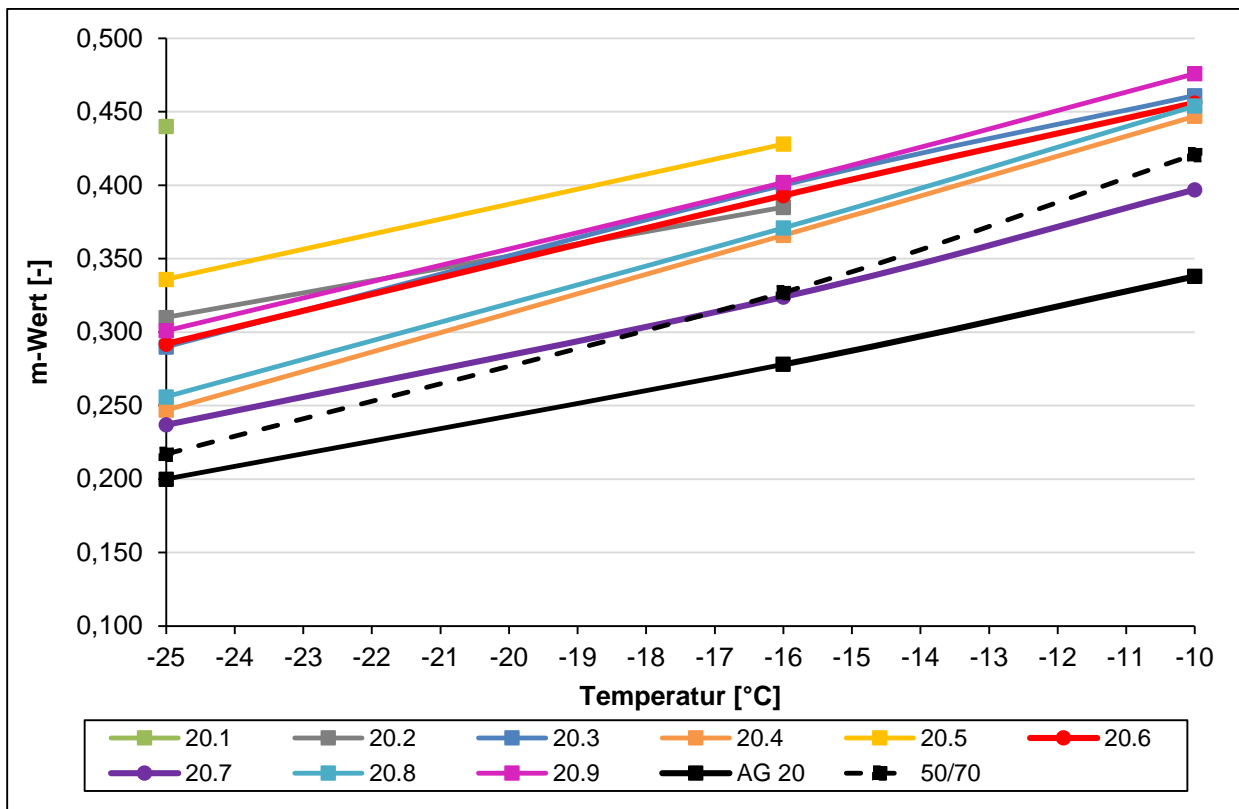


Bild 5-43: m-Werte der Gemische 20.1 bis 20.9, des Bindemittels aus Granulat AG 20 und eines 50/70 (Zugabemenge 1)

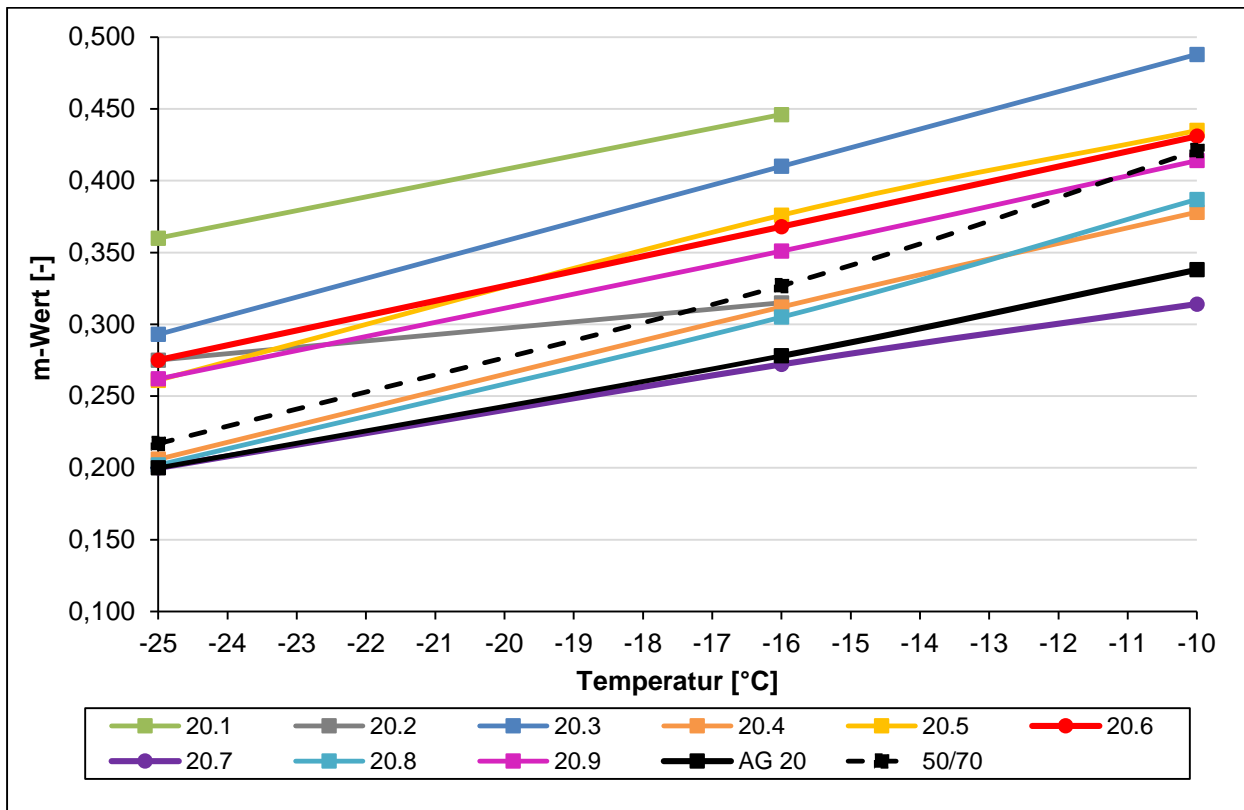


Bild 5-44: m-Werte der Gemische 20.1 bis 20.9, des Bindemittels aus Granulat AG 20 und eines 50/70 (Zugabemenge 2)

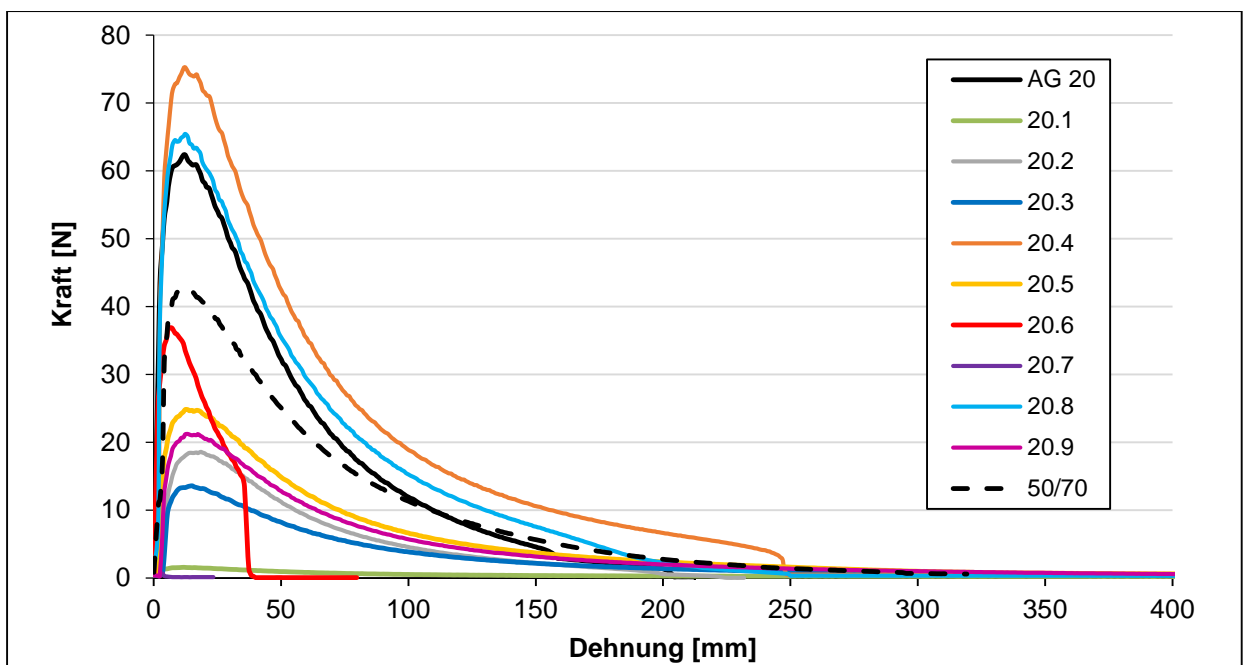


Bild 5-45: Kraft-Dehnungs-Kurven der Gemische mit AG 20 (Zugabemenge 1)

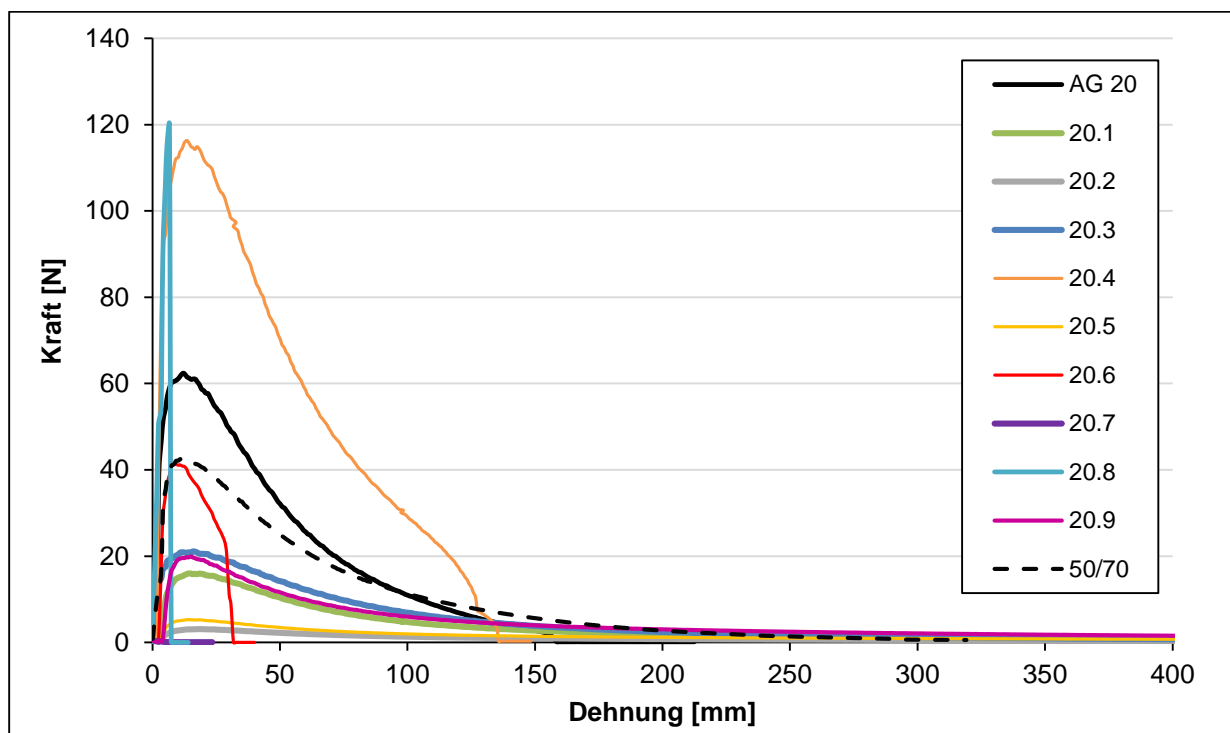


Bild 5-46: Kraft-Dehnungs-Kurven der Gemische mit AG 20 (Zugabemenge 2)

5.2.12 Untersuchung der Gemische aus Rejuvenatoren und AG 21

Die Erweichungspunkte Ring und Kugel und Nadelpenetrationen der Gemische aus den Rejuvenatoren R 1 bis R 9 und dem Asphaltgranulat AG 21 sind in Tab. 5-33 dargestellt. Die Gemische mit dem Bindemittel aus dem Asphaltgranulat AG 21 wurden zuletzt erstellt, sodass die Erkenntnisse und Erfahrungen aus den vorherigen Untersuchungen zur Ermittlung der Zugabemengen eingesetzt werden konnten, was eine gute Einstellung des Zielwertes für den Erweichungspunkt Ring und Kugel zur Folge hatte. Lediglich die Gemische 21.7 und 21.8 wiesen zu hohe Erweichungspunkte auf, wobei dieser bei Gemisch 21.8 nur sehr geringfügig erhöht ist und die Nadelpenetration nur um 2/10 mm unter dem Anforderungsbereich liegt. Die Nadelpenetrationen sind bis auf die Gemische 21.3 und 21.5 jedoch deutlich alle ≥ 70 1/10 mm.

Die Ergebnisse der Untersuchungen im DSR sind als Black-Diagramm in Bild 5-47 dargestellt. Analog zu den bisherigen Ergebnissen haben Gemische mit R 3 und R 4 eine rheologische Wirksamkeit im Sinne einer „Verjüngung“, wobei dieser für R 3 am stärksten ausgeprägt ist. Auch mit R 8 wird eine verjüngende Wirkung erzielt. Alle weiteren Gemische erzeugen eher eine Alterung, was beim Gemisch 21.2 wie bereits bei den anderen Asphaltgranulaten besonders ausgeprägt ist.

Hinsichtlich des Kälteverhaltens wurden die Gemische im BBR untersucht. Für 21.7 und 21.2 konnten ähnlich wie bei anderen Asphaltgranulaten keine Werte ermittelt werden, bei den Gemischen 21.1, 21.5 und 21.6 wurden nur sehr geringe Biegekiechsteifigkeiten bei -25 °C gemessen was aus der Tab. 5-34 ersichtlich wird.

Tab. 5-33: Erweichungspunkte Ring und Kugel (EP RuK) und Nadelpenetrationen (PEN) der Gemische aus den Rejuvenatoren 1 bis 9 und AG 21

Probe	Zugabemenge	EP RuK	PEN
	[M.-%]	[°C]	[0,1 mm]
AG 21	-	75,5	16
21.1	13,0	52,9	89,0
21.2	25,0	46,4	180,0
21.3	16,0	50,4	69,0
21.4	30,0	53,8	76,0
21.5	17,0	46,8	67,2
21.6	21,0	53,5	141,0
21.7	16,0	69,6	154,5
21.8	50,0	54,1	48,0
21.9	45,0	50,4	86,1

Tab. 5-34: Biegekriechsteifigkeiten der Gemische mit AG 21 und Rejuvenatoren

Gemisch	Biegekriechsteifigkeit [MPa]		
	-25 °C	-16 °C	-10 °C
AG 21	942	421	211
21.1	101	-*	-*
21.2	-*	-*	-*
21.3	339	56	11
21.4	363	79	12
21.5	86	-*	-*
21.6	195	-*	-*
21.8	535	151	86
21.9	325	77	35

* = nicht bestimmt worden

Die Additive R.3, R.4, R.8 und R.9 bewirken eine Reduzierung der Biegekriechsteifigkeiten und eine Erhöhung der m-Werte in Bild 5-48 erkannt werden kann. Dabei ist die Wirkung von R 9 nur sehr gering. Darüber hinaus wurden die Kraftduktilitäten der Gemische (mit Ausnahme von 21.6 und 21.7) aufgrund der Beschaffenheit der Proben bei 10 °C bestimmt. Die Ergebnisse für die maximale max. Zugkraft und die Formänderungsarbeit sind in Tab. 5-35 zusammengestellt. Bild 5-49 enthält die Kraft-Dehnungs-Kurven der Gemische. Für alle Gemische kann der verjüngende Effekt anhand der Senkung der maximalen Zugkräfte und Erhöhung der Dehnlänge im Vergleich zum Bindemittel aus AG 21 ohne Zusätze nachgewiesen werden.

Die Gemische 21.2 und 21.5 besitzen dabei sehr geringe Formänderungsarbeiten und niedrige maximale Zugkräfte.

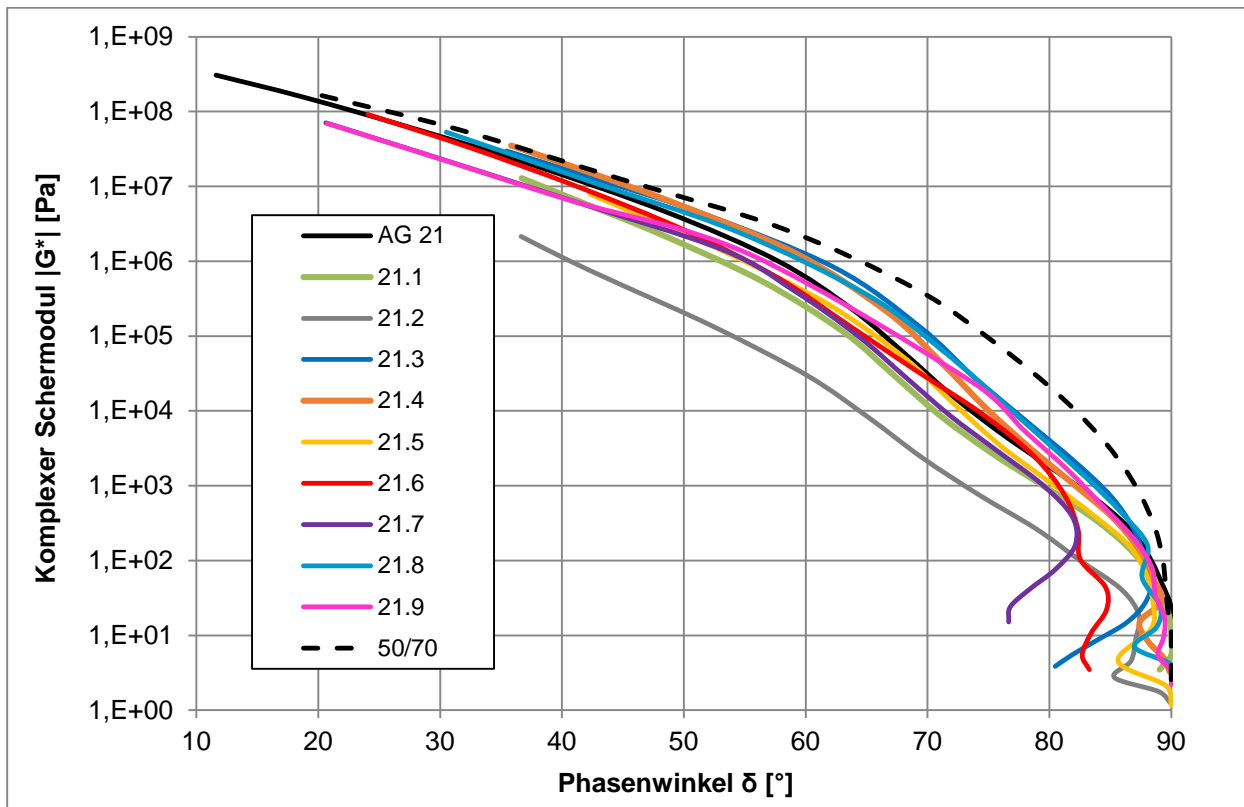


Bild 5-47: Black-Dialogramm der Gemische mit AG 21 sowie die Referenzwerte eines 50/70

Tab. 5-35: Ergebnisse der Kraftduktilitätsprüfung für Gemische mit AG 21

Gemisch	Max. Zugkraft	Formänderungsarbeit		
	[N]	E'_{ges} [J/cm ²]	E'_{0-200} [J/cm ²]	$E_{200-400}$ [J/cm ²]
AG 21	158,53	9,16	9,16	-
21.1	10,92	1,51	1,05	0,46
21.2	3,08	0,43	0,31	0,12
21.3	15,06	1,62	1,25	0,37
21.4	22,64	2,65	1,95	0,70
21.5	5,32	0,68	0,49	0,19
21.8	50,86	4,95	3,82	1,13
21.9	23,04	1,87	1,68	0,19

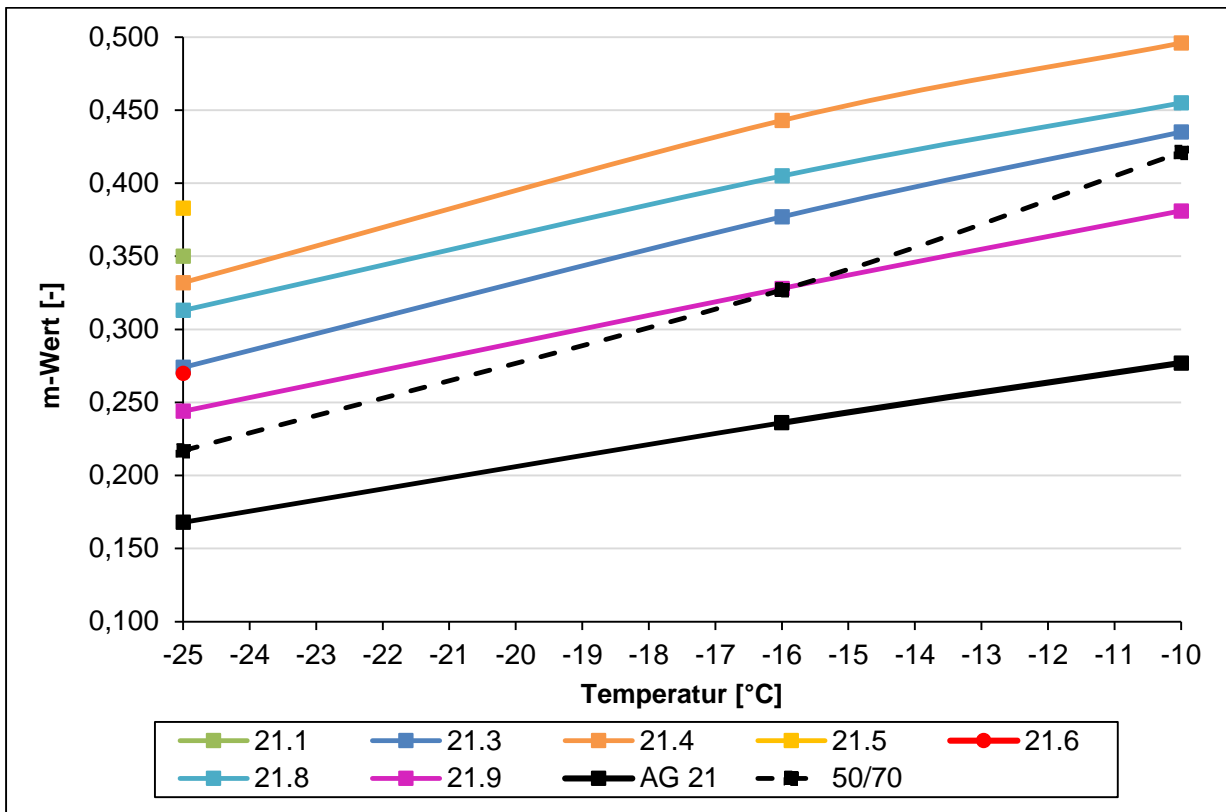


Bild 5-48: m-Werte der Gemische 21.1 bis 21.9, des Bindemittels aus Granulat AG 20 und eines 50/70

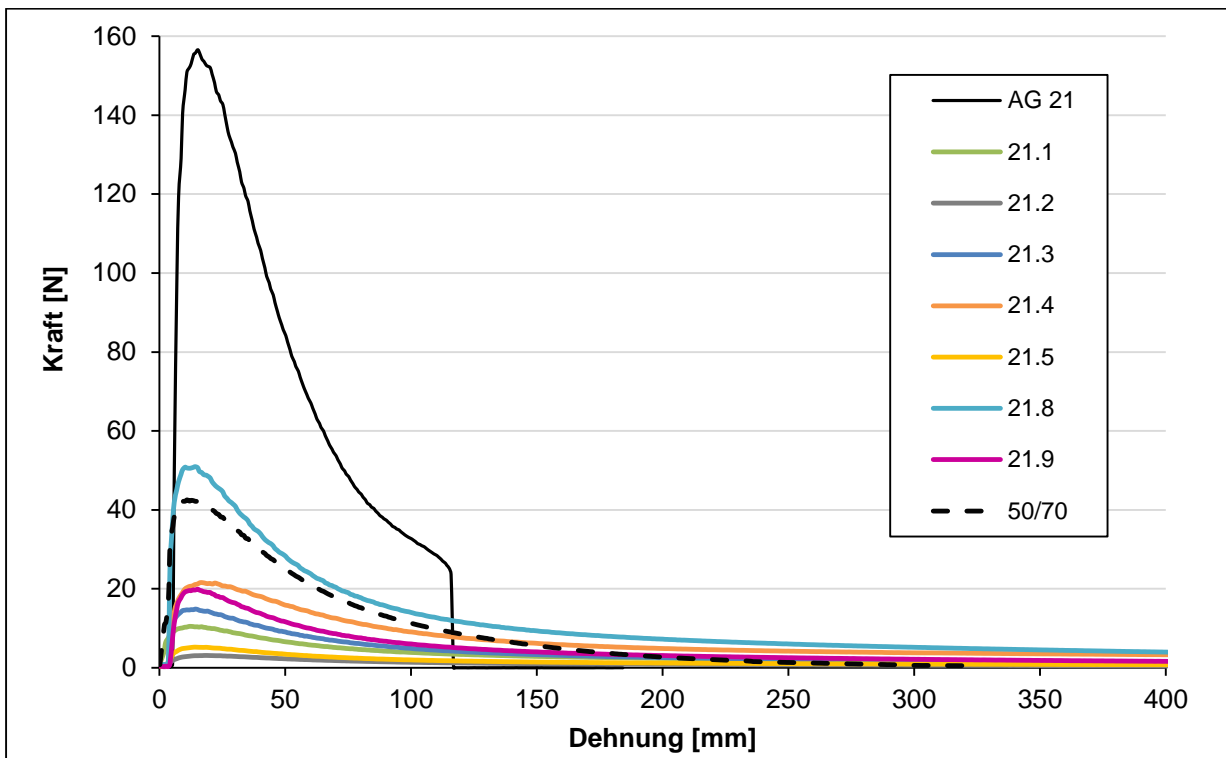


Bild 5-49: Kraft-Dehnungs-Kurven der Gemische mit AG 21

5.3 Zusammenfassende Bewertung der Wirksamkeitsuntersuchungen an Bitumen

5.3.1 Bewertung der Wirkungsweise der Rejuvenatoren

Die Untersuchungen der Gemische aus Rejuvenatoren und den Bindemitteln aus AG 4, AG 7, AG 9, AG 18, AG 20 und AG 21 ermöglichen erste belastbare Schlüsse zur Wirksamkeit der Produkte.

Die weichen Straßenbaubitumen R 8 und R 9 zeigen ebenso die gewünschten rheologisch verjüngenden Wirkungen auf das verhärtete Bindemittel aus den Granulaten. Im Vergleich zu den Rejuvenatoren sind dabei jedoch deutlich höhere Zugabeanteile notwendig. In der Praxisanwendung ist eine Verwendung solcher weicheren Straßenbaubitumen damit grundsätzlich auch zu befürworten, allerdings können in Abhängigkeit von dem Alterungsgrad des Bindemittels im Granulat, vom vorgesehenen Granulatanteil in der Erstprüfung und vom Gesamtbindemittelgehalt in der Erstprüfung Grenzen bei der Anwendung von weicheren Straßenbaubitumen als „Rejuvenator“ auftreten.

Die Verwendung von weichen Straßenbaubitumen eignet sich somit nicht für Asphaltgranulate mit erhöhten Erweichungspunkten, so sind die Zugabemengen mit AG 4 bei 50 M.-% bemessen und damit bereits sehr hoch.

R 3 und R 4 zeigen bei allen Untersuchungen positive Ergebnisse. Die Viskositätsminderung, die sich bereits durch die konventionellen Kennwerte Erweichungspunkt Ring und Kugel und Nadelpenetration andeutet, wird auch rheologisch bestätigt. R 3 ist dabei der Rejuvenator, mit dem höchsten rheologischen Verjüngungseffekt, sodass der rheologische Zustand eines frischen Bitumens erreicht wurde. Die Wirkung des Rejuvenators ist somit nicht von dem Bindemittel aus dem Granulat abhängig und die Zugabemengen können ohne tiefgehende Kenntnisse über das Bindemittel aus dem Granulat ermittelt werden.

R 4 dahingegen bewirkt zwar ebenfalls eine Verjüngung, das Verhalten im Black-Diagramm deutet allerdings auch auf über die Verjüngung hinausgehende Veränderung des Bitumens hin.

Mit R 2 und R 7 konnte bei keinem gealterten Bindemittel eine rheologisch wirksame Verjüngung festgestellt werden. Die Ergebnisse von R 7 weisen bei keiner Untersuchungsmethode auf eine signifikante Viskositätsminderung hin. R 2 senkt zwar die Viskosität des Bindemittels aus dem Granulat, die elastischen Anteile werden allerdings nicht reduziert.

Der Rejuvenator R 5 erweist sich rheologisch bei einzelner Betrachtung des komplexen Schubmoduls und des Phasenwinkels zwar als wirksam, dies allerdings nicht in einem Verhältnis, das einer tatsächlichen rheologischen Verjüngung gleichkommt. Sowohl mit R 5, als auch mit den Rejuvenatoren R 1 und R 6 sind weitere Untersuchungen erforderlich, da basierend auf den vorhandenen Daten keine eindeutigen Aussagen bezüglich der Wirksamkeit getroffen werden können.

5.3.2 Toxikologische Bewertung der Rejuvenatoren

Bei den als Rejuvenatoren eingesetzten Formulierungen handelt es sich aus chemischer Sicht um eine sehr heterogene Produktgruppe. Zum Einsatz kommen beispielsweise Mineralölprodukte (aromatische Kohlenwasserstoffe, Mineralöle, Bitumenprodukte), organische Lösungsmittel oder Siloxane, aber auch – teilweise modifizierte – pflanzliche Erzeugnisse (Pflanzenöl, Fettsäuren, Harze). Angeboten werden aber auch recycelte Schmieröle. Daher ist eine universelle toxikologische Bewertung von Rejuvenatoren nicht

möglich, zumal die Herstellerangaben für die Produkte, die sich in der weiteren Auswahl für die Testung im Rahmen dieses Projekts befanden, teilweise lückenhaft bis unzureichend sind. Darüber hinaus ist anzunehmen, dass das Spektrum an chemischen Verbindungen weitaus größer ist, da viele weitere Produkte auf dem Markt sind oder zukünftig auf den Markt kommen.

Bei den meisten Rejuvenatoren, zu denen Informationen (z. B. als Sicherheitsdatenblatt) vorliegen, handelt es sich um Gemische, die durch die Lieferanten nicht als gefährlich nach Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 (CLP-Verordnung) eingestuft werden. Bei den Einstufungen, mit denen einzelne Produkte oder deren Inhaltsstoffe gekennzeichnet waren, handelt es sich um Haut- und Augenreizung, Sensibilisierung der Haut und Aspirationsgefahr. Darüber hinaus enthalten einige Produkte Polycyclische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK). Mit 2-(Butoxyethoxy)ethanol ist auch ein Lösungsmittel unter den Inhaltsstoffen, für das in der Technischen Regel TRGS 900 ein Arbeitsplatzgrenzwert (AGW) in Höhe von 67 mg/m³ gelistet wird.

Aus dieser Auflistung der potenziellen Gefährdungen, die von der Verwendung der jeweiligen Produkte ausgehen, lässt sich folgern, dass der Arbeitgeber den Einsatz von Rejuvenatoren im Rahmen seiner Gefährdungsbeurteilung gesondert berücksichtigen muss. Schon für Tätigkeiten mit bitumengebundenen – PAK-haltigen – Straßenbaustoffen, die üblicherweise bei Temperaturen ab 170°C ausgeführt werden, gilt, dass der Hautkontakt vermieden sowie die Exposition gegen Dämpfe und Aerosole minimiert werden muss. Weitere Gesichtspunkte des Arbeitsschutzes können aufgrund gesundheitsgefährdender Eigenschaften von Inhaltsstoffen der verschiedenen Produkte bedeutsam werden. Beispiele lassen sich aus den wenigen Informationen ableiten, die für eine begrenzte Anzahl an Rejuvenatoren vorliegt.

- Es kann die Überwachung eines AGWs notwendig sein, da auch schwerflüchtige Lösungsmittel (wie 2-(Butoxyethoxy)ethanol) bei hohen Verarbeitungstemperaturen zu einer relevanten Expositionshöhe führen können.
- Problematisch ist die Anwesenheit von sensibilisierenden Stoffen zu sehen. Für diese wird Hautkontakt kaum zu verhindern sein wird, wenn sie in die Dampfphase mitgerissen werden und sich nachfolgend auf ungeschützter Haut niederschlagen. Entscheidend für eine mögliche Gefährdung ist die hautsensibilisierende Wirkstärke der jeweiligen Verbindung, die aus der Einstufung nicht zwingend abgeleitet werden kann.
- Im Fall von PAK-haltigen Rejuvenatoren ist darauf zu achten, dass PAK nicht in höheren Konzentrationen vorliegen als in den entsprechenden Bitumenprodukten selbst.
- Schließlich gilt für recycelte Schmieröle, dass sie nur aus schadstofffreien Altölen gewonnen werden dürfen. Dies liegt jedoch im Verantwortungsbereich des Herstellers.
- Bei den für die Herstellung von Asphaltmischgut im Labor ausgewählten zwei Rejuvenatoren handelte es sich um viskose Flüssigkeiten, so dass bei diesen Produkten Maßnahmen zum Schutz vor Staub nicht nötig sind.

Diese Beispiele zeigen, dass der Arbeitgeber auf die Bereitstellung eines Sicherheitsdatenblatts als wichtigstes Informationsmittel in der Stofflieferkette entsprechend den Anforderungen der Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 (REACH) angewiesen ist. Mit der Registrierungspflicht nach REACH für Produkte, die ab einer Jahrestonne hergestellt oder

importiert werden, ist auch die Pflicht zur toxikologischen Testung verbunden (Anhang VII bis Anhang X). Der Umfang der Testung steigt mit der Jahrestonnage und umfasst mindestens in vitro Tests für Hautreizung, Augenreizung, Genmutation sowie Prüfung der akuten Toxizität und Sensibilisierung der Haut. Werden jeweils mehr als 10, 100 oder 1000 Tonnen in Verkehr gebracht, sind weitere Toxizitätstests für eine erfolgreiche Registrierung erforderlich.

Zusammenfassend lässt für die Verwendung von Rejuvenatoren bei der Aufbereitung und Verarbeitung von bitumengebundenen Straßenbaustoffen feststellen, dass für jedes einzelne Produkt bei der Durchführung einer Gefährdungsbeurteilung geprüft werden muss, ob zusätzliche Arbeitsschutzmaßnahmen erforderlich sind oder sogar gemäß des Minimierungsgebots die Substitution durch ein anderes Produkt geboten ist.

5.3.3 Ermittlung optimaler Zugabemengen von Rejuvenatoren

Für die Bindemittel aus den Asphaltgranulaten, bei denen zwei Zugabemengen realisiert worden waren, wurden aus den Ergebnissen der DSR- und BBR-Untersuchungen und der Kraftduktilitätsprüfungen die in den Tab. 5-36 bis Tab. 5-39 optimalen Zugabemengen der einzelnen Rejuvenatoren in M.-% zu den untersuchten Bindemitteln aus Asphaltgranulaten zur Wiederherstellung der rheologischen Eigenschaften eines Straßenbaubitumens 50/70 mit Hilfe von Inter- bzw. Extrapolation errechnet. Maßgebliche Kenngrößen waren dabei die Äquiviskositätstemperatur (Temperatur beim einem komplexen Schermodul von 15 kPa) [RADENBERG et al.], die Biegekriechsteifigkeit S bei -16 °C und die maximale Zugkraft. Da die Kraftduktilitätsprüfung für das Bindemittel aus AG 18 bei unterschiedlichen Temperaturen durchgeführt wurde, wurde die Berechnung der optimalen Zugabemenge für die maximale Zugkraft nicht durchgeführt.

Für einige Gemische konnten für alle drei Parameter (z.B Gemisch 20.3) optimale Zugabemenge in ähnlicher Größenordnung ermittelt werden.

Auf Basis aller rheologisch-physikalischen Untersuchungen und unter Berücksichtigung der Diskussionen im projektbetreuenden Ausschuss wurden die Rejuvenatoren R 1, R 3 und R 8 für die weiter gehenden Untersuchungen ausgewählt.

Tab. 5-36: Optimale Zugabemengen für das Bindemittel aus AG 4 zur Wiederherstellung der rheologischen Parameter eines Straßenbaubitumens 50/70

Gemisch	Äquiviskositätstemperatur	Biegekriechsteifigkeit S	Maximale Zugkraft
4.1	13,4	-*	-*
4.2	15,6	-*	-*
4.3	12,0	8,9	8,6
4.4	29,5	33,8	37,8
4.5	17,4	-*	-*
4.6	16,8	-*	-*
4.7	21,5	-*	-*
4.8	37,2	-*	30,7
4.9	42,4	54,2	44,5

* Berechnung nicht möglich

Tab. 5-37: Optimale Zugabemengen für das Bindemittel aus AG 7 zur Wiederherstellung der rheologischen Parameter eines Straßenbaubitumens 50/70

Gemisch	Äquisviskositäts-temperatur	Biegekriechsteifigkeit S	Maximale Zugkraft
7.1	3,8	-*	3,3
7.2	6,6	-*	3,6
7.3	5,0	5,8	4,9
7.4	15,3	13,2	18,9
7.5	4,6	-*	2,8
7.6	1,7	-*	5,4
7.7	-*	-*	-*
7.8	30,2	25,6	28,3
7.9	10,8	9,4	10,0

-* Berechnung nicht möglich

Tab. 5-38: Optimale Zugabemengen für das Bindemittel aus AG 18 zur Wiederherstellung der rheologischen Parameter eines Straßenbaubitumens 50/70

Gemisch	Äquisviskositäts-temperatur	Biegekriechsteifigkeit S	Maximale Zugkraft
18.1	15,1	-*	-*
18.2	34,2	-*	-*
18.3	17,5	13,4	-*
18.4	39,7	35,6	-*
18.5	19,2	12,6	-*
18.6	-*	-*	-*
18.7	-*	-*	-*
18.8	76,1	51,2	-*
18.9	44,8	36,3	-*

-* Berechnung nicht möglich

Tab. 5-39: Optimale Zugabemengen für das Bindemittel aus AG 20 zur Wiederherstellung der rheologischen Parameter eines Straßenbaubitumens 50/70

Gemisch	Äquisviskositäts-temperatur	Biegekriechsteifigkeit S	Maximale Zugkraft
20.1	9,5	-*	3,9
20.2	5,8	35,8	14,4
20.3	11,8	13,4	13,0
20.4	25,9	23,3	17,8
20.5	11,8	19,4	15,8
20.6	19,4	22,3	18,7
20.7	18,0	25,5	-*
20.8	34,5	42,0	39,2
20.9	35,0	37,0	35,5

-* Berechnung nicht möglich

5.4 Alterungsneigung von Bindemittel-Rejuvenatoren-Gemischen

Da Gemische aus Bindemittel aus Asphaltgranulat und Rejuvenator bei der Wiederverwendung und nach dem Wiedereinbau erneut Alterungsprozessen ausgesetzt sind, sollte das Alterungsverhalten zunächst an Gemischen aus Bindemittel aus Asphaltgranulat und Rejuvenator bestimmt werden. Für alle Gemische wurden die drei Alterungsverfahren RTFOT, 3 x RTFOT und RTFOT plus anschließende PAV-Alterung angewendet. An allen Gemischen wurden die Erweichungspunkte Ring und Kugel bestimmt. Da sich bereits bei den vorangegangenen Untersuchungen herausgestellt hatte, dass eine Beurteilung der Gemische allein über den Erweichungspunkt nicht umfassend möglich ist, wurden für alle Gemische außer denen mit AG 7 (zu wenig Material) zusätzlich DSR-Versuche zur Beschreibung des rheologischen Verhaltens durchgeführt. In der Tab. 5-40 sind die ermittelten Erweichungspunkte der Bindemittel aus Asphaltgranulat, der Bindemittel nach Rejuvenatorzugabe und nach RTFOT, 3 x RTFOT und RTFOT plus PAV aufgeführt. Die Zugabemengen für die einzelne Rejuvenatoren wurden aus Tab. 5-7 übernommen, bzw. nach Methode 2 über die Äquiviskositätstemperatur bestimmt, weil mit dieser etwas ziel-sicherer die angepeilten Erweichungspunkte erreicht werden konnten.

Tab. 5-40: Erweichungspunkte der Altbindemittel, der Gemische nach Rejuvenatorzugabe und nach den Alterungsversuchen

Bezeichnung Gemisch	Erweichungspunkt RuK AG [°C]	Erweichungspunkt RuK AG + R [°C]	Erweichungspunkt RuK nach RTFOT [°C]	Erweichungspunkt RuK nach 3 x RTFOT [°C]	Erweichungspunkt RuK nach RTFOT +PAV [°C]
AG 4/ R1	78,0	51,1	52,2	51,8	68,9
AG 4/ R3	78,0	40,0	47,7	63,3	87,7
AG 4/ R8	78,0	55,4	58,4	66,5	74,8
AG 5/ R1	50,6	50,5	57,5	66,4	70,0
AG 5/ R3	50,6	50,1	60,2	73,8	81,0
AG 5/ R8	50,6	55,4	59,6	68,7	71,7
AG 6/ R1	65,4	51,1	51,3	61,6	64,0
AG 6/ R3	65,4	58,5	63,4	77,0	90,0
AG 6/ R8	65,4	60,1	63,0	71,6	79,0
AG 7/ R1	57,0	54,6	62,1	63,1	67,8
AG7/ R3	57,0	52,1	61,4	69,8	83,4
AG 12/ R1	68,8	50,8	54,6	60,9	69,1
AG 12/ R3	68,8	54,9	60,9	71,4	86,1
AG 12/ R8	68,8	55,6	61,5	67,4	69,5
AG 18/ R1	82,0	35,4	42,0	52,0	53,6
AG 18/ R3	82,0	54,0	71,3	88,0	95,0
AG18/ R8	82,0	59,4	71,0	72,7	74,8
AG 20/ R1	68,8	44,3	52,5	61,8	65,4
AG 20/ R3	68,8	52,2	59,4	70,5	71,5
AG 20/ R8	68,8	57,1	65,2	75,7	78,0

Bei allen Gemischen sinkt erwartungsgemäß der Erweichungspunkt nach Rejuvenatorzugabe. Mit zunehmender Alterungsstufe steigt er auf sein Maximum nach der Langzeitalterung RTFOT plus PAV. Das Maß der Senkung/Erhöhung ist dabei abhängig vom Asphaltgranulat, der Zugabemenge und auch vom Rejuvenator.

Bei den Bindemitteln, die einen Erweichungspunkt größer 60 °C haben, bleiben Gemische mit R 1 auch nach der Langzeitalterung unter dem Wert des ursprünglichen Altbindemittels, wobei bis auf AG 7, AG 18 und AG 20 die Erweichungspunkte nach Zugabe von R 1 im Anforderungsbereich liegen.

Bei den Gemischen mit R 3 wird deutlich, dass sie, mit Ausnahme von AG 20, im Vergleich der Rejuvenatoren unabhängig vom Asphaltgranulat jeweils die höchsten Erweichungspunkte erreichen, was ein Indiz für ein beschleunigtes Alterungsverhalten ist.

Die unterschiedlichen Tendenzen der Alterungsneigung der Gemische lassen sich durch die Ergebnisse der DSR-Untersuchungen (s. Bild 5-50 bis Bild 5-55) bestätigen. In je einem Black-Diagramm sind die Kurven für das Bindemittel aus dem Asphaltgranulat, die Gemische mit den drei Rejuvenatoren R 1, R 3 und R 8 und die Kurven für die Gemische nach der höchsten Alterungsstufe (RTFOT + PAV) dargestellt.

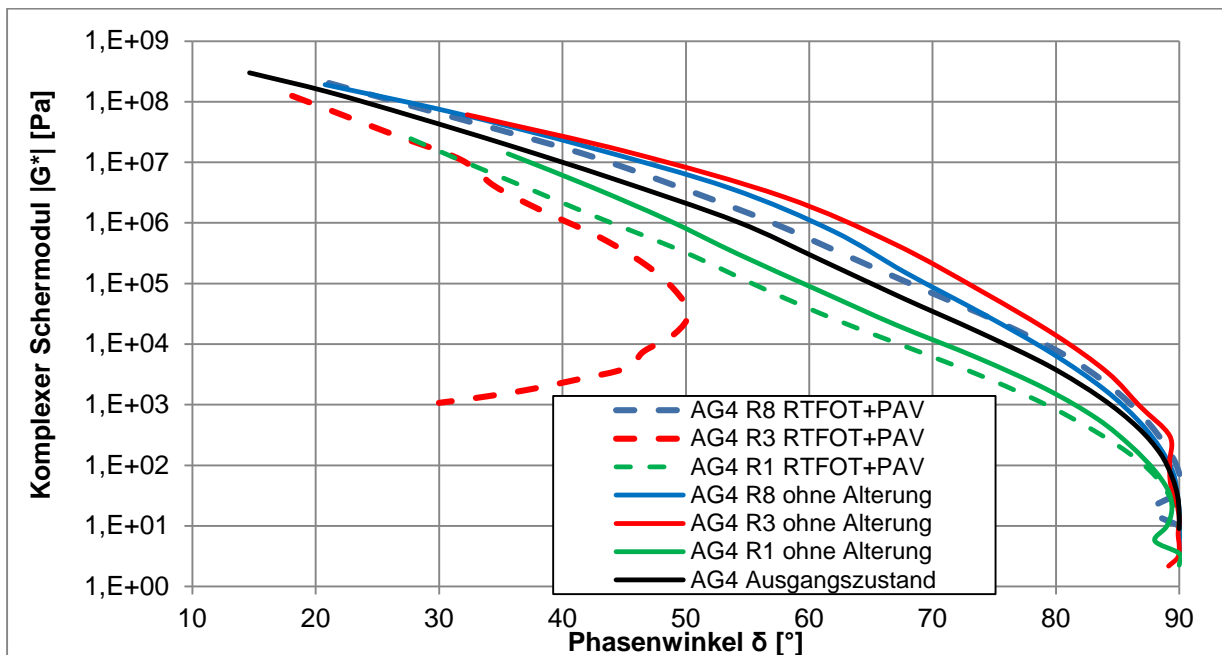


Bild 5-50: Black-Diagramm für AG 4 und Gemische vor und nach RTFOT+ PAV-Alterung

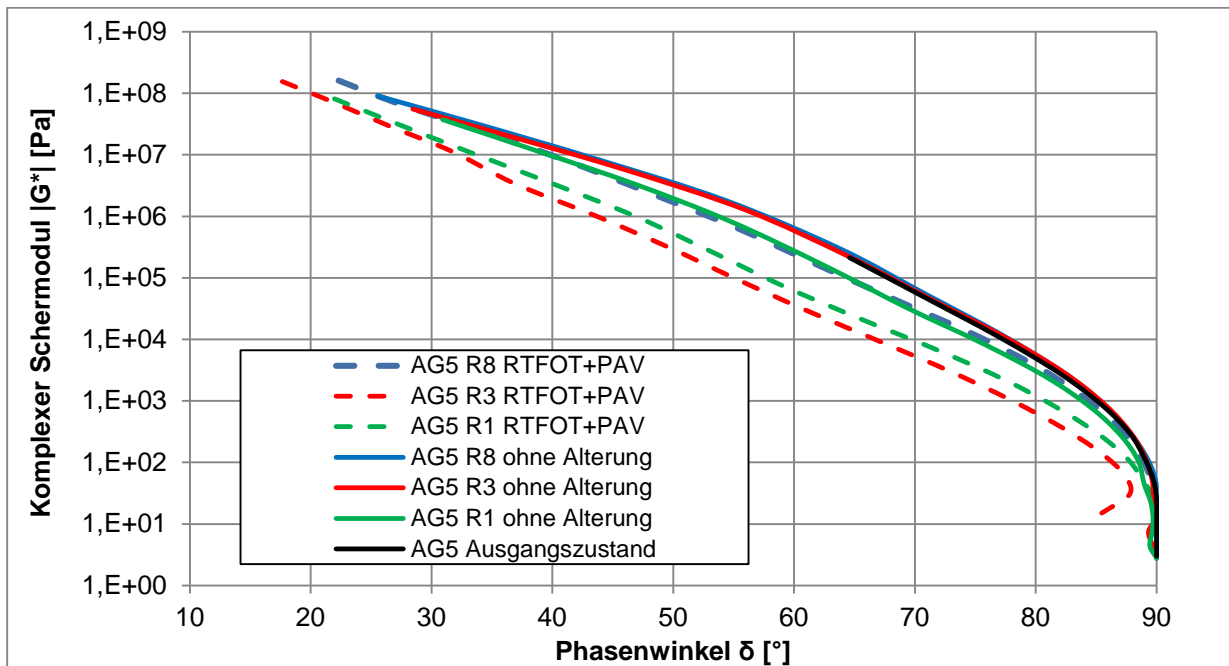


Bild 5-51: Black-Diagramm für AG 5 und Gemische vor und nach RTFOT+ PAV-Alterung

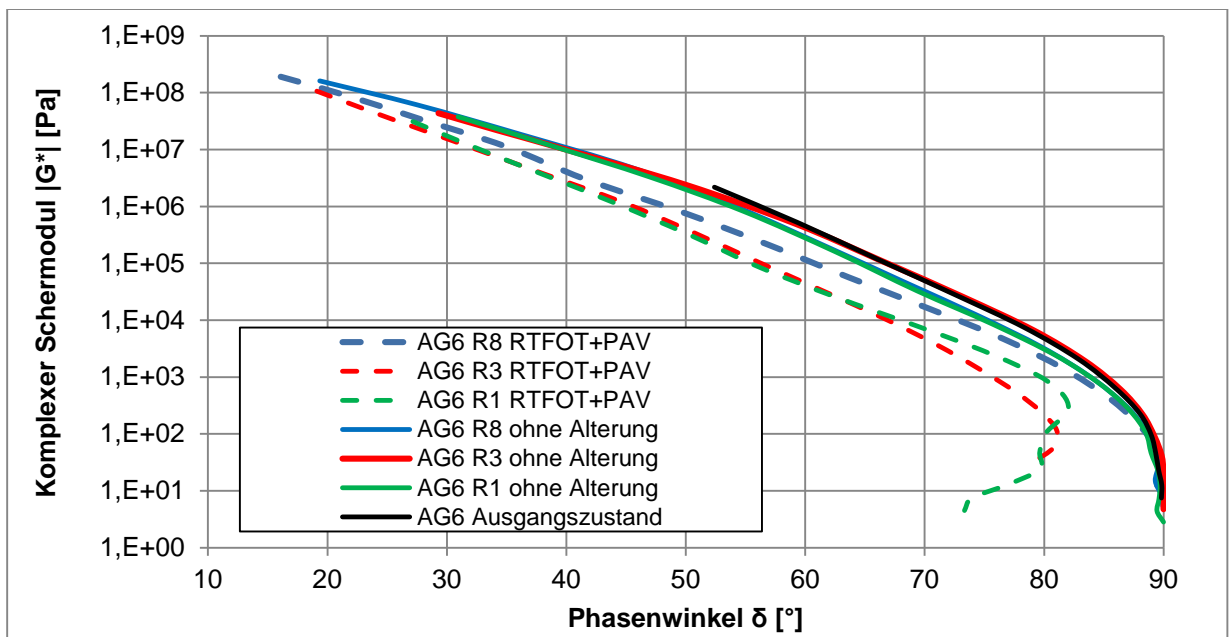


Bild 5-52: Black-Ddiagramm für AG 6 und Gemische vor und nach RTFOT+ PAV-Alterung

Wie bereits bekannt, erzielen R 3 und R 8 auf rheologischer Ebene eine verjüngende Wirkung, R 1 hingegen nicht. Durch die Langzeitalterung verändert sich das Verhältnis elastischer/viskoser Anteile, wobei diese Veränderung bei R 3 deutlich auffälliger ist und die Frage offen bleibt, warum dort für ein Gemisch eine Kurve ähnlich der eines hochmodifizierten Bindemittels (AG 4 und AG 18) gemessen wurde. Möglicherweise sind diese Effekte auf Reaktionen der Additive mit Restfüller oder anderen Bestandteilen des Bindemittels aus dem Asphaltgranulat zurückzuführen.

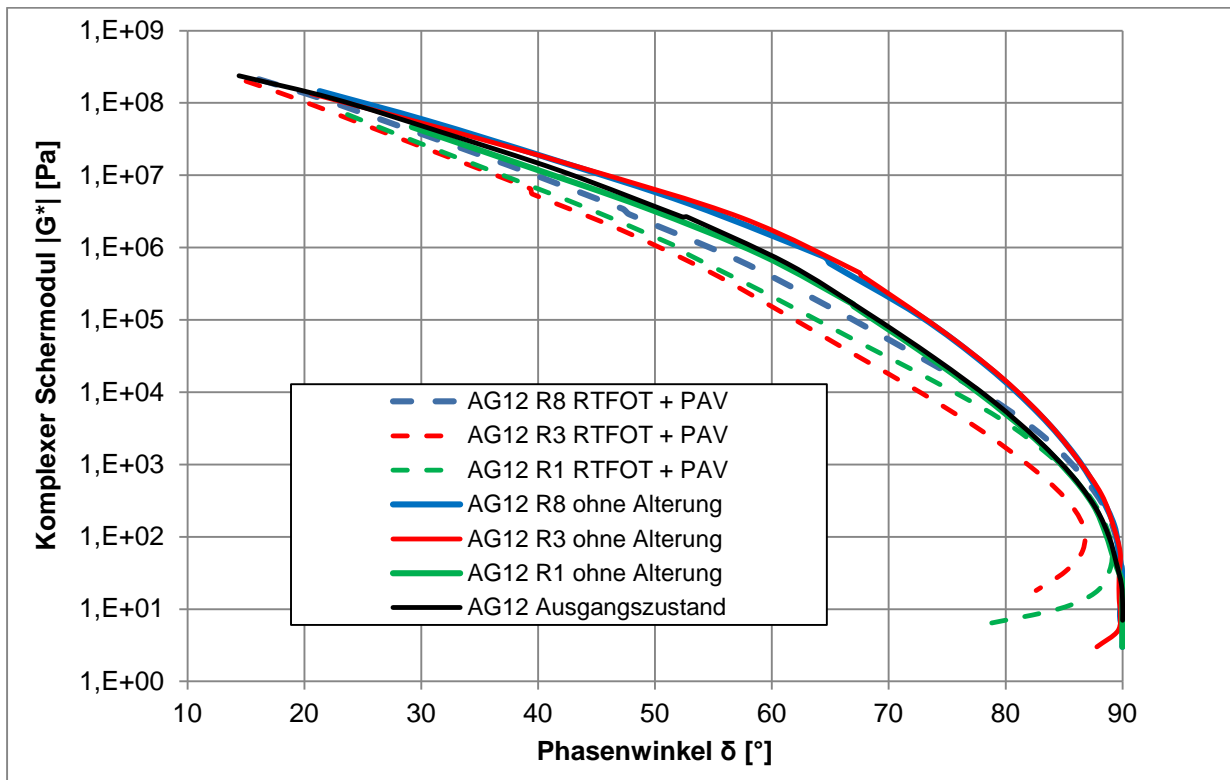


Bild 5-53: Black-Dialogramm für AG 12 und Gemische vor und nach RTFOT+ PAV-Alterung

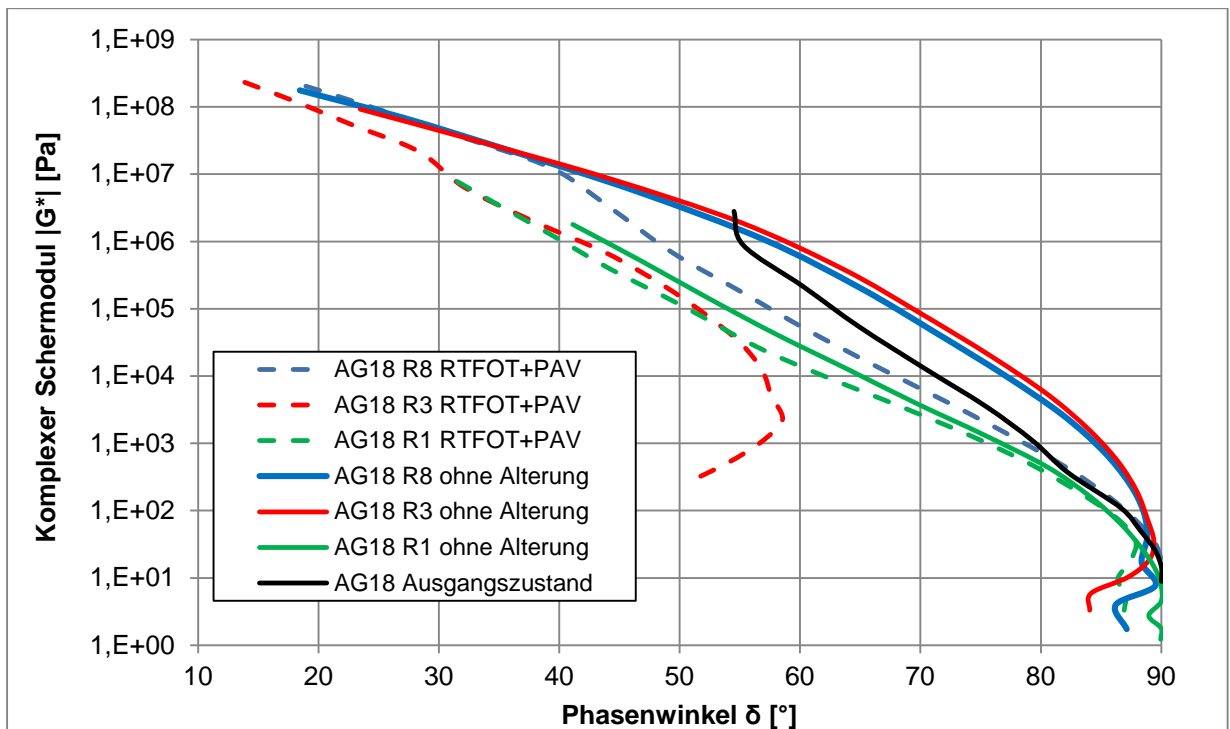


Bild 5-54: Black-Dialogramm für AG 18 und Gemische vor und nach RTFOT+ PAV-Alterung

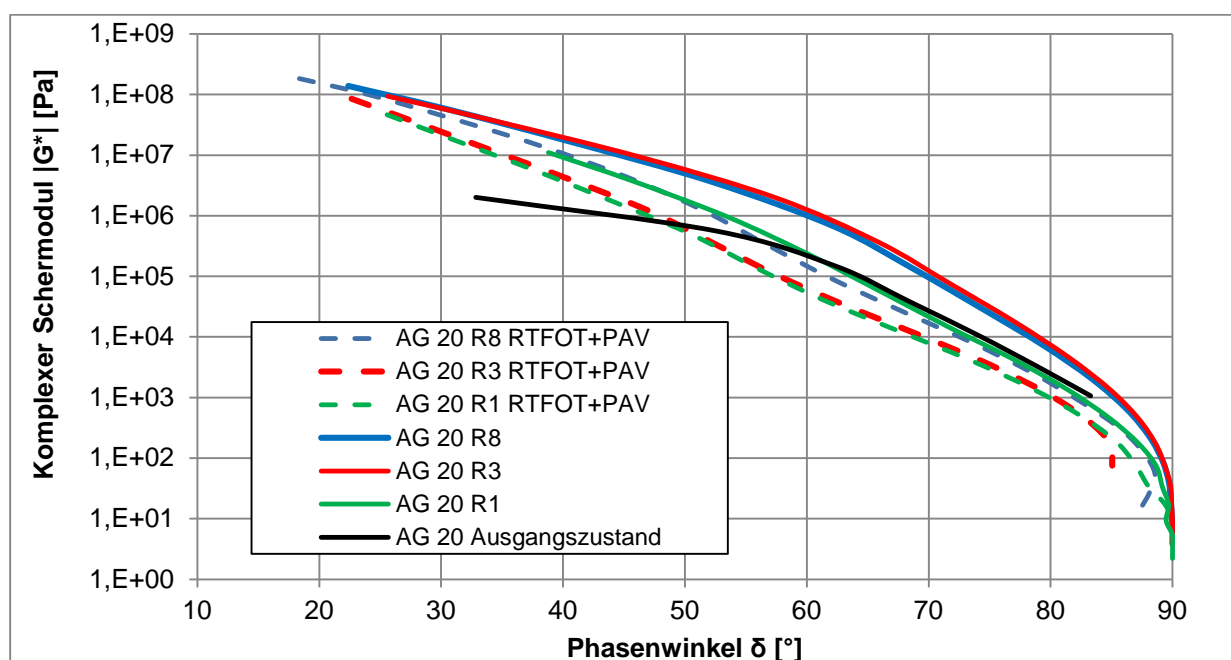


Bild 5-55: Black-Dialogramm für AG 20 und Gemische vor und nach RTFOT+ PAV-Alterung

Die Ergebnisse der Untersuchungen an den Erweichungspunkten werden insofern bestätigt, als dass R1 auf rheologischer Ebene zwar nicht wirksam ist, der Einfluss der Langzeitalterung aber wesentlich geringer ist als bei R 3. Generell weisen die Gemische mit den Rejuvenatoren nach einer Langzeitalterung niedrige Phasenwinkel bei äquivalenter Schermodulbetrachtung auf als das ursprüngliche Bindemittel aus dem Granulat.

5.5 Mikrostruktureller Nachweis der Wirkung der Rejuvenatoren

In Ergänzung zum Untersuchungsprogramm wurden Untersuchungen zur Visualisierung der Mikrostrukturen eines Bitumens mit und ohne Rejuvenatoren durchgeführt.

Hierzu wurde ein Straßenbaubitumen 30/45 bei 85 °C im PAV für 65 Stunden gealtert. Danach wurden die Rejuvenatoren R 1 und R 3 mit jeweils 15 M.-% hinzugegeben. Anschließend wurde der Erweichungspunkt Ring und Kugel bestimmt. Er betrug für das Gemisch mit R 1 58,9 °C, für das Gemisch mit R 3 56 °C. Die ursprünglich vorgesehene Untersuchung der Gemische mit Hilfe des Fluoreszenzmikroskops erbrachte keine verwertbaren Ergebnisse. Dagegen lieferte die lichtmikroskopische Untersuchung mit Hilfe des Digitalmikroskops überraschende Ergebnisse. Die Proben unterschieden sich hinsichtlich ihrer Oberflächentextur voneinander und es können sogenannte „Bienenstrukturen“ identifiziert werden. Derartige Strukturen sind normalerweise erheblich kleiner und können nach derzeitigem Kenntnisstand nur mit aufwändigeren mikroskopischen Verfahren (z.B. AFM) nachgewiesen werden. Es wird vermutet, dass Bienenstrukturen Anreicherungen von paraffinischen Kohlenwasserstoffen sind. Derart große Bienenstrukturen sind für Bitumen dieser Sorte eher atypisch. Im Vergleich zum Ausgangszustand des Straßenbaubitumens 30/45 im Bild 5-56 ist nach PAV-Alterung eine erheblich größere Anzahl kleinerer „Bienen“ zu erkennen (s. Bild 5-57).

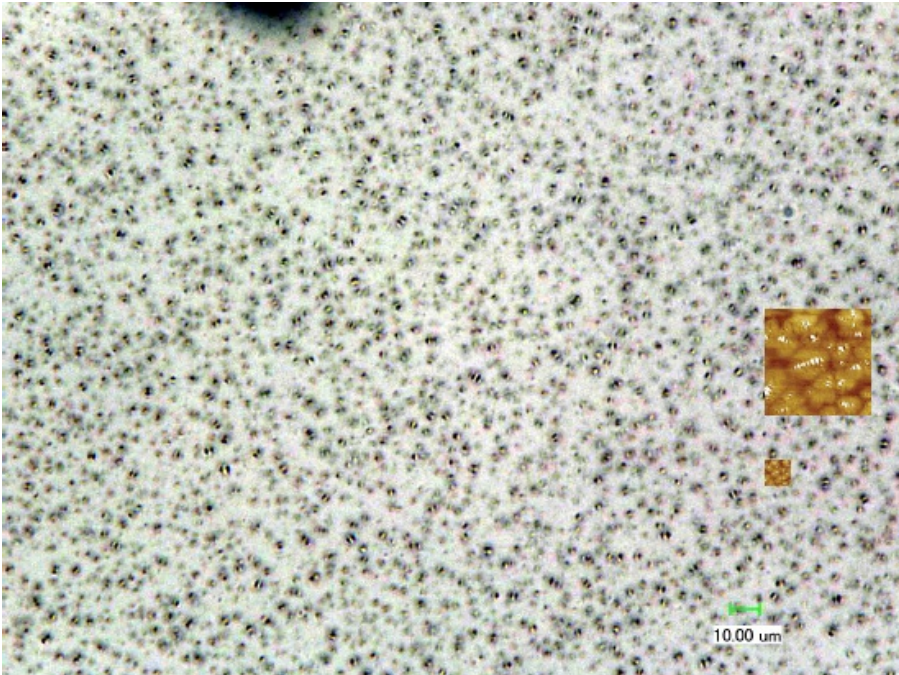


Bild 5-56: Bienenstrukturen im Straßenbaubitumen 30/45

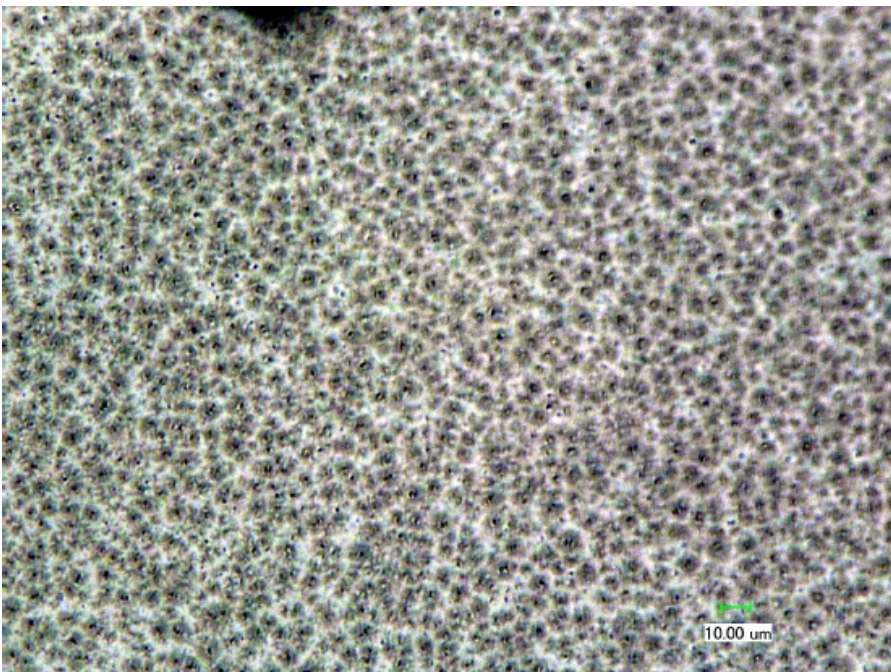


Bild 5-57: Bienenstrukturen des 30/45 nach der Alterung im PAV

Die R 3-modifizierte Probe ähnelt der Struktur des 30/45 im nicht gealterten Zustand (s. Bild 5-58). Dagegen zeigt das mit R 1 behandelte Bitumen sogar eine leichte Abnahme der „Bienenstrukturen“ (s. Bild 5-59), was die unterschiedliche Wirkungsweise und die Wirksamkeit der beiden Rejuvenatoren untermauern würde.

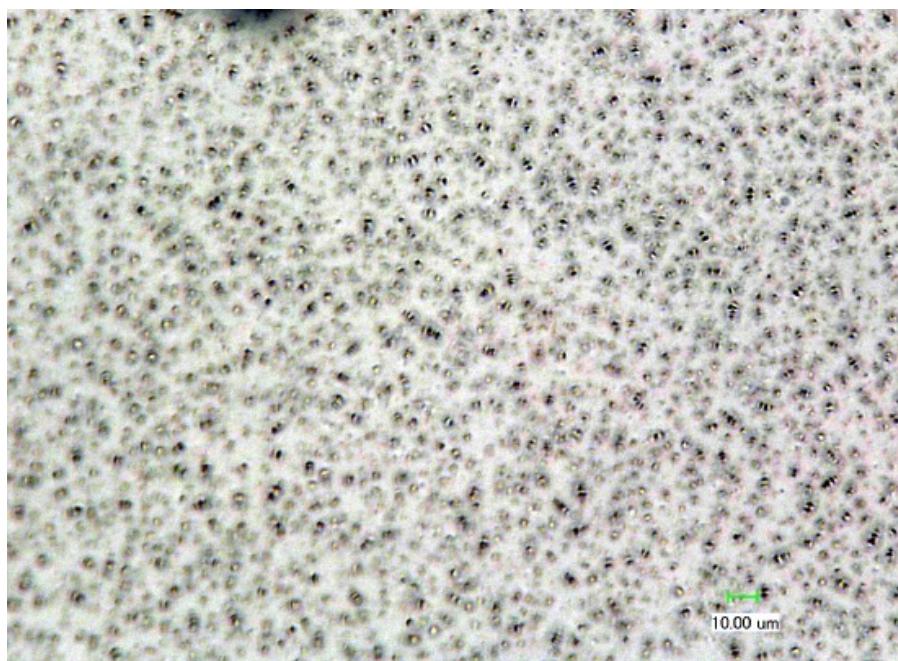


Bild 5-58: Bienenstrukturen der mit R 3 versetzten Probe

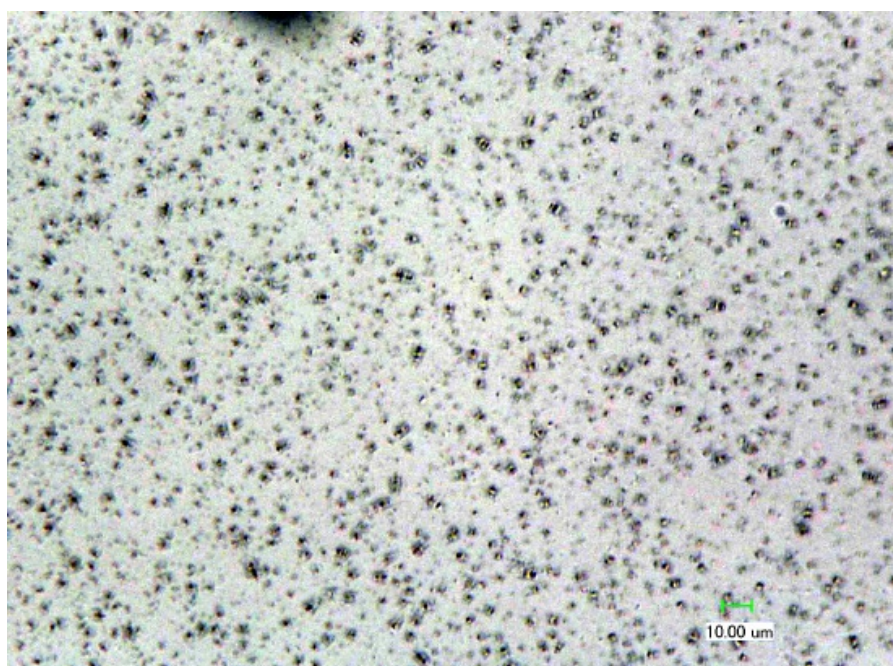


Bild 5-59: Bienenstrukturen der mit R 1 versetzten Probe

Die Infrarotspektren in Bild 5-60 zeigen sehr deutlich die Bildung von Carbonyl- und Sulfoxidfunktionen als Folge der PAV-Alterung.

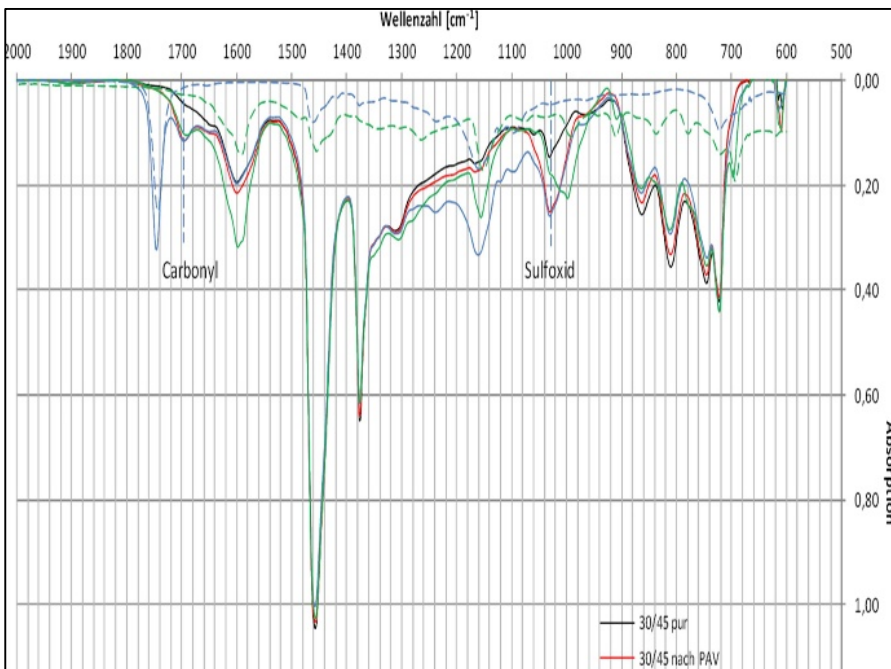


Bild 5-60: FTIR-Spektren

Die Sulfoxidabsorptionsbande des mit R 3 (grüne Linie) modifizierten 30/45 unterscheidet sich von denen der anderen gealterten Proben. Möglicherweise ist dies eine Folge einer Wechselwirkung von Inhaltsstoffen des R 3 und schwefelorganischen Verbindungen des Bitumens.

5.6 Entwicklung eines Laborverfahrens

Das zu entwickelnde Laborverfahren soll eine Methode zur Quantifizierung des Gehaltes an schwerlöslichen Asphaltene ermöglichen. Im Gegensatz zu den bekannten Verfahren auf Basis chemischer Analysen soll dieses einfach anwendbar sein, einen möglichst kurzen Zeitaufwand benötigen und wirtschaftlich sein. Die Zielsetzung ist eine hinreichend genaue Methode zur Bestimmung des Alterungszustandes von Bitumen zu erarbeiten, die auch von Straßenbaulaboratorien adaptiert werden kann.

5.6.1 Ansatz zur Durchführung des Laborverfahrens

Als Grundlage des Verfahrens dient die Bestimmung des Asphaltengehaltes nach [ZENKE, 1989]. Zunächst soll die Lösung von Bitumen und anschließend eine gezielte Ausfällung der schwerlöslichen Asphaltene erfolgen. Hierzu wird eine definierte Menge Bitumen mit einer definierten Menge Lösemittel übergossen und das Gemisch bis zur vollständigen Lösung des Bitumens in ein Ultraschallbad gestellt. Die Vibration des Ultraschallbades beschleunigt das vollständige Auflösen des Bitumens. Anschließend wird eine definierte Menge eines Fällungsmittels hinzugegeben und das Gemisch erneut ins Ultraschallbad gestellt. Die Menge des Löse- bzw. Fällungsmittels, bzw. das Verhältnis dieser zueinander, wurde in Anlehnung an [ZENKE, 1989] über den Hildebrand'schen Parameter bestimmt. Nach einer zu bestimmenden Dauer soll das Gemisch entnommen und seine Trübung gemessen werden. Anschließend sollen die ausgefällten Bestandteile abgetrennt und eine erneute Trübungsmessung der sogenannten Basistrübung stattfinden. Die Differenz der beiden Messungen, im Folgenden Trübungsgrad $T_{res.}$ genannt, soll ein Wert zur Quantifizierung des Gehaltes an schwerlöslichen Asphaltene sein. Die Validierung erfolgt über Bindemittelproben mit bekannter chemischer Zusammensetzung.

5.6.2 Erprobung der Trübheitsmessungen

Für die Messung der Trübung der Lösungen wurden zwei Messgeräte verglichen, ein Photometer und ein Turbidimeter. Das Gemisch, das gemäß der Durchführungsbeschreibung hergestellt wurde, bestand aus 2 g Bitumen und je 50 ml Cyclohexan und 50 ml Isooctan.

5.6.3 Erprobung des Photometers

Ein Photometer misst die Lichtabsorption einer Lösung oder Flüssigkeit über den ganzen oder nur einen vorher bestimmten Wellenlängenbereich des Lichts. Über die Farbgebung der gemessenen Lösung kann rheologisch der maßgebend für diese Farbgebung ist, getroffen werden. Gemessen wird hierbei die durchtretende Intensität des Lichtes, die von wellenlängenabsorbierenden Eigenschaften der Lösung abhängig ist [LANGE, 1980]. Die Messung ergibt einen dimensionslosen Wert für die Absorption der Lösung je Wellenlänge. Das Resultat einer photometrischen Messung wird in einem Diagramm wiedergegeben, in dem die Absorption in Abhängigkeit von der Wellenlänge des aufgetragenen Lichtspektrums dargestellt wird.

Trotz Variation des Verhältnisses zwischen Bitumenmenge und Gesamtmenge aus Löse- und Fällungsmittel konnten mit dem Photometer keine aussagekräftigen Ergebnisse ermittelt werden. Die Ergebniskurven der Messung einer Probe vor und nach Abtrennung der ausgefällten Bestandteile sind beispielhaft in Bild 5-61 dargestellt. Die Kurven verlaufen nahezu identisch, wodurch keine eindeutige Aussage zur Quantifizierung der ausgefällten Bestandteile getroffen werden kann.

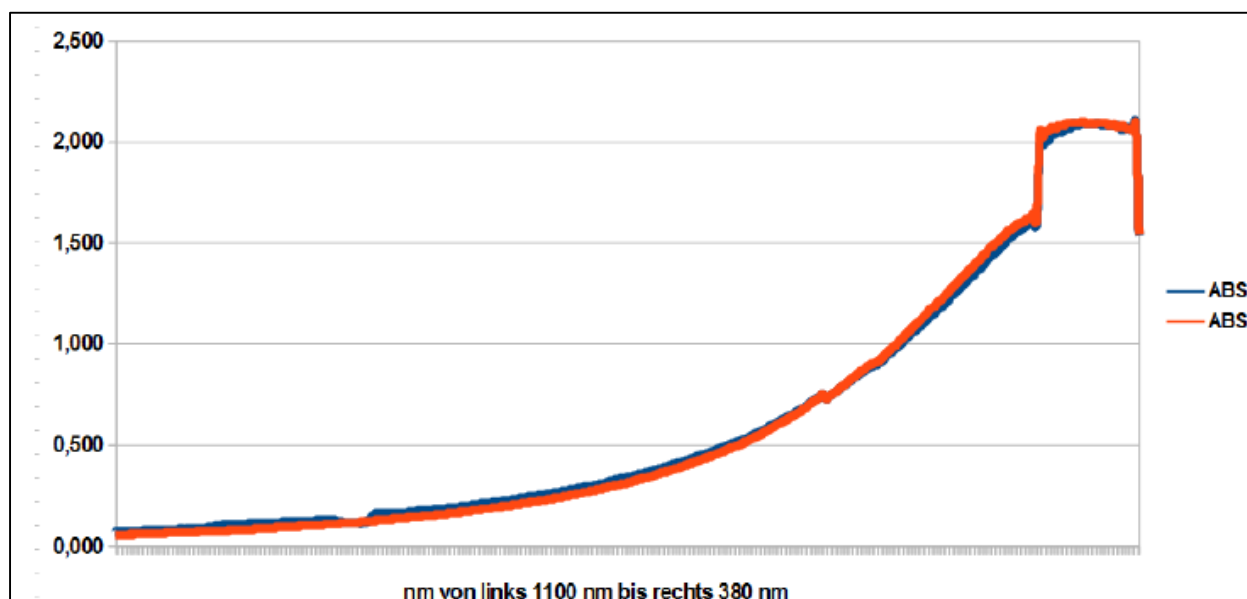


Bild 5-61: Absorption eines Gemisches aus Bitumen und Löse- und Fällungsmittel vor (blau) und nach (rot) Abtrennung der ausgefällten Bestandteile über ein Spektrum von 380 nm bis 1100 nm

5.6.4 Erprobung des Turbidimeters

Ein Turbidimeter, auch Nephelometer oder Trübheitsmessgerät, misst den Anteil von Feststoffen in einer Flüssigkeit. Hierbei wird die Flüssigkeit von einer Lichtquelle angestrahlt und von einem bzw. zwei Lichtsensoren, sogenannten Detektoren, gemessen, wieviel Licht die Flüssigkeit durchdringt, bzw. von den Feststoffen in der Flüssigkeit ab-

gelenkt wird. Als Ergebnis der Messung wird ein Trübheitswert angegeben, der die Lichtstreuung im 90°-Winkel zur Lichtquelle in Nephelometric Turbidity Units (NTU) angibt. Das Funktionsprinzip eines Turbidimeters ist in Bild 5-62 dargestellt.

Für die Messung stehen Messröhrchen mit definiertem Volumen zur Verfügung, in die die Lösung eingefüllt wird. Während des Messvorgangs werden vom Gerät zehn Einzelmessungen durchgeführt und ein Mittelwert daraus ausgegeben. Da das Messgerät ein zügiges und einfaches Messen ermöglicht, sind zur Eliminierung von Ausreißern drei Messungen je Probe mit überschaubarem Aufwand durchgeführt worden. Aus einem Gemisch wurden drei Proben entnommen, sodass insgesamt neun Messwerte je Gemisch vorlagen.

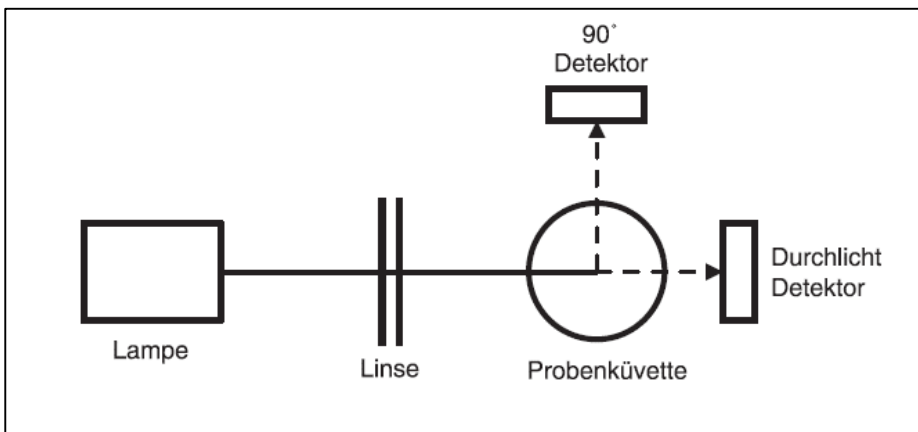


Bild 5-62: Funktionsprinzip einer Trübheitsmessung [HACH, 2004]

Ein Gemisch aus 2 g Bitumen und insgesamt 100 ml Lösung stellte sich als nicht messbar heraus, da es zu trüb war. Der Anteil des Bitumens wurde daraufhin kontinuierlich reduziert, bis aussagekräftige Werte erzielt werden konnten. Ein Verhältnis von 0,1 g Bitumen zu insgesamt 100 ml Löse- und Fällungsmittel stellte sich hierbei als geeignet raus. Für eine exakte Einwaage dieser geringen Menge Bitumen wurde das Bitumen zunächst auf einer Silikonunterlage eingewogen und gekühlt. Vom hierbei entstehenden Bitumenplättchen konnten so eventuell Überschüsse exakt abgetrennt werden.

Ein weiterer Vorteil dieser Methode erwies sich darin, dass bei der Eingabe ins Mischgefäß kein flüssiges Bitumen am Glas anhafteten konnte. Erste Messungen an vier verschiedenen Bitumen sind in Bild 5-63 den absoluten Gehalten an schwerlöslichen Asphaltene gegenübergestellt. Es wird eine eindeutige Relation dieser Werte erkannt. Das Bestimmtheitsmaß eines linearen Zusammenhangs von 0,86 unterstreicht die Erkenntnis, dass die Durchführung von Trübheitsmessungen den richtigen Ansatz für das vereinfachte Laborverfahren bietet.

Zur weiteren Validierung der Ergebnisse wurden zunächst drei weitere Bitumen untersucht. Die Ergebnisse sind in Bild 5-64 dargestellt. Es fällt auf, dass die drei Werte im Vergleich sehr gute Korrelationen zum absoluten Gehalt an schwerlöslichen Asphaltene aufweisen (Bestimmtheitsmaß von 0,93), aber insgesamt deutlich geringere Trübheitsgrade gemessen wurden, als bei den Bitumen der ersten Untersuchungsreihe. Bei der gesamtheitlichen Betrachtung der sieben Bitumen sind somit keine deutlichen Zusammenhänge zwischen Trübheitsgrad und Gehalt an schwerlöslichen Asphaltene zu erkennen. So weisen Bitumen mit ähnlich hohen Gehalten an schwerlöslichen Asphaltene deutlich unterschiedliche Trübheitsgrade auf.

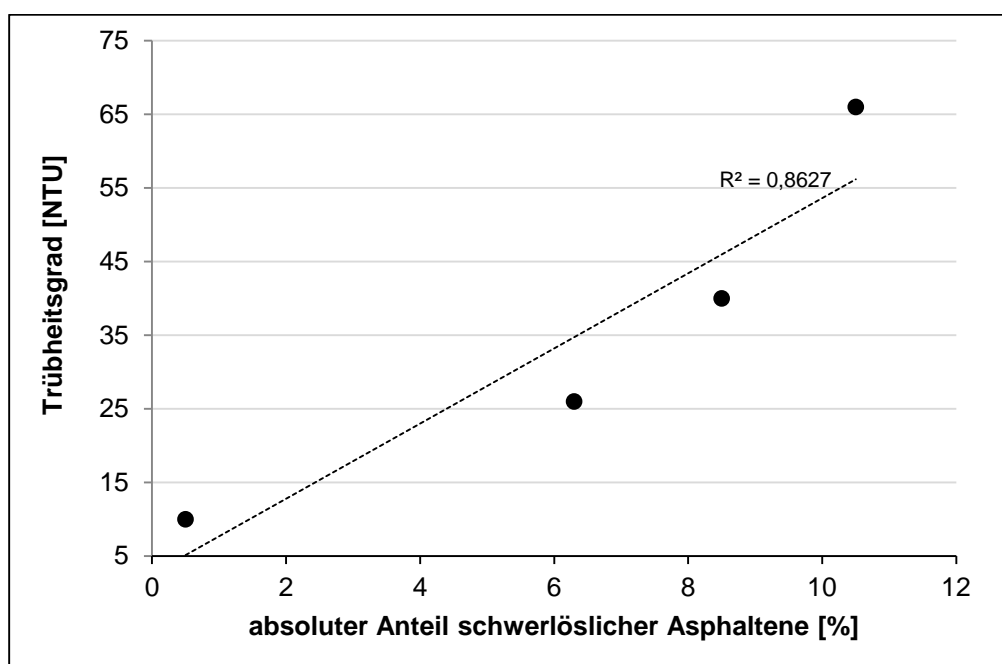


Bild 5-63: Trübheitsgrad und absolute Anteile schwerlöslicher Asphaltene von vier verschiedenen Bitumen

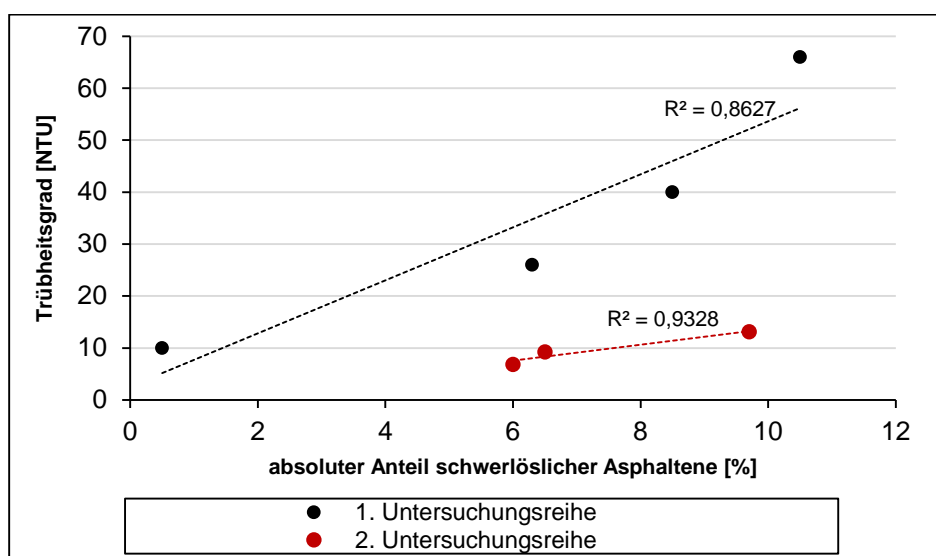


Bild 5-64: Trübheitsgrade der ersten und der zweiten Untersuchungsreihe im Verhältnis zu den absoluten Gehalten an schwerlöslichen Asphaltene

Die Bestimmung des Trübheitsgrades mittels Turbidimeter stellte sich zwar grundlegend als geeigneter Ansatz für ein Laborverfahren dar, das gesamte Verfahren musste allerdings noch durch die Variierung weiterer Parameter optimiert werden.

5.6.5 Prüfung der Homogenität der Lösung

Da für hinreichend messbare Trübheitsgrade lediglich 0,1 g Bitumen in 100 ml Lösemittel aufgelöst werden müssen, wurde die Genauigkeit der Methode durch vier Einzeluntersuchungen überprüft. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in Bild 5-65 dargestellt. Die Trübheitsgrade, die eine maximale Differenz von 2 NTU aufweisen, sind als hinreichend gleichmäßig zu beurteilen. Somit kann gesagt werden, dass die im vereinfachten

Laborverfahren genutzte Bitumenmenge von 0,1 g für die Gesamtmenge des Bitumens repräsentative Ergebnisse liefert.

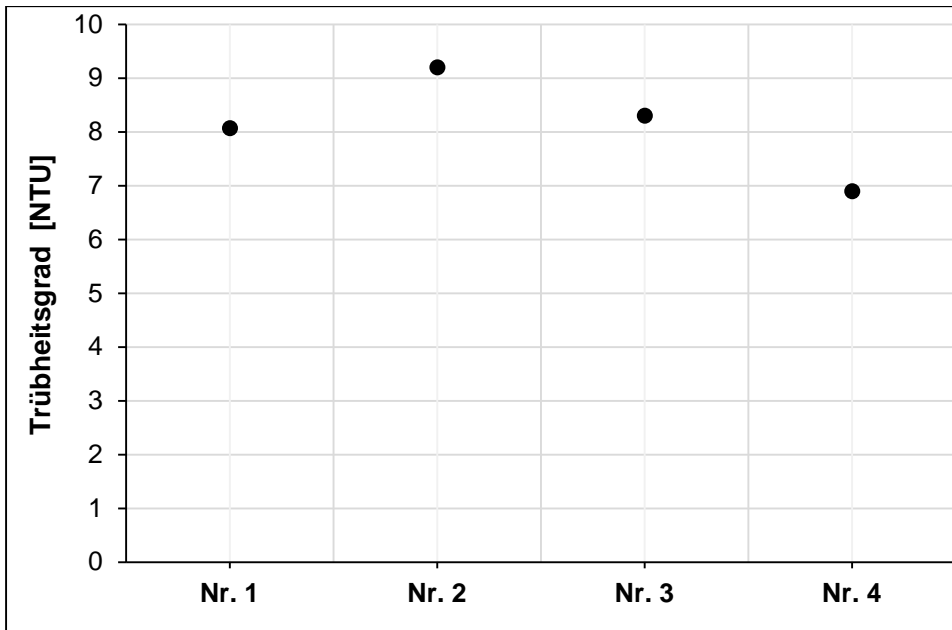


Bild 5-65: Trübheitsgrade von vier Einzelproben eines Bitumens

5.6.6 Variation der Randbedingungen zur Optimierung des Verfahrens

Aufgrund der in 5.6.2 festgestellten Abweichungen der Trübheitsgrade von Bitumen mit ähnlichen Gehalten an schwerlöslichen Asphaltene, wurden nachfolgende Parameter des Verfahrens variiert:

- Art des Fällungsmittels
- Lösedauer und Fällungsdauer
- Temperatur während Lösung und Fällung
- Methode des Abtrennens der ausgefällten Bestandteile

5.6.7 Variation des Fällungsmittels

Die Wahl von Isooctan (C_8H_{18}) als Fällungsmittel erfolgte zunächst in Anlehnung an die Bestimmung des Asphaltengehaltes nach [ZENKE, 1989]. Allerdings wird bei diesem Verfahren eine mehrstündige Fällungszeit empfohlen, die im Rahmen des vereinfachten und schnellen Laborverfahrens nicht sinnvoll ist. Als Alternative wurde n-Heptan (C_7H_{16}) ausgewählt. Aufgrund seiner kurzkettigeren Moleküle wurde eine schneller ablaufende Fällungsreaktion erwartet.

Zur Ermittlung der Zugabemenge von n-Heptan als Fällungsmittel wurde der Löslichkeitsparameter nach Hildebrand, den bereits [ZENKE, 1989] zur Bestimmung der Zugabemenge von Isooctan heranzog, genutzt. Größtenteils sind die Löslichkeitsparameter organischer Lösungsmittel in verschiedenen Tabellenwerken und Literaturquellen aufgeführt. Der δ_0 -Wert einer gelösten Fraktion kann dann aus dem Löslichkeitsparameter des Lösungsmittels gefolgert werden.

Nach [ZENKE, 1989] muss ein Löser-Fällern-Gemisch zur Ausfällung schwerlöslicher Bestandteile einen effektiven Löslichkeitsparameter von $\delta_o = 15,71 \sqrt{MPa}$ aufweisen, dieser ergibt sich z. B. bei einem Verhältnis von 50:50 bei Cyclohexan und Isooctan. Die Berechnung der Zugabemenge von n-Heptan als Fällungsmittel erfolgte über die Eigenschaften der beiden Lösemittel Cyclohexan und n-Heptan, die in Tab. 5-41 zusammengefasst sind.

Das Verhältnis von Cyclohexan zu n-Heptan ließ sich somit nach [ZENKE, 1989] mit folgender Formel berechnen:

$$\delta_o = \frac{\left(\frac{Vol.\% \cdot Dichte}{Molmasse \cdot \delta_o}\right)_{\text{Löser}} + \left(\frac{Vol.\% \cdot Dichte}{Molmasse \cdot \delta_o}\right)_{\text{Fällern}}}{\left(\frac{Vol.\% \cdot Dichte}{Molmasse}\right)_{\text{Löser}} + \left(\frac{Vol.\% \cdot Dichte}{Molmasse}\right)_{\text{Fällern}}}$$

Es ergab sich ein Verhältnis von 30% Cyclohexan zu 70% n-Heptan.

Tab. 5-41: Stoffliche Eigenschaften von Cyclohexan [ZENKE, 1989] und n-Heptan [GESTIS, 2014]

Stoff	Dichte	Molmasse	δ_o -Wert
	[g/cm ³]	[g/mol]	[\sqrt{MPa}]
Cyclohexan	0,7786	84,16	16,78
n-Heptan	0,68	100,20	15,3

Vier verschiedene Bitumen (A bis D) wurden unter den gleichen Versuchsbedingungen mit Isooctan (50 M.-%) und n-Heptan in den Zugabemengen 50 M.-% und 70 M.-% ausgefällt. Die resultierenden Trübheitsgrade sind in Bild 5-66 dargestellt. Zwischen dem Isooctan und dem n-Heptan in einer Zugabemenge von 50 M.-% können nur geringe Differenzen festgestellt werden. Die Ausfällung mit 70 M.-% n-Heptan zeigt jedoch grundsätzlich höhere Trübheitsgrade auf.

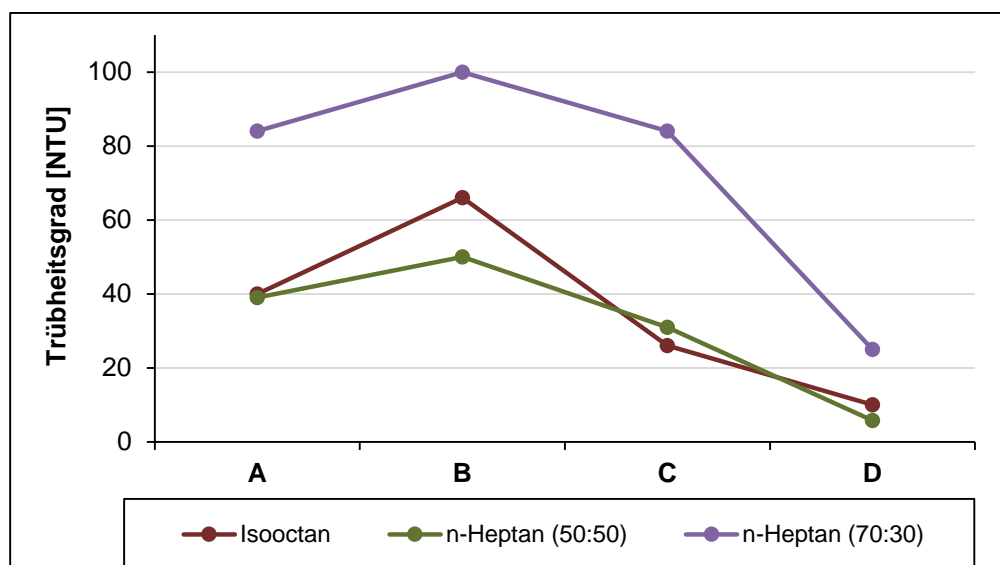


Bild 5-66: Trübheitsgrade von vier Bitumen (A bis D) mit unterschiedlichen Fällungsmitteln

Qualitativ unterscheiden sich die Kurvenverläufe allerdings gering.

Die Verwendung von n-Heptan stellte sich als schwierig heraus, da das Lösemittel sehr leicht flüchtig ist. Außerdem liegen die Kosten für n-Heptan deutlich höher als für

Isooctan. In Anbetracht dieser Randbedingungen wurde im weiteren Verlauf weiterhin Isooctan als Fällungsmittel verwendet.

5.6.8 Variation der Löse- und Fällungszeit

Für die maximale Fällungsausbeute wurde die Dauer der Lösung und der Fällung variiert. Hierbei wurde ein Zeitraum von bis zu 24 Stunden gewählt. Zunächst wurde die Lösedauer nach Lösungsmittelzugabe variiert.

Alle weiteren Randbedingungen blieben konstant, die Fällungsdauer lag bei 30 Minuten. Die resultierenden Trübheitsgrade in Abhängigkeit von der Lösedauer sind in Bild 5-67 dargestellt.

Es ist zu erkennen, dass die Trübheitsgrade mit zunehmender Lösedauer deutlich abnehmen. Hieraus ließ sich folgern, dass die Lösedauer möglichst kurz ausfallen sollte. Eine Lösedauer von 30 Minuten war allerdings zum vollständigen Auflösen des Bitumens notwendig und konnte nicht weiter reduziert werden.

Aus diesem Grund wurde die Lösedauer für die nachfolgenden Untersuchungen auf 30 Minuten festgelegt.

Neben der Lösedauer wurde auch die Fällungsdauer variiert, um mögliche Auswirkungen auf die Fällungsausbeute festzustellen. Hierzu wurden analog zur Variation der Lösedauer die Zeiträume 0,5 Stunden, eine Stunde, drei Stunden, sechs Stunden und 24 Stunden gewählt. Um allgemeingültige Aussagen treffen zu können, wurden die Untersuchungen an insgesamt fünf verschiedenen Bitumen unterschiedlicher Bitumensorten durchgeführt, die zur vereinfachten Darstellung mit A bis E und der jeweiligen Bitumensorte bezeichnet wurden. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Bild 5-68 zusammengefasst. Es ist zu erkennen, dass mit zunehmender Fällungsdauer auch die Fällungsausbeute zunimmt. Signifikante Unterschiede zum Trübheitsgrad nach der kürzesten Fällungsdauer von 30 Minuten können bei allen Bitumen frühestens nach dreistündiger Fällungsdauer festgestellt werden. Nach sechsstündiger Fällung wird die Zunahme des Trübheitsgrades sehr gering, wobei nie ein konstantes Maximum erreicht wird. Bei sehr langer Ausfällungszeit wird die Fällungsausbeute wieder geringer, da sich die ausgefällten Bestandteile erneut im Gemisch auflösen, die Kurve würde somit nach einem gewissen, unbekanntem Zeitraum wieder fallen. [ZENKE, 1989].

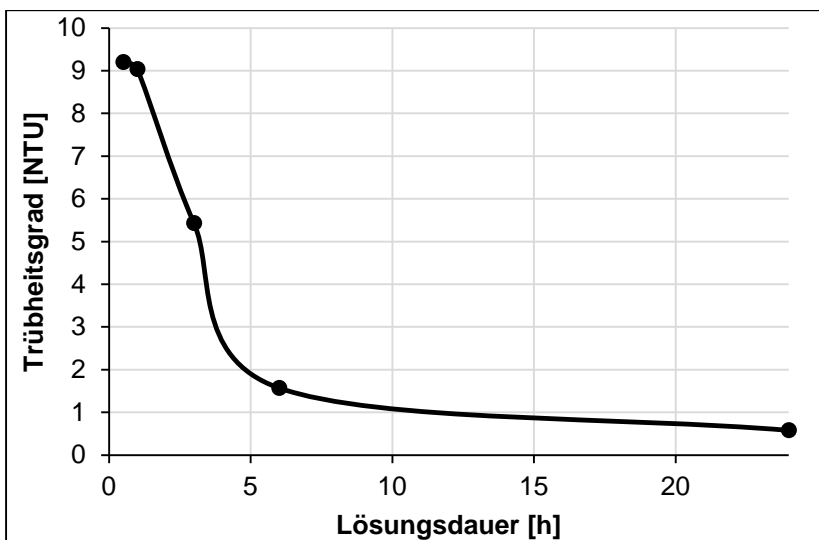


Bild 5-67: Resultierende Trübheitsgrade bei variabler Lösedauer

Da das Laborverfahren zeitnahe Ergebnisse liefern und die Dauer möglichst kurz gehalten werden sollte, waren Fällungsdauern von drei bzw. sechs Stunden nicht umsetzbar. Die Fällungsdauer wurde somit zunächst auf 30 Minuten festgelegt. Die Erhöhung der Fällungsausbeute sollte durch Variation anderer Parameter erreicht werden.

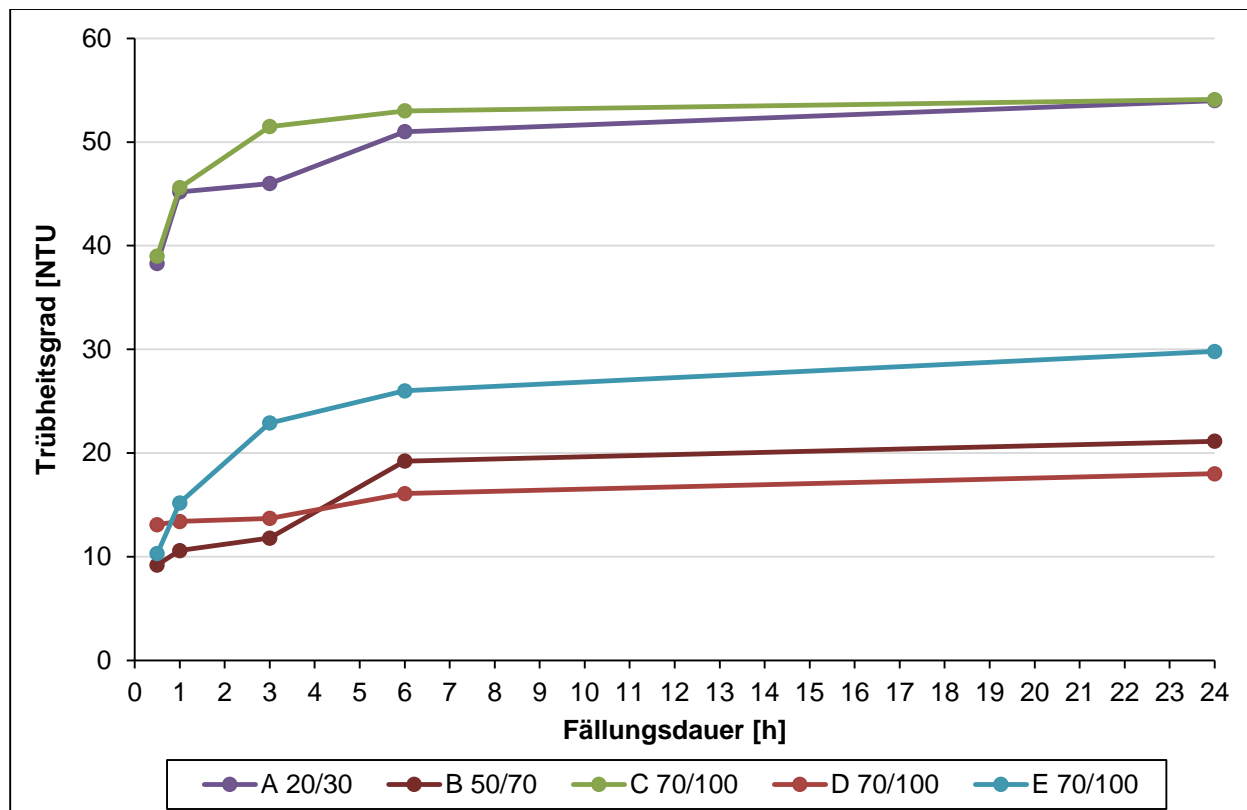


Bild 5-68: Variation der Fällungsdauer unterschiedlicher Bitumen und resultierende Trübheitsgrade

5.6.9 Variation der Temperatur

Im Verfahren nach [ZENKE, 1989] wird das Gemisch sowohl während des Löse- als auch während des Fällungsvorgangs bis zum Siedepunkt erhitzt und jeweils ca. 15 Minuten im Siedebereich gehalten. Beim Laborverfahren wurden Löse- und Fällungsvorgang in einem Ultraschallbad durchgeführt, in dem eine Temperatur von 40 °C vorherrschte. Zur Untersuchung des Einflusses der Temperatur auf die Fällungsausbeute wurde die Untersuchung im Ultraschallbad, neben der ohnehin vorherrschenden Temperatur von 40 °C, bei 20 °C, 50 °C, 60 °C und 70 °C durchgeführt. Hierdurch sollten sowohl die Bedingungen bei Raumtemperatur, als auch erhöhte Temperaturen unter dem Siedepunkt des Gemisches erprobt werden. Da der Siedepunkt von Cyclohexan bei 80 °C liegt, betrug die maximale Versuchstemperatur 70 °C.

In Bild 5-69 sind die Trübheitsgrade der unterschiedlich temperierten Gemische aufgezeichnet.

Es fällt auf, dass der Trübheitsgrad der Mischung mit steigender Versuchstemperatur abnimmt, was bedeutet, dass die Fällungsausbeute geringer wird. Da die Differenz zwischen den einzelnen Temperatursprüngen vergleichsweise gering (3 NTU bei 20 °C Temperaturunterschied) und die Senkung der Temperatur im Ultraschallbad aufwändig war, wurde auf ein Herabsetzen der Temperatur auf 20 °C verzichtet und das Ultraschallbad weiterhin bei 40 °C betrieben.

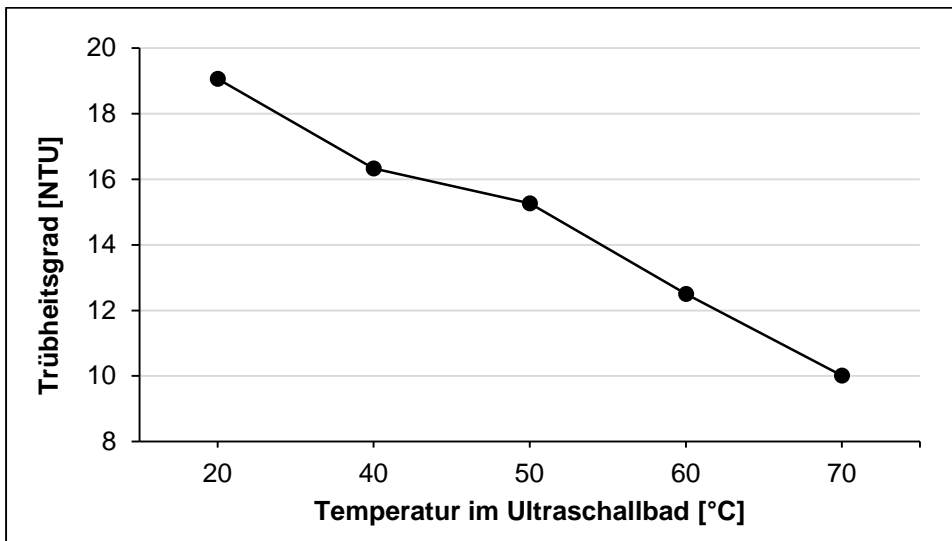


Bild 5-69: Resultierende Trübungsgrade eines Bitumens bei unterschiedlichen Versuchstemperaturen

5.6.10 Optimierung der Abtrennung der ausgefällten Bestandteile

Der maßgebende Trübungsgrad eines Gemisches ergibt sich aus der Differenz $T_{res.}$ der gemessenen Trübung nach 30-minütiger Ausfällung der schwerlöslichen Asphaltene (T_2) und der gemessenen Trübung nach Abtrennung dieser ausgefällten Bestandteile (T_1). Für einen aussagekräftigen Trübungsgrad ist daher die möglichst vollständige Abtrennung der schwerlöslichen Asphaltene notwendig. Hierfür standen im Rahmen der Untersuchungen zwei Methoden zur Verfügung, das Filtern sowie das Zentrifugieren des Gemisches.

Für beide Methoden wurde eine Auswahl unterschiedlicher Bitumen unter den in 5.6.7 bis 5.6.9 definierten Randbedingungen vorbereitet.

Bei der Filterung standen drei verschiedene Filter zur Verfügung, davon zwei Papierfilter und ein Membranfilter. Der Vorteil des Membranfilters im Vergleich zum Papierfilter ist die definierte Porengröße, die über den gesamte Filter gleichmäßig verteilt ist, wohingegen ein Papierfilter keine gleichmäßigen Porengrößen und somit nur einen Rückhaltebereich aufweisen kann. Da nach heutigem Stand des Wissens keine genauen Aussagen zur Struktur der Asphaltene im Kolloidsystem Bitumen und somit zur Größe der Asphaltene getroffen werden können, wurden drei verschiedene Filtergrößen zum Abtrennen der schwerlöslichen Asphaltene verwendet. Da sich die Durchlaufzeit durch den Filter mit steigendem Feinheitsgrad dessen erhöht, war es im Sinne des Laborverfahrens, den größtmöglichen Filter zu verwenden. Insgesamt wurden für die Erprobung der Papierfilter sieben Bitumen und für den Membranfilter zwei Bitumen untersucht.

Die Zentrifugierung sollte aufgrund der Anschaffungskosten und des Zeitaufwandes zunächst nur zur Validierung der Filterungen dienen. Erst in dem Fall, dass durch Filterung keine ausreichend genauen Trübungsgrade erfasst werden konnten, sollte die Zentrifuge als Alternative in Betracht gezogen werden.

Filterung mit Papierfiltern

Für die Filterung standen Papierfilter mit Rückhaltebereichen von 4 bis 12 μm und 2 bis 4 μm zur Verfügung. Es wurden sieben verschiedene Bitumen, die aus Gründen der

Übersichtlichkeit mit den Zahlen 1 bis 7 bezeichnet wurden, untersucht und die Trübheitsgrade ermittelt. In Bild 5-70 ist zu sehen, dass mit dem feineren Filter (2 bis 4 μm) deutlich höhere Trübheitsgrade als mit dem gröberen Filter (4 bis 12 μm) gemessen wurden. Die Differenzen liegen hier bei bis zu 50 NTU (Bitumen 1). Dies bedeutet, dass mit dem feineren Filter deutlich mehr ausgefällte Bestandteile abgetrennt werden. Unter den Papierfiltern erwies sich somit der Filter mit einem Rückhaltebereich von 2 bis 4 μm als geeignet.

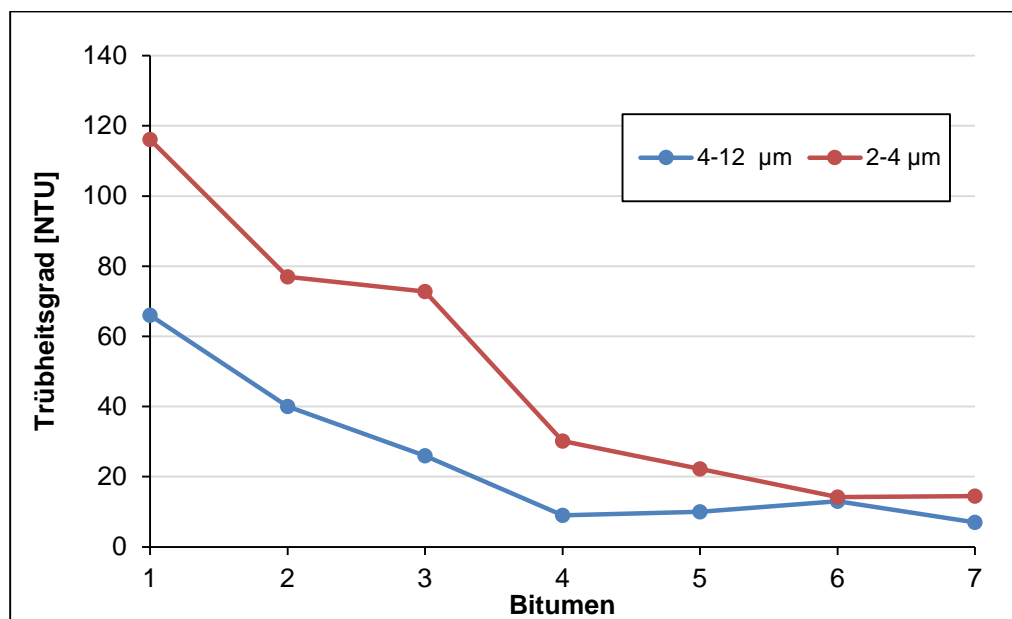


Bild 5-70: Resultierende Trübheitsgrade nach Filterung von sieben Bitumen mit zwei verschiedenen Papierfiltern

Filterung mit Membranfilter mit einer Porengröße von 0,45 μm

Als Alternative zu den Papierfiltern ohne gleichmäßige Porengrößen, wurde ein feiner Membranfilter mit einer Porengröße von 0,45 μm verwendet.

Die Untersuchungen wurden mit zwei Bitumen, die signifikante Unterschiede in ihren absoluten Gehalten an schwerlöslichen Asphaltene aufwiesen, durchgeführt. Der Anteil an schwerlöslichen Asphaltene des Straßenbaubitumens 50/70 lag bei 6,5 M.-% und der des 70/100 bei 0,5 M.-%. Zum Vergleich wurden beide Bitumen ebenfalls mit den zwei Papierfiltern untersucht. In Bild 5-71 sind die Unterschiede der Trübheitsgrade in Abhängigkeit von der Filtergröße, getrennt nach Bitumensorte, dargestellt. Am Straßenbaubitumen 70/100 ist zu erkennen, dass mit steigender Feinheit des Filters auch größere Mengen der ausgefällten Bestandteile abgetrennt werden konnten. Durch Filterung mit dem Membranfilter konnte ein Trübheitsgrad von 28 NTU erreicht werden, wohingegen die Papierfilter nur Trübheitsgrade von 20 NTU bzw. 10 NTU ermöglichten. Anders verhält es sich allerdings beim Straßenbaubitumen 50/70. Hier konnte mit dem Papierfilter mit einem Rückhaltebereich von 2 bis 4 μm ein Trübheitsgrad von 26 NTU erzielt werden, der keinen signifikanten Unterschied zu dem vom Membranfilter erzielten Trübheitsgrad von 25 NTU aufwies.

Die Nutzung des Membranfilters stellte sich allerdings als schwierig dar. Je höher die Teilchenkonzentration in der Probenlösung und je feiner der Filter war, desto länger dauerte die Filtration. Dementsprechend musste die zu filternde Menge schrittweise auf den

Filter gegossen werden, wodurch die Probe nicht durchgehend abgedeckt werden konnte. Dies führte zu einer Verdunstung des Löse- bzw. Fällungsmittels, wodurch eine Verfälschung der am Membranfilter ermittelten Ergebnisse nicht ausgeschlossen werden kann. Aufgrund dieser Schwierigkeit wurde entschieden, für den weiteren Untersuchungsablauf Papierfilter mit einem Rückhaltebereich von 2 bis 4 μm zu verwenden.

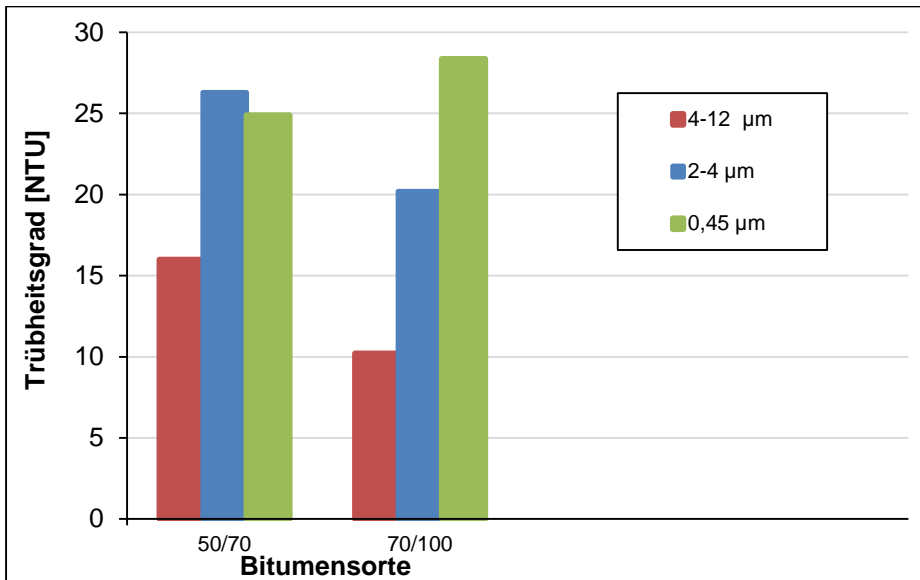


Bild 5-71: Trübheitsgrade von zwei Bitumen, deren Bestandteile mit drei verschiedenen Filtern abgetrennt wurden

Zentrifugierung der Gemische

Zur Überprüfung der durch Filterung erzielten Resultate wurde eine Zentrifuge hinzugezogen. Durch Zentrifugierung der Gemische konnte vermutlich die beste Trennung der ausgefällten Bestandteile sichergestellt werden. Hierzu mussten allerdings die Parameter Umdrehungszahl und Zentrifugierdauer konfiguriert werden.

Zur Dauer der Zentrifugierung wurden Untersuchungen mit vier verschiedenen Bitumen durchgeführt, deren Ergebnisse in Bild 5-72 dargestellt sind. Es ist eindeutig zu erkennen, dass bei keiner der Bitumen nach einer Dauer von mehr als 10 Minuten erhebliche Änderungen im ermittelten Trübheitsgrad festgestellt werden können. Aufgrund dessen wurde die Dauer der Zentrifugierung auf 10 Minuten festgelegt.

Im nächsten Schritt wurde die optimale Umdrehungszahl der Zentrifuge erprobt. Hierzu wurden die vier Bitumen bei einer Dauer von 10 Minuten mit drei verschiedenen Umdrehungszahlen (2500 U/min, 3500 U/min und 4000 U/min) zentrifugiert. Bild 5-73 zeigt, dass durch Erhöhung der Umdrehungszahl bei keiner der Bitumen Änderungen im Trübheitsgrad gemessen werden konnten.

Die Kurven verlaufen beinahe identisch. Aus diesem Grund wurde zur weiteren Erprobung des Laborverfahrens eine Umdrehungszahl von 2500 Umdrehungen pro Minute festgelegt.

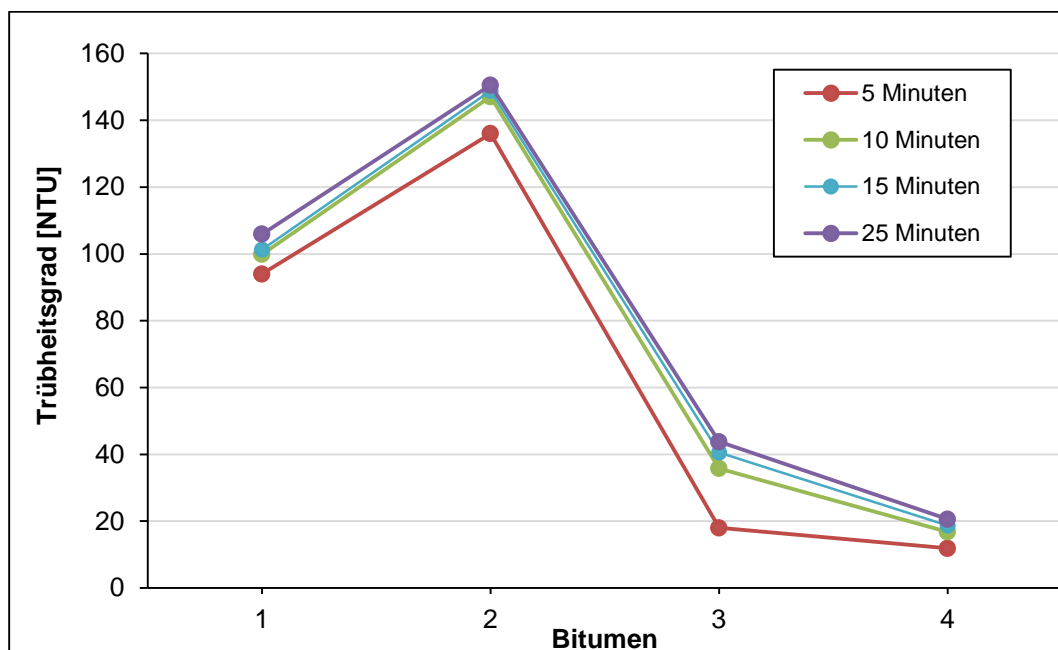


Bild 5-72: Resultierende Trübheitsgrade von vier Bitumen bei unterschiedlichen Zentrifugierdauern

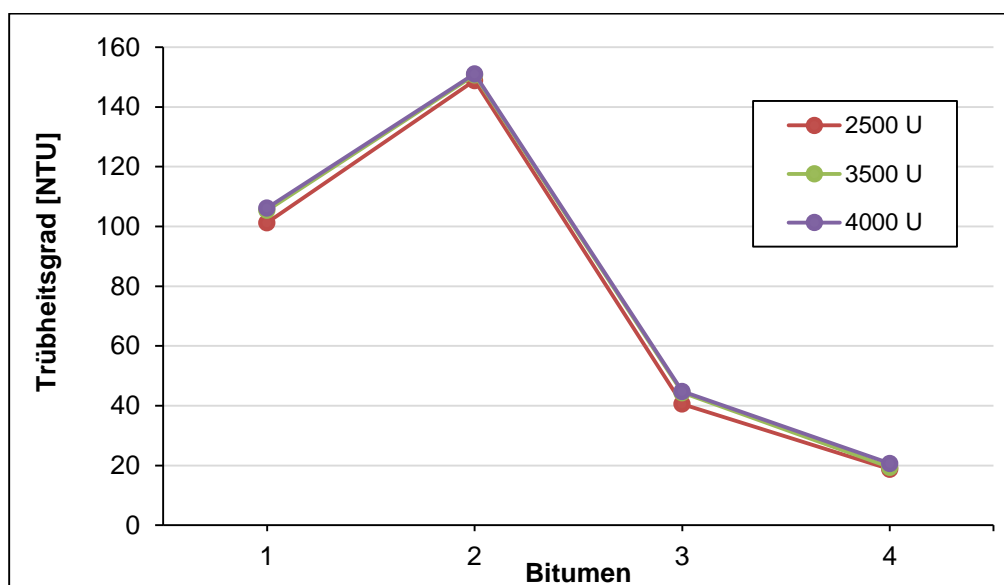


Bild 5-73: Resultierende Trübheitsgrade von vier Bitumen bei Zentrifugierung mit unterschiedlichen Umdrehungszahlen

Prüfung der durch Filtration ermittelten Trübheitsgrade durch Zentrifugierung

Nachdem die Randbedingungen für die Zentrifugierung festgelegt wurden, wurden insgesamt 40 Bitumen untersucht. Die Bezeichnung dieser erfolgte durch Nummerierung in Abhängigkeit von der Bitumensorte. So sind z.B. Straßenbaubitumen 50/70 gegliedert in 1. 50/70 bis 14. 50/70. Es wurden je Bitumen zwei Gemische hergestellt, die entweder über ein Papierfilter mit einem Rückhaltebereich von 2 bis 4 μm abgefiltert oder zentrifugiert wurden.

Der Vergleich beider Methoden ist Bild 5-74 zu entnehmen. Mit Ausnahme der Bitumen 6. 50/70 und 2. 160/220 werden durch das Zentrifugieren höhere Trübheitsgrade erreicht, als durch die Filtration. Es fällt auf, dass mittels Zentrifugieren deutlich höhere maximale

Werte und Differenzen von bis zu 43 NTU (Bitumen 4. 20/30) zur Filtration erreicht werden. Dies lässt vermuten, dass durch die Filtration trotz Auswahl der geeignetsten Filtergröße kein hinreichend exakter Anteil der ausgefällten Bestandteile abgetrennt werden kann. Dies hängt vermutlich damit zusammen, dass die Größe der Asphaltene in den untersuchten Bindemitteln zum einen unterschiedlich ist und zum anderen teilweise kleiner ist als der Porendurchmesser des Filters. Durch Zentrifugierung wird offensichtlich annähernd die komplette ausgefällte Phase abgetrennt.

Für die Abtrennung der ausgefällten Bestandteile wurde somit das Zentrifugieren ausgewählt und die Methode der Filtration verworfen.

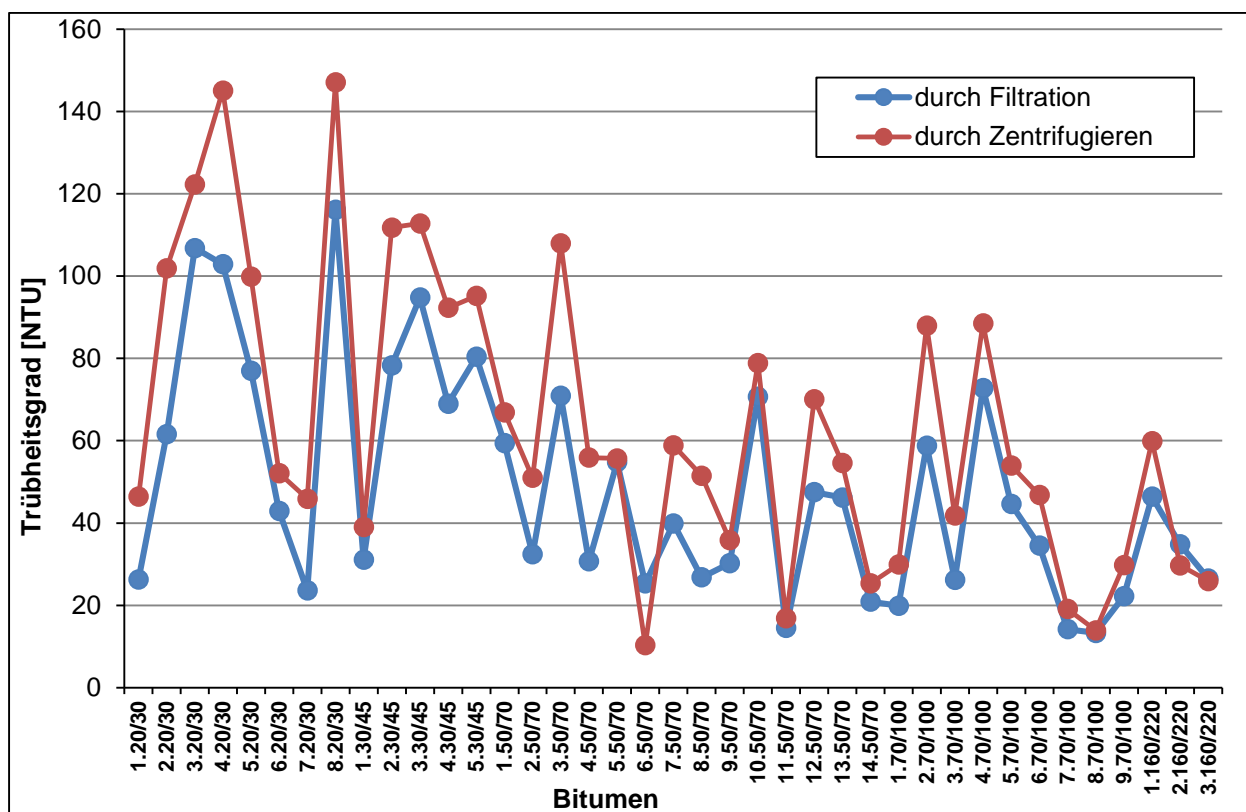


Bild 5-74: Trübheitsgrade durch Abtrennung der ausgefällten Bestandteile im Bitumen mittels Filtration und Zentrifugierung

5.6.11 Trübheitsmessung vor der Fällungsmittelzugabe

Trübheitsmessungen mittels Turbidimeter basieren auf der Methode, dass feste Stoffe in der bemessenen Lösung Lichtbrechungen hervorrufen, über die ein Trübungswert quantifiziert wird.

Der Grundgedanke bei der Anwendung von Trübheitsmessungen im Rahmen der Bestimmung des Gehalts an schwerlöslichen Asphaltene eines Bitumens war der, dass durch eine homogene Verteilung ausgefällter Bestandteile in einem Bitumen-Lösemittel-Gemisch die durch Lichtbrechung verursachte Wirkung gemessen wird. Anschließend sollte nach Abtrennung der ausgefällten Bestandteile eine „0-Messung“ durchgeführt werden. Die Differenz der Trübungswerte könnte so ein Maß für die Quantifizierung der ausgefällten Bestandteile schwerlösliche Asphaltene darstellen.

Da das Turbidimeter nur feste gefällte Partikel des Gemisches misst, stellte sich die grundlegende Frage, ob die „0-Messung“ nicht bereits nach dem Lösen (vor Zugabe des Fällungsmittels) erfolgen kann.

Dieser Ansatz wurde geprüft, indem an den 40 zuvor untersuchten Bitumen Trübungsmessungen vor der Fällungsmittelzugabe durchgeführt wurden. Der Trübungsgrad, hier modifizierter Trübungsgrad genannt, wurde daraufhin als Differenz zwischen Trübungsmessungen vor der Fällungsmittelzugabe (T_1) und nach Ausfällung (T_2) bestimmt.

Die Ergebnisse der Bestimmung des Trübungsgrades durch Zentrifugieren und die modifizierten Trübungsgrade sind einander in Bild 5-75 gegenübergestellt. Das Bestimmtheitsmaß von 0,94 zeigt deutlich, dass der modifizierte Trübungsgrad dem Trübungsgrad aus Messungen vor und nach Abtrennung ausgefallter Bestandteile entspricht. Demnach ist eine Abtrennung der ausgefallten Bestandteile als weiterer Arbeitsschritt nicht notwendig.

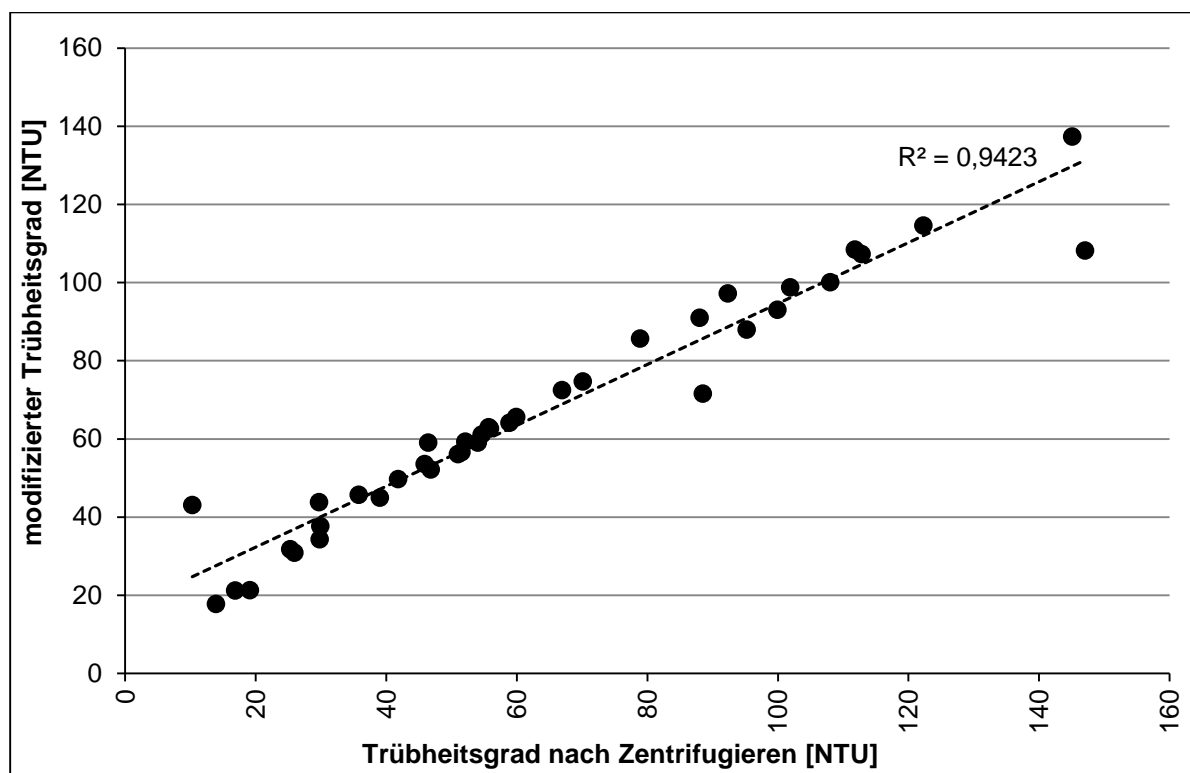


Bild 5-75: Trübungsgrade von 40 Bitumen, ermittelt durch Zentrifugieren und durch die modifizierte Trübungsmessung

5.6.12 Zusammenfassende Anleitung zur Durchführung des vereinfachten Laborverfahrens

Zur Durchführung des Laborverfahrens wird Folgendes benötigt:

- Lösemittel: Cyclohexan
- Fällungsmittel: Isooctan
- Silikonplatte
- Waage mit einer Genauigkeit von mindestens 0,01 g
- Verschließbarer Glaskolben mit mindestens 150 ml Fassungsvermögen
- Ultraschallbad
- Turbidimeter mit Messröhrchen
- Pipette

Nach Erprobung der Randbedingungen wurden für die Durchführung des Laborverfahrens vorläufig folgende sechs Schritte festgelegt:

1. Einwaage

0,1 g Bitumen werden auf einer Silikonunterlage eingewogen. Nach Erhärtung des Bitumens kann mit einem heißen Messer etwaiger Überschuss abgetrennt werden. Die Waage sollte mindestens eine Genauigkeit von 0,01 g aufweisen.

2. Zugabe des Lösemittels

Das Bitumen wird in einen Glaskolben gegeben und mit 50 ml Cyclohexan vermischt. Der Glaskolben wird verschlossen und für 30 Minuten in ein Ultraschallbad mit einer Temperatur von 40 °C gestellt. Das Bitumen muss sich vollständig auflösen und ein homogenes Gemisch entstehen.

3. Bestimmung der Basistrübung

Mit einem Turbidimeter wird der Trübungswert T_1 [NTU] des Gemisches bestimmt. Hierzu wird das Gemisch mit einer Pipette in die Messröhrchen überfüllt. An jedem Röhrchen werden drei Einzelmessungen durchgeführt. Je Gemisch wird ein Röhrchen abgefüllt. Der Mittelwert aus drei Messungen ist maßgebend. Nach Beendigung der Trübungsmessung wird das Gemisch in den Glaskolben zurückgegeben.

4. Zugabe des Fällungsmittels

Das Gemisch wird mit 50 ml Isooctan aufgefüllt und erneut verschlossen für 30 Minuten in das Ultraschallbad mit einer Temperatur von 40 °C gestellt.

5. Bestimmung der durch die ausgefällten Bestandteile verursachten Trübung

Der Trübungswert nach Ausfällung T_2 [NTU] wird mit dem Turbidimeter gemessen. Je Gemisch werden drei Röhrchen mit einer Pipette abgefüllt. Vor jeder Probenahme wird der Glaskolben ausreichend geschüttelt, damit kein Rückstand am Glasboden anhaftet und die Proben in den Röhrchen homogen sind. An jedem Röhrchen werden drei Einzelmessungen durchgeführt, vor jeder Messung wird das Röhrchen geschüttelt, damit sich die ausgefällten Bestandteile homogen im Gemisch verteilen. Aus den insgesamt neun Messwerten wird ein Mittelwert bestimmt.

6. Bestimmung des Trübheitsgrades

Der maßgebende Trübheitsgrad $T_{res.}$ wird wie folgt bestimmt:

$$T_{res.} = T_2 - T_1 \quad [\text{NTU}]$$

5.6.13 Validierung des Verfahrens

Zur Validierung der Trübheitsgrade und zur Prüfung ihrer Aussagekräftigkeit wurden diese Werte mit den chemischen Eigenschaften der 40 untersuchten Bitumen verglichen. Die ermittelten Trübheitsgrade sind in Bild 5-76 den absoluten Gehalten an schwerlöslichen Asphaltenen der einzelnen Bitumen gegenübergestellt. Ein grundlegender Zusammenhang ist zu erkennen (Bestimmtheitsmaß von 0,49), es liegen allerdings noch einige Ausreißer vor. Bei Berücksichtigung der Bitumensorten, die hier durch verschiedene Farben gekennzeichnet sind, wird deutlich, dass die Ausreißer überwiegend an den härteren Bitumensorten festgestellt wurden.

Zur weiteren Optimierung des Verfahrens müssen die Ausreißer näher betrachtet und ggf. weitere Bitumen untersucht werden.

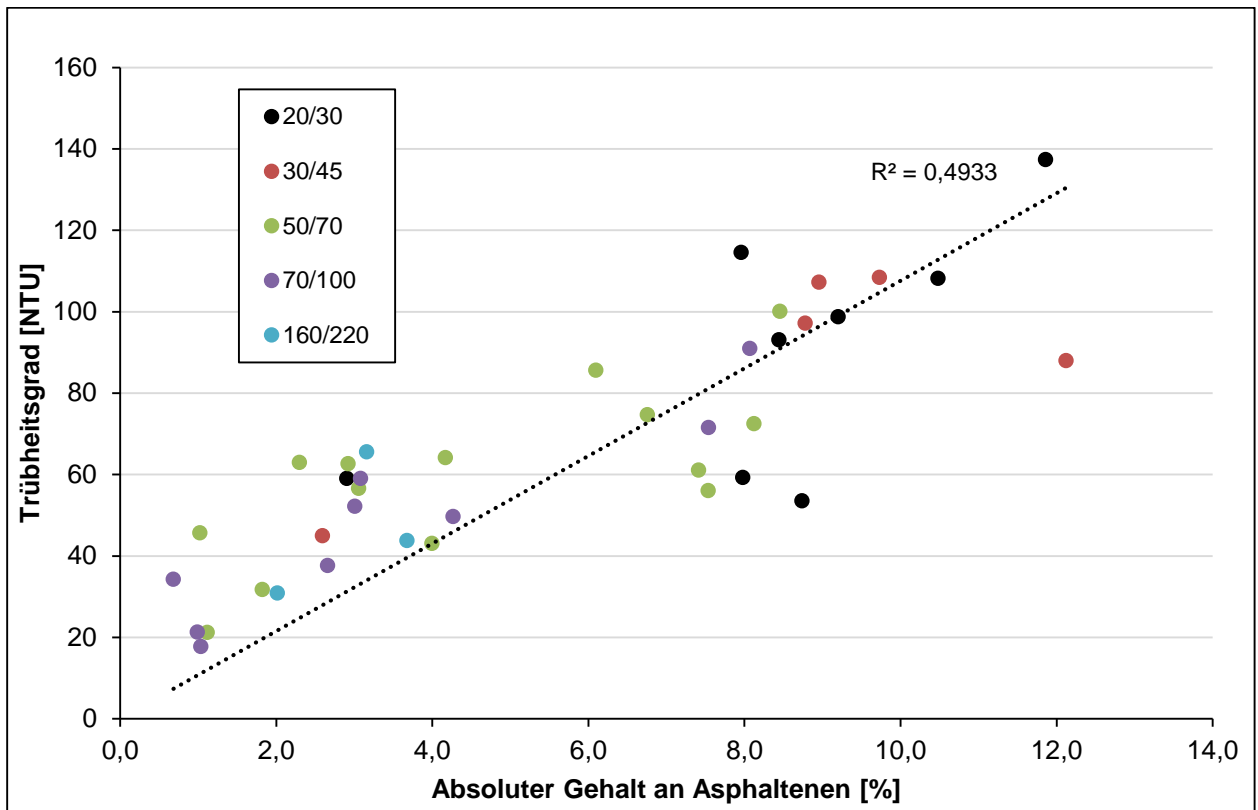


Bild 5-76: Verhältnis der Trübheitsgrade zu den absoluten Anteilen an schwerlöslichen Asphaltene der 40 untersuchten Bitumen

6 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel des Vorhabens war die Entwicklung und Erprobung einer Technologie zum gezielten Einsatz von Rejuvenatoren.

Zunächst wurden dazu Untersuchungen an Gemischen aus rückgewonnenen Bindemitteln und als Rejuvenatoren bezeichnete Produkte mit Hilfe des DSR, des BBR und der Bestimmung des Erweichungspunktes Ring und Kugel sowie der Kraftduktilität durchgeführt.

Dabei liefern die Erkenntnisse zu den typischen Wirkungsweisen der Rejuvenatoren ein sehr heterogenes Bild, wenn das Verjüngungsziel rheologisch komplex definiert wird. Rheologisch komplex bedeutet in diesem Zusammenhang, dass nicht ausschließlich die Steifigkeit oder der Erweichungspunkt Ring und Kugel als Zielgröße angesehen werden sollte, da zwar mit Hilfe der Rejuvenatoren ein Erweichungspunkt im Anforderungsbereich eines Straßenbaubitumens 50/70 erzielt werden konnte, eine rheologische Wirksamkeit im Sinne einer „Verjüngung“ aber nicht zu erkennen war. Für eine sinnvolle Bindemittelverjüngung sollte auch das Verhältnis zwischen elastischen und viskosen Verformungsanteilen betrachtet werden. Dieses kann aus den Kurvenverläufen im Black-Diagramm abgeleitet werden. Diese Ergebnisse könnten auch für eine Beurteilung des Alterungsgrades eines bitumenhaltigen Bindemittels im Ausbauasphalt sinnvoll sein. Zum Beispiel wäre der Phasenwinkel bei einem komplexen Schermodul von 100 kPa oder bei 15 kPa ein möglicher Kennwert. Eine Betrachtung bei einem komplexen Schermodul von 15 kPa hätte dabei den Vorteil, dass die Temperatur bei diese Steifigkeit etwa vergleichbar mit dem Erweichungspunkt Ring und Kugel ist.

Grundsätzlich haben die bisherigen Untersuchungen zu den rheologischen Wirkungen der zehn ausgewählten Rejuvenatoren signifikante qualitative Unterschiede ergeben (siehe Bild 6-1).

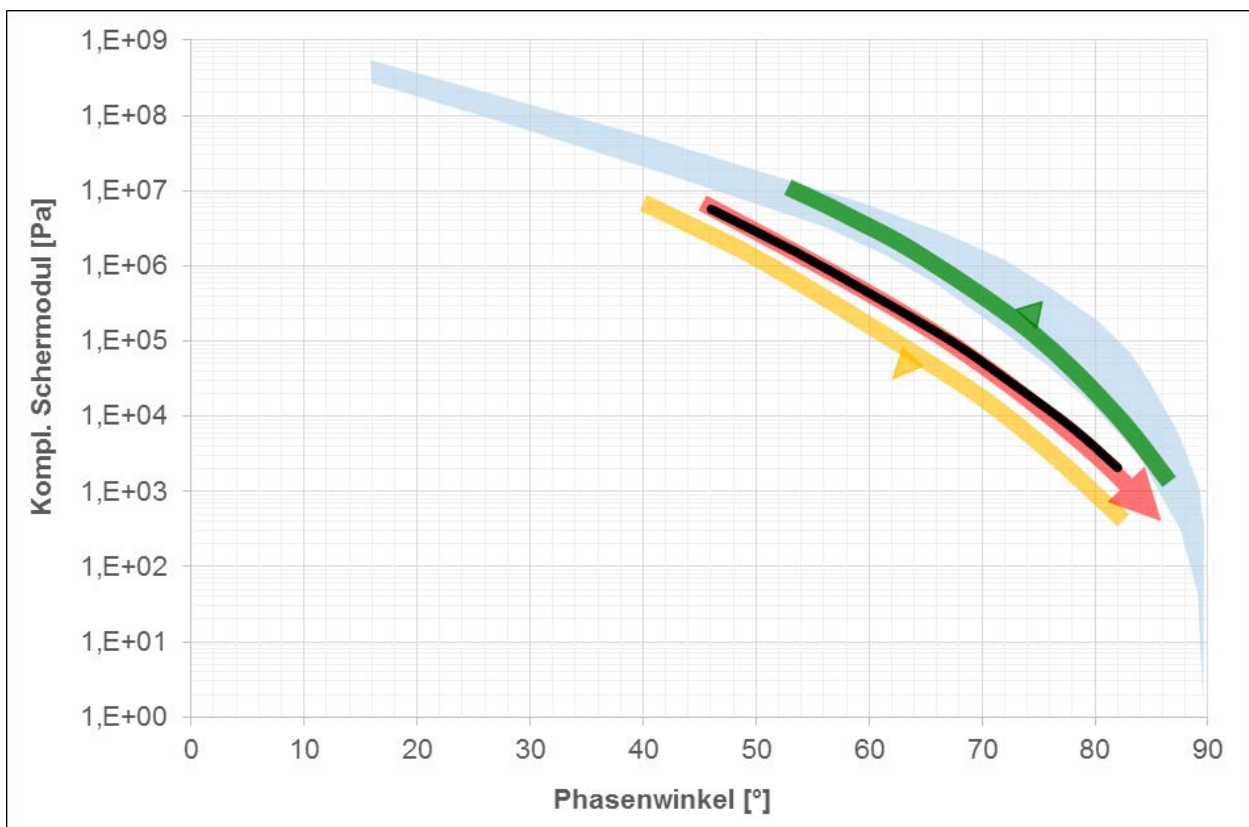


Bild 6-1: Erkenntnisse zu den typischen Wirkungen der Rejuvenatoren im Black-Diagramm

Die schwarze Linie in Bild 6-1 stellt dabei eine typische Ausgangssituation dar (Kurvverlauf eines gealterten Bindemittels im Black-Diagramm). Die hellblaue Fläche ist wiederum das bestmögliche Zielfenster für die Verjüngung, das durch Messungen an einer Vielzahl frischer Bitumen definiert wurde. Die grüne Linie ist die Verschiebung der rheologischen Eigenschaften durch Zugabe eines rheologisch günstig wirkenden Verjüngungsmittels. Rejuvenatoren mit dieser Wirkungsweise wurden im Rahmen der Untersuchungen tatsächlich festgestellt. Die rote Linie zeigt ein „Verjüngungsmittel“ mit fluxender Wirkung. Hiermit lässt sich zwar eine Verminderung der Steifigkeit eines bitumenhaltigen Bindemittels erreichen, das rheologische Verhältnis aus elastischen und viskosen Verformungsanteil bleibt aber weitgehend unverändert. Die dritte Wirkungsvariante zeigt eine Veränderung des rheologischen Verhältnisses aus elastischen und viskosen Verformungsanteil hin zu noch höheren elastischen Anteilen. Dies ist nach bisherigen Erkenntnissen keine gewünschte Wirkungsweise. Allerdings wird auch hier die Steifigkeit des resultierenden Bindemittels reduziert.

Für die zukünftige praktische Anwendung von Rejuvenatoren bei der Wiederverwendung von Asphalt wird unter Berücksichtigung der Erkenntnisse aus diesem Forschungsprojekt eine Eignungsüberprüfung der funktionalen rheologischen Wirksamkeit der zum Einsatz vorgesehenen Rejuvenatoren empfohlen. Der Anhang A zeigt einen Vorschlag für eine Verfahrensbeschreibung zum Nachweis der Wirksamkeit eines Rejuvenators.

7 Literatur

- ASTM D 4124:** Standard Test Method for Separation of Asphalt into Four Fractions. American Society for Testing and Materials, 2009
- DIN EN 1426:** Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung der Nadelpenetration, Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag, Berlin, 2007
- DIN EN 1427:** Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung des Erweichungspunktes – Ring- und Kugel-Verfahren, Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag, Berlin, 2007
- DIN EN 12607-1:** Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung der Beständigkeit gegen Verhärtung unter Einfluss von Wärme und Luft – Teil 1: RTFOT-Verfahren, Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag, Berlin, 2013
- DIN EN 12697-11:** Asphalt - Prüfverfahren für Heißasphalt - Teil 11: Bestimmung der Affinität von Gesteinskörnungen und Bitumen, Beuth Verlag, Berlin, Berlin, 2012
- DIN EN 12697-46:** Asphalt – Prüfverfahren für Heißasphalt – Teil 46: Widerstand gegen Kälterisse und Tieftemperaturverhalten bei einachsigen Zugversuchen, Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag, Berlin, 2012
- DIN EN 13589:** Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung der Streckeigenschaften von modifiziertem Bitumen mit dem Kraft-Duktilitäts-Verfahren, Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag, Berlin, 2008
- DIN EN 13702-1:** Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Bestimmung der Formänderungsarbeit Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, Ausgabe 2003
- DIN EN 13703:** Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Bestimmung der dynamischen Viskosität von modifizierten Bitumen – Teil 1: Platte-Kegel-Verfahren, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, Ausgabe 2004
- DIN EN 14769:** Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Beschleunigte Langzeit-Alterung mit einem Druckalterungsbehälter (PAV), Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag, Berlin, 2012
- DIN EN 14770:** Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung des komplexen Schermoduls und des Phasenwinkels – Dynamisches Scherrheometer (DSR), Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag, Berlin, 2012
- DIN EN 14771:** Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung der Biegekriechsteifigkeit – Biegebalkenrheometer (BBR), Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag, Berlin, 2012
- DIN 51595:** Prüfung von Mineralölerzeugnissen – Bestimmung des Gehaltes an Asphaltenen – Fällung mit Heptan, Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag, Berlin, 2000
- 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, Köln, 2009
- TL Asphalt-StB 07/13:** Technische Lieferbedingungen für Asphaltmischgut für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen (TL Asphalt-StB), Ausgabe 2007/Fassung 2013, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln, 2013
- TL AG-StB 09:** Technische Lieferbedingungen für Asphaltgranulat (TL AG-StB), Ausgabe 2009, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln, 2013
- TL Bitumen-StB 07:** Technische Lieferbedingungen für Straßenbaubitumen und gebrauchsfertige polymermodifizierte Bitumen, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln, 2007

- TP Asphalt-StB 07, Teil 1:** Technische Prüfvorschrift für Asphalt – Teil 1: Bindemittelgehalt, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln, 2007
- TP Asphalt-StB 07, Teil 3:** Technische Prüfvorschrift für Asphalt – Teil 3: Rückgewinnung des Bindemittels - Rotationsdampfer, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln, 2007
- TP Asphalt-StB 07, Teil 10 B:** Technische Prüfvorschrift für Asphalt – Teil 10 B: Verdichtungswiderstand mit Hilfe des Marshall- Verdichtungsgerätes Verfahren B: Änderung der Probekörperdicke, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln, 2010
- TP Asphalt-StB 07, Teil 25 B 1:** Technische Prüfvorschrift für Asphalt – Teil 25 B 1: Einaxialer Druckschwellversuch – Bestimmung des Verformungsverhaltens von Walzasphalt bei Wärme, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln, 2010
- TP Asphalt-StB 07, Teil 46 A:** Technische Prüfvorschrift für Asphalt – Teil 46 A: Kälteeigenschaften Einaxialer Zugversuch und Abkühlversuch, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln, 2013
- TP Gestein-StB 07, Teil 4.1.2:** Technische Prüfvorschriften für Gesteinskörnungen im Straßenbau, Teil 4.1.2: Bestimmung der Korngrößenverteilung durch Siebung, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln, 2007
- ACHILLES, F.:** Mikroskopische und bildanalytische Untersuchungen an aus Asphalt hergestellten Dünnschliffen, Studienarbeit, ISBS Institut für Straßenwesen, TU Braunschweig, 2014
- AFCEC-TR-76-3:** Evaluation of rejuvenators for Bituminous pavements, Air Force Civil Engineering Center, Tyndall Air Force Base, 1976
- AIREY, G. D., BROWN, S. F.:** Rheological Performance of Aged Polymer Modified Bitumens, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Ausgabe 67, S. 66-100, 1998
- ASI:** asphalt preservation & recycling, Handout, ASI solutions plc, Rooksley
- BAG:** Interner Untersuchungsbericht der BAG, Abteilung ATQ, Linz am Rhein, 2011
- BOBEMA:** BBM RheoFalt Asphalt recycling, Bobema Nederland B.V., Hoorn, 2010
- BOYER, R. E.:** Asphalt Rejuvenators “Fact, or Fable”, Transportation Systems 2000 (TS2K) Workshop, San Antonio, 2000
- BROWNRIDGE, H.:** The Role of an Asphalt Rejuvenator in Pavement Preservation: Use and Need for Asphalt Rejuvenation, First International Conference on Pavement Preservation, Newport Beach, 2010
- BURKE, J.:** Solubility Parameters: Theory and Application; AIC Book and Paper Group Annual, Volume 3, S. 13-58, 1984,
- Radenberg, M. ; Wellner, F., Ascher, D., Cetinkaya, R.:** Bestimmung des Alterungsverhaltens von Asphaltgemischen als Grundlage für die Dimensionierung und Prognose der Lebensdauer und Schadensentstehung. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (Hg.) (2013): von. Heft 1091. Bremen: Fachverlag NW in der Carl Schünemann Verlag GmbH (Forschung, Straßenbau und Straßenverkehrstechnik).
- CHIU, C.-T., LEE, M.-G.:** Effectiveness of Seal Rejuvenators for Bituminous Pavement Surfaces, Journal of Testing and Evaluation, ASTM International, West Conshohocken, 2006
- DEUTSCHER ASPHALTVERBAND (DAV) e.V.:** Wiederverwenden von Asphalt, Bonn, 2014
- DICKIE, J. P., YEN, T. F.:** Macrostructure of the asphaltic fractions by various instrumental methods, Analytical Chemistry, 1967
- FENIXFALT:** Regeneriert den Asphalt und versichert die Zukunft der Fahrbahn, Handout, Fenixfalt SAS, Salies-de-Béarn

- FISCHER, T.:** Analytische Methoden in den Erdwissenschaften (1996/1997). Abgerufen am 27. 01 2014 von <http://titan.minpet.unibas.ch/minpet/vorlesungen.cdc/analyt/preparation/DSprp.html>
- GARCÍA, Á., SCHLANGEN, E., VAN DE VEN, M.:** Properties of capsules containing rejuvenators for their use in asphalt concrete, Fuel 90, Elsevier, 2010
- GESTIS-STOFFDATENBANK;** Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung, online abgerufen am 14.11.14
- HIRSCH, V.:** Chemisch-physikalische Charakterisierung von Normbitumen und PmB, Teil 2: Korrelation zwischen physikalischen Eigenschaften und chemischer Konstitution von Normbitumen und polymermodifizierten Bitumen; Abschlussbericht, Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach, 2005
- HACH:** Bedienungsanleitung zum Tragbaren Trübheitsmessgerät, Hach Company, 2004
- HERMADI, M.; ZAMHARI, K. A.; BIN KARIM, A. T.; ABDULLAH, M. E.; LLOYD, L.:** The Effect of Saturates on Rheological and Aging Characteristics of Bitumen, World Academy of Science, Engineering and Technology, Vol. 6, 2012
- JIMÉNEZ DEL BARCO CARRIÓN, A; LO PRESTI, D.; AIREY, G. D.:** Binder design of high RAP content hot and warm asphalt mixture wearing courses, Road Materials and Pavement Design, Vol.16, No. S1, 460-474, 2015
- KARLSSON, R., ISACSSON, U.:** Bitumen Rejuvenator Diffusion as Influenced by Ageing, Road Materials and Pavement Design, Vol. 3, Nr. 3, Taylor & Francis, London, 2002
- LANGE, B., VEJDĚLEK, Z.:** Photometrische Analyse; Weinheim, 1980
- LESUEUR, D., GERARD, J. F., CLAUDY, P., LETOFFE, J. M., PLANCHE, J. P., MARTIN, D.:** A Structure-Related Model To Describe Bitumen Linear Viscoelasticity, Eurasphalt & Eurobitume Congress, Strasbourg, 1996
- LOPEZ, E., GASCA ALLUE, C., CHIFFLET, P., GARCIA SERRADA, C.:** A new life for bitumen. A recent innovation for the regeneration of the aged bitumen in hot mix asphalt, XXIVth Road World Congress, Mexico City, 2011
- MOGAWER, W. S., BOOSHEHRAN, A., VAHIDI, S., AUSTERMAN, A. J.:** Evaluating the effect of rejuvenators on the degree of blending and performance of high RAP, RAS, and RAP/RAS mixtures, Road Materials and Pavement Design, Vol. 14, S2, S. 193-213, Taylor & Francis, London, 2013
- MULLINS, O. C.:** The Modified Yen Model, Energy and Fuels, Vol. 24, 2010
- MULLINS, O. C.; SABBAB, H.; EYSSAUTIER, J.; POMERANTZ, A. E.; BARRÉ, L.; ANDREWS, A. B.; RUIZ-MORALES, Y.; MOSTOWFI, F.; MCFARLANE, R.; GOUAL, L.; LEPKOWICZ, R.; COOPER, T.; ORBULESCU, J.; LEBLANC, R. M.; EDWARDS, J.; ZARE, R.N.:** Advances in Asphaltenes Science and the Yen-Mullins Model, Energy and Fuels, Vol. 26, ACS Publications, Washington, 2012
- NAHAR, S. N.; QIU, J.; SCHMETS, A. J. M.; SCHLANGEN, E.; SHIRAZI, M.; VAN DEN VEEN, M; F. C., SCHITTER, G.; SCARPAS, A:** Turning Back Time, Rheological and Microstructural Assessment of Rejuvenated Bitumen, Transportation Research Record, No. 2444, pp. 52-62, Washington D.C., 2014
- NELLENSTEYN, F. J.:** Bereiding en Constitutie van Asphalt, Delft / Netherland, 1923
- NEUMANN, H.-J., RAHIMIAN, I.:** Über die Kolloidchemie des Bitumens, Bitumen, Heft 1, S. 1-5, 1973
- NEUMANN, H.-J.:** Oxidationsverhalten von Bitumen bei Gebrauchstemperaturen; Erdöl Erdgas Kohle 103, 1987

-
- NEUMANN, H.-J., RAHIMIAN, I., PACZYNSKA-LAHME, B.:** Zur Strukturalterung von Bitumen, Bitumen, Heft 2, S. 54-56, 1992
- NEUMANN, H.-J.:** Was ist Bitumen?, Bitumen, Heft 4, S. 146-151, 1995
- NÖSLER, I.:** Beitrag zur prüftechnischen Ansprache des Haftverhaltens zwischen Mineralstoff und Bitumen; Dissertation, Universität-GH Wuppertal, 2000
- PLANCHE, J. P., LESUEUR, D., HINES, M. L., KING, G. N.:** Evaluation of Elastomer Modified Bitumens using SHRP Binder Specifications, Eurasphalt & Eurobitume Congress, Strasburg, 1996
- POTSCHKA, V.:** Entwicklung eines Prüfverfahrens zur prognostizierenden Beurteilung des Alterungsverhaltens von Bitumen in Asphalt; 1989
- RADENBERG, M.; NYTUS, N.; GEHRKE, M.:** Einfluss der chemischen, rheologischen und physikalischen Grundeigenschaften von Straßenbaubitumen auf das Adhäsionsverhalten unterschiedlicher Gesteinskörnungen: IGF-Vorhaben 16639 N/1, 2014
- RAPBOND RECYCLING AGENTS:** Sicherheitsdatenblatt Rapbond 240, ASI solutions plc, Rooksley, 2010
- READ, J. u. WHITEOAK, D.:** The SHELL Bitumen Handbook; Thomas Telford Publishing, Fifth Edition, 2003
- REDELIUS, P.; SOENEN, H.:** Correlation between Bitumen Polarity and Rheology, Road Materials and Pavement Design, Vol. 6, No. 3, 2005
- REGEMAC:** Fiche produit Regemac RCn et RCs, Fenixfalt SAS, Salies-de-Béarn, 2012
- REGEFALT:** Fiche produit Regefalt RT, Fenixfalt SAS, Salies-de-Béarn, 2012
- RHEOFALT HP-EM:** Produktdatenblatt und Sicherheitsdatenblatt RheoFalt HP-EM, Ventraco Chemie B.V., Amsterdam, 2009
- RICHTER, E.:** Zur Verhärtung des Bitumens und deren Auswirkung auf die Lebensdauer von Asphaltbetondeckschichten, Bitumen, Heft 1, S. 13-18, 1989
- RIEBESEHL, G.:** Storimpex Vollrecycling, Handout, Storimpex Asphaltec GmbH, Glinde, 2011
- RUB:** Interne Forschung des Lehrstuhls für Verkehrswegebau, Ruhr-Universität Bochum, Bochum, 2014
- SCHLAME, K.:** Entwicklung einer Methode zur Langzeitalterung von Strassenbaubindemitteln. Bonn : Bundesminister für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Abt. Strassenbau, Strassenverkehr, 2002 (Forschung Strassenbau und Strassenverkehrstechnik Heft 843)
- SEBOR, G., BLAZEK J.:** Optimization of the preparative separation of petroleum maltenes by liquid adsorption chromatography; Journal of Chromatography, Vol. 847, S. 323-330, 1999
- SHEN, J., AMIRKHANIAN, S., TANG, B.:** Effects of rejuvenator on performance-based properties of rejuvenated asphalt binder and mixtures, Construction and Building Materials 21, S. 958-964, Elsevier, 2006
- SHEN, J., AMIRKHANIAN, S., MILLER, J. A.:** Effects of Rejuvenating Agents on Superpave Mixtures Containing Reclaimed Asphalt Pavement, Journal of Materials in Civil Engineering, S. 376-384, ASCE, 2007
- STARDOPE ACF 20:** Produktdatenblatt und Sicherheitsdatenblatt Stardope ACF 20, Star Asphalt S.p.A., Saracena, 2010
- STARDOPE ACF 100:** Produktdatenblatt und Sicherheitsdatenblatt Stardope ACF 100, Star Asphalt S.p.A., Saracena, 2010

- STARDOPE RG:** Produktdatenblatt und Sicherheitsdatenblatt Stardope RG, Star Asphalt S.p.A., Saracena, 2010
- STORFLUX:** Produktdatenblatt Storflux, Asphaltec GmbH, Glinde, 2009
- STORFLUX PLUS:** Produktdatenblatt Storflux Plus, Asphaltec GmbH, Glinde, 2009
- STORFLUX PREMIUM:** Produktdatenblatt Storflux Premium, Asphaltec GmbH, Glinde, 2009
- STORFLUX NATURE:** Produktdatenblatt Storflux Nature, Asphaltec GmbH, Glinde, 2009
- STORBIT:** Produktdatenblatt Storbit, Asphaltec GmbH, Glinde, 2009
- STORBIT PLUS:** Produktdatenblatt Storbit Plus, Asphaltec GmbH, Glinde, 2009
- STORBIT PREMIUM:** Produktdatenblatt Storbit Premium, Asphaltec GmbH, Glinde, 2009
- STORBIT NATURE:** Produktdatenblatt Storbit NATURE, Asphaltec GmbH, Glinde, 2009
- TEGO ADDIBIT EM 20:** Produktdatenblatt und Sicherheitsdatenblatt, Evonik Industries, Essen, 2011
- THIMM, L.:** FT-IR und FT-NIR spektroskopische Untersuchungen in Kombination mit chemometrischen Auswertelgorithmen zur Charakterisierung der chemischen Zusammensetzung von Straßenbaubitumen, Essen, 2009
- VALUE ENGINEERING:** Report on Reclamite Usage, Naval Weapons Center, China Lake, California, Navy Facilities Engineering Command – Western Division, San Bruno, 1973
- VENTRACO:** RheoFalt® HP-EM – Sustainable Production of Asphalt, Handout, Ventraco Chemie B.V., Amsterdam
- WEGAN, V., BRULÉ, B.:** Die Struktur von Polymermodifiziertem Bitumen in Asphalt. Bitumen, Heft 1, S. 6-12, 2000
- ZAUMANIS, M., MALLICK, R. B., FRANK, R.:** Low temperature properties of rejuvenated 100 % reclaimed asphalt pavement mixtures, 5th EATA Conference, Braunschweig, 2013
- ZENKE, G.:** Zum Löseverhalten von "Asphaltenen": Anwendung von Löslichkeitsparameter-Konzepten auf Kolloidfraktionen schwerer Erdölprodukte, Dissertation, Clausthal, 1989
- ZENKE, G.:** Stoffbestand und Verhalten von Straßenbaubitumen: Eine Übersicht zum Stande der Erkenntnisse (III), Bitumen, Heft 4, S. 177-183, 1991

Anhang A: Verfahrensbeschreibung zum Nachweis der funktionalen rheologischen Wirksamkeit eines Rejuvenators bei der Wiederverwendung von Asphalt (Eignungsuntersuchung)

1. Allgemeines

Die nachfolgenden Beschreibungen sind eine auf der Basis der Ergebnisse des Forschungsvorhaben „Einsatz von Rejuvenatoren bei der Wiederverwendung von Asphalt“ (FE 07.0250/2011/LRB) abgeleitete Empfehlung zum Nachweis der funktionalen rheologischen Wirksamkeit eines Rejuvenators bei der Wiederverwendung von Asphalt.

Grundsätzlich haben die Untersuchungen im Rahmen des vorgenannten Forschungsvorhabens gezeigt, dass das Mischungsverhältnis zwischen Rejuvenator und Bindemittel aus dem Granulat nicht in einem linearen Zusammenhang mit den zu optimierenden rheologischen Eigenschaften des Bindemittelgemisches stehen. Darüber hinaus ist die Dauerhaftigkeit der verjüngenden Wirkung von großer Bedeutung für eine nachhaltige Wiederverwendung von Asphalt, sodass auch dieser Aspekt im Rahmen einer Eignungsuntersuchung von Rejuvenatoren betrachtet werden sollte.

2. Untersuchungsmaterialien

Für den Nachweis der Wirkung des Rejuvenators wird empfohlen, mindestens drei Asphaltgranulate mit unterschiedlichem Alterungsgrad zu beschaffen. Der Grad der Alterung sollte das Gesamtspektrum der für die Wiederverwendung anfallenden Ausbausphalte an der betrachteten Asphaltmischanlage abdecken. Die für die Untersuchungen vorgesehenen Asphaltgranulate sollten in ausreichender Menge und in homogener Zusammensetzung vorliegen (z.B. selektives Fräsgut).

Darüber hinaus ist der zu bewertende Rejuvenator in ausreichender Menge zu beschaffen.

3. Laboruntersuchungen und Bewertung der Ergebnisse

Aus den Asphaltgranulaten ist mit Hilfe einer Extraktion nach TP Asphalt-StB Teil 1 und anschließender Bindemittelrückgewinnung nach TP Asphalt-StB Teil 3 das Bindemittel in ausreichender Menge zu gewinnen. Es wird empfohlen, eine Bindemittelmenge von mindestens 500 g zu gewinnen.

Jeweils eine Teilprobe der aus den Granulaten gewonnenen Bindemittel ist gemäß AL DSR (Temperatursweep) in einem Temperaturbereich von 30 bis 90 °C (eine Erweiterung des Temperaturbereichs ist anzustreben) zu untersuchen. Als Auswertung wird empfohlen, die Temperatur zu berechnen, bei der der komplexe Schermodul G^* 15 kPa erreicht. Zudem ist der Phasenwinkel δ bei diesem komplexen Schermodul zu betrachten. Die Temperatur bei einem komplexen Schermodul von 15 kPa entspricht bei Straßenbaubitumen nach bisherigem Kenntnisstand dem Erweichungspunkt Ring und Kugel. Der Phasenwinkel ist eine wichtige Kenngröße zur Bewertung des rheologisch wichtigen Verhältnisses zwischen viskosen und elastischen Steifigkeitsanteilen. Die Tabelle 1 zeigt die typischen Wertebereiche von frischen Straßenbaubitumen für diese beiden Kennwerte.

Tabelle 1: Derzeitiger Erfahrungsbereich für T_{G^*15kPa} und δ_{G^*15kPa} (Straßenbaubitumen, frisch)

Bitumen- sorte	T_{G^*15kPa} Temperatur bei $G^* = 15$ kPa		δ_{G^*15kPa} Phasenwinkel bei $G^* = 15$ kPa	
	min T [°C]	max T [°C]	min δ [°]	max δ [°]
20/30	58	63	75	82
30/45	53	58	75	83
50/70	48	53	78	86
70/100	43	48	79	87
160/220	37	42	78	84

Durch Alterung eines Bindemittels erhöht sich T_{G^*15kPa} und δ_{G^*15kPa} verringert sich. Erhöhungen von T_{G^*15kPa} um 20 K und mehr sowie Verringerungen von δ_{G^*15kPa} um bis zu 20 ° lassen sich in Bindemitteln aus Asphaltgranulat feststellen.

Eine hohe rheologische Wirksamkeit eines Rejuvenators ist grundsätzlich dann gegeben, wenn sich T_{G^*15kPa} und δ_{G^*15kPa} im Bindemittelgemisch wieder annähernd in den Wertebereich der angestrebten Bindemittelsorte im frischen Zustand befindet. Nach bisherigem Kenntnisstand ist eine vollständige Rückführung dieser rheologischen Eigenschaften mit den bisher untersuchten Rejuvenatoren nicht möglich.

Für den Nachweis der Wirksamkeit ist jedes aus den drei Granulaten gewonnene Bindemittel mit drei unterschiedlichen Rejuvenatoranteilen zu einem homogenen Bindemittelgemisch zu mischen. Die Bedingungen zur Bindemittelgemischherstellung sind zu dokumentieren und für alle Gemische gleichermaßen einzuhalten. Eine zukünftige Regelung zur einheitlichen Herstellung solcher Bindemittelgemische ist anzustreben.

An diesen Gemischen sind die rheologischen Bindemittelleigenschaften gemäß AL DSR (Temperatursweep) in einem Temperaturbereich von 30 bis 90 °C (eine Erweiterung des Temperaturbereichs ist anzustreben) zu untersuchen. Nach bisherigem Kenntnisstand ist eine Interpolation der Ergebnisse möglich, während eine Extrapolation nicht empfohlen wird.

Für den Nachweis der Wirkungsdauer des Rejuvenators ist eine simulierte Alterung des ausgewählten Bindemittelgemisches durchzuführen. Hierzu sollte eine kombinierte Kurz- und Langzeitalterung durchgeführt werden (RTFOT- und anschließend PAV-Alterung).

Über die erneute Prüfung der Kennwerte T_{G^*15kPa} und δ_{G^*15kPa} kann die Dauerhaftigkeit der verjüngenden Wirkung überprüft werden.

4. Praxiserprobung

Grundsätzlich wird mit den vorbeschriebenen Untersuchungen die rheologisch wirksame Veränderung der Bindemittelleigenschaften im Labormaßstab behandelt. Die hinreichende Homogenisierbarkeit eines Rejuvenators bei der Asphaltmischgutherstellung sollte nach bisherigen Erkenntnissen vorzugsweise unter Praxisbedingungen überprüft werden. Für einen abschließenden Nachweis der Praxistauglichkeit sollte daher an der

Asphaltmischanlage eine Probemischung durchgeführt werden. An dem so hergestellten Mischgut kann die homogene Mischgutzusammensetzung (hier insbesondere das Bindemittelgemisch) indirekt mit Hilfe von Performance-Untersuchungen (z.B. Steifigkeiten und/oder andere) überprüft werden. Hierzu ist ein an der Asphaltmischanlage hergestelltes und vergleichbar zusammengesetztes Referenzmischgut erforderlich, bei dem eine hinreichende Homogenität vorausgesetzt werden kann (z.B. Mischgut ohne Asphaltgranulat).

Der Vergleich solcher Untersuchungsergebnisse ist eine wichtige zusätzliche Erkenntnis bei der Verwendung von Rejuvenatoren im Asphaltstraßenbau, sodass diese Ergebnisse als Erfahrungssammlung dokumentiert werden sollten.

Im Auftrag des Bundesministeriums
für Verkehr und digitale Infrastruktur

Schlussbericht zum Forschungsprojekt
FE 07.0250/2011/LRB

Einsatz von Rejuvenatoren bei der Wiederverwendung von Asphalt

Teil 2

von

Axel Walther, Michael P. Wistuba und Stephan Büchler

April 2016

Technische Universität Braunschweig

Teil 2 – Technische Universität Braunschweig

Institut für Straßenwesen (ISBS)

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

Inhalt

1	Vorwort	133
2	Einleitung und Zielsetzung	134
2.1	Problemstellung	134
2.2	Projektziel und -inhalt	135
3	Untersuchungsmethodik	137
3.1	Vorgehensweise	137
3.2	Verwendete Baustoffe und Rezepturen	137
3.2.1	Gestein	138
3.2.2	Bitumen	138
3.2.3	Asphaltgranulat.....	139
3.2.4	Rejuvenatoren (Verjüngungsmittel).....	139
3.3	Laborverfahren zur Herstellung von Asphaltmischgut unter Einsatz von Asphaltgranulat und Rejuvenatoren	140
3.3.1	Mischtemperaturen für die Asphaltmischgut-Varianten	141
3.3.2	Erwärmung des Asphaltgranulats	142
3.3.3	Herstellung von Asphaltmischgut im Labor unter Verwendung von Rejuvenatoren.	143
3.3.4	Zweiwellen-Zwangsmischer (ZZM)	143
3.3.5	Walzsektor-Verdichtung zur Herstellung von Asphalt-Probepplatten	144
3.4	Performance-Prüfungen zur Ansprache der Asphalteigenschaften	146
3.4.1	Verformungswiderstand	146
3.4.2	Widerstand gegen Kälterissbildung.....	149
3.4.3	Ermüdungswiderstand.....	150
3.4.4	Steifigkeit von Asphalt	153
3.5	Bitumen-Typisierungs-Schnell-Verfahren	156
3.6	Rechnerische Lebensdauer	157
3.6.1	Berechnungsgrundlagen	157
3.6.2	Anzahl der zulässigen Lastwechsel	158
3.6.3	Nachweis der Gebrauchsdauer.....	159
4	Untersuchungsergebnisse	160
4.1	Bindemittleigenschaften	160
4.2	Zugabemengen an Rejuvenator	160
4.3	Asphalttragschicht-Varianten AC 32 T S (Mischgut-Variante 1)	160
4.3.1	Zusammensetzung	160
4.3.2	Performance-Eigenschaften.....	164

4.4	Asphaltbinderschicht-Varianten AC 22 B S (Mischgut-Variante 2)	173
4.4.1	Zusammensetzung	173
4.4.2	Performance Eigenschaften	174
4.5	Asphaltdeckschicht-Varianten SMA 11 S (Mischgut-Variante 3)	183
4.5.1	Zusammensetzung	183
4.5.2	Performance-Eigenschaften	184
4.6	Asphaltdeckschicht-Varianten AC 11 D S (Mischgut-Variante 4)	193
4.6.1	Zusammensetzung	193
4.6.2	Performance-Eigenschaften	194
4.7	Großtechnisch hergestellte Asphaltdeckschicht-Varianten SMA 8 S (Mischgut-Variante 5)	202
4.7.1	Gedächtnisprotokoll zum Einbau des SMA 8 S mit Rejuvenatoren in Hamburg Billstedt am 12.09.2015	202
4.7.2	Ergebnisse der Eigenüberwachung (WPK):.....	214
4.7.3	Zusammensetzung	214
4.7.4	Performance-Eigenschaften	217
4.8	Lebensdauerprognose mittels rechnerischer Dimensionierung	222
4.8.1	Randbedingungen und Eingangsgrößen.....	222
5	Interpretation der Untersuchungsergebnisse	227
5.1	Verformungswiderstand von Asphalt	227
5.2	Widerstand gegen Kälterissbildung von Asphalt	229
5.3	Steifigkeit und Ermüdungswiderstand von Asphalt	231
5.4	Rechnerische Dimensionierung	234
6	Zusammenfassung.....	235
Literatur	238

1 Vorwort

Dieser Bericht beinhaltet den zweiten Teil des vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur beauftragten Forschungsprojekts FE 07.0250/2011/LRB - „*Einsatz von Rejuvenatoren bei der Wiederverwendung von Asphalt*“. Er wurde am Institut für Straßenwesen der Technischen Universität Braunschweig (ISBS) erarbeitet. In diesem Teil werden neue Erkenntnisse vorgestellt zur Zusammensetzung von Asphalt unter Verwendung von Asphaltgranulat, Frischbindemittel und Rejuvenatoren (Verjüngungsmitteln) als Bindemitteladditiv. Auch bei hohen Zugabeanteilen von Asphaltgranulat und bei Verwendung von Rejuvenatoren soll das angestrebte Zielbindemittel zielsicher „eingestellt“ werden können.

Dem Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur und der Bundesanstalt für Straßenwesen sei für die Realisierung dieses Projekts gedankt. Langfristig ausreichende Investitionen in die universitäre Forschung sind die Voraussetzung, eine aus der Forschung erwachsende Wertschöpfung für die Gesellschaft sicherzustellen.

Gleichermaßen wird der TOTAL Deutschland GmbH, BP Europa SE, und den Herstellern der eingesetzten Rejuvenatoren für die Bereitstellung von Baustoffen gedankt.

Die Autoren

2 Einleitung und Zielsetzung

2.1 Problemstellung

Die Verwendung von Asphaltmischgut unter Verwendung von Ausbauasphalt in Form von Asphaltgranulat ist seit vielen Jahren Stand der Technik (siehe z. B. Walther und Wistuba, 2014; Arand und Renken, 1994; Renken et al., 2005, 1996; Wistuba et al., 2011; Grönniger et al., 2010; Mollenhauer et al., 2010). Nach wie vor kann dabei das im Ausbauasphalt vorhandene Bindemittel aufgrund der durch Alterung bedingten Versprödung nur in begrenztem Maße bei der Herstellung eines neuen Asphaltmischgutes eingebracht werden. Darüber hinaus wurden in den letzten Jahren und werden in den kommenden Jahren verstärkt Ausbauasphalte gewonnen werden, die bereits mit Asphaltgranulat hergestellt worden sind und damit einen besonders hohen Alterungsgrad aufweisen. Die Wiederverwendungsmenge von Ausbauasphalt liegt seit annähernd 10 Jahren bei konstant rd. 20 % bezogen auf die gesamte Asphaltmischgutproduktion (Deutscher Asphaltverband, 2014).

Um ein gealtertes Bindemittel in dem Maße zu verjüngen, dass seine mechanischen Eigenschaften jenen eines lieferfrischen, ungealterten Bitumen entsprechen, müssen vergleichsweise hohe Mengen an Frischbindemittel zugegeben werden. Die Zugabemenge ergibt sich aus den derzeit gültigen Regelungen der TL Asphalt-StB in Abhängigkeit des Erweichungspunktes Ring und Kugel EP_{RUK} . Der EP_{RUK} des aus dem Asphaltgranulat rückgewonnenem Bindemittels darf dabei im Mittel 70 °C nicht überschreiten, da sonst Haftprobleme zum Gestein und ein verschlechtertes Kälteverhalten des Asphaltmischguts befürchtet werden. Darüber hinaus darf gemäß TL Asphalt (2013) das lieferfrische Bindemittel nur eine Sortenspanne weicher als das Zielbindemittel sein. Bei der Kontrollprüfung gelten die Anforderungen an das rückgewonnene Bindemittel der ZTV Asphalt-StB in Abhängigkeit des festgelegten Zielbindemittels.

Somit ergibt sich die maximal mögliche Zugabemenge an Asphaltgranulat aus der notwendigen Zugabemenge an lieferfrischem Bitumen in Kombination mit dem zu erzielenden Bindemittelgehalt des Asphaltmischguts.

Eine Alternative zu der Zugabe von Frischbindemittel bieten Additive in Form von Rejuvenatoren (Verjüngungsmittel), mit deren Hilfe infolge der Bitumenalterung verloren gegangene Bitumenbestandteile und Veränderungen kompensiert werden und die Viskosität des gealterten Bitumens herabgesetzt wird. Durch die Zugabe von Rejuvenatoren bei der Aufbereitung von Ausbauasphalt und/oder bei der Herstellung von Asphaltmischgut mit Asphaltgranulat besteht somit die Möglichkeit, die Eigenschaften des gealterten Bindemittels aus dem Asphaltgranulat dahingehend positiv zu beeinflussen, dass z. B. die Viskosität des Bitumens verringert und je nach Zugabestoff die Widerstandsfähigkeit gegen Oxidation erhöht wird (Guillaume, 1987; Shen et al., 2006; Holleran, 2005; Boyer, 2000). Prinzipiell basieren bisherige Methoden zur Verjüngung auf dem Hinzufügen verlorener Komponenten oder vergleichbarer Stoffe (Ersatz von Dispersionsmitteln oder Erdölharzen). Dieser Prozess kann dann zu einer Wiederherstellung des ursprünglichen Verhältnisses zwischen Maltenen und Asphaltenen führen (Sanders, 2005).

Rejuvenatoren verringern die Viskosität des Bindemittels im Asphaltgranulat deutlich stärker als lieferfrische Bitumen. Die notwendigen Zugabemengen an Rejuvenatoren sind daher wesentlich geringer, was wiederum eine höhere Zugabemenge Asphaltgranulat bei gleichem Bindemittelgehalt im Asphalt ermöglicht.

2.2 Projektziel und -inhalt

Die effektive Nutzung von wiederaufbereiteten Bindemitteln aus Asphaltgranulaten ist heute und in der nahen Zukunft – insbesondere vor dem Hintergrund einer nachhaltigen Ressourcenbewirtschaftung – eine wichtige technologische Herausforderung.

Das Teilziel dieses Forschungsprojekts, das am Institut für Straßenwesen der Technischen Universität Braunschweig (ISBS) erarbeitet wird, ist eine Analyse der Wirkung von Rejuvenatoren (Verjüngungsmittel) auf die Asphalteigenschaften von repräsentativen Mischgutvarianten.

Zur Klärung, ob Asphalte mit Asphaltgranulat und Rejuvenatoren vergleichbare Performance-Eigenschaften wie Asphalte mit Asphaltgranulat und lieferfrischem Bitumen aufweisen, werden in diesem Forschungsvorhaben systematische Untersuchungen durchgeführt.

Aus Oszillationsprüfungen am Dynamischen Scherrheometer (DSR) ist bekannt, dass die resultierenden Bindemittleigenschaften stark von der Zugabemenge des Rejuvenators abhängig sind. Bislang wird die notwendige Zugabemenge von Rejuvenatoren anhand des resultierenden Erweichungspunktes Ring und Kugel, der Nadelpenetration oder der Viskosität des Bitumens bestimmt (Shen et al., 2007). Diese herkömmliche Methode ist allerdings nicht immer zielführend. Eine Überschreitung der optimalen Zugabemenge an Rejuvenator führt schnell zu einem starkem Abfall des komplexen Schermoduls, auch wenn das Ergebnis des EP_{RuK} nur geringfügig verringert wird. Insbesondere bei Polymermodifiziertem Bitumen im Asphaltgranulat kann eine adäquate Bindemittelverjüngung nur ungenau mittels EP_{RuK} bestimmt werden, da die Polymere die Bindemittelsteifigkeit maßgeblich beeinflussen.

An alternativen Verfahren wird zurzeit geforscht, mit den vordergründigen Zielen, das DSR zur Gewinnung von rheologischen Materialkenngrößen bzw. -gesetzen einzusetzen und den Prüfaufwand zu reduzieren.

Als ein am DSR einsetzbares, alternatives Prüfverfahren wird im Rahmen dieses Forschungsprojekts das am ISBS entwickelte Bitumen-Typisierungs-Schnell-Verfahren (BTSV) zur Bestimmung der optimalen Zugabemenge an Rejuvenator eingesetzt. Mittels Oszillationsprüfung (1,59 Hz) von 20 bis 90 °C bei stetiger Erwärmung wird jene Temperatur (T_{BTSV}) ermittelt, bei der der komplexe Schermodul auf einen Wert von $G^* = 12,5$ kPa abgefallen ist. Die aus dem Asphaltgranulat rückgewonnenen Bindemittel werden soweit verjüngt, bis die Temperatur T_{BTSV} der des lieferfrischen Referenzbitumens entspricht.

Es werden für 4 Asphaltarten bzw. -sorten – eine Asphalttragschicht (AC 32 T S), eine Asphaltbinderschicht (AC 22 B S) und 2 Asphaltdeckschichten (AC 11 D S und SMA 11 S) – Rezepturen mit unterschiedlichen Rejuvenatoren und unterschiedlichen Zusammensetzungen bezüglich des Zugabeanteils von Asphaltgranulat erstellt. Diesen Gemischen wird eine Referenzvariante ausschließlich mit Primärbaustoffen vergleichend gegenüber gestellt.

Zur Herstellung der mit Asphaltgranulat und Rejuvenator versetzten Gemische werden lieferfrisches Bitumen bzw. frische Gesteinskörnungen nur insoweit hinzugesetzt, wie es für eine zweckmäßige Rezeptur unabdingbar ist. Insgesamt ergeben sich damit 24 Mischgutvarianten mit Rejuvenatoren und 4 Referenzvarianten (28 Asphaltvarianten). Zusätzlich werden 4 großtechnisch hergestellte Asphaltvarianten aus Splittmastixasphalt SMA 8 S im Labor überprüft.

Das Gebrauchsverhalten der Asphaltvarianten wird anhand folgender primärer Gebrauchseigenschaften am verdichteten Asphaltgemisch (Performance-Eigenschaften) bewertet (Begriffsbestimmungen vgl. FGSV, 2014):

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

Zur Charakterisierung der Performance-Eigenschaften werden folgende Prüfmethode eingesetzt:

- Verformungswiderstand gemäß TP Asphalt-StB, Teil 25 B 1 (bzw. DIN EN 12697-25) mit dem Einaxialen Druck-Schwellversuch (FGSV, 1999),
- Steifigkeit und Ermüdungswiderstand von Asphalt mit dem Spaltzug-Schwellversuch gemäß AL Sp-Asphalt 09 (FGSV, 2009a) und
- Widerstand gegen Kälterissbildung gemäß TP Asphalt-StB, Teil 46 A mit dem Einaxialen Zugversuch und dem Abkühlversuch (FGSV, 2013).
- Dimensionierungsberechnungen erfolgen gemäß RDO Asphalt 09 (FGSV, 2009b).

3 Untersuchungsmethodik

3.1 Vorgehensweise

Am ISBS ist aus zahlreichen früheren Untersuchungen zur praxisadäquaten Laborverdichtung von Asphaltmischgut mit Asphaltgranulat bekannt, dass die Intensität des Aufschlusses eines Granulatstückes die mechanischen Eigenschaften des Asphaltes maßgeblich beeinflussen kann und der Aufschluss des Granulatstückes von der Art des Mischwerkzeuges abhängig ist. Daher sind dem Labormisch- und -verdichtungsprozess von Asphaltmischgut mit Asphaltgranulat eine besondere Bedeutung beizumessen.

Die Asphaltherstellung unter Zugabe von Asphaltgranulat erfolgt im Labor des ISBS vorzugsweise mit einem Zweiwellen-Zwangsmischer mit einer ausreichend langen Mischzeit. Der Zweiwellen-Zwangsmischer ist eine Sonderanfertigung, die das Mischwerkzeug einer Chargenmischanlage und somit die Mischkinematik unter Praxisbedingungen im Maßstab von 1:8 nachbildet. Alternative Laborverfahren zur Mischgutherstellung sind die Handmischung und die maschinelle Mischung mittels Schlag- und Rührmischer (sog. REGO-Mischer) oder mittels Gegenlauf-Zwangsmischer (sog. Freundl-Mischer), deren jeweilige Mischkinematik gerätetypisch ist.

Im Forschungsvorhaben „Auswirkung der Wiederverwendung von Ausbauasphalt in Asphalttragschichten auf mechanische Eigenschaften“ (Walther und Wistuba, 2014) konnte anhand von Performance-Prüfungen nachgewiesen werden, dass die Mischgutherstellung unter Verwendung von Asphaltgranulat durch den Zweiwellen-Zwangsmischer vorteilhaft gegenüber anderen Labormischverfahren ist.

Im Rahmen dieses Forschungsprojekts werden folgende Asphaltmischgut-Varianten im Labor unter Zugabe unterschiedlicher Zugabeanteile von Asphaltgranulat und unter Einsatz unterschiedlicher Rejuvenatoren hergestellt und mittels Walzsektor-Verdichtungsgerät gem. TP Asphalt (Teil 33) zu Asphalt-Probeplatten verdichtet:

- Asphalttragschicht AC 32 T S,
- Asphaltbinderschicht AC 22 B S,
- Asphaltdeckschicht SMA 11 S und
- Asphaltdeckschicht AC 11 D S.

Es wird ausschließlich die Warmzugabe von Asphaltgranulat berücksichtigt.

Die hergestellten Asphalt-Probekörper werden umfangreichen Laborprüfungen unterzogen. Dabei werden die asphaltmechanischen Eigenschaften mittels Performance-Prüfungen zu Verformungs-, Kälte-, Ermüdungseigenschaften und Steifigkeit charakterisiert.

Die an den im Labor hergestellten Proben (bei Einsatz von Asphaltgranulat und Rejuvenator) ermittelten Ergebnisse werden den Ergebnissen der Referenzproben ohne Zugabe von Asphaltgranulat gegenübergestellt.

3.2 Verwendete Baustoffe und Rezepturen

Die zur Herstellung im Labor benötigten Baustoffkomponenten für die herzustellenden Asphalttragschicht-Varianten setzen sich aus frischen (ungebrauchten) und bereits verwendeten Baustoffen zusammen.

3.2.1 Gestein

Zur Herstellung der Asphalttragschichtmischgut-Varianten AC 32 T S kommt ein Sedimentgestein (Kalkstein) zur Anwendung. Kalkstein ist ein biogenes Sedimentgestein, das hauptsächlich aus den beiden Mineralien Kalzit und Aragonit (beide CaCO_3) und aus Dolomit ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) besteht. Das Gestein kann aus feinkristallinem Kalkschlamm oder aus zusammengeschwemmten Kalkschalen oder anderen karbonatischen Organismenresten entstanden sein. Seine mittlere Rohdichte beträgt $2,717 \text{ g/cm}^3$.

Zur Herstellung der Asphaltbinderschichtmischgut- (AC 22 B S) und der Asphaltdeckschichtmischgut-Varianten (AC 11 D S und SMA 11 S) kommt ein magmatisches Gestein (Gabbro) zur Anwendung. Gabbro wird in der Gesteinskunde als ein kompaktes grobkörniges magmatisches Gestein plutonischen Ursprung bezeichnet, das hauptsächlich aus Pyroxen und Olivin besteht. Seine mittlere Rohdichte beträgt $2,970 \text{ g/cm}^3$.

- Die im Labor zusammengesetzte Asphaltmischgut-Variante **AC 32 T S** wird aus Natursand für die Gesteinskörnung 0/2 und aus Kalkstein für die Gesteinskörnungsgemische 2/5, 5/22 und 22/32 hergestellt. Als Füller dient Kalksteinmehl.
- Die im Labor zusammengesetzte Asphaltmischgut-Variante **AC 22 B S** wird aus Gabbro Brechsand für die Gesteinskörnung 0/2 und aus Gabbro für die Gesteinskörnungsgemische 2/5, 5/8, 8/11, 11/16 und 16/22 hergestellt. Als Füller dient Kalksteinmehl.
- Die im Labor zusammengesetzten Asphaltmischgut-Varianten **AC 11 D S** und **SMA 11 S** werden aus Gabbro Brechsand für die Gesteinskörnung 0/2 und aus Gabbro für die Gesteinskörnungsgemische 2/5, 5/8 und 8/11 hergestellt. Als Füller dient Kalksteinmehl.

Die Aufbereitung aller Gesteine – mit Ausnahme des Füllers – beinhaltet Nasssiebung, Waschen sowie anschließende Trockensiebung zur Auftrennung der entsprechenden Kornklassen.

3.2.2 Bitumen

Es kommen 3 Bindemittelsorten für die Asphaltmischgut-Varianten 1 bis 4 zur Anwendung:

- **Mischgut-Variante 1 (AC 32 T S)**: Als frisches Bindemittel für alle Asphalttragschichtmischgut-Varianten (mit und ohne Asphaltgranulat) wird Straßenbaubitumen der Sorte **30/45** der Total Bitumen Deutschland GmbH eingesetzt.
- **Mischgut-Variante 2 (AC 22 B S)**: Als frisches Bindemittel für alle Asphaltmischungen (mit und ohne Asphaltgranulat) wird Polymermodifiziertes Bitumen der Sorte **25/55-55 A** der BP Europa SE eingesetzt.
- **Mischgut-Variante 3 (SMA 11 S)**: Als frisches Bindemittel für alle Asphaltmischungen (mit und ohne Asphaltgranulat) wird Polymermodifiziertes Bitumen der Sorte **25/55-55 A** der Total Bitumen Deutschland GmbH eingesetzt.
- **Mischgut-Variante 4 (AC 11 D S)**: Als frisches Bindemittel für alle Asphaltdeckschichtmischungen der Sorte Asphaltbeton (mit und ohne Asphaltgranulat) wird Straßenbaubitumen der Sorte **50/70** der Total Bitumen Deutschland GmbH eingesetzt.

3.2.3 Asphaltgranulat

Es werden Asphaltgranulate aus drei Quellen eingesetzt. Grundsätzlich muss eine ausreichende Homogenität des Asphaltgranulats sichergestellt sein, um die definierten Sollvorgaben des Asphaltmischgutes bezüglich der Sieblinien bei allen herzustellenden Einzelmischungen einhalten zu können. Deshalb wird für alle berücksichtigten Asphaltgranulate im Labor eine Homogenisierung vorgenommen und diese gemäß den Technischen Lieferbedingungen für Asphaltgranulat, TL AG-StB 09 (FGSV, 2009d) durch die Bestimmung der Stückgrößenverteilung und Asphaltgranulat-Zusammensetzung klassifiziert.

Die Asphaltgranulate werden in ausreichender Menge ausgebreitet in der Halle des ISBS-Prüflabors bei Raumtemperatur trocken gelagert und durch mehrfaches Umsetzen homogenisiert. Die Entnahme von Proben erfolgt an verschiedenen Stellen der jeweiligen Halde.

Die Stückgrößenverteilungen der zu untersuchenden Asphaltgranulat-Varianten werden durch Siebung mit den nach TP Asphalt-StB, Teil 2 (FGSV, 2010a) vorgesehenen Analysesieben ermittelt. Es werden Korngrößenverteilung, Bindemittelgehalt und Rohdichte sowie am rückgewonnenen Bindemittel konventionelle und erweiterte Bindemittleigenschaften bestimmt.

Die Gleichmäßigkeit wird gemäß den technischen Vorgaben im Regelwerk anhand der ermittelten Spannweiten und Mittelwerte der Merkmalsgrößen Bindemittelgehalt, Erweichungspunkt Ring und Kugel, Füllergehalt, Sandgehalt und Kornanteil über 2 mm beurteilt und die Einzelwerte auf Normalverteilung beziehungsweise Homogenität überprüft.

Es werden die in Tabelle 3-1 spezifizierten Asphaltgranulat-Varianten 1 bis 3 für die Herstellung der Asphaltmischgut-Varianten (vgl. Tabelle 3-2) eingesetzt.

Tabelle 3-1: Zusammensetzung und Eigenschaften der Asphaltgranulat-Varianten

Merkmal		Einheit	AG 1 (AC 32 T S)	AG 2 (AC 22 B S)	AG 3 (SMA 11 S & AC 11 D S)
Korngrößenverteilung	NS/BS	≤ 0,063	11,1	13,1	14,5
		0,063 / 0,25	7,7	6,0	4,5
		0,25 / 1	20,8	13,8	10,1
		1 / 2	8,5	9,6	9,1
		2 / 5,6	16,0	20,1	30,9
		5,6 / 8	11,9	10,5	27,1
		8 / 11,2	13,7	11,8	3,2
		11,2 / 16	6,1	13,5	0,4
		16 / 22,4	4,3	1,6	-
		22,4 / 31,5	-	-	-
		31,5 / 42,5	-	-	-
Bindemittelgehalt		M.-%	5,1	5,8	6,21
Erweichungspunkt Ring & Kugel		° C	69,3	78,0	69,2

3.2.4 Rejuvenatoren (Verjüngungsmittel)

Es kommen 3 Rejuvenatoren (R 1, R 3 und R 8) für die Herstellung von Asphaltmischgut im Labor unter Verwendung von Asphaltgranulat zum Einsatz. Diese wurden auf Basis von rheologisch-physikalischen Untersuchungen und unter Berücksichtigung der Diskussionen im projektbetreuenden Ausschuss gewählt (vgl. Berichtsteil RUB). Die Aufgabe eines Rejuvenators ist es, die alterungsbedingte Versprödung des im Asphaltgranulat enthaltenen Bindemittels zu kompensieren.

3.3 Laborverfahren zur Herstellung von Asphaltmischgut unter Einsatz von Asphaltgranulat und Rejuvenatoren

Die Asphaltmischgutherstellung im Labor umfasst das Bereitstellen und Einwiegen der Gesteinskörnungen, des Bitumens, des Asphaltgranulates, des Rejuvenators sowie das Mischen der Baustoffkomponenten.

Die jeweilige Korngrößenverteilung der im Labor hergestellten Asphaltmischgut-Varianten entspricht den Kenndaten aus Tabelle 3-2.

Die Mischgutkomponenten werden ausschließlich mit dem Zweiwellen-Zwangsmischer im Maßstab 1:8 (ISBS Sonderanfertigung, sh. Kapitel 3.1) zu den jeweiligen Asphaltmischgut-Varianten vermengt. Eine Übersicht der hergestellten Asphaltmischgut-Varianten im Labor zeigt Tabelle 3-3.

Zusätzlich zu den im Labor hergestellten Asphaltmischgut-Varianten wurde eine Teststrecke unter Einsatz der Rejuvenatoren in Hamburg realisiert und dokumentiert (Bergedorfer Straße). Die großtechnisch hergestellten und in situ eingebauten Asphaltmischgut-Varianten der Sorte Splittmastixasphalt SMA 8 S sind ebenfalls in Tabelle 3-3 dargestellt (vgl. Abschnitt 4.7.1).

Tabelle 3-2: Zusammensetzung und Eigenschaften der berücksichtigten Asphaltmischgut-Varianten 1 bis 4 (Referenz)

Merkmal		Einheit	AC 32 T S	AC 22 B S	SMA 11 S	AC 11 D S
Korngrößenverteilung	≤ 0,063	M.-%	6,9	8,5	11,3	8,2
	0,063 / 0,25	M.-%	5,2	5,4	3,4	10,6
	0,25 / 1	M.-%	14,3	8,2	5,3	14,1
	1 / 2	M.-%	7,0	8,4	5,8	13,9
	2 / 5,6	M.-%	12,8	16,3	17,9	16,3
	5,6 / 8	M.-%	10,1	9,3	20,2	10,9
	8 / 11,2	M.-%	8,4	9,4	32,8	17,9
	11,2 / 16	M.-%	13,7	8,9	3,3	7,7
	16 / 22,4	M.-%	7,2	21,5	-	0,4
	22,4 / 31,5	M.-%	12,6	4,2	-	-
	31,5 / 42,5	M.-%	1,6	-	-	-
	Summe		100	100	100	100
Asphaltgranulat	M.-%	-	-	-	-	
Zielbindemittelsorte	-	30/45	25/55-55	25/55-55	50/70	
Rejuvenator	-	-	-	-	-	
Gesteinsart	-	Kalkstein	Gabbro	Gabbro	Gabbro	
Frischbindemittelsorte	-	30/45	25/55-55	25/55-55	50/70	
Bindemittelgehalt	M.-%	4,2	4,2	6,6	6,0	
Rohdichte	g/cm ³	2,537	2,704	2,649	2,678	
Raumdichte	g/cm ³	2,451	2,615	2,581	2,605	
Hohlraumgehalt	V.-%	5,0	3,5	2,5	2,5	
Erweichungspunkt Ring & Kugel	° C	61,2	59,2	64,8	53,8	

Tabelle 3-3: Asphaltmischgut-Varianten im Überblick

Mischgut-Variante	Asphaltgranulat-Variante	Rejuvenator	Zugabeanteil AG [M.-%]	Variante
1) AC 32 T S	-	-	-	V1
	AG 1	R 8	50	V2
			80	V3
		R 3	50	V4
			80	V5
		R 1	50	V6
			80	V7
2) AC 22 B S	-	-	-	V8
	AG 2	R 8	40	V9
			60	V10
		R 3	40	V11
			60	V12
		R 1	40	V13
			60	V14
3) SMA 11 S	-	-	-	V15
	AG 3	R 8	20	V16
			40	V17
		R 3	20	V18
			40	V19
		R 1	20	V20
			40	V21
4) AC 11 D S	-	-	-	V22
	AG 3	R 8	20	V23
			40	V24
		R 3	20	V25
			40	V26
		R 1	20	V27
			40	V28
		großtechnisch hergestellte Asphaltmischgut-Varianten		
SMA 8 S	AG 4	-	-	V30
		R 8	50	V31
		R 3		V32
		R 1		V33

3.3.1 Mischtemperaturen für die Asphaltmischgut-Varianten

Die Mischtemperatur des Asphaltmischgutes wird in Abhängigkeit der Viskosität des eingesetzten Bitumen gemäß TP Asphalt-StB, Teil 35 „Asphaltmischgutherstellung im Laboratorium“ (FGSV, 2007b) gewählt. Beispielsweise soll für Straßenbaubitumen 30/45 die Referenztemperatur von 175 °C nicht unterschritten werden, wobei beim Mischen von Walzasphalt die Referenztemperatur um maximal 20 K überschritten werden kann. Die gewählten Mischtemperaturen in Abhängigkeit von der vorgesehenen Bindemittelart und -sorte für die Asphaltmischgut-Varianten 1 bis 4 sind in Tabelle 3-4 dargestellt.

Tabelle 3-4: Mischtemperatur der Asphaltmischgut-Varianten 1 bis 4 in Abhängigkeit von der vorgesehenen Bindemittelart und -sorte in Anlehnung an FGSV (2007b)

Asphaltmischgut-Variante	Bindemittel	Mischtemperatur [°C]
1 (AC 32 T S)	Straßenbaubitumen 30/45	180
2 (AC 22 B S)	Polymermodifiziertes Bitumen 25/55-55	160
3 (SMA 11 S)	Polymermodifiziertes Bitumen 25/55-55	160
4 (AC 11 D S)	Straßenbaubitumen 50/70	160

3.3.2 Erwärmung des Asphaltgranulats

Die Erwärmung des Asphaltgranulats (AG) bei der Asphaltmischgut-Variante 1 (AC 32 T S) erfolgt entgegen den Empfehlungen der TP Asphalt-StB, Teil 35 „Asphaltmischgutherstellung im Laboratorium“ (FGSV, 2007b) aufgrund der angestrebten Zugabeanteilen von bis zu 80 M.-% Asphaltgranulat. In den Technischen Prüfvorschriften wird eine Temperierung des Asphaltgranulats von 110 °C über eine Zeitdauer von maximal 5 Stunden empfohlen.

Eine Abweichung zu dieser Empfehlung ist begründet in der definierten Vorgehensweise für die Temperierung der frischen Gesteinskörnungen bei hohen Zugabeanteilen an Asphaltgranulat (TP Asphalt-StB, Teil 35):

„Wenn höhere Asphaltgranulatanteile verwertet werden sollen, ist die Erwärmungstemperatur für die Gesteinskörnungen und den Füller so zu wählen, dass die im Abschnitt 4.1 - der Technischen Prüfvorschrift - genannten Mischtemperaturen erreicht werden.“

Bei Umsetzung dieser Vorgehensweise würden die in Tabelle 3-5 dargestellten theoretischen Temperaturen der frischen Gesteinskörnungen zum Erreichen der angestrebten Mischtemperatur resultieren.

Tabelle 3-5: Theoretische Temperaturen der frischen Gesteinskörnungen beim Mischprozess in Abhängigkeit vom Zugabeanteil des Asphaltgranulats (AG) bei Warmzugabe für Mischgut-Variante 1 (AC 32 T S)

Mischtemperatur [°C] AC 32 T S	Anteil AG	T _{Gestein} [°C] Warmzugabe AG @ 110 °C
180	50 M.-%	280
	80 M.-%	450

Handelsübliche Wärmekammern mit Luftumwälzung nach DIN 500011-12 weisen im Regelfall eine technische Höchsttemperatur von 300 °C auf. Dies kann dazu führen, dass bei hohen Zugabeanteilen an Asphaltgranulat eine erforderliche Temperatur der frischen Gesteinskörnungen größer 300 °C zum Erreichen der angestrebten Mischtemperatur nicht erzielt werden kann.

Aufgrund dieser Randbedingungen wird folgendes Vorgehen gewählt. Die Erwärmung des Asphaltgranulats wird für die Asphaltmischgut-Variante 1 (AC 32 T S) für eine Zeitdauer von 4 Stunden bei der angestrebten Mischtemperatur von 180°C durchgeführt. Für die Mischgutvarianten 2 bis 4 wird gemäß den Empfehlungen der Technischen Prüfvorschriften vorgegangen.

3.3.3 Herstellung von Asphaltmischgut im Labor unter Verwendung von Rejuvenatoren

Das Laborverfahren zur Herstellung von Asphaltmischgut wird nachfolgend am Beispiel der Asphalttragschichtmischgut-Variante AC 32 T S erläutert:

Zunächst werden die frischen Gesteinskörnungen, mit der größten Kornklasse beginnend, in folgender Reihenfolge eingewogen und erwärmt:

- Körnung 22/32,
- Körnung 11/22,
- Körnung 8/11,
- Körnung 5/8,
- Natursand,
- Gesteine der Körnung 2/5 und
- Füller.

Anschließend wird das temperierte Bitumen bereitgestellt.

Der Ablauf der Mischgutherstellung ist wie folgt:

- Einfüllen des Asphaltgranulates und Mischen,
- Zugabe des Rejuvenators und Mischen für die Dauer von 30 s zur Homogenisierung,
- Einfüllen der heißen Gesteinskörnungen in den Labormischer,
- Zugabe des Füllers,
- Mischen für eine Dauer von 20 s,
- Zugabe des heißen, frischen Bitumens bzw. Bindemittels und Starten der Nachmischzeit von 180 s.

Die Mischgutherstellung für die Mischgutvarianten AC 22 B S und AC 11 D S erfolgt analog. Der Ablauf der Mischgutherstellung der Mischgutvariante SMA 11 S wird abgeändert und wie folgt durchgeführt.

- Einfüllen der heißen Gesteinskörnungen in den Labormischer,
- Einfüllen des Bindemittelträgers und Mischen für die Dauer von 30 s zur Homogenisierung,
- Einfüllen des Asphaltgranulates und Mischen,
- Zugabe des Rejuvenators und Mischen für die Dauer von 30 s zur Homogenisierung,
- Zugabe des Füllers,
- Mischen für eine Dauer von 20 s,
- Zugabe des heißen, frischen Bitumens bzw. Bindemittels und Starten der Nachmischzeit von 180 s.

Hintergrund dieser Abweichung ist die homogene Verteilung des Bindemittelträgers im Asphaltmischgut, die ausschließlich bei Abwesenheit eines Bindemittels aufgrund von Materialanhäufung durch Verkleben im Mischtrog gewährleistet ist.

3.3.4 Zweiwellen-Zwangsmischer (ZZM)

Beim Zweiwellen-Zwangsmischer sind Mischtrog und Mischwerkzeug im Maßstab 1:8 eines Asphaltmischwerkes nachgebildet. Die Mischkinematik entspricht in etwa der einer konventionellen Mischanlage und liefert so eine praxisadäquate Vermischung der Ausgangskomponenten (Renken und Lobach, 2006).

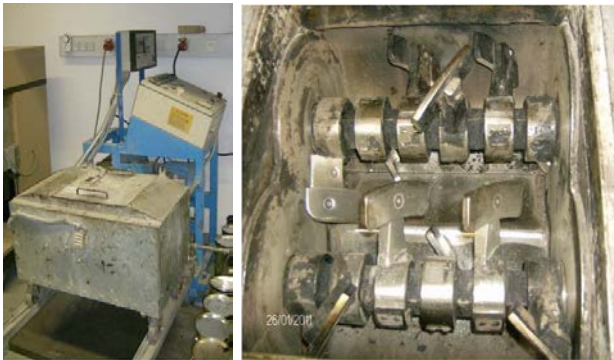


Abbildung 3-1: Zweiwellen-Zwangsmischer mit Mischtrog (Fotos: ISBS).

Abbildung 3-1 zeigt den ZZM-Labormischer sowie den Mischtrog mit Mischwerkzeug. Die beiden Wellen (Abbildung 3-1, rechts) rotieren gegenläufig im Mischtrog und lassen so eine „Asphaltwolke“ über sich entstehen. Durch die horizontal liegenden gegenläufig rotierenden Wellen mit ihren senkrecht stehenden Schaufeln ist bei diesem Mischer-Typ eine Zwangsvermischung gegeben. Zudem ist die Rotationsgeschwindigkeit deutlich höher im Vergleich zu anderen häufig verwendeten Labormischern. Im Zwei-Wellen-Zwangsmischer können Mengen von 16 kg bis maximal 40 kg in einer Charge gemischt werden.

3.3.5 Walzsektor-Verdichtung zur Herstellung von Asphalt-Probeplatten

Für die Prüfung der Asphalttragschicht-Varianten der Sorten AC 32 T S, AC 22 B S, AC 11 D S und SMA 11 S werden nach dem Herstellen der Asphaltgemische Asphalt-Probeplatten hergestellt.

Die Herstellung der 320 x 200 mm² großen Asphalt-Probeplatten erfolgt in Anlehnung an die Technischen Prüfvorschriften für Asphalt im Straßenbau TP Asphalt-StB, Teil 33: „Verfahren zur Herstellung von Asphalt-Probeplatten im Laboratorium“ (FGSV, 2007a).

Die Dicke der Asphalt-Probeplatten richtet sich nach dem Größtkorn des herzustellenden Mischgutes sowie nach den Mindestanforderungen der Technischen Prüfvorschriften TP Asphalt, Teil 25 B 1, der DIN EN 12697-46 und der AL Sp-Asphalt 09. Gewählt werden Asphalt-Probeplatten mit einer Höhe von 40 mm (AC 11 D S; SMA 11 S), 60 mm (AC 22 B S) und 90 mm (AC 32 T S).

Das Walzsektor-Verdichtungsgerät besteht aus einer Verdichtungsform mit Einfüllaufsatz und einem sektorförmigen Verdichtungskörper (in der Folge als Walzsektor bezeichnet). Die Verdichtung erfolgt durch eine wiegeartige Bewegung des auf den Kreismittelpunkt fixierten Walzsektors auf der Probenplattenoberfläche, verursacht durch eine translatorische Bewegung der Verdichtungsform. Das Funktionsprinzip des Walzsektor-Verdichtungsgerätes kann Abbildung 3-2 entnommen werden.

Die für die Herstellung der Asphalt-Probeplatten erforderliche Mischgutmenge berechnet sich aus der angestrebten Dicke der Asphalt-Probeplatten, der Grundfläche der Verdichtungsform und der angestrebten Raumdichte des verdichteten Asphaltes.

Durch die herstellungsbedingten Unterschiede der Asphaltmischgutvarianten – u. a. die Verwendung variierender Zugabeanteile an Asphaltgranulat – können sich Ungleichheiten bezüglich des Dichteniveaus und der mechanischen Eigenschaften der aus dem Mischgut hergestellten Asphalt-Probeplatten ergeben.

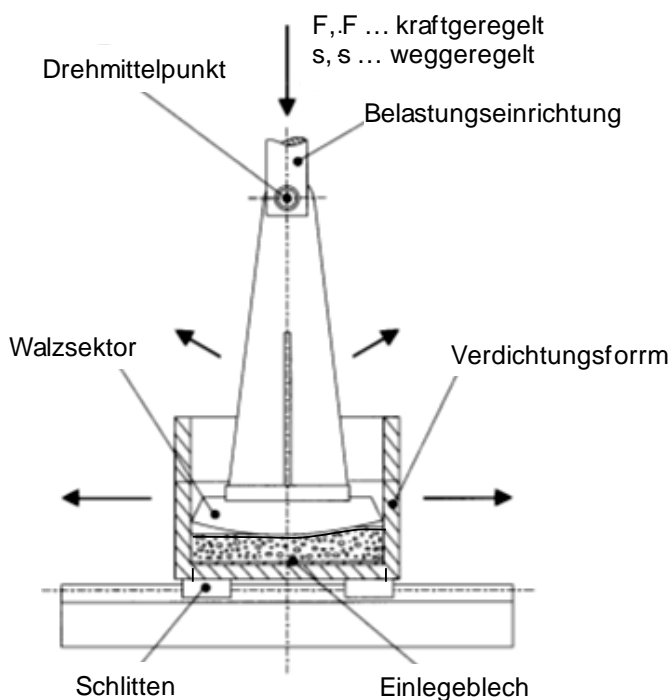


Abbildung 3-2: Walzsektor-Verdichtungsgerät (FGSV, 2007a).

Zunächst wird das zu verdichtende Asphaltmischgut auf die Verdichtungstemperatur temperiert und anschließend gleichmäßig auf das Einlegeblech in die auf 80 °C vorgeheizte, rechteckige Verdichtungsform gelegt. Die Verdichtungsform befindet sich auf einem spurgeführten, horizontal beweglichen Schlitten. Anschließend wird der ebenfalls beheizte Walzsektor abgesenkt. Daraus resultiert eine Druckspannung zwischen dem Sektor und dem zu verdichtenden Mischgut. Zeitgleich wird die Verdichtungsform horizontal entsprechend Abbildung 3-2 bewegt. Der dabei mitgeführte Walzsektor wird während des Vorgangs um seinen Drehmittelpunkt ausgelenkt und erzeugt eine Walzbewegung auf der Oberseite der Mischgutprobe.

Für die Herstellung von Asphalt-Probepplatten mit praxisadäquaten Eigenschaften ist ein Verdichtungsregime definiert, das die Verdichtungsabläufe in situ möglichst praxisnah simuliert. Der Verdichtungsprozess gliedert sich in zwei Verdichtungsstadien. Während der *Vorverdichtung* wird die Verdichtungsarbeit der schwimmenden (Hochverdichtungs-) Einbaubohle des Straßenfertigers nachgestellt. Dazu wird der Walzsektor mit einer Geschwindigkeit von 0,5 mm je Übergang weggeregelt abgesenkt, bis auf der Asphalt-Probepplatte eine Last von 2,6 kN erreicht wird. Die dabei erreichte Plattenhöhe wird für weitere fünf Übergänge konstant gehalten. Danach wird der Walzsektor hochgefahren (0,5 mm / Übergang), bis die Platte vollständig entlastet ist. Mittels der *Hauptverdichtung* wird der Verdichtungsprozess der in situ eingesetzten Glattmantelwalzen simuliert. Zunächst werden zur Glättung der Oberfläche 15 Übergänge bei konstanter Last von 0,52 kN aufgebracht. Danach wird die Linienlast kraftgeregelt in 15 Stufen bis zu Erreichen einer Maximalkraft von 19,5 kN gesteigert. Die Entlastung erfolgt in weiteren 15 gleichen Laststufen. In Abbildung 3-3 sind der Verlauf der zur Verdichtung aufgebrauchten Kraft sowie die dabei erreichte Plattenhöhe während dieser Verdichtungsstadien schematisch dargestellt.

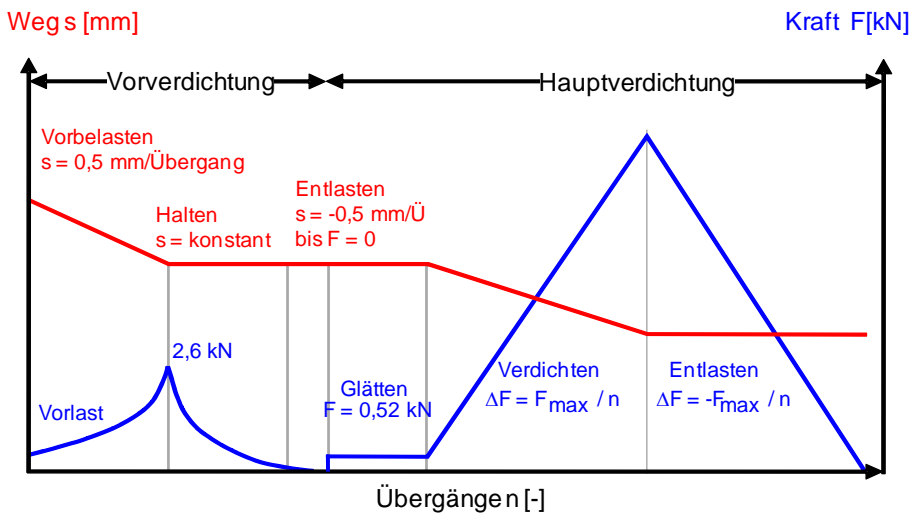


Abbildung 3-3: Plattenhöhe und aufgebrachte Kraft je cm Plattenbreite während der Verdichtung im Walzsektor-Verdichtungsgerätes: weggeregelte Vorverdringung, kraftgeregelte Hauptverdringung (Ringleb, 2012).

Erfahrungsgemäß werden Verdichtungsgrade zwischen 99 % und 101 % – bezogen auf die Dichte des Marshall-Probekörpers – erreicht. Mit der kraftgeregelten Hauptverdringung werden übermäßige Beanspruchungen der Korn-zu-Korn-Kontaktflächen und so unzulässige Kornzertrümmerungen vermieden.

3.4 Performance-Prüfungen zur Ansprache der Asphalteeigenschaften

Für die Beurteilung der Einflüsse der Rejuvenatoren in Abhängigkeit des Zugabeanteils von Asphaltgranulat sowie deren Varianten (AG 1 bis AG 3) werden die Verformungs-, Kälte- sowie Steifigkeits- und Ermüdungseigenschaften im Labor prüftechnisch angesprochen. Die eingesetzten Prüfverfahren sind nachfolgend beschrieben.

3.4.1 Verformungswiderstand

Zur Beurteilung des Verformungswiderstandes der Asphaltmischgut-Varianten wird der Einaxiale Druck-Schwellversuch eingesetzt. Für den einaxialen Druck-Schwellversuch gemäß TP Asphalt-StB, Teil 25 B 1 (FGSV, 2012) werden Asphaltprobekörper gemäß TP Asphalt-StB, Teil 30 (FGSV, 2007) hergestellt, die Raumdichte gemäß TP Asphalt-StB, Teil 6 (FGSV, 2010c) bestimmt und anschließend bei Raumtemperatur bis zur Massenkonzanz gelagert.

Beim Einaxialen Druck-Schwellversuch wird ein zylindrischer Asphaltprobekörper (Durchmesser $\varnothing = 100 \pm 5 \text{ mm}$) mit einem Druckstempel zyklisch belastet, dessen Außendurchmesser eine minimale Größe von $\varnothing = 110 \text{ mm}$ aufweist. Der Lastimpuls wird sinusförmig mit Lastpausen gewählt (Abbildung 3-4). Ein Belastungszyklus besteht somit aus Lastimpuls und Lastpause.

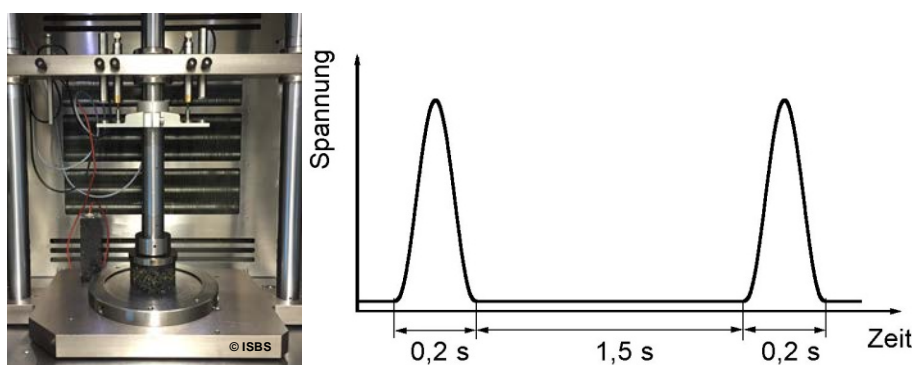


Abbildung 3-4: Einaxialer Druck-Schwellversuch: Prüfvorrichtung (links) und Lastimpuls (rechts); (FGSV, 2012).

Während der Prüfung akkumulieren sich bleibende Verformungen (Abbildung 3-5), wodurch es zu einer Verringerung der Probekörperhöhe kommt.

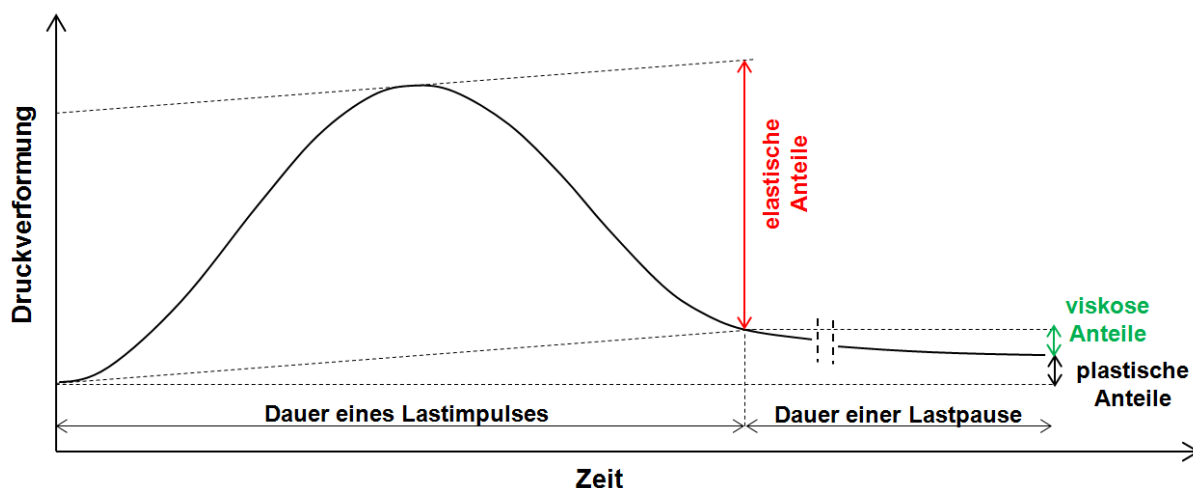


Abbildung 3-5: Verformungsanteile bei einem Lastzyklus im Einaxialen Druck-Schwellversuch, schematisch (Wistuba und Isailovic, 2014).

Für jeden Lastzyklus kann die Verformung (Dehnung) nach folgender Gleichung berechnet werden.

$$\epsilon_n = \frac{h_0 - h_{ni}}{h_0} \cdot 1000 \text{ [‰]} \quad \text{Gleichung 3-1}$$

mit:

ϵ_n Dehnung nach n Belastungszyklen [‰],
 h_0 Höhe des Probekörpers am Anfang der Prüfung [mm],
 h_n Höhe des Probekörpers nach n Belastungszyklen [mm].

Die akkumulierten axialen plastischen Dehnungen als Funktion der Anzahl an Belastungszyklen bilden die Kriechkurve. Die Kriechkurve wird mittels Methode der kleinsten Quadrate durch folgende Funktion beschrieben:

$$\epsilon_{pd,n} = b \cdot n^a \text{ [‰]} \quad \text{Gleichung 3-2}$$

mit:

$\varepsilon_{pd,n}$ plastische Druckdehnung nach n Belastungszyklen [%],
 a, b Regressionsparameter [-],
 n Anzahl an erfolgten Belastungszyklen.

Der Anstieg der Kriechkurve (erste Ableitung) ergibt die Dehnungsrate (Kriechrate). Dieser Wert wird zusammen mit der zugehörigen plastischen Druckdehnung und der Anzahl der Belastungszyklen an einem bestimmten Punkt als ein Maß für die Beständigkeit des Mischgutes gegen bleibende Verformung verwendet:

$$\varepsilon_{pd,n} = a + b \cdot n^k + c \cdot (e^{dn} - 1) \quad [\%] \quad \text{Gleichung 3-3}$$

mit:

$\varepsilon_{pd,n}$ plastische Druckdehnung nach n Belastungszyklen [%],
 a,b,c,d,k Regressionsparameter [-],
 n Anzahl an erfolgten Belastungszyklen.

Typische Kriechkurven für Walzasphalte zeigen Abbildung 3-6 (ohne Wendepunkt) und Abbildung 3-7 (mit Wendepunkt). Jede Kriechkurve weist zumindest 2 Phasen auf. In Phase I nimmt die Krümmung der Kriechkurve stark ab, Phase II zeigt einen quasilinearen Kurvenverlauf. Für den Fall, dass es zu keiner Stabilisierung der plastischen Druckverformung kommt, ändert die Krümmung der Kriechkurve im Wendepunkt ihr Vorzeichen und es bildet sich eine Phase III mit einem progressiven Anstieg der plastischen Verformungen. Der Wendepunkt ist definiert als jener Punkt der Kriechkurve, in dem die Dehnungsrate den niedrigsten Wert aufweist.

Üblicherweise kann bei Asphalten mit ausreichend hohem Verformungswiderstand keine Phase III beobachtet werden. Daher wird in der Prüfvorschrift gemäß Regelwerk (TP Asphalt-StB) kein Wendepunkt in der Kriechkurve berücksichtigt.

Im Fall A (kein Wendepunkt; vgl. Abbildung 3-6) wird der Anstieg der Kriechkurve im quasilinearen Bereich zum Versuchsende als Dehnungsrate $f_{c,Ende}$ angegeben. Die zugehörige plastische Druckdehnung am Ende der Prüfung wird als charakteristischer Wert ε_{Ende} angegeben.

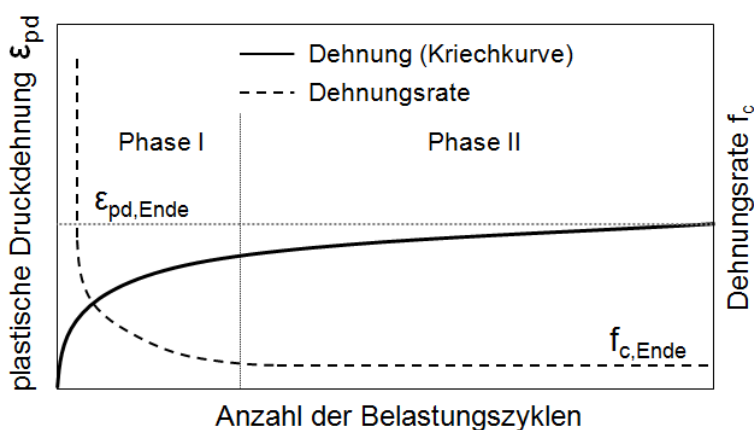


Abbildung 3-6: Verlauf der Kriechkurve und der Dehnungsrate beim Einaxialen Druck-Schwellversuch ohne Wendepunkt (Fall A); (FGSV, 2012).

Im Fall B (Wendepunkt) werden die plastische Druckdehnung $\varepsilon_{pd,w}$ im Wendepunkt angegeben, die Anzahl der erfolgten Belastungszyklen n_w bis zum Wendepunkt und die Dehnungsrate $f_{c,w}$ im Wendepunkt.

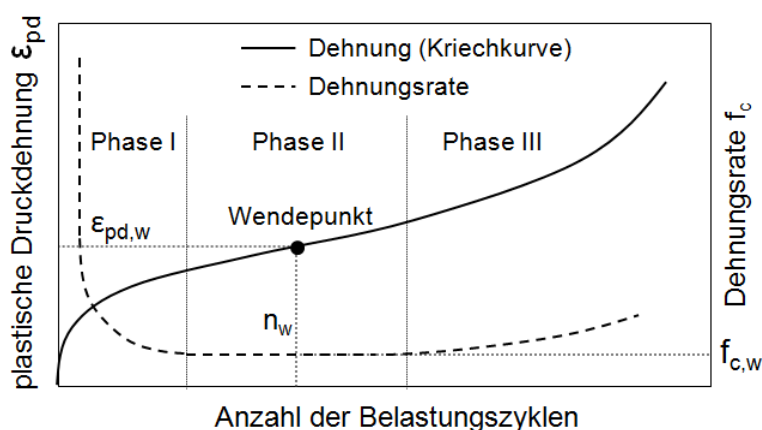


Abbildung 3-7: Verlauf der Kriechkurve und der Dehnungsrate beim Einaxialen Druck-Schwellversuch mit Wendepunkt (Fall B); (FGSV, 2012).

Prüfergebnis des Einaxialen Druck-Schwellversuchs ist die bleibende axiale Druckdehnung zusammen mit der Dehnungsrate jeweils am Versuchsende (spätestens nach 10.000 Lastwechseln) bzw. im Wendepunkt der Kriechkurve.

3.4.2 Widerstand gegen Kälterissbildung

Zur Ansprache der Asphalteigenschaften bei tiefen Temperaturen (Rissresistenz) werden der Einaxiale Zugversuch und der Abkühlversuch nach der Technischen Prüfvorschrift TP Asphalt-StB, Teil 46 A (FGSV, 2013) durchgeführt.

Dazu werden prismatische Probekörper in Abhängigkeit vom eingesetzten Größtkorn der Asphaltmischgut-Varianten aus den Asphalt-Probepplatten (siehe Kapitel 3.3.5) gesägt.

3.4.2.1 Abkühlversuch

Zur Ermittlung der bei tiefen Temperaturen durch behinderte thermische Dehnung auftretenden kryogenen Zugspannungen werden Abkühlversuche gemäß TP Asphalt, Teil 46 (FGSV, 2013) durchgeführt.

Dabei wird ein (an Adapter geklebter) prismatischer Probekörper der Länge nach in die Prüfeinrichtung bei 20 °C eingespannt und einer vorgegebenen Abkühlrate von $\dot{T} = 10 \text{ K/h}$ ausgesetzt. Während des Abkühlvorgangs wird die Probekörperlänge konstant gehalten. Durch die Messung der Probekörperlänge über induktive Wegaufnehmer, die sich außerhalb der Prü fzelle befinden, kann die unvermeidliche Temperaturdehnung des Prü frahmens vom Schrittmotor ausgeglichen werden.

Durch den behinderten thermischen Schrumpf werden im Probekörper kryogene Zugspannungen hervorgerufen. Erreichen die kryogenen Spannungen die Zugfestigkeit des Probekörpers, kommt es zum Bruch. Als Ergebnis der Prüfung werden die kryogenen Zugspannungen in Abhängigkeit von der Temperatur $\sigma_{\text{cry}}(T)$ sowie die erreichte Bruchtemperatur T_{Br} und die Bruchspannung σ_{Br} ausgegeben.

3.4.2.2 Kältezugsversuch

Zur Ermittlung der Einaxialen Zugfestigkeit von Asphalt werden weggeregelte Zugversuche gemäß TP Asphalt, Teil 46 bei vier verschiedenen Temperaturen ($T = -25^\circ\text{C}$, -10°C , $+5^\circ\text{C}$, $+20^\circ\text{C}$) bei einer 3-fachen Versuchsbelegung durchgeführt. Der in die Prüfeinrichtung eingespannte Probekörper wird während der Temperierphase spannungsfrei auf die

Prüf­temperatur gebracht. Nach der Temperierphase wird er mit einer Verformungs­geschwindigkeit von $\dot{s} = 1 \text{ mm/min}$ bis zum Erreichen der Zugfestigkeit auseinander gezogen. Die Zugfestigkeit ist die bei Eintritt des Bruches erreichte Spannung oder – wenn bei hohen Prüf­temperaturen kein Bruch auftritt – die maximal erreichte Zugspannung. Als Versuchsergebnis wird die bei der Prüf­temperatur erreichte Zugfestigkeit $\beta_z(T)$ angegeben.

3.4.2.3 Zugfestigkeitsreserve

Die Zugfestigkeiten werden über die jeweilige Prüf­temperatur aufgetragen. Zur Abschätzung der Zugfestigkeit bei nicht geprüften Temperaturen werden die Messpunkte mit einem kubischen Spline verbunden. Die Differenz der Zugfestigkeit und der in den Abkühlversuchen ermittelten kryogenen Spannung ergibt zu jeder Temperatur die Zugfestigkeitsreserve $\Delta\beta_z(T)$ (vgl. Gleichung 3-4). Sie ist ein theoretisches Maß für die mechanogene Spannung, die der Probekörper zusätzlich zu der kryogenen Spannung schadlos ertragen kann (Arand et al., 1984). Die Temperatur $T(\Delta\beta_{z,t,\max})$, bei der die Zugfestigkeitsreserve ihr Maximum aufweist, ist eine Kenngröße, die zur Einschätzung und zum Vergleich der Kälteempfindlichkeit des Asphaltes herangezogen wird.

$$\Delta\beta_z(T) = \beta_z(T) - \sigma_{\text{cry}}(T)$$

Gleichung 3-4

Abbildung 3-8 gibt das Prinzip zur Ermittlung der Zugfestigkeitsreserve aus den Versuchskurven des Zugversuchs und des Abkühlversuchs in einem Temperatur-Spannungs-Diagramm wieder.

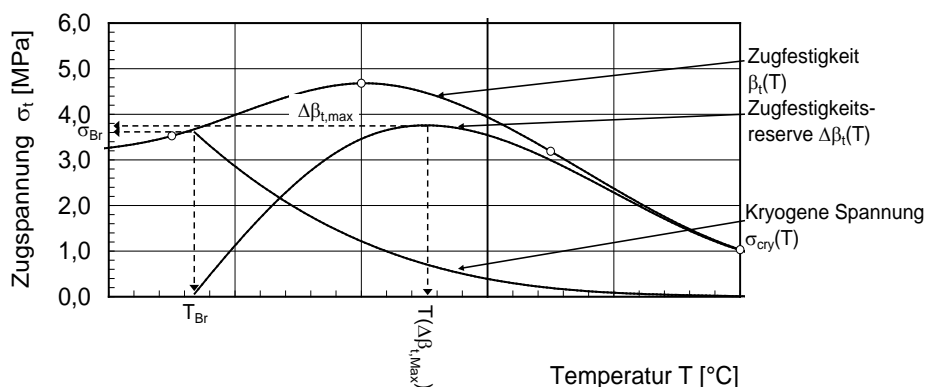


Abbildung 3-8: Prinzip zur Bewertung der Zugfestigkeitsreserve aus den Versuchskurven des Zugversuchs und des Abkühlversuchs in einem Temperatur-Spannungs-Diagramm (Arand et al., 1984).

3.4.3 Ermüdungswiderstand

Zur Ansprache des Ermüdungswiderstandes von Asphalt werden Spaltzug-Schwellversuche gemäß der „Arbeitsanleitung zur Bestimmung des Steifigkeits- und Ermüdungsverhaltens von Asphalten mit dem Spaltzug-Schwellversuch als Eingangsgröße in die Dimensionierung von Asphaltbefestigungen“, AL Sp-Asphalt 09 (FGSV, 2009a) durchgeführt.

Im Spaltzug-Schwellversuch wird ein auf der Mantelfläche liegender zylindrischer Probekörper über Lasteinleitungstreifen mit einer sinusförmig schwellenden Druckkraft kraft­ geregelt belastet. Dadurch wird in Probekörpermitte eine horizontal wirkende Zugspannung σ_{SZ} erzeugt. Die Prüf­temperatur wird konstant mit $T = 20 \text{ °C}$ gewählt. Das Belastungs­schema des Spaltzug-Schwellversuchs ist in Abbildung 3-9 (Mitte) dargestellt. Die

Unterspannung wird zur Lagesicherung des Probekörpers einheitlich mit 0,035 MPa festgelegt, die Oberspannung ist durch Vorversuche zu ermitteln.

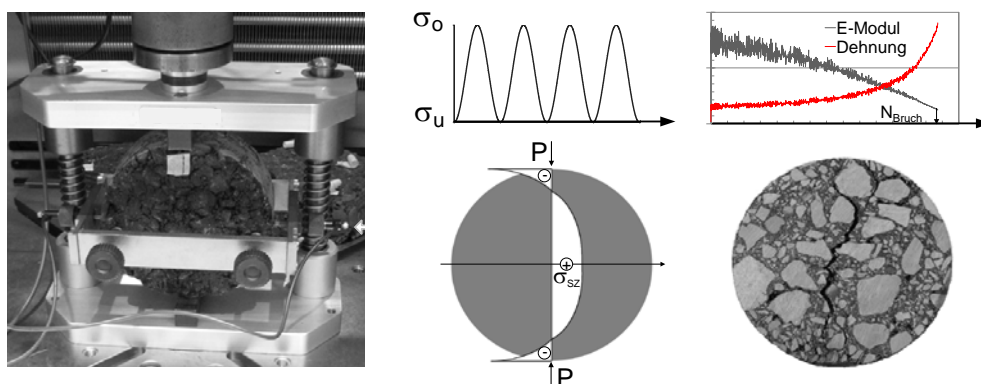


Abbildung 3-9: Spaltzug-Schwellversuch: Prüfeinsatz (links), Prinzipskizze (Mitte) und Bruchbild nach Versuchsende (rechts); (Walther, 2014).

Das definierte Ermüdungskriterium basiert auf dem Verlauf der dissipierten Energie nach Van Dijk (1975) bzw. Hopman et al. (1989); siehe auch Rowe (1993). Die „Energy Ratio“ (Energierate) ER ist das Verhältnis aus der am Versuchsanfang je Lastwechsel dissipierten Energie W_0 und der dissipierten Energie W_n bei einem beliebigen Lastwechsel N (Gleichung 3-5). Durch die Annahme einer während des Versuchs konstanten Phasenverschiebung zwischen Spannungs- und Dehnungssignal verhält sich die ER näherungsweise proportional zum Produkt aus der Lastwechselzahl N und dem zu diesem Zeitpunkt vorliegenden absoluten E-Modul $|E|_n$ (Gleichung 3-6):

$$ER(n) = \frac{n \cdot W_0}{W_n} = \frac{n \cdot (\pi \cdot \sigma_0 \cdot \varepsilon_0 \cdot \sin \varphi_0)}{\pi \cdot \sigma_n \cdot \varepsilon_n \cdot \sin \varphi_n} \quad \text{Gleichung 3-5}$$

$$ER(n) \sim N \cdot |E|_n \quad \text{Gleichung 3-6}$$

In Abbildung 3-10 ist der Verlauf der ER als Funktion der Lastwechselzahl dargestellt. Die Lastwechselzahl, bei der ER einen Maximalwert erreicht und der Probekörper als ermüdet gilt, ist als Lastwechselzahl N_{Makro} definiert. Nach der zugrunde liegenden Schädigungstheorie vereinen sich zu diesem Zeitpunkt Mikrorisse zu einem ersten Makroriss, der in unmittelbarer Folge zum Bruch des Probekörpers führt.

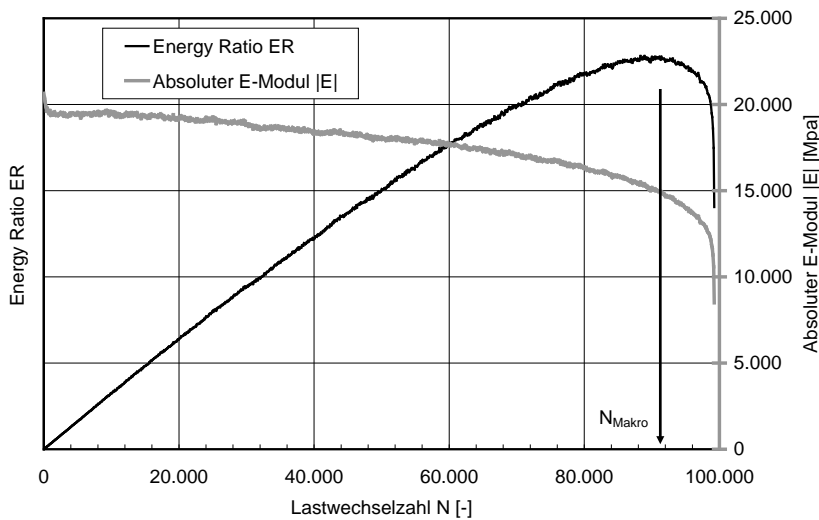


Abbildung 3-10: Ermittlung der bis zum Makroriss ertragbaren Lastwechselzahl N_{Makro} anhand der Energy Ratio ER (Konzept nach Rowe, 1993).

Folgende Ergebnisse des Spaltzug-Schwellversuchs werden ausgewertet und dokumentiert:

- die jeweils beim 100. Lastwechsel gemessene elastische Anfangsdehnung $\varepsilon_{\text{el,anf}}$,
- der Steifigkeitsmodul nach dem 100. Lastwechsel, repräsentiert durch $|E|_{100}$,
- die bis zum Makroriss ertragene Lastwechselzahl N_{Makro} .

Die anhand von 9 Einzelversuchen (3-fach Variation der Oberspannung; 3-fach belegt) ermittelten Lastwechselzahlen werden in einem $N_{\text{Makro}} - \varepsilon_{\text{el,anf}}$ -Diagramm aufgetragen und die Ermüdungsfunktion mittels Regression bestimmt (vgl. Abbildung 3-11).

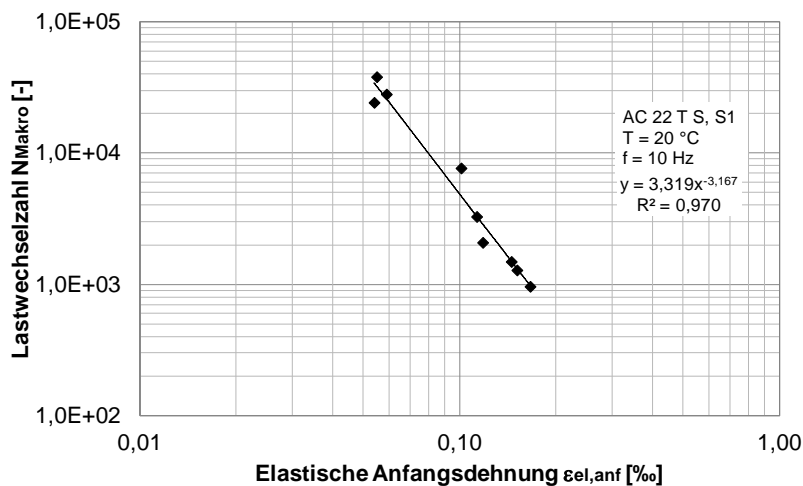


Abbildung 3-11: Beispiel für die Ableitung der Ermüdungsfunktion aus dem Spaltzug-Schwellversuch für ein Asphalttragschichtmischgut AC 22 T S.

Das Ergebnis bildet das materialspezifische Ermüdungsgesetz (Gleichung 3-7).

$$N_{\text{Makro}} = C_1 \cdot \varepsilon_{\text{el,anf}}^{C_2}$$

Gleichung 3-7

Gemäß AI Sp-Asphalt 09 sind folgende Bestimmtheitsmaße der Regressionen in Abhängigkeit der Asphaltmischgutart einzuhalten (Tabelle 3-6).

Tabelle 3-6: Mindestanforderungen für das Bestimmtheitsmaß R^2 der Ermüdungsfunktionen (AL Sp-Asphalt 09)

Material	Bestimmtheitsmaß [%]
Asphaltdeckschicht	$R^2 > 90$
Asphaltbinderschicht	$R^2 > 90$
Asphalttragschicht	$R^2 > 80$

3.4.4 Steifigkeit von Asphalt

Die dimensionierungsrelevanten Steifigkeitsmoduln der Asphaltsschichten (Betrag des komplexen dynamischen E-Moduls) werden gemäß RDO Asphalt 09 (FGSV, 2009c) vorzugsweise aus Ergebnissen des Spaltzug-Schwellversuchs abgeleitet. Im Ausnahmefall darf richtliniengemäß eine Berechnung mittels des Verfahrens nach Francken und Verstraeten (1974) aus den kompositionellen Asphalteigenschaften erfolgen.

Die Ansprache des Steifigkeitsverhaltens von Asphalt erfolgt i. a. mit Hilfe von zyklischen Laborprüfungen. Üblicherweise wird als Belastungsform eine Sinusschwingung gewählt, deren Amplitude und Frequenz variiert wird. Sie gibt annähernd den realen Belastungsimpuls nach einer Fahrzeugüberfahrt wieder (sh. Wistuba und Perret, 2004).

Grundsätzlich unterscheidet man *homogene Verfahren* mit einem homogenen Spannungs-Dehnungs-Zustand im Messbereich und *inhomogene Verfahren*, bei denen die Spannungs-Dehnungs-Beziehungen von einem Punkt des Probekörpers zum nächsten variieren. Zu den homogenen Verfahren zählen einaxiale Belastungsprüfungen an schlanken Probekörpern und Scherprüfungen. Biege- und indirekte Zugprüfungen sind den inhomogenen Verfahren zuzuordnen (Di Benedetto et al., 2001).

Die Ableitung von Steifigkeitsmoduln von Asphalt mit Hilfe inhomogener Verfahren wie dem Spaltzug-Schwellversuch ist zulässig, solange lineares visko-elastisches Materialverhalten angenommen werden kann. Die Ableitung des Steifigkeitsmoduls von Asphalt mit Hilfe zyklischer Laborprüfungen begründet sich auf folgenden theoretischen Überlegungen (vgl. Wistuba et al., 2009).

Bei einem linear visko-elastischen Material führt eine sinusförmige Erregung (mit der Kreisfrequenz ω bzw. Frequenz $f = \omega/2\pi$) zunächst zu einer sinusförmigen Beanspruchung $\sigma(t)$ und in der Folge zu einer sinusförmigen Antwort $\varepsilon(t)$. Aufgrund der Visko-Elastizität läuft die Antwort der Erregung mit einer bestimmten Phasenverschiebung zeitlich nach (Abbildung 3-12). Der Phasenwinkel ϕ ist ein Maß für die innere Reibung des Materials (Findley et al., 1976) und kann zur Abschätzung der dissipierten Energie pro Lastwechsel herangezogen werden. Der Phasenwinkel weist immer eine Größe von $0 \leq \phi \leq \pi/2$ auf, wobei $\phi = 0$ für rein elastisches Materialverhalten und $\phi = \pi/2$ für viskoses gilt.

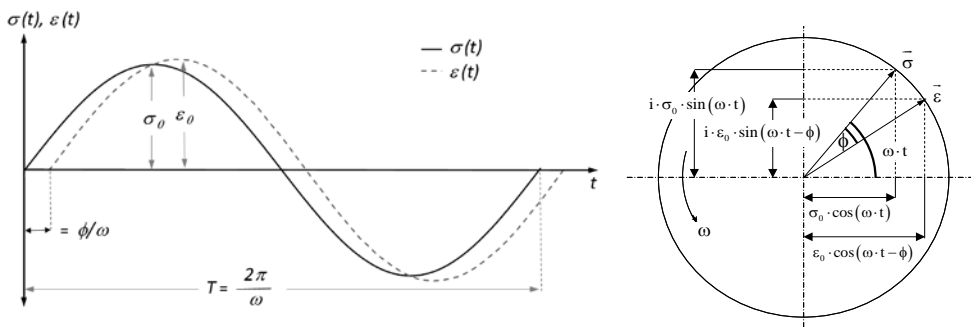


Abbildung 3-12: Spannungs-Dehnungs-Diagramm für ein sinuserregtes linear visko-elastisches Material (links) und Darstellung von $\sigma(t)$ und $\varepsilon(t)$ in der komplexen Zahlenebene (rechts) (Wistuba et al., 2009).

Der komplexe Modul kann in einen Realteil E_1 (Speichermodul) und einen Imaginärteil E_2 (Verlustmodul) zerlegt werden (Abbildung 3-13).

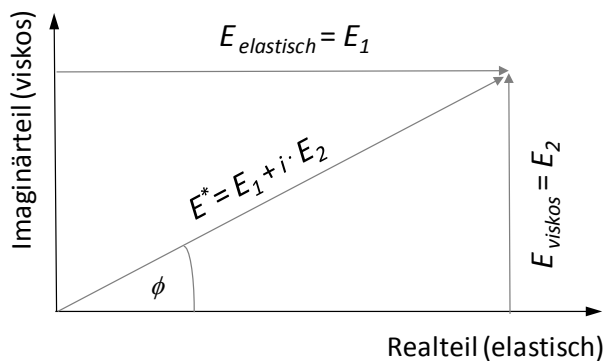


Abbildung 3-13: Zerlegung des komplexen Moduls in einen Realteil E_1 (Speichermodul) und einen Imaginärteil E_2 (Verlustmodul) in der komplexen Zahlenebene (Wistuba et al., 2009).

Der Betrag des komplexen dynamischen Moduls $|E^*|$ zusammen mit dem Phasenwinkel ϕ wird als (dynamischer) Steifigkeitsmodul bezeichnet. Es folgt:

$$|E^*| = \sqrt{\left(\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cdot \cos\phi\right)^2 + \left(\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cdot i \cdot \sin\phi\right)^2} = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} = \sqrt{E_1^2 + E_2^2} \quad \text{Gleichung 3-8}$$

Die Ermittlung der Materialsteifigkeit erfolgt bei kleinen Amplituden und mit einer geringen Anzahl an Belastungszyklen (100 Lastwechsel), um eventuell auftretende, prüfbedingte Einflüsse auf die Materialschädigung zu vermeiden.

Der Steifigkeitsmodul von linear visko-elastischen Materialien kann aus den Amplituden von Kraft (Spannung σ_0) und Weg bzw. Durchbiegung (Dehnung ε_0) berechnet werden. In Abhängigkeit des gewählten Prüfverfahrens fließen folgende Korrekturfaktoren in die Berechnung ein. Ein Formfaktor γ berücksichtigt die Probekörpergeometrie, ein Massenfaktor μ die Massenträgheitseffekte des Probekörpers und der mitschwingenden Geräteteile.

Vorausgesetzt die Steifigkeitsprüfung wird richtig durchgeführt und interpretiert, besteht zwischen unterschiedlichen Prüfverfahren eine hohe Konsistenz, so dass im Wesentlichen jedes beliebige Prüfverfahren zur Ableitung der Materialsteifigkeit herangezogen werden kann (Di Benedetto et al., 2001).

Beim Spaltzug-Schwellversuch wird die zu untersuchende Asphaltvariante nacheinander bei den Temperaturen 20°C, 10°C, 0°C und -10°C jeweils an drei Probekörpern zyklisch mit verschiedenen Frequenzen, z. B. 0,1 Hz, 1 Hz, 5 Hz, 10 Hz und 20 Hz beansprucht. Aus den gewonnenen Kenndaten kann daraufhin die Masterkurve abgeleitet werden. Diese gibt, basierend auf den Annahmen der Temperatur-Frequenz-Äquivalenz, die Steifigkeit des untersuchten Asphaltes bezüglich der Temperatur wieder.

Die Höhe der Dehnungsreaktion infolge einer äußeren Beanspruchung hängt bei viskoelastischen Baustoffen auch von der aufgebrachten Frequenz f ab. Wird ein Baustoff bei hoher Frequenz belastet so ist die resultierende Dehnungsreaktion kleiner als bei äquivalenter Beanspruchung mit geringerer Frequenz. Beim Prinzip der Temperatur-Frequenz-Äquivalenz für die Ermittlung des E-Moduls wird angenommen, dass für eine bestimmte Kombination aus Frequenz und Temperatur ein E-Modul abgeleitet werden kann, welcher bei einer weiteren Kombination aus Frequenz und Temperatur auftreten kann.

Hürtgen (2000) ermittelte gleichgroße E-Moduln eines Materials bei unterschiedlichen Prüftemperaturen und Frequenzen. Dieses Erkenntnis wird für Laborprüfungen genutzt, indem die Ergebnisse gewählter Temperatur-Frequenz-Paare entlang einer Masterfunktion auf andere Temperatur-Frequenz-Bereiche ausgeweitet werden (vgl. Abbildung 3-14).

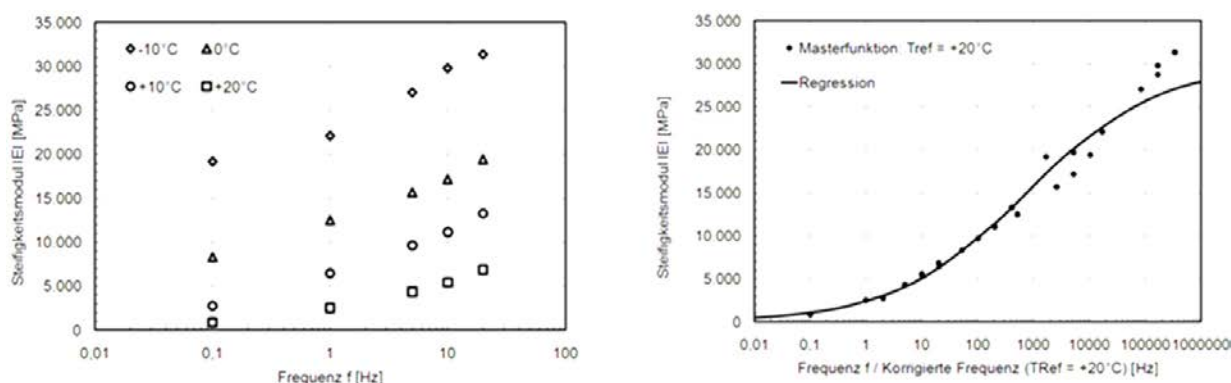


Abbildung 3-14: Ermittlung einer Masterkurve nach Hürtgen (vgl. Grönniger und Walther, 2011).

Unter Zuhilfenahme des Verschiebungsfaktors α_T nach Gleichung 3-9 kann die jeweilige Prüffrequenz zur korrigierten Frequenz f_R nach Gleichung 3-10 überführt werden. Die gemessenen E-Moduln lassen sich durch Gleichung 3-11 approximieren.

$$\alpha_T = \frac{1}{e^{-m \cdot \left(\frac{1}{T+273} - \frac{1}{T_R+273} \right)}} \quad \text{Gleichung 3-9}$$

$$f_R = f \cdot \alpha_T \quad \text{Gleichung 3-10}$$

$$|E| = y_0 + \frac{w}{1 + e^{-\left(\frac{\ln(f_R) - x_0}{z} \right)}} \quad \text{Gleichung 3-11}$$

mit:

T	tatsächliche Prüftemperatur [°C]
T_R	Bezugstemperatur [°C]
m	Faktor [°C]

w	Glasm modul [MPa]; bei tiefer Temperatur und hoher Frequenz maximal erreichbarer Steifigkeitsmodul
y_0, x_0, z	Regressionskoeffizienten

3.5 Bitumen-Typisierung-Schnell-Verfahren

Die Einstellung des Zielbindemittels im Rahmen des Asphaltrecyclings erfolgt üblicherweise anhand des resultierenden Erweichungspunktes Ring und Kugel EP_{RuK} . Seit einigen Jahren wird in Deutschland nach alternativen Verfahren unter Verwendung des dynamischen Scherrheometers (DSR) gesucht. Vor diesem Hintergrund wird in diesem Forschungsprojekt das am ISBS entwickelte Bitumen-Typisierung-Schnell-Verfahren (BTSV) angewandt.

Das BTSV dient der Bestimmung der rheologischen Eigenschaften des Zielbindemittels aus den rheologischen Eigenschaften der Ausgangsstoffe. Dazu werden im DSR unter definierter oszillierender Beanspruchung im instationären Temperaturzustand für einen vorgegebenen komplexen Schermodul von 12,5 kPa die Äqui-Schermodul-Temperatur (T_{BTSV}) und der zugehörige Phasenwinkel (δ_{BTSV}) ermittelt (sh. Alisov, 2016).

Die Prüfung wird im spannungsgeregelten Modus bei kontinuierlich ansteigender Temperatur durchgeführt. Als Prüfgeometrie werden Platte-Platte-Messsysteme mit Plattendurchmesser von 25 mm und einer Spaltweite von 1 mm verwendet (Abbildung 3-15). Die Bindemittelprobe wird kontinuierlich mit einer Frequenz von 1,59 Hz oszillierend beansprucht. Während der Beanspruchung wird die Temperatur in einem Temperaturbereich von 20 °C bis maximal 90 °C kontinuierlich mit einer Temperaturrate von 1,2 K/min erhöht. Der Probekörper wird über die gesamte Prüfdauer (von Beginn der Temperaturrampe) mit einer konstanten Scherspannung von 500 ± 5 Pa in Oszillation beansprucht. Während der Messung werden die Werte des komplexen Schermoduls, des Phasenwinkels und der Temperatur sekundlich aufgezeichnet. Aus den Messwerten werden jene Temperatur ermittelt, bei der der komplexe Schermodul eine Größe von $G^* = 12,5 \pm 0,05$ kPa erreicht (T_{BTSV}) sowie der bei dieser Temperatur gemessene Phasenwinkel (δ_{BTSV}) (vgl. Abbildung 3-16).



Abbildung 3-15: Dynamisches Scherrheometer (DSR) mit Prüfgeometrie eines Platte-Platte-Mess-Systems mit einem Plattendurchmesser von 25 mm für den Temperaturbereich von +20 °C bis +90 °C.

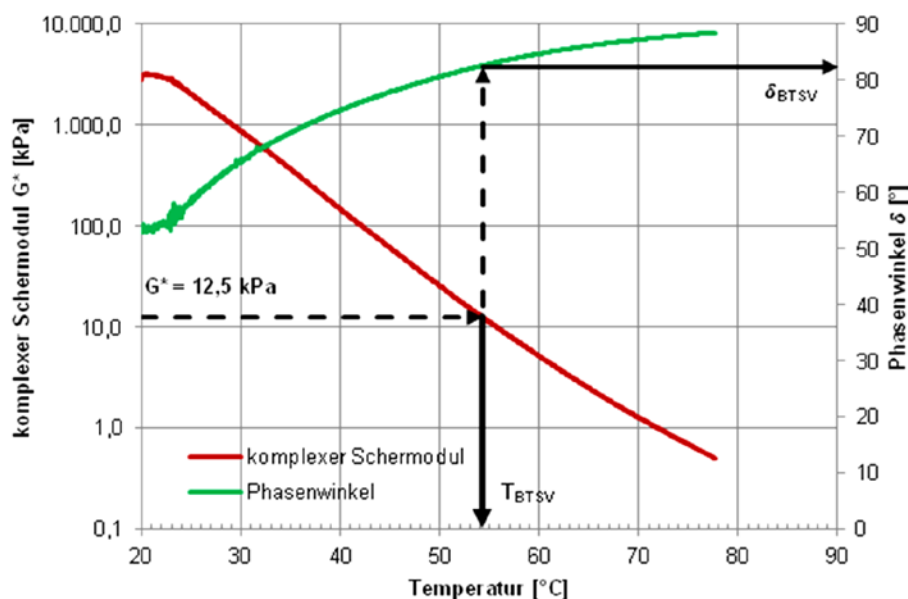


Abbildung 3-16: Typischer Verlauf von komplexem Schermodul und Phasenwinkel bei kontinuierlichem Temperaturanstieg (sh. Alisov, 2016).

3.6 Rechnerische Lebensdauer

Auf der Grundlage des ermittelten Ermüdungsverhaltens der Tragschicht-Varianten und der im Technischen Regelwerk dokumentierten Methode zur Rechnerischen Dimensionierung (RDO Asphalt 09; FGSV, 2009c) wird die rechnerische Lebensdauer von daraus hergestellten Straßenaufbau-Varianten ermittelt.

3.6.1 Berechnungsgrundlagen

Der rechnerische Nachweis des Ermüdungsverhaltens der Asphalttragschicht beruht gemäß Technischem Regelwerk (RDO Asphalt 09; FGSV, 2009c) auf einer Begrenzung der Biegezug-Beanspruchung an der Unterseite der Asphalttragschicht (klassische Ermüdungstheorie). Zur Berechnung der maßgebenden Dehnungen bzw. Spannungen (sog. Primärwirkungen) an der Unterseite der Asphalttragschicht wird die linear-elastische Mehrschichtentheorie angewendet. Hier wird der Fahrbahnoberbau in homogene Schichten eingeteilt. Jede Schicht wird durch die Eigenschaften Dicke h , Elastizitätsmodul E , Querdehnzahl ν und Verbund zu der darunter liegenden Schicht beschrieben. Die unterste Schicht eines Mehrschichtensystems wird mit einem als Halbraum definierten Untergrund festgelegt. Für die Berechnung der auftretenden Beanspruchungen aus der Verkehrslast p wird im Modell die Radlast durch eine runde, auf der Oberfläche vertikal angreifende Flächenlast (Topflast) angenähert.

Zur Berücksichtigung der jeweiligen temperaturabhängigen Steifigkeit der Asphaltsschichten werden gem. gültigem Regelwerk 13 Temperaturklassen berücksichtigt, welche die statistische Verteilung der Asphaltoberflächentemperaturen im Jahresverlauf repräsentieren.

Der Temperaturverlauf im Asphalt wird durch Gleichung 3-12 bestimmt. Jeder im Mehrschichten-Modell definierten Asphaltsschicht bzw. -lage kann somit eine Temperatur zugeordnet werden, anhand der der entsprechende E-Modul der Schicht abgeleitet werden kann. Die benötigte Temperatur-Steifigkeitsfunktion wird je Asphaltmischgut mittels Laborprüfungen bestimmt.

$$y = b \cdot \ln(0,01 \cdot x + 1,0) + T$$

Gleichung 3-12

mit:

y	Asphalttemperatur in der Tiefe x [°C]
x	Tiefe unter Fahrbahnoberfläche [mm]
T	Oberflächentemperatur [°C]
b	Parameter, abhängig von T [-]

Zur Berücksichtigung der unterschiedlichen Achslasten im Fahrzeugkollektiv werden bis zu 11 Achslastklassen definiert, deren Anteil am Gesamtverkehr in Abhängigkeit der Straßenklasse definiert ist (Tabelle 3-7).

Über die angestrebte Lebensdauer und das durchschnittliche tägliche Verkehrsaufkommen des Schwerverkehrs DTV^(SV) wird die Anzahl an Achsübergängen prognostiziert, die innerhalb der definierten, theoretischen Lebensdauer zu erwarten sind (vorh N).

Es ergeben sich somit insgesamt bis zu 143 einzelne Mehrschichten-Modelle oder Bemessungsfälle. Für jeden Bemessungsfall sind die Primärwirkungen an der Unterseite der Asphalttragschicht zu berechnen.

Tabelle 3-7: Achslastklasse und zugeordnete Häufigkeit (Uhlig, 2007)

Bezeichnung	Achslastklasse (statische Last) [t]										
	0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	≥20
BAB Fernverkehr *)	2,8396	21,4670	26,4848	30,7195	11,7032	4,9098	1,6540	0,2087	0,0126	0,0007	0,0001
BAB Mischverkehr **)	3,4940	24,9439	27,4935	26,3373	11,0538	4,6596	1,7180	0,2711	0,0257	0,0031	-
BAB Stadtnaher Verkehr ***)	4,0101	36,7995	29,3512	17,1376	7,5290	3,8888	1,1408	0,1399	0,0031	-	-

) Fernverkehr entspricht der Verbindungsfunktionsstufe 0 und I, „kontinental / großräumig“ nach den Richtlinien zur Anlage von Landstraßen RAL bzw. Richtlinien zu Anlage von Autobahnen RAA

-) Mischverkehr entspricht der Verbindungsstufe II „überregional“ nach den RAL / RAA

-) Stadtnaher Verkehr entspricht der Verbindungsstufe III „regional“ nach den RAL / RAA

3.6.2 Anzahl der zulässigen Lastwechsel

Anhand der mit Spaltzug-Schwellversuchen an dem entsprechenden Asphalttragschichtmaterial ermittelten Ermüdungsfunktion (gem. AL SP-Asphalt 09) wird die für jede berechnete Dehnung ertragbare zulässige Lastwechselzahl abgeleitet:

$$\text{zul N} = \frac{\text{SF}}{\text{F}} \cdot a \cdot \varepsilon^k$$

Gleichung 3-13

mit:

zul N	zulässige Lastwechselzahl bis zur Rissentstehung in den Asphalttragschichten [-]
a	Materialkennwert, durch Regression bestimmt [-]
ε	elastische Anfangsdehnung (nach dem 100. Lastzyklus) [µm/m]
k	Materialkennwert, durch Regression bestimmt [-]
SF	Shiffaktor, für den Spaltzug-Schwellversuch gem. RDO ist ein Faktor von SF = 1.500 anzunehmen [-]
F	Sicherheitsbeiwert gem. RDO [-]

3.6.3 Nachweis der Gebrauchsdauer

Unterschiedliche Achslasten und unterschiedliche Temperaturzustände führen zu variierenden Beanspruchungszuständen an der Unterseite der Asphalttragschicht. So kann für jeden zu berücksichtigenden Belastungsfall, unter Verwendung von Gleichung 3-13, eine zulässige Lastwechselzahl $zul\ N$ ermittelt werden. Diese wird in der Folge den vorhandenen Lastwechseln $vorh\ N$ gegenübergestellt. Der Quotient aus $vorh\ N$ und $zul\ N$ wird als Teilschädigung interpretiert und mittels der Schadensakkumulations-Hypothese nach Miner (1945) zur Gesamtschädigung summiert. Der Nachweis gegenüber Ermüdung gilt als erfüllt, wenn die Summe der Teilschädigungen innerhalb der angestrebten Nutzungsdauer den Wert 1,0 nicht überschreitet (vgl. Gleichung 3-14).

$$\sum_{MINER} = \frac{vorh...N_a}{zul...N_a} + \frac{vorh...N_b}{zul...N_b} + \frac{vorh...N_c}{zul...N_c} + \dots + \frac{vorh...N_n}{zul...N_n} \leq 1 \quad \text{Gleichung 3-14}$$

4 Untersuchungsergebnisse

4.1 Bindemittleigenschaften

In Tabelle 4-2 sind dargestellt die Bindemittelkenndaten Erweichungspunkt Ring und Kugel (EP_{RUK}) sowie die Ergebnisse aus dem BTSV (T_{BTSV} , δ_{BTSV}) für die

- Frischbindemittel,
- die aus den Asphaltgranulat-Varianten rückgewonnenen Bindemittel und
- die aus den Asphaltmischgut-Varianten rückgewonnenen Bindemittel.

Die Findung des optimalen Zugabeanteils eines Rejuvenators zum rückgewonnenen Bindemittel aus Asphaltgranulat ist jeweils ein iterativer Prozess. Pauschale Zugabemengen, die beispielsweise auf einer Reduktion des Erweichungspunktes abzielen, führen nicht zu vergleichbaren Bindemittelkenndaten und sind deshalb nicht empfehlenswert.

4.2 Zugabemengen an Rejuvenator

Mittels BTSV (siehe Kapitel 3.5) werden für die im Labor hergestellten Asphaltvarianten die in Tabelle 4-1 enthaltenen Zugabemengen für die Rejuvenatoren in Abhängigkeit vom Asphaltgranulat festgelegt.

Tabelle 4-1: Mittels BTSV ermittelte Zugabemengen M.-% an Rejuvenator

Rejuvenator	Asphaltgranulat AG	Zielbindemittel	Zugabe Rejuvenator [M.-%] bezogen auf Bindemittel des Asphaltgranulats
R 8	AG 1	30/45	60,0
R 3			8,0
R 1			6,3
R 8	AG 2	25/55-55	57,5
R 3			6,0
R 1			5,0
R 8	AG 3	25/55-55	100,0
R 3			8,5
R 1			8,1
R 8	AG 3	50/70	105,0
R 3			11,0
R 1			9,0

Auf die Zusammensetzung der großtechnisch hergestellten Asphaltvarianten wurde durch das ISBS kein Einfluss genommen, die Menge an zugegebenem Rejuvenator wurde nicht mittels BTSV eingestellt.

4.3 Asphalttragschicht-Varianten AC 32 T S (Mischgut-Variante 1)

4.3.1 Zusammensetzung

Die Korngrößenverteilungen der hergestellten Mischgut-Varianten AC 32 T S sind anhand der Siebdurchgänge in Tabelle 4-3 angegeben. Abbildung 4-1 zeigt die angestrebte und die erreichten Korngrößenverteilungen im Vergleich mit dem zulässigen Sieblinienbereich gemäß TL Asphalt-StB 07.

Die Variante V3 (80 M.-% AG) unter Verwendung des Rejuvenators R8 wurde nicht umgesetzt. Hier hätte die Verjüngung des rückgewonnenen Bindemittels aus dem Asphaltgranulat AG 1 zur Folge, dass ein Bindemittelgehalt größer als der definierte Zielbindemittelgehalt für die Asphalttragschicht-Variante von 4,2 M.-% resultieren würde, und zwar 6,5 M.-% (zur Verjüngung des aus dem Asphaltgranulat rückgewonnenen Bindemittels auf ein Zielbindemittel der Sorte 30/45 sind 60 M.-% Zugabe des Rejuvenators R8 bezogen auf das Bindemittel des Asphaltgranulats notwendig). Eine Vergleichbarkeit mit den anderen im Labor hergestellten Asphalttragschichtmischgut-Varianten wäre dann nicht gegeben.

Tabelle 4-2: Ergebnisse der Bindemittelkenndaten Erweichungspunkt Ring und Kugel (EP_{RuK}) gemäß DIN EN 1427 und Ergebnisse aus dem BTSV (T_{BTSV} , δ_{BTSV}) gemäß AL BTSV (DSR) (Entwurf 5.12.2015) (Mittelwerte)

Asphaltsorte	Variante	Rejuvenator	Zugabeanteil AG [M.-%]	EP_{RuK} [°C]	T_{BTSV} [°C]	δ_{BTSV} [°]
AC 32 T S	AG 1	-	-	69,3	70,7	73,4
	30/45 _{frisch}	-	-	55,9	58,7	78,5
	160/220 _{frisch}	-	-	40,3	40,4	77,6
	V1	-	0	59,8	↗	↗
	V2	R 8	50	57,0	↗	↗
	V3		80	-	-	-
	V4	R 3	50	59,1	↗	↗
	V5		80	58,2	↗	↗
	V6	R 1	50	59,9	↗	↗
	V7		80	58	↗	↗
AC 22 B S	AG 2	-	-	78,0	68,0	66,7
	25/55-55 _{frisch}	-	-	52,8	57,6	67,5
	160/220 _{frisch}	-	-	40,3	40,4	77,6
	V8	-	0	59,1	58,2	71,1
	V9	R 8	40	63,6	60,1	72,2
	V10		60	-	-	-
	V11	R 3	40	66	61,3	71,5
	V12		60	69,4	63,7	68,8
	V13	R 1	40	65,8	65,0	68,8
	V14		60	69,6	62,3	67,1
SMA 11 S	AG 3	-	-	69,2	70,7	73,4
	25/55-55 _{frisch}	-	-	58,6	57,0	67,5
	160/220 _{frisch}	-	-	40,3	40,4	77,6
	V15	-	0	64,8	60,6	65,2
	V16	R 8	20	61,2	59,2	68,6
	V17		40	58,3	58,7	72,3
	V18	R 3	20	62,4	60,4	67,5
	V19		40	63,0	61,8	69,1
	V20	R 1	20	62,6	60,5	66,7
	V21		40	61,8	59,8	68,0
AC 11 D S	AG 3	-	-	69,2	70,7	73,4
	50/70 _{frisch}	-	-	51,3	54,8	78,8
	160/220 _{frisch}	-	-	40,6	40,4	77,6
	V22	-	0	53,8	58,3	77,7
	V23	R 8	20	57,1	57,8	76,4
	V24		40	56,0	57,0	76,4
	V25	R 3	20	56,6	59,1	77,0
	V26		40	56,2	58,6	76,8
	V27	R 1	20	55,2	58,3	76,0
	V28		40	55,9	58,9	75,0
SMA 8 S	V30	-	-	68,1	65,8	66,7
	V31	R 8	50	59,0	57,5	71,3
	V32	R 3	50	61,4	58,2	68,4
	V33	R 1	50	58,8	54,8	65,7

¹⁾ Es liegen keine Ergebnisse für T_{BTSV} und δ_{BTSV} aus dem BTSV vor, da dieses Prüfverfahren bei Herstellung der Asphalttragschicht AC 32 T S noch nicht in seiner gemäß AL BTSV (DSR) definierten Form vorhanden war. Hier wurde ein vergleichbarer komplexer Schermodul G^* für das Zielbindemittel bei einer definierten Temperatur von 50 °C bei einer Prüffrequenz von 1,59 Hz herangezogen.

Tabelle 4-3: Zusammensetzung der hergestellten Mischgut-Varianten AC 32 T S bei Warmzugabe des Asphaltgranulats (Mittelwerte) in Abhängigkeit vom eingesetzten Rejuvenator und vom Zugabeanteil des Asphaltgranulats

Korndurchmesser [mm]	Siebdurchgang [M.-%]						
	0 M.-% AG	50 M.-% AG			80 M.-% AG		
	Referenz (V1)	R 8 (V2)	R 3 (V4)	R 1 (V6)	R 8 (V3)	R 3 (V5)	R 1 (V7)
31,5	98,4	100,0	100,0	100,0	-	100,0	100,0
22,4	85,7	88,6	85,0	87,5	-	91,3	87,6
16	78,5	83,0	75,0	76,1	-	83,2	77,2
11,2	64,8	69,9	65,0	65,3	-	72,9	64,8
8	56,4	55,4	57,0	55,1	-	59,4	58,8
5,6	46,3	44,4	47,0	43,6	-	48,2	42,0
2	33,5	30,1	33,0	29,7	-	32,8	31,0
1	26,4	24,8	23,0	24,6	-	26,8	25,0
0,25	12,2	12,6	10,9	12,1	-	14,2	11,1
0,125	8,9	9,4	8,4	9,0	-	10,7	9,3
0,063	6,9	8,0	7,5	7,8	-	9,1	8,5

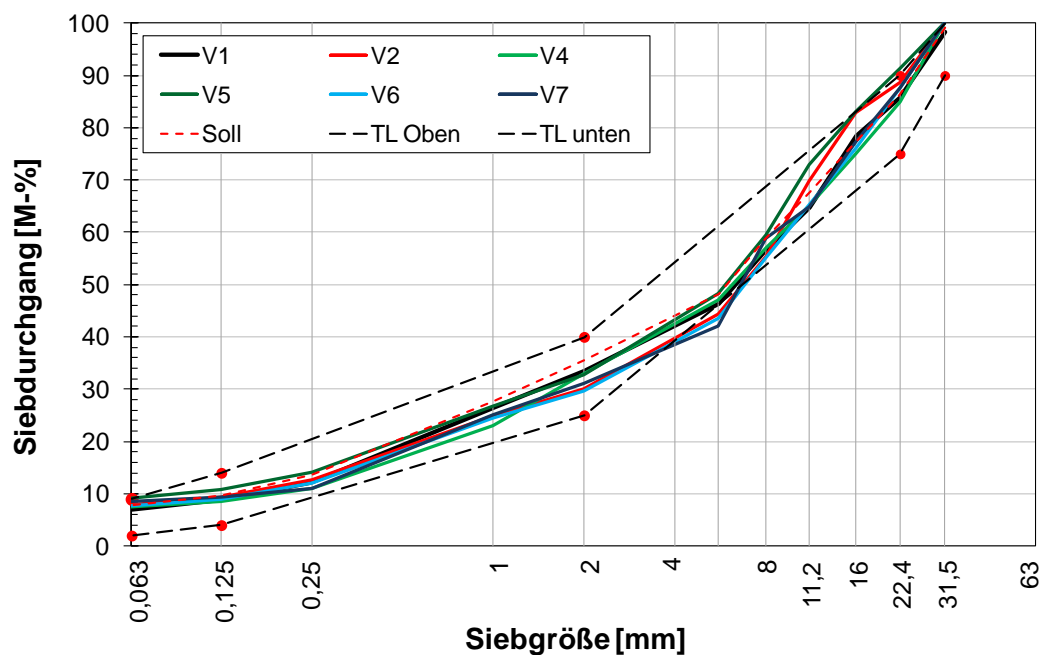


Abbildung 4-1: Mittlere Korngrößenverteilungen (Kontrollprüfung) für die Asphalttragschicht-Varianten AC 32 T S.

Die erzielten Korngrößenverteilungen entsprechen weitestgehend der angestrebten Soll-Sieblinie. Tabelle 4-4 fasst die Ergebnisse der Überprüfungen für die Mischgut-Varianten AC 32 T S zusammen.

Tabelle 4-4: Kontrollprüfungsergebnisse für die Mischgut-Varianten AC 32 T S

Kenngroße	Mischgut-Variante						
	0 M.-% AG	50 M.-% AG			80 M.-% AG		
	Referenz (V1)	R 8 (V2)	R 3 (V4)	R 1 (V6)	R 8 (V3)	R 3 (V5)	R 1 (V7)
Bindemittelgehalt B [M.-%]	4,2	4,1	4,1	4,2	-	4,1	4,2
Rohdichte ρ_m [g/cm ³]	2,537	2,570	2,568	2,537	-	2,568	2,537
Erweichungspunkt EP _{Ruk} [°C]	59,8	57,0	59,1	59,8	-	59,1	59,8

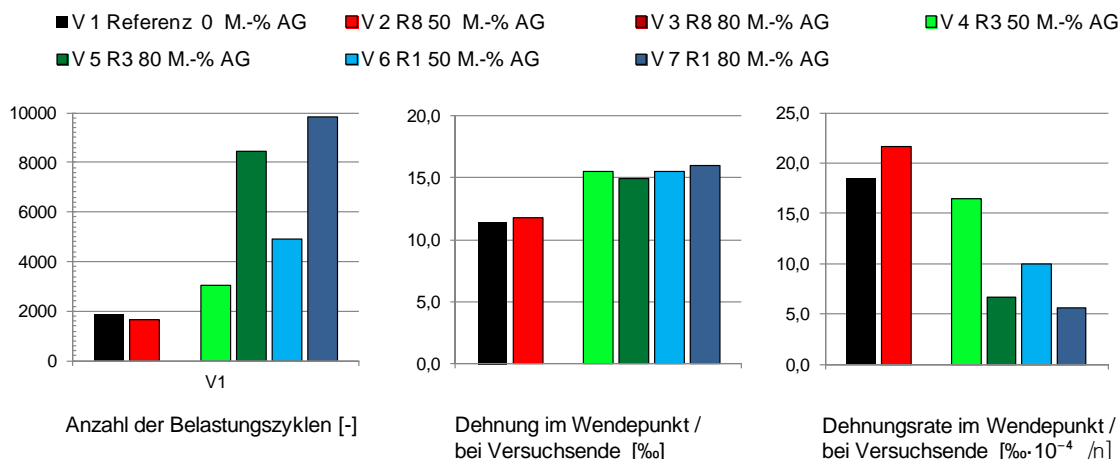
4.3.2 Performance-Eigenschaften

4.3.2.1 Verformungswiderstand

In Tabelle 4-5 sind die Ergebnisse aus dem Einaxialen Druck-Schwellversuch für die Mischgut-Varianten AC 32 T S angegeben. Abbildung 4-2 gibt die Ergebnisse grafisch wieder.

Tabelle 4-5: Ergebnisse der Verformungsprüfung der Mischgut-Varianten AC 32 T S mittels Einaxialen Druck-Schwellversuch gem. TP Asphalt, Teil 25 B 1 (Mittelwerte)

Variante	Rejuvenator	Zugabeanteil AG [M.-%]	Anzahl Belastungszyklen [-]	Dehnung im Wendepunkt / bei Versuchsende [‰]	Dehnungsrate im Wendepunkt / bei Versuchsende [‰ · 10 ⁻⁴ /h]
V1	-	0	1881,0	11,4	18,5
V2	R 8	50	1666,0	11,8	21,7
V3		80	-	-	-
V4	R 3	50	3042,7	15,5	16,5
V5		80	8460,7	15,0	6,7
V6	R 1	50	4902,7	15,5	10,0
V7		80	9825,3	16,0	5,6

**Abbildung 4-2:** Ergebnisse der Verformungsprüfung der Mischgut-Varianten AC 32 T S mittels Einaxialen Druck-Schwellversuch gem. TP Asphalt, Teil 25 B 1.

Gemäß den Technischen Prüfvorschriften TP Asphalt, Teil 25 B 1 ist das Versuchsergebnis die Dehnungsrate im Wendepunkt bzw. am Versuchsende. Aus Abbildung 4-2 kann

folgende Reihung von geringer (vorteilhafter) zu erhöhter Dehnungsrate abgeleitet werden:

$$V7 > V5 > V6 > V4 > V1 > V2$$

Die Asphalttragschicht-Varianten mit einem Zugabeanteil von 80 M.-% Asphaltgranulat (V7 und V5) zeigen zudem vorteilhafte Eigenschaften in Hinblick auf die Anzahl an erreichten Belastungszyklen.

Hinsichtlich der Dehnung zeigen die Varianten bei Verwendung der Rejuvenatoren R 3 und R 1 vergleichbare Dehnungen, und zwar unabhängig des Zugabeanteils an Asphaltgranulat. Die Referenzvariante V1 ohne Zugabe von Asphaltgranulat bzw. ohne Rejuvenator und die Variante V2 unter Verwendung des Rejuvenators R 8 weisen vergleichbare und im Vergleich zu den Varianten unter Einsatz von R 3 und R 1 geringere Dehnungen auf.

4.3.2.2 Widerstand gegen Kälterissbildung

Zur Auswertung und Interpretation der Ergebnisse zum Kälteverhalten werden als Merkmalsgrößen

- die Bruchtemperatur beim Abkühlversuch inklusive der Bruchspannung,
- die maximale Zugfestigkeit
- und daraus resultierend die Zugfestigkeitsreserve

ausgewertet. Um vorteilhafte Kälteeigenschaften zu erreichen, sollten diese Merkmalsgrößen folgende Eigenschaften aufweisen:

- Bei den Abkühlversuchen sollte die Bruchtemperatur möglichst niedrig sein und eine möglichst hohe Bruchspannung erzielt werden.
- Bei der maximalen Zugfestigkeitsreserve sollte ein möglichst hoher Wert und eine möglichst tiefe korrespondierende Temperatur erreicht werden.

In Tabelle 4-6 sind die aus dem Abkühlversuch ermittelten Bruchtemperaturen mit den korrespondierenden Bruchspannungen der unterschiedlich hergestellten Asphalttragschichtmischgut-Varianten AC 32 T S zusammengestellt. Abbildung 4-3 gibt die Ergebnisse grafisch wieder.

Bezüglich der Bruchtemperatur ergeben sich bei einem Zugabeanteil von 50 M.-% Asphaltgranulat geringfügige Unterschiede von bis zu 2,7 °C bei Verwendung von R 1 als Rejuvenator im Vergleich zur Referenz ohne Zugabe von Asphaltgranulat.

Die Zunahme des Anteils an Asphaltgranulat auf 80 M.-% bewirkt eine Verringerung der Bruchtemperatur von 6,2 °C (R 3) bzw. 6,1 °C (R 1) im Vergleich zur Referenz. Der Zugabeanteil von Asphaltgranulat wirkt sich bezüglich der Bruchtemperatur ausschließlich bei hohen Zugabemengen (80 M.-% AG) aus.

Tabelle 4-6: Bruchtemperatur [°C] mit korrespondierender Bruchspannung [MPa] aus Abkühlversuchen an den Mischgut-Varianten AC 32 T S

Variante	Rejuvenator	Zugabeanteil AG [M.-%]	Bruchtemperatur [°C]	Bruchspannung [MPa]
V1	-	0	-21,1	4,09
V2	R 8	50	-23,2	3,33
V3		80	-	-
V4	R 3	50	-21,7	3,92
V5		80	-27,3	4,59
V6	R 1	50	-23,8	3,70
V7		80	-27,2	4,23

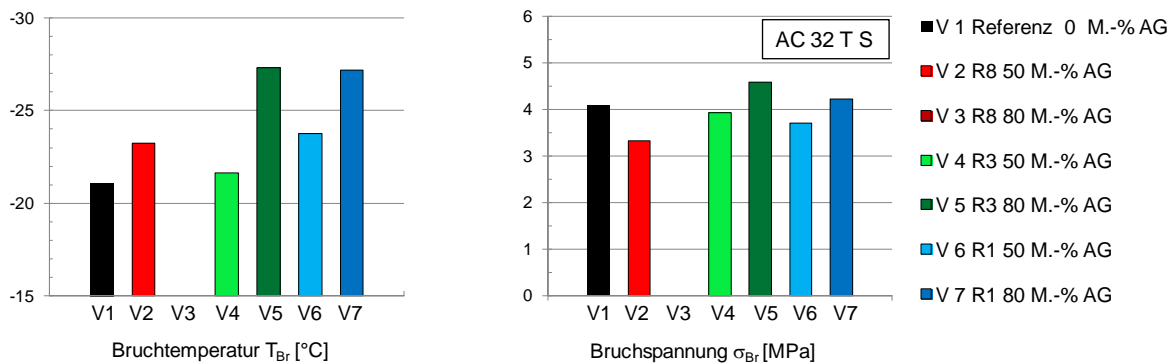


Abbildung 4-3: Bruchtemperaturen mit korrespondierenden Bruchspannungen aus Abkühlversuchen an den Mischgut-Varianten AC 32 T S in Abhängigkeit vom Zugabeanteil an Asphaltgranulat und vom eingesetzten Rejuvenator.

Die Mischgut-Varianten unter Verwendung der Rejuvenatoren R 8, R3 und R 1 weisen einheitlich mindestens vergleichbare bzw. geringere (vorteilhafte) Bruchtemperaturen im Vergleich zur Referenz auf.

Bei Betrachtung der Bruchspannung sind vergleichbare Abhängigkeiten vom Zugabeanteil des Asphaltgranulates erkennbar, wie bei Betrachtung der Bruchtemperatur. Beim direkten Vergleich erzielen jene Varianten mit 80 M.-% Asphaltgranulat die höchsten Bruchspannungen. Die Asphalttragschicht-Varianten V 4 und V 6, die einen Zugabeanteil an Asphaltgranulat von 50 M.-% aufweisen (R 3 und R 1) erzielen vergleichbare Bruchspannungen wie die Referenz ohne Asphaltgranulat. Die Mischgut-Variante V2 (R 8) erreicht im Vergleich die geringsten Bruchspannungen.

Die Ergebnisse der Kältezugsversuche für die AC 32 T S Varianten sind in Tabelle 4-7 zusammengestellt. In Abbildung 4 sind für die Mischgut-Varianten AC 32 T S die Ergebnisse aus den Kältezugsprüfungen bei den Temperaturen +20 °C, +5 °C, -10 °C und -25 °C dargestellt.

Tabelle 4-7: Ergebnisse der Kältezugsprüfungen für die Mischgut-Varianten AC 32 T S.

Variante	Rejuvenator	Zugabeanteil AG [M.-%]	Zugspannung [MPa]			
			@ +20 °C	@ +5 °C	@ -10 °C	@ -25 °C
V1	-	0	1,61	4,58	4,74	4,04
V2	R 8	50	1,00	3,62	4,37	3,25
V3		80	-	-	-	-
V4	R 3	50	1,14	3,81	4,71	3,47
V5		80	1,38	3,94	5,83	4,25
V6	R 1	50	1,01	3,16	4,58	3,47
V7		80	0,71	2,93	4,66	4,23

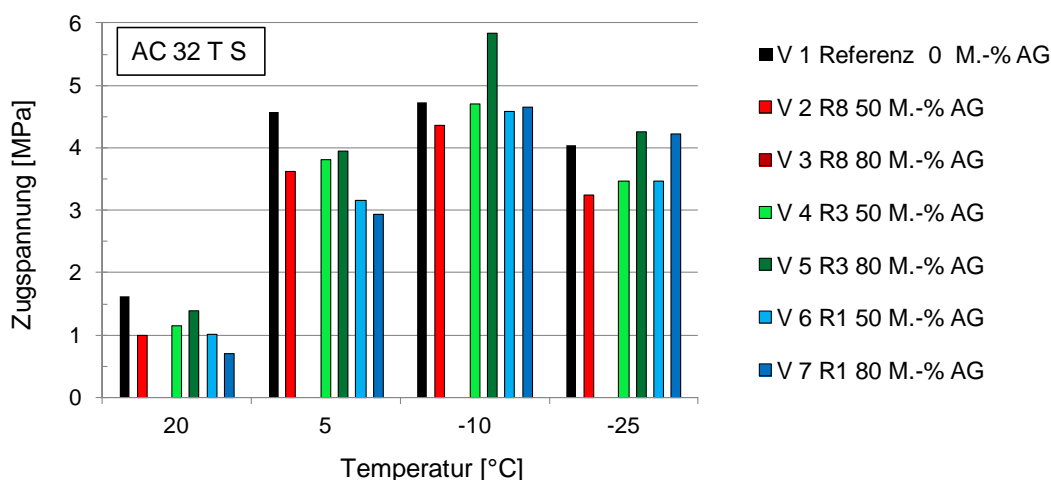


Abbildung 4: Ergebnisse der Kältezugsprüfungen an den Mischgut-Varianten AC 32 T S (Mittelwerte).

Bei +20 °C und bei +5 °C weist die Referenz-Variante V1 die höchsten (vorteilhafte) Zugspannungen auf, gefolgt von den Varianten V5 und V4 (R 3), V2 (R 8) und V6 bzw. V7 (R 1).

Bei -10 °C, dem Bereich der höchsten Zugspannung, erzielen alle Mischgut-Varianten vergleichbare Zugspannungen – mit Ausnahme der Variante V5 (R 3 mit 80 M.-% AG). Für diese Mischgut-Variante wird eine höhere Zugspannungen von ca. 1,1 MPa im Vergleich zur Referenz erzielt.

Aus den Ergebnissen der Abkühl- und der Kältezugsprüfung wird die Zugfestigkeitsreserve je Asphalttragschichtmischgut-Variante ermittelt (vgl. Tabelle 4-8).

Eine einheitliche Reihung der eingesetzten Rejuvenatoren bzw. des Zugabeanteils an Asphaltgranulat hinsichtlich der Auswirkung auf das Kälteverhalten der hergestellten Asphalttragschicht-Varianten ergibt sich daraus nicht. Die Variante V5 unter Verwendung des Rejuvenators R 3 und eines Zugabeanteils von 80 M.-% Asphaltgranulat (dunkelgrün) weist im Vergleich zu den anderen Varianten die höchste Zugfestigkeitsreserve bei -5,1 °C (vorteilhafter) korrespondierender Temperatur auf.

Den jeweiligen Verlauf der Zugfestigkeitsreserve in Abhängigkeit von der Temperatur zeigt Abbildung 4-4. Die Variante V7 weist bei der maximalen Zugfestigkeitsreserve im Vergleich die geringste Temperatur auf ($T = -6,6$ °C), welche in der Folge als Bezugstemperatur gewählt wird. Je Zugabeanteil an Asphaltgranulat und eingesetztem Rejuvenator sind in Abbildung 4-5 die auf diese Bezugstemperatur bezogenen Zugfestigkeitsreserven der Varianten gegenübergestellt. So wird ein vergleichbares Kälteverhalten für alle Asphaltmischgut-Varianten ermittelt, wobei Variante V5 eine erhöhte Zugfestigkeitsreserve von ca. 0,8 MPa aufweist (Abbildung 4-5).

Tabelle 4-8: Maximale Zugfestigkeitsreserve [MPa] mit korrespondierender Temperatur [°C] für die Mischgut-Varianten AC 32 T S

Variante	Rejuvenator	Zugabeanteil AG [M.-%]	Zugfestigkeitsreserve [MPa]	Temperatur [°C]
V1	-	0	4,59	1,4
V2	R 8	50	3,91	-1,7
V3		80		
V4	R 3	50	4,00	-1,3
V5		80	4,66	-5,1
V6	R 1	50	3,86	-4,6
V7		80	3,78	-6,6

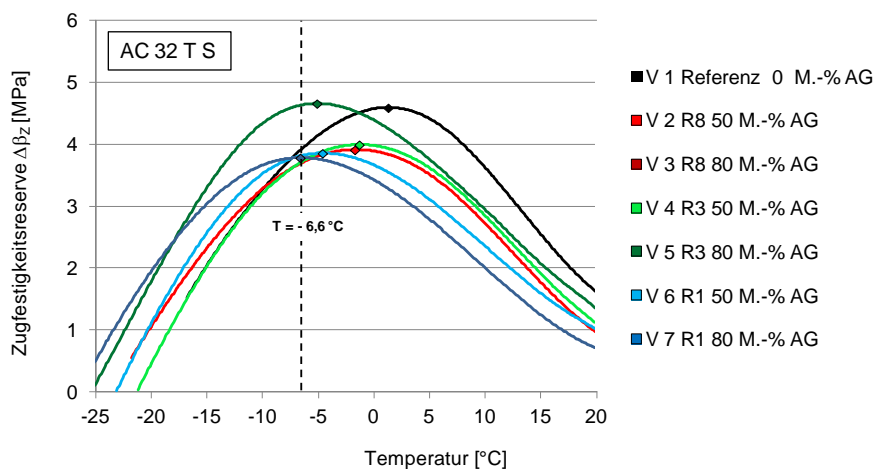


Abbildung 4-4: Verlauf der Zugfestigkeitsreserven für die Mischgut-Varianten AC 32 T S mit eingezeichneter Bezugstemperatur (gestrichelte Linie bei -6,6 °C für Variante V7).

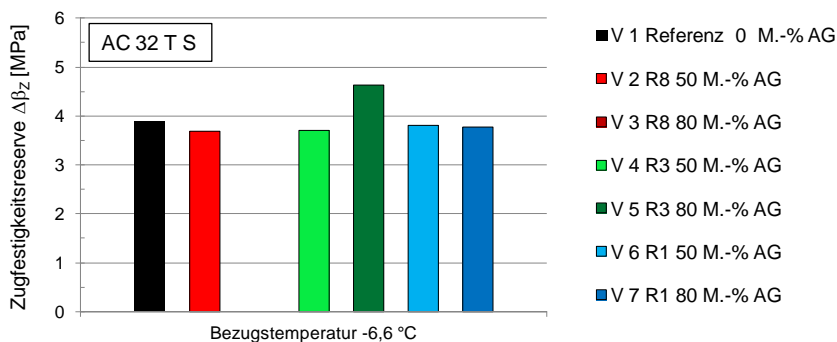


Abbildung 4-5: Zugfestigkeitsreserve unter Variation des Zugabeanteils des Asphaltgranulates und der eingesetzten Rejuvenatoren unter Verwendung der ermittelten Bezugstemperatur von -6,6 °C.

4.3.2.3 Steifigkeit

Für alle Asphalttragschicht-Varianten liegen Ergebnisse zu den Steifigkeitsmoduln und zum Ermüdungswiderstand aus Spaltzug-Schwellversuchen gemäß AL Sp-Asphalt 09 vor.

Die bei den Prüftemperaturen +20, +10, 0, und -10 °C und bei einer Prüffrequenz von 10 Hz ermittelten Steifigkeitsmoduln sind in Tabelle 4-9 angegeben. Abbildung 4-6 gibt die Ergebnisse grafisch wieder.

Tabelle 4-9: Ergebnisse der Steifigkeitsprüfungen für die Mischgut-Varianten AC 32 T S mittels Spaltzug-Schwellversuch bei einer Prüffrequenz von 10 Hz

Variante	Rejuvenator	Zugabeanteil AG [M.-%]	Steifigkeitsmodul [MPa] @ Temperatur[°C]			
			20	10	0	-10
V1	-	0	12308	19334	24887	29873
V2	R 8	50	12039	17897	23824	28726
V3		80	-	-	-	-
V4	R 3	50	12527	18607	24506	28769
V5		80	12580	17647	23197	27940
V6	R 1	50	12247	15379	22163	29232
V7		80	9603	14562	20382	27134

Tendenziell werden für die Referenzvariante V1 geringfügig höhere Steifigkeitsmoduln im Vergleich zu jenen mittels Rejuvenatoren hergestellten Mischgut-Varianten festgestellt.

Unter Verwendung von Gleichung 3-11 und unter Berücksichtigung aller Prüffrequenzen zur Ermittlung des Steifigkeitsmoduls (gemäß AL Sp-Asphalt 09 sind mindestens 3 verschiedene Belastungsfrequenzen zwischen 0,1 und 10 Hertz zu wählen; hier: 0,1, 1, 5 und 10 Hertz) werden die in Tabelle 4-10 angegebenen Regressionsparameter der Sigmoidfunktion je Asphalttragschicht-Variante erhalten.

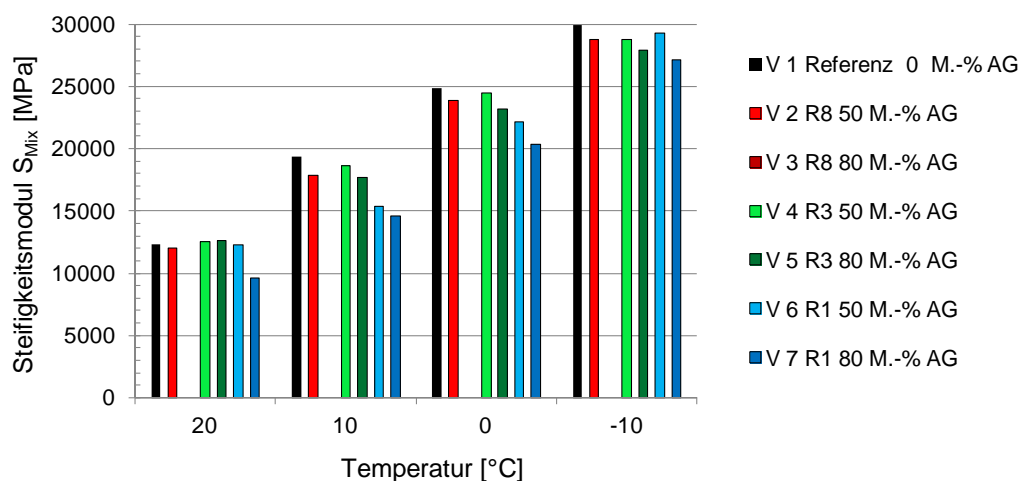


Abbildung 4-6: Ergebnisse der Steifigkeitsprüfungen für die Mischgut-Varianten AC 32 T S mittels Spaltzug-Schwellversuch bei einer Prüffrequenz von 10 Hertz.

Tabelle 4-10: Regressionsparameter y_0 , w , x_0 , z der Sigmoidfunktionen der Mischgut-Varianten AC 32 T S

Variante	Rejuvenator	Zugabeanteil AG [M.-%]	Regressionsparameter			
			y_0	w	x_0	z
V1	-	0	-6604,01	42415	1,36	2,19
V2	R 8	50	-5030,71	40496	1,84	2,14
V3		80	-	-	-	-
V4	R 3	50	-2047,08	34428	1,64	1,69
V5		80	-5919,39	40831	1,64	2,26
V6	R 1	50	-4598,49	50011	3,29	2,57
V7		80	-4475,44	50944	3,88	2,76

Der Steifigkeitsverlauf über die Temperatur am Beispiel der Asphalttragschicht-Varianten mit 50 M.-% Asphaltgranulat ist in Abbildung 4-7 dargestellt. Die Varianten mit einem Zugabeanteil von 80 M.-% Asphaltgranulat zeigt Abbildung 4-8. Extrapolierte Bereiche sind in grauer Farbe gekennzeichnet.

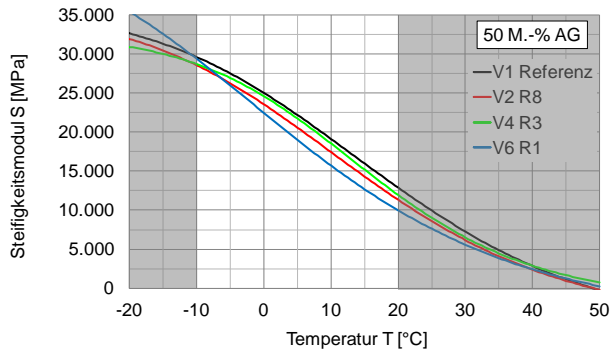


Abbildung 4-7: Steifigkeitsverlauf in Abhängigkeit von der Temperatur am Beispiel der Mischgut-Varianten AC 32 T S mit 50 M.-% Asphaltgranulat.

Es zeigen sich annähernd gleiche Verläufe für die Steifigkeit der Asphalttragschicht-Varianten V1 und V4. Variante V2 weist einen parallelen Versatz im Temperaturbereich von 20 bis -10 °C zur Variante V1 auf (geringere Steifigkeitsmoduln), Variante V6 weist über einen weiten Temperaturbereich den geringsten Steifigkeitsverlauf auf.

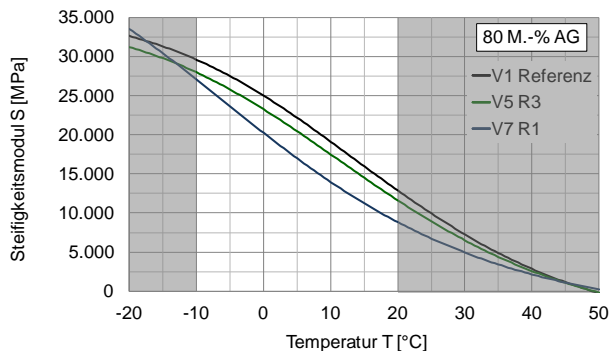


Abbildung 4-8: Steifigkeitsverlauf in Abhängigkeit von der Temperatur am Beispiel der Mischgut-Varianten AC 32 T S mit 80 M.-% Asphaltgranulat.

Für die Asphalttragschicht-Varianten mit 80 M.-% Asphaltgranulat ist ein ähnliches Verhalten zu jenen mit 50 M.-% Asphaltgranulat feststellbar, jedoch mit einer stärkeren Ausprägung, d. h. die Varianten zeigen geringere Steifigkeiten.

4.3.2.4 Ermüdungswiderstand

Die Ergebnisse zum Ermüdungsverhalten der Mischgut-Varianten AC 32 T S für die Prüftemperatur +20 °C und für eine Prüffrequenz von 10 Hz sind in Tabelle 4-11 wiedergegeben. Die Ermüdungsfunktionen der im Labor hergestellten Asphalttragschicht-Varianten erreichen Bestimmtheitsmaße größer 90 % (Mindestanforderung für Asphalttragschichten gem. AL Sp-Asphalt 09 entspricht 80 %; vgl. Tabelle 3-6).

Tabelle 4-11: Regressionsparameter C_1 , C_2 und Bestimmtheitsmaße R^2 der Ermüdungsfunktionen aus dem Spaltzug-Schwellversuch je Mischgut-Variante AC 32 T S

Variante	Rejuvenator	Zugabeanteil AG [M.-%]	Regressionsparameter [-]		R^2 [%]
			C_1	C_2	
V1	-	0	2,098	-3,563	93
V2	R 8	50	1,162	-3,577	94
V3		80	-	-	-
V4	R 3	50	2,186	-3,399	91
V5		80	1,465	-3,553	93
V6	R 1	50	1,788	-3,554	97
V7		80	2,486	-3,473	98

Die je Asphalt-Variante aus 9 Einzelversuchen ermittelten Ermüdungsfunktionen am Beispiel der Asphalttragschicht-Varianten mit 50 M.-% Asphaltgranulat sind in Abbildung 4-9 dargestellt, jene mit einem Zugabeanteil von 80 M.-% in Abbildung 4-10.

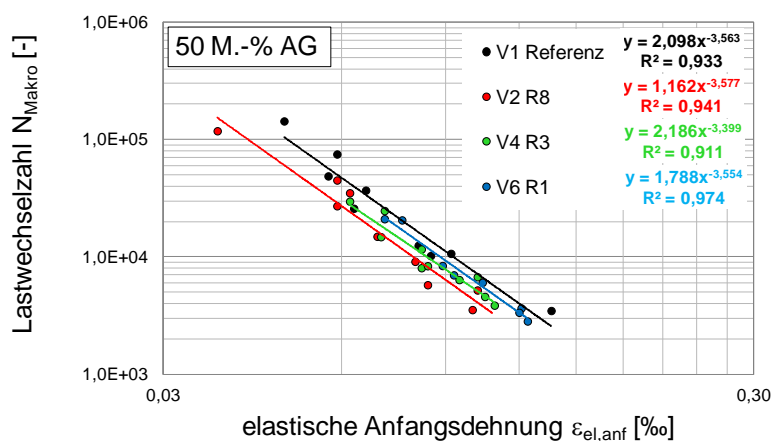


Abbildung 4-9: Mittels Spaltzug-Schwellversuch ermittelte Ermüdungsfunktionen am Beispiel der Mischgut-Varianten AC 32 T S mit 50 M.-% Asphaltgranulat bei 20 °C und 10 Hz.

Die dargestellten Ermüdungsfunktionen der Asphalttragschichtmischgut-Varianten weisen einen annähernd parallelen Verlauf auf (vgl. Regressionsparameter C_2 , der die Steigung des dargestellten Funktionsverlaufes angibt), wobei die Referenz-Variante V1 die vorteilhaftesten Eigenschaften aufweist, Variante V2 die im Vergleich schlechtesten.

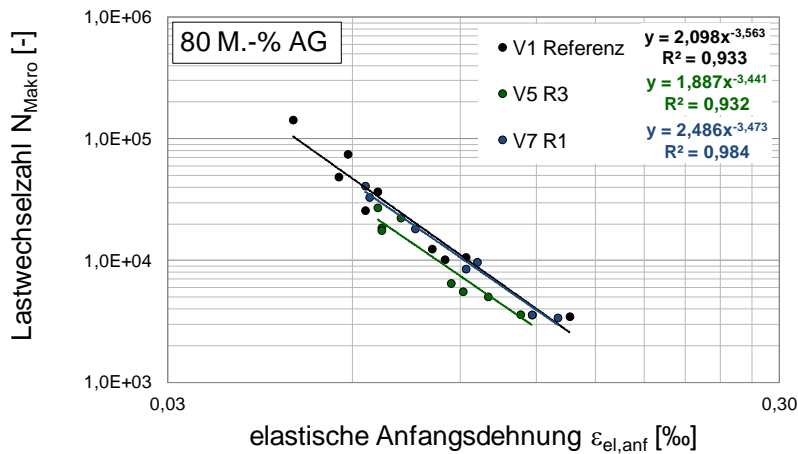


Abbildung 4-10: Mittels Spaltzug-Schwellversuch ermittelte Ermüdungsfunktionen am Beispiel der Mischgut-Varianten AC 32 T S mit 80 M.-% Asphaltgranulat bei 20 °C und 10 Hz.

Für die Variante V7 (R1) mit 80 M.-% Asphaltgranulat ist die Ermüdungsfunktionen annähernd deckungsgleich mit der Referenz ohne Einsatz von Asphaltgranulat. Variante V5 (R3) weist einen parallelen Versatz auf und damit verbunden schlechtere Ermüdungseigenschaften.

Die Auswirkungen der eingesetzten Rejuvenatoren auf das Mischgut hinsichtlich des Ermüdungsverhaltens mittels Spaltzug-Schwellversuch bei variierenden Zugabeanteilen von Asphaltgranulat kann Abbildung 4-11 entnommen werden.

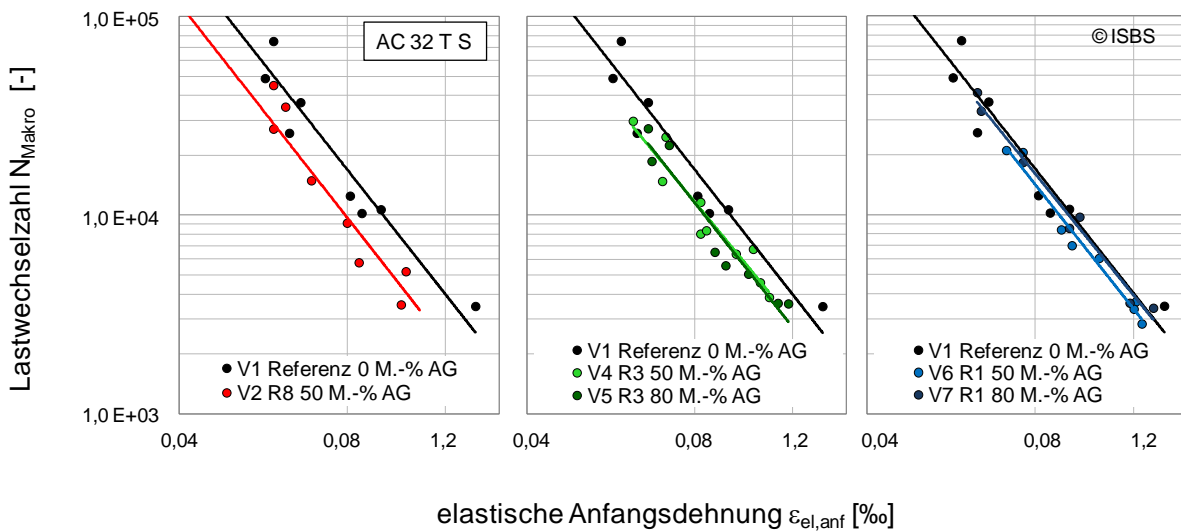


Abbildung 4-11: Ermüdungsfunktionen für die Mischgut-Varianten AC 32 T S unter Variation des Rejuvenators (R8, links; R3, Mitte; R1, rechts) und der Zugabeanteile von Asphaltgranulat (0, 50 und 80 M.-% AG).

Die Referenzvariante V1 ohne Zugabe von Asphaltgranulat erzielt über den betrachteten Dehnungsbereich (0,04 – 1,3 ‰) die höchsten Lastwechselzahlen. Tendenziell werden für das bei Einsatz des Rejuvenators R8 hergestellte Mischgut die geringsten Lastwechselzahlen festgestellt. Bei Einsatz des Rejuvenators R1 können annähernd vergleichbare

Ermüdungseigenschaften gegenüber der Referenz erzielt werden, und zwar unabhängig vom Zugabeanteil des Asphaltgranulats.

Insbesondere die Betrachtung der mittels des Rejuvenators R3 hergestellten Asphalttragschicht-Varianten V4 und V5 zeigt, das unabhängig vom Zugabeanteil von Asphaltgranulat annähernd identische Ermüdungseigenschaften im Labor abgeleitet werden können.

4.4 Asphaltbinderschicht-Varianten AC 22 B S (Mischgut-Variante 2)

4.4.1 Zusammensetzung

Die Korngrößenverteilungen der hergestellten Mischgut-Varianten AC 22 B S sind anhand der Siebdurchgänge in Tabelle 4-12 angegeben. Abbildung 4-12 zeigt die angestrebte und die erreichten Korngrößenverteilungen im Vergleich mit dem zulässigen Sieblinienbereich gemäß TL Asphalt-StB 07. Die Variante V11 (60 M.-% AG) unter Verwendung des Rejuvenators R8 wurde nicht umgesetzt (analoge Begründung wie bei Variante V3, sh. Kapitel 4.3.1).

Tabelle 4-12: Zusammensetzung der hergestellten Mischgut-Varianten AC 22 B S bei Warmzugabe des Asphaltgranulats (Mittelwerte) in Abhängigkeit vom eingesetzten Rejuvenator und vom Zugabeanteil an Asphaltgranulat

Korn- durch- messer [mm]	Siebdurchgang [M.-%]						
	0 M.-% AG	40 M.-% AG			60 M.-% AG		
	Referenz (V8)	R8 (V9)	R3 (V11)	R1 (V13)	R8 (V10)	R3 (V12)	R1 (V14)
31,5	100,0	100,0	100,0	100,0	-	100,0	100,0
22,4	95,8	99,2	98,0	97,9	-	100,0	99,0
16	74,3	83,8	79,9	77,7	-	83,6	81,9
11,2	65,5	70,3	65,8	64,9	-	67,8	66,6
8	56,1	59,5	54,5	55,6	-	55,6	52,6
5,6	46,8	48,9	44,6	45,9	-	44,8	41,3
2	30,6	27,2	24,1	25,8	-	22,9	21,5
1	22,1	20,3	17,8	18,8	-	17,7	16,4
0,25	14,0	12,8	11,3	12,0	-	11,7	10,8
0,125	11,0	10,2	9,1	9,6	-	9,6	8,9
0,063	8,5	8,1	7,4	7,7	-	8,1	7,6

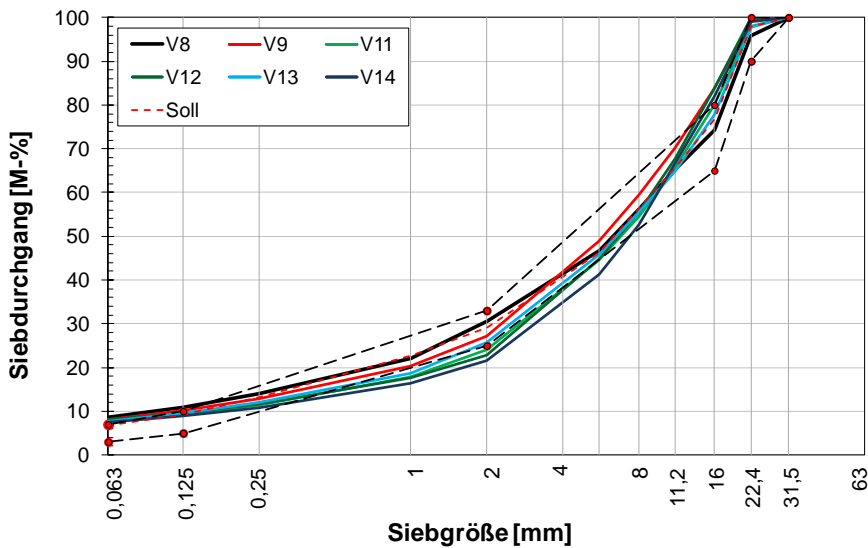


Abbildung 4-12: Mittlere Korngrößenverteilungen (Kontrollprüfung) für die Asphalttragschicht-Varianten AC 22 B S.

Die erzielten Korngrößenverteilungen entsprechen weitestgehend der angestrebten Soll-Sieblinie. Tabelle 4-13 fasst die Ergebnisse der Überprüfungen für die Mischgut-Varianten AC 22 B S zusammen.

Tabelle 4-13: Kontrollprüfungsergebnisse für die Mischgut-Varianten AC 22 B S

Kenngröße	Mischgut-Variante						
	0 M.-% AG	40 M.-% AG			60 M.-% AG		
	Referenz (V8)	R8 (V9)	R3 (V11)	R1 (V13)	R8 (V10)	R3 (V12)	R1 (V14)
Bindemittelgehalt B [M.-%]	4,2	4,3	4,1	4,3	-	4,1	4,1
Rohdichte ρ_m [g/cm ³]	2,704	2,656	2,617	2,650	-	2,625	2,618
Erweichungspunkt EP _{RuK} [°C]	59,2	63,6	66,0	65,8	-	69,4	69,6

4.4.2 Performance Eigenschaften

4.4.2.1 Verformungswiderstand

In Tabelle 4-14 sind die Ergebnisse aus dem Einaxialen Druck-Schwellversuch für die Mischgut-Varianten AC 22 B S angegeben. Abbildung 4-13 gibt die Ergebnisse grafisch wieder.

Tabelle 4-14: Ergebnisse der Verformungsprüfung der Mischgut-Varianten AC 22 B S aus dem Einaxialen Druck-Schwellversuch gem. TP Asphalt, Teil 25 B 1 (Mittelwerte)

Variante	Rejuvenator	Zugabeanteil AG [M.-%]	Anzahl Belastungszyklen [-]	Dehnung im Wendepunkt / bei Versuchsende [‰]	Dehnungsrate im Wendepunkt / bei Versuchsende [‰ · 10 ⁻⁴ /n]
V8	-	0	10000	9,1	1,4
V9	R8	40	10000	9,7	1,3
V10		60	-	-	-
V11	R3	40	10000	11,3	2,5
V12		60	10000	9,1	0,9
V13	R1	40	10000	9,7	1,2
V14		60	10000	11,8	2,3

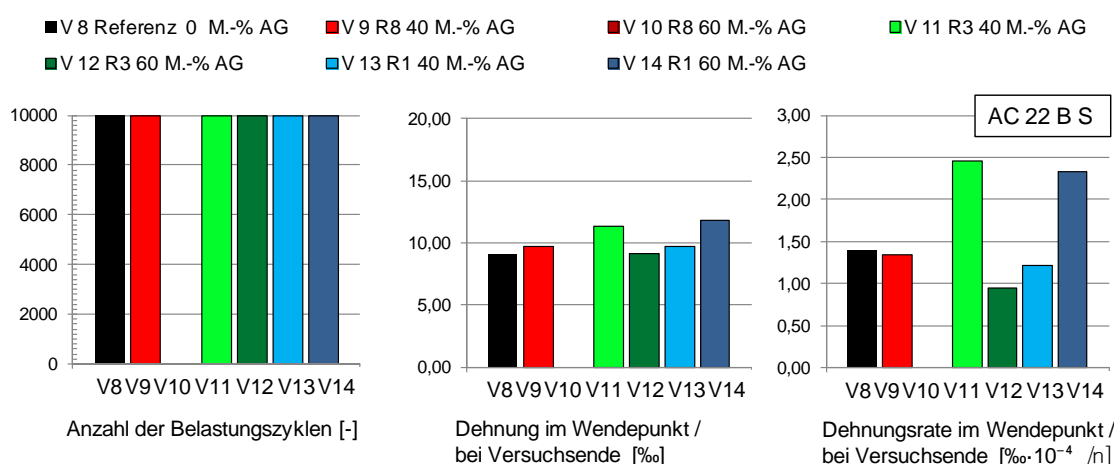


Abbildung 4-13: Ergebnisse der Verformungsprüfung der Mischgut-Varianten AC 22 B S mittels Einaxialem Druck-Schwellversuch gem. TP Asphalt, Teil 25 B 1.

Gemäß TP Asphalt, Teil 25 B 1 ist das Versuchsergebnis die Dehnungsrate im Wendepunkt bzw. am Versuchsende. Bei allen Asphaltbinderschicht-Varianten wird die maximale Anzahl an Belastungszyklen gemäß den TP Asphalt von 10.000 bis Versuchsende ohne Ausbildung eines Wendepunktes erreicht. Aus Abbildung 4-13 kann folgende Reihung von geringer (vorteilhafter) zu erhöhter Dehnungsrate abgeleitet werden:

$$V12 > V13 > V9 > V8 > V14 > V11$$

4.4.2.2 Widerstand gegen Kälterissbildung

In Tabelle 4-15 sind die aus dem Abkühlversuch ermittelten Bruchtemperaturen mit den korrespondierenden Bruchspannungen der unterschiedlich hergestellten Asphaltbinderschichtmischgut-Varianten AC 22 B S zusammengestellt. Abbildung 4-14 gibt die Ergebnisse grafisch wieder.

Tabelle 4-15: Bruchtemperatur [°C] mit korrespondierender Bruchspannung [MPa] aus den Abkühlversuchen an den Mischgut-Varianten AC 22 B S

Variante	Rejuvenator	Zugabeanteil AG [M.-%]	Bruchtemperatur [°C]	Bruchspannung [MPa]
V8	-	0	4,228	-23,5
V9	R8	40	4,712	-26,4
V10		60	-	-
V11	R3	40	3,887	-26,2
V12		60	4,725	-26,5
V13	R1	40	4,769	-26,3
V14		60	4,367	-30,2

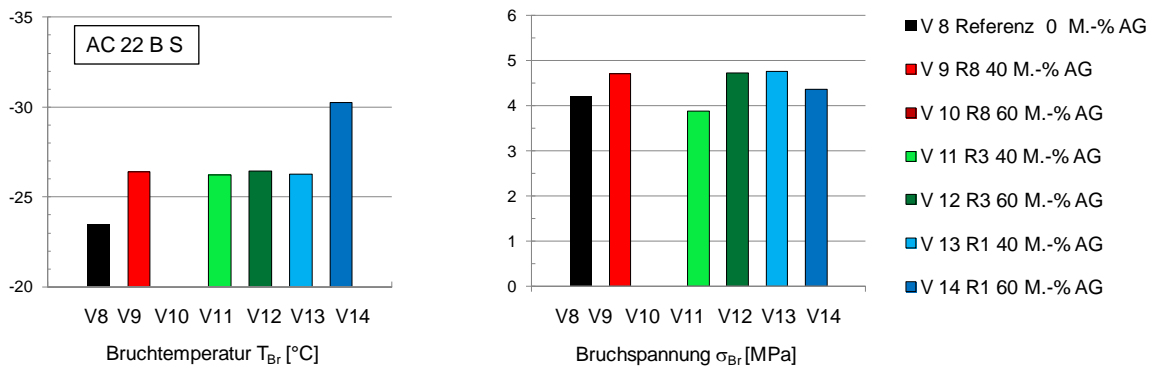


Abbildung 4-14: Bruchtemperaturen mit korrespondierenden Bruchspannungen aus den Abkühlversuchen an den Mischgut-Varianten AC 22 B S in Abhängigkeit vom Zugabeanteil an Asphaltgranulat und vom eingesetzten Rejuvenator.

Bezüglich der Bruchtemperatur ergeben sich bei einem Zugabeanteil von 40 M.-% Asphaltgranulat vergleichbare Kälteeigenschaften bei Verwendung aller zum Einstaz kommenden Rejuvenatoren. Die Bruchtemperaturen sind im Vergleich zur Referenz ausnahmslos geringer (vorteilhaft).

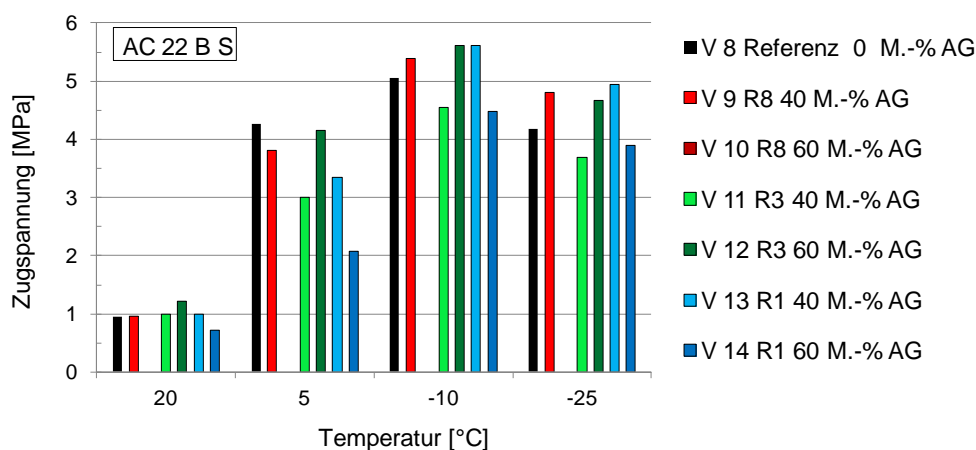
Der Einsatz des Rejuvenators R1 bewirkt eine Verringerung der Bruchtemperatur von 6,7 °C im Vergleich zur Referenz, wohingegen der Einsatz des Rejuvenators R3 keine Auswirkungen hinsichtlich der Bruchtemperatur aufweist.

Die Größenordnung der Bruchspannung liegt für alle Varianten in einer vergleichbaren Größenordnung, wobei alle Varianten mit Ausnahme der Variante V11 (R3) höhere Bruchspannungen als die Referenzvariante aufweisen.

Die Ergebnisse der Kältezugsversuche für die Mischgut-Varianten AC 22 B S sind in Tabelle 4-16 zusammengestellt. In Abbildung 4-15 sind die Ergebnisse grafisch dargestellt.

Tabelle 4-16: Ergebnisse der Kältezugsprüfungen für die Mischgut-Varianten AC 22 B S.

Variante	Rejuvenator	Zugabeanteil AG [M.-%]	Zugspannung [MPa]			
			@ +20 °C	@ +5 °C	@ -10 °C	@ -25 °C
V8	-	0	0,952	4,259	5,052	4,175
V9	R8	40	0,960	3,804	5,388	4,811
V10		60	-	-	-	-
V11	R3	40	0,996	3,010	4,555	3,695
V12		60	1,213	4,155	5,616	4,667
V13	R1	40	0,990	3,354	5,616	4,949
V14		60	0,721	2,083	4,285	3,708

**Abbildung 4-15:** Ergebnisse der Kältezugsprüfungen an den Mischgut-Varianten AC 22 B S (Mittelwerte).

Die Varianten V11 und V14 weisen die geringsten Zugfestigkeiten auf. Unter Ausschluss dieser beiden Varianten kann bei den Prüftemperaturen -10 °C und -25 °C festgestellt werden, dass für die mit Rejuvenator hergestellten Mischgut-Varianten höhere Zugspannungen als für die Referenzvarianten erzielt werden.

Aus den Ergebnissen der Abkühl- und der Kältezugsprüfung wird die Zugfestigkeitsreserve je Asphaltbinderschichtmischgut-Variante ermittelt (vgl. Tabelle 4-17).

Tabelle 4-17: Maximale Zugfestigkeitsreserven [MPa] mit korrespondierenden Temperaturen [°C] für die Mischgut-Varianten AC 22 B S

Variante	Rejuvenator	Zugabeanteil AG [M.-%]	Zugfestigkeitsreserve [MPa]	Temperatur [°C]
V8	-	0	4,58	-1,1
V9	R8	40	4,53	-4,8
V10		60	-	-
V11	R3	40	3,70	-5,4
V12		60	4,72	-3,8
V13	R1	40	4,44	-6,9
V14		60	3,60	-9,0

Der zuvor festgestellte Einfluss der Varianten V11 und V14 auf die Kältezugsfestigkeiten spiegelt sich in den ermittelten maximalen Zugfestigkeitsreserven wieder (nachteilig).

Den jeweiligen Verlauf der Zugfestigkeitsreserve in Abhängigkeit von der Temperatur zeigt Abbildung 4-16 für alle Asphaltbinderschicht-Varianten.

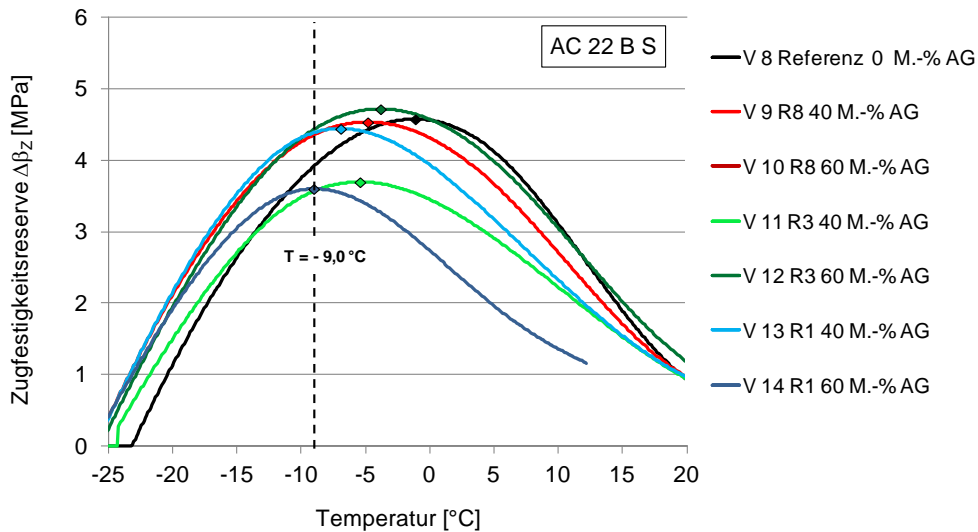


Abbildung 4-16: Verlauf der Zugfestigkeitsreserven für die Mischgut-Varianten AC 22 B S (Bezugstemperatur als gestrichelte Linie bei $-8,8\text{ °C}$ für Variante V14).

Die Variante V14 weist bei der maximalen Zugfestigkeitsreserve im Vergleich die geringste Temperatur auf ($T = -9,0\text{ °C}$), welche (analog zu Kapitel 4.3.2.2) in der Folge als Bezugstemperatur gewählt wird. Je Zugabeanteil an Asphaltgranulat und eingesetztem Rejuvenator sind in Abbildung 4-17 die auf diese Bezugstemperatur bezogenen Zugfestigkeitsreserven der Varianten gegenübergestellt.

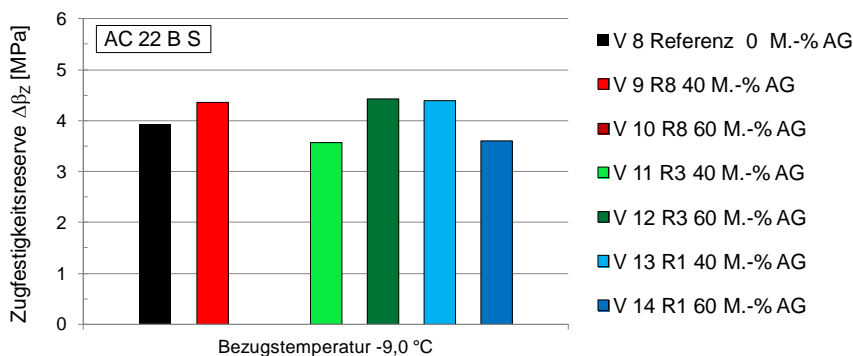


Abbildung 4-17: Zugfestigkeitsreserven bei einer Bezugstemperatur von $-9,0\text{ °C}$.

Die Variante V9, V12 und V13 weisen vergleichbare Zugfestigkeitsreserven bei einer Bezugstemperatur von $-9,0\text{ °C}$ auf und sind vorteilhaft gegenüber der Referenz. Die Varianten V11 und V14 weisen die nachteiligsten Zugfestigkeitsreserven auf.

4.4.2.3 Steifigkeit

Die bei den Prüftemperaturen +20, +10, 0, und -10 °C und bei einer Prüffrequenz von 10 Hz ermittelten Steifigkeitsmoduln für die Mischgut-Varianten AC 22 B S sind in Tabelle 4-18 angegeben. Abbildung 4-18 gibt die Ergebnisse grafisch wieder.

Tabelle 4-18: Ergebnisse der Steifigkeitsprüfungen für die Mischgut-Varianten AC 22 B S mittels Spaltzug-Schwellversuch bei einer Prüffrequenz von 10 Hz

Variante	Rejuvenator	Zugabeanteil AG [M.-%]	Steifigkeitsmodul [MPa] @ Temperatur[°C]			
			20	10	0	-10
V8	-	0	10822	16246	25129	30746
V9	R8	40	10784	15369	23155	28650
V10		60				
V11	R3	40	10616	14565	21726	28719
V12		60	8884	12621	17849	21705
V13	R1	40	8913	13174	20691	26924
V14		60	7032	9725	15914	22740

Tendenziell werden für die Referenzvariante V8 leicht erhöhte Steifigkeitsmoduln im Vergleich zu jenen mittels Rejuvenatoren hergestellten Mischgut-Varianten festgestellt. Unter Verwendung von Gleichung 3-11 und unter Berücksichtigung aller Prüffrequenzen werden die in Tabelle 4-19 angegebenen Regressionsparameter erhalten.

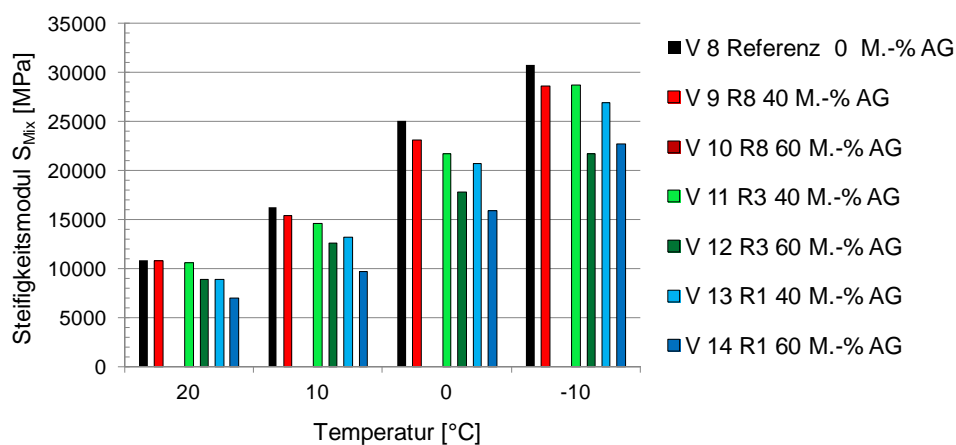


Abbildung 4-18: Ergebnisse der Steifigkeitsprüfungen an den Mischgut-Varianten AC 22 B S mittels Spaltzug-Schwellversuch bei einer Prüffrequenz von 10 Hertz.

Tabelle 4-19: Regressionsparameter y_0 , w , x_0 , z der Sigmoidfunktionen für die Mischgut-Varianten AC 22 B S

Variante	Rejuvenator	Zugabeanteil AG [M.-%]	Regressionsparameter			
			y_0	w	x_0	z
V8	-	0	453,87	33603	2,34	1,39
V9	R8	50	-2246,34	39123	2,68	1,93
V10		80	-	-	-	-
V11	R3	50	-2046,45	43663	3,36	2,17
V12		80	-1701,77	28582	2,38	1,92
V13	R1	50	-723,56	35828	3,08	1,81
V14		80	201,73	33556	3,94	1,80

Die Steifigkeitsverläufe in Abhängigkeit von der Temperatur am Beispiel der Asphaltbinderschicht-Varianten mit 40 M.-% Asphaltgranulat sind in Abbildung 4-19 dargestellt. Die Varianten mit einem Zugabeanteil von 60 M.-% Asphaltgranulat zeigt Abbildung 4-20. Extrapolierte Bereiche sind in grauer Farbe gekennzeichnet.

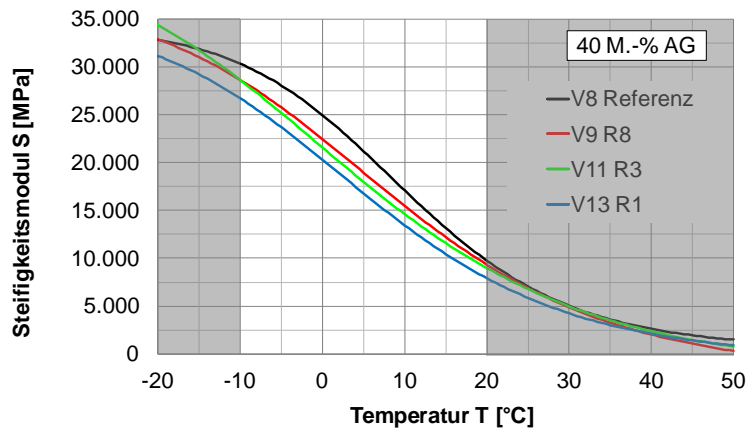


Abbildung 4-19: Steifigkeitsverlauf über die Temperatur am Beispiel der Mischgut-Varianten AC 22 B S mit 40 M.-% Asphaltgranulat.

Die Referenz V8 weist die höchsten Steifigkeiten auf. Für die Asphaltbinderschicht-Varianten V9 und V11 zeigen sich annähernd gleiche Verläufe mit geringeren Steifigkeiten zur Referenz. Variante V13 weist einen parallelen Versatz im Temperaturbereich von 20 bis -10 °C zu Variante V9 auf (geringere Steifigkeitsmoduln).

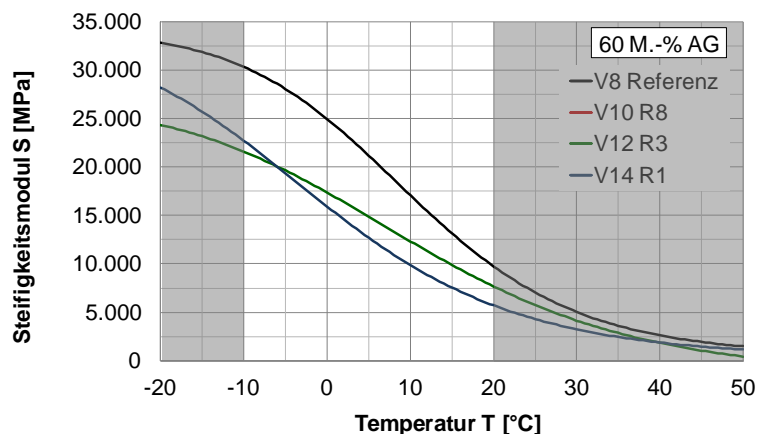


Abbildung 4-20: Steifigkeitsverlauf in Abhängigkeit von der Temperatur am Beispiel der Mischgut-Varianten AC 22 B S mit 60 M.-% Asphaltgranulat.

Für die Asphaltbinderschicht-Varianten mit 60 M.-% Asphaltgranulat ist ein deutlich abweichender Verlauf zu jenen mit 40 M.-% Asphaltgranulat feststellbar. Die Erhöhung des Zugabeanteils von Asphaltgranulat bewirkt eine Verringerung des Steifigkeitsmoduls (vgl. Tabelle 4-18).

4.4.2.4 Ermüdungswiderstand

Die Ergebnisse zum Ermüdungsverhalten der Mischgut-Varianten AC 22 B S für die Prüftemperatur +20 °C und für eine Prüffrequenz von 10 Hz sind in Tabelle 4-20 wiedergege-

ben. Die Ermüdungsfunktionen der im Labor hergestellten Asphaltbinderschicht-Varianten erreichen Bestimmtheitsmaße größer 90 % entsprechend den Mindestanforderung für Asphaltbinderschichten gem. AL Sp-Asphalt 09; vgl. Tabelle 3-6.

Tabelle 4-20: Regressionsparameter C_1 , C_2 und Bestimmtheitsmaße R^2 der Ermüdungsfunktionen aus dem Spaltzug-Schwellversuch je Mischgut-Variante AC 22 B S

Variante	Rejuvenator	Zugabeanteil AG [M.-%]	Regressionsparameter [-]		R^2 [%]
			C_1	C_2	
V8	-	0	2,350	-3,325	98
V9	R8	40	1,600	-3,621	94
V10		60	-	-	-
V11	R3	40	3,501	-3,226	96
V12		60	4,273	-3,277	92
V13	R1	40	1,930	-3,510	94
V14		60	3,062	-3,374	93

Die Ermüdungsfunktionen am Beispiel der Asphaltbinderschicht-Varianten mit 40 M.-% Asphaltgranulat sind in Abbildung 4-21 dargestellt, jene mit einem Zugabeanteil von 60 M.-% in Abbildung 4-22.

Die dargestellten Ermüdungsfunktionen der Asphaltbinderschichtmischgut-Varianten verlaufen annähernd parallel (vgl. Regressionsparameter C_2 , der die Steigung des dargestellten Funktionsverlaufes angibt), wobei die Variante V9 die vorteilhaftesten Eigenschaften aufweist, die Referenz Variante V8 die im Vergleich schlechtesten.

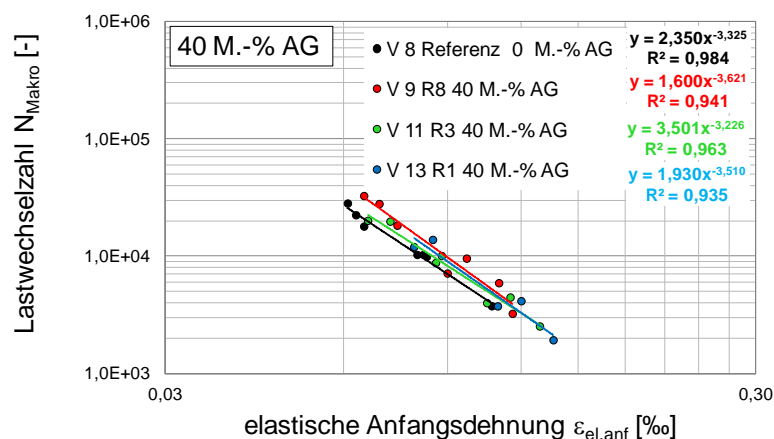


Abbildung 4-21: Mittels Spaltzug-Schwellversuch ermittelte Ermüdungsfunktionen am Beispiel der Mischgut-Varianten AC 22 B S mit 40 M.-% Asphaltgranulat bei 20 °C und 10 Hz.

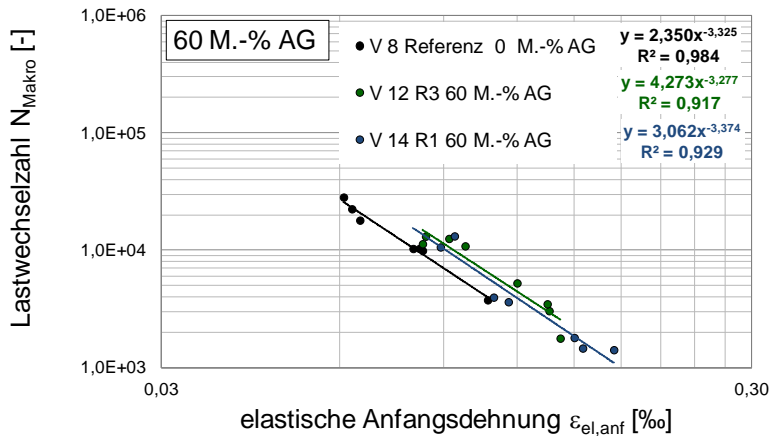


Abbildung 4-22. Mittels Spaltzug-Schwellversuch ermittelte Ermüdungsfunktionen am Beispiel der Mischgut-Varianten AC 22 B S mit 60 M.-% Asphaltgranulat bei 20 °C und 10 Hz.

Für die Varianten V12 (R3) und V14 (R1) mit 60 M.-% Asphaltgranulat zeigen die Ermüdungsfunktionen vergleichbare Verläufe. Die Referenz weist die geringsten Ermüdungswiderstände auf. Bei gleicher Dehnung resultieren geringere zulässige Lastwechsel (Regressionsparameter C_1 , weist den geringsten Faktor auf).

Die Auswirkungen der eingesetzten Rejuvenatoren auf das Mischgut hinsichtlich des Ermüdungsverhaltens bei variierenden Zugabeanteilen von Asphaltgranulat können Abbildung 4-23 entnommen werden.

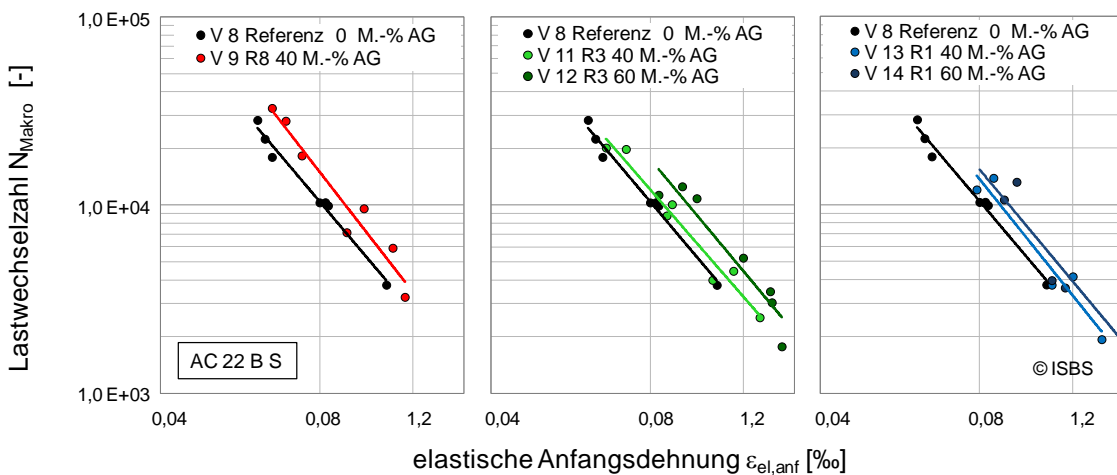


Abbildung 4-23: Ermüdungsfunktionen für die Mischgut-Varianten AC 22 B S unter Variation des Rejuvenators (R8, links; R3, Mitte; R1, rechts) und der Zugabeanteile von Asphaltgranulat (0, 40 und 60 M.-% AG).

Für die Referenzvariante V1 ohne Zugabe von Asphaltgranulat werden über den betrachteten Dehnungsbereich (0,04 – 1,3 ‰) die geringsten Lastwechselzahlen beobachtet. Tendenziell werden bei Einsatz der Rejuvenatoren R3 und R1 keine miteinander vergleichbaren Ermüdungsfunktionen bei unterschiedlichen Zugabeanteilen von Asphaltgranulat erzielt.

4.5 Asphaltdeckschicht-Varianten SMA 11 S (Mischgut-Variante 3)

4.5.1 Zusammensetzung

Die Korngrößenverteilungen der hergestellten Mischgut-Varianten SMA 11 S sind anhand der Siebdurchgänge in Tabelle 4-21 angegeben. Abbildung 4-24 zeigt die angestrebte Korngrößenverteilung und die erreichten Korngrößenverteilungen im Vergleich mit dem zulässigen Sieblinienbereich gemäß TL Asphalt-StB 07.

Tabelle 4-21: Zusammensetzung der hergestellten Mischgut-Varianten SMA 11 S bei Warmzugabe des Asphaltgranulats (Mittelwerte) in Abhängigkeit des eingesetzten Rejuvenators und des Zugabeanteils des Asphaltgranulates

Korn-durch-messer [mm]	Siebdurchgang [M.-%]						
	0 M.-% AG	20 M.-% AG			40 M.-% AG		
	Referenz (V15)	R8 (V16)	R3 (V18)	R1 (V20)	R8 (V17)	R3 (V19)	R1 (V21)
31,5	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
22,4	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
16	99,7	99,7	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
11,2	95,9	95,6	94,3	95,9	93,2	93,5	95,2
8	60,7	60,6	62,0	60,8	58,4	56,4	60,7
5,6	41,9	41,6	43,5	41,5	40,2	38,9	40,8
2	25,8	25,9	27,9	26,5	25,4	24,3	24,5
1	20,3	20,5	22,3	21,0	20,2	19,6	19,4
0,25	15,0	14,9	15,7	15,1	14,6	14,3	14,3
0,125	13,1	12,9	13,4	13,0	12,6	12,4	12,4
0,063	11,6	11,6	12,1	11,4	11,1	11,1	11,1

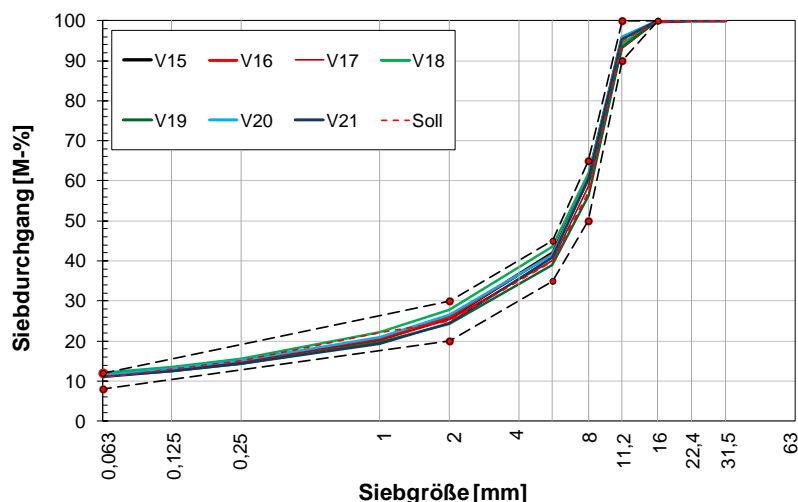


Abbildung 4-24: Mittlere Korngrößenverteilungen (Kontrollprüfung) für die Asphaltdeckschicht-Varianten SMA 11 S.

Die erzielten Korngrößenverteilungen entsprechen der angestrebten Soll-Sieblinie. Tabelle 4-22 fasst die Ergebnisse der Überprüfungen für die Mischgut-Varianten SMA 11 S zusammen.

Tabelle 4-22: Kontrollprüfungsergebnisse für die Mischgut-Varianten SMA 11 S

Kenngröße	Mischgut-Variante						
	0 M.-% AG	20 M.-% AG			40 M.-% AG		
	Referenz (V15)	R8 (V16)	R3 (V18)	R1 (V20)	R8 (V17)	R3 (V19)	R1 (V21)
Bindemittelgehalt B [M.-%]	6,6	6,7	6,7	6,6	6,7	6,7	6,6
Rohdichte ρ_m [g/cm ³]	2,649	2,558	2,602	2,649	2,558	2,602	2,649
Erweichungspunkt EP _{Ruk} [°C]	64,8	61,2	62,4	64,8	61,2	62,4	64,8

4.5.2 Performance-Eigenschaften

4.5.2.1 Verformungswiderstand

In Tabelle 4-23 sind die Ergebnisse aus dem Einaxialen Druck-Schwellversuch für die Mischgut-Varianten SMA 11 S angegeben. Abbildung 4-25 gibt die Ergebnisse grafisch wieder.

Tabelle 4-23: Ergebnisse der Verformungsprüfung an den Mischgut-Varianten SMA 11 S mittels Einaxialem Druck-Schwellversuch gem. TP Asphalt, Teil 25 B 1 (Mittelwerte)

Variante	Rejuvenator	Zugabeanteil AG [M.-%]	Anzahl Belastungszyklen [-]	Dehnung im Wendepunkt / bei Versuchsende [‰]	Dehnungsrate im Wendepunkt / bei Versuchsende [‰ · 10 ⁻⁴ /n]
V15	-	-	10000,0	14,7	2,0
V16	R8	20	9320,7	16,3	4,8
V17		40	10000,0	21,3	2,6
V18	R3	20	9538,0	16,9	4,6
V19		40	10000,0	15,0	1,5
V20	R1	20	9518,7	16,7	4,5
V21		40	10000,0	14,6	1,8

■ V 15 Referenz 0 M.-% AG
 ■ V 16 R8 20 M.-% AG
 ■ V 17 R8 40 M.-% AG
 ■ V 18 R3 20 M.-% AG
■ V 19 R3 40 M.-% AG
 ■ V 20 R1 20 M.-% AG
 ■ V 21 R1 40 M.-% AG

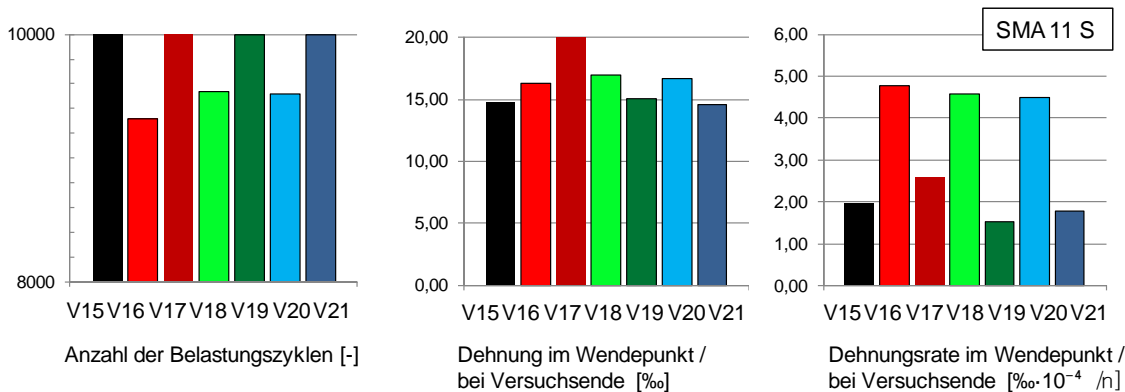


Abbildung 4-25: Ergebnisse der Verformungsprüfung der Mischgut-Varianten SMA 11 S mittels Einaxialem Druck-Schwellversuch gem. TP Asphalt, Teil 25 B 1.

Gemäß TP Asphalt, Teil 25 B 1 ist das Versuchsergebnis die Dehnungsrate im Wendepunkt bzw. am Versuchsende. Alle Asphaltdeckschicht-Varianten mit einem erhöhten Zugabeanteil von Asphaltgranulat (40 M.-%) erreichen die maximale Anzahl von Belastungszyklen gemäß den TP Asphalt von 10.000 bis Versuchsende ohne Ausbildung eines

Wendepunktes. Aus Abbildung 4-25 kann folgende Reihung von geringer (vorteilhafter) zu erhöhter Dehnungsrate abgeleitet werden:

$$V19 > V21 > V15 > V17 > V20 > V18 > V16$$

4.5.2.2 Widerstand gegen Kälterissbildung

In Tabelle 4-24 sind die aus den Abkühlversuchen ermittelten Bruchtemperaturen mit den korrespondierenden Bruchspannungen für die unterschiedlich hergestellten Asphaltdeckschichtmischgut-Varianten SMA 11 S zusammengestellt. Abbildung 4-26 gibt die Ergebnisse grafisch wieder.

Tabelle 4-24: Bruchtemperatur [°C] mit korrespondierender Bruchspannung [MPa] aus den Abkühlversuchen an den Mischgut-Varianten SMA 11 S

Variante	Rejuvenator	Zugabeanteil AG [M.-%]	Bruchtemperatur [°C]	Bruchspannung [MPa]
V15	-	0	-28,8	5,65
V16	R8	20	-27,7	5,08
V17		40	-30,7	5,08
V18	R3	20	-24,8	4,97
V19		40	-25,1	5,19
V20	R1	20	-27,2	4,67
V21		40	-28,2	5,31

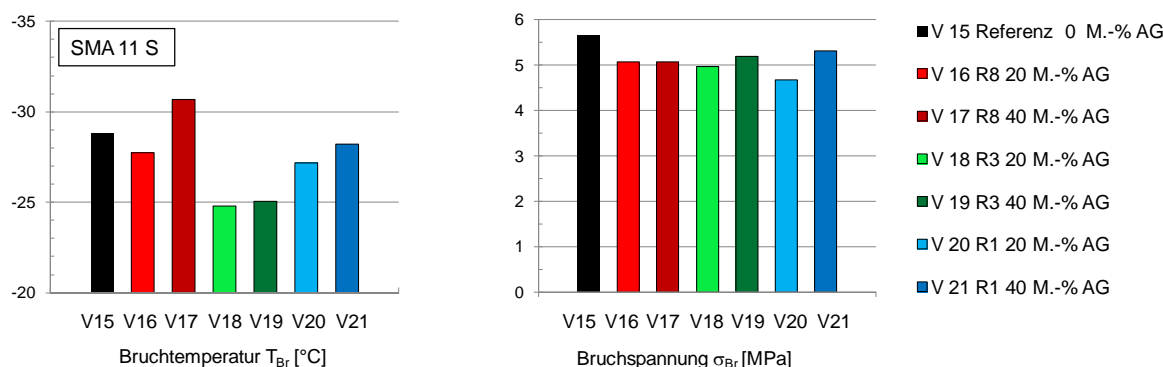


Abbildung 4-26: Bruchtemperaturen mit korrespondierenden Bruchspannungen aus den Abkühlversuchen an den Mischgut-Varianten SMA 11 S in Abhängigkeit vom Zugabeanteil an Asphaltgranulat und vom eingesetzten Rejuvenator.

Bezüglich der Bruchtemperatur ergeben sich Unterschiede hinsichtlich des eingesetzten Rejuvenators. So weisen die Varianten unter Verwendung des Rejuvenators R8 geringere Bruchtemperaturen auf (vorteilhaft) als jene für R1 gefolgt von R3.

Die Zunahme des Anteils an Asphaltgranulat von 20 auf 40 M.-% bewirkt tendenziell eine Verringerung der Bruchtemperatur. Insbesondere ist diese Tendenz für den Rejuvenator R8 feststellbar.

Die korrespondierenden Bruchspannungen liegen in einer vergleichbaren Größenordnung. Die Referenz weist hier die höchsten Bruchspannungen auf.

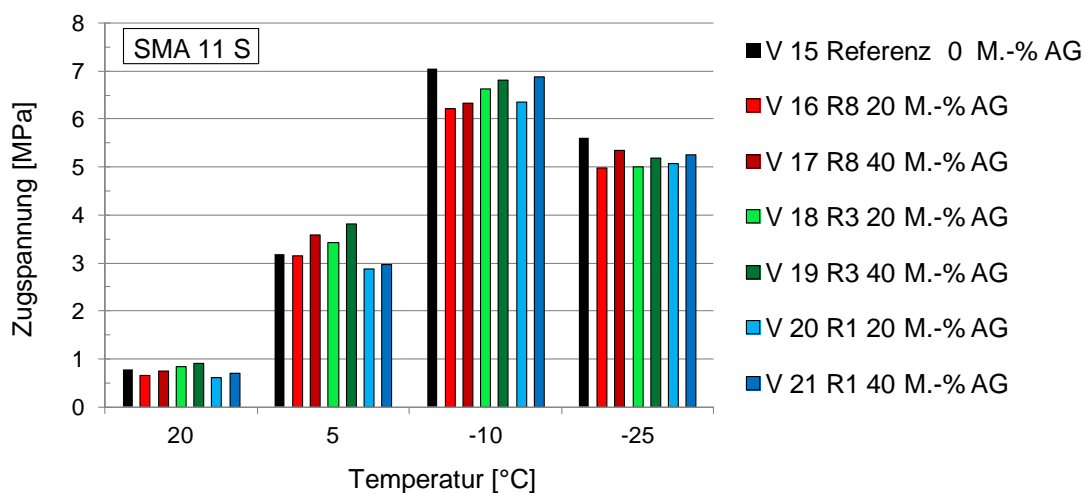
Die Ergebnisse der Kältezugsversuche für die SMA 11 S Varianten sind in Tabelle 4-25 zusammengestellt.

Tabelle 4-25: Ergebnisse der Kältezugsprüfungen für die Mischgut-Varianten SMA 11 S.

Variante	Rejuvenator	Zugabeanteil AG [M.-%]	Zugspannung [MPa]			
			@ +20 °C	@ +5 °C	@ -10 °C	@ -25 °C
V15	-	0	0,784	3,2	7,05	5,6
V16	R8	20	0,663	3,2	6,22	4,99
V17		40	0,744	3,6	6,32	5,348
V18	R3	20	0,833	3,4	6,63	4,999
V19		40	0,9	3,8	6,81	5,178
V20	R1	20	0,612	2,9	6,35	5,079
V21		40	0,699	3,0	6,89	5,256

In Abbildung 4-27 sind für die Mischgut-Varianten SMA 11 S die Ergebnisse aus den Kältezugsprüfungen bei den Temperaturen +20 °C, +5 °C, -10 °C und -25 °C dargestellt.

Die Referenz weist die höchsten Zugspannungen bei den Temperaturen von -10 °C und -25 °C auf. Bei den höheren Temperaturen von +5 und +20 °C weisen die Mischgut-Varianten unter Einsatz der Rejuvenatoren R8 und R3 tendenziell gleichwertige bis leicht verbesserte Kälteeigenschaften auf.

**Abbildung 4-27:** Ergebnisse der Kältezugsprüfungen an den Mischgut-Varianten SMA11 S (Mittelwerte).

Aus den Ergebnissen von Abkühl- und der Kältezugsprüfungen werden die Zugfestigkeitsreserven ermittelt (vgl. Tabelle 4-26).

Tabelle 4-26: Maximale Zugfestigkeitsreserve [MPa] mit korrespondierender Temperatur [°C] für die Mischgut-Varianten SMA 11 S

Variante	Rejuvenator	Zugabeanteil AG [M.-%]	Zugfestigkeitsreserve [MPa]	Temperatur [°C]
V15	-	0	5,88	-8,8
V16	R8	20	5,27	-8,3
V17		40	5,37	-8,2
V18	R3	20	5,40	-7,6
V19		40	5,58	-7,1
V20	R1	20	5,40	-9,0
V21		40	5,93	-9,3

Die Zugabe von Asphaltgranulat bewirkt bei Einsatz der Rejuvenatoren R8 und R3 eine geringfügige Erhöhung (nachteilig) der Temperatur bei der maximalen Zugfestigkeitsreserve im Vergleich zur Referenz. Bei Einsatz des Rejuvenators R1 resultieren vergleichbare Zugfestigkeitsreserven bei gleichen korrespondierenden Temperaturen im Vergleich zur Referenz.

Den jeweiligen Verlauf der Zugfestigkeitsreserve in Abhängigkeit von der Temperatur für alle Asphalttragschicht-Varianten zeigt Abbildung 4-28. Analog zu Kapitel 4.3.2.2 wird wieder eine Bezugstemperatur festgelegt; hier für Variante V21 mit $T = -9,3\text{ °C}$.

Je Zugabeanteil an Asphaltgranulat und eingesetztem Rejuvenator sind in Abbildung 4-28 die auf diese Bezugstemperatur bezogenen Zugfestigkeitsreserven der Varianten gegenübergestellt.

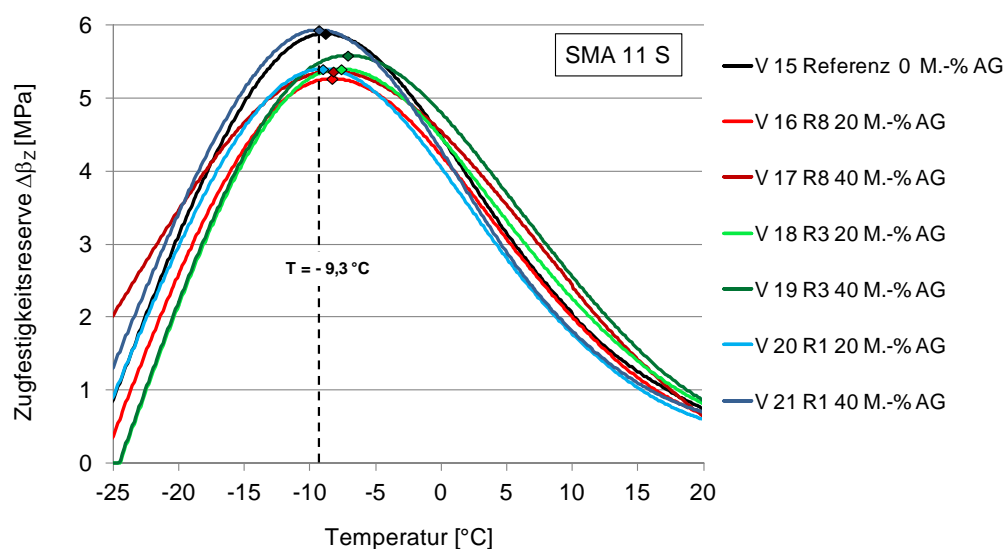


Abbildung 4-28: Verlauf der Zugfestigkeitsreserven für die Mischgut-Varianten SMA 11 S mit eingezeichneter Bezugstemperatur (gestrichelte Linie bei $-9,3\text{ °C}$ für Variante V21).

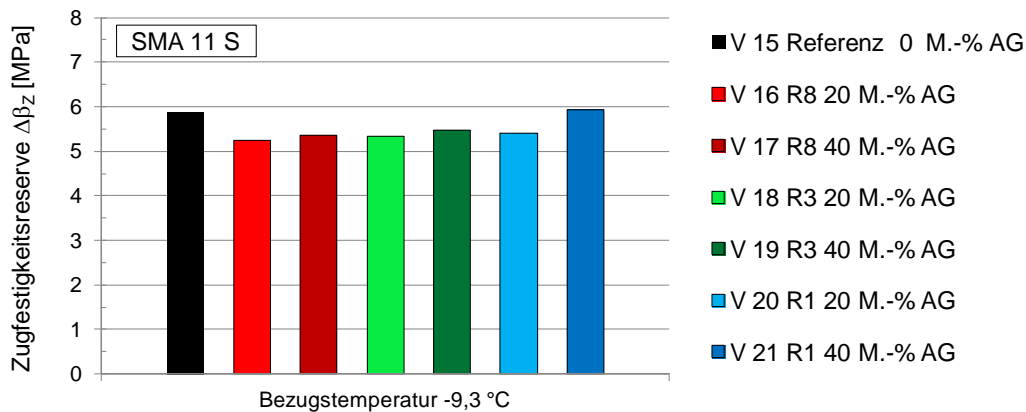


Abbildung 4-29: Zugfestigkeitsreserven bezogen auf eine Bezugstemperatur von -9,3 °C.

Bei Heranziehen der Bezugstemperatur von -9,3 °C zeigen die Referenzvariante V15 und die Variante V21 bei erhöhter Zugabe von Asphaltgranulat (40 M.-%) bei Verwendung des Rejuvenators R1 die vorteilhaftesten Eigenschaften. Eine Erhöhung des Zugabeanteils von 20 auf 40 M.-% Asphaltgranulat bewirkt tendenziell eine leichte, vorteilhafte Erhöhung der Zugfestigkeitsreserve bei Betrachtung der jeweiligen Rejuvenatoren.

4.5.2.3 Steifigkeit

Die bei den Prüftemperaturen +20, +10, 0, und -10 °C und bei einer Prüffrequenz von 10 Hz ermittelten Steifigkeitsmoduln der Mischgut-Varianten SMA 11 S sind in Tabelle 4-27 angegeben. Abbildung 4-30 gibt die Ergebnisse grafisch wieder.

Tabelle 4-27: Ergebnisse der Steifigkeitsprüfungen für die Mischgut-Varianten SMA 11 S mittels Spaltzug-Schwellversuch bei einer Prüffrequenz von 10 Hz

Variante	Rejuvenator	Zugabeanteil AG [M.-%]	Steifigkeitsmodul [MPa] @ Temperatur[°C]			
			20	10	0	-10
V15	-	0	6706	11904	23315	29142
V16	R8	20	6640	14088	20835	27571
V17		40	7314	12211	21519	27444
V18	R3	20	6632	12126	16604	25340
V19		40	8900	14809	20667	27239
V20	R1	20	7770	13059	18440	26980
V21		40	7592	11995	17373	25932

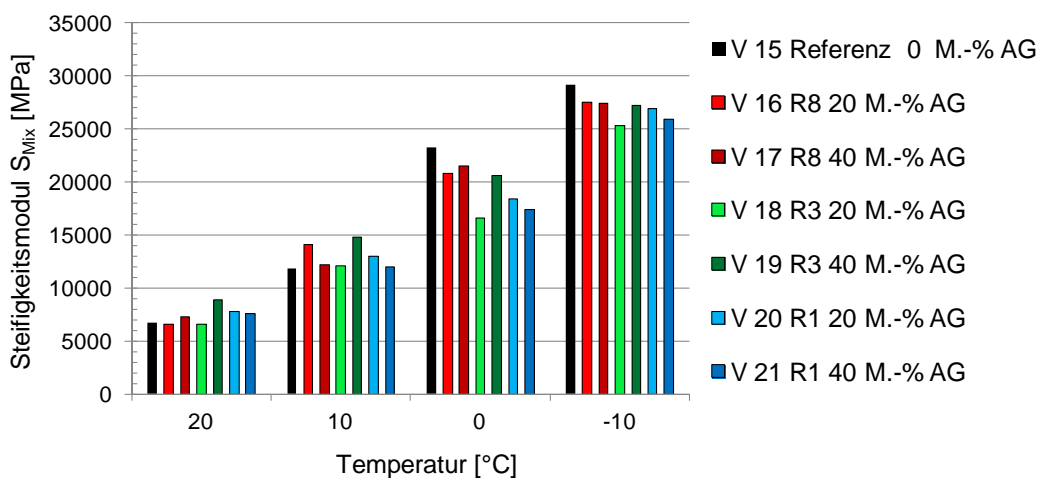


Abbildung 4-30: Ergebnisse der Steifigkeitsprüfungen für die Mischgut-Varianten SMA 11 S mittels Spaltzug-Schwellversuch bei einer Prüffrequenz von 10 Hertz.

Unter Verwendung von Gleichung 3-11 und unter Berücksichtigung aller Prüffrequenzen zur Ermittlung des Steifigkeitsmoduls werden die in Tabelle 4-28 angegebenen Regressionsparameter der Sigmoidfunktion erhalten.

Tabelle 4-28: Regressionsparameter y_0 , w , x_0 , z der Sigmoidfunktionen für die Mischgut-Varianten SMA 11 S

Variante	Rejuvenator	Zugabeanteil AG [M.-%]	Regressionsparameter			
			y_0	w	x_0	z
V15	-	0	1264,90	29660	2,65	1,05
V16	R8	20	-661,35	32967	2,73	1,36
V17		40	-268,69	31007	2,64	1,39
V18	R3	20	-930,11	37513	3,73	1,88
V19		40	-3670,66	40003	2,70	2,11
V20	R1	20	-1507,49	40247	3,49	1,98
V21		40	-590,89	37108	3,59	1,87

Die Steifigkeitsverläufe in Abhängigkeit von der Temperatur am Beispiel der Asphaltdeckschicht-Varianten SMA 11 S mit 20 M.-% Asphaltgranulat sind in Abbildung 4-31 dargestellt. Die Varianten mit einem Zugabeanteil von 40 M.-% Asphaltgranulat zeigt Abbildung 4-32. Extrapolierte Bereiche sind in grauer Farbe gekennzeichnet.

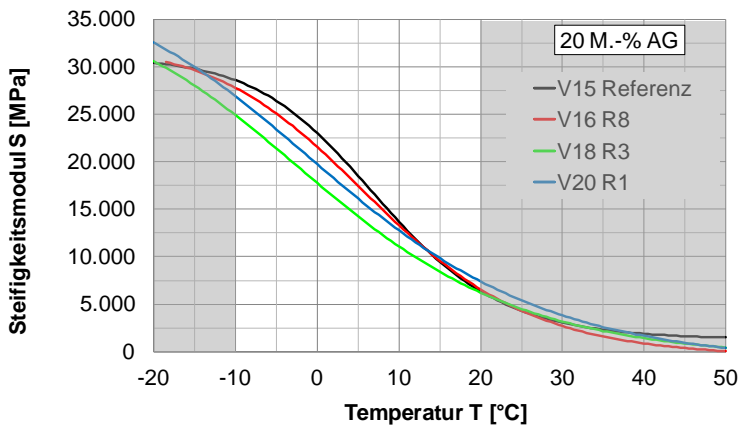


Abbildung 4-31: Steifigkeitsverläufe in Abhängigkeit von der Temperatur am Beispiel der Mischgut-Varianten SMA 11 S mit 20 M.-% Asphaltgranulat.

Im Temperaturbereich von -10 bis +10 °C weist die Referenzvariante V15 die höchsten Steifigkeiten auf. Danach anschließend folgen die Varianten V16, V20 und V18 mit abnehmender Steifigkeit. Bei einer Prüftemperatur von 20 °C weist die Variante V20 die höchste, die anderen Varianten weisen eine vergleichbare Steifigkeit auf. Eine Erhöhung des Zugabeanteils an Asphaltgranulat von 20 auf 40 M.-% bewirkt bei der Variante V19 eine Steifigkeitserhöhung, insbesondere bei den Prüftemperaturen +10 und +20 °C.

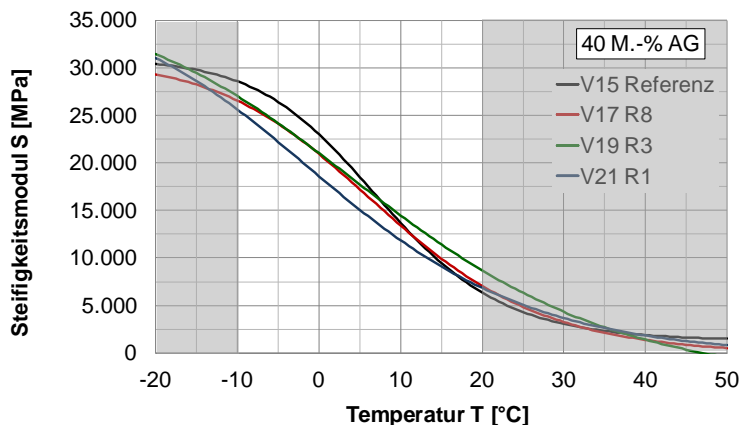


Abbildung 4-32: Steifigkeitsverläufe in Abhängigkeit von der Temperatur am Beispiel der Mischgut-Varianten SMA 11 S mit 40 M.-% Asphaltgranulat.

4.5.2.4 Ermüdungswiderstand

Die Ergebnisse zum Ermüdungsverhalten der Mischgut-Varianten SMA 11 S für die Prüftemperatur +20 °C und für eine Prüffrequenz von 10 Hz sind in Tabelle 4-29 wiedergegeben. Die Ermüdungsfunktionen der im Labor hergestellten Asphaltdeckschicht-Varianten erreichen Bestimmtheitsmaße größer 90 % entsprechend der Mindestanforderung für Asphaltdeckschichten gem. AL Sp-Asphalt 09 (vgl. Tabelle 3-6).

Tabelle 4-29: Regressionsparameter C_1 , C_2 und Bestimmtheitsmaße R^2 der Ermüdungsfunktionen aus dem Spaltzug-Schwellversuch je Mischgut-Variante SMA 11 S

Variante	Rejuvenator	Zugabeanteil AG [M.-%]	Regressionsparameter [-]		R^2 [%]
			C_1	C_2	
V15	-	0	42,409	-2,701	98
V16	R8	20	71,463	-2,447	99
V17		40	53,348	-2,573	99
V18	R3	20	25,259	-3,036	95
V19		40	19,522	-3,056	98
V20	R1	20	38,116	-2,827	99
V21		40	29,895	-2,866	95

Die Ermüdungsfunktionen am Beispiel der Asphaltdeckschicht-Varianten SMA 11 S mit 20 M.-% Asphaltgranulat sind in Abbildung 4-33 dargestellt, jene mit einem Zugabeanteil von 40 M.-% in Abbildung 4-34.

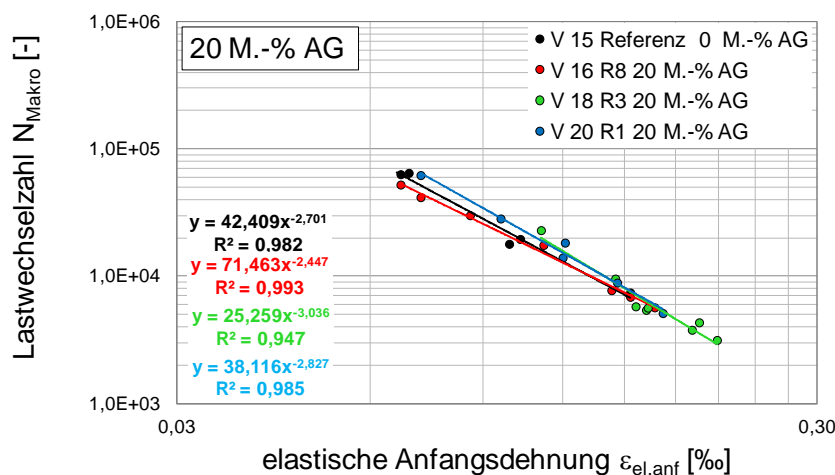


Abbildung 4-33: Mittels Spaltzug-Schwellversuch ermittelte Ermüdungsfunktionen am Beispiel der Mischgut-Varianten SMA 11 S mit 20 M.-% Asphaltgranulat bei 20 °C und 10 Hz.

Die dargestellten Ermüdungsfunktionen der Asphaltdeckschichtmischgut-Varianten verlaufen nicht parallel (vgl. Regressionsparameter C_2 , der die Steigung des dargestellten Funktionsverlaufes angibt). Die vorteilhaftesten Eigenschaften im dargestellten Dehnungsbereich weist Variante V20 auf, Variante V16 die im Vergleich schlechtesten.

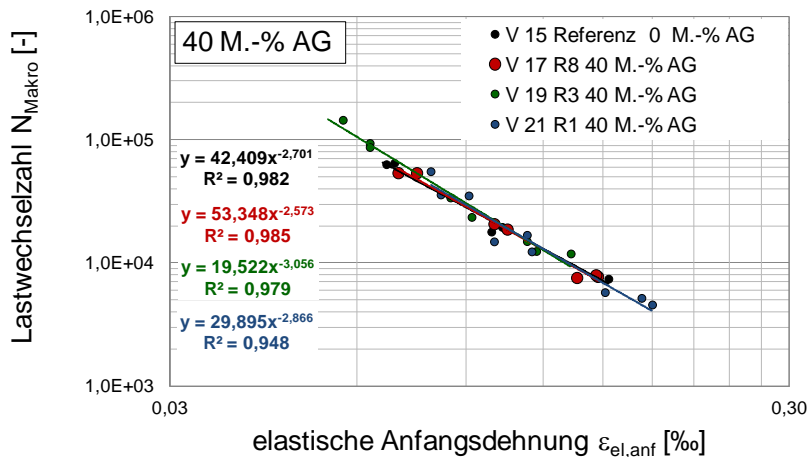


Abbildung 4-34: Mittels Spaltzug-Schwellversuch ermittelte Ermüdungsfunktionen am Beispiel der Mischgut-Varianten SMA 11 S mit 40 M.-% Asphaltgranulat bei 20 °C und 10 Hz.

Für die Varianten V19 (R3) und V21 (R1) mit 40 M.-% Asphaltgranulat zeigen die Ermüdungsfunktionen vergleichbare Verläufe. Ebenfalls sind die Verläufe für die Referenz V15 und die Variante V17 (R8) vergleichbar, wobei die Ermüdungswiderstände geringer sind.

Die Auswirkungen der eingesetzten Rejuvenatoren auf das Ermüdungsverhalten kann Abbildung 4-35 entnommen werden.

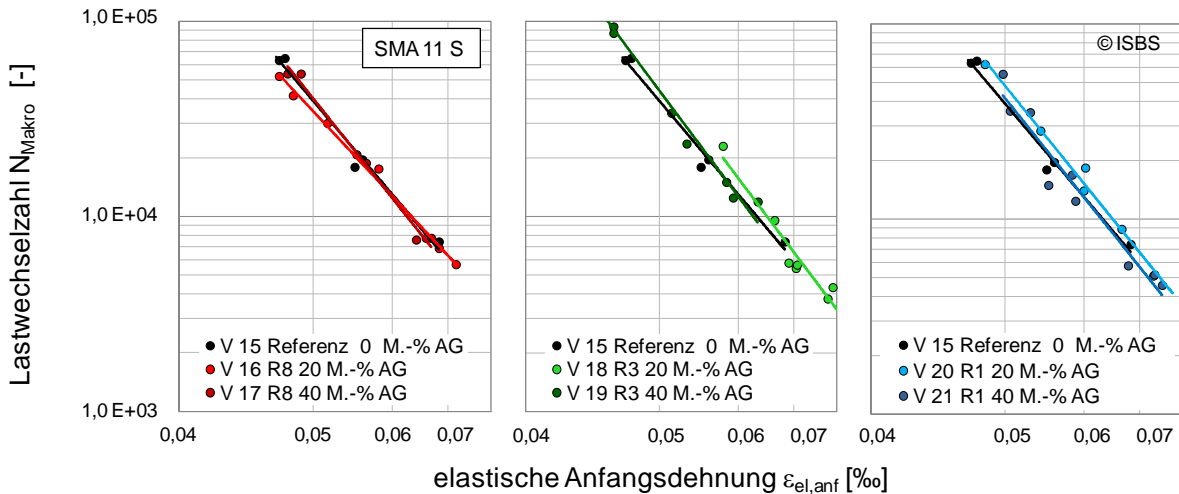


Abbildung 4-35: Ermüdungsfunktionen für die Mischgut-Varianten SMA 11 S unter Variation des Rejuvenators (R8, links; R3, Mitte; R1, rechts) und der Zugabeanteile an Asphaltgranulat (0, 20 und 40 M.-% AG).

Tendenziell ist bei einem Zugabeanteil von 20 M.-% Asphaltgranulat bei den Mischgutvarianten unter Einsatz der Rejuvenatoren R3 und R1 ein verbessertes Ermüdungsverhalten gegenüber jenen Varianten mit einer Zugabe von 40 M.-% Asphaltgranulat feststellbar. Desweiteren bewirkt die Verwendung dieser Rejuvenatoren eine verbesserte Ermüdungsbeständigkeit bei geringen Dehnungen gegenüber der Referenzvariante V15.

4.6 Asphaltdeckschicht-Varianten AC 11 D S (Mischgut-Variante 4)

4.6.1 Zusammensetzung

Die Korngrößenverteilungen der hergestellten Mischgut-Varianten AC 11 D S sind anhand der Siebdurchgänge in Tabelle 4-30 angegeben. Abbildung 4-36 zeigt die angestrebte Korngrößenverteilung und die erreichten Korngrößenverteilungen im Vergleich mit dem zulässigen Sieblinienbereich gemäß TL Asphalt-StB 07.

Tabelle 4-30: Zusammensetzung der hergestellten Mischgut-Varianten AC 11 D S bei Warmzugabe des Asphaltgranulats (Mittelwerte) in Abhängigkeit vom eingesetzten Rejuvenator und vom Zugabeanteil an Asphaltgranulat

Korn- durch- messer [mm]	Siebdurchgang [M.-%]						
	0 M.-% AG	20 M.-% AG			40 M.-% AG		
	Referenz (V22)	R8 (V23)	R3 (V25)	R1 (V27)	R8 (V24)	R3 (V126)	R1 (V28)
31,5	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
22,4	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
16	100,0	98,7	99,3	100,0	99,7	99,5	99,4
11,2	95,0	93,0	94,6	94,8	94,9	94,4	94,1
8	81,7	78,3	78,6	79,7	80,5	80,6	81,9
5,6	68,0	69,6	69,2	71,1	69,8	69,3	71,1
2	51,7	52,1	52,1	52,6	51,7	52,5	55,1
1	35,1	34,7	35,3	34,3	34,7	34,5	36,6
0,25	18,1	18,0	18,3	17,4	18,1	17,8	18,2
0,125	12,5	12,5	12,5	12,0	12,5	12,3	12,4
0,063	8,2	8,8	8,6	8,0	9,0	8,8	8,2

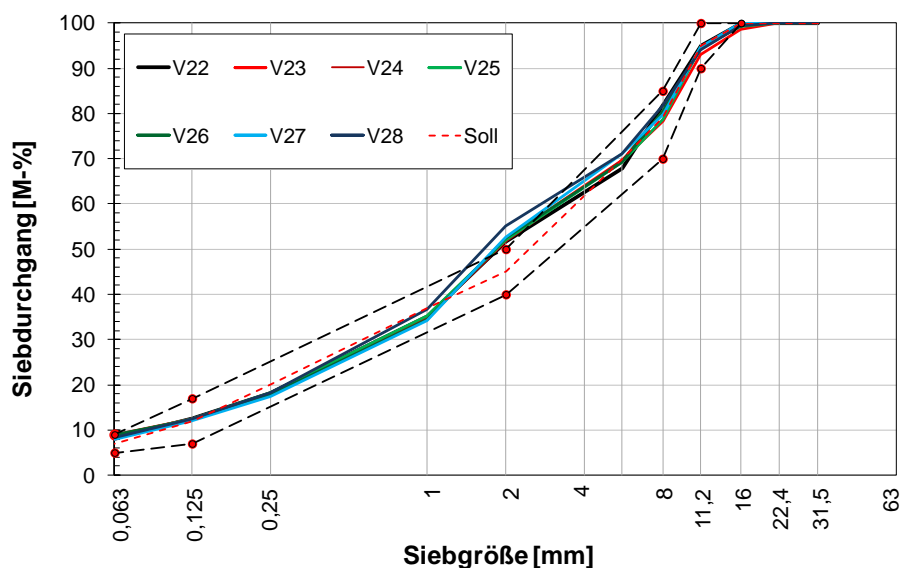


Abbildung 4-36: Mittlere Korngrößenverteilungen (Kontrollprüfung) für die Asphaltdeckschicht-Varianten AC 11 D S.

Die erzielten Korngrößenverteilungen entsprechen weitestgehend der angestrebten Soll-Sieblinie mit Ausnahme des Siebdurchgangs auf der Siebgröße 2,0 mm. Tabelle 4-31

fasst die Ergebnisse der Überprüfungen für die Mischgut-Varianten AC 11 D S zusammen.

Tabelle 4-31: Kontrollprüfungsergebnisse für die Mischgut-Varianten AC 11 D S

Kenngröße	Mischgut-Variante						
	0 M.-% AG	20 M.-% AG			40 M.-% AG		
	Referenz (V22)	R8 (V23)	R3 (V25)	R1 (V27)	R8 (V24)	R3 (V126)	R1 (V28)
Bindemittelgehalt B [M.-%]	6,1	6,1	6,2	6,1	6,2	6,3	6,4
Rohdichte ρ_m [g/cm ³]	2,639	2,616	2,619	2,611	2,578	2,558	2,523
Erweichungspunkt EP _{RuK} [°C]	53,8	57,0	56,6	55,2	56,0	56,2	55,8

4.6.2 Performance-Eigenschaften

4.6.2.1 Verformungswiderstand

In Tabelle 4-32 sind die Ergebnisse aus dem Einaxialen Druck-Schwellversuch für die Mischgut-Varianten AC 11 D S angegeben. Abbildung 4-37 gibt die Ergebnisse grafisch wieder.

Tabelle 4-32: Ergebnisse der Verformungsprüfung an den Mischgut-Varianten AC 11 D S mittels Einaxialem Druck-Schwellversuch gem. TP Asphalt, Teil 25 B 1 (Mittelwerte)

Variante	Rejuvenator	Zugabeanteil AG [M.-%]	Anzahl Belastungszyklen [-]	Dehnung im Wendepunkt / bei Versuchsende [%]	Dehnungsrate im Wendepunkt / bei Versuchsende [% $\cdot 10^{-4}/n$]
V22	-	-	1289,3	15,7	26,4
V23	R8	20	10000,0	18,7	3,8
V24		40	8930,7	18,2	3,7
V25	R3	20	6276,0	18,2	7,3
V26		40	6539,3	16,8	5,9
V27	R1	20	1646,0	14,8	18,3
V28		40	7892,7	23,9	8,1

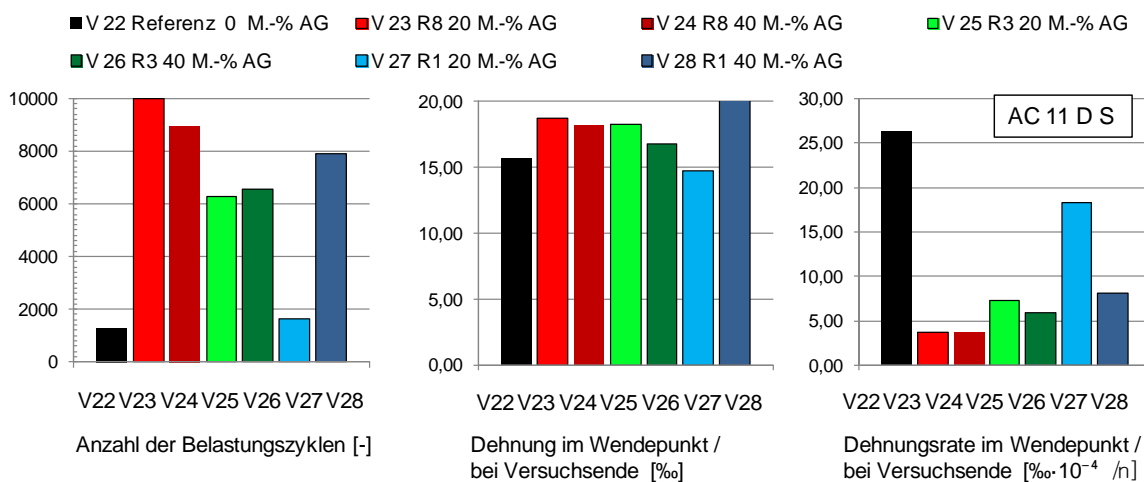


Abbildung 4-37: Ergebnisse der Verformungsprüfung der Mischgut-Varianten AC 11 D S mittels Einaxialem Druck-Schwellversuch gem. TP Asphalt, Teil 25 B 1.

Gemäß TP Asphalt, Teil 25 B 1 ist das Versuchsergebnis die Dehnungsrate im Wendepunkt bzw. am Versuchsende. Aus Abbildung 4-79 kann folgende Reihung von geringer (vorteilhafter) zu erhöhter Dehnungsrate in Abhängigkeit von den eingesetzten Rejuvenatoren abgeleitet werden:

$$R8 > R3 > R1$$

Tendenziell weisen die Varianten mit erhöhter Zugabe an Asphaltgranulat verbesserte Verformungseigenschaften auf.

4.6.2.2 Widerstand gegen Kälterissbildung

In Tabelle 4-33 sind die aus dem Abkühlversuch ermittelten Bruchtemperaturen mit den korrespondierenden Bruchspannungen der unterschiedlich hergestellten Asphaltdeckschichtmischgut-Varianten AC 11 D S zusammengestellt. Abbildung 4-38 gibt die Ergebnisse grafisch wieder.

Tabelle 4-33: Bruchtemperatur [°C] mit korrespondierender Bruchspannung [MPa] aus den Abkühlversuchen an den Mischgut-Varianten AC 11 D S

Variante	Rejuvenator	Zugabeanteil AG [M.-%]	Bruchtemperatur [°C]	Bruchspannung [MPa]
V22	-	0	-27,3	4,814
V23	R8	20	-25,2	5,153
V24		40	-26,7	4,682
V25	R3	20	-24,5	5,467
V26		40	-25,9	4,97
V27	R1	20	-26,9	4,755
V28		40	-27,6	5,028

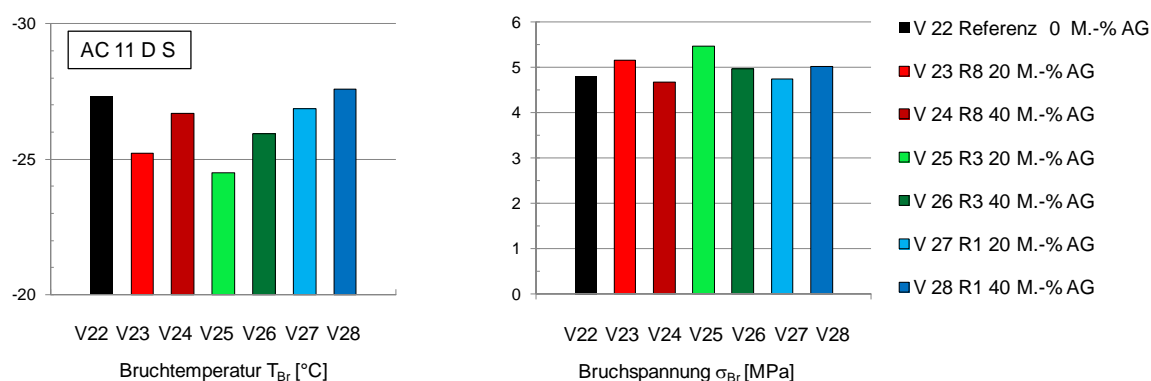


Abbildung 4-38: Bruchtemperaturen mit korrespondierenden Bruchspannungen aus den Abkühlversuchen an den Mischgut-Varianten AC 11 D S in Abhängigkeit vom Zugabeanteil an Asphaltgranulat und vom eingesetzten Rejuvenator.

Bezüglich der Bruchtemperatur ergeben sich Unterschiede hinsichtlich des eingesetzten Rejuvenators. So weisen die Varianten unter Verwendung des Rejuvenators R1 geringere Bruchtemperaturen auf (vorteilhaft) als jene unter Verwendung von R8, gefolgt von R3.

Die Zunahme des Anteils an Asphaltgranulat von 20 auf 40 M.-% bewirkt tendenziell eine Verringerung der Bruchtemperatur. Insbesondere ist diese Tendenz für den Rejuvenator R8 feststellbar.

Die korrespondierenden Bruchspannungen hingegen zeigen mit Ausnahme der Variante V28 einen entgegengesetzten Trend, d. h. mit Zunahme des Anteils an Asphaltgranulat verringert sich die korrespondierende Bruchspannung.

Die Ergebnisse der Kältezugsversuche für die AC 11 D S Varianten sind in Tabelle 4-34 zusammengestellt.

Tabelle 4-34: Ergebnisse der Kältezugsprüfungen für die Mischgut-Varianten AC 11 D S.

Variante	Rejuvenator	Zugabeanteil AG [M.-%]	Zugspannung [MPa]			
			@ +20 °C	@ +5 °C	@ -10 °C	@ -25 °C
V22	-	0	0,653	3,167	5,578	5,123
V23	R8	20	0,916	3,684	6,585	4,997
V24		40	0,989	3,887	6,089	4,791
V25	R3	20	0,958	4,040	6,577	5,091
V26		40	0,859	3,656	5,919	5,118
V27	R1	20	0,582	2,976	5,169	4,600
V28		40	0,642	2,721	6,714	5,297

In Abbildung 4-39 sind für die Mischgut-Varianten AC 11 D S die Ergebnisse aus den Kältezugsprüfungen bei den Temperaturen +20 °C, +5 °C, -10 °C und -25 °C dargestellt.

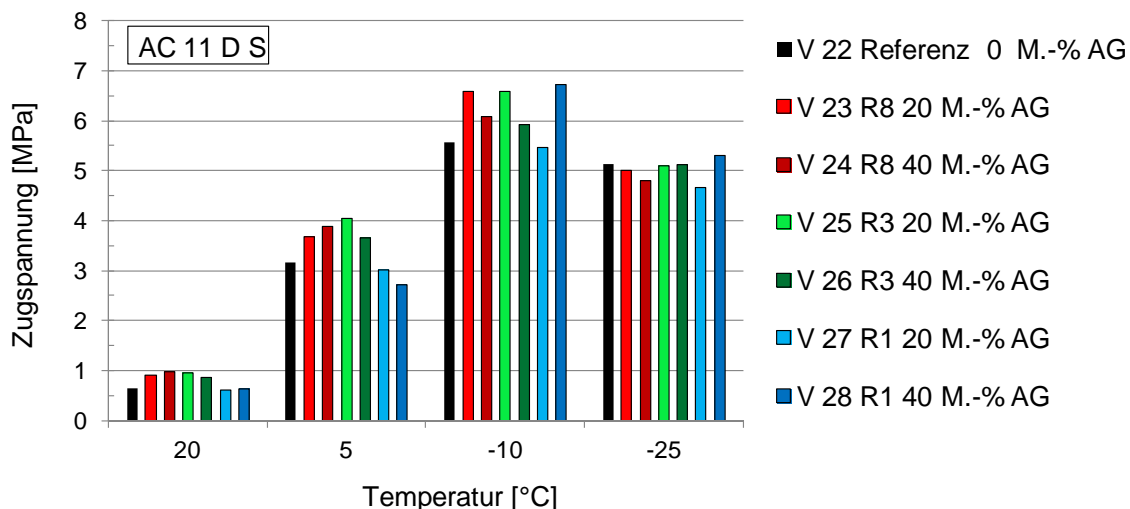


Abbildung 4-39: Ergebnisse aus den Kältezugsprüfungen an den Mischgut-Varianten AC 11 D S (Mittelwerte).

Aus den Ergebnissen der Abkühl- und der Kältezugsprüfungen wird die Zugfestigkeitsreserve je Asphalttragschichtmischgut-Variante ermittelt (vgl. Tabelle 4-35).

Tabelle 4-35: Maximale Zugfestigkeitsreserve [MPa] mit korrespondierender Temperatur [°C] für die Mischgut-Varianten AC 11 D S

Variante	Rejuvenator	Zugabeanteil AG [M.-%]	Zugfestigkeitsreserve [MPa]	Temperatur [°C]
V22	-	0	4,77	-8,0
V23	R8	20	5,57	-7,4
V24		40	5,03	-5,9
V25	R3	20	5,42	-6,1
V26		40	4,92	-6,4
V27	R1	20	4,61	-7,5
V28		40	5,93	-9,7

Eine einheitliche Reihung der eingesetzten Rejuvenatoren bzw. des Zugabeanteils an Asphaltgranulat hinsichtlich der Auswirkung auf das Kälteverhalten der hergestellten Asphaltmischgut-Varianten ergibt sich daraus nicht.

Den jeweiligen Verlauf der Zugfestigkeitsreserve in Abhängigkeit von der Temperatur zeigt Abbildung 4-40. Wieder wird eine Bezugstemperatur festgelegt, hier aus Variante V28 mit $T = -9,7 \text{ °C}$.

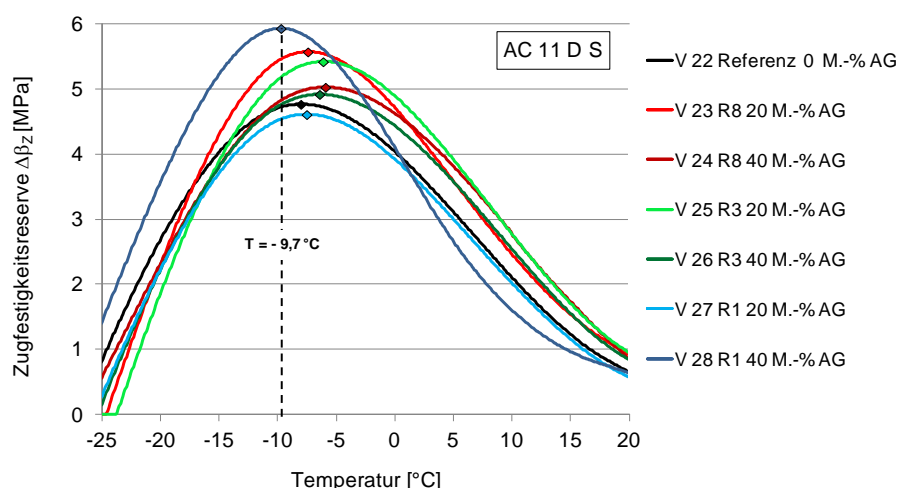


Abbildung 4-40: Verlauf der Zugfestigkeitsreserven für die Mischgut-Varianten AC 11 D S mit eingezeichneter Bezugstemperatur (gestrichelte Linie bei $-9,7 \text{ °C}$ für Variante V28).

Je Zugabeanteil an Asphaltgranulat und eingesetztem Rejuvenator werden zu der in Abbildung 4-40 dargestellten Bezugstemperatur von $-9,7 \text{ °C}$ die jeweiligen Zugfestigkeitsreserven der Varianten ermittelt (vgl. Abbildung 4-41).

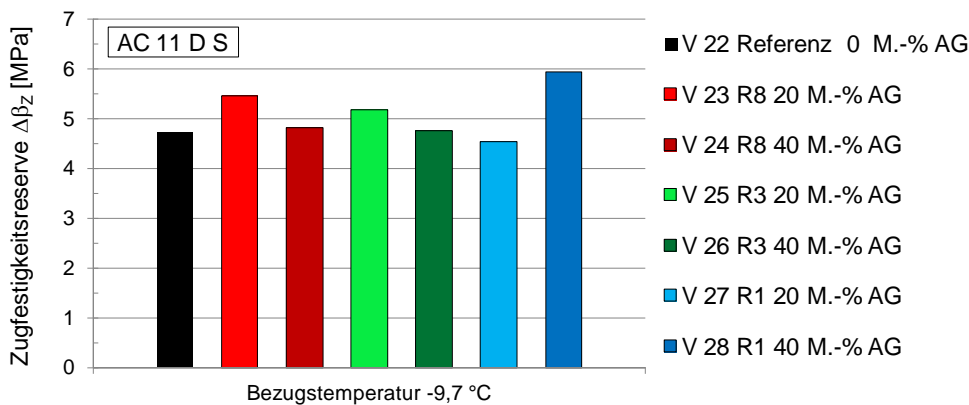


Abbildung 4-41: Zugfestigkeitsreserven für eine Bezugstemperatur von -9,7 °C.

Mit Ausnahme der Variante V28 nimmt der Widerstand gegen Kälterissbildung mit zunehmendem Asphaltgranulatanteil ab. Im Vergleich zur Referenz zeigen die Varianten mit einem Zugabeanteil von 20 M.-% Asphaltgranulat bessere Kälteeigenschaften.

4.6.2.3 Steifigkeit

Die bei den Prüftemperaturen +20, +10, 0, und -10 °C und bei einer Prüffrequenz von 10 Hz ermittelten Steifigkeitsmoduln der Mischgut-Varianten AC 11 D S sind in Tabelle 4-36 angegeben. Abbildung 4-42 gibt die Ergebnisse grafisch wieder.

Tabelle 4-36: Ergebnisse der Steifigkeitsprüfungen für die Mischgut-Varianten AC 11 D S mittels Spaltzug-Schwellversuch bei einer Prüffrequenz von 10 Hz

Variante	Rejuvenator	Zugabeanteil AG [M.-%]	Steifigkeitsmodul [MPa] @ Temperatur[°C]			
			20	10	0	-10
V22	-	0	7777	14108	21569	30457
V23	R8	20	8809	14844	21956	30733
V24		40	8784	13960	22324	29683
V25	R3	20	10091	14605	22471	28890
V26		40	6978	12603	20899	28264
V27	R1	20	7889	14805	24481	29906
V28		40	6740	11098	18668	26244

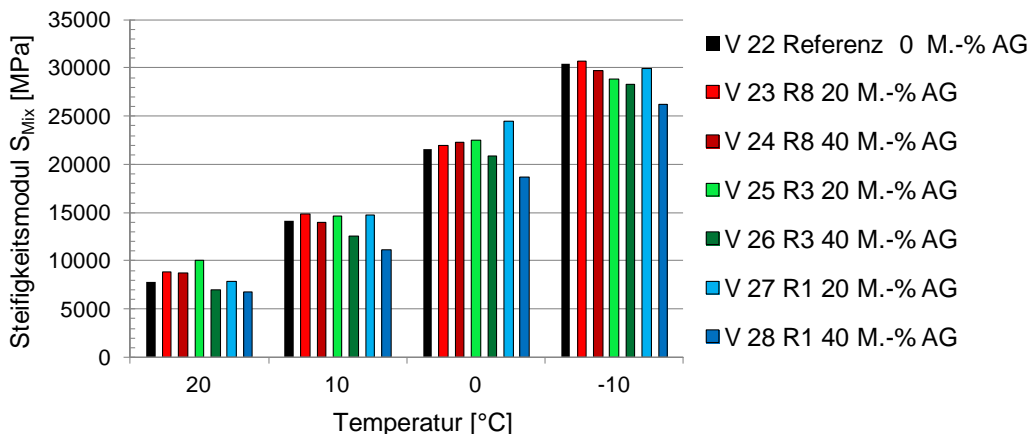


Abbildung 4-42: Ergebnisse der Steifigkeitsprüfungen für die Mischgut-Varianten AC 11 D S mittels Spaltzug-Schwellversuch bei einer Prüffrequenz von 10 Hertz.

Unter Verwendung von Gleichung 3-11 und unter Berücksichtigung aller Prüffrequenzen zur Ermittlung des Steifigkeitsmoduls werden die in Tabelle 4-37 angegebenen Regressionsparameter der Sigmoidfunktion erhalten.

Tabelle 4-37: Regressionsparameter y_0 , w , x_0 , z der Sigmoidfunktionen der Mischgut-Varianten AC 11 D S

Variante	Rejuvenator	Zugabeanteil AG [M.-%]	Regressionsparameter			
			y_0	w	x_0	z
V22	-	0	-1234,06	41538	3,27	1,68
V23	R8	20	-1790,64	46494	3,49	2,04
V24		40	-0,70	33795	2,55	1,43
V25	R3	20	-295,46	35650	2,67	1,69
V26		40	-1208,87	35543	2,89	1,54
V27	R1	20	-1317,90	41038	3,18	1,76
V28		40	-590,00	39652	3,77	1,87

Die Steifigkeitsverläufe in Abhängigkeit von der Temperatur am Beispiel der Asphaltdeckschicht-Varianten der Sorte AC 11 D S mit 20 M.-% Asphaltgranulat sind in Abbildung 4-43 dargestellt. Die Varianten mit einem Zugabeanteil von 40 M.-% Asphaltgranulat zeigt Abbildung 4-44. Extrapolierte Bereiche sind in grauer Farbe gekennzeichnet.

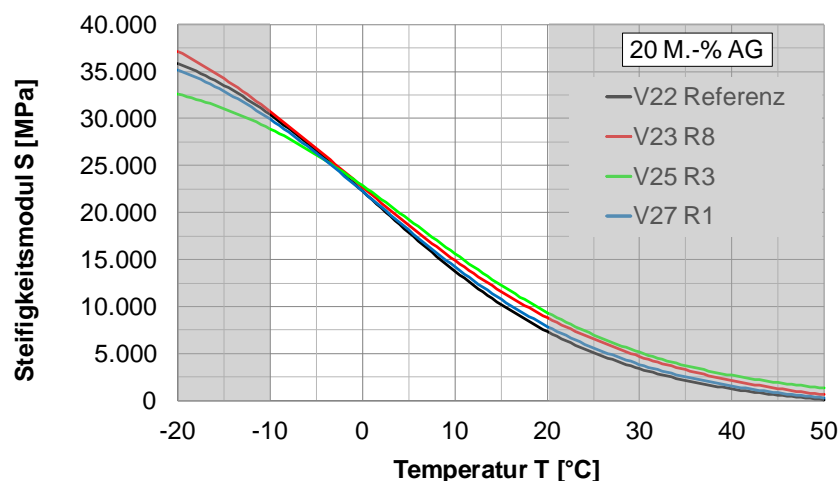


Abbildung 4-43: Steifigkeitsverlauf in Abhängigkeit von der Temperatur am Beispiel der Mischgut-Varianten AC 11 D S mit 20 M.-% Asphaltgranulat.

Es zeigen sich gleiche Steifigkeitsverläufe für die Asphaltmischgut-Varianten V22 und V27. Variante V23 und 25 weisen im Temperaturbereich von 0 bis +20 °C vergleichbare und im Vergleich zur Referenzvariante V22 erhöhte Steifigkeiten auf. Die geringsten Steifigkeiten ergeben sich für Variante V25 bei einer Prüftemperatur von -10 °C.

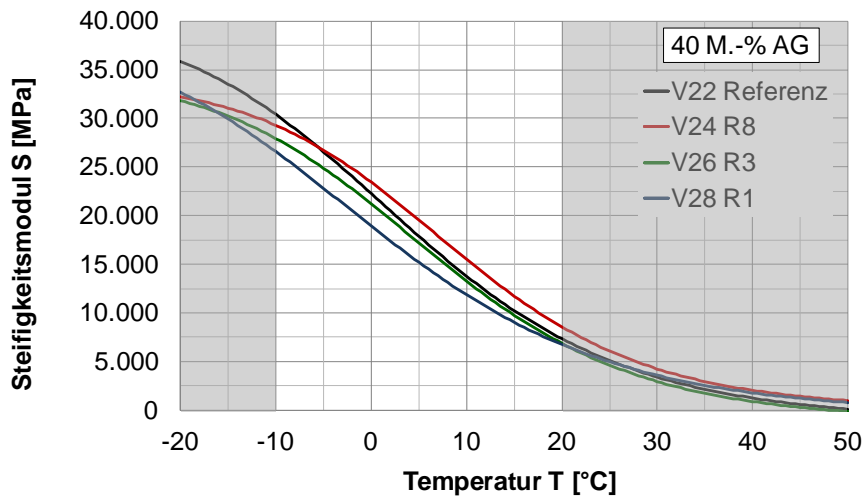


Abbildung 4-44: Steifigkeitsverlauf in Abhängigkeit von der Temperatur am Beispiel der Mischgut-Varianten AC 11 D S mit 40 M.-% Asphaltgranulat.

4.6.2.4 Ermüdungswiderstand

Die Ergebnisse zum Ermüdungsverhalten der Mischgut-Varianten AC 11 D S für die Prüftemperatur +20 °C und für eine Prüffrequenz von 10 Hz sind in Tabelle 4-38 wiedergegeben. Die Ermüdungsfunktionen der im Labor hergestellten Asphaltdeckschicht-Varianten erreichen Bestimmtheitsmaße entsprechend der Mindestanforderung für Asphaltdeckschichten gem. AL Sp-Asphalt 09 (vgl. Tabelle 3-6).

Tabelle 4-38: Regressionsparameter C_1 , C_2 und Bestimmtheitsmaße R^2 der Ermüdungsfunktionen aus dem Spaltzug-Schwellversuch je Mischgut-Variante SMA 11 S

Variante	Rejuvenator	Zugabeanteil AG [M.-%]	Regressionsparameter [-]		R^2 [%]
			C_1	C_2	
V22	-	0	6,931	-3,028	95
V23	R8	20	26,509	-2,716	95
V24		40	33,477	-2,616	90
V25	R3	20	12,316	-3,167	98
V26		40	2,698	-2,935	98
V27	R1	20	1,788	-3,554	97
V28		40	11,443	-3,034	96

Die Ermüdungsfunktionen am Beispiel der Asphaltdeckschicht-Varianten AC 11 D S mit 20 M.-% Asphaltgranulat sind in Abbildung 4-45 dargestellt, jene mit einem Zugabeanteil von 40 M.-% in Abbildung 4-46.

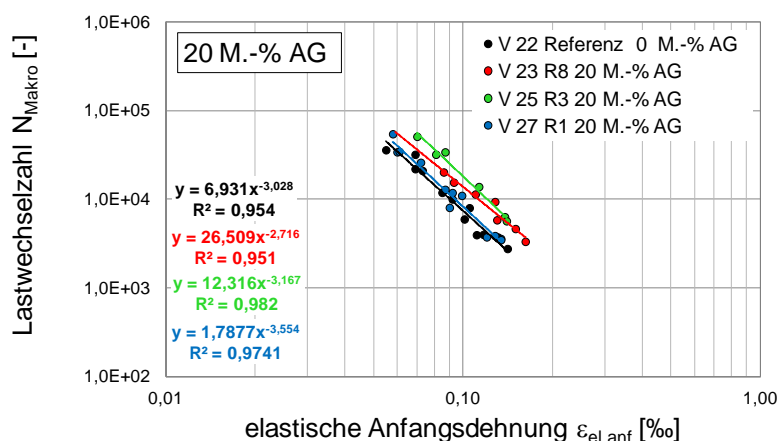


Abbildung 4-45: Mittels Spaltzug-Schwellversuch ermittelte Ermüdungsfunktionen am Beispiel der Mischgut-Varianten AC 11 D S mit 20 M.-% Asphaltgranulat bei 20 °C und 10 Hz.

Die dargestellten Ermüdungsfunktionen der Asphaltdeckschichtmischgut-Varianten weichen für die Varianten mit dem Rejuvenator R8 von einem parallelen Verlauf ab (vgl. Regressionsparameter C_2 , der die Steigung des dargestellten Funktionsverlaufes angibt). Die vorteilhaftesten Eigenschaften im dargestellten Dehnungsbereich weist Variante V25 auf, Variante V22 (Referenz) die im Vergleich schlechtesten. Bei geringen Dehnungen kommt es zu einem Schnittpunkt dieser beiden Ermüdungsfunktionen, das Verhältnis bezüglich Ermüdungswiderstand kehrt sich um.

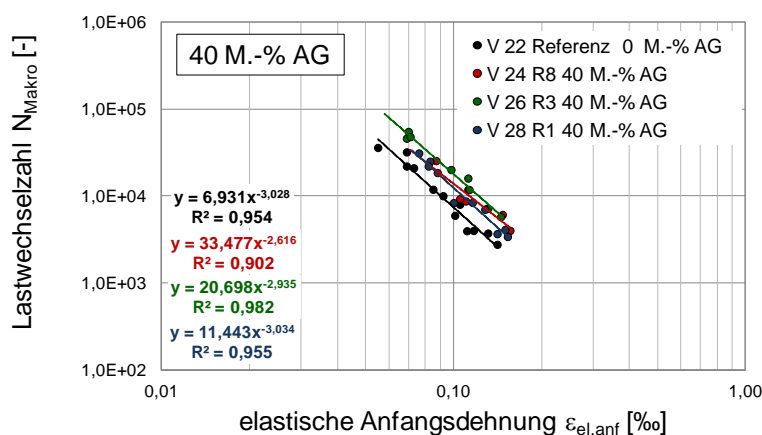


Abbildung 4-46: Mittels Spaltzug-Schwellversuch ermittelte Ermüdungsfunktionen am Beispiel der Mischgut-Varianten AC 11 D S mit 40 M.-% Asphaltgranulat bei 20 °C und 10 Hz.

Für die Varianten V22, 26 (R3) und V28 (R1) mit 40 M.-% Asphaltgranulat zeigen die Ermüdungsfunktionen vergleichbare Verläufe mit parallelem Versatz. Die Auswirkungen der eingesetzten Rejuvenatoren auf das Mischgut hinsichtlich des Ermüdungsverhaltens mittels Spaltzug-Schwellversuch bei variierenden Zugabeteilen von Asphaltgranulat kann Abbildung 4-47 entnommen werden.

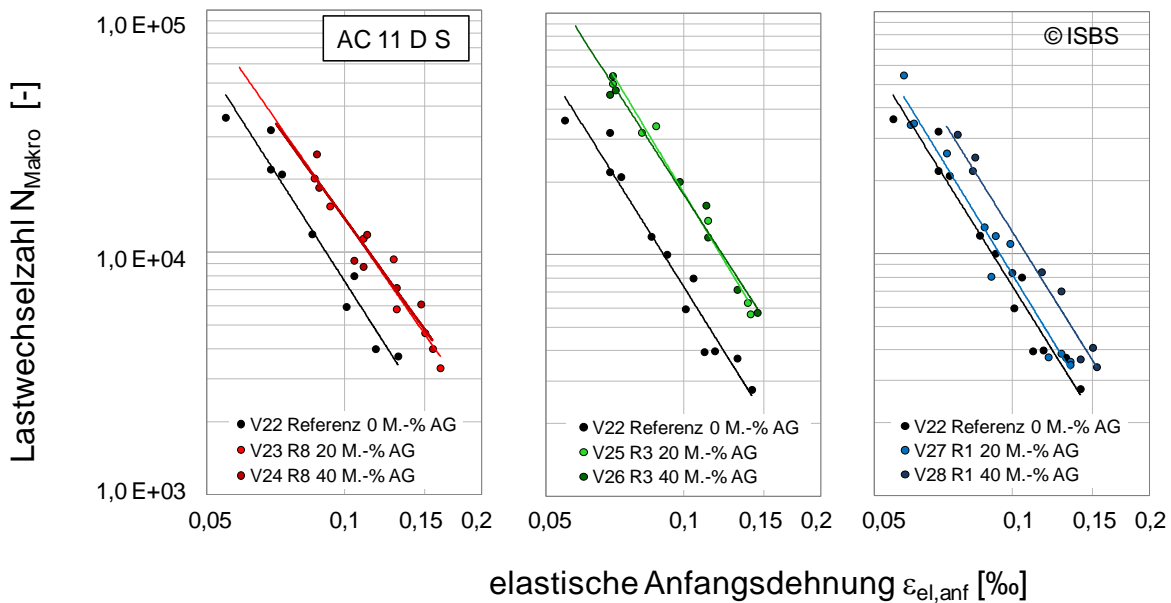


Abbildung 4-47: Ermüdungsfunktionen für die Mischgut-Varianten AC 11 D S unter Variation des Rejuvenators (R8, links; R3, Mitte; R1, rechts) und der Zugabeanteile von Asphaltgranulat (0, 20 und 40 M.-% AG).

4.7 Großtechnisch hergestellte Asphaltdeckschicht-Varianten SMA 8 S (Mischgut-Variante 5)

Die in Kapitel 4.7.1 dargestellten Berichtsteile wurden von der Basalt-Actien-Gesellschaft BAG zur Verfügung gestellt.

4.7.1 Gedächtnisprotokoll zum Einbau des SMA 8 S mit Rejuvenatoren in Hamburg Billstedt am 12.09.2015

Im Rahmen des durchgeführten Forschungsprojektes des Bundesverkehrsministeriums wird die Wirkung von Rejuvenatoren untersucht. Unter allen untersuchten Produkten wurden vier Rejuvenatoren ausgewählt, mit denen eine Erprobungsstrecke auf der B5 „Bergedorfer Straße“ in Hamburg gebaut wurde. Abbildung 4-48 zeigt die Lage der Einbaustrecke.



Abbildung 4-48: Einbaustrecke (Quelle: Google Maps).

Der Einbau der gesamten Baumaßnahme erfolgte in drei Bauabschnitten (vgl. Abbildung 2). Der erste Bauabschnitt (orange markiert) wurde am 05.09.2015 fertiggestellt. Hier wurde ein herkömmlicher SMA 8 S mit 25 % Asphaltgranulat, jedoch ohne Rejuvenatoren eingebaut. Der Einbau des zweiten Bauabschnittes (gelb markiert) erfolgte am 12.09.2015. Hier kamen neben einer Nullvariante zwei Rejuvenatoren zum Einsatz, und zwar die Rejuvenatoren R1 und R8. Der letzte Abschnitt (rot markiert) wurde am 19.09.2015 eingebaut. Hier wurden neben einer Nullvariante zwei SMA 8 S unter Verwendung von Rejuvenatoren eingebaut, darunter auch der Rejuvenator R3.

Die Planung und Umsetzung der Baumaßnahme erfolgte in enger Abstimmung mit der Behörde für Wirtschaft, Verkehr und Innovation (BWVI) Hamburg.

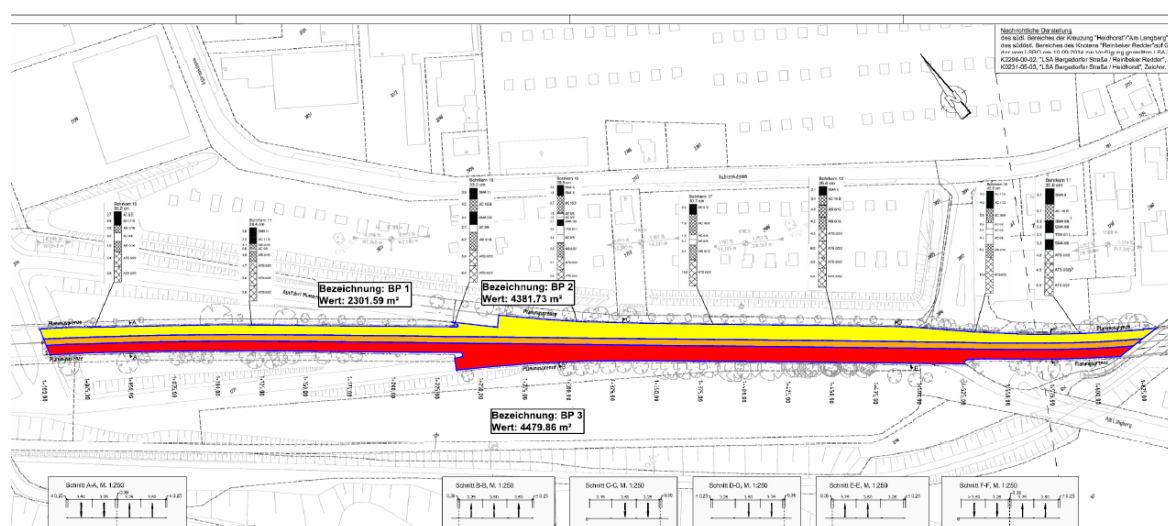


Abbildung 4-49: Unterteilung der Baumaßnahme in drei Bauabschnitte.

In Tabelle 4-39 sind die verschiedenen Mischgutvarianten mit ihren Zusätzen aufgeführt.

Tabelle 4-39: Mischgutvarianten

	SMA 8 Hmb.	SMA 8 Hmb. mit Rejuvenator R1	SMA 8 Hmb. mit Rejuvenator R8	SMA 8 Hmb. mit Rejuvenator R3
Einbaudatum	05.09.2015	12.09.2015	12.09.2015	19.09.2015

Anteil an Asphaltgranulat [M.-%]	25	50	50	50
Bindemittel	5,6 M.-% PmB 25/55-55 A mit Haftverbesserer	3,7 M.-% PmB 25/55-55 RC mit Haftverbesserer	1,7 M.-% PmB 25/55-55 RC mit Haftverbesserer	4,0 M.-% PmB 25/55-55 RC mit Haftverbesserer
Zusatz	0,3 M.-% VIATOP Premium	0,3 M.-% VIATOP Premium	0,3 M.-% VIATOP Premium	0,3 M.-% VIATOP Premium
	-	0,7 M.-% R1	2,7 M.-% R8	0,4 M.-% R3

(a) Mischprozess

Das Asphaltmischgut wurde am Mischwerk Hamburg Pinkertweg hergestellt. Die Fahrtzeit zur Baustelle betrug ca. 10 Minuten. Das Asphaltgranulat wurde über die Warmzugabe dazugegeben, während die Rejuvenatoren über die Bitumenwaage zum Bitumen hinzugefügt wurden. Die Rejuvenatoren wurden in großen Behältern gelagert; die Zugabe erfolgte automatisch (vgl. Abbildung 3).

An der Mischanlage wurde eine Trockenmischzeit von ca. 10 Sekunden und eine Nachmischzeit von ca. 30 Sekunden eingestellt. Die Temperaturen während des Mischprozesses betragen zwischen 170 °C und 185 °C.



Abbildung 4-50: Lagerung und Zugabe der Rejuvenatoren.

(b) Einbau

Der Einbau wurde vom Bauunternehmen Kemna Bau GmbH durchgeführt. Dabei kamen der Fertiger „Vögele Super 1800-2“ sowie zwei Walzen „Bomag BS 180“ zum Einsatz. Am Straßenfertiger wurden folgende Einstellungen für alle Varianten vorgenommen:

- Tamperdrehzahl: 1000 U/min
- Temperhub: 2 mm
- Einbaugeschwindigkeit: 3,5 bis 5,5 m/min

Die Gesamtlänge des Einbaus betrug ca. 607 m. Die Schichtdicke aller SMA-Varianten wurde mit 4 cm angestrebt.

4.7.1.1 Einbau des Verzögerungstreifens

Gegen 7.45 Uhr wurde mit dem Einbau des Verzögerungstreifens begonnen (Ausfahrt Richtung Hamburg-Mümmelmannsberg). Während des Einbaus war es bewölkt; die Temperatur betrug ca. 13 °C. Hier wurde Mischgut mit 50 % Asphaltgranulat und dem Rejuvenator R1 eingesetzt. Der letzte Teil des Verzögerungstreifens wurde aufgrund der Breite in zwei Bahnen eingebaut. Abbildung 4 zeigt den Einbau.



Abbildung 4-51: Einbau des Verzögerungstreifens mit SMA 8 Hmb. mit R1.

Für den Verzögerungstreifen wurden vier Lkw mit Mischgut benötigt. Die Mischguttemperaturen wurden dabei sowohl im Fertigerkübel als auch in der Förderschnecke gemessen. Folgende Temperaturen konnten festgehalten werden:

Tabelle 4-40: Mischguttemperaturen im Fertigerkübel sowie Förderschnecke

Uhrzeit des Abkippens	Temperatur im Kübel	Temperatur in der Förderschnecke
7:45 Uhr	161 °C	157 °C
8:00 Uhr	168 °C	163 °C
8:25 Uhr	165 °C	-
8:40 Uhr	170 °C	165 °C

Die Verdichtung wurde mittels Troxler-Sonde vom Baustofflabor Hamburg überprüft. Nachstehend sind die Ergebnisse der erreichten Verdichtung aufgelistet (Dauer der Messung: 15 Sekunden):

- Vorverdichtung mittels Fertiger: 78,5 %
- Nach 1. Walzübergang (statisch): 91,4 %
- Nach 2. Walzübergang (statisch): 94,0 %
- Nach 3. Walzübergang (vibrierend): 98,6 %

In Abbildung 4-52 ist die Oberfläche des SMA 8 Hmb. mit dem eingesetzten Rejuvenator R1, welches auf dem Verzögerungstreifen eingebaut wurde, abgebildet. Die linke Abbildung zeigt die Oberfläche nach der Vorverdichtung mittels Straßenfertiger, während die rechte Abbildung die Oberfläche nach der Verdichtung mittels Walze zeigt.

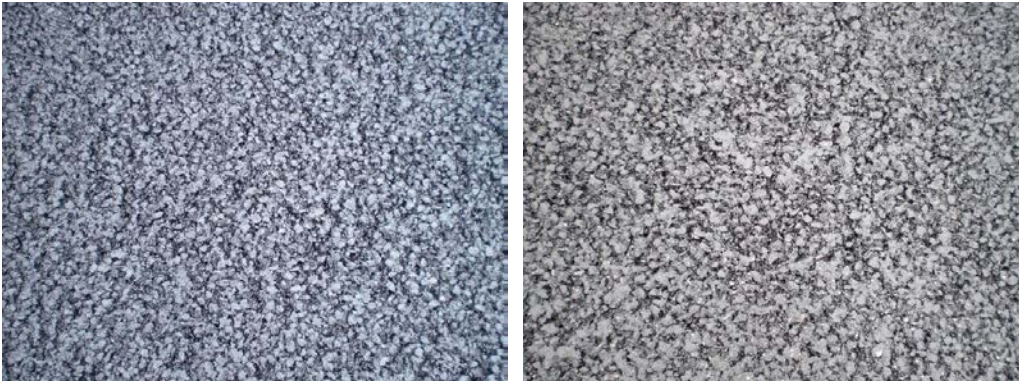


Abbildung 4-52: Oberfläche des Verzögerungsstreifens (SMA 8 Hmb. mit R1) vor (links) und nach der Walzverdichtung (rechts).

Nach der abgeschlossenen Walzverdichtung wird die heiße Oberfläche mit Splitt abgestreut. Abbildung 4-53 zeigt die abgestreute Oberfläche.



Abbildung 4-53: Oberfläche des Verzögerungsstreifens (SMA 8 Hmb. mit R1) nach der Abstreuerung mit Splitt.

Beim letzten Teil des Verzögerungsstreifens kam es zu einer Überfettung an der Oberfläche. Da das Bitumen an die Oberfläche getreten ist, kann eine Überverdichtung nicht ausgeschlossen werden. Hierbei würden zu viele Walzgänge das Bitumen an die Oberfläche hochdrücken.



Abbildung 4-54: Fettige Oberfläche beim letzten Teil des Verzögerungsstreifens.

4.7.1.2 Einbau der Hauptfahrbahn

Die Hauptfahrbahn in Richtung Hamburg wird mit drei verschiedenen Mischgutvarianten asphaltiert. Es kommen sowohl eine Nullvariante als auch zwei Rejuvenatoren zum Einsatz. Um den Einfluss der verschiedenen Rejuvenatoren in der Praxis beurteilen zu können, wird die Lage der Abschnitte festgehalten. Jeweils der letzte Lkw eines Rejuvenators sowie der erste Lkw des nächsten Rejuvenators werden als Übergangsbereich gekennzeichnet, da in diesem Bereich eine Vermischung von zwei Varianten stattfinden kann. Abbildung 8 zeigt alle eingebauten Abschnitte. Die Übergangsbereiche werden in rot dargestellt, während die Abschnitte, in denen eine Vermischung ausgeschlossen werden kann, blau gekennzeichnet sind.

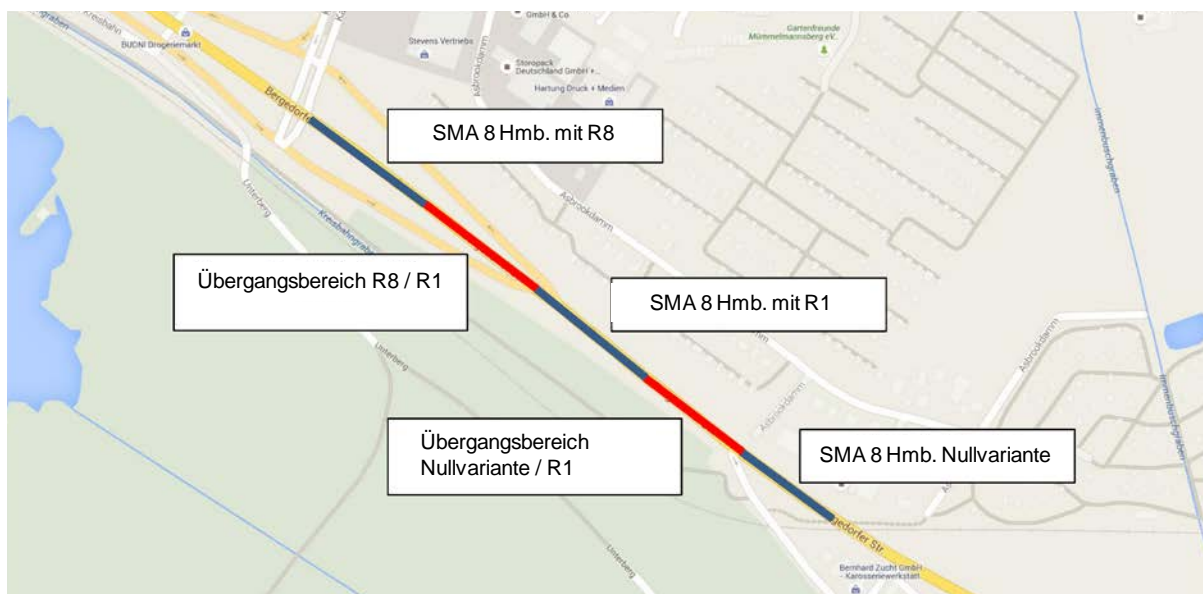


Abbildung 4-55: Unterteilung der Varianten (Quelle: Google Maps).

(a) SMA 8 Hmb. Nullvariante

Nach der Umsetzung des Straßenfertigers wurde gegen 10.15 Uhr mit dem Einbau der Nullvariante begonnen (vgl. Abbildung 4-54). Hier wurde zuerst die Mischgutsorte SMA 8 Hmb. mit 10 % Asphaltgranulat, jedoch ohne Rejuvenator, eingesetzt. Während des Einbaus war es bewölkt; die Temperatur betrug ca. 15 °C.



Abbildung 4-56: Einbau der Variante SMA 8 Hmb. mit 10 % Asphaltgranulat / ohne Rejuvenator.

Zu Beginn musste der Randbereich der Hauptfahrbahn per Hand mit Mischgut nachgeworfen werden (vgl. Abbildung 4-57).



Abbildung 4-57: Im Randbereich wurde Mischgut per Hand nachgeworfen.

Für den Einbau wurden insgesamt drei Lkw mit Mischgut benötigt. Mit dem Mischgut der ersten beiden Lkw konnte eine Strecke von ca. 100 m asphaltiert werden. Das Mischgut aus dem dritten Lkw wird als Übergangsbereich gekennzeichnet. Die Mischguttemperaturen wurden dabei sowohl im Fertigerkübel als auch in der Förderschnecke gemessen. Folgende Temperaturen können festgehalten werden:

Tabelle 4-41: Mischguttemperaturen im Fertigerkübel sowie in Förderschnecke

Uhrzeit des Abkippens	Temperatur im Kübel	Temperatur in der Förderschnecke
10:10 Uhr	-	164 °C
10:30 Uhr	169 °C	165 °C
10:45 Uhr	163 °C	158 °C

Die Verdichtung wurde mittels Troxler-Sonde vom Baustofflabor Hamburg überprüft. Nachstehend sind die Ergebnisse der erreichten Verdichtung aufgelistet (Dauer der Messung: 15 Sekunden):

- Vorverdichtung mittels Fertiger: 78,4 %,
- Nach 1. Walzübergang (statisch): 94,0 %,
- Nach 2. Walzübergang (vibrierend): 98,6 %.

In Abbildung 4-58 ist die Oberfläche der Nullvariante zu sehen, während Abbildung 4-59 die Oberfläche des Übergangsbereichs zur Variante mit R1 zeigt. Beide Abbildungen stellen die Oberfläche nach der abgeschlossenen Verdichtung mittels Walze dar. Die Oberfläche der Nullvariante erscheint rau und offen.



Abbildung 4-58: Oberfläche des SMA 8 Hmb. als Nullvariante nach der abgeschlossenen Walzverdichtung.



Abbildung 4-59: Oberfläche des Übergangsbereiches SMA 8 Hmb. Nullvariante zu SMA 8 Hmb. mit R1 nach der abgeschlossenen Walzverdichtung.

Während des Einbaus wurden im Mischgut der Nullvariante einige größere Gesteine des Granusil gefunden. Dieses hatte zur Folge, dass an mehreren Stellen die Klumpen entfernt und die Löcher mit Mischgut per Hand verfüllt werden mussten (vgl. Abbildung 4-60).

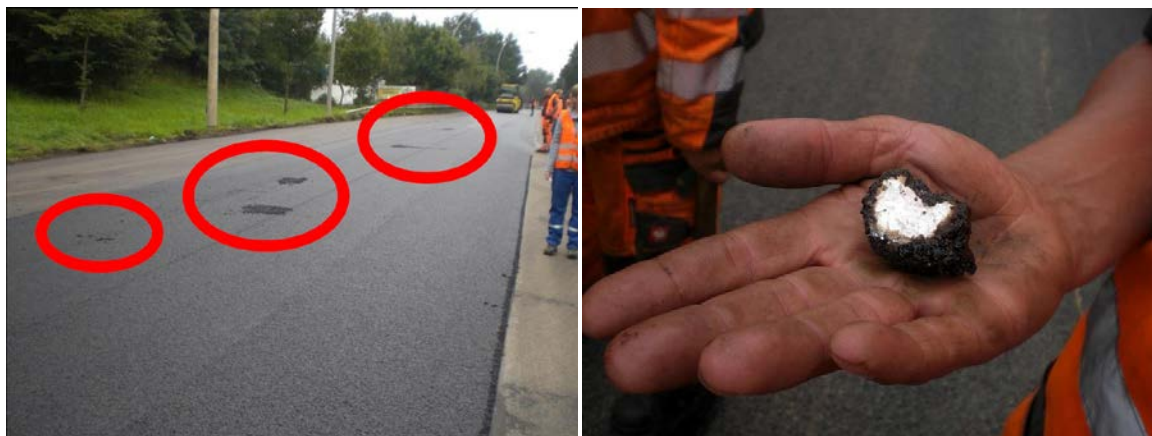


Abbildung 4-60: Im Mischgut der Nullvariante wurde Granusil gefunden.

(b) SMA 8 Hmb. unter Einsatz von R1

Gegen 11 Uhr wurde das Mischgut mit 50 % Asphaltgranulat mit dem Rejuvenator R1 eingebaut (vgl. Abbildung 4-61). Während des Einbaus war es bewölkt; die Temperatur betrug ca. 16 °C.



Abbildung 4-61: Einbau des SMA 8 Hmb. mit dem Rejuvenator R1.

Für den Einbau wurden insgesamt vier Lkw mit Mischgut benötigt. Das Mischgut aus dem ersten sowie aus dem vierten Lkw wird zum Übergangsbereich gezählt. Mit dem Mischgut des zweiten und dritten Lkw konnte eine Strecke von ca. 135 m asphaltiert werden. In Abbildung 4-62 ist der Einbau des Übergangsbereiches zur Mischgutvariante SMA 8 Hmb. mit dem Rejuvenator R8 abgebildet.



Abbildung 4-62: Einbau des Übergangsbereiches SMA 8 Hmb. mit dem Rejuvenator R1 und R8.

Die Mischguttemperaturen wurden sowohl im Fertigerkübel als auch in der Förderschnecke gemessen. Folgende Temperaturen können festgehalten werden:

Tabelle 4-42: Mischguttemperaturen im Fertigerkübel sowie in Förderschnecke

Uhrzeit des Abkippens	Temperatur im Kübel	Temperatur in der Förderschnecke
11:05 Uhr	174 °C	166 °C
11:15 Uhr	169 °C	165 °C
11:30 Uhr	168 °C	163 °C
11:45 Uhr	165 °C	160 °C

Für den Streckenabschnitt unter Einsatz des Rejuvenators R1 liegen keine Daten der Troxlersonde vor. Laut dem Baustoffprüfer des Baustofflabors Hamburg ist jedoch ein Unterschied zwischen der Nullvariante und der Variante mit R1 bemerkbar. Beim SMA 8 Hmb. unter Einsatz von R1 kann eine schnellere Verdichtung von 98 % erreicht werden.



Abbildung 4-63: Oberfläche des SMA 8 S Hmb. mit R1 nach der abgeschlossenen Walzverdichtung und Abstreuerung.

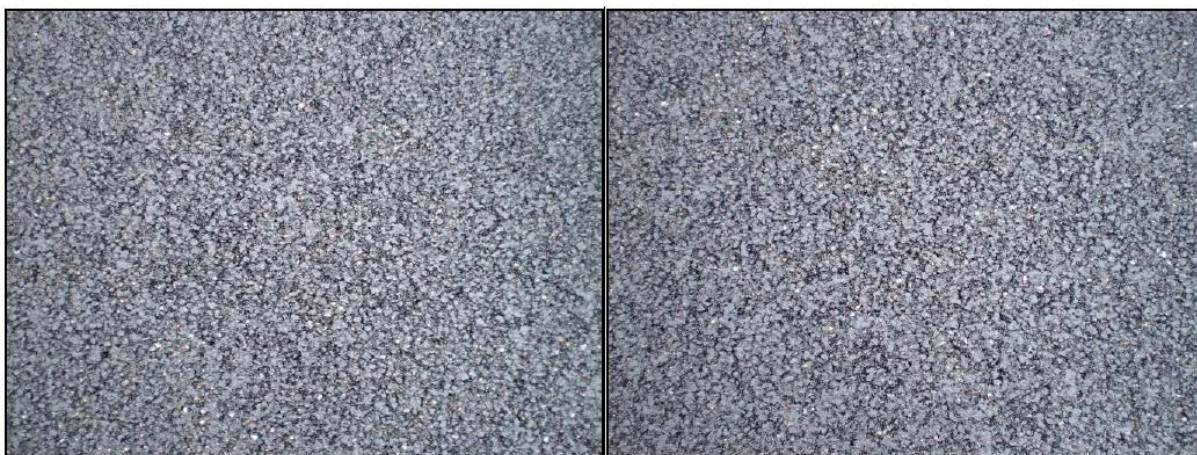


Abbildung 4-64: Oberfläche des Übergangsbereiches SMA 8 Hmb. R1 zu SMA 8 Hmb. mit R8 nach der abgeschlossenen Walzverdichtung und Abstreuerung.

In Abbildung 4-63 wird die Oberfläche der Variante mit R1 gezeigt, während in Abbildung 4-64 die Oberfläche des Übergangsbereichs zur Variante mit R8 abgebildet wird. Beide Abbildungen stellen die Oberfläche nach der abgeschlossenen Walzverdichtung sowie Abstreuerung dar. Die Oberfläche des SMA 8 Hmb. mit R1 ist geschlossener als die Nullvariante.

Beim Mischgut mit R1 können kleine weiße Steine an der Oberfläche beobachtet werden (vgl. Abbildung 4-65). Im Mischgut, welches sich in der Förderschnecke befindet, konnten keine Steine erkannt werden. Diese werden erst nach der Vorverdichtung mittels Straßenfertiger sichtbar.



Abbildung 4-65: An der Oberfläche des SMA 8 Hmb. mit R1 sind kleine weiße Steine zu sehen.

(c) SMA 8 Hmb. unter Einsatz von R8

Gegen 12 Uhr wurde mit dem Einbau des letzten Abschnitt, und zwar des SMA 8 Hmb. mit 50 % Asphaltgranulat und dem Rejuvenator R8, begonnen (vgl. Abbildung 4-66). Während des Einbaus war es bewölkt bis sonnig; die Temperatur betrug ca. 17 °C.



Abbildung 4-66: Einbau des SMA 8 Hmb. mit R8.

Für den Einbau wurden insgesamt drei Lkw mit Mischgut benötigt. Das Mischgut aus dem ersten Lkw wurde wieder zum Übergangsbereich gezählt. Mit dem Mischgut des zweiten und dritten Lkw konnte eine Strecke von ca. 119 m asphaltiert werden. Die Mischguttemperaturen wurden sowohl im Fertigerkübel als auch in der Förderschnecke gemessen. Folgende Temperaturen können festgehalten werden:

Tabelle 4-43: Mischguttemperaturen im Fertigerkübel sowie in Förderschnecke

Uhrzeit des Abkippens	Temperatur im Kübel	Temperatur in der Förderschnecke
12:05 Uhr	178 °C	174 °C
12:20 Uhr	179 °C	175 °C
12:35 Uhr	176 °C	172 °C



Abbildung 4-67: Oberfläche des SMA 8 Hmb. mit R8 nach Vorverdichtung mittels Straßenfertiger.

In Abbildung 4-67 wird die Oberfläche der Variante mit dem Rejuvenator R8 nach der Vorverdichtung gezeigt, während in Abbildung 4-68 die Oberfläche nach der Walzverdichtung abgebildet wird.



Abbildung 4-68: Oberfläche des SMA 8 Hmb. mit R8 nach Walzverdichtung.

Das Mischgut des SMA 8 Hmb. mit dem Rejuvenator R8 ist augenscheinlich glänzender als die anderen Varianten und auch die Oberfläche wirkt geschlossener. Wie in Abbildung 22 beobachtet werden kann, treten kleinere Fettflecke an der Oberfläche auf. Zum anderen fällt auf, dass die Mischguttemperatur um ca. 10 °C höher liegt als bei anderen Varianten.



Abbildung 4-69: Kleinere Fettflecken an der Oberfläche des SMA 8 Hmb. mit R8.

Insgesamt kann bei dieser Baumaßnahme eine gute Baustellenorganisation festgehalten werden. Die Lkw müssen nicht lange warten bis gekippt werden kann und auch der Straßenfertiger kommt selten zum Stehen.

4.7.2 Ergebnisse der Eigenüberwachung (WPK):

Der Untersuchungsbefund der Werkseigenen Produktionskontrolle (WPK) ergab folgendes:

- Der Erweichungspunkt Ring und Kugel beim Mischgut ohne Rejuvenator (Nullvariante) ist auffällig hoch. Er überschreitet den Erweichungspunkt aus der Erstprüfung um ca. 7 °C, liegt damit jedoch noch im Sollbereich.
- Beim SMA 8 Hmb. mit R1 (in der Hauptfahrbahn) wurde mit 1,8 Vol.-% ein geringerer Hohlraumgehalt ermittelt als in der Erstprüfung angegeben (2,6 Vol.-%). Dennoch liegt der Wert im Bereich der zulässigen Abweichung.
- Beim SMA 8 Hmb. mit R8 wurde mit 1,5 Vol.-% ein geringerer Hohlraumgehalt ermittelt als in der Erstprüfung angegeben (2,6 Vol.-%). Dennoch liegt der Wert im Bereich der zulässigen Abweichung.
- Beim SMA 8 Hmb. mit R1 ist der Wert der Nadelpenetration auffällig hoch. Mit einer Eindringtiefe von 65 0,1 mm liegt der Wert deutlich über den anderen (48 0,1 mm bei der Variante mit R8 und 28 0,1 mm bei der Nullvariante).
-

4.7.3 Zusammensetzung

Mischgutproben der großtechnisch hergestellten SMA 8 S Varianten wurden für die nachfolgenden Untersuchungen am Mischwerk bereit gestellt. Die Korngrößenverteilungen der hergestellten Mischgut-Varianten SMA 8 S sind anhand der Siebdurchgänge in Tabelle 4-44 angegeben. Abbildung 4-70 zeigt die angestrebte Korngrößenverteilung und die erreichten Korngrößenverteilungen im Vergleich mit dem zulässigen Sieblinienbereich gemäß TL Asphalt-StB 07 (ZTV Hamburg).

Tabelle 4-44: Zusammensetzung der hergestellten Mischgut-Varianten SMA 8 S bei Warmzugabe des Asphaltgranulats (Mittelwerte) in Abhängigkeit vom eingesetzten Rejuvenator und vom Zugabeanteil an Asphaltgranulat von 50 M.-%

Korn- durch- messer [mm]	Siebdurchgang [M.-%]			
	25 M.-% AG	50 M.-% AG		
	Referenz (V30)	R8 (V31)	R3 (V32)	R1 (V33)
31,5	100,0	100,0	100,0	100,0
22,4	100,0	100,0	100,0	100,0
16	100,0	100,0	100,0	100,0
11,2	100,0	100,0	100,0	100,0
8	96,1	94,1	93,8	94,7
5,6	56,8	51,7	50,7	52,6
2	31,9	31,3	30,0	30,7
1	23,3	24,5	23,6	24,5
0,25	16,1	16,2	16,3	16,2
0,125	13,4	13,4	13,7	13,3
0,063	11,7	11,7	12,1	12,0

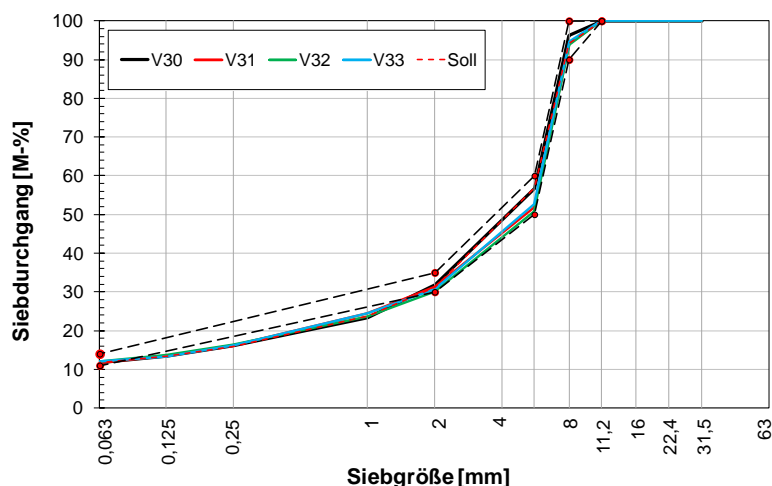


Abbildung 4-70: Mittlere Korngrößenverteilungen (Kontrollprüfung) für die Asphaltdeckschicht-Varianten SMA 8 S.

Die erzielten Korngrößenverteilungen entsprechen weitestgehend der angestrebten Soll-Sieblinie. Tabelle 4-45 fasst die Ergebnisse der Überprüfungen für die Mischgut-Varianten SMA 8 S zusammen.

Auf die Zusammensetzung der großtechnisch hergestellten Asphaltvarianten wurde durch das ISBS kein Einfluss genommen, die Menge an zugegebenem Rejuvenator wurde nicht mittels BTSV eingestellt.

Tabelle 4-45: Kontrollprüfungsergebnisse für die Mischgut-Varianten SMA 8 S

KenngroÙe	Mischgut-Variante			
	Referenz (V30)	50 M.-% AG		
		R8 (V31)	R3 (V32)	R1 (V33)
Bindemittelgehalt B [M.-%]	7,4	7,5	7,4	7,6
Rohdichte ρ_m [g/cm ³]	2,328	2,345	2,342	2,337
Erweichungspunkt EP _{RuK} [°C]	68,0	59,0	61,4	58,8

4.7.4 Performance-Eigenschaften

4.7.4.1 Verformungswiderstand

In Tabelle 4-46 sind die Ergebnisse aus dem Einaxialen Druck-Schwellversuch für die Mischgut-Varianten SMA 8 S angegeben. Abbildung 4-71 gibt die Ergebnisse grafisch wieder.

Tabelle 4-46: Ergebnisse der Verformungsprüfungen an den Mischgut-Varianten SMA 8 S mittels Einaxialen Druck-Schwellversuch gem. TP Asphalt, Teil 25 B 1 (Mittelwerte)

Variante	Rejuvenator	Zugabeanteil AG [M.-%]	Anzahl Belastungszyklen [-]	Dehnung im Wendepunkt / bei Versuchsende [%]	Dehnungsrate im Wendepunkt / bei Versuchsende [% · 10 ⁻⁴ /h]
V30	-	25	10000,0	14,9	2,1
V31	R8	50	4402,7	17,4	10,2
V32	R3	50	5229,3	18,2	10,9
V33	R1	50	3906,0	17,0	9,7

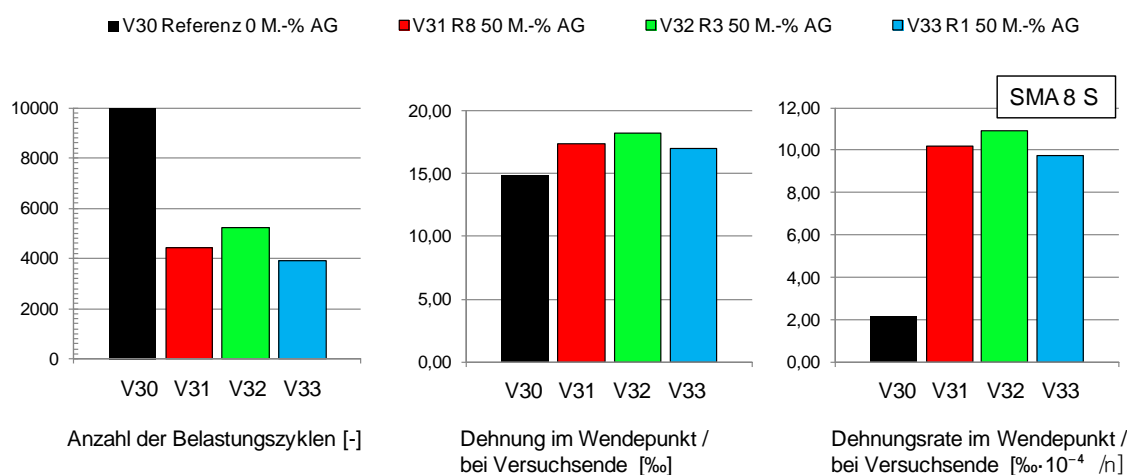


Abbildung 4-71: Ergebnisse der Verformungsprüfungen an den Mischgut-Varianten AC 11 D S mittels Einaxialen Druck-Schwellversuch gem. TP Asphalt, Teil 25 B 1.

4.7.4.2 Widerstand gegen Kälterissbildung

In Tabelle 4-47 sind die aus den Abkühlversuchen ermittelten Bruchtemperaturen mit den korrespondierenden Bruchspannungen zusammengestellt. Abbildung 4-72 gibt die Ergebnisse grafisch wieder.

Tabelle 4-47: Bruchtemperatur [°C] mit korrespondierender Bruchspannung [MPa] aus den Abkühlversuchen an den Mischgut-Varianten SMA 8 S

Variante	Rejuvenator	Zugabeanteil AG [M.-%]	Bruchtemperatur [°C]	Bruchspannung [MPa]
V30	-	25	4,859	-22,7
V31	R8	50	4,398	-28,7
V32	R3	50	4,835	-27,8
V33	R1	50	4,387	-33,0

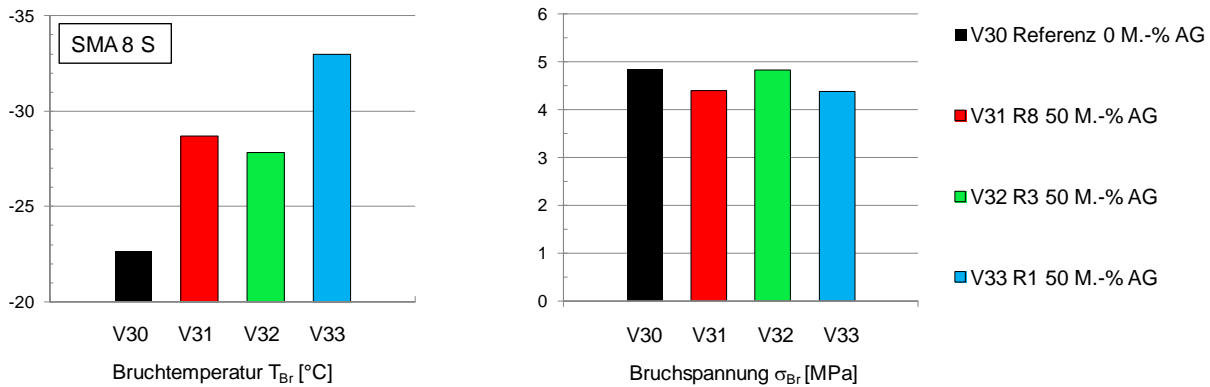


Abbildung 4-72: Bruchtemperaturen mit korrespondierenden Bruchspannungen aus den Abkühlversuchen an den Mischgut-Varianten SMA 8 S bei einem Zugabeanteil von 0 und 50 M.-% Asphaltgranulat in Abhängigkeit vom eingesetzten Rejuvenator.

Die Ergebnisse der Kältezugsversuche für die großtechnisch hergestellten SMA 8 S Varianten sind in Tabelle 4-48 zusammengestellt. In Abbildung 4-73 sind die Ergebnisse aus den Kältezugsprüfungen grafisch dargestellt.

Tabelle 4-48: Ergebnisse der Kältezugsprüfungen für die Mischgut-Varianten SMA 8 SS.

Variante	Rejuvenator	Zugabeanteil AG [M.-%]	Zugspannung [MPa]			
			@ +20 °C	@ +5 °C	@ -10 °C	@ -25 °C
V30	-	25	0,912	4,432	5,761	4,415
V31	R8	50	0,553	2,651	6,809	5,224
V32	R3	50	0,596	2,823	7,225	5,412
V33	R1	50	0,400	1,633	5,357	6,202

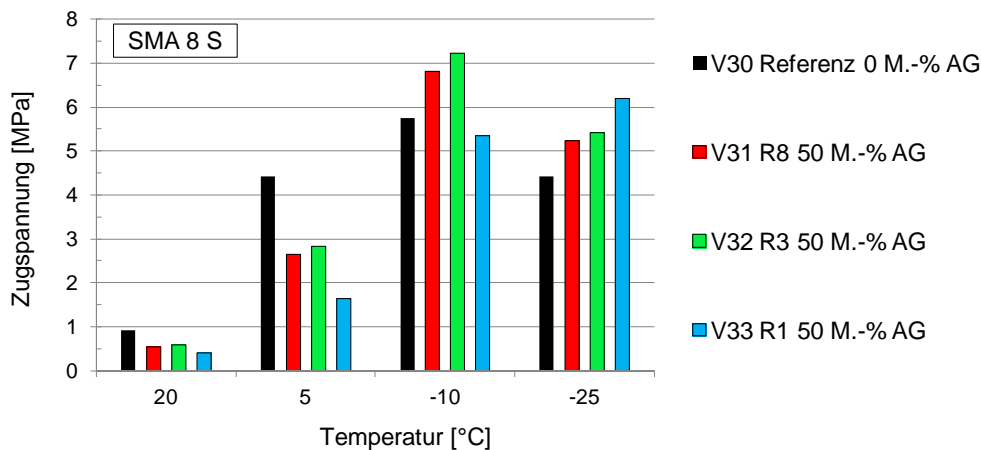


Abbildung 4-73: Ergebnisse der Kältezugsprüfungen an den Mischgut-Varianten SMA 8 S (Mittelwerte).

Aus den Ergebnissen der Abkühl- und der Kältezugsprüfungen wird die Zugfestigkeitsreserve je Asphaltdeckschichtmischgut-Variante ermittelt (vgl. Tabelle 4-49).

Tabelle 4-49: Maximale Zugfestigkeitsreserve [MPa] mit korrespondierender Temperatur [°C] für die Mischgut-Varianten SMA 8 S

Variante	Rejuvenator	Zugabeanteil AG [M.-%]	Zugfestigkeitsreserve [MPa]	Temperatur [°C]
V30	-	25	4,84	-2,1
V31	R8	50	5,95	-9,7
V32	R3	50	6,26	-9,6
V33	R1	50	5,20	-14,1

Den jeweiligen Verlauf der Zugfestigkeitsreserve in Abhängigkeit von der Temperatur für alle Asphaltdeckschicht-Varianten zeigt Abbildung 4-74.

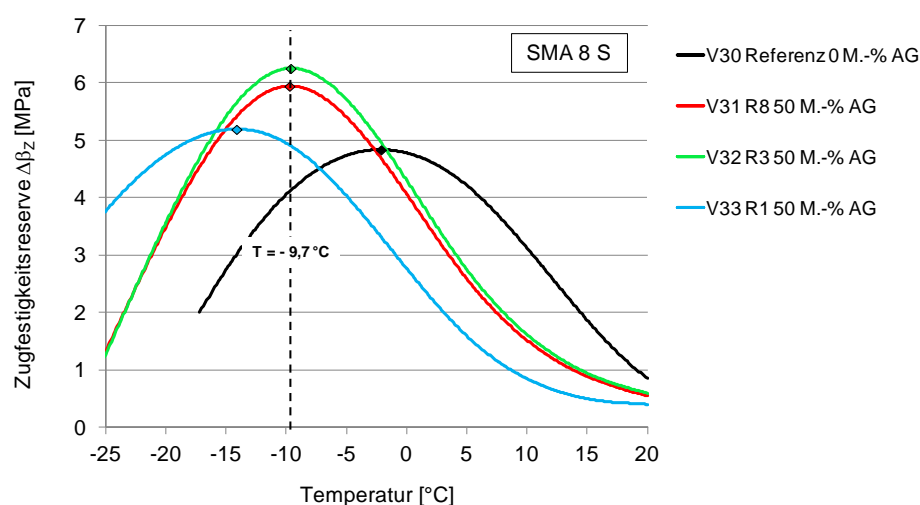


Abbildung 4-74: Verlauf der Zugfestigkeitsreserven für die Mischgut-Varianten SMA 8 S.

Die Varianten V31 und V32 weisen annähernd vergleichbare Verläufe der Zugfestigkeitsreserven auf. Die Varianten V30 und V33 weichen von diesem Verlauf deutlich ab. Das bisher gewählte Vorgehen eine Bezugstemperatur für alle Mischgut-Varianten zu wählen, um eine Reihung bezüglich des Widerstandes gegen Kälterissbildung abzuleiten ist nicht zielführend.

4.7.4.3 Steifigkeit

Die bei den Prüftemperaturen +20, +10, 0, und -10 °C und bei einer Prüffrequenz von 10 Hz ermittelten Steifigkeitsmoduln der Mischgut-Varianten SMA 8 S sind in Tabelle 4-50 angegeben. Abbildung 4-75 gibt die Ergebnisse grafisch wieder.

Tabelle 4-50: Ergebnisse der Steifigkeitsprüfungen für die Mischgut-Varianten SMA 8 S mittels Spaltzug-Schwellversuch bei einer Prüffrequenz von 10 Hz

Variante	Rejuvenator	Zugabeanteil AG [M.-%]	Steifigkeitsmodul [MPa] @ Temperatur [°C]			
			20	10	0	-10
V30	-	25	8021	12870	15531	18745
V31	R8	50	5828	9343	15222	19695
V32	R3		6252	8100	14127	19102
V33	R1		3901	6614	10742	14618

Tendenziell werden für die Referenzvariante V30 geringfügig erhöhte Steifigkeitsmoduln für die Temperaturen +20 und +10 °C im Vergleich zu jenen mittels Rejuvenatoren hergestellten Mischgut-Varianten festgestellt. Für die Temperaturen 0 und -10 °C weisen die Mischgutvarianten V31 (R8) und V32 (R3) vergleichbare Steifigkeitsmoduln zur Referenz auf. Für die mittels R1 hergestellte Mischgutvariante werden über den gesamten Temperaturbereich die geringsten Steifigkeitsmoduln festgestellt.

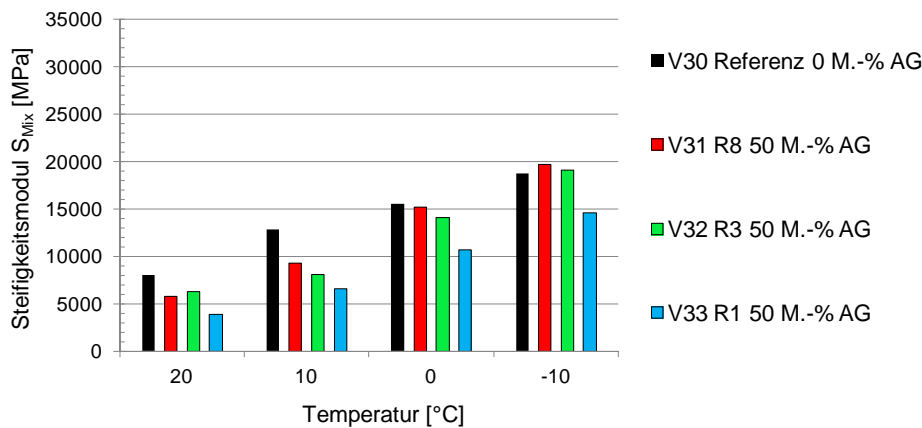


Abbildung 4-75: Ergebnisse der Steifigkeitsprüfungen für die Mischgut-Varianten SMA 8 S mittels Spaltzug-Schwellversuch bei einer Prüffrequenz von 10 Hertz.

Unter Verwendung von Gleichung 3-11 und unter Berücksichtigung aller Prüffrequenzen zur Ermittlung des Steifigkeitsmoduls werden die in Tabelle 4-51 angegebenen Regressionsparameter der Sigmoidfunktion erhalten.

Tabelle 4-51: Regressionsparameter y_0 , w , x_0 , z der Sigmoidfunktionen für die großtechnisch hergestellten Mischgut-Varianten SMA 8 S

Variante	Rejuvenator	Zugabeanteil AG [M.-%]	Regressionsparameter			
			y_0	w	x_0	z
V30	-	25	-1485,75	24261	2,01	2,04
V31	R8	50	-780,89	27763	3,33	1,83
V32	R3	50	1629,00	20612	3,14	1,28
V33	R1	50	591,16	21127	4,08	1,68

Die Steifigkeitsverläufe in Abhängigkeit von der Temperatur am Beispiel der Asphaltdeckschicht-Varianten der Sorte SMA 8 S mit 50 M.-% Asphaltgranulat sind in Abbildung 4-76 dargestellt.

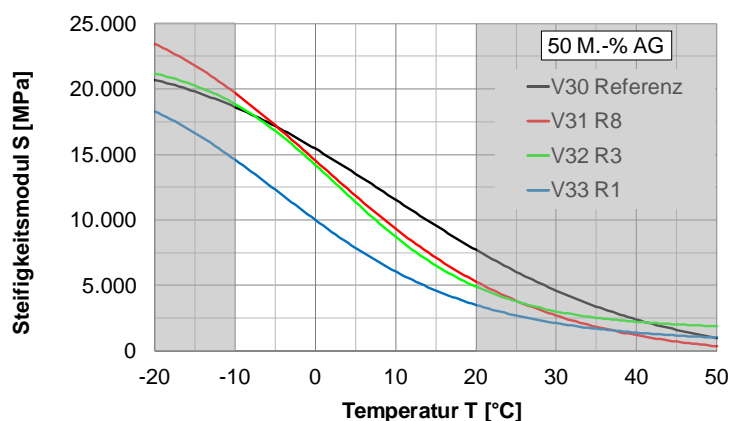


Abbildung 4-76: Steifigkeitsverläufe in Abhängigkeit von der Temperatur am Beispiel der großtechnisch hergestellten Mischgut-Varianten SMA 8 S mit 0 bzw. 50 M.-% Asphaltgranulat.

Die Referenzvariante V30 weist im Temperaturbereich 0 bis +20 °C erhöhte Steifigkeiten gegenüber allen anderen Varianten auf, bei -10 °C wird für die Variante V30 eine geringfügig geringere Steifigkeit als für Variante V31 festgestellt. Es zeigen sich annähernd gleiche Verläufe für die Steifigkeitsmoduln der Asphaltdeckschicht-Varianten V31 und V32. Variante V33 weist die geringsten Steifigkeitsmoduln auf.

4.7.4.4 Ermüdungswiderstand

Die Ergebnisse zum Ermüdungsverhalten der großtechnisch hergestellten Mischgut-Varianten SMA 8 S für die Prüftemperatur +20 °C und für eine Prüffrequenz von 10 Hz sind in Tabelle 4-52 wiedergegeben. Die Ermüdungsfunktionen der im Labor verdichteten Asphaltdeckschicht-Varianten erreichen Bestimmtheitsmaße größer 90 % gemäß der Mindestanforderung für Asphaltdeckschichten nach AL Sp-Asphalt 09 (vgl. Tabelle 3-6).

Tabelle 4-52: Regressionsparameter C_1 , C_2 und Bestimmtheitsmaße R^2 der Ermüdungsfunktionen aus dem Spaltzug-Schwellversuch je Mischgut-Variante SMA 8 S

Variante	Rejuvenator	Zugabeanteil AG [M.-%]	Regressionsparameter [-]		R^2 [%]
			C_1	C_2	
V30	-	25	41,511	-2,974	96
V31	R8	50	35,157	-2,859	98
V32	R3		61,493	-2,748	99
V33	R1		90,925	-2,577	99

Die je Asphalt-Variante aus 9 Einzelversuchen ermittelten Ermüdungsfunktionen am Beispiel der Asphaltdeckschicht-Varianten SMA 8 S mit 50 M.-% Asphaltgranulat sind in Abbildung 4-77 dargestellt.

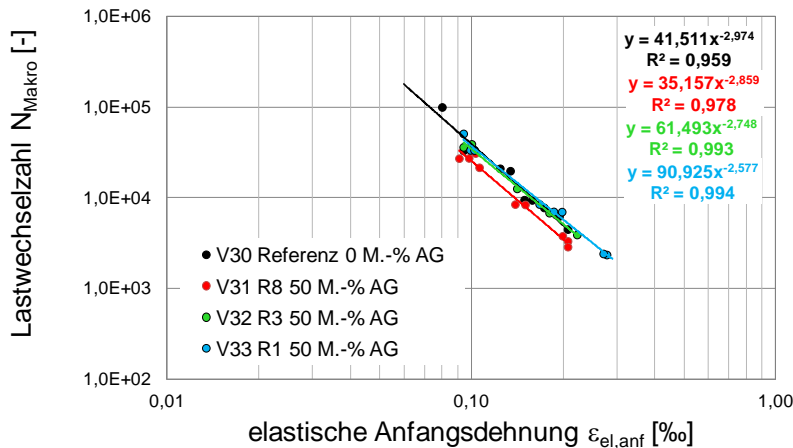


Abbildung 4-77: Mittels Spaltzug-Schwellversuch ermittelte Ermüdungsfunktionen am Beispiel der großtechnisch hergestellten Mischgut-Varianten SMA 8 S mit 0 bzw. 50 M.-% Asphaltgranulat bei 20 °C und 10 Hz.

Die dargestellten Ermüdungsfunktionen der Asphaltdeckschichtmischgut-Varianten V30, V32 und V33 weisen einen annähernd deckungsgleichen Verlauf auf. Die Variante V31 mit dem Rejuvenator R8 weist die vergleichsweise schlechtesten Ermüdungseigenschaften auf (paralleler Versatz).

4.8 Lebensdauerprognose mittels rechnerischer Dimensionierung

Mittels dem im Technischen Regelwerk dokumentierten Verfahren (Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung des Oberbaus von Verkehrsflächen mit Asphaltdeckschicht; RDO Asphalt 09) können mögliche Auswirkungen auf die prognostizierte rechnerische Lebensdauer einer Asphaltbefestigung untersucht werden. Die im Folgenden erläuterte Lebensdauerprognose gemäß RDO Asphalt 09 basiert im Wesentlichen auf den Steifigkeits- und Ermüdungsprüfungen an der Asphalttragschicht-Variante AC 32 T S.

Zur Durchführung von Berechnungen gemäß RDO Asphalt 09 wird der in der Software PADESTO umgesetzte Berechnungsalgorithmus (fehlerkorrigiert) angewandt.

4.8.1 Randbedingungen und Eingangsgrößen

Es werden folgende zwei Aufbauvarianten aus dem Katalog an Standardaufbauten im Technischen Regelwerk (Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen; RStO 12) berücksichtigt:

- Asphalttragschicht auf Frostschutzschicht (RStO 12, Tafel 1, Zeile 1) und
- Asphalttragschicht auf Schottertragschicht und auf Frostschutzschicht (RStO 12, Tafel 1, Zeile 3).

Als Verkehrsbeanspruchung werden reale Daten von vier ausgewählten Bundesfernstraßen eingesetzt (durchschnittlicher täglicher Verkehr und Schwerverkehrsanteil für das Jahr 2005 aus den Jahresauswertungen von Dauerzählstellen auf Bundesfernstraßen; vgl. BAST, 2005). Die aus der Verkehrsbeanspruchung resultierenden Belastungsklassen werden nach RStO 12 bestimmt.

Es werden die Belastungsklassen Bk100, Bk32, Bk10 und Bk3,2 gemäß den RStO 12 berücksichtigt. Die Befestigung Bk100 liegt mit $B = 211$ Mio. im sehr hohen Beanspruchungsbereich. Die Befestigungen Bk32 ($B = 13$ Mio.) und Bk10 ($B = 3,4$ Mio.) liegen im unteren Beanspruchungsbereich. Die Befestigung Bk3,2 liegt an der mittleren Belastungsklassengrenze.

Die Eingangsgrößen zur Verkehrsbeanspruchung sind in Tabelle 4-53 zusammengestellt. Für alle Befestigungen wird eine theoretische Lebensdauer von 30 Jahren angestrebt, die bei der Ermittlung von vorh. N berücksichtigt wird.

Tabelle 4-53: Festlegung der Belastungsklassen

	Berechnung der Belastungsklasse nach RStO 12			
	Bk100	Bk32	Bk10	Bk3,2
DTV [Kfz/24h]	72.713	15.908	7.968	5200
SV-Anteil [%]	20,0	18,7	7,7	7,0
Fahrstreifenfaktor f_1 [-]	0,4	0,45	0,5	0,5
Fahrstreifenbreitenfaktor f_2 [-]	1,0	1,1	1,40	1,80
Steigungsfaktor f_3 [-]	1,0	1,0	1,0	1,0
Mittlere jährliche Zunahme des Schwerverkehrs p [-]	0,03	0,02	0,01	0,01
Achszahlfaktor f_A [-]	4,5	4,0	3,3	3,3
Nutzungszeitraum N [a]	30	30	30	30
Lastkollektivquotient q_{Bm} [-]	0,33	0,25	0,23	0,23
Bemessungsrelevante Beanspruchung B [-]	150,01 Mio	22,16 Mio	4,3 Mio	3,16 Mio
Gewählte Eingangsgrößen für die Dimensionierung nach den RDO Asphalt				
Achslastkollektiv	BAB Fernverkehr	BAB Mischverkehr	BAB Stadtn. Verkehr	
Temperaturzone		Zone I		
Sicherheitsbeiwert F		2,1 / 0,6		

In Tabelle 4-54 und Tabelle 4-55 sind die untersuchten Befestigungs-Varianten dargestellt.

Tabelle 4-54: Befestigungs-Varianten der Bauweise Asphalttragschicht auf Frostschutzschicht

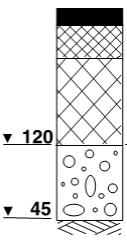
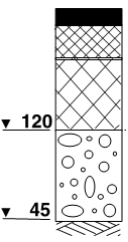
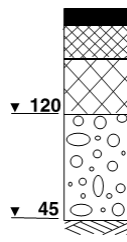
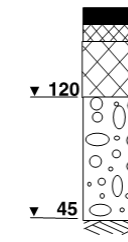
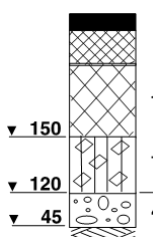
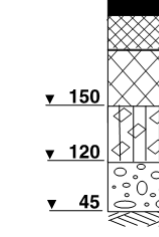
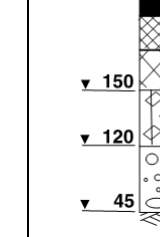
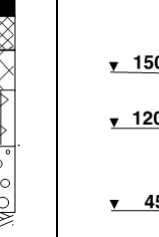
RStO 12, Tafel 1, Zeile 1: Asphalttragschicht auf Frostschutzschicht				
Bezeichnung:	Bk100	Bk32	Bk10	Bk3,2
Aufbauskizze				
Schichtdicken [cm]				
Asphaltdeckschicht	4			
Asphaltbinderschicht	8			6
Asphalttragschicht AC 32 T S	22	18	14	12
Dicke des frostsicheren Oberbaus	75			70

Tabelle 4-55: Befestigungs-Varianten der Bauweise Asphalttragschicht auf Schottertragschicht und auf Frostschutzschicht

RStO 12, Tafel 1, Zeile 3: Asphalttragschicht auf Schottertragschicht und auf Frostschutzschicht				
Bezeichnung:	Bk100	Bk32	Bk10	Bk3,2
Aufbauskinne				
Schichtdicken [cm]				
Asphaltdeckschicht	4			
Asphaltbinderschicht	8			6
Asphalttragschicht AC 32 T S / AC 32 T N	18	14	10	10
Dicke der Schottertragschicht	15			
Dicke des frostsicheren Oberbaus	75			70

4.8.1.1 Ermittlung der Dicke des frostsicheren Oberbaus

Gemäß RDO Asphalt 09 ist die Dicke des frostsicheren Oberbaus nach der in den RStO beschriebenen Methode zu ermitteln und einzuhalten. Es wird von einer frostsicheren Mindestdicke des Oberbaus von 75 cm für die Belastungsklassen Bk100, Bk32 und Bk10 ausgegangen. Für Bk3,2 wird von einer um 5 cm verringerten Dicke des frostsicheren Oberbaus ausgegangen.

4.8.1.2 Eingangsgröße Temperatur

Die für die untersuchten Befestigungsvarianten angenommene Verteilung der Straßenoberflächentemperatur entspricht der in den RDO beschriebenen Temperaturzone 1 (vgl. Abbildung 4-78).

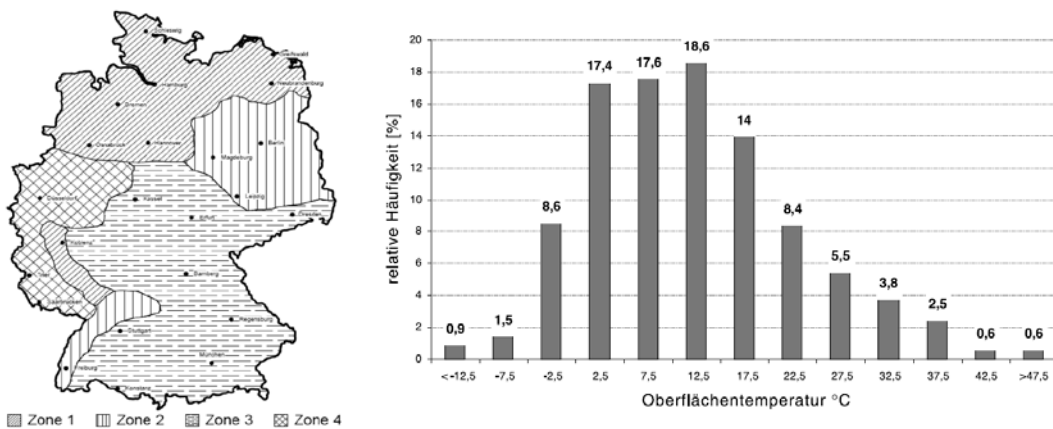


Abbildung 4-78: Gewählte Verteilung der Straßenoberflächentemperatur gemäß Zone 1 der RDO Asphalt 09 (FGSV 2009a).

4.8.1.3 Berechnungsergebnisse

Mischgut-Variante 1 (AC 32 T S)

In Tabelle 4-56 und Tabelle 4-57 sind die Berechnungsergebnisse in Form der „Miner-Summe“ für die Mischgut-Variante 1 (AC 32 T S) wiedergegeben (RDO-Kalibrierasphalt als Referenz). Abbildung 4-43 und Abbildung 4-44 geben die Ergebnisse graphisch wieder.

Tabelle 4-56: Berechnungsergebnisse aus der rechnerischen Dimensionierung gem. RDO Asphalt 09 für die Mischgut-Varianten AC 32 T S für die Bauweise „Asphalttragschicht auf Frostschutzschicht“ gemäß Tafel1, Zeile 1 RStO 12 (RDO-Kalibrierasphalt als Referenz)

Variante	Rejuvenator	Zugabeanteil AG [M.-%]	Miner Summe [-]			
			Bk100	Bk32	Bk10	Bk3,2
RDO	-	-	1,27	0,67	0,44	0,87
V1	-	0	1,18	0,52	0,28	0,43
V2	R8	40	2,79	1,22	0,66	1,02
V3		60	-	-	-	-
V4	R3	40	2,21	0,93	0,48	0,70
V5		60	2,21	0,96	0,51	0,78
V6	R1	40	2,52	1,09	0,57	0,87
V7		60	3,03	1,26	0,64	0,95

bei Berücksichtigung von kryogenen Beanspruchungen						
Variante	Rejuvenator	Zugabeanteil AG [M.-%]	Miner Summe [-]			
			Bk100	Bk32	Bk10	Bk3,2
RDO	-	-	1,34	0,69	0,45	0,88
V1	-	0	1,31	0,56	0,29	0,45
V2	R8	40	2,98	1,28	0,68	1,04
V3		60	-	-	-	-
V4	R3	40	2,58	1,03	0,51	0,74
V5		60	2,66	1,09	0,56	0,83
V6	R1	40	2,67	1,13	0,59	0,89
V7		60	3,22	1,32	0,66	0,97

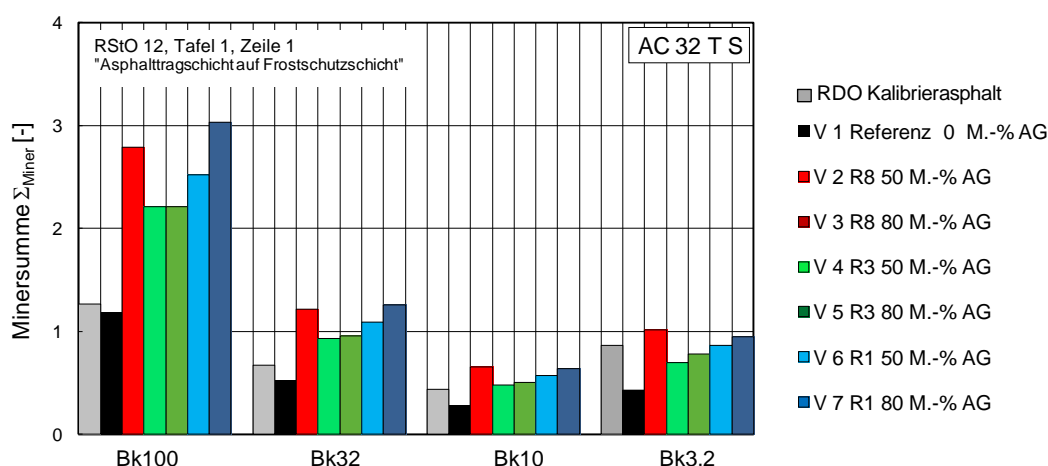


Abbildung 4-79: Berechnungsergebnisse aus der rechnerischen Dimensionierung gem. RDO Asphalt 09 für die Mischgut-Varianten AC 32 T S für die Bauweise „Asphalttragschicht auf Frostschutzschicht“, für die Belastungsklassen Bk100, Bk32, Bk10 und Bk3,2 gemäß RStO 12 (RDO-Kalibrierasphalt als Referenz) ohne Berücksichtigung von kryogenen Spannungen.

Aus den Berechnungsergebnissen ist bei Berücksichtigung der Belastungsklasse Bk100 abzuleiten, dass die Asphalttragschichten für alle berücksichtigten Mischgut-Varianten einer Dauerbeanspruchung über einen Dimensionierungszeitraum von 30 Jahren nicht standhalten, die Minersummen sind stets größer 1.

Für die Belastungsklasse Bk32 halten die Asphalttragschichten für die berücksichtigten Mischgut-Varianten „RDO“, V1, V4 und V5 einer Dauerbeanspruchung über einen Dimensionierungszeitraum von 30 Jahren stand. Auch bei der Belastungsklasse Bk10 halten alle Varianten einer Dauerbeanspruchung über einen Dimensionierungszeitraum von 30 Jahren stand. In der Belastungsklasse Bk3,2 halten mit Ausnahme der Variante V2 alle Varianten einer Dauerbeanspruchung über einen Dimensionierungszeitraum von 30 Jahren stand.

Eine Änderung des gewählten Straßenaufbaus durch Wahl einer anderen Bauweise gemäß RStO 12 führt von der Reihung zu vergleichbaren Ergebnissen, jedoch weisen die Schädigungssummen nach Miner geringere (vorteilhafte) Werte auf.

Tabelle 4-57: Berechnungsergebnisse aus der rechnerischen Dimensionierung gem. RDO Asphalt 09 für die Mischgut-Varianten AC 32 T S für die Bauweise „Asphalttragschicht auf Schottertragschicht und auf Frostschutzschicht“ gemäß Tafel 1, Zeile 3 RStO 12 (RDO-Kalibrierasphalt als Referenz)

Variante	Rejuvenator	Zugabeanteil AG [M.-%]	Miner Summe [-]			
			Bk100	Bk32	Bk10	Bk3,2
RDO	-	-	1,06	0,61	0,43	0,48
V1	-	0	0,81	0,39	0,23	0,22
V2	R8	40	1,93	0,92	0,55	0,52
V3		60	-	-	-	-
V4	R3	40	1,46	0,67	0,39	0,35
V5		60	1,51	0,72	0,42	0,40
V6	R1	40	1,71	0,80	0,46	0,44
V7		60	1,99	0,90	0,50	0,47
bei Berücksichtigung von kryogenen Beanspruchungen						
Variante	Rejuvenator	Zugabeanteil AG [M.-%]	Miner Summe [-]			
			Bk100	Bk32	Bk10	Bk3,2
RDO	-	-	1,09	0,62	0,44	0,48
V1	-	0	0,87	0,41	0,24	0,23
V2	R8	40	2,02	0,95	0,56	0,53
V3		60	-	-	-	-
V4	R3	40	1,62	0,71	0,39	0,37
V5		60	1,71	0,78	0,45	0,42
V6	R1	40	1,78	0,82	0,47	0,45
V7		60	2,08	0,93	0,51	0,48

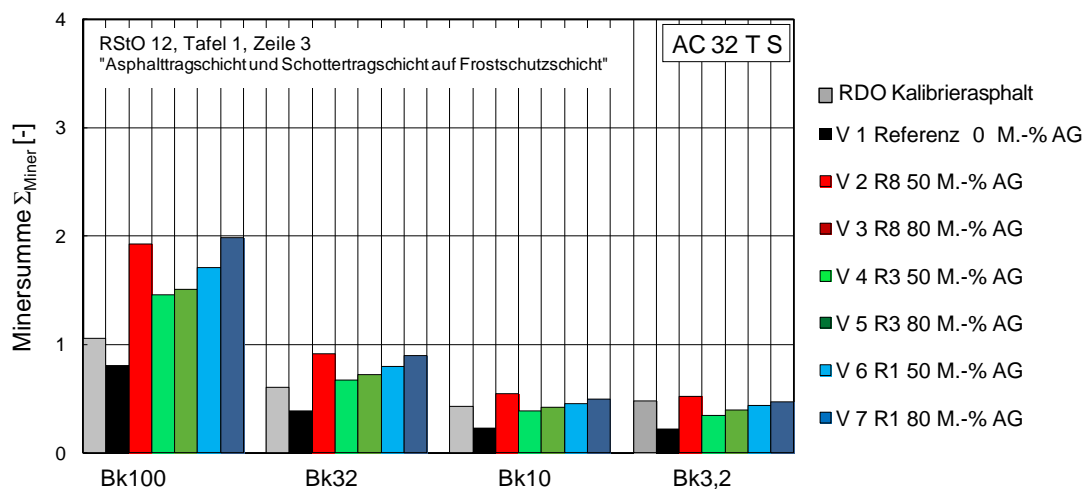


Abbildung 4-80: Berechnungsergebnisse aus der rechnerischen Dimensionierung gem. RDO Asphalt 09 für die Mischgut-Varianten AC 32 T S für die Bauweise „Asphalttragschicht auf Schottertragschicht und auf Frostschutzschicht“, für die Belastungsklassen Bk100, Bk32, Bk10 und Bk3,2 gemäß RSStO 12 (RDO-Kalibrierasphalt als Referenz).

Daraus kann abgeleitet werden:

- Eine Zunahme des Asphaltgranulatanteils erhöht die Schädigungssumme nach Miner.
- Die Rejuvenatoren zeigen folgende vorteilhafte Reihung hinsichtlich der Schädigungssumme: R3 > R1 > R8.

5 Interpretation der Untersuchungsergebnisse

Anhand der in Kapitel 4 beschriebenen Ergebnisse werden im Folgenden die Auswirkungen der Rejuvenatoren und des Zugabeanteils von Asphaltgranulat auf die Performance-Eigenschaften der Asphalt-Varianten interpretiert. Im Einzelnen sind die Ergebnisse aus den Zug- und Abkühlversuchen (Kapitel 3.4.2), dem Einaxialen Druck-Schwellversuch (Kapitel 3.4.1) und aus den Steifigkeits- und Ermüdungsprüfungen zusammen mit den Resultaten aus der rechnerischen Dimensionierung (Kapitel 4.8) in die Beurteilung einbezogen. Die Ergebnisinterpretation zielt auf eine Beurteilung der Einflüsse des eingesetzten Rejuvenators von Asphaltgranulat auf die resultierenden mechanischen Asphalteeigenschaften ab.

5.1 Verformungswiderstand von Asphalt

Abbildung 5-1 zeigt die Ergebnisse für die Dehnungsrate im Wendepunkt bzw. bei Ende des Einaxialen Druck-Schwellversuchs für die Mischgut-Varianten AC 32 T S in Abhängigkeit vom Zugabeanteil an Asphaltgranulat.

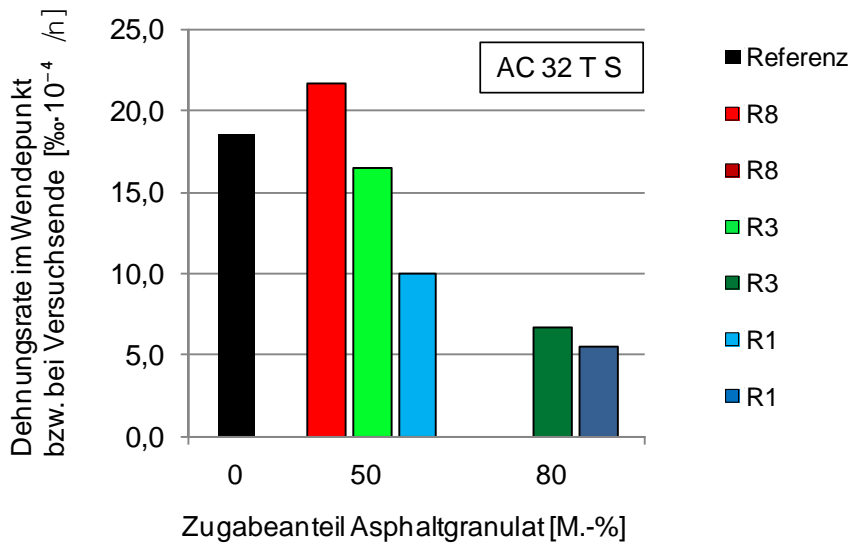


Abbildung 5-1: Dehnungsraten im Wendepunkt bzw. bei Versuchsende für die Mischgut-Varianten AC 32 T S aus dem Einaxialen Druck-Schwellversuch gem. TP Asphalt, Teil 25 B 1.

Aus Abbildung 5-1 ist ein systematischer Einfluss des Zugabeanteils an Asphaltgranulat für die Mischgut-Variante AC 32 T S ableitbar. Mit Ausnahme der Variante unter Verwendung des Rejuvenators R8 wird eine vorteilhafte Verformungsbeständigkeit gegenüber der Referenz festgestellt. Ein erhöhter Zugabeanteil von Asphaltgranulat wirkt sich zudem positiv auf die Verformungsbeständigkeit aus. Dies korrespondiert mit den Erkenntnissen von Walther und Wistuba (2014) für Asphalttragschichtmischgut.

Abbildung 5-1 zeigt die Ergebnisse der Dehnungsraten im Wendepunkt bzw. bei Versuchsende für die Mischgut-Varianten SMA 11 S und AC 11 D S in Abhängigkeit vom Zugabeanteil an Asphaltgranulat.

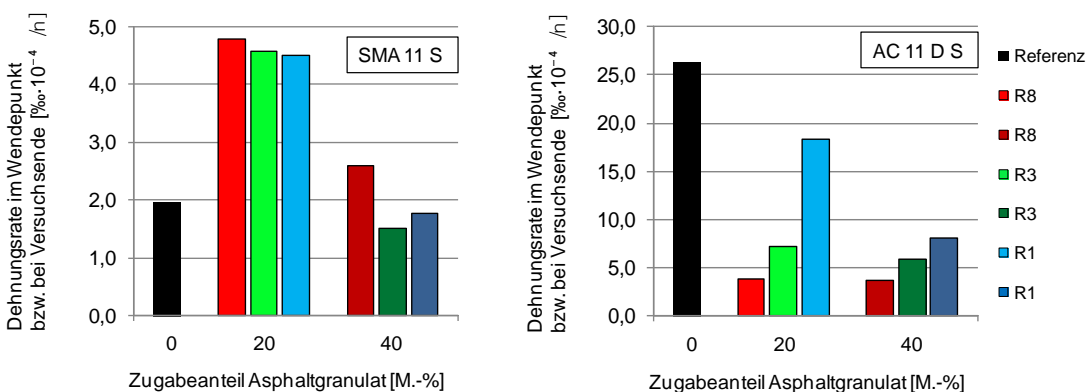


Abbildung 5-2: Ergebnisse der Dehnungsrate im Wendepunkt bzw. bei Versuchsende für die Mischgut-Varianten SMA 11 S (links) und AC 11 D S (rechts) aus dem Einaxialen Druck-Schwellversuch gem. TP Asphalt, Teil 25 B 1.

Wie für die Asphalttragschicht-Variante AC32 T S ist auch aus Abbildung 5-1 ein systematischer Einfluss des Zugabeanteils an Asphaltgranulat ableitbar.

Für die Mischgut-Variante SMA 11 S ist festzustellen, dass ein Zugabeanteil von 20 M.-% Asphaltgranulat gegenüber einem erhöhten Zugabeanteil von 40 M.-% den Verformungswiderstand im Vergleich zur Referenz negativ beeinflusst. Die Dehnungsraten der

SMA-Varianten mit 40 M.-% Asphaltgranulat weisen unabhängig vom eingesetzten Rejuvenator vergleichbare Größenordnungen wie die Referenz auf.

Für die Mischgut-Variante AC 11 D S ist festzustellen, dass die Zugabe von Asphaltgranulat den Verformungswiderstand positiv im Vergleich zur Referenz beeinflusst. Der Zugabeanteil von Asphaltgranulat wirkt sich bei dieser Mischgut-Variante weniger stark auf die Performance aus als bei der Mischgut Variante SMA 11 S. Auffällig sind die Varianten unter Verwendung des Rejuvenators R1. Diese weisen im Vergleich zu den anderen Rejuvenatoren die geringsten Verformungswiderstände auf.

Abbildung 5-3 zeigt die Ergebnisse der Dehnungsraten im Wendepunkt bzw. bei Versuchsende für die Mischgut-Varianten AC 22 B S in Abhängigkeit vom Zugabeanteil an Asphaltgranulat. Der Einfluss des Zugabeanteils an Asphaltgranulat auf den Verformungswiderstand ist hier nicht ohne weiteres ableitbar.

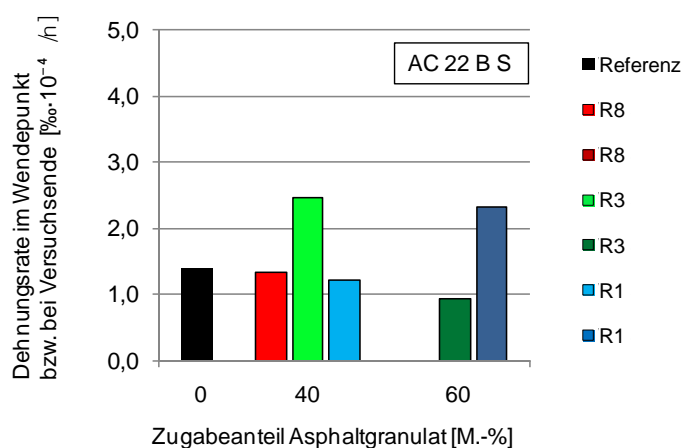


Abbildung 5-3: Ergebnisse der Dehnungsrate im Wendepunkt bzw. bei Versuchsende für die Mischgut-Varianten AC 22 B S aus dem Einaxialen Druck-Schwellversuch gem. TP Asphalt, Teil 25 B 1.

Es ist kein systematischer Einfluss des Zugabeanteils von Asphaltgranulat bei Verwendung von Rejuvenatoren auf die Verformungsbeständigkeit ableitbar. Anzumerken ist jedoch die geringe Dehnungsrate von $1,6 \text{ } \text{‰} \cdot 10^{-4/n}$ im Mittel über alle dargestellten Mischgut-Varianten der Sorte AC 22 B S, die eine Interpretation bezüglich des Zugabeanteils von Asphaltgranulat und Rejuvenator erschwert. Die Varianten erzielen tendenziell vergleichbare Verformungswiderstände.

5.2 Widerstand gegen Kälterissbildung von Asphalt

Die Zugfestigkeitsreserven werden zusammenfassend für eine gewählte Bezugstemperatur je Asphaltmischgut-Variante dargestellt (vgl. Abbildung 5-4).

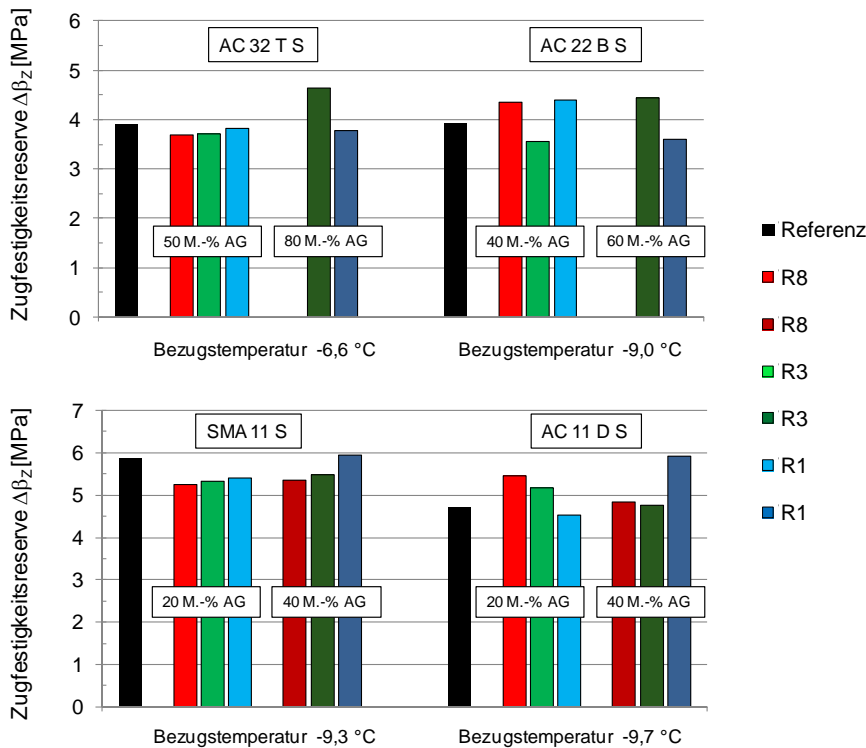


Abbildung 5-4: Zugfestigkeitsreserven (bei einer Bezugstemperatur) unter Variation des Zugabeanteils an Asphaltgranulat und der eingesetzten Rejuvenatoren für die Mischgut-Varianten AC 32 T S, AC 22 B S, SMA 11 S und AC 11 D S.

Für die **Mischgut-Variante AC 32 T S** ist festzustellen, dass alle Varianten unter Zugabe von Asphaltgranulat und Rejuvenatoren vergleichbare Kälteeigenschaften erzielen. Tendenziell vorteilhaft erweist sich die Variante unter Einsatz des Rejuvenators R3 mit einem Zugabeanteil von 80 M.-% Asphaltgranulat.

Für die **Mischgut-Variante AC 22 B S** ist festzustellen, dass Asphaltmischgut der Sorte Asphaltbeton AC 22 B S unter Einsatz von Asphaltgranulat und Rejuvenatoren vergleichbare Kälteeigenschaften wie eine Referenzvariante ohne Zugabe von Asphaltgranulat erzielen kann. Eine einheitliche Reihung hinsichtlich des Zugabeanteils von Asphaltgranulat bzw. eingesetztem Rejuvenator bezüglich der Kälteeigenschaften ist nicht erkennbar.

Für die **Mischgut-Variante SMA 11 S** ist festzustellen, dass alle Varianten unter Zugabe von Asphaltgranulat und Rejuvenatoren vergleichbare Kälteeigenschaften erzielen, wobei die Referenz vorteilhafte Eigenschaften aufweist. Tendenziell geht mit der Zunahme von Asphaltgranulat eine vorteilhafte Performance einher.

Für die **Mischgut-Variante AC 11 D S** ist festzustellen, dass alle Varianten unter Zugabe von Asphaltgranulat und Rejuvenatoren vergleichbare bis leicht verbesserte Kälteeigenschaften erzielen als die Referenz. Eine einheitliche Reihung hinsichtlich des Zugabeanteils von Asphaltgranulat bzw. des eingesetzten Rejuvenators bezüglich der Kälteeigenschaften ist nicht erkennbar, da die Variante unter Verwendung des Rejuvenators R1 und bei einem Zugabeanteil von 40 M.-% Asphaltgranulat eine gegenläufige Tendenz zu den anderen Varianten aufzeigt.

5.3 Steifigkeit und Ermüdungswiderstand von Asphalt

In Abbildung 5-5 sind die Steifigkeitsverläufe in Abhängigkeit von der Temperatur unter Variation des Zugabeanteils an Asphaltgranulat und der eingesetzten Rejuvenatoren für die Mischgut-Varianten AC 32 T S und AC 22 B S dargestellt.

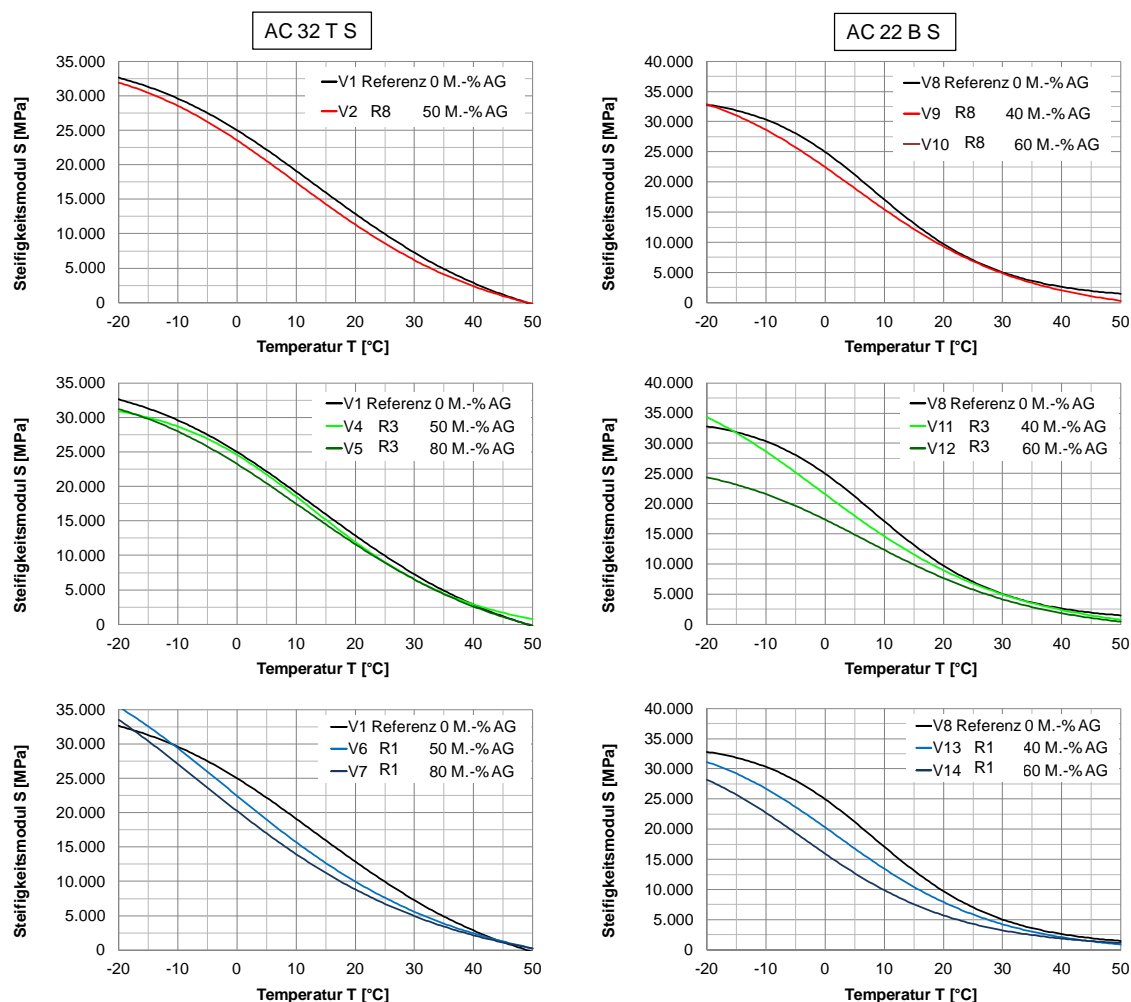


Abbildung 5-5: Steifigkeitsverläufe in Abhängigkeit von der Temperatur unter Variation des Zugabeanteils an Asphaltgranulat und der eingesetzten Rejuvenatoren für die Mischgut-Varianten AC 32 T S und AC 22 B S.

Aus den Steifigkeitsverläufen (generiert aus Sigmoidfunktion) kann abgeleitet werden, dass

- mittels des Rejuvenators R8 annähernd vergleichbare Steifigkeitsverläufe wie die jeweiligen Referenz-Varianten für AC 32 T S und AC 22 B S erzielt werden können,
- mittels des Rejuvenators R3 unabhängig vom Zugabeanteil von Asphaltgranulat annähernd vergleichbare Steifigkeitsverläufe wie für die Referenz-Variante des Asphaltmischguts AC 32 T S, aber nicht wie für das Asphaltmischgut AC 22 B S erzielt werden können,
- mittels des Rejuvenators R1 unabhängig vom Zugabeanteil von Asphaltgranulat geringere Steifigkeiten in Abhängigkeit von der Temperatur im Vergleich zu den die jeweiligen Referenz-Varianten für AC 32 T S und AC 22 B S resultieren.

In Abbildung 5-5 sind die Steifigkeitsverläufe in Abhängigkeit von der Temperatur unter Variation des Zugabeanteils an Asphaltgranulat und der eingesetzten Rejuvenatoren für die Mischgut-Varianten SMA 11 S und AC 11 D S dargestellt.

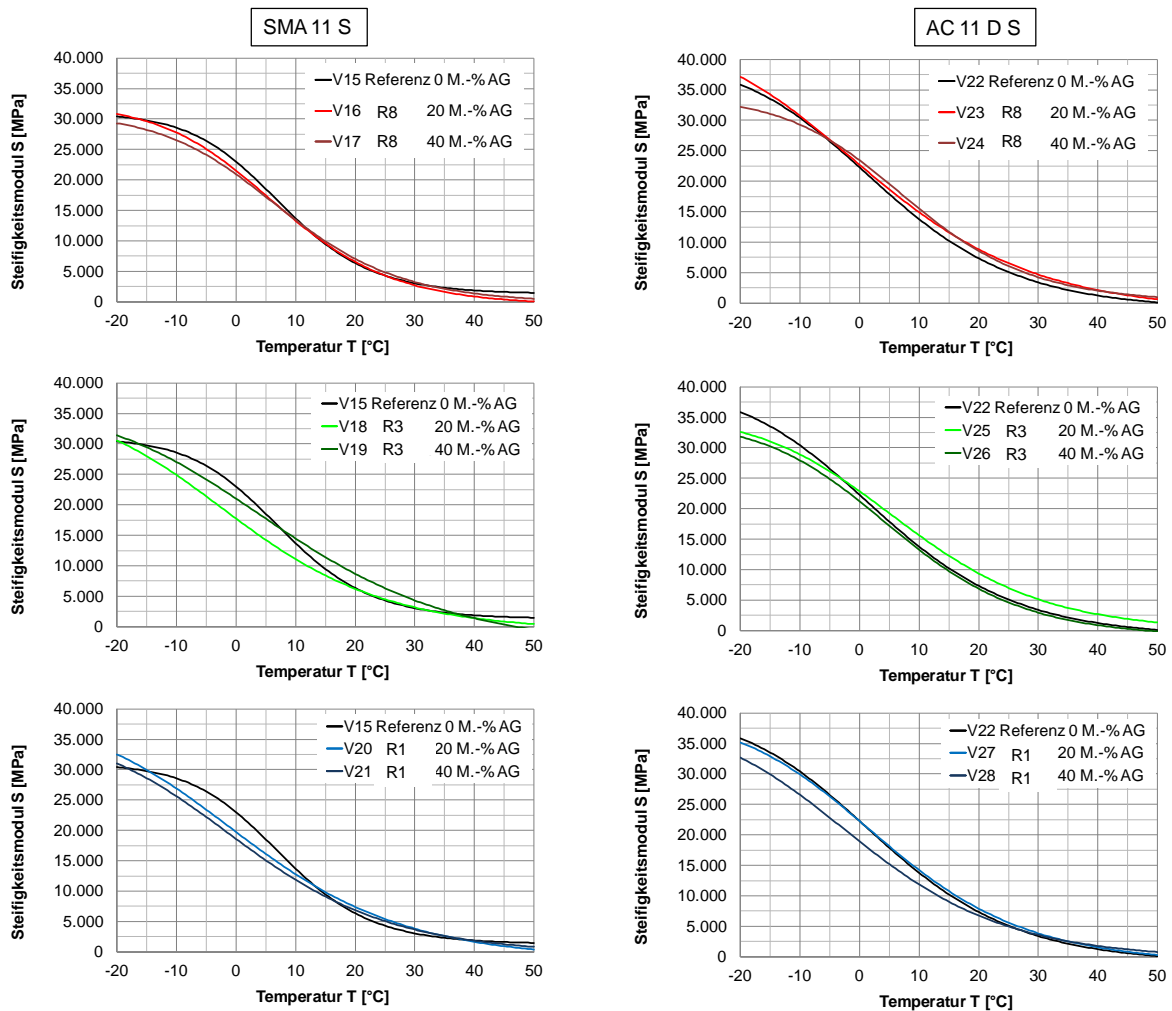


Abbildung 5-6: Steifigkeitsverläufe in Abhängigkeit von der Temperatur unter Variation des Zugabeanteils an Asphaltgranulat und der eingesetzten Rejuvenatoren für die Mischgut-Varianten SMA 11 S und AC 11 D S.

Aus den Steifigkeitsverläufen (generiert aus Sigmoidfunktion) kann abgeleitet werden, dass

- mittels des Rejuvenators R8 annähernd vergleichbare Steifigkeitsverläufe wie die jeweiligen Referenz-Varianten für SMA 11 S und AC 11 D S erzielt werden können,
- mittels des Rejuvenators R3 für die Asphaltart SMA 11 S zum Teil deutlich von der Referenz abweichende Steifigkeitsmoduln feststellbar sind, wohingegen bei der Mischgut-Variante AC 11 D S annähernd vergleichbare bzw. vorteilhafte Steifigkeitsverläufe wie für die Referenz-Variante erzielt werden können,
- mittels des Rejuvenators R1 für die Asphaltart SMA 11 S zum Teil deutlich von der Referenz abweichende Steifigkeitsmoduln (insbesondere im Temperaturbereich von -10 °C bis +10 °C) feststellbar sind, wohingegen bei der Mischgut-Variante AC 11 D S annähernd vergleichbare Steifigkeitsverläufe wie für die Referenz-Variante erzielt werden können.

Für die **Mischgut-Variante AC 32 T S** ist festzustellen, dass die Varianten unter Zugabe von Asphaltgranulat und der Rejuvenatoren R8 und R3 vergleichbare Steifigkeitsmoduln erzielen wie die Referenz, die Varianten unter Verwendung des Rejuvenators R1 zum Teil deutlich geringere. Eine Zunahme des Anteils an Asphaltgranulat bewirkt tendenziell eine Abminderung des Steifigkeitsmoduls

Für die **Mischgut-Variante AC 22 B S** ist festzustellen, dass Asphaltmischgut der Sorte Asphaltbeton AC 22 B S unter Einsatz von Asphaltgranulat und Rejuvenatoren tendenziell geringere Steifigkeitsmoduln als eine Referenzvariante ohne Zugabe von Asphaltgranulat erzielt. Eine Zunahme des Anteils an Asphaltgranulat bewirkt eine Abminderung des Steifigkeitsmoduls.

Für die **Mischgut-Variante SMA 11 S** ist festzustellen, dass alle Varianten unter Zugabe von Asphaltgranulat und Rejuvenatoren tendenziell geringere Steifigkeitsmoduln als die Referenz im Temperaturbereich von -10 °C bis +10 °C erzielen. Bei 20 °C resultieren einheitlich höhere Steifigkeitsmoduln aus der Regression (Sigmoidfunktion).

Für die **Mischgut-Variante AC 11 D S** ist festzustellen, dass Asphaltmischgut der Sorte Asphaltbeton AC 11 D S unter Einsatz von Asphaltgranulat und Rejuvenatoren vergleichbare Steifigkeitsmoduln wie eine Referenzvariante ohne Zugabe von Asphaltgranulat erzielen kann.

Eine erhöhte Zugabe von Asphaltgranulat bewirkt tendenziell eine Reduktion der Steifigkeitsmoduln.

Hinsichtlich des Ermüdungswiderstandes weisen alle Asphaltmischgut-Varianten unter Einsatz von Rejuvenatoren gleichwertige bis vorteilhafte Performance-Eigenschaften auf im Vergleich zur Referenz, mit Ausnahme der Asphalttragschichtmischgut-Variante AC 32 T S.

5.4 Rechnerische Dimensionierung

Innerhalb der rechnerischen Dimensionierung werden bezüglich der Schädigungssumme nach Miner insbesondere die Materialkenngrößen der Asphalttragschicht berücksichtigt, da hier die Auswirkungen zwischen den Performance-Eigenschaften Steifigkeit und Ermüdungswiderstand berücksichtigt werden.

Andere Asphaltarten wie beispielsweise Asphaltbinder- und –deckschichten werden ausschließlich hinsichtlich der Steifigkeit im Berechnungsverfahren gemäß RDO Asphalt 09 berücksichtigt. Hier weisen steifere Varianten Vorteile gegenüber weicheren auf, da sie die Tragfähigkeit des gebundenen Oberbaus erhöhen und so zu einer Reduktion der Biegezugdehnungen an der Unterseite der Asphalttragschicht beitragen.

Für die Asphalttragschicht Variante AC 32 T S kann abgeleitet werden, dass erhöhte Zugaben von Asphaltgranulat eine Reduktion der Steifigkeitsmoduln und damit einhergehend höhere Biegezugdehnungen an der Unterseite der Asphalttragschicht zur Folge haben.

Die abgeleiteten Eigenschaften der Mischgut-Varianten AC 32 T S bezüglich des Ermüdungswiderstandes zeigen, dass die im Forschungsprojekt eingesetzten Rejuvenatoren lediglich annähernd die Eigenschaften der Referenzvariante ohne Einsatz von Asphaltgranulat erreichen.

6 Zusammenfassung

Dieser Bericht beinhaltet den zweiten Teil des vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur beauftragten Forschungsprojekts FE 07.0250/2011/LRB - „Einsatz von Rejuvenatoren bei der Wiederverwendung von Asphalt“. Er wurde am Institut für Straßenwesen der Technischen Universität Braunschweig (ISBS) erarbeitet.

Die Verwendung von Asphaltmischgut unter Verwendung von Ausbauasphalt in Form von Asphaltgranulat ist in Deutschland seit vielen Jahren Stand der Technik. Um ein gealtertes Bindemittel in dem Maße zu verjüngen, dass seine mechanischen Eigenschaften jenen eines lieferfrischen, ungealterten Bitumens entsprechen, müssen vergleichsweise hohe Mengen an Frischbindemittel zugegeben werden. Die Zugabemenge ergibt sich aus den derzeit gültigen Regelungen der TL Asphalt-StB in Abhängigkeit des Erweichungspunktes Ring und Kugel EP_{RuK} . Der EP_{RuK} des aus dem Asphaltgranulat rückgewonnenen Bindemittels darf dabei im Mittel 70 °C nicht überschreiten, da sonst Haftprobleme zum Gestein und ein verschlechtertes Kälteverhalten des Asphaltmischguts befürchtet werden. Darüber hinaus darf gemäß TL Asphalt (2013) das lieferfrische Bindemittel nur eine Sortenspanne weicher als das Zielbindemittel sein. Bei der Kontrollprüfung gelten die Anforderungen an das rückgewonnene Bindemittel der ZTV Asphalt-StB in Abhängigkeit des festgelegten Zielbindemittels.

Somit ergibt sich die maximal mögliche Zugabemenge an Asphaltgranulat aus der notwendigen Zugabemenge an lieferfrischem Bitumen in Kombination mit dem zu erzielenden Bindemittelgehalt des Asphaltmischguts.

Eine Alternative zu der Zugabe von Frischbindemittel bieten Additive in Form von Rejuvenatoren (Verjüngungsmittel), mit deren Hilfe infolge der Bitumenalterung verloren gegangene Bitumenbestandteile und Veränderungen kompensiert werden und die Viskosität des gealterten Bitumens herabgesetzt wird. Durch die Zugabe von Rejuvenatoren bei der Aufbereitung von Ausbauasphalt und/oder bei der Herstellung von Asphaltmischgut mit Asphaltgranulat besteht somit die Möglichkeit, die Eigenschaften des gealterten Bindemittels aus dem Asphaltgranulat dahingehend positiv zu beeinflussen, dass z. B. die Viskosität des Bitumens verringert und je nach Zugabestoff die Widerstandsfähigkeit gegen Oxidation erhöht wird. Prinzipiell basieren bisherige Methoden zur Verjüngung auf dem Hinzufügen verlorener Komponenten oder vergleichbarer Stoffe (Ersatz von Dispersionsmitteln oder Erdölharzen).

Rejuvenatoren verringern die Viskosität des Bindemittels im Asphaltgranulat deutlich stärker als lieferfrische Bitumen. Die notwendigen Zugabemengen an Rejuvenatoren sind daher wesentlich geringer, was wiederum eine höhere Zugabemenge Asphaltgranulat bei gleichem Bindemittelgehalt im Asphalt ermöglicht.

Ein Teilziel dieses Forschungsprojekts ist eine Analyse der Wirkung von Rejuvenatoren (Verjüngungsmittel) auf die Asphalteeigenschaften von repräsentativen Mischgutvarianten.

Zur Klärung, ob Asphalte mit Asphaltgranulat und Rejuvenatoren vergleichbare Performance-Eigenschaften wie Asphalte mit Asphaltgranulat und lieferfrischem Bitumen aufweisen, werden in diesem Forschungsvorhaben systematische Untersuchungen durchgeführt.

Aus Oszillationsprüfungen am Dynamischen Scherrheometer (DSR) ist bekannt, dass die resultierenden Bindemiteleigenschaften stark von der Zugabemenge des Rejuvenators

abhängig sind. Bislang wird die notwendige Zugabemenge von Rejuvenatoren im Wesentlichen anhand des resultierenden Erweichungspunktes Ring und Kugel bestimmt. Diese Methode ist allerdings nicht immer zielführend. Eine Überschreitung der optimalen Zugabemenge an Rejuvenator führt schnell zu einem starkem Abfall des komplexen Schermoduls, auch wenn das Ergebnis des EP_{RuK} nur geringfügig verringert wird. Insbesondere bei Polymermodifiziertem Bitumen im Asphaltgranulat kann eine adäquate Bindemittelverjüngung nur ungenau mittels EP_{RuK} bestimmt werden, da die Polymere die Bindemittelsteifigkeit maßgeblich beeinflussen.

An alternativen Verfahren wird zurzeit geforscht, mit den vordergründigen Zielen, das DSR zur Gewinnung von rheologischen Materialkenngrößen bzw. -gesetzen einzusetzen und den Prüfaufwand zu reduzieren. Als ein am DSR einsetzbares, alternatives Prüfverfahren wird im Rahmen dieses Forschungsprojekts das am ISBS entwickelte Bitumen-Typisierung-Schnell-Verfahren (BTSV) zur Bestimmung der optimalen Zugabemenge an Rejuvenator eingesetzt. Mittels Oszillationsprüfung (1,59 Hz) von 20 bis 90 °C bei stetiger Erwärmung wird jene Temperatur (T_{BTSV}) ermittelt, bei der der komplexe Schermodul auf einen Wert von $G^* = 12,5$ kPa abgefallen ist. Die aus dem Asphaltgranulat rückgewonnenen Bindemittel werden soweit verjüngt, bis die Temperatur T_{BTSV} der des lieferfrischen Referenzbitumens entspricht.

Es werden für 4 Asphaltarten bzw. -sorten – eine Asphalttragschicht (AC 32 T S), eine Asphaltbinderschicht (AC 22 B S) und 2 Asphaltdeckschichten (AC 11 D S und SMA 11 S) – Rezepturen mit unterschiedlichen Rejuvenatoren und unterschiedlichen Zusammensetzungen bezüglich des Zugabeanteils von Asphaltgranulat erstellt. Diesen Gemischen wird eine Referenzvariante ausschließlich mit Primärbaustoffen vergleichend gegenüber gestellt.

Zur Herstellung der mit Asphaltgranulat und Rejuvenator versetzten Gemische werden lieferfrisches Bitumen bzw. frische Gesteinskörnungen nur insoweit hinzugesetzt, wie es für eine zweckmäßige Rezeptur unabdingbar ist. Insgesamt ergeben sich damit 24 Mischgutvarianten mit Rejuvenatoren und 4 Referenzvarianten (28 Asphaltvarianten). Zusätzlich werden 4 großtechnisch hergestellte Asphaltvarianten aus Splittmastixasphalt SMA 8 S im Labor überprüft.

Das Gebrauchsverhalten der Asphaltvarianten wird anhand folgender primärer Gebrauchseigenschaften am verdichteten Asphaltgemisch (Performance-Eigenschaften) bewertet (Begriffsbestimmungen vgl. FGSV, 2014):

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

Zur Charakterisierung der Performance-Eigenschaften werden folgende Prüfmethode eingesetzt:

- Verformungswiderstand gemäß TP Asphalt-StB, Teil 25 B 1 (bzw. DIN EN 12697-25) mit dem Einaxialen Druck-Schwellversuch (FGSV, 1999),
- Steifigkeit und Ermüdungswiderstand von Asphalt mit dem Spaltzug-Schwellversuch gemäß AL Sp-Asphalt 09 (FGSV, 2009a) und

-
- Widerstand gegen Kälterissbildung gemäß TP Asphalt-StB, Teil 46 A mit dem Einaxialen Zugversuch und dem Abkühlversuch (FGSV, 2013).
 - Dimensionierungsberechnungen erfolgen gemäß RDO Asphalt 09 (FGSV, 2009b).

Aus diesen Untersuchungen können zusammenfassend folgende Schlüsse gezogen werden:

- Bezüglich aller untersuchten Performance-Eigenschaften ist festzustellen, dass unter Verwendung der eingesetzten Rejuvenatoren eine ausreichende Verjüngung des zufolge Alterung versprödeten Bindemittels erreicht werden kann. Asphalte mit Asphaltgranulat und Rejuvenatoren weisen weitgehend vergleichbare Performance-Eigenschaften auf wie Asphalte mit Asphaltgranulat und lieferfrischem Bitumen.
- Bei richtig dosierter Zugabemenge verringern Rejuvenatoren gezielt die Viskosität des Bindemittels im Asphaltgranulat, Nachteile gegenüber der Verjüngung durch Frischbindemittel konnten nicht nachgewiesen werden.
- Die notwendigen Zugabemengen an Rejuvenatoren sind dabei wesentlich geringer, was wiederum eine höhere Zugabemenge Asphaltgranulat bei gleichem Bindemittelgehalt im Asphalt ermöglicht. Die optimale Zugabemenge kann mit dem am ISBS entwickelten Bitumen-Typisierung-Schnell-Verfahren (BTSV) zuverlässig bestimmt werden.
- Ein Vergleich der Performance-Eigenschaften von Asphalt-Varianten, die mit dem BTSV konzipiert wurden, mit jenen der in situ eingebauten Asphalt-Varianten, die nach der herkömmlichen Methode eingestellt wurden, bestätigen die Anwendbarkeit des BTSV als eine geeignete Methode zur Einstellung der optimalen Zugabemenge an Rejuvenator.

Literatur

- Alisov, A. 2016. Prüfsystematik zur Differenzierung von Bitumen mittels instationärer Oszillationsrheometrie. Dissertation (in Bearbeitung), Institut für Straßenwesen, Technische Universität Braunschweig, unveröffentlicht.
- Arand, W., Steinhoff, G., Eulitz, J. und Milbradt, H. 1984. Verhalten von Asphalten bei tiefen Temperaturen; Entwicklung und Erprobung eines Prüfverfahrens. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 407, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Wohnungswesen, Bonn.
- Arand, W., Renken, P. 1994. Verwendung größtmöglicher Ausbauasphaltanteile im Straßenbau, Schlussbericht zum FA Q 148669 des Bundesministeriums für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie, Braunschweig.
- Boyer, R.-E. 2000. Asphalt Rejuvenators "Fact, or Fable". Asphalt Institute, Transportation System 2000, Workshop, San Antonio, Texas.
- Di Benedetto, H., Partl, M.N., Francken, L., and De La Roche, A. 2001. Stiffness testing for bituminous mixtures. RILEM TC 182-PEB Performance testing and evaluation of bituminous materials, Materials and Structures, Vol. 34.
- Deutscher Asphaltverband e.V.. 2014. Wiederverwenden von Asphalt, Bonn.
- FGSV, 2007a. Technische Prüfvorschriften für Asphalt, Teil 33, Verfahren zur Herstellung von Asphalt-Probeplatten im Laboratorium mit dem Walzsektor-Verdichtungsgerät. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln.
- FGSV, 2007b. Technische Prüfvorschriften für Asphalt, Teil 35, Asphaltmischgutherstellung im Laboratorium. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln.
- FGSV, 2007c. Technische Prüfvorschriften für Asphalt, Teil 8, Volumetrische Kennwerte von Asphalt-Probekörpern und Verdichtungsgrad. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln.
- FGSV, 2009a. Arbeitsanleitung zur Bestimmung des Steifigkeits- und Ermüdungsverhaltens von Asphalten mit dem Spaltzug-Schwellversuch als Eingangsgröße in die Dimensionierung von Asphaltbefestigungen. AL-SP – ASPHALT 09, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln.
- FGSV, 2009b. Merkblatt für die Wiederverwendung von Asphalt (MWA). Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln.
- FGSV, 2009c. Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung des Oberbaues von Verkehrsflächen mit Asphaltdecke RDO Asphalt 09. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln.
- FGSV, 2009d. Technische Lieferbedingungen für Asphaltgranulat (TL AG-StB 09). Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln.
- FGSV, 2010a. Technische Prüfvorschriften für Asphalt, Teil 2, Korngrößenverteilung. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln.
- FGSV, 2010b. Technische Prüfvorschriften für Asphalt, Teil 25 A 2, Dynamischer Stempeldringversuch an Walzasphalt. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln.
- FGSV, 2010c. Technische Prüfvorschriften für Asphalt, Teil 6, Raumdichte von Asphaltprobekörpern. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln.
- FGSV, 2012. Technische Prüfvorschriften für Asphalt, Teil: 25 B 1, Einaxialer Druckschwellversuch – Bestimmung des Verformungsverhaltens von Walzasphalten bei Wärme, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln.

FGSV, 2013. Technische Prüfvorschrift für Asphalt, Teil: 46 A, Kälteeigenschaften – Einaxialer Zugversuch und Abkühlversuch, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln.

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

Findley, W.N., Lai, J.S., and Onaran, K. 1976. Creep and relaxation of nonlinear viscoelastic materials. North-Holland Series in Applied Mathematics and Mechanics, Vol. 18, North-Holland Publishing Company, Amsterdam.

Francken, L., and Verstraeten, J. 1974. Methods for Predicting Moduli and Fatigue Laws of Bituminous Road Mixes under Repeated Bending. Transportation Research Record No. 515, pp. 114-123, Washington D.C.

Grönninger, J., Renken, P. und Wistuba, M. 2009. Verwendung von Fräsasphalt aus Offenporigen Asphaltdeckschichten auf möglichst hohem Wertschöpfungsniveau. Schlussbericht, Forschungsvorhaben FE 07.0212/2006/CGB i. A. des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung, Technische Universität Braunschweig, Institut für Straßenwesen, Braunschweig; erschienen in: Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Heft 1035, 2010.

Guillaume. F., 1987. Die Wiederverwendung von bituminösem Mischgut in zentralen Mischanlagen. La Technique Routière 1, S. 56.

Holleran, G., Wieringa, T. and Tailby, J. 2005. Rejuvenation Treatments for Aged Pavements. Transport Research Board, USA.

Hürtgen, H. 2000. Methoden zur Beschreibung der thermomechanischen Eigenschaften von Asphalt (Asphalt-Rheologie). Schriftenreihe des Fachgebietes Konstruktiver Straßenbau im Institut für Straßenwesen und Städtebau, Universität Hannover, Heft 20, Hannover.

Mollenhauer, K., Arm, M., Descantes, Y., Pihl, K.A., Gaspar, L., De Boc, L., Gobert, J.-B., and de la Roche, C. 2010. DIRECT-MAT – developing best practice on recycling or safe disposal of road materials in Europe. Proc., EU Waste Management Conference, pp. 152-162, June 8-9, 2010, Cologne, Germany.

prEN 12697, 2011. Asphalt – Prüfverfahren für Heißasphalt – Teil 46, Kälterisse und Tieftemperaturverhalten bei einachsigen Zugversuchen. Europäische Norm, Europäisches Komitee für Normung.

Renken, P. und Lobach, T. 2005. Wirksamkeit der Zugabe von Asphaltgranulat auf die mechanischen Eigenschaften von Asphaltdeckschichten. Schlussbericht, Forschungsprojekt FA 07.194/2001/CGB i. A. des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Technische Universität Braunschweig, Institut für Straßenwesen, erschienen in: Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Heft 908.

Renken, P. und Lobach, T. 2006. Einfluss der Zugabe von Ausbauasphalt ohne und mit PmB auf die Eigenschaften von Asphaltbindervarianten bei Verwendung von PmB 45. Schlussbericht, Forschungsprojekt FE 07.205/2003/BGB i. A. des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Institut für Straßenwesen, Technische Universität Braunschweig.

Ringleb, A. 2012. Einfluss der Walzsektor-Verdichtung auf Ergebnisse des Triaxialen Druck-Schwellversuchs. Diplomarbeit, erschienen in: Schriftenreihe Straßenwesen, 25, Institut für Straßenwesen, Technische Universität Braunschweig.

Sanders, P., 2005. Review of Recycling and Rejuvenation Procedures. SILVIA Projekt Report, SILVIA-TRL-016-02-WP4-240605.

Shen J., Amirkhanian, S., and Lee, S.-J. 2007. HP-GPC Characterization of Recycled Aged Rubber Modified Binders. *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 19, No. 6, pp 515-522.

Shen, J., Amirkhanian, S., and Tang, B. 2007. Effects of rejuvenator on performance-based properties of rejuvenated asphalt binder and mixtures. *Chongqing/Clemson, Science Direct, Construction and Building Materials* 21, Elsevier.

Steinhoff, G., Eulitz, J. und Milbradt, H. 1986. Verhalten von Asphalt bei tiefen Temperaturen. Schlussbericht, AIF-Forschungsvorhaben Nr. 5699, Institut für Straßenwesen, Technische Universität Braunschweig.

Walther, A. & Wistuba, M. 2014. Auswirkung der Wiederverwendung von Ausbauasphalt in Asphalttragschichten auf mechanische Eigenschaften. Forschungsprojekt Nr. FE 07.0245/2011/CGB i.A. des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur und der Bundesanstalt für Straßenwesen, Institut für Straßenwesen, Technische Universität Braunschweig.

Walther, A. 2014. Rechnerische Dimensionierung von Asphaltstraßen unter Berücksichtigung stündlicher Beanspruchungszustände. Dissertation, Institut für Straßenwesen, Heft 28, Technische Universität Braunschweig, ISBN 978-3-932164-28-6.

Wistuba, M. und Isailovic, I. 2014. Performance-orientierte Asphaltspezifikation – Entwicklung eines praxisgerechten Prüfverfahrens zur Ansprache des Verformungswiderstandes. Schlussbericht, Forschungsprojekt FE 84.0106/2009 i. A. des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Institut für Straßenwesen, Technische Universität Braunschweig.

Wistuba, M., Grönniger, J. und Renken, P. Asphaltwiederverwendung auf hohem Wertschöpfungsniveau. *Straße und Autobahn*, 8, 532-536, Kirschbaum Verlag, 2011.

Wistuba, M., Monismith, C., Bahia, H.U., Renken, P., Olard, F., Blab, R., Mollenhauer, K., Metzker, K., Büchler, S., Grönniger, J., Zeng, M. und Nam, K. 2009. Asphaltverhalten bei tiefen Temperaturen. *Schriftenreihe Straßenwesen*, 23, Institut für Straßenwesen, Technische Universität Braunschweig.

Wistuba, M., and Perret, J. 2004. Comparative strain measurement in bituminous layers with the use of ALT. *Proc. of the 2nd Int. Conf. on Accelerated Pavement Testing*, 25-29 September 2004, Minneapolis, Minnesota.