

## Einsatz von Rejuvenatoren bei der Wiederverwertung von Asphalt

FA 7.250

Forschungsstellen: Technische Universität Braunschweig, Institut für Straßenwesen (ISBS) (Prof. Dr. Dipl.-Ing. M. P. Wistuba)

Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Verkehrswegebau (Prof. Dr.-Ing. M. Radenberg)

Basalt Actien-Gesellschaft, Linz

Bearbeiter: Walther, A. / Wistuba, M. P. / Büchler, S. / Radenberg, M. / Boetcher, S. / Sedaghat, S. / Schmidt, H. / Cetikaya, R.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Bonn

Abschluss: April 2016

### 1 Einleitung und Problemstellung

Das Forschungsvorhaben 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 Bindemittelleigenschaften wurden von der Ruhr-Universität Bochum bearbeitet und die performance-basierten asphalt-technologischen Untersuchungen von der Technischen Universität Braunschweig. Die Beschaffung der erforderlichen Untersuchungsmaterialien sowie die material- und bautechnische Planung und Begleitung der projektabschließenden Erprobungsstrecke erfolgten durch die Basalt Actien-Gesellschaft.

Bedingt durch die zwei in sich geschlossenen Arbeitspakete ist der Forschungsbericht auch in zwei separate Berichtsteile aufgeteilt, die strukturell jeweils unabhängig sind, in ihren wissenschaftlich experimentellen Inhalten aber aufeinander aufbauen. In diesem Kurzbericht sind die Ergebnisse beider Teile enthalten (Kapitel 3 und 4 RUB, Kapitel 5 und 6 TUBS). Die Kapitel 1, 2 und 7 sind allgemeine und zusammenfassende Ausführungen.

Aufgrund der Alterung und der damit verbundenen Zunahme der Viskosität des im Ausbaumasphalt vorhandenen Bindemittels erhöht sich auch die Steifigkeit des Asphalts im Straßenoberbau während seiner Nutzungsdauer. Bei der Wiederverwendung können deshalb hohe Zugabemengen an Asphaltgranulat möglicherweise die Qualität des Mischguts negativ beeinflussen. Folglich wurden größere Mengen an Ausbaumasphalt bisher vorwiegend in Asphalttragschichten verwendet. Angesichts der gegenwärtigen Bedeutung von Nachhaltigkeit und Ressourcenschonung ist es wünschenswert, zukünftig die Zugabemengen von Ausbaumasphalt auch in Asphaltdeckschichten zu erhöhen.

Rejuvenatoren (Verjüngungsmittel) können diese Alterungsprozesse möglicherweise umkehren und das Bitumen im Ausbaumasphalt idealerweise wieder in seinen rheologischen Ausgangszustand versetzen.

Momentan existiert ein großes Spektrum an Additiven, die eine "Verjüngung" des Bitumens im Ausbaumasphalt versprechen.

Sowohl Inhaltsstoffe als auch Wirksamkeit variieren von Produkt zu Produkt, was eine genaue Definition des Begriffs "Rejuvenator" und seiner Wirkungsweise erschwert.

### 2 Zielsetzung

Das Projekt beschäftigt sich deshalb mit der Untersuchung der Wirksamkeit der Rejuvenatoren und dem Einfluss derartiger Additive auf gealtertes Bitumen. Dazu wurden zunächst 21 Rejuvenatoren beschafft und getestet. Sie wurden charakterisiert und miteinander und ebenso mit weichem Straßenbaubitumen hinsichtlich ihrer Wirksamkeit auf gealtertes Bitumen verglichen. Daraus sollte letztlich eine Technologie für den gezielten Einsatz der Rejuvenatoren sowie eine Begriffsdefinition für Rejuvenatoren entwickelt 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.

Nach eingehender Charakterisierung der Art und Dauer der Wirkung der Rejuvenatoren wird in Abhängigkeit von diesen Ergebnissen eine Auswahl für weitergehende performance-orientierte Asphaltuntersuchungen (Verformungswiderstand, Steifigkeit, Ermüdungswiderstand und Widerstand gegen Kälterissbildung) an unterschiedlichen Asphaltarten getroffen. Hierzu werden Laboruntersuchungen und im Anschluss daran Erprobungen im Rahmen einer Straßenbaumaßnahme durchgeführt, wissenschaftlich begleitet und dokumentiert.

### 3 Untersuchungsmethodik zur Bindemittelleistung

Das Untersuchungsprogramm war hinsichtlich der Untersuchungen an Bindemittel und Rejuvenatoren zusammen mit der Entwicklung einer vereinfachten Labormethode zur Bestimmung des Alterungsgrads in vier aufeinanderfolgende Schritte unterteilt.

Aufgrund der großen Bandbreite von Additiven, die auf dem Markt als Rejuvenatoren verkauft werden, gibt es bisher keine generellen Hinweise zur Anwendung. Für eine umfassende Beurteilung der Wirksamkeit und Wirkungsweise von Rejuvenatoren wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens ein Großteil der auf dem Markt angebotenen Produkte beschafft. Diese wurden nach Auswertung der Datenblätter und Produktinformationen im ersten Untersuchungsschritt beschrieben. Außer den 21 als Rejuvenatoren bezeichneten Additiven wurden die weichen Straßenbaubitumen 650/900, 500/650, 250/330 und 160/220 als Rejuvenatoren getestet.

Untersuchungsschritt 2 beinhaltete die Kategorisierung der Produkte, indem dasselbe Basisbitumen verwendet wurde und zu diesem jeder Rejuvenator mit den gleichen drei Zugabemengen hinzugefügt wurde, um die Wirkungsweise untereinander zu vergleichen. Für alle Rejuvenatoren wurden die Zugabemengen 3,0, 5,0 und 7,0 % verwendet. Zusätzlich wurden die weichen Straßenbaubitumen mit einer Zugabemenge von 1,0 % untersucht. Um eventuelle Alterungseffekte aus rückgewonnenem Bindemittel aus Ausbaumasphalt zu vermeiden, wurde in diesem Schritt ein

hartes Straßenbaubitumen 20/30 verwendet. Ungefähr 100 ml frisches Bitumen 20/30 und die jeweilige Zugabemenge wurden bei 150 °C für zehn Minuten verrührt, um ein homogenes Gemisch zu erzeugen. An den Gemischen wurden die physikalischen Eigenschaften, in Form von Erweichungspunkt Ring und Kugel (DIN EN 1427) und Nadelpenetration (DIN EN 1426), bestimmt.

In einem dritten Untersuchungsschritt wurden 22 Asphaltgranulate extrahiert und analysiert. An ihnen wurden der Erweichungspunkt Ring und Kugel (DIN EN 1427), die Nadelpenetration (DIN EN 1426), die mithilfe des DSR gemessenen Parameter Phasenwinkel und komplexer Schermodul (DIN EN 14770), die im BBR gemessenen Parameter Biegekriechsteifigkeit und m-Wert (DIN EN 14771), sowie die Kraftduktilität (DIN EN 13589) ermittelt. Aus diesen 22 extrahierten Bindemitteln wurden fünf ausgewählt, wobei neben der verfügbaren Menge, die eine wichtige Rolle spielte, um alle weiteren Untersuchungen durchzuführen zu können, auch ein breites Spektrum an Alterungsgraden für die Tests erhalten bleiben sollten, sodass fünf sehr verschiedene Bindemittel aus Asphaltgranulat ausgewählt wurden.

Diese fünf Bindemittel wurden analog zu Schritt drei, aber zu verschiedenen Zeitpunkten, untersucht: Zum einen frische Gemische, zum anderen Gemische, die einer Laboralterung gemäß RTFOT (DIN EN 12607), 3 x RTFOT oder RTFOT plus PAV (DIN EN 14769) ausgesetzt worden waren, sodass insgesamt 100 bis 150 Gemische rheologisch und physikalisch analysiert werden sollten. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen gaben für jeden Rejuvenator einen Überblick über die optimale Zugabemenge, seinen Einfluss auf das Bindemittel aus dem Asphaltgranulat, seine Wirksamkeit hinsichtlich verschiedener Alterungsgrade von Bindemitteln aus Granulaten und über seine verjüngende Wirkung im Allgemeinen, also ob ein verjüngender Effekt erzielt wird oder nicht.

Die große Menge an Ergebnissen zu den charakteristischen Eigenschaften der verschiedenen Asphaltgranulate ermöglichte Aussagen über die Eigenschaften und Qualität der Bindemittel über den Erweichungspunkt Ring und Kugel hinaus. Basierend auf diesen wurde eine Testmethode mit der Bezeichnung "Vereinfachtes Laborverfahren" zur wirtschaftlichen, schnellen und einfachen Bestimmung des Alterungsgrades von Bitumen entwickelt.

Durch verschiedene Alterungsprozesse sinkt der Anteil an Maltenen im Bitumen, während der Anteil an Asphaltene steigt. Während es zahlreiche Verfahren zur Analyse der Bitumenchemie gibt, bei denen Lösemittel dem Bitumen zugegeben wird, wurde mit dem Asphaltstatus nach Zenke ein Verfahren entwickelt, mit dem nicht nur der Gehalt an Asphaltene und Maltenen bestimmt werden kann, sondern auch zwischen leicht-, mittel- und schwerlöslichen Asphaltene unterschieden werden kann. Dabei bewirken Alterungsprozesse eine Entwicklung der Asphaltene zu schwerlöslichen hin. Folglich ist der Anteil an schwerlöslichen Asphaltene ein Parameter zur Beschreibung des Alterungsgrades und der Gebrauchseigenschaften des Bitumens. Das "Vereinfachte Laborverfahren" basiert auf der Bestimmung des Asphaltstatus. Dabei erfolgt die Ausfällung schwerlöslicher Asphaltene mithilfe von Cyclohexan als Löser und Isooctan als Fällner über ein Löser-Fällner-Verhältnis von 1:1.

Die Quantifizierung der ausgefällten Asphaltene erfolgte mithilfe eines Turbidimeters.

## 4 Versuchsergebnisse und Bewertung Bindemittelperformance

### 4.1 Untersuchung der Rejuvenatoren

Die Rejuvenatoren wurden von den Herstellern mit Produktdatenblättern, Sicherheitsdatenblättern und zusätzlichen Gebrauchsinformationen geliefert, jedoch ohne genaue Zusammensetzung. Dennoch war es möglich, die Produkte im ersten Schritt in drei Gruppen zu unterteilen. Insgesamt 16 der 22 Produkte werden als "Rejuvenatoren" von den Herstellern vertrieben. Gemäß der angegebenen Wirksamkeit wurden sie in die Gruppen "rheologisch wirksam" und "chemisch wirksam" unterteilt. Erstere sollen die maltene Phase ergänzen, letztere Oxidationsprozesse rückgängig machen.

Einige Hersteller stellten außerdem Produkte zur Verfügung, die ursprünglich für andere Verwendungszwecke im Bitumen vorgesehen waren, aber zusätzlich einen Verjüngungseffekt hatten beziehungsweise von denen angenommen wurde, dass sie ihn erzielen können. Sie wurden in der Gruppe "andere Produkte" zusammengefasst. Darüber hinaus gab es eine Gruppe mit weichen Straßenbaubitumen.

Die Ergebnisse des zweiten Untersuchungsschritts zeigten, dass jedes Produkt einen speziellen Effekt auf das Bitumen hatte, einige beeinflussten mehr den Erweichungspunkt Ring und Kugel, andere mehr die Nadelpenetration. Bis auf die weichen Straßenbaubitumen konnte kein linearer Zusammenhang zwischen steigender Zugabemenge und Senkung des Erweichungspunkts festgestellt werden. Chemisch wirksame Produkte erhöhten die Viskosität des Bitumens. Um die einzelnen Effekte weiter differenzieren zu können, wurden sieben Additive und zwei weiche Straßenbaubitumen für weitere Untersuchungen ausgewählt.

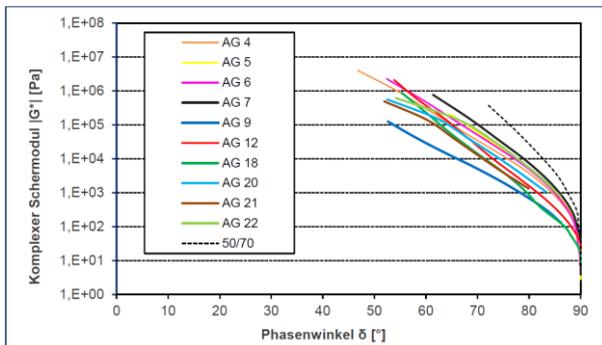
### 4.2 Untersuchung der Asphaltgranulate

Im Rahmen des Projekts wurden 22 verschiedene Asphaltgranulate hinsichtlich ihrer physikalischen, chemischen und rheologischen Eigenschaften untersucht. Zehn von ihnen wurden für weitere Tests ausgewählt. Tabelle 1 zeigt die Ergebnisse der Extraktionen der Asphaltgranulate und die zugehörigen Erweichungspunkte Ring und Kugel und die Nadelpenetrationen.

Die Zusammensetzung der Granulate und die Erweichungspunkte Ring und Kugel variieren stark (zwischen 50 und 105 °C). Diese signifikanten Unterschiede in den physikalischen Eigenschaften konnten so nicht in den chemischen Analysen wiedergefunden werden. Bei der Bestimmung des komplexen Schermoduls und des Phasenwinkels wurde jedoch die große Variationsbreite sichtbar. Die Ergebnisse sind in Bild 1 als Black-Diagramm im Vergleich zu einem Straßenbaubitumen 50/70 dargestellt.

**Tabelle 1: Ergebnisse der Extraktionen der Asphaltgranulate**

Bez.	Füllergehalt	Feine Gesteinskörnung	Grobe Gesteinskörnung	Bindemittelgehalt	Erweichungspunkt RuK	Nadelpenetration
	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	[° C]	[1/10 mm]
AG 4	14,7	73,3	12,0	6,6	78,0	14
AG 5	17,5	72,2	9,7	6,5	50,6	31
AG 6	15,5	63,3	21,2	6,8	65,4	21
AG 7	18,0	80,3	1,7	6,7	57,0	30
AG 9	9,5	47,5	43,0	4,0	105,0	7
AG 12	8,4	15,6	76,0	5,6	68,8	20
AG 18	21,4	72,8	5,8	6,6	82,0	18
AG 20	7,6	37,3	55,1	5,4	68,8	21
AG 21	10,0	22,3	67,8	6,6	70,0	21
AG 22	4,9	38,9	56,2	3,7	66,6	18



**Bild 1: Black-Diagramm der zehn Bindemittel aus Asphaltgranulat**

### 4.3 Zugabe von Rejuvenatoren zu Bindemittel aus Asphaltgranulat

Der nächste Schritt war das Herstellen von Gemischen von sieben Rejuvenatoren (R 1 bis R 7) und zwei weichen Straßenbaubitumen (R 8 und R 9) mit fünf Bindemitteln aus Asphaltgranulaten. Aufgrund der bisherigen Ergebnisse wurden die in Tabelle 1 grau markierten AG 4, 7, 9, 18 und 20 gewählt. Zunächst musste die jeweilige Zugabemenge des Rejuvenators ermittelt werden. Es wurde für alle Rejuvenatoren angestrebt, die physikalischen und rheologischen Eigenschaften eines Straßenbaubitumens 50/70 wiederherzustellen. Dabei sollte untersucht werden, ob dies möglich ist beziehungsweise welche Zugabemenge dafür erforderlich ist. Weil die Herstellerangaben für die Ermittlung der Zugabemenge nicht ausreichend waren, waren Voruntersuchungen mit frischem Bitumen und verschiedenen Zugabemengen der Rejuvenatoren notwendig. Basierend auf den Ergebnissen des zweiten Untersuchungsschritts wurde die Zugabemenge errechnet, die aufgrund der größeren Differenz zwischen dem angestrebten Erweichungspunkt und dem tatsächlichen Erweichungspunkt Ring und Kugel des Bindemittels aus dem Asphaltgranulat wesentlich höher war als in den Voruntersuchungen. An den Gemischen wurden die Nadelpenetration und der Erweichungspunkt Ring und Kugel gemessen. Die Resultate für die Gemische 1 bis 9 (R 1 bis R 9) mit Bindemittel aus Asphaltgranulat AG 4 und 20 sind in den Tabelle 2 und 3 zusammen mit der Zugabemenge dargestellt.

Nur wenige Gemische (grau markiert) erfüllen die geforderten Werte für den Erweichungspunkt Ring und Kugel beziehungs-

weise für die Nadelpenetration, die Gemische 20.3 und 20.5 erfüllen beide Kriterien. Diese Tendenz wurde von Gemischen mit AG 7, AG 9 und AG 18 bestätigt. Offensichtlich ist die Ermittlung der Zugabemenge für die meisten Rejuvenatoren anhand einer linearen Prognose unzutreffend. Darüber hinaus wurden Werte im Anforderungsbereich für ein Straßenbaubitumen 50/70 von unterschiedlichen Rejuvenatoren erreicht, sodass eine zuverlässige Information über die Eignung des einzelnen Rejuvenators mithilfe der physikalischen Parameter allein nicht möglich ist. Deshalb mussten weitere Untersuchungen an den Gemischen mit anderen Zugabemengen gemacht werden, um die Aussagen über die Rejuvenatoren zu bestätigen oder zu widerlegen.

**Tabelle 2: Ergebnisse für die Gemische 4.1 bis 4.9**

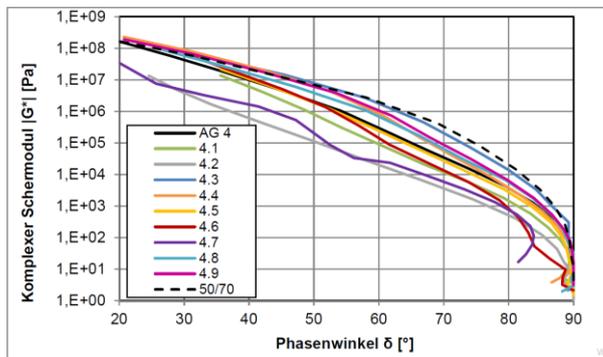
Gemisch	Zugabemenge [M.-%]	Erweichungspunkt RuK [°C]	Nadelpenetration [1/10 mm]
AG 4	-	78,0	14
4.1	24,0	51,1	106
4.2	24,0	46,1	132
4.3	20,0	40,0	169
4.4	31,0	57,3	36
4.5	20,0	41,5	164
4.6	20,0	57,8	61
4.7	20,0	69,9	37
4.8	50,0	55,4	43
4.9	50,0	46,7	84

**Tabelle 3: Ergebnisse für die Gemische 20.1 bis 20.9**

Gemisch	Zugabemenge [M.-%]	Erweichungspunkt RuK [°C]	Nadelpenetration [1/10 mm]
AG 20	-	68,8	21
20.1	14,0	44,3	138
20.2	10,0	56,3	47
20.3	10,0	52,2	50
20.4	10,0	59,9	30
20.5	10,0	53,3	56
20.6	15,0	58,5	47
20.7	15,0	66,6	41
20.8	40,0	57,1	36
20.9	35,0	58,5	54

Die Ergebnisse der DSR-Messungen hingegen (s. Bild 2 und Bild 3) erlauben eine bessere Differenzierung zwischen den einzel-

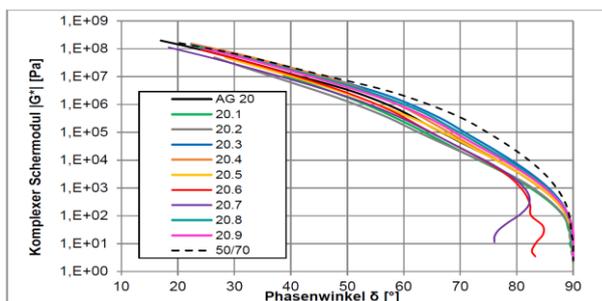
nen Rejuvenatoren und deren rheologischem Effekt. Dieser kann leicht im Black-Diagramm bestimmt werden, weil bei äquivalenter Schermodulbetrachtung unterschiedliche zugehörige Phasenwinkel erreicht werden, die ein unterschiedliches visko-elastisches Verhalten dokumentieren.



**Bild 2: Black-Diagramm der Gemische 4.1 bis 4.9**

Die Kurve von AG 4 ohne Rejuvenator liegt in der Mitte der elf Kurven. Zu Vergleichszwecken enthält das Diagramm auch die Kurve für ein Straßenbaubitumen 50/70. Einige Rejuvenatoren (zum Beispiel Gemische 4.3 und 4.4) verändern das Verhältnis zwischen viskosen und elastischen Anteilen, sodass der Kurvenverlauf ähnlich zu dem des Straßenbaubitumens 50/70 ist, wobei R 3 den größten Einfluss hat. Rheologisch gesehen ist dies gleichbedeutend mit einem "Verjüngungseffekt".

Andere (zum Beispiel R 5/Gemisch 4.5) verhalten sich "fluxend": Die Steifigkeiten eines Bindemittels 50/70 können möglicherweise erreicht werden, aber das Verhältnis zwischen viskosen und elastischen Anteilen bleibt weitestgehend unverändert. Die dritte Gruppe von Rejuvenatoren (zum Beispiel R 2 und R 7) verursachen eine Verschiebung hin zu höheren elastischen Komponenten. Nach bisherigen Erkenntnissen ist dies ein unerwünschtes Verhalten. Die Schlussfolgerungen zu den verschiedenen Wirksamkeiten der Rejuvenatoren können analog auf die Gemische mit AG 7, AG 18 und AG 20 übertragen werden, was in Bild 3 bestätigt wird.

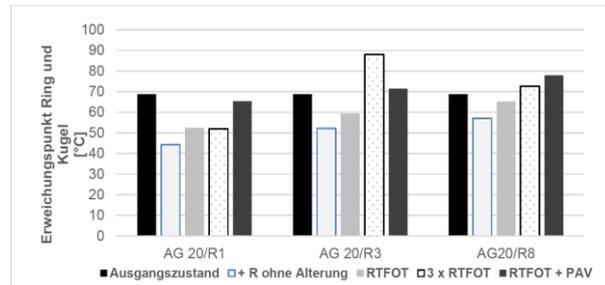


**Bild 3: Black-Diagramm der Gemische 20.1 bis 20.9**

Rejuvenator R 3 zeigt einen verjüngenden Effekt, ebenso wie R 8 und R 9, während die meisten anderen (besonders R 2 oder R 6) diesen nicht besitzen. Diese Aussagen über die einzelnen Rejuvenatoren konnten von den Untersuchungen im BBR und von den Kraftduktilitätsprüfungen untermauert werden.

## 4.4 Alterungsneigung von Rejuvenatoren-Bitumen-Gemischen

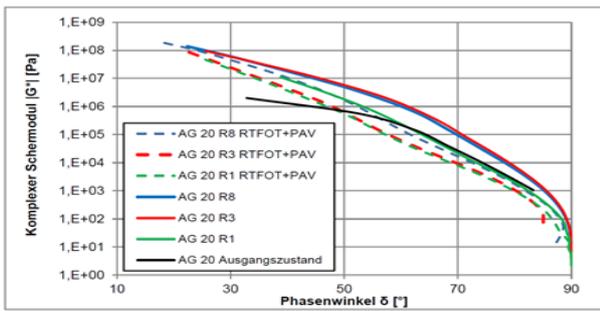
Nach der Auswahl von drei Additiven mit rheologisch verjüngender Wirkung wurden mit diesen Gemischen hergestellt, die einer Kurzzeit- beziehungsweise Langzeitalterung im Labor ausgesetzt wurden. Ziel der Untersuchung war die Beschreibung der Alterungsneigung beziehungsweise des Alterungsverhaltens der Gemische. Bild 4 zeigt als Säulendiagramm die ermittelten Erweichungspunkte Ring und Kugel – getrennt nach Rejuvenatoren – für die drei Alterungsstufen.



**Bild 4: Erweichungspunkt Ring und Kugel von Gemischen mit AG 20 und R 1, 3 und 8 vor und nach Alterungsuntersuchungen**

Unabhängig vom Rejuvenator können einige generelle Schlüsse gezogen werden. Nach der Zugabe der Rejuvenatoren sinkt anfänglich der Erweichungspunkt. Nach der Kurzzeitalterung (RTFOT) steigt er an, erreicht aber den Wert des Ausgangszustands noch nicht. Nach der dreifachen RTFOT-Alterung ist der Erweichungspunkt höher als im Ausgangszustand. Der höchste Erweichungspunkt wird nach der Langzeitalterung durch das kombinierte Verfahren RTFOT und PAV erreicht. Da die bisherigen Ergebnisse zeigten, dass der Erweichungspunkt nur bedingt Aussagen über die rheologische Wirksamkeit erlaubt, wurden zusätzlich Untersuchungen mit dem DSR durchgeführt. Die Ergebnisse für die Gemische mit AG 20 nach der Langzeitalterung (RTFOT und PAV) veranschaulicht das Black-Diagramm in Bild 5, welches zudem den Kurvenverlauf für das Bindemittel aus dem Asphaltgranulat AG 20 und die Kurven nach Rejuvenatorzugabe enthält.

Wie bereits bekannt, wirken R 3 und 8 rheologisch "verjüngend", R 1 hingegen nicht. Nach der Langzeitalterung verschiebt sich das Verhältnis zwischen elastischen und viskosen Anteilen zugunsten der elastischen Anteile. Aufgrund des geringeren Abstands der Kurven für das Gemisch mit R 1 vor und nach der Langzeitalterung für das Gemisch kann darauf geschlossen werden, dass der Einfluss der Alterung wesentlich geringer ist als bei den beiden anderen Gemischen.



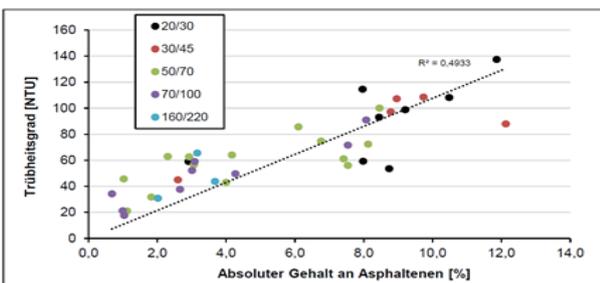
**Bild 5: Black-Diagramm für AG 20 und Gemische vor und nach RTFOT+PAV-Alterung**

#### 4.5 Laborschnellverfahren zur Bestimmung des Alterungsgrades

An insgesamt 50 verschiedenen Bindemitteln wurde ein Laborschnellverfahren zur Bestimmung des Alterungsgrades auf Basis des Asphaltgehalts entwickelt und überprüft. Die Basis des Verfahrens ist eine Trübheitsmessung eines Gemischs aus Bindemittel, Lösemittel und Fällungsmittel mit einem Turbidimeter. Parameter wie Farbe der Mischung in Abhängigkeit von der Bindemittelmenge, Fällungs- und Lösezeit und die Temperatur wurden variiert. Auch verschiedene Methoden zur Abtrennung der ausgefällten Bestandteile wurden berücksichtigt.

Abschließend wurde eine Verfahrensbeschreibung für diese Schnellmethode mit einem Turbidimeter erstellt. Zur Validierung der Trübheitsgrade und zur Prüfung ihrer Aussagekräftigkeit wurden diese Werte mit den chemischen Eigenschaften nach Zenke an 40 untersuchten Bitumen verglichen.

Die ermittelten Trübheitsgrade sind in Bild 6 den absoluten Gehalten an schwerlöslichen Asphaltenen der einzelnen Bitumen gegenübergestellt. Ein grundlegender Zusammenhang ist zu erkennen (Bestimmtheitsmaß von 0,493), 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.



**Bild 6: Verhältnis der Trübheitsgrade zu den absoluten Anteilen an schwerlöslichen Asphaltenen der 40 untersuchten Bitumen**

## 5 Untersuchungsmethodik zur Asphaltperformance

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

Es wurden für vier Asphaltarten beziehungsweise -sorten – eine Asphalttragschicht (AC 32 T S), eine Asphaltbinderschicht (AC 22 B S) und zwei Asphaltdeckschichten (AC 11 D S und SMA 11 S) – Asphaltmischgut mit unterschiedlichen Rejuvenatoren und unterschiedlichen Zusammensetzungen bezüglich des Zugabeteils von Asphaltgranulat im Labor hergestellt. Diesen Gemischen wurde jeweils eine Referenzvariante ausschließlich mit frischen ungebrauchten Baustoffen vergleichend gegenübergestellt. Zur Herstellung der mit Asphaltgranulat und Rejuvenator versetzten Gemische wurden frisches Bitumen beziehungsweise frische Gesteinskörnungen nur insoweit hinzugesetzt, wie es für eine zweckmäßige Rezeptur unabdingbar ist. Insgesamt wurden so 24 Mischgutvarianten mit Rejuvenatoren und vier Referenzvarianten (28 Asphaltvarianten) im Labor hergestellt. Zusätzlich wurden vier großtechnisch hergestellte Asphaltvarianten aus Splittmastixasphalt SMA 8 S im Labor überprüft (vergleiche Tabelle 4).

Das Gebrauchsverhalten der Asphaltvarianten wurde anhand folgender primärer Gebrauchseigenschaften am verdichteten Asphaltgemisch (Performance-Eigenschaften) bewertet.

- 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- beziehungsweise behinderten thermischen Schrumpfens).

Zur Charakterisierung der Performance-Eigenschaften wurden folgende Prüfmethode eingesetzt:

- Verformungswiderstand gemäß TP Asphalt-StB, Teil 25 B 1 beziehungsweise DIN EN 12697-25 mit dem Einaxialen Druck-Schwellversuch,
- Steifigkeit und Ermüdungswiderstand von Asphalt mit dem Spaltzug-Schwellversuch gemäß AL Sp-Asphalt 09 und
- Widerstand gegen Kälterissbildung gemäß TP Asphalt-StB, Teil 46 A mit dem Einaxialen Zugversuch und dem Abkühlversuch.
- Dimensionierungsberechnungen erfolgen gemäß RDO Asphalt 09.

## 6 Untersuchungsergebnisse Asphaltperformance

### 6.1 Zusammensetzung der Mischgut-Varianten am Beispiel der Mischgut-Variante 1 (AC 32 T S)

Die Korngrößenverteilungen der hergestellten Mischgut-Varianten AC 32 T S sind anhand der Siebdurchgänge in Tabelle 5 angegeben. Bild 7 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 R 8 wurde nicht umgesetzt. Hier hätte die Verjüngung des rückgewonnen Bindemittels aus dem Asphaltgranulat zur Folge,

## Asphaltbauweisen

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 R

8 bezogen auf das Bindemittel des Asphaltgranulats notwendig). Eine Vergleichbarkeit mit den anderen im Labor hergestellten Asphalttragschichtmischgut-Varianten wäre dann nicht gegeben.

Tabelle 4: Asphaltmischgut-Varianten im Überblick

Mischgut-variante	Asphaltgranulat-Variante	Rejuvenator	Zugabeanteil AG [M.-%]	Variante
1) AC 32 T S	-	-	-	V 1
	AG 1	R 8	50	V 2
			<del>80</del>	<del>V 3</del>
		R 3	50	V 4
			80	V 5
		R 1	50	V 6
			80	V 7
2) AC 22 B S	-	-	-	V 8
	AG 2	R 8	40	V 9
			<del>60</del>	<del>V 10</del>
		R 3	40	V 11
			60	V 12
		R 1	40	V 13
			60	V 14
3) SMA 11 S	-	-	-	V 15
	AG 3	R 8	20	V 16
			40	V 17
		R 3	20	V 18
			40	V 19
		R 1	20	V 20
			40	V 21
4) AC 11 D S	-	-	-	V 22
	AG 3	R 8	20	V 23
			40	V 24
		R 3	20	V 25
			40	V 26
		R 1	20	V 27
			40	V 28
größtechnisch hergestellte Asphaltmischgut-Varianten				
SMA 8 S	AG 4	-	-	V 30
		R 8	50	V 31
		R 3		V 32
		R 1		V 33

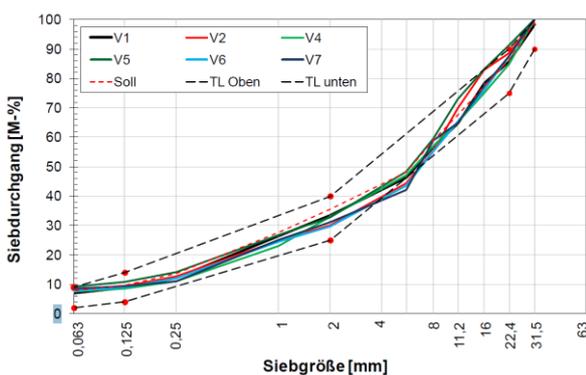
**Tabelle 5: Zusammensetzung der hergestellten Mischgut-Varianten AC 32 T S bei Warmzugabe des Asphaltgranulats (Mittelwerte) in Abhängigkeit vom eingesetzten Rejuvenator und vom Zugabeanteil des Asphaltgranulats**

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
<b>0,063</b>	<b>6,9</b>	<b>8,0</b>	<b>7,5</b>	<b>7,8</b>	-	<b>9,1</b>	<b>8,5</b>

Tabelle 6 fasst die Ergebnisse der Überprüfungen für die Mischgut-Varianten AC 32 T S zusammen.

**Tabelle 6: Kontrollprüfungsergebnisse für die Mischgut-Varianten AC 32 T S**

Kenngröße	Mischgut-Variante						
	0 M.-% AG	50 M.-% AG			80 M.-% AG		
	Referenz (V1)	R 8 (V2)	R 3 (V4)	R 1 (V1)	R 8 (V2)	R 3 (V4)	R 1 (V1)
<b>Bindemittelgehalt B [M.-%]</b>	<b>4,2</b>	<b>4,1</b>	<b>4,1</b>	<b>4,2</b>	<b>4,1</b>	<b>4,1</b>	<b>4,2</b>
<b>Rohdichte pm [g/cm³]</b>	<b>2,537</b>	<b>2,570</b>	<b>2,568</b>	<b>2,537</b>	<b>2,570</b>	<b>2,568</b>	<b>2,537</b>
<b>Erweichungspunkt EP RuK [°C]</b>	<b>59,8</b>	<b>57,0</b>	<b>59,1</b>	<b>59,8</b>	<b>57,0</b>	<b>59,1</b>	<b>59,8</b>

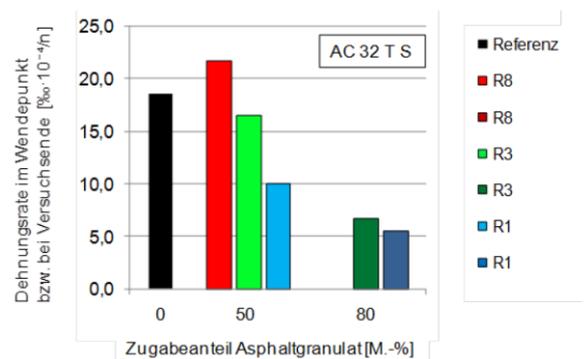


**Bild 7: Mittlere Korngrößenverteilungen (Kontrollprüfung) für die Asphalttragschicht-Varianten AC 32 T S**

## 6.2 Verformungswiderstand von Asphalt

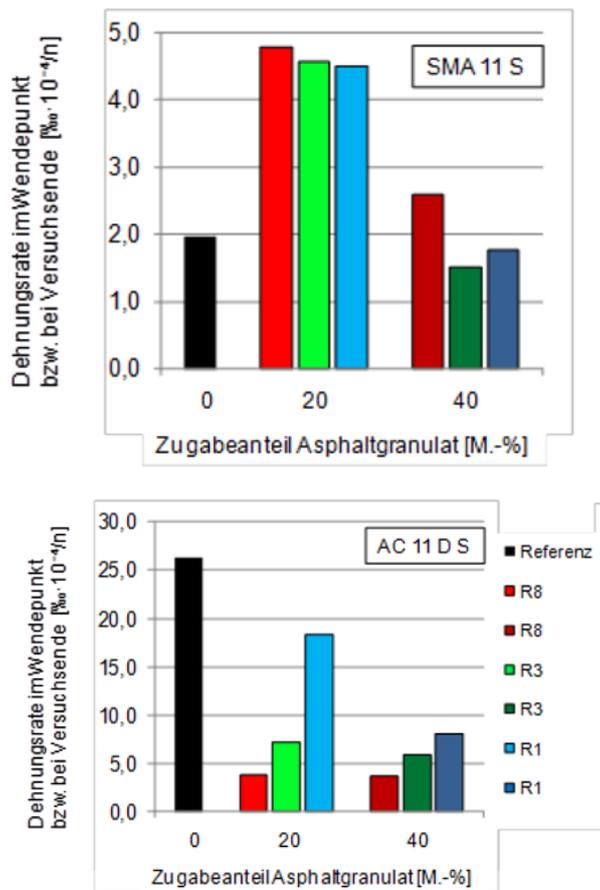
Bild 8 zeigt die Ergebnisse für die Dehnungsrate im Wendepunkt beziehungsweise bei Ende des Einaxialen Druck-Schwellversuchs für die Mischgut-Varianten AC 32 T S in Abhängigkeit vom Zugabeanteil an Asphaltgranulat. Aus Bild 8 ist ein systematischer Einfluss des Zugabeanteils an Asphaltgranulat für die

Mischgut-Variante AC 32 T S ableitbar. Mit Ausnahme der Variante unter Verwendung des Rejuvenators R 8 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.



**Bild 8: Dehnungsraten im Wendepunkt beziehungsweise bei Versuchsende für die Mischgut-Varianten AC 32 T S aus dem Einaxialen Druck-Schwellversuch gem. TP Asphalt, Teil 25 B 1**

Bild 9 zeigt die Ergebnisse der Dehnungsraten im Wendepunkt beziehungsweise bei Versuchsende für die Mischgut-Varianten SMA 11 S und AC 11 D S in Abhängigkeit vom Zugabeanteil an Asphaltgranulat.



**Bild 9:** Ergebnisse der Dehnungsrate im Wendepunkt beziehungsweise 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.

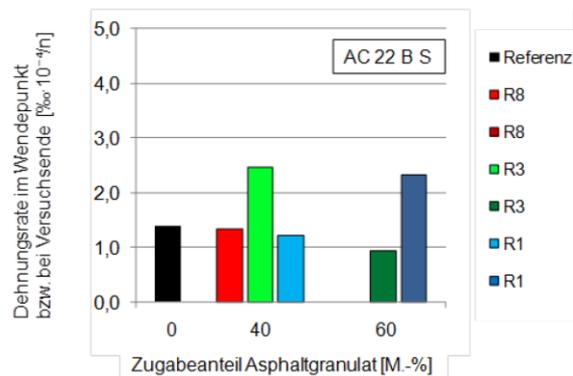
Wie für die Asphalttragschicht-Variante AC 32 T S ist auch aus Bild 9 ein systematischer Einfluss des Zugabeanteils an Asphaltgranulat erkennbar.

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 R 1. Diese weisen im Vergleich zu den anderen Rejuvenatoren die geringsten Verformungswiderstände auf.

Bild 10 zeigt die Ergebnisse der Dehnungsraten im Wendepunkt beziehungsweise 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.



**Bild 10:** Ergebnisse der Dehnungsrate im Wendepunkt beziehungsweise 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 erkennbar. Anzumerken ist jedoch die geringe Dehnungsrate von  $1,6 \text{‰} \cdot 10^{-4/n}$  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.

### 6.3 Widerstand gegen Kälterissbildung von Asphalt

Die Zugfestigkeitsreserven sind in Bild 11 zusammenfassend für eine gewählte Bezugstemperatur je Asphaltmischgut-Variante dargestellt.

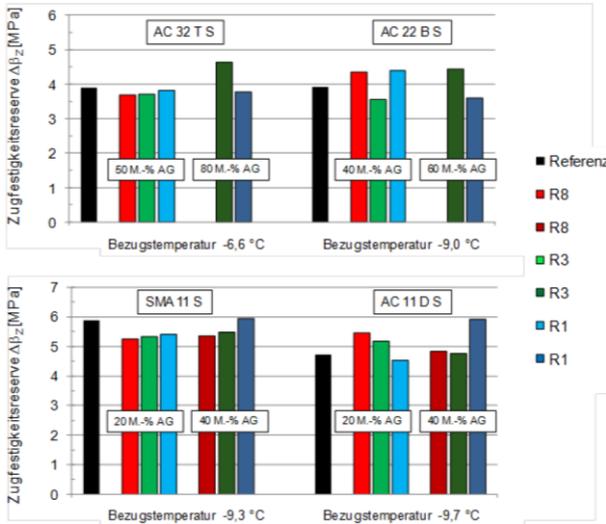
Für die Mischgut-Variante AC 32 T S ist festzustellen, dass alle Varianten unter Zugabe von Asphaltgranulat und Rejuvenatoren vergleichbare Kälteeigenschaften erzielen. Tendenziell vorteilhaft erweist sich die Variante unter Einsatz des Rejuvenators R 3 mit einem Zugabeanteil von 80 M.-% Asphaltgranulat.

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 beziehungsweise 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 beziehungsweise des einge-

setzen Rejuvenators bezüglich der Kälteeigenschaften ist nicht erkennbar, da die Variante unter Verwendung des Rejuvenators R 1 und bei einem Zugabeanteil von 40 M.-% Asphaltgranulat eine gegenläufige Tendenz zu den anderen Varianten aufzeigt.



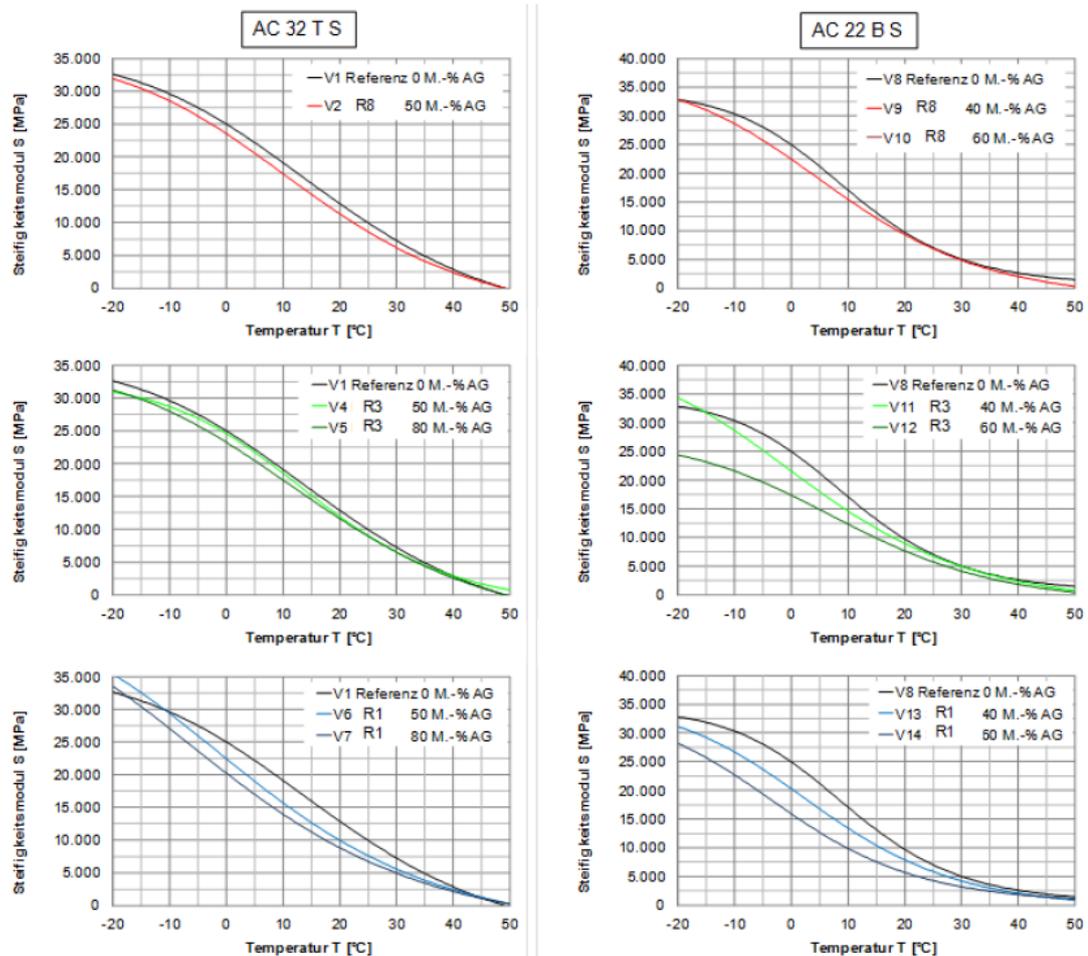
**Bild 11:** Zugfestigkeitsreserven (bei einer Bezugstemperatur) unter Variation des Zugabeanteils an Asphaltgranulat und der eingesetzten Rejuvenatoren für die Mischgut-Varianten AC 32 T S, AC 22 B S, SMA 11 S und AC 11 D S.

## 6.4 Steifigkeit und Ermüdungswiderstand von Asphalt

In Bild 12 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.

Aus den Steifigkeitsverläufen (generiert aus Sigmoidfunktion gemäß AL Sp-Asphalt 09) kann abgeleitet werden, dass

- mittels des Rejuvenators R 8 annähernd vergleichbare Steifigkeitsverläufe wie bei den jeweiligen Referenz-Varianten für AC 32 T S und AC 22 B S erzielt werden können,
- mittels des Rejuvenators R 3 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 R 1 unabhängig vom Zugabeanteil von Asphaltgranulat geringere Steifigkeiten in Abhängigkeit von der Temperatur im Vergleich zu den jeweiligen Referenz-Varianten für AC 32 T S und AC 22 B S resultieren.



**Bild 12:** 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.

In Bild 13 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.

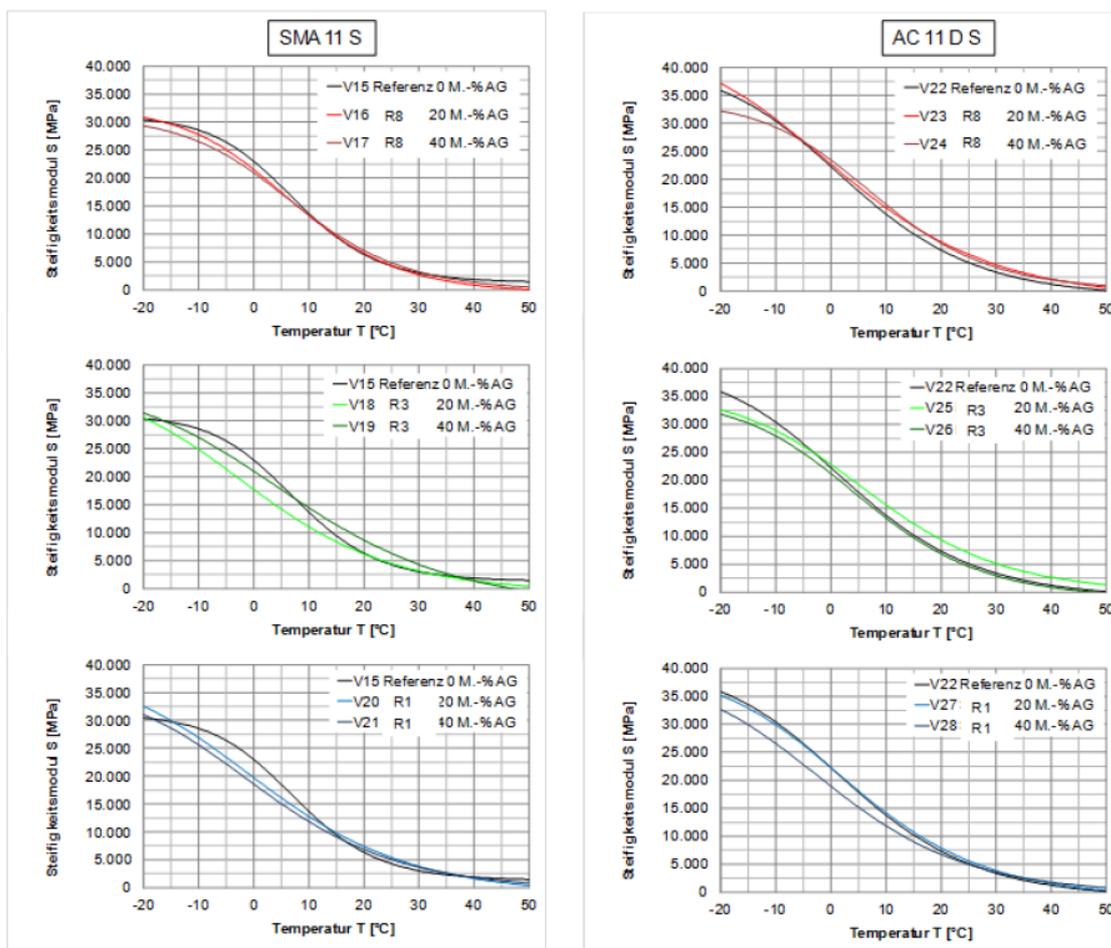
Aus den Steifigkeitsverläufen (generiert aus der Sigmoidfunktion) kann abgeleitet werden, dass

- mittels des Rejuvenators R 8 annähernd vergleichbare Steifigkeitsverläufe wie für die jeweiligen Referenz-Varianten für SMA 11 S und AC 11 D S erzielt werden können,
- mittels des Rejuvenators R 3 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 beziehungsweise vorteilhafte Steifigkeitsverläufe wie für die Referenz-Variante erzielt werden können,
- mittels des Rejuvenators R 1 für die Asphaltart SMA 11 S zum Teil deutlich von der Referenz abweichende

Steifigkeitsmodul (insbesondere im Temperaturbereich von -10 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 R 8 und R 3 vergleichbare Steifigkeitsmoduln erzielen wie die Referenz, die Varianten unter Verwendung des Rejuvenators R 1 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.



**Bild 13: 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**

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 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 Steifig-

keitsmoduln wie eine Referenzvariante ohne Zugabe von Asphaltgranulat erzielen kann. Eine höhere Zugabe von Asphaltgranulat bewirkt tendenziell eine Reduktion der Steifigkeitsmoduln.

Hinsichtlich des Ermüdungswiderstands 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. Hier zeigen die Mischgut-Varianten unter Einsatz von Rejuvenatoren tendenziell geringere Ermüdungswiderstände auf.

## 6.5 Rechnerische Dimensionierung

Bei 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 Ermüdungswiderstands zeigen, dass die im Forschungsprojekt eingesetzten Rejuvenatoren lediglich annähernd die Eigenschaften der Referenzvariante ohne Einsatz von Asphaltgranulat erreichen.

## 7 Zusammenfassung und Folgerungen für die Praxis

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 mithilfe des DSR, des BBR und der Bestimmung des Erweichungspunkts 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.

Generell erlauben Black-Diagramme eine gute Beurteilung des rheologischen Verhaltens von Gemischen aus Bindemittel und Rejuvenatoren im Hinblick auf rheologische "verjüngende" Effekte. Ebenso ermöglichen sie Aussagen über die Alterungsneigung derartiger Gemische.

Der Einfluss der Rejuvenatoren ist unterschiedlich: Einige Rejuvenatoren wirken tatsächlich rheologisch "verjüngend", andere "fluxend". Die dritte Wirkungsvariante zeigt eine Veränderung des rheologischen Verhältnisses aus elastischen und viskosen Verformungsanteilen hin zu noch höheren elastischen Anteilen. Dies ist nach bisherigen Erkenntnissen keine gewünschte Wirkungsweise.

Zusammenfassend können 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 wurden nicht beobachtet.
- Die notwendigen Zugabemengen an Rejuvenatoren sind wesentlich geringer gegenüber der Verjüngung durch Frischbindemittel, was wiederum eine höhere Zugabemenge Asphaltgranulat bei gleichem Bindemittelgehalt im Asphalt ermöglicht. Die optimale Zugabemenge kann mit dem am ISBS entwickelten Bitumentypisierungs-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.