

# Entwicklung einer Prüfsystematik zum Nachweis/zur Überprüfung der Eignung der Wiederverwertung von Ausbauasphalt mit Erweichungspunkten des extrahierten Bindemittels von über 70 Grad Celsius

FA 7.219

Forschungsstelle: RWTH Aachen University, Institut für Straßenwesen (Prof. Dr.-Ing. M. Oeser)

Bearbeiter: Oeser, M. / Meyer, A.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Bonn

Abschluss: September 2015

## 1 Problemstellung und Zielsetzung

Das Kreislaufwirtschaftsgesetz verlangt die Wiederverwertung von Ausbauasphalt auf möglichst hohem Wertschöpfungsniveau in möglichst hohen Zugabeanteilen. Hierbei ist jedoch der Grundsatz der Gleichwertigkeit zu beachten, der besagt, dass die im Ausbauasphalt enthaltenen Baustoffkomponenten die gleichen Eigenschaften aufweisen müssen wie originäre Baustoffe. Für das im Ausbauasphalt enthaltene Bitumen kann diese Anforderung allerdings nicht erfüllt werden, da dieses durch die Verarbeitung und Liegedauer praktisch immer thermisch und/oder oxidativ beansprucht wird und somit altert.

Im Allgemeinen wird der Alterungsgrad eines Asphalts über den Anstieg des Erweichungspunkts Ring und Kugel des aus dem Ausbauasphalt zurückgewonnenen Bitumens charakterisiert. Um die Verwendung zu stark gealterter Bitumen beziehungsweise Asphalte zu vermeiden, wurden in den Technischen Lieferbedingungen für Asphaltgranulat (TL AG-StB 06) Grenzwerte für den Erweichungspunkt definiert (70 °C für den Mittelwert und 77 °C für den Einzelwert), bei deren Überschreitung das Asphaltgranulat nur dann eingesetzt werden darf, wenn dessen Unschädlichkeit im Rahmen der Erstprüfung des unter Einsatz des Asphaltgranulats herzustellenden Asphaltmischguts gesondert nachgewiesen wird.

Bei dieser pragmatischen Vorgehensweise bleibt aber völlig außer Acht, dass einige Bitumensorten und -produkte bereits im Frischzustand einen Erweichungspunkt von über 70 °C aufweisen. Hierzu zählen zum Beispiel wachsmodifizierte und höher modifizierte Bitumen. Die Wiederverwertung von mit diesen "Sonderbindemitteln" hergestellten Asphalten ist damit praktisch ausgeschlossen, selbst wenn es sich um Asphaltgranulat einer neuen Asphaltbefestigung handeln würde.

Darüber hinaus bleibt bislang völlig offen, wie bei der Wiederverwertung von Ausbauasphalten mit hohen Erweichungspunkten der "gesonderte Nachweis" im Rahmen der Eignungsprüfung zu erbringen ist.

Ziel der Forschungsarbeit ist es daher, die bestehenden Unzulänglichkeiten im Regelwerk zu beseitigen und Antworten auf folgende Kernfragen zu finden:

- Welche Prüfverfahren eignen sich zur Unterscheidung von Sonderbindemitteln mit hohen Erweichungspunkten und stark gealterten Standardbitumen mit vergleichbaren Erweichungspunkten?

- Kann mit diesen Prüfverfahren eine Einstufung des aus dem Ausbauasphalt rückgewonnenen Bindemittels erfolgen, um sicherzustellen, dass kein extrem gealtertes Bitumen vorliegt?
- Kann Ausbauasphalt unschädlich wiederverwendet werden, wenn das enthaltene Sonderbindemittel bereits im Frischzustand einen Erweichungspunkt von über 70 °C besitzt?
- In welcher Weise ist der Nachweis der Unschädlichkeit für die Erstellung einer Eignungsprüfung zu führen?

Mit der Beantwortung dieser Fragen können mit Sonderbindemitteln hergestellte Asphalte zukünftig hochwertig im Heißmischverfahren wiederverwertet werden.

## 2 Untersuchungsmethodik

Die im Rahmen des Vorhabens durchgeführten Arbeiten lassen sich grundsätzlich zwei Untersuchungsebenen zuordnen:

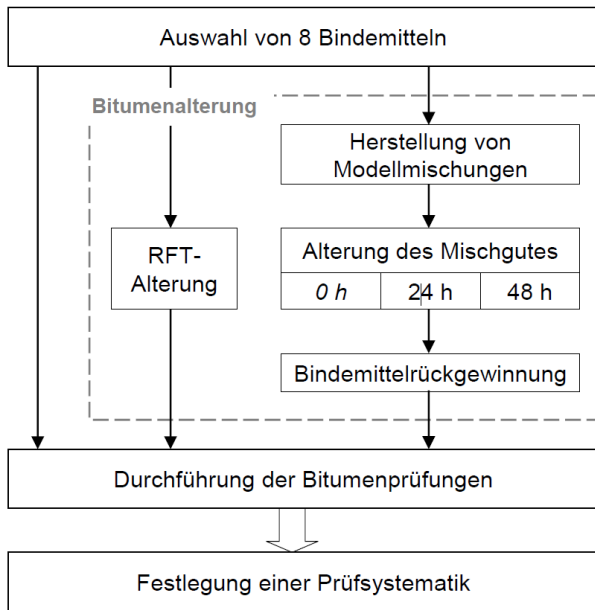
- Entwicklung einer Prüfsystematik zum zielsicheren Nachweis von stark gealtertem Standardbitumen.
- Nachweis der Unschädlichkeit bei Verwendung von Asphaltgranulat, das Sondermittel mit hohen Erweichungspunkten enthält.

### 2.1 Phase 1 (Bitumenebene): Entwicklung einer Prüfsystematik

In Phase 1 geht es zunächst darum, eine Prüfsystematik zu entwickeln, die eine Unterscheidung zwischen stark gealtertem Standardbitumen und Sonderbindemitteln mit vergleichbar hohen Erweichungspunkten erlaubt. Hierzu wurden vier Standardbitumen (1 x 30/45, 1 x 50/70, 2 x PmB 25/55-55 A) und vier Sonderbindemittel (1 x PmB 25/55-55 A NV, 3 x PmB 40/100-65 A) ausgewählt und unterschiedlichen Laboralterungsmethoden unterworfen. Neben einer RFT-Kurzzeitalterung am reinen Bindemittel kam auch eine Alterung am Gestein im Wärmeschrank (Modellmischung) mit zwei unterschiedlichen Verweildauern zur Anwendung. Die insgesamt 32 Bindemittelproben (= acht Produkte x vier Konditionierungen) wurden folgenden konventionellen und performance-orientierten Prüfungen unterzogen:

- Erweichungspunkt Ring und Kugel
- Nadelpenetration
- Elastische Rückstellung
- Kraftduktilität bei 25 °C
- DSR-Analytik
- BBR-Analytik

Bild 1 veranschaulicht die Vorgehensweise:



**Bild 1:** Ablaufplan für die Bitumenuntersuchungen zur Entwicklung einer Prüfsystematik

## 2.2 Phase 2 (Asphaltebene): Nachweis der Gleichwertigkeit

Eine große Herausforderung innerhalb des Projekts bestand in der Beschaffung der gewünschten Asphaltgranulatqualitäten, da die Verfügbarkeit von mit Sonderbindemitteln hergestellten Asphalten aus bestehenden Befestigungen sehr eingeschränkt ist. In Kombination mit der Forderung, dass alle Asphaltgranulate der gleichen Mischgutart (SMA 8 S) entstammen und der Erweichungspunkt in einem Zielbereich von 80 °C liegen sollte, schied diese Alternative praktisch aus.

Es wurde daher beschlossen, die Asphaltgranulate auf der Einbaustrecke am Institut für Straßenwesen "zu generieren". Hierbei wurde wie folgt vorgegangen:

- Einbau der Splittmastix-Varianten auf der Versuchsstrecke des Instituts
- Anschließendes Fräsen des eingebauten Asphalts (siehe Bild 2)
- Zusätzliche Alterung des gefrästen Asphaltmaterials im Wärmeschrank

Diese Vorgehensweise wurde für die Bereitstellung aller Asphaltgranulatqualitäten gewählt, auch für diejenigen mit herkömmlichem PmB, da somit die bestmögliche Vergleichbarkeit der verschiedenen Varianten gewährleistet war.

Um den Einfluss verschiedener Bindemittel und die Auswirkungen der Herstellmodalitäten möglichst weit gefächert erfassen zu können, wurden – ausgehend von den jeweiligen Referenzmischungen ohne die Verwendung von Asphaltgranulat – folgende Parameter bei der Zugabe variiert:

- Bindemittel im Asphaltgranulat (Art und Alterungszustand) (6-fach)
- Zugabemenge (2-fach)
- Zugabeart beziehungsweise -temperatur (2-fach – nur exemplarisch)



**Bild 2:** Fräsen der eingebauten Schicht

Tabelle 1 gibt einen Überblick über den Variationsumfang, wobei die Referenzvariante ohne Asphaltgranulat hier nicht aufgeführt ist.

**Tabelle 1:** Variationsumfang für den Splittmastixasphalt 8 S und den Asphaltbinder 16 B S

Bindemittel im Asphaltgranulat	Zugabemenge [M.-%]	Zugabeart [-]
PmB 25/55-55 A * (EP RuK < 70 °C)	15	kalt
	30	kalt
PmB 25/55-55 A (EP RuK > 70 °C)	15	kalt
	30	kalt
	15	warm
	30	warm
PmB 25/55-55 NV (EP RuK > 70 °C)	15	kalt
	30	kalt
PmB 10/40-65 A (EP RuK > 70 °C)	15	kalt
	30	kalt
PmB 40/100-65 A (EP RuK > 70 °C)	15	kalt
	30	kalt
50/70 NV (EP RuK > 70 °C)	15	kalt
	30	kalt

Bei der Herstellung der Mischungen mit und ohne Asphaltgranulat wurde durch gezielte Dosierung der frischen Komponenten auf eine vergleichbare kompositionelle Zusammensetzung geachtet. Die Verdichtung aller Asphaltvarianten erfolgte derart, dass ein einheitlicher Hohlraumgehalt erzielt wurde.

Die Einhaltung der Rezepttreue sowie der vergleichbaren Hohlraumgehalte der Prüfkörper wurde entsprechend nachgewiesen. Für die insgesamt 30 Asphaltvarianten wurden folgende Eigenschaften bestimmt:

- Verdichtbarkeit
- Verformungseigenschaften
- Ermüdungseigenschaften
- Kälteverhalten
- Haftverhalten

### 3 Ansätze zur Differenzierung zwischen stark gealterten Standardbitumen und Sonderbindemitteln

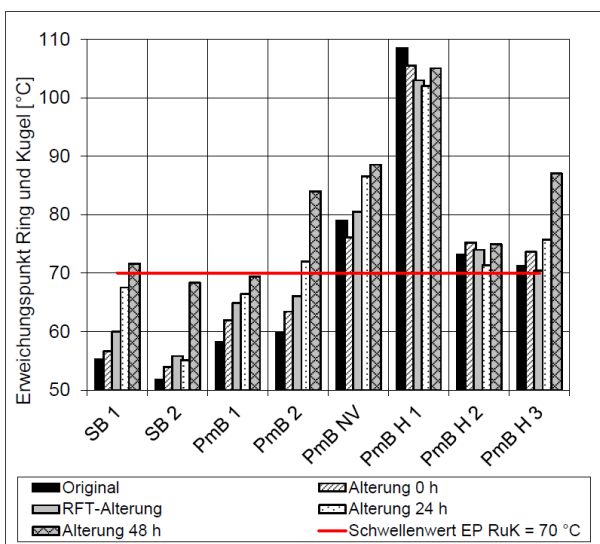
#### 3.1 Ergebnisse der konventionellen Bitumenprüfungen

Bei der stärksten Alterungsbeanspruchung (Alterung am Gestein für 48 Stunden bei 130 °C unter Luftzufuhr) stiegen die Erweichungspunkte der konventionellen Bitumen um bis zu 25 K. Bei den Sonderbindemitteln lagen alle Erweichungspunkte bereits im Frischzustand über 70 °C, für ein Produkt sogar über 100 °C. Während der Alterung kam es teilweise zu einer Verringerung des Erweichungspunkts. Hieraus wird das deutlich abweichende Verhalten der Sonderbindemittel gegenüber konventionellen Bindemitteln ersichtlich (siehe Bild 3).

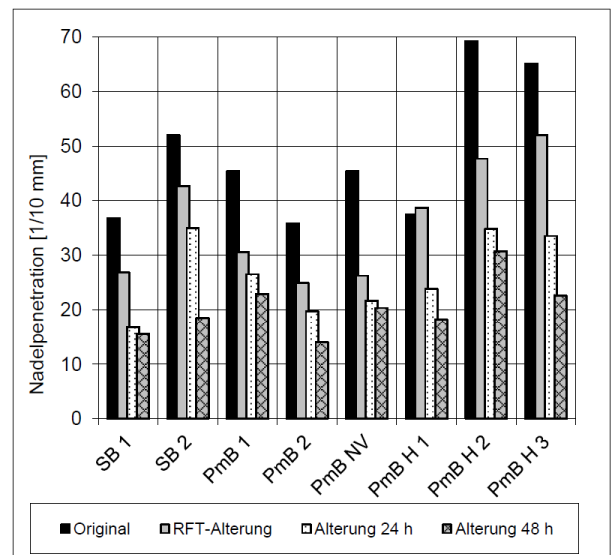
Demgegenüber lieferte die Nadelpenetration vergleichsweise systematische Ergebnisse. Auch für die Sonderbindemittel wurde hier ein sukzessiver Viskositätsanstieg verzeichnet. Die Penetrationswerte nahmen ausgehend vom Frischzustand teilweise um über 40 Einheiten ab (siehe Bild 4).

#### 3.2 Auswertung von Energiequotienten aus Kraftduktilitätskurven

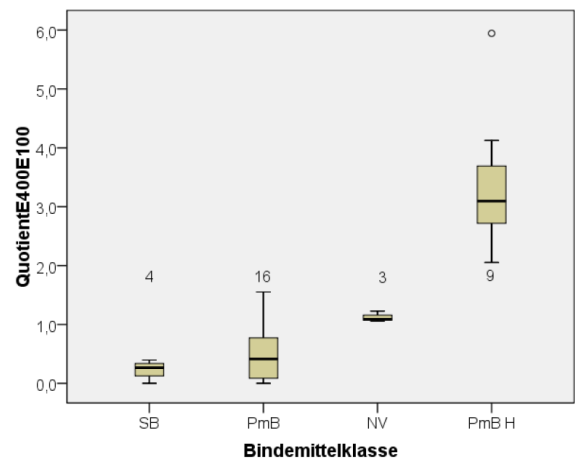
Besonderes Augenmerk wurde auf die Auswertung der Kraftduktilitätskurven gelegt. Insbesondere bei polymermodifizierten Bindemitteln kann durch Unterteilung des Kurvenverlaufs in zwei Bereiche berücksichtigt werden, dass bei geringen Ausziehlängen der Kraftverlauf nahezu ausschließlich vom Basisbitumen bestimmt wird. Erst bei größeren Dehnungen entfalten die Polymere durch Netzwerkbildung ihre Wirkung und prägen so den weiteren Kurvenverlauf.



**Bild 3: Erweichungspunkte der Bindemittel in unterschiedlichen Alterungszuständen**



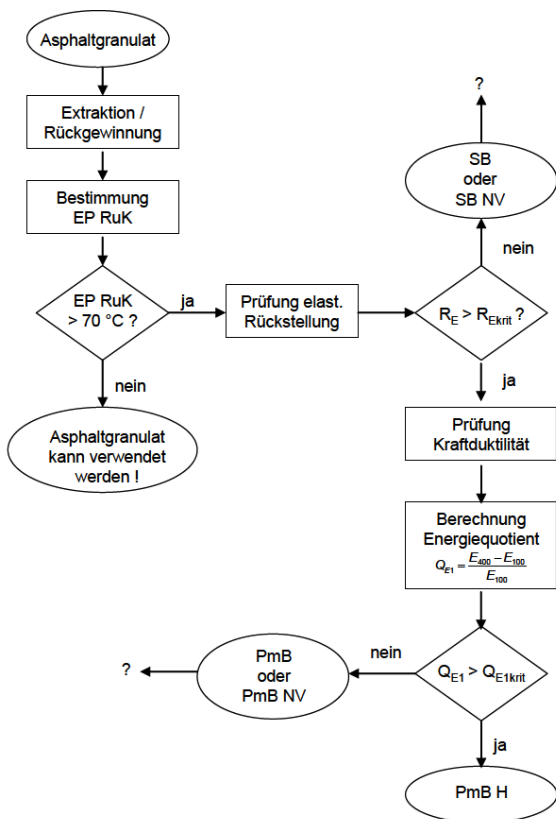
**Bild 4: Penetrationswerte der Bindemittel in unterschiedlichen Alterungszuständen**



**Bild 5: Differenzierung der Bindemittelklassen anhand des Energiequotienten  $QE1 = (E400 - E100) / E100$**

Deshalb wurden in Anlehnung an Angst (2002) und Hirsch (2005) verschiedene Formänderungsenergien und deren Quotienten berechnet, um auf dieser Basis eine Differenzierung zwischen den beiden Bindemittelgruppen vornehmen zu können. Dies gelang jedoch nur zum Teil, da sich insbesondere die wachsmodifizierten Bindemittel nur schwer von den unmodifizierten Pendanten unterscheiden. Eine Trennung zwischen Straßenbaubitumen, Standard-PmB und hochmodifizierten PmB ist anhand des Energiequotienten  $(E_{400} - E_{100}) / E_{100}$  jedoch prinzipiell möglich, wie Bild 3 zeigt.

Bei den wachsmodifizierten Bindemitteln ist grundsätzlich zwischen Straßenbaubitumen und polymermodifizierten Bindemitteln zu unterscheiden. Das niedrigviskose PmB würde nach Prüfung der Elastischen Rückstellung den polymermodifizierten Bindemitteln zugeordnet und könnte auch durch die Kraftduktilitätsprüfung nicht von einem Standard-PmB unterschieden werden. Ein ähnliches Problem ergibt sich auch für die bisher nicht berücksichtigten wachsmodifizierten Straßenbaubitumen (zum Beispiel 50/70 NV).



**Bild 6:** Vorläufiges Ablaufdiagramm zur Differenzierung zwischen stark gealtertem Straßenbaubitumen und Sonderbindemittel

Der Nachweis der Wachsmodifizierung kann im Rahmen der beschriebenen Prüfsystematik somit noch nicht erbracht werden. Allerdings lassen sich die Bindemittel durch Prüfung der Elastischen Rückstellung und der Kraftduktivität in folgende drei Klassen einordnen:

- Klasse 1: Herkömmliche Straßenbaubitumen und wachsmodifizierte Straßenbaubitumen
- Klasse 2: Standard-PmB und PmB mit Wachszusätzen
- Klasse 3: Höher polymermodifizierte Bindemittel

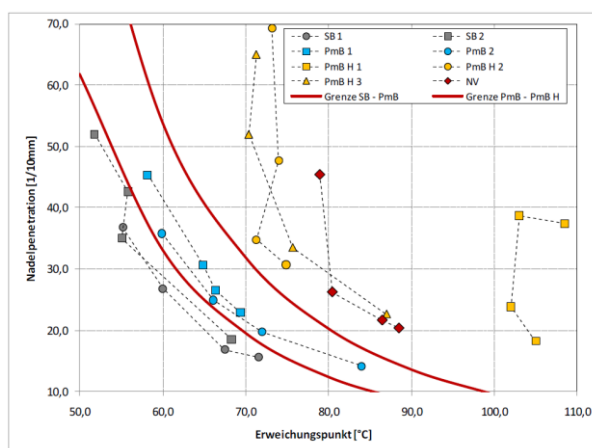
Eine umfassende und eindeutige Differenzierung zwischen Sonderbindemitteln (inklusive wachsmodifizierten Produkten) und stark gealterten Straßenbaubitumen ist gegenwärtig mit den vorgestellten Verfahren noch nicht gewährleistet. Hinzu kommt, dass die Vorgehensweise anhand des in Bild 6 dargestellten Ablaufdiagramms relativ komplex ist und der Anforderung an ein schnelles und einfaches Differenzierungskriterium nicht gerecht wird.

Daher wurde ein weiterer Differenzierungsansatz verfolgt, der aus einer kombinierten Betrachtung der beiden konventionellen Kennwerte Nadelpenetration und Erweichungspunkt besteht. Diesem Ansatz liegt die Idee zugrunde, dass ein gealtertes Bitumen nur dann über adäquate Eigenschaften verfügt, wenn es nicht zu stark versprödet ist. Diese Sprödeheit lässt sich möglicherweise mithilfe der Nadelpenetration erfassen.

### 3.3 Kombinierte Betrachtung von Erweichungspunkt und Nadelpenetration

Jedes gebrauchsfertige Bitumen wird gemäß den TL Bitumen-StB 07 anhand der beiden Kenngrößen Nadelpenetration und Erweichungspunkt Ring und Kugel typisiert und einer entsprechenden Bindemittelkategorie zugeordnet. Dies lässt sich anschaulich darstellen, wenn man die entsprechenden Wertepaare in einem Diagramm gegeneinander aufträgt. In Bild 7 wurde dies für alle zur Verfügung stehenden Bitumen in ihren jeweiligen Alterungsstadien durchgeführt.

Dabei wird zunächst der Einfluss der Alterung auf die beiden Kennwerte deutlich sichtbar. Die Nadelpenetration nimmt mit zunehmender Alterung sukzessive ab, für die Straßenbaubitumen (graue Marker) genauso wie für die Standard-PmB (blaue Marker) und die Sonderbindemittel (gelbe beziehungsweise rote Marker). Der Erweichungspunkt steigt tendenziell an, für die Straßenbaubitumen und Standard-PmB kontinuierlich, für die Sonderbindemittel teilweise diskontinuierlich.



**Bild 7:** Beziehung zwischen Nadelpenetration und Erweichungspunkt für die verschiedenen Bitumen mit unterschiedlichen Alterungsgraden

Dieser Ansatz wurde in ein Klassifizierungsdiagramm mit drei Bereichen überführt. Je nach Lage innerhalb dieses Diagramms kann das zu beurteilende Bindemittel entweder der Gruppe "Straßenbaubitumen", "konventionelle PmB" und "Sonderbindemittel" zugeordnet werden.

## 4 Nachweis der Gleichwertigkeit

### 4.1 Vergleichbarkeit der Asphaltvarianten

Zur Beurteilung der Gleichmäßigkeit der Asphaltgranulate gemäß M WA (2009) wurden die jeweiligen Spannweiten und Mittelwerte der Merkmalsgrößen Bindemittelgehalt, Erweichungspunkt Ring und Kugel, Füllergehalt, Sandgehalt und Kornanteil über 2 mm bestimmt und die fünf Einzelwerte auf Normalverteilung beziehungsweise Homogenität überprüft. Darüber hinaus konnte im Rahmen einer Varianzanalyse gezeigt werden, dass für alle Merkmale die Nullhypothese "Die Mittelwerte sind gleich" auf dem 5%-Signifikanzniveau nicht verworfen werden konnte und somit der Nachweis der Gleichwertigkeit auch von dieser Seite erbracht wurde.

Die Überprüfung auf Vergleichbarkeit der verschiedenen Mischgutvarianten erfolgte einmal anhand der kompositionellen Merkmale Erweichungspunkt Ring und Kugel, Bindemittelgehalt, Füllergehalt, Sandgehalt und Splittgehalt, das heißt über die Einhaltung der Soll-Rezeptur, und darüber hinaus anhand des Hohlraumgehalts der aus dem Mischgut hergestellten Marshall-Probenkörper und WSV-Platten.

Auch hier konnte anhand geeigneter statistischer Analysen nachgewiesen werden, dass die Vergleichbarkeit der Mischgutvarianten gegeben war und somit etwaige Unterschiede bei den Ergebnissen der Asphaltprüfungen auf die verschiedenen Asphaltgranulate zurückgeführt werden können.

## 4.2 Ergebnisse der Asphaltprüfungen

Die unterschiedlichen Asphaltvarianten wurden hinsichtlich des Verdichtungs-, Verformungs-, Kälte-, Ermüdungs- und Haftverhaltens geprüft. Zusammenfassend hat sich im Rahmen der Untersuchungen Folgendes gezeigt:

### Verdichtbarkeit

Keines der Mischgüter mit AG-Anteil besitzt einen höheren Verdichtungswiderstand als die Referenzmischung (ohne AG). Die T-Werte schwanken insgesamt zwischen dem Minimalwert von 39 für das wachsmodifizierte PmB (bei 30 % Zugabeanteil) und dem Maximalwert von 46 für die Referenzvariante.

### Kälteverhalten

Die Asphaltgranulatzugabe wirkt sich bei den SMA-Varianten zwar tendenziell ungünstig auf die Bruchtemperatur aus, die Bruchtemperaturen sind aber insgesamt auf einem unkritischen Niveau unterhalb von -20 °C, sodass allen Asphalten prinzipiell gute Kälteeigenschaften zugesprochen werden können. Bei den ABi-Varianten führt die Zugabe von Granulat bei einigen Varianten (unter anderem AG mit Standard-PmB) sogar zu niedrigeren Bruchtemperaturen und damit zu günstigeren Kälteeigenschaften. Auch hier liegen sämtliche Bruchtemperaturen unterhalb von -20 °C.

Im Hinblick auf die Zugfestigkeitsreserve führt die Zugabe von Asphaltgranulat beim SMA zu etwas ungünstigeren Werten. Für die ABi-Varianten ist weder ein positiver noch negativer Einfluss erkennbar (siehe Bild 8). Allerdings verschieben sich die Temperaturen, bei denen das Maximum der Zugfestigkeitsreserve auftritt, zu höheren Werten hin, was tendenziell als ungünstig zu werten ist.

### Verformungsverhalten

Für die ABi-Varianten wird die Wärmestandfestigkeit durch die unterschiedlichen Asphaltgranulatqualitäten nicht signifikant beeinträchtigt. Für die SMA-Varianten hingegen schneiden einzelne Varianten etwas ungünstiger als die Referenzvariante ab, aber nicht schlechter als die Nullvariante (mit "ungealtertem" Asphaltgranulat).

### Ermüdungseigenschaften

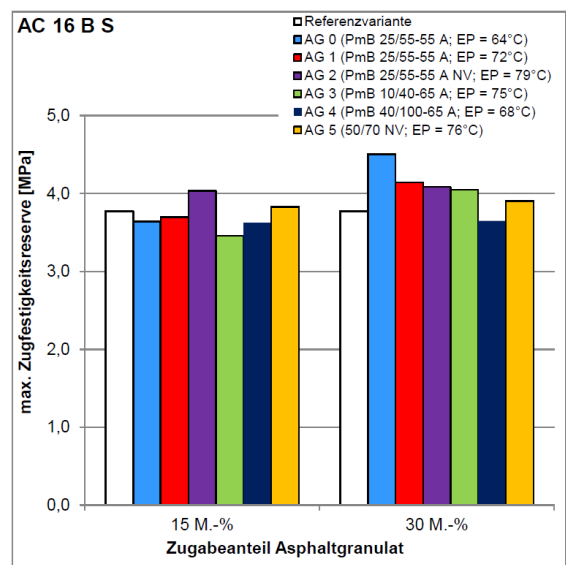
Lässt man die eher prüftechnisch bedingten Unterschiede außen vor, so kann zusammenfassend festgestellt werden, dass sich die Ermüdungseigenschaften bei Zugabe der hier eingesetzten

Asphaltgranulate, gleich mit welchem Bindemittel, tendenziell verbessern (siehe Bild 9).

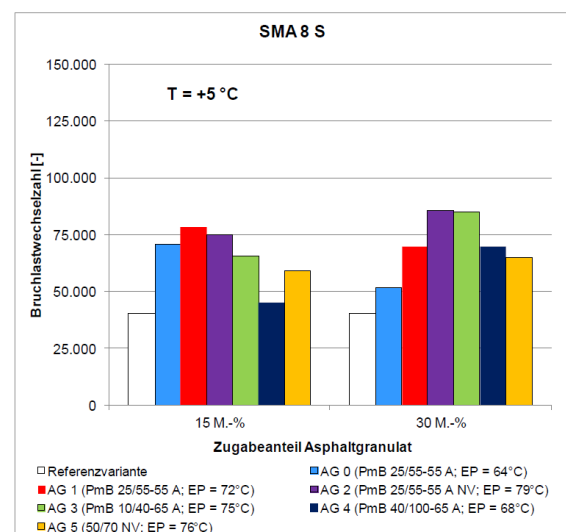
### Haftverhalten

Die Zugabe von Asphaltgranulat wirkt sich zwar geringfügig auf die Wasserempfindlichkeit aus, die Verhältniswerte liegen aber insgesamt auf einem hohen Niveau. Die übergreifend hohen Verhältniswerte sind sicherlich auch auf die vergleichsweise geringen Hohlraumgehalte der Prüfkörper zurückzuführen, bei denen das Schädigungspotenzial des Wassers nicht in dem Maße zum Tragen kommt.

Als übergreifendes Ergebnis kann festgehalten werden, dass die mit gealtertem Asphaltgranulat hergestellten Varianten grundsätzlich vergleichbare Eigenschaften gegenüber der Referenzvariante (ohne Asphaltgranulat) beziehungsweise der Nullvariante (mit ungealtertem Asphaltgranulat) aufweisen. Die Ermüdungseigenschaften verbessern sich sogar tendenziell.



**Bild 8:** Einfluss der Asphaltgranulatvariante auf die maximale Zugfestigkeitsreserve (ABi-Varianten)



**Bild 9:** Einfluss der Asphaltgranulatvariante auf die Bruchlastwechselzahl bei einer Prüftemperatur von +5 °C (SMA-Varianten)

## 5 Empfehlungen

Wie die Nachweisführung für einen unschädlichen Einsatz von Ausbauasphalt mit hohen Erweichungspunkten erfolgen kann, lässt sich auf Basis der gewonnenen Ergebnisse nur im Ansatz ableiten.

Das Hauptproblem besteht darin, dass die Erweichungspunkte der hier untersuchten "herkömmlichen Asphaltgranulate" zu niedrig waren. Unter "herkömmlichen Asphaltgranulaten" sind jene Granulate zu verstehen, die entweder ein Straßenbaubitumen oder ein gebrauchsfertiges Standard-PmB enthalten. Bei diesen Bitumen ist der Erweichungspunkt nach wie vor ein brauchbarer Indikator, um den Alterungsgrad abzuschätzen und eine Wiederverwendung hiervon abhängig zu machen.

Im Rahmen der hier durchgeführten Untersuchungen ist jedoch kein Asphaltgranulat eingesetzt worden, in dem extrem verhärtetes Bitumen enthalten war. Der maximale Erweichungspunkt lag für das harte Standard-PmB (PmB 10/40-65 A) bei 72 °C, somit zwar oberhalb des Grenzwerts von 70 °C, aber immer noch im gemäßigten Bereich.

Dies wird auch von den Ergebnissen der Asphaltuntersuchungen bestätigt. Alle Mischgutvarianten, die mit diesem Asphaltgranulat hergestellt wurden, weisen Eigenschaften auf, die mit denen eines AG-freien Mischguts weitestgehend vergleichbar sind. Lediglich die Temperatur bei maximaler Zugfestigkeitsreserve verschlechtert sich tendenziell und das Haftverhalten wird marginal beeinträchtigt. Der Wiederverwendung von derartigem Asphaltgranulat steht demnach nichts im Wege. Dies gilt im Übrigen auch für die anderen fünf hier untersuchten Asphaltgranulatqualitäten.

Auf Basis der Ergebnisse der Asphaltprüfungen wird daher vorgeschlagen, den Nachweis der Gleichwertigkeit gegenüber einem Referenzasphalt ohne Granulat anhand folgender Eigenschaften zu führen:

- Verdichtbarkeit nach TP Asphalt-StB,
- Kälteverhalten anhand von kombinierten Abkühl- und Zugversuchen,
- Haftverhalten anhand von Zugversuchen an luft- und wassergelagerten Proben.

Sollten sich für die Mischgutvariante mit AG vergleichbare oder bessere Ergebnisse als für die Referenzvariante (ohne AG) ergeben, so kann das infrage stehende Granulat in frischem Mischgut mit Anteilen bis zu 30 % wiederverwendet werden.

## 6 Literatur

[TL AG-StB 06]: Technische Lieferbedingungen für Asphaltgranulat, FGSV Verlag, Köln, 2000.

[TL Bitumen-StB 07]: Technische Lieferbedingungen für Straßenbaubitumen und gebrauchsfertige Polymermodifizierte Bitumen (TL Bitumen-StB 07); FGSV Verlag, Köln, 2007.

[M WA 2009]: Merkblatt für die Wiederverwendung von Asphalt, FGSV Verlag, Köln, 2009.

[Angst 2002]: Angst, C.: Optimierung der Kraft- Duktilitätsprüfung von polymermodifizierten Bitumen (PmB); in: Straße und Autobahn, Heft 4, S. 203-210, 2002.

[Hirsch 2005]: Hirsch, V.: Neue Methoden zur Ansprache des Gebrauchsverhaltens von Bindemitteln; in: Straße und Autobahn, Heft 12, S. 706-710, 2005.