



Sonderdruck aus der „asphalt 2|2019“

(„asphalt“ wird herausgegeben von der Stein-Verlag Baden-Baden GmbH, www.stein-verlagGmbH.de)



Steigende Asphaltgranulatmengen machen die Wiederverwendung von Asphalt ökologisch und ökonomisch alternativlos. (Quellen: DAV/hin)

Teil 1: Laboruntersuchungen

Wirksamkeit und Performance von Rejuvenatoren

Die Wiederverwendung von Ausbauasphalt ist eine der großen Stärken des Baustoffs Asphalt und spielt im Asphaltstraßenbau schon heute eine entscheidende Rolle. Im Sinne des Gesetzes zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen [1] (kurz: „Kreislaufwirtschaftsgesetz“) und aus Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen werden zum Teil schon jetzt hohe bis sehr hohe Zugaben von Asphaltgranulat in allen Asphaltlagen realisiert.

Von Dr.-Ing. Daniel Gogolin

1 Schwerpunkt: Rejuvenatoren

Durch die tendenziell steigenden Zugabeanteile von Asphaltgranulat (AG) in allen Asphalt-schichten und -lagen nimmt dabei ebenfalls auch das Themengebiet Alterung (Bitumen und Asphalt) immer weiter an Bedeutung zu. Alterungsprozesse führen hierbei allgemein zu einem Verlust der entscheidenden Eigenschaften eines bitumenhaltigen Bindemittels, wie z. B. Verlust der viskosen Eigenschaften (Versprödung) oder Verlust der Klebkraft (Adhäsion).

Zukünftig kann die fortschreitende Alterung der Asphalte durch die wiederholte Wiederverwendung von Asphaltgranulat (zweite/dritte Generation Asphaltgranulat) langfristig zu Problemen führen. Die Lösung dieser Problematik könnte u. a. in der Wiederauffrischung des Altbitumens, d. h. in der weitestgehenden Wiederherstellung der ursprünglichen Bitumeneigenschaften durch die Zugabe sogenannter Rejuvenatoren liegen.

Im Rahmen dieses dreiteiligen Beitrags werden Möglichkeiten aufgezeigt, wie

- die Wirksamkeit am Beispiel eines Rejuvenators im Labor nachgewiesen werden kann (Teil 1),
- die labortechnischen Nachweise im Rahmen einer Erprobungsstrecke validiert werden können (Teil 2) und
- sich unterschiedliche Rejuvenatoren im Rahmen einer labortechnischen Vergleichsuntersuchung darstellen (Teil 3).

Einschränkung bei der Verwendung von Asphaltgranulat

Im Rahmen des Technischen Regelwerks zum Umgang mit Asphaltgranulat (TL AG-StB 09 [2] und M WA [3]) werden an dem Erweichungspunkt Ring und Kugel am wiedergewonnenen Bindemittel aus dem Asphaltgranulat Grenzwerte an den Einzelwert von 70 °C bzw. den Mittelwert von 77 °C vorgegeben. Bindemittel, die diese Erweichungspunkte überschreiten, sind in der Regel kritisch zu betrachten und müssen – falls sie doch eingesetzt werden sollen – ihre Eignung in einem gesonderten Nachweis im Rahmen der Erstprüfung nachweisen. Nach heutigen Erkenntnissen liegen bereits ca. 30 % des anfallenden Asphaltgranulats in einem Bereich, der für die Wiederverwendung bereits kritisch betrachtet werden muss bzw. zum Teil gar nicht mehr wiederverwendet werden kann.

An dieser Stelle ist anzumerken, dass durch den verstärkten Einsatz von Additiven und Zusätzen im Asphalt, beispielsweise durch viskositätsverändernde Zusätze, Gummibitumen oder hochpolymermodifizierte bitumenhaltige Bindemittel, rein physikalische Untersuchungen wie z. B. der Erweichungspunkt Ring und Kugel und die Nadelpenetration nicht immer Rückschlüsse auf die tatsächliche Qualität des Bindemittels zulassen. Eine Möglichkeit zur Klassifizierung solcher Bitumen ist durch die Betrachtung der rheologischen Kennwerte des Bindemittels – beispielweise mittels dynamischem Scherrheometer (DSR) – möglich. Grundsätzlich können aber schon detailliertere Informationen zum Bestand seitens der Auftrag-

geber einer Baumaßnahme die Einschätzung/Bewertung der Bindemittelkennwerte deutlich erleichtern.

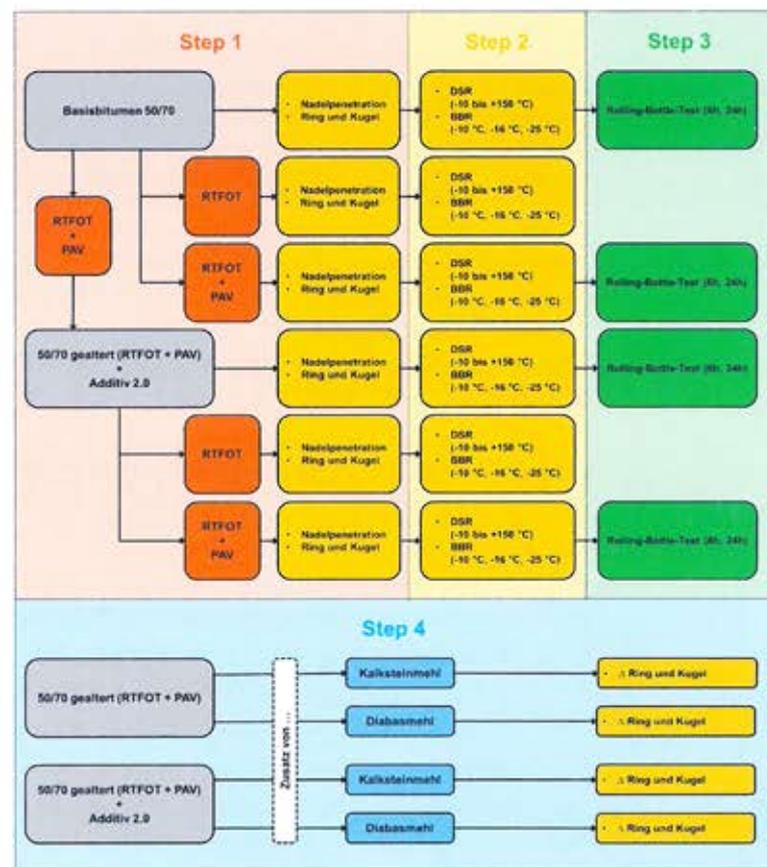
Möglichkeiten einer „Verjüngung/Rejuvenation“

Der Begriff Rejuvenation entstammt dem Englischen und bedeutet allgemein Verjüngung. Nach der Definition von SHEN [4] werden Additive als Rejuvenatoren bezeichnet, die das im Asphaltgranulat enthaltene Bitumen, welches über seine Liegedauer Alterungs- und somit Erhärtungsprozessen unterliegt, möglichst wieder in den Ursprungszustand zurückführen sollen.

In Deutschland spielen Rejuvenatoren erst seit einigen Jahren eine Rolle im Asphaltstraßenbau. Inzwischen existieren zahlreiche Produkte mit der Bezeichnung Rejuvenator auf dem nationalen und internationalen Markt. Die meisten davon werden bisher primär im Zuge der Wiederverwendung von Asphaltgranulat verwendet.

Physikalisch wird ein Rejuvenator zumeist als ein Stoff verstanden, der die Viskosität eines verhärteten Bitumens verringert, indem es den Erweichungspunkt Ring und Kugel senkt [5] bzw. die Nadelpenetration erhöht. An dieser Stelle muss aber ausdrücklich betont werden, dass auch Fluxöle oder natürliche Öle wie z. B. Rapsöl Bitumen grundsätzlich nach dieser Definition erweichen. Diese Stoffe können aber – gerade im Hinblick auf die Veränderung der rheologischen Eigenschaften eines Bitumens – nicht als Rejuvenatoren bezeichnet werden. In diesem Kontext

Flussdiagramm Untersuchungsprogramm am Beispiel von Additiv 2.0



2 Schwerpunkt: Rejuvenatoren

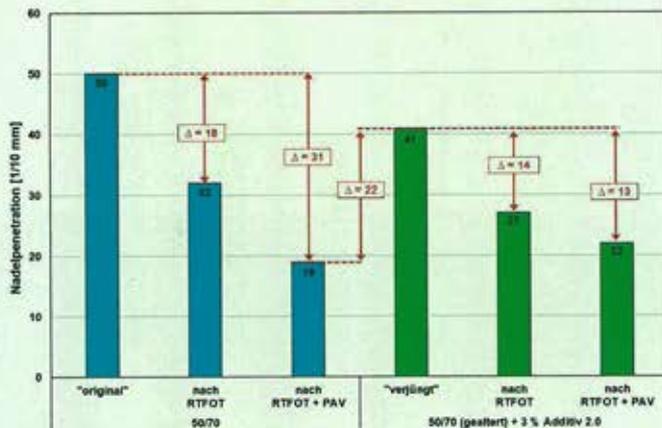


Abbildung 2: Untersuchungsergebnisse Nadelpenetration

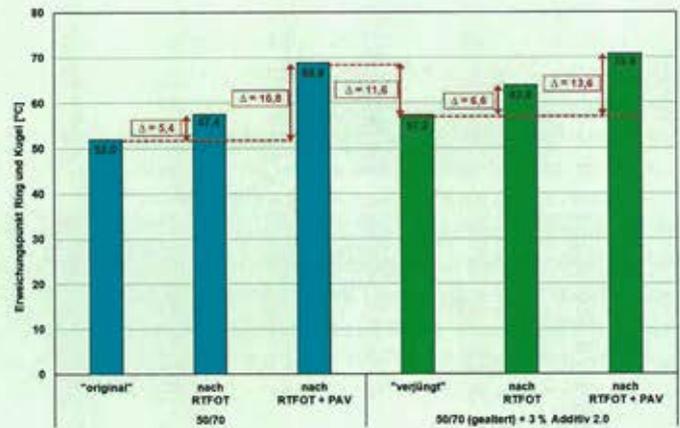


Abbildung 3: Untersuchungsergebnisse Erweichungspunkt Ring und Kugel

muss somit deutlich zwischen sogenannten Weichmachern und Rejuvenatoren unterschieden werden:

Rejuvenatoren bewirken eine Reduzierung der Viskosität bei gleichzeitiger Wiederherstellung der viskoelastischen (rheologischen) Eigenschaften eines gealterten bitumenhaltigen Bindemittels. Das Alterungsverhalten des rejuventierten bitumenhaltigen Bindemittels wird nicht negativ beeinflusst und entspricht im Wesentlichen dem Alterungsverhalten eines Frischbindemittels.

Weichmacher bewirken eine Reduzierung der Viskosität, können aber die viskoelastischen (rheologischen) Eigenschaften eines bitumenhaltigen Bindemittels nicht wiederherstellen. Weichmacher erweichen bzw. plastifizieren das Bindemittel lediglich. Durch die Zugabe eines Weichmachers in ein bitumenhaltiges Bindemittel kann es durch z. B. leicht flüchtige Bestandteile unter Umständen zu einem beschleunigten Alterungsverhalten kommen.

Ergänzend hierzu wird im Positionspapier „Rejuvenators“ der European Asphalt Pavement Association [6] zusätzlich darauf hingewiesen, dass Rejuvenatoren grundsätzlich nur dann eingesetzt werden sollten, wenn

- keine Umweltbelastungen und Gesundheits- und Sicherheitsgefahren während der Lagerung, der Verarbeitung, der Herstellung und der Anwendung entstehen.
- die zukünftige Wiederverwendung und Wiederverwertbarkeit der Asphalte nicht gefährdet werden.
- sich keine negativen Auswirkungen auf die technische Qualität des Produkts (Asphalt) ergeben.

Labortechnisches Untersuchungsprogramm

Das durchgeführte Untersuchungsprogramm ist in Abbildung 1 in Form eines Flussdiagramms dargestellt. Das Untersuchungsprogramm gliederte sich insgesamt in vier Untersuchungsschritte (Steps).

Als Basisbindemittel für alle Untersuchungen wurde ein Straßenbaubitumen 50/70 nach TL Bitumen 07/13

ausgewählt. Als Rejuvenatoren kamen zwei unterschiedliche Produkte (hier: Additiv 1.0 und Additiv 2.0) zum Einsatz, die zum Zeitpunkt der Untersuchungen noch nicht am Markt verfügbar waren.

In einem ersten Schritt wurde das verwendete Basisbitumen jeweils durch die Nadelpenetration und den Erweichungspunkt Ring und Kugel physikalisch charakterisiert. Das Basisbitumen wurde daraufhin in ausreichender Menge für alle nachstehenden Untersuchungen kurz- und langzeitgealtert (RTFOT nach DIN EN 12607-1 und PAV nach DIN EN 14769). Die Wirksamkeit der beiden Additive wurde anschließend mittels Nadelpenetration und Erweichungspunkt Ring und Kugel am gealterten Basisbitumen (RTFOT und PAV) und nach Zugabe von jeweils 3 M.-% beider Additive untersucht. Anschließend wurde das verjüngte Bitumen noch einmal kurz- und langzeitgealtert und analysiert.

Im zweiten Schritt wurde die rheologische Wirksamkeit der Rejuvenatoren mittels Dynamischem Scherreometer (DSR) in Anlehnung an die DIN EN 14770 (vgl. Prüfparameter Tabelle 1) und Biegebalkenrheometer (BBR) nach DIN EN 14771 analog zu den Alterungsstufen gemäß Step 1 untersucht.

Das Haftverhalten zwischen Gestein und Bitumen sollte durch die Zugabe von Additiven grundsätzlich nicht negativ beeinflusst werden. Hierzu wurde im Step 3 das Adhäsionsverhalten mittels Rolling-Bottle-Test nach TP Asphalt-StB Teil 11 am Basisbitumen und im unmittelbaren Vergleich nach Zugabe beider Additive nach der Langzeitalterung nach jeweils 6, 24 und 72 Stunden geprüft.

Im letzten Arbeitsschritt wurde der Einfluss verschiedener Füller (hier: Kalksteinmehl und Diabasmehl) auf die Wirkungsweise der Additive überprüft. Als Indikator für eine mögliche Einschränkung des Wirkungsgrads eines Rejuvenators durch eventuell auftretende Wechselwirkungen zwischen Bitumen und (u. a. hochreaktivem) Füller aufzuzeigen, wurde an dieser Stelle das Delta-Ring- und Kugel-Verfahren nach DIN EN 13179-1 angewendet.

Ergebnisse der Untersuchungen

Grundsätzlich zeigten im Rahmen des Projekts beide geprüften Additive vergleichbare Ergebnisse im Hinblick auf die physikalische und rheologische Wirksamkeit. Allerdings hat sich durch die Untersuchungen in Step 4 herauskristallisiert, dass die Zugabe von Kalksteinmehl die Wirkung des Additivs 1.0 nahezu vollständig negiert. Da es in der Praxis – gerade durch die Zugabe von Asphaltgranulat – nicht auszuschließen ist, dass Kalksteinmehl oder andere hochreaktive Mineralkomponenten Bestandteil des Asphaltmischguts sind, wurde das Additiv 1.0 für diesen Anwendungsfall an dieser Stelle nicht weiterverfolgt.

Anhand der durchgeführten Untersuchungen konnte sowohl auf physikalischer als auch auf rheologischer Ebene die Wirkung des Additivs 2.0 deutlich herausgearbeitet werden. Die Abbildungen 2 und 3 zeigen hierbei die Wirkung des Additivs auf das gealterte Basisbitumen hinsichtlich der Nadelpenetration und des Erweichungspunkts Ring und Kugel in den Zuständen vor und nach Verjüngung und jeweils nach unterschiedlichen Alterungsstufen.

Zusammenfassend konnte sowohl hinsichtlich der Ergebnisse der Nadelpenetration als auch des Erweichungspunkts Ring und Kugel gezeigt werden, dass nach der Zugabe von 3 % des Additivs 2.0 der Langzeitalterungseffekt (PAV) nahezu vollständig negiert wurde. So konnte bei einer Zugabe von 3 % des Additivs 2.0 eine Reduzierung des Erweichungspunkts Ring und Kugel von 11,6 °C ($\approx 3,8$ °C je 1 %) und eine Erhöhung der Nadelpenetration von 22 $\frac{1}{10}$ mm ($\approx 7,3$ $\frac{1}{10}$ mm je 1 %) erreicht werden.

Beim Einsatz von Rejuvenatoren ist die unmittelbare Betrachtung des Alterungsverhaltens nach der Verjüngung von besonderer Bedeutung. Hierbei sollte sich bei wiederholter Alterung des verjüngten Bitumens keine

signifikante Abweichung zum Alterungsverhaltens des verwendeten Basisbitumens zeigen. Aus bisherigen Erfahrungen kann es aber gerade bei Produkten mit leicht flüchtigen Bestandteilen hier zu sprunghaften und signifikanten Alterungsanstiegen kommen.

Auf Grundlage der gewonnenen Erkenntnisse aus den Laborprüfungen konnte für das Additiv 2.0 nach den beiden zusätzlichen Alterungsstufen ein zum Basisbitumen vergleichbares Alterungsverhalten attestiert werden.

In Abbildung 3 werden die Prüfergebnisse aus der DSR-Analytik als Phasenwinkel in Abhängigkeit der Äquivalenztemperatur $T_{\text{Äq}}$ dargestellt. Diese Darstellungsform erlaubt es, die Wirksamkeit des Rejuvenators auf rheologischer Basis anschaulich zu demonstrieren.

Die Ergebnisse der physikalischen Untersuchungen konnten durch diese rheologische Betrachtungsweise zusätzlich untermauert werden. So konnte nach der Verjüngung mit dem Additiv 2.0 eine Zunahme des Phasenwinkels von 2,8° und einer Abnahme der Äquivalenztemperatur von -9,0 °C verzeichnet werden. Somit befindet sich – rheologisch betrachtet – das verjüngte Bitumen nahezu auf dem Niveau des ursprünglichen Basisbitumens nach der Kurzzeitalterung (RTFOT). Die Langzeitalterung wurde demnach hinsichtlich der ermittelten rheologischen Kennwerte approximativ negiert. Die wiederholte Alterung des verjüngten Bitumens führt ebenfalls zu einem vergleichbaren Alterungsverlauf wie der des Ausgangsbasisbitumens.

Eine weitere Darstellungsmöglichkeit und Bewertung der rheologischen Wirksam-

Tabelle 1: Prüfparameter zur Best. der rheologischen Bindemittelkennwerte mit dem DSR

Messsystem	Platte/Platte
Prüfart	weggesteuert/oszillierend
Vorgegebene Deformation	0,5 bis 1,0 %
Prüftemperaturbereich	-10 bis 60 °C bzw. 60 bis 150 °C
Prüfintervalle	10 °C
Prüffrequenzen	1,59 Hz
Zeit der Temperierung zwischen den Prüfintervallen	15 min
Probendurchmesser	8 mm bzw. 25 mm
Spaltbreite	1 mm



4 Schwerpunkt: Rejuvenatoren

keit eines Rejuvenators bzw. der Unterscheidung zwischen Rejuvenator und Weichmacher wird durch das BLACK-Diagramm ermöglicht. Nach dem bisherigen Stand des Wissens können mithilfe dieser Diagrammform (vgl. Abbildung 5) folgende Aussagen visualisiert werden:

- Alterung von Bitumen führt zu einem Anstieg der Steifigkeit bzw. der Viskosität (Erhöhung des komplexen Schermoduls) und zu einer Abnahme der viskosen bzw. der Zunahme der elastischen Anteile im Bitumen (Verringerung des Phasenwinkels)
- Zugabe eines Weichmachers (fluxende Wirkung) führt zu einer Verringerung der Steifigkeit/Viskosität, die visko-elastischen Anteile des Bitumens werden dabei nur marginal bis gar nicht beeinflusst
- Zugabe eines Rejuvenators (verjüngende Wirkung) führt zu einer Verringerung der Steifigkeit / Viskosität bei gleichzeitiger Zunahme der viskosen Anteile (Erhöhung des Phasenwinkels)

Im BLACK-Diagramm zeigt sich somit bei einem rheologisch wirksamen Rejuvenator eine Verschiebung des Kurvenverlaufs wieder in Richtung der ursprünglichen Kurve des Ausgangsbitumens vor der Alterung. Ein Weichmacher kann hingegen keine Verschiebung des Kurvenverlaufs in Richtung der ursprünglichen Lage bewirken.

Die Abbildung 6 zeigt die Untersuchungsergebnisse mit der DSR-Analytik im BLACK-Diagramm.

Anhand des Diagramms lässt sich deutlich die Verschiebung des Kurvenverlaufs des RTFOT- und PAV-geal-

terten Straßenbaubitumens 50/70 nach der Zugabe des Additivs 2.0 in Richtung des ursprünglichen Verlaufs des frischen Basisbitumens erkennen.

Aus rheologischer Sicht liegt das verjüngte Bitumen auch nach dieser Betrachtungsweise mit dem kurzzeitgealterten 50/70 (nach RTFOT) auf einem vergleichbaren Niveau.

Das Kälteverhalten eines Bitumens ist gerade im Umgang mit gealterten Bitumen von entscheidender Bedeutung. Aus den Untersuchungen mit dem Bending-Beam-Rheometer konnte bei einem Grenzwert für die Biegesteifigkeit von 300 MPa und für den m-Wert von 0,3 auch hier gezeigt werden, dass die Verjüngung des gealterten Bitumens zu einer deutlichen Verbesserung der Kälteeigenschaften geführt hat.

Auszugsweise sind in Abbildung 7 die Ergebnisse der Kälteuntersuchungen (hier: Biegesteifigkeit) dargestellt. Hieran lässt sich deutlich erkennen, dass die Biegesteifigkeit nach der Verjüngung für das Tieftemperaturverhalten sogar günstiger liegt als die des frischen Basisbitumens. Erst nach der Kurz- und Langzeitalterung steigt die Steifigkeit auf das Niveau des Frischbitumens an. Bezüglich der Relaxationsfähigkeit des Bitumens (m-Wert) ist die Wirkung im Vergleich zur Biegesteifigkeit nicht ganz so stark ausgeprägt – hier konnte aber ebenfalls nach der Verjüngung das Niveau des RTFOT-gealterten Bitumens erreicht werden.

Neben den reinen Bitumenuntersuchungen ist die Wechselwirkung mit verschiedenen Mineralstoffen für

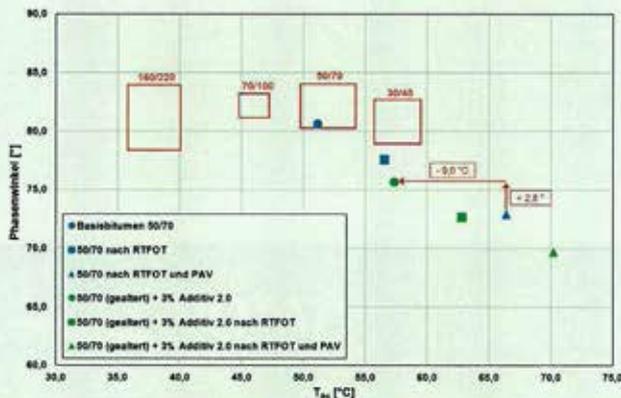


Abbildung 4: Phasenwinkel in Abhängigkeit von äquivalenter Temperatur $T_{Äq}$

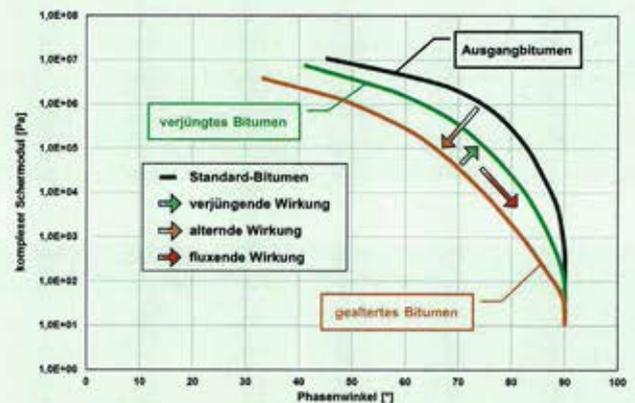


Abbildung 5: Beispielhafte Darstellung von Bitumenalterung und -verjüngung im BLACK-Diagramm

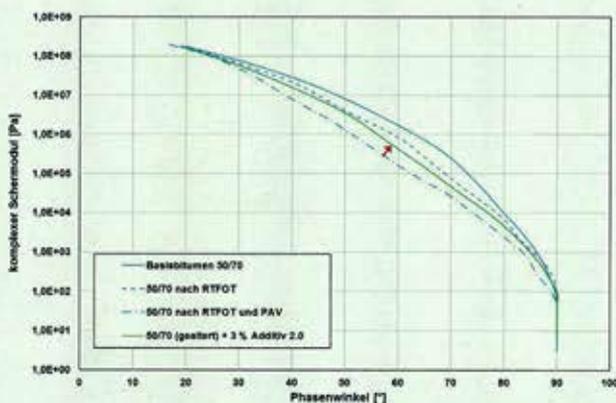


Abbildung 6: BLACK-Diagramm zum Nachweis der rheologisch wirksamen Verjüngung

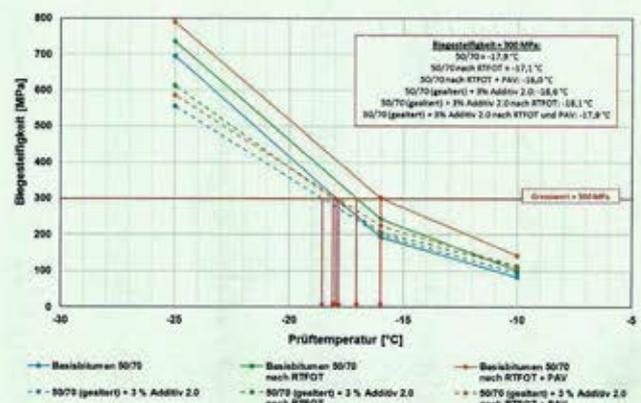


Abbildung 7: Ergebnisse Biegesteifigkeiten im BBR

5 Schwerpunkt: Rejuvenatoren

die Bewertung eines Rejuvenators ebenfalls von besonderer Bedeutung.

Mit den Rolling-Bottle-Versuchen konnte gezeigt werden, dass die Affinität des Bindemittels zum Gestein nach der Zugabe des Additivs bzw. auch nach weiterer Alterung durch RTFOT und PAV nach jeweils 6 h, 24 h und 72 h auf einem gemeinsamen Niveau liegen. Ein negativer Einfluss auf die Adhäsionseigenschaften konnte an dieser Stelle ausgeschlossen werden.

Die Abbildung 8 veranschaulicht die Untersuchungsergebnisse des durchgeführten Delta-Ring- und -Kugel-Verfahrens. Im Rahmen der Untersuchungen wurde das gealterte 50/70 (nach RTFOT+PAV) und das verjüngte Bitumen sowohl mit Kalksteinmehl als auch mit Diabasmehl gemischt und geprüft.

Als Indikator für eventuelle Wechselwirkungen mit den beiden Füllern wurde die Zunahme des Erweichungspunkts Ring und Kugel im unmittelbaren Vergleich zwischen jeweils den Varianten „gealtertes Bitumen und gealtertes Bitumen + Füller“ und „verjüngtes Bitumen und verjüngtes Bitumen + Füller“ herangezogen. Falls eine Wechselwirkung bzw. ein Einfluss auf die Wirksamkeit vorliegt, müsste bei Zugabe eines Füllers die Versteifung signifikant bis auf das Niveau des gealterten Bitumens ansteigen.

Aus den gewonnenen Ergebnissen (Abb. 8) lässt sich somit ableiten, dass die verjüngende Wirkung nach dem bisherigen Erkenntnisstand des Additivs 2.0 durch die mineralischen Komponenten nicht beeinflusst wird.

Fazit

Anhand des hier vorgestellten Versuchsprogramms konnte deutlich gezeigt werden, dass labortechnisch grundsätzlich die Möglichkeit besteht, Rejuvenatoren hinsichtlich ihrer Wirkungsweise adäquat zu beschreiben. Hierfür sollten neben den klassischen und vertragsrechtlich immer noch bedeutsamen physikalischen Parametern (z. B. RuK, NP) vorrangig aber auch entsprechende rheologische Untersuchungen erfolgen. Nach den bisherigen Erkenntnissen bieten in diesem Zusammenhang gerade rheologische Untersuchungen (z. B. mit dem DSR) die Möglichkeit, unterschiedliche Produkte nach einer rein plastifizierenden/erweichenden Wirkung oder einer rheologisch wirksamen Verjüngung einzuordnen.

Am Beispiel der Untersuchungen des Additivs 1.0 konnte grundsätzlich hergeleitet werden, dass nicht nur alleine die Betrachtungen der Wirkung eines Rejuvenators im Bitumen zielführend sind, sondern vielmehr auch eventuelle Wechselwirkungen mit den mineralischen Komponenten eines Asphalts zwingend in die Betrachtungen miteinbezogen werden müssen.

Ebenso spielt im Hinblick auf die Nachhaltigkeit eines verjüngten Asphalts auch das Alterungsverhalten nach der Verjüngung eine entscheidende Rolle. An dieser Stelle müssen beschleunigte Alterungsprozesse grundsätzlich während der Liegezeit/Nutzungsdauer ausgeschlossen werden können.

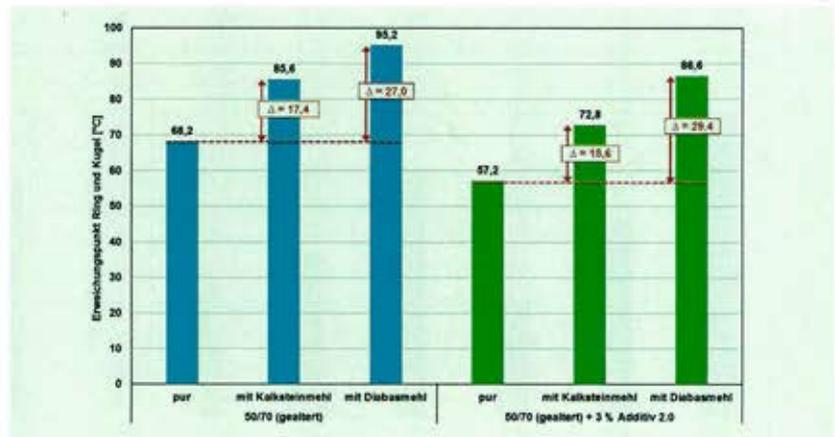


Abbildung 8: Untersuchungsergebnisse versteifender Einfluss von Füller

Zusammenfassend können aus den durchgeführten Untersuchungen folgende Schlüsse für rheologisch wirksame Rejuvenatoren gezogen werden:

- Ein Rejuvenator muss sowohl die physikalischen als auch die rheologischen Eigenschaften eines Bitumens wiederherstellen können.
- Eine wiederholte Alterung sollte zu keiner beschleunigten Alterung führen.
- Der Einsatz eines Rejuvenators sollte zu keinen negativen Wechselwirkungen zwischen Gestein und Bitumen führen.
- Die Wirkung eines Rejuvenators sollte durch die mineralische Komponente des Asphalts nicht negativ beeinflusst werden.

Ausblick

Aufgrund der durchwegs positiven Laborergebnisse des geprüften Rejuvenators („Additiv 2.0“) wurde dieser im Rahmen von zwei Erprobungstrecken in der Stadt Münster eingesetzt. Der zweite Teil dieser Veröffentlichung befasst sich in diesem Zusammenhang mit den labortechnischen Voruntersuchungen, der Herstellung des Asphaltmischguts im Asphaltmischwerk, dem Einbau des Asphalts und der durchgeführten Kontroll- und erweiterten Untersuchungen zur Validierung der vorangegangenen Laborergebnisse.

AUTOR

Dr.-Ing. Daniel Gogolin
Ingenieurgesellschaft PTM
Dortmund mbH
Frische Luft 155
44319 Dortmund-Wickede
www.ptm.net
daniel.gogolin@ptm.net

LITERATUR

- [1] Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz – KrWG) vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212)
- [2] Technische Lieferbedingungen für Asphaltgranulat, TL AG-StB, Ausgabe 2009, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Köln
- [3] Merkblatt für die Wiederverwendung von Asphalt, M WA, Ausgabe 2009, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Köln
- [4] SHEN, J.; AMIRKHANIAN, S.; MILLER, J.: Effects of Rejuvenating Agents on Superpave Mixtures Containing Reclaimed Asphalt Pavement. In: Journal of Materials in Civil Engineering (2007), S. 376–384
- [5] Deutscher Asphaltverband e.V., 2014. Wiederverwenden von Asphalt, Bonn.
- [6] EAPA Position Paper Rejuvenators – August 2018