

Einfluss von modifizierten Bitumen auf die Kälte- und Ermüdungseigenschaften von Asphalt und deren Veränderung während der Nutzungsdauer

FA 7.208

Forschungsstelle: Technische Universität Braunschweig, Institut für Straßenwesen (Prof. Dr.-Ing. habil. P. Renken)

Bearbeiter: Büchler, S. / Mollenhauer, K. / Renken, P.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Bonn

Abschluss: April 2007

- Nadelpenetration,
- Brechpunkt nach Fraaß,
- elastische Rückstellung,
- Kennwerte der Kraftduktilität-Analytik,
- Kennwerte der DSR-Analytik sowie
- Kennwerte der BBR-Analytik.

1 Aufgabenstellung

Das Gebrauchsverhalten und die Nutzungsdauer von Asphaltstraßen werden im Wesentlichen vom Verformungsverhalten bei Wärme, vom Ermüdungsverhalten und von den Kälteeigenschaften beeinflusst. Während der Einfluss von polymermodifizierten Bitumen auf die Verformungseigenschaften als weitgehend bekannt vorausgesetzt wird, wurden systematische Untersuchungen auf das Kälte- und Ermüdungsverhalten bislang nicht durchgeführt.

Ziel dieses Forschungsprojektes ist es, die Veränderung der Bitumeneigenschaften aufgrund der Alterung am Bitumenprodukt und im Asphalt systematisch zu erforschen und einen möglichen Zusammenhang mit den Kälte- und Ermüdungseigenschaften des Asphalttes während der Nutzungsdauer aufzudecken.

2 Untersuchungsmethodik

Zum Erreichen des Forschungsziels wurde eine Anzahl Bitumenarten/-sorten unterschiedlicher Provenienzen zur Herstellung eines Splittmastixasphalttes eingesetzt.

Zum einen wurden marktgängige Bindemittel unterschiedlichen Alterungsverfahren ausgesetzt und die konventionellen sowie die rheologischen Kenndaten (BBR-DSR-KD) erhoben. Zum anderen wurden die Asphaltte einer thermisch oxidativen Alterung unterworfen und Untersuchungen zum Kälte- und Ermüdungsverhalten durchgeführt. In einem letzten Schritt wurden korrelative Zusammenhänge zwischen den Bindemittelkenndaten und Asphaltkennwerten erforscht.

Für die umfangreichen Bitumenuntersuchungen wurden die folgenden Bitumenprodukte eingesetzt:

- PmB 25 A (2 Hersteller),
- PmB 45 A (5 Hersteller),
- PmB 65 A (2 Hersteller),
- PmB 40/100-65 H (2 Hersteller) und
- 50/70 (1 Hersteller).

An allen 11 Bitumenprodukten wurden in den Alterungsstufen

- frisch,
- nach Rolling Thin Film Oven Test (RTFOT-Alterung) und nach
- Pressure Aging Vessel (PAV-Alterung)

die folgenden Kennwerte festgestellt:

- Erweichungspunkt Ring und Kugel,

Nach Auswertung der Versuchsergebnisse wurden 7 Bitumenprodukte, nämlich PmB 25 A, PmB 45 A (3 Hersteller), PmB 65 A, PmB 40/100-65 H und 50/70 für die systematischen Untersuchungen mit dem Splittmastixasphalt ausgewählt.

3 Alterung des Asphalttes und Herstellung der Probekörper

Die Untersuchungen der ausgewählten mechanischen Asphalteeigenschaften erfolgten an frisch hergestelltem Asphalt und an thermisch oxidativ gealtertem Asphalt. Dazu wurde auf ein Alterungsverfahren zurückgegriffen – Braunschweiger Alterung (BSA) – welches in einem früheren Forschungsprojekt konzipiert und im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens weiter optimiert wurde. Ziel der Optimierung war es, in einem laborökonomischen Zeitraum einen Anstieg des Erweichungspunktes Ring und Kugel um 12 K bei einer möglichst geringen Prüftemperatur ($T = \leq 80 \text{ °C}$) zu erreichen. Die Optimierung führte schließlich zu einem Verfahren, mit welchem es gelingt, eine praxisnahe thermisch oxidative Alterung der Asphaltbefestigung während der Nutzungsdauer der Straße zu simulieren. Mit den im Rahmen der Bindemittelvoruntersuchungen ausgewählten 7 Bindemitteln wurden Splittmastixasphalte 0/8 S bei sonst gleicher Zusammensetzung wiederholt hergestellt. Aus einer Teilprobe wurden jeweils unmittelbar Asphalt-Probekörper hergestellt, eine andere Teilprobe wurde mit der BSA im Laboratorium gealtert und sodann aus dieser Asphalt-Probekörper hergestellt. In allen Fällen wurde die Verdichtungsarbeit bei der Herstellung der walzsektorverdichteten Asphalt-Probekörper derart verändert, dass alle für die Prüfung vorgesehenen Asphalt-Probekörper vergleichbare Hohlraumgehalte aufwiesen.

Für die Untersuchungen zum Kälte- und Ermüdungsverhalten standen somit jeweils 14 Variationen eines Splittmastixasphalttes 0/8 S zur Verfügung, nämlich SMA mit jeweils 7 unterschiedlichen Bindemitteln; zum einen "frisch", zum anderen "gealtert".

4 Kälteverhalten und Zusammenhänge mit Bitumenkennwerten

4.1 Untersuchungen zum Kälteverhalten

Für die Untersuchungen zum Kälteverhalten wurden Abkühl- und Zugversuche bei den Prüftemperaturen von -25 °C , -10 °C , $+5 \text{ °C}$ und $+20 \text{ °C}$ nach der Technischen Prüfvorschrift der FGSV "Verhalten von Asphaltten bei tiefen Temperaturen" durchgeführt. Aus den Ergebnissen der beiden Versuchstypen lässt sich die Zugfestigkeitsreserve als Differenz aus der temperaturabhängigen Zugfestigkeit und der im Abkühlversuch ermittelten kryogenen Spannung berechnen. Sie stellt einen charakteristischen Wert zur Beurteilung des Kälteverhaltens dar.

Der Einfluss der Alterung auf das Kälteverhalten kann für alle SMA 0/8 S-Varianten Bild 1 entnommen werden.

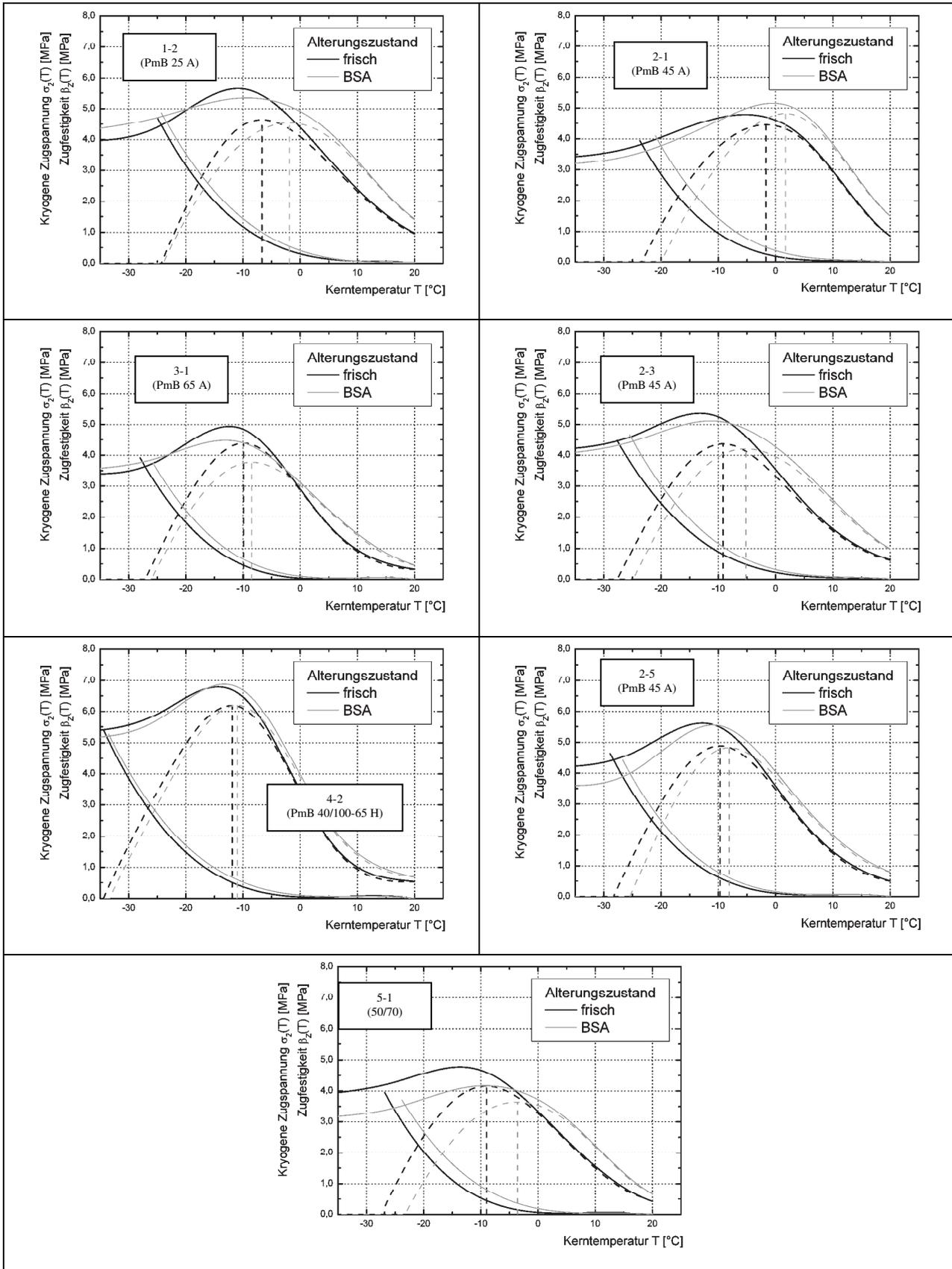


Bild 1: Kälteverhalten der untersuchten SMA 0/8 S vor und nach der Braunschweiger Alterung (BSA)

Bild 1 zeigt, dass die Kurvenverläufe der Abkühl- und Zugversuche und damit auch die der Zugfestigkeitsreserve (gestrichelt dargestellt) allein in Abhängigkeit vom eingesetzten Bitumen nach Art, Sorte und Hersteller in einen höheren Temperaturbereich von 1,0 bis 5,5 K verschoben werden und damit ein ungünstigeres Kälteverhalten charakterisieren.

Die geringste Veränderung wird bei Verwendung von hochpolymermodifizierten Bitumen PmB 40/100-65 H des hier eingesetzten Herstellers festgestellt. Dieses Bindemittelprodukt weist im Vergleich zu den anderen Bindemittelprodukten die geringste Alterungsanfälligkeit auf: Das untersuchte Produkt zeichnet sich durch vergleichsweise hohe Zugfestigkeiten, niedrige kryogene Spannungen im Abkühlversuch und daraus resultierend vergleichsweise hohe Zugfestigkeiten im tiefen Temperaturbereich aus.

Bei einem Vergleich der "normalen" polymermodifizierten Bindemittel PmB 65 A, PmB 45 A und PmB 25 A wurde aber grundsätzlich festgestellt, dass die niedrig viskosen PmB-Sorten ein besseres Kälteverhalten aufweisen als die "harten" PmB. Dies gilt für die maximale Zugfestigkeitsreserve und für die Temperatur der maximalen Zugfestigkeitsreserve.

Auffällig ist die große Spannweite im Kälteverhalten der drei SMA mit unterschiedlichen PmB 45 A-Produkten. So weist Variante 2-1 das ungünstigste Kälteverhalten der PmB 45 A

auf. Die ermittelten Kennwerte weisen ihn als "härter" als das geprüfte PmB 25 A (1-2) aus. Weiterhin weisen die an Variante 2-5 ermittelten Ergebnisse auf eine geringe Asphaltviskosität hin, wodurch dieser SMA mit PmB 45 A ein günstigeres Kälteverhalten aufweist als die SMA-Variante mit PmB 65 A (3-1). Die Spannweite der Ergebnisse lässt darauf schließen, dass die Wahl eines PmB-Produktes trotz gleicher Sortenbezeichnung zu großen Veränderungen des Materialverhaltens führen kann.

4.2 Zusammenhänge mit Bitumenkennwerten

Zur Aufdeckung möglicher Zusammenhänge zwischen den wichtigsten Bitumenkennwerten wie Erweichungspunkt Ring und Kugel, Penetration und Brechpunkt nach Fraaß sowie Kennwerten der DSR-, BBR- und KD-Analytik einerseits und Kennwerten aus den Abkühlversuchen und den bei verschiedenen Temperaturen durchgeführten Zugversuchen werden multiple lineare Regressionsanalysen durchgeführt, in welchen gleichzeitig die unterschiedlichen Alterungszustände des Bitumens, aber auch des Asphaltes, berücksichtigt wurden. Die stärksten Zusammenhänge, ausgedrückt mit Bestimmtheitsmaßen von bis zu 94 %, sind in der Tabelle 1 eingetragen.

Tabelle 1: Signifikante funktionale Abhängigkeiten der Ergebnisse zum Kälteverhalten von den Bitumenkennwerten

Zielgröße = a₀ + a₁ · Einflussgröße1 + a₂ · Einflussgröße2				
Zielgröße	Parameter a₀	Einflussgröße 1 Parameter a₁	Einflussgröße 2 Parameter a₂	Bestimmtheitsmaß
kryogene Spannung bei T = -20 °C	-4,0736	Brechpunkt nach Fraaß 0,9701	-	87,8 %
	-78,3156	BBR, Steifigkeit S 118,9408	-	88,1 %
	-29,8513	BBR, T (S=300 MPa) 4,3604	-	88,4 %
	-0,8009	DSR, G* (T=60 °C) 3,3336 · 10 ⁻⁵	DSR, δ (T=60 °C) 0,0357	88,6 %
Zugfestigkeit, T = +20 °C	0,3346	Erweichungspunkt RuK 0,0161	Brechpunkt n. Fraaß 0,0617	93,5 %
Zugfestigkeit, T = +20 °C	-16260,05	DSR, G* (T=60 °C) 57537,61	-	94,1 %
Zugfestigkeit, T = +5 °C	5,0645	Erweichungspunkt RuK 0,0021	Brechpunkt n. Fraaß 0,2105	93,9 %
Zugfestigkeit, T = -10 °C	-2,2181	Erweichungspunkt RuK 0,0862	Brechpunkt n. Fraaß -0,1500	72,0 %
Zugfestigkeit, T = -25 °C	-3,4130	Erweichungspunkt RuK 0,0936	Brechpunkt n. Fraaß -0,1609	82,9 %
Temperatur der maximalen Zugfestigkeitsreserve	-4,0736	Brechpunkt n. Fraaß 0,9701	-	87,8 %

Zunächst hat sich gezeigt, dass die kryogene Spannung bei $T = -20\text{ °C}$ mit mehreren Bitumenkennwerten sehr gut korreliert; ähnlich mit dem Brechpunkt nach $F r a a \beta$ und mit jeweils zwei Kennwerten aus der BBR- und der DSR-Analytik.

Der stärkste Zusammenhang wird zwischen der Zugfestigkeit bei $T = +20\text{ °C}$ und dem komplexen Schermodul G^* ($T = 60\text{ °C}$) festgestellt, aber auch die konventionellen Bitumenkennwerte Erweichungspunkt Ring und Kugel und Brechpunkt nach $F r a a \beta$ sind sehr gut geeignet, die Veränderung der Asphalteeigenschaften aufgrund einer Alterung zu prognostizieren. Der gute Zusammenhang mit dem Brechpunkt nach $F r a a \beta$ hängt allerdings auch damit zusammen, dass zur Gewinnung präziser Ergebnisse der Versuch vielfach wiederholt wurde. Andererseits berichteten bereits andere Autoren in früheren Arbeiten über gute Abhängigkeiten zwischen der mittels BBR festgestellten Steifigkeit und dem Brechpunkt nach $F r a a \beta$.

Qualitativ hohe Zusammenhänge zwischen Kennwerten der KD-Analytik, Penetrationswerten sowie der Elastischen Rückstellung und den Kälteeigenschaften des Asphaltes konnten nur in Teilbereichen aufgedeckt werden.

5 Ermüdungsverhalten und Zusammenhänge mit Bitumenkennwerten

5.1 Untersuchungen mittels Zugschwellversuchen

Die Untersuchungen zum Ermüdungsverhalten wurden mittels Zugschwellversuchen bei Anlegen der in den Abkühlversuchen ermittelten kryogenen Zugspannung als Unterlage bei drei Prüftemperaturen durchgeführt. Ergebnis der Versuche sind die Anzahl der ertragbaren Lastimpulse bis zum Bruch des Probekörpers, der Elastizitätsmodul und der Makroriss nach $R o w e$. In Bild 2 sind am Beispiel eines PmB 65 A links der Elastizitätsmodul und rechts die energy ratio nach $R o w e$ über die Versuchsdauer dargestellt.

Bild 3 zeigt die Untersuchungsergebnisse für die Anzahl der ertragbaren Lastimpulse für alle Splittmastixasphalte zum einen "frisch", zum anderen BSA-gealtert.

Bild 3 ist zunächst zu entnehmen, dass die Anzahl der ertragbaren Lastwechsel von der Prüftemperatur abhängig ist und meist im Bereich von $T = -10\text{ °C}$ ein Maximum durchläuft. Weiterhin begünstigt im höheren Temperaturbereich bei $+5\text{ °C}$ (teilweise auch bei -10 °C) die Alterung des Asphaltes scheinbar die Ermüdungseigenschaften. Im tiefen Temperaturbereich bei -20 °C werden diese ungünstig beeinflusst.

Im Vergleich weist der Splittmastixasphalt mit dem höher modifizierten Bitumen der Sorte PmB 40/100-65 H im tiefen Temperaturbereich unabhängig vom Alterungszustand ein deutlich besseres Ermüdungsverhalten auf. Summarisch betrachtet sind bei Temperaturen im Bereich von $+5\text{ °C}$ die steifen Asphalte von Vorteil, während bei den tieferen Temperaturen im Bereich von -20 °C die "weichen" polymermodifizierten Bindemittel Vorteile zeigen.

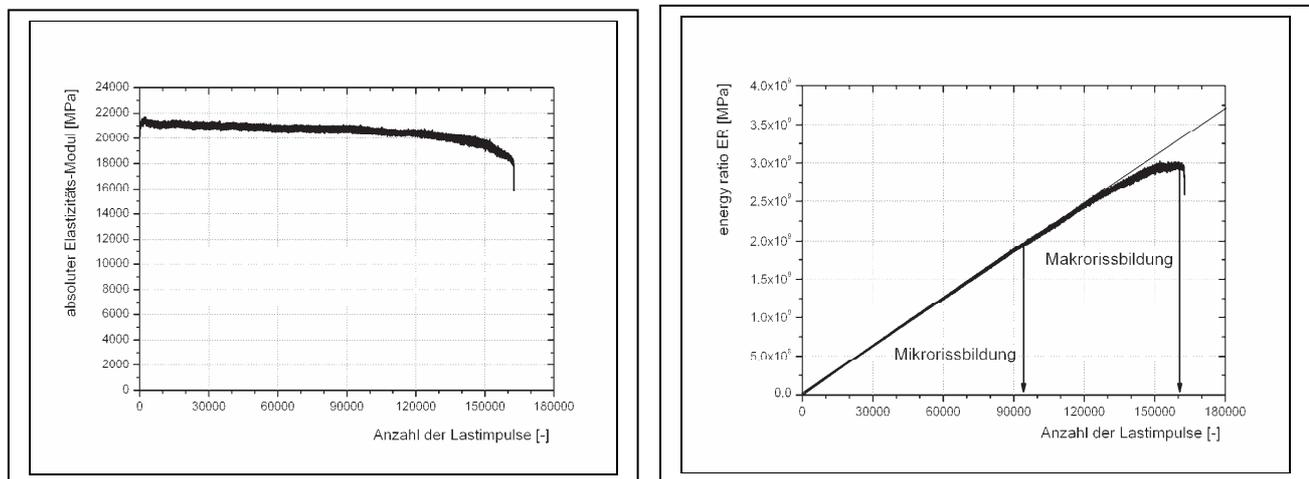


Bild 2: Elastizitätsmodul (links) und energy ratio (rechts) über die Versuchsdauer am Beispiel eines SMA 0/8 S mit PmB 65 A beim Zugschwellversuch

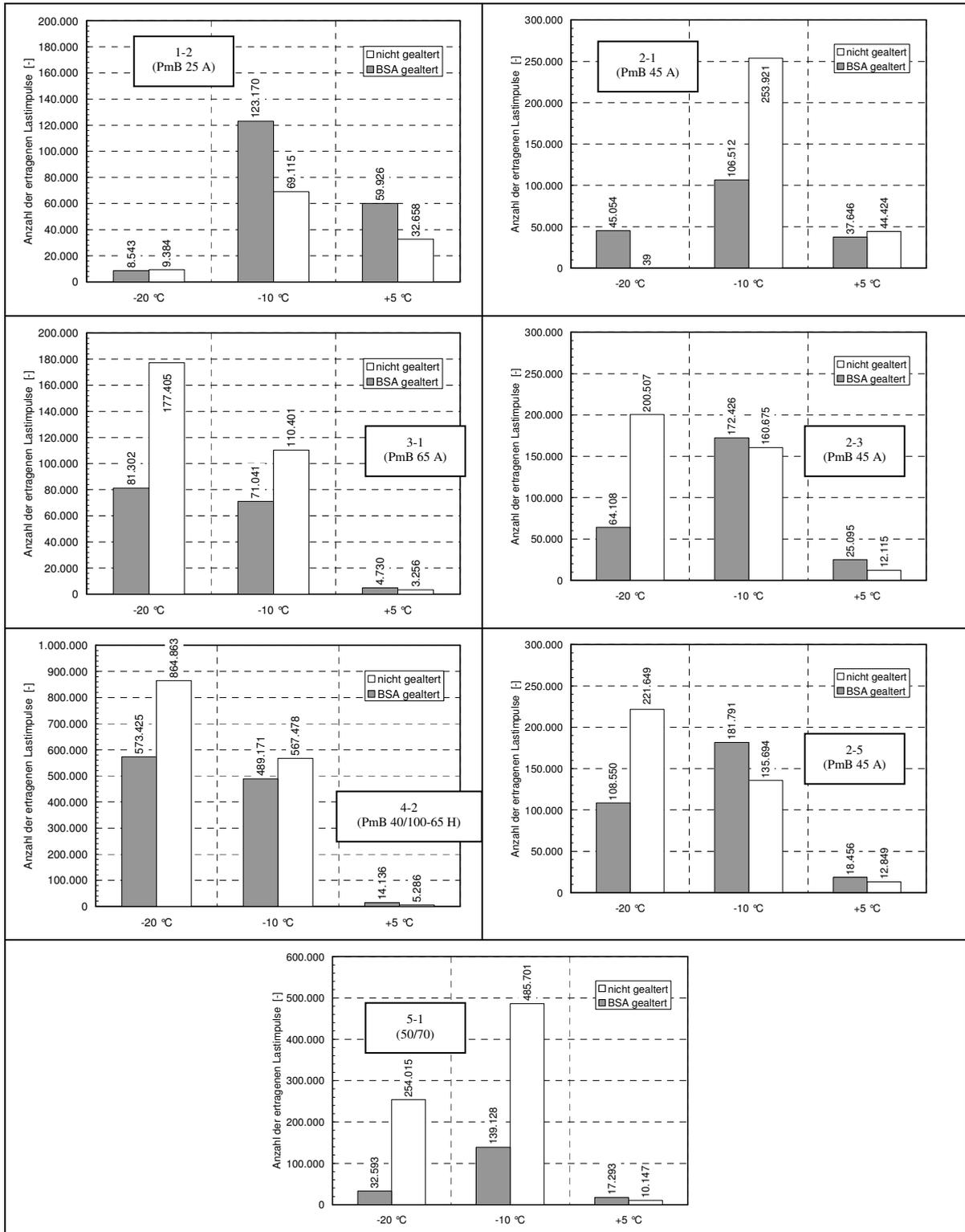


Bild 3: Ergebnisse der Zugschwellversuche an ungealterten und BSA-gealterten Splittmastixasphalten mit unterschiedlichen Bindemitteln

5.2 Untersuchungen mittels 4-Punkt-Biegeversuchen

Während der Bearbeitung des Forschungsprojektes wurde die Europäische Norm EN 12697-24 veröffentlicht, nach der die Ermüdungseigenschaften von Asphalt auch mittels 4-Punkt-Biegeversuchen zu bestimmen sind. Aus diesem Grunde wurden zusätzlich an vier Splittmastixasphaltvariationen im "frischen" Zustand im Sinne von orientierenden Untersuchungen Ermüdungsversuche nach der Europäischen Norm durchgeführt.

Für diese Versuche wurde ein am Institut für Straßenwesen konstruierter und am Institut für Stahlbau der Technischen Universität Braunschweig gemäß EN 12697-24 gefertigter Prüfrahmen verwendet.

Durchgeführt wurden weggeregelte Wechselbiegeversuche bei $T = +20\text{ °C}$ mit 10 Hz. Das Ergebnis der 4-Punkt-Biegeversuche stellt der Abfall des Elastizitätsmoduls auf 50 % vom Startwert dar. In Abhängigkeit von der vorgegebenen Dehnungsamplitude kann eine sogenannte Ermüdungskurve erstellt werden, anhand derer die Dehnungsamplitude abgelesen wird, bei der eine Million Lastwechsel einen 50%igen Abfall des Elastizitätsmoduls erzeugen. Für die vier untersuchten Splittmastixasphalte ist dies in Bild 4 dargestellt.

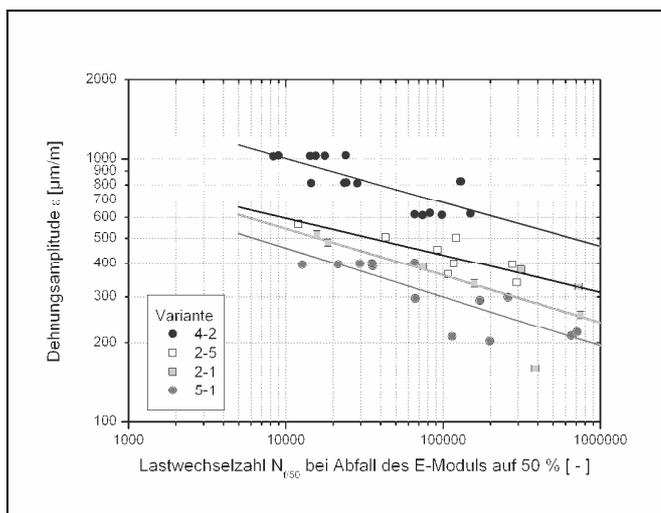


Bild 4: Regressionen über die Dehnungsamplituden in Abhängigkeit der Lastwechselzahl $N_{f/50}$ (Ermüdungskurven) der 4-Punkt-Biegeversuche an vier Splittmastixvarianten bei $T = +20\text{ °C}$ und 10 Hz

Bild 4 ist zu entnehmen, dass die Variante mit dem PmB 40/100-65 H die höchste Dehnungsamplitude ertragen kann, während Variante 5-1 mit 50/70 die geringste Amplitude erträgt. Die Variante 2-1, als SMA mit niedriger viskos eingestuftem PmB 45 A, zeigt eine geringere Dehnungsamplitude als Variante 2-5 mit höher viskosen PmB 45 A. Anhand dieser Ergebnisse kann abgelesen werden, dass mit zunehmender Viskosität des Bitumens die Dehnungsamplitude zum Erreichen des 50%igen Abfalls des Elastizitätsmoduls sinkt. Steife Asphalte erweisen sich hiernach als ermüdungsanfälliger.

5.3 Zusammenhänge der Ermüdungseigenschaften mit Bitumenkennwerten

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass nur in begrenztem Umfang von Bitumenkennwerten auf Ermüdungseigenschaften des Asphaltes geschlossen werden kann. Einzig bei der Prüftemperatur von $T = +5\text{ °C}$ konnten einige Zusammenhänge nachgewiesen werden und dann meistens nur getrennt für einen Alterungszustand, nämlich entweder 1 (frisch) oder 2

(BSA-gealtert) für den Zusammenhang zwischen der Anzahl der ertragbaren Lastimpulse und der maximalen Kraft des Kraftduktilitätsversuches beziehungsweise mit dem komplexen Schermodul G^* aus dem DSR-Versuch. Werden beide Alterungsstufen zusammen betrachtet, fällt der Zusammenhang auf Bestimmtheitsmaße von nur 63 % beziehungsweise 69 % zurück.

Des Weiteren sind Zusammenhänge zwischen der Anzahl der Lastimpulszahl bei

$+5\text{ °C}$ sowie des Elastizitätsmoduls bei $+5\text{ °C}$ mit dem Brechpunkt nach $F r a a \beta$

vorhanden.

Als eng sind die geschilderten Zusammenhänge nicht zu bezeichnen. Offensichtlich sind die geprüften Bitumeneigenschaften mit den Ermüdungseigenschaften des Asphaltes über eine dritte, höchstwahrscheinlich asphalttechnologische beziehungsweise gesteinspezifische Größe verknüpft, die bisher unbekannt geblieben ist.

Aus den Ergebnissen der 4-Punkt-Biegeversuche wurden ebenfalls Korrelationsanalysen durchgeführt, die aber in der Aussage sehr eingeschränkt sind, da lediglich vier Splittmastixasphaltvarianten im "frischen" Zustand geprüft wurden. Es fehlt also insbesondere die Alterungsstufe BSA. Dennoch können einige Tendenzen mitgeteilt werden. So korrelieren die Dehnungsamplituden mit dem Phasenwinkel des DSR-Versuches und der E-Modul mit der Nadelpenetration, dem Brechpunkt nach $F r a a \beta$ und Kenndaten des BBR-Versuches.

6 Zusammenfassung

10 polymermodifizierte Bitumen und ein Straßenbaubitumen unterschiedlicher Art, Sorte und Hersteller wurden im frischen sowie kurzzeit- und langzeitgealterten Zustand konventionellen und rheologischen Prüfverfahren unterzogen. Anhand der Ergebnisse wurden sechs PmB sowie ein Straßenbaubitumen 50/70 zur Herstellung von SMA 0/8 S – bei gleicher Zusammensetzung – ausgesucht.

Des Weiteren wurde zur Simulierung der Nutzungsdauer ein Alterungsverfahren an Asphalt entwickelt und optimiert. Resultat ist die Braunschweiger Alterung (BSA).

An "frischen" und gealterten Asphalten wurden zur Beurteilung des Kälteverhaltens Zug- und Abkühlversuche durchgeführt. Im Rahmen der untersuchten PmB zeigte das PmB 40/100-65 H das günstigste Kälteverhalten. Die aufgrund der hohen Viskosität des Bitumens steifsten SMA-Varianten wiesen das ungünstigste Kälteverhalten auf. Die Alterung und damit die Nutzungsdauer bewirkt generell eine Verschiebung der Kurvenverläufe der Zug- und Abkühlversuche in einen positiveren Temperaturbereich, womit ein ungünstiges Kälteverhalten durch den Alterungsangriff ausgedrückt wird. Dabei erweist sich das höher modifizierte Bitumen als am geringsten alterungsanfällig, während dem Straßenbaubitumen die größte Alterungsempfindlichkeit mit den größten Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften zugewiesen wird.

Bei der Ermittlung funktionaler Zusammenhänge zwischen Bitumenkennwerten und den Ergebnissen der Kälteversuche hat sich gezeigt, dass die kryogenen Spannungen sich z. B. mit den Ergebnissen des BBR-Versuches abschätzen lassen, während die Zugfestigkeiten mit dem Erweichungspunkt RuK in Kombination mit dem Brechpunkt nach $F r a a \beta$ eine gute Korrelation aufwiesen.

Zur Beurteilung des Ermüdungsverhaltens wurden zunächst einaxiale Zugschwellversuche bei drei Temperaturen durchgeführt. Im Temperaturbereich über dem Gefrierpunkt und

teilweise auch bis circa -10 °C erweisen sich die steiferen Asphalte als günstig. Im Tieftemperaturbereich unterhalb circa -10 °C zeigen die weicheren Asphalte Vorteile. Dies wird auch durch die Braunschweiger Alterung (BSA) bestätigt, bei der die Versprödung des Bitumens zu steiferen Asphalten führt. Die Ergebnisse der Zugschwellversuche lassen sich nur bedingt mit der maximalen Kraft der Kraftduktilität und dem komplexen Schermodul G^* des DSR abschätzen.

In einem weiteren Schritt wurden Ermüdungsversuche mit dem 4-Punkt-Biegeversuch mit einem reduzierten Versuchsprogramm durchgeführt. Die Ergebnisse weisen steiferen Asphaltvarianten Nachteile im Ermüdungsverhalten zu. Die Variante mit dem höher modifizierten Bitumen zeigt insgesamt das günstigste Ermüdungsverhalten. Korrelation mit den Bitumenkennwerten und den Ergebnissen der Zugschwellversuche können in der Tendenz als plausibel angesehen werden.

Resultierend zeigt sich, dass die polymermodifizierten Bitumen auch hinsichtlich der Asphaltalterung einen großen Einfluss auf

die Ergebnisse der Versuche zum Kälteverhalten beziehungsweise Ermüdungsverhalten ausüben. Aufgrund der großen Spannweite der Eigenschaften unterschiedlicher Bitumen-Produkte derselben Sorte ist es von großer Wichtigkeit, die jeweiligen Produkteigenschaften bei der Wahl polymermodifizierten Bitumens zu berücksichtigen. Die Prognostizierung der Kälte- und Ermüdungseigenschaften von Asphalt in "frischem" und gealtertem Zustand anhand von konventionellen oder rheologischen Bitumeneigenschaften gelingt nur unvollständig.

Tabelle 3: Signifikante funktionale Abhängigkeiten von Ergebnissen der Zugschwellversuche von den Bitumenkennwerten

Zielgröße = $a_0 + a_1 \cdot \text{Einflussgröße 1}$				
Zielgröße	Alterungs-Kombination	Parameter a_0	Einflussgröße 1 Parameter a_1	Bestimmtheitsmaß
Anzahl der ertragbaren Lastimpulse, $T = +5 \text{ °C}$	1	1,736	KD, maximale Kraft $2,1998 \cdot 10^{-4}$	83,9 %
	2	3,5438	KD, maximale Kraft $4,8958 \cdot 10^{-4}$	77,2 %
	1 + 2	1,4684	KD, maximale Kraft $4,3535 \cdot 10^{-4}$	63,8 %
	1	6634,0437	DSR, G^* ($T=60 \text{ °C}$) 0,6103	73,6 %
	2	9276,7385	DSR, G^* ($T=60 \text{ °C}$) 1,1727	81,6 %
	1 + 2	5698,3329	DSR, G^* ($T=60 \text{ °C}$) 1,0509	69,9 %
	1 + 2	-15,3173	Brechpunkt nach Fraaß $2,1993 \cdot 10^{-4}$	77,7 %
Elastizitäts-Modul, $T = +5 \text{ °C}$	1 + 2	-32,342	Brechpunkt nach Fraaß 0,0019	68,0 %