

## Weiterentwicklung der Prüfung des Kälteverhaltens von Straßenbaubitumen und PmB mit dem Bending-Beam-Rheometer (BBR)

FA 7.211

Forschungsstelle: Technische Universität München,  
Centrum Baustoffe und Materialprüfung  
(Prof. Dr.-Ing. P. Schießl)

Bearbeiter: Wörner, T. / Stütz, M. /  
Wallner, B.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Bau und  
Stadtentwicklung, Bonn

Abschluss: Juni 2008

### 1 Aufgabenstellung

Um das Kälteverhalten von Bitumen und Polymermodifiziertem Bitumen (PmB) besser als mit dem Brechpunkt nach Fraaß beurteilen zu können, wurden national und international verschiedene Prüfverfahren entwickelt, die sich durch die Art der Belastung unterscheiden. Als Beispiel für die höhere Aussagekraft dieser Prüfverfahren sei das Zug-Retardationsverfahren genannt, mit dem deutliche Unterschiede im Kälteverhalten von Bitumen und PmB nachgewiesen werden konnten, auch innerhalb gleicher Penetrationsklassen. Auf europäischer Ebene hat sich das aus dem amerikanischen SHRP-Programm hervorgegangene Bending-Beam-Rheometer (BBR) durchgesetzt.

Mittlerweile liegt eine europäische Norm für die Prüfung mit dem BBR vor. Die Prüfbedingungen und die Auswertungs-

systematik wurden unverändert aus der amerikanischen Norm übernommen, obwohl sich das europäische Prüfkonzept grundlegend vom amerikanischen unterscheidet, da es feste Prüfbedingungen vorschreibt, während das amerikanische System auf festen Anforderungswerten bei unterschiedlichen Prüfbedingungen beruht (performance-grades).

Die festen Prüfbedingungen der europäischen Norm lassen jedoch keine umfassende Beurteilung der Bindemittel zu, da durch die Randbedingungen weitere Eigenschaften der Bindemittel unterdrückt werden. Daher sollte das Prüfverfahren mit dem BBR zur Untersuchung des Kälteverhaltens von Straßenbaubitumen und PmB so modifiziert werden, dass eine wesentlich bessere Beurteilung der Bindemittel möglich wird.

### 2 Untersuchungsmethodik

Die Versuchsdurchführung erfolgte sowohl nach DIN EN 14771 (TL PmB) bei einer Temperatur von  $-16\text{ °C}$  und einer Belastung von  $(980\pm 50)\text{ mN}$  als auch zusätzlich bei  $-12\text{ °C}$ ,  $-20\text{ °C}$  und  $-24\text{ °C}$  sowie bei  $780\text{ mN}$  und  $1\,230\text{ mN}$ . Es wurden 19 Bindemittel aus vier Werken untersucht. Als Ergebnis sind gemäß DIN EN 14771 die Werte für Steifigkeit und m-Wert bei  $8,0\text{ s}$ ,  $15,0\text{ s}$ ,  $30,0\text{ s}$ ,  **$60,0\text{ s}$** ,  $120,0\text{ s}$  und  $240,0\text{ s}$  anzugeben.

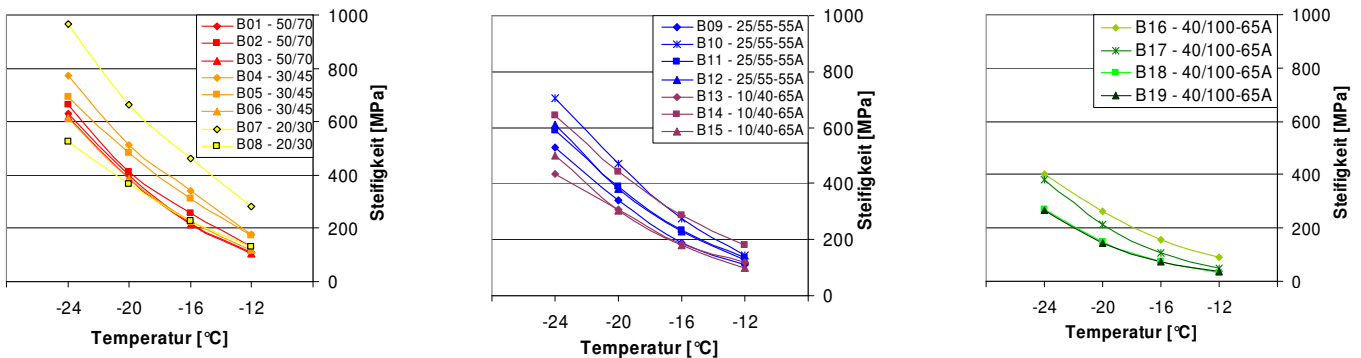


Bild 1: Steifigkeit: Straßenbaubitumen (links), Polymermodifizierte Bitumen (Mitte), höher Polymermodifizierte Bitumen (rechts)

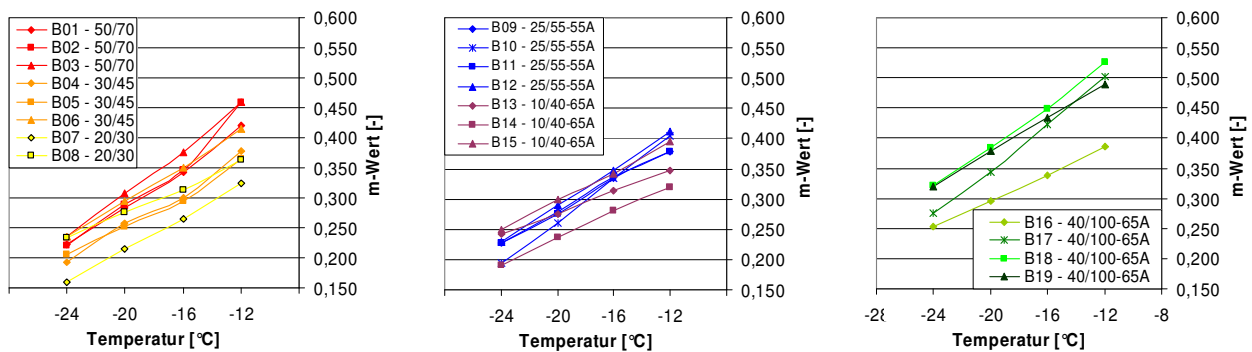


Bild 2: m-Wert: Straßenbaubitumen (links), Polymermodifizierte Bitumen (Mitte), höher Polymermodifizierte Bitumen (rechts)

### 3 Untersuchungsergebnisse

In **Bild 1** ist die Steifigkeit für vier Prüftemperaturen eingetragen, jeder Punkt ist der Mittelwert aus den drei Belastungen (780 mN, 980 mN und 1 230 mN), die Ablesung erfolgte nach 60 s. Die Steifigkeiten der verschiedenen Bitumensorten sind getrennt dargestellt. Im direkten Vergleich der unterschiedlichen Bindemittel besitzt das Straßenbaubitumen 20/30 B07 die höchste Steifigkeit. Die übrigen Straßenbaubitumen und die Polymermodifizierten Bitumen überlagern sich, während die höher Polymermodifizierten Bitumen die geringsten Steifigkeiten aufweisen. Die Straßenbaubitumen zeigen eine steilere Kurve als die Polymermodifizierten Bitumen und eine ähnliche Steigung auf. Straßenbaubitumen besitzen – mit Ausnahme des B20/30 mit der geringen Steifigkeit – mit zunehmender Härte größere Steifigkeiten. Bei den Polymermodifizierten Bitumen haben die höher Polymermodifizierten Bindemittel die geringsten Steifigkeiten. Die Polymermodifizierten Bitumen und die höher Polymermodifizierten Bitumen besitzen bei -12 °C jeweils etwa gleiche Steifigkeiten und spreizen sich bis -24 °C weiter auf. Daher können bei tieferen Temperaturen die Bindemittel durch die weitere Spreizung besser differenziert werden. Eine Abhängigkeit von der Belastung ist nicht gegeben. Die erhaltenen Kurven lassen sich gut exponentiell beschreiben. Das Bestimmtheitsmaß der Korrelation liegt bei  $r^2=0,98$  bis  $r^2=0,99$ .

In **Bild 2** ist der m-Wert für vier Prüftemperaturen eingetragen, jeder Punkt ist der Mittelwert aus den drei Belastungen (780 mN, 980 mN und 1 230 mN), die Ablesung erfolgte nach 60 s. Die m-Werte der verschiedenen Bitumensorten sind getrennt dargestellt. Die Steigungen der Straßenbaubitumen sind annähernd gleich, ebenso bei den Polymermodifizierten Bitumen, obwohl hier auch Kreuzungen der m-Wert-Geraden auftreten. Die m-Werte bleiben auch bei veränderter Prüftemperatur im Verhältnis zueinander überwiegend gleich. Die höchsten m-Werte haben die 40/100-65, welche auch die geringsten Steifigkeiten aufweisen. Die meisten Straßenbaubitumen sowie die Polymermodifizierten Bitumen befinden sich im mittleren Bereich und überlagern sich. Den geringsten m-Wert besitzt das B 20/30 mit der größten Steifigkeit. Eine temperaturabhängige Spreizung der Ergebnisse zur besseren Differenzierung kann hier nicht festgestellt werden. Die beiden höher Polymermodifizierten Bitumen, welche dieselbe Steifigkeitskurve besitzen, haben hier bei -20 und -24 °C auch gleiche m-Werte. Höher Polymermodifizierte Bitumen weisen aufgrund ihrer hohen m-Werte und den geringen Steifigkeiten gutes Tieftemperaturverhalten auf. Die erhaltenen Kurven lassen sich mit einem Bestimmtheitsmaß um  $r^2=0,99$  sehr gut linear darstellen.

## 3.1 Präzision

Gemäß DIN EN 14771 dürfen die berechneten Steifigkeiten von der gemessenen Steifigkeit um max.  $\pm 2\%$  abweichen. Andernfalls sind die Ergebnisse zweifelhaft. Bei den durchgeführten Untersuchungen zeigten sich Abweichungen über  $2\%$  insbesondere je geringer die Belastung, je tiefer die Prüftemperatur und je früher die Ablesung der Messung gewählt wird.

Gemäß DIN EN 14771 beträgt die Wiederholpräzision für Steifigkeit  $9\%$  vom Mittelwert, für den m-Wert  $4\%$  vom Mittelwert zweier Ergebnisse. Bei Vergleich sämtlicher Einzelablesungen weichen  $1,2\%$  der Steifigkeiten und  $5,4\%$  der m-Werte von der Wiederholpräzision ab. Somit überschreiten die m-Werte die in der Norm vorgegebene Präzision leicht.

Der Ausreißertest ergab, dass sämtliche Werte verträglich sind. Ausreißer der gemessenen Steifigkeit häufen sich etwas zu tieferen Prüftemperaturen und geringen Belastungen hin, während Ausreißer der gerechneten Steifigkeit und des m-Wertes eine gleichmäßige Verteilung über die Prüfparameter aufweisen. Maßgebend nach DIN EN 14771 ist die gerechnete Steifigkeit.

## 3.2 Weitere Untersuchungen

An ausgewählten Bindemitteln wurden Untersuchungen zur Alterung sowie ein Gerätevergleich durchgeführt.

### 3.2.1 Tieftemperaturverhalten

Es wurde die Einhaltung der Anforderung an das Tieftemperaturverhalten von Bitumen gemäß AASHTO TP1 (Superpave) überprüft. Diese ist gegeben bei einer Steifigkeit  $< 300$  MPa und einem m-Wert  $> 0,3$ . Es zeigte sich, dass für verschiedene Bindemittel auch verschiedene Tieftemperaturbereiche eingehalten werden. Mit einer BBR-Untersuchung bei zwei Temperaturen lässt sich leicht der Anforderungswert ermitteln, die Prüftemperaturspanne kann für jede Bitumensorte angegeben werden.

### 3.2.2 Multivariate Varianzanalyse

Aus Ergebnissen mit mehreren Prüfparametern werden über dieses mathematisch-statistische Auswerteverfahren diejenigen Parameter bestimmt, welche den größten Einfluss auf das Ergebnis haben. Es werden damit Varianzen und Prüfgrößen errechnet, über die Gesetzmäßigkeiten hinter den Daten ermittelt werden können. Da hier mehrere Faktoren zur Einflussfindung ausschlaggebend sind, wird die mehrfaktorielle Varianzanalyse durchgeführt.

Die Ergebnisse der Varianzanalyse zeigen sehr deutlich, dass die Prüftemperatur nicht beliebig gewählt werden darf. Die Temperatur ist wie bisher auch vorzuschreiben. Eine Ausnahme bilden Untersuchungen, die darauf abzielen, definierte Steifigkeiten oder m-Werte zu erreichen, wie bei der Ermittlung der Tieftemperaturanforderungen. Nach der Temperatur haben die Bindemittel selbst, sowie der Ablesezeitpunkt einen annähernd gleich hohen Einfluss. Da das Bitumen nicht festgelegt werden kann, ist der Ablesezeitpunkt zu fixieren. Einzig die Prüflast ist frei wählbar und unabhängig.

## 4 Ziel / Optimierungsmöglichkeiten

Bild 3 zeigt, dass erst zu einem späteren Zeitpunkt als  $t = 60$  s, zu dem normgemäß die Berechnung von S und m stattfindet, linear viskoses Verhalten erreicht wird, sodass auch bei der Versuchsauswertung Optimierungsmöglichkeiten vorhanden sind, welche die Aussagekraft und die Präzision der Ergebnisse

des BBR steigern können. Es sind die Verformungskurven eines 20/30, eines 22/55-55 A sowie eines 40/100-65 A eingetragen. Der zeitliche Verlauf der Kurven zeigt klar, dass ideal viskoses Verhalten erst ab einem Zeitpunkt von etwa 120 Sekunden vorliegt und somit eine Bestimmung der Steifigkeit zu einem späteren Zeitpunkt als den bisher üblichen 60 Sekunden zu deutlich präziseren Ergebnissen führen kann.

Hinsichtlich der Tieftemperaturanforderung gemäß SHRP-Programm könnten für jede Bindemittelsorte zwei Grenztemperaturen angegeben werden, mit denen die Tieftemperaturanforderung leicht bestimmt werden kann. Bei höher Polymermodifizierten Bitumen wird diese Temperaturspanne etwa  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  tiefer liegen als bei Straßenbaubitumen.

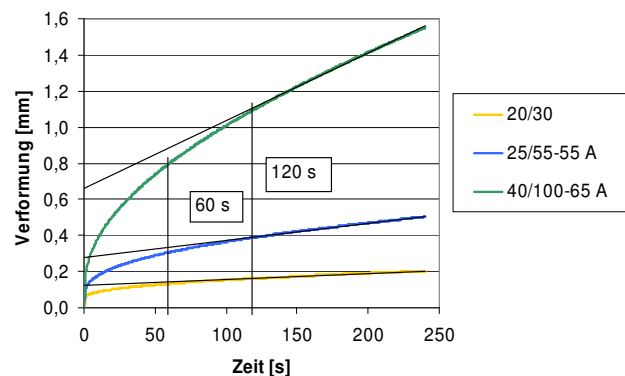


Bild 3: Verlauf der Durchbiegung im BBR

In Bild 4 sind die Steifigkeit und der m-Wert bei einer Ablesung von 60 s für ein 50/70 eingetragen. Für die Ermittlung der Tieftemperaturanforderung gemäß AASHTO ist der m-Wert größer  $0,3$  bzw. die Steifigkeit kleiner als  $300$  MPa relevant. Bei dem 50/70 kann somit eine Temperatur von  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$  abgelesen werden. Hier liegt die Steifigkeit bei  $300$  MPa und der m-Wert ist noch größer als  $0,3$ . Bei Zugrundelegung der Kennwerte bei späterer Ablesung von 120 s oder 240 s verschiebt sich die Temperatur in den kälteren Bereich.

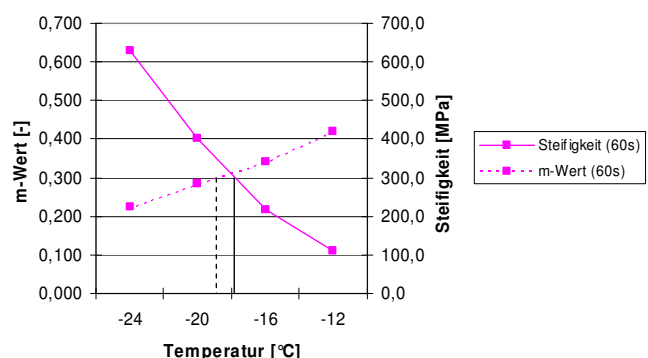


Bild 4: Grafische Ermittlung der Minimaltemperatur für ein Straßenbaubitumen 50/70

**5 Folgerungen für die Praxis**

Zur besseren Beurteilung des Kälteverhaltens von Bitumen und PmB als bisher mit dem genormten Brechpunkt nach Fraaß eignet sich insbesondere das Bending-Beam-Rheometer (BBR). Um eine weiterreichende Beschreibung der Bindemittel zu gestatten, als es derzeit nach der Standardauswertung aus der Prüfnorm DIN EN 14771 möglich ist, wurden die Kennwerte Steifigkeit und m-Wert an 19 verschiedenen Bitumen und PmB mit erweiterten Versuchsbedingungen ermittelt und ausgewertet.

Die standardisierte Ermittlung der Kennwerte Steifigkeit und m-Wert wurde auf Prüfungen bei vier Prüftemperaturen und drei Prüflasten erweitert. Aus den gemessenen Verformungskurven ergeben sich die Steifigkeit und der m-Wert. Diese Kennwerte wurden statistisch untersucht und einander gegenübergestellt. Es wurden nicht nur Ergebniswerte, sondern die ganzen Ergebniskurven betrachtet.

Die gemäß DIN EN 14771 durchgeführte Untersuchung der Gültigkeit, also der Vergleich der gemessenen mit der berechneten Steifigkeit, erbrachte größere Abweichungen bei geringer Belastung und niedrigerer Prüftemperatur. Die in DIN EN 14771 angegebene Präzision wird bei der Steifigkeit eher bei geringer Prüftemperatur, beim m-Wert eher bei tiefer Prüftemperatur und geringer Belastung überschritten. Der Ausreißertest ergab keine Häufung bei Prüfparametern. Es kann festgestellt werden, dass überwiegend bessere Ergebnisse bei späterer Ablesung zustande kommen. Eine Betrachtung der Ergebnisse insgesamt zeigt, dass für eine bessere Differenzierung der Steifigkeitswerte möglichst tiefe Temperaturen erforderlich sind. Zu geringe Belastungen wie 780 mN sind hinsichtlich der Qualität der Ergebnisse zweifelhaft, sodass eine Prüfung mit höherer Belastung durchgeführt werden sollte. Da ideal-viskoses Verhalten der Bindemittel erst nach einer Belastungsdauer von über 120 s auftritt, sollte von dem Bestimmungszeitpunkt  $t = 60$  s abgegangen werden. Hierdurch wird zudem die Genauigkeit der Daten erhöht.

Eine Auswertung mittels multivariater Varianzanalyse bestätigt dies: Die Prüftemperatur hat den größten Einfluss auf das Ergebnis, gefolgt von der Ablesezeit und dem Bindemittel. Eine Änderung der Belastung wirkt sich nicht auf das Ergebnis aus. Daher sind die Temperatur und die Ablesezeit zu fixieren.

Die Betrachtung der Steifigkeiten für alle Bindemittel ergibt die geringsten Steifigkeiten für alle höher Polymermodifizierten Bitumen. Straßenbaubitumen und Polymermodifizierte Bitumen überschneiden sich im mittleren Bereich, eines der beiden geprüften B 20/30 besitzt die größte Steifigkeit, während das andere sich wie ein B 50/70 verhält. Die Ergebnisse der m-Werte liegen linear in Abhängigkeit der Temperatur. Den höchsten m-Wert besitzen die höher Polymermodifizierten Bitumen, die auch die geringste Steifigkeit aufweisen. Destillationsbitumen und Polymermodifizierte Bitumen überschneiden sich auch hier, den geringsten m-Wert hat das B 20/30 mit der höchsten Steifigkeit, während das zweite B 20/30 wieder einen mittleren m-Wert aufweist. Während die Steifigkeit für alle Bindemittel bei kälterer Prüftemperatur größer gespreizt ist und somit die Bindemittel besser differenziert werden können, liefert der m-Wert für alle Prüftemperaturen Ergebnisse auf gleichem Niveau. Alle Ergebnisse sind unabhängig von der Belastung. Die Kenntnis von Werten für Steifigkeit und m-Wert reicht also nicht aus, um zwischen Straßenbaubitumen und Polymermodifizierten Bitumen zu unterscheiden.

Nach dem Tieftemperaturkriterium (m-Wert  $> 0,3$ , Steifigkeit  $< 300$  MPa) wurde die jeweilige Mindesttemperatur ermittelt. Mit Kenntnis dieser Minimaltemperatur lassen sich für jede Binde-

mittelsorte Temperaturbereiche festlegen, innerhalb derer die Tieftemperaturkriterien auf jeden Fall erfüllt sind.

Aus der Alterung resultieren für die Steifigkeiten und den m-Wert sowie für die Minimaltemperatur des Destillationsbitumens, des Polymermodifizierten Bitumens und des höher Polymermodifizierten Bitumens deutliche Unterschiede sowohl für Kurzzeitalterung RTFOT als auch für Langzeitalterung RTFOT + PAV.

Der Gerätevergleich liefert teils deutliche Unterschiede, wenngleich die Vergleichspräzision jeweils eingehalten wird.

Um die schadfrei zu ertragende Mindesttemperatur von Bitumen zu ermitteln, können die TL Bitumen durch Angabe einer Prüftemperaturspannweite ergänzt werden. Aufgrund der durchgeführten Untersuchungen wird vorgeschlagen, Straßenbaubitumen bei  $-10$  °C und  $-20$  °C zu prüfen, da Tieftemperaturanforderungen bei zwischen  $-12$  °C und  $-18$  °C erfüllt werden. Polymermodifizierte Bitumen wären bei  $-12$  °C und  $-22$  °C zu prüfen und höher Polymermodifizierte Bitumen bei  $-18$  °C und kälter als  $-25$  °C:

	Ermittelte Minimaltemp (min)	Ermittelte Minimaltemp (max)	Vorschlag Prüftemp 1 (min)	Vorschlag Prüftemp 2 (max)
<b>B</b>	-18 °C	-12 °C	-20 °C	-10 °C
<b>PmB</b>	-20 °C	-14 °C	-22 °C	-12 °C
<b>H-PmB</b>	< -24 °C	-19,5 °C	< -25 °C	-18 °C

Es wird zudem vorgeschlagen, künftige Prüfungen bei einer Belastung von mindestens 980 mN durchzuführen, und den Bestimmungszeitpunkt für die Kennwerte Steifigkeit und m-Wert auf mindestens 120 Sekunden festzulegen.

Die Präzision der neuen Prüfmethodik sollte nach Abschluss des Projekts in einem Ringversuch genau bestimmt werden. Mit diesem Schritt wären alle fachlichen Voraussetzungen für eine normative Umsetzung der Ergebnisse erfüllt.