

## Zusammenhang des Wertes für die Elastische Rückstellung von zurückgewonnenem Polymermodifiziertem Bindemittel und den Gebrauchseigenschaften des Asphaltmischgutes zur Schaffung eines Bewertungsmaßstabes

FA 7.213

Forschungsstelle: Universität Karlsruhe (TH), Institut für Straßen- und Eisenbahnwesen (Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. R. Roos)

Bearbeiter: Wittenberg, A. / Plachkova, P.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Bonn

Abschluss: September 2009

### 1 Einleitung

Im Rahmen dieses Forschungsprojekts sollte überprüft werden, ob zwischen der Kenngröße Elastische Rückstellung nach DIN EN 13398 und dem Gebrauchsverhalten von Asphalten ein Zusammenhang besteht, auf dessen Basis ein Bewertungs-

maßstab erarbeitet werden kann. Dazu wurden unter Verwendung von ausschließlich Polymermodifizierten Bitumen (PmB) jeweils 6 Asphaltvarianten aus Gussasphalt 0/11 S und Asphaltbinder 0/22 S hergestellt. Als Polymermodifizierte Bitumen wurden PmB 25 A und PmB 45 A von vier verschiedenen Herstellern eingesetzt.

Zunächst mussten im Labor geeignete Verfahren zur praxisnahen Beanspruchung des Asphaltmischguts entwickelt werden, um eine Reduzierung der Elastischen Rückstellung und eine Veränderung der Gebrauchseigenschaften der hergestellten Asphalte zu erreichen. Mit diesen Verfahren sollten die Asphalte praxisnah beansprucht und dadurch verändert werden. Dazu wurden für die beiden unterschiedlichen Asphaltarten dieser Untersuchungen verschiedene Verfahren definiert und festgelegt:

Nach dem Mischen gemäß den Vorgaben der TP A (Stufe 1) erfolgte die Beanspruchung der Gussasphalte bei einer Temperatur von 250 °C und geringer Umdrehungsgeschwindigkeit bei Verweildauern in

- Stufe 2 von 60 Minuten und in
- Stufe 3 von 165 Minuten.

Die Asphaltbinder wurden nach dem Mischen (Stufe 1) granuliert und im Wärmeschrank auf einem Drahtgitter bei 180 °C und einer Verweildauer in

- Stufe 2 von 120 Minuten und in
- Stufe 3 von 180 Minuten

beansprucht.

Dabei war die Beanspruchung für die Gussasphalte als überwiegend thermisch sowie die der Asphaltbinder als oxidativ und thermisch anzusehen, da im Wärmeschrank zusätzlich zur Temperatureinwirkung ein hoher definierter Luftaustausch erfolgte.

Am PmB im Anlieferungszustand (Stufe 0) sowie an den rückgewonnenen PmB nach dem Mischen und aus den jeweiligen Beanspruchungsstufen wurden folgende Untersuchungen durchgeführt:

- Elastische Rückstellung bei 25 °C nach DIN EN 13398 und zusätzlich bei verschiedenen Prüfbedingungen,
- Nadelpenetration nach DIN EN 1426,
- Erweichungspunkt Ring und Kugel nach DIN EN 1427,
- Formänderungsarbeit bis Mindestduktilität nach DIN 52013 und TL PmB, Anhang B,
- Formänderungsarbeit nach TL Bitumen,
- Gelpermeationschromatografie sowie
- Infrarotspektroskopie.

Zur Untersuchung der Gebrauchseigenschaften wurden an den Gussasphalten und Asphaltbindern der verschiedenen Stufen der Beanspruchung (Stufe 1 bis 3) folgende Untersuchungen durchgeführt:

- Abkühlversuche zur Kälteflexibilität,
- Spaltzugschwellversuche zum Ermüdungsverhalten und
- dynamische Stempeleindringversuche an Gussasphalten bzw. Druckschwellversuche an Asphaltbindervarianten zum Verformungsverhalten

und zusätzlich an den Asphaltbindervarianten

- statische Spaltzugversuche zum Haftverhalten.

## 2 Untersuchungen und Ergebnisse

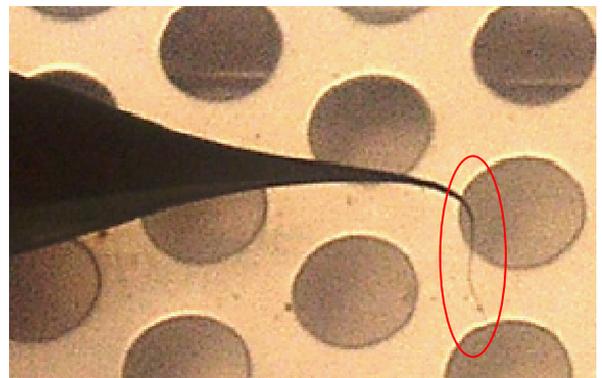
### 2.1 Untersuchungen und Untersuchungsergebnisse zur Elastischen Rückstellung

An den PmB im Anlieferungszustand und den rückgewonnenen PmB wurden Einflussfaktoren auf die Elastische Rückstellung untersucht. Als Einflussgrößen wurden neben den Prüfbedingungen das jeweilige Bitumenprodukt selbst sowie die Veränderung der Asphalte aufgrund der Beanspruchung in zwei Stufen (Beanspruchungsart und -dauer) angesehen. Die Variation der Prüfbedingungen der Elastischen Rückstellung umfasste die Standardprüftemperatur von 25 °C, die erhöhte

Prüftemperatur von 35 °C, die Standardauszugslängen 20 bzw. 10 cm sowie zusätzlich 5 cm. Die höhere Temperatur und die verringerten Auszugslängen wurden zur Vermeidung von Fadenrissen vor dem Erreichen der angestrebten Auszugslänge in den höheren Beanspruchungsstufen ausgewählt.

Die Bestimmung der Größen der Elastischen Rückstellung war vor allem bei den höher beanspruchten Varianten aus praktischen Gründen schwierig:

- Insbesondere bei den rückgewonnenen PmB aus Gussasphalten war die Bestimmung der Elastischen Rückstellung mit noch mehr Fehlermöglichkeiten behaftet. Hier stellten sich bei der Prüfung deutlich dünnere Fäden ein, als bei den Asphaltbindern, sodass die Fäden sehr schwer erkennbar waren und somit auch der Abstand der Halbfäden kaum zu ermitteln war (Bild 1).



**Bild 1:** Fadenausbildung bei der Elastischen Rückstellung eines PmB 45 A (Variante 4) in Gussasphalt bei einer Temperatur von 25 °C und einer angestrebten Auszugslänge von 20 cm (Stufe 3)

- Durch die Erhöhung der Prüftemperatur auf 35 °C ringelten sich bei einigen Varianten die Fäden sehr stark, was die Messung der Abstände der Halbfäden verfälschen konnte (Bild 2).

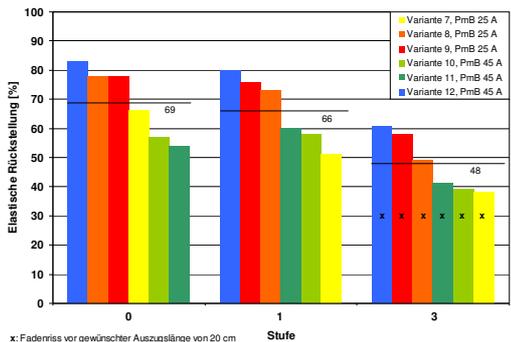
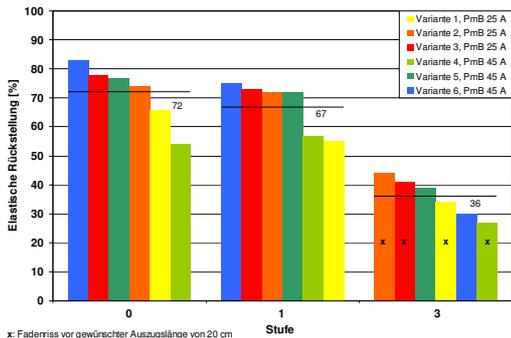


**Bild 2:** Fadenringelung bei der Elastischen Rückstellung der Variante 7 bei einer Temperatur von 35 °C und einer angestrebten Auszugslänge von 20 cm (Stufe 2)

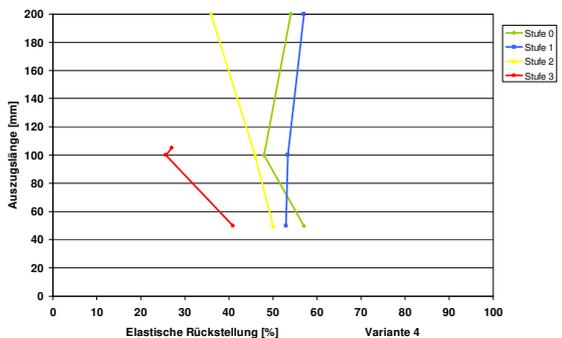
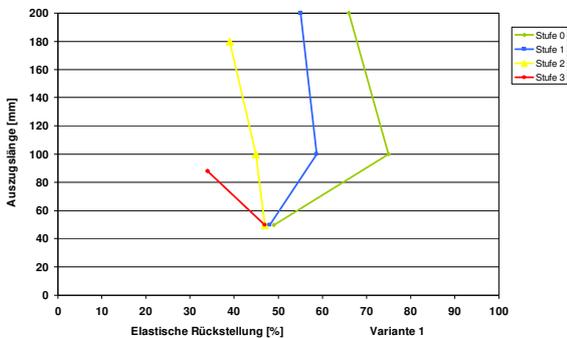
Eine Unterscheidung zwischen den eingesetzten Bitumensorten PmB 25 A und PmB 45 A anhand der Ergebnisse der Elastischen Rückstellung in den unterschiedlichen Beanspruchungsstufen war nicht möglich, da es deutliche Überschneidungen der Wertebereiche gab (Bild 3). Der Einfluss der Bitumensorte auf die Größe der Elastischen Rückstellung war somit für spätere Untersuchungen vernachlässigbar. Die beiden Bitumensorten wurden im Zuge der weiteren Diskussionen zusammengefasst.

Die Erhöhung der Prüftemperatur auf 35 °C, die ein Reißen der Fäden vor Erreichen der Auszugslänge in den Stufen 2 und 3 vermeiden sollte, ergab eine Veränderung der Elastischen Rückstellung gegenüber den Verhältnissen mit Standardtemperaturen von 25 °C: Die Werte in den Stufen 0, 1 und 2 wurden kleiner, in Stufe 3 dagegen stiegen diese an.

Die Erhöhung führte prinzipiell zu einer Vergrößerung der Auszugslänge, allerdings wurden dadurch die Fäden noch dünner, einige Fäden rissen zudem immer noch.



**Bild 3:** Ergebnisse der Elastischen Rückstellung aller Gussasphalte (oben) und Asphaltbinder (unten) bei einer angestrebten Auszugslänge von 20 cm und einer Temperatur von 25 °C der Größe nach für die Stufen 0, 1 und 3 geordnet



**Bild 4:** Elastische Rückstellung bei 25 °C und 20 cm Auszugslänge für PmB 25 A des Herstellers 1 (oben) und PmB 45 A des Herstellers 2 (unten) (Stufen 0 bis 3)

Um ein vorzeitiges Reißen zu vermeiden, wurde als weitere Möglichkeit die Verkürzung der Auszugslänge untersucht. Dazu wurden alle Varianten neben der Standardauszugslänge von

20 cm auch bei 10 cm, ausgewählte Varianten auch bei einer Länge von 5 cm, geprüft. Durch Gegenüberstellung der Elastischen Rückstellung und der zugehörigen Auszugslänge für einzelne Varianten und einzelne Stufen der Beanspruchung konnte festgestellt werden, dass, je nach Auszugslänge, sich die Elastische Rückstellung deutlich verändert (Bild 4). Zwei umfassend untersuchte PmB zeigten deutlich unterschiedliche Charakteristiken für die Kurvenverläufe: Bei jeder Variante ergaben sich durch die Veränderung der Auszugslänge unterschiedliche Veränderungen der Elastischen Rückstellung. Diese wurden auf die festgestellten unterschiedlichen spezifischen Zusammensetzungen der PmB zurückgeführt.

Eine Systematik, wie sich die veränderte Auszugslänge auf die Ergebnisse auswirkte bzw. ein Zusammenhang mit der Elastischen Rückstellung konnte nicht festgestellt werden.

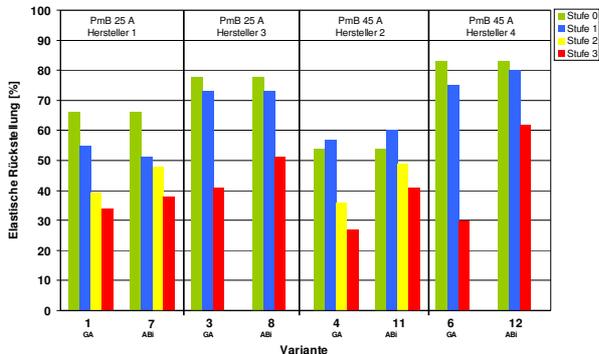
Die Veränderung der Elastischen Rückstellung infolge thermischer oder thermischer und oxidativer Beanspruchungszustände wurde anhand der Ergebnisse der Stufen 1, 2 und 3 untersucht. Die Beanspruchungen der Asphalte zeigten den beabsichtigten Effekt auf die rückgewonnenen PmB: Je länger die Asphalte beansprucht wurden, desto geringer fiel die Elastische Rückstellung aus. Diese zeigte allerdings keine einheitlichen Veränderungen (Bild 3). Es wurde festgestellt, dass jedes Bitumenprodukt unterschiedlich stark auf die Beanspruchung reagiert und somit auch die Elastische Rückstellung unterschiedlich abfiel, was wiederum auf die spezifische Zusammensetzung der PmB bzw. der enthaltenen Polymere und deren "Beanspruchungsempfindlichkeit" zurückgeführt werden musste (Bild 6).

Durch den Vergleich der an den PmB ermittelten Ergebnisse im Anlieferungszustand (Stufe 0) sowie aus den Gussasphalt- und Asphaltbindern nach dem Mischen (Stufe 1) ergaben sich Werte für die Elastische Rückstellung auf vergleichsweise ähnlichem Niveau (Bild 3). Dies galt auch für PmB, die in beiden Asphaltarten eingesetzt wurden. Bei einer Prüftemperatur von 25 °C und einer Auszugslänge von 20 cm lagen die Werte der Beanspruchungsstufe 3 für die Asphaltbinder zwischen 38 und 61 % durchschnittlich bei 48 %. Für die Gussasphalte ergaben sich Werte zwischen 26 und 44 % bei einem arithmetischen Mittelwert von 36 % (Bild 3).

Eine weitere Reduktion der Maßzahlen für die Elastische Rückstellung war mit den vorgegebenen Beanspruchungen nicht möglich, da entweder die Fäden dann zu dünn wurden oder der Fadenriss nach wenigen Zentimetern eintrat. Zudem waren einige PmB bei einer weiteren Beanspruchung so versprödet, dass sie aus der Probekörperform herausgezogen wurden. Die ermittelte Spanne entsprach dem bei beanstandeten/auffälligen Kontrollprüfungen erfahrungsgemäß festgestellten Bandbreiten für die Elastische Rückstellung beider Asphaltarten, d. h. die Beanspruchungen und Stufen im Labor wurden praxisnah gewählt.

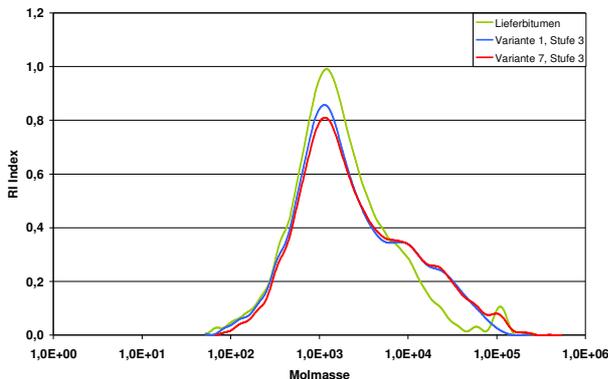
Somit waren Unterschiede zwischen den Ergebnissen beider Asphaltarten zu erkennen, welche sich auch in Stufe 2 bestätigten. Diese resultierten allerdings nicht aus der Asphaltart, sondern in erster Linie aus deren unterschiedlicher praxisnah gewählten Beanspruchungsart und -dauer. Der Grund für die niedrigeren Werte der PmB für die Elastische Rückstellung aus den Gussasphalten in Stufe 3 war in der hohen thermischen Beanspruchung zu vermuten (Bild 5). Die hohe Temperatur von 250 °C führte dazu, dass sich die Polymere durch ein Aufbrechen der langen Ketten verkürzten und somit an elastischer Wirkung bei der Bestimmung der Elastischen Rückstellung verloren. Die Beanspruchung der Asphaltbinder bei geringeren Temperaturen von 180 °C, aber unter Luftzufuhr, führte dazu, dass das Basisbitumen stärker versprödete, die Polymere sich aber nicht so stark verkürzten.

Dadurch waren z. B. die Auszugslängen für die Asphaltbinder, auch beim gleichen zugrunde liegenden PmB, prinzipiell kürzer als bei den Gussasphalten. Diese Erkenntnisse konnten durch die Gelpermeationschromatografie belegt werden.



**Bild 5:** Ergebnisse der Elastischen Rückstellung bei 25 °C und angestrebter Auszugslänge von 20 cm für Varianten mit gleichem PmB eines Herstellers für die Beanspruchungsstufen 0 bis 3, das jeweils in einer Gussasphalt- (GA) und einer Asphaltbindervariante (ABI) enthalten war

Hier zeigte sich, dass die ursprünglich im Anlieferungszustand (Stufe 0) vorhandenen Polymere der PmB aus den Gussasphaltvarianten in Stufe 3 einen deutlich geringeren Anteil im PmB aufwiesen als bei den nicht so stark thermisch beanspruchten Asphaltbindern (Bild 6).



**Bild 6:** GPC-Kurven der Gussasphaltvariante 1 und Asphaltbindervariante 7, mit Bitumen des gleichen Herstellers, im Anlieferungszustand und in Stufe 3

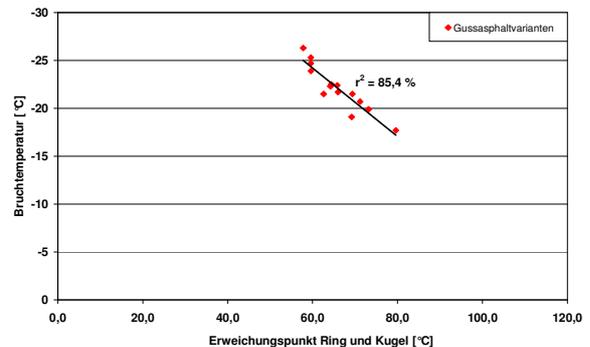
Zusammenfassend ließ sich feststellen, dass die Elastische Rückstellung, außer dass sie naturgemäß vom Bitumenprodukt mit seiner spezifischen Zusammensetzung abhing, von folgenden Faktoren mehr oder weniger ausgeprägt beeinflusst wurde:

- Beanspruchungsart und -dauer (Stufe),
- Prüfbedingung Temperatur und
- Prüfbedingung Auszugslänge.

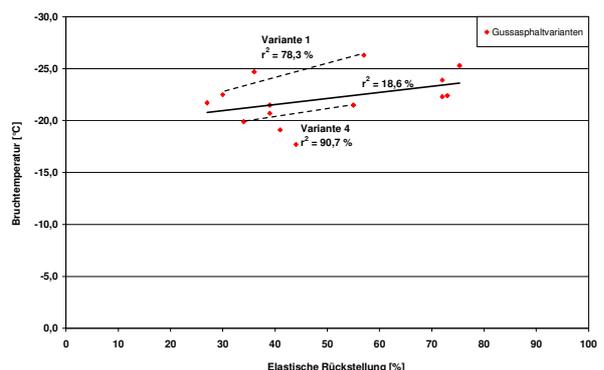
Insgesamt konnte keine Systematik im Hinblick auf Größenordnungen und Richtungen erkannt werden, wie die Prüfbedingungen Temperatur und Auszugslänge die Ergebnisse der Elastischen Rückstellung beeinflussten. Somit konnten keine prinzipiellen Empfehlungen für verbesserte Prüfbedingungen von rückgewonnenem PmB im Rahmen von Kontrollprüfungen gegeben werden.

## 2.2 Untersuchung von Zusammenhängen zwischen der Elastischen Rückstellung und den Kenngrößen für die Gebrauchseigenschaften der Gussasphalte

Die möglichen Zusammenhänge zwischen den ermittelten Kenngrößen der Prüfverfahren zu den Gebrauchseigenschaften und der Elastischen Rückstellung und weiterer Bitumenkenngrößen am rückgewonnenen PmB wurden statistisch zunächst mithilfe bivariater (einfacher) Korrelationsanalyse und mit multipler Regressionsanalyse untersucht. Dabei zeigten die Kenngrößen der Abkühlversuche zur Bestimmung der Kälteflexibilität, wie z. B. die Bruchtemperatur, gute Korrelationen mit den viskositätsbeschreibenden Bitumenkenngrößen (Bild 7). Ein Zusammenhang zwischen der Elastischen Rückstellung und der Bruchtemperatur sowie der Bruchspannung ließ sich nicht feststellen (Bild 8). Die kryogene Spannung bei -15 °C, die zur weiteren Charakterisierung der Kälteflexibilität als zusätzliche Spannung in den Probekörpern gegenüber der Bruchspannung herangezogen wurde, zeigte zwar einen statistisch abgesicherten, aber dennoch schwachen Zusammenhang mit der Elastischen Rückstellung mit einem niedrigen Bestimmtheitsmaß von  $r^2 < 46\%$ . Nach der multiplen Regressionsanalyse zeigten die viskositätsbeschreibenden Kenngrößen hierfür den größten Einfluss.



**Bild 7:** Zusammenhang mit Bestimmtheitsmaß  $r^2$  zwischen dem Erweichungspunkt Ring und Kugel und der Bruchtemperatur der Gussasphalte in allen Stufen (N = 14)

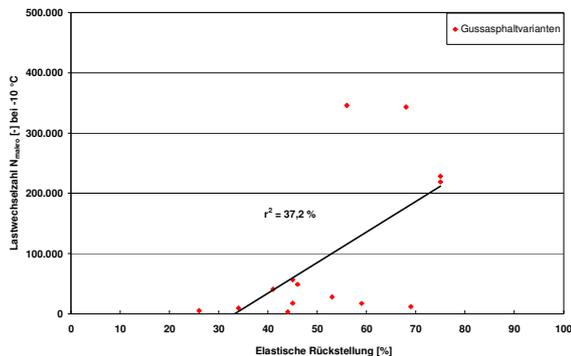


**Bild 8:** Zusammenhang mit Bestimmtheitsmaß  $r^2$  zwischen der Elastischen Rückstellung (25 °C, 20 cm Auszugslänge) und der Bruchtemperatur für die Gussasphalte in allen Stufen (N = 14) sowie für die Varianten 1 und 4 in allen Stufen (N = 3)

Die bei den Spaltzugschwellversuchen zur Untersuchung des Ermüdungsverhaltens bestimmten Lastwechselzahlen  $N_{\text{makro}}$  bei +10 und -10 °C zeigten keine Zusammenhänge mit den Ergebnissen der Elastischen Rückstellung (Bild 9).

Bei der getrennten Untersuchung einzelner rückgewonnener PmB ließen sich auf Basis eines sehr geringen Datenmaterials

Zusammenhänge z. B. für die Bruchtemperatur erkennen: Je niedriger die Werte der Elastischen Rückstellung waren, umso höher war die Bruchtemperatur (Bild 8).



**Bild 9:** Zusammenhang mit Bestimmtheitsmaß  $r^2$  zwischen der Elastischen Rückstellung (25 °C, 10 cm Auszugslänge) und der Lastwechselzahl  $N_{\text{makro}}$  bei -10 °C für die Gussasphalte in allen Stufen (N = 14)

Ob und inwieweit dieser Zusammenhang auf Basis größeren Datenmaterials bestätigt werden kann oder von den viskositätsbeschreibenden Kenngrößen des PmB abhängt, musste zunächst offen bleiben. Dazu wären zusätzliche Untersuchungen mit dem gleichen PmB in weiteren gestaffelten Beanspruchungsstufen erforderlich. Die entsprechenden Ergebnisse wären dann für das jeweilige PmB spezifisch und dürften nicht verallgemeinert werden.

Insgesamt ist festzustellen, dass die untersuchten Zusammenhänge für ingenieurmäßige Anwendungen nicht ausreichend oder begründet auszuschließen sind. Somit ist die Ableitung eines allgemeinen, für alle PmB gültigen Bewertungsmaßstabes nicht möglich.

### 2.3 Untersuchung von Zusammenhängen zwischen der Elastischen Rückstellung und den Kenngrößen für die Gebrauchseigenschaften der Asphaltbinder

Die einfache Korrelationsanalyse und die multiple Regressionsanalyse zeigten, ähnlich wie bei den Gussasphalten, hohe Korrelationen zwischen den viskositätsbeschreibenden Kenngrößen des PmB und den Kenngrößen der Abkühlversuche zur Bestimmung der Kälteflexibilität, wie Bruchtemperatur und kryogene Spannung bei -3 °C. Diese kryogene Spannung bei -3 °C wurde zur weiteren Charakterisierung der Kälteflexibilität als zusätzliche Spannung in den Probekörpern gegenüber der Bruchspannung herangezogen. Zwischen der Elastischen Rückstellung und der Bruchtemperatur sowie der Bruchspannung konnten nur schwache bzw. sehr schwache Zusammenhänge mit einem niedrigen bis mäßigen Bestimmtheitsmaß festgestellt werden. Ein Zusammenhang zwischen der kryogenen Spannung bei -3 °C und der Elastischen Rückstellung war im Allgemeinen nicht zu erkennen. Die multiple Regressionsanalyse zeigte auch hier, dass die viskositätsbeschreibenden Kenngrößen den größeren Einfluss auf die Bruchtemperatur haben.

Die Ergebnisse der Spaltzugschwellversuche zur Untersuchung des Ermüdungsverhaltens ergeben, dass kein Zusammenhang zwischen den Lastwechselzahlen  $N_{\text{makro}}$  bei +20 °C und den Ergebnissen der Elastischen Rückstellung besteht. Dies galt ebenso für die Kenngrößen des statischen Spaltzugversuchs zur Prüfung des Haftverhaltens. Die Untersuchung einzelner Varianten auf Basis eines sehr geringen Datenmaterials zeigten Zusammenhänge z. B. zwischen der Elastischen Rückstellung und der Bruchtemperatur sowie der Lastwechselzahl  $N_{\text{makro}}$  bei +20 °C. Dies könnte auf Interaktionen der Elastischen Rückstellung mit den viskositätsbeschreibenden Kenngrößen beruhen

und müsste in Untersuchungen mit weiteren gestaffelten Beanspruchungsstufen und jeweils gleichen PmB überprüft werden. Die entsprechenden Ergebnisse wären dann für das jeweilige PmB spezifisch und dürften nicht verallgemeinert werden.

Insgesamt gilt für die Asphaltbindervarianten analog zu den Gussasphalten, dass es keine ausreichenden oder begründet auszuschließenden Zusammenhänge im Hinblick auf Möglichkeiten zur Beschreibung der Gebrauchseigenschaften gibt. Somit ist die Ableitung eines allgemeinen, für alle PmB gültigen Bewertungsmaßstabes nicht möglich.

## 3 Ergebnisse

Aufgrund der hier angewendeten Untersuchungssystematik lässt sich zusammenfassen, dass die Prüfbedingungen für die Elastische Rückstellung (Auszugslänge und Prüftemperatur) die verschiedenen untersuchten PmB 25 A und PmB 45 A mit ihrer spezifischen Zusammensetzung unterschiedlich ansprechen; es kann allerdings keine Systematik im Hinblick auf Größenordnungen und Richtungen erkannt werden, wie Prüfbedingungen die Ergebnisse der Elastischen Rückstellung beeinflussen.

Jedes PmB reagiert tendenziell mit einer Verringerung der Elastischen Rückstellung bei einer oxidativen und/oder thermischen Beanspruchung, allerdings jeweils, der spezifischen Zusammensetzung wegen, von verschiedenen Ausgangsniveaus aus unterschiedlich ausgeprägt, d. h. mit unterschiedlicher Beanspruchungsempfindlichkeit. Entsprechend zeigen sich auch die Gebrauchseigenschaften der Asphalte auf verschiedenen Niveaus, die sich unterschiedlich ausgeprägt bei Beanspruchung verändern. Mittels bivariaten Korrelationsanalysen werden für den überwiegenden Anteil der Kenngrößen keine Zusammenhänge zwischen der Elastischen Rückstellung und den einzelnen Kenngrößen der Gebrauchseigenschaften der Gussasphalt- und der Asphaltbindervarianten festgestellt. Vereinzelt ergeben sich zwar statistisch abgesicherte, aber dennoch schwache bzw. sehr schwache Zusammenhänge mit sehr niedrigen bis mäßigen Bestimmtheitsmaßen.

Aufgrund der multiplen Regressionsanalysen wiesen die viskositätsbeschreibenden Bitumenkenngößen zumeist den größten Einfluss auf die Gebrauchseigenschaften der Asphalte auf; die Elastische Rückstellung ist dabei von untergeordneter Bedeutung. Für die PmB einzelner Gussasphalt- und Asphaltbindervarianten ergeben sich über die drei Beanspruchungsstufen Zusammenhänge zwischen einzelnen Gebrauchseigenschaften und der Elastischen Rückstellung mit teilweise hohen Bestimmtheitsmaßen. Hierfür liegen allerdings stets sehr geringe Datenkollektive (drei Wertepaare) zugrunde, sodass diese Aussagen mit weiteren Untersuchungen statistisch abgesichert werden sollten. Die so ermittelten Zusammenhänge wären gegebenenfalls nur für das entsprechende PmB gültig und dürften nicht verallgemeinert werden.

Insgesamt zeigte sich, dass die mit der hier eingesetzten Untersuchungsmethodik vereinzelt ermittelten Zusammenhänge zwischen der Elastischen Rückstellung und den Kenngrößen der Gebrauchseigenschaften der Asphalte für eine ingenieurmäßige Anwendung nicht ausreichend sind oder begründet ausgeschlossen werden können. Somit ist die Ableitung eines allgemeinen, für alle untersuchten PmB gültigen Bewertungsmaßstabes auf Basis eines Zusammenhangs zwischen der Elastischen Rückstellung und den Gebrauchseigenschaften der hier untersuchten Asphalte nicht möglich. Die Gebrauchseigenschaften des Asphaltmischguts hängen für die hier untersuchten Arten und Sorten von PmB vor allem mit deren Viskosität zusammen. Das Verfahren zur Bestimmung der Elastischen Rückstellung dient somit lediglich zum Nachweis des Vorhandenseins von Polymeren im PmB.