

## Prüfung des Verhaltens von Asphalt bei tiefen Temperaturen mit Hilfe des modifizierten Spaltzugversuchs unter besonderer Beachtung der Querdehnung

FA 7.191

Forschungsstelle: Zentrum für angewandte Forschung und Technologie e.V. an der Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden (FH), Prüfstelle für bituminöse Baustoffe (Prof. Dr.-Ing. habil. P. Pilz)

Bearbeiter: Borek, J. / Müller, F.

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

Abschluss: Januar 2003

### 1. Aufgabenstellung

Durch die ständige Verkehrszunahme werden vom Benutzer immer höhere Anforderungen an den Fahrkomfort der Straßen gestellt. Dies gilt insbesondere sowohl für die Ebenflächigkeit in Quer- und Längsrichtung, als auch für die Griffigkeit und Helligkeit, d. h. für Kennwerte, die das Gebiet der Verkehrssicherheit betreffen. Unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten ist eine möglichst hohe Nutzungsdauer einer Straßenkonstruktion anzustreben.

Wesentliche Voraussetzungen für den Bau von haltbaren Straßenkonstruktionen sind die Kenntnis der Baustoffeigenschaften, der funktionsgerechte Einbau und eine lückenlose Qualitätskontrolle.

Da zur Überprüfung des Verhaltens von Asphalt bei tiefen Temperaturen zur Zeit die Verfahren (Zugversuche bei tiefen Temperaturen sowie Abkühlversuche) nur einigen wenigen Prüfstellen zur Verfügung stehen, gibt es Bestrebungen, ein einfacheres Prüfverfahren wie den modifizierten Spaltzugversuch zur Abschätzung der Zugfestigkeit einzuführen.

Im deutschen Asphaltstraßenbau erfolgte die Anwendung der Spaltzugprüfung bereits in den 60-er Jahren. In zahlreichen Veröffentlichungen beschrieb Müller die Theorie und entwickelte die Messtechnik dahingehend weiter, dass neben der Spaltzugfestigkeit zusätzlich auch die Querverformung bestimmt werden konnte. Dadurch wurde die Aufzeichnung des Spannungs-Dehnungsverhaltens und bei Annahme der Querdehnungszahl auch die Berechnung des E-Moduls möglich gemacht. Hauptsächlich aufgrund dieser Arbeiten wurde in der ehemaligen DDR eine Prüfvorschrift zur Bestimmung der Spaltzugfestigkeit (TGL 20801/21) erarbeitet.

Derzeit gibt es in Deutschland kein bundesweit gültiges Prüfverfahren zur Bestimmung der Spaltzugfestigkeit  $f_{SZ}$  und der Querdehnung  $\varepsilon$  bei tiefen Temperaturen.

Ziel dieses Forschungsvorhabens war es, Anforderungen an das Prüfverfahren zu definieren. Dieses Verfahren soll im Rahmen der erweiterten Eignungsprüfung eingesetzt werden. Ausgehend von den überwiegend positiven Erfahrungen mit dem Spaltzugversuch in den neuen Bundesländern sollte überprüft werden, ob die Kenngrößen des Spaltzugversuches geeignet sind, auf das Verhalten unterschiedlich zusammengesetzter Asphalte Rückschlüsse ziehen zu können.

Dieser Nachweis würde es ermöglichen, die Eigenschaften von Asphalt nicht mehr nur über Bindemittelkennwerten optimieren zu können, sondern über die Asphaltkennwerten im Rahmen von erweiterten Eignungsprüfungen.

## 2. Ausführungen zu den zu bestimmenden Größen wie Spaltzugfestigkeit, Querdehnung und E-Modul

### 2.1 Allgemeines

Der Spaltzugversuch wird heute infolge seiner einfachen Durchführung und der Verwendung von zylindrischen Probekörpern in verschiedenen Ländern zur Bestimmung der Festigkeits- und Elastizitätsparameter von Asphalten herangezogen. Während zunächst vorwiegend nur die Festigkeitseigenschaften unter statischen Bedingungen Gegenstand der Untersuchungen waren, wurden in den letzten Jahrzehnten die Prüfungen ausgedehnt, wobei auch dynamische Lasteinwirkungen und die damit verbundene spezielle Auswertung Eingang fanden.

So ist es nicht verwunderlich, wenn im Ergebnis des SHRP-Programmes (Strategic Highway Research Program) die Anwendung dieses praktikablen Versuches im Asphaltstraßenbau für die Lösung spezieller Probleme empfohlen wird, denen sich auch neuere Bemühungen in Europa anschließen. Trotz dieser positiven Aussagen sind die Versuchsergebnisse Gegenstand häufiger Kritik, die sich im Wesentlichen auf die Annahme eines ebenen Spannungszustandes, der Gültigkeit der Elastizitätstheorie und der Spannungsverteilung im Bereich der Lasteintragungstreifen bezieht. Neben den im Forschungsprogramm vorgesehenen Versuchen, die zur Klärung der noch offenen Fragen beitragen sollen, erscheint es daher sinnvoll, auch die bislang bekannten Bemühungen auf theoretischem Gebiet mit einzubeziehen, mit der Zielsetzung, zuverlässige und aussagefähige Parameter für die ingenieurmäßige Bewertung von Asphalten zu erhalten.

### 2.2 Theoretische Grundlagen

Beim Spaltzugversuch werden waagrecht liegende zylindrische Probekörper durch eine Linienlast über Lastverteilungstreifen in einer Druckpresse bis zur Bruchlast beansprucht. Dabei erzeugen die senkrecht wirkenden hohen Druckkräfte im Bereich der Lastebene in Querrichtung Zugspannungen, die bei entsprechender Sprödigkeit des Materials einen Zugbruch durch Aufspalten der Probe herbeiführen und somit eine Bestimmung der Zugfestigkeit des Baustoffes ermöglichen. Die ersten theoretischen Untersuchungen zu diesem Problem stammen von Timoschenko bzw. Föppl. Sie gehen von der Belastung einer Kreisscheibe mit 2 diametralen Einzelkräften unter der Annahme eines ebenen Spannungszustandes auf der Basis der Elastizitätstheorie aus.

Neben den Festigkeiten am Spaltzugkörper interessieren weiterhin die Verformungen und die sich daraus ergebenden Steifigkeiten. Hierfür bietet sich die Messung der Querverformung im Bereich der Mittelebene der Probe mit  $(x, y = 0, z = 0)$  aus mehreren Gründen an. Einmal herrscht dort ein ebener Spannungszustand, was die mathematische Behandlung wesentlich vereinfacht. Zum anderen sind die Endflächen der Messbasis frei von Lasteintragungen. Dies wiederum bietet eine gute Ausgangssituation für genaue und reproduzierbare Messergebnisse. Ebenfalls günstig wirkt sich die äußere Belastung in diesem Bereich auf die Spannungsverteilung aus, sodass mit einer Einzellast anstelle der gleichmäßigen Streckenlast gerechnet werden kann.

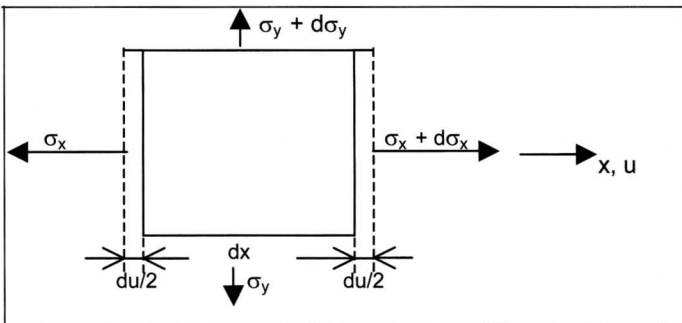
Es ergeben sich die Normalspannungen

$$\sigma_x = -\frac{2 * P}{\pi * l} * \left[ \frac{2 * r * x^2}{(x^2 + r^2)^2} - \frac{1}{2 * r} \right] \text{ und}$$

$$\sigma_y = -\frac{2 * P}{\pi * l} * \left[ \frac{2 * r^3}{(x^2 + r^2)^2} - \frac{1}{2 * r} \right] \quad (1)$$

$\sigma_x$  und  $\sigma_y$  stellen innerhalb der x-Achse Hauptspannungen dar, damit werden die Scherspannungen  $\tau_{xy}$  zu Null. Für die Dehnung in x-Richtung erhält man unter Verwendung eines Verschiebungssystems u in Verbindung mit dem Hook'schen Gesetz den Ansatz (Bild 1)

$$\frac{du}{dx} = \epsilon_x = \frac{1}{E} * (\sigma_x - \mu \sigma_y) \quad \text{mit } \mu = \text{Poissonzahl} \quad (2)$$



**Bild 1: Dehnungsansatz für den Bereich der x-Achse**

bzw. für die Längenänderung u in x-Richtung unter Berücksichtigung der Integrationsgrenzen

$$\int_{-r}^{+r} du = \frac{1}{E} \int_{-r}^{+r} (\sigma_x - \mu \sigma_y) dx = \frac{1}{E} \left\{ \int_{-r}^{+r} \sigma_x dx - \mu \int_{-r}^{+r} \sigma_y dy \right\} \quad (3)$$

Nach Auflösen des Integrals ergibt sich für die Berechnung der Längenänderung u in Querrichtung der Ansatz

$$u = \frac{1}{E} \left( 0,273 * \frac{P}{l} + \mu * \frac{P}{l} \right) = \frac{P}{l * E} * (0,273 + \mu) \text{ und}$$

$$\text{daraus } E = \frac{P}{l * u} * (0,273 + \mu) \quad (4)$$

Zur Bewertung des Verformungsverhaltens eines Baustoffes wird häufig auch die Bruchdehnung  $\epsilon_{br}$  herangezogen. Geht man von der Überlegung aus, dass der Bruch der Probe beim Spaltzugversuch vom Symmetriezentrum aus eingeleitet wird, dann lässt sich mithilfe der Elastizitätstheorie die Bruchverformung errechnen.

Die Verteilung der Dehnung  $\epsilon_x$  innerhalb der x-Achse ist nicht konstant, sondern verläuft glockenförmig mit dem Maximum in Probenmitte und dem Wert Null jeweils am Rande der Probe und lässt sich aus dem Ansatz nach Gleichung (2) berechnen nach (5):

$$\epsilon_{\max} = \epsilon_{br} = \frac{\left( \frac{P}{\pi * l * r} + \mu \frac{3 * P}{\pi * l * r} \right)}{P * (0,273 + \mu)} l * u = \frac{u}{\pi * r} * \frac{1 + 3 * \mu}{0,273 + \mu} = \frac{2 * u}{\pi * d} * \frac{1 + 3 * \mu}{0,273 + \mu} = \frac{2 * u}{\pi * d} * f(\mu) \quad (5)$$

### 3. Untersuchungsprogramm

Im Rahmen des Forschungsvorhabens sollten die Untersuchungen zur Spaltzugprüfung an Asphaltbeton, Splittmastixasphalt und Asphaltbinder bei Variation der Bindemittelsorte, des Bindemittelgehaltes und der Korngrößenverteilung durchgeführt werden.

Die Bearbeiter haben sich für folgende Asphalte entschieden:

1. Asphaltbinder 0/22 S mit Bitumen 50/70
2. Asphaltbinder 0/16 S mit Bitumen 30/45
3. Asphaltbeton 0/11 S mit Bitumen 50/70
4. Asphaltbeton 0/8 mit Bitumen 70/100
5. Splittmastixasphalt 0/11 S mit Bitumen 50/70
6. Splittmastixasphalt 0/8 mit Bitumen 70/100.

Es wurden nicht nur Marshall-Probekörper (MPK), sondern auch gyratorisch verdichtete (GPK) und aus mit dem Walzsektorverdichter hergestellten Probekörpern gebohrte Probekörper (PPK) hergestellt. Dadurch sind neben den verschiedenen Verdichtungsarten auch unterschiedliche Probekörperdurchmesser vorgegeben.

#### 3.1 Prüfverfahren

Wie unter 2.2 bereits ausgeführt, werden beim Spaltzugversuch waagrecht liegende zylindrische Probekörper durch eine angenäherte Linienlast über Lastverteilungstreifen in einer Druckpresse bis zum Bruch beansprucht. Die Druckkräfte, die dabei auftreten, erzeugen im Bereich der Lastebene in Querrichtung Verformungen, die durch Wegaufnehmer gemessen werden können. Diese Aufnehmer sind seitlich in einem Rahmen angebracht, in dem der Probekörper zur Prüfung fixiert wird.

Die Lastverteilungstreifen zum Aufbringen der Linienlast sind im Entwurf der DIN EN 12697-23 genormt.

Zum Aufzeichnen der auftretenden Querverschiebungen und Kräfte sind sowohl die Druckpresse als auch die seitlichen Wegaufnehmer mit einem Computer gekoppelt.

Mithilfe einer speziellen Software lassen sich die einzelnen Messgrößen wie Querdehnung, E-Modul sowie das Arbeitsvermögen (Integral der Kraft-Verformungskurve) bestimmen. Dabei können die Ausgabeparameter frei gewählt werden. Um einen Vergleich zwischen verschiedenen verdichteten und aus unterschiedlichem Asphaltmischgut bestehenden Probekörpern durchführen zu können, müssen einige Festlegungen getroffen werden:

- Unebenheiten an der Mantelfläche wurden entfernt.
- Bei sehr offenporigen Probekörpern wurde die Mantelfläche an den Stellen mit festem Klebeband abgeklebt, an denen die Messfühler für die Querverschiebung anliegen. Die Temperierung der Probekörper erfolgte für mindestens vier Stunden bei 5 °C in einem Kühlschrank, um ein Durchtemperieren zu ermöglichen.
- Die Zeitspanne zwischen der Entnahme der Probekörper aus dem Kühlschrank und dem Abschluss der Prüfung betrug weniger als zwei Minuten.

#### 4. Ergebnisse

Eine Betrachtung der erreichten Ergebnisse wurde für jedes Mischgut getrennt durchgeführt (Bilder 2 und 3).

Dargestellt werden hier als Beispiel nur die an den Gyrator-Probekörpern bei 50 % der Bruchlast erreichten Ergebnisse.

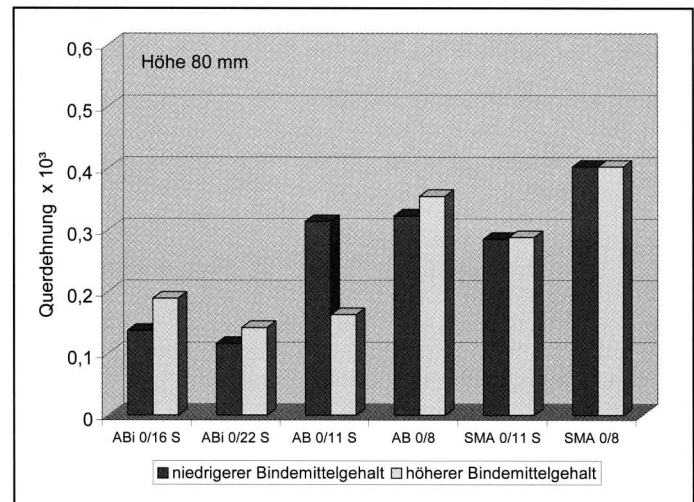
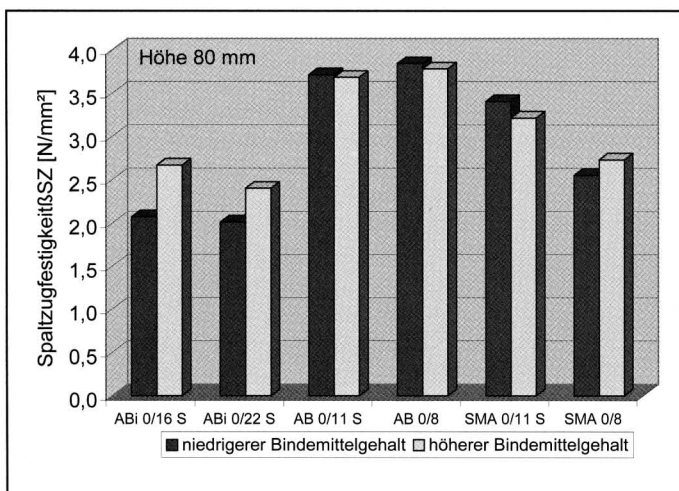
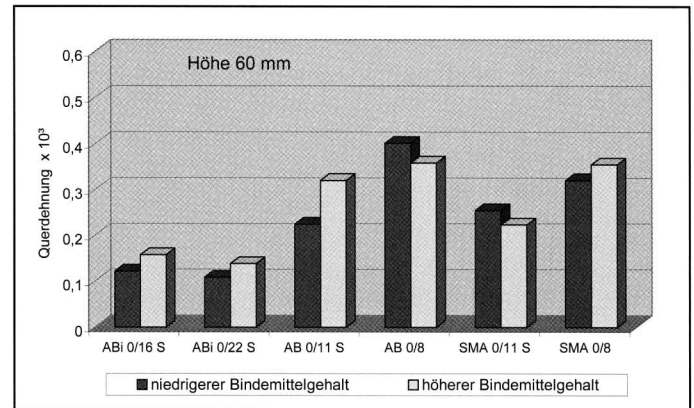
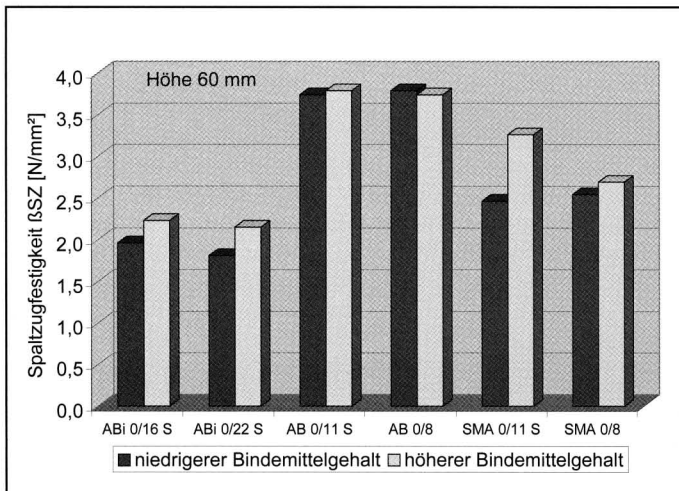
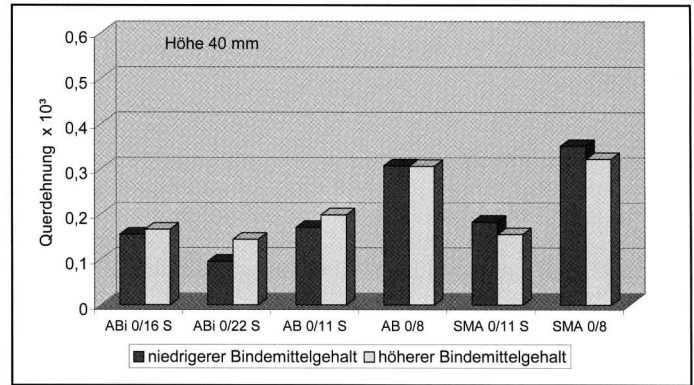
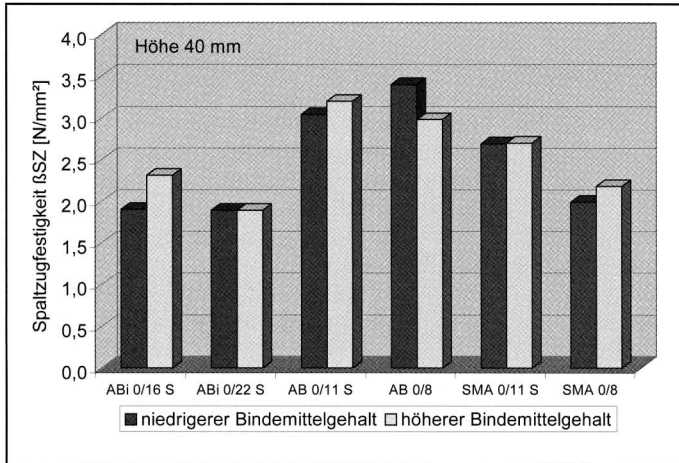


Bild 3: Querdehnung bei 50 % der Bruchlast an Gyrator-Probekörpern in Abhängigkeit der Mischgutart (-sorte) und dem Bindemittelgehalt

Bild 2: Spaltzugfestigkeit an GPK in Abhängigkeit der Mischgutart (-sorte) und dem Bindemittelgehalt

#### 5. Schlussfolgerungen

Die in der Aufgabenstellung vorgegebenen Streifenbreiten von 12,7 mm für Probekörper mit einem Durchmesser von 100 mm (Marshall-Probekörper) und 19,1 mm für Probekörper mit einem Durchmesser von 150 mm (aus Platten gebohrte Probekörper und Gyrator-Probekörper) haben sich bewährt und sollten beibehalten werden. Durch die größere Breite werden ein Schubbruch und zu hohe Spannungskonzentrationen im Lasteintragungsbereich vermieden.

Gleichzeitig treten durch die günstigen Auflagebedingungen geringere Streuungen auf (Beispiel: Spaltzugfestigkeit des Asphaltbinders 0/22 S mit 4,1 M.-% Bit. der Höhe 80 mm; Variationskoeffizient der Marshall-Probekörper: 17,1 %; Variationskoeffizient der aus Platten gebohrten Probekörper: 8,4 %). Die

dadurch bedingte scheinbare geringe Festigkeitszunahme gegenüber der Annahme einer Linienlast ist vertretbar.

Das Verhältnis der Höhe zum Durchmesser des Probekörpers sollte im Bereich von 0,4 bis 0,6 liegen.

Für größere Probekörperdicken sind in Abhängigkeit von der Mischgutart Festigkeitszunahmen zu erwarten. Korrelationen in Abhängigkeit unterschiedlicher Probekörperhöhen und Mischgüter lassen sich zum jetzigen Zeitpunkt nicht verlässlich festlegen, sodass die momentanen Abmessungen beibehalten werden sollten.

Hohe Spaltzugfestigkeiten in Verbindung mit hohen Querdehnungen deuten auf eine hohe Rissicherheit und Ermüdungsbeständigkeit hin.

Geringe Spaltzugfestigkeiten in Verbindung mit ebenfalls geringen Querdehnungen hingegen weisen auf hohe Standfestigkeit (E-Modul) hin.

Bei der Bestimmung der Querdehnung und des E-Moduls ist darauf zu achten, dass die Messung in der Symmetrieachse  $z = 0$  erfolgt, da hier, bedingt durch den 2-achsigen Spannungszustand, die günstigsten Voraussetzungen gegeben sind.

Mit der Querdehnung  $\varepsilon$  lässt sich ein aussagefähiges Merkmal zur Beurteilung der Asphalte erkennen.

Der zu bevorzugende Probekörperdurchmesser beträgt 150 mm. Damit lassen sich ebenfalls aus fertigen Straßenkonstruktionen gezogene Bohrkern von 150 mm Durchmesser problemlos prüfen. Aus praktischen Gesichtspunkten ist die Herstellung der Probekörper im Labor mit dem Gyrator zu empfehlen, da es sich hier um eine knetende Verdichtung handelt und sich Mischgutarten mit einem Größtkorn von 22 mm besser verarbeiten lassen.

Es zeigt sich, dass der Variationskoeffizient der Spaltzugfestigkeit an Gyrator-Probekörpern im Mittel aller Mischgutarten und Probekörperhöhen mit 6,3 % kleiner ist als an MPK mit 8,1 %.

Die Prüftemperatur sollte nicht über 5 °C liegen. Damit entspricht sie der EN 12697-23. Zu geringe Temperaturen führen zu Abweichungen durch Temperatureinfluss bei der Durchführung der Spaltzugprüfung. Unser Vorschlag von 5 °C als Prüftemperatur beruht auf Erfahrungen, die durch die erreichten Prüfergebnisse im Rahmen dieses Forschungsvorhabens bestätigt werden.

Die bislang gewählte Vorschubgeschwindigkeit von 50 mm/min sollte beibehalten werden. Abhängigkeiten der erreichten Kennwerte von der Vorschubgeschwindigkeit wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens nicht untersucht.

Die angegebenen Prüfbedingungen sollten solange angewandt werden, bis sich die Möglichkeiten der Durchführung dynamischer Prüfungen an zylindrischen Probekörpern verbessert haben.

Dynamische Prüfverfahren sind deshalb erforderlich, weil

1. die Aussagekraft gegenüber dem bisherigen Verfahren insofern erhöht wird, weil die elastischen und viskosen Anteile einschließlich des Phasenwinkels  $\varphi$  verbesserte Aussagen zulassen (SHRP-Programm; das führt bis zur Bestimmung des Ermüdungsverhaltens (z. B. Abfall der aufnehmbaren Kraft auf 50 % des Ausgangswertes)),
2. an den Ausgangsbitumen bereits entsprechende elastische und viskose Anteile bestimmt werden können (Dynamisches Scherrheometer) und deshalb derartige Prüfungen auch für Asphalt zunehmend verwendet werden sollten.

Deshalb müssen Voraussetzungen geschaffen werden, um zukünftig dynamische Prüfverfahren mehr als bisher anzuwenden und dazu erforderliche Untersuchungen sollten in einem weiteren Forschungsvorhaben vorgenommen werden. Dabei sollte besonders darauf geachtet werden, dass ein für die Laboratorien einfach zu handhabendes Gerät benutzt werden kann, um den Prüfaufwand in vernünftigen Grenzen zu halten.

Vorstellungen und Verbindungen zu Praxispartnern in Bezug auf den Einsatz eines solchen Prüfgerätes sind in unserer Prüfstelle vorhanden. Entsprechende Voruntersuchungen wurden bereits früher durchgeführt.

### Literaturverzeichnis

- [1] Müller, F.: "Anwendung der Spaltzugfestigkeit im bituminösen Straßenbau"; ZS "Die Straße", (1970) Februar
- [2] Müller, F.: "Die Bestimmung der Formänderungskennwerte beim Spaltzugversuch"; ZS "Das Straßenwesen", 49. Sonderheft
- [3] Bellin, P.: "Die Ergebnisse der Bitumen- und Asphaltforschung des SHRP"; ZS "Bitumen", (2002)4

