

Einfluss der Temperatur, der Belastungsfrequenz und der Impulskraft beim Falling-Weight-Deflectometer (FWD) auf die Größe der effektiven Schicht-E-Moduli

FA 4.174

Forschungsstelle: Technische Universität Darmstadt, Versuchsanstalt für Straßenwesen (Prof. Dr.-Ing. Bald)

Bearbeiter: Bald, S. / Grätz, B.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Bonn

Abschluss: November 1999

1. Aufgabenstellung

Der Straßenbau in der Bundesrepublik Deutschland wird in Zukunft weniger durch den Neubau als durch die Erhaltung und Erneuerung geprägt sein. Durch die stark steigende Verkehrsbelastung wird die vorhandene Straßensubstanz in immer stärkerem und schnellerem Maße verbraucht. Nur in begründeten Fällen kann eine Grunderneuerung in Betracht gezogen werden. Da andererseits auch die Verstärkungen aus zeitlichen und finanziellen Gründen nicht im wünschenswerten Umfang durchgeführt werden können, müssen die Maßnahmen nach ihrer Dringlichkeit in Angriff genommen werden. Wenn Tragfähigkeitsgründe für eine Erneuerung verantwortlich sind, müssen spezielle Kriterien für eine Dringlichkeitsreihung und Verstärkungsbemessung angewendet werden.

Beim natürlichen Straßenverkehr wird die aus dem Kraftfahrzeug resultierende Belastung durch das rollende Rad auf die Fahrbahnoberfläche übertragen und wirkt auf ein Flächenelement der Fahrspur nur einen Bruchteil einer Sekunde ein. Die Dauer der Einwirkung des Stoßes (Impulses) wird dabei durch die Geschwindigkeit des Fahrzeuges und die Länge der Aufstandsfläche des Reifens in Fahrrichtung bestimmt [1]. Die Messung der Reaktionen der Fahrbahnbefestigungen als Formänderungen bzw. Verformungen infolge dynamischer Belastungen soll u.a. die Möglichkeit schaffen, die Tragfähigkeit und die Moduli der Schichten zu bestimmen.

Das Ziel des Forschungsvorhabens ist die Quantifizierung des Einflusses unterschiedlicher Temperaturen sowie unterschiedlicher Impulskräfte und -breiten auf die aus den FWD-Messdaten rückgerechneten Schichtmoduli des Zweischichtensystems. Unter Verwendung dieser Schichtmoduli soll die Möglichkeit geschaffen werden, die Tragfähigkeit einer Fahrbahnbefestigung in Abhängigkeit von der Temperatur, der Impulskraft und der Impulsbreite beurteilen zu können. Die Beurteilung der Tragfähigkeit einer Fahrbahnbefestigung unter Berücksichtigung dieser Einflussgrößen ist bezüglich deren Beanspruchung von Bedeutung; insbesondere im Hinblick auf erforderlich werdende Instandsetzungs- und Erneuerungsmaßnahmen. Aus den zu ermittelnden Übertragungsfunktionen, die das komplexe Verhalten zwischen den Verformungs-Zeit-Kurven und der Kraft-Zeit-Kurve repräsentieren, soll evtl. neben einer Aussage bezüglich der Tragfähigkeit auch eine Interpretation der Standfestigkeit des Asphaltpaketes ermöglicht werden. Diese Übertragungsfunktionen sollen die Grundlage für eine zu entwickelnde „Dynamische viskoelastische Zweischichtentheorie“ liefern.

2. Untersuchungsmethodik

Im Hinblick auf die Zielsetzung wurden fünf Strecken untersucht, für die bereits Untersuchungsdaten aus den Langzeitbeobachtungen der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) [15]

bzw. aus FE-Projekten vorlagen. Nach dem Abschluss der Messungen mit dem FWD wurden in der rechten Rollspur der Untersuchungsstrecken Bohrkerne entnommen zur Feststellung der Kennwerte bezüglich Aufbau und Dicke der Schichten, Mischgutzusammensetzung und Hohlraumverhältnisse der Asphalt-schichten sowie des mechanischen Verhaltens der Baustoffe der Asphalt-schichten.

3. Untersuchungsergebnisse

Ein Vergleich der ermittelten asphalttechnologischen Kennwerte mit den Anforderungen der derzeit gültigen Technischen Regelwerke erfolgte nicht, da die fünf Untersuchungsstrecken seit ca. 30 Jahren unter Verkehr liegen. Da jedoch der Erweichungspunkt Ring und Kugel des Bitumens maßgeblich den absoluten E-Modul des Asphalt-schichtes beeinflusst, wurde aus den Daten der Mischgutzusammensetzung und den Hohlraumgehalten der Schichten nach dem in [2] beschriebenen und in [3] „modifizierten Verfahren nach Francken und Verstraeten“ für die Temperatur 20 °C und die Frequenz 10 Hz dieser Modul berechnet. Das Berechnungsverfahren beruht auf den Ergebnissen von Zweipunkt-Biegeversuchen mit Wechselbelastung, die in [16] beschrieben sind. Ab einem Erweichungspunkt Ring und Kugel von ca. 80 °C sind die rechnerisch ermittelten absoluten E-Moduli und Glasmoduli identisch.

3.1 Mechanisches Verhalten der Fahrbahnbefestigungen

Die Verformungen der Fahrbahnoberfläche infolge definierter Belastungen werden mit statischen bzw. quasistatischen sowie dynamischen Messverfahren ermittelt [3]. Das FWD ist ein dynamisches Messverfahren, bei dem ein Kraftimpuls auf die Fahrbahnbefestigung aufgebracht wird und die Verformungen im Lastzentrum sowie in verschiedenen Abständen zu diesem in Abhängigkeit von der Zeit gemessen werden.

Aus gemessenen Kraft-Zeit- und Verformungs-Zeit-Verläufen kann durch Bildung der komplexen Übertragungsfunktion [4 bis 6] eine Strukturanalyse für z.B. ein Bauteil, also auch für eine Fahrbahnbefestigung, durchgeführt werden. Diesbezügliche Auswertungen von FWD-Messergebnissen liegen bisher in der Literatur [7] nur vereinzelt vor. Die in dem Forschungsbericht beschriebene beispielhafte Auswertung der FWD-Messdaten im Hinblick auf die Berechnung dieser Funktion ergab, dass mit den Messungen nur die beiden Frequenzen 0 Hz und 31,3 Hz erfasst werden. Die obere Frequenz entspricht nach [1] einer Lkw-Geschwindigkeit von ca. 40 km/h; weiterhin wurde festgestellt, dass die beiden Übertragungsfunktionen in Abhängigkeit vom Abstand vom Lastflächenmittelpunkt einen fast deckungsgleichen Verlauf aufweisen, wobei die Übertragungsfunktion der Frequenz 0 Hz dem statischen Lastfall entspricht. Eine der Voraussetzungen zur Durchführung dieser Strukturanalyse ist die zeitgleiche Abtastung der Messkanäle; diese Forderung erfüllt die Messdatenerfassung des für die Messungen eingesetzten FWD jedoch nicht, so dass die oben beschriebene Übertragungsfunktion nur eine „Näherungslösung“ sein kann. Zur Berechnung der komplexen Übertragungsfunktion müsste die Messdatenerfassung dahingehend modifiziert werden, dass

- das Messfenster vergrößert und die Abtastrate erhöht wird (die Erfassung von Doppel- und Mehrfachimpulsen muss jedoch vermieden werden)

- die Datenerfassung mit einem A/D-Wandler durchgeführt wird, mit dem die 10 Kanäle zeitgleich abgetastet werden können.

Die Berechnung der komplexen Übertragungsfunktion von Fahrbahnbefestigungen ist im Hinblick auf die Beurteilung des Strukturverhaltens unter dynamischer Belastung notwendig. Aus den Komponenten dieser Funktion können z.B. die Eigen- und Resonanzfrequenzen der Fahrbahnbefestigung berechnet sowie das viskoelastische Verhalten beurteilt werden. Diese Möglichkeit der Auswertung dynamischer Messungen, die auf Fahrbahnbefestigungen durchgeführt wurden, bietet die Impulshammer-Messtechnik [7]; dieses Verfahren wird zurzeit im Rahmen eines Forschungsauftrages [8] zur Beurteilung der Wirksamkeit unterschiedlicher Instandsetzungsmaßnahmen bezüglich des Strukturverhaltens der Fahrbahnbefestigungen eingesetzt.

Nach dem heutigen Stand der Wissenschaft und Technik [3] dienen die mit dem FWD durchgeführten Messungen ausschließlich dem Zweck, Aussagen zur Tragfähigkeit einer Fahrbahnbefestigung zu ermöglichen. Die Tragfähigkeit wird durch Schichtmoduli oder Tragfähigkeitskennzahlen quantifiziert, die aus den Verformungsmulden rückgerechnet bzw. berechnet werden [3, 8, 9]. Die Verformungsmulde ist die Darstellung der Maximalwerte der Verformung, die in der Verformungs-Zeit-Kurve auftreten, in Abhängigkeit vom Abstand vom Lastflächenmittelpunkt. Diese Maximalwerte treten i. a. zu verschiedenen Zeitpunkten auf; die Verformungsmulde stellt somit keine Momentaufnahme des dynamischen Verformungsverhaltens der Fahrbahnoberfläche zu einem bestimmten Zeitpunkt dar. Verfahren zur Rückrechnung der Schichtmoduli aus der Verformungsmulde sind in dem Forschungsbericht FE 04.162 [3] zusammengestellt. Auf Grund der in diesem Forschungsbericht und in [10] enthaltenen Ergebnisse kann im Hinblick auf die Anwendbarkeit der Rückrechenverfahren gefolgert werden, dass

- nur mit Rückrechenverfahren, die auf zweischichtigen Berechnungsmodellen beruhen, plausible Ergebnisse erhalten werden.

Aus den Ergebnissen des Forschungsberichtes FE 04.162 ist weiterhin ersichtlich, dass

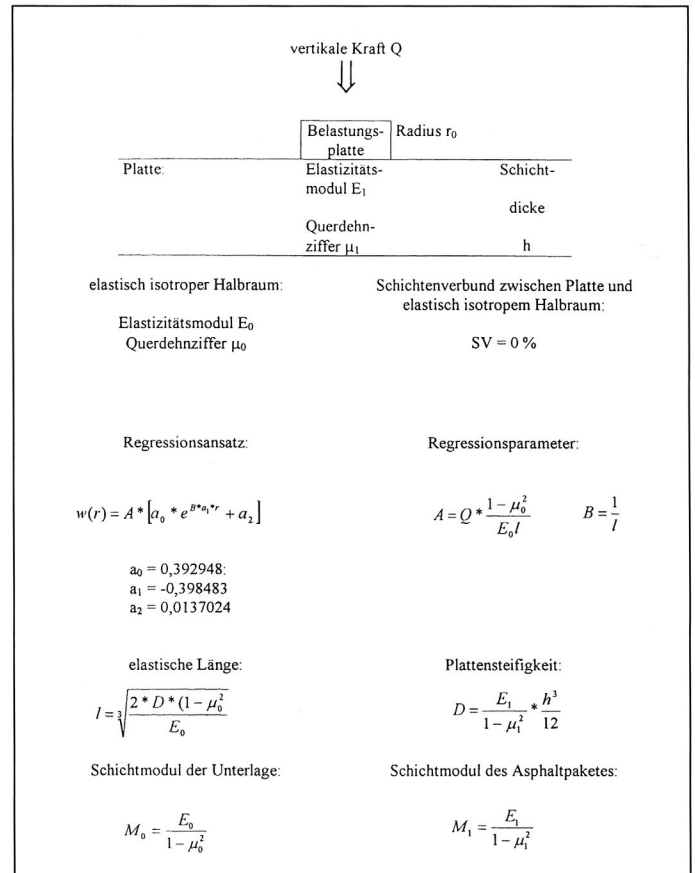
- mit den rückgerechneten Schichtmoduli keine Aussage über die Nutzungsdauer und die Restnutzungsdauer von Fahrbahnbefestigungen getroffen werden kann.

Da das in diesem Forschungsbericht enthaltene aus der Zweischichtentheorie abgeleitete Regressionsverfahren zur Rückrechnung der Schichtmoduli nicht auf Fahrbahnbefestigungen mit gerissener Oberfläche angewendet werden kann, wurde im vorliegenden Forschungsauftrag das im Bild 1 dargestellte auf dem Befestigungsmodell „Platte auf elastisch isotropem Halbraum“ basierende Rückrechenverfahren entwickelt.

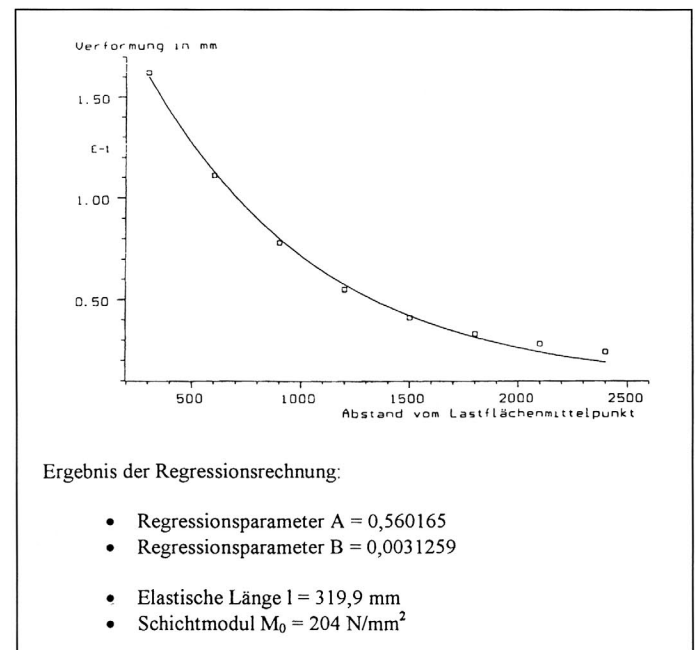
Ein Beispiel für die Übereinstimmung zwischen der gemessenen und der rückgerechneten Verformungsmulde ist in Bild 2 dargestellt.

Dieses Verfahren hat gegenüber den aus der Mehrschichtentheorie abgeleiteten Rückrechenverfahren u.a. folgende Vorteile:

- für die Rückrechnung ist kein Mehrschichtenprogramm, wie z.B. BISAR, notwendig;
- für den Wert der Querdehnzahl μ muss keine Annahme getroffen werden;
- die Tragfähigkeit, die als elastische Länge 1 definiert wurde, und der Schichtmodul M_0 der ungebundenen Unterlage werden ohne Kenntnis der Dicke des Asphaltpaketes direkt aus der Verformungsmulde berechnet;



1: Befestigungsmodell „Platte auf elastisch isotropem Halbraum“



2: Beispiel für das Ergebnis der Rückrechnung der Tragfähigkeitskennwerte aus mit dem FWD gemessenen Verformungsmulden mit dem aus dem Befestigungsmodell „Platte auf elastisch isotropem Halbraum“ abgeleiteten Regressionsansatz

- treten auf einer Strecke unterschiedliche Tragfähigkeiten auf, so werden diese entweder durch unterschiedliche Schichtmoduli M_1 oder Schichtdicken h des Asphaltpaketes verursacht; zur Feststellung der Ursache sind weiter gehende Untersuchungen wie Bohrkernentnahmen mit anschließenden Festigkeitsprüfungen, z.B. Spaltzugschwellversuche [3, 11], oder zerstörungsfreie Bestimmung der Schichtdicken, z.B. mit dem Impulsradar [12], notwendig.

Im Rahmen dieses Forschungsauftrages wurde der Einfluss der Temperatur, der Belastungsfrequenz (Impulsbreite) und der Impulskraft (Impulshöhe) auf die Größe der effektiven Schichtmoduli untersucht. Auf Grund der Gerätekonfiguration des für die Messungen verwendeten FWD konnte der Einfluss der Impulsbreite auf die Schichtmoduli nicht nachgewiesen werden. Zur Beschreibung des Einflusses der Impulskraft auf die Schichtmoduli des Asphaltpaketes und der ungebundenen Unterlage wurde ein Potenzansatz verwendet; die mit dem Potenzansatz beschriebene Abhängigkeit ist

- für die Schichtmoduli M_0 der ungebundenen Unterlage und M_1 des Asphaltpaketes streckenspezifisch; somit kann keine allgemein gültige Formel zur Umrechnung der Schichtmoduli, die für die Impulskraft Q ermittelt wurden, auf die Impulskraft $Q = 50$ kN angegeben werden;
- für den Schichtmodul M_0 bei einigen Strecken und Messperioden nicht nachweisbar, weil der Parameter b den Wert Null aufweist und dieser Schichtmodul somit unabhängig von der Impulskraft ist.

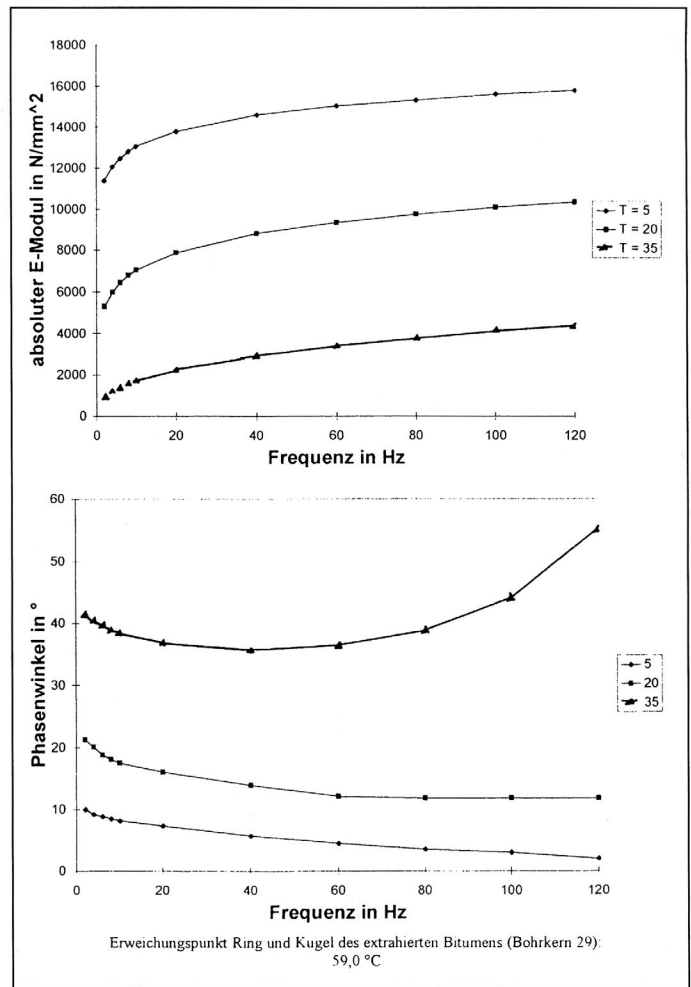
Zu einem ähnlichen Ergebnis führt auch die Beurteilung der Abhängigkeit zwischen dem Schichtmodul des Asphaltpaketes und der Temperatur, nämlich dass auch diese Temperaturabhängigkeit streckenspezifisch ist; somit kann hier keine allgemein gültige Formel zur Umrechnung der bei einer Temperatur T ermittelten Schichtmoduli auf die Bezugstemperatur T_R angegeben werden.

Die Beurteilung der Tragfähigkeit von Fahrbahnbefestigungen aus mit dem FWD gemessenen Verformungsmulden kann auch mit Tragfähigkeitszahlen als UI-Tz-Diagramm erfolgen [8, 9], die jedoch keine mechanischen Kenngrößen darstellen. Vergleichende Untersuchungen über den Zusammenhang zwischen dem UI-Tz-Diagramm und den Tragfähigkeitskennwerten elastische Länge l und Schichtmodul M_0 liegen bisher noch nicht vor. In dem vorliegenden Forschungsbericht ist jedoch ein Weg skizziert, mit dem dieser Zusammenhang realisiert werden kann.

3.2 Mechanisches Verhalten der Baustoffe der Asphalt-schichten

Die versuchstechnische Ermittlung des absoluten E-Moduls und des Phasenwinkels als zweite Komponente des komplexen E-Moduls der Schichten erfolgte mit dem dynamischen Zweipunkt-Biegeversuch [17] in der BASt für die Temperaturen 5, 20 und 35 °C. Ein Beispiel für die Untersuchungsergebnisse enthält Bild 3; in diesem Bild ist der absolute E-Modul und der Phasenwinkel in Abhängigkeit von der Frequenz für die drei Temperaturen dargestellt.

Der absolute E-Modul wird bei den Temperaturen mit zunehmender Frequenz größer; eine Temperatur-Frequenz-Äquivalenz der absoluten E-Moduli konnte jedoch mit der Williams-Landel-Ferry-Gleichung (WLF-Gleichung) und der Arrhenius-Funktion nicht nachgewiesen werden. Der Phasenwinkel weist in Abhängigkeit von der Frequenz für die drei Temperaturen ein unterschiedliches Verhalten auf, bei der Temperatur von 35 °C durchläuft er im Bereich der Frequenz von 40 Hz ein Minimum. Weiterhin wurde festgestellt, dass die versuchstechnisch ermittelten gegenüber den rechnerisch ermittelten absoluten E-Moduli kleiner sind. Da der absolute E-Modul nur kleiner oder gleich dem

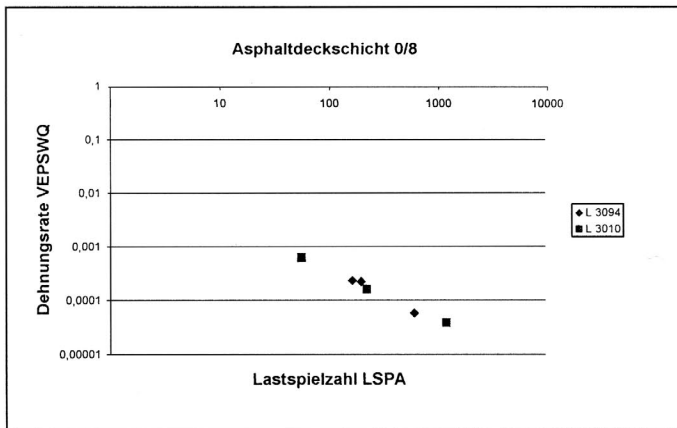


3: Beispiel für die Untersuchungsergebnisse der dynamischen Werkstoffprüfung

Glasmodul sein kann, sind in dem o. g. Bereich des Erweichungspunktes Ring und Kugel auch die absoluten E-Moduli entsprechend hoch und müssten dementsprechend für die Ermüdungsbeständigkeit der Asphalte vorteilhaft sein. Dieses deckt sich nach [18] nicht mit praktischen Erfahrungen; in der Praxis werden vielmehr in Verkehrsflächenbefestigungen aus Asphalt mit harten oder während der Nutzungsdauer verhärteten Bindemitteln häufiger Längsrisse neben den Rollspuren der Fahrzeuge gefunden, die durch das Zusammenwirken kryogener Zugspannungen mit verkehrslastbedingten Zugspannungen an der Fahrbahnoberfläche erklärt werden können. Praxisadäquate Ermüdungsversuche dürfen daher nicht als Wechselversuche, sondern sie müssen vielmehr als Schwellversuche konzipiert werden.

Bei der Bestimmung von Materialkennwerten sollen weiterhin gemäß [2] Belastungseinrichtungen verwendet werden, die je nach der zu ermittelnden Materialeigenschaft möglichst einfache Lastfälle simulieren, es ist also ein definierter Spannungszustand anzustreben. Die Beanspruchung muss dabei in ihrem zeitabhängigen Verlauf der Beanspruchung in Fahrbahnen unter Verkehr angepasst sein. Theoretisch wäre es denkbar, Schwellversuche last- oder weggeregelt durchzuführen. Für die korrekte prüftechnische Ansprache des Ermüdungsverhaltens von Asphalt scheidet weggeregelt Schwellversuche aber aus, da der Asphalt unter dem Einfluss der periodisch anschwellenden Steuergröße Dehnung relaxiert. Da dies mit der Wirklichkeit nicht übereinstimmt, kann das Ermüdungsverhalten praxisgerecht nur mit Hilfe von lastgeregelten Schwellversuchen angesprochen werden [18]. Zu diesem Versuchstyp zählen der Biege- und Spaltzugschwellversuch [3]. Die Anwendung des Biege-

schwelligversuch zur prüftechnischen Ansprache des Widerstandes gegen Rissbildung von Asphalttschichten ist auf Grund der Balkentheorie eingeschränkt; diese Einschränkung trifft für den Spaltzugschwelligversuch nicht zu. Außerdem kann mit diesem Versuch das Festigkeitsverhalten der gesamten Schicht angesprochen werden. Die Auswertung der Untersuchungsergebnisse ergab in Analogie zu früheren Untersuchungen [11], dass zwischen dem Beginn der Bruchphase (Dehnungsrate im Wendepunkt) und dem Bruchzustand (Lastspielzahl der Asymptote) der Impulskriechkurve der Querdehnung in Abhängigkeit von der Schichtart ein potenzieller Zusammenhang besteht. Ein Beispiel ist in Bild 4 dargestellt.

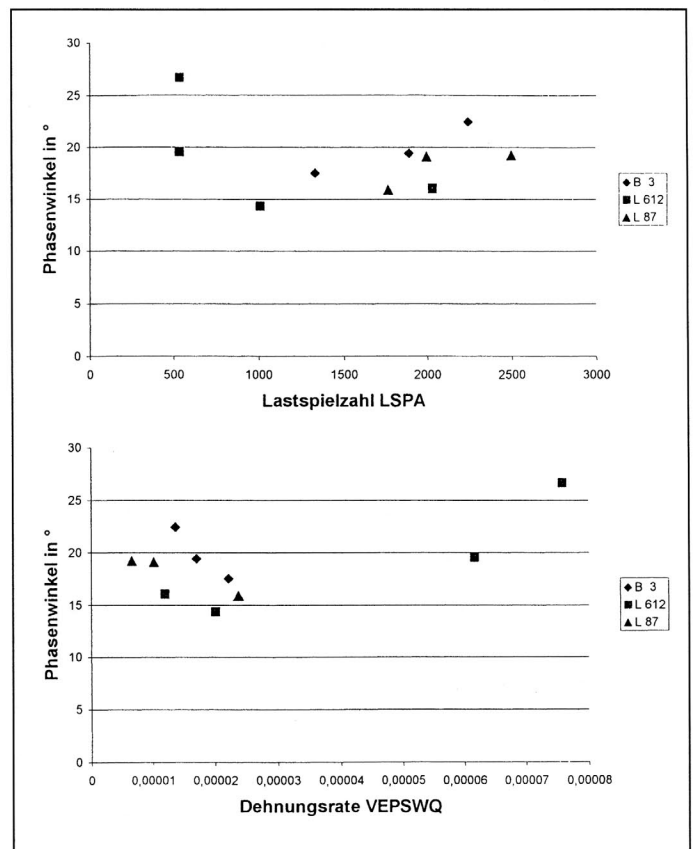


4: Zusammenhang zwischen der Dehnungsrate und der Lastspielzahl

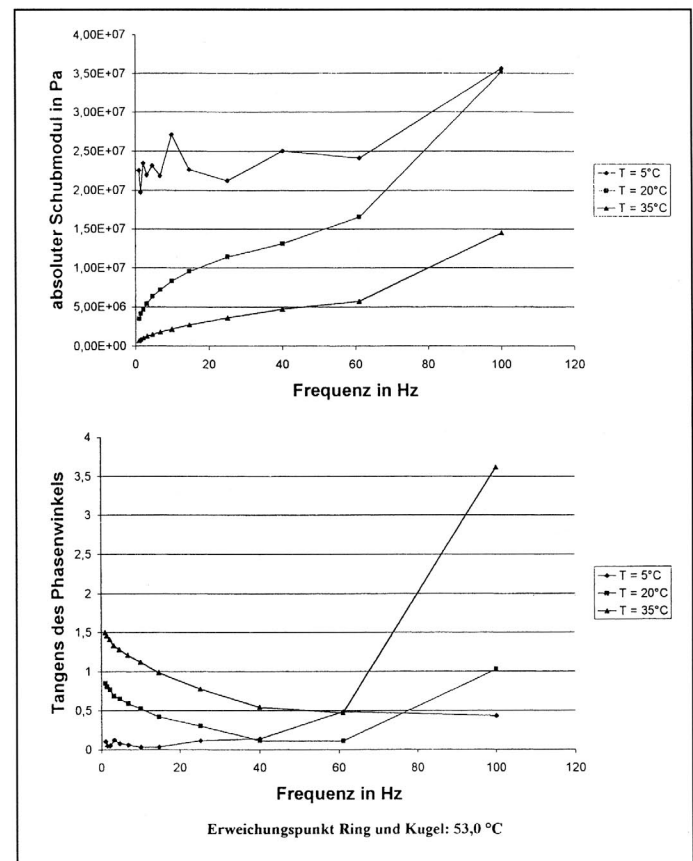
Zwischen diesen beiden Festigkeitskennwerten und den absoluten E-Moduli konnten keine Trendlinien ermittelt werden, d.h. Asphalte mit hohen wie auch niedrigen absoluten E-Moduli können zur Rissbildung neigen. Der absolute E-Modul beschreibt jedoch nur eine Komponente des viskoelastischen Steifigkeitsverhaltens der Asphalte; die andere Komponente ist der Phasenwinkel. Zwischen diesem Kennwert und den Festigkeitskennwerten besteht ein quadratischer Zusammenhang mit einem Minimum, wie Bild 5 zeigt.

Dies bedeutet, dass große Phasenwinkel bei kleinen und großen Festigkeitskennwerten auftreten können. Der Widerstand der Schichten einer Asphaltbefestigung gegen Rissbildung wird nicht nur durch deren Festigkeitsverhalten sondern auch durch den Schichtenverbund beeinflusst. Die Prüfung des Schichtenverbundes erfolgte mit dem Schergerät nach Leutner. Der Vergleich der Untersuchungsergebnisse mit den in [19] aufgeführten Mindestwerten des Schichtenverbundes ergab, dass der Mindestwert nur einmal unterschritten wurde. Im Rahmen der an den Schichten durchgeführten Mischgutuntersuchungen wurde das Konsistenzmerkmal Erweichungspunkt Ring und Kugel der Bitumen ermittelt. Die bisherigen konventionellen Bitumen-Prüfverfahren erwiesen sich jedoch auf Grund früherer Tests sowie auch der SHRP-Untersuchungen für die Berechnung des Gebrauchsverhaltens von Bitumen und Asphalt als ungeeignet und für deren Beurteilung nur als bedingt geeignet; die Gebrauchseigenschaften Ermüdungs- und Verformungsverhalten der Bitumen können jedoch mit dem dynamischen Scher-Rheometer (DSR) geprüft werden [20]. Aus diesem Grund wurden mit dem DSR RS 50 durch Schubwechselbelastung die rheologischen Kennwerte absoluter Schubmodul und Phasenwinkel der extrahierten Bitumen ermittelt. In Bild 6 ist ein Beispiel für die Untersuchungsergebnisse dargestellt.

Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass das rheologische Verhalten der absoluten Schubmoduli und der Phasenwinkel in Abhängigkeit von der Frequenz nicht mit dem von Bitumen



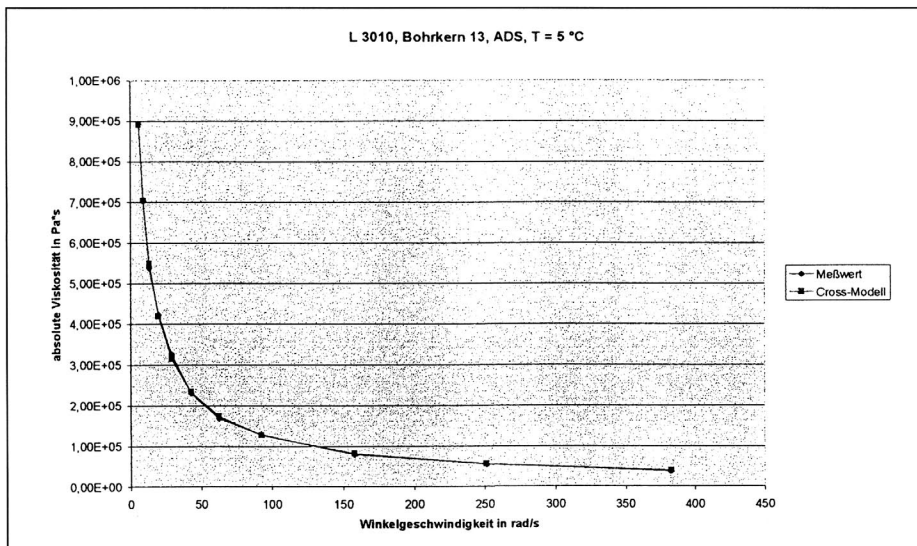
5: Abhängigkeit zwischen dem Phasenwinkel und den Festigkeitskennwerten



6: Rheologische Kennwerte des extrahierten Bitumens (L 3010, BK 13, ADS)

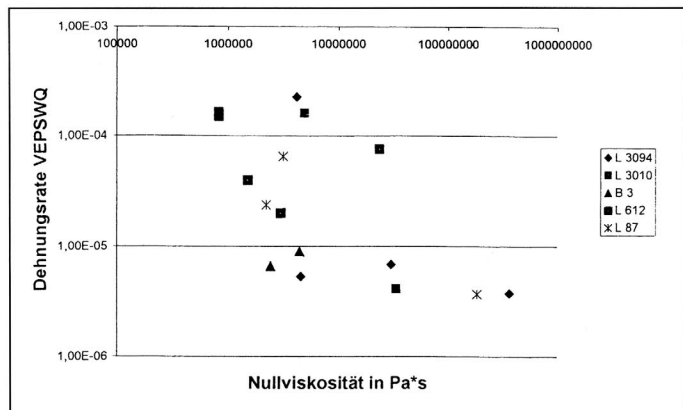
übereinstimmt, die aus dem Bitumentank von Mischanlagen entnommen wurden; weiterhin konnte auch keine Temperatur-Frequenz-Äquivalenz festgestellt werden. Alternativ zum komplexen Schubmodul und dessen Komponenten kann jedoch nach [21] zur Beurteilung des rheologischen Verhaltens die komplexe Viskosität und deren Komponenten verwendet werden. Die Abhängigkeit zwischen der absoluten Viskosität und der Frequenz wurde mit dem Cross-Modell [21] quantifiziert. Die Übereinstimmung zwischen den Messwerten und den mit dem Cross-Modell berechneten Werten ist in Bild 7 beispielhaft dargestellt.

Im Rahmen der Auswertung der Ergebnisse der Spaltzugschwellversuche wurde als Orientierungswert der Dehnungsrate der Wert $VEPSWQ = 0,000015$ ermittelt. Unterschreitet die Dehnungsrate diesen Grenzwert, so kann die Rissbildung eintreten. Im Hinblick auf die Nullviskosität bei $20\text{ }^\circ\text{C}$ bedeutet dies, dass dieser Wert kleiner ca. $\eta_0 = 1000000\text{ Pa}\cdot\text{s}$ sein sollte. Bei der „Festlegung dieses Grenzwertes“ wird jedoch der Einfluss der Mischgutzusammensetzung und der Hohlraumverhältnisse der geprüften Asphalte auf deren Widerstand gegen Rissbildung nicht berücksichtigt; aus der grafischen Darstellung dieser Abhängigkeit ist ersichtlich, dass auch Asphalte, deren Bitumen



7: Beispiel für die Übereinstimmung zwischen den Messwerten und den mit dem Cross-Modell berechneten Werten

Zur Beurteilung des rheologischen Verhaltens der Bitumen im Hinblick auf den Widerstand des Asphaltes gegen Spurrinnenbildung wurde die Nullviskosität verwendet; die Nullviskosität tritt bei der Winkelgeschwindigkeit Null auf. Aus der Abhängigkeit zwischen der im Spaltzugschwellversuch ermittelten Dehnungsrate im Wendepunkt der Querdehnung und der Nullviskosität kann, wie Bild 8 zeigt, ein Trend dahingehend abgelesen werden, dass mit zunehmender Nullviskosität die Dehnungsrate abnimmt.



8: Zusammenhang zwischen der mit dem Spaltzugschwellversuch ermittelten Dehnungsrate VEPSWQ im Wendepunkt der Querdehnung und der Nullviskosität η_0

eine höhere Nullviskosität aufweisen, einen größeren Widerstand gegen Rissbildung aufweisen können. Aus dem Vergleich dieser Abhängigkeit und der Abhängigkeit zwischen der Spurtiefe und der Nullviskosität zur Beschreibung des Widerstandes des Asphaltes gegen Spurrinnenbildung [22] wird die „Widersprüchlichkeit im Verhalten des Asphaltes“ dahingehend deutlich, dass mit steigender Nullviskosität der Widerstand des Asphaltes gegen Spurrinnenbildung zunimmt, aber der Widerstand des Asphaltes gegen Rissbildung abnimmt. Bei dieser Feststellung sollte jedoch berücksichtigt werden, dass das Verhalten des Asphaltes nicht nur durch das Bitumen, sondern auch durch dessen Mischgutzusammensetzung und die Hohlraumverhältnisse beeinflusst wird.

3.3 Zusammenhang zwischen den im Labor und auf den Untersuchungsstrecken ermittelten mechanischen Kennwerten

Gemäß dem Untersuchungsprogramm sollten Zusammenhänge zwischen den Schichtmoduli und den rheologischen Kennwerten der Asphalte und Bitumen ermittelt werden. Die Ausführungen im Forschungsbericht zeigen jedoch, dass aus den mit dem FWD aufgenommenen Daten der Kraft- und Verformungs-Zeit-Kurven keine Nachgiebigkeitskurven und dementsprechend auch keine absoluten Schichtmoduli sowie Phasenwinkel berechnet werden können. Die Grundlage zur Bildung eines Zusammenhanges zwischen den im Labor und auf den Untersuchungsstrecken ermittelten mechanischen Kennwerten ist somit nicht gegeben. Auf Grund der in dem Forschungsbericht

beschriebenen Problematik konnten für die aus den mit dem FWD gemessenen Verformungsmulden berechneten Schichtmoduli des Asphaltpaketes keine Temperatur-Frequenz-Äquivalenzen weder mit der WLF-Gleichung noch mit der Arrhenius-Funktion berechnet werden. Aus den Ausführungen im Abschnitt 3.2 ist ersichtlich, dass auch für die mit Wechselversuchen bestimmten absoluten Moduli der Asphalte und der Bitumen keine Temperatur-Frequenz-Äquivalenzen berechnet werden konnten. Aus den genannten Gründen war es nicht möglich, Zusammenhänge zwischen den Schichtmoduli und den rheologischen Kennwerten zu ermitteln, mit denen die Einflussgrößen Temperatur sowie Belastungsart und -frequenz auf die rückgerechneten Schichtmoduli des Zweischichtensystems quantifiziert werden können.

4. Folgerungen für die Praxis

Im Hinblick auf die „Möglichkeiten und Grenzen des FWD zur Beurteilung der Tragfähigkeit und Standfestigkeit von Fahrbahnbefestigungen“ kann aus der Beschreibung des Messverfahrens sowie den dargestellten Untersuchungsergebnissen und deren Auswertung gefolgert werden:

1. die Abhängigkeiten des Schichtmoduls des Asphaltpaketes von der Impulskraft und der Temperatur sind streckenspezifisch und deshalb können keine allgemein gültigen Umrechnungsformeln angegeben werden,
2. zum jetzigen Zeitpunkt können auf Grund des verwendeten Systems der Messdatenerfassung keine komplexen Übertragungsfunktionen berechnet werden und somit kann auch keine Strukturanalyse der Fahrbahnbefestigung durchgeführt werden; diese Strukturanalyse kann jedoch mit der Impulshammer-Messtechnik [13] durchgeführt werden, die zurzeit im Rahmen eines Forschungsauftrages [14] angewendet wird,
3. aus den mit dem FWD gemessenen Verformungs-Zeit-Kurven kann die Verformungsmulde bestimmt werden, jedoch muss überprüft werden, welchen Einfluss die zeitverschoebene Abtastung der neun Geofon-Messkanäle auf den Verlauf der Verformungsmulde ausübt,
4. aus der Verformungsmulde können unter Berücksichtigung des Punktes 1 Tragfähigkeitskennzahlen und Schichtmoduli berechnet werden.

Außerdem wird bestätigt, dass

5. zur Berechnung der Schichtmoduli nur Verfahren verwendet werden dürfen, die auf zweischichtigen Berechnungsmodellen basieren und
6. aus den berechneten Schichtmoduli keine Nutzungsdauern und Restnutzungsdauern einer Fahrbahnbefestigung abgeleitet werden können.

Die vordringlichsten Aufgaben bezüglich des Einsatzes des Falling-Weight-Deflectometers zur Feststellung der Schichtmoduli und der Tragfähigkeitskennzahlen sind kurz- bis mittelfristig:

1. Erstellung eines Arbeitspapiers, in dem die Bedingungen für die Messung und die Auswertung festgelegt sind,
2. Schaffung eines Bewertungshintergrundes bezüglich der Beurteilung der Tragfähigkeit und des Spannungs-Verformungszustandes von Fahrbahnbefestigungen.

In dem Forschungsbericht sind weiterhin Untersuchungsergebnisse über Spaltzugschwellversuche zur Bestimmung des Zeitfestigkeitsverhaltens und über Biegegewchselversuche zur Bestimmung des komplexen E-Moduls der Asphalte enthalten; das rheologische Verhalten der extrahierten Bitumen wurde mittels Schubwechselversuchen im Rheometer geprüft. Aus den Untersuchungsergebnissen ist ersichtlich, dass mit dem Spaltzugschwellversuch das Zeitfestigkeitsverhalten von Asphalt prüftechnisch angesprochen werden kann. Im Rahmen zukünftiger Forschungsvorhaben sollte die in dem Forschungsbericht und der Literatur aufgezeigte Problematik des Wechselversuches im Vergleich zum Schwellversuch behandelt werden; weiterhin sollten für die Prüfverfahren Randbedingungen ermittelt werden, die mit den in der Fahrbahnbefestigung auftretenden realen Beanspruchungen übereinstimmen.

Literaturverzeichnis:

- [1] Baum, Behr, Buseck: Die Reaktion von Straßen bei zeitabhängiger Belastung, Teil 1 und Teil 2, Wissenschaftliche Berichte, Heft 4, 1965, Bundesanstalt für Straßenbau, Köln
- [2] Merkblatt über die mechanischen Eigenschaften von Asphalt, Ausgabe 1985, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln
- [3] Durth, Grätz, Suß: Überprüfung praktischer Methoden zur Messung der Tragfähigkeit und Einschätzung der Restnutzungsdauer, insbesondere für Straßen auf dem Gebiet der neuen Bundesländer, FE 04.162, Versuchsanstalt für Straßenwesen der TH Darmstadt, 1995
- [4] Schrüfer: Signalverarbeitung, Carl Hanser Verlag, München/Wien, 1992
- [5] Waller, Schmidt: Schwingungslehre für Ingenieure, BI Wissenschaftsverlag, Mannheim, 1989
- [6] Strukturen prüfen, Brül und Kjaer, Quickborn, 1989
- [7] Foinquinos, Roesset, Stokoe II: Response of Pavement Systems to Dynamic Loads Imposed by Nondestructive Tests, Transportation Research Record (TRB), H. 1504, 1995
- [8] Jendia: Bewertung der Tragfähigkeit von bituminösen Straßenbefestigungen, Veröffentlichungen des Institutes für Straßen- und Eisenbahnenwesen der Universität Karlsruhe (TH), Heft 45, 1995
- [9] Jendia: Analyse des Falling-Weight-Deflectometers (FWD) und seine Interpretationsmöglichkeiten, Fahrzeug und Fahrbahn, FGSV-Tagung am 10. und 11. Oktober 1995 in Karlsruhe
- [10] Hothan: Möglichkeiten und Grenzen von Deflektionsmessungen, persönliche Mitteilung an den Verfasser, 1995
- [11] Grätz: Widerstand von Asphalt gegen Rissbildung – prüftechnische Ansprache mit dem Spaltzugschwellversuch, Prüfung und Bewertung von Konstruktionsschichten im Straßenbau, Schriftenreihe des Lehrstuhls Straßenbau, Heft 7, TU Dresden, 1998
- [12] Funk, Kretz, Lindner, Wilmers: Zerstörungsfreie Erkundung des Straßenaufbaus mit Hilfe des Impulsradars, Straße und Autobahn, Heft 8/1996
- [13] Grätz: Strukturanalyse von Fahrbahnbefestigungen mit der Impulshammer-Messtechnik – Beispiel: ungerissene und gerissene Fahrbahnbefestigung, Versuchsanstalt für Straßenwesen der TU Darmstadt, 1997, unveröffentlicht
- [14] Grätz: Langzeitverhalten von Instandsetzungsmaßnahmen – Hauptstudie, FE 07.176, Versuchsanstalt für Straßenwesen der TU Darmstadt, in Bearbeitung
- [15] Horz: Die Datenbank „Untersuchungsstrecken“ (Handbuch), Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach, 1991
- [16] Francken, Verstraeten: Methods for predicting moduli and fatigue laws of bituminous road mixes under repeated bending, Transportation Research Record 515, 1974
- [17] Bartolomaeus, Schickl: Materialkundliche Untersuchungen über das strukturelle Verhalten von Asphalt im spannungskontrollierten Biegeversuch unter realistischer Beanspruchung, Projekt Nr. 96341, Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach, 1998
- [18] Arand: Gedanken zur Ermüdung von Verkehrsflächenbefestigungen aus Asphalt bei Kälte, Festschrift Alexander Gerlach, Mitteilungen aus dem Fachgebiet Konstruktiver Straßenbau im Institut für Verkehrswirtschaft der Universität Hannover, Heft 15, 1993
- [19] Hiersche, Freund, Codjia, Vassiliou: Erarbeitung eines Bewertungshintergrundes für das Prüfverfahren „Schichtenverbund nach Leutner“ und Bestimmung der Präzision, FE 07.146, Universität Karlsruhe, 1994
- [20] Bellin: Die Ergebnisse der Bitumen- und Asphaltforschung des Strategic Highway Research Program SHRP, Bitumen, Heft 2/1995
- [21] Schramm: Einführung in Rheologie und Rheometrie, Gebrüder Haake GmbH, Karlsruhe, 1995
- [22] Höppel: Neue Qualitätskriterien für Normbitumen und PmB, ARBIT-Symposium '99, Würzburg