

Weiterentwicklung von Stoffmodellen zur Voraussage des Verformungswiderstandes und Ermüdungsverhaltens von Asphaltbefestigungen

FA 4.187

Forschungsstelle: Technische Universität Braunschweig, Institut für Straßenwesen (Prof. Dr.-Ing. R. Leutner)

Bearbeiter: Lorenzl, H. / Schmoeckel, K.

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

Abschluss: März 2005

1. Aufgabenstellung

Seit der Baustoff Asphalt für die Befestigung von Verkehrswegen eingesetzt wird, können zwei verschiedene Schadensformen beobachtet werden, die zu Einschränkungen der Nutzungsdauer führen.

Die bisherige Methodik der Bemessung erlaubt es nicht, eine auf den speziellen Einzelfall zugeschnittene Straßenbefestigung zu konzipieren, die verkehrlich, wirtschaftlich, umwelt- und sicherheitstechnisch optimiert ist. Daher wurde dieses Forschungsvorhaben initiiert.

Zur Beschreibung des Ermüdungsverhaltens sollen bereits bestehende Stoffmodelle weiterentwickelt und mit Hilfe von Versuchsergebnissen validiert werden. Neben den Ergebnissen des einaxialen Zug-Schwell-Versuchs sollen die Versuchsergebnisse des Spaltzugversuchs als Grundlage zum weiterentwickelten Ermüdungsmodell herangezogen werden.

Zur Modellierung eines Stoffgesetzes für den Verformungswiderstand einer Asphaltbefestigung werden Spaltzugversuche und Triaxialversuche durchgeführt. Um die Praxisnähe des Stoffmodells überprüfen zu können, werden zusätzlich großmaßstäbliche Spurbildungsversuche durchgeführt. Da diese sehr aufwändig sind, werden weiterhin im Laboratorium Verformungsversuche im Spurbildungsgerät gefahren.

Folgende Forschungsinstitutionen waren bei der Bearbeitung des vom Bundesministerium für Verkehr-, Bau- und Wohnungswesen geförderten Forschungsvorhabens beteiligt:

Forschungsstelle	Bearbeiter	Aufgaben
TU Braunschweig, Institut für Straßenwesen	Prof. Dr.-Ing. Rolf Leutner; Dr.-Ing. Holger Lorenzl, Dipl.-Ing. Konrad Schmoeckel	Projektleitung, Zug-Schwell-Versuche, Triaxialversuche
BTU Cottbus, Lehrstuhl Straßenbau	Dipl.-Ing. Janin Donath	Versuche im Spurbildungsgerät
TU Darmstadt, Institut für Verkehr; Fachgebiet Straßenwesen mit Versuchsanstalt	Prof. Dr.-Ing. J. Stephan Bald, Dr.-Ing. Bernd Grätz, Dipl.-Ing. Steffen Riedl	Spaltzugversuche
TU Dresden, Lehrstuhl für Statik	Prof. Dr.-Ing. Bernd Möller, Dr.-Ing. Markus Oeser	Modellerstellung
TU Dresden, Lehrstuhl für Straßenbau	Prof. Dr.-Ing. Frohmut Wellner; Dr.-Ing. Sabine Werkmeister	Spaltzugversuche
TU München, Lehrstuhl und Prüfam für Bau von Landverkehrswegen	Prof. Dr.-Ing. Günther Leykauf, Dipl.-Ing. Christoph Simon	Bau der Versuchsstraße, Spurbildungsversuche im Großmaßstab

2. Untersuchungsmethodik

Zur Validierung des weiterentwickelten Stoffmodells wurden verschiedene Versuche an Asphalt durchgeführt. Damit bei allen Versuchen Asphaltmaterial mit gleichen Stoffeigenschaften untersucht werden konnte, wurde auf dem Betriebsgelände der Asphalt-Mischanlage ISAR-Asphalt in Aschheim bei München eine Versuchsstraße mit herkömmlichen Asphaltfertigern und Walzen angelegt, aus der Bohrkern und Probeplatten herausgesägt wurden. Für zusätzliche Prüfungen im Spurbildungsgerät mit den Prüfbedingungen Gummirad/Luft wurden aus dem beim Bau der Probestrecke verwendeten Asphaltmischgut Probeplatten mit dem Walzsegmentverdichter im Labor hergestellt. Bei den aus der Probestrecke entnommenen Probekörpern wurden trotz strikter Vorgaben und intensiver Überwachung des Einbau- und Verdichtungsprozesses hohe Schwankungen der Schichtdicke und des Hohlraumgehaltes festgestellt, die deutliche Auswirkungen auf die Prüfergebnisse hatten.

Zur Ansprache des Verformungsverhaltens wurden neben den Spurbildungsversuchen im Großmaßstab und im Spurbildungsgerät auch Triaxialversuche mit dynamischer Radialspannung (Stützdruck) durchgeführt.

Die Triaxialversuche wurden am Institut für Straßenwesen der TU Braunschweig bei Temperaturen von + 26 °C, + 38 °C und + 50 °C durchgeführt. Zur Herstellung der Probekörper wurden aus der Versuchsstrecke entnommene Bohrkern mit einem Durchmesser von 100 mm schichtweise getrennt. Während bei der Prüfung des Asphalttragschichtmaterials zylindrische Probekörper mit einer Höhe von 70 mm Verwendung fanden, wurden die Probekörper aus Deck- und Binderschicht in der jeweils vorliegenden Schichtdicke geprüft. Dabei wurden die axialen und radialen Verformungen während der 150 000 aufgetragenen Lastwechsel erfasst. Als axiale Oberlast wurde bei allen Versuchen einheitlich eine Spannung von 0,8 MPa aufgebracht, während die mit einer Phasendifferenz zum axialen Spannungsimpuls von 10 ms aufgetragene Radialspannung in mehreren Stufen variiert wurde.

Am Lehrstuhl Straßenbau der BTU Cottbus wurden Spurbildungsversuche im Spurbildungsgerät unter Verwendung eines Gummirads im auf 50 °C temperierten Luftbad durchgeführt. Dabei wurden zum einen die im Labor hergestellten Platten der Einzelgemische und zum anderen aus der Probestrecke entnommene Platten der gesamten Asphaltbefestigung geprüft. Durch die genaue Aufnahme der Oberfläche der Prüfplatten vor und nach den Spurbildungsversuchen konnten die bleibenden Verformungen der Spurrinne und der Verdrückungen genau dokumentiert werden.

Um die Materialverschiebungen innerhalb der Probeplatten während der Spurbildungsversuche zu erfassen, wurden an mittig geschnittenen Asphaltprobeplatten gestaffelte Spurbildungsversuche mit 5 Belastungszyklen mit jeweils 4 000 Überrollungen durchgeführt. Dabei wurden die Schnittkanten der Asphaltprobeplatten vor der ersten Beanspruchung und nach jedem Zyklus mittels Scanner aufgezeichnet. Durch die Überlagerung der Querschnitte nach unterschiedlichen Lastwechselzahlen konnten Kornverschiebungen innerhalb des Asphaltpaketes sichtbar gemacht werden.

Am Lehrstuhl und Prüfmittel für Bau von Landverkehrswegen der TU München wurden Spurbildungsversuche im Großmaßstab durchgeführt. Dabei wurden aus der Versuchsstraße geschnittene Platten (1 400 x 1 400 mm²) mit in der Praxis eingesetzten Lkw-Reifen belastet. Neben jeweils einem häufig verwendeten Lenkachs- und Antriebsachsreifen wurde auch ein Einzelbreitreifen (Super-Single-Tire) eingesetzt. Durch die Variation der Radlast und des Reifenfülldruckes wurde das Verformungsverhalten der Asphaltbefestigung bei jedem Reifen mit jeweils drei Belastungskombinationen untersucht. Die Probeplatten wurden dabei durch Bestrahlen der Oberfläche auf einen Temperaturgradienten temperiert, der etwa 30-mal im Jahr vorkommt.

Für die Spaltzugprüfungen wurden aus der Versuchsstraße entnommene Bohrkern (Ø 150 mm) in die Einzelschichten zersägt. Damit die Spaltzugprüfungen auch am ca. 4,0 cm dicken Splittmastixasphalt sachgerecht durchgeführt werden konnten, mussten aus den vorliegenden Bohrkernen Zylinder mit einem Durchmesser von 100 mm herausgeschnitten werden.

Unter Variation der Oberspannung in jeweils drei Stufen wurden die Spaltzugversuche bei Prüftemperaturen von -5 °C, +5 °C und +20 °C durchgeführt. Die Versuche bei -5 °C wurden zudem mit und ohne kryogene Unterspannungen gefahren. Bei 20 °C wurden zusätzlich zu dem nach DIN EN 12697 Teil 2 vorgeschlagenen Belastungszyklus (Lastimpulsdauer: 0,1 s; Lastpause: 0,4 s) Versuche mit Lastpausen von 1,5 s und 0,1 s sowie einer Impulslänge von 0,2 s bei einer Lastpause von 0,4 s durchgeführt.

Die axialen Zug-Schwell-Versuche wurden bei Temperaturen von -15 °C, -2,5 °C und +10 °C durchgeführt. Zur Ermittlung der bei den tiefen Temperaturen aufzubringenden Unterspannungen wurden zuvor Abkühlversuche gefahren, um die kryogenen Spannungen zu erfassen. Die damit überlagerten Spannungsdifferenzen wurden in drei Stufen variiert. Alle Versuche erfolgten mit einer Lastimpulsdauer von 0,1 s ohne Lastpause.

Zur Auswertung der Ergebnisse aus den Zug-Schwell-Versuchen und Spaltzugversuchen wurden verschiedene Verfahren angewendet. In Bild 1 ist anhand der Versuchsergebnisse aus einem Zug-Schwell-Versuch an einem Asphaltbinder die auf dem Konzept der dissipierten Energie basierte Ermittlung des Zeitpunktes der Mikro- und Makrorissentstehung dargestellt. Dazu wird das Produkt aus E-Modul und Lastwechselzahl über der Lastwechselzahl aufgetragen. Aus dem Kurvenverlauf können Änderungen des Materialverhaltens auf Grund der Rissbildung abgeleitet werden.

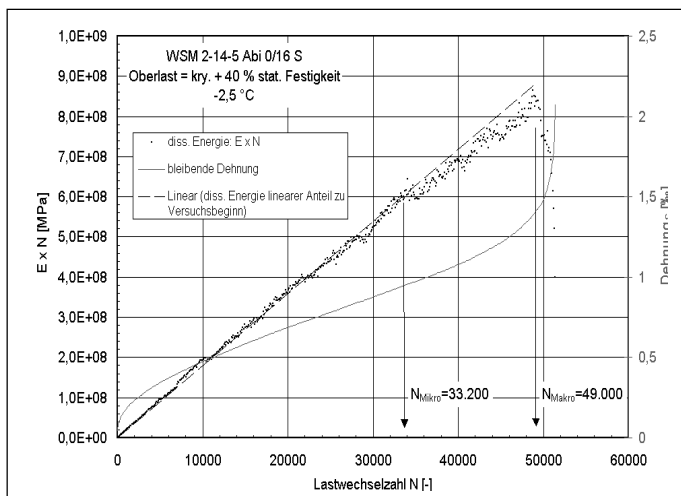


Bild 1: Ermittlung der ermüdungsrelevanten Lastwechselzahlen N_{Mikro} , N_{Makro} und N_{br} am Beispiel eines Zug-Schwell-Versuchs mit einem Abi 0/16 S bei -2,5 °C

3. Untersuchungsergebnisse

3.1 Ergebnisse der Triaxialversuche

Bei allen in den Triaxialversuchen gemessenen Größen wurde eine starke Abhängigkeit von der eingestellten Radialspannung festgestellt. Exemplarisch sind in Bild 2 die in den Triaxialversuchen mit der ATS 0/22 CS ermittelten Messwerte der bleibenden axialen Dehnung $\epsilon_{\text{pl,ax}}$ dargestellt. Es ist eine deutliche Abhängigkeit der bleibenden Verformung von der Radialspannung zu erkennen, die durch Potenzfunktionen beschrieben werden kann. Mit dem Anstieg der Versuchstemperatur wächst der Einfluss der Radialspannung auf die bleibenden axialen Verformungen, verdeutlicht durch einen steileren Verlauf der Potenzfunktionen.

Zum Vergleich der geprüften Asphaltarten untereinander ist in Bild 3 die axiale Dehnungsrate $\delta\epsilon_{\text{ax}}$ am Versuchsende bei 38 °C dargestellt. Darin ist deutlich zu erkennen, dass der Asphaltbinder auch bei sehr geringen Radialspannungen den geringsten Verformungszuwachs aufweist. Bei Radialspannungen unter 0,13 MPa ($\hat{=}$ 1,3 bar) weist das Asphalttragschichtmaterial die höchsten Dehnungsraten am Versuchsende auf, während sich der SMA 0/11 S bei höheren Radialspannungen stärker verformt. Die hohen Dehnungsraten bei geringen Radialspannungen zeigen, dass in diesen Triaxialversuchen während der aufgetragenen 150 000 Lastwechsel der tertiäre Schädigungsbereich erreicht wird.

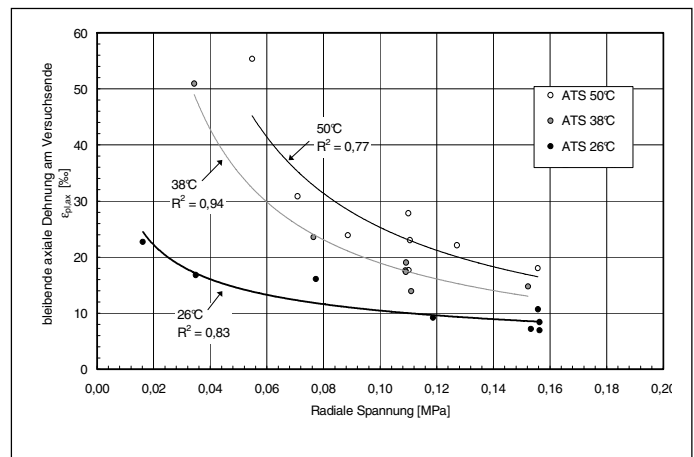


Bild 2: Bleibende axiale Dehnung $\epsilon_{\text{pl,ax}}$ in den Triaxialversuchen an der ATS 0/22 CS in Abhängigkeit der Radialspannung σ_{rad}

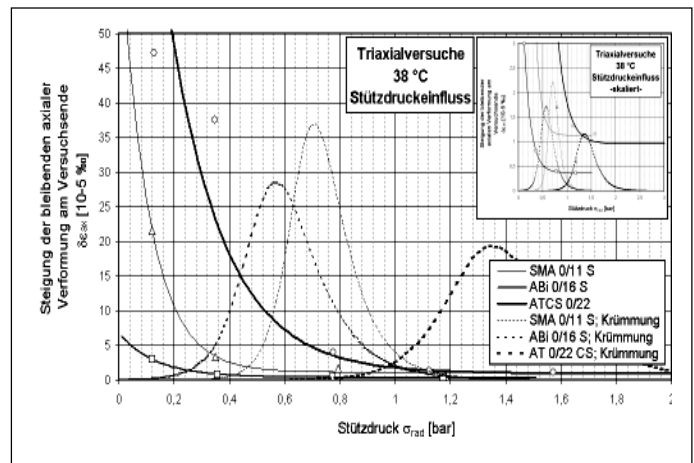


Bild 3: Steigung der bleibenden axialen Dehnung am Versuchsende in Abhängigkeit des Stützdruckes, sowie Krümmung der Regressionsfunktion bei 38 °C

Bei geringen Radialspannungen weisen Deck- und Tragschichtmaterial hohe bleibende Dehnungen auf, während das Asphaltbindermaterial deutlich verformungsresistenter ist. Mit zunehmender Radialspannung nehmen die Verformungen beim Splittmastixasphalt schneller ab als beim Binder- und Tragschichtmaterial. Beim Splittmastixasphalt reicht schon eine geringe Radialspannung aus, um die axialen Dehnungen zu reduzieren. Während vertikale Lasten bei Binder- und Tragschicht durch die abgestuften Körnungen hauptsächlich nach unten abgetragen werden, werden sie beim Splittmastixasphalt durch das von Ausfallkörnungen geprägte Gesteinsgerüst zu großen Anteilen horizontal abgeführt. Bei sehr geringen Radialspannungen können sich die Gesteinskörner des SMA nicht abstützen, wodurch hohe Axialdehnungen gemessen werden.

Zur Ermittlung der Materialkenngrößen absoluter Elastizitätsmodul E und Querdehnzahl μ wurden Gleichungen aufgestellt, die auch die im Triaxialversuch aufgebrauchten Radialspannungen berücksichtigen. Tabelle 1 zeigt die mit der darin angegebenen Gleichung berechneten E-Moduln, für die keine Abhängigkeit von der Radialspannung festgestellt werden konnte.

Tabelle 1: Mittelwerte und Variationskoeffizienten der im Triaxialversuch ermittelten absoluten Elastizitätsmoduln

Verwendete Gleichung		$E = \frac{\sigma_{ax}^2 + \sigma_{ax} \cdot \sigma_{rad} - 2 \cdot \sigma_{rad}^2}{\epsilon_{ax} \cdot (\sigma_{ax} + \sigma_{rad}) - 2 \cdot \epsilon_{rad} \cdot \sigma_{rad}}$			
Versuchstemperatur		26 °C	38 °C	50 °C	
E-Moduln	SMA 0/11 S	Mittelwert [MPa]	386	282	272
		Var.-Koeff. [%]	10	6	11
	ABi 0/16 S	Mittelwert [MPa]	449	360	356
		Var.-Koeff. [%]	6	5	12
	ATS 0/22 CS	Mittelwert [MPa]	635	647	516
		Var.-Koeff. [%]	6	5	8

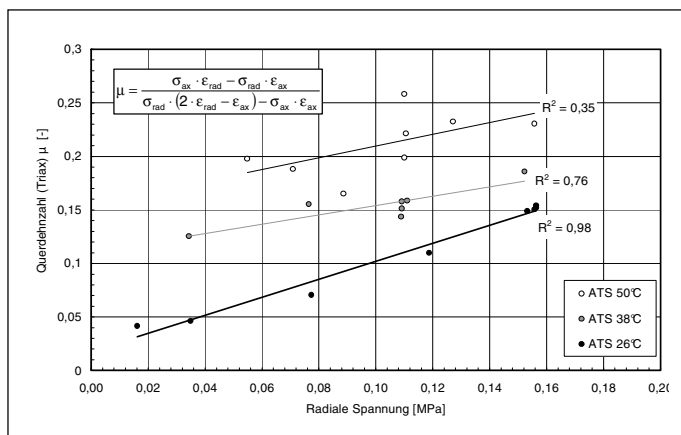


Bild 4: Aus den Ergebnissen der Triaxialversuche an der ATS 0/22 CS ermittelte elastische Querdehnzahlen μ in Abhängigkeit der Radialspannung

In Bild 4 sind die berechneten Querdehnzahlen und die verwendete Gleichung dargestellt. Mit zunehmender Radialspannung ist ein Anstieg der Querdehnzahl zu erkennen. Weiterhin wird deutlich, dass die Querdehnzahlen mit steigender Temperatur höhere Werte annehmen. Durch das bei höherer Temperatur weichere Bindemittel entstehen höhere radiale Dehnungen, die zu größeren Querdehnzahlen führen.

3.2 Ergebnisse der Spurbildungsversuche im Spurbildungsgerät

In Tabelle 2 sind die nach Abschluss der Spurbildungsversuche gemessenen Spurrinntiefen absolut und bezogen auf die jeweilige Plattenhöhe sowie die nach 10 000 und 20 000 Überrollungen gemessenen Spurraten zusammengestellt. An den gemessenen relativen Spurrinntiefen ist zu erkennen, dass der Asphaltbinder deutlich verformungsresistenter ist als der Splittmastixasphalt und die Asphalttragschicht.

Tabelle 2: Spurrate I (2 000–10 000 Ü.), Spurrate II (10 000–20 000 Ü.) und Spurrate III (2 000–20 000 Ü.) sowie relative Spurrinntiefe nach 10 000 und 20 000 Überrollungen

Probplatten	Spurrate			Relative Spurrinntiefe	
	I	II	III	nach 10.000 Übr.	nach 20.000 Übr.
	μm / Ü			[%]	
Splittmastixasphalt 0/11S (Platte 1)	0,059	0,024	0,039	5,38	5,98
Splittmastixasphalt 0/11S (Platte 3)	0,031	0,012	0,021	5,09	5,38
Asphaltbinder 0/16S (Platte 2)	0,0525	0,018	0,033	3,42	3,78
Asphaltbinder 0/16S (Platte 3)	0,029	0,012	0,019	2,97	3,04
Asphalttragschicht 0/22 CS (Platte 1, 12,0 cm)	0,370	0,175	0,262	6,17	7,63
Asphalttragschicht 0/22 CS (7,0 cm)	0,151	0,056	0,098	5,28	6,07
Schichtkombination (Platte 1,2 und 5)	0,119	0,065	0,089	1,15	1,47
Schichtkombination (Platte 1 und 2)	0,125	0,069	0,094	1,04	1,38

Die relativen Verformungen der Probplatten der Schichtenkombination fallen sehr niedrig aus. Auch die Absolutwerte der Spurrinntiefe liegen nur leicht über denen des einzeln geprüften Deckschichtmaterials. Daraus kann abgeleitet werden, dass im Spurbildungsversuch die oberflächennahen Bereiche deutlich stärker beansprucht werden als die tiefer in der Befestigung liegenden Schichten. Die Vertikallast unter dem Prüfrad verteilt sich mit zunehmender Tiefe über einen breiter werdenden Bereich, wodurch die Asphaltbinder- und die Asphalttragschicht nur noch durch eine geringere Spannung beansprucht werden. Spurbildungsversuche auf Probplatten aus Binder- und Tragschichtmaterial weisen demnach eine deutlich zu hohe Beanspruchung auf, die nicht den Belastungen in der Realität entspricht.

In Bild 5 sind die Ergebnisse der Spurbildungsversuche und der Triaxialversuche am ABi 0/16 S im gleichen Diagramm dargestellt. Dabei wurden aufgrund der unterschiedlichen Belastungsart und -größe die in den beiden Versuchsarten gemessenen Dehnungen unterschiedlich skaliert aufgetragen. Die Dehnungsverläufe der Spurbildungsversuche können gut mit den Verformungskurven der Triaxialversuche bei geringer Radialspannung verglichen werden. Dies deutet darauf hin, dass die Asphaltproben im Spurbildungsversuch eine Beanspruchung erfahren, die im Triaxialversuch bei niedrigen Radialspannungen erreicht wird. Da diese fortschreitende Schädigung als nicht praxisrelevant einzustufen ist, kann daraus die Folgerung abgeleitet werden, dass die im Spurbildungsgerät aufgebrauchte Beanspruchung nicht zur Ermittlung von in einem Stoffmodell verwertbaren Materialkenngrößen geeignet ist. Trotzdem eignet sich der Spurbildungsversuch für den relativen Vergleich zur Ansprache des Verformungsverhaltens verschiedener Asphalte.

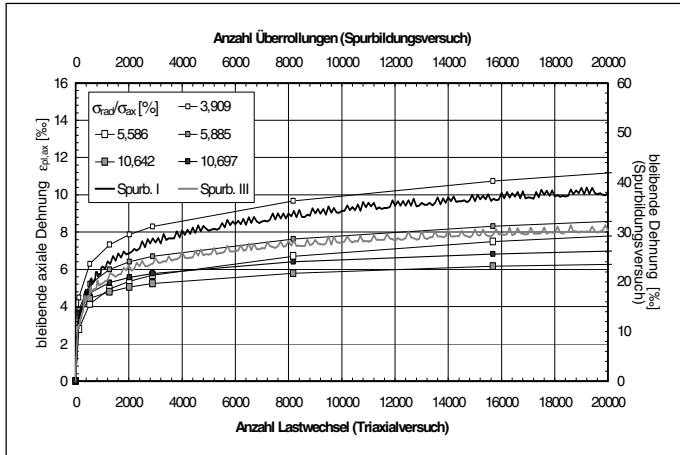


Bild 5: Einordnung des Verformungsverlaufes der Prüfungen des ABi 0/16 S im Spurbildungsversuch in die Ergebnisse des dynamischen Triaxialversuchs bei 50°C mit unterschiedlich skalierten Dehnungsachsen – 0 bis 20.000 Lastwechsel bzw. Überrollungen

Durch die Überlagerung der während der gestaffelten Spurbildungsversuche aufgenommenen Querschnitte der Probekörper kann der Materialtransport im geprüften Probekörper während des Spurbildungsversuches visualisiert werden. In Bild 6 ist exemplarisch der nach dem Spurbildungsversuch aufgenommene Querschnitt der Asphaltbefestigung mit der Querschnittsfotografie der unbelasteten Platte gezeigt. Während in der Binder- und Tragschicht keine Kornumlagerungen zu erkennen sind, weichen die Gesteinskörnungen des Deckschichtmaterials der Belastung vertikal und seitlich aus.

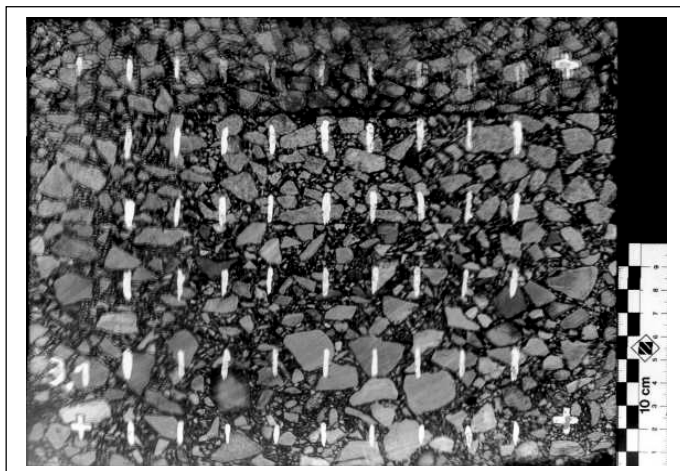


Bild 6: Überlagerung des nach 20.000 Überrollungen im Spurbildungsgerät aufgenommenen Querschnittes mit dem unbelasteten Ausgangsquerschnitt der Ausbauplatte

3.3 Ergebnisse der Spurbildungsversuche im Großmaßstab

Exemplarisch für die Spurbildungsversuche im Großmaßstab werden im Folgenden die Ergebnisse der Versuche mit dem Lenkachsreifen 315/80 R22,5 aufgezeigt. In Bild 7 ist die Deformationsentwicklung dieser Versuche dargestellt. Aufgrund der großen Abmessungen des Reifens mussten die Versuche spurtreu durchgeführt werden, sodass sich die einzelnen Profilrinnen deutlich in der entstandenen Deformationsmulde abzeichnen.

Bild 8 zeigt die bei den drei nacheinander bei Variation der Radlast und des Fülldruckes durchgeführten Versuchen ermittelten Spurraten.

Zusätzlich ist die Reifenaufstandsfläche des Reifens im Diagramm dargestellt. Um den unterschiedlich großen Aufstandsbereichen A bis E des Reifens gerecht zu werden, wurde die Deformationsentwicklung in diesem Fall getrennt nach den drei Reifenbereichen ausgewertet.

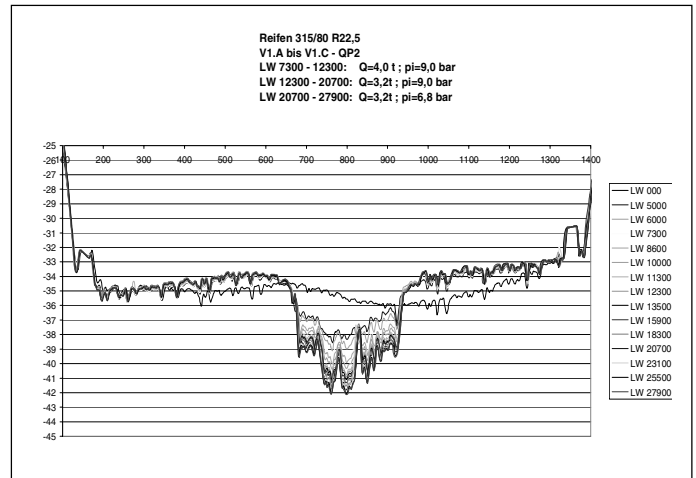


Bild 7: Deformationsentwicklung der Asphaltoberfläche in Versuch 1 Querprofil 2

Deutlich ist der Einfluss der unterschiedlichen Radlast/Fülldruck-Kombinationen zu erkennen. Weiterhin zeigen die Ergebnisse, dass die einzelnen Reifenabschnitte quer zur Überrollrichtung zu unterschiedlichen Spurbildungsraten führen.

In Bild 8 ist die im Spurbildungsgerät bei Belastung des gesamten Asphaltpakets gemessene Spurrate als horizontale Linie eingetragen. Die Flächenpressung bei den Versuchen im Spurbildungsgerät wurde zu 0,876 MPa ermittelt. Es liegt somit eine höhere Flächenpressung vor als bei den Versuchen im Großmaßstab.

Die Einflüsse des Reifentyps sowie die unterschiedlichen Belastungen unter den verschiedenen Zonen der Reifen können durch die Versuche im Spurbildungsgerät nicht nachgestellt werden. Weiterhin zeigt der Vergleich der Verformungsentwicklung in den Versuchen im Großmaßstab ($p_m = 0,543$ MPa bis $p_m = 0,755$ MPa) mit den Ergebnissen aus den Versuchen im Spurbildungsgerät ($p_m = 0,876$ MPa), dass Radlast/Fülldruck-Kombinationen mit hoher mittlerer Flächenpressung zu deutlich stärkeren Verformungen führen, als sie in den Versuchen im Spurbildungsgerät erzeugt wurden.

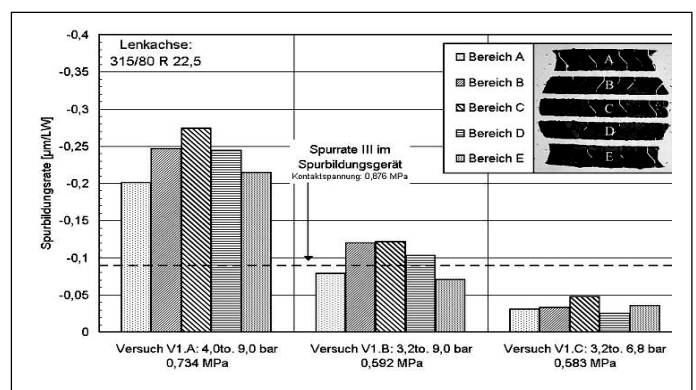


Bild 8: Spurbildungsraten der großmaßstäblichen Versuche mit einem Lenkachsreifen 315/80 R22,5 in den verschiedenen Reifenaufstandsbereichen im Vergleich mit der Verformungsrate im Spurbildungsgerät

3.4 Ergebnisse der dynamischen Spaltzugversuche

Unterschiede im Ermüdungsverhalten können anhand von Ermüdungskurven aufgezeigt werden, in denen die Beanspruchung (aufgebrachte Spannung oder gemessene elastische Dehnung) einer den Ermüdungszustand (Mikro-/Makrorissbildung oder Bruch) beschreibenden Lastwechselzahl gegenübergestellt wird. Dabei hat sich gezeigt, dass die dynamischen Spaltzugversuche gut mit dehnungsabhängigen Wöhler-Linien auswertet werden können, in denen Einflüsse aus Variationen des Hohlraumgehaltes und der Temperatur zum Teil ausgeglichen werden. Exemplarisch zeigt Bild 9 die bei den unterschiedlichen Versuchsbedingungen ermittelten dehnungsabhängigen Ermüdungskurven der dynamischen Spaltzugversuche am ABI 0/16 S. Deutlich ist der Einfluss der Unterspannung auf die bei -5 °C ermittelten Versuchsergebnisse zu erkennen. Werden Versuche mit Unterspannung in Höhe der kryogenen Spannungen gefahren, nimmt die Ermüdungsresistenz stark ab. Der Einfluss verschiedener Lastpausen (in einem Bereich von 0,1 s bis 1,5 s) auf das Ermüdungsverhalten ist bei den untersuchten Asphaltgemischen bezüglich des Beginns der Makrorissbildung als relativ gering einzuschätzen. Tendenziell führen längere Lastpausen zu höheren ertragbaren Lastwechselzahlen.

Die Parameter der Potenzgleichungen der dehnungsabhängigen Wöhlerlinien können in Abhängigkeit von der Prüftemperatur formuliert werden. Dadurch könnten die Ergebnisse auf weitere, nicht im Versuchsprogramm untersuchte Temperaturen und Belastungen extrapoliert werden. Aus Bild 10 können die elastischen Anfangsdehnungen abgelesen werden, die im Spaltzugversuch mit der ATS 0/22 CS bei verschiedenen Temperaturen zu bestimmten Lastwechselzahlen zur Bildung eines Makrorisses führen.

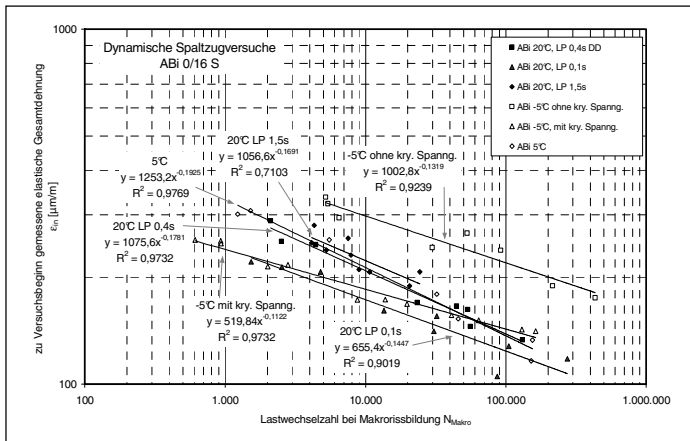


Bild 9: Anfängliche elastische Dehnung in Abhängigkeit von der Lastwechselzahl für den ABI 0/16

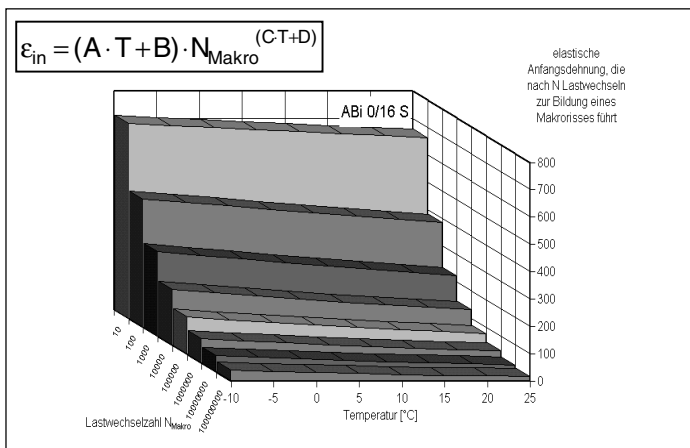


Bild 10: Elastische Anfangsdehnung, die im dynamischen Spaltzugversuch am ABI 0/16 S nach N_{Makro} Lastwechseln zur Bildung eines Makrorisses führt in Abhängigkeit der Temperatur

Die anhand der Ergebnisse der dynamischen Spaltzugversuche ermittelten Elastizitätsmoduln zeigen eine Abhängigkeit von der Beanspruchungsgröße und der Lastpausendauer. Mit zunehmender Belastung nimmt der in den Versuchen ermittelte Elastizitätsmodul zu. Eine Verlängerung der Lastpause zwischen zwei Lastimpulsen bewirkt tendenziell eine Abnahme des Elastizitätsmoduls.

3.5 Ergebnisse der Zug-Schwell-Versuche

Die Ergebnisse der Zug-Schwell-Versuche zeigen eine starke Abhängigkeit vom Verdichtungsgrad des Probematerials. In Bild 11 sind die Lastwechselzahlen bei Makrorissbildung in Abhängigkeit des Hohlraumgehaltes des untersuchten Probekörpers aus ABI 0/16 S aufgetragen. Deutlich ist ein Anstieg der ertragbaren Lastwechselzahl mit geringerem Hohlraumgehalt erkennbar. Mit sinkender Prüftemperatur nimmt die Abhängigkeit, die durch eine Potenzfunktion beschrieben werden kann, zu.

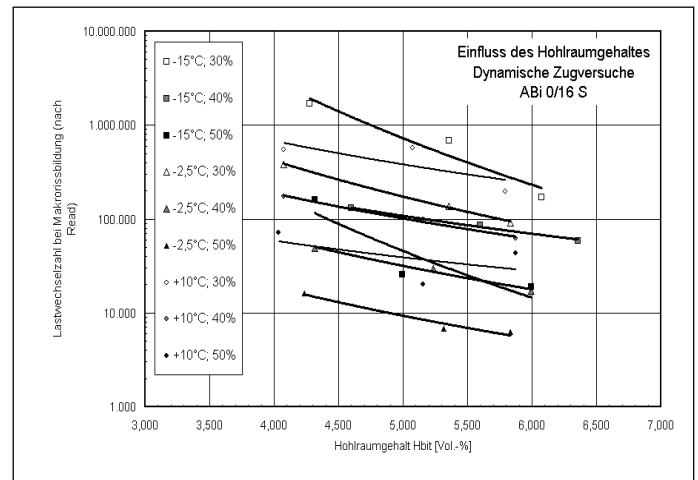


Bild 11: Einfluss des Hohlraumgehaltes H_{bit} auf die Bruchlastwechselzahl N_{br} bei den axialen Zug-Schwell-Versuchen am ABI 0/16 S

In Bild 12 sind die dehnungsabhängigen Wöhler-Linien der drei untersuchten Materialien und Temperaturen dargestellt. Es ist zu erkennen, dass für den untersuchten Beanspruchungsbereich mit zunehmender Temperatur eine geringere Ermüdungsresistenz zu verzeichnen ist.

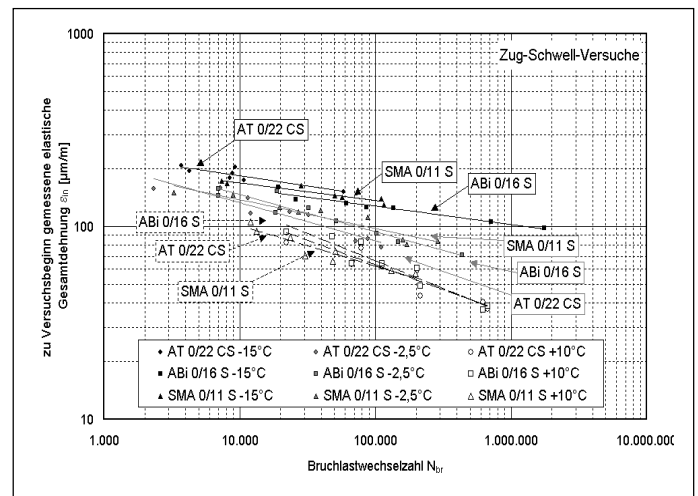


Bild 12: Wöhler-Linien der Bruchlastwechselzahl in Abhängigkeit von der elastischen Gesamtdehnung bei Versuchsbeginn für Zug-Schwell-Versuchsergebnisse

Auch die Ergebnisse der Zug-Schwell-Versuche lassen sich mit einer temperaturabhängigen Potenzfunktion beschreiben, die bei Bild 13 angewendet wurde. Deutlich ist bei den Kurven für

hohe Lastwechselzahlen zu erkennen, dass die ertragbare Anfangsdehnung bei einer bestimmten Minus-Temperatur einen Maximalwert aufweist. Wird diese Temperatur unterschritten, fällt die Resistenz gegen Ermüdung stark ab und bereits geringe Anfangsdehnungen führen zur Bildung eines Makrorisses.

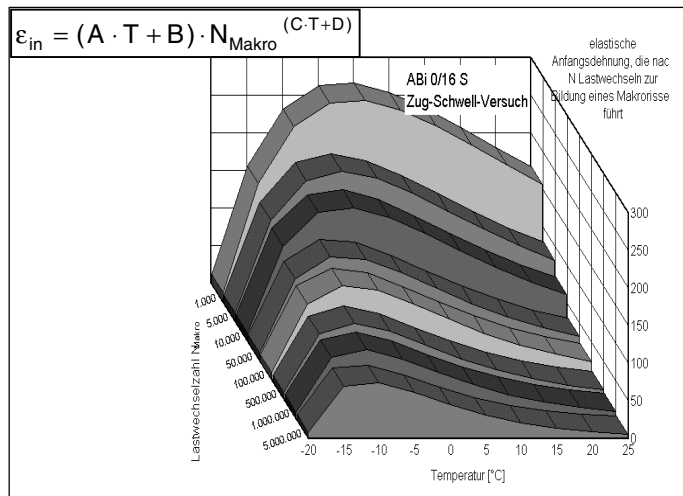


Bild 13: Elastische Anfangsdehnung, die im Zug-Schwell-Versuch am ABI 0/16 S nach N_{Makro} Lastwechseln zur Bildung eines Makrorisses führt in Abhängigkeit der Temperatur

3.6 Vergleich der Ergebnisse der dynamischen Spaltzug- und der Zug-Schwell-Versuche

Mit dem axialen Zug-Schwell-Versuch und dem Spaltzugversuch stehen zwei Prüfverfahren zur Verfügung, mit denen Asphaltte hinsichtlich des Ermüdungsverhaltens untersucht werden können.

Bei der Auswertung der dynamischen Spaltzugversuche und der Zug-Schwell-Versuche wurde eine große Streuung der ermittelten Lastwechselzahlen, die zum Eintreten eines Ermüdungsereignisses führen, festgestellt. Diese führte bei den Zug-Schwell-Versuchen zu höheren Variationskoeffizienten, als bei den dynamischen Spaltzugversuchen. Eine Ursache für die Streuungen konnte in den im großen Maße streuenden Hohlraumgehalten des untersuchten Prüfgutes gefunden werden. Bei den Zug-Schwell-Versuchen führen höhere Hohlraumgehalte zu deutlich früherem Versagen der Probekörper. Der Einfluss des Hohlraumgehaltes nimmt mit sinkender Temperatur zu. Bei den Spaltzugversuchen konnte der Einfluss des Hohlraumgehaltes qualitativ nachgewiesen werden. Durch die Erstellung von dehnungsabhängigen Ermüdungskurven konnte bei den Spaltzugversuchen der Einfluss aus dem Hohlraumgehalt ausgeglichen werden, sodass sehr hohe Regressionskoeffizienten der Ermüdungskurven erreicht wurden, die über den aus den axialen Zugversuchen ermittelten Ermüdungskurven liegen.

Bild 14 gibt die Oberspannung in Abhängigkeit der resultierenden Lastwechselzahl, bei der ein Makroriss auftritt, wieder und zeigt, dass sich beim Asphaltbinder die in den beiden Versuchsarten ermittelten Wöhlerlinien mit Ausnahme der Spaltzugversuche bei -5 °C plausibel der Temperatur nach einordnen lassen.

Im Gegensatz zu den E-Moduln, die im dynamischen Spaltzugversuch ermittelt wurden, weisen die in den Zug-Schwell-Versuchen berechneten Moduln eine fallende Tendenz mit zunehmender Belastung auf. Dieser Unterschied kann dadurch erklärt werden, dass im Spaltzugprobekörper ein zweidimensionaler Spannungszustand erzeugt wird, bei dem die horizontale Zugspannung mit einer senkrecht dazu liegenden dreimal so hohen Druckspannung überlagert wird, während im Zug-Schwell-Versuch eine reine Zugbelastung vorliegt. Weiterhin konnte festgestellt werden, dass die in den Versuchen ermittelten E-Moduln

teilweise stark von den nach dem Verfahren von Francken und Verstraeten berechneten abweichen.

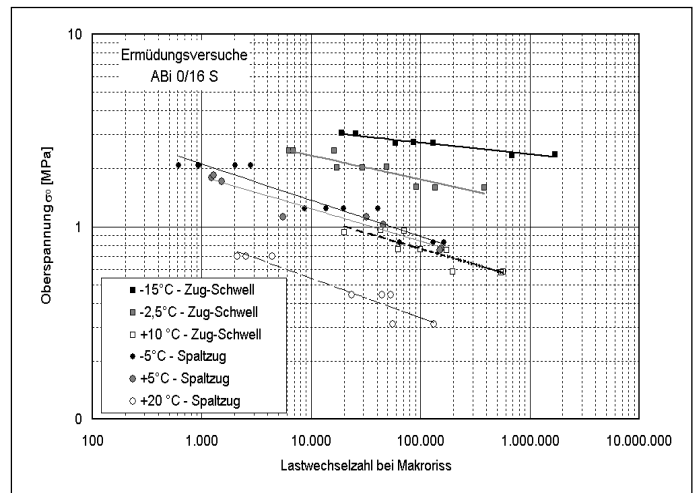


Bild 14: Ergebnisse der Ermüdungsversuche im dynamischen Spaltzugversuch und im Zugschwellversuch am ABI 0/16 S in Abhängigkeit von der Oberspannung

3.7 Weiterentwickeltes Stoffmodell

Um nichtlineare Spannungs-Dehnungs-Abhängigkeiten der Asphaltgemische phänomenologisch zu beschreiben, wurden rheologische Modelle eingesetzt, die elastische, akkumulierte viskoplastische und akkumulierte tertiäre Dehnungsanteile berücksichtigen. Viskoelastische Dehnungsanteile wurden bei den zyklischen Belastungen, die typischen Verkehrsbelastungen entsprechen, aufgrund der kurzen Belastungsdauer vernachlässigt. Das eingesetzte rheologische Modell ist von Materialparametern abhängig, die anhand der Ergebnisse der Zug-Schwell-Versuche in Abhängigkeit von der Temperatur und der Belastung aufgrund der homogenen und eindeutigen Spannungsverteilung über den Probekörperquerschnitt ermittelt wurden. Daraufhin konnte das Modell für die Berechnung des Spaltzugversuchs angewendet werden.

Bild 15 zeigt den mit dem Stoffmodell berechneten Spannungszustand innerhalb eines Spaltzugversuchs. Auch die bleibenden Dehnungen im Spaltzugversuch und bei den Spurbildungsversuchen im Großmaßstab konnten berechnet werden. Sie zeigen eine zufriedenstellende Übereinstimmung mit den Messergebnissen.

4. Schlussfolgerungen

Bei allen aus der Versuchsstraße entnommenen Probekörpern wurden große Schwankungen der Raumdichten und der Schichtdicken festgestellt, die auch bei den zur Stoffmodellierung herangezogenen Versuchen zu hohen Streuungen geführt haben. Um diese zu vermeiden, sollten in Zukunft Probekörper, an denen Versuche zur Ermittlung von Materialparametern durchgeführt werden, unter Laborbedingungen hergestellt werden, um im Versuchsprogramm möglichst homogene Bedingungen gewährleisten zu können. Der Labortechnik stehen ausreichend praxisnahe Verdichtungsgeräte zur Verfügung, um die Übertragbarkeit auf In-situ-Verhältnisse gewährleisten zu können.

Die Ergebnisse der Triaxialversuche zeigen eine sehr hohe Abhängigkeit von der aufgebrachten Radialspannung. Diese sollte so gewählt werden, dass im Laborversuch untersuchtes Material in Beanspruchungszuständen geprüft wird, die auch in der Realität anzutreffen sind.

Es wurde gezeigt, dass die Beanspruchung vor allem bei Asphaltbinder- und Asphalttragschichtproben im Spurbildungs-

gerät auch mit den Prüfbedingungen Gummirad/Luftbad deutlich höher ist, als sie in der Realität vorkommen. Demnach ist dieses Prüfverfahren nicht geeignet, um Materialparameter für eine Stoffmodellierung zu ermitteln.

Die Spurbildungsversuche im Großmaßstab sind grundsätzlich geeignet, im relativen Vergleich das Verhalten von Asphaltbaustoffen praxisnah im Labor anzusprechen, wobei die in diesem Forschungsvorhaben zur Anwendung gekommene Spurreue aller Überrollungen zu einem in der Realität nicht vorkommenden Abdruck der Profilrinnen geführt hat. Um diesen Abdruck zu vermeiden, sollten Versuche mit Spurversatz durchgeführt werden. Die Formen der Spurrinne im Querschnitt sowie des Latschabdruckes deuten darauf hin, dass unter breiten Lkw-Reifen keine homogene Flächenpressung herrscht. Daher führt die Ermittlung der Fahrbahnbelastung nur aus Radlast und Aufstandsfläche zu fehlerhaften Spannungen.

Mit dem axialen Zug-Schwell-Versuch und dem Spaltzugversuch stehen zwei Prüfverfahren zur Verfügung, mit denen Asphaltmaterial unter direkter bzw. indirekter Zugbeanspruchung geprüft werden kann. Dabei haben die Auswertungsergebnisse gezeigt, dass die unterschiedlichen Prüfparameter sowie Spannungszustände große Auswirkungen auf die ermittelbaren Stoffparameter haben. So zeigen sowohl die in statischen Versuchen ermittelten Festigkeiten als auch die in dynamischen Versuchen ermittelten dynamischen E-Moduln unterschiedliche Werte.

Zur Beurteilung des Ermüdungsverhaltens eignen sich die in Schwellversuchen ermittelten Lastwechselzahlen bis zum Eintritt eines definierten Ereignisses, welches zur Stoffmodellierung und Bemessung energetisch eindeutig definiert sein sollte.

Die Spaltzugversuche bei -5 °C haben gezeigt, dass die Prüfungen unter Berücksichtigung der kryogenen Spannung zu einer deutlichen Reduzierung der ertragbaren Lastwechselzahlen führen. Daher sollte die Unterspannung bei tiefen Temperaturen für die strukturelle Bemessung von Verkehrsflächen Berücksichtigung finden. Die ermittelten Versuchsergebnisse

lassen einen quantitativen Vergleich der beiden angewendeten Ermüdungsprüfverfahren nicht zu. Es konnte beobachtet werden, dass die in beiden dynamischen Versuchen ermittelten Lastwechselzahlen hohe Variationskoeffizienten aufzeigen, die bei beiden Prüfmethoden zum Teil auf die großen Unterschiede der Hohlraumgehalte der Probekörper des untersuchten Materials zurückgeführt werden können. Dieser Einfluss konnte vor allem bei den Spaltzugversuchen durch die Bildung von dehnungsabhängigen Ermüdungskurven ausgeglichen werden, so dass höhere Korrelationskoeffizienten als bei den anhand der Zug-Schwell-Versuche ermittelten Wöhler-Linien erreicht werden konnten.

Um die Aussagekraft der beiden Ermüdungsprüfungen miteinander vergleichen zu können, sind weitere Untersuchungen nötig, in denen mit beiden Versuchen unter gleichen Prüfbedingungen (Prüftemperatur, Frequenz, Lastpause) dasselbe Material geprüft wird. Dabei sollten Probekörper verwendet werden, die unter Laborbedingungen (z. B. durch Walzsegmentverdichtung) hergestellt wurden, und so homogenere volumetrische Eigenschaften aufweisen als das in dieser Arbeit untersuchte Prüfgerät aus einer Versuchsstraße.

Die vorliegenden Versuchsergebnisse beider Verfahren zeigen, dass sich der Zug-Schwell-Versuch aufgrund der rein axialen Zugbeanspruchung besonders gut zur Validierung von Stoffmodellen eignet. Der Spaltzugversuch eignet sich aufgrund der geringeren Streuungen der Versuchsergebnisse und somit der geringeren notwendigen Versuchsanzahl besonders gut zur Bestimmung der Eingangsparameter für eine analytische Bemessung von Asphaltbefestigungen.

Abschließend bleibt festzuhalten, dass die durchgeführten Versuche Aussagen über den Widerstand der Asphalte gegen Ermüdung und Verformung liefern. Eine Zustandsprognose der Fahrbahnbefestigung allein aus Prüfergebnissen ist jedoch nicht möglich. Neben dem tatsächlichen Beanspruchungszustand im Straßenkörper müssen weitere Einflussfaktoren wie Spurnauigkeit, Klima und Bodenkenwerte berücksichtigt werden, was im Rahmen einer analytischen Bemessung denkbar ist.

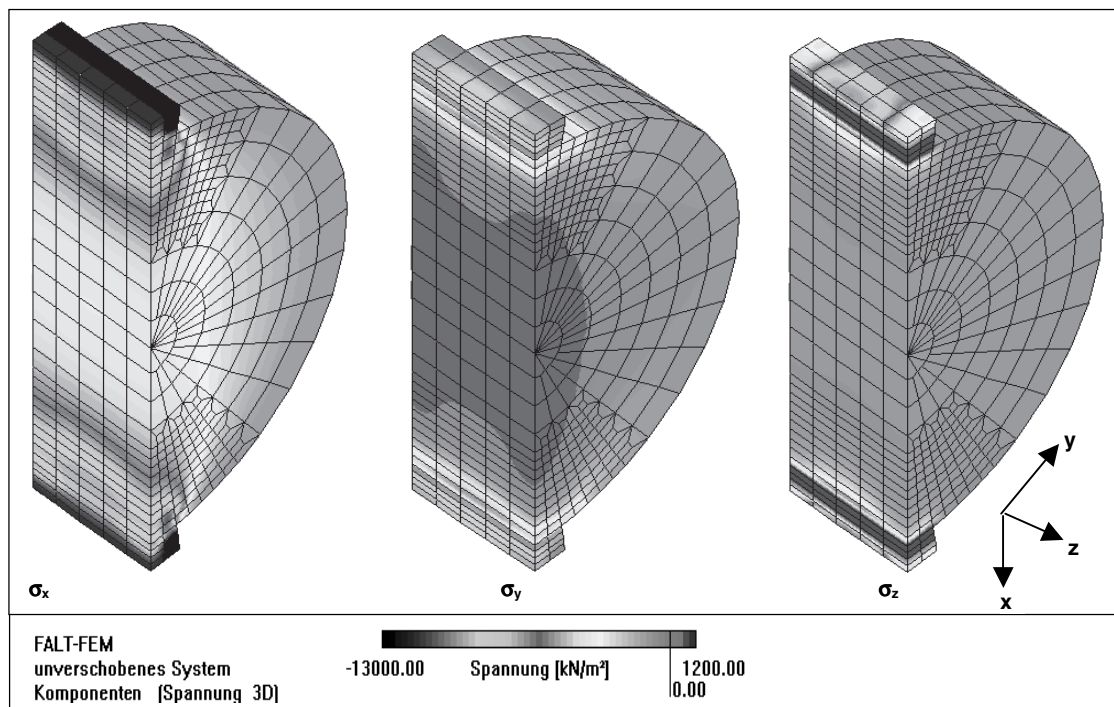


Bild 15:
 Darstellung der
 berechneten
 Spannungen σ_x ,
 σ_y und σ_z