



# ISBS

Institut für Straßenwesen

Konrad Mollenhauer

---

## **Dimensionierungsrelevante Prognose des Ermüdungsverhaltens von Asphalt mittels einaxialer Zug-Schwellversuche**

2008



Heft 21  
Braunschweig 2008

## Vorwort

Es ist zu erwarten, dass hinkünftige Großbauvorhaben im Straßenbau zunehmend in Form von Betreibermodellen abgewickelt werden, denen eine Lebenszyklusbetrachtung für die jeweilige Baumaßnahme zu Grunde liegt. Dabei werden nicht bautechnische Größen, sondern Funktionsanforderungen an das Bauwerk definiert und ausgeschrieben, auf die der Bieter sein Leistungsangebot abstellt. Die Voraussetzungen für den Erfolg solcher Modelle im Asphaltstraßenbau sind eine optimierte Mischgutkonzeption und die richtige Dimensionierung der Oberbaustruktur, sowie eine zuverlässige Prognose des Langzeitverhaltens unter Gebrauch. Dabei spielt die Kenntnis der Baustoffeigenschaften eine entscheidende Rolle. Vor allem ist es die über lange Zeiträume in den Asphalt-schichten voranschreitende Materialermüdung, welche das Gebrauchsverhalten und die technische Lebensdauer des Asphaltoberbaus bestimmt. Die Asphaltermüdung wird daher in klassischen Dimensionierungsansätzen als maßgebendes Bemessungs-kriterium ange-setzt. Üblicherweise wird dabei die Dicke des Asphaltoberbaus so konzipiert, dass die infolge des Schwerverkehrs resultierenden Biegezugspannungen an der Unterseite des Asphaltpakets dauerhaft auf ein zulässiges Maß reduziert sind. Die Beanspruchung des Materials ist dabei nicht nur von der aufgebrachten Last abhängig, sondern wird in Abhängigkeit von den jeweiligen momentanen Temperaturbedingungen von der Steifigkeit und Festigkeit des Asphalts, ausgedrückt durch den komplexen dynamischen E-Modul, wesentlich mitbestimmt. Der mischgut-, last- und temperaturabhängige E-Modul ist somit eine wesentliche Materialkenngröße zur Beschreibung des mechanischen Asphalt-verhaltens unter Kurzzeit- und Langzeitbeanspruchung und damit die wichtigste Eingangs-größe in Dimensionierungsverfahren. Die Prognose des mischgutabhängigen Ermüdungs-verhaltens von Walzasphalt basiert auf Laborprüfverfahren. Dabei wird auf einen Asphalt-probe-körper eine zyklisch dynamische Beanspruchung aufgebracht und während des Versuchs der infolge Steifigkeitsabnahme abfallende Verlauf des E-Moduls ausgewertet.

Die Arbeit von Herrn Dr.-Ing. Konrad Mollenhauer behandelt die labortechnische Ansprache des Steifigkeits- und Er-müdungs-verhalten von Walzasphalten. Sie ist im Speziellen dem einaxialen zyklisch dynamischen Ermüdungs-ver-such unter schwellender Zugbeanspruchung gewidmet, in der Folge als Zug-Schwellversuch

bezeichnet. Konrad Mollenhauer beleuchtet den Zug-Schwellversuch hinsichtlich seiner Anwendungsgrenzen und Anwendbarkeit für Dimensionierungsfragen und sucht nach Möglichkeiten, den Prüfaufwand im Hinblick auf zukünftige Routineprüfungen im Rahmen neuer Dimensionierungsmethoden zu reduzieren. Der Einfluss der mechanischen Belastung auf das Ermüdungsverhalten von Asphalt wird in Abhängigkeit der Belastungszeit ausgewertet, anstelle der bisher üblichen Darstellung als Funktion der Lastwechselzahl. Dabei stellt Konrad Mollenhauer fest, dass das Ermüdungsverhalten nicht von der Frequenz beeinflusst wird und überprüft diese Beobachtung anhand zahlreicher Materialuntersuchungen an unterschiedlichen Asphaltmischgütern. Basierend auf dieser Erkenntnis weist er darauf hin, dass es hinkünftig möglich sein sollte, den Prüfaufwand im Rahmen von Reihenuntersuchungen an Asphaltmischgut zu reduzieren, ohne dabei auf eine ausreichende Prognosegenauigkeit verzichten zu müssen.

Im Hauptkapitel seiner Arbeit stellt Konrad Mollenhauer die aus wissenschaftlicher Sicht interessante und bisher nicht geklärte Forschungsfrage, ob die während des Zug-Schwellversuchs beobachtete Akkumulation plastischer Dehnungsanteile auf das Phänomen der Ermüdung zurückgeführt werden kann. Mit der systematischen Klärung dieser Frage liefert Mollenhauer einen entscheidenden Beitrag zum Stand des Wissens im Bezug auf das Ermüdungsverhalten von Asphalt unter Zugbeanspruchung. Es gelingt ihm anhand der Ergebnisse aus Zug-Schwellversuchen die Beweisführung, dass bei zyklisch dynamischer Zugbeanspruchung eines Asphaltprobekörpers nicht nur der Steifigkeitsabfall infolge Mikrorissbildung eine Konsequenz der Materialermüdung ist, sondern auch die fortlaufende Kumulation plastischer Dehnungen. Die vorweg aufgestellte Hypothese, dass die Dehnungszunahme eine Folge der rissbedingten Minderung des wirk-samen Probekörperquerschnitts ist und damit gleichermaßen der Materialermüdung zuge-schrieben werden kann, wird einwandfrei bestätigt, indem die Ergebnisse aus den Laborprüfungen und aus den unter Anwendung des Burger Modells durchgeführten Simulationen des rheologischen Materialverhaltens in einen richtigen Zusammenhang gebracht werden. Folgerichtig kommt er zu dem Schluss, dass der Zug-Schwellversuch uneingeschränkt zur Prüfung des Ermüdungsverhaltens geeignet ist.

Die vorliegende Arbeit wurde im Juli 2008 an der Fakultät für Architektur, Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften der TU Braunschweig als Promotionsschrift

angenommen. Für die erfolgreiche Promotionsleistung wurde Konrad Mollenhauer das Gesamtprädikat „mit Auszeichnung“ erteilt.

Herr Dr.-Ing. Konrad Mollenhauer, geb. 1976 in Wuppertal, ist seit 2002 als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Straßenwesen der TU Braunschweig tätig. Seine breite Forschungstätigkeit betreibt Konrad Mollenhauer sowohl selbständig als auch in Forschungsprojekten des Instituts. Seine Arbeiten auf dem Gebiet der Dimensionierung von Oberbaukonstruktionen für Verkehrswege sind wertvolle Beiträge für die nationale und internationale Straßenforschung. Vor allem wegen seiner wissenschaftlichen Kreativität, stets konstruktiver und überzeugender Beiträge und seiner persönlichen Qualifikation ist Konrad Mollenhauer bei Vorgesetzten, im Kollegenkreis und bei Studierenden sehr geschätzt.

Ich wünsche Konrad Mollenhauer alles Gute und für seine zukünftige Tätigkeit in der Wissenschaft weiterhin viel Erfolg!

Braunschweig, im November 2008

Michael P. Wistuba

## Kurzfassung

Der Ermüdungswiderstand beeinflusst die Dauerhaftigkeit einer Asphaltbefestigung maßgebend. Der einaxiale Zug-Schwellversuch simuliert die kombinierte Beanspruchung aus kryogener Spannung infolge thermisch behinderten Schrumpfes sowie aus Biegebeanspruchung infolge Verkehrs. Diese schwellende Zugspannung bewirkt neben der Vergrößerung der viskoelastischen Dehnung auch progressiv zunehmende viskoplastische Verformung. In der Literatur wird dazu angemahnt, dass der herkömmlich zur Auswertung herangezogene Ermüdungseffekt, die Verringerung des Elastizitätsmoduls, durch den Aufbau großer Dehnungen verfälscht wird. In der vorliegenden Arbeit wird gezeigt, dass die im einaxialen Zug-Schwellversuch gemessene viskoplastische Dehnung ebenso aus der Materialermüdung resultiert wie das herkömmliche Auswertungskriterium Steifigkeits-Abnahme. Unter Anwendung des Burgers-Modells kann der Verlauf der viskoplastischen Dehnung berechnet werden, indem die ermüdungsbedingte Materialschädigung, abgeleitet aus dem Verlauf der viskoelastischen Dehnung, berücksichtigt wird. Aus Zug-Schwellversuchen unter Variation der Temperatur, der Belastungsfrequenz und der Beanspruchung werden Ermüdungsfunktionen abgeleitet, mit denen die Ermüdungsresistenz prognostiziert werden kann. Es wird gezeigt, dass die Schädigung infolge Ermüdung unabhängig von der zwischen 3 Hz und 10 Hz variierten Prüffrequenz ist, wenn ihr Verlauf über die Zeit dargestellt wird. So weisen neben den Ermüdungsfunktionen sowohl die bei gleicher Temperatur und Beanspruchung gemessene viskoplastische Dehnung als auch die Steifigkeit von der Frequenz im untersuchten Bereich unabhängige Verläufe auf. Durch die Einführung der Belastungsfrequenz in die Ermüdungsfunktionen kann der für die Dimensionierung notwendige Prüfaufwand mit einer nur geringen Einbuße an Präzision erheblich reduziert werden.

## **Abstract**

The resistance against fatigue controls the service life of asphalt pavements. Besides the traffic-induced bending stress, so-called cryogenic tensile stress occurs at low and decreasing temperatures due to prohibited thermal shrinkage. The combination of both is simulated in laboratory by the uniaxial swelling tensile test. In this test, the asphalt specimen is subjected to a sinusoidal load, which is superposed by a constant tension stress. The asphalt's reaction on this permanent tension stress is the development of visco-plastic strain which eclipses the visco-elastic strain signal. The values of the visco-elastic strain signal are less than a tenth of the accumulating visco-plastic strain. In the international literature it is stated, that the fatigue effects can be hidden behind the substantial irreversible deformation. In this thesis it is shown that the courses of both strain signals can be interpreted as reaction to the same deterioration of the specimen by growth of fatigue cracks by using rheological model calculation. Thus the swelling tensile test is capable for the evaluation of the fatigue characteristics of asphalt material in laboratory. For the use in design and prognosis tools, fatigue functions are elaborated from the results of uniaxial swelling tests with variation of temperature, frequency and stress level. Besides the crack initiation and propagation, the course of stiffness can be used for the characterisation of the fatigue resistance. Further the results gained at varied frequencies (3, 5 and 10 Hz) showed, that the testing time controls the fatigue deterioration primarily. If the testing time is used as basis of evaluation, the numbers of endured load cycles as well as the courses of stiffness reduction and visco-plastic strain are indifferent of the frequency. By integrating the frequency inside the equation of the fatigue-function, the test effort can be reduced considerably.

# Inhalt

Vorwort .....	3
Kurzfassung.....	6
Abstract .....	7
Inhalt.....	8
1 Einleitung und Problemstellung .....	10
2 Asphalteigenschaften .....	14
2.1 Zusammensetzung von Asphalt.....	14
2.2 Aufbau von Asphaltbefestigungen .....	15
2.3 Beanspruchung von Asphaltbefestigungen.....	16
2.4 Rheologie von Asphalt .....	19
2.4.1 Rheologische Modelle zur Simulation des Verformungsverhaltens.....	19
2.4.2 Reaktion rheologischer Modelle bei konstanter Spannung .....	21
2.4.3 Reaktion rheologischer Modelle bei sinusförmiger Schwellbelastung .	23
2.4.4 Vereinfachende Nomenklatur.....	30
2.4.5 Temperatur-Frequenz-Äquivalenz des Elastizitätsmoduls .....	30
2.5 Ermüdungsverhalten von Asphalt .....	31
2.5.1 Dissipierte Energie .....	32
2.5.2 Ermüdungsversuche .....	32
2.5.3 Schädigungsmodelle .....	35
2.5.4 Schädigung infolge Risswachstum.....	36
3 Untersuchungsprogramm .....	40
3.1 Untersuchte Asphalte.....	40
3.2 Zug- und Abkühlversuch .....	42
3.2.1 Prüfeinrichtung .....	42
3.2.2 Abkühlversuch.....	43
3.2.3 Zugversuch .....	44
3.2.4 Zugfestigkeitsreserve .....	44
3.2.5 Ergebnisse der Zug- und Abkühlversuche .....	45
3.3 Retardationsversuch .....	48
3.4 Zug-Schwellversuch.....	49
3.4.1 Beschreibung des Prüfverfahrens .....	49
3.4.2 Verfahren zur Versuchsauswertung .....	52

3.4.3	Versuchsergebnisse.....	54
3.4.4	Nutzung der Versuchsergebnisse für die Dimensionierung .....	58
3.4.5	Versuchsübersicht.....	60
4	Auswirkungen der Materialermüdung: Risswachstum und Bruch.....	61
4.1	Ergebnisse der Zug-Schwellversuche.....	61
4.2	Einfluss der Beanspruchung auf die ertragbare Lastwechselzahl.....	61
4.3	Einfluss der Frequenz / Belastungszeit auf die ertragbare Lastwechselzahl .	64
4.4	Einflüsse auf die Parameter der Ermüdungsfunktionen .....	66
4.5	Ermüdungsprognose.....	72
4.6	Reduzierung des Prüfaufwandes .....	76
4.6.1	Prognose mittels dehnungsabhängiger Ermüdungsfunktionen .....	76
4.6.2	Prognose mit spannungsabhängigen Ermüdungsfunktionen mit einheitlichen Exponenten .....	79
5	Auswirkungen der Materialermüdung: Abnahme der Steifigkeit .....	84
5.1	Absoluter Elastizitätsmodul und Phasenwinkel.....	84
5.2	Temperatur-Frequenz-Äquivalenz der Steifigkeit.....	87
5.3	Quasi-lineare Abnahme des absoluten E-Moduls .....	88
5.4	Verlauf des absoluten E-Moduls in der Schädigungsphase.....	94
6	Auswirkung der Materialermüdung: Bleibende Dehnung.....	96
6.1	Bleibende Dehnung im Zug-Schwellversuch .....	96
6.2	Dehnungsverlauf im Retardationsversuch .....	97
6.2.1	Anpassung der Dehnungsmessung mittels Burgers-Modells .....	98
6.2.2	Temperaturabhängigkeit der Burgers-Elemente .....	102
6.3	Bleibende Dehnungen infolge statischer und dynamischer Belastung .....	110
6.4	Ergebnis: Bleibende Dehnung infolge Ermüdung .....	112
6.5	Schlussfolgerung .....	119
7	Zusammenfassung.....	120
	Ausblick .....	124
	Literatur .....	125
	Verwendete Formelzeichen .....	130
	Abbildungsverzeichnis.....	132
	Tabellenverzeichnis .....	138
	Anlagen .....	139
	Englische Kurzfassungen .....	141

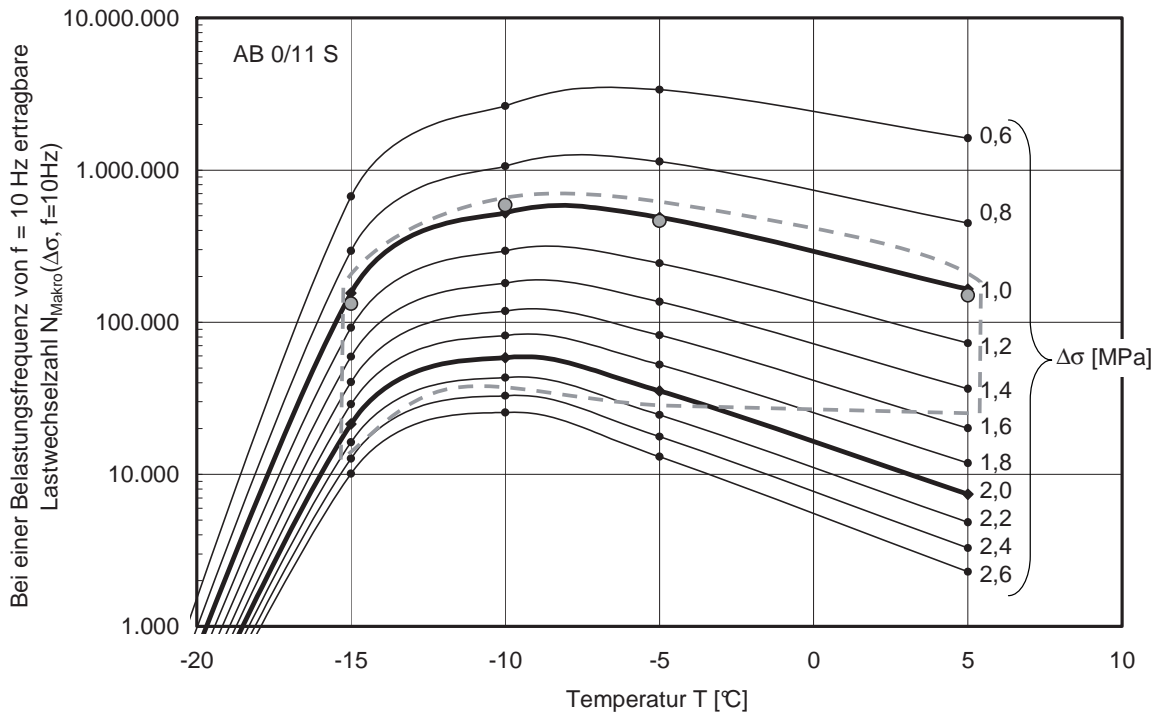


## 7 Zusammenfassung

Der Widerstand gegen Ermüdungsrisssbildung ist neben der Verformungsresistenz die Eigenschaft eines Asphaltbaustoffes, die die Dauerhaftigkeit der Befestigung maßgebend beeinflusst. Ermüdungsschäden treten in der Befestigung in Zonen auf, in denen der Asphalt durch hohe und wiederholt auftretende Zugspannungen beansprucht wird. Neben der hauptsächlich bei Durchbiegung unter der fahrenden Verkehrslast auftretenden mechanogenen Zugspannung werden Asphaltbefestigungen bei sinkenden Temperaturen durch kryogene Zugspannungen beansprucht. Somit können in den Wintermonaten durch das Wetter bedingte ungünstige Belastungsbedingungen auftreten, die bei gleichzeitig hoher Verkehrsbelastung zum Versagen der Asphaltbefestigung infolge Ermüdung führen können. Diese Schäden treten meist an der Oberseite der Asphaltbefestigung auf, da hier die höchsten Beanspruchungen aufgrund der höheren Temperaturschwankungen zu finden sind. Durch die entstandenen Risse kann Niederschlagswasser in die Asphaltbefestigung eintreten und somit die weiterführende Zerstörung der Befestigung einleiten.

Um im Vorfeld der Konstruktion einer Fahrbahnbefestigung die Resistenz eines Asphalttes gegen diese in der Praxis vorkommende Beanspruchung im Labor zu ermitteln und somit die Zusammensetzung des Baustoffs optimieren zu können, wurde der einaxiale Zug-Schwellversuch entwickelt [1]. Dieses Prüfverfahren überlagert die infolge Abkühlung auftretende konstante Zugspannung mit einer sinusförmig schwellenden Zugspannung. Die gewonnenen Ergebnisse können für die Prognose der Risssbildung in Asphaltbefestigungen und somit für deren Dimensionierung eingesetzt werden.

Für den Einsatz in Dimensionierungsmodellen wurden die ertragbaren Lastwechselzahlen in Abhängigkeit von der Temperatur, der Belastungsfrequenz und der Beanspruchung in einaxialen Zug-Schwellversuchen ermittelt. Aus den Ergebnissen wurden Ermüdungsfunktionen abgeleitet, mit denen die bei vorgegebener Temperatur und Frequenz ertragbare Lastwechselzahl aus der mechanogenen Zugspannung  $\Delta\sigma$  mit hoher Präzision berechnet werden kann. In Abbildung 7-1 ist exemplarisch das aus den temperaturabhängigen Ermüdungsfunktionen für die Prüffrequenz von  $f = 10$  Hz abgeleitete Dimensionierungsdiagramm eines Asphaltbeton AB 0/11 S gezeigt.



**Abbildung 7-1: Anwendung der spannungsabhängigen Ermüdungsfunktionen zur Berechnung der ertragbaren Lastwechselzahl für den AB 0/11 S**

Bei der Auswertung der Versuche zeigte sich, dass die Materialschädigung, die sich sowohl in Rissbildung als auch im Verlauf der viskoelastischen und viskoplastischen Dehnung manifestiert, bei der Belastung mit hoher Frequenz langsamer fortschreitet als bei geringen Frequenzen. Alle drei Ermüdungskriterien zeigen dabei einen Einfluss der Dauer der Beanspruchung, der unabhängig von der Frequenz im untersuchten Bereich zwischen 3 Hz und 10 Hz ist. So tritt das Materialversagen bei Versuchen, in denen die Belastung mit hoher Frequenz aufgebracht wird, zum gleichen Zeitpunkt ein wie bei Versuchen mit geringerer Frequenz, bei denen folglich weniger Lastwechsel bis zum Versagenszeitpunkt eingetragen werden mussten. Somit kann die Frequenz in die Ermüdungsfunktionen (Gleichung 7.1) zur Berechnung der ertragbaren Lastwechselzahl in Abhängigkeit von der Beanspruchung einbezogen werden, was zum einen den notwendigen Prüfaufwand reduziert, da nur eine Frequenz im Labor untersucht werden muss. Zum anderen kann die Auswirkung unterschiedlicher Überrollungsgeschwindigkeiten, die in der Praxis vorkommen, in der Dimensionierung von Asphaltbefestigungen berücksichtigt werden. Der größere Schädigungseinfluss langsam fahrender Fahrzeuge ist bekannt und wird bereits heute bei der Dimensionierung z. B. von Steigungsstrecken berücksichtigt.

$$N_{\text{Makro}} = f \cdot T_1(T) \cdot \Delta\sigma^{T_2(T)} \quad \text{Gleichung 7.1}$$

- mit:  $N_{\text{Makro}}$ : bis zum Makroriss ertragbare Lastwechselzahl  
 $f = 1/t$ : Frequenz oder Kehrwert der Belastungszeit eines Lastimpulses  
 $\Delta\sigma$ : Spannungsdifferenz = mechanogene Zugspannung  
 $T_1(T)$ : temperaturabhängiger Koeffizient der Ermüdungsfunktion  
 $T_2(T)$ : temperaturabhängiger Exponent der Ermüdungsfunktion

Trotz der Klärung des Einflusses der Belastungsfrequenz auf das Ermüdungsverhalten ist ein hoher Prüfaufwand notwendig, um auch den Einfluss der Temperatur bei der Dimensionierung berücksichtigen zu können. Daher wurde ein Konzept entwickelt, das die Ermittlung von temperaturabhängigen Ermüdungsfunktionen mit einem verringerten Prüfaufwand bei geringfügig verringerter Präzision ermöglicht.

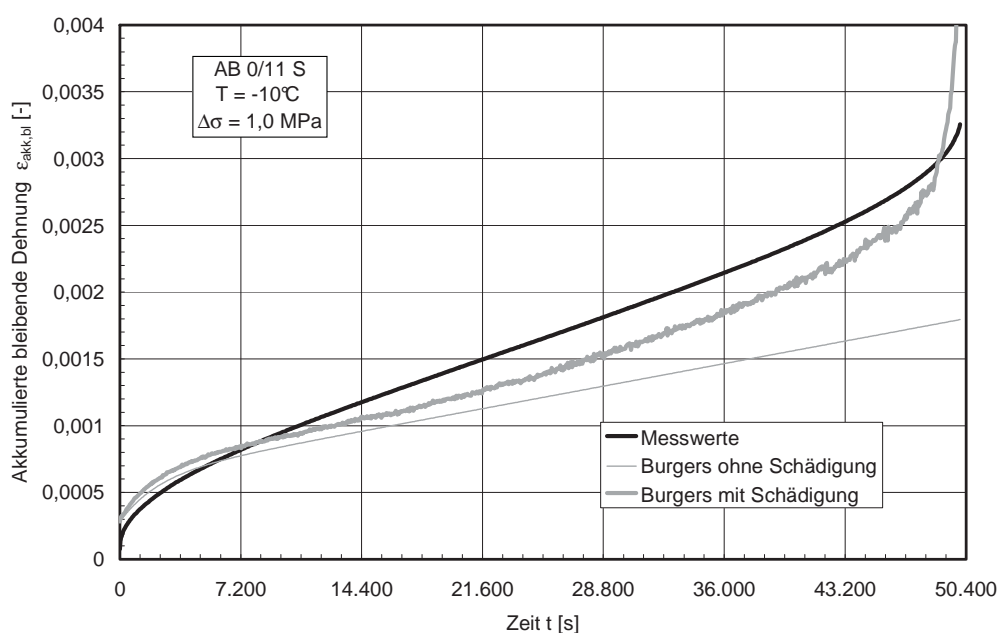
Wie die Ergebnisse der Arbeit zeigen, besteht ein enger Zusammenhang zwischen der quasi-linearen Abnahme des absoluten E-Moduls  $\Delta E$  und der bis zum Versagen des Probekörpers ertragbaren Lastwechselzahl  $N_{\text{Makro}}$ . Eine Nutzung dieses Kriteriums eröffnet die Möglichkeit, Ergebnisse der einaxialen Zug-Schwellversuche zu nutzen, bei dem die einzelnen Prüfungen nicht bis zum endgültigen Versagen des Probekörpers durchgeführt werden. Die Ermüdungsresistenz lässt sich dadurch auch bei geringen Beanspruchungen ermitteln, wodurch der Zeitaufwand für die Durchführung der Prüfung erheblich reduziert werden kann.

Durch die im einaxialen Zug-Schwellversuch eingesetzte Belastung mittels schwellenden Kraftsignals bewirkt die im Probekörper fortschreitende Materialermüdung neben der Vergrößerung der viskoelastischen Dehnung, die auch bei Ermüdungsversuchen mit anderen Beanspruchungen zur Auswertung herangezogen wird, zusätzlich den Aufbau von viskoplastischen Verformungen. In der internationalen Literatur wird dazu angemahnt, dass der herkömmlich zur Auswertung herangezogene Ermüdungseffekt – die Abnahme des Elastizitätsmoduls – durch den Aufbau großer Dehnungen überlagert und verfälscht wird.

Um zu zeigen, dass die im einaxialen Zug-Schwellversuch gemessene viskoplastische Dehnung ebenso aus der Materialermüdung resultiert wie das herkömmlich zur Auswertung herangezogene Kriterium der Elastizitätsmodul-Abnahme, wurde der Verlauf der viskoplastischen Dehnung mit Hilfe des Burgers-Modells berechnet. Für

die Ermittlung der vier benötigten Modellparameter (zwei Elastizitätsmoduln und zwei Viskositäten) wurden Retardationsversuche unter Variation der Temperatur und der Spannung durchgeführt. Die Parameter der vier rheologischen Elemente wurden durch Anpassung des berechneten Dehnungsverlaufs an die in den Retardationsversuchen gemessene Kriechkurve ermittelt. Der Einfluss der Temperatur und der Spannung auf die Modellparameter konnte funktional beschrieben werden.

Durch die Berücksichtigung der aus dem Verlauf der absoluten E-Moduln abgeleiteten Schädigung infolge Rissbildung, die während des Zug-Schwellversuchs zu einem Anstieg der tatsächlich auf den Probekörper wirkenden Beanspruchung führt, konnten die viskoplastischen Dehnungen im Zug-Schwellversuch mit dem Burgers-Modell berechnet werden. Dabei wurde eine gute Übereinstimmung der berechneten Dehnungsverläufe mit den im Versuch gemessenen Dehnungen erreicht, wie Abbildung 7-2 exemplarisch zeigt.



**Abbildung 7-2: Vergleich des mittels Burgers-Modells berechneten Verlaufs der akkumulierten bleibenden Dehnung mit den Messwerten aus dem einaxialen Zug-Schwellversuch am Beispiel AB 0/11 S; T = -10°C;  $\Delta\sigma = 1,0$  MPa**

Da der im Versuch beobachtete Aufbau viskoplastischer Dehnungsanteile nur unter Berücksichtigung der Schädigung infolge Ermüdung berechnet werden konnte, ist bewiesen, dass auch diese Asphaltreaktion auf Materialermüdung zurückzuführen ist. Die akkumulierte bleibende Dehnung im Versuch verfälscht demnach nicht das

Ergebnis des Zug-Schwellversuchs, sondern ist ebenso wie die Abnahme des absoluten E-Moduls Folge der Rissbildung, die ihre Ursache in der Ermüdung des Materials hat. Der einaxiale Zug-Schwellversuch ist demnach geeignet, das Ermüdungsverhalten von Asphalt im Laboratorium anzusprechen und die daraus ermittelten Kennwerte in Prognose- und Dimensionierungsmodellen zu nutzen.

## **Ausblick**

Die für die Dimensionierung ermittelten Ermüdungsfunktionen wurden aus Zug-Schwellversuchen gewonnen, in denen die Unterspannung in Abhängigkeit der Temperatur anhand von Versuchsergebnissen festgelegt wurde, die als „worst-case-Kriterium“ angesehen werden müssen und somit die tatsächlich in Fahrbahnbefestigungen auftretenden kryogenen Spannungen nur bedingt wiedergeben. Daher sind weitere Untersuchungen notwendig, die den Einfluss der Höhe der Unterspannung auf die Materialschädigung erklären. Wenn gleichzeitig ein Berechnungsmodell zur Verfügung steht, mit dem die kryogene Spannung infolge der in der Praxis anzutreffenden Temperaturen berechnet werden kann, lässt sich das Ermüdungsverhalten von Asphaltbefestigungen in Abhängigkeit der lokalen Wetter- und Verkehrsverhältnisse noch präziser prognostizieren.

Weiterhin bleibt bei den bisher vorliegenden Dimensionierungsmodellen das Phänomen der Heilung unberücksichtigt. Durch Druckspannungen und hohe Temperaturen können sich bereits aufgetretene Risse in der Asphaltbefestigung wieder verschließen. Aus diesem Grund liegt die Nutzungsdauer von Fahrbahnbefestigungen meist um ein Vielfaches über jener, die in Berechnungsmodellen unter Verwendung von im Labor ermittelten Materialkennwerten berechnet wurde. Um dieses Phänomen berücksichtigen zu können, ist die Erweiterung der bestehenden Versuchssystematik notwendig.