

**Performance-orientierte
Asphaltspezifikation –
Entwicklung eines praxis-
gerechten Prüfverfahrens
zur Ansprache des
Verformungswiderstandes**

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Straßenbau Heft S 115

bast

Performance-orientierte Asphaltspezifikation – Entwicklung eines praxis- gerechten Prüfverfahrens zur Ansprache des Verformungswiderstandes

von

Michael P. Wistuba
Ivan Isailović

Technische Universität Braunschweig
Institut für Straßenwesen (ISBS)

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Straßenbau Heft S 115

bast

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

A - Allgemeines
B - Brücken- und Ingenieurbau
F - Fahrzeugtechnik
M - Mensch und Sicherheit
S - Straßenbau
V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt bei der Carl Schünemann Verlag GmbH, Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen, Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in der Regel in Kurzform im Informationsdienst **Forschung kompakt** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos angeboten; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Ab dem Jahrgang 2003 stehen die **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)** zum Teil als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv ELBA zur Verfügung.
<http://bast.opus.hbz-nrw.de>

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt FE 84.0106/2009:
Performance-orientierte Asphaltspezifikation –
Entwicklung eines praxisgerechten Prüfverfahrens zur
Ansprache des Verformungswiderstandes

Fachbetreuung
Sebastian Lipke

Herausgeber
Bundesanstalt für Straßenwesen
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach
Telefon: (0 22 04) 43 - 0

Redaktion
Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit

Druck und Verlag
Fachverlag NW in der
Carl Schünemann Verlag GmbH
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53
Telefax: (04 21) 3 69 03 - 48
www.schuenemann-verlag.de

ISSN 0943-9323
ISBN 978-3-95606-355-8

Bergisch Gladbach, März 2018

Kurzfassung – Abstract

Performance-orientierte Asphaltspezifikation – Entwicklung eines praxistauglichen Prüfverfahrens zur Ansprache des Verformungswiderstandes

Inhalt dieses Forschungsprojekts ist die Prüfung der Verformungsstabilität von Walzasphalten für den Straßenbau. Ziel ist es, den technisch aufwendigen Triaxialversuch in ein praxistaugliches, aussagekräftiges Prüfverfahren mit vereinfachten Versuchsbedingungen zu überführen, damit dieser für Routineprüfungen angewendet werden kann.

Ein Teil des Forschungsprojekts ist der mehrlagigen Herstellung von dicken Asphaltprobeplatten mit dem Walzsektor-Verdichtungsgerät gewidmet und der geeigneten Gewinnung von zylindrischen Probekörpern aus den Platten. Ausführlich wird die Auswirkung von Verdichtungsmodus und Bohrrichtung auf das Ergebnis von Triaxialversuchen analysiert. Es wird gezeigt, dass das Herstellungs- und das Gewinnungsverfahren von Asphaltprobekörpern aus Asphaltplatten einen großen Einfluss auf das Versuchsergebnis aus zyklisch-dynamischen Laborversuchen haben können. Insbesondere für Triaxialversuche ist es daher zwingend notwendig, schlanke Probekörper in vertikaler Richtung aus dicken Asphaltplatten, hergestellt mit einem kombinierten weg-kraftgeregelten Verdichtungsregime, auszubohren.

Der Hauptteil des Forschungsprojekts hat die Entwicklung einer verbesserten Methode zur Interpretation von zyklisch-dynamischen Asphaltprüfungen zum Inhalt. Es wird die Energie, die während zyklisch-dynamischer Asphaltprüfungen dissipiert wird, in Reihenuntersuchungen systematisch ausgewertet und erweist sich dabei als sehr aussagekräftige Kenngröße zur Beschreibung der asphaltmechanischen Eigenschaften. So wird für jeden Versuchstyp aufgeschlüsselt, welche Veränderungen während der Prüfung im Baustoff stattfinden und welche Schädigungen vorhanden sind (Ermüdung oder plastische Verformung, oder beide).

Anhand der neuen Auswertemethode mithilfe der dissipierten Energie werden im abschließenden Teil des Forschungsprojekts unterschiedliche Prüfverfahren zur Ansprache des Verformungsverhaltens vergleichend analysiert und Empfehlungen für die Laborpraxis abgeleitet. Als Alternative zum tech-

nisch aufwendigen Triaxialversuch wird demzufolge als praxistaugliches Laborprüfverfahren der Stempelpoleindringversuch mit Stützring empfohlen, da er qualitativ ähnliche Ergebnisse liefert.

Performance-oriented asphalt specification – Development of a practical procedure addressing resistance to permanent deformation

In this research project the question is raised, if the assessment of the resistance to permanent deformation of asphalt mixtures can be addressed – as a first approximation – in a less complex manner, compared to the conventional cyclic compression test with confining pressure (usually called Triaxial Test). As a result, a practical test method is recommended that is based on a simplified cyclic penetration test for assessing the resistance to permanent deformation at high temperatures. During the test, a steel stamp is cyclically agitated in compressive loading mode, while the test specimen is mounted in a supporting steel ring, which completely encloses the asphalt test specimen during testing.

The first part of the research project is devoted to the production of homogeneous multi-layered thick asphalt slabs using the rolling sector compactor. The effect of compaction mode and drilling direction on the result of triaxial tests is analyzed. The test results show that the production and the drilling process of cylindrical asphalt samples from asphalt slabs can significantly influence the results of cyclic laboratory tests. For Triaxial Test it is recommended to drill the test samples in the vertical direction of thick asphalt slabs, prepared in rolling sector compactor using combined displacement-force-controlled compaction regime.

The second part of the research project is a systematic study for finding an improved method for analysis and interpretation of cyclic laboratory tests. The dissipated energy concept was identified to be a powerful tool for the interpretation of cyclic performance tests on asphalt mixtures. For different types of tests performed, changes in material behavior can clearly be assessed and

it can be distinguished between material failure due to fatigue, permanent deformation, or to both. Based on dissipated energy evaluation, the Triaxial Test and the cyclic penetration test show similar results.

Summary

Performance-oriented asphalt specification – Development of a practical procedure addressing resistance to permanent deformation

1 Objective

Asphalt mixtures for road pavements are designed according to the Technical Standards in order to withstand traffic and temperature stresses in the long term. Suitability of a particular asphalt mix can be assessed in laboratory by applying performance-oriented test methods to address essential properties such as stiffness, fatigue resistance, resistance to cracking, durability and resistance to permanent deformation.

This research project is dedicated to the permanent deformation properties of hot rolled asphalt mixtures. For this purpose, various laboratory testing methods are known, such as rutting test, cyclic compression tests (with or without confining pressure) and cyclic penetration test. Among these tests, the cyclic compression test with confining pressure (so-called Triaxial Test) is best appropriate for mix optimization. However, due to the comparatively expensive equipment and complex testing procedure, it is not used as a standard test for routine testing in Germany.

Thus, this research project was initiated, with the objective to determine whether the assessment of the resistance to permanent deformation can be judged in a different less complex manner. As a result, a practical test method for assessment of the resistance to permanent deformation at high temperatures should be recommended.

2 Contents

2.1 Comparative analysis of cyclic test methods

Different accelerated laboratory cyclic tests were used in this project to characterize the asphalt permanent deformation behavior. These tests include both, those with dominant compressive

stress (deformation tests) as well as those with dominant tensile stress (fatigue tests). In detail, the investigation included the following types of tests:

- cyclic compression test with known confining pressure, so-called Triaxial Test,
- cyclic penetration test with unknown confining pressure (with or without support ring),
- indirect tensile test (IDT; damage is due to material fatigue but also to accumulation of permanent strain).

Analysis of test results for each individual test type is based on the dissipated energy concept.

Dissipated energy implies energy transported out of the system in form of mechanical work, heat generation, or damage (cracking) during one loading cycle. The change in material behavior after each loading cycle is analyzed by determining the change in the primary material responses (stress, strain, phase angle). Different material responses can be separated using

- a plot of Lissajous figures (hysteresis loops), which are generated by the superposition of stress and strain curves, and
- calculation of dissipated energy.

In a stress-controlled test, constant energy dissipation over a number of loading cycles is linked to constant mechanical properties. Any increase in dissipated energy from load cycle i to load cycle $i + 1$ is related to a change in the mechanical material properties. Hence, almost the whole change in dissipated energy can be associated to damage (fatigue cracks).

2.2 Production of specimens from thick asphalt slabs

Performance testing of asphalt mixtures requires the production of asphalt specimens from laboratory compacted asphalt mixtures. According to the German Technical Specifications (TP Asphalt-StB Part 33) asphalt mix slabs are compacted using a Rolling Sector Compactor.

For the realization of Triaxial Tests, specimens must be obtained from asphalt slabs in that way that the loading direction of the asphalt sample during the test is parallel to the direction of the compaction

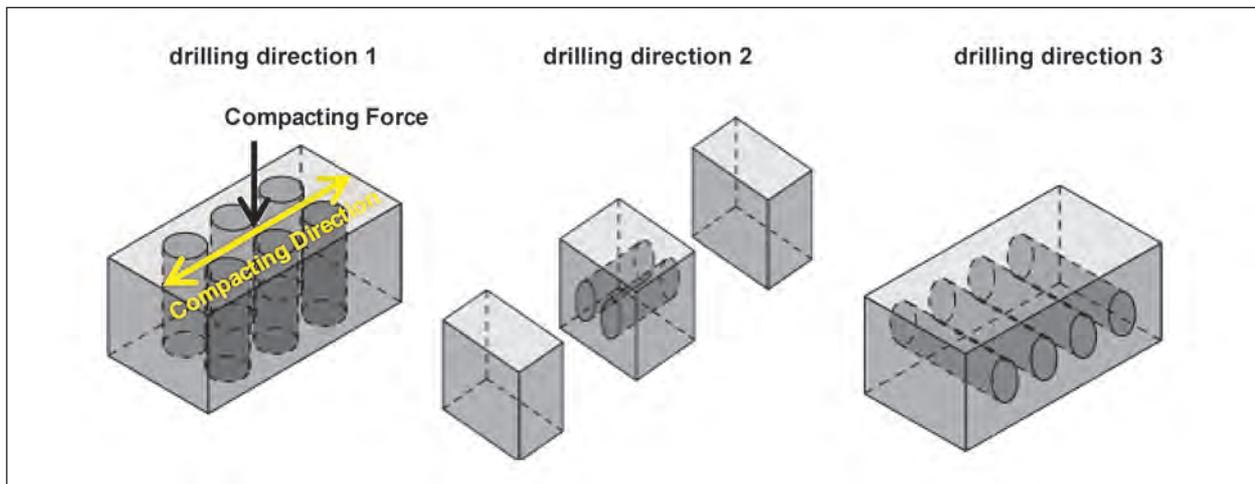


Fig. 1: 1. Different drilling directions for obtaining cylindrical samples out of asphalt mix slabs: 1. Drilling direction parallel to the compaction force, 2. Drilling direction perpendicular to the compaction force and in the direction of compaction, 3. Drilling direction perpendicular to the direction of compaction

force that was acting on the asphalt slab during the compaction process (see Figure 1). Hence, thick asphalt sample slabs are needed with slab thicknesses of about 200 mm.

Production of thick, sufficiently homogeneous asphalt slabs can only be achieved through a multi-layered compaction method using a specified compression regime. Within this project, a suitable compaction regime was experimentally developed by varying the compaction forces and the load passes, in order to ensure a homogeneous density distribution over the entire asphalt mix slab.

Two variants for compaction were considered, a displacement-controlled compaction method and a combination of displacement-controlled and force-controlled compaction method. The compaction of the asphalt mix slabs was carried out in three layers. Subsequently, the influence of the selected compaction regime and the drilling direction (see Figure 1) on the results from Triaxial Testing was investigated.

3 Results

Based on the results obtained in this research project the following conclusions can be drawn:

- The dissipated energy concept was found to be a powerful tool for the interpretation of cyclic performance tests of compacted asphalt mixtures. For any test type, changes in material behavior can be assessed to fatigue, permanent deformation, or to both.
- Among all asphalt tests used for the assessment of resistance to permanent deformation, the cyclic compression test with confining cyclic pressure (so-called Triaxial Test) is the most efficient. It allows most realistic simulation of the main stress states arising in road pavements. Exemplarily, Figure 2 illustrates for a standard base course material (AC 22 T S) the evolution of accumulated compressive strains and of energy dissipation for a number of load repetitions. After an initial compaction phase, a quasi-stationary material behavior is observed. The dashed line indicates the approximate boundary of the disproportionate increase in permanent compressive strains (approx. 500 load cycles), from which the dissipated energy no longer decreases and remains relatively constant. During a secondary quasi-stationary phase, plastic deformation is observed exclusively, while any effects resulting from change in material behavior are negligible.
- The Triaxial Test and the cyclic penetration test show similar results, as proved by evaluation of the dissipated energy. Both tests result in the same ranking of the considered asphalt mixtures with respect to permanent deformation resistance.
- In the study, penetration tests with and without a supporting ring were compared. It was found, that by using a supporting ring, any disproportionate growth in permanent deformation is avoided. Therefore, the use of a supporting ring is recommended.

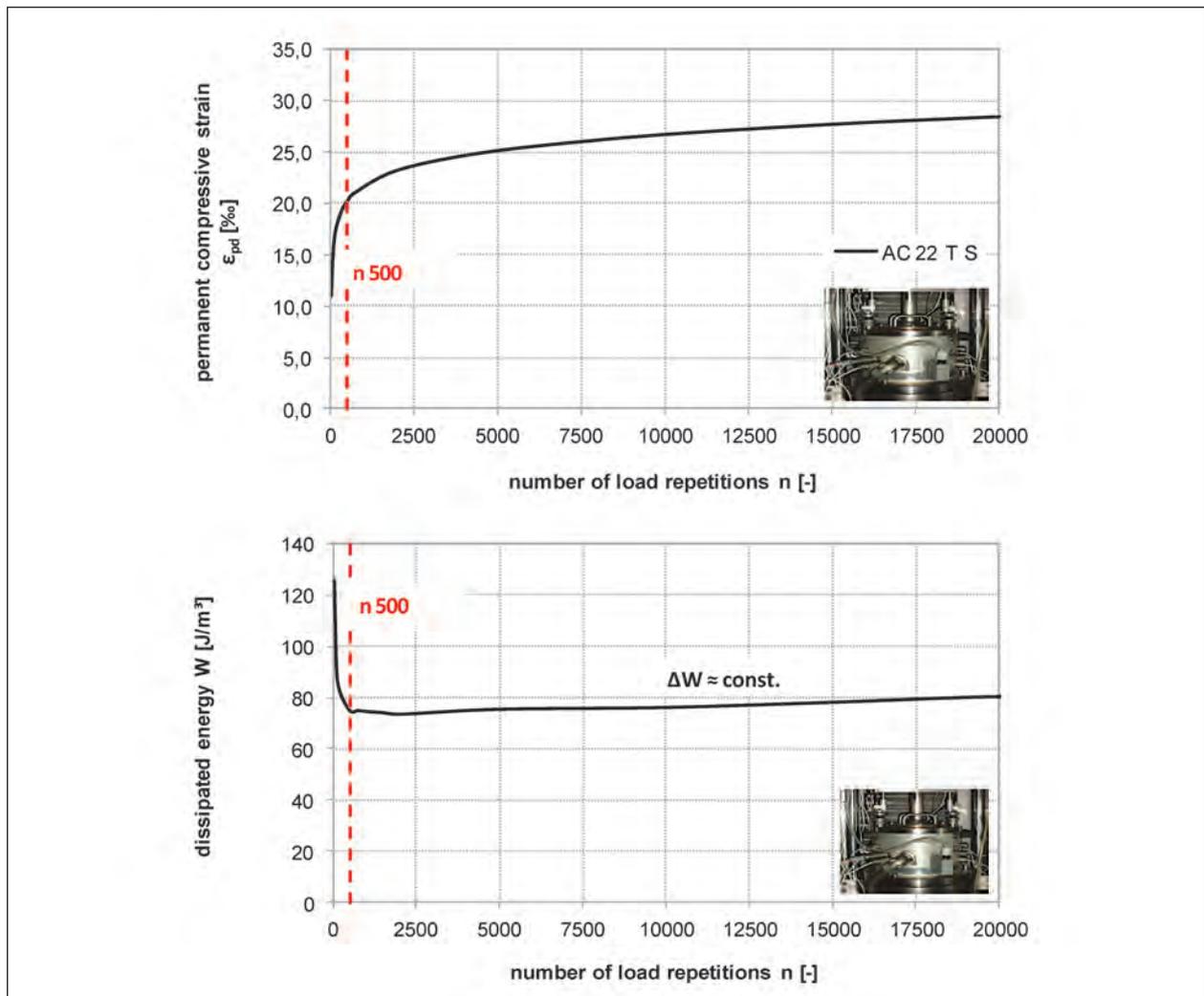


Fig. 2: Triaxial Test for asphalt mix type AC 22 TS: Accumulated permanent compressive strains in function of load repetitions (top) and energy dissipation in function of load repetitions (bottom)

- The evaluation of dissipated energy for indirect tensile test, performed at 20 °C, showed, that during this test relatively small changes in dissipated energy appear, but large permanent tensile strains. It was checked if the asphalt susceptibility to permanent tensile strain correlates with its susceptibility to the permanent compressive strain. It was found, that the deformation behavior under tensile stress does not correlate with the deformation behavior under compressive stress. A test with dominant tensile stress (here indirect tensile test) is therefore not applicable for the evaluation of the deformation behavior under compression stress.
- Studies on the production of thin asphalt samples demonstrate that the presented combined displacement-force controlled compaction regime ensures a homogeneous density distribution over the entire asphalt mix slab.

Regarding the influence of the drilling direction on permanent deformation susceptibility in Triaxial Tests, it was stated, that the largest deformation resistance is achieved in specimens resulting from a drilling direction parallel to the compaction force, and the lowest is achieved for specimens resulting from a drilling direction orthogonal to the direction of compaction.

4 Conclusions

The approach taken in this research study is directed to an improved interpretation of test results from performance testing of asphalt mixtures by evaluating different material effects. Using the dissipated energy concept, fatigue and permanent deformation behavior of asphalt mixtures can be evaluated more accurately. It is possible, to

assess any incremental change in load and mixture dependent material response during every single load cycle.

Based on the results in this study, it is recommended to use the cyclic penetration test with a supporting ring, which completely encloses the asphalt test specimen during testing, as an alternative to the technically complex Triaxial Test for addressing the resistance of rolled asphalt to permanent deformation.

The production and drilling methods for asphalt test specimens can have a significant impact on the test result obtained in cyclic laboratory tests. There is strong need, especially for Triaxial Tests, to produce asphalt samples with sufficient height. Cylindrical, slim specimens should be drilled in vertical direction from the asphalt sample slab, that drilling direction is parallel to the acting of compaction force during the compaction process. For compaction of the multi-layer asphalt sample slabs is recommended to use a rolling sector compactor and a combined displacement-force-controlled compaction regime as specified in this study.

Inhalt

Vorwort	11	4 Vergleichende Analyse von zyklischen Prüfverfahren.	27
1 Aufgabenstellung.	11	4.1 Überblick zu den berücksichtigten Laborprüfverfahren.	27
1.1 Hintergrund und Forschungsfrage	11	4.1.1 Stempeleindringversuch.	28
1.2 Projektziel.	12	4.1.2 Triaxialversuch	30
2 Asphaltprüfung mit zyklischer Beanspruchung	13	4.1.3 Spaltzug-Schwellversuch.	32
2.1 Performance-orientierte Asphaltspezifikation	13	4.2 Berücksichtigte Baustoffe.	35
2.2 Reversibles und irreversibles Verformungsverhalten	14	4.2.1 Gestein.	35
2.2.1 Materialermüdung	14	4.2.2 Bitumen	36
2.2.2 Bleibende Verformung (Spurrinnenbildung)	16	4.2.3 Asphalt	37
2.3 Energiedissipation bei zyklisch-dynamischer Beanspruchung.	17	4.3 Prüfbedingungen	39
3 Untersuchungen zur Probekörperherstellung.	20	4.4 Prüfergebnisse	39
3.1 Laborverdichtung mit dem Walzsektor-Verdichtungsgerät	20	4.4.1 Triaxialversuche	39
3.2 Verdichtungsregime zur Herstellung dicker Asphaltprobeplatten.	22	4.4.2 Stempeleindringversuche mit Stützring.	42
3.2.1 Weggeregelte Plattenherstellung.	23	4.4.3 Stempeleindringversuche ohne Stützring.	45
3.2.2 Kombinierte weg-kraftgeregelte Plattenherstellung.	23	4.4.4 Spaltzug-Schwellversuche.	45
3.2.3 Bewertung	23	4.4.5 Auswertung der dissipierten Energie.	49
3.3 Einfluss von Verdichtungsregime und Bohrrichtung auf das Prüfergebnis.	25	4.4.6 Vergleichende Darstellungen	53
3.3.1 Möglichkeiten zur Wahl der Bohrrichtung.	25	5 Schlussfolgerungen und Empfehlungen	58
3.3.2 Auswertung von Triaxialversuchen.	26	Literatur	60
		Bilder	62
		Tabellen	65

Vorwort

In diesem Forschungsprojekt werden neue Forschungserkenntnisse zum Verhalten von Walzasphalt in zyklischen Laborprüfungen vorgestellt. Die Versuchsauswertung auf der Grundlage der Energiedissipation zufolge von mechanischer Arbeit, Wärmeerzeugung und Materialschädigung (Rissbildung, Verformung) ermöglicht einen vertieften Einblick in das Materialverhalten in jedem Belastungs-Entlastungszyklus. So gelingt es, für unterschiedliche Versuchstypen aufzuschlüsseln, dass Materialermüdung und plastische Verformung zu verschiedenen Anteilen zur inkrementellen Materialschädigung und zum Materialversagen beitragen. Dabei spielt es a priori keine Rolle, ob die Zielsetzung der Laborprüfung eine Bewertung des Verformungs- oder des Ermüdungsverhaltens ist. Anhand der neu identifizierten Auswertemöglichkeit werden unterschiedliche Prüfverfahren zur Ansprache des Verformungsverhaltens vergleichend analysiert und Empfehlungen für die Laborpraxis gegeben. Schließlich wird ein einfaches Laborprüfverfahren als Alternative zum aufwendigen Triaxialversuch vorgestellt.

Dem Bundesministerium für Verkehr und der Bundesanstalt für Straßenwesen sei für die Realisierung dieses Projekts herzlich gedankt. Langfristig ausreichende Investitionen in die universitäre Forschung sind die Voraussetzung, eine aus der Forschung erwachsende Wertschöpfung für die Gesellschaft sicherzustellen.

Die Autoren

1 Aufgabenstellung

1.1 Hintergrund und Forschungsfrage

Straßenbauasphalte werden entsprechend den Anforderungen aus Verkehrs- und Witterungsbeanspruchung so konzipiert, dass sie die auftretenden Kräfte schadlos aufnehmen können. Die Eignung einer bestimmten Asphaltart bzw. -sorte als Schicht im Straßenoberbau kann im Labor mittels gebrauchsverhaltensorientierten Prüfverfahren nachgewiesen werden.

Mithilfe von gebrauchsverhaltensorientierten Laborprüfungen werden die wesentlichen Asphalteeigenschaften angesprochen, wie Steifigkeit, Ermüdungs- und Kälterissbeständigkeit, Dauerhaftigkeit und Widerstand gegen bleibende Verformungen (Verformungsstabilität). Die Ergebnisse aus gebrauchsverhaltensorientierten Laborprüfungen können zur performance-orientierten Asphaltspezifikation herangezogen werden.

Inhalt dieses Forschungsprojekts ist die Prüfung der Verformungsstabilität von Walzasphalten für den Straßenbau. Zur Prüfung der Verformungsstabilität stehen eine Reihe von Laborverfahren zur Verfügung, wie der Spurbildungsversuch, der Druck-Schwellversuch (mit/ohne Stützdruck) oder der Stempeleindringversuch. Allen Prüfverfahren gemeinsam ist die messtechnische Beobachtung des temperatur-, frequenz- und zeitabhängigen visko-elasto-plastischen Asphaltverhaltens (Druckkriechen).

Unter allen Verformungsprüfungen ist der Druck-Schwellversuch mit radialem Stützdruck (sog. Triaxialversuch) der aussagekräftigste, weil er eine realitätsnahe Simulation jenes Hauptspannungszustandes ermöglicht, der in der Straße bei Radüberfahrt entsteht (Bild 1).

Die in Europa am weitesten verbreitete Variante des Triaxialversuchs ist jene, bei der die axiale Druckbeanspruchung zyklisch-dynamisch aufgebracht wird, während der Probekörper radial durch einen konstant wirkenden Stützdruck gehalten wird. Diese Beanspruchungsart erfordert apparativ eine herkömmliche zyklisch-dynamische Prüfeinrichtung mit Erweiterung um eine Druckzelle zur Aufbringung des seitlichen konstanten Stützdrucks. Der Triaxialversuch wurde in Deutschland erstmals an der TU Braunschweig zur Prüfung der Verformungsresistenz gedrungener zylindrischer Asphalt-Probekörper eingesetzt. Dabei wurde auch die Prüfsystema-

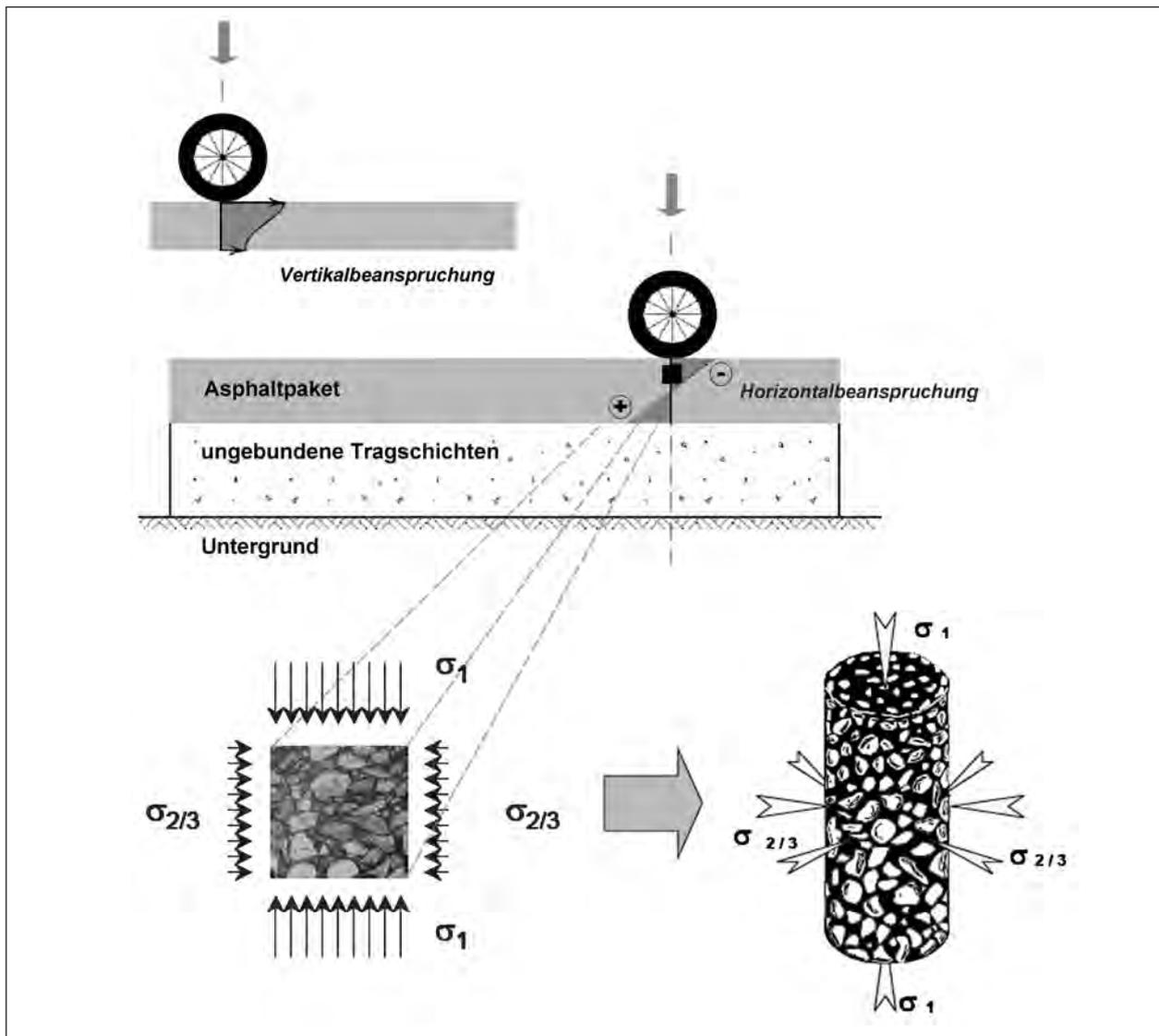


Bild 1: Räumlicher Spannungszustand in Asphaltbefestigungen und Übertragung auf den Triaxialversuch (WELLNER et al., 2007)

tik entwickelt, bei der sowohl der axiale Druck mit einer zyklisch-dynamischen Schwingung angeregt werden kann als auch der (phasenverschobene) radiale Stützdruck (siehe z. B. ARAND & von der DECKEN, 1996; RENKEN & BÜCHLER, 2005).

Während der Triaxialversuch zum Zweck der Baustoffoptimierung und -entwicklung hervorragend geeignet ist, wird er – wegen der vergleichsweise aufwendigen Geräte- und Prüftechnik – als Standardversuch im Rahmen von Routineprüfungen (Erst-, Kontrollprüfung) in Deutschland nicht eingesetzt.

Die Deutsche Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) hat daher die Durchführung dieses Forschungsprojekts angeregt und die Forschungsfrage formuliert, ob bzw. in welcher Weise der Triaxialversuch für die Anwendung im Rahmen von Routineprüfungen in ein praxistaug-

liches, aussagekräftiges Prüfverfahren mit vereinfachten Versuchsbedingungen überführt werden kann.

1.2 Projektziel

Inhalt des Forschungsprojekts ist die Ansprache des mechanischen Verhaltens von Walzasphalten für den Straßenbau mithilfe von zyklisch-dynamischen Laborprüfverfahren.

Ziel ist es festzustellen, ob die Beurteilung der Verformungsstabilität von Walzasphalten alternativ zum technisch aufwendigen Triaxialversuch mit einem anderen zyklisch-dynamischen Prüfverfahren erfolgen kann. Schließlich soll ein praxistaugliches Prüfverfahren zur Ansprache des Verformungswiderstandes empfohlen werden.

2 Asphaltprüfung mit zyklischer Beanspruchung

2.1 Performance-orientierte Asphaltspezifikation

Im Jahr 2008 wurde in der Europäischen Union – auf gesetzlicher Grundlage der Bauproduktenrichtlinie – mit der Normenserie EN 13108 „Bituminous mixtures – Material specifications“ ein neues System zur Spezifikation und zur Führung des Konformitätsnachweises von Asphaltmischgut im Straßenbau verbindlich eingeführt. Die Europäische Norm EN 13108 enthält die Anforderungen an europäisch harmonisierte Mischgutsorten und die Ausführungsbestimmungen zur Qualitätssicherung im Rahmen der Konformitätsbewertung durch Erstprüfung und Werkseigene Produktionskontrolle. Die Erstprüfung gibt somit die Sicherheit, dass eine (europäisch harmonisierte) Asphaltmischung jede in der jeweiligen Produktnorm gestellte Anforderung erfüllt.

Erstmals wurden in der Europäischen Norm EN 13108 Teil 1 für die Spezifikation von Asphaltbetonmischgut (AC Asphalt Concrete, für Trag-, Binder- und Deckschichten) wahlweise zwei Ansätze zugelassen: der empirische und der fundamentale Ansatz (Performance-Ansatz). Festhaltend am Erfahrungshintergrund hat Deutschland zunächst nur den empirischen Ansatz national in Form der Technischen Lieferbedingungen für Asphaltmischgut für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen (TL Asphalt-StB 07) umgesetzt.

Der wesentliche Unterschied zwischen dem empirischen und dem fundamentalen Ansatz liegt in der Nachweisführung der Konformität des Asphaltbetonmischguts im Rahmen der Erstprüfung gemäß EN 13108 Teil 20. Beim empirischen Ansatz wird im Wesentlichen das Asphaltbetonmischgut – in Anlehnung an die traditionell übliche Vorgangsweise – auf der Grundlage von volumetrischen Kennwerten konzipiert, wie Korngrößenverteilung, Bindemittel- und Hohlraumgehalt. Hingegen basiert der fundamentale Ansatz auf fundamentalen, am Gebrauchsverhalten orientierten Laborprüfungen. Man spricht von einer performance-orientierten Asphaltspezifikation.

Für eine performance-orientierte Asphaltspezifikation sind zusätzliche fundamentale Materialprüfungen gefordert, die am verdichteten Asphaltbetonmischgut im Labor unter möglichst realitätsnahen Belastungsbedingungen stattfinden.

In Performance-Prüfungen wird an Asphaltprobekörpern im Labor das nichtlineare Verhalten von Asphaltmischgutschichten simuliert. Dabei wird unter kontrollierten, isothermen Prüfbedingungen zeitraffend eine hohe Zahl von Belastungswiederholungen auf einen Asphaltprobekörper mit definierten Abmessungen aufgebracht und die allmähliche Veränderung der Asphalteigenschaften in Form der Primärwirkungen im Asphaltprobekörper (Spannungen, Dehnungen) gemessen.

In einem kraftgeregelten (bzw. spannungsgeregelten) Versuch wird eine wiederkehrende (zyklische) konstante Kraft (bzw. Spannung) aufgebracht und die resultierende Zunahme der Verformung (bzw. Dehnung) gemessen. Hingegen wird beim weggeregelten (bzw. verformungsgeregelten) Versuch eine konstante Verformung (bzw. Dehnung) aufgebracht und die resultierende Abnahme der Kraft (bzw. Spannung) gemessen (siehe WISTUBA et al., 2009).

Die während der Performance-Prüfung festgestellte Änderung der Primärwirkungen in Abhängigkeit der aufgetragenen Belastungszyklen wird zur Beurteilung des Verformungsverhaltens und zur Ableitung von Materialkenngrößen herangezogen.

Ergebnis von Performance-Prüfungen sind somit physikalisch interpretierbare Materialkenngrößen, die – gegebenenfalls in Verbindung mit Stoffmodellberechnungen – das Asphaltverhalten unter Gebrauch, d. h. im eingebauten Zustand in der Straße unter den Einflüssen aus Verkehr und Wetter beschreiben. Die fundamentale Asphaltprüfung soll zukünftig eine projektbezogene Optimierung des Mischguts unter Berücksichtigung der tatsächlich zu erwartenden Beanspruchung ermöglichen.

Zur Prüfung der Gebrauchseigenschaften sind in der Europäischen Normenserie EN 12697 unterschiedliche Prüfverfahren beschrieben. Zur Prüfung der Gebrauchseigenschaften Materialsteifigkeit sind wahlweise vier und zur Prüfung der Materialermüdung wahlweise zwei unterschiedliche Prüfmethoden zugelassen. Zur Prüfung der Verformungsbeständigkeit mithilfe des zyklisch-dynamischen Druck-Schwell-Versuchs können die Prüfbedingungen innerhalb vorgegebener weiterer Grenzen frei gewählt werden.

Zurzeit besteht international weder eine Einigung über das jeweils optimale Verfahren, noch über die für den jeweiligen Versuch festzulegenden Prüfbedingungen. Die Möglichkeit der freien Wahl der Versuchsmethode bzw. der Prüfbedingungen führt

zu teils widersprüchlichen Prüfergebnissen, zu Problemen bei der vergleichenden Interpretation und zu Kritik an der gebrauchungsverhaltensorientierten Prüfsystematik insgesamt. Das angegebene Portfolio an Prüfverfahren zur Bewertung des Gesamtverhaltens der Straße während der Liege- und Gebrauchsdauer ist zurzeit noch unvollständig und im Rahmen von Forschungsprojekten weiter zu entwickeln.

2.2 Reversibles und irreversibles Verformungsverhalten

Straßenbauasphalt, ein verdichtetes Haufwerk aus Mineralstoffen und Bitumen, verhält sich stark belastungs- und temperaturabhängig. Während bei Beanspruchung das Gestein elastisch reagiert, ist das Bindemittel Bitumen ein thermo-viskoser Baustoff. Die Eigenschaften der Komponenten spiegeln sich im rheologischen Verhalten des Asphalts wider, der folglich als elastisch-plastisch-viskoser Baustoff einzuordnen ist, dessen Reaktionen nicht nur durch die Größe der einwirkenden Kräfte sondern in hohem Maße auch durch die Temperatur und die Lasteinwirkungszeit bestimmt werden.

Somit zeigt Asphalt unter Belastung stets nebeneinander elastische, viskose und plastische Verformungsanteile. Elastische Verformung erfolgt unter Lasteinwirkung spontan und ist nach Entlastung spontan rückstellbar. Plastische Verformung erfolgt unter Lasteinwirkung spontan und wird nach Entlastung beibehalten. Viskose Verformung ist eine zeitabhängige Verformung unter Lasteinwirkung, die nach Entlastung beibehalten wird. Die visko-elastische Verformung unter Lasteinwirkung erfolgt zeitabhängig, strebt unter konstanter Last einem Grenzwert zu und ist nach Entlastung zeitabhängig rückstellbar. Die visko-plastische Verformung unter Lasteinwirkung erfolgt zeitabhängig, strebt unter konstanter Last einem Grenzwert zu und wird nach der Entlastung beibehalten.

Die Verformungsanteile können generell in reversible (rückstellbare, elastische) und irreversible (bleibende, permanente) unterteilt werden. Elastizität und Visko-Elastizität sind für die reversiblen Verformungsanteile im Asphalt verantwortlich. Bei tiefen Temperaturen und Kurzzeitbelastung liegt ein nahezu linear elastisches, zeitunabhängiges Verhalten vor, d. h. dass die infolge der Lasteinwirkung spontan eintretende Dehnung bei Entlastung ebenso spontan zurückgestellt wird. Irreversible Asphalt-

verformungen sind auf die plastischen Eigenschaften des Asphalts zurückzuführen. Sie sind langfristig hauptverantwortlich für Spurrinnenbildung in Asphaltstraßen.

Die jeweilige Ausprägung von reversiblen und irreversiblen Verformungsanteilen in einer Asphaltbefestigung hängt maßgeblich von den Beanspruchungsbedingungen ab, insbesondere Last (Druck, Zug, Scherung) und Temperatur. Ferner beeinflusst die innere Struktur des verdichteten, festen Asphalttaufwerks maßgeblich das resultierende Verhalten. Es ist entscheidend, ob Zug-, Druck- oder Scherbeanspruchung dominiert.

2.2.1 Materialermüdung

Schädigung infolge Verformung wird oft von Schädigung infolge Materialermüdung begleitet – und umgekehrt (siehe Kapitel 2.3). Materialermüdung steht mit Rissversagen in Zusammenhang. Rissversagen in Asphalt ist eine Folge einer die Festigkeit erreichenden Beanspruchung. Rissversagen kann spontan zufolge einer einzelnen Überlast eintreten, oder als Folge einer allmählich voranschreitenden Materialermüdung bei wiederholter Belastung.

Unter Materialermüdung versteht man im Allgemeinen ein allmähliches Baustoffversagen infolge Dauerbeanspruchung, wenn Zugbeanspruchung dominant ist. Obwohl die Einzellast kleiner als die Festigkeit des Materials ist, werden infolge der Lastwiederholungen ein allmählicher Abfall der Materialsteifigkeit und gleichzeitig (im kraftgesteuerten Versuch) ein Anstieg der Dehnungsreaktionen festgestellt. Es wird angenommen, dass der Steifigkeits- bzw. Festigkeitsverlust primär eine Folge der Bildung von Mikrorissen im Asphalt ist.

Die maßgebliche Kenngröße von viskoelastischen Materialien wie Asphalt, die aus zyklisch-dynamischen Laborprüfungen mit dominanter Zugbeanspruchung erhalten wird, ist der komplexe dynamische E-Modul. Dieser kann wie folgt bestimmt werden.

Im Asphalt wirken die viskosen Bitumeneigenschaften wie ein Dämpfer. Dadurch kommt es bei zyklischer Lastaufbringung zu einer Zeitverschiebung zwischen aufgebrachtener Spannung $\sigma(t)$ und resultierender Dehnung $\epsilon(t)$, die als Phasenverschiebung φ bezeichnet wird (Bild 2).

Der komplexe dynamische Elastizitätsmodul ist definiert als:

$$E^*(t) = \frac{\sigma(t)}{\epsilon(t)}$$

$$= \frac{\sigma_0 \cdot \cos(\omega \cdot t) + i \cdot \sigma_0 \cdot \sin(\omega \cdot t)}{\epsilon_0 \cdot \cos(\omega \cdot t - \varphi) + i \cdot \epsilon_0 \cdot \sin(\omega \cdot t - \varphi)}$$

$$= \frac{\sigma_0}{\epsilon_0} \cdot \cos\varphi + \frac{\sigma_0}{\epsilon_0} \cdot i \cdot \sin\varphi = E' + i \cdot E'' \quad \text{Gl. 1}$$

- E*(t) komplexer dynamischer E-Modul
- σ(t) Spannung
- ε(t) Dehnung
- ω Winkelgeschwindigkeit
- φ Phasenverschiebungswinkel
- E' realer Anteil: elastischer oder Elastizitätsmodul oder Speichermodul (storage modulus)
- E'' imaginärer Anteil: viskoser Modul oder Verlustmodul (loss modulus)

Der Betrag des komplexen dynamischen E-Moduls wird oft kurz dynamischer E-Modul E_{dyn} (oder absoluter E-Modul oder Steifigkeitsmodul) genannt und kann berechnet werden aus:

$$|E^*(t)| \equiv E_{dyn}$$

$$= \sqrt{\left(\frac{\sigma_0}{\epsilon_0} \cdot \cos\varphi\right)^2 + \left(\frac{\sigma_0}{\epsilon_0} \cdot i \cdot \sin\varphi\right)^2} = \frac{\sigma_0}{\epsilon_0} \quad \text{Gl. 2}$$

Der E-Modul kann aus zyklischen ein- oder mehraxialen, direkten oder indirekten Zug-Schwell- oder Zug-Druck-Wechselastversuchen abgeleitet werden (Bild 3). Einaxiale Prüfverfahren an schlanken Probekörpern eignen sich zum Zwecke wissenschaftlicher Untersuchungen zum Ermüdungsverhalten am besten, weil bei diesen Prüfverfahren davon ausgegangen werden kann, dass im untersuchten Probekörperquerschnitt mit ausreichender Näherung ein homogener, einaxialer Spannungszustand erreicht wird (siehe WISTUBA et al., 2009).

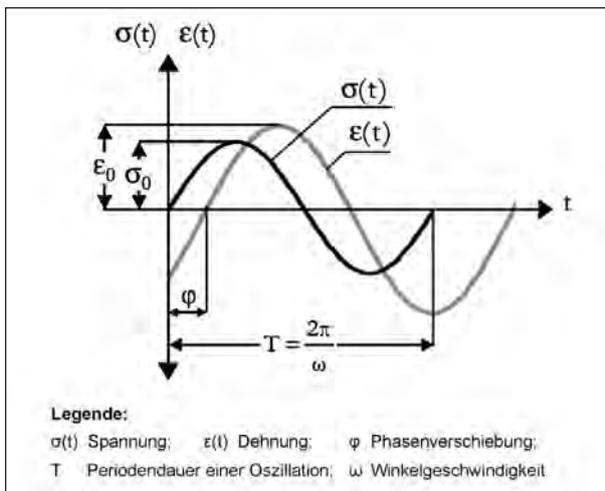


Bild 2: Spannungs- und Dehnungsdiagramm als Funktion der Zeit: Die resultierende Dehnung läuft der aufgetragenen konstanten Spannung zeitlich hinterher

Während eines Ermüdungsversuchs verändert sich der E-Modul kontinuierlich (Bild 4). Im Regelfall ist dieser Steifigkeitsabfall durch zwei oder drei Phasen charakterisiert. Phase 1 ist durch eine rasche Steifigkeitsabnahme gekennzeichnet, die nach einigen Lastwechseln in eine quasi-lineare Steifigkeitsabnahme übergeht (Phase 2). Versagen tritt ein, wenn sich die Mikrorisse zu einem ungeordneten Netz verdichten und einen Makroriss bilden. Bei fortgeschrittener Schädigung nimmt die Steifigkeit daher progressiv ab (Phase 3).

Das Ermüdungsversagen, das heißt der Eintritt des ersten Makrorisses, ist oft nicht eindeutig bestimmbar. Daher gilt in der Laborprüfung das Material dann als ermüdet, wenn der Materialzustand einem definierten Ermüdungskriterium gleicht. Für Aus-

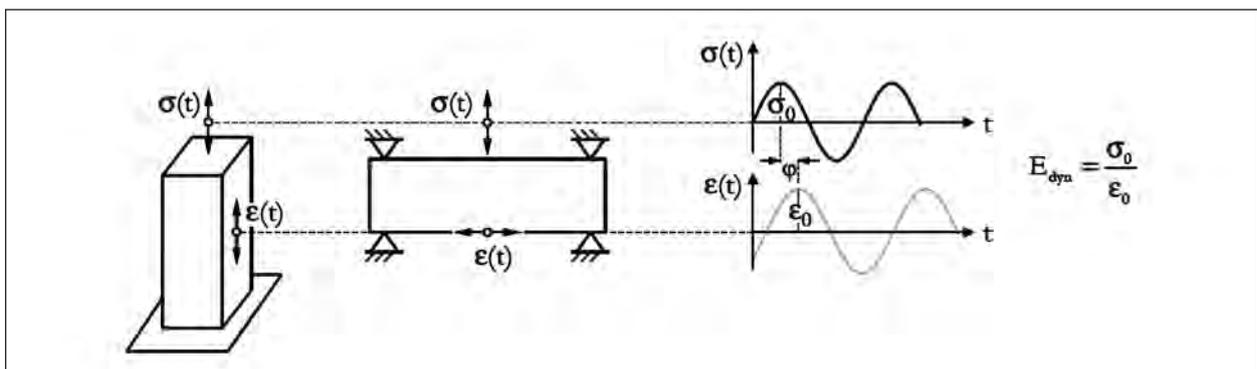


Bild 3: Einaxialer Zug-Druck-Versuch bzw. Biegeversuch an einem Asphaltprobekörper (Prinzipskizze)

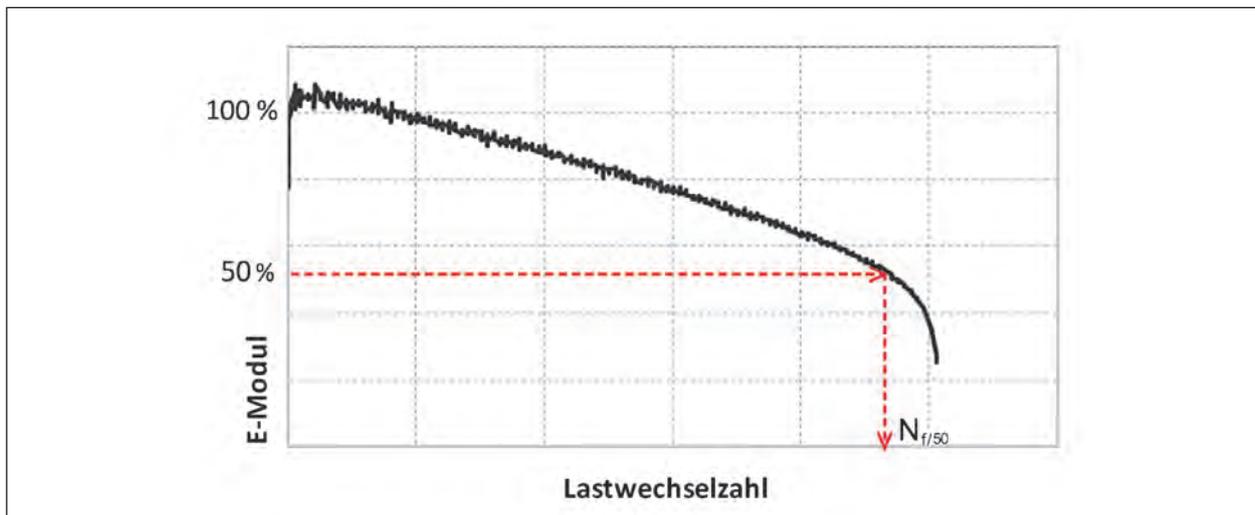


Bild 4: Verlauf des E-Moduls im Ermüdungsversuch (schematisch); Lastwechselzahl $N_{f/50}$ bei Erreichen eines E-Modul-Abfalls um 50 % (Ermüdungskriterium)

wertung und Interpretation von zyklisch-dynamischen Ermüdungsprüfungen an Asphalten unter definierten Beanspruchungsbedingungen wird im Allgemeinen die bis zum Eintritt eines definierten Ermüdungskriteriums ertragbare Lastwechselzahl bestimmt. Dazu finden verschiedene Auswertungsverfahren Anwendung, welche meist den Verlauf des Steifigkeitsmoduls bzw. den Verlauf der dissipierten Energie zugrunde legen (siehe WISTUBA et al., 2009).

Als weit verbreitetes, konventionelles Ermüdungskriterium gilt, wenn in der Ermüdungsprüfung jene Lastwechselzahl $N_{f/50}$ erreicht wird, bei welcher der Abfall des Steifigkeitsmoduls 50 % seines Anfangswertes (bestimmt nach 100 Lastwechseln) erreicht. Dieses Kriterium ist dann problematisch, wenn der Probekörper bereits mit einer Steifigkeit größer als 50 % der Anfangssteifigkeit bricht. Dies ist oft bei niedrigen Prüftemperaturen der Fall.

2.2.2 Bleibende Verformung (Spurrinnenbildung)

Asphalt neigt, wenn er nicht anforderungsgerecht konzipiert ist, bei starker Beanspruchung durch Verkehr und Hitze zu plastischen Druckverformungen. Die Folge ist Spurrinnenbildung in den Fahrspuren, welche die Fahrsicherheit gefährdet und ein Versagenskriterium darstellt, das die Lebensdauer von Asphaltdeck- und Asphaltbinderschichten deutlich herabsetzt.

Als Ursache für Spurrinnenbildung wirken mindestens zwei unterschiedliche temperaturabhängige

Verformungsmechanismen: Zum einen können die Asphaltsschichten durch Verkehrsbelastung im Bereich der Fahrspuren nachverdichtet werden, was zu einer Erhöhung der Raumdichte bzw. zu einer Verringerung des Volumens und somit zur Spurrinnenbildung in den Fahrspuren führt. Dieser Verformungsvorgang ist im Regelfall auf ein während des Einbaus unzureichend verdichtetes Asphaltmischgut zurückzuführen und stellt meist keinen Mangel der Mischgutkomposition dar. Zum anderen kommt es zur Materialverdrückung in und neben den Fahrspuren. Bei annähernd konstantem Volumen (Dilatanz), wird Material aus den Fahrspuren, wo höchste vertikale Druckbeanspruchungen entstehen, seitlich verdrückt. Dadurch bilden sich neben den Fahrspuren seitliche Aufwölbungen. Dieser Verformungsvorgang wird wesentlich durch die Mischgutzusammensetzung bestimmt. Die Verformungsstabilität von Asphalt wird daher bei der Rezeptur des Mischguts berücksichtigt und stellt eine in Routineprüfungen maßgebliche zu überprüfende Eigenschaft dar.

Die Rezeptur eines herkömmlichen Asphaltmischguts kann hinsichtlich der Verformungsstabilität mithilfe verschiedener Maßnahmen verbessert werden. Dazu zählen beispielsweise die Verringerung des Füller- und Bindemittelgehalts, die Erhöhung des Brechsandanteils und der Einsatz eines harten, (polymer-)modifizierten Bindemittels (siehe z. B. ARAND, W. & von der DECKEN, 1996). Die Erhöhung der Verformungsstabilität ist ein Optimierungsprozess und darf nur im Rahmen der rheologischen Kompatibilität realisiert werden, das heißt nur insoweit, als insbesondere der Ermüdungswiderstand

und die Rissresistenz bei Kälte nicht unzulässig verschlechtert werden.

Der Widerstand von Asphalt gegenüber plastischen Verformungen kann mittels zyklischen Laborprüfungen mit dominanter Druckbeanspruchung analysiert werden. Verformungsversuche werden bei Prüftemperaturen von etwa 50 °C durchgeführt und zielen darauf ab, das Druckkriechen von Asphalt in Form eines Stoffgesetzes zu formulieren, d. h. die elastischen und plastischen Dehnungen als Funktion der Belastungswiederholungen. Als Ergebnis von Verformungsversuchen erhält man die bleibenden axialen Dehnungen zu einer definierten Lastwechselzahl oder auch die Dehnungsrate im Wendepunkt der Kriechkurve.

2.3 Energiedissipation bei zyklisch-dynamischer Beanspruchung

Während der zyklisch-dynamischen Laborprüfung verändert sich das Asphaltverhalten fortlaufend. Dies kann anhand der Veränderung der Primärwirkungen (Spannung, Dehnung) festgestellt und ausgewertet werden. Als aussagekräftige Kenngröße kann dazu die dissipierte Energie herangezogen werden (vgl. SHIHUI & CARPENTER, 2007). Als dissipierte Energie werden jene energetischen Anteile zusammengefasst, die in einem Belastungs-Entlastungszyklus verbraucht werden, in Form von mechanischer Arbeit, Wärmeerzeugung oder Materialschädigung (Rissbildung).

Die dissipierte Energie errechnet sich für ein Volumenelement je Belastungszyklus aus dem Produkt der Spannungsamplitude $\sigma_{0,i}$, der Dehnungsamplitude $\varepsilon_{0,i}$ und dem Sinus des Phasenwinkels φ_i (Gleichung 3).

$$W_i = \pi \cdot \sigma_{0,i} \cdot \varepsilon_{0,i} \cdot \sin\varphi_i \left[\frac{\text{J}}{\text{m}^3} \right] \quad \text{Gl. 3}$$

W_i dissipierte Energie je Volumenelement und Belastungszyklus i [J/m^3]

$\sigma_{0,i}$ Spannungsamplitude [MPa]

$\varepsilon_{0,i}$ Dehnungsamplitude [-]

φ_i Phasenverschiebungswinkel [°]

Bei einem ideal elastischen Material wird die gesamte Energie, die während der Belastung in den

Probenkörper eingebracht wird, bei Entlastung vollständig zurückgestellt. Es gibt keinen Energieverlust bzw. keine Energiedissipation, die Belastungskurve ist mit der Entlastungskurve ident (Bild 5, oben).

Bei einem visko-elastischen Material wie Asphalt, folgen Entlastungs- und Belastungskurve eines Belastungszyklus unterschiedlichen Wegen, wobei ein Teil der Energie durch die viskose Verformung verbraucht, d. h. dissipiert wird. In einem Spannungs-Dehnungsdiagramm erscheint der Belastungszyklus als eine Ellipse (Hysterese), die nach dem französischen Physiker Jules Antoine Lissajous (1822–1880) Lissajous-Figur genannt wird. Die der Ellipse eingeschriebene Fläche entspricht der dissipierten Energie (Bild 5, unten).

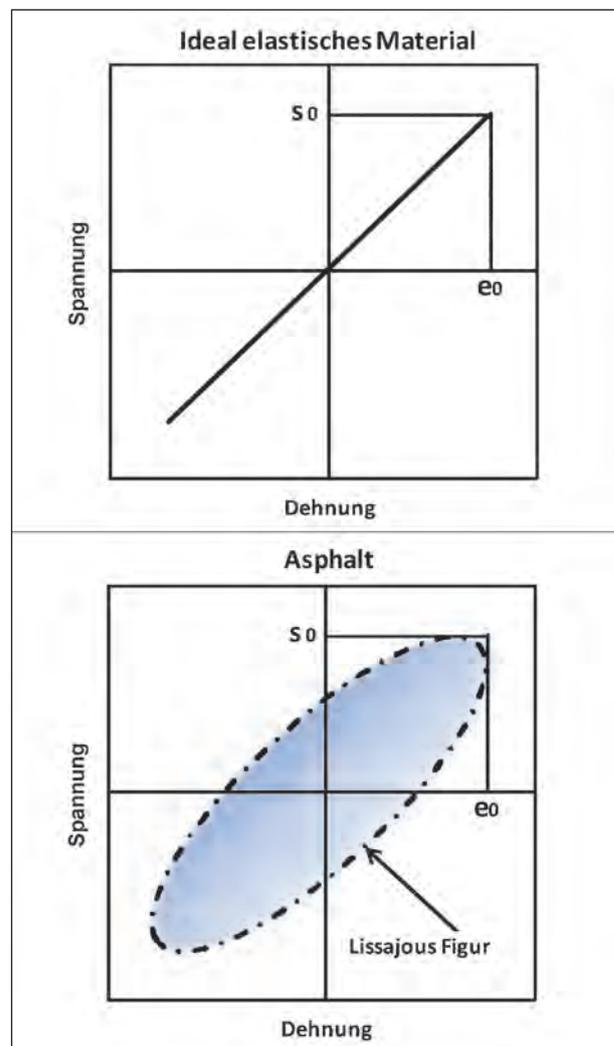


Bild 5: Darstellung von einem Belastungszyklus in Spannungs-Dehnungsdiagramm bei einem ideal elastischen Material (oben) und bei einem visko-elastischen Material wie Asphalt (unten)

Energiedissipation hat verschiedene Ursachen, resultiert aber maßgebend aus der Probekörperschädigung. Wird in einem zyklisch-dynamischen Versuch (bei Kraftregelung) beim Lastimpuls $i+1$ mehr Energie dissipiert als beim Lastimpuls i , so steht dies in Zusammenhang mit einer Änderung der mechanischen Materialeigenschaften, u. a. mit einer Materialschädigung. So kann größtenteils aus der Veränderung der dissipierten Energie während eines zyklisch-dynamischen Laborversuchs auf die Probekörperschädigung geschlossen werden.

Anschaulich wird dies durch die Veränderung der Lissajous-Figur nach unterschiedlichen Anzahlen an Belastungszyklen dargestellt. Eine Verdrehung und Ausbauchung der Lissajous-Figur mit zunehmender Versuchsdauer ist primär auf Materialermüdung zurückzuführen, während eine horizontale Verschiebung entlang der Dehnungsachse als plastische Verformung des Probekörpers interpretiert werden kann.

Bild 6 zeigt beispielhaft die Lissajous-Figuren aus zwei unterschiedlichen zyklisch-dynamischen kraftgeregelten Laborprüfungen, bei denen die Lissajous-Figuren am Versuchsanfang und am Versuchsende dargestellt sind. Das linke Bild zeigt eine Verdrehung und Ausbauchung der Lissajous-Figur und damit eine große Änderung in dissipierter Energie (siehe Bild 6, links), die primär auf Materialschädigung bzw. Materialermüdung zurückzuführen ist. Im rechten Bild verändert die Lissajous-Figur während des Versuchsverlaufs ihre Form kaum, zeigt aber eine deutliche horizontale Verschiebung (Bild 6, rechts). Dies kann mit plastischen Verformungen während des Versuchs begründet werden.

Die Auswertung der dissipierten Energie in Form von Lissajous-Figuren ist eine anschauliche Methode zur Analyse jener Mechanismen während eines zyklisch-dynamischen Laborversuchs, die zum Versagen des Probekörpers führen. Die Veränderung der Lissajous-Figur während des Versuchs ist für jeden Versuchstyp unterschiedlich. Manche Versu-

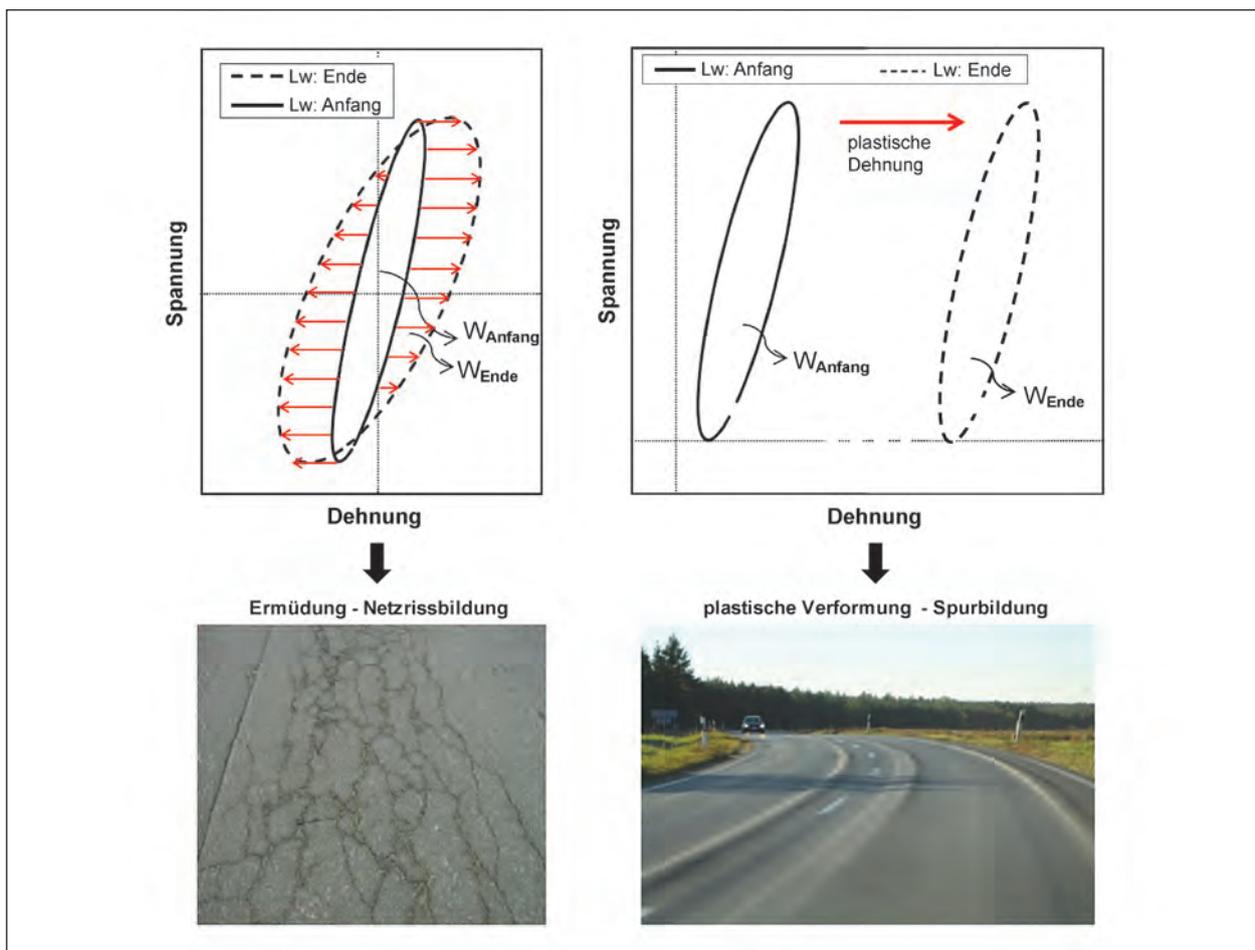


Bild 6: Interpretation von kraftgeregelten Ermüdungsprüfungen (links) und zyklisch-dynamischen Verformungsprüfungen (rechts): Lissajous-Figuren jeweils für einen Lastwechsel am Versuchsbeginn (Lw: Anfang) und am Versuchsende (Lw: Ende) (schematisch) (vgl. di BENEDETTO, 2013)

che sind geprägt von Materialschädigung durch Ermüdung (Verdrehung und Ausbauchung der Ellipse), andere von Materialschädigung durch Verformung (Horizontalverschiebung der Ellipse).

Anhand der Auswertung von Lissajous-Figuren für Spaltzug-Schwell- und Zug-Schwellversuche (bei 20 °C Prüftemperatur) wurde in einem früheren Forschungsprojekt (siehe WISTUBA et al., 2013) nachgewiesen, dass diese Versuchstypen zu vergleichsweise kleinen Änderungen in den Ermüdungseigenschaften führen, aber zu großen plastischen Zugverformungen (bis zu 25 ‰ beim Spaltzug-Schwellversuch, Bild 7). Bei beiden Prüfverfahren ist somit

die Materialermüdung gegenüber der Verformung untergeordnet und das Bruchversagen des Probekörpers ist zum überwiegenden Teil eine Folge von überlagerten plastischen Deformationen (vgl. auch di BENEDETTO, 2013). Vor diesem Hintergrund wird in Kapitel 4 der Widerstand von Walzasphalten gegenüber bleibenden Verformungen auch mittels Spaltzug-Schwellversuchen bestimmt und jenen Ergebnissen gegenübergestellt. Es soll überprüft werden, ob die Anfälligkeit des Asphalts gegenüber plastischer Zugverformung in einem Zusammenhang steht mit dessen Anfälligkeit gegenüber plastischer Druckverformung (festgestellt in Verformungsversuchen).

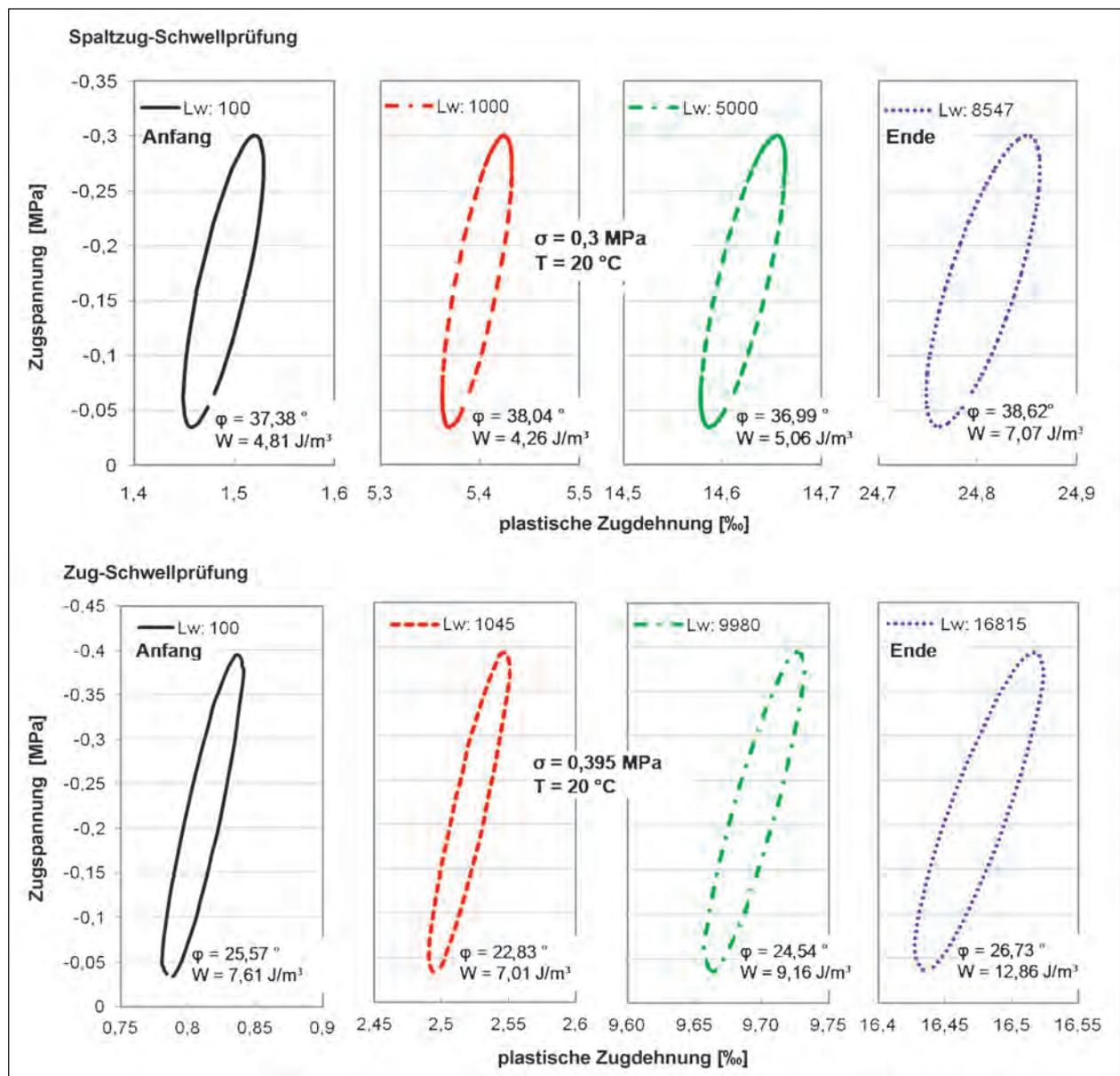


Bild 7: Kraftgeregelte Spaltzug-Schwellversuch und Zug-Schwellprüfung an Asphaltbeton AC 11 D S bei einer Prüftemperatur von $T = 20 \text{ °C}$: Darstellung von Lissajous-Figuren am Anfang der Belastungsphase (100. Lastwechsel) und bei zunehmenden Lastwechselzahlen bis zum Erreichen des Ermüdungskriteriums (WISTUBA et al., 2013)

Wie gezeigt werden konnte, ist die energiebasierte Auswertung von zyklischen Laborprüfungen sehr aussagekräftig, weil unterschiedliche Anteile der inkrementellen Schädigung identifiziert und quantifiziert werden: Materialermüdung, plastische Zugverformung und plastische Druckverformung. Im Rahmen dieses Forschungsprojekts wurde die dissipierte Energie für jeden Versuchstyp ausgewertet.

3 Untersuchungen zur Probekörperherstellung

3.1 Laborverdichtung mit dem Walzsektor-Verdichtungsgerät

Die Durchführung von Performance-Prüfungen erfordert die Herstellung von Asphaltprobekörpern aus im Labor verdichtetem Mischgut. Um die Ergebnisse der Laboruntersuchungen auf das Verhalten vorhandener bzw. zu erstellender Asphaltbefestigungen übertragen zu können, müssen die im Labor hergestellten Probekörper möglichst dieselben mechanischen Eigenschaften aufweisen wie die mittels Walzverdichtung in der Praxis produzierten Straßenschichten.

Heute steht eine ganze Reihe unterschiedlicher Laborverdichtungsverfahren zur Verfügung, die auf schlagender, knetender, walzender und/oder vibratorischer Verdichtungswirkung beruhen. Folgende Verdichtungsverfahren zur Probekörperherstellung sind europäisch genormt: die Schlagverdichtung mit dem Marshall-Verdichtungsgerät gemäß EN 12697-30, die Gyrator-Verdichtung gemäß EN 12697-31, die Laborverdichtung mit einem Vibrationsverdichter gemäß EN 12697-32 und mit einem Walzenverdichtungsgerät gemäß EN 12697-33.

Aus zahlreichen Forschungsergebnissen im In- und Ausland ist hinlänglich bekannt, dass das Verdichtungsverfahren die resultierenden Eigenschaften des Asphaltprobekörpers wesentlich beeinflussen kann (siehe z. B. RENKEN & BÜCHLER, 2004). Die Eigenschaften des Asphaltprobekörpers wiederum bestimmen maßgeblich die Qualität des Ergebnisses der Performance-Prüfung. Somit ist die Wahl des richtigen Verdichtungsverfahrens von großer Bedeutung hinsichtlich der Ergebnisse aus der fundamentalen Prüfung von Asphaltmischgut.

Im Rahmen dieses Projekts wird ausschließlich auf das Verdichtungsverfahren mit dem Walzsektor-

Verdichtungsgerät zurückgegriffen, das vor rund 20 Jahren am Institut für Straßenwesen der TU Braunschweig (ISBS) entwickelt wurde (siehe ARAND et al., 1990; ARAND & RENKEN, 1999). Das Gerät realisiert eine walzende Verdichtung von Asphaltmischgut im Labor und ermöglicht die Herstellung von Asphaltplatten, die vergleichbare mechanische Eigenschaften wie großtechnisch auf der Straße eingebaute und verdichtete Asphalte aufweisen (RENKEN, 2002). Die Walzsektor-Verdichtung ist heute weltweit als praxisadäquates Laborverdichtungsverfahren anerkannt. Aus den damit hergestellten Prüfplatten können durch Sägen oder Bohren homogene Probekörper mit definierten Eigenschaften hergestellt werden, die im Rahmen von fundamentalen Asphaltprüfungen Verwendung finden sollen (z. B. Abkühl-, Kältezug-, Steifigkeits-, Ermüdungs-, Triaxialversuche).

Im deutschen Anwendungsdokument der EN 12697-33 der Technischen Prüfvorschriften für Asphalt, TP Asphalt-StB Teil 33 „Herstellung von Asphalt-Probepplatten im Laboratorium mit dem Walzsektor-Verdichtungsgerät (WSV)“, Ausgabe 2007 ist das Verfahren spezifiziert. Durch die Präzisierung nicht nur des Walzsektor-Verdichtungsgerätes sondern auch des Verdichtungsregimes ist die Herstellung von Probekörpern mit vergleichbaren Materialeigenschaften möglich.

Gemäß TP Asphalt-StB Teil 33 besteht das Walzsektor-Verdichtungsgerät aus einem beheizbaren Walzsektor mit Stahlbandage, der am Drehmittelpunkt an der Belastungseinrichtung aufgehängt ist. Als Belastungseinrichtungen sind hydraulisch und mechanisch arbeitende Geräte im Einsatz, die sowohl kraft- als auch weggeregelte Lasten aufbringen können. Die auf einem horizontal beweglichen Schlitten montierte, beheizbare Verdichtungsform ist in ihren Abmessungen auf den Walzsektor abgestimmt (vgl. Bild 8).

Zunächst wird das zu verdichtende Asphaltmischgut auf die vorgesehene Verdichtungstemperatur (bei Straßenbaubitumen: 135 °C, bei PmB: 145 °C) gebracht und anschließend gleichmäßig auf das Einlegeblech in die auf 80 °C vorgeheizte, rechteckige Verdichtungsform gelegt. Die Verdichtungsform befindet sich auf einem spurgeführten, horizontal beweglichen Schlitten. Anschließend wird der ebenfalls beheizte Walzsektor abgesenkt und erzeugt dann eine Druckspannung zwischen dem Sektor und dem zu verdichtenden Mischgut. Zeitgleich wird die Verdichtungsform horizontal hin- und

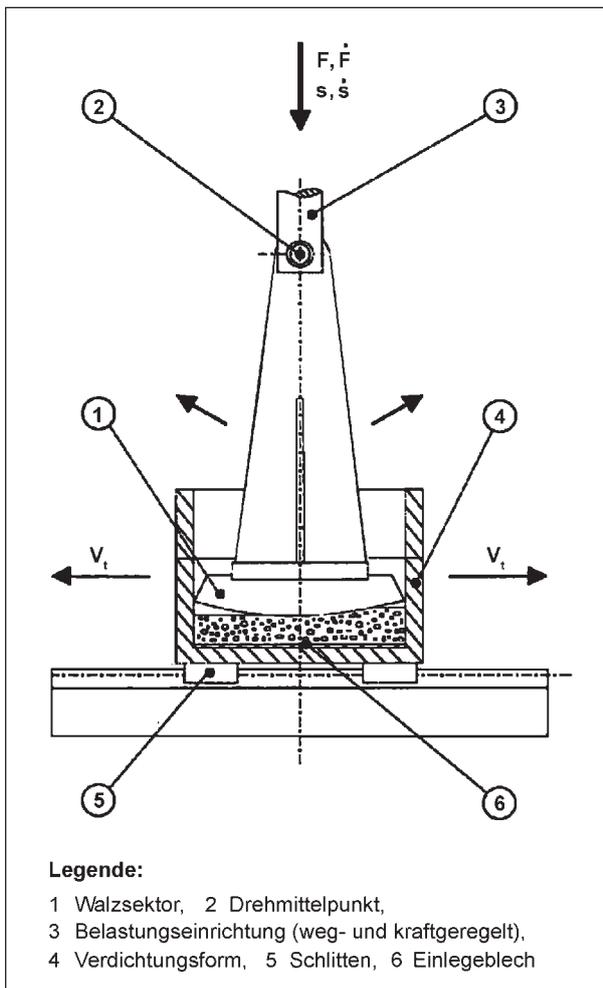


Bild 8: Skizze und Abmessungen des Walzsektor-Verdichtungsgerätes (FGSV, 2007)

her bewegt. Der dabei mitgeführte Walzsektor wird während des Vorgangs um seinen Drehmittelpunkt ausgelenkt und erzeugt eine Walzbewegung auf der Oberseite der Mischgutprobe.

Für die Herstellung von Asphalt-Probepplatten mit praxisadäquaten Eigenschaften ist ein Verdichtungsregime definiert, das die Verdichtungsabläufe in situ möglichst praxisnah simuliert. Der Verdichtungsprozess gliedert sich in zwei Verdichtungsdurchgänge. Während der Vorverdichtung wird die Verdichtungsarbeit der schwimmenden (Hochverdichtungs-)Einbaubohe des Straßenfertigers nachgestellt. Dazu wird der Walzsektor mit einer Geschwindigkeit von 0,5 mm/Übergang weggeregelt abgesenkt, bis auf der Asphaltplatte eine Last von 2,6 kN erreicht wird. Die dabei erreichte Plattenhöhe wird für weitere fünf Übergänge konstant gehalten. Danach wird der Walzsektor hochgefahren (0,5 mm/Übergang), bis die Platte vollständig entlastet ist. Mittels der Hauptverdichtung wird der Verdichtungsprozess der in situ eingesetzten Glattmantelwalzen simuliert. Zunächst werden zur Glättung der Oberfläche 15 Übergänge bei konstanter Last von 0,52 kN aufgebracht. Danach wird die Linienlast kraftgeregelt in 15 Stufen bis zu Erreichen einer Maximalkraft von 19,5 kN gesteigert. Die Entlastung erfolgt in weiteren 15 gleichen Laststufen. In Bild 9 sind der Verlauf der zur Verdichtung aufgetragenen Kraft sowie die dabei erreichte Plattenhöhe während dieser Verdichtungsschritte schematisch dargestellt.

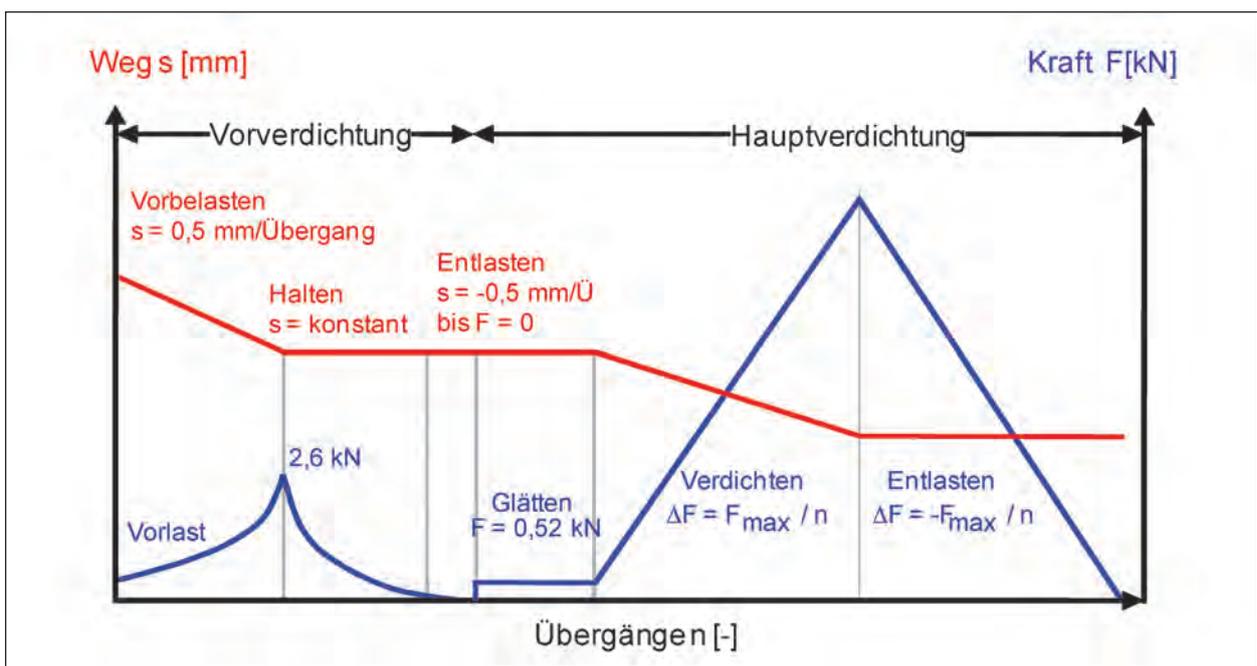


Bild 9: Plattenhöhe und aufgetragene Kraft während der Verdichtung im Walzsektor-Verdichtungsgerät: weggeregelte Vorverdichtung, kraftgeregelt Hauptverdichtung

Erfahrungsgemäß werden Verdichtungsgrade zwischen 99 % und 101 % – bezogen auf die Dichte des Marshall-Probekörpers – erreicht. Mit der kraftgeregelten Hauptverdichtung werden übermäßige Beanspruchungen der Korn-zu-Korn-Kontaktflächen und so unzulässige Kornzertrümmerungen vermieden.

3.2 Verdichtungsregime zur Herstellung dicker Asphaltprobplatten

Im Triaxialversuch wird ein zylindrischer, schlanker Asphaltprobekörper primär in Achsrichtung druckbelastet. Die Richtung der Drucklast entspricht idealerweise der Richtung der Verdichtungskraft, mit der das Mischgut verdichtet wird. Somit sind ausreichend dicke Probplatten notwendig, mit Plattendicken von etwa 200 mm.

Die Praxis zeigt, dass die Herstellung dicker, ausreichend homogener Asphaltplatten mittels eines entsprechend großen Verdichtungsgeräts und über einen mehrlagigen Einbau zu erreichen ist (siehe SCHINDLER, 2008; HÖFLINGER, 2006; RINGLEB & HERZBERG, 2012).

In der Laborpraxis sind große Verdichtungsgeräte wenig verbreitet und vielfach ist das notwendige Verdichtungsregime unbekannt zur Herstellung ausreichend genauer Asphaltplatten. Aus diesem

Grund wird in der Folge ein geeignetes Verdichtungsregime erläutert.

Es sollen ausreichend homogene Asphaltplatten mit einer Höhe von 220 mm zuverlässig hergestellt werden können. Dazu ist ein Walzsektor-Verdichtungsgerät großer Bauart vorteilhaft. Ein Verdichtungsgerät der neuesten Generation, das diese Anforderung erfüllt, steht an der TU Braunschweig zur Verfügung (Bild 10). Mithilfe dieses Walzsektor-Verdichtungsgeräts ist es möglich, Asphalt-Probplatten mit einer Höhe von bis zu 300 mm herzustellen.

Die Prozessorsteuerung des verwendeten Walzsektor-Verdichtungsgeräts erlaubt es, die Verdichtungsparameter zu variieren bzw. einzelne Verdichtungsregimes getrennt voneinander auszuführen.

Durch Variation der Verdichtungskräfte und Überrollungszahlen wurde experimentell ein Verdichtungsprogramm entwickelt, welches eine homogene Dichteverteilung über die gesamte Asphalt-Probplatte sicherstellt. Dazu wurden in Anlehnung an die TP Asphalt-StB Teil 33 sowie an Untersuchungsergebnisse aus vorangegangenen Arbeiten (SCHINDLER, 2008; HÖFLINGER, 2006) zwei Varianten der Verdichtung erprobt: die Wegregelung und eine Kombination aus Weg- und Kraftregelung.

Die Untersuchungen erfolgten an Asphaltbeton für Asphalttragschichten der Sorte AC 22 T S mit 4,5 M-% Gehalt an Straßenbaubitumen 50/70 (siehe Kapitel 4.2, Tabelle 9). Die Herstellung von



Bild 10: Walzsektor-Verdichtungsgerät zur Herstellung großformatiger Asphalt-Probplatten (500 x 700 x 300 mm³)

Asphalt-Probepplatten erfolgte dreilagig, wobei alle drei Lagen heiß auf heiß unmittelbar nacheinander eingebaut wurden. Die Verdichtung erfolgte im Hinblick auf einen Zielhohlraumgehalt.

3.2.1 Weggeregelte Plattenherstellung

Bei der weggeregelten Verdichtung wird das Walzsegment kontinuierlich um einen vorgegebenen Weg je Übergang abgesenkt. Der Verdichtungsprozess ist beendet, wenn die voreingestellte Zielhöhe oder eine zu erreichende Höchstkraft erreicht wird. Im Anschluss daran wird der Probekörper mit fixer Höhenposition des Segments mehrfach ($n = 15$) überrollt und dann bei kontinuierlicher Wegänderung des Segments je Übergang bis zur vollständigen Spannungsfreiheit wieder entlastet. Bild 11 zeigt eine schematische Darstellung der sich dabei ergebenden Absenkung des Walzsegments und der daraus resultierenden Kräfte.

3.2.2 Kombinierte weg-kraftgeregelte Plattenherstellung

Die in Deutschland vorgeschriebene technische Prüfvorschrift für die Herstellung von Asphalt-Probepplatten im Labor mit dem Walzsektor-Verdichtungsgerät (TP Asphalt-StB Teil 33) sieht eine kombinierte weg-kraftgeregelte Verdichtung vor.

Die Herstellung von dicken, dreilagigen Asphalt-Probepplatten erfolgte daher zum Vergleich alternativ mittels kombinierter weg-kraftgeregelter Verdich-

tung unter systematischer Variation der Höchstlast und der Anzahl der Walzübergänge in der Hauptverdichtungsphase (siehe Tabelle 1).

3.2.3 Bewertung

Die Bewertung der Homogenität der mit den unterschiedlichen Verdichtungsregimes hergestellten Asphalt-Probepplatten erfolgte durch Raumdichtebestimmung an einzelnen Bohrkernscheiben, die jeweils aus der fertigen Asphalt-Probepplatte gemäß Bild 12 entnommen wurden. Die angestrebte Raumdichte war $2,53 \text{ g/cm}^3$.

Stufe 1	Grundmodell (TP Asphalt-StB, Teil 33)	
Stufe 2	Variation der Maximalkräfte F_{max}	Variation der Überrollungen n
Stufe 3	Anpassung der Maximalkräfte und der Überrollungen	
Stufe 4	Überprüfung der Reproduzierbarkeit	

Tab. 1: Parameterstudie bei kombinierter weg-kraftgeregelter Verdichtung

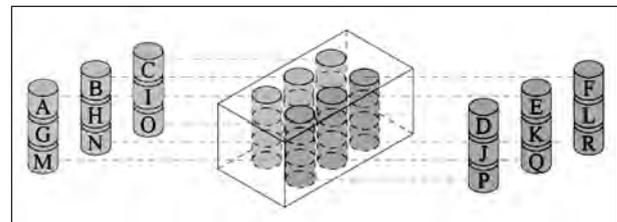


Bild 12: Entnahme-Schema der Bohrkernscheiben zur Überprüfung der Verdichtungs-Homogenität mittels Raumdichtebestimmung

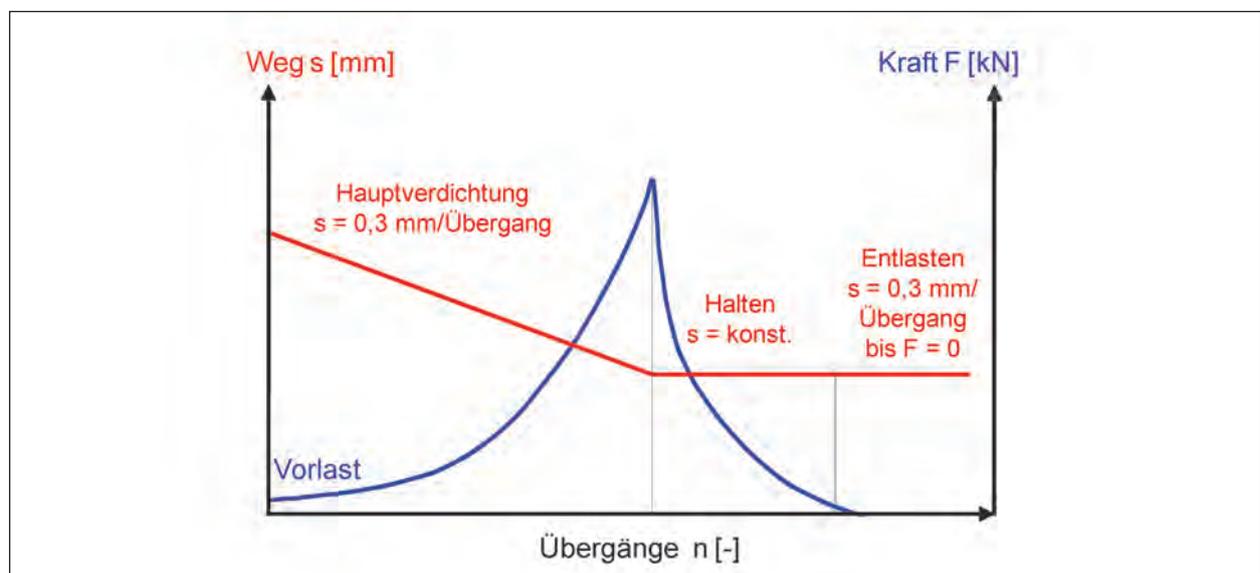


Bild 11: Kraft-Weg-Verlauf bei weggeregelter Verdichtung mit einer Vorschubgeschwindigkeit von $s = 0,3 \text{ mm/Übergang}$

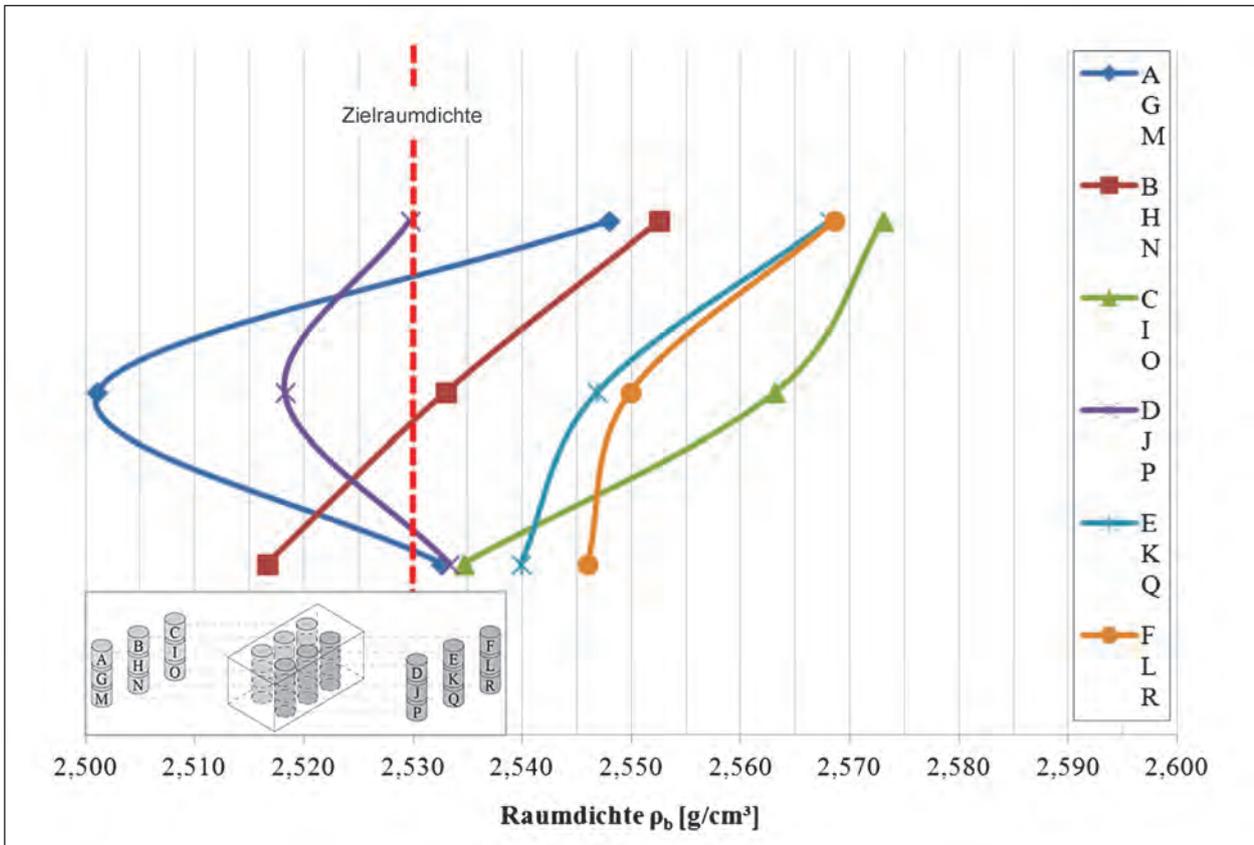


Bild 13: Dichteverteilung innerhalb einer Asphaltprobeplatte, die mittels weggeregeltem Verdichtungsregimes hergestellt wurde

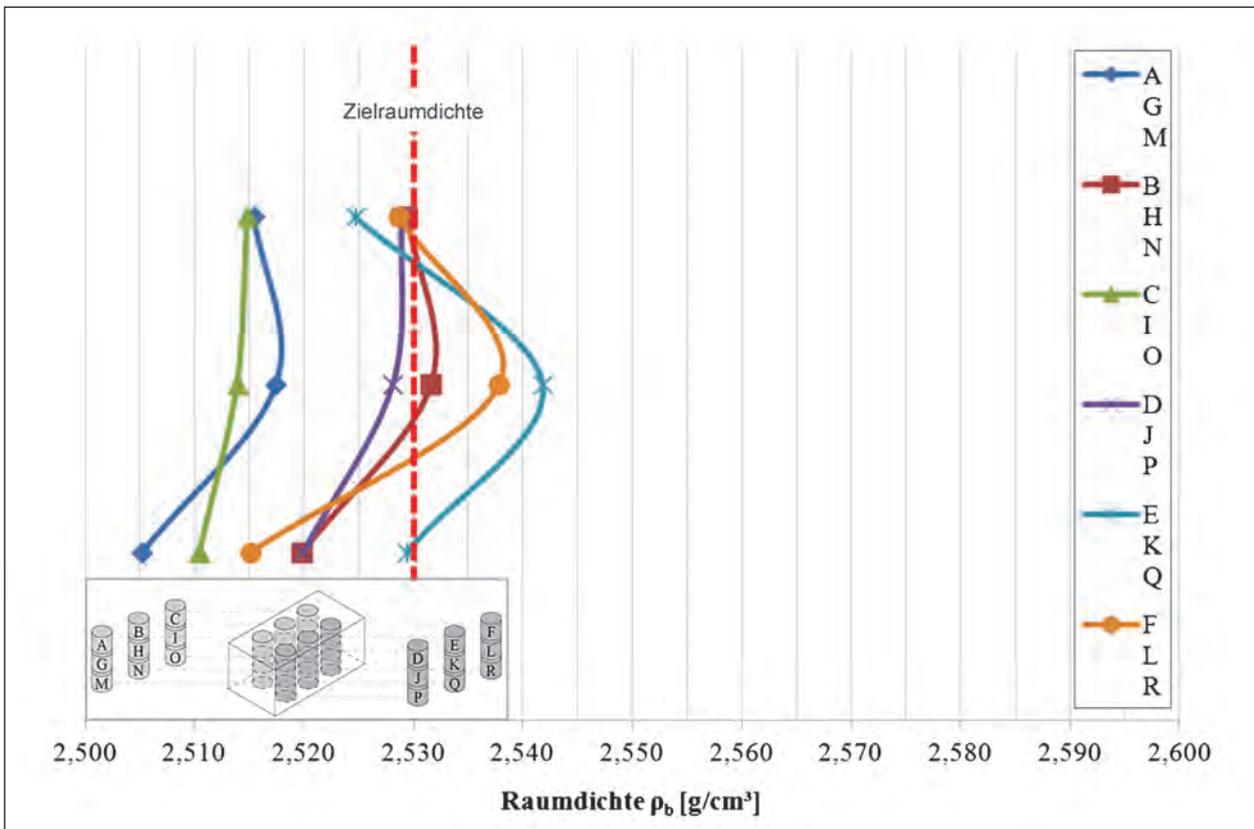


Bild 14: Dichteverteilung innerhalb einer Asphaltprobeplatte, die mittels kombiniertem weg-kraftgeregeltem Verdichtungsregimes hergestellt wurde

Die Verteilung der resultierenden Raumdichten nach weggeregelter Verdichtung ist in Bild 13 dargestellt, jene nach weg-kraftgeregelter Verdichtung in Bild 14. Die Messgrößen übereinanderliegender Bohrkernscheiben sind miteinander verbunden und lassen so den lagenweisen Verlauf erkennen. Die Betrachtung einzelner Reihen gibt Aufschluss über die Spannweite der Messgrößen innerhalb der einzelnen Lagen.

Ein Vergleich der mit den beiden Verdichtungsregimes erzielten Dichteverteilungen ermöglicht eine Bewertung der Verfahren.

Bei der weggeregelten Verdichtung schwanken die Verteilungen von Dichte und Hohlraumgehalt deutlich sowohl innerhalb einzelner Lagen als auch über die Lagen hinweg. Hingegen wird mit dem weg-kraftgeregelter Verdichtungsregime eine bessere Homogenität erreicht, die sich der angestrebten Raumdichte mit ausreichender Genauigkeit annähert.

Die mittels Weg-Kraftregelung optimierten Verdichtungsparameter für jede Lage, bezüglich Höchstkraft und Überrollungszahl in der Hauptverdichtungsphase, die zu einer ausreichend homogenen

	maximale Kraft F_{\max} [kN]	Überrollungszahl n [-]
obere Lage	19,0	8
mittlere Lage	3,5	12
untere Lage	3,0	10

Tab. 2: Optimierte Parameter für eine kombinierte kraft-/weg-geregelte Verdichtung

Dichteverteilung in der dreilagig hergestellten Asphaltplatte führt, sind in Tabelle 2 angegeben.

3.3 Einfluss von Verdichtungsregime und Bohrrichtung auf das Prüfergebnis

3.3.1 Möglichkeiten zur Wahl der Bohrrichtung

Bei einer ausreichend dicken Asphaltprobeplatte kann die Bohrrichtung ident mit der Wirkrichtung der Verdichtungskraft gewählt werden, mit der die Druckkraft des Walzsektors während dem Verdichtungsvorgang in den Asphalt eingebracht wird und nach der sich die innere Struktur des Asphalthaufwerks während des Verdichtungsvorganges ausrichtet. Somit stimmt – realitätsnah im Vergleich zu den Wirkrichtungen in der Straße – die primäre Belastungsrichtung im Triaxialversuch mit der Wirkrichtung der Verdichtungskraft überein (siehe Bild 15, Bohrrichtung 1).

Meistens wird jedoch eine Bohrrichtung gewählt, die von der idealen Bohrrichtung 1 abweicht. So werden in vielen Laboratorien bevorzugt einlagige dünne Asphaltplatten hergestellt und die Probekörper horizontal ausgebohrt, obwohl bekannt ist, dass die Anisotropie die mechanischen Eigenschaften von Asphalt maßgeblich beeinflusst.

Entsprechend Bild 15, werden in diesem Forschungsprojekt horizontale Bohrrichtungen parallel zur Verdichtungsrichtung (Bohrrichtung 2) oder orthogonal zur Verdichtungsrichtung (Bohrrichtung 3) ausgeführt und die sich daraus ergebenden Ein-

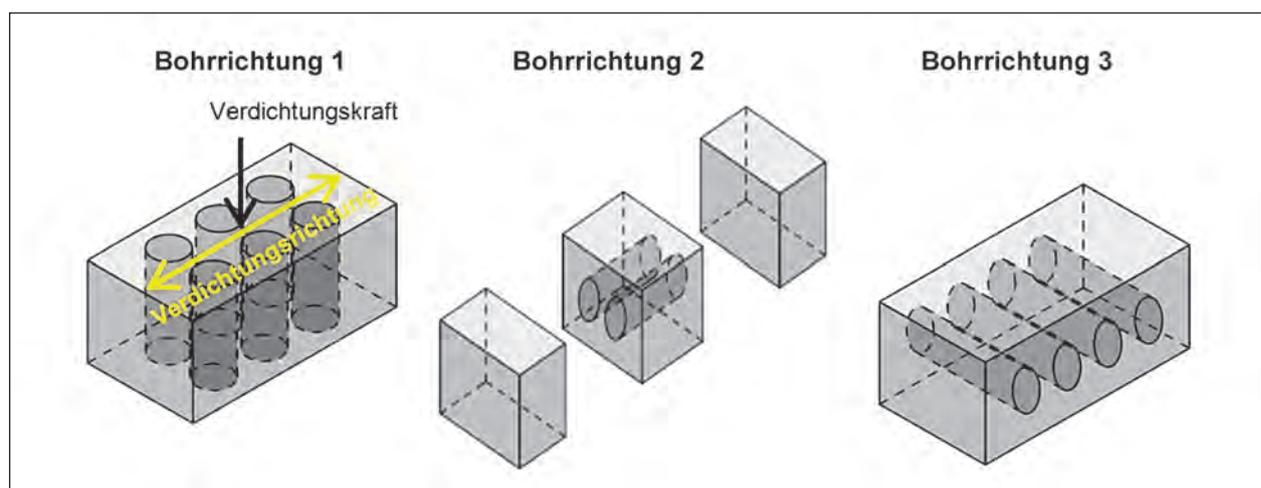


Bild 15: Bohrrichtungen für die Gewinnung von zylindrischen Probekörpern aus Asphaltplatten: Bohrrichtung 1 parallel zur Verdichtungskraft, Bohrrichtung 2 orthogonal zur Verdichtungskraft und in Verdichtungsrichtung, Bohrrichtung 3 orthogonal zur Verdichtungskraft und orthogonal zur Verdichtungsrichtung. Auswertung von Triaxialversuchen

flüsse auf die Ergebnisse von Verformungsprüfungen analysiert.

3.3.2 Auswertung von Triaxialversuchen

Für die Untersuchung des Einflusses der Verdichtungsart und der Verdichtungsrichtung auf die Verformungsbeständigkeit wurden beide (oben vorgestellte) Verdichtungsregimes und alle 3 Bohrrichtungen vergleichend analysiert.

Dazu wurden Triaxialversuche an zylindrischen Asphalt-Probekörpern mit einer Probekörperhöhe von $h = 200$ mm und einem Probekörperdurchmesser von $\varnothing = 100$ mm durchgeführt. Die Prüfbedingungen sind in Tabelle 3 angegeben.

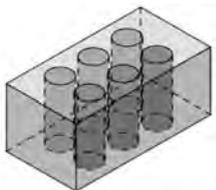
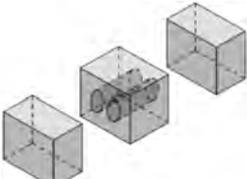
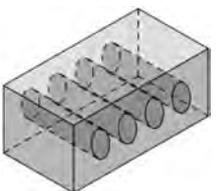
Die Versuchsergebnisse sind für jede Verdichtungsart und jede Bohrrichtung mindestens dreifach belegt.

Die Auswertung und Darstellung der Versuchsergebnisse erfolgen in Anlehnung an die Europäische Norm EN 12697-25, indem die resultierende plastische Dehnung beim 10.000-sten Lastwechsel und die Dehnungsrate berechnet werden. Alle ermittelten Beurteilungsparameter sind in Tabelle 4 einander gegenübergestellt, Bild 16 zeigt die resultierenden Kriechkurven.

Je nach Verdichtungsregime und Bohrrichtung resultieren z. T. deutliche Unterschiede in den Vergleichsgrößen und Kriechkurven.

Prüftemperatur	40 °C
Frequenz der axialen Belastung	3 Hz
Zyklische Axialbelastung	sinusförmig, ohne Lastpausen
Axiale Belastungsamplitude	300 kPa
Radialer Stützdruck	150 kPa (konstant)
Anzahl der Lastwechsel	20.000
Kontaktflächenbehandlung	planparalleles Schleifen und Beschichten mit Silikonfett

Tab. 3: Prüfbedingungen für die Triaxialversuche

Bohrrichtung	weggeregelte Verdichtung				kraft-wegeregelte Verdichtung			
	$\epsilon_{\text{axial},10.000}$ [%]		f_c [$\mu\text{m}/\text{m}/\text{n}$]		$\epsilon_{\text{axial},10.000}$ [%]		f_c [$\mu\text{m}/\text{m}/\text{n}$]	
Richtung 1 	3,42 3,05 2,82	2,94	0,360 0,258 0,214	0,277	2,68 2,64 2,96	2,76	0,215 0,194 0,215	0,208
Richtung 2 	3,44 3,06 3,32 3,23	3,26	0,289 0,282 0,281 0,287	0,285	2,59 2,99 2,83	2,80	0,218 0,295 0,298	0,270
Richtung 3 	3,76 3,66 3,57 3,60	3,65	0,404 0,363 0,348 0,378	0,373	2,80 3,12 3,22	3,05	0,397 0,387 0,457	0,414

Tab. 4: Ergebnisse der Triaxialversuche: axiale Dehnungen beim 10.000-sten Lastwechsel ($\epsilon_{\text{axial},10.000}$) und Dehnungsraten (f_c)

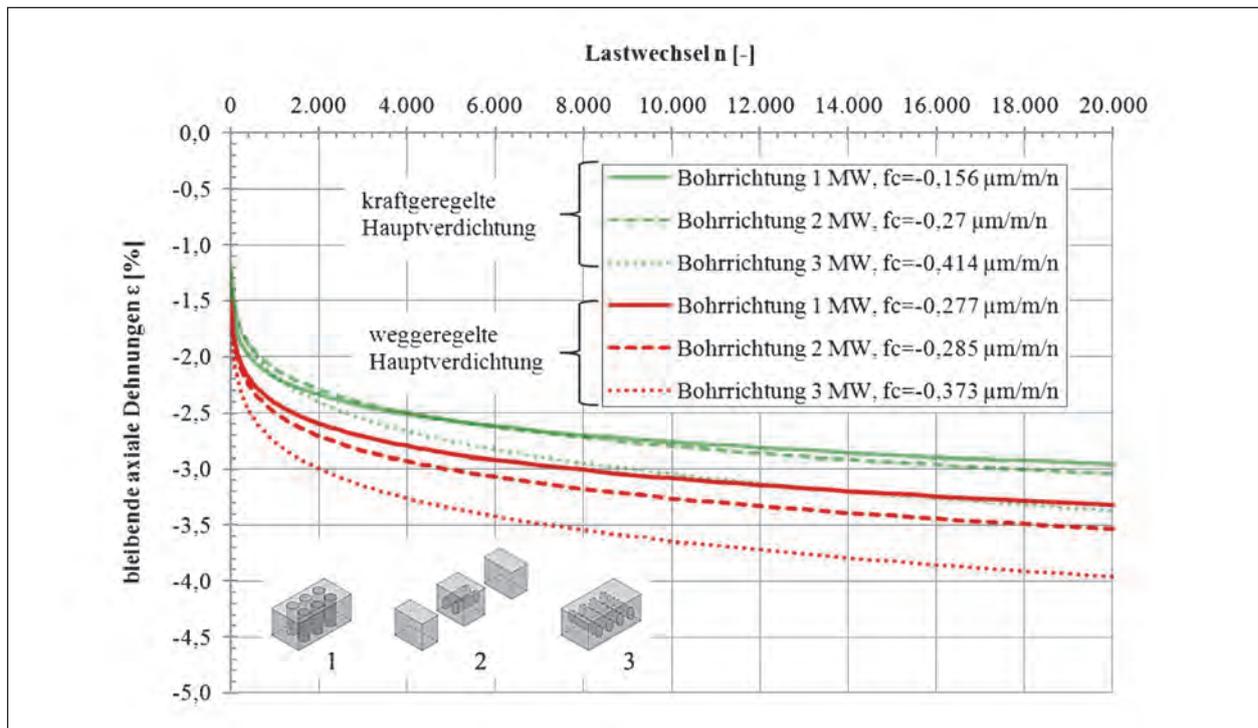


Bild 16: Ergebnisse der Triaxialversuche: Kriechkurven (gemittelt nach Dreifachbelegung)

Bezüglich des Einflusses der Bohrrichtung ergibt sich für die beiden untersuchten Verdichtungsregimes die gleiche Reihung der Prüfergebnisse. Die größte Verformungsbeständigkeit wird jeweils bei den Probekörpern der Bohrrichtung 1 erzielt, die niedrigste bei Bohrrichtung 3.

Bei der weg-kraftgeregelten Verdichtung ergeben sich im ungünstigsten Fall Dehnungen $\epsilon_{\text{axial},10.000}$, welche ca. 10,5 % über den Dehnungen der günstigsten Variante liegen. Die Dehnungsrate der Prüfkörper nach Bohrrichtung 3 entspricht der doppelten Kriechrate der Probekörper mit Bohrrichtung 1.

Bei weggeregelter Verdichtung ergeben sich in Bohrrichtung 3 um ca. 24 % höhere Dehnungen $\epsilon_{\text{axial},10.000}$ als in Bohrrichtung 1, und eine um ca. 34,7 % höhere Dehnungsrate.

Die Zunahme des irreversiblen axialen Verformungsanteils während des Triaxialversuchs ist bei Probekörpern, die mittels weggeregelter Verdichtung hergestellt wurden, deutlich stärker ausgeprägt als bei Probekörpern, die mittels weg-kraftgeregelter Verdichtung hergestellt wurden. Im ungünstigsten Fall (Bohrrichtung 3 nach weggeregelter Verdichtung) sind die axialen Dehnungen $\epsilon_{\text{axial},10.000}$ um 32,2 % und die Kriechrate f_c um 99,0 % höher als die Parameter der günstigsten Variante (Bohrrichtung 1 nach weg-kraftgeregelter Verdichtung).

Die Spannweite der bleibenden Dehnungen verschiedener Bohrrichtungen ist nach weg-kraftgeregelter Verdichtung wesentlich geringer.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass eine Bohrrichtung senkrecht zur Ausrichtungsebene der Körner beim Verdichtungsprozess zwingend notwendig ist. Dazu sind möglichst großformatige, entsprechend dicke homogene Asphalt-Probekörper mittels Walzsektor-Verdichtungsgerät unter weg-kraftgeregelter Verdichtung herzustellen, aus denen die zylindrischen Probekörper für die Triaxialversuchen vertikal gebohrt werden können.

4 Vergleichende Analyse von zyklischen Prüfverfahren

4.1 Überblick zu den berücksichtigten Laborprüfverfahren

Zur Charakterisierung des elasto-plastischen Materialverhaltens von Asphalt werden in diesem Projekt zeitraffende Laborprüfverfahren mit zyklischer Belastung eingesetzt. Diese Prüfverfahren umfassen sowohl solche mit dominanter Druckbeanspruchung (Verformungsversuche) als auch solche mit dominanter Zugbeanspruchung (Ermüdungsversuche).

Die Einbeziehung von Ermüdungsversuchen (Spaltzug-Schwellversuchen) erfolgt vor dem Hintergrund, dass der Schädigungseintrag bei Ermüdungsversuchen neben der Materialermüdung stets auch zufolge plastischer Verformung erfolgt – wenn auch zufolge plastischer Zugverformung (siehe Kapitel 2.3). Es soll überprüft werden, ob die Anfälligkeit des Asphalts gegenüber plastischer Zugverformung in einem Zusammenhang steht mit dessen Anfälligkeit gegenüber plastischer Druckverformung (festgestellt in Verformungsversuchen).

Im Rahmen dieses Forschungsprojekts eingesetzte Verformungsversuche (Prüfverfahren zur Charakterisierung des Verformungswiderstandes) sind Druck-Schwellversuche.

Beim Druck-Schwellversuch wird über einen gelenkig gelagerten Druckstempel in axialer Richtung eine zyklische (schwellende) Beanspruchung auf die Stirnfläche eines zylindrischen Asphaltprüfkörpers aufgebracht. Eine möglichst realitätsnahe, homogene Spannungsverteilung innerhalb des Prüfkörpers wird angestrebt. Daher wird als Form für den Lastimpuls meist eine Sinusschwingung gewählt, weil bei Fahrzeugüberfahrt die reale Form der Druckdehnung in einem Punkt der Oberbauschicht unterhalb der Reifenauflandfläche einer Sinusschwingung stark ähnelt. Als Prüfergebnis werden die auftretenden axialen plastischen Verformungen aufgezeichnet und als Dehnungen in Form einer Kriechkurve dargestellt.

Druck-Schwellversuche werden hinsichtlich der Prüfgeometrie und -bedingungen grundsätzlich unterschieden in

- Druck-Schwellversuch ohne Stützdruck (hier nicht weiter verfolgt),

- Druck-Schwellversuch mit nicht näher bekanntem Stützdruck, sog. Stempeleindringversuch (siehe Kapitel 4.1.1) und
- Druck-Schwellversuch mit definiertem Stützdruck, sog. Triaxialversuch (siehe Kapitel 4.1.2).

Zur Analyse des Ermüdungsverhaltens von Walzasphalten ist eine ganze Reihe von Laborprüfverfahren bekannt. Der in Deutschland am weitesten verbreitete und daher in diesem Projekt eingesetzte Versuchstyp ist der Spaltzug-Schwellversuch (siehe Kapitel 4.1.3).

4.1.1 Stempeleindringversuch

Stempeleindringversuch ohne Stützring

Beim Stempeleindringversuch (gemäß TP Asphalt-StB, Teil 25 A 2) wird ein zylindrischer Asphaltprobekörper ($\varnothing 197 \pm 5$ mm) mit einem Druckstempel belastet, dessen Außendurchmesser ($\varnothing 80$ mm) so klein ist, dass der Asphaltprüfkörper nur in einem eingeschränkten mittleren Bereich einer Druckbeanspruchung ausgesetzt ist. Damit werden rund um den beanspruchten Bereich wirkende Einspannungseffekte simuliert, wie sie auch in der Straße aufgrund der Schichtausdehnung vorhanden sein müssen. Der Lastimpuls wird sinusförmig mit Lastpausen gewählt (Bild 17).

Ein Belastungszyklus besteht somit aus Lastimpuls und Lastpause. Während der Prüfung akkumulieren sich bleibende Verformungen (Bild 18), wodurch es zu einer Verringerung der Probekörperhöhe kommt.

Für jeden Lastzyklus kann die plastische Druckdehnung nach Gleichung 4 berechnet werden:

$$\varepsilon_{pd,i} = \frac{h_0 - h_i}{h_0} \cdot 1000 \text{ [‰]} \quad \text{Gl. 4}$$

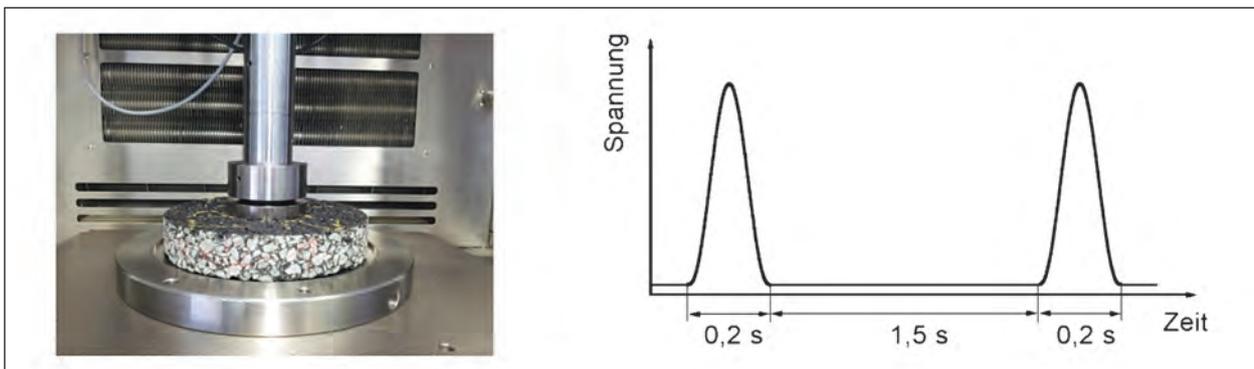


Bild 17: Stempeleindringversuch: Prüfvorrichtung (links) und Lastimpuls (rechts)

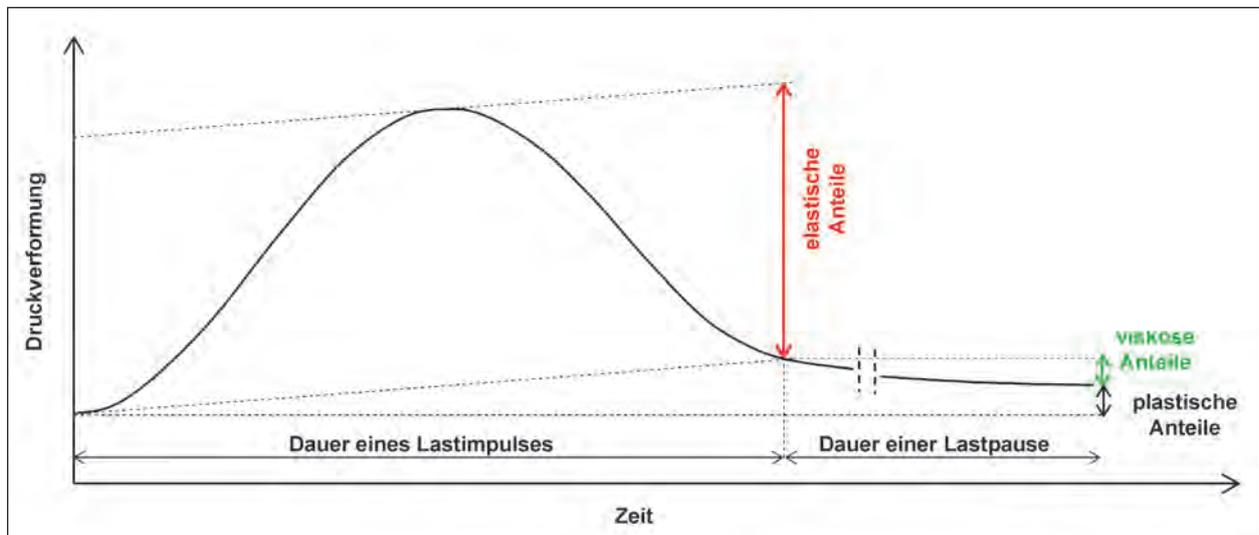


Bild 18: Verformungsanteile bei einem Lastzyklus im Stempelversuch (schematisch)

$\epsilon_{pd,i}$ plastische Druckdehnung nach dem i -ten Belastungszyklus [%]

h_0 Höhe des Probekörpers am Anfang der Prüfung [mm]

h_i Höhe des Probekörpers nach i Belastungszyklen [mm]

Die akkumulierten axialen plastischen Dehnungen als Funktion der Anzahl an Belastungszyklen bilden die Kriechkurve. Die Kriechkurve wird mittels Methode der kleinsten Quadrate durch die folgende Funktion beschrieben:

$$\epsilon_{pd,n} = b \cdot n^a \quad \text{Gl. 5}$$

$\epsilon_{pd,n}$ plastische Druckdehnung nach n Belastungszyklen [%]

a, b Regressionsparameter [-]

n Anzahl an erfolgten Belastungszyklen

Der Anstieg der Kriechkurve (erste Ableitung) ergibt die Dehnungsrate (Kriechrate). Dieser Wert wird zusammen mit der zugehörigen plastischen Druckdehnung und der Anzahl der Belastungszyklen an einem bestimmten Punkt als ein Maß für die Berücksichtigung der Beständigkeit des Mischgutes gegen bleibende Verformung interpretiert.

Typische Kriechkurven für Walzasphalt zeigt Bild 19, ohne Wendepunkt (Fall A) und mit Wendepunkt (Fall B). Jede Kriechkurve weist zumindest 2 Phasen auf. In Phase I nimmt die Krümmung stark ab, Phase II zeigt einen quasilinearen Kurvenverlauf. Für den Fall, dass es zu keiner Stabilisierung der

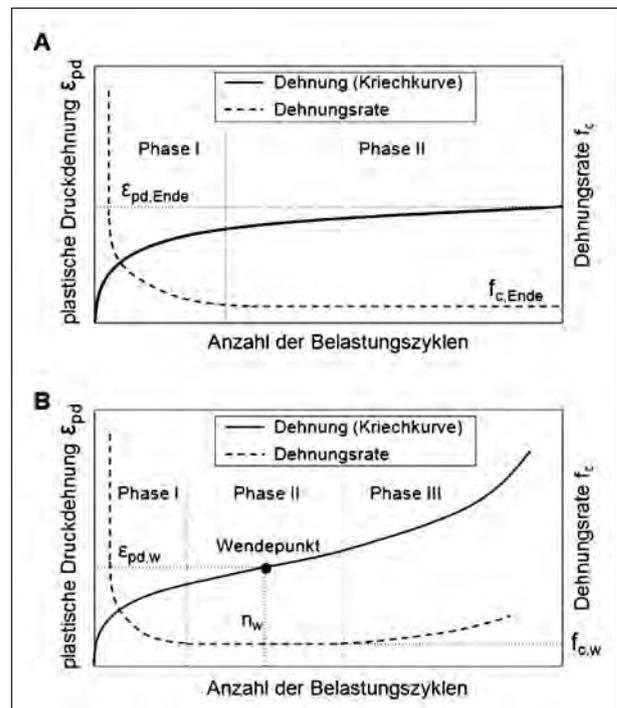


Bild 19: Verlauf der Kriechkurve und der Dehnungsrate bei einem Stempelversuch ohne Wendepunkt (Fall A) und mit Wendepunkt (Fall B)

plastischen Druckverformung kommt, ändert die Krümmung der Kriechkurve im Wendepunkt ihr Vorzeichen und es zeigt eine Phase III mit einem progressiven Anstieg der plastischen Verformungen. Der Wendepunkt ist definiert als jener Punkt der Kriechkurve, in dem die Dehnungsrate den niedrigsten Wert aufweist.

Üblicherweise kann bei Asphalten mit ausreichend hohem Verformungswiderstand keine Phase III beobachtet werden. Daher wird in der Prüfvorschrift

gemäß Regelwerk (TP Asphalt-StB) kein Wendepunkt in der Kriechkurve berücksichtigt.

Im Fall A (kein Wendepunkt) wird der Anstieg der Kriechkurve im quasilinearem Bereich zum Versuchsende als Dehnungsrate $f_{c,Ende}$ angegeben. Die zugehörige plastische Druckdehnung am Ende der Prüfung wird als ε_{Ende} angegeben.

Im Fall B (Wendepunkt) werden die plastische Druckdehnung $\varepsilon_{pd,w}$ im Wendepunkt angegeben, die Anzahl der erfolgten Belastungszyklen n_w bis zum Wendepunkt und die Dehnungsrate $f_{c,w}$ im Wendepunkt. Die Bestimmung der Dehnungsrate erfolgt durch die erste Ableitung aus folgender Funktion:

$$\varepsilon_{pd,n} = a + b \cdot n^k + c \cdot (e^{d \cdot n} - 1) [\text{‰}] \quad \text{Gl. 6}$$

$\varepsilon_{pd,n}$ plastische Druckdehnung nach n Belastungszyklen [‰]

a, b, c, d, k Regressionsparameter [-]

n Anzahl an erfolgten Belastungszyklen

Prüfergebnis des Stempel Eindringversuchs ist somit die bleibende axiale Druckdehnung zusammen mit der Dehnungsrate jeweils am Versuchsende (spätestens nach 10.000 Lastwechsel) bzw. im Wendepunkt der Kriechkurve.

Stempel Eindringversuch mit Stützring

Um dem Einspannungszustand in der Straße besser Rechnung zu tragen, wird mitunter beim Stempel Eindringversuch zusätzlich ein Stützring aus Stahl verwendet, der den Asphaltprüfkörper an seinen zylindrischen Mantelflächen umschließt und über die Bodenplatte mit der Unterlage vollflächig fest verbunden ist (siehe Bild 20).

Anhand von Analysen zu den im Asphaltprobekörper auftretenden Beanspruchungszuständen kann festgestellt werden, dass die Verwendung eines Stützringes die resultierenden Primärwirkungen (Spannungen, Dehnungen) im Probekörper beeinflusst.

In Bild 21 sind die Ergebnisse einer Finite-Elemente-Analyse (realisiert mit der FE-Software ABAQUS) dargestellt. Die Simulation erfolgt auf der Grundlage der Elastizitätstheorie. Der E-Modul des Materials beträgt konstant 500 MPa (bei 50 °C), die Querdehnzahl ist 0,4. Es gilt die Randbedingung, dass am Übergang zum Stützring nur vertikale Verformung möglich ist und keine Horizontalverformung. Die Abbildungen zeigen den Asphaltprobekörper, der Stützring ist nicht abgebildet.

Unterschiede bei Durchführung des Stempel Eindringversuchs mit und ohne Verwendung eines Stützringes werden in Kapitel 4.4 anhand von Laborversuchen näher untersucht.

4.1.2 Triaxialversuch

Ein Volumenelement im Straßenoberbau wird infolge der Radlast in vertikaler Richtung mit einer Druckspannung beansprucht. Es reagiert darauf mit einer Ausdehnung in radialer Richtung. Durch umgebendes Material wird der betrachtete Volumenkörper allerdings an seiner Querdehnung behindert, wenn auch nicht gänzlich blockiert. Dadurch ergeben sich Druckspannungen in radialer Richtung (vgl. ARAND et al., 1996; WELLNER et al., 2007). Sowohl die axialen als auch die radialen Spannungszustände sind als Funktion der Zeit anzusehen.

Der Triaxialversuch mit radialem Stützdruck zielt darauf ab, jenen mehraxialen Hauptspannungszustand im Versuch möglichst realitätsnah zu simulieren, der in der Schicht im Moment der Fahrzeug-

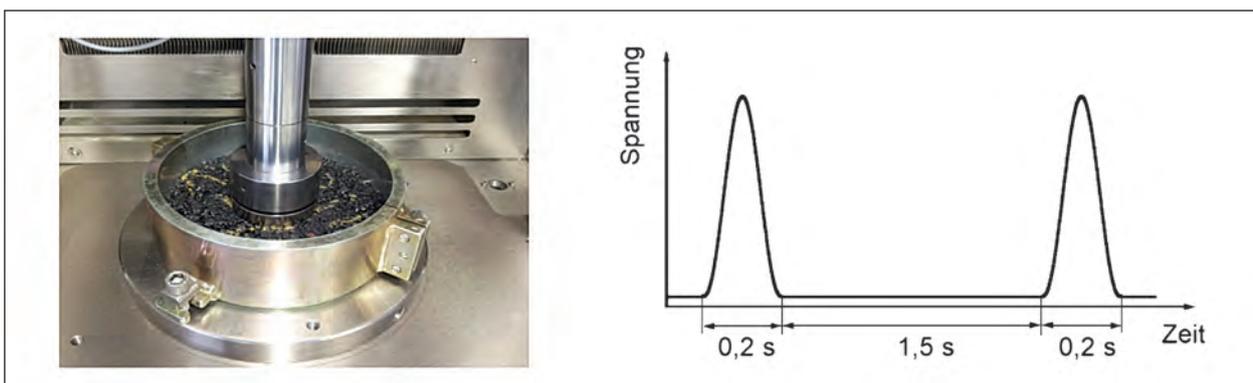


Bild 20: Stempel Eindringversuch unter Verwendung eines Stützringes

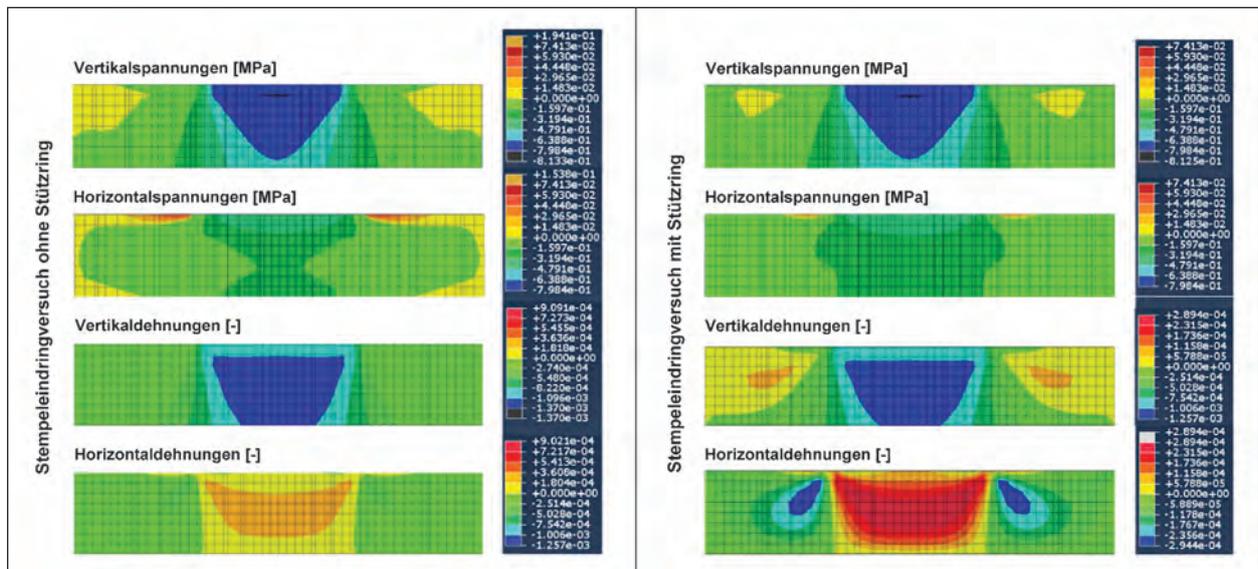


Bild 21: Ergebnisse der Finite-Elemente-Analyse: Stempeleindringversuch mit und ohne Verwendung eines Stützringes (Farblgende: Grün bis Blau = Druck, Gelb bis Rot = Zug; Achtung: veränderliche Werteskala)



Bild 22: Prüfeinrichtung zur Durchführung eines Triaxialversuchs (Beispiel)

überfahrt unter der Radaufstandsfläche auftritt. Deshalb wird im Triaxialversuch zusätzlich zur axialen Druck-Schwellbelastung eine phasenverschobene radiale Druckspannung auf den Probekörper aufgebracht. Bild 22 zeigt beispielhaft einen Prüfeinsatz für Triaxialversuche.

Nach umfangreichen Untersuchungen an der TU Braunschweig wurde die Phasenverschiebung zwischen der sinusförmigen axialen und radialen Druckbelastung auf 36° festgelegt (ARAND et al., 1996) und ein Verfahren entwickelt, mit dem pas-

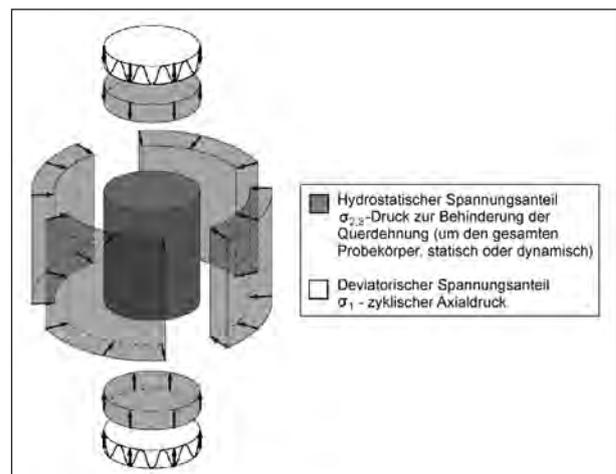


Bild 23: Schematische Darstellung des räumlichen Spannungszustandes beim Triaxialversuch

send für jede Asphaltart ein materialabhängiger schwellerer Stützdruck bestimmt werden kann (RENKEN et al., 2004).

Den triaxialen räumlichen Spannungszustand, dem der Probekörper während des dynamischen Triaxialversuchs ausgesetzt ist, zeigt Bild 23 schematisch. Werden alle Oberflächen mit der gleichen Druckspannung beansprucht, herrscht ein sogenannter hydrostatischer Spannungszustand. Die zusätzlich in axialer Richtung aufgebrachten Spannungen werden als deviatorischer Spannungsanteil bezeichnet und sind für die Entstehung bleibender Verformungen verantwortlich (WELLNER et al., 2007).

Die fortlaufende Versuchsdurchführung führt zu einer Stauchung des Probekörpers, der sich zeit-

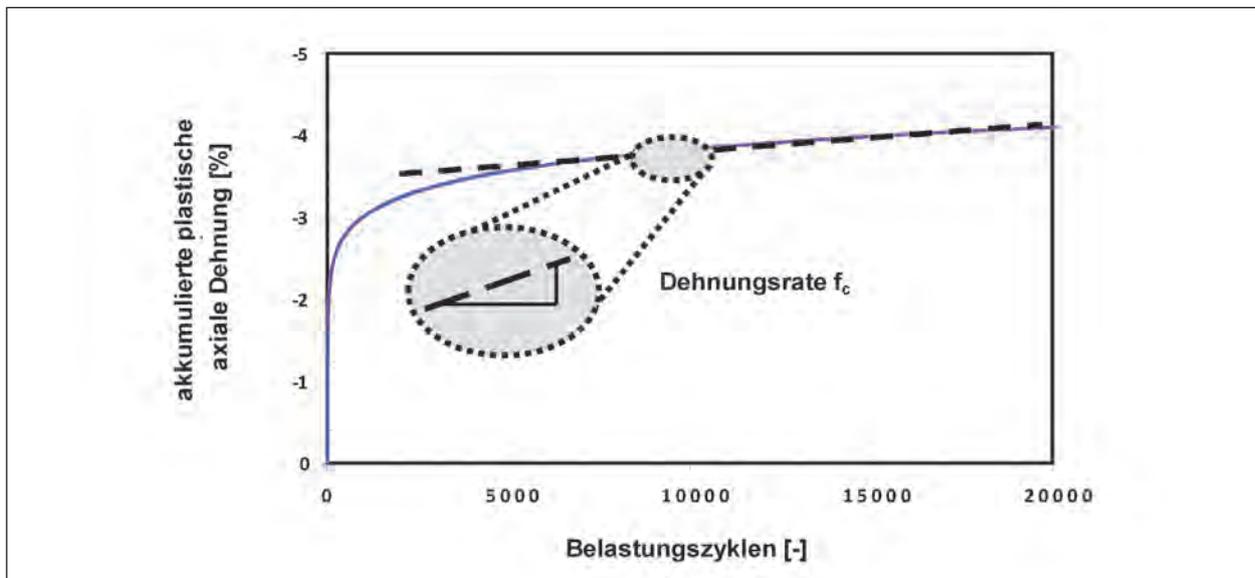


Bild 24: Ergebnis eines Triaxialversuchs mit schwellendem Stützdruck (schematisch)

gleich seitlich ausdehnt. Die axialen und radialen Verformungen werden kontinuierlich aufgenommen. Aus den gemessenen Verformungen werden als Materialkenngrößen der komplexe dynamische E-Modul und die Querdehnzahl bestimmt. Zusätzlich wird – in Analogie zum Stempeleindringversuch – als Prüfergebnis die akkumulierte plastische axiale Druckdehnung und die Dehnungsrate am Versuchsende (bzw. im Wendepunkt der Kriechkurve) angegeben (siehe Bild 24).

Das Prüfverfahren des Triaxialversuchs mit schwellendem Stützdruck ist das zurzeit geeignetste und gleichzeitig aufwendigste Laborprüfverfahren für die Simulation der plastischen Verformungen in Straßenbefestigungen aus Walzasphalt.

4.1.3 Spaltzug-Schwellversuch

Beim Spaltzug-Schwellversuch wird über zwei diametral angeordnete Lasteinleitungstreifen eine vertikale, zyklisch schwellende Druckspannung auf einen zylindrischen Asphaltprobekörper aufgebracht, wodurch sich im Probekörper näherungsweise ein zwei-dimensionaler inhomogener Spannungszustand einstellt (Bild 25). Vertikal wirken Druckspannungen (x-Richtung), horizontal, senkrecht zu den Lasteinleitungsschienen Zugspannungen (y-Richtung), die in Probekörpermitte näherungsweise einen konstanten Betrag aufweisen. Es wirken keine Horizontalspannungen in z-Richtung. Die horizontalen Zugspannungen führen bei zyklischer Beanspruchung allmählich zum Versagen des Probekörpers.

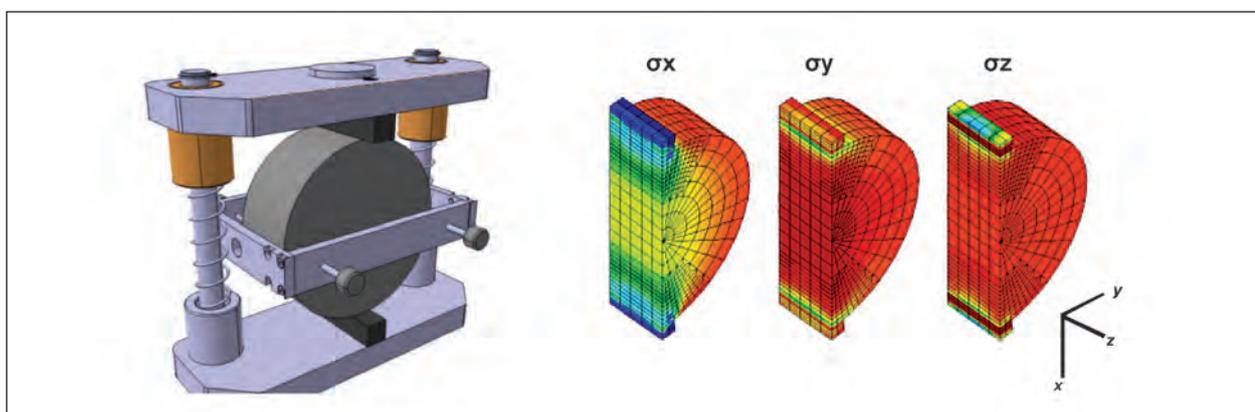


Bild 25: Spannungszustand im zylindrischen Probekörper während eines Spaltzug-Schwellversuchs: Rot: Zugspannung; Blau: Druckspannung; Orange: keine Spannungsbeanspruchung (vgl. OESER, 2004)

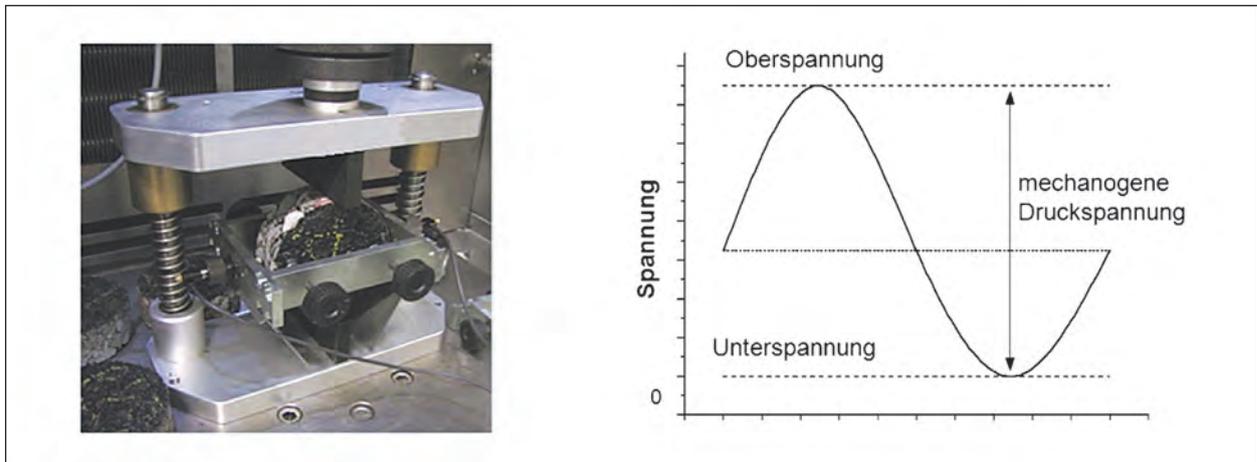


Bild 26: Prüfeinsatz für Spaltzug-Schwellversuch und Belastungsschema

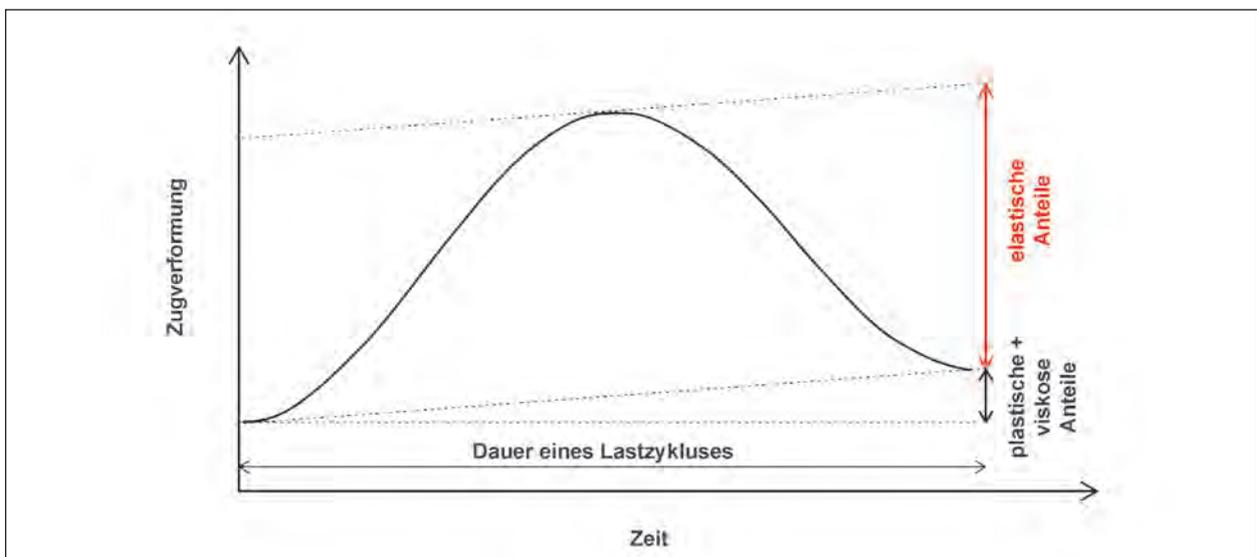


Bild 27: Verformungsanteile bei einem Lastzyklus im Spaltzug-Schwellversuch (schematisch)

Bild 26 zeigt den für Spaltzug-Schwellversuche gemäß AL Sp-Asphalt 09 bzw. DIN EN 12697-24 verwendeten Prüfrahen mit dem Belastungsschema. Für die Messung der horizontalen Verformung des zylindrischen Probekörpers sind zwei induktive Wegaufnehmer angebracht. Die Wegaufnehmer sind an einem biegesteifen Messrahmen montiert, welcher mit 4 Klemmschrauben am Probekörper befestigt ist.

Aus der horizontalen Zugbeanspruchung im mittleren Bereich des Probekörpers (vgl. Bild 25) ergeben sich in horizontaler Richtung elastische und plastische Verformungen, die von viskosen Verformungsanteilen überlagert werden (siehe Bild 27). Im Verlauf des Versuchs kommt es zur Akkumulation von bleibenden Zugverformungen und anschließend zum Versagen des Probekörpers.

Gemäß Regelwerk (AL SP-Asphalt 09) werden anhand der gemessenen vertikalen Kraft und der induzierten horizontalen Zugverformung die horizontal in Probekörpermitte wirkende Zugspannung σ_H , die auftretende horizontale Dehnung ε_H und der Steifigkeitsmodul $|E^*|$ mittels folgender Gleichungen berechnet:

$$\sigma_H = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot d \cdot h} \quad [\text{MPa}] \quad \text{Gl. 7}$$

$$\varepsilon_H = \frac{2 \cdot u \cdot (1 + 3 \cdot \mu)}{\pi \cdot d \cdot (0,274 + \mu)} \cdot 1000 \quad [\%] \quad \text{Gl. 8}$$

$$|E^*| = \frac{F \cdot (0,274 + \mu)}{h \cdot u_e} \quad [\text{MPa}] \quad \text{Gl. 9}$$

- σ_H horizontale Zugspannung in Probekörpermitte [MPa]
- F vertikal wirkende Druckkraft [N]
- d Probekörperdurchmesser [mm]
- h Probekörperhöhe [mm]
- ϵ_H horizontale elastische Zugdehnung in Probekörpermitte [‰]
- u horizontale Zugverformung in Probekörpermitte [mm]
- u_e horizontale elastische Zugverformung in Probekörpermitte [mm]
- μ Querdehnzahl (hier 0,298 bei 20 °C) [-]
- $|E^*|$ Steifigkeitsmodul (E-Modul) [MPa]

Die Berechnung der resultierenden plastischen Zugdehnung ϵ_{pz} erfolgt unter Berücksichtigung der akkumulierten plastischen Dehnungen bei Erreichen des Ermüdungskriteriums und unter Berücksichtigung der Dehnung zu Versuchsbeginn (nach dem 100. Lastwechsel). Als Ermüdungskriterium ist die Lastwechselzahl N_{Makro} definiert (siehe unten).

Unter Anwendung des Prinzips der dissipierten Energie entwickelte HOPMAN (1989) ein Verfahren für die Auswertung von Ermüdungsprüfungen auf Grundlage der Energy Ratio (ER). Die ER ist der Quotient aus den dissipierten Energien zu Ver-

suchsbeginn und zum n-ten Lastwechsel, multipliziert mit der Lastwechselzahl n:

$$ER_{(n)} = \frac{n \cdot W_0}{W_n} [-] \quad \text{Gl. 10}$$

- $ER_{(n)}$ Energy Ratio beim Lastwechsel n [-]
- W_0 dissipierte Energie zu Versuchsbeginn [J/m³]
- W_n dissipierte Energie beim Lastwechsel n [J/m³]

Bei Annahme einer während des Versuchs konstanten Phasenverschiebung verhält sich die ER proportional zum Produkt aus der Lastwechselzahl n und dem E-Modul zu diesem Zeitpunkt. Es gilt:

$$ER_{(n)} = n \cdot |E^*|_n \text{ [MPa]} \quad \text{Gl. 11}$$

- $ER_{(n)}$ Energy Ratio beim Lastwechsel n [MPa]
- n Lastwechselzahl [-]

$|E^*|$ Steifigkeitsmodul [MPa]

In Bild 28 ist beispielhaft für einen Spaltzug-Schwellversuch der Verlauf der ER über die Lastwechselzahl dargestellt. Die ER weist üblicherweise zunächst einen steilen Anstieg auf, der allmählich abnimmt, bis kurz vor Versuchsende ein Maximum erreicht ist. Der Hochpunkt entspricht dem Zeitpunkt der Makrorissbildung, die zugehörige Lastwechselzahl ist als Ermüdungskriterium N_{Makro} defi-

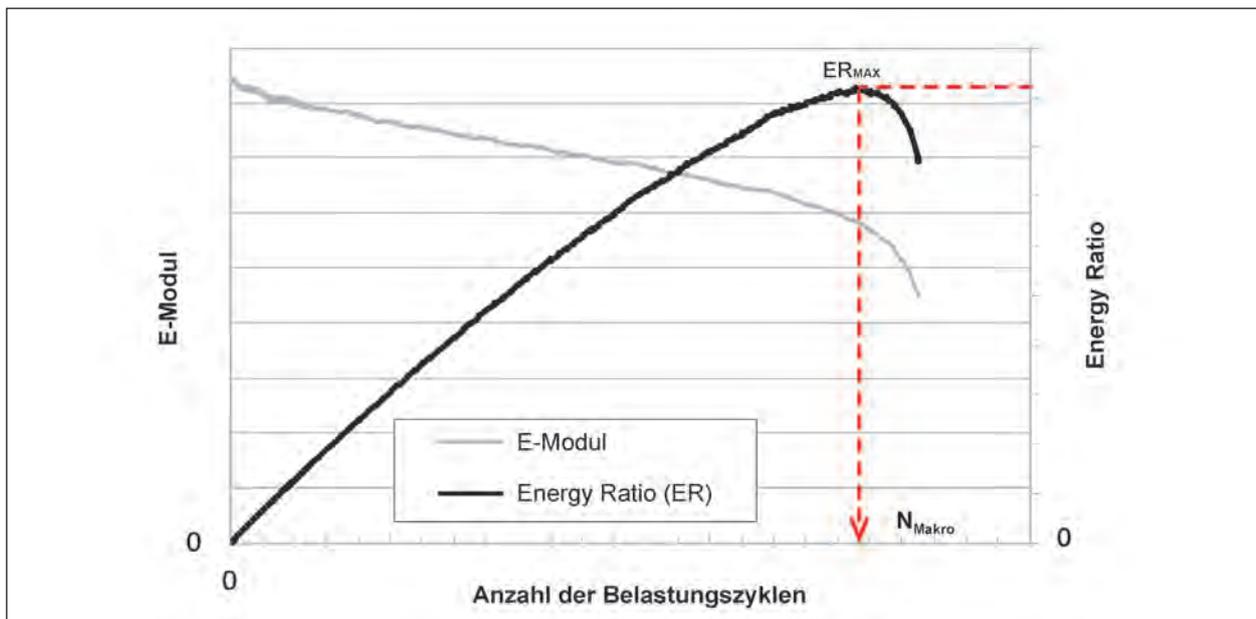


Bild 28: Exemplarischer Verlauf des absoluten E-Moduls und Verlauf der Energy Ratio (ER) während eines kraftgeregelten Spaltzug-Schwellversuchs

nier. Bis zum vollständigen Bruch des Probekörpers können im Regelfall noch wenige weitere Lastwechsel ertragen werden, wobei die erfolgte Makrorissbildung zu einem starken Abfall der ER führt (Bild 28).

Eine beispielhafte Auswertung des Spaltzug-Schwellversuchs mithilfe von Lissajous-Figuren (siehe Kapitel 2.3) mit einer Darstellung der plastische Zugdehnungen ϵ_{pz} zeigen Bild 29 und Bild 30.

Bild 29 stellt die Lissajous-Figuren am Anfang der Prüfung (beim 100. Lastwechsel) und bei Erreichen des Ermüdungskriteriums bei N_{Makro} dar, wobei die plastische Zugdehnung dem horizontalen Abstand zwischen den Figuren entspricht.

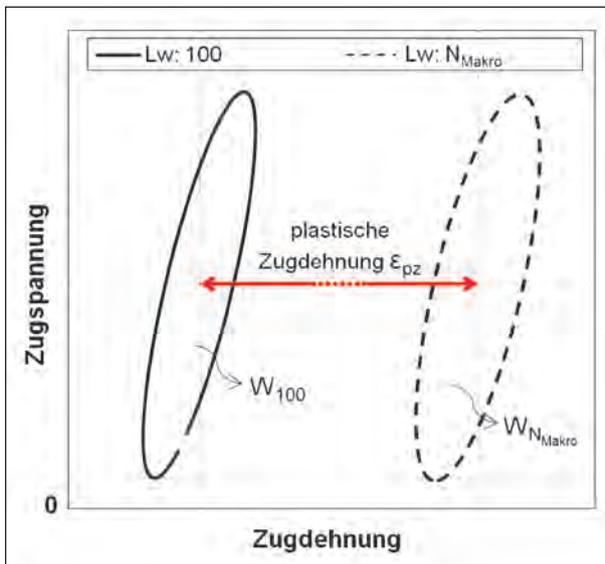


Bild 29: Spaltzug-Schwellversuch: Exemplarische Darstellung der Lissajous-Figuren beim 100. Lastwechsel und bei N_{Makro} (Ermüdungskriterium)

Bild 30 zeigt den typischen Verlauf der akkumulierten plastischen Zugdehnungen als Funktion der aufgetragenen Belastungszyklen. Es ist zu erkennen, dass die Zugdehnungen allmählich bis zur Entstehung des Makrorisses ansteigen und danach progressiv zum Versagen des Probekörpers führen.

4.2 Berücksichtigte Baustoffe

4.2.1 Gestein

Zur Anwendung kommen zwei magmatische (Gabbro und Diabas) und ein Sedimentgestein (Kalkstein).

Gabbro ist ein Tiefengestein und bildet sich durch langsames Abkühlen von basaltischer Magma im Erdinneren in ca. 5 Kilometer Tiefe. Gabbro besteht überwiegend aus Feldspat und Augit im Verhältnis 1:1 und enthält keine Quarz-Anteile. Wegen der vergleichsweise geringen Anteile an SiO_2 ist Gabbro basisch und hydrophob. Die mittlere Rohdichte beträgt $2,890 \text{ g/cm}^3$.

Diabas wird in der Gesteinskunde ein basaltisches, mittelkörniges subvulkanisches Gestein genannt, das hauptsächlich aus Plagioklas und Augit besteht und ein rein körniges Gefüge besitzt. Seine mittlere Rohdichte beträgt $2,910 \text{ g/cm}^3$.

Kalkstein ist ein biogenes Sedimentgestein, das hauptsächlich aus den beiden Mineralien Kalzit und Aragonit (beide CaCO_3) und aus Dolomit ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) besteht. Das Gestein kann aus feinkristallinem Kalkschlamm oder aus zusammengeschwemmten Kalkschalen oder anderen karbonatischen Organismenresten entstanden sein. Seine mittlere Rohdichte beträgt $2,717 \text{ g/cm}^3$.

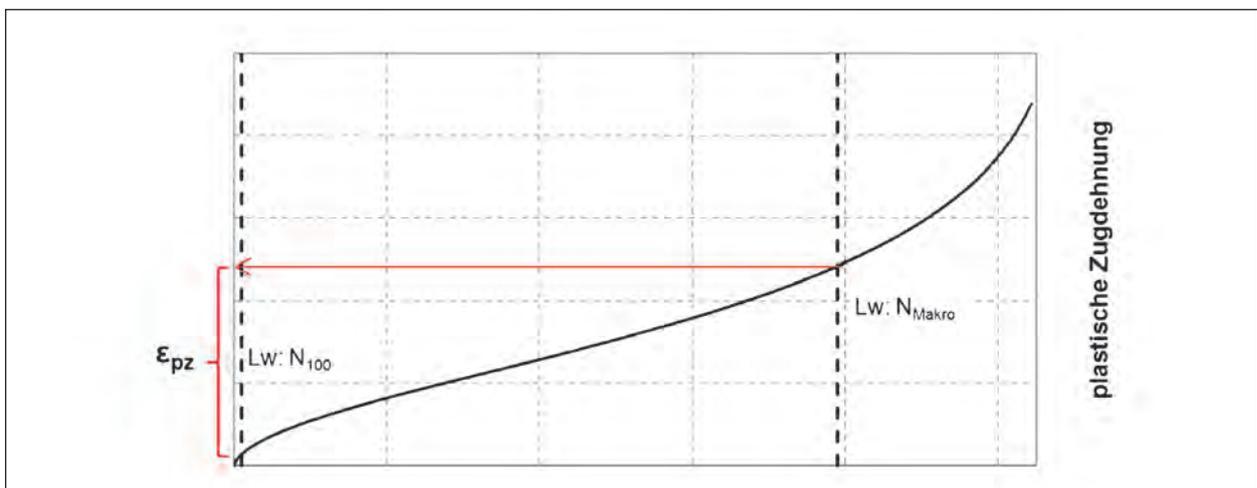


Bild 30: Spaltzug-Schwellversuch: Typischer Verlauf der plastischen Zugdehnungen über die Lastwechselzahl

4.2.2 Bitumen

Es werden die Straßenbaubitumen (30/45 und 50/70) und die polymermodifizierten Bitumen (25/55-55A und 40/100-65A) berücksichtigt. Tabelle 5 und Tabelle 6 geben einen Überblick zu

den mechanischen und rheologischen Eigenschaften der eingesetzten Straßenbaubitumen. Zu den polymermodifizierten Bitumen siehe Tabelle 7 und Tabelle 8.

Kraftduktilität 25 °C	Duktilität [mm]		1.000,0
	Max. Kraft [N]		2,0
	Verformungsarbeit	W_{gesamt} [J/cm ²]	0,1914
		$W_{0-0,2m}$ [J/cm ²]	0,1346
$W_{0,2-0,4m}$ [J/cm ²]		0,0080	
Erweichungspunkt Ring und Kugel [°C]			55,4
Nadelpenetration [mm/10]			40,0
elastische Rückstellung [%]			18,0
DSR (60 °C; 1,59 Hz)	Phasenwinkel [°]		80,8
	komplexer Schermodul [Pa]		7.081
BBR (-10 °C)	Kriechsteifigkeit S [MPa]		88,2
	m-Wert [-]		0,458
BBR (-16 °C)	Kriechsteifigkeit S [MPa]		219,7
	m-Wert [-]		0,407
BBR (-25 °C)	Kriechsteifigkeit S [MPa]		712,4
	m-Wert [-]		0,123
BBR	T bei S = 300 MPa [°C]		-18,0

Tab. 5: Eigenschaften des eingesetzten Straßenbaubitumen 30/45

Kraftduktilität 25 °C	Duktilität [mm]		1.000,0
	Max. Kraft [N]		1,5
	Verformungsarbeit	W_{gesamt} [J/cm ²]	0,1070
		$W_{0-0,2m}$ [J/cm ²]	0,09635
$W_{0,2-0,4m}$ [J/cm ²]		0,00755	
Erweichungspunkt Ring und Kugel [°C]			51,8
Nadelpenetration [mm/10]			50,0
elastische Rückstellung [%]			9,5
DSR (60 °C; 1,59 Hz)	Phasenwinkel [°]		82,4
	komplexer Schermodul [Pa]		5.352
BBR (-10 °C)	Kriechsteifigkeit S [MPa]		60,6
	m-Wert [-]		0,510
BBR (-16 °C)	Kriechsteifigkeit S [MPa]		154,2
	m-Wert [-]		0,426
BBR (-25 °C)	Kriechsteifigkeit S [MPa]		582,1
	m-Wert [-]		0,278
BBR	T bei S = 300 MPa [°C]		-20,0

Tab. 6: Eigenschaften des eingesetzten Straßenbaubitumen 50/70

Kraftduktilität 25 °C	Duktilität [mm]		1.000,0
	Max. Kraft [N]		1,77
	Verformungsarbeit	W_{gesamt} [J/cm ²]	1,2135
		$W_{0-0,2m}$ [J/cm ²]	0,2655
$W_{0,2-0,4m}$ [J/cm ²]		0,2739	
Erweichungspunkt Ring und Kugel [°C]			58,2
Nadelpenetration [mm/10]			51,7
elastische Rückstellung [%]			80,3
DSR (60 °C; 1,59 Hz)	Phasenwinkel [°]		68,2
	komplexer Schermodul [Pa]		5.653
BBR (-10 °C)	Kriechsteifigkeit S [MPa]		66,4
	m-Wert [-]		0,519
BBR (-16 °C)	Kriechsteifigkeit S [MPa]		171,5
	m-Wert [-]		0,427
BBR (-25 °C)	Kriechsteifigkeit S [MPa]		559,5
	m-Wert [-]		0,315
BBR	T bei S = 300 MPa [°C]		-19,8

Tab. 7: Eigenschaften des eingesetzten polymermodifizierten Bitumen 25/55-55A

Kraftduktilität 25 °C	Duktilität [mm]		1.000,0
	Max. Kraft [N]		2,54
	Verformungsarbeit	W_{gesamt} [J/cm ²]	1,8360
		$W_{0-0,2m}$ [J/cm ²]	0,1931
$W_{0,2-0,4m}$ [J/cm ²]		0,2638	
Erweichungspunkt Ring und Kugel [°C]			37,2
Nadelpenetration [mm/10]			63,5
elastische Rückstellung [%]			96,5
DSR (60 °C; 1,59 Hz)	Phasenwinkel [°]		64,1
	komplexer Schermodul [Pa]		7.576
BBR (-10 °C)	Kriechsteifigkeit S [MPa]		35,5
	m-Wert [-]		0,4553
BBR (-16 °C)	Kriechsteifigkeit S [MPa]		78,2
	m-Wert [-]		0,4240
BBR (-25 °C)	Kriechsteifigkeit S [MPa]		261,5
	m-Wert [-]		0,3453
BBR	T bei S = 300 MPa [°C]		-26,3

Tab. 8: Eigenschaften des eingesetzten polymermodifizierten Bitumen 40/100-65A

4.2.3 Asphalt

Es werden die in Tabelle 9 spezifizierten Asphaltvarianten berücksichtigt: drei Asphaltdeckschichtvarianten (AC 11 D S, SMA 11 S, PA 8), eine Asphaltbinderschichtvariante (AC 16 B S) und drei Asphalttragschichtvarianten (AC 22 T S, AC 32 T S, AC 32

T N). Die Asphaltmischgutsorte AC 22 T S wird ausschließlich bei den Untersuchungen zur Probekörperherstellung berücksichtigt (siehe Kapitel 3).

Zur Herstellung des Asphaltmischguts kommt ein Gegenlaufzwangslabormischer (GZM-30+) zum Einsatz, wie er speziell zur Herstellung von

Walzasphalt und Gussasphalt entwickelt wurde (Bild 31).

Das Mischprinzip beruht auf einem Gegenlaufzwangsmischbetrieb mit geneigter Mischtrommel und angestelltem Mischwerkzeug. Der Gegenlauf-

zwangsmischbetrieb wird durch zwei drehzahlregelte Antriebsmotoren für die Mischtrommel und das exzentrische Mischwerkzeug realisiert. Es ergibt sich eine vollständige dreidimensionale Vermischung des Mischgutes aufgrund des asynchronen Antriebsdrehzahlverhältnisses, der geneigten

Merkmal		Massenprozent	Asphaltvariante							
			AC 11 D S	SMA 11 S	PA 8	AC 16 B S	AC 22 T S*	AC 32 T S	AC 32 T N	
Korngrößenverteilung	≤ 0,063 mm	M.-%	7,0	8,7	4	5	5,5	6,5	5,5	
	(Natursand)	0,063/0,25 mm	M.-%	2	-	-	-	-	5,3	8,5
		0,25/1 mm	M.-%	3,75	-	-	-	-	14,4	18,6
		1/2 mm	M.-%	2,5	-	-	-	-	7,3	4,7
	(Brechsand)	0,063/0,25 mm	M.-%	6	3,9	1,2	4,5	4,2	-	-
		0,25/1 mm	M.-%	11,25	7,4	2,1	8,5	10,1	-	-
		1 / 2 mm	M.-%	7,5	4,7	2,2	14	10,3	-	-
		2/5,6 mm	M.-%	27,0	11,0	12	13	18,3	12,5	12,3
		5,6/8 mm	M.-%	18,0	22,0	78	10	9,9	9,1	6,1
		8/11,2 mm	M.-%	15,0	42,0	-	15	11,8	10,6	7,1
		11,2/16 mm	M.-%	-	-	-	30	11,7	9,8	5,1
		16/22,4 mm	M.-%	-	-	-	-	14,1	9,5	6,4
		22,4/31,5 mm	M.-%	-	-	-	-	4,1	15	25,7
		Zusatz Arbocel	M.-%	-	0,3	0,5	-	-	-	-
		Summe	M.-%	100	100	100	100	100	100	100
Gesteinsart		-	Gabbro	Gabbro	Gabbro	Gabbro	Kalkstein	Kalkstein	Diabas	
Bindemittelsorte		-	50/70	50/70	40/100-65A	25/55-55A	50/70	30/45	50/70	
Bindemittelgehalt		M.-%	5,9	6,5	5,8	4,6	4,5	4,4	4,0	
Rohdichte		g/cm ³	2,60	2,59	2,62	2,66	2,61	2,55	2,65	
Raumdichte		g/cm ³	2,49	2,50	2,06	2,55	2,53	2,40	2,54	
Hohlraumgehalt		V.-%	4,2	3,3	21,4	4,2	3,0	6,3	3,8	

* nur für Probekörperherstellung und optimierung gemäß Kapitel

Tab. 9: Zusammensetzung und Eigenschaften der berücksichtigten Asphaltvarianten



Bild 31: Labormischer mit Gegenlaufzwangsprinzip

Mischtrommel und eines im Winkel angestellten Mischwerkzeuges. Durch die Neigung der Mischtrommel und des angestellten Mischwerkzeuges ergibt sich eine gleichmäßige Verteilung aller Komponenten des Asphaltmischguts, die Gefahr von Entmischung wird gleichzeitig minimiert.

Die Herstellung der Asphalt-Probepplatten erfolgt mittels Walzsektor-Verdichtungsgerät (siehe Kapitel 3).

4.3 Prüfbedingungen

Die Untersuchungen zum Verformungsverhalten erfolgen unter Anwendung von Triaxialversuchen, Stempeleindringversuchen mit und ohne Stützring sowie Spaltzug-Schwellversuchen. Die Ergebnisse aus den Triaxialversuchen mit schwellendem Stützdruck liegen aus einem früheren Forschungsprojekt (siehe RENKEN & BÜCHLER, 2004) vor.

Die Versuchsbedingungen für die Triaxialversuche sind in Tabelle 10 zusammengestellt.

Die Stempeleindringversuche mit Stützring wurden in Anlehnung an die Prüfnorm TP Asphalt-StB, Teil 25 A 2 – gültig für Stempeleindringversuche ohne Stützring – durchgeführt. Die Versuchsbedingungen für die Stempeleindringversuche sind in Tabelle 11 zusammengestellt.

Die Spaltzug-Schwellversuche wurden gemäß Prüfnorm AL Sp-Asphalt 09 durchgeführt. Die Versuchsbedingungen für die Spaltzug-Schwellversuche sind in Tabelle 12 zusammengestellt.

4.4 Prüfergebnisse

4.4.1 Triaxialversuche

Die resultierenden Kriechkurven aus den Triaxialversuchen an den Asphaltarten AC 16 B S, SMA 11 S, PA 8, AC D 11 S (vgl. RENKEN & BÜCHLER, 2004) zeigen die Bilder 32 bis 35 sowie Tabelle 13.

Prüftemperatur	40 °C	
Dauer der Temperierung	120 Minuten	
Probekörperdurchmesser	100 mm	
Probekörperhöhe	60 mm	
Anzahl der Belastungszyklen	150.000	
zyklische Axial- Radialbelastung	sinusförmig	
Frequenz der Axial- Radialbelastung	10 Hz	
Phasenverschiebung der Radialbelastung	36°	
axiale Oberspannung	0,8 MPa	
axiale und radiale Unterspannung	0,01 MPa	
radiale Oberspannung	AC 16 B S	0,03 MPa
	SMA 11 S	0,08 MPa
	PA 8	0,1 MPa
	AC 11 D S	0,1 MPa

Tab. 10: Versuchsbedingungen für die Triaxialversuche

Prüftemperatur	50 °C	
Dauer der Temperierung	150 Minuten	
Probekörperdurchmesser	200 mm	
Probekörper- höhe	Größtkorn D = 8 und D = 11 mm	40 mm
	Größtkorn D = 16 mm	60 mm
	Größtkorn D ≥ 22 mm	80 mm
Stempeldurchmesser	80 mm	
Anzahl an Belastungszyklen	10.000	
Dauer der Belastung	0,2 s	
Dauer der Lastpause	1,5 s	
Oberspannung	0,8 MPa	
Unterspannung	0,02 MPa	

Tab. 11: Versuchsbedingungen für die Stempeleindringversuche

Prüftemperatur	20 °C	
Probekörper- durchmesser	Größtkorn D ≤ 16 mm	100 mm
	16 < Größtkorn D < 32 mm	150 mm
	Größtkorn D ≥ 32 mm	150 mm
Probekörper- höhe	Größtkorn D ≤ 16 mm	40 mm
	16 < Größtkorn D < 32 mm	60 mm
	Größtkorn D ≥ 32 mm	90 mm
Prüffrequenz	10 Hz	
angestrebte horizontale Zugunterspannung	0,035 MPa	

Tab. 12: Versuchsbedingungen für die Spaltzug-Schwellversuche

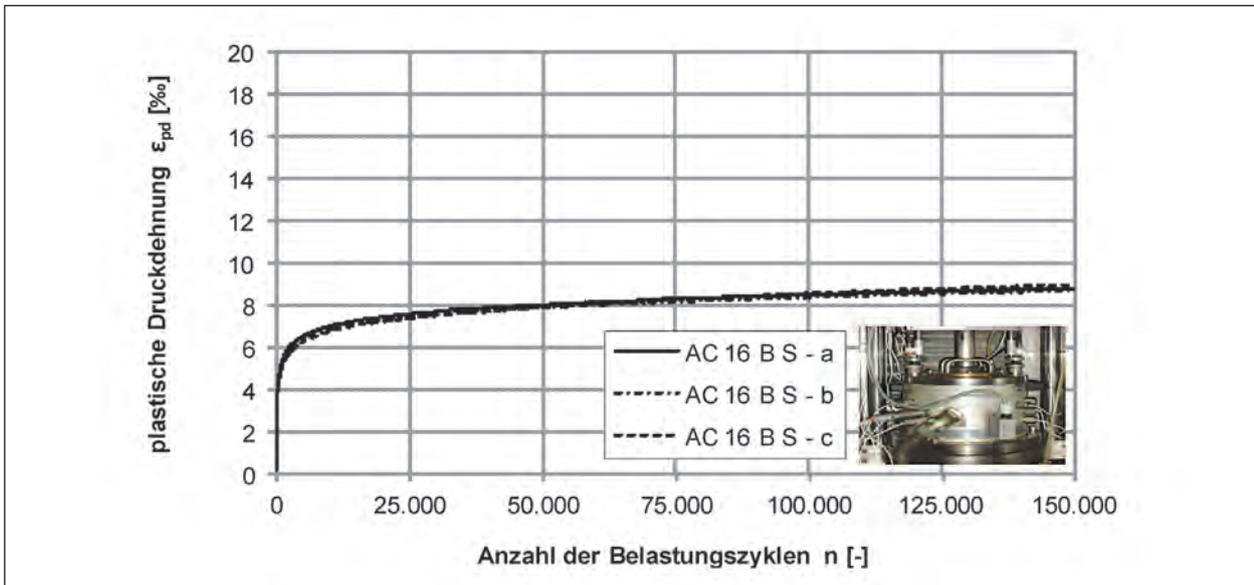


Bild 32: Kriechkurven aus dem Triaxialversuch für die Asphaltart AC 16 B S (Dreifachbelegung)

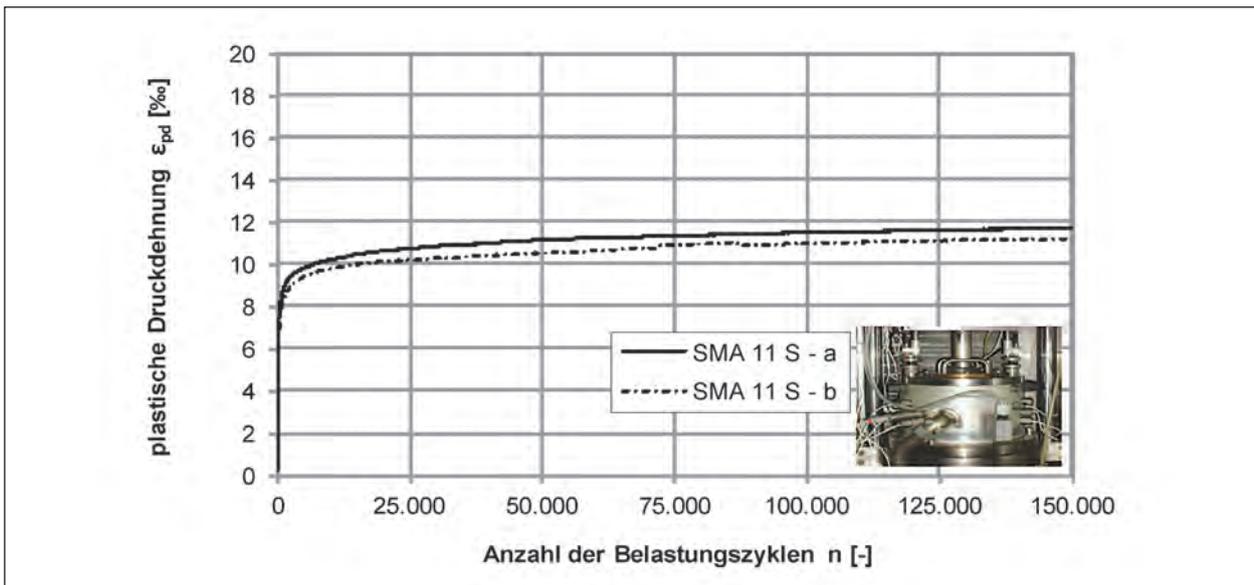


Bild 33: Kriechkurven aus dem Triaxialversuch für die Asphaltart SMA 11 S (Zweifachbelegung)

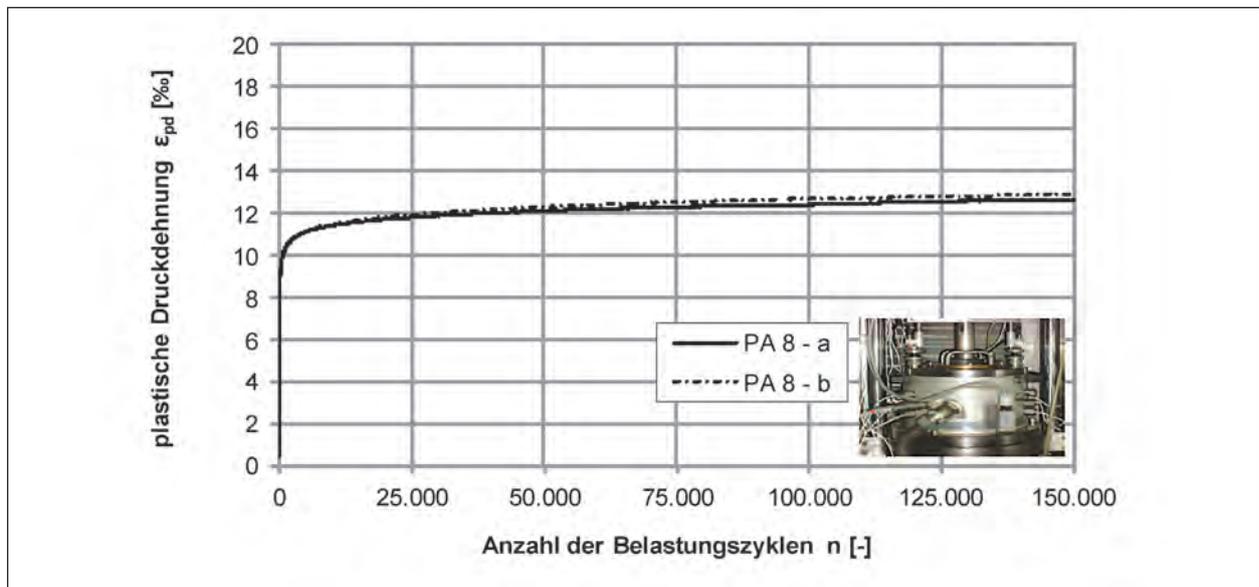


Bild 34: Kriechkurven aus dem Triaxialversuch für die Asphaltart PA 8 (Zweifachbelegung)

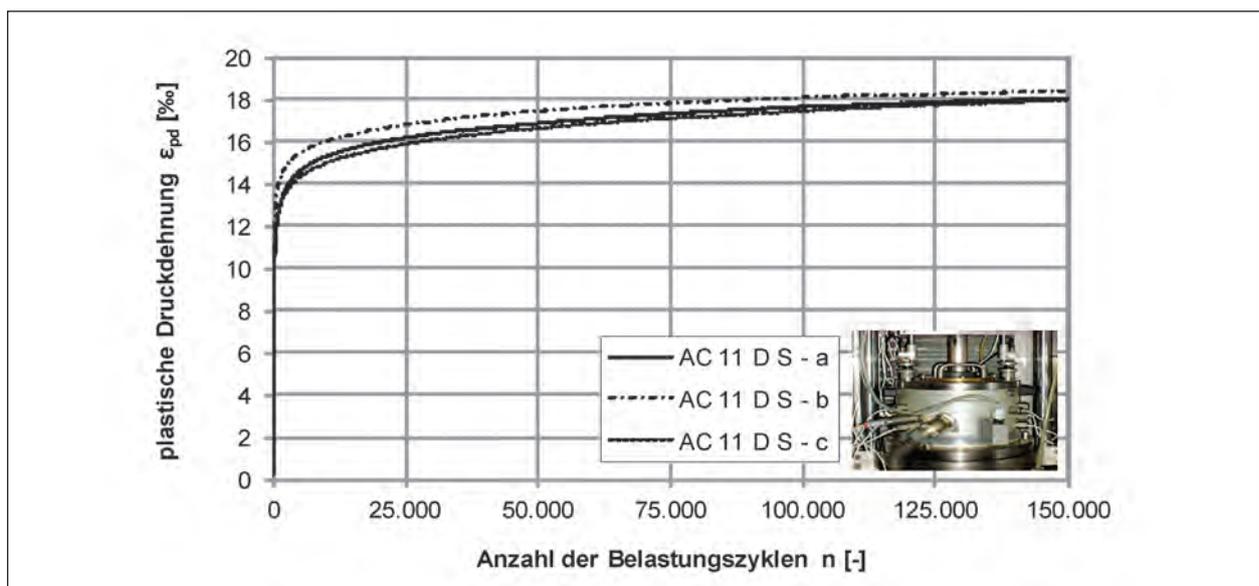


Bild 35: Kriechkurven aus dem Triaxialversuch für die Asphaltart AC 11 D S (Dreifachbelegung)

Asphaltart	Anzahl der Belastungszyklen [-]	akkumulierte plastische Druckdehnung [%]	akkumulierte plastische Druckverformung [mm]	Dehnungsrate [% · 10 ⁻⁴ /n]
AC 16 B S	10.000	6,87	0,41	0,76
SMA 11 S	10.000	9,97	0,60	0,7
PA 8	10.000	11,43	0,69	0,59
AC 11 D S	10.000	15,41	0,92	1,12
AC 16 B S	150.000	8,83	0,53	0,07
SMA 11 S	150.000	11,42	0,68	0,06
PA 8	150.000	12,76	0,77	0,05
AC 11 D S	150.000	18,13	1,09	0,09

Tab. 13: Ergebnisse der Triaxialversuche (nach 10.000 und 150.000 Belastungszyklen)

4.4.2 Stempelindringversuche mit Stützring

Die resultierenden Kriechkurven aus den Stempelindringversuchen mit Stützring an den Asphaltarten AC 16 B S, SMA 11 S, PA 8 und AC 11 D S (LEUTNER et al., 2003) sowie an den Asphaltarten AC 32 T N, AC 32 T S zeigen die Bilder 36 bis 41 und Tabelle 14.

Ergänzende Kriechkurven, die für die Asphaltarten SMA 11 S und AC 11 D S bestimmt wurden, zeigen Bild 42, Bild 43 und Tabelle 15.

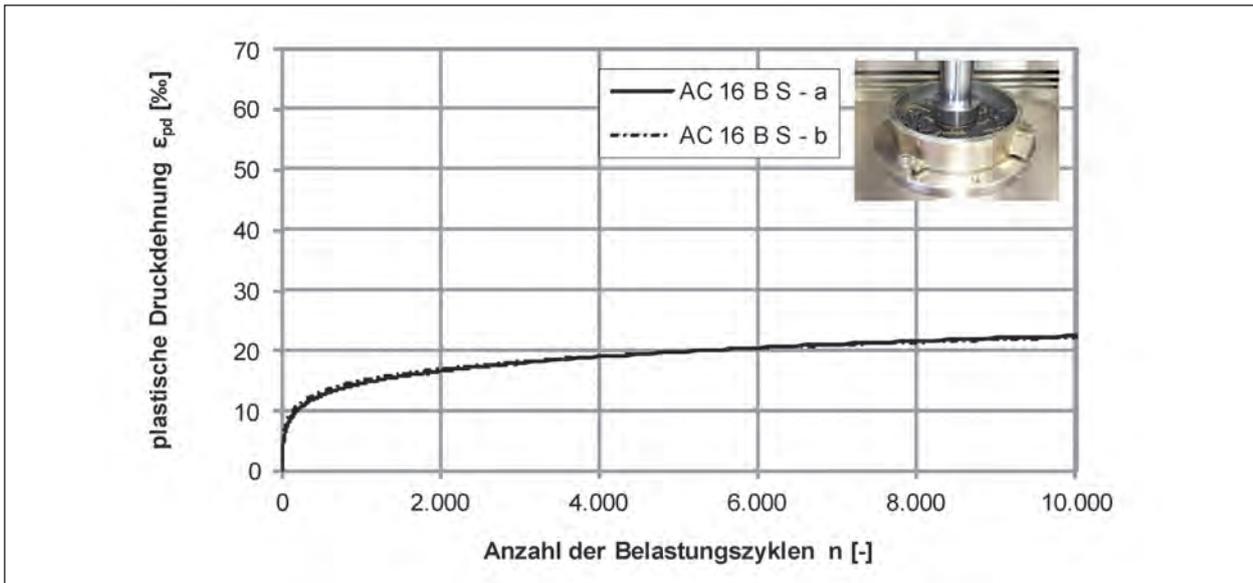


Bild 36: Kriechkurven aus dem Stempelindringversuch mit Stützring für die Asphaltart AC 16 B S (Zweifachbelegung)

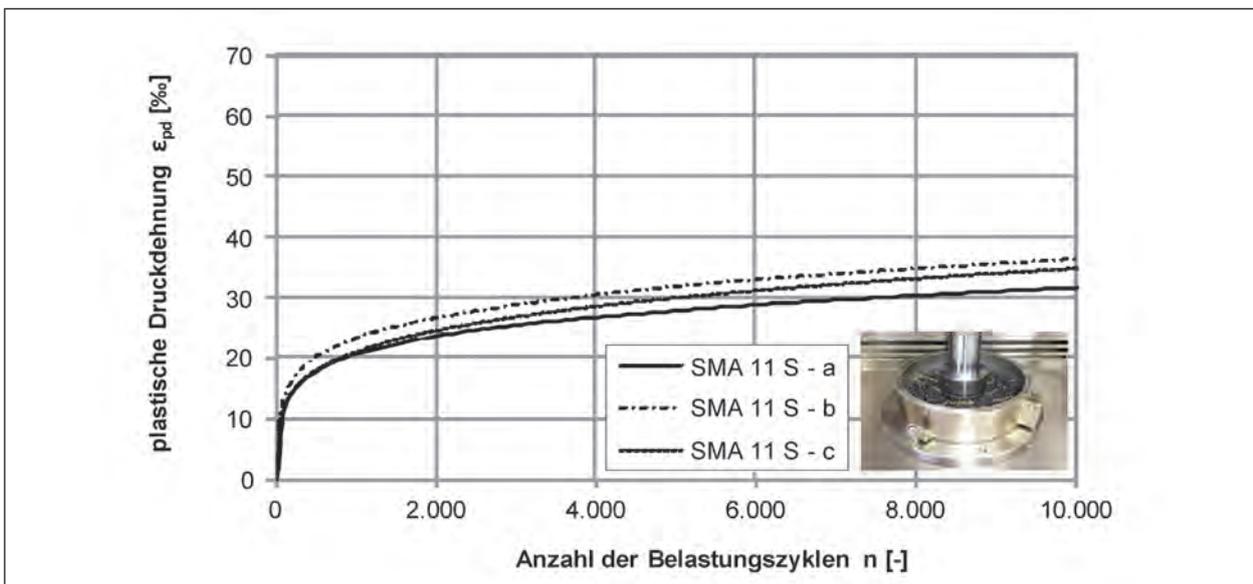


Bild 37: Kriechkurven aus dem Stempelindringversuch mit Stützring für die Asphaltart SMA 11 S (Dreifachbelegung)

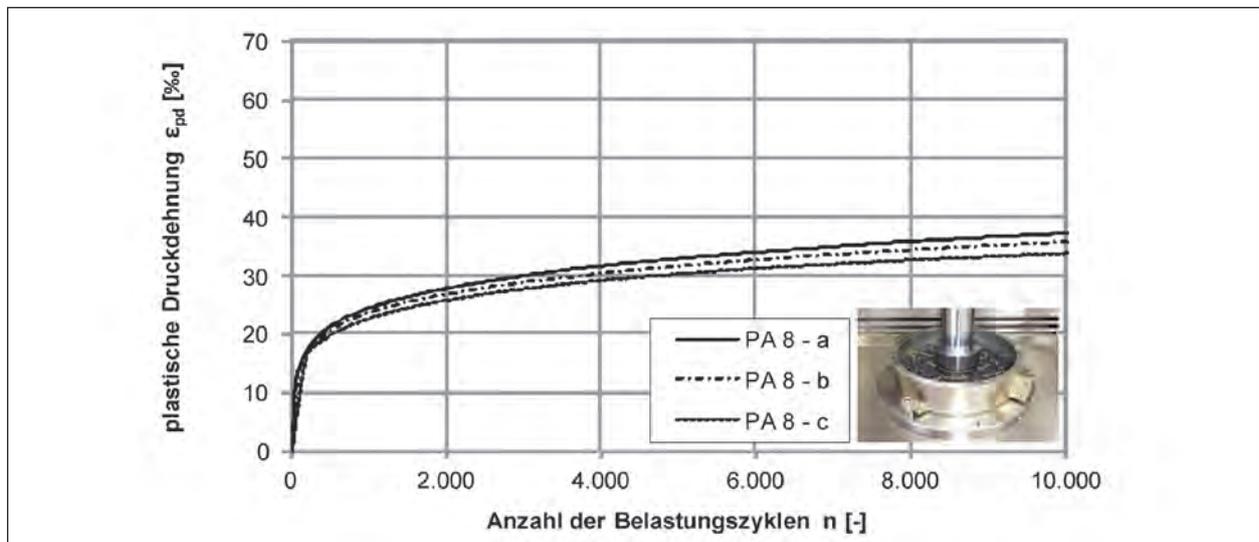


Bild 38: Kriechkurven aus dem Stempel Eindringversuch mit Stützring für die Asphaltart PA 8 (Dreifachbelegung)

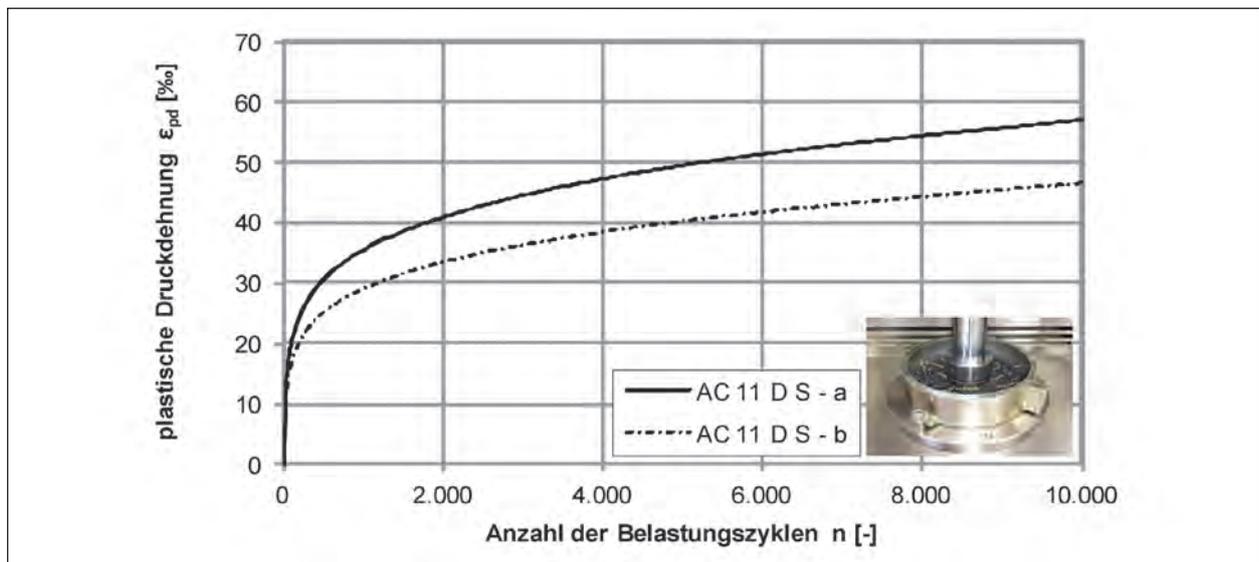


Bild 39: Kriechkurven aus dem Stempel Eindringversuch mit Stützring für die Asphaltart AC 11 D S (Zweifachbelegung)

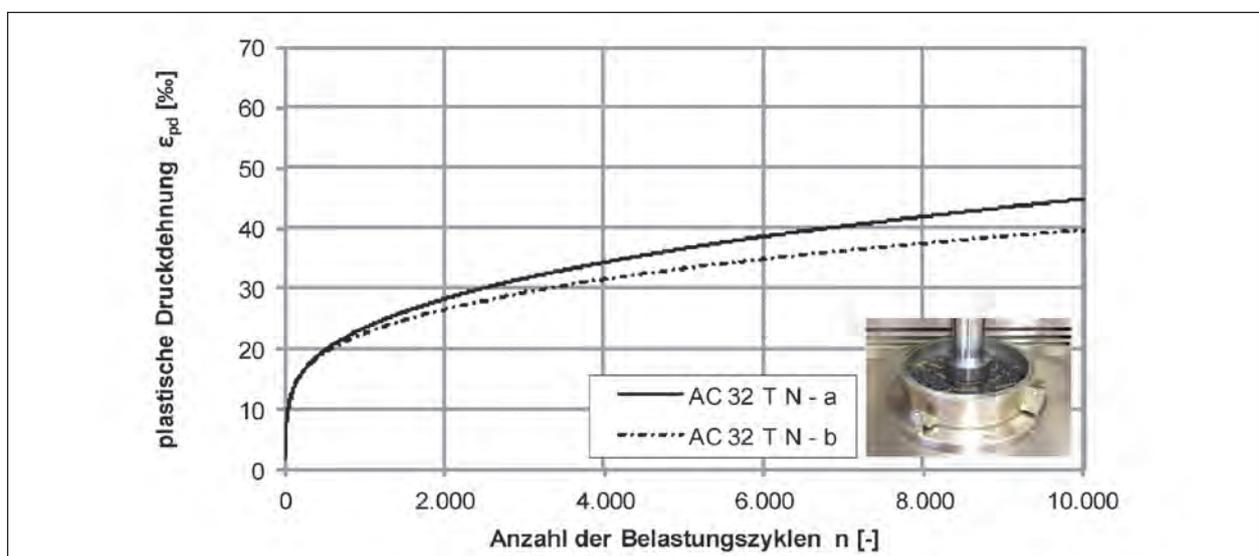


Bild 40: Kriechkurven aus dem Stempel Eindringversuch mit Stützring für die Asphaltart AC 32 T N (Zweifachbelegung)

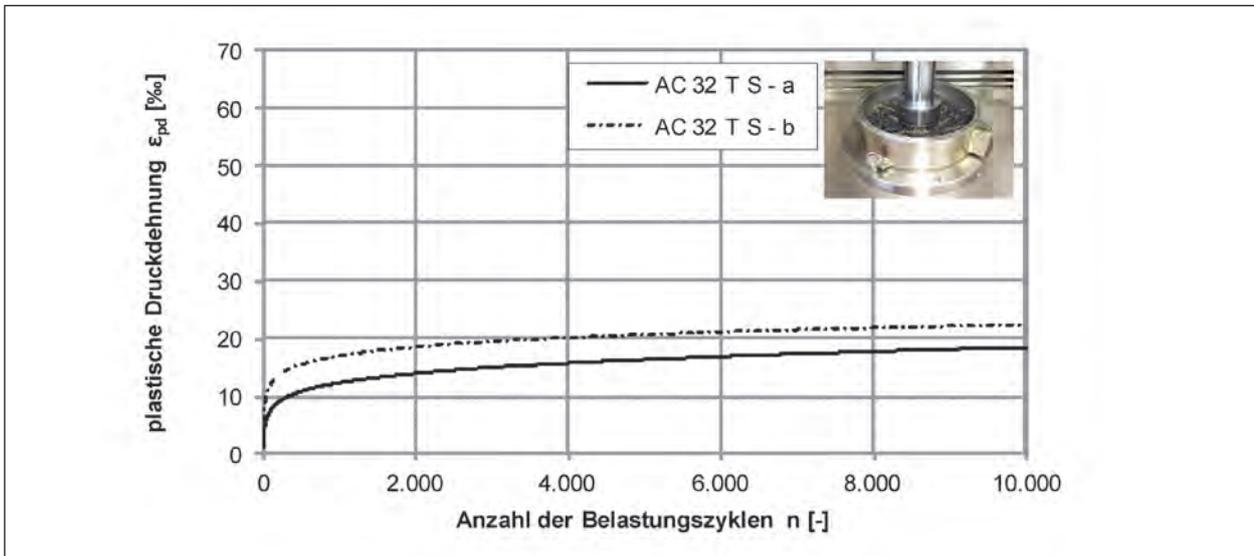


Bild 41: Kriechkurven aus dem Stempeleindringversuch mit Stützring für die Asphaltart AC 32 T S (Zweifachbelegung)

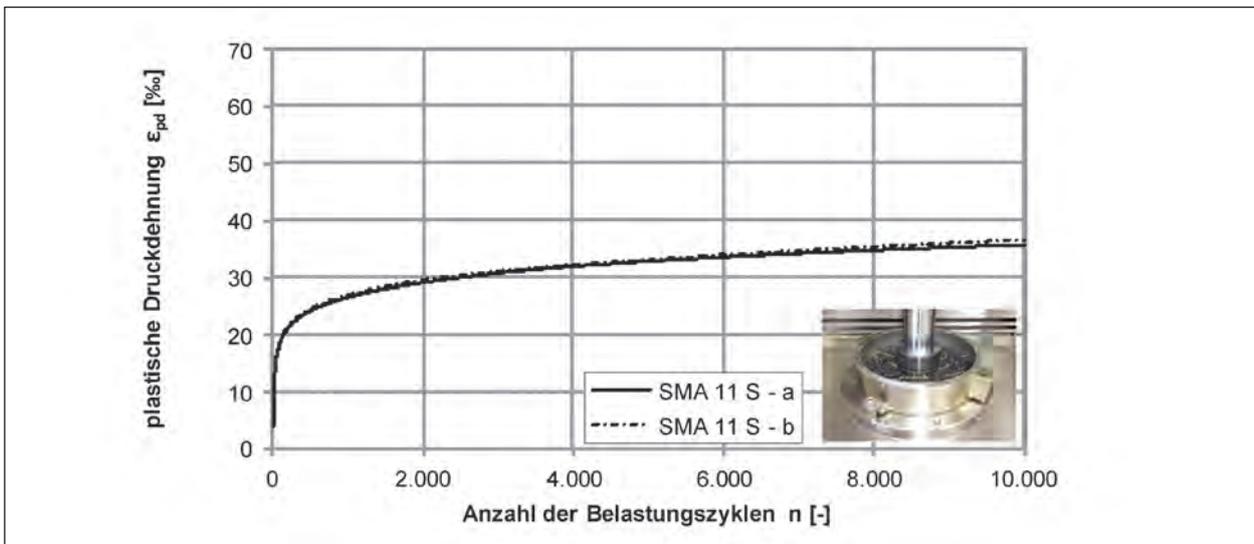


Bild 42: Kriechkurven aus dem Stempeleindringversuch mit Stützring für die Asphaltart SMA 11 S (Zweifachbelegung)

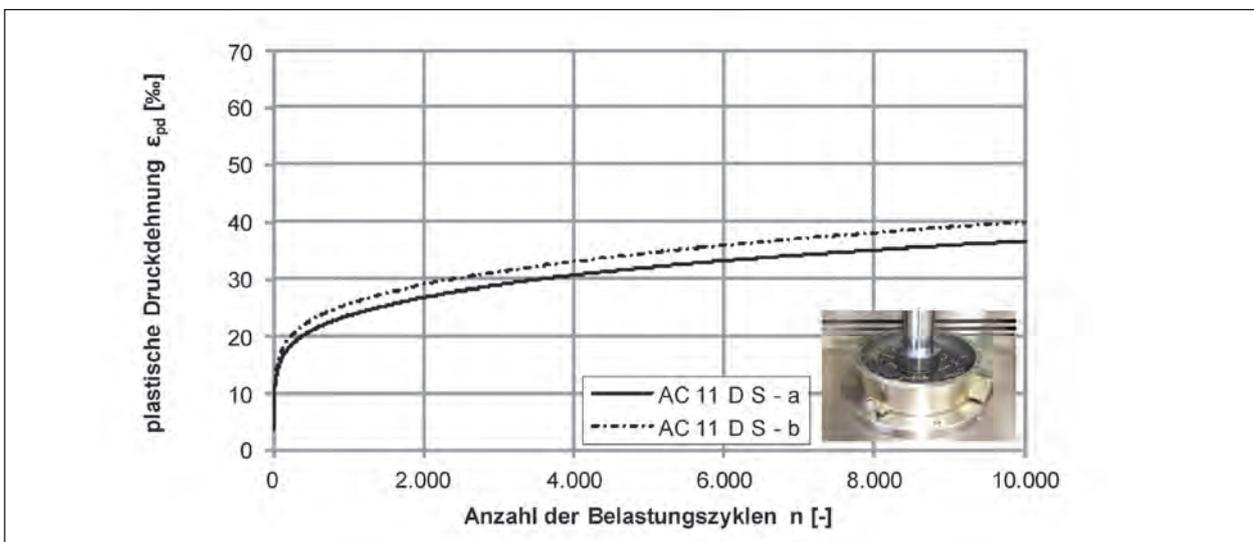


Bild 43: Kriechkurven aus dem Stempeleindringversuch mit Stützring für die Asphaltart AC 11 D S (Zweifachbelegung)

Asphaltsorte	Anzahl der Belastungszyklen [-]	akkumulierte plastische Druckdehnung [%]	akkumulierte plastische Druckverformung [mm]	Dehnungsrate [% $\cdot 10^{-4}/n$]
AC 16 B S	10.000	22,21	0,89	4,23
SMA 11 S	10.000	34,07	1,36	6,13
PA 8	10.000	35,55	1,42	6,40
AC 11 D S	10.000	51,72	2,07	11,27
AC 32 T N	10.000	42,19	3,42	16,73
AC 32 T S	10.000	20,24	1,66	2,50

Tab. 14: Ergebnisse der Stempelindringversuche mit Stützring

Asphaltsorte	Anzahl der Belastungszyklen [-]	akkumulierte plastische Druckdehnung [%]	akkumulierte plastische Druckverformung [mm]	Dehnungsrate [% $\cdot 10^{-4}/n$]
SMA 11 S	10.000	36,02	1,48	3,65
AC 11 D S	10.000	38,20	1,58	6,67

Tab. 15: Ergänzende Ergebnisse der Stempelindringversuche mit Stützring an den Asphaltsorten SMA 11 S und AC 11 D S

4.4.3 Stempelindringversuche ohne Stützring

Die resultierenden Kriechkurven aus den Stempelindringversuchen ohne Stützring an den geprüften Asphaltsorten AC 32 T S und AC 32 T N zeigen Bild 44, Bild 45 und Tabelle 16.

4.4.4 Spaltzug-Schwellversuche

Für die Asphaltsorten AC 11 D S, SMA 11 D S, AC 32 T S und AC 32 T N wurden Spaltzug-Schwellversuche kontinuierlich bis zum Versagen des Asphaltprobekörpers durchgeführt und der jeweilige Verlauf des E-Moduls, der Energy Ratio, der plastischen Zugverformungen und die Lissajous-Figuren

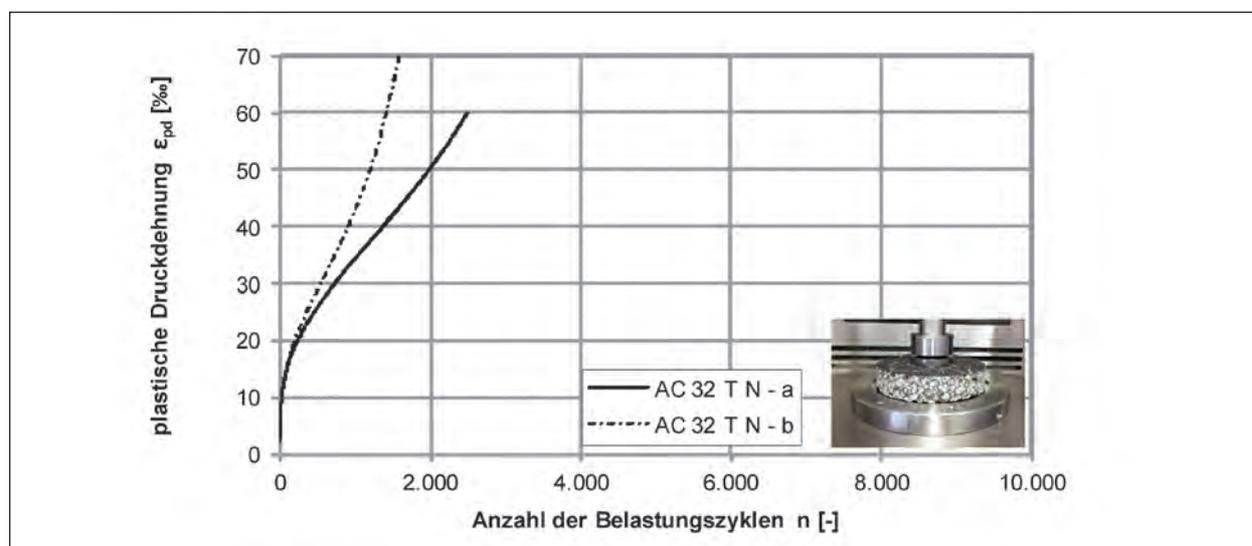


Bild 44: Kriechkurven aus dem Stempelindringversuch ohne Stützring für die Asphaltsorte AC 32 T N (Zweifachbelegung)

Asphaltsorte	Anzahl der Belastungszyklen [-]	akkumulierte plastische Druckdehnung [%]	akkumulierte plastische Druckverformung [mm]	Dehnungsrate [% $\cdot 10^{-4}/n$]
AC 32 T N	926	33,94	2,73	225,26
AC 32 T S	9.166	38,30	3,28	20,63

Tab. 16: Ergebnisse der Stempelindringversuche ohne Stützring an den Asphaltsorten AC 32 T N und AC 32 T S

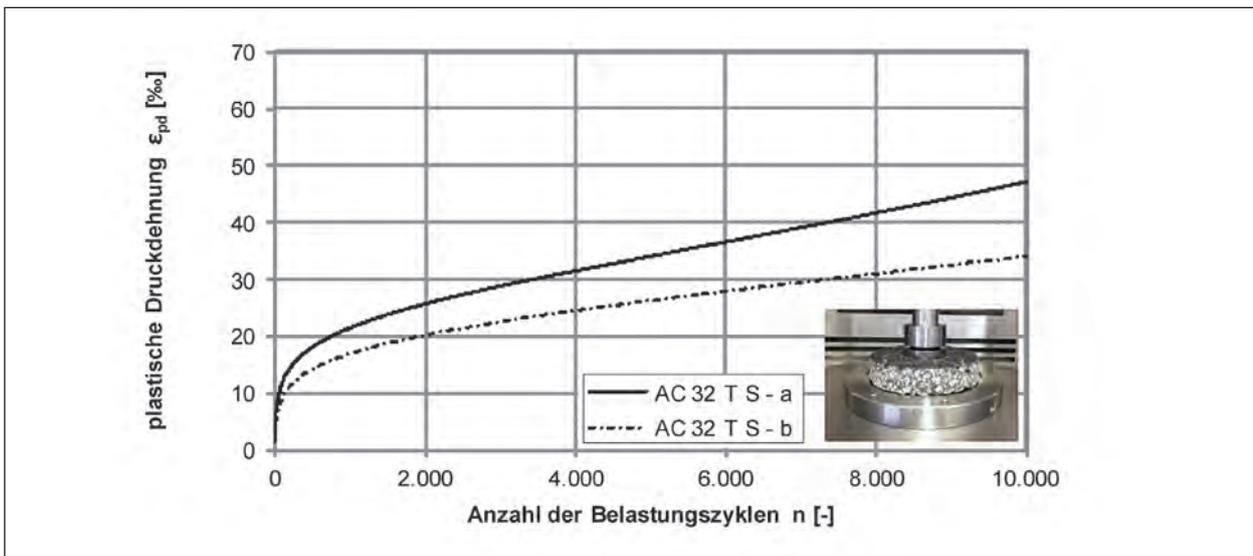


Bild 45: Kriechkurven aus dem Stempelindringversuch ohne Stützung für die Asphaltart AC 32 T S (Zweifachbelegung)

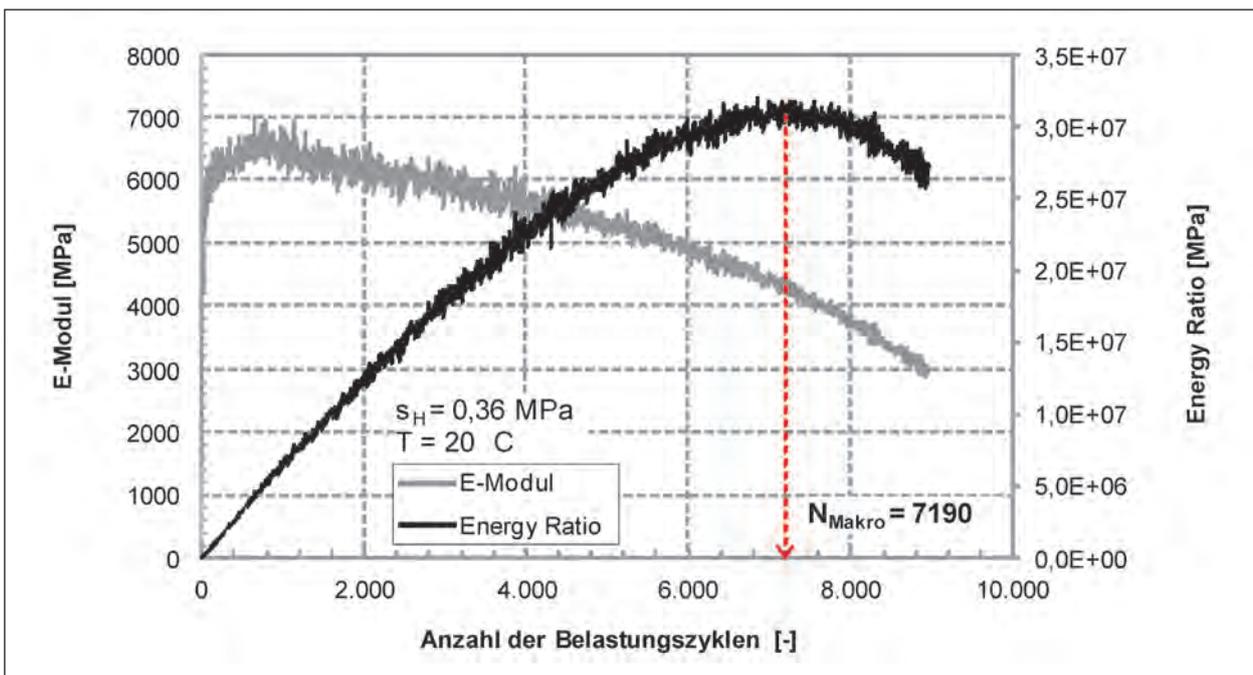


Bild 46: Verlauf des E-Moduls und Energy Ratio bei einem Spaltzug-Schwellversuch, durchgeführt an der Asphaltart SMA 11 S

jeweils am Anfang der Prüfung und bei der Lastwechselzahl N_{Makro} ausgewertet. Exemplarisch sind

diese Auswertungen für die Asphaltart SMA 11 S in Bild 46 und Bild 47 dargestellt.

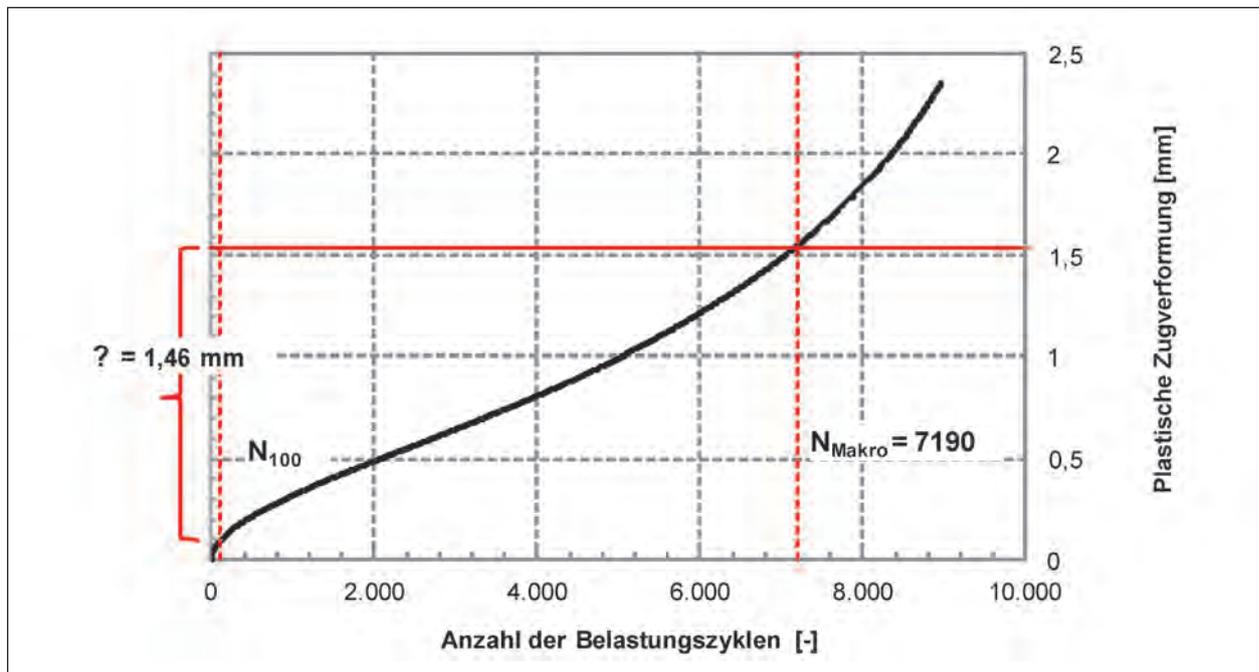


Bild 47: Verlauf der plastischen Zugverformungen bei einem Spaltzug-Schwellversuch, durchgeführt an der Asphaltart SMA 11 S

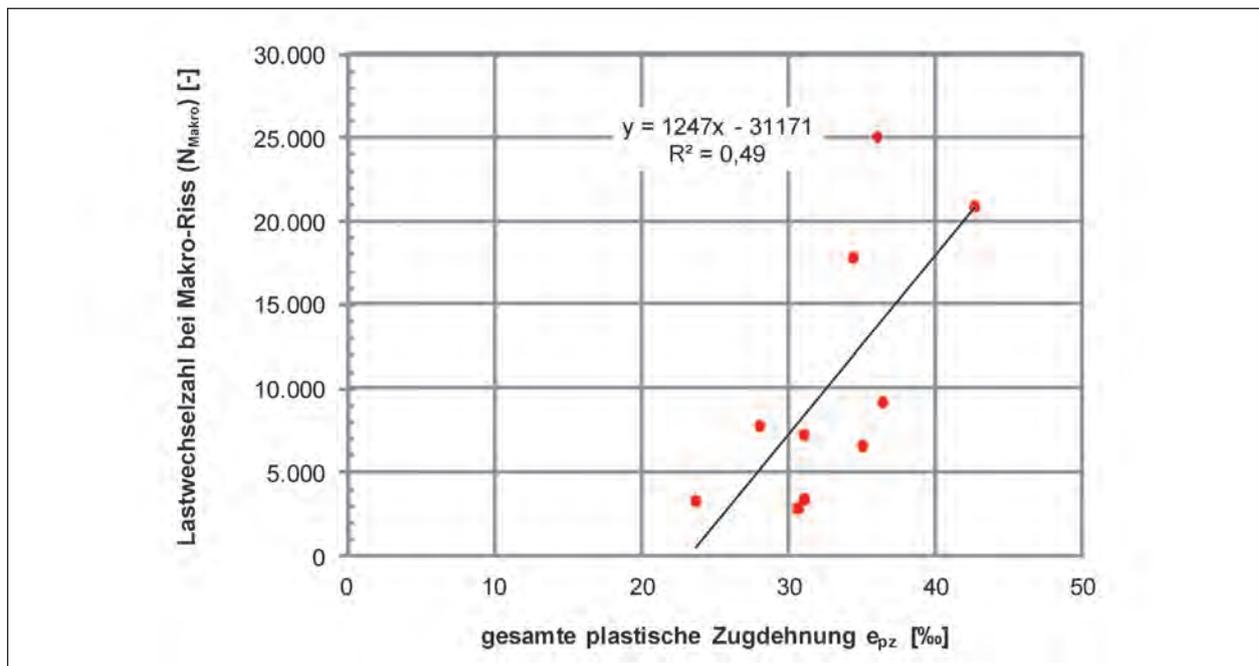


Bild 48: Akkumulierte plastische Zugdehnungen als Funktion der Lastwechselzahl N_{Makro} an der Asphaltart SMA 11 S

Die akkumulierte plastische Zugdehnung ϵ_{pz} als Funktion der Lastwechselzahl N_{Makro} ist exemplarisch für die Asphaltart SMA 11 S in Bild 48 abgebildet. Mit zunehmender Lastwechselzahl bei Entstehung eines Makrorisses nehmen auch die akkumulierten plastischen Zugdehnungen im Probekörper zu.

Die Lastwechselzahlen N_{Makro} , die akkumulierten plastischen Zugdehnungen ϵ_{pz} und die akkumulierten plastischen Zugverformungen sind für alle untersuchten Asphaltarten in den Tabellen 17 bis 20 angegeben.

horizontal induzierte Oberspannung [MPa]	$N_{\text{Makro}} [-]$	akkumulierte plastische Zugdehnung ϵ_{pz} [‰]	akkumulierte plastische Zugverformung [mm]
0,46	3.289	31,07	1,47
0,46	3.188	23,68	1,12
0,46	2.734	30,59	1,44
0,36	6.492	34,98	1,65
0,36	9.095	36,44	1,72
0,36	7.190	30,98	1,46
0,36	7.700	28,00	1,32
0,26	25.000	36,05	1,70
0,26	17.750	34,40	1,62
0,26	20.787	42,68	2,02

Tab. 17: Prüfergebnisse aus Spaltzug-Schwellversuchen an der Asphaltart SMA 11 S

horizontal induzierte Oberspannung [MPa]	$N_{\text{Makro}} [-]$	akkumulierte plastische Zugdehnung ϵ_{pz} [‰]	akkumulierte plastische Zugverformung [mm]
0,57	3.394	22,94	1,08
0,57	2.771	22,81	1,08
0,57	3.087	18,61	0,88
0,45	7.900	24,19	1,14
0,45	6.600	20,30	0,96
0,45	6.054	20,72	0,98
0,45	8.685	24,02	1,13
0,35	19.750	27,17	1,28
0,35	23.454	26,21	1,24
0,35	31.937	26,76	1,26

Tab. 18: Prüfergebnisse aus Spaltzug-Schwellversuchen an der Asphaltart AC 11 D S

horizontal induzierte Oberspannung [MPa]	$N_{\text{Makro}} [-]$	akkumulierte plastische Zugdehnung ϵ_{pz} [‰]	akkumulierte plastische Zugverformung [mm]
0,45	7.626	12,46	0,90
0,45	3.855	14,89	1,08
0,60	1.498	12,77	0,93
0,60	2.519	14,73	1,07
0,35	12.137	15,68	1,14
0,35	23.660	14,68	1,06

Tab. 19: Prüfergebnisse aus Spaltzug-Schwellversuchen an der Asphaltart AC 32 T N

horizontal induzierte Oberspannung [MPa]	N_{Makro} [-]	akkumulierte plastische Zugdehnung ϵ_{pz} [‰]	akkumulierte plastische Zugverformung [mm]
0,40	62.051	14,21	1,03
0,40	295471	7,09	0,51
0,40	64.000	12,63	0,91
0,55	11.400	10,22	0,74
0,55	32.677	7,62	0,55
0,55	9.442	11,71	0,85
0,70	2.814	7,61	0,55
0,70	12.482	5,25	0,38
0,70	5.750	6,21	0,45

Tab. 20: Prüfergebnisse aus Spaltzug-Schwellversuchen an der Asphaltart AC 32 T S

4.4.5 Auswertung der dissipierten Energie

Sämtliche im Rahmen des Projekts durchgeführten Versuche wurden hinsichtlich der Energiedissipation ausgewertet. Die Bilder 49 bis 51 zeigen exemplarisch die Auswertungen aus Triaxialversuchen für die Asphaltart AC 22 T S. In Bild 49 sind die akkumulierten plastischen Druckdehnungen als Funktion der Belastungszyklen dargestellt. Es zeigt sich, dass sich nach einer Anfangsphase (Nachverdichtung) ein quasistationäres Materialverhalten einstellt. Die gestrichelte Linie gibt näherungsweise die Grenze der überproportionalen Zunahme der plastischen Druckdehnungen zu Versuchsbeginn an (ca. 500 Belastungszyklen), ab der die dissipierte Energie nicht mehr abfällt und näherungsweise konstant bleibt (siehe Bild 50).

In Bild 51 sind die zugehörigen Lissajous-Figuren nach 500 Belastungszyklen und nach 20.000 Belastungszyklen gegenüber gestellt. Während der Phase mit quasistationärem Materialverhalten ist fast ausschließlich plastische Druckverformung zu beobachten, während Effekte zufolge Änderungen des Materialverhaltens vernachlässigbar klein sind (die Änderung in dissipierter Energie ist mit 7,3 % vergleichsweise klein).

Nachfolgend ist exemplarisch die Energiedissipation während eines Stempel Eindringversuchs mit Stützring für einen AC 32 T N dargestellt. Die Lastpause zwischen den Lastwechseln erschwert die Auswertung der dissipierten Energie, weil die Energiedissipation durch viskose Rückstellung und Fließvorgänge im Material überlagert wird. Da-

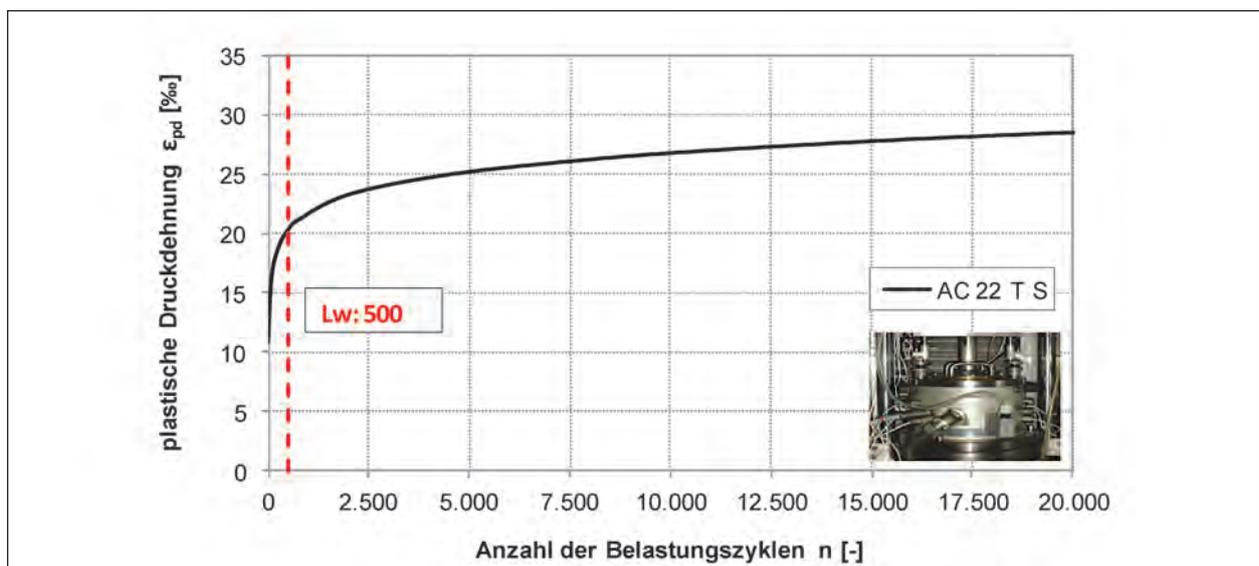


Bild 49: Triaxialversuch: Akkumulierte plastische Druckdehnungen als Funktion der Belastungszyklen, durchgeführt an der Asphaltart AC 22 T S

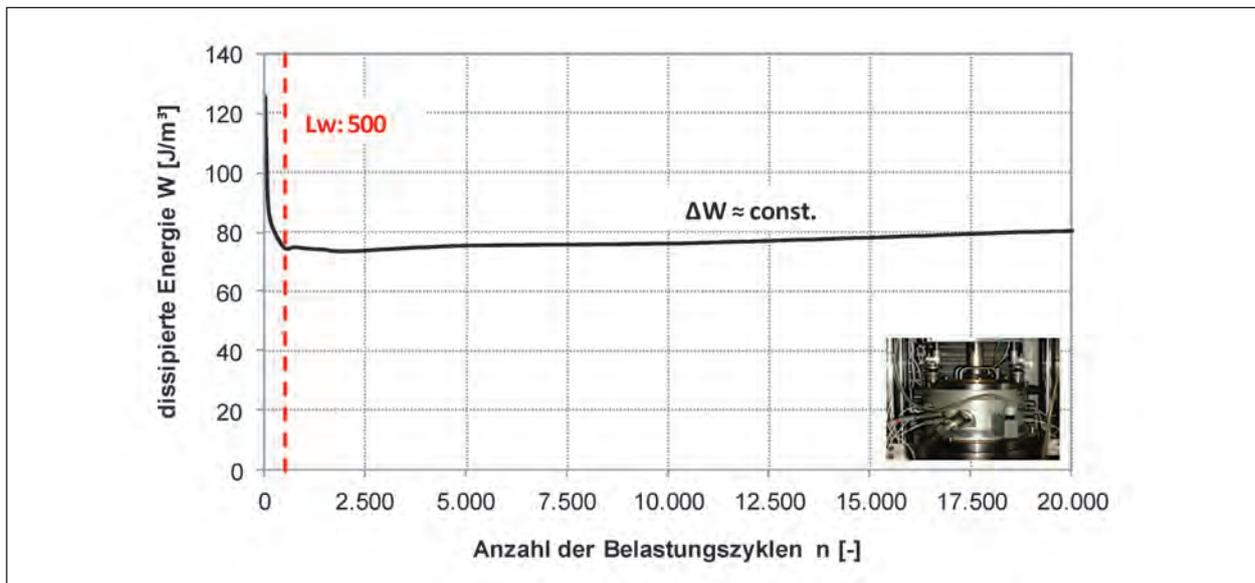


Bild 50: Energiedissipation als Funktion der Belastungszyklen für den in Bild 49 dargestellten Triaxialversuch

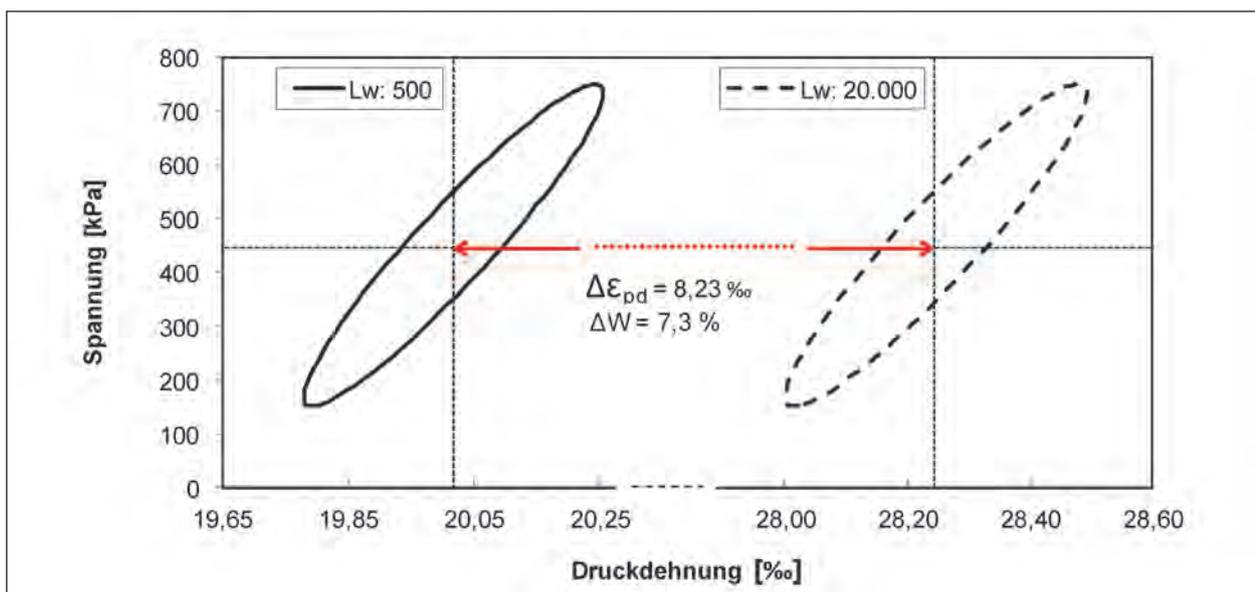


Bild 51: Lissajous-Figuren nach 500 Belastungszyklen und nach 20.000 Belastungszyklen für den in Bild 49 dargestellten Triaxialversuch

durch kommt es zur Deformation der Lissajous-Figur (siehe Bild 53).

Auswertung und Analyse der Energiedissipation sind somit nur dann zielführend, wenn das Lastsignal eine harmonische Schwingung darstellt.

Die Auswertung der dissipierten Energie für einen Spaltzug-Schwellversuch zeigen exemplarisch die Bilder 54 bis 56 für einen SMA 11 S. Die große horizontale Verschiebung der Lissajous-Figur (um ca. 31 ‰) zwischen Anfang (100. Lastwechsel) und Erreichen des Ermüdungskriteriums (N_{Makro}) weist auf

die während des Versuchs auftretenden großen plastischen Verformungen hin. Die Materialermüdung ist deutlich weniger ausgeprägt, die Veränderung der dissipierten Energie beträgt nur ca. 40 %. Folglich resultiert das Bruchversagen des Probekörpers zum überwiegenden Teil durch die Überlagerung der plastischen Deformationen.

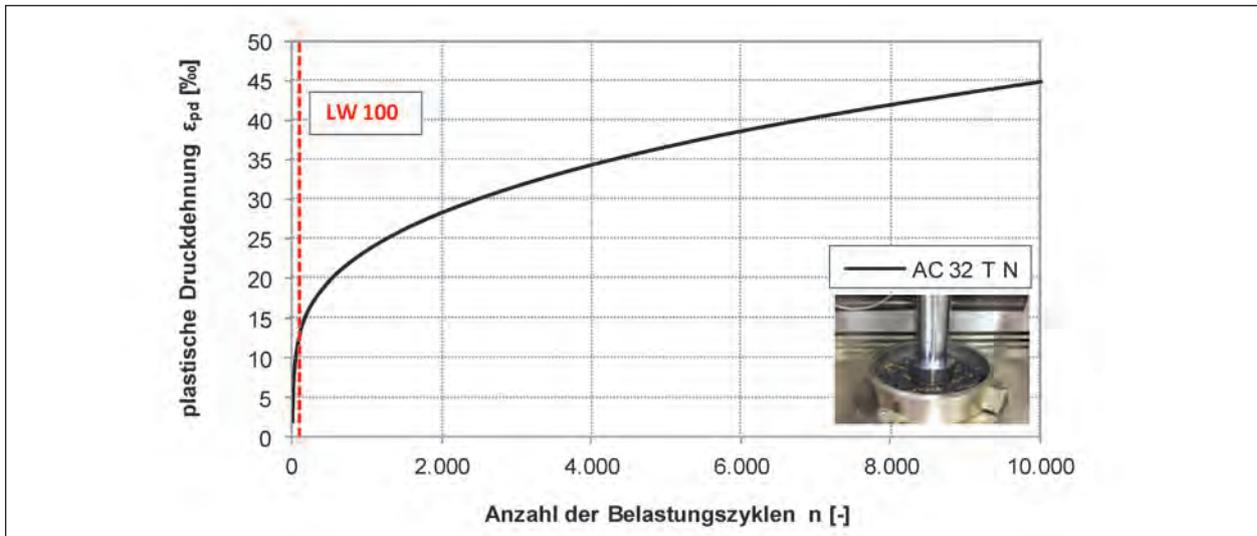


Bild 52: Stempeldringversuch mit Stützung: Akkumulierte plastische Druckdehnungen als Funktion der Belastungszyklen, durchgeführt an der Asphaltart AC 32 T N

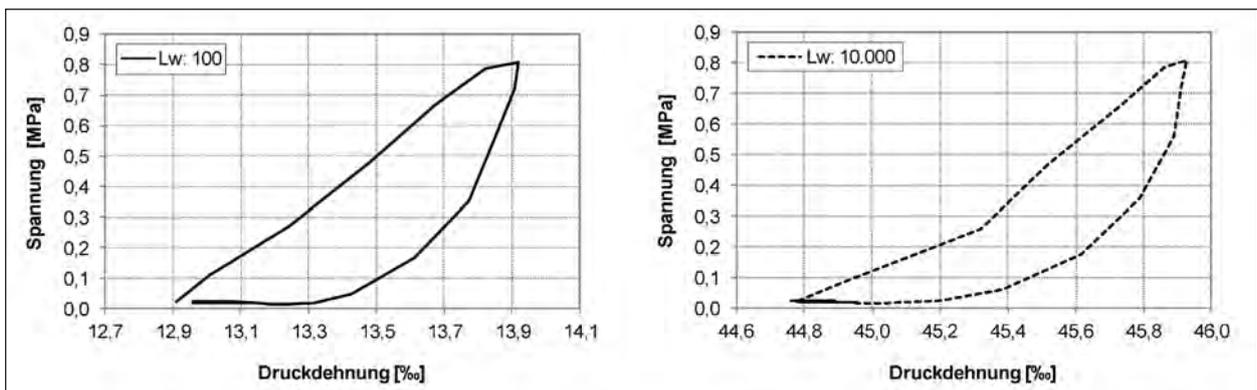


Bild 53: Deformation der Lissajous-Figur nach 100 Belastungszyklen (oben) und nach 10.000 Belastungszyklen (unten) für den in Bild 52 dargestellten Stempeldringversuch mit Stützung

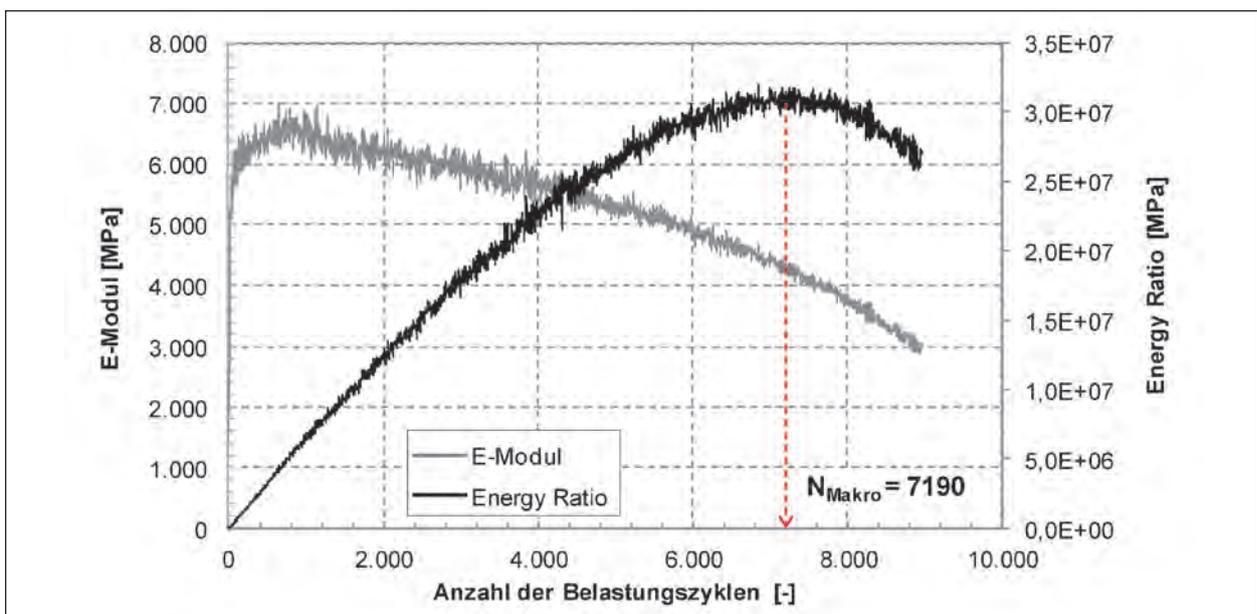


Bild 54: Spaltzug-Schwellversuch: Verlauf des E-Moduls und Energy Ratio, durchgeführt an der Asphaltart SMA 11 S

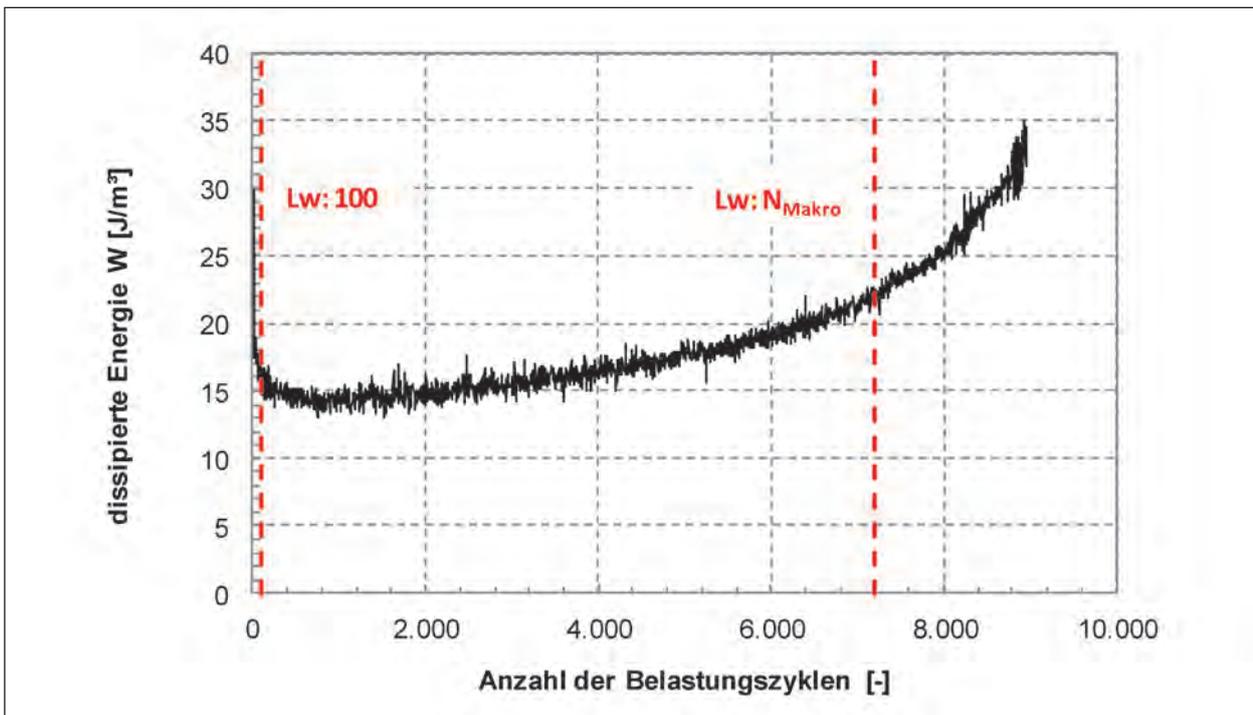


Bild 55: Energiedissipation als Funktion der Belastungszyklen für den in Bild 54 dargestellten Spaltzug-Schwellversuch

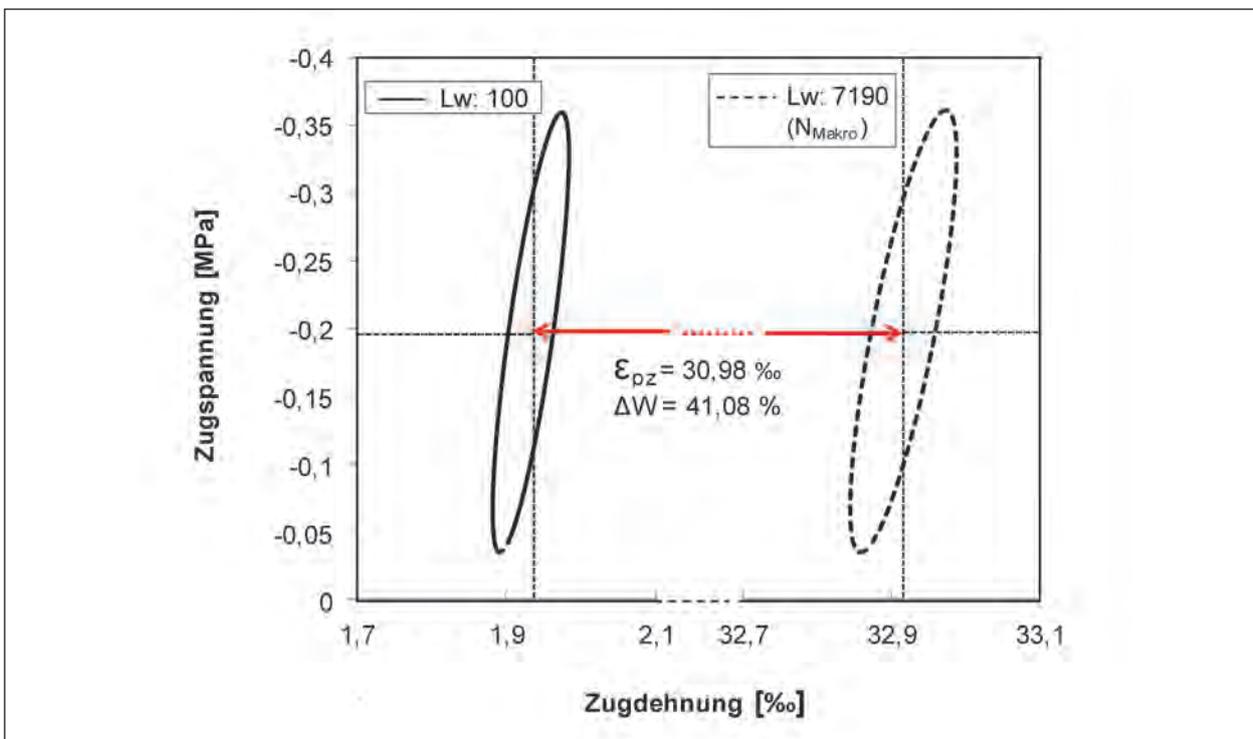


Bild 56: Spaltzug-Schwellversuch durchgeführt an der Asphaltsorte SMA 11 S: Lissajous-Figuren beim 100. Lastwechsel und bei der Lastwechselzahl N_{Makro}

4.4.6 Vergleichende Darstellungen

Triaxialversuche und Stempeleindringversuche mit Stützring

In Bild 57 sind die Prüfergebnisse aus Triaxial- und Stempeleindringversuchen mit Stützring für die Asphaltart SMA 11 D S beispielhaft einander gegenübergestellt. Die resultierenden plastischen Dehnungen aus Triaxialversuchen weisen deutlich niedrigere Werte auf, was auf eine niedrigere Prüftemperatur und einen eventuell größeren Stützdruck während der Prüfung zurückzuführen ist.

Eine Relativbetrachtung der resultierenden Dehnungen zeigt die Unterschiede zwischen den beiden Versuchstypen (Tabelle 21). Die Zahlenwerte der bleibenden axialen Dehnung wurden zueinander ins Verhältnis gesetzt. Die Dehnungen des Asphaltbinders werden zu 1,0 gesetzt, alle weiteren Dehnungen werden relativ dazu angegeben (siehe Tabelle 21). Die Ergebnisse zeigen, dass die relativen Verhältnisse zum Asphaltbinder bei beiden Versuchstypen vergleichbar sind, sowohl nach 10.000 Lastwechseln, als auch nach 150.000 Lastwechseln beim Triaxialversuch (siehe Tabelle 21 und Bild 58). Der Stempeleindringversuch mit Stütz-

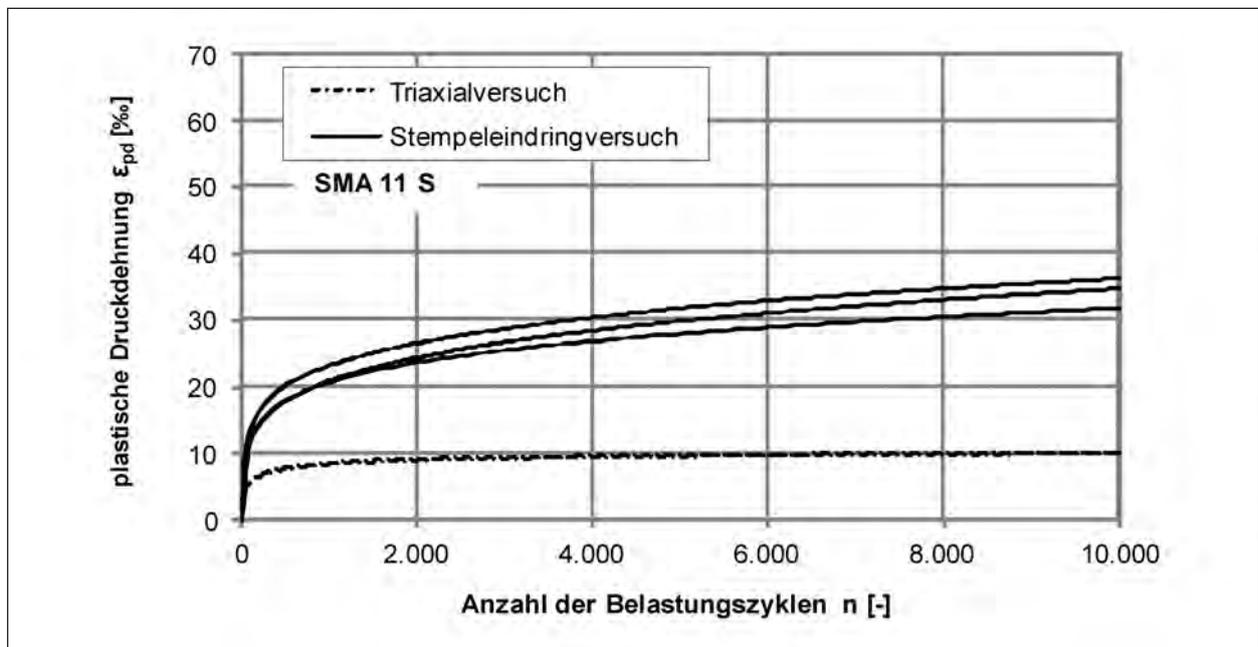


Bild 57: Kriechkurven aus Triaxialversuchen und Stempeleindringversuchen mit Stützring bis 10.000 Lastwechsel für Asphaltart SMA 11 S

Asphaltart	Triaxialversuch		Stempeleindringversuch mit Stützring	
	akkumulierte plastische Druckdehnung [%]	relative Dehnung zum Asphaltbinder [-]	akkumulierte plastische Druckdehnung [%]	relative Dehnung zum Asphaltbinder [-]
	nach 10.000 Lastwechseln		nach 10.000 Lastwechseln	
AC 16 B S	6,87	1,0	22,21	1,0
SMA 11 S	9,97	1,45	34,07	1,53
PA 8	11,43	1,66	35,55	1,60
AC 11 D S	15,41	2,24	51,72	2,33
	nach 150.000 Lastwechseln		nach 10.000 Lastwechseln	
AC 16 B S	8,83	1,0	22,21	1,0
SMA 11 S	11,42	1,29	34,07	1,53
PA 8	12,76	1,44	35,55	1,60
AC 11 D S	18,13	2,05	51,72	2,33

Tab. 21: Vergleich der Ergebnisparameter aus Triaxialversuchen und Stempeleindringversuchen mit Stützring

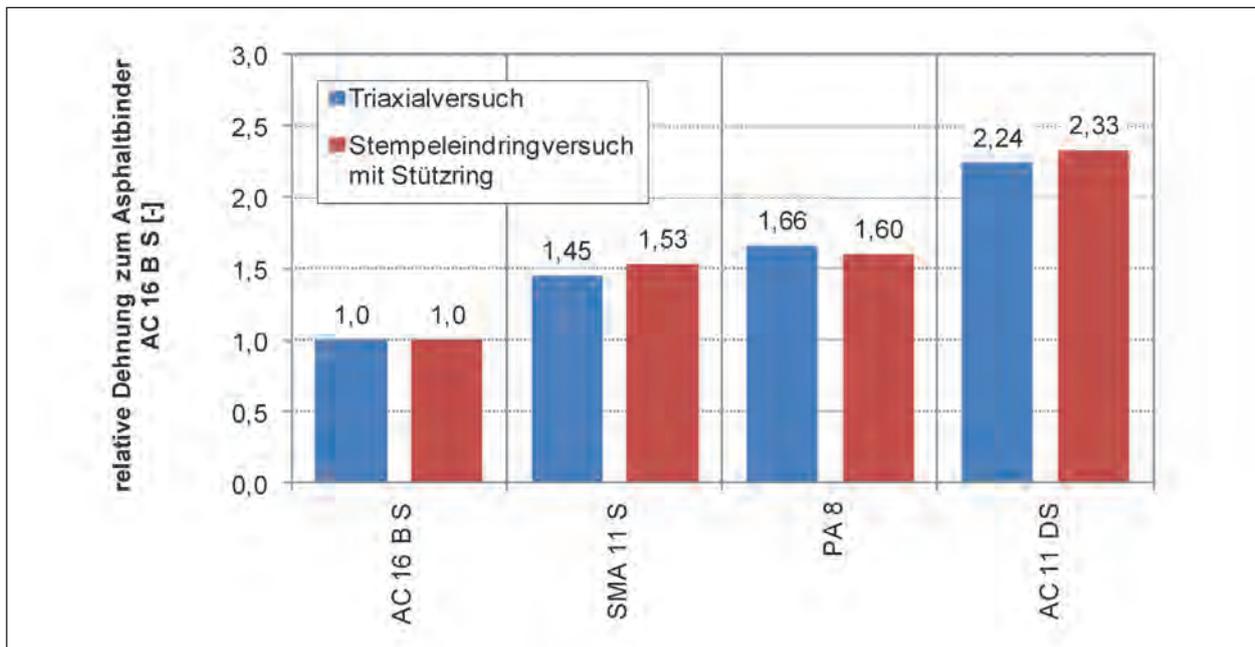


Bild 58: Darstellung der relativen Verhältnisse der berücksichtigten Asphaltvarianten zur Asphaltbindervariante beim Triaxialversuch (nach 10.000 Lastwechseln) und beim Stempeleindringversuch mit Stützring (nach 10.000 Lastwechseln)

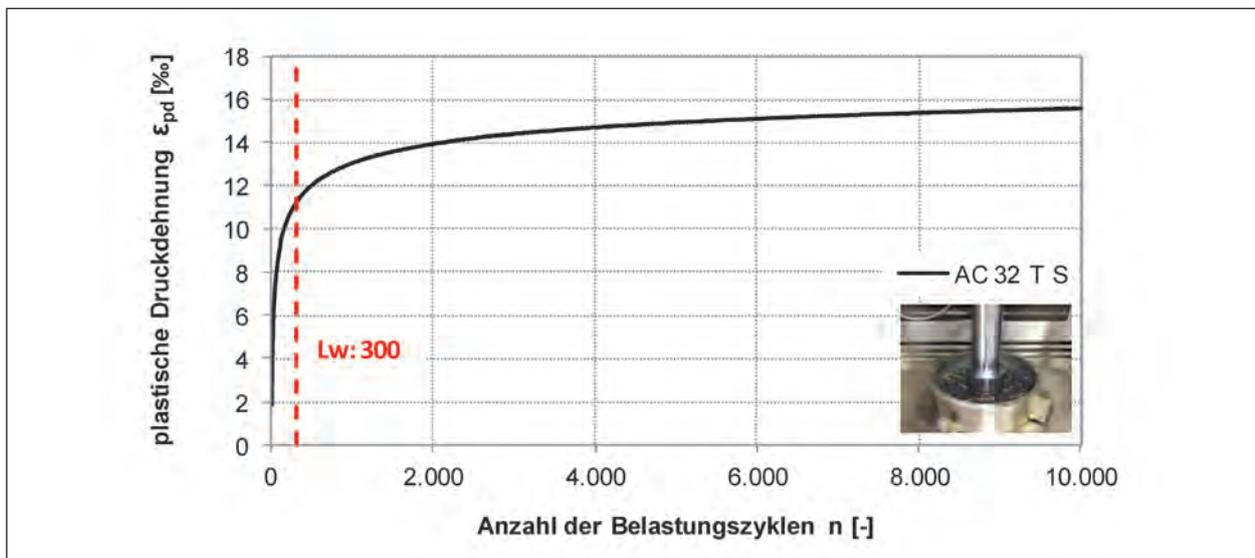


Bild 59: Stempeleindringversuch mit Stützring ohne Lastpausen: Akkumulierte plastische Druckdehnungen als Funktion der Belastungszyklen, durchgeführt an der Asphaltart AC 32 T S

ring liefert die gleiche Reihung der Asphaltvarianten bezüglich Verformungsbeständigkeit wie der Triaxialversuch.

Um das Materialverhalten während des Stempeleindringversuchs mittels Auswertung der dissipierten Energie beschreiben und mit dem Materialverhalten bei Triaxialversuch vergleichen zu können, wurden die Versuche ohne Lastpause durchgeführt. Die Auswertung anhand der dissipierten Energie von einem Stempeleindringversuch mit Stützring, durchgeführt ohne Lastpause an der

Asphaltart AC 32 T S zeigen exemplarisch die Bilder 59 bis 60. Es ist zu erkennen, dass sich nach einer Anfangsphase der Nachverdichtung ein quasistationäres Materialverhalten einstellt. Die dissipierte Energie nimmt überproportional bis zu einem Punkt ab, ab dem sie anschließend näherungsweise konstant bleibt (siehe Bild 60). In Bild 61 sind die zugehörigen Lissajous-Figuren nach 300 Belastungszyklen und nach 10.000 Belastungszyklen gegenüber gestellt. Während der Phase des quasistationären Materialverhaltens findet fast ausschließlich plastische Druckverformung

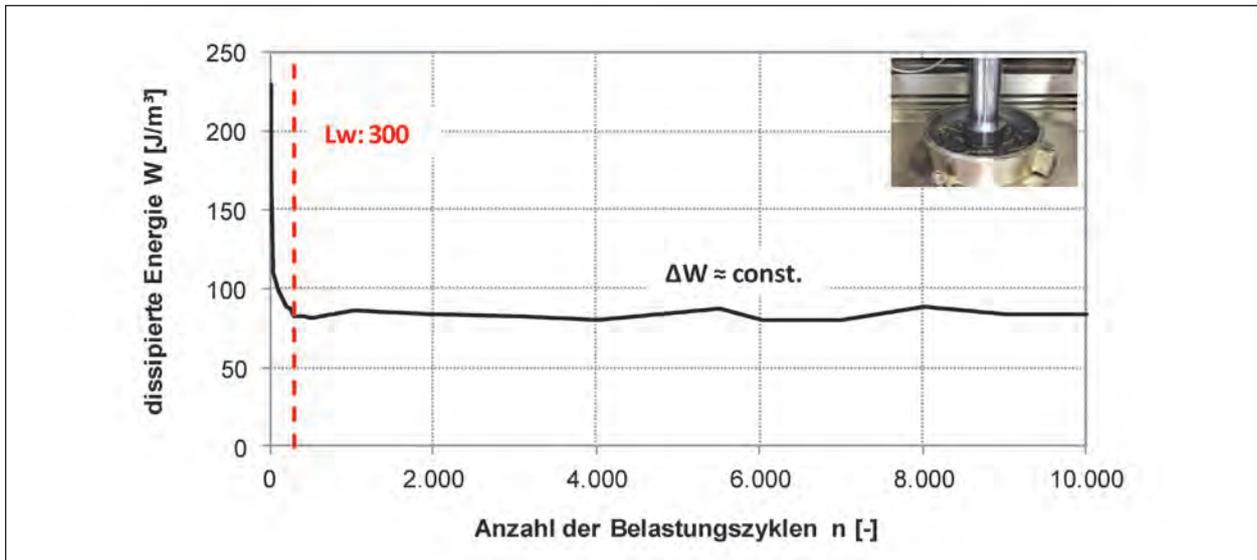


Bild 60: Energiedissipation als Funktion der Belastungszyklen für den in Bild 59 dargestellten Stempelndringversuch

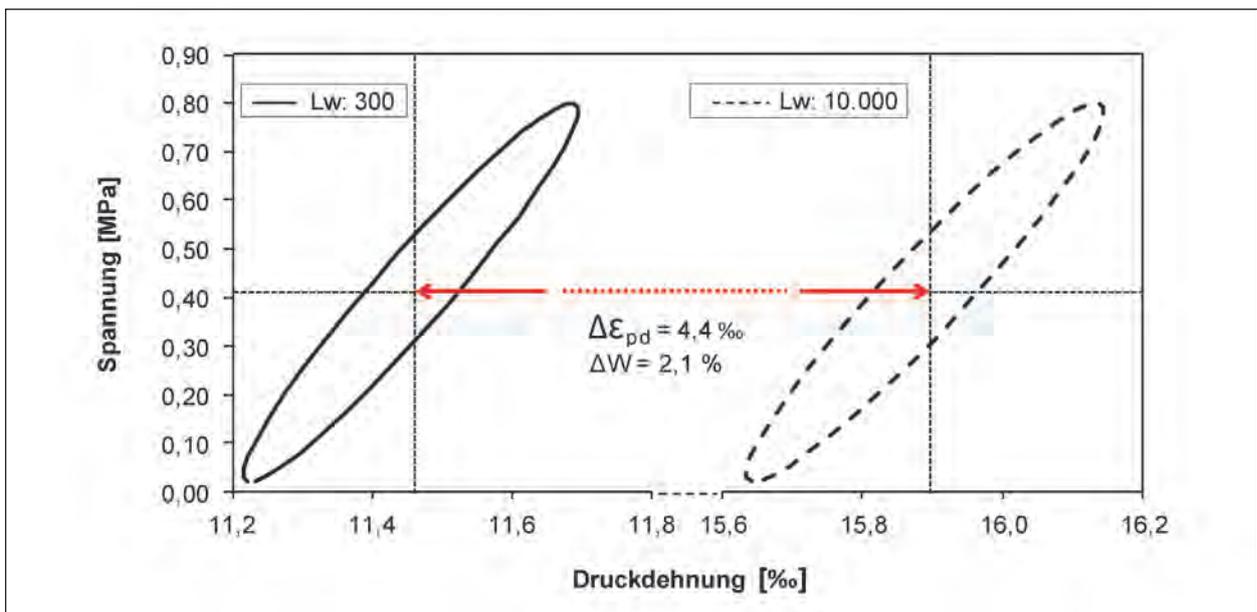


Bild 61: Lissajous-Figuren nach 300 Belastungszyklen und nach 10.000 Belastungszyklen für den in Bild 59 dargestellten Stempelndringversuch

statt, während Effekte zufolge Änderungen des Materialverhaltens vernachlässigbar klein sind. Dieses Materialverhalten ist grundsätzlich auch bei Versuchen mit Lastpausen zu erwarten. Das Materialverhalten während eines Stempelndringversuchs mit Stützring und jenes während eines Triaxialversuchs sind qualitativ gleich (vgl. Kapitel 4.4.5).

Stempelndringversuch mit und ohne Stützring

Tabelle 22 vergleicht die Ergebnisse aus den Stempelndringversuchen an den Asphaltarten

AC 32 T N und AC 32 T S, wobei jeweils Mittelwerte aus Einzelergebnisse dargestellt sind. Eine grafische Gegenüberstellung zeigen Bild 62 und Bild 63.

Es ist zu erkennen, dass die resultierenden plastischen Dehnungen in den Versuchen ohne Stützring deutlich höher sind. Der Stützring verhindert das überproportionale Wachstum von plastischen Dehnungen und ermöglicht damit einen Vergleich von verschiedenen Materialien ohne die notwendige Berücksichtigung von mehreren Parametern für den Fall eines Wendepunktes (z. B. Variante

AC 32 T N und Variante AC 32 T S mit Stützring, vorteilhaft, auch weil der Einspannungszustand in Tabelle 22). Die Verwendung eines Stützringes ist der Straße simuliert ist.

Asphaltsorte	Stützring	Anzahl der Belastungszyklen [-]	akkumulierte plastische Druckdehnung [‰]	akkumulierte plastische Druckverformung [mm]	Dehnungsrate [‰ · 10 ⁻⁴ /n]
AC 32 T N	ja	10.000	42,19	3,42	16,73
AC 32 T S		10.000	20,24	1,66	2,50
AC 32 T N	nein	926	33,94	2,73	225,26
AC 32 T S		9.166	38,30	3,28	20,63

Tab. 22: Ergebnisse aus den Stempelindringversuchen mit und ohne Stützring an den Asphaltarten AC 32 T N und AC 32 T S

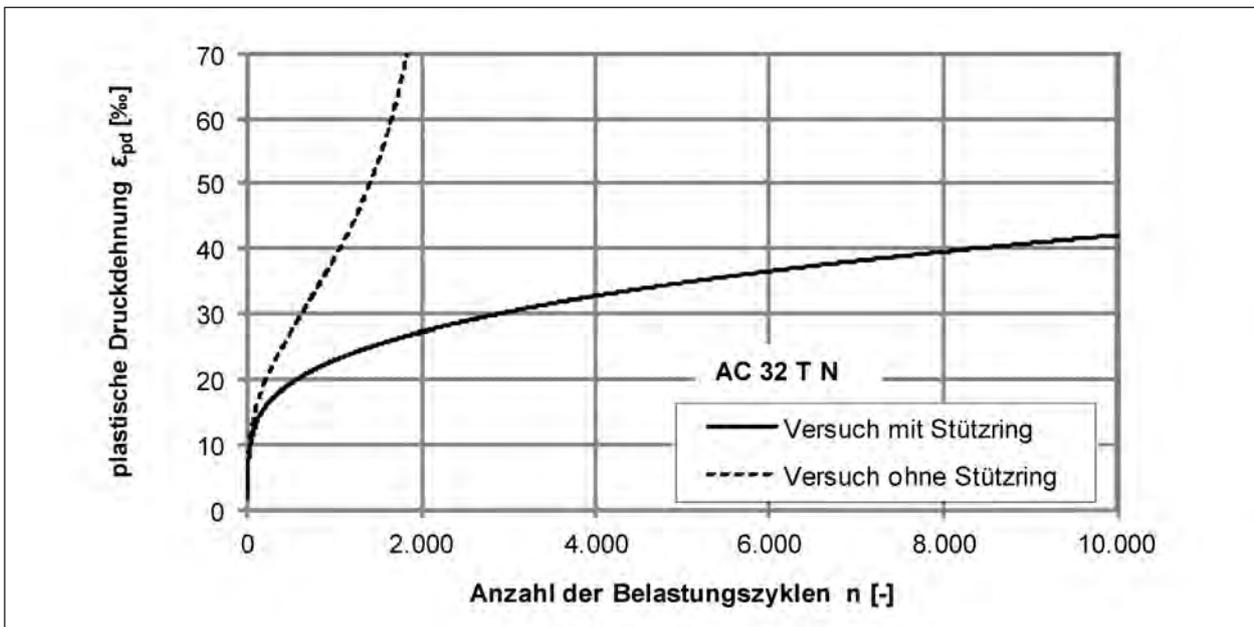


Bild 62: Überlagerung der (gemittelten) Kriechkurven aus Stempelindringversuchen mit und ohne Stützring für die Asphaltart AC 32 T N

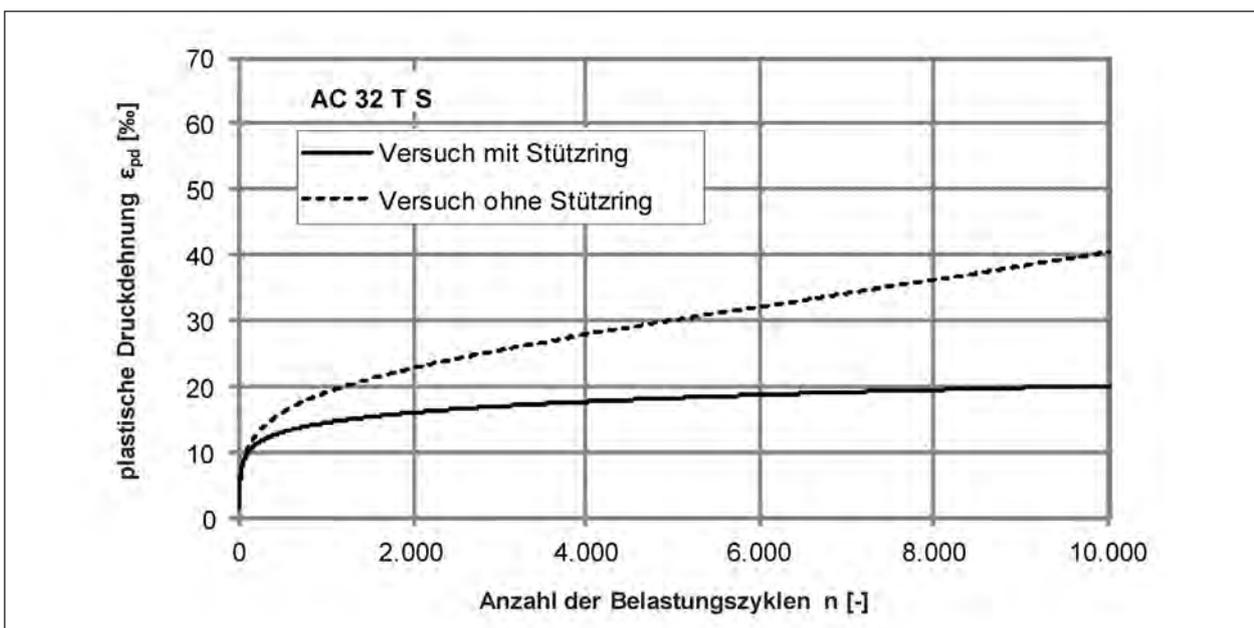


Bild 63: Überlagerung der (gemittelten) Kriechkurven aus Stempelindringversuchen mit und ohne Stützring für die Asphaltart AC 32 T S

Spaltzug-Schwellversuche und Stempeleindringversuche mit Stützring

In Bild 64 sind für die Asphaltarten AC 11 D S, SMA 11 S, AC 32 T S und AC 32 T N die akkumulierten plastischen Zugdehnungen in Abhängigkeit der Lastwechselzahl N_{Makro} dargestellt. Um die Korrelation des Verformungsverhaltens unter Zugbeanspruchung (beim Spaltzug-Schwellversuch) mit

dem Verformungsverhalten unter Druckbeanspruchung (beim Stempeleindringversuch mit Stützring) zu überprüfen, wurde für jede Asphaltart jeweils für die Lastwechselzahl $N_{\text{Makro}} = 10.000$ die akkumulierte plastische Zugdehnung ermittelt (Bild 65).

Tabelle 23 vergleicht die Ergebnisse aus Spaltzug-Schwellversuchen mit jenen aus Stempeleindringversuchen mit Stützring an den ausgewählten

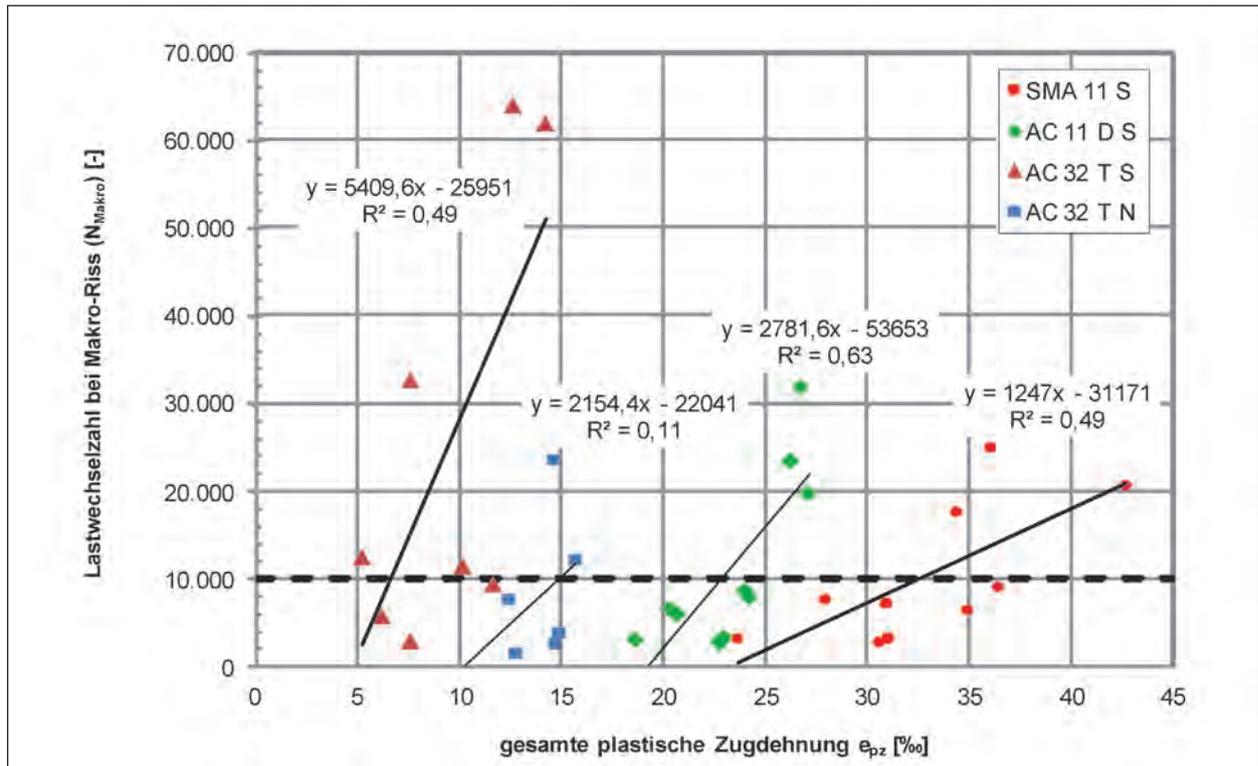


Bild 64: Spaltzug-Schwellversuch: Akkumulierte plastische Zugdehnungen in Abhängigkeit der Lastwechselzahl N_{Makro}

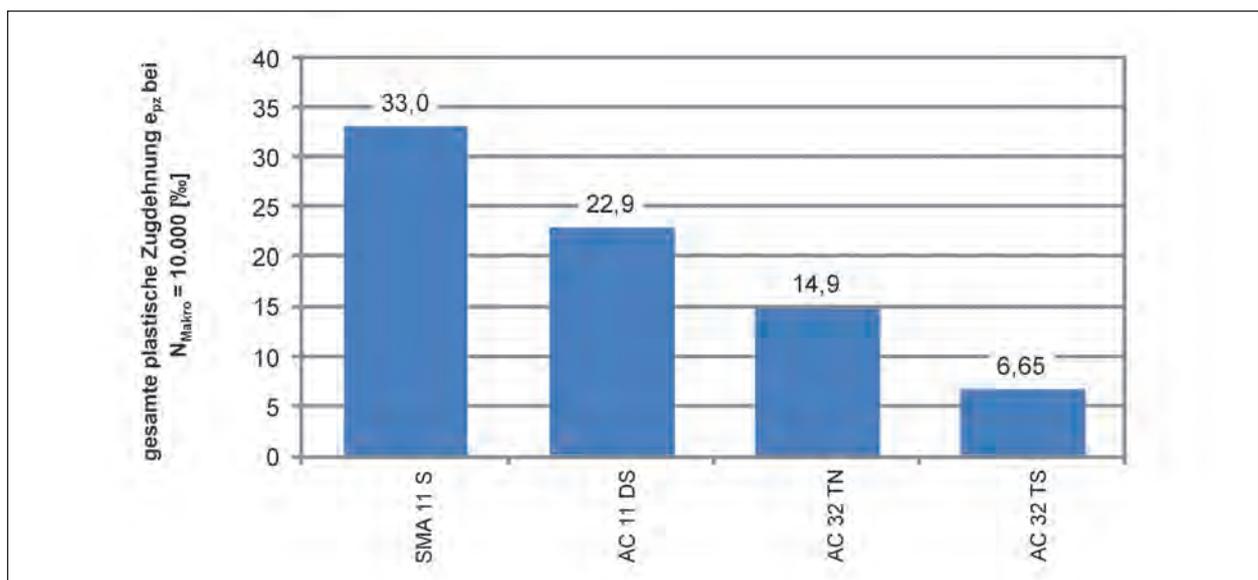


Bild 65: Spaltzug-Schwellversuch: Akkumulierte plastische Zugdehnungen nach 10.000 Lastwechseln

Asphaltart	Spaltzug-Schwellversuch		Stempeleindringversuch mit Stützring	
	akkumulierte plastische Zugdehnung bei $N_{\text{Makro}} = 10.000$ [‰]	relative Dehnung zum AC 32 T S [-]	akkumulierte plastische Druckdehnung [‰]	relative Dehnung zum AC 32 T S [-]
AC 32 T S	6,65	1,0	20,24	1,0
SMA 11 S	33,0	4,96	36,02	1,78
AC 11 D S	22,9	3,44	38,20	1,89
AC 32 T N	14,9	2,24	42,19	2,08

Tab. 23: Vergleich der Ergebnisse aus den Spaltzug-Schwellversuchen und aus den Stempeleindringversuchen mit Stützring an den Asphaltarten AC 32 T S, AC 32 T N, AC 11 D S und SMA 11 S

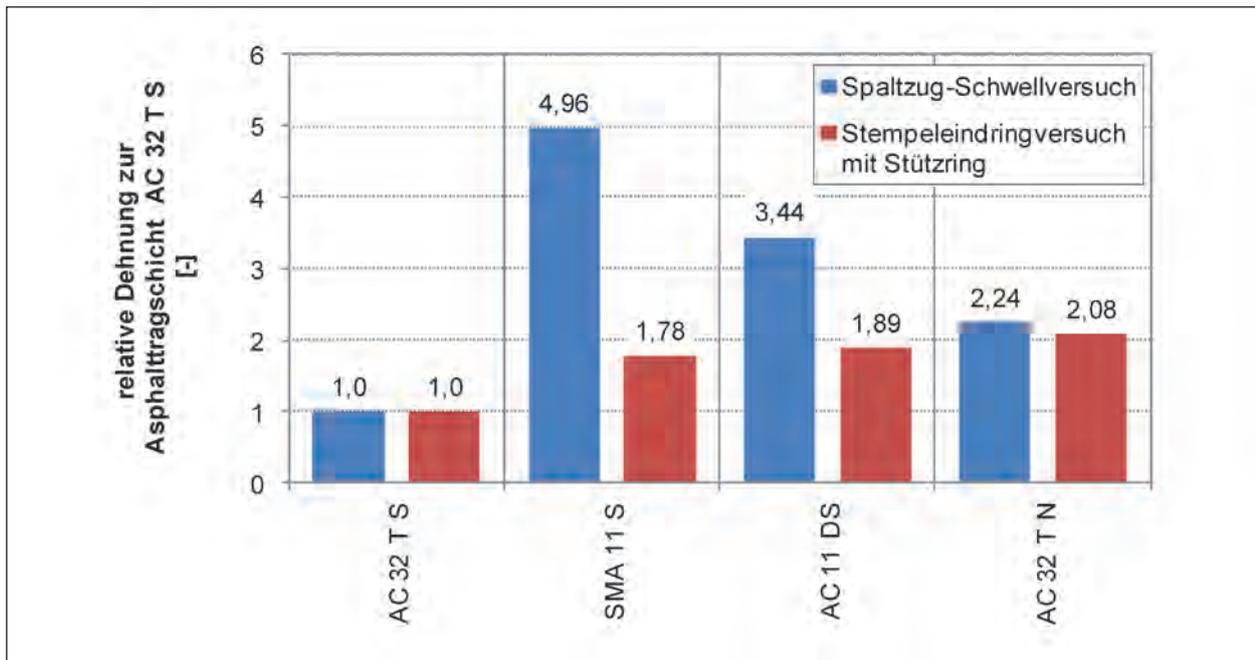


Bild 66: Darstellung der relativen Verhältnisse der berücksichtigten Asphaltvarianten zur Asphalttragschichtvariante beim Spaltzug-Schwellversuch (bei $N_{\text{Makro}} = 10.000$ Lastwechsel) und beim Stempeleindringversuch (nach 10.000 Lastwechseln)

Asphaltarten. Die plastischen Zug- und Druckdehnungen wurden zueinander ins Verhältnis gesetzt, wobei die Dehnungen der Asphalttragschicht AC 32 T S als Referenz (1,0) dienen. Die Ergebnisse zeigen, dass die relativen Verhältnisse zur Referenz (Asphalttragschicht) bei beiden Versuchstypen unterschiedlich sind (siehe Bild 66). Das Verformungsverhalten unter Zugbeanspruchung ist nicht mit jenem unter Druckbeanspruchung vergleichbar. Ein Versuch mit dominanter Zugbeanspruchung (hier Spaltzug-Schwellversuch) eignet sich grundsätzlich nicht (auch nicht tendenziell) zur Beurteilung des Verformungsverhaltens unter Druckbeanspruchung.

5 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Inhalt dieses Forschungsprojekts ist die vergleichende Bewertung unterschiedlicher Laborprüfverfahren hinsichtlich ihrer Eignung zur Bewertung der Verformungsstabilität von Walzasphalten für den Straßenbau. Dazu werden ausgewählte, in Deutschland bevorzugt durchgeführte zyklisch-dynamische Laborprüfverfahren (Performance-Prüfungen) mit unterschiedlichen Prüfgeometrien verglichen. Allen Prüfverfahren gemeinsam sind die zyklische Lastaufbringung während des Versuchs und die messtechnische Beobachtung des temperatur-, frequenz- und zeitabhängigen visko-elasto-plastischen Verformungsverhaltens. Die berücksichtigten Laborprüfverfahren sind: der Triaxialversuch, der Stempeleindringversuch, der Stempeleindring-

versuch mit Stützring und der Spaltzug-Schwellversuch.

In die Auswertungen sind folgende Walzasphaltarten einbezogen: Asphaltbeton für Asphaltdeck-, -binder- und -tragschichten, Splittmastixasphalt und offenerporiger Asphalt.

Der in dieser Forschungsarbeit verfolgte Ansatz zur vergleichenden Auswertung unterschiedlicher zyklisch-dynamischer Laborprüfverfahren konzentriert sich auf die inkrementelle Veränderung der belastungs- und mischgutabhängigen Materialantwort je Lastzyklus. Während des Versuchs verändert sich das Asphaltverhalten. Dies kann anhand der Veränderung der Primärwirkungen (Spannung, Dehnung) festgestellt und ausgewertet werden.

Als sehr aussagekräftige Kenngrößen, die einen vertieften Einblick in das Materialverhalten erlauben, wurden identifiziert (i.) die Darstellung jener Kurvengraphen als Lissajous-Figuren, die durch die Überlagerung der Spannungs-Dehnungs-Schwingungen entstehen, und (ii.) die dissipierte Energie, mit der jene energetischen Anteile berechnet werden, die in einem Belastung-Entlastungszyklus verbraucht werden in Form von mechanischer Arbeit, Wärmeerzeugung oder Materialschädigung (Rissbildung, Verformung).

Anhand dieser Kenngrößen kann für jeden Versuchstyp aufgeschlüsselt werden, wie Materialermüdung und plastische Verformung zur inkrementellen Materialschädigung und zum Materialversagen beitragen. Dabei spielt es a priori keine Rolle, ob die Zielsetzung der Laborprüfung eine Bewertung des Verformungs- oder des Ermüdungsverhaltens ist.

Es wird angeregt, zukünftige Untersuchungen zur labortechnischen Ansprache des Asphaltverhaltens verstärkt auf das anisotrope Strukturverhalten von Asphalt zu richten. Es sind neue Stoffkenngrößen zu identifizieren, die für die Interpretation des Asphaltverhaltens in Abhängigkeit der Beanspruchungsrichtung genutzt werden können.

Anhand der neu identifizierten Auswertung gelingt es, die in ihrer Prüfgeometrie unterschiedlichen Prüfverfahren hinsichtlich der während der zyklisch-dynamischen Belastung auftretenden Materialveränderungen vergleichend zu bewerten.

Zusammenfassend wird festgehalten:

Das Herstellungs- und das Gewinnungsverfahren von Asphaltprobekörpern aus Asphaltplatten hat jeweils einen großen Einfluss auf das Versuchsergebnis aus zyklisch-dynamischen Laborversuchen. Insbesondere für Triaxialversuche ist es zwingend notwendig, schlanke Probekörper in vertikaler Richtung aus dicken Asphaltplatten auszubohren. In der Arbeit wird für die Laborverdichtung mit dem Walzsektor-Verdichtungsgerät und unter Anwendung eines kombinierten weg-kraftgeregelten Verdichtungsregimes ein Laborverfahren erläutert, das die Herstellung von entsprechend dicken und ausreichend homogenen Asphaltplatten ermöglicht.

Bei zyklisch-dynamischen Laborprüfungen können unter Auswertung der dissipierten Energie und der Lissajous-Figuren unterschiedliche Arten der inkrementellen Schädigung identifiziert und quantifiziert werden: Materialermüdung, plastische Zugverformung und plastische Druckverformung.

Bei Laborprüfverfahren mit Lastpausen zwischen den Lastimpulsen wird die Energiedissipation durch viskose Rückstellung und innere Fließvorgänge im Material während den Lastpausen überlagert und verringert damit die Aussagekraft der energiebasierten Auswertung. Dann gelingt es – insbesondere zur Bewertung des Verformungsverhaltens – im Rahmen der Versuchsauswertung nicht, die unterschiedlichen Verformungsanteile zu isolieren und das Materialverhalten technisch sauber zu beschreiben. Daher ist im Sinne einer klar definierten Materialansprache im Laborversuch die sinusförmige Beanspruchungskurve gegenüber einer Kurve aus Lastimpulsen mit dazwischen liegenden Lastpausen zu bevorzugen.

Der Druck-Schwellversuch mit radialem Stützdruck (Triaxialversuch) ist nach wie vor das aussagekräftigste Laborprüfverfahren zur Bewertung des Druckverformungsverhaltens von Walzasphalten unter zyklischer Beanspruchung. Er ermöglicht eine realitätsnahe Simulation jenes Hauptspannungszustandes, der in der Straße bei Radüberfahrt entsteht. Das Prüfergebnis kann für die Erstellung von Stoffgesetzen genutzt werden. Im Spaltzug-Schwellversuch kommt es im Versuchsverlauf – neben Effekten der Materialermüdung – zu dominanten plastischen Zugdeformationen, die allmählich zum Versagen des Probekörpers führen. Somit ist dieser Versuchstyp gut geeignet für eine Bewertung des Verformungsverhaltens unter Zugbeanspruchung.

Es wurde überprüft, ob – trotz der Anisotropie des Baustoffs Asphalt – das Verformungsverhalten unter Zugbeanspruchung mit dem Verformungsverhalten unter Druckbeanspruchung korreliert. Eine Korrelation könnte vorteilhaft genutzt werden, um Ermüdungsversuche mit ausreichend großer Zugdeformation zur qualitativen Bewertung der allgemeinen Verformungsstabilität des geprüften Asphalts heranziehen zu können. Allerdings konnte eindeutig nachgewiesen werden, dass keine ausreichende Korrelation besteht, die Betrachtung der Zugdeformation allein keinen ausreichend genauen Hinweis auf die Verformungsanfälligkeit des Materials gibt und somit der Spaltzug-Schwellversuch nicht als alternativer Verformungsversuch für das Druckverhalten herangezogen werden kann.

Wie auch aus früheren Untersuchungen bekannt ist, korrelieren die Ergebnisse aus Triaxialversuchen mit jenen aus Stempel Eindringversuchen. Das Materialverhalten, das sich bei beiden Versuchstypen einstellt, ist qualitativ vergleichbar, wie anhand der Auswertung der jeweils dissipierten Energie nachgewiesen wurde. Es konnte gezeigt werden, dass sich der Stempel Eindringversuch mit Stützring gut eignet für eine grundsätzliche Bewertung der Verformungsneigung von Walzasphalten und zur Vorauswahl von technisch ähnlichen Varianten herangezogen werden kann. Es konnte ferner gezeigt werden, dass der Stützring aus Metall, der den Asphaltprobekörper vollständig umschließt, vorteilhaft ist und zu plausibleren Prüfergebnissen führt als ohne Verwendung eines Stützringes, weil der Stützring störende horizontale Zugdeformationen verringert. Nachteilig gegenüber dem Triaxialversuch ist die Pressung des Stempels auf eine vergleichsweise kleinere Fläche, wodurch es zu einer abweichenden Anfangsphase der Verformungskurve mit großen plastischen Verformungen kommen kann.

Aufbauend auf diesen Ergebnissen wird für Routineprüfungen der Stempel Eindringversuch mit Stützring als ein zum Triaxialversuch alternatives Prüfverfahren zur Ansprache des Verformungswiderstandes von Walzasphalten empfohlen.

Literatur

- ARAND, W. & RENKEN, P. (1990): Entwicklung eines im Labor anwendbaren Verdichtungsverfahrens, durch welches Walzasphalten dieselben mechanischen Eigenschaften wie bei der Walzverdichtung in der Praxis vermittelt werden. Schlussbericht, FE 07.123G86I, i. A. des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Institut für Straßenwesen, Technische Universität Braunschweig
- ARAND, W. & RENKEN, P. (1999): Labor-Walzverdichtungs-Gerät zur Herstellung verdichteter Asphaltproben mit praxisadäquaten mechanischen Eigenschaften. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 771, Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Bonn
- ARAND, W. & von der DECKEN, S. (1996): Pilotphase Qualitätssicherung in der Querschnittsforschung; Qualitätsplanung im Asphaltstraßenbau – behandelt am Beispiel des Verformungswiderstandes. Schlussbericht, Q27, i. A. der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen Otto von Guericke e. V. (AIF), Institut für Straßenwesen, Technische Universität, Braunschweig
- di BENEDETTO, H. (2013): Fatigue and other phenomena during cyclic loading of bituminous materials. Keynote, 5th Int. Conf. of the European Asphalt Technology Association (EATA), June 4th, 2013, Braunschweig, Germany
- DIN EN 12697-25 (2005): Prüfverfahren für Heißasphalt – Teil 25: Druckschwellversuch. Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth Verlag GmbH, Berlin
- FGSV (2010): TP Asphalt-StB, Teil 25 B 1. Einaxialer Druckschwellversuch – Bestimmung der Verformungsverhaltens von Walzasphalt bei Wärme. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln
- FGSV (2010): TP Asphalt-StB, Teil 25 A 2. Dynamischer Stempel Eindringversuch an Walzasphalt. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln
- FGSV (2009): AL Sp-Asphalt 09. Arbeitsanleitung zur Bestimmung des Steifigkeits- und Ermüdungsverhaltens von Asphalten mit dem Spalt-

- Zugschwellversuch als Eingangsgröße in die Dimensionierung. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln
- FGSV (2007): TP Asphalt-StB, Teil 33. Herstellung von Asphalt-Probepplatten in Labor mit dem Walzsektor-Verdichtungsgerät (WSV). Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln
- HÖFLINGER, G. (2006): Untersuchungen zur Probekörperherstellung von Walzasphalten mit dem Walzsegmentverdichter. Diplomarbeit, Institut für Straßenbau und Straßenerhaltung, Technische Universität Wien
- HOPMAN, P.; KUNST, P. & PRONK, A. (1989): A Renewed Interpretation Model for Fatigue Measurement. Verification of Miner's Rule. 4th Eurobitumen Symposium, October 4th, 1989, Madrid
- LEUTNER, R.; RENKEN, P.; BÜCHLER, S. & LOBACH, T. (2003): Überprüfung der Eignung des dynamischen Stempel Eindringversuches zur Beurteilung der Verformungseigenschaften von Asphalt und Schaffung eines Bewertungshintergrundes. Schlussbericht, Nr. 12522N, i. A. der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen Otto von Guericke e. V. (AIF), Institut für Straßenwesen, Technische Universität Braunschweig
- MOLLENHAUER, K.; WISTUBA, M. & RENKEN, P. (2011): Verfahren zur Bestimmung der Ermüdungseigenschaften von Asphalt unter Berücksichtigung der Europäischen Normung – Schaffung eines Bewertungshintergrundes. Schlussbericht, Forschungsprojekt FE 07.0214/2006/EGB i. A. des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Institut für Straßenwesen, Technische Universität Braunschweig
- OESER, M. (2004): Numerische Simulation des nichtlinearen Verhaltens flexibler mehrschichtiger Verkehrswegebefestigungen. Veröffentlichungen des Lehrstuhls für Statik, Heft 7, Technische Universität Dresden
- RENKEN, P. (2002): Verdichtung von Walzasphalt im Laboratorium und im Felde. Schriftenreihe Straßenwesen, Heft 18, Institut für Straßenwesen, Technische Universität Braunschweig
- RENKEN, P. & BÜCHLER, S. (2004): Optimierung der Prüfmodalitäten des Triaxialversuchs mit schwellendem Stützdruck zur praxisadäquaten Bewertung des Verformungswiderstandes von Asphalt. Schlussbericht, FE 07.190/2000EGB, i. A. des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Institut für Straßenwesen, Technische Universität Braunschweig
- RINGLEB, A. & HERZBERG, B. (2012): Einfluss der Walzsektor-Verdichtung auf Ergebnisse des Triaxialen Druck-Schwellversuchs/Einfluss der Mischgutherstellung im Labor auf die resultierenden Asphalteigenschaften. Schriftenreihe Straßenwesen, Heft 25, Institut für Straßenwesen, Technische Universität Braunschweig
- SHIHUI, S. & CARPENTER, S. (2007): Dissipated Energy Concepts for HMA performance: Fatigue and Healing. Final Report, University of Illinois, Urbana-Champaign, USA
- SCHINDLER, K. (2008): Untersuchung des Verformungsverhaltens von Asphalt zur Bestimmung von Materialkennwerten für die Dimensionierung. Dissertation, Institut für Straßenwesen, Technische Universität Braunschweig
- WELLNER, F. (2007): Nachhaltiger Straßenbau – Bemessungsmodell zur Förderung der Innovations- und Wettbewerbsfähigkeit kleiner und mittelständischer Straßenbauunternehmen. Schlussbericht, i. A. der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), Technische Universität Dresden
- WISTUBA, M.; MONISMITH, C.; BAHIA, H. U.; RENKEN, P.; OLARD, F.; BLAB, R.; MOLLENHAUER, K.; METZKER, K.; BÜCHLER, S.; GRÖNNIGER, J.; ZENG, M.; NAM, K. (2009): Asphaltverhalten bei tiefen Temperaturen/ Asphalt material behaviour at low temperatures. Schriftenreihe Straßenwesen, Heft 23, Institut für Straßenwesen, Technische Universität Braunschweig
- WISTUBA, M.; ALISOV, A. & ISAILOVIĆ, I. (2013): Ansprache und Steuerung von Healing-Effekten bei Asphalt. Schlussbericht, FE 07.0251/2011/ERB, i. A. des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Institut für Straßenwesen, Technische Universität Braunschweig

Bilder

- Bild 1: Räumlicher Spannungszustand in Asphaltbefestigungen und Übertragung auf den Triaxialversuch (WELLNER et al., 2007)
- Bild 2: Spannungs- und Dehnungsdiagramm als Funktion der Zeit: Die resultierende Dehnung läuft der aufgebracht konstanten Spannung zeitlich hinterher
- Bild 3: Einaxialer Zug-Druck-Versuch bzw. Biegeversuch an einem Asphaltprobekörper (Prinzipskizze)
- Bild 4: Verlauf des E-Moduls im Ermüdungsversuch (schematisch); Lastwechselzahl $N_{f/50}$ bei Erreichen eines E-Modul-Abfalls um 50 % (Ermüdungskriterium)
- Bild 5: Darstellung von einem Belastungszyklus in Spannungs-Dehnungsdiagramm bei einem ideal elastischen Material (links) und bei einem visko-elastischen Material wie Asphalt (rechts)
- Bild 6: Interpretation von kraftgeregelten Ermüdungsprüfungen (links) und zyklisch-dynamischen Verformungsprüfungen (rechts): Lissajous-Figuren jeweils für einen Lastwechsel am Versuchsbeginn (Lw: Anfang) und am Versuchsende (Lw: Ende) (schematisch) (vgl. di BENEDETTO, 2013)
- Bild 7: Kraftgeregelte Spaltzug-Schwellversuch und Zug-Schwellprüfung an Asphaltbeton AC 11 D S bei einer Prüftemperatur von $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$: Darstellung von Lissajous-Figuren am Anfang der Belastungsphase (100. Lastwechsel) und bei zunehmenden Lastwechselzahlen bis zum Erreichen des Ermüdungskriteriums (WISTUBA et al., 2013)
- Bild 8: Skizze und Abmessungen des Walzsektor-Verdichtungsgerätes (FGSV 2007)
- Bild 9: Plattenhöhe und aufgebrachte Kraft während der Verdichtung im Walzsektor-Verdichtungsgerät: weggeregelte Vorverdichtung, kraftgeregelte Hauptverdichtung
- Bild 10: Walzsektor-Verdichtungsgerät zur Herstellung großformatiger Asphalt-Probepplatten ($500 \times 700 \times 300 \text{ mm}^3$)
- Bild 11: Kraft-Weg-Verlauf bei weggeregelter Verdichtung mit einer Vorschubgeschwindigkeit von $s = 0,3 \text{ mm/Übergang}$
- Bild 12: Entnahme-Schema der Bohrkernscheiben zur Überprüfung der Verdichtungs-Homogenität mittels Raumdichtebestimmung
- Bild 13: Dichteverteilung innerhalb einer Asphaltprobeplatte, die mittels weggeregeltem Verdichtungsregimes hergestellt wurde
- Bild 14: Dichteverteilung innerhalb einer Asphaltprobeplatte, die mittels kombiniertem weg-kraftgeregeltem Verdichtungsregimes hergestellt wurde
- Bild 15: Bohrrichtungen für die Gewinnung von zylindrischen Probekörpern aus Asphaltplatten: Bohrrichtung 1 parallel zur Verdichtungskraft, Bohrrichtung 2 orthogonal zur Verdichtungskraft und in Verdichtungsrichtung, Bohrrichtung 3 orthogonal zur Verdichtungskraft und orthogonal zur Verdichtungsrichtung. Auswertung von Triaxialversuchen
- Bild 16: Ergebnisse der Triaxialversuche: Kriechkurven (gemittelt nach Dreifachbelegung)
- Bild 17: Stempeleindringversuch: Prüfvorrichtung (links) und Lastimpuls (rechts)
- Bild 18: Verformungsanteile bei einem Lastzyklus im Stempeleindringversuch (schematisch)
- Bild 19: Verlauf der Kriechkurve und der Dehnungsrate bei einem Stempeleindringversuch ohne Wendepunkt (Fall A) und mit Wendepunkt (Fall B)
- Bild 20: Stempeleindringversuch unter Verwendung eines Stützringes
- Bild 21: Ergebnisse der Finite-Elemente-Analyse: Stempeleindringversuch mit und ohne Verwendung eines Stützringes (Farblegende: Grün bis Blau = Druck; Gelb bis Rot = Zug; Achtung: veränderliche Werteskala)
- Bild 22: Prüfeinrichtung zur Durchführung eines Triaxialversuchs (Beispiel)
- Bild 23: Schematische Darstellung des räumlichen Spannungszustandes beim Triaxialversuch

- Bild 24: Ergebnis eines Triaxialversuchs mit schwellendem Stützdruck (schematisch)
- Bild 25: Spannungszustand im zylindrischen Probekörper während eines Spaltzug-Schwellversuchs: Rot: Zugspannung; Blau: Druckspannung; Orange: keine Spannungsbeanspruchung (vgl. OESER, 2004)
- Bild 26: Prüfeinsatz für Spaltzug-Schwellversuch und Belastungsschema
- Bild 27: Verformungsanteile bei einem Lastzyklus im Spaltzug-Schwellversuch (schematisch)
- Bild 28: Exemplarischer Verlauf des absoluten E-Moduls und Verlauf der Energy Ratio (ER) während eines kraftgeregelten Spaltzug-Schwellversuchs
- Bild 29: Spaltzug-Schwellversuch: Exemplarische Darstellung der Lissajous-Figuren beim 100. Lastwechsel und bei N_{Makro} (Ermüdungskriterium)
- Bild 30: Spaltzug-Schwellversuch: Typischer Verlauf der plastischen Zugdehnungen über die Lastwechselzahl.
- Bild 31: Labormischer mit Gegenlaufzwangsprinzip
- Bild 32: Kriechkurven aus dem Triaxialversuch für die Asphaltart AC 16 B S (Dreifachbelegung)
- Bild 33: Kriechkurven aus dem Triaxialversuch für die Asphaltart SMA 11 S (Zweifachbelegung)
- Bild 34: Kriechkurven aus dem Triaxialversuch für die Asphaltart PA 8 (Zweifachbelegung)
- Bild 35: Kriechkurven aus dem Triaxialversuch für die Asphaltart AC 11 D S (Dreifachbelegung)
- Bild 36: Kriechkurven aus dem Stempelndringversuch mit Stützring für die Asphaltart AC 16 B S (Zweifachbelegung)
- Bild 37: Kriechkurven aus dem Stempelndringversuch mit Stützring für die Asphaltart SMA 11 S (Dreifachbelegung)
- Bild 38: Kriechkurven aus dem Stempelndringversuch mit Stützring für die Asphaltart PA 8 (Dreifachbelegung)
- Bild 39: Kriechkurven aus dem Stempelndringversuch mit Stützring für die Asphaltart AC 11 D S (Zweifachbelegung)
- Bild 40: Kriechkurven aus dem Stempelndringversuch mit Stützring für die Asphaltart AC 32 T N (Zweifachbelegung)
- Bild 41: Kriechkurven aus dem Stempelndringversuch mit Stützring für die Asphaltart AC 32 T S (Zweifachbelegung)
- Bild 42: Kriechkurven aus dem Stempelndringversuch mit Stützring für die Asphaltart SMA 11 S (Zweifachbelegung)
- Bild 43: Kriechkurven aus dem Stempelndringversuch mit Stützring für die Asphaltart AC 11 D S (Zweifachbelegung)
- Bild 44: Kriechkurven aus dem Stempelndringversuch ohne Stützring für die Asphaltart AC 32 T N (Zweifachbelegung)
- Bild 45: Kriechkurven aus dem Stempelndringversuch ohne Stützring für die Asphaltart AC 32 T S (Zweifachbelegung)
- Bild 46: Verlauf des E-Moduls und Energy Ratio bei einem Spaltzug-Schwellversuch, durchgeführt an der Asphaltart SMA 11 S
- Bild 47: Verlauf der plastischen Zugverformungen bei einem Spaltzug-Schwellversuch, durchgeführt an der Asphaltart SMA 11 S
- Bild 48: Akkumulierte plastische Zugdehnungen als Funktion der Lastwechselzahl N_{Makro} an der Asphaltart SMA 11 S
- Bild 49: Triaxialversuch: Akkumulierte plastische Druckdehnungen als Funktion der Belastungszyklen, durchgeführt an der Asphaltart AC 22 T S
- Bild 50: Energiedissipation als Funktion der Belastungszyklen für den in Bild 49 dargestellten Triaxialversuch
- Bild 51: Lissajous-Figuren nach 500 Belastungszyklen und nach 20.000 Belastungszyklen für den in Bild 49 dargestellten Triaxialversuch
- Bild 52: Stempelndringversuch mit Stützring: Akkumulierte plastische Druckdehnungen als Funktion der Belastungszyklen, durchgeführt an der Asphaltart AC 32 T N

- Bild 53: Deformation der Lissajous-Figur nach 100 Belastungszyklen (oben) und nach 10.000 Belastungszyklen (unten) für den in Bild 52 dargestellten Stempeleindringversuch mit Stützring
- Bild 54: Spaltzug-Schwellversuch: Verlauf des E-Moduls und Energy Ratio, durchgeführt an der Asphaltart SMA 11 S
- Bild 55: Energiedissipation als Funktion der Belastungszyklen für den in Bild 54 dargestellten Spaltzug-Schwellversuch
- Bild 56: Spaltzug-Schwellversuch durchgeführt an der Asphaltart SMA 11 S: Lissajous-Figuren beim 100. Lastwechsel und bei der Lastwechselzahl N_{Makro}
- Bild 57: Kriechkurven aus Triaxialversuchen und Stempeleindringversuchen mit Stützring bis 10.000 Lastwechsel für Asphaltart SMA 11 S
- Bild 58: Darstellung der relativen Verhältnisse der berücksichtigten Asphaltvarianten zur Asphaltbindervariante beim Triaxialversuch (nach 10.000 Lastwechseln) und beim Stempeleindringversuch mit Stützring (nach 10.000 Lastwechseln)
- Bild 59: Stempeleindringversuch mit Stützring ohne Lastpausen: Akkumulierte plastische Druckdehnungen als Funktion der Belastungszyklen, durchgeführt an der Asphaltart AC 32 T S
- Bild 60: Energiedissipation als Funktion der Belastungszyklen für den in Bild 59 dargestellten Stempeleindringversuch
- Bild 61: Lissajous-Figuren nach 300 Belastungszyklen und nach 10.000 Belastungszyklen für den in Bild 59 dargestellten Stempeleindringversuch
- Bild 62: Überlagerung der (gemittelten) Kriechkurven aus Stempeleindringversuchen mit und ohne Stützring für die Asphaltart AC 32 T N
- Bild 63: Überlagerung der (gemittelten) Kriechkurven aus Stempeleindringversuchen mit und ohne Stützring für die Asphaltart AC 32 T S

- Bild 64: Spaltzug-Schwellversuch: Akkumulierte plastische Zugdehnungen in Abhängigkeit der Lastwechselzahl N_{Makro}
- Bild 65: Spaltzug-Schwellversuch: Akkumulierte plastische Zugdehnungen nach 10.000 Lastwechseln
- Bild 66: Darstellung der relativen Verhältnisse der berücksichtigten Asphaltvarianten zur Asphalttragschichtvariante beim Spaltzug-Schwellversuch (bei $N_{\text{Makro}} = 10.000$ Lastwechsel) und beim Stempeleindringversuch (nach 10.000 Lastwechseln)

Tabellen

- Tab. 1: Parameterstudie bei kombinierter wegkraftgeregelter Verdichtung
- Tab. 2: Optimierte Parameter für eine kombinierte kraft-/weggeregelte Verdichtung
- Tab. 3: Prüfbedingungen für die Triaxialversuche
- Tab. 4: Ergebnisse der Triaxialversuche: axiale Dehnungen beim 10.000sten Lastwechsel ($\epsilon_{\text{axial},10.000}$) und Dehnungsraten (f_c)
- Tab. 5: Eigenschaften des eingesetzten Straßenbaubitumen 30/45
- Tab. 6: Eigenschaften des eingesetzten Straßenbaubitumen 50/70
- Tab. 7: Eigenschaften des eingesetzten polymermodifizierten Bitumen 25/55-55A
- Tab. 8: Eigenschaften des eingesetzten polymermodifizierten Bitumen 40/100-65A
- Tab. 9: Zusammensetzung und Eigenschaften der berücksichtigten Asphaltvarianten
- Tab. 10: Versuchsbedingungen für die Triaxialversuche
- Tab. 11: Versuchsbedingungen für die Stempeleindringversuche
- Tab. 12: Versuchsbedingungen für die Spaltzug-Schwellversuche
- Tab. 13: Ergebnisse der Triaxialversuche (nach 10.000 und 150.000 Belastungszyklen)

-
- Tab. 14: Ergebnisse der Stempel Eindringversuche mit Stützring
- Tab. 15: Ergänzende Ergebnisse der Stempel Eindringversuche mit Stützring an den Asphaltarten SMA 11 S und AC 11 D S
- Tab. 16: Ergebnisse der Stempel Eindringversuche ohne Stützring an den Asphaltarten AC 32 T N und AC 32 T S
- Tab. 17: Prüfergebnisse aus Spaltzug-Schwellversuchen an der Asphaltart SMA 11 S
- Tab. 18: Prüfergebnisse aus Spaltzug-Schwellversuchen an der Asphaltart AC 11 D S
- Tab. 19: Prüfergebnisse aus Spaltzug-Schwellversuchen an der Asphaltart AC 32 T N
- Tab. 20: Prüfergebnisse aus Spaltzug-Schwellversuchen an der Asphaltart AC 32 T S
- Tab. 21: Vergleich der Ergebnisparameter aus Triaxialversuchen und Stempel Eindringversuchen mit Stützring
- Tab. 22: Ergebnisse aus den Stempel Eindringversuchen mit und ohne Stützring an den Asphaltarten AC 32 T N und AC 32 T S
- Tab. 23: Vergleich der Ergebnisse aus den Spaltzug-Schwellversuchen und aus den Stempel Eindringversuchen mit Stützring an den Asphaltarten AC 32 T S, AC 32 T N, AC 11 D S und SMA 11 S

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Straßenbau“

2011

S 68: Lärmindernder Splittmastixasphalt
Ripke

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 69: Untersuchung der Messunsicherheit und der Klassifizierungsfähigkeit von Straßenbelägen
Müller, Wasser, Germann, Kley € 14,50

S 70: Erprobungsstrecke mit Tragschichten ohne Bindemittel aus ziegelreichen RC-Baustoffen
Dieser Bericht liegt außerdem in digitaler Form vor und kann unter http://bast.opus.hbz-nrw.de heruntergeladen werden.
Jansen, Kurz € 16,00

S 71: Enteignung für den Straßenbau – Verfahrensvereinheitlichung – Privatisierung – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises „Straßenrecht“ im September 2010 in Bonn € 15,00

S 72: Griffigkeitsprognose an offenporigen Asphalten – Teil 2: Neue Baumaßnahmen
Jansen, Pöppel-Decker € 15,00

S 73: Längsebenenheitsauswerteverfahren „Bewertetes Längsprofil“ – Weiterentwicklung der Längsebenenheitsbewertung der Zustandserfassung und -bewertung
Maerschalk, Ueckermann, Heller € 18,50

2012

S 74: Verbundprojekt „Leiser Straßenverkehr 2“ – Reduzierte Reifen-Fahrbahn-Geräusche
Projektgruppe „Leiser Straßenverkehr 2“ € 30,50

S 75: Abschätzung der Risiken von Hang- und Böschungsrutschungen durch die Zunahme von Extremwetterereignissen
Krauter, Kumerics, Feuerbach, Lauterbach € 15,50

S 76: 42. Erfahrungsaustausch über Erdarbeiten im Straßenbau
Maerschalk, Ueckermann, Heller € 18,50

S 77: Netzplanung – Netzbildung – Netzbereinigung
Durner € 16,50

S 78: Untersuchung des Einflusses der Grobtextur auf Messergebnisse mit dem SKM-Verfahren
Bürckert, Gauterin, Unrau € 16,50

2013

S 79: Gussasphalt ohne Abstreuerung
Ripke € 9,00

S 80: Entwicklung einer neuen Versuchstechnik zur Bestimmung der Grenze zwischen halbfestem und festem Boden
Vogt, Birle, Heyer, Etz € 17,50

S 81: Das straßenrechtliche Nutzungsregime im Umbruch – Aktuelle Fragen des Planungsrechts
Durner € 15,00

2014

S 82: Qualitätskontrolle PWS – Wehner/Schulze Quality Control
Teil 1: Auswertung der Kenndaten der PWS Prüfung
Teil 2: Auswertung von Vergleichsuntersuchungen zur Prüfung der Poliereinheit mittels Schleifpapier

Jansen

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 83: Die Stellung der Gemeinden im Straßenrecht – aktuelle Probleme des Umweltrechts – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises „Straßenrecht“ am 23./24. September 2013 in Bonn
Durner € 17,00

S 84: Anforderungen an die Erhaltung von Radwegen
Maerschalk, Oertelt € 19,00

S 85: Kornformbeurteilung mit dem optischen Partikelmessgerät Camsizer®
Kunz

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2015

S 86: Einfluss des Asphaltgranulates auf die bemessungs- und ermüdungsrelevanten Materialeigenschaften einer zwangsgebundenen, kaltgebundenen und bitumendominanten Tragschicht
Radenberg, Miljković, Schäfer

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 87: Untersuchungen zur Ermittlung von Präzisionswerten für zwei AKR-Schnelltests Durchführung und Auswertung
Müller, Seidel, Böhm

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 88: Verwendung von AKR-geschädigtem Betonaufbruch für hydraulisch gebundene Tragschichten
Hüniger, Börner

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 89: Ermittlung von repräsentativen Substanzwerten in homogenen Abschnitten
Villaret, Frohböse, Jähmig, Karcher, Niessen, Buch, Zander

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 90: AKR-Untersuchungen für Fahrbahndecken aus Beton mit Waschbetonoberfläche
Müller, Seidel, Böhm, Stark, Ludwig, Seyfarth

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 91: Straßen im Gesamtsystem der Verkehrsträger
Durner

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 92: Längsebenenheitsmesssysteme – Überprüfung der Signalverarbeitungsverfahren nach dem Prinzip der Mehrfachabtastung (HRM)
Neubeck, Wiesebrock

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2016

S 93: Bewertung und Optimierung der Hydrophobierung zur Verminderung des AKR-Schädigungsfortschrittes in Fahrbahndeckenbetonen
Weise, Schrang € 19,50

S 94: Beanspruchung und Entfernbarkeit temporärer Fahrbahnmarkierung
Kemper, Schacht, Klapproth, Oeser, Beyer € 16,50

S 95: Bezugsgröße für den Verdichtungsgrad von Schichten ohne Bindemittel
Bialucha, Merkel, Motz, Demond, Schmidt, Ritter, Haas € 14,50

S 96: Bewertungshintergrund für den Widerstand gegen Polieren von Gesteinskörnungen nach dem PWS-Verfahren
Dudenhöfer, Rückert
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 97: Einheitliche Bewertungs- kriterien für Elemente der Straßenverkehrsinfrastruktur im Hinblick auf Nachhaltigkeit – Straße und Tunnel
Fischer, Sauer, Jungwirth, Baumgärtner, Hess, Ditter, Roth, Xalter
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 98: Verifikation eines Europäischen Prüfverfahrens zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit von Asphalt
Böhm, Beara
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 99: Ansprache und Steuerung von Healing-Effekten bei Asphalt
Wistuba, Alisov, Isailović
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 100: Probekörperherstellung für performance-basierte Asphaltprüfungen
R. Roos, C. Karcher, A. Wittenberg
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 101: Belastungseinrichtung Mobile Load Simulator MLS10 Sensorik zur Beanspruchungsdetektion im ersten gemeinsamen Versuchsbetrieb
Wacker, Scherckenbach, Rabe, Golkowski
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 102: Effizienz technischer Sicherungsmaßnahmen im Erdbau – Lysimeteruntersuchungen unter Laborbedingungen – Teil 1: Bodenmaterial
Kellermann-Kinner, Bürger, Marks € 16,50

S 103: Effizienz technischer Sicherungsmaßnahmen im Erdbau – Untersuchungen von Bauweisen in Freilandlysimetern – Teil 1: Untersuchungszeitraum 2010 - 2013
Brand, Tiffert, Endres, Schnell, Marks, Kocher € 19,50

S 104: Nachhaltige und effiziente Sanierung von Schlaglöchern
Thienert, Beckedahl, Koppers, Paffrath, Nafe € 15,00

2017

S 105: Untersuchungen zur Überprüfung des Luftporenanteils als Verdichtungsanforderung bei feinkörnigen Böden und bindigen Mischböden
Lypp, Birle, Heyer, Vogt € 20,50

S 106: Zusammenhang zwischen Bitumenchemie und straßenbautechnischen Eigenschaften
Radenberg, Nytus, Gehrke
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 107: Baustoffe für standfeste Bankette
Koukoulidou, Birle, Heyer € 15,50

S 108: Neue Wege zur Finanzierung des Straßenbaus – Entwicklungen des europäischen Umweltrechts – Referate eines For-

schungsseminars des Arbeitskreises „Straßenrecht“ am 21./22. September 2015 in Bonn
Durner

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 109: RIVA – Risikoanalyse wichtiger Verkehrsachsen des Bundesfernstraßennetzes im Kontext des Klimawandels
Korn, Leupold, Mayer, Kreienkamp, Spekat € 15,50

S 110: Vergleichbarkeit der Auslaugraten von Materialien mit und ohne Sandzumischung nach dem Säulenkurzverfahren (DIN 19528)
Lin, Linnemann, Vollpracht € 16,50

S 111: Bitumenextraktion aus Asphalt mit dem nachwachsenden Rohstoff Octansäuremethylester(Kokosester)
Alisov, Wistuba
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 112: Nachweis der flächendeckenden Verdichtungskontrolle von Asphalt
Zander, Buch, Birbaum
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 113: Einfluss der Temperatur auf die Probekörperherstellung bei Niedrigtemperaturgussasphalt im Rahmen der Kontrollprüfungen
Schellenberg
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 114: Studie zum Anwendungspotenzial von werksgemischten Kaltbauweisen – Asphalt
Mollenhauer
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2018

S 115: Performance-orientierte Asphaltspezifikation – Entwicklung eines praxisgerechten Prüfverfahrens zur Ansprache des Verformungswiderstandes
Wistuba, Isailović
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

Fordern Sie auch unser kostenloses Gesamtverzeichnis aller lieferbaren Titel an! Dieses sowie alle Titel der Schriftenreihe können Sie unter der folgenden Adresse bestellen:

Fachverlag NW in der Carl Schünemann Verlag GmbH
Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen
Tel. +(0)421/3 69 03-53 · Fax +(0)421/3 69 03-63

Alternativ können Sie alle lieferbaren Titel auch auf unserer Website finden und bestellen.

www.schuenemann-verlag.de