

Ansprache und Steuerung von Healing-Effekten bei Asphalt

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Straßenbau Heft S 99

bast

Ansprache und Steuerung von Healing-Effekten bei Asphalt

von

Michael P. Wistuba
Alexander Alisov
Ivan Isailović

Technische Universität Braunschweig
Institut für Straßenwesen (ISBS)

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Straßenbau Heft S 99

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-Nr. 07.0251/2011/ERB:
Ansprache und Steuerung von Healing-Effekten bei Asphalt

Fachbetreuung
Franz Bommert

Herausgeber
Bundesanstalt für Straßenwesen
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach
Telefon: (0 22 04) 43 - 0
Telefax: (0 22 04) 43 - 674

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 978-3-95606-258-2

Bergisch Gladbach, November 2016

Kurzfassung – Abstract

Ansprache und Steuerung von Healing-Effekten bei Asphalt

Der Straßenbaustoff Asphalt ist unter bestimmten Voraussetzungen in der Lage, während Erholungsphasen eine bereits eingetretene Strukturschädigung selbsttätig zum Teil oder vollständig zurückzubilden und so eine Regeneration des Baustoffs zu bewirken. Man spricht von Selbstheilungs- oder Healing-Eigenschaften. Für eine Steigerung der Dauerhaftigkeit von Straßenbauasphalten wäre es von großem Nutzen, die Healing-Eigenschaften kontrollieren bzw. stimulieren zu können.

Eine systematische Untersuchung der Healing-Eigenschaften von Bitumen und Asphalt sowie geeignete Verfahren zu ihrer prüftechnischen Ansprache waren bisher nicht bekannt. Ziel des Forschungsprojekts war es, zu klären, ob und mit welchen Prüf- und Auswertemethoden die Healing-Eigenschaften von Straßenbauasphalten im Labor angesprochen werden können.

Mit dieser Arbeit werden erstmals Ergebnisse aus systematisch variierten Reihenuntersuchungen zu den Selbstheilungskräften von Bitumen und Asphalt vorgestellt. Es wurden statische und zyklisch-dynamische Laborprüfungen mit Lastpausen (Erholungsphasen) zwischen den Belastungszyklen eingesetzt.

Zur Ansprache von Healing-Eigenschaften erwiesen sich auf Asphaltebene kraftgeregelte Zug-Druck-Wechselastprüfungen und auf Bitumenebene kraftgeregelte DSR-Ermüdungsprüfungen jeweils mit Lastpause als gut geeignet. Es wurde eine Auswertemethodik entwickelt und neue Healing-Indices eingeführt, die eine Beurteilung des Healing-Verhaltens an einem einzigen Probekörper nach Durchführung einer Ermüdungsprüfung erlauben.

Die materialspezifischen Healing-Eigenschaften könnten bei der rechnerischen Dimensionierung vorteilhaft berücksichtigt werden. Dazu wird ein Konzept vorgestellt, nach dem die im Rahmen von Dimensionierungen notwendigen Ermüdungsprüfungen mit Untersuchungen zum Healing-Verhalten zu ergänzen sind. Folglich kann ein modifiziertes Materialgesetz verwendet werden, welches auch die materialspezifischen Healing-Eigenschaften abbildet.

Designation and regulation of asphalt healing

As an asphalt pavement is not constantly exposed to traffic, there is a possibility for regeneration of the existing damage. This regeneration is defined as the materials self-recovery capability or material healing, which depends on certain loading or environmental conditions. For an increased durability of asphalt structures it would be of the great use to control and stimulate the healing properties.

Healing properties of bitumen and hot mix asphalt (HMA) have been investigated by many researchers, but an appropriate healing procedure and testing composition have not been found. The objective of this research was to determine whether and by what evaluation method, the healing properties of HMA and bitumen can be addressed.

Within this work, a comprehensive healing investigation was conducted under systematical variation of tests parameters and material composition. In order to determine healing capacity of binder and HMA, static and cyclic continuous and discontinuous fatigue tests were performed.

As a result, a new healing approach with a new healing index was introduced, which relies on both continuous and with one rest period intermittent fatigue tests. It allows precise evaluation of the healing properties, excluding a material-related scatter from continuous tests. For that purpose an uniaxial stress controlled tension-compression test was employed for HMA healing evaluation and DSR fatigue test for bitumen healing evaluation.

The developed procedure represents a good tool for the healing evaluation and it can be successfully used for further pre-selection of pavement materials in order to achieve optimal pavement lifespan.

Inhalt

Vorwort	7	5.1.2 Healing-Prüfungen mittels DSR	46
1 Ziel des Forschungsprojekts	7	5.1.3 Multi Stress Creep Recovery Test	54
2 Stand des Wissens	8	5.1.4 Einaxialer Zugversuch	61
2.1 Selbstheilung (Healing) von Asphalt ...	8	5.1.5 Chromatografische Analyse	62
2.2 Asphaltverhalten unter zyklisch- dynamischer Ermüdungs- beanspruchung	11	5.1.6 Spektroskopische Analyse	64
3 Vorgehensweise	15	5.2 Asphalt	73
3.1 Überblick	15	5.2.1 Ermüdungsverhalten in der Zug- Schwellprüfung	73
3.2 Prüfung von Bitumen	16	5.2.2 Ermüdungsverhalten in der Zug- Druck-Wechselastprüfung	76
3.2.1 Dynamic Shear Rheometer	16	5.2.3 Healing-Verhalten in der Zug- Schwellprüfung	79
3.2.2 Multiple Stress Creep and Recovery Test	17	5.2.4 Healing-Verhalten in der Zug-Druck- Wechselastprüfung	82
3.2.3 Einaxialer Zugversuch	17	5.2.5 Healing-Verhalten in der Spaltzug- Schwellprüfung	87
3.2.4 Chromatografische Analyse	19	5.2.6 Healing-Verhalten in der Vier-Punkt- Biegeprüfung	88
3.2.5 Spektroskopische Analyse	21	6 Bewertung der Prüfergebnisse	89
3.2.6 Ermüdungs-Healing-Prüfungen	23	6.1 Eignung der Prüfverfahren	89
3.3 Prüfung von Asphalt	24	6.1.1 Ansprache der Healing-Eigen- schaften von Bitumen	89
3.3.1 Mechanische Konfiguration des Prüfsystems	24	6.1.2 Ansprache der Healing-Eigen- schaften von Asphalt	91
3.3.2 Prüfverfahren und Prüf- bedingungen	27	6.2 Eignung der Healing-Indices	100
3.3.3 Ermüdungs-Healing-Prüfungen: Versuchstypen und Lastpausen- definitionen	29	6.3 Wahl der Prüfparameter	110
3.3.4 Definitionen der Healing-Indices	33	6.4 Healing-Verhalten geprüfter Baustoffe im Vergleich	111
4 Eingesetzte Baustoffe	36	6.4.1 Bitumen	111
4.1 Gestein	36	6.4.2 Asphalt	112
4.2 Bitumen	36	7 Berücksichtigung von Healing in der rechnerischen Dimensionierung	114
4.3 Asphalt	39	7.1 Rechnerische Dimensionierung gemäß Regelwerk	114
5 Prüfergebnisse	40	7.1.1 Vorgehensweise	114
5.1 Bitumen	40		
5.1.1 Ermüdungsprüfungen mittels DSR ...	40		

7.1.2	Ermittlung der Steifigkeits- und Ermüdungsfunktion.	115
7.2	Korrektur der Ermüdungsfunktion.	116
8	Zusammenfassung und Ausblick . . .	116
9	Literatur	119

Vorwort

In diesem Forschungsprojekt werden erstmals Ergebnisse aus systematisch variierten Reihenuntersuchungen zu den Selbstheilungskräften von Bitumen und Asphalten für den Straßenbau vorgestellt. Dabei wird, bei Anwendung gesicherter wissenschaftlicher Methoden, unter Laborbedingungen einwandfrei nachgewiesen, dass Bitumen und daraus hergestellte Baustoffe unter bestimmten Randbedingungen selbsttätig in der Lage sind, eine infolge von Beanspruchung eingetretene Schädigung zumindest teilweise wieder zurückzubilden, also zu heilen. Zur Ansprache der Selbstheilungskräfte von Bitumen und Asphalt werden im Rahmen der Arbeit gut geeignete Laborprüfungen mit den optimalen Prüfeinstellungen spezifiziert. Zur Bewertung der Prüfergebnisse werden neben herkömmlichen Auswerteparametern gänzlich neue, sehr aussagekräftige Healing-Indices vorgestellt.

Die vorliegenden Ergebnisse stellen eine erhebliche Wertschöpfung für die Wissenschaft dar. Sie sind gleichzeitig eine Herausforderung für die Zukunft, weil der Erkenntnisgewinn eine wichtige Grundlage für spätere neue technologische Entwicklungen ist. Dem Bundesministerium 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 Ziel des Forschungsprojekts

Manche Baustoffe sind unter bestimmten Voraussetzungen in der Lage, eine bereits eingetretene Strukturschädigung selbsttätig rückgängig zu machen und so eine Regeneration des Baustoffs zu bewirken. Man spricht von Selbstheilungs- oder Healing-Eigenschaften.

Es wird angenommen, dass der Baustoff Asphalt grundsätzlich solche Healing-Eigenschaften aufweist, worauf Publikationen außerhalb Deutschlands hinweisen. Seit rund 15 Jahren wird diese Asphalteeigenschaft international diskutiert. Man sucht nach geeigneten Verfahren zu ihrer prüftechnischen Ansprache. Eine systematische Untersuchung der Healing-Eigenschaften von Asphalt ist bisher nicht bekannt.

Für eine Steigerung der Dauerhaftigkeit von Straßenbauasphalten wäre es von großem Nutzen, die Healing-Eigenschaften gezielt zu kontrollieren bzw. zu stimulieren. Etwa könnten bestimmte Baustoffe und Baustoffkomponenten so ausgewählt werden, dass die Healing-Eigenschaften begünstigt werden. Daraus resultiert für das in der Folge behandelte Forschungsthema eine hohe wissenschaftliche, technische und wirtschaftliche Bedeutung.

Ziel des Forschungsprojekts ist es, zu klären, ob und mit welchen Prüf- und Auswertemethoden die Healing-Eigenschaften von Straßenbauasphalten im Labor systematisch angesprochen werden können. Dazu werden statische und zyklisch-dynamische Laborprüfungen mit Lastpausen zwischen den Belastungszyklen an ausgewählten Bitumen- und Asphaltproben eingesetzt. Mittels Reihenuntersuchungen werden die Prüfbedingungen, welche die Healing-Eigenschaften beeinflussen, bewertet. Anhand der Ergebnisse wird ein geeignetes Prüf- und Auswertekonzept für die Ansprache der Healing-Eigenschaften von Straßenbauasphalten definiert. Darüber hinaus wird ein Verfahren zur Berücksichtigung der materialspezifischen Healing-Eigenschaften im Rahmen der rechnerischen Dimensionierung konzipiert.

Vom Auftragnehmer wurde zu diesem Thema ein Forschungsantrag formuliert und der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen zur Aufnahme in das gemeinsame Förderprogramm des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung vorgeschlagen. Aufgrund der Aufforderung zur Angebotsabgabe wurde der Bundesanstalt für Straßenwesen am 29.08.2011

ein im Detail ausgearbeitetes Forschungsangebot zugeleitet. Daraufhin wurde mit Schreiben vom 23.11.2011 dem Institut für Straßenwesen der Technischen Universität Braunschweig unter der Leitung von Prof. Dr. Michael P. WISTUBA durch die Bundesanstalt für Straßenwesen in Vertretung für das BMVBW der Auftrag zur Durchführung des Forschungsprojekts FE 07.0251/2011/ERB erteilt.

2 Stand des Wissens

2.1 Selbstheilung (Healing) von Asphalt

Selbstheilung (Healing) von Asphalt ist die Fähigkeit des Baustoffs eine Schädigung während einer Lastpause selbsttätig zum Teil oder vollständig wieder zurückzubilden. Bei der Schädigung handelt es sich typischerweise um Mikrorisse, die in Folge von Materialermüdung entstanden sind (nicht Verformung).

Der Selbstheilungsmechanismus bzw. Healing-Effekt beruht auf einer Rückführung des Schädigungsprozesses ohne äußere mechanische oder thermische Einwirkungen. So gilt beispielweise das Erwärmen von (mit Stahlfasern bewährtem) Asphalt zum Verschließen von Rissen mit erweichtem Bindemittel strenggenommen nicht als Selbstheilung.

Heilung von im Asphalt aufgetretenen Schädigungen ist vermutlich eine von mehreren Ursachen dafür, dass die in der Praxis an Asphaltstraßen beobachtete tatsächliche Schädigungsentwicklung deutlich langsamer verläuft, als dies die Ergebnisse von kontinuierlichen Ermüdungsprüfungen an Asphaltprobekörpern im Labor zeigen. Es wird davon ausgegangen, dass in der Realität das Lebensdauerende erst bei einer Lastwechselzahl eintritt, welche die prüftechnisch ertragbare Lastwechselzahl bei weitem übertrifft.

Zur Ansprache der Healing-Eigenschaften von Asphalt im Labor sind grundsätzlich folgende Versuchstypen bekannt (siehe Kapitel 2.2):

- Zyklisch-dynamische Ermüdungsprüfungen mit einander direkt folgenden Lastimpulsen und mit Lastpausen nach einer bestimmten Anzahl an Lastimpulsen (siehe z. B. LITTLE et al., 1999; BRYESSE et al., 2003; BODIN et al., 2004; KIM & ROQUE, 2006; BHASIN et al., 2009;

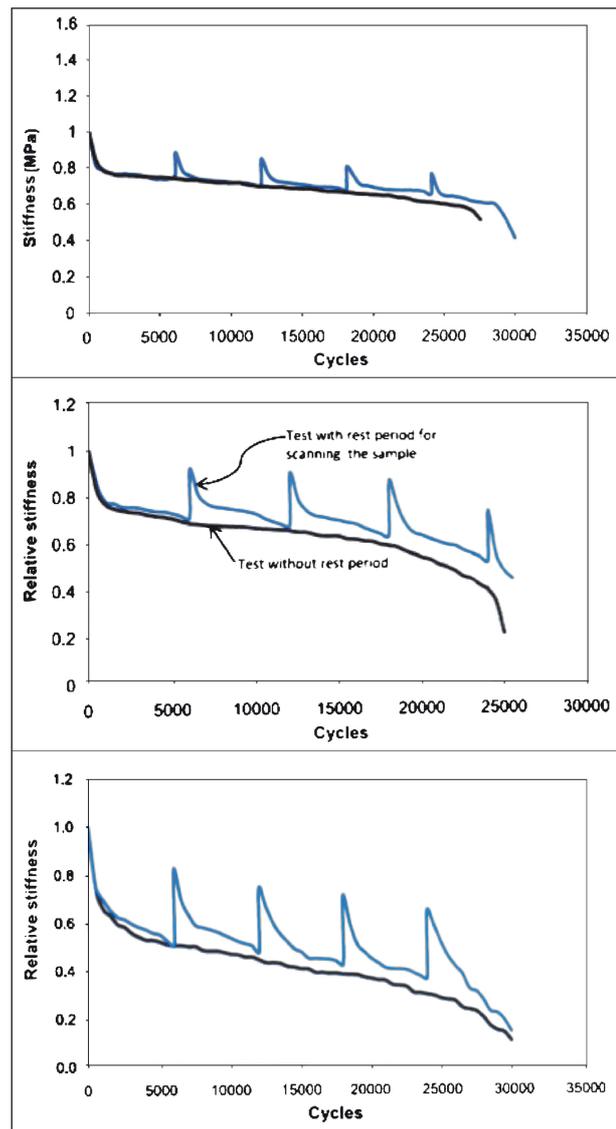


Bild 1: Verlauf der relativen Steifigkeit während kontinuierlicher (schwarz) und diskontinuierlicher Ermüdungsprüfung (blau) mit einaxialer Zug/Durch-Wechselbelastung bei $T = 5\text{ °C}$ (oben), 23 °C (Mitte) und 35 °C (unten) (KHAN & COLLOP, 2010)

SANTAGATA et al., 2009; Di BENEDETTO et al., 2011), vgl. Bild 1,

- zyklisch-dynamische Ermüdungsprüfungen mit Lastpausen zwischen den einzelnen Lastimpulsen (siehe z. B. CASTRO & SÁNCHEZ, 2006; CARPENTER & SHEN, 2006; LEUTNER et al., 2006), vgl. Bild 2,
- statische Zugprüfungen mit bruchmechanischer Auswertung (siehe z. B. MAILLARD et al., 2004), vgl. Bild 3.

Vermutlich finden während der Ermüdungsprüfung Riss-Schädigung und Heilung gleichzeitig statt. Im Gegensatz zur Schädigung, die durch mecha-

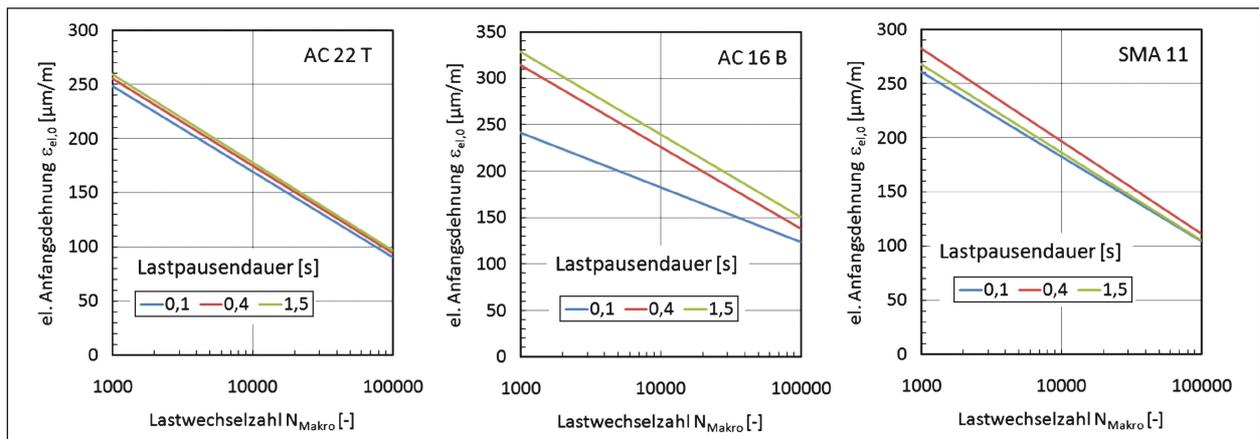


Bild 2: In Spaltzug-Schwellprüfungen ($T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$) ermittelte Ermüdungsfunktionen bei Variation der Lastpause jeweils zwischen zwei Lastimpulsen (LEUTNER et al., 2006)

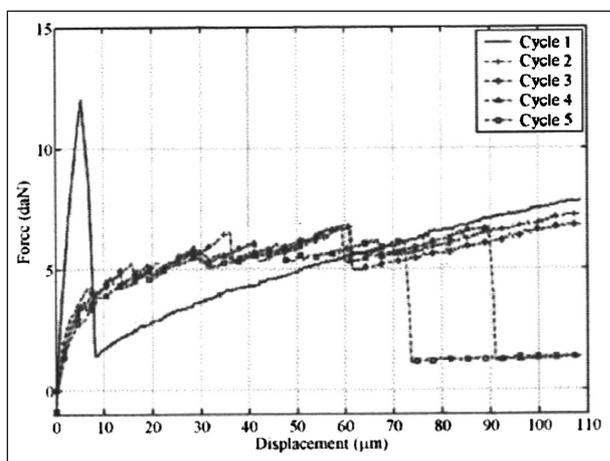


Bild 3: Kraft-Verformungsdiagramm aus bruchmechanischen einaxialen Zugprüfungen mit Lastpausen (Straßenbaubitumen 50/70, $T = 0 \text{ }^\circ\text{C}$) (MAILLARD et al., 2004)

nische Energie eingetragen wird, wird die Heilung durch die molekulare Zusammensetzung des Bitumens gesteuert (LITTLE et al., 1998).

Bitumen erhält seinen Zusammenhalt (Kohäsion) durch unterschiedlich geladene Moleküle. Für die Trennung zweier benachbarter Moleküle durch einen Riss, ist zunächst ein bestimmter Energieaufwand notwendig. Nach der Trennung der Moleküle, weisen die entstehenden Rissoberflächen Ladungsunterschiede auf. Ohne weitere Belastung ziehen diese Ladungsunterschiede (freie Oberflächenenergie) das viskoelastische Bitumen wieder zusammen, sodass sich der Riss – zumindest teilweise – schließt. Ist die mechanisch eingetragene Schädigungsenergie höher als die für die Trennung der Verbindungen notwendige Oberflächenenergie, so kommt es zu einer weiteren Schädigung (Risswachstum). Bei geringerer (bzw. keiner) mechanischer Beanspruchung können sich ent-

standene Risse wieder schließen. Unter Anwendung dieser bruchmechanischen Schädigungstheorie können sowohl zyklisch-dynamische als auch statische Prüfungen ausgewertet werden.

Die Selbstheilung von Asphalt wird somit durch die rheologischen Eigenschaften des Bindemittels Bitumen ermöglicht. Bitumen ist ein viskoses Medium, dessen Viskosität stark temperaturabhängig ist. Im Asphalt dient das mit Feinanteilen (Füller) angereicherte Bitumen dazu, die Gesteinskörner unterschiedlicher Größe zusammenzuhalten. Die Mastix, also das Bitumen-Füller-Gemisch, verklebt die Gesteinskörner dauerhaft und stützt diese bei Krafteinwirkung.

Man geht davon aus, dass unter bestimmten Voraussetzungen das temperaturabhängige Fließvermögen der Mastix ausreicht, eine durch die verkehrs- und/oder witterungsbedingte Belastung eingepreßte strukturelle Schädigung zu heilen. Innere Fließvorgänge des Mastixfilms bewirken, dass bereits initiierte Mikrorisse wieder verschlossen werden. In der Folge verändern sich Zusammenhalt, Festigkeit und Tragfähigkeit des Asphalts vorteilhaft. Die Straßenbefestigung wird dauerhaft verbessert.

In einigen Studien wurde der Einfluss der kompositionellen Asphaltgrößen auf die aus mechanischen Prüfungen mit Lastpause abgeleiteten Healing-Eigenschaften untersucht. Dabei wurde als maßgebliche Einflussgröße für das Healing-Verhalten von Asphalt die durch die Bindemittelprovenienz und Raffinierung bestimmte molekulare Bitumenzusammensetzung herausgearbeitet: Hohe Asphaltanteile vermindern die Healing-Fähigkeit, während hohe Anteile an Aromaten förderlich sind, vgl. Bild 4 (Legende siehe Tabelle 1; Healing-Index).

Vermutlich bewirkt eine Polymermodifikation zunächst einen höheren Widerstand gegen Schädigung. Sind jedoch Schädigungen eingetreten, kann die Polymermodifikation die Selbstheilung des Bindemittels behindern (LITTLE et al., 1999; KIM & ROQUE, 2006). Die Polymerketten binden dabei einen Teil der mobilen Aromat-Anteile, sodass das Selbstheilungsvermögen verringert ist.

Zum Einfluss der Temperatur sowie der Lastpausendauer auf das Healing-Vermögen wurde festgestellt, dass je höher die Temperatur ist (BHASIN et al., 2009) und je höher die Dauer der Belastungspause (LITTLE et al., 1999) ist, desto mehr wird eine zuvor eingetragene Schädigung durch Heilung zurückgebildet.

Neben der rein phänomenologischen Betrachtung des Healing-Verhaltens auf die gemessenen Mate-

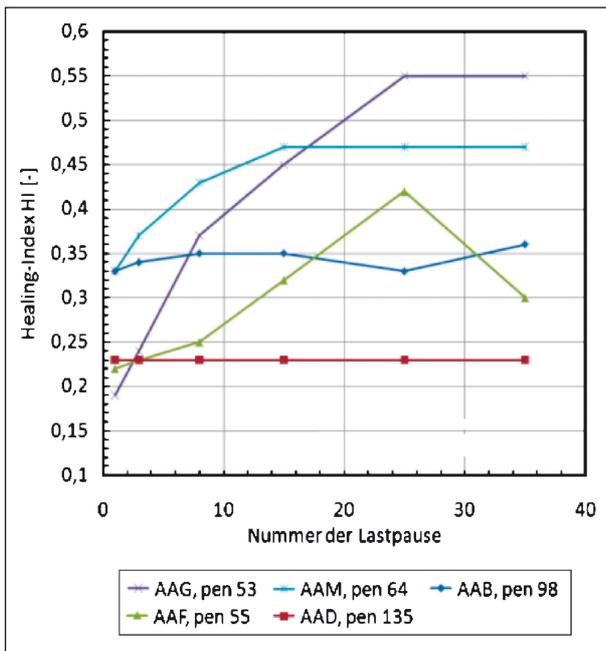


Bild 4: Einfluss der Bindemittleigenschaften auf den in Asphaltprüfungen ermittelten Healing-Index HI nach wiederholten Lastpausen (LITTLE et al., 1999). Legende- siehe Tabelle 1

rialparameter (z. B. durch den Vergleich der ertragbaren Lastwechselzahlen mit/ohne Lastpause wie in Kapitel 3.3.4 ausführlicher erläutert) finden sich in der Literatur verschiedene Ansätze zur Auswertung der Prüfungen sowie zur Bewertung des Healing-Verhaltens in Form von Kennwerten:

Mit dem Healing-Index (HI) (vgl. LITTLE et al., 1999) werden bestimmte Materialkenngrößen (z. B. Steifigkeitsmodul, je Lastwechsel dissipierte Energie) nach einer Lastpause mit jenen verglichen, die vor der Lastpause gemessen wurden. Die dissipierte Energie ist jener Anteil an Energie, der bei Beanspruchung nicht zur äußeren Gestaltänderung des Probekörpers verwendet, sondern in eine andere Energieform (z. B. Wärmeenergie) umgewandelt wird. Je höher HI ist, desto mehr wird eine vor der Lastpause eingetragene Schädigung während der Lastpause rückgeführt. Die Anwendung dieses Healing-Index beschränkt sich auf Versuche mit weggeregelter Belastungsart.

$$HI = \frac{(W_{Ps,dis,h} - W_{Ps,dis,d})}{W_{Ps,dis,d}} \cong \frac{(|E^*|_{Ps,h} - |E^*|_{Ps,d})}{|E^*|_{Ps,d}} [-] \tag{Gl. 1}$$

HI Healing-Index [-]

$W_{Ps,dis,h}$ je Lastwechsel dissipierte Pseudo-Energie nach der Lastpause

$W_{Ps,dis,d}$ je Lastwechsel dissipierte Pseudo-Energie vor der Lastpause

$|E^*|_{Ps,h}$ Absolutteil des Pseudo-E-Moduls nach der Lastpause

$|E^*|_{Ps,d}$ Absolutteil des Pseudo- E-Moduls vor der Lastpause

Mit dem Relativen Healing-Index (RHI) (vgl. SANTAGATA et al., 2009) wird jene Anzahl an Last-

Bitumen	Anteil Bitumenkomponente [%]			Nadeleindringtiefe Pen [1/10 mm]
	Asphaltene	Aromate (polar)	Gesättigte	
AAG	8,3	51,2	11,9	53
AAM	9,4	50,3	5,1	64
AAB	19,3	38,3	8,6	98
AAF	16,4	38,3	9,6	55
AAD	23,9	41,3	8,6	135

Tab. 1: Legende zu Bild 4

wecheln ermittelt, die bei der Wiederbelastung notwendig ist, um die zuvor durch Heilung regenerierte Steifigkeit erneut zu vermindern, bezogen auf die Dauer der Lastpause:

$$\text{RHI} = \frac{N_c}{t_b \cdot f} \quad [-] \quad \text{Gl. 2}$$

RHI Relativer Healing-Index [-]

N_c Anzahl der Lastwechsel während der Zweitbelastung bis zum Erreichen des komplexen Schubmoduls vor der Lastpause [-]

t_b Dauer der Lastpause [s]

f Prüffrequenz [Hz]

Die in Lastpausen beobachtete Rückführung des Steifigkeitsmoduls dürfte nicht ausschließlich auf Heilungseffekte zurückzuführen sein. So haben Di BENEDETTO et al. (2011) nachgewiesen, dass bei geringer Beanspruchung (weggeregelte Zug-Druck-Wechselversuche, Prüffrequenz $f = 10$ Hz, Dehnungsamplitude $< 120 \mu\text{m/m}$, 10.000 Lastwechsel) die während der Beanspruchung initiierte Steifigkeitsabnahme (Schädigungsphase 1) in den Lastpausen vollständig regeneriert wird. Die während der Belastung gemessene Steifigkeitsabnahme wird mit nicht-linearem Materialverhalten (eine höhere Beanspruchung bewirkt eine geringe Steifigkeit), Erwärmung infolge Energiedissipation (Abkühlen während der Lastpausen) und Bindemittelthixotropie (sterische Verhärtung in Lastpausen) begründet. Demnach tritt Schädigung und daher auch Heilung erst bei höherer Beanspruchung auf.

2.2 Asphaltverhalten unter zyklisch-dynamischer Ermüdungsbeanspruchung

Heilung ist i. Allg. die Rückführung von Ermüdungsrissen. Rissversagen in Asphalt ist die Folge einer die Festigkeit erreichenden Zugbeanspruchung. Rissversagen kann spontan zufolge einer einzelnen Überlast eintreten, oder als Folge einer allmählich voranschreitenden Materialermüdung (Abnahme der Steifigkeit) bei wiederholter Belastung.

Es ist international gängige Praxis, die Beanspruchung einer Asphaltstraße im Labor mithilfe von zyklisch-dynamischen Prüfungen an Asphaltproben zu simulieren. In der Materialprüfung wird eine hohe Zahl von Belastungswiederholungen aufgebracht und die daraus resultierende Steifigkeitsabnahme infolge Materialermüdung festgestellt.

Dabei wird auf einen Probekörper mit definierten Abmessungen in einem kraftgeregelten Versuch eine wiederkehrende (zyklische) konstante Kraft (bzw. Spannung) aufgebracht und die resultierende Verformung (bzw. Dehnung) gemessen.

Bild 5 zeigt schematisch den Spannungs-Dehnungs-Verlauf bei Kraftregelung. In einem wegeregelten Versuch wird eine konstante Dehnung aufgebracht und die resultierende Kraft gemessen.

Unter Materialermüdung versteht man im Allgemeinen ein allmähliches Versagen des Materials infolge Dauerbeanspruchung. Obwohl die Einzelast kleiner als die Festigkeit des Materials ist, werden infolge der Lastwiederholungen ein allmählicher Abfall der Materialsteifigkeit und gleichzeitig ein Anstieg der Dehnungsreaktionen festgestellt. Es wird angenommen, dass der Steifigkeits- bzw. Festigkeitsverlust primär eine Folge der Bildung von Mikrorissen im Material ist.

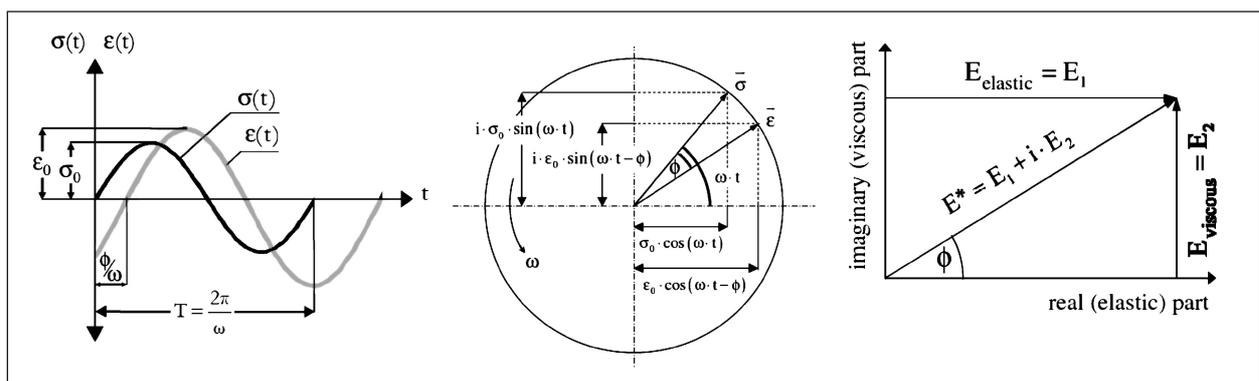


Bild 5: Zyklisch-dynamischer Versuch mit Kraftregelung: Die resultierende Verformung (Dehnung) läuft der aufgebrachten konstanten Kraft (Spannung) hinterher (WISTUBA et al., 2009)

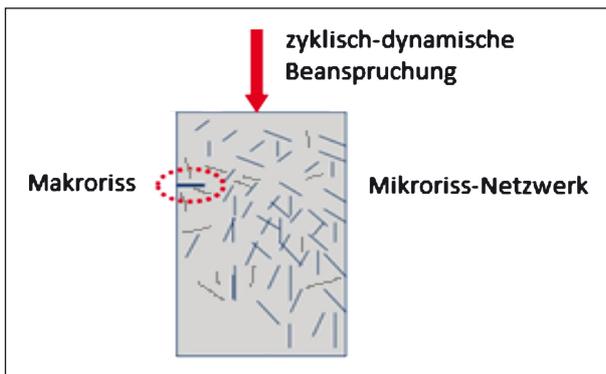


Bild 6: Prinzipskizze: Verdichtung eines Mikroriss-Netzkes zu einem Makroriss (nach Di BENEDETTO, 2013)

Im Regelfall ist der Steifigkeitsabfall im Versuch durch 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 (vgl. MOLLENHAUER et al., 2011; Bild 6). Bei fortgeschrittener Schädigung nimmt die Steifigkeit progressiv ab (Phase 3).

Für die Ermüdungsprüfung an Straßenbauasphalten werden unterschiedliche Prüfverfahren eingesetzt, von denen sich (homogene) einaxiale Prüfverfahren zum Zwecke wissenschaftlicher Untersuchungen des Ermüdungsverhaltens am besten eignen (siehe WISTUBA et al., 2009). In diesem Projekt werden insbesondere homogene einaxiale Asphaltprüfungen eingesetzt, wie die einaxiale Zugprüfung und die einaxiale Zug-Druck-Wechselastprüfung jeweils am schlanken prismenförmigen Probekörper. Bei diesen Prüfverfahren wird davon ausgegangen, dass im untersuchten Probekörperquerschnitt mit ausreichender Näherung ein homogener, einaxialer Spannungszustand erreicht wird.

Es ist internationale Konvention, die Steifigkeit von Asphalt durch den Verlauf des Absolutwertes des komplexen dynamischen Steifigkeitsmodul $|E^*|$ (auch „absoluter E-Modul“ oder „Steifigkeitsmodul“) über der Versuchszeit oder der Lastimpulszahl zu beschreiben. Der E-Modul ergibt sich als Quotient aus initiiertem Spannung und resultierender elastischer Vertikalverformung zu:

$$|E^*| = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \text{ [MPa]} \quad \text{Gl. 3}$$

$|E^*|$ komplexer dynamischer Steifigkeitsmodul (E-Modul) [MPa]

σ_0 Spannungsamplitude [MPa]

ε_0 Dehnungsamplitude [-]

Die Messgenauigkeit während des Versuchs und damit die Genauigkeit der Auswertung des E-Moduls (Gleichung 3) wird wesentlich von der Genauigkeit der verwendeten Wegaufnehmer beeinflusst. Bei Kraftsteuerung ist das gemessene Wegsignal nie exakt sinusförmig, der daraus ausgewertete Verlauf des E-Moduls als Funktion der Lastwechselzahl zeigt Schwankungen (vgl. Bild 7a und b). Aus diesem Grund werden die Signale der Wegaufnehmer in diesem Projekt mithilfe einer Sinusregression gemäß Gleichung 4 und Gleichung 5 korrigiert bzw. geglättet (Bild 7c):

$$F(t) = F_m + F_a \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + \varphi_F) \text{ [N]} \quad \text{Gl. 4}$$

$F(t)$ zeitabhängige, sinusförmige Kraftfunktion [N]

F_m mittlere Kraft [N]

F_a Kraftamplitude [N]

f Frequenz [Hz]

φ_F Phasenverschiebung der Kraftschwingung [rad]

$$s(t) = s_m + s_a \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + \varphi_s) \text{ [mm]} \quad \text{Gl. 5}$$

$s(t)$ zeitabhängige, sinusförmige Wegfunktion [mm]

s_m mittlerer Weg [mm]

s_a Wegamplitude [mm]

φ_s Phasenverschiebung der Wegschwingung [rad]

Das Ermüdungsversagen von Asphalt, das heißt der Eintritt des ersten Makrorisses im Probekörper, ist oft nicht eindeutig bestimmbar. Daher gilt in der Laborprüfung das Material dann als ermüdet, wenn der Materialzustand einem definierten Ermüdungskriterium entspricht.

Für Auswertung 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 zu Grunde legen (siehe WISTUBA et al., 2009).

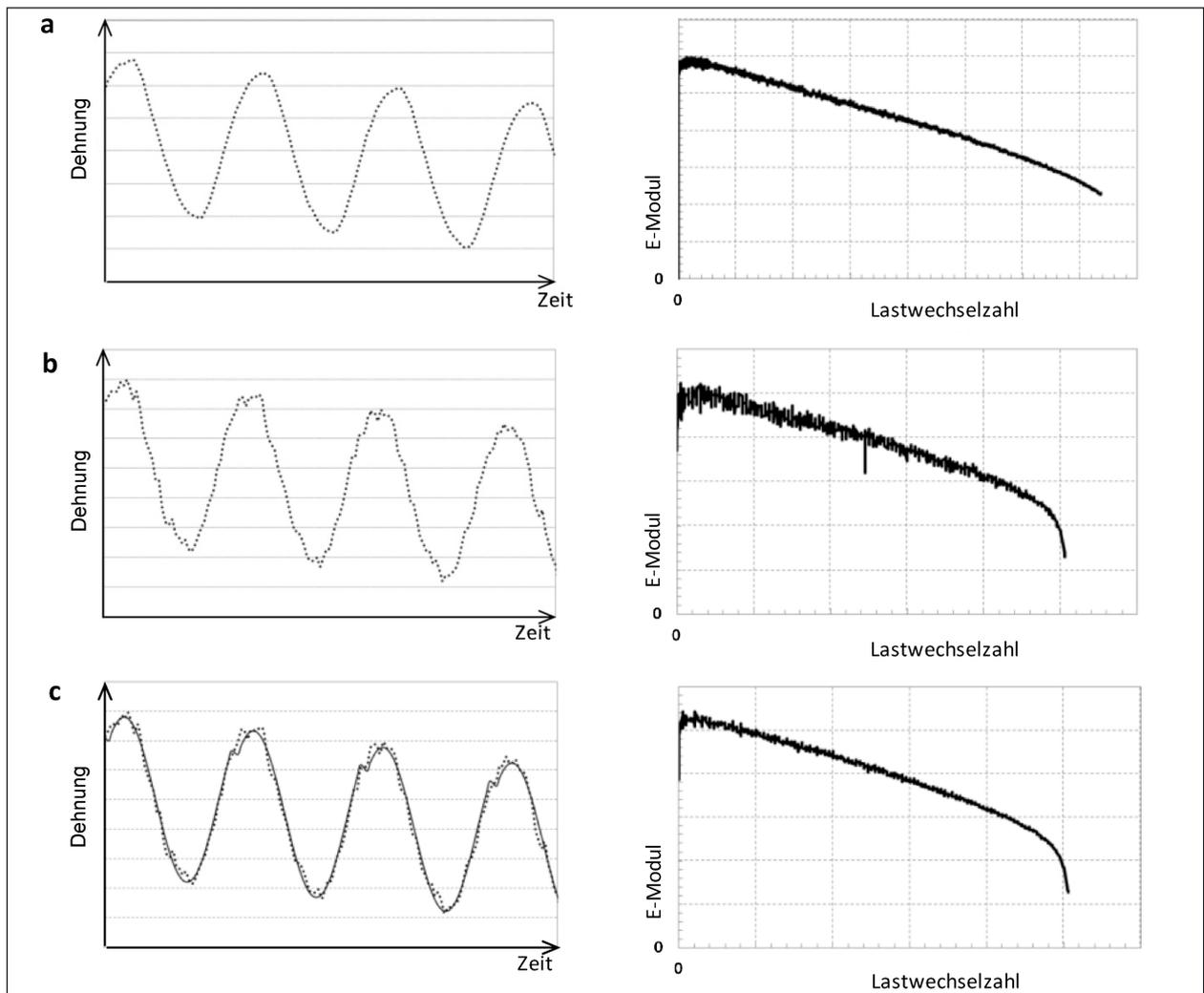


Bild 7: Verlauf der Verformung (Dehnung) und des E-Moduls im kraftgeregelten Zug-Schwellversuch unter Verwendung von (a) präzisen Wegaufnehmern und (b) wenig präzisen Wegaufnehmern, sowie (c) bei Anwendung einer Sinusregression

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 gilt als problematisch, wenn die quasi-stationäre Ermüdungsphase vor Abfall um 50 % erreicht wird, das heißt wenn der Probekörper bereits mit einer Steifigkeit größer als 50 % der Anfangssteifigkeit bricht. Dies ist oft bei niedrigen Prüftemperaturen der Fall (siehe Bild 8).

Van DIJK (1975) führte das Prinzip der dissipierten Energie in die Auswertung von Ermüdungsprüfungen an Asphalt ein (siehe auch WISTUBA et al., 2009).

Als dissipierte Energie werden jene energetischen Anteile zusammengefasst, die bei Belastung des

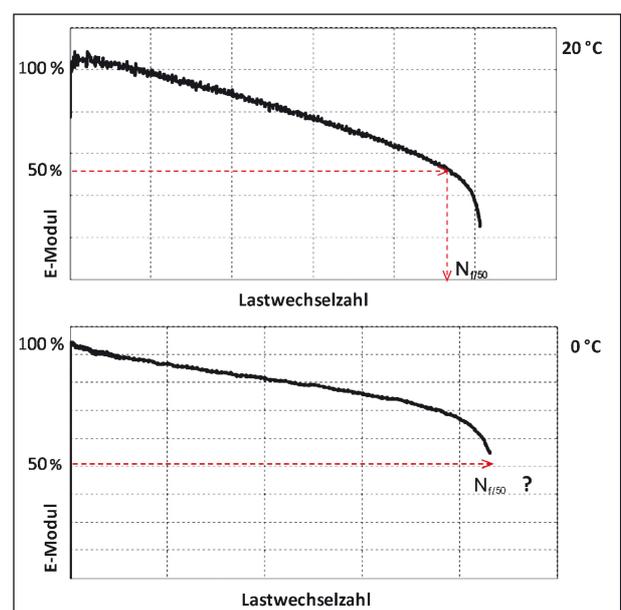


Bild 8: Verlauf des E-Moduls in Zug-Schwell-Versuchen bei 20 °C (oben) und bei 0 °C (unten)

Probekörpers in andere Energieformen (z. B. Wärmeenergie) umgewandelt (dissipiert) werden oder zur Materialschädigung führen.

Gemäß Gleichung 6 ergibt sich die je Volumenelement während eines Lastwechsels i dissipierte Energie aus dem Produkt der wirkenden Spannungsamplitude $\sigma_{0,i}$, der Dehnungsamplitude $\epsilon_{0,i}$ und dem Sinus des Phasenwinkels φ_i zu:

$$W_i = \pi \cdot \sigma_{0,i} \cdot \epsilon_{0,i} \cdot \sin\varphi_i \left[\frac{\text{J}}{\text{m}^3} \right] \quad \text{Gl. 6}$$

W_i je Volumenelement dissipierte Energie [J/m³]

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

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

φ_i Phasenwinkel [°]

Anhand von elliptischen Kurvengrafen, die durch Überlagerung harmonischer Schwingungen entstehen (Hystereseschleifen) und nach dem französischen Physiker Jules Antoine LISSAJOUS (1822-1880) Lissajous-Figuren genannt werden, kann die bei zyklisch-dynamischen Asphaltprüfungen auftretende Materialschädigung in Anteile zufolge Ermü-

dung (Drehung des Ellipsoids um seine Achse, Änderung der dissipierten Energie) und in Anteile zufolge Verformung (Verschiebung entlang der x-Achse) zerlegt werden (siehe z. B. Bild 9, Di BENEDETTO, 2013). Die dissipierte Energie wird als die eingeschlossene Fläche zwischen den Messwerten eines Zyklus im Spannungs-Dehnungs-Diagramm dargestellt (Bild 9). Die zur Materialschädigung verbrauchte Energie in zyklisch-dynamischen Prüfverfahren kann aus der Differenz der dissipierten Energie zweier aufeinanderfolgender Lastwechsel berechnet werden. Wird in zyklisch-dynamischen Prüfverfahren (bei Kraftregelung) beim Lastimpuls $i+1$ mehr Energie dissipiert als beim Lastimpuls i , so führt dies u. a. zur Materialschädigung.

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

$$ER(n) = \frac{n \cdot W_0}{W_n} [-] \quad \text{Gl. 7}$$

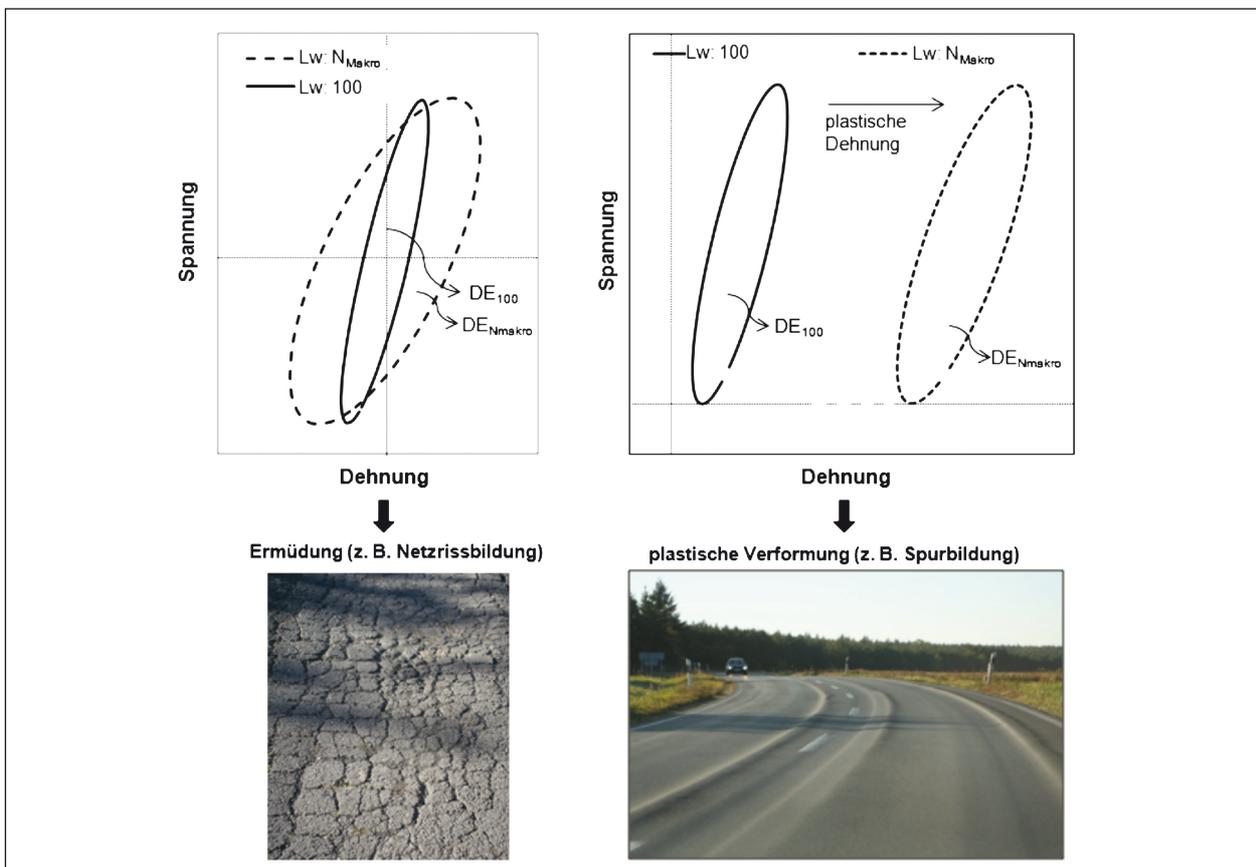


Bild 9: Lissajous-Figuren zur Interpretation von zyklisch-dynamischen Asphaltprüfungen bei Kraftregelung

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 zwischen dem Spannungs- und dem Dehnungssignal verhält sich die ER proportional zum Produkt aus der Lastwechselzahl n und dem E-Modul zu diesem Zeitpunkt. Es gilt:

$$ER(n) = n \cdot |E|_n \text{ [MPa]} \quad \text{Gl. 8}$$

ER(n) Energy Ratio beim Lastwechsel n [MPa]

N Lastwechselzahl [-]

|E| E-Modul [MPa]

In Bild 10 ist 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 wird als Ermüdungskriterium N_{Makro} definiert. 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 10).

Das Ermüdungskriterium N_{Makro} ist vor allem dann vorteilhaft, wenn nach dem Ermüdungskriterium

$N_{f/50}$ (siehe oben) das Ermüdungsversagen nicht eindeutig zu identifizieren ist.

3 Vorgehensweise

3.1 Überblick

Es ist zunächst nicht gesichert, mit welchen Laborprüfverfahren und Auswertemethoden die Healing-Eigenschaften von Bitumen und Asphalt in geeigneter Weise angesprochen werden können. Im Rahmen des Projekts werden daher verschiedene prüftechnische und materialspezifische Einflussgrößen analysiert sowie unterschiedliche Prüfverfahren und Auswertemethoden angewandt.

Folgende Prüfbedingungen werden (je nach Möglichkeit des Prüfverfahrens) hierarchisch variiert:

- Belastungsregime (Weg-/Kraftregelung, Ober-/Unterspannung, Anzahl an Zyklen vor der Lastpause),
- Prüftemperatur,
- Lastpause (Zeitpunkt und Dauer der Lastpause).

Anhand der Prüfergebnisse werden die Einflüsse der variierten Prüfbedingungen festgestellt und beurteilt. Als Ergebnis dieser Parameterstudie werden die bestgeeigneten Prüfverfahren zur Ansprache der Healing-Eigenschaften an Bitumen- und Asphaltproben mit den jeweils optimalen Prüfbedingungen sowie die bestgeeigneten Auswertemetho-

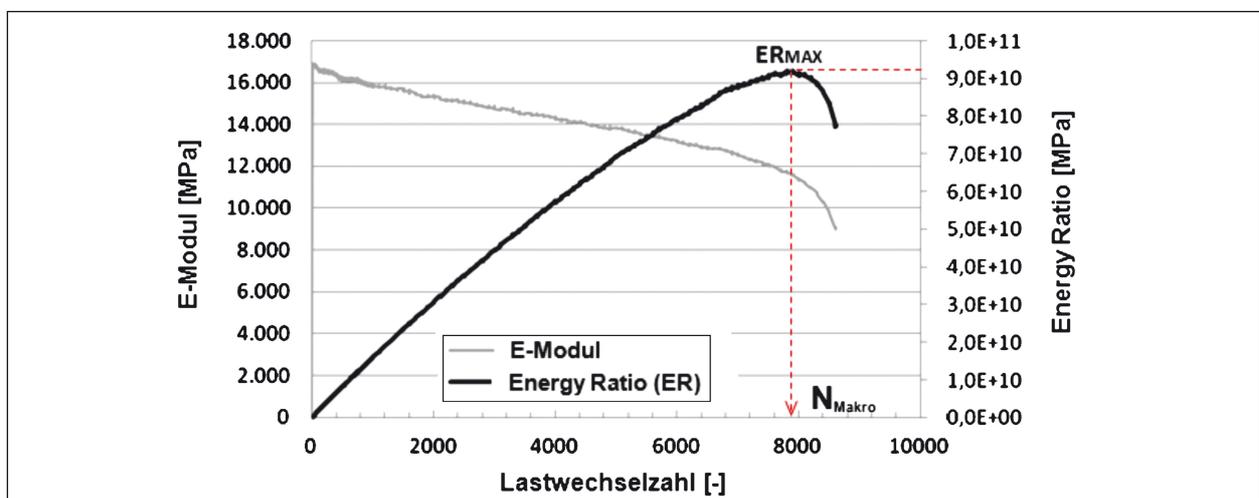


Bild 10: Exemplarischer Verlauf des absoluten E-Moduls und der Energy Ratio (ER) während einer kraftgeregelten Zug-Druckwechselastprüfung bei $T = 0 \text{ °C}$

den festgelegt und für zukünftige Healing-Prüfungen empfohlen.

Die Ansprache von Healing-Eigenschaften erfolgt an Bitumen- und an Asphaltproben mittels statischer und zyklisch-dynamischer Prüfverfahren unter Einführung von Lastpausen zwischen den Lastimpulsen.

Dabei werden a priori solche Verfahren ausgewählt, die eine möglichst homogene Beanspruchung im Prüfmedium während der Prüfung ermöglichen. Die grundsätzliche Übertragbarkeit des entwickelten Prüf- und Auswertekonzeptes auf Ermüdungsprüfungen mit überwiegend inhomogener Beanspruchung (z. B. 4-Punkt-Biegeprüfungen und Spaltzug-Schwellprüfungen) wird mittels Einzelprüfungen überprüft.

Für die materialabhängige Berücksichtigung von Healing-Eigenschaften im Rahmen der rechnerischen Dimensionierung wird ein grundlegendes erstes Konzept vorgeschlagen. Es wird empfohlen, entweder materialabhängige Shift-Faktoren zur Berücksichtigung des Healing-Verhaltens sowie der vorliegenden Verkehrsbelastung einzuführen, oder die in der Laborprüfung ermittelte Ermüdungsfunktion zu modifizieren.

3.2 Prüfung von Bitumen

Für die Ansprache der Healing-Eigenschaften von Bitumen wird bei jeweils zweifacher Variation der Lastpausenbedingung das zyklisch-dynamische Prüfverfahren mit dem Dynamischen Shear Rheometer (DSR) eingesetzt.

Die statischen Bitumenprüfungen erfolgen mittels Multi Stress Creep Recovery Test (MSCR) sowie mittels einer einaxialen Zugprüfung.

Chemisch-physikalische Bitumenuntersuchungen erfolgen anhand von chromatografischen und spektroskopischen Analysemethoden.

3.2.1 Dynamic Shear Rheometer

Das Anwendungsgebiet des dynamischen Scherrheometers (DSR) ist die Messung rheologischer Kenngrößen fließfähiger Materialien. Im Rahmen der DSR-Analytik für Bitumen wird eine Bindemittelprobe einer oszillierenden (schwingenden) Scherbeanspruchung ausgesetzt und bei Durchführung eines Temperatursweeps im Bereich von

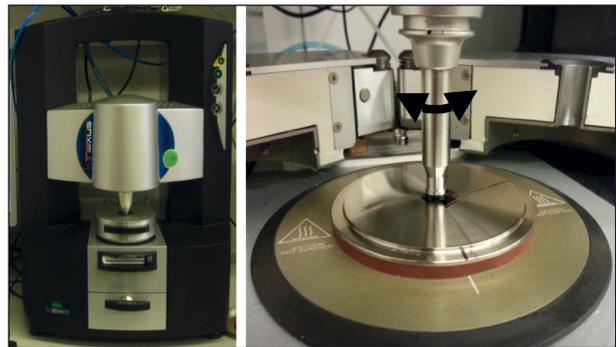


Bild 11: Verwendetes dynamisches Scherrheometer, hier mit 8 mm Platte-Platte Messgeometrie

+30 °C bis +90 °C und eines Frequenzsweeps im Bereich von 0,1 Hz bis 10 Hz der komplexe Schermodul G^* und der Phasenwinkel δ ausgewertet.

Grafisch dargestellt werden darüber hinaus die Zusammenhänge G^* , δ , Frequenz und Temperatur in verschiedenen Kombinationen, wie z. B. Schermodul gegen Frequenz (Masterfunktion), Schermodul gegen Phasenwinkel (Black-Diagramm) und Imaginärteil G'' gegen den Realteil G^* (Cole-Cole Diagramm).

Mit der DSR-Analytik wird das viskoelastische Verhalten eines Bitumens überprüft und Anhaltswerte für die Verformungseigenschaften ($G^*/\sin \delta$) und Ermüdungseigenschaften ($G^* \cdot \sin \delta$) erhalten.

Bei DSR-Messungen werden im Regelfall wenige Oszillationsschwingungen zur Bestimmung des komplexen Schermoduls und des Phasenwinkels ausgeführt.

Für die Beurteilung des Healing-Verhaltens von Bitumen werden zyklisch-dynamische kraft- und weggeregelte Ermüdungsprüfungen durchgeführt, bei denen eine kontrollierte Strukturschädigung angestrebt wird. Die kontinuierliche Belastung führt zu einem Abfall des komplexen Schermoduls. Zwischen kontinuierlichen Belastungsphasen werden Lastpausen angeordnet.

Durch Variation folgender Lastpausenbedingungen wird deren Einfluss auf die Ermüdungsbeständigkeit untersucht:

- Temperatur,
- Lastpausendauer.

Des Weiteren werden die Bedingungen

- weg-/kraftgeregelte DSR-Prüfungen und
- Anzahl der Belastungsimpulse während der Belastungsphasen

während der Beanspruchungsphase variiert und ebenfalls deren Einfluss auf die Ermüdungsbeständigkeit untersucht.

Durch die Erweiterung der DSR-Prüfung mittels Lastpausen erfolgt eine Zunahme des Schubmoduls nach jeder Erholungsphase, so dass das Ermüdungskriterium in Abhängigkeit von der Lastpausenbedingung nach erhöhter Lastwechselzahl erreicht wird.

Um innerhalb einer möglichst kurzen Versuchsdauer eine hohe Schädigung im Prüfmedium zu erzielen (schneller Abfall des komplexen Schermoduls) werden die Beanspruchungen so gewählt, dass bei Beginn der Beanspruchung eine Messung im linear-viskoelastischen Bereich sichergestellt ist, jedoch die Belastungsgrößen (Scherspannung bzw. Deformation) maximal sind. Dazu ist bei der gewählten Prüftemperatur vor Beginn der Ermüdungsprüfung der linear-viskoelastische Bereich mittels Amplituden-Sweep zu bestimmen.

Zur Untersuchung des Einflusses von Entlastungsphasen/Lastpausen auf die Ermüdungsbeständigkeit werden die DSR-Prüfungen durch eingefügte Lastpausen unterbrochen. Weiterhin werden die Beanspruchungsbedingungen während der Lastpause (Temperatur, Scherspannung, Lastpausendauer) sowie die Anzahl der Lastwechsel bis zur Unterbrechung der Ermüdungsprüfung variiert.

3.2.2 Multiple Stress Creep and Recovery Test

Beim Multiple Stress Creep and Recovery Test (MSCRT) wird eine Bitumenprobe einer wiederholten statischen Kriechbeanspruchung mit Erholungsphasen ausgesetzt. Die entsprechend der DSR-Analytik vorbereitete Probe wird für eine Zeitdauer von 1 s mit einer Scherbelastung beansprucht und anschließend für eine Dauer von 9 s entlastet. Der MSCR-Test wird gemäß der „AL MSCR-Prüfung (DSR)“ (FGSV, 2012) in drei Laststufen (0,1; 1,6; 3,2 kPa) mit jeweils 10 Zyklen bei einer konstanten Temperatur (60 °C) durchgeführt. Die Gesamtdauer der Prüfung beträgt somit 300 s.

Für jede Laststufe und jeden Lastzyklus sind zu ermitteln:

- die gemessene Dehnung zu Beginn der Kriechbelastung,
- die gemessene Dehnung nach 1 s,

- die gemessene Dehnung nach 10 s,
- die eingestellte Dehnung am Ende der Kriechbeanspruchung und
- die eingestellte Dehnung am Ende der Erholungsphase.

Die Ergebnisse, die sich durch die Änderung der Prüfbedingungen ergeben, werden ermittelt. Um einen Vergleich der Ergebnisse entsprechend dem deutschen Regelwerk zu ermöglichen, werden 3 Laststufen (0,1; 1,6; 3,2 kPa) untersucht und die Entlastungsphase auf 90 s bzw. 300 s erhöht. Die modifizierten MSCR Versuche werden bei drei Prüftemperaturen (40 °C; 50 °C; 60 °C) durchgeführt. Alle übrigen Versuchsbedingungen entsprechen jenen der „AL MSCR-Prüfung (DSR)“ (FGSV, 2012).

3.2.3 Einaxialer Zugversuch

Statische Kriech-Erholungsprüfungen werden im einaxialen Zugversuch durchgeführt, der durch Lastpausen unterbrochen wird. Dabei wird ein spannungsfrei temperierter Bitumen-Probekörper für eine festgelegte Zeitdauer mit einer konstanten Zugspannung (bezogen auf den Ausgangsquerschnitt) belastet. Während der Belastungsphase wird die axiale Verformung des Probekörpers aufgezeichnet. Nach der Belastungsphase wird der Probekörper entlastet und die Rückverformung während der Entlastungsphase (Lastpause) erfasst.

Für jede Laststufe und jeden Lastzyklus werden (in Anlehnung an den MSCR-Test) ermittelt:

- die gemessene Dehnung zu Beginn der Kriechbelastung,
- die gemessene Dehnung nach Ende der Kriechbelastung,
- die gemessene Dehnung nach Ende der Lastpause,
- die eingestellte Dehnung am Ende der Kriechbeanspruchung und
- die eingestellte Dehnung am Ende der Erholungsphase.

Probenform und Vorbereitung für die wiederholten statischen Kriech-Erholungsprüfungen entsprechen der DIN EN 13589.

Das Bitumen wird in herkömmliche für den Kraftduktilitätsversuch genormte Formen gegossen (Bild 12), abgeschält und anschließend für eine ausreichende Zeit auf die jeweilige Prüftemperatur temperiert.

Zur Prüfung wird die so präparierte Probe senkrecht in eine Prüfmaschine eingebaut und anschließend in die mit Ethanol gefüllte Temperier-Einheit eingetaucht (Bild 13). Durch die Temperierung im Flüssigkeitsbad wird eine homogene Temperaturverteilung im Probekörper über die gesamte Versuchsdauer gewährleistet. Zudem sind Reibungskräfte ausgeschlossen, die etwa zwischen den Probekörper und einer Auflagerfläche entstehen könnten.

Die statische Zugbeanspruchung wird jeweils durch eingefügte Entlastungsphasen unterbrochen.

Die Durchführung der einaxialen statischen Kriech-Erholungsprüfungen erfolgt an Straßenbaubitumen 70/100, 50/70 und an Polymermodifiziertem Bitumen 25/55-55 A bei weggeregelter und kraftgeregelter Zugbeanspruchung. Die Prüftemperatur be-

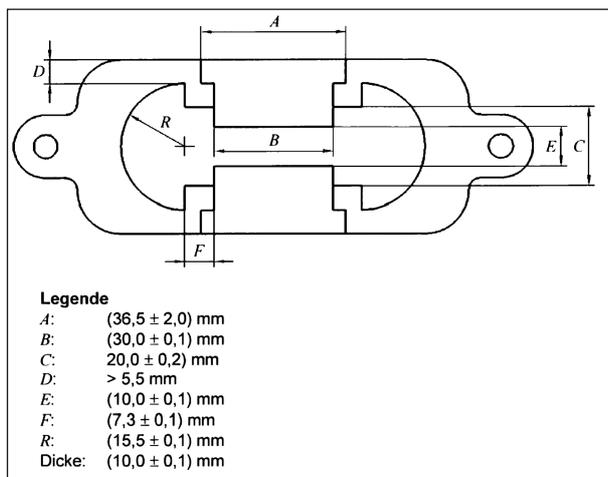


Bild 12: Gießform für den Kraftduktilitätsversuch gemäß DIN EN 13589

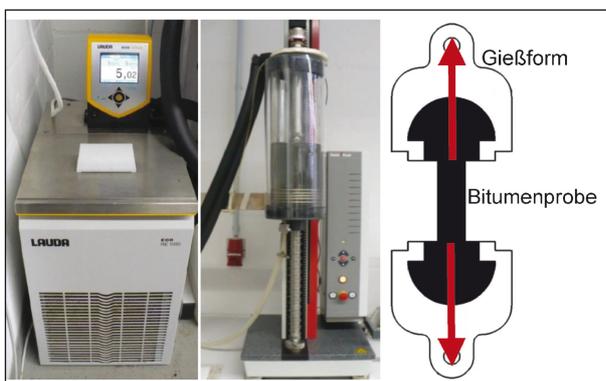


Bild 13: Versuchsaufbau für statische Zug-Retardationsversuche am Kraftduktilitäts-Probekörper

trägt konstant $T = -5 \text{ °C}$. Die Probekörper werden vor dem Einbau in das Prüfgerät für 90 min und weitere 5 min nach dem Einbau bei Prüftemperatur konditioniert. Weiterhin wird auf den spannungsfreien Einbau der Probekörper geachtet.

Die Belastungsgrößen werden aus statischen Zugversuchen mit einer weggeregelter Belastungsgeschwindigkeit von 0,22 mm/min unter Bestimmung der Zugfestigkeit gewonnen. Es wird in Folge für jeden Belastungszyklus kraftgeregelt (1,5 N/s) eine Belastung von 50 % der Bruchspannung auf die Probe aufgebracht und für eine Dauer von 300 s bzw. 600 s gehalten, gefolgt von einer Entlastungsphase. Es werden 5 Belastungs- und Entlastungszyklen aufgebracht und anschließend die Probe weggeregelt (0,22 mm/min) bis zum Bruch belastet.

Zur Ermittlung der optimalen Parameter für die Durchführung dieses Versuchstyps erfolgten folgende Variationen:

- Kraftgeregeltere statische Kriechprüfungen ohne Lastpause mit einaxialer Zugspannung von $\sigma = 0,03 \text{ MPa}$ und $\sigma = 0,1 \text{ MPa}$ bei Temperaturen von $+5 \text{ °C}$ und -5 °C an Straßenbaubitumen 50/70 und an PmB 25/55-55 für eine Dauer von jeweils 6.000 s bzw. 1.500 s.
- Kraftgeregeltere wiederholte statische einaxiale Kriech-Erholungsprüfungen mit einer einaxialen Zugspannung von $\sigma = 0,03 \text{ MPa}$ und $\sigma = 0,1 \text{ MPa}$ bei Temperaturen von $+5 \text{ °C}$ und -5 °C an Straßenbaubitumen 50/70 und an PmB 25/55-55 mit einer Belastungsdauer von 300 s und 600 s und einer Entlastungsdauer von 300 s mit 5- bzw. 10-facher Wiederholung.
- Kraftgeregeltere wiederholte statische einaxiale Kriech-Erholungsprüfungen mit einer einaxialen Zugspannung von $\sigma = 0,03 \text{ MPa}$ und $\sigma = 0,1 \text{ MPa}$ bei Temperaturen von $+5 \text{ °C}$ und -5 °C an Straßenbaubitumen 50/70 und an PmB 25/55-55 mit einer Belastungsdauer von 300 s und 600 s und einer Entlastungsdauer von 600 s mit 5- bzw. 10-facher Wiederholung.
- Weggeregeltere statische Kriechprüfungen ohne Lastpause mit Dehnungsgrenzen von $\epsilon = 10 \%$, 5% , 2% bei Temperaturen von $+5 \text{ °C}$ und -5 °C an Straßenbaubitumen 50/70 und an PmB 25/55-55.
- Weggeregeltere einaxiale Zugprüfungen mit einer Belastungsgeschwindigkeit von

$v = 0,22 \text{ mm/min}$ und $v = 0,5 \text{ mm/min}$ bei Temperaturen von $+5 \text{ °C}$ und -5 °C an Straßenbaubitumen 5 0/70 und an PmB 25/55-55.

- Kraftgeregelte wiederholte statische einaxialen Kriech-Erholungsprüfungen mit einer einaxialer Zugspannung von $\sigma = 0,5 \cdot f_{ct}$ und $\sigma = 0,8 \cdot f_{ct}$ bei Temperaturen von $+5 \text{ °C}$ und -5 °C an Straßenbaubitumen 50/70 und an PmB 25/55-55 mit einer Belastungsdauer von 300 s und 600 s und einer Entlastungsdauer von 300 s mit 5- bzw. 10-facher Wiederholung.

3.2.4 Chromatografische Analyse

Die chromatografische Analyse erfolgt mittels Dünnschichtchromatografie mit anschließendem Flammenionisationsdetektor (FID) und dient der anteilmäßigen Bestimmung von gesättigten Kohlenwasserstoffen (Saturates), Aromaten (Aromatics), Harzen (Resins) und Asphaltene (Asphaltenes), auch SARA-Fractionen genannt, in Bitumen gemäß International Petroleum Test Method 469/01 (IP 469/01).

Untersucht werden je 100 mg Bitumen in 10 ml Toluol gelöst. Chromatografische Untersuchungsmethoden bestehen aus einer stationären und einer mobilen Phase (Eluent). Die eingesetzten Chromarods (Bild 14) bilden hierbei die stationäre Phase

der Dünnschichtchromatografie. Verschiedene Lösungsmittelgemische bilden später in drei Entwicklungsgängen die mobilen Phasen. Chromarods sind mit Kieselgel beschichtete Quarzstäbe, an denen die Trennung der SARA-Fractionen durchgeführt wird.

Der Probenauftrag erfolgt mittels Sample Spotter (Bild 15) und ermöglicht, Probenmengen von $1 \mu\text{l}$ auf die Chromarods präzise aufzutragen.

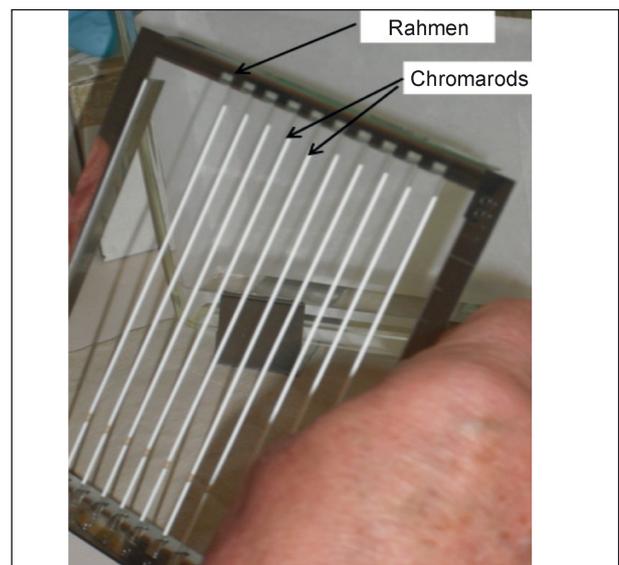


Bild 14: Rahmen mit Chromarods

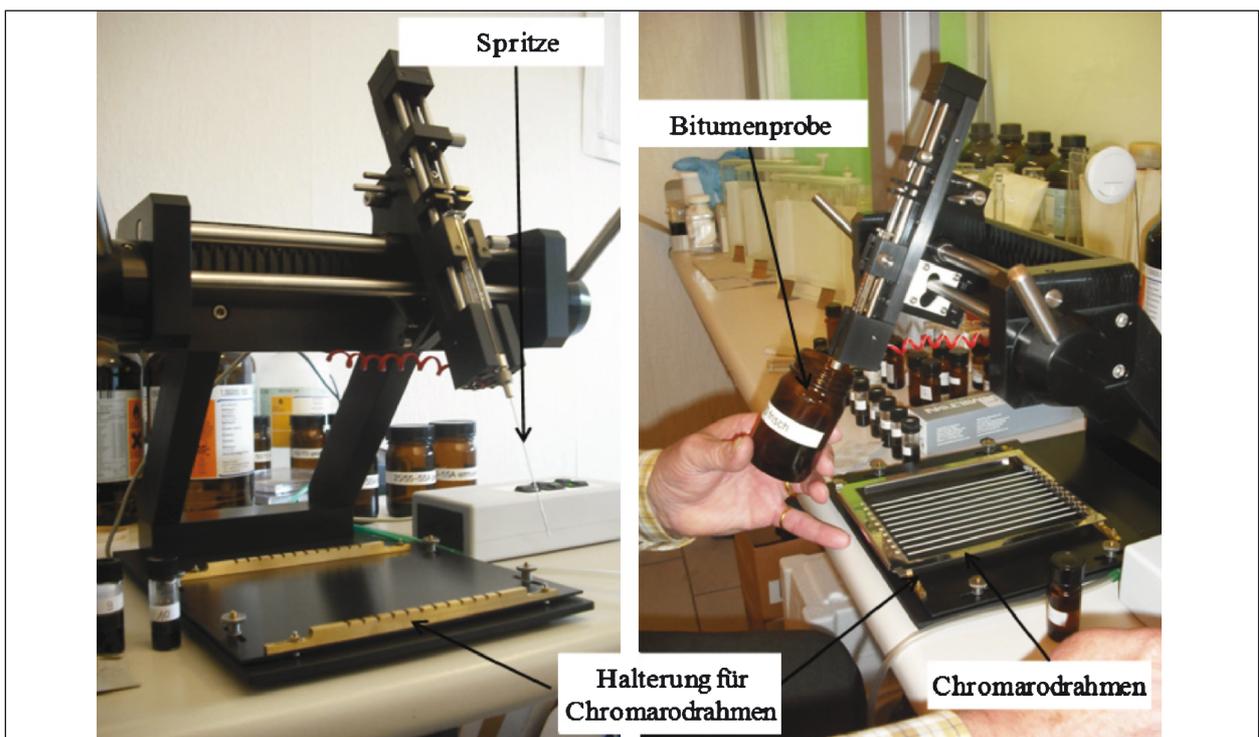


Bild 15: Sample Spotter SES 3202/IS 03

Im ersten Entwicklungsgang werden mit dem Fließmittel Heptan die gesättigten Kohlenwasserstoffverbindungen aus der Bitumenlösung herausgezogen. Der Entwicklungsvorgang wird durch die Kapillarkräfte erzeugt, die die mobile Phase über die stationäre Phase ziehen. Im ersten Entwicklungsgang werden nichtaromatische zyklische und azyklische Kohlenwasserstoffe (Naphtene, Paraffine) aus der Bitumenlösung herausgezogen (IP 469, 2001). Der kapillare Fließvorgang wird beendet, sobald das Fließmittel genau 11 cm an den Chromarods hochgestiegen ist. Anschließend wird der Chromarod-Träger der Entwicklungskammer entnommen und getrocknet.

Beim zweiten Entwicklungsgang werden aromatische Stoffe aus der Bitumenlösung abgetrennt. Dazu zählen Kohlenwasserstoffverbindungen mit einem oder mehreren aromatischen Ringen. Die mobile Phase bildet hier ein Toluol-Heptan-Gemisch.

Im dritten und letzten Entwicklungsgang wird der verbliebenen Bitumenlösung der Harzanteil entzogen. Die Trennung dieser Stoffgruppe erfolgt mit einem Lösungsmittelgemisch aus Dichlormethan/Methanol. Am Ausgangspunkt der aufgetragenen Bitumenlösungen verbleiben Asphaltene.

Bild 16 zeigt die drei Entwicklungsgänge als Übersicht, das Detail eine Fraktionentrennung aus der Bitumenlösung.

Bild 17 zeigt die Verteilung der 4 Fraktionen entlang der Chromarods nach Ende der chromatografischen Trennung und deren Einbau im Iatroscan.

Anschließend erfolgt die quantitative Bestimmung der SARA-Fraktionen mittels Iatroscan. Die Chromarod-Stäbchen werden in einer Wasserstoffflamme abgebrannt. Die bei der Ionisierung freigewordenen Elektronen werden detektiert und als Ausgangssignal über den Detektor unmittelbar an den PC übertragen und grafisch als Signalpeak dargestellt. In der Auswertung werden die Flächen unter den Peaks bestimmt, die als Maß der vier SARA-Fraktionen in einer Bitumenlösung stehen.

Die durch den Flammenionisationsdetektor registrierte Ionenintensität [mV] wird im Chromatogramm auf der Ordinate abgetragen. Die Abszisse gibt den zeitlichen Verlauf [min] der chromatografischen Trennung wieder. Deutlich sichtbar werden die Peaks der vier Fraktionen.

Im Rahmen dieses Projekts werden chromatografische Analysen an zwei Bitumenvarianten (50/70, 25/55-55 A) jeweils in drei unterschiedlichen Zuständen (frisch, gealtert, DSR-ermüdet) analysiert.

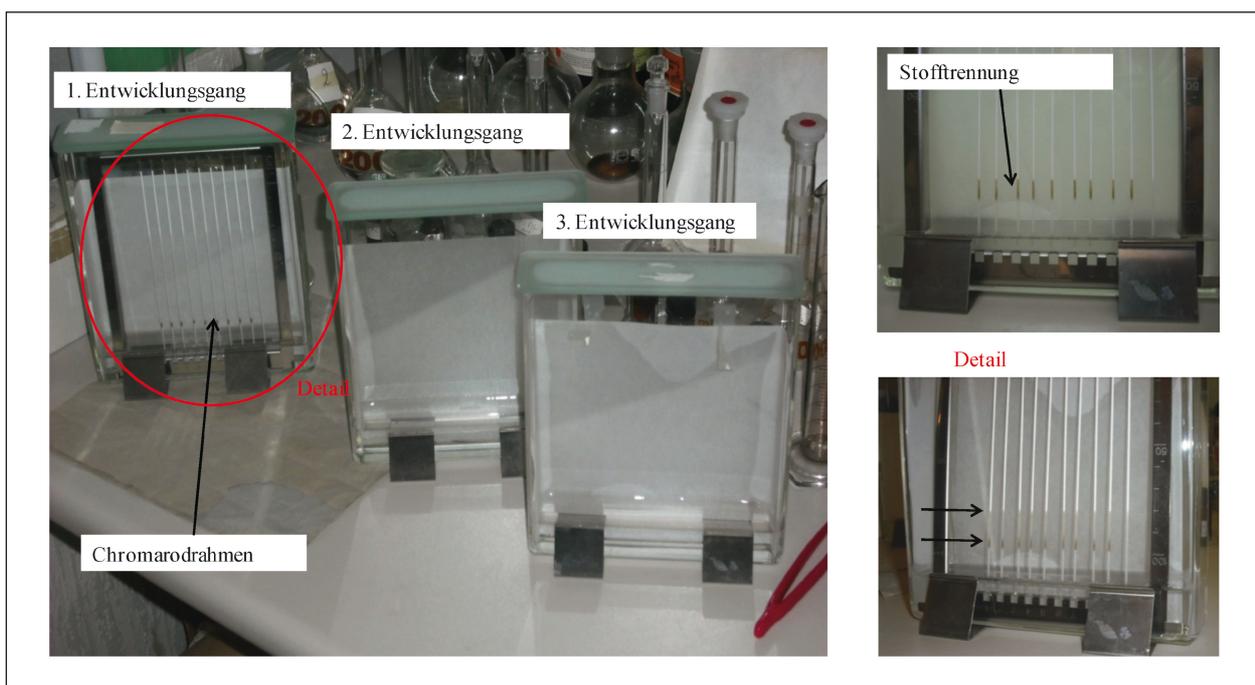


Bild 16: Entwicklungsgänge bei der chromatografischen Stoffaufreinigung

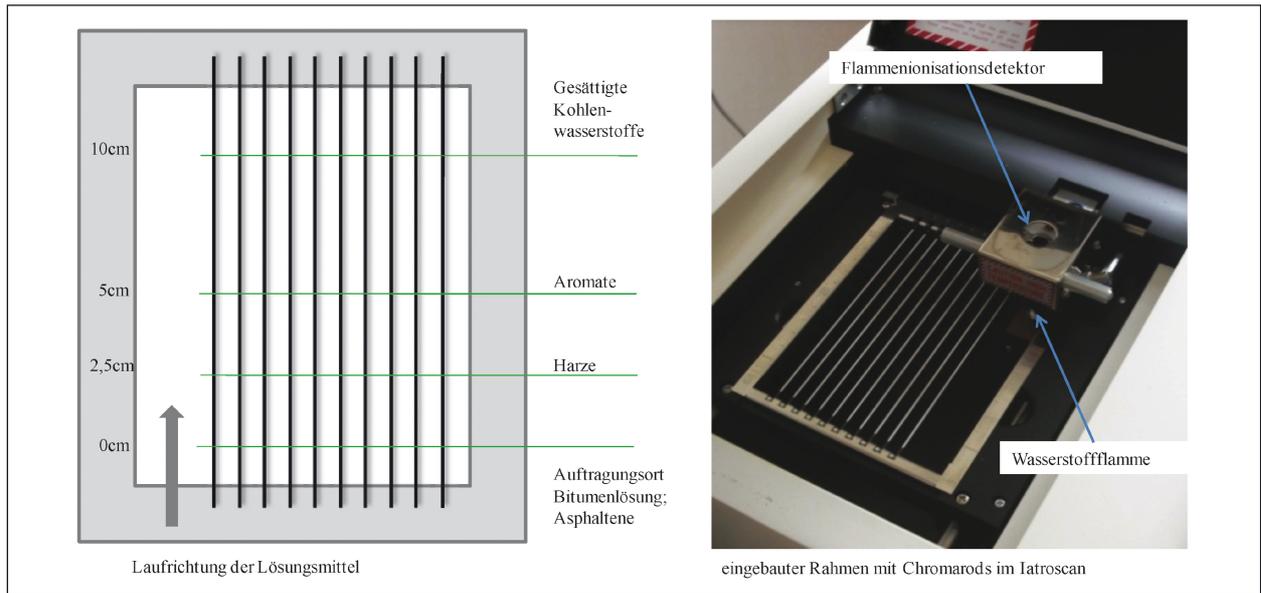


Bild 17: Prinzipskizze Chromarods nach den 3 Entwicklungsstufen

3.2.5 Spektroskopische Analyse

Durch die Infrarotspektroskopie kann Bitumen auf molekularer Ebene untersucht werden. Hierbei werden Transmissionsspektren ermittelt, die die Lichtdurchlässigkeit einer Probe im Infrarotbereich wiedergeben. Es lassen sich hiermit Veränderungen auf molekularer Ebene durch Unterschiede in der Transmission bzw. Absorption vor und nach einer Beanspruchung mittels Transmissionsspektren darstellen.

Die infrarotspektroskopischen Analysen wurden mit einem Fourier-Transformations-IR-Spektrometer durchgeführt. Dieses Spektrometer besteht aus einer Infrarotquelle (Global), Interferometerkammer, Probenkammer, Detektorkammer sowie Computertechnik (Bild 18).

Das Prinzip der Ermittlung der Transmissionsspektren beruht darauf, dass das Interferometer die Infrarotstrahlung aufgrund seines Aufbaus, bestehend aus einem festen und beweglichen Spiegel sowie Strahlteilern, in zwei Teilstrahlen trennt. Diese durchstrahlen einen Kristall. Messungen im Spektralbereich der Wellenzahlen 300 bis 8.000 cm^{-1} erfolgen hier mittels Global (Lichtquelle aus Siliziumcarbid) und KBr-(Karbomit) Strahlteiler. Durch die Technologie der abgeschwächten Totalreflexion (ATR-Technologie) werden infrarotspektroskopische Untersuchungen an Bitumenproben im festen Zustand möglich. Die Probe wird dabei von den beiden Infrarotteilstrahlen oberflächennah ($\sim 1 \mu\text{m}$) durchstrahlt (Bild 19).

Durch die kontinuierliche Verschiebung des einen Spiegels kommt es zu einer Phasenverschiebung der Lichtwellen beider Teillichtstrahlen. „Beide Wellen interferieren (überlagern sich konstruktiv oder destruktiv) zu einer resultierenden Welle“ (SETZ, 2005), die im Detektor zusammengeführt und dort als Interferogramm dargestellt wird.

Ein Interferogramm zeigt die vom Detektor gemessene Strahlungsintensität des Infrarotlichts und wird als Funktion der Zeit proportional zur Verschiebung des Spiegels dargestellt (SETZ, 2005).

Mittels Fourier-Transformation (FT) ist es möglich, das zeitabhängige Interferogramm in ein frequenzabhängiges Spektrum, das Einkanalspektrum, zu überführen.

Das Einkanalspektrum enthält äußere Informationen wie beispielsweise aus Lichtquelle, Detektor oder optischen Elementen. Um Transmissionsspektren einer Probe ohne äußere Einflüsse zu erhalten, ist das Verhältnis eines Einkanalspektrums mit Probe zu einem Einkanalspektrum ohne Probe (Hintergrundmessung) zu bilden:

T Transmission [-]

I Einkanalspektrum Probe

I_0 Einkanalspektrum Leermessung (Hintergrund)

$$T = \frac{I}{I_0} \cdot 100 [\%]$$

Gl. 9

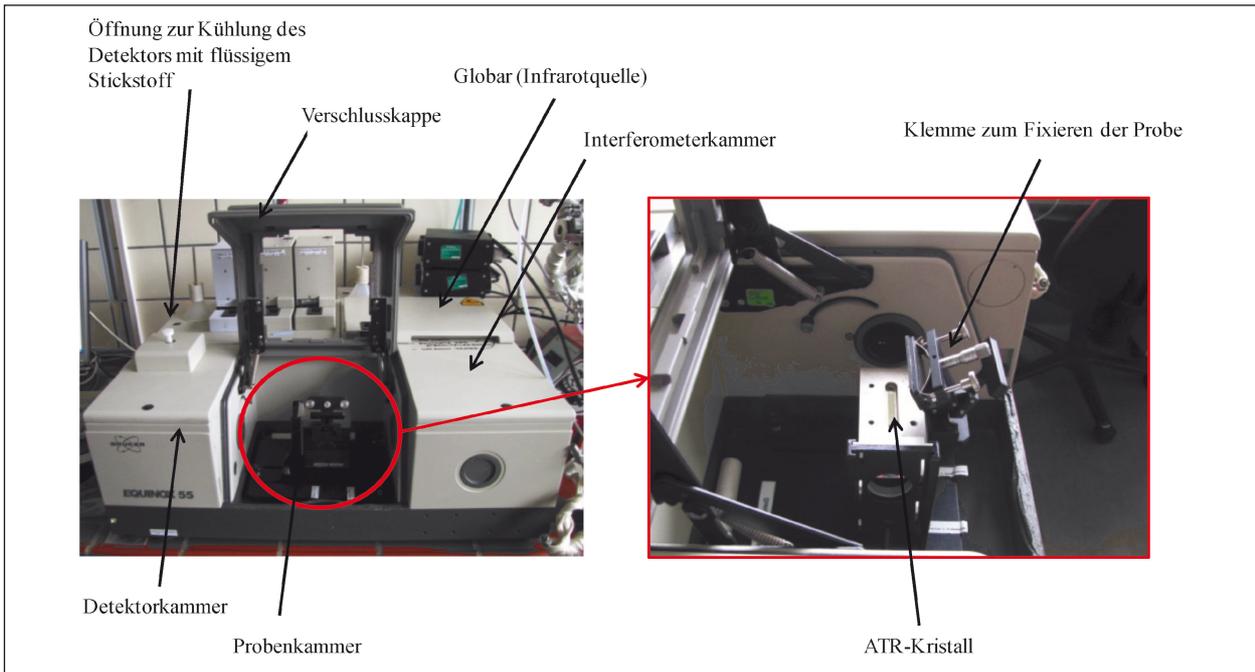


Bild 18: Fourier-Transformations-IR-Spektrometer Equinox 55, Fa. Bruker Optik

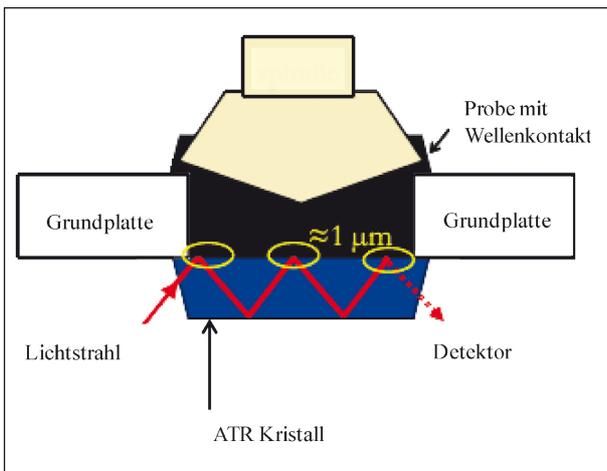


Bild 19: Funktionsprinzip einer ATR-Messung (van den BERGH, 2011)

Das Transmissionsspektrum zeigt die am Detektor registrierte Signalintensität des Infrarotlichts als Funktion der Wellenzahl. Das Transmissionsspektrum einer Probe zeigt die Lichtdurchlässigkeit, also das am Detektor registrierte Licht, in Abhängigkeit von der Wellenzahl, die aussagt, „wie viele Wellen der Infrarotstrahlung auf einen Zentimeter“ vorzufinden sind (HESSE et al., 2012). Die Wellenzahl errechnet sich aus:

$$\tilde{\nu} = \frac{1}{\lambda} \left[\frac{1}{\text{cm}} \right] \quad \text{Gl. 10}$$

$\tilde{\nu}$ Wellenzahl [cm^{-1}]

λ Wellenlänge [cm]

Die Lage der Banden ist abhängig von der Atommasse und der Bindungsstärke der Moleküle (SETZ, 2005; HESSE et al., 2012; BUDDRUS, 2003). Sie entstehen durch Molekülanregungen aufgrund von Schwingungen. An diesen Stellen wird das Licht von der Probe absorbiert und Moleküle zu Schwingungen angeregt.

Es gibt zwei Schwingungsformen von Molekülen. Zum einen Valenzschwingungen (Streckschwingungen) oberhalb einer Wellenzahl $\tilde{\nu} = 1.500 \text{ cm}^{-1}$, bei denen sich die Atomabstände ändern, sowie Deformationsschwingungen mit Winkeländerungen zwischen den Atomen im Bereich unterhalb von $\tilde{\nu} = 1.500 \text{ cm}^{-1}$. Dieser Bereich mit einer Vielzahl von Absorptionsbanden im Spektrum wird auch als Fingerprintbereich bezeichnet und ist für ein Molekül charakteristisch (SETZ, 2005).

Die Schwingungsfreiheitsgrade berechnen sich in Abhängigkeit der Gesamtatomanzahl N aus (HESSE et al., 2012, BUDDRUS, 2003):

$$n = 3N - 6 \text{ für nicht-lineare Moleküle} \quad \text{Gl. 11}$$

Die mögliche Schwingungsanzahl für lineare Moleküle berechnet sich aus

$$n = 3N - 5 \quad \text{Gl. 12}$$

Voraussetzungen für Absorptionsbanden im Infrarot-Licht sind auftretende Dipolmomentänderungen während Molekülschwingungen. „In symmetrischen Molekülen sind Schwingungen, die symmetrisch zum Symmetriezentrum erfolgen, IR-inaktiv (keine Dipolmomentänderung) [...]“ (HESSE et al., 2012). Antisymmetrische Schwingungen im Bezug auf das Symmetriezentrum sind IR-aktiv. „Solch ein Fall liegt z. B. vor, wenn zwei Atome mit unterschiedlicher Elektronegativität gegeneinander schwingen“ (LEHMANN, 2010).

Des Weiteren kann festgehalten werden, dass hohe Atommassen Infrarot-Licht bei niedrigen Wellenzahlen absorbieren und umgekehrt (Tabelle 2).

Tabelle 3 stellt jeweils die drei Bindungstypen von Kohlenstoffverbindungen und dessen absorbierender Wellenzahlbereich dar. Je höher die Bindungsanzahl ist, desto größer wird die Wellenzahl bei der die Moleküle in Schwingung versetzt werden. Dies liegt an der höheren Bindungsenergie einer Mehrfachbindung gegenüber einer Einfach-

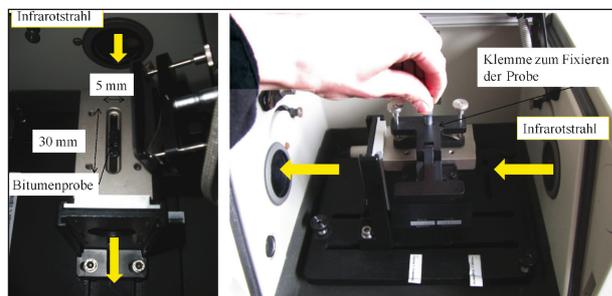


Bild 20: Bitumenprobe im ATR-Block

bindung. Folglich ist ein höherer Energieeintrag über hohe Wellenzahlen notwendig um diese Bindungen zum Schwingen zu bringen (BUDDRUS, 2003).

Es werden im Rahmen dieses Projekts spektroskopische Analysen an zwei Bitumenvarianten (50/70; 25/55-55 A) jeweils in drei unterschiedlichen Zuständen (frisch, gealtert, DSR-ermüdet) analysiert.

3.2.6 Ermüdungs-Healing-Prüfungen

Folgende drei Versuchstypen werden für Bitumen hinsichtlich Belastung und Lastpause unterschieden. Versuchstyp 1 dient als Referenz (kein Healing). Der Versuchstyp 3 wird zur Bewertung des Einflusses der Lastpause auf die Healing-Eigenschaften herangezogen (Versuchstyp 2 ist für Asphaltproben reserviert).

Versuchstyp 1: Ermüdungsversuch

Die zyklisch-dynamische Beanspruchung erfolgt kontinuierlich ohne Lastpause bis zum Versagen des Probekörpers (Bild 21).

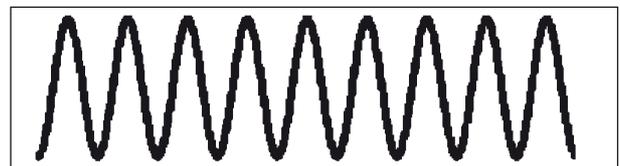


Bild 21: Prinzip Versuchstyp 1: Beanspruchung ohne Lastpause (klassischer Ermüdungsversuch)

Bindung (C-X)	Wellenzahlbereich [cm ⁻¹]	Atommasse von X	Schwingungsform
C-Cl	~ 700	35	Deformationsschwingungen
C-H	~ 3.000	1	Valenzschwingungen

Tab. 2: Frequenzen von Grundschwingungen in Abhängigkeit der Atommasse (HESSE et al., 2012)

Molekülbindung	Wellenzahlbereich [cm ⁻¹]	Schwingungsform
Einfachbindungen (C-C, C-N, C-O)	800 – 1.300 (~1.000)	Deformationsschwingung
Doppelbindungen (C=C, C=N, C=O)	1.500 – 1.800 (~1.600)	Valenzschwingung
Dreifachbindungen (C≡C, C≡N)	2.000 – 2.300 (~2.200)	

Tab. 3: Schwingungsbereich wichtiger Molekülfragmente (nach BUDDRUS, 2003; HESSE et al., 2012)

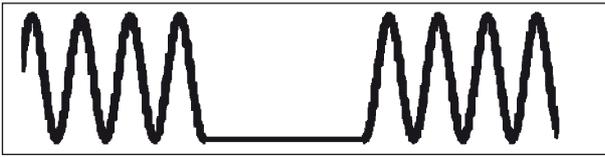


Bild 22: Prinzip Versuchstyp 3: Längere Lastpause zwischen zwei Belastungsphasen

Versuchstyp 3: Lastpause zwischen den Belastungsphasen

Die zyklisch-dynamische Beanspruchung erfolgt diskontinuierlich. Nach einer kontinuierlichen Belastungsphase erfolgt eine längere Lastpause (siehe Bild 22).

3.3 Prüfung von Asphalt

Zur Ansprache der Materialermüdung und der Auswirkung von Lastpausen auf das Ermüdungsverhalten von Asphalt werden im Rahmen dieses Projekts einaxiale zyklisch-dynamische Zugprüfungen an prismenförmigen Asphaltprobekörpern durchgeführt. Dabei werden sowohl die zyklisch-dynamische Zugprüfung als auch die zyklisch-dynamische Zug-Druck-Wechsellastprüfung angewendet.

Die in den Straßenbaulaboren praktizierte Durchführung von einaxialen zyklisch-dynamischen Zugprüfungen zeigt Unterschiede hinsichtlich der me-

chanischen und steuerungstechnischen Konfiguration des Prüfsystems. Folgende Prüfsystemeigenschaften, welche die Auswahl des optimalen Prüfverfahrens zur Ansprache der Healing-Eigenschaften von Asphalt beeinflussen könnten, werden daher im Rahmen dieses Projekts näher untersucht: Prüfgerätetyp und Regelungstechnik, Lagerungsart des Prüfgestänges, Prüfquerschnitt des Probekörpers und Prüfsteuerung.

Die Durchführung von statischen Zugprüfungen an Asphaltproben hat sich früh im Projektverlauf als nicht zielführend erwiesen. Auf dieses Prüfverfahren wird daher nicht weiter eingegangen.

3.3.1 Mechanische Konfiguration des Prüfsystems

a) Prüfgerätetyp und Regelungstechnik

Folgende zwei Prüfgeräte werden im Rahmen dieses Projekts vergleichsweise eingesetzt: Eine servo-hydraulische Prüfmaschine (Bild 23, links) und eine elektromechanische Prüfmaschine (Bild 23, rechts).

Die wichtigsten Eigenschaften beider Gerätetypen sind in Tabelle 4 gegenübergestellt.

Die Steuerung der Beanspruchung erfolgt geräteabhängig entweder mittels servo-hydraulischer

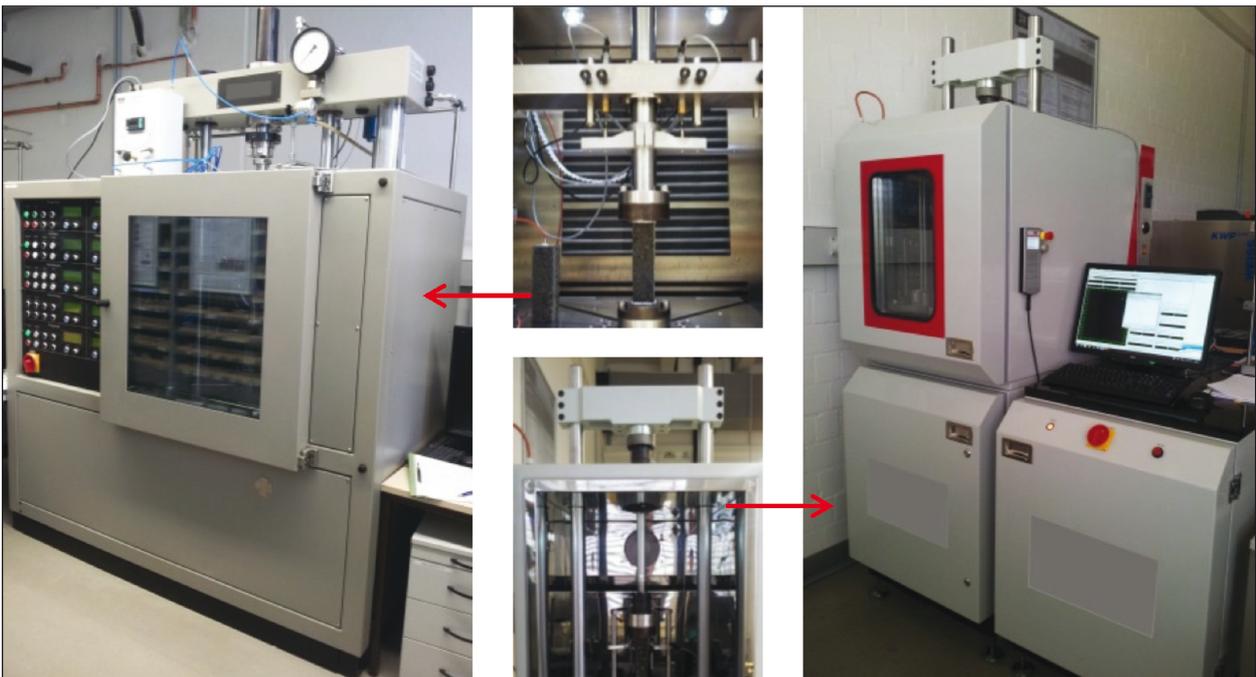


Bild 23: Für das Forschungsvorhaben eingesetzte dynamische Asphaltprüfmaschinen mit servo-hydraulischem Antrieb (links) und elektromechanischem Antrieb (rechts)

Eigenschaft	servo-hydraulische Maschine	elektromechanische Maschine
Antriebsart des Lastkolbens	hydraulisch	elektromechanisch
Regelungsart	kraft/weg	kraft/weg
max. Last [kN]	± 20	± 20
max. Prüffrequenz [Hz]	30	10
Temperierungsbereich der Klimakammer [°C]	- 25 bis +60	- 30 bis +70

Tab. 4: Eigenschaften der für das Forschungsvorhaben eingesetzten dynamischen Asphaltprüfmaschinen

Regelung oder mittels elektromechanischen Spindelantriebs.

b) Lagerungsart des Prüfgestänges

Die Kraftübertragung vom Prüfgestänge auf den Probekörper erfolgt über den Lastkolben und die Adapter, an die der jeweilige Probekörper geklebt ist (siehe Kapitel 4.3).



Bild 24: Gelenkig gelagertes Prüfgestänge

Manche Prüfgestänge sind mit einem Gelenk oberhalb des Adapters ausgeführt, das einen weitgehend zwängungsfreien Einbau des Asphaltprobekörpers ermöglicht (siehe Bild 24).

Im Rahmen des Projekts durchgeführte vergleichende kraftgeregelte Zug-Schwellprüfungen bei den Prüftemperaturen $T = 20\text{ °C}$ und $T = 0\text{ °C}$ zeigten, dass die Verwendung eines starren Prüfgestänges zu einer Reduktion der Prüfstreuung führt (vgl. Bild 25 und Bild 26 für eine Prüftemperatur von 20 °C bzw. Tabelle 5).

Die größere Prüfstreuung bei gelenkiger Lagerung ist auf eine während des Versuchs zunehmende Biegung des Probekörpers zurückzuführen. Die einaxiale Zugprüfung wird zu einer Biegeprüfung.

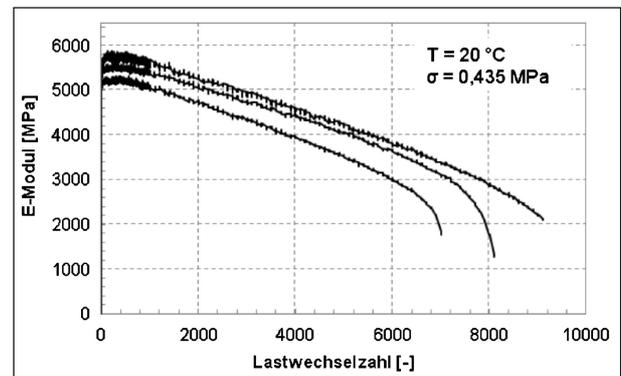


Bild 25: Kraftgeregelte Zug-Schwellprüfung mit gelenkig gelagertem Lastgestänge (Prüftemperatur 20 °C , Oberspannung $\sigma = 0,435\text{ MPa}$)

	mit gelenkig gelagertem Lastgestänge	mit starrem Lastgestänge
Lastwechselzahl N_{Makro} [-]	5.800 6.507 7.108	16.407 16.105 -
Mittelwert [-]	6.471,7	16.256,0
Standardabweichung [-]	654,72	213,55
Variationskoeffizient [%]	10,12	1,31

Tab. 5: Kraftgeregelte Zug-Schwellprüfung (Prüftemperatur 20 °C , Oberspannung $\sigma = 0,435\text{ MPa}$)

Dies wurde anhand von gekerbten Probekörpern nachgewiesen, wie nachfolgend erläutert.

Das Ermüdungsversagen bei einaxialen Zugversuchen tritt im schwächsten Prüfquerschnitt auf. Um

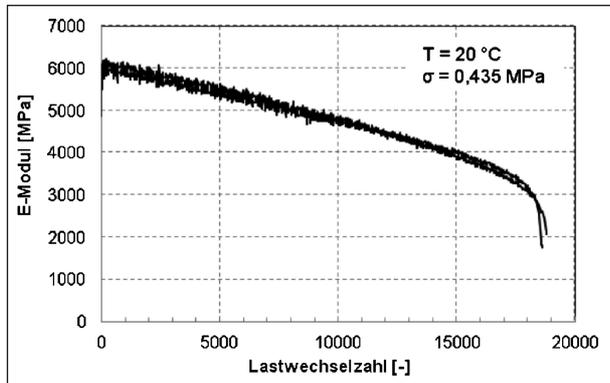


Bild 26: Kraftgeregelte Zug-Schwellprüfung mit starrem Lastgestänge (Prüf­temperatur 20 °C, Oberspannung $\sigma = 0,435$ MPa)

die Stelle des Bruchversagens über die Länge des Probekörpers zielsicher anzusteuern, bevorzugen manche Prüfinstitute den Probekörper vor der Prüfung zu kerben. Durch das Kerben wird eine Sollbruchstelle im Probekörper erzeugt, der kleinste Prüfquerschnitt ist somit der Bruchquerschnitt (Bild 27 links).

Mittels Dehnungsmessung und Vergleich der während der Prüfung zurückgelegten Vertikalwege der linken und rechten Seite kann die Probekörperbiegung anschaulich dargestellt werden (Bild 27 rechts).

Analog kann die Biegung mittels Einsatz der Methode der Photo-Elastizität nachgewiesen werden (Bild 28).

Im Rahmen dieses Projekts erfolgten alle weiteren Healing-Prüfungen unter Verwendung eines starr gelagerten Prüf­gestänges (ohne bzw. mit fixiertem Gelenk) an nicht gekerbten Probekörpern.

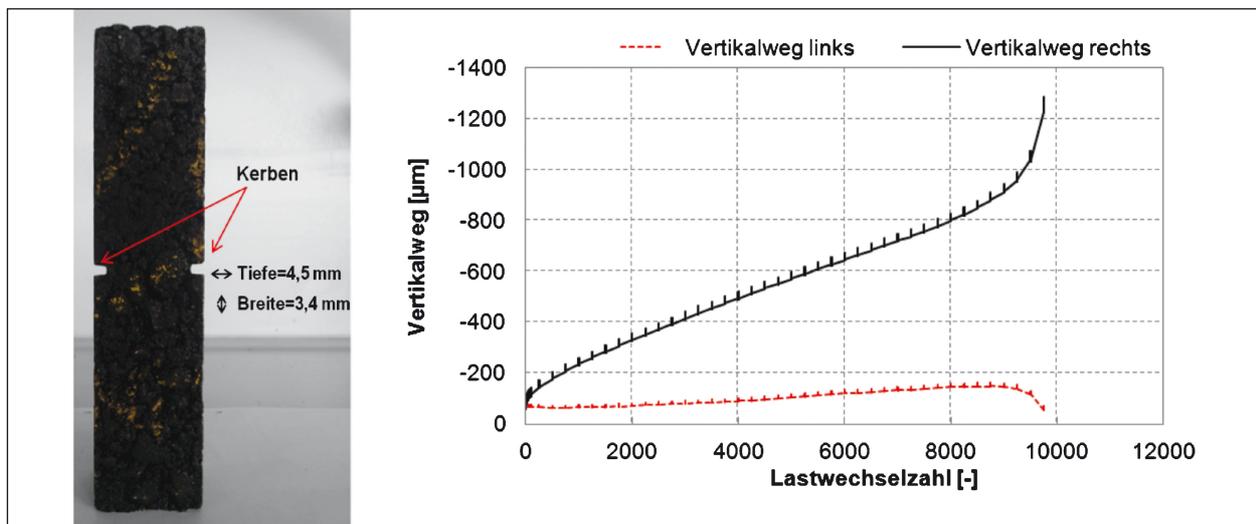


Bild 27: Reduktion des Prüfquerschnitts durch Kerben zur Festlegung der Sollbruchstelle (links); Nachweis der Biegung des gekerbten Probekörpers durch Vergleich der Vertikalwege an den gegenüberliegenden Probekörperseiten (rechts)

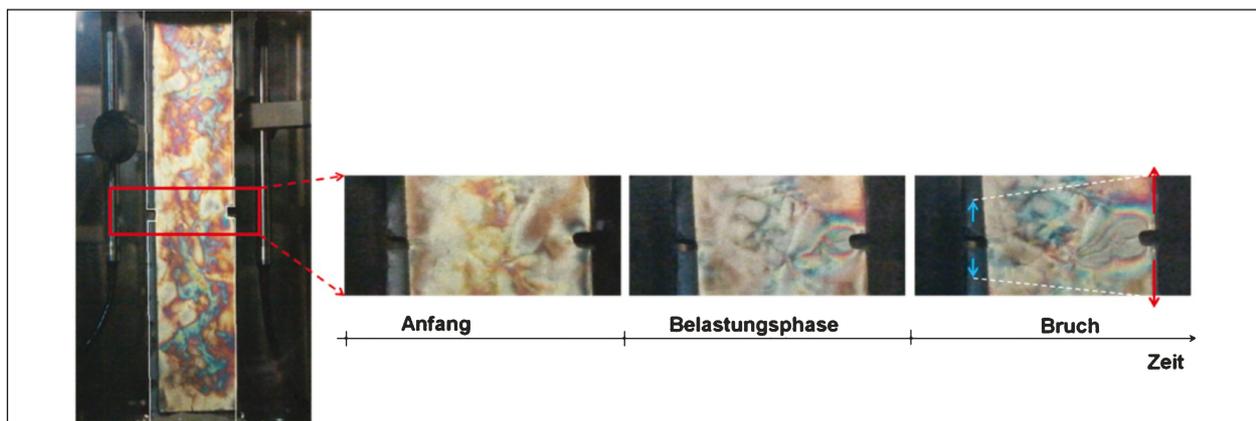


Bild 28: Nachweis der Biegung des gekerbten Probekörpers durch Einsatz der Methode der Photo-Elastizität

3.3.2 Prüfverfahren und Prüfbedingungen

Die einaxialen zyklisch-dynamischen Asphaltprüfungen werden in Form von Zug-Schwellprüfungen und Zug-Druck-Wechselastprüfungen durchgeführt. Zur Überprüfung der Prüfansätze erfolgen ergänzende Laborversuche mittels Spaltzug-Schwellprüfung und Vier-Punkt-Biegeprüfung (unter Verwendung einer servo-hydraulischen Prüfmaschine).

a) Zug-Schwellprüfung

Bei der Zug-Schwellprüfung schwingt die Amplitude der sinusförmigen Beanspruchung zwischen einer (geringen) unteren Zugbeanspruchung (positive Unterspannung) und einer oberen Zugbeanspruchung (positive Oberspannung), siehe Bild 29.

Während der Prüfung wird die Vertikalverformung des Probekörpers über zwei diametral angeordnete induktive Wegaufnehmer gemessen. Für jede Einzelschwingung werden 40 Messwerte aufgezeichnet.

Die Prüffrequenz beträgt konstant 10 Hz, also 10 Belastungsimpulse pro Sekunde.

Die Unterspannung bei kraftgeregelten Zug-Schwellprüfungen bei 20 °C beträgt konstant 0,035 MPa. Die Unterspannungen bei Prüfungen unterhalb von 20 °C werden in Abhängigkeit der zuvor im Abkühlversuch ermittelten kryogenen Spannung gewählt. Die Unterspannung ergibt sich für das verwendete Asphaltmischgut (AC 11 D S, 50/70) bei 0 °C zu 0,13 MPa.

Die Wahl der Oberspannung bei kraftgeregelten Zug-Schwellprüfungen bestimmt die Anzahl der ertragbaren Lastwechsel und damit die Dauer des Ermüdungsversuchs.

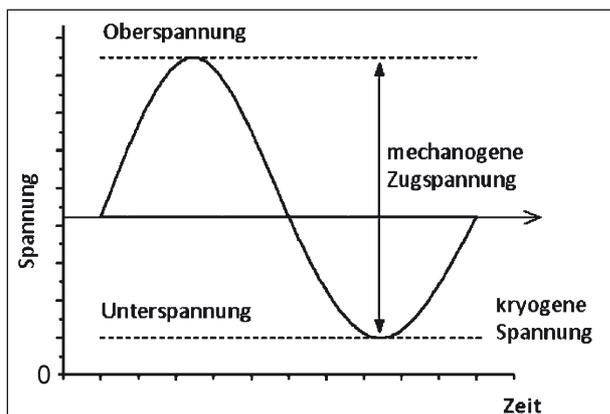


Bild 29: Prinzip der Zug-Schwellprüfung bei Kraftregelung

Um die Versuche (insbesondere bei diskontinuierlichen Ermüdungsversuchen) auf eine akzeptable Dauer zu beschränken, wird die Oberspannung im Rahmen dieses Projekts in Abhängigkeit der Prüftemperatur so festgelegt, dass die resultierende Anzahl an Lastwechseln bis zum Ermüdungsversagen bei kontinuierlicher Ermüdungsprüfung $N_{\text{Makro}} \leq 10.000$ beträgt.

b) Zug-Druck-Wechselastprüfung

Dehnungsmessungen in Straßenbefestigungen zeigen, dass es infolge der Radüberrollung zu einer dominanten Zugbeanspruchung an der Unterseite des Asphaltpakets kommt, die jeweils vor- und nachlaufend von einer Druckwelle begleitet wird (Bild 30). Die Druckbeanspruchung beträgt an der Unterseite des Asphaltpakets in etwa 20 bis 25 cm Tiefe (von der Straßenoberfläche) rund 15 bis 20 % der Amplitude der Zug-Druck-Beanspruchung.

Mit abnehmender Tiefe wächst die Druckbeanspruchung an und überschreitet schließlich die Größe der Zugspannung (Bild 31).

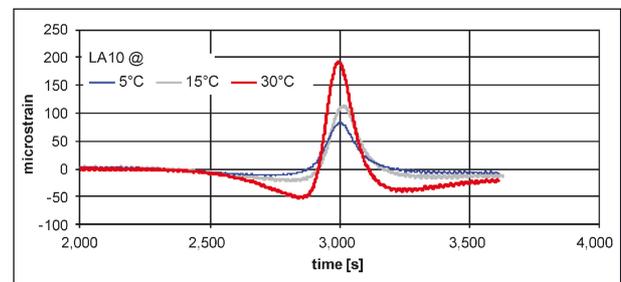


Bild 30: Ergebnis von Dehnungsmessungen an einem realen Straßenaufbau an der Unterseite der Asphalttragschicht: in Lastachse, 22 cm Tiefe, 11 km/h Geschwindigkeit, 115 kN Achslast, Einzelachse mit Einzelbereifung und 8 Bar Reifeninnendruck (WISTUBA, 2004)

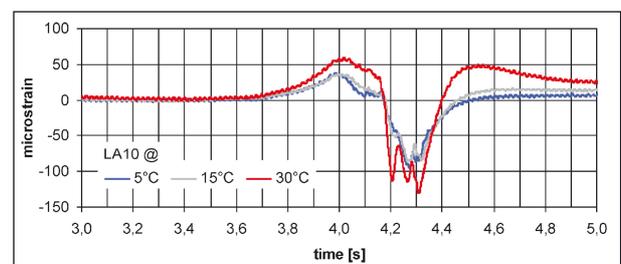


Bild 31: Ergebnis von Dehnungsmessungen an einem realen Straßenaufbau an der Unterseite der Asphaltdeckschicht: in Lastachse, 4 cm Tiefe, 11 km/h Geschwindigkeit, 115 kN Achslast, Einzelachse mit Einzelbereifung und 8 Bar Reifeninnendruck (WISTUBA, 2004; WISTUBA & PERRET, 2004)

Bei der Zug-Druck-Wechselastprüfung wird diese Situation nachgebildet: Die Amplitude der sinusförmigen Beanspruchung schwingt zwischen einer geringen Druckbeanspruchung und einer oberen Zugbeanspruchung. Die Beanspruchung wechselt damit nach jedem Zyklus sein Vorzeichen (Wechselast), siehe Bild 32.

c) Spaltzug-Schwellprüfung

Bei der Spaltzug-Schwellprüfung wird über zwei diametral angeordnete Lasteinleitungsschienen (dynamisch) eine Druckspannung auf einen zylindrischen Asphaltprobekörper aufgebracht, wodurch sich im Probekörper näherungsweise ein 2-dimensionaler inhomogener Spannungszustand bildet (siehe Bild 33). Vertikal wirken Druckspan-

nungen (x), horizontal, senkrecht zu den Lasteinleitungsschienen Zugspannungen (y), die in Probekörpermitte näherungsweise einen konstanten Betrag aufweisen. Es wirken keine Horizontalspannungen in z -Richtung.

Bild 34 zeigt den für Spaltzug-Schwellprüfungen gemäß AL Sp 2009 bzw. DIN EN 12697-24 verwendeten Prüfrahen. Für die Messung der horizontalen Verformung des zylindrischen Probekörpers sind zwei induktive Wegaufnehmer angebracht. Die Wegaufnehmer sind an einem biegesteifen Messrahmen befestigt, welcher mit 4 Klemmschrauben am Probekörper befestigt ist.

Die Probekörper werden sinusförmig kraftgeregelt bei einer Frequenz von 10 Hz belastet.

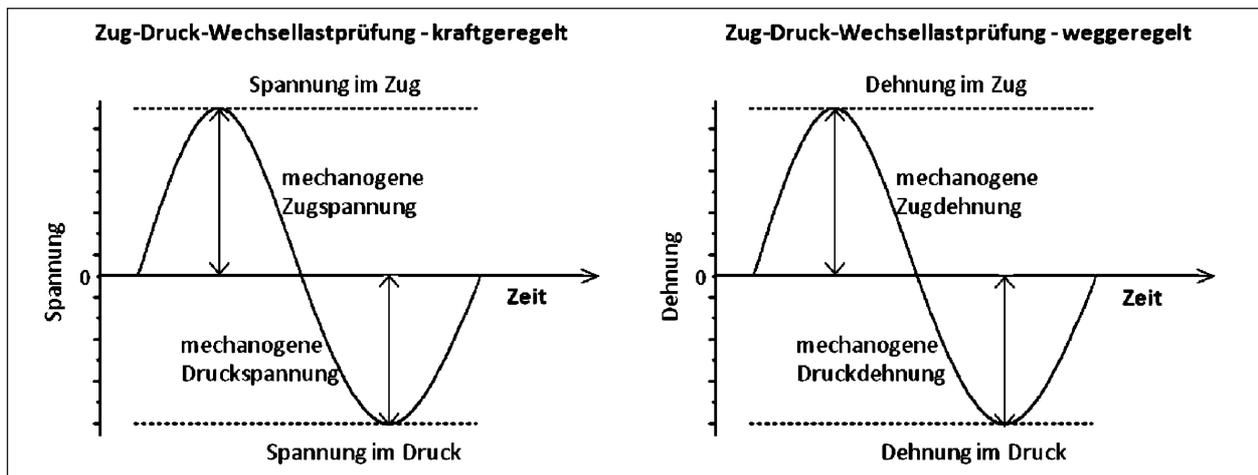


Bild 32: Prinzip der Zug-Druck-Wechselastprüfung bei Kraftregelung (links) und Wegregelung (rechts)

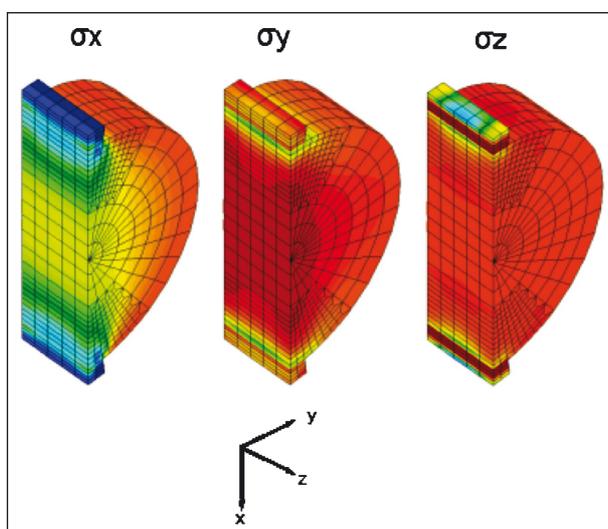


Bild 33: Spannungszustand im zylindrischen Probekörper während einer Spaltzug-Schwellprüfung: rot: Zugspannung, blau: Druckspannung, orange: keine Spannungsbeanspruchung (OESER, 2004)

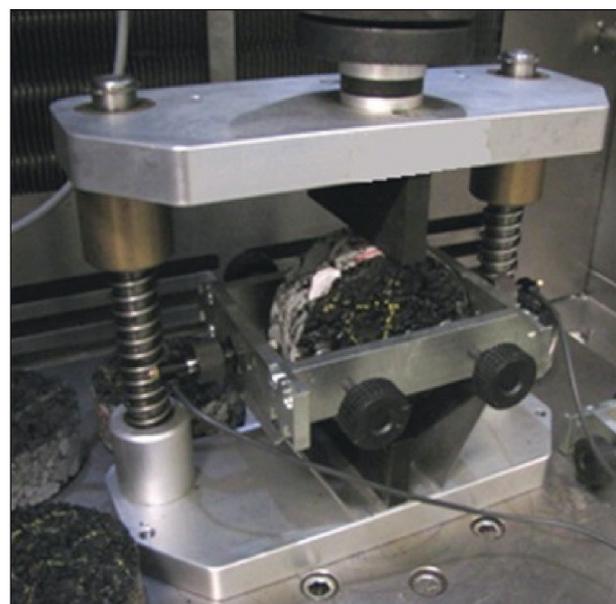


Bild 34: Prüfeinsatz für Spaltzug-Schwellprüfungen

d) Vier-Punkt-Biegeprüfung

In der Vier-Punkt-Biegeprüfung wird ein prismatischer Asphalt-Probekörper, dessen Länge mindestens dem sechsfachen des größten Wertes der Höhe und Breite betragen muss, an zwei äußeren Auflagern gelenkig gelagert, während über zwei innere Belastungspunkte eine vertikale Verschiebung sinusförmig eingetragen wird. Diese bewirkt an Ober- und Unterseite des Probekörpers horizontale Biegedehnungen, die zwischen den inneren Auflagern konstant sind (vgl. Bild 35). Infolge der sinusförmigen Biegebeanspruchung wechseln sich Biegezug- und Biegedruckspannungen ab. Die Biegebeanspruchung nimmt zur horizontalen Mittelachse des Probekörpers hin ab, in der sich ein unbeanspruchter Bereich ausbildet.

Bild 36 zeigt den Prüfeinsatz, der für die Vier-Punkt-Biegeprüfungen im Rahmen dieses Projekts eingesetzt wird. Dieser Prüfeinsatz erfüllt sämtliche Bedingungen der entsprechenden Europäischen Norm und ist hinsichtlich der zwängungsfreien Probekörperlagerung optimiert. Die Versuche werden in Wegregelung durchgeführt.

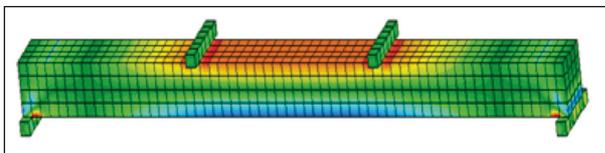


Bild 35: Horizontale Normalspannung im Probekörper während eines Vier-Punkt-Biegeversuchs (rot: Druckspannung, blau: Zugspannung, grün: keine Horizontalspannung)



Bild 36: Prüfeinsatz für Vier-Punkt-Biegeprüfung

3.3.3 Ermüdungs-Healing-Prüfungen: Versuchstypen und Lastpausendefinitionen

a) Versuchstypen

Folgende drei Versuchstypen werden hinsichtlich Belastung und Lastpause unterschieden. Versuchstyp 1 dient als Referenz (kein Healing). Die Versuchstypen 2 und 3 werden zur Bewertung des Einflusses der Lastpause auf die Healing-Eigenschaften herangezogen.

- Versuchstyp 1: Ermüdungsversuch

Die zyklisch-dynamische Beanspruchung erfolgt kontinuierlich ohne Lastpause bis zum Versagen des Probekörpers (siehe Bild 37; vgl. Bild 21 für Bitumen).

- Versuchstyp 2: Lastpause nach jedem Lastimpuls

Die zyklisch-dynamische Beanspruchung erfolgt diskontinuierlich. Nach jedem Lastimpuls erfolgt eine Lastpause (siehe Bild 38).

- Versuchstyp 3: Lastpause zwischen den Belastungsphasen

Die zyklisch-dynamische Beanspruchung erfolgt diskontinuierlich. Nach einer kontinuierlichen Belastungsphase erfolgt eine längere Lastpause (siehe Bild 39; vgl. Bild 22 für Bitumen).

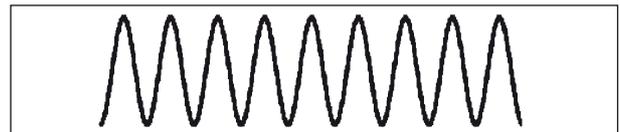


Bild 37: Prinzip Versuchstyp 1: Beanspruchung ohne Lastpause („klassischer“ Ermüdungsversuch)



Bild 38: Prinzip Versuchstyp 2: Lastpause nach jedem Lastimpuls



Bild 39: Prinzip Versuchstyp 3: Längere Lastpause zwischen zwei Belastungsphasen

b) Lastpausendefinitionen

Die an realen Straßenquerschnitten auftretenden Zeitlücken der Schwerverkehrsbelastung sind von der Verkehrszusammensetzung abhängig. Die Verteilung der Zeitlücken zwischen den Achsen und zwischen den Fahrzeugen wird von der Verkehrsstärke, den Fahrzeugtypen (Achskonfiguration) und der Geschwindigkeit bestimmt (Bild 40).

An Messstellen zur Verkehrszählung mit entsprechender Ausrüstung zur automatischen Erfassung des Schwerverkehrs (Induktionsschleife, Achslastwaage) können die Zeitabstände zwischen den Achsübergängen erfasst werden (mit einer Auflösung von ca. 0,01 m). Daraus kann die Verteilung der Zeitlücken zwischen den Schwerverfahrzeugen und den Achsen ermittelt werden.

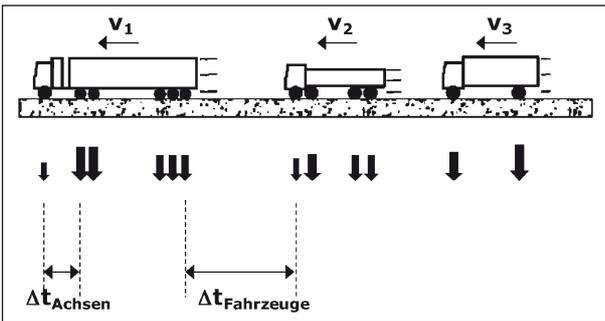


Bild 40: Zeitlücken Δt zwischen Einzelachsen und zwischen Fahrzeugen (schematisch)

Aus den in Bild 41 bis Bild 43 dargestellten Zeitlückenverteilungen für unterschiedliche Verkehrsstärken an einem repräsentativen Autobahnquerschnitt können die kürzesten Dauern von Zeitlücken abgeschätzt werden: Zeitlücken zwischen zwei Schwerverfahrzeugen dauern mindestens 0,5 s, zwischen zwei Einzelachsen mindestens 0,1 s und zwischen zwei Tripelachsen mindestens 1,5 s. Rund jede zweite Zeitlücke zwischen zwei Schwerverfahrzeugen dauert mindestens 4 s, zwischen zwei Einzelachsen mindestens 0,5 s und zwischen zwei Tripelachsen mindestens 5 s.

Die längsten Zeitlücken des Schwerverkehrs treten während der Nacht bzw. an Wochenenden auf. Eine Zeitlücke von 8 h entspricht einer Dauer von rund 30.000 s.

Zur Ansprache von Healing-Eigenschaften im Labor wird die Lastpausendauer in Anlehnung an die in der Realität vorkommenden Zeitlücken gewählt.

Als minimale Lastpause zwischen einzelnen Belastungsimpulsen wird eine Dauer von 0,5 s festgelegt, entsprechend einer Summenhäufigkeit von 50 % aller Zeitlücken zwischen zwei Einzelachsen (Bild 44 links).

Als maximale Lastpause zwischen zwei Belastungsphasen (mit einer Vielzahl von Belastungsimpulsen) wird eine Dauer von 30.000 s gewählt, entsprechend einer Unterbrechung des Schwerverkehrs von 8 h (Bild 44 rechts).

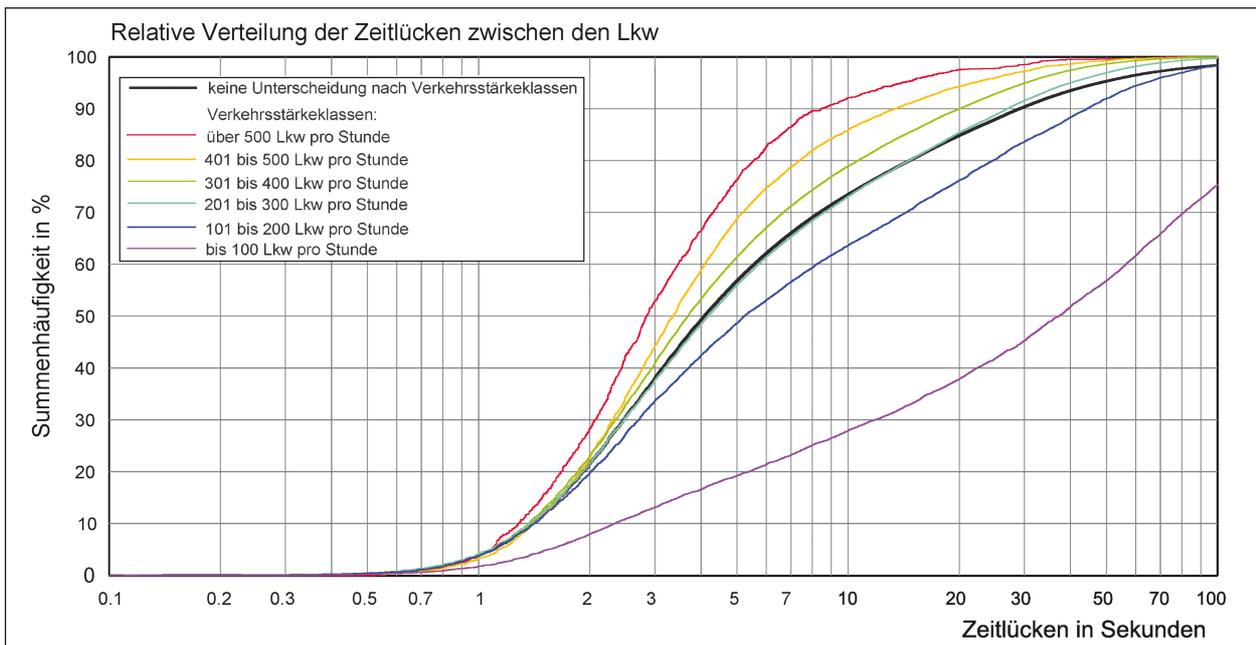


Bild 41: Relative Verteilung der Zeitlücken zwischen den Schwerverfahrzeugen (A12 Inntalautobahn, km 53.1 Vomp, re FS, beide Ri, Werktag) (WISTUBA et al., 2007)

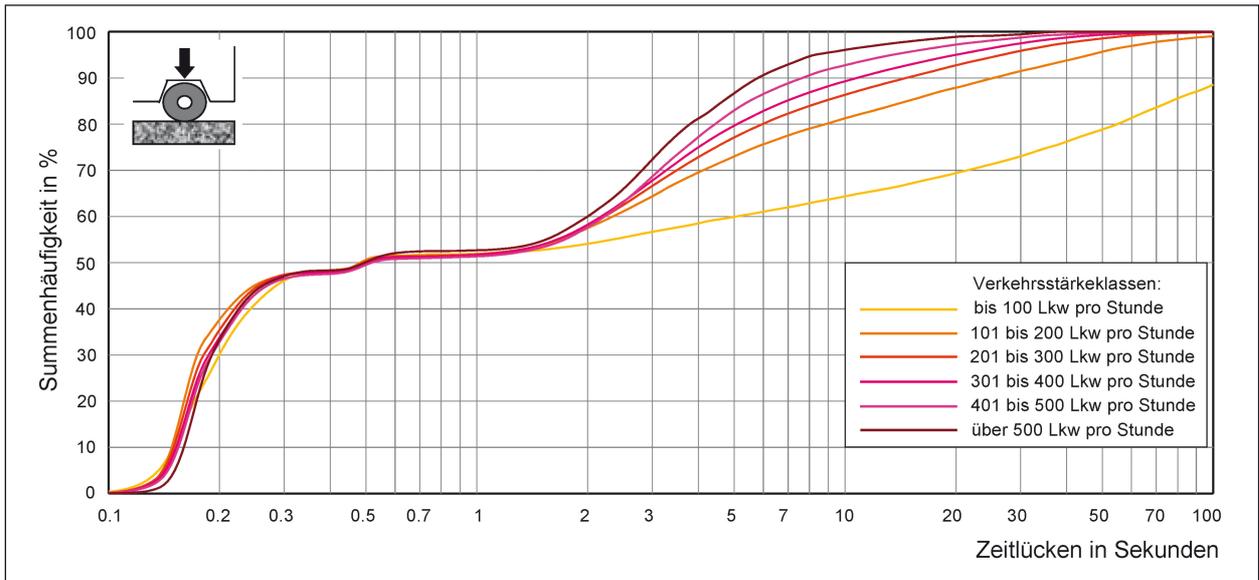


Bild 42: Relative Verteilung der Zeitlücken zwischen Einzelachsen (A 12 Inntalautobahn, km 53.1 Vomp, re FS, beide Ri, Werktag; Dichte durch Splinefunktionen angepasst) (WISTUBA et al., 2007)

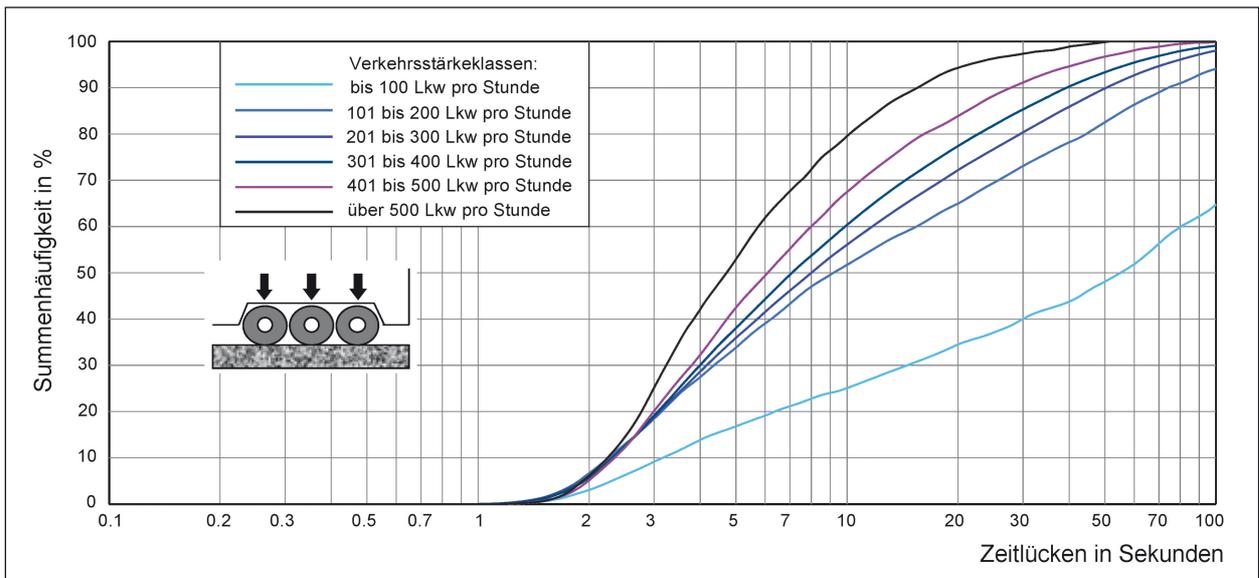


Bild 43: Relative Verteilung der Zeitlücken zwischen Tripelachsen (A 12 Inntalautobahn, km 53.1 Vomp, re FS, beide Ri, Werktag; Dichte durch Splinefunktionen angepasst) (WISTUBA et al., 2007)

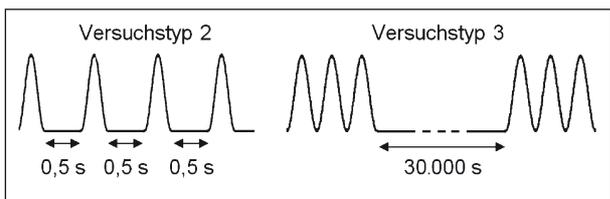


Bild 44: Minimale und maximale Lastpausendauer für Laborprüfungen in Abhängigkeit vom Versuchstyp

Bestimmung der Lastpausendauer bei Versuchstyp 2

Entsprechend der obigen Angaben werden für den Versuchstyp 2 zwei Lastpausen geringer Dauer festgelegt: LP2a = 0,5 s und LP2b = 1,0 s.

Zeitpunkt der eingebrachten Lastpause bei Versuchstyp 3

Der Zeitpunkt, an dem die Ermüdungsprüfung nach Versuchstyp 3 durch eine Lastpause unterbrochen wird, erfolgt in Abhängigkeit vom Schädigungsgrad,

ausgedrückt durch die Energy Ratio (ER). Der Probekörper wird bis zum Erreichen von 50 % der maximalen Energy Ratio belastet. Anschließend folgt eine Lastpause, in der sich der Probekörper zwangungsfrei erholen kann. Danach wird die kontinuierliche Belastung bis zum Versagen des Probekörpers fortgesetzt. Das Vorgehen für die Ermittlung des Zeitpunktes, an dem 50 % der maximalen Energy Ratio erreicht sind, ist in Bild 48 schematisch dargestellt.

Die Prüfung eines Probekörpers bei kontinuierlicher Ermüdung (Versuchstyp 1) liefert als Ergebnis u. a. den Verlauf der Energy Ratio über die Anzahl der Lastwechsel (vgl. Bild 45a).

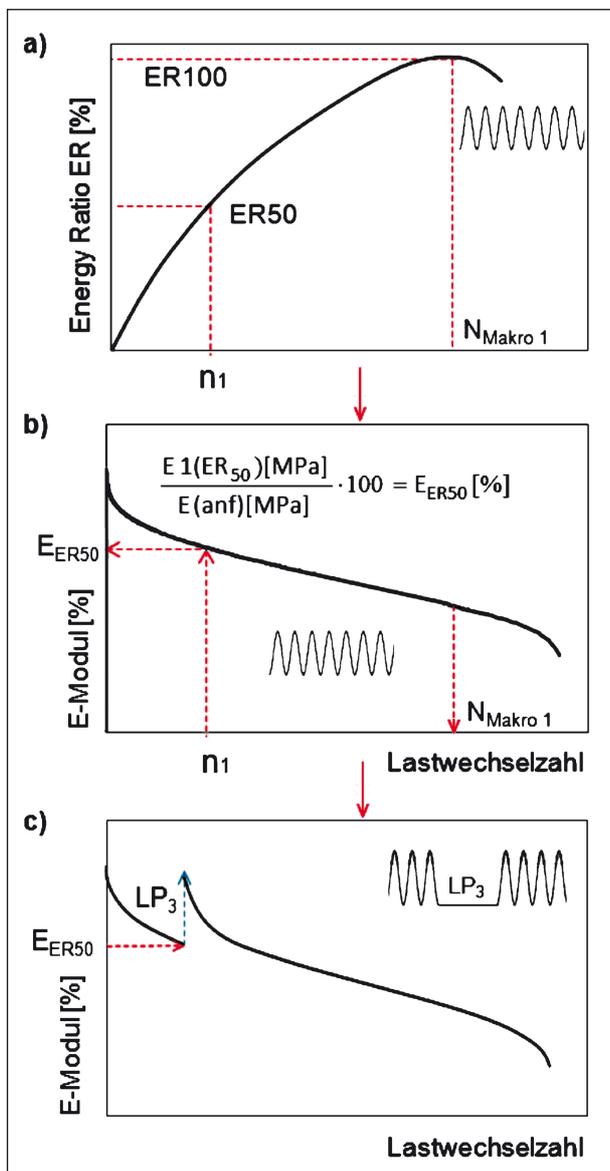


Bild 45: Ermittlung des Zeitpunktes für das Einsetzen einer Lastpause bei Versuchstyp 3 in Abhängigkeit von Versuchstyp 1 (ohne Lastpause) bei E_{ER50}

Bezogen auf das Maximum der ER (N_{Makro1}) lässt sich diejenige Anzahl der Lastwechsel (n_1) ableiten, bei der die ER einen Wert von 50 % des Maximums (ER_{50}) erreicht hat (siehe Bild 45a). Der korrespondierende Steifigkeitsmodul für Asphalt E_{ER50} (bzw. analog für Bitumen G_{ER50}) ist in Bild 45b dargestellt. Daraus wird der Zeitpunkt für das Einsetzen der Lastpause beim Versuchstyp 3 festgelegt. Sobald der Modul auf E_{ER50} (bzw. G_{ER50}) abgefallen ist, setzt die Lastpause ein (siehe Bild 45c).

Entsprechend dem dargelegten Vorgehen werden weitere Prüfungen durchgeführt, bei dem die Lastpause bei 75 % der maximalen ER liegt (E_{ER75}).

Bestimmung der Lastpausendauer bei Versuchstyp 3

Für den Versuchstyp 3 werden drei auf unterschiedliche Art ermittelte Lastpausendauer angewendet (LP3a, LP3b, LP3c).

- **Lastpausendauer LP3a**

Die Lastpausendauer LP3a für den Versuchstyp 3 wird in Abhängigkeit von den Ergebnissen des Versuchstyps 2 mit 0,5 s Lastpausendauer (LP2a) gewählt. Es werden die Lastpausen bei Versuchstyp 2 bis zum Erreichen von 50 % Energy Ratio addiert (siehe Bild 46).

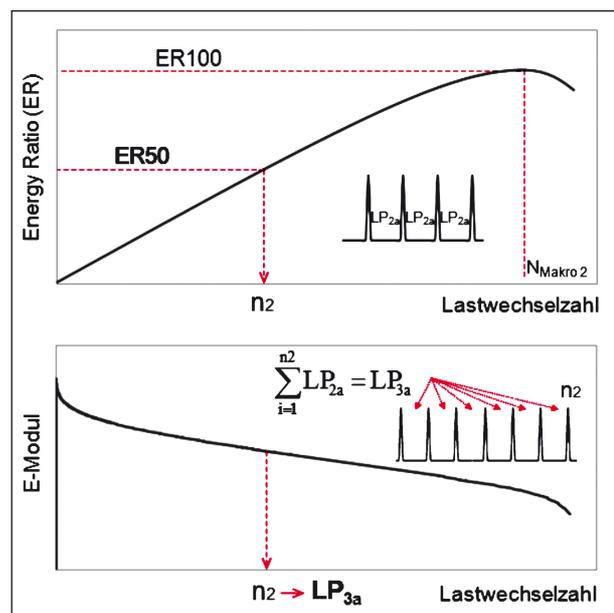


Bild 46: Ermittlung der Lastpausendauer LP3a für Versuchstyp 3 aus Ergebnissen des Versuchstyps 2 mit Lastpausendauer $LP_{2a} = 0,5$ s

• Lastpausendauer LP3b

Sowohl bei der Zug-Schwellprüfung, als auch bei der Zug-Druck-Wechsellastprüfung wird der Probekörper axial bzw. vertikal gedehnt. Bei zwängungsfreier Unterbrechung der Ermüdungsprüfung in Form einer Lastpause stellt sich der elastische Anteil Teil dieser Dehnung spontan zurück und der viskose Anteil zeitverzögert. Der plastische Anteil

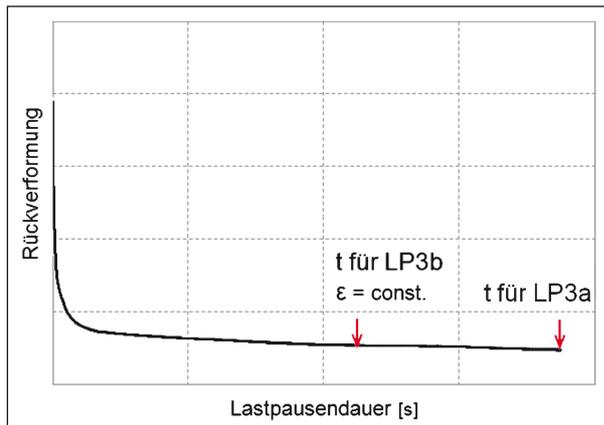


Bild 47: Ermittlung der Lastpausendauer LP3b für Versuchstyp 3 anhand der Rückverformung während der Lastpause bei Versuchstyp 3 mit Lastpausendauer LP3a

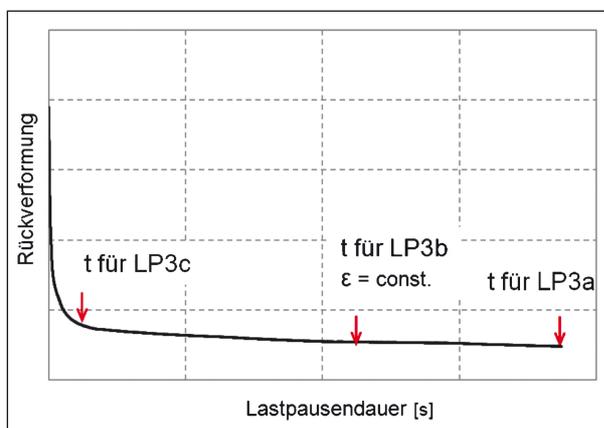


Bild 48: Ermittlung der Lastpausendauer LP3c für Versuchstyp 3 anhand der Rückverformung während der Lastpause bei Versuchstyp 3 mit Lastpausendauer LP3a

der Vertikalverformung stellt sich bei Entlastung nicht zurück. Die Dauer bis zur vollständigen Rückstellung des viskosen Anteils wird als Retardationszeit bezeichnet.

Die Lastpausendauer LP3b für den Versuchstyp 3 wird in Abhängigkeit von den Ergebnissen des Versuchstyps 3a ermittelt. Es wird dabei die Retardationszeit ermittelt ($\Delta\varepsilon < 3,0 \mu\text{m}/2\text{s}$) und als Dauer für LP3b festgelegt. Die Ermittlung von LP3b setzt voraus, dass die Lastpausendauer LP3a größer als die Retardationszeit ist (Bild 47).

Die Lastpausendauer LP3b wird bei Zug-Druck-Wechsellastprüfungen (20 °C und 0 °C) bestimmt und für Healing-Prüfungen mittels Zug-Schwellprüfung übernommen.

• Lastpausendauer LP3c

Die Lastpausendauer LP3c für den Versuchstyp 3 wird in Abhängigkeit von den Ergebnissen des Versuchstyps 3a ermittelt. Es wird dabei die Retardationszeit ermittelt und eine Zeitdauer wesentlich geringer als die Retardationszeit gewählt (Bild 48).

Die zur Anwendung kommende Lastpausendauer beim Versuchstyp 3 sind in Tabelle 6 zusammengefasst.

3.3.4 Definitionen der Healing-Indices

Die Auswertung zur Charakterisierung der Healing-Eigenschaften erfolgt auf der Grundlage von folgenden 5 unterschiedlichen Kenngrößen. Die Healing-Indices Hi1 und Hi2 werden dabei der Literatur entnommen. Zur verbesserten Charakterisierung der Healing-Eigenschaften werden zusätzlich die Healing-Indices Hi3, Hi4 und Hi5 eingeführt.

Der Healing-Index Hi1 (vgl. LITTLE et al., 2001; van den BERGH, 2012) beschreibt die Zunahme der bis zum Erreichen des Ermüdungskriteriums ertragbaren Lastwechsel infolge einer oder mehrerer

Prüfverfahren	Temperatur [°C]	LP3a [s]	LP3b [s]	LP3c [s]
Zug-Druck-Wechsellastprüfung	20	30.000* 18.725 15.000*	11.000	7.500* 1.000 500*
	0	2.408	1.000	500
Zug-Schwellprüfung	20	9.426	11.000	1.000
	0	4.630	1.000	500

* Versuche notwendig zur Optimierung der Lastpausendefinition

Tab. 6: Definierte Lastpausendauer LP3 für Healing-Prüfungen nach Versuchstyp 3 an Asphalt

Lastpausen bei sonst gleichen Belastungsbedingungen. Er wird berechnet aus dem Quotienten der Differenz der ertragbaren Lastwechsel bei kontinuierlicher und diskontinuierlicher Ermüdungsprüfung (vgl. Bild 49):

$$Hi1 = \frac{N_{Makro2,3} - N_{Makro1}}{N_{Makro1}} \cdot 100 [\%] \quad \text{Gl. 13}$$

$N_{Makro2,3}$ ertragbare Lastwechselzahl bei diskontinuierlicher Ermüdungsprüfung nach Versuchstyp 2 oder 3 [-]

N_{Makro1} ertragbare Lastwechselzahl bei kontinuierlicher Ermüdungsprüfung nach Versuchstyp 1 [-]

Der Healing-Index Hi2 (vgl. DANIEL, 1996; ERKENS, 2012) charakterisiert den Gewinn an Lastwechseln nach Einführung einer Lastpause:

$$Hi2 = \frac{LW1 - n(ER50)}{n(ER50)} \cdot 100 [\%] \quad \text{Gl. 14}$$

$n(ER50)$ Lastwechselzahl bis zur Lastpause [-]

LW1 Lastwechselzahl in der zweiten Belastungsphase, bei welcher ein E-Modul erreicht wird, der jenem E-Modul entspricht, der vor Einsetzen der Lastpause während der ersten Belastungsphase erreicht wurde [-] (siehe Bild 50)

Zur Ermittlung des Healing-Index Hi3 wird zunächst eine Ermüdungsprüfung ohne Lastpause bis zum Eintritt des Ermüdungsversagens durchgeführt. Die zur 50%igen Ermüdung korrespondierende ER50 wird ausgewertet. Bild 51 zeigt den relativen Verlauf der Energy Ratio über dem relativen Verlauf des

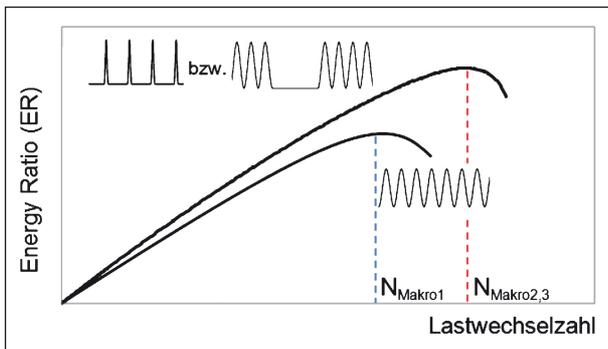


Bild 49: Schematischer Verlauf der Energy Ratio (ER) bei kontinuierlicher und diskontinuierlicher Ermüdungsprüfung

E-Moduls bei kontinuierlicher Ermüdungsprüfung. Es lässt sich der relative E-Modul bei 50 % ER ermitteln (E_{ER50}).

Anschließend erfolgt die Ermüdungsprüfung mit Lastpause, wobei die Lastpause zu jenem Zeitpunkt erfolgt, bei der der relative E-Modul dem zuvor ermittelten relativen E-Modul bei ER50 ohne Lastpause entspricht. Nach der Lastpause wird die Prüfung bis zum Eintritt des Ermüdungsversagens fortgeführt und die zur 50%igen Ermüdung korrespondierende ER50 der zweiten Belastungsphase ausgewertet (siehe Bild 52).

Der Healing-Index Hi3 ist der Quotient aus der Differenz der Lastwechsel bis zum Erreichen von ER50 mit und ohne Lastpause und der Lastwechselzahl bis ER50 ohne Lastpause (zur Erläuterung der Parameter siehe Bild 53):

$$Hi3 = \frac{n(ER'50) - n(ER50)}{n(ER50)} \cdot 100 [\%] \quad \text{Gl. 15}$$

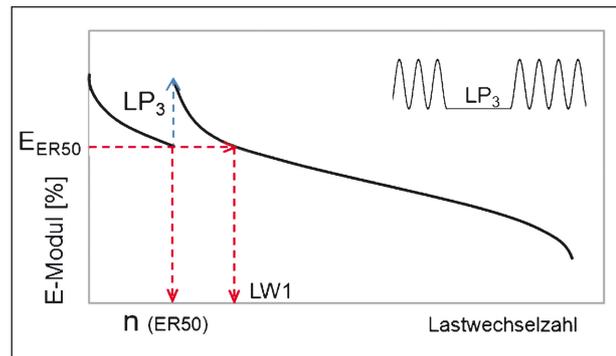


Bild 50: Schematischer Verlauf des E-Moduls in Abhängigkeit der Lastwechselzahl (LW) bei Unterbrechung der Ermüdungsbeanspruchung durch eine Lastpause LP

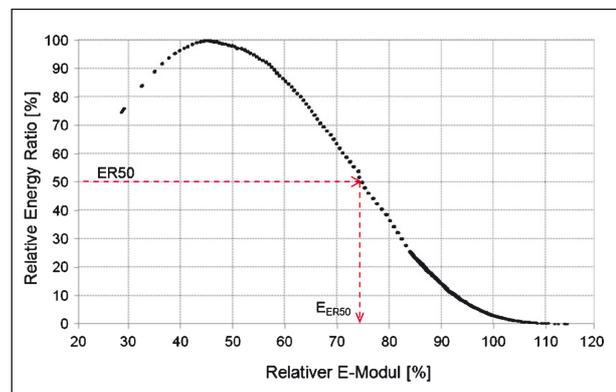


Bild 51: Beispiel für den Verlauf der Energy Ratio über den relativen E-Modul bei der kontinuierlichen Ermüdungsprüfung

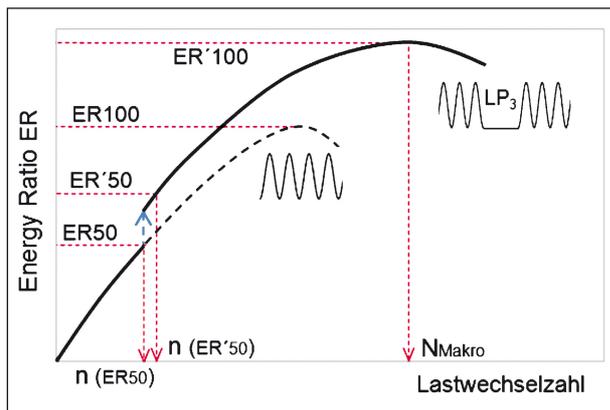


Bild 52: Schematischer Verlauf der Energy Ratio ER bei Ermüdungsbeanspruchung ohne Lastpause (unten, gestrichelt) und mit Lastpause (oben)

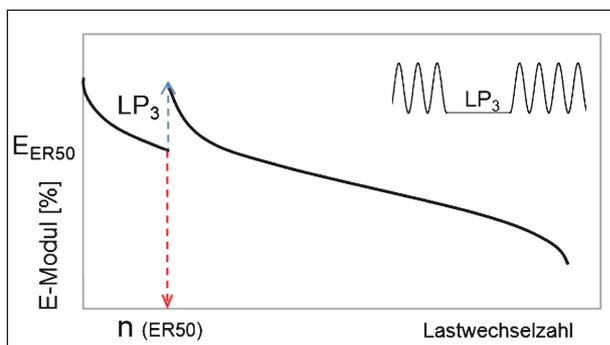


Bild 53: Schematischer Verlauf des E-Moduls bei einer Ermüdungsprüfung mit Lastpause nach Erreichen einer Energy Ratio von 50 % (ER50)

- $n_{(ER'50)}$ Lastwechselzahl bis zu 50 % ER bei Ermüdungsprüfung nach Lastpause [-]
- $n_{(ER50)}$ Lastwechselzahl bis zu 50 % ER bei kontinuierlicher Ermüdungsprüfung vor Lastpause [-]

Healing-Index Hi_4 vergleicht die Energy Ratio bis zum Erreichen des Ermüdungskriteriums (ER100) mit der ER des geschädigten Materials nach einer Lastpause (ER''100) (Bild 54). Zuvor wird der Probekörper bis ER50 belastet und daraus ER100 berechnet.

Nach der Lastpause wird der Probekörper wie ein unbelasteter Probekörper betrachtet und bis zum Bruch belastet. Die Berechnung von ER beginnt wieder bei Lastwechsel 1. Das Maximum der ER innerhalb der zweiten Belastungsphase wird ermittelt und gemäß Gleichung 16 mit dem extrapolierten Wert für ER100 ins Verhältnis gesetzt.

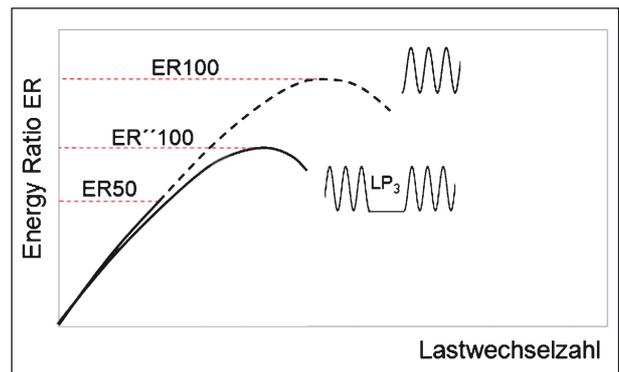


Bild 54: Schematischer Verlauf der Energy Ratio (ER) bei Versuchstyp 3

$$Hi_4 = \frac{ER''100}{ER100} \cdot 100 [\%] \quad \text{Gl. 16}$$

ER''100 Maximum der Energy Ratio beim zweiten Belastungszyklus [MPa],

ER 100 berechnetes Maximum der Energy Ratio des unbelasteten Probekörpers gemäß Gleichung 18 [MPa].

Bei Belastung des Probekörpers bis ER50 ergibt sich:

$$ER100 = 2 \cdot ER50 \text{ [MPa]} \quad \text{Gl. 17}$$

Versuchstechnisch bedingt ist eine Belastung des Probekörpers bis exakt zum korrespondierenden Steifigkeitsmodul bei ER50 nicht immer durchführbar und daher eine Korrektur von ER100 gemäß Gleichung 21 erforderlich.

$$ER100 = \frac{100}{ER_{\text{Abbruch}} [\%]} \cdot ER50 \text{ [MPa]} \quad \text{Gl. 18}$$

Die erreichte relative Energy Ratio (ER_{Abbruch}) kann in Abhängigkeit des relativen E-Moduls bei Abbruch der ersten Belastungsphase gemäß Bild 55 ermittelt werden.

Mit dem Healing-Index Hi_5 erfolgt eine Ermittlung des Anstiegs der maximalen Energy Ratio infolge einer Lastpause. Der Probekörper wird zunächst ohne Lastpause bis zum Erreichen von ER50 belastet und daraus ER100 rechnerisch ermittelt. Die Berechnung der Energy Ratio nach Lastpause erfolgt unter Berücksichtigung der Lastwechsel aus der ersten Belastungsphase. Das Maximum der ER, welches in der zweiten Belastungsphase erreicht wird, wird durch ER'100 ausgedrückt.

Hi5 wird mittels Gleichung 19 aus der Differenz von ER100 und ER'100 und ER100 bestimmt.

$$Hi5 = \frac{ER'100 - ER100}{ER100} \cdot 100 [\%] \quad \text{Gl. 19}$$

Wie auch bei der Ermittlung von Hi4 ist eine Belastung des Probekörpers bis exakt zum korrespondierenden Steifigkeitsmodul bei ER50 nicht immer durchführbar und daher eine Ermittlung von ER100 gemäß Gleichung 21 erforderlich.

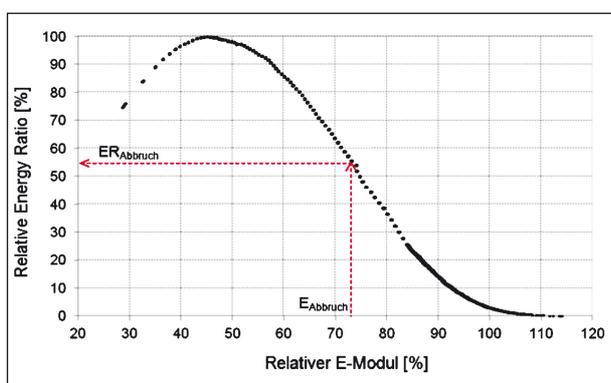


Bild 55: Korrektur von ER100 anhand der tatsächlichen Belastung des Probekörpers beim Einsetzen der Lastpause

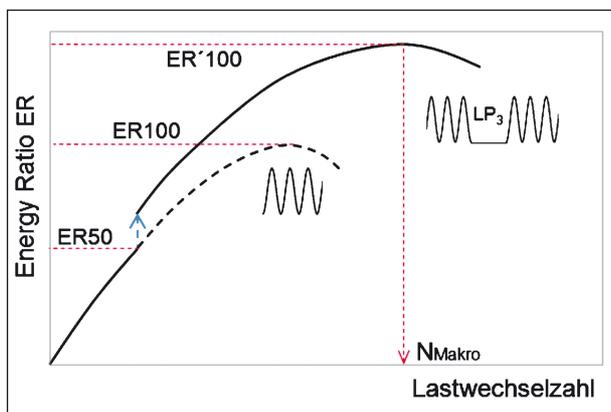


Bild 56: Schematischer Verlauf der Energy Raio (ER) bei Versuchstyp 3

4 Eingesetzte Baustoffe

4.1 Gestein

Zur Anwendung kommt ausschließlich Gabbro der Norddeutschen Naturstein GmbH in Bad Harzburg/Harz, welches das langjährige Referenzgestein des ISBS Prüflabors ist. Ein Einfluss des Gesteins auf das Healing-Verhalten wird im Rahmen dieses Forschungsprojektes nicht untersucht.

Gabbro ist ein magmatisches Tiefengestein und bildet sich durch das langsame Abkühlen basaltischen Magmas in ca. fünf Kilometer Tiefe. Gabbro besteht überwiegend aus Feldspat und Augit im Verhältnis 1:1 und enthält keine Quarz-Anteile. Wegen der vergleichsweise geringen Anteile an SiO₂ ist Gabbro basisch und hydrophob. Die mittlere Rohdichte beträgt ca. 2,890 g/cm³.

4.2 Bitumen

Für die Bindemitteluntersuchungen wurden verschiedene Straßenbaubitumen sowie ein Polymermodifiziertes Bitumen eingesetzt (siehe Tabelle 7). Die Prüfungen erfolgten zum Teil in zwei Alterungsstufen, im Anlieferungszustand und nach Bitumenalterung mittels Rolling Thin Film Oven Test (RTFOT) und Pressure Ageing Vessel (PAV).

Zur Einordnung der untersuchten Bindemittel und zum Aufzeigen möglicher Korrelationen zwischen dem Healing-Verhalten und den mechanischen Bindemittleigenschaften wurden konventionelle sowie rheologische Bitumenkennwerte an den frischen und gealterten (RTFOT+PAV) Proben bestimmt:

- Erweichungspunkt Ring und Kugel, Nadelpenetration, Elastische Rückstellung und Kraftduktivität,

Bitumenart/-sorte	Hersteller	Herstellerbezeichnung
30/45	Total Bitumen Deutschland GmbH, Brunsbüttel	AZALT 30/45 DE
70/100		AZALT 70/100 DE
50/70		AZALT 50/70 DE
25/55-55 A		STYRELF 25/55-55 A

Tab. 7: Im Projekt eingesetzte Bitumenarten bzw. -sorten

- dynamischer Schubmodul und Phasenwinkel bei 60 °C und 1,59 Hz, Einen Überblick über die mechanischen und rheologischen Bindemittleigenschaften der verschiedenen Bitumen geben die Tabellen 8 bis 11.
- Kälteflexibilität mittels Bending-Beam-Rheometer (-10, -16 und -25 °C).

		frisch	RTFOT+PAV	
Kraftduktilität 25 °C	Duktilität [mm]	1.000,0	296,6	
	Max. Kraft [N]	2,0	25,3	
	Verformungsarbeit	W_{gesamt} [J/cm ²]	0,1914	1,6102
		$W_{0-0,2m}$ [J/cm ²]	0,1346	1,6055
$W_{0,2-0,4m}$ [J/cm ²]		0,0080	0,0047	
Erweichungspunkt RuK [°C]		55,4	72,3	
Nadelpenetration [mm/10]		40,0	19,0	
elastische Rückstellung [%]		18,0	27,4	
DSR 60 °C, 1,59 Hz	Phasenwinkel [°]	80,8	67,5	
	komplexer Schermodul [Pa]	7.081	49.014	
BBR -10 °C	Kriechsteifigkeit S [MPa]	88,2	160,6	
	m-Wert [-]	0,458	0,341	
BBR -16 °C	Kriechsteifigkeit S [MPa]	219,7	315,5	
	m-Wert [-]	0,407	0,233	
BBR -25 °C	Kriechsteifigkeit S [MPa]	712,4	892,2	
	m-Wert [-]	0,123	0,042	
BBR	T bei S = 300 MPa [°C]	-18,0	-15,6	

Tab. 8: Bitumenkennwerte des Straßenbaubitumen 30/45

		frisch	RTFOT+PAV	
Kraftduktilität 25 °C	Duktilität [mm]	1.000,0	1.000,0	
	Max. Kraft [N]	0,6	7,1	
	Verformungsarbeit	W_{gesamt} [J/cm ²]	0,0674	0,6217
		$W_{0-0,2m}$ [J/cm ²]	0,0232	0,5232
$W_{0,2-0,4m}$ [J/cm ²]		0,0000	0,0443	
Erweichungspunkt RuK [°C]		47,3	61,0	
Nadelpenetration [mm/10]		75,0	26,0	
elastische Rückstellung [%]		22,5	16,0	
DSR 60 °C, 1,59 Hz	Phasenwinkel [°]	86,4	77,0	
	komplexer Schermodul [Pa]	2.455	14.345	
BBR -10 °C	Kriechsteifigkeit S [MPa]	49,3	129,4	
	m-Wert [-]	0,520	0,424	
BBR -16 °C	Kriechsteifigkeit S [MPa]	161,9	271,6	
	m-Wert [-]	0,452	0,330	
BBR -25 °C	Kriechsteifigkeit S [MPa]	604,2	713,3	
	m-Wert [-]	0,220	0,091	
BBR	T bei S = 300 MPa [°C]	-19,6	-16,8	

Tab. 9: Bitumenkennwerte des Straßenbaubitumen 70/100

		frisch	RTFOT+PAV	
Kraftduktilität 25 °C	Duktilität [mm]	1.000,0	342,9	
	Max. Kraft [N]	1,5	16,2	
	Verformungsarbeit	W_{gesamt} [J/cm ²]	0,1070	1,0565
		$W_{0-0,2m}$ [J/cm ²]	0,09635	1,0693
$W_{0,2-0,4m}$ [J/cm ²]		0,00755	0,0011	
Erweichungspunkt RuK [°C]		51,9	68,2	
Nadelpenetration [mm/10]		50,0	24,0	
elastische Rückstellung [%]		9,5	18,0	
DSR 60 °C, 1,59 Hz	Phasenwinkel [°]	82,4	68,6	
	komplexer Schermodul [Pa]	5.352	35.318	
BBR -10 °C	Kriechsteifigkeit S [MPa]	60,6	117,4	
	m-Wert [-]	0,510	0,428	
BBR -16 °C	Kriechsteifigkeit S [MPa]	154,2	277,5	
	m-Wert [-]	0,426	0,389	
BBR -25 °C	Kriechsteifigkeit S [MPa]	582,1	571,3	
	m-Wert [-]	0,278	0,290	
BBR	T bei S = 300 MPa [°C]	-20,0	-16,8	

Tab. 10: Bitumenkennwerte des Straßenbaubitumen 50/70

		frisch	RTFOT+PAV	
Kraftduktilität 25 °C	Duktilität [mm]	1.000,0	470,3	
	Max. Kraft [N]	2,2	11,4	
	Verformungsarbeit	W_{gesamt} [J/cm ²]	0,3386	2,3049
		$W_{0-0,2m}$ [J/cm ²]	0,2491	1,5085
$W_{0,2-0,4m}$ [J/cm ²]		0,1960	0,7458	
Erweichungspunkt RuK [°C]		59,7	73,6	
Nadelpenetration [mm/10]		45	21	
elastische Rückstellung [%]		78	62	
DSR 60 °C, 1,59 Hz	Phasenwinkel [°]	71,6	61,7	
	komplexer Schermodul [Pa]	5.974	33.279	
BBR -10 °C	Kriechsteifigkeit S [MPa]	66,4	93,7	
	m-Wert [-]	0,492	0,462	
BBR -16 °C	Kriechsteifigkeit S [MPa]	165,9	194,2	
	m-Wert [-]	0,412	0,407	
BBR -25 °C	Kriechsteifigkeit S [MPa]	471,3	463,4	
	m-Wert [-]	0,205	0,331	
BBR	T bei S = 300 MPa [°C]	-20,6	-20,1	

Tab. 11: Bitumenkennwerte des Polymermodifizierten Bitumen PmB 25/55-55

4.3 Asphalt

Die Prüfungen zur Ansprache der Healing-Eigenschaften von Asphalt erfolgten an einem Asphaltbeton für Asphaltdeckschichten der Sorte AC 11 D S, unter Verwendung von Straßenbaubitumen 50/70 und Polymermodifiziertem Bitumen PmB 25-55/55 (Bitumeneigenschaften siehe oben) und an einem Asphaltbeton für Asphaltbinder-schichten der Sorte AC 16 B S, unter Verwendung von Straßenbaubitumen 50/70.

Die Spezifikationen der verwendeten Asphaltmischgüter sind in Tabelle 12 angegeben. Bild 57 und Bild 58 zeigen die zugehörigen Sieblinien.

Das Asphaltmischgut wird am ISBS routinemäßig mittels Zwangsmischer im Labor gemischt, mittels Walz-Sektor-Verdichtungsgerät zu Asphaltprobe-

	AC 11 D S	AC 16 B S
Rohdichte [g/cm ³]	2,636	2,697
Raumdichte [g/cm ³]	2,569	2,478
Hohlraumgehalt [%]	3,4	8,1
Verdichtungsgrad [%]	99	99
Bindemittel	50/70	50/70
Bindemittelgehalt [%]	5,9	4,37

Tab. 12: Spezifikationen der eingesetzten Asphaltmischgüter

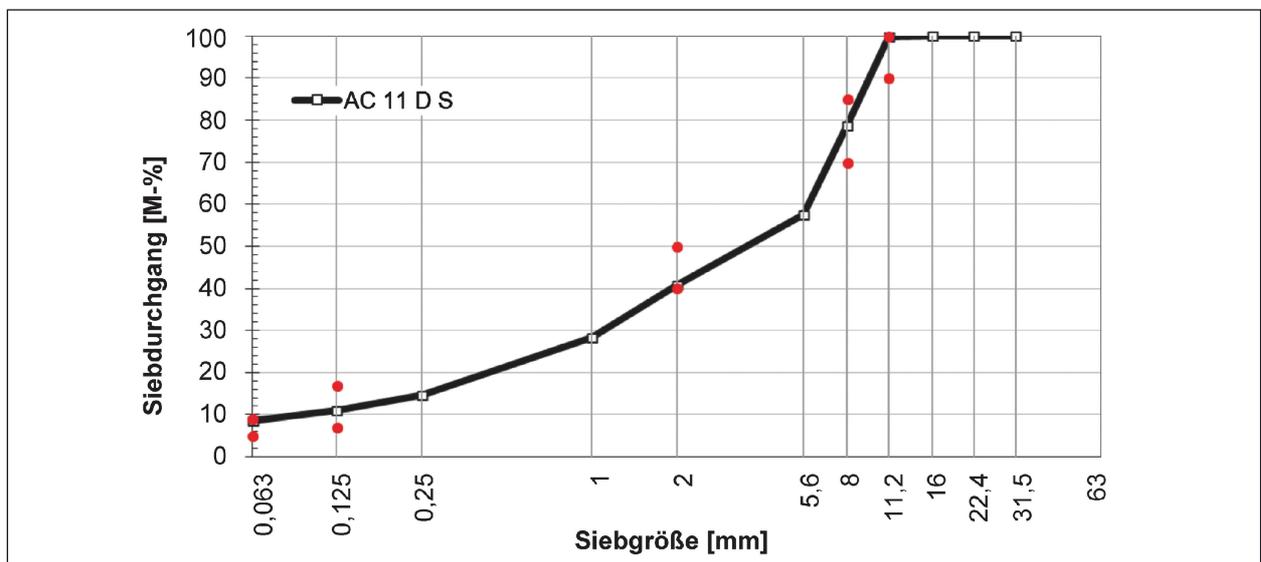


Bild 57: Sieblinie des verwendeten AC 11 D S und Grenzen gemäß TL Asphalt 07 (rot)

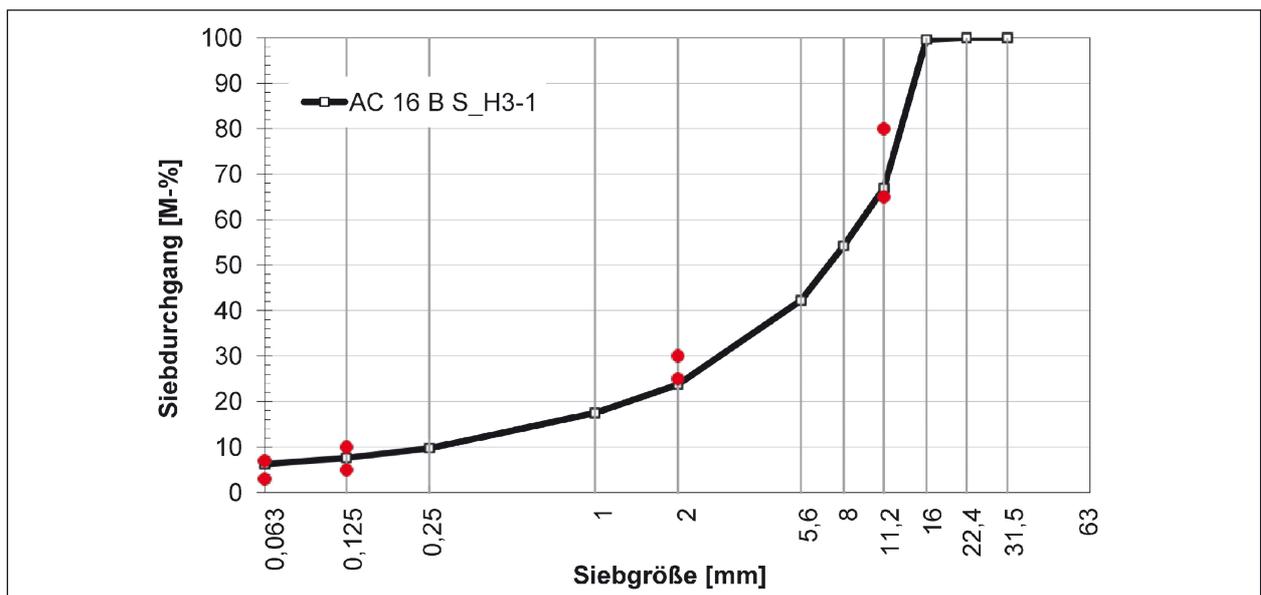


Bild 58: Sieblinie des verwendeten AC 16 B S und Grenzen gemäß TL Asphalt 07 (rot)

platten verdichtet und daraus sämtliche Asphalt-Probekörper hergestellt.

Zum Mischen kommt ein Gegenlaufzwangslabor-mischer (GZM-30+) zum Einsatz, wie er speziell zur Herstellung von Walzasphalt und Gussasphalt entwickelt wurde. Das Mischprinzip beruht auf einem Gegenlaufzwangsmischbetrieb mit geneigter Mischtrommel und angestelltem Mischwerkzeug. Der Gegenlaufzwangsmischbetrieb wird durch zwei drehzahlgeregelte Antriebsmotoren für Mischtrommel und exzentrischem Mischwerkzeug realisiert. Es ergibt sich eine vollständige dreidimensionale Vermischung des Mischgutes aufgrund des asynchronen Antriebsdrehzahlverhältnisses, der geeigneten Mischtrommel und einen 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. Bild 59 zeigt den Labormischer und das Mischwerkzeug.

Die Herstellung von 320 x 200 x 40 mm³ großen Asphalt-Probepplatten erfolgt gemäß TP Asphalt-StB, Teil 33. Das Walzsektor-Verdichtungsgerät besteht aus einer Verdichtungsform mit Einfüllaufsatz und einem sektorförmigen Verdichtungskörper. Die Verdichtung erfolgt durch eine wiegeartige Bewegung des auf den Kreismittelpunkt fixierten Sektors des Walzkörpers auf der Probenplattenoberfläche, verursacht durch eine translatorische Bewegung der Verdichtungsform. Die Vorverdichtung – zur Simulation der glättenden Wirkung einer Fertigerbohle – wird dabei weggeregelt mit 0,2 mm pro Walzsektorübergang realisiert, bis eine Kraft von 2 kN erreicht ist. Die Hauptverdichtung, die dem eigentlichen Walzeneinsatz entspricht, erfolgt im Anschluss mit einer eingeleiteten Kraft von 1 kN je Übergang, bis eine Kraft von 15 kN erreicht ist. Zur Ansteuerung des Zielhohlraumgehalts wird die Anzahl der jeweiligen Walzübergänge gemäß Erfahrungshintergrund angepasst.



Bild 59: Labormischer mit Gegenlaufzwangsprinzip

Die Menge Asphaltmischgut, welche bei einem Mischvorgang im Labor hergestellt werden kann, ist auf ca. 40 kg begrenzt. Jede Mischung wird mit einer Nummer versehen (Mischungsnummer).

Mittels einer Trennschleifeinrichtung werden aus den Asphalt-Probepplatten prismenförmige Asphalt-Probekörper mit den Abmessungen 40 x 40 x 160 mm³ gesägt. Die minimale Querschnittabmessung eines Asphaltprismas übersteigt das Dreifache des Größtkorns und unterschreitet ein Drittel der Längenabmessung.

Die beiden Adapter, die zur Verbindung des Probekörpers mit dem Lastgestänge der Zugprüfmaschine notwendig sind, werden mittels Zweikomponentenkleber an die Stirnflächen der Probekörper geklebt. Die Zugprüfung kann nach einer spannungsfrei gelagerten Erhärtungszeit von mindestens 24 Stunden erfolgen.

5 Prüfergebnisse

Im Folgenden sind ausgewählte Prüfergebnisse dargestellt, welche die Gesamtheit der Ergebnisse an den Einzelversuchen gut widerspiegeln. Insgesamt liegen die Prüfergebnisse aus rund 500 Einzelversuchen an Bitumenproben und rund 270 Einzelversuchen an Asphaltproben in aufbereiteter digitaler Form vor. Auf Anfrage werden Sie dem Auftraggeber zur Verfügung gestellt und dem Schlussbericht als Datenträger beigelegt.

5.1 Bitumen

5.1.1 Ermüdungsprüfungen mittels DSR

Im Rahmen dieses Projekts erfolgen an Bitumenproben scherspannungsgeregelte (kraftgeregelte) und deformationsgeregelte (weggeregelte) Ermüdungsprüfungen mittels Dynamischem Scherrheometer (DSR).

Die kontinuierliche Ermüdungsprüfung führt bei zunehmender Versuchsdauer zu einer starken Beanspruchung des Rheometers. Vorversuche zur Ermittlung geeigneter Prüfparameter sind daher notwendig. Wird dabei die Belastung auf die Probe zu groß gewählt, kann dies zu einem hohen Drehmoment am Rotationsmotor des DSR führen. Eine andauernde Belastung im oberen Drittel der Drehmomentgrenze des DSR ($\tau_{\max} = 0,2 \text{ Nm}$) verursacht

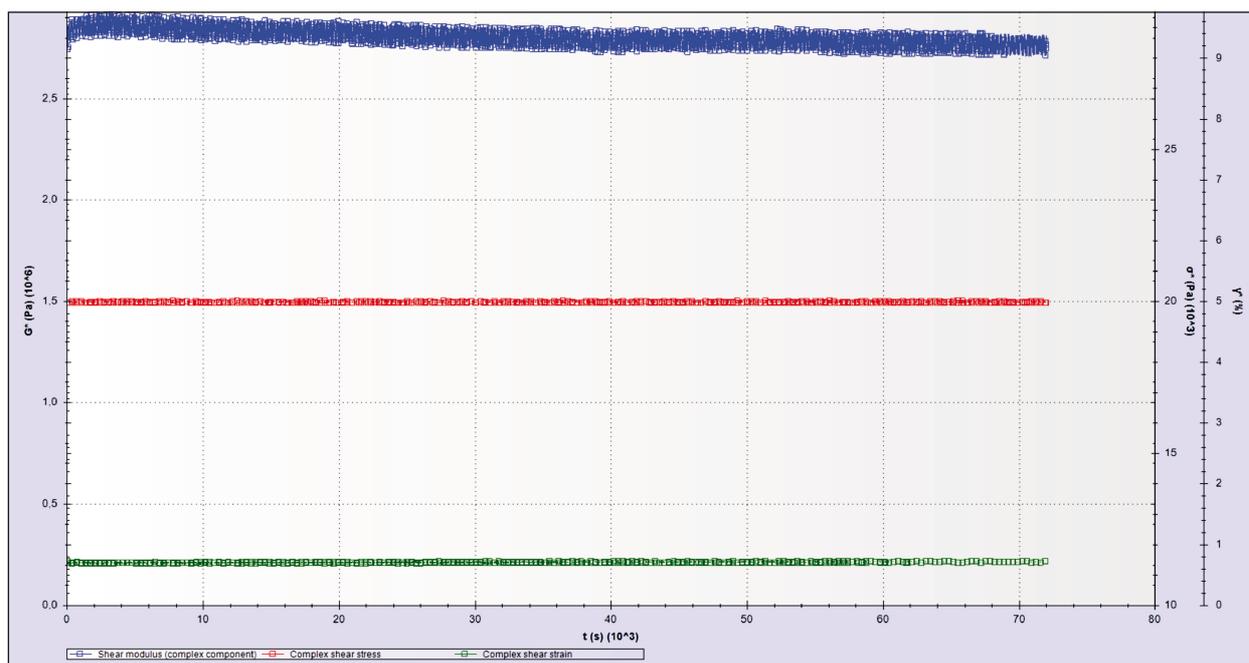


Bild 60: Deformationsgeregelte Ermüdungsprüfung mittels DSR (0,8 %; T = 30 °C): Verlauf des Schermoduls (G^*) über die Zeit t (s) für Straßenbaubitumen 50/70

bereits nach wenigen Minuten eine Überhitzung des Motors und folglich einen Abbruch der Prüfung. Bei geringerer Belastung der Bitumenprobe verzögert sich der Zeitpunkt der Überhitzung des Rotationsmotors, jedoch ist dann die Anzahl der ertragbaren Lastwechsel bis zum Erreichen des Ermüdungskriteriums zu groß, die Versuchsdauer (z. T. mehrere Tage) zu lange und die große Datenmenge verursacht Speicherüberlastung sowie Datenverlust infolge Systemabsturz. Bild 60 zeigt den Verlauf des komplexen Schermoduls während einer DSR-Prüfung mit einer Dauer von ca. 19 Stunden, kurz vor der Speicherauslastung der Software.

Bei den im Rahmen dieses Projekts durchgeführten deformationsgeregelten Ermüdungsprüfungen unter Variation der Prüftemperatur erfolgt die Belastung der Probe bei einer Prüffrequenz von 10 Hz nahe der oberen Grenze des linear-viskoelastischen Bereiches, welcher vorab mittels Amplituden-Sweep ermittelt wird.

Adäquate Prüfbedingungen zeigen sich für Straßenbaubitumen 50/70 bei einer Temperatur von 40 °C und einer Deformation von 6 %. Der komplexe Schermodul des 50/70 bei dieser Temperatur beträgt ca. 0,42 MPa. Die Lastwechselzahl bis zum Erreichen des Ermüdungskriteriums liegt dabei unter 10.000. Die resultierende Scherspannung bei der Deformationsregelung beträgt bei Versuchsbeginn ca. 25 kPa.

Durch das Erwärmen der Bitumenprobe vergrößert sich der linear-viskoelastische Bereich deutlich. Bei der festgelegten Prüffrequenz von 10 Hz ist das verwendete Rheometer nicht in der Lage, unbegrenzt große Deformationen bei einem Spaltabstand von 1 mm aufzubringen. Die aufnehmbare Scherspannung durch die Probe nimmt bei ansteigender Temperatur überproportional ab. Daher ist eine kontinuierliche Belastung der Probe im hohen Temperaturbereich bei Scherspannungsregelung nur mit sehr geringer Scherspannung möglich, womit ein nachteiliger Anstieg der Versuchsdauer verbunden ist. Ab einem bestimmten Temperaturbereich (bindemittelabhängig) kann durch das DSR keine Belastungsgröße mehr aufgebracht werden, die zum Versagen der Bitumenprobe führt.

Bei den im Rahmen dieses Projekts durchgeführten scherspannungsgeregelten Ermüdungsprüfungen wird die Scherspannung im oberen Bereich des linear-viskoelastischen Bereiches gewählt. Bei Durchführung der scherspannungsgeregelten DSR-Prüfungen ist die Anzahl der Lastwechsel bis zum Versagen des Probenmaterials bei gleicher Temperatur reduziert, was eine Verkürzung der Prüfdauer zur Folge hat. Dies ist durch den höheren Energie-Eintrag in die Probe begründet, da infolge der Spannungsregelung die resultierende Deformation bei zunehmender Strukturschädigung zunimmt (vgl. Bild 61).

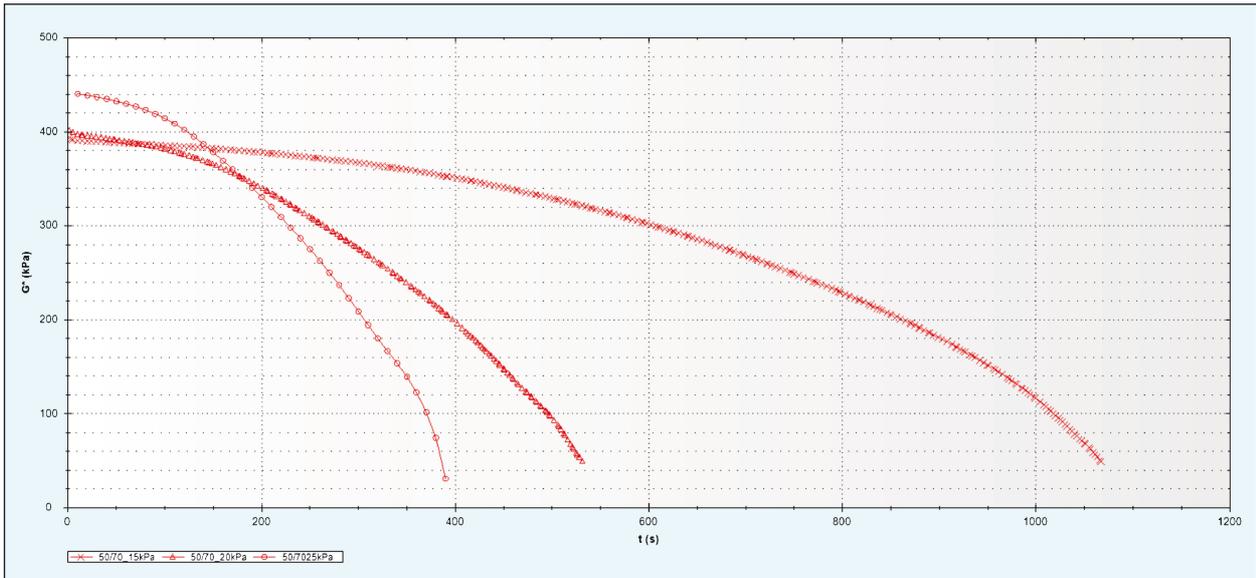


Bild 61: Scherspannungsgeregelte Ermüdungsprüfung mittels DSR bei unterschiedlichen Belastungsgrößen (15, 20, 25 kPa; $T = 40\text{ °C}$): Verlauf des Schermoduls (G^*) über die Zeit t (s) für Straßenbaubitumen 50/70

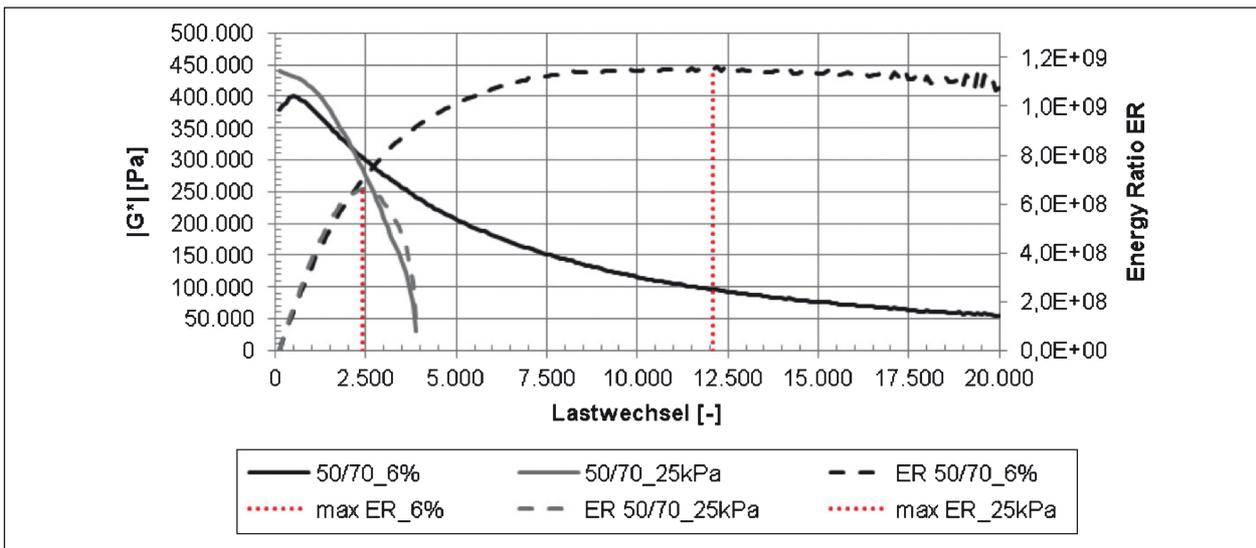


Bild 62: Kraft- und weggeregelte kontinuierliche Ermüdungsprüfung an Straßenbaubitumen 50/70 bei einer Prüftemperatur von 40 °C

Temperatur [°C]	40
Frequenz f [Hz]	10
Solldeformation [%]	6,0
Scherspannung [kPa]	25
Durchmesser Messgeometrie [mm]	20
Spaltbreite [mm]	1
Abbruchkriterium	$ G^* < 50\text{ kPa}$

Tab. 13: Geräte- und Prüfparameter für DSR-Prüfungen an Straßenbaubitumen 50/70

Tabelle 13 fasst die gewählten Geräte- und Prüfparameter für Ermüdungsprüfungen an Straßenbaubitumen 50/70 mittels DSR zusammen.

Beispielhaft sind jeweils der Verlauf von $|G^*|$ und der Energy Ratio (ER) für Straßenbaubitumen 50/70 bei einer Prüftemperatur von 40 °C in Bild 62 sowohl bei scherspannungsgeregelter als auch bei deformationsgeregelter Ermüdungsprüfung mittels DSR dargestellt.

Der Startmodul $|G^*|$ liegt bei beiden Regelungsarten etwa auf gleichem Niveau. Während der komplexe Schermodul bei scherspannungsgeregelter Ermüdungsprüfung von Beginn an sukzessive und zunehmend steiler abfällt, steigt er bei deformationsgeregelter Ermüdungsprüfung zunächst leicht an und fällt erst nach Überschreiten eines Maximums ab. Dabei reduziert sich die Abnahme des komplexen Schermoduls bei deformationsgeregel-

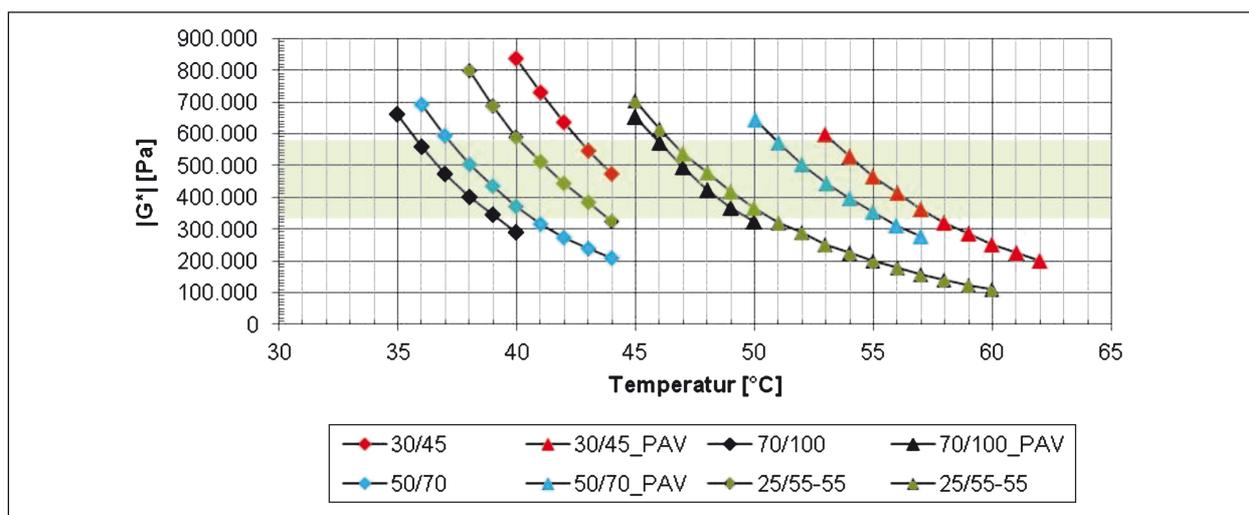


Bild 63: Temperatur-Sweep bei deformationsgeregelter Oszillation (0,5 %) zur Bestimmung des Bereiches für Ermüdungsprüfungen mittels DSR (grün)

ter Ermüdungsprüfung über die Versuchsdauer. Das Verhalten des komplexen Schermoduls spiegelt sich im Verlauf der Energy Ratio (ER) wider. Bei beiden Belastungs-Regimen nimmt die Energy Ratio zunächst stark und in gleichem Maße zu. Bei ca. 2.500 Lastwechseln erreicht die ER bei Scherspannungsregelung jedoch ein Maximum und fällt anschließend rapide ab. Bei Deformationsregelung nimmt die Energy Ratio weiter zu und fällt nach deutlich mehr Lastwechseln nur mäßig ab. Ein ausgeprägtes Maximum wie bei der Scherspannungsregelung bildet sich dabei nicht aus, da die ER über einen langen Zeitraum ein nahezu konstantes Niveau aufweist.

Anhand der Ergebnisse der an Straßenbaubitumen 50/70 durchgeführten Untersuchungen kann davon ausgegangen werden, dass bei einer Belastungsgröße innerhalb des linear-viskoelastischen Bereiches und der technischen Voraussetzungen des verwendeten Rheometers die unterschiedlichen Bitumen nicht bei einer einheitlichen Temperatur beprobt werden können. Im Vergleich ist Straßenbaubitumen 30/45 bei gleicher Prüftemperatur steifer, Straßenbaubitumen 70/100 weicher. Deutliche Unterschiede sind auch nach Alterung mittels RTFOT und PAV vorhanden.

Um im DSR bei allen Bitumenarten/-sorten eine gezielte Materialermüdung herbeizuführen, ist daher die Wahl geeigneter Prüftemperaturen zwingend notwendig. Daher ist für jedes (frische oder gealterte) Bitumen ein Temperatur Sweep durchzuführen mit dem Ziel, jenen Temperaturbereich zu identifizieren, in dem der komplexe Schermodul eine vergleichbare Messgröße zwischen 0,35 bis

0,5 MPa aufweist. Da die entsprechende Bindemittelsteifigkeit unterhalb des Erweichungspunktes zu vermuten ist, wird der Temperaturbereich vom Erweichungspunkt abwärts in Schritten von 1 K bestimmt. Die Ergebnisse solcher Temperatur-Sweeps sind in Bild 63 dargestellt. Der grün hinterlegte Bereich kennzeichnet jenen Bereich, in dem eine Ermüdung unter den genannten Voraussetzungen mittels DSR möglich ist.

In Tabelle 14 sind die festgelegten Temperaturen für die im Rahmen dieses Projekts durchgeführten Ermüdungsprüfungen zusammengestellt.

Kontinuierliche Ermüdungsprüfungen geben Aufschluss über den Abfall des Schermoduls $|G^*|$ bis zum Erreichen einer Energy Ratio von 50 % (ER50). Bild 64 und Bild 65 zeigen kontinuierliche deformationsgeregelte (6 %) und scherspannungsgeregelte (25 kPa) Ermüdungsprüfungen bei festgelegter Prüffrequenz ($f = 10$ Hz).

In Tabelle 15 ist der Schermodul $|G^*|$ bei einer ER von 50 % als Anteil von $|G^*|$ bei Versuchsbeginn für alle untersuchten Bitumen dargestellt.

Auffällig ist, dass der Schermodul $|G^*|$ bei einer ER von 50 % bei allen untersuchten Bitumen in derselben Größenordnung liegt. Der Mittelwert beträgt 95,1 %, bei einer Standardabweichung von 1,08 % und einem Variationskoeffizienten von 1,14 %.

Die Prüfung der Ermüdungseigenschaften von Polymermodifiziertem Bitumen (PmB) dauern gegenüber jenen an Straßenbaubitumen deutlich länger. Aufgrund der Wirkung der Polymer-Fasern ist der Verlauf des Schermoduls über die Versuchs-

Bitumen		T [°C]	G* [MPa]
30/45	frisch	42	0,483
	gealtert	55	0,457
70/100	frisch	37	0,498
	gealtert	47	0,478
50/70	frisch	40	0,438
	gealtert	53	0,377
25/55-55	frisch	42	0,355
	gealtert	48	-

Tab. 14: Charakteristische Temperaturen für Ermüdungsprüfungen mittels DSR

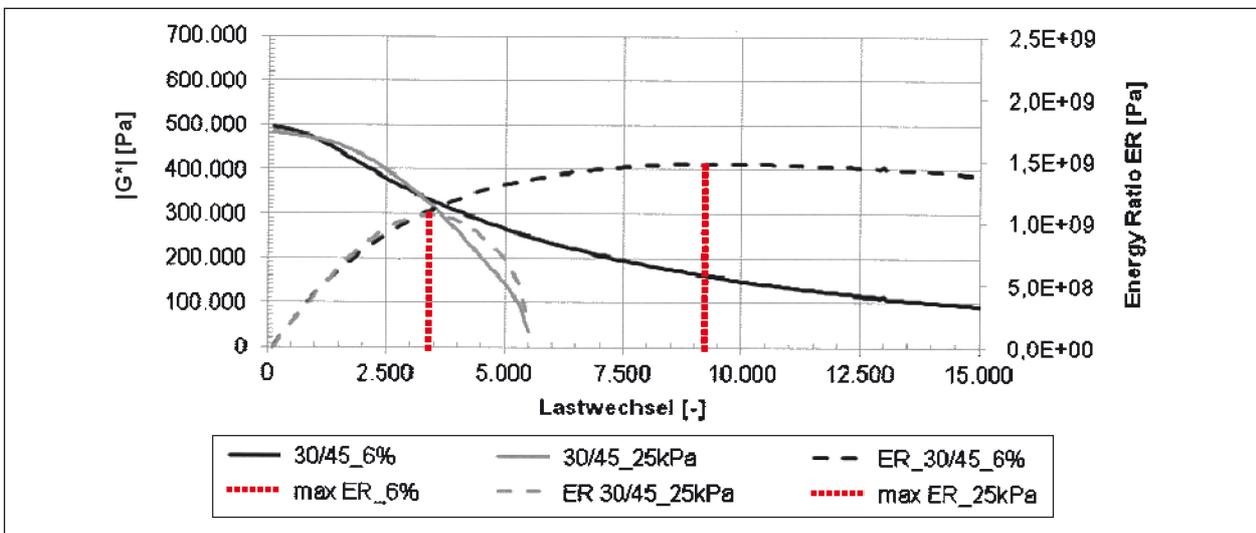


Bild 64: Kraft- und deformationsgeregelte kontinuierliche Ermüdungsprüfung an Straßenbaubitumen 30/45 bei einer Prüftemperatur von 42 °C

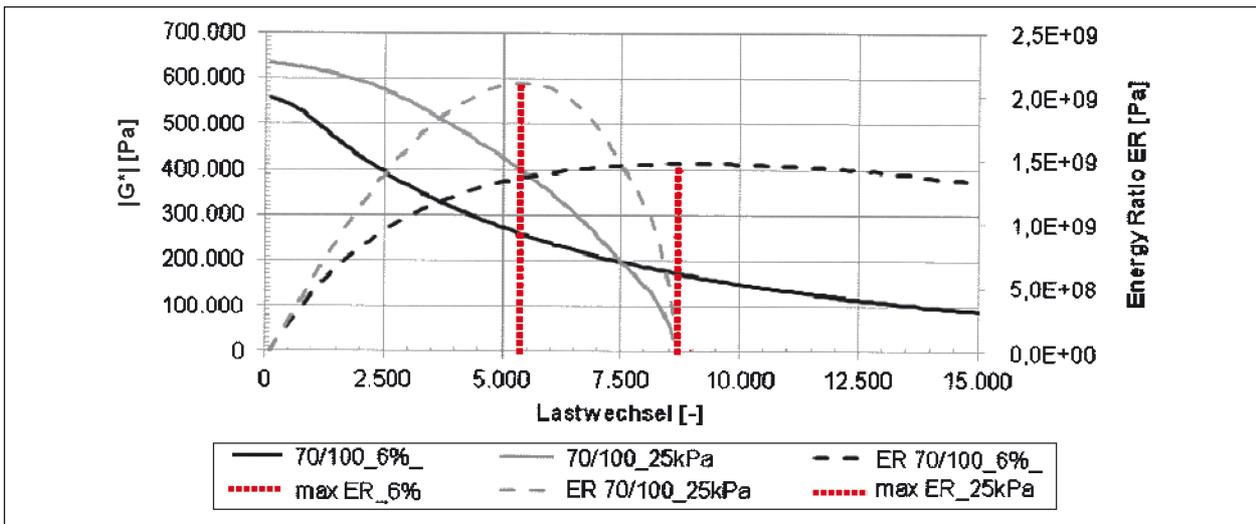


Bild 65: Kraft- und deformationsgeregelte kontinuierliche Ermüdungsprüfung an Straßenbaubitumen 70/100 bei einer Prüftemperatur von 37 °C

dauer nicht gleichmäßig, sondern zeigt Bereiche mit Anstiegen des Schermoduls. Beispielhaft sind für eine scherspannungsgeregelte Ermüdungs-

prüfung am PmB 25/55-55 in Bild 66 der Verlauf des komplexen Schermoduls und in Bild 67 der Verlauf der Energy Ratio ER dargestellt.

Bitumen	Zustand	T	$ G^* $ Beginn	$ G^* $ bei max ER	$ G^* $ bei 50 % ER	$ G^* $ bei 50 % ER
		[°C]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[%]
30/45	frisch	42	0,483	0,322	0,464	96,2
	gealtert	55	0,457	0,300	0,429	93,9
70/100	frisch	37	0,498	0,303	469	94,0
	gealtert	47	0,478	0,304	0,455	95,2
50/70	frisch	40	0,438	0,274	416	94,9
	gealtert	53	0,377	0,260	0,365	96,5
25/55-55	frisch	42	0,355	0,127	0,160	45,1
	gealtert	48	-	-	-	-

Tab. 15: Kriterium für das Einsetzen der Lastpause bei ER50 (grau hinterlegt)

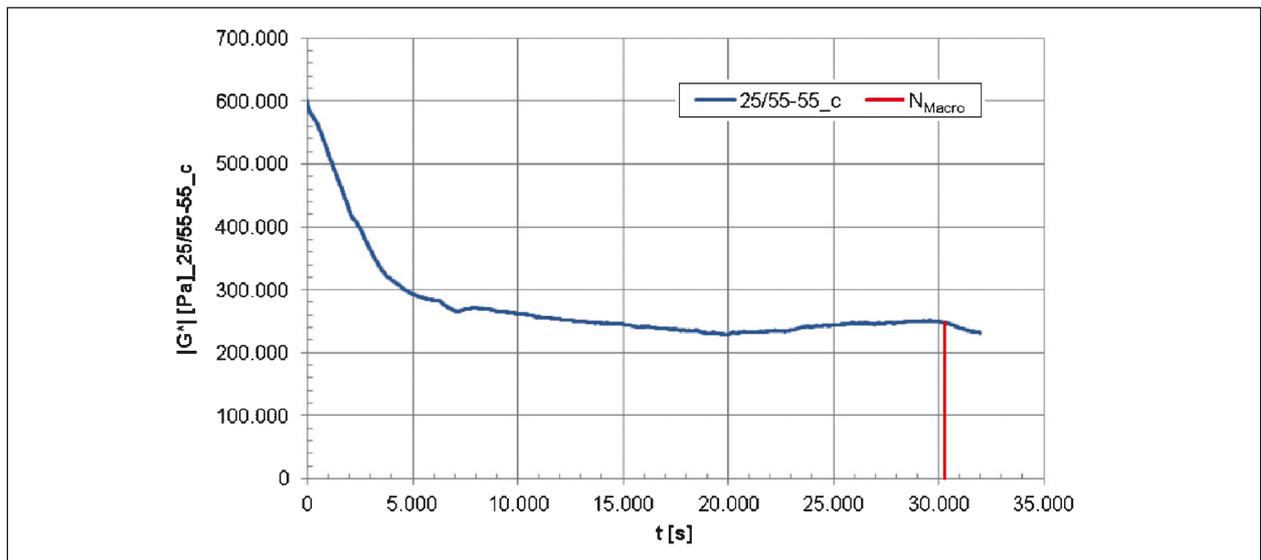


Bild 66: Verlauf des komplexen Schermoduls bei scherspannungsgeregelter Ermüdungsprüfung am PmB 25/55-55

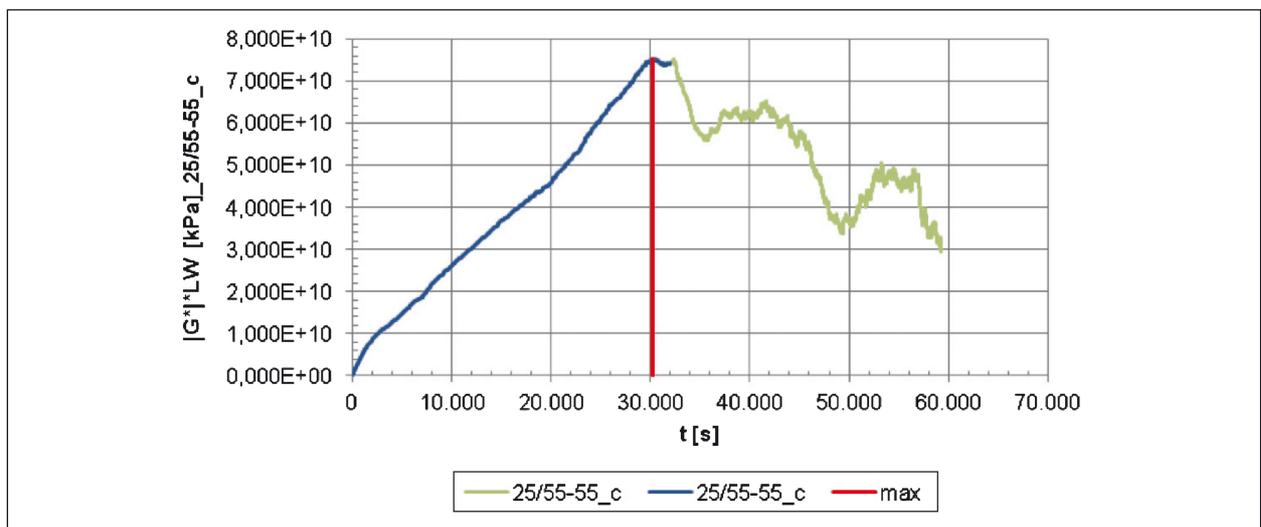


Bild 67: Verlauf der Energy Ratio ER bei scherspannungsgeregelter Ermüdungsprüfung am PmB 25/55-55 bei 42 °C

5.1.2 Healing-Prüfungen mittels DSR

Es werden an Straßenbaubitumen 50/70 sowohl kraftgesteuerte (bei 25 kPa Scherspannung) als auch deformationsgeregelter (bei 6 % Auslenkung) DSR-Prüfungen bei einer Prüftemperatur von konstant 40 °C durchgeführt.

Die Einführung von Lastpausen bei Ermüdungsprüfungen mittels DSR ist auf den Versuchstyp 3 beschränkt (siehe Kapitel 3.2.6).

Zur Identifikation eines für die Ansprache der Healing-Eigenschaften von Bitumen bestgeeigneten Prüfverfahrens werden im Rahmen dieses Projekts die Prüfparameter variiert und ihre Auswirkungen auf das Prüfergebnis analysiert. Das schrittweise Vorgehen zur Identifikation der optimalen Prüfbedingungen ist nachfolgend beschrieben. Dabei werden solange die Prüfbedingungen variiert, bis eine einwandfreie Interpretation der Versuchsergebnisse realisiert wird.

Zunächst wird folgendes Lastpausenkriterium definiert:

Die Lastpause erfolgt nach einem Abfall des Schermoduls (um rund 50 %) auf den konstanten Wert von $|G^*| = 300$ kPa. Es wird der Healing-Index 1 ausgewertet.

Bild 68 zeigt beispielhaft den Verlauf des Schermoduls $|G^*|$ bei beiden Versuchstypen (kraftgesteuert

$\gamma = 6$ % und deformationsgesteuert $\sigma = 25$ kPa) mit dem Lastpausenkriterium $|G^*| = 300$ kPa und einer Lastpause von 600 s (LP 600 s).

Sämtliche Ergebnisse aus den Ermüdung-Healing-Prüfungen bis 300 kPa mit einer Lastpause von 600 s sind in Tabelle 16 gegenübergestellt und in Bild 69 grafisch dargestellt.

Die Lastpausendauer von 600 s wird variiert. Es werden weitere Versuche mit Lastpausen von 0 s, 900 und 1.800 s durchgeführt. Beispiele für kraft- und deformationsgeregelter Prüfungen mit variierenden Lastpausendauer siehe Bild 70 und 71.

Die Ergebnisse aus den deformationsgeregelter DSR-Prüfungen mit unterschiedlicher Lastpausendauer sind in Tabelle 17 gegenübergestellt und in Bild 72 grafisch dargestellt.

Die Ergebnisse aus den scherspannungsgeregelten DSR-Prüfungen mit unterschiedlicher Lastpausendauer sind in Tabelle 18 gegenübergestellt und in Bild 73 grafisch dargestellt. Nach der Auswertung dieser Ermüdung-Healing-Prüfungen ist festzuhalten, dass dieses Kriterium wegen zu großer Schädigung der Probe unvorteilhaft ist und daher nicht weiter verfolgt wird. Das Lastpausenkriterium wird neu definiert:

Die Lastpause erfolgt nach einem Abfall der Energy Ratio auf 50 % (ER50). Es werden jeweils 5 Belas-

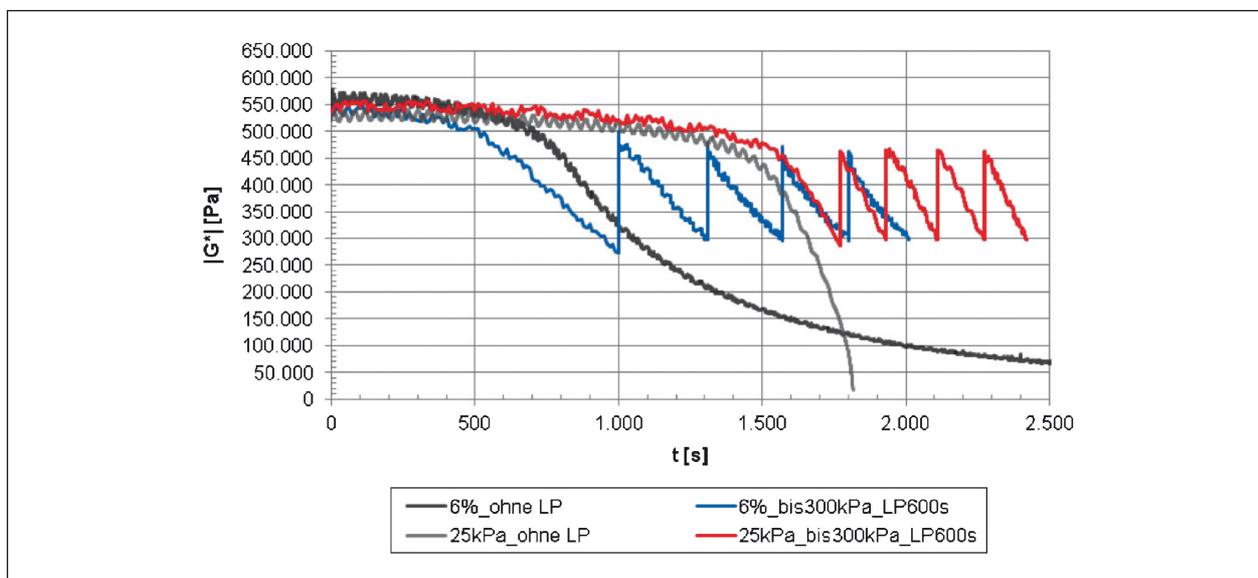


Bild 68: Kontinuierliche DSR-Prüfung am 50/70 bei 40 °C sowie DSR-Healing-Prüfungen mit eingebrachten Lastpausen von 600 s

tungszyklen mit zwischenliegenden (4) Lastpausen aufgebracht. Die Lastpausendauer beträgt jeweils konstant 600 s. Belastungsart, Lastpausendauer und Temperatur während der Lastpause werden variiert.

Die Auswertung erfolgt anhand

- der Healing-Indices 1, 2 und 3,
- der prozentual ertragbaren Lastwechselzahl nach eingelegter Lastpause bis zum Abfall des

komplexen Schermoduls am Ende der ersten Belastungsphase und der

- Zunahme der Lastwechselzahl bis zum Erreichen von Maximum ER durch die eingebrachten Lastpausen.

Bild 74 zeigt beispielhaft den Verlauf des Schermoduls $|G^*|$ bei scherspannungsgeregelter Healing-Prüfung mittels DSR mit dem Lastpausenkriterium ER50. Bild 75 zeigt den zugehörigen Verlauf der Energy Ratio.

	Zyklus	LW bis Abbruchkriterium	LW_i/LW_0 [%]	$ G^* $ bei Beginn von Zyklus n [%]
6%_bis300kPa_LP600s	1	10.100	100,0	100,0
	2	3.060	30,3	90,8
	3	2.630	26,0	86,8
	4	2.320	23,0	84,8
	5	2.070	20,5	83,4
25kPa_bis300kPa_LP600s	1	17.800	100,0	100,0
	2	1.620	9,1	83,8
	3	1.810	10,2	83,6
	4	1.640	9,2	84,4
	5	1.460	8,2	81,8

Tab. 16: Ergebnisse aus Ermüdung-Healing-Prüfungen mittels DSR an Straßenbaubitumen 50/70 bei unterschiedlichen Belastungsarten

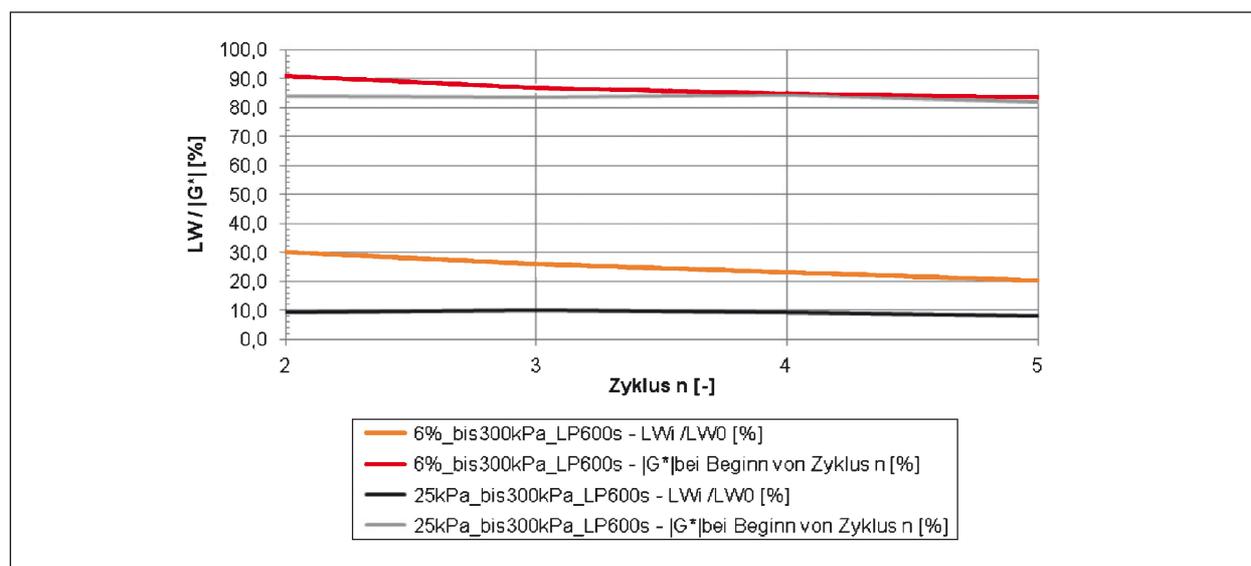


Bild 69: Ergebnisse aus Ermüdung-Healing-Prüfungen mittels DSR an Straßenbaubitumen 50/70 bei einer Prüftemperatur von 40 °C und unterschiedlichen Belastungsarten

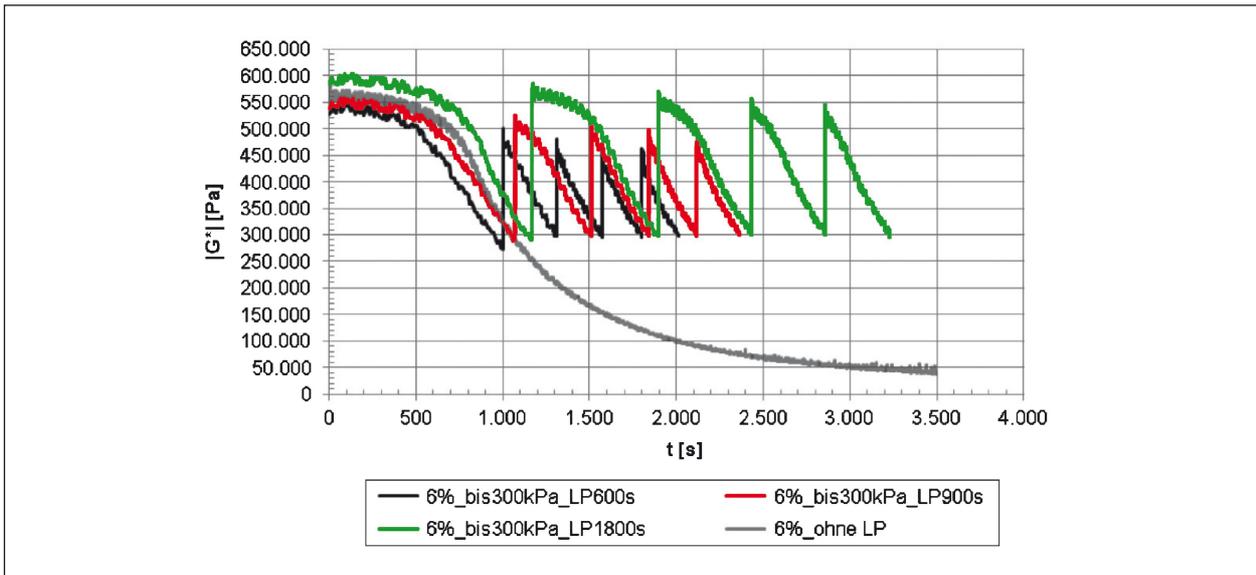


Bild 70: Kontinuierliche deformationsgeregelte DSR-Prüfung an Straßenbaubitumen 50/70 bei einer Prüftemperatur von 40 °C sowie deformationsgeregelte DSR-Prüfung mit eingebrachten Lastpausen von 600 s, 900 s und 1.800 s

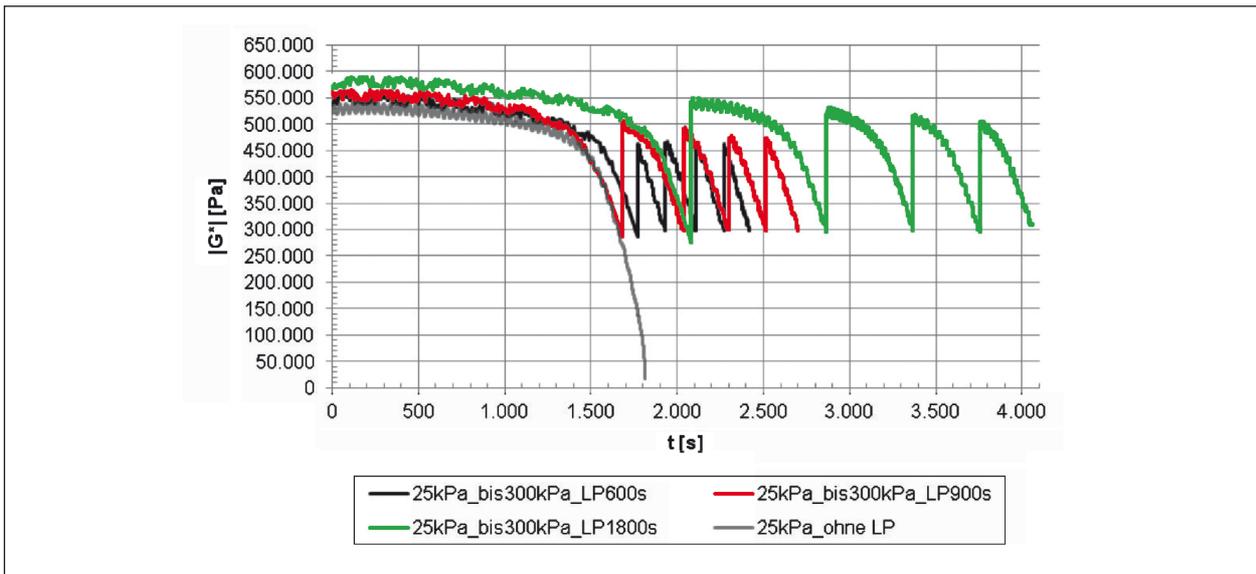


Bild 71: Kontinuierliche scherspannungsgeregelte DSR-Prüfung an Straßenbaubitumen 50/70 bei einer Prüftemperatur von 40 °C sowie scherspannungsgeregelte DSR-Prüfung mit eingebrachten Lastpausen von 600 s, 900 s und 1.800 s

	Zyklus	LW bis Abbruchkriterium	LW_i/LW_0 [%]	$ G^* $ bei Beginn von Zyklus n [%]
6%_bis300kPa_LP600s	1	10.100	100,0	100,0
	2	3.060	30,3	90,8
	3	2.630	26,0	86,8
	4	2.320	23,0	84,8
	5	2.070	20,5	83,4
6%_bis300kPa_LP900s	1	10.800	100,0	100,0
	2	4.400	40,7	94,3
	3	3.320	30,7	91,1
	4	2.790	25,8	89,4
	5	2.440	22,6	87,8
6%_bis300kPa_LP1800s	1	11.800	100,0	100,0
	2	7.290	61,8	97,5
	3	5.360	45,4	94,7
	4	4.260	36,1	93,9
	5	3.740	31,7	91,4

Tab. 17: Ergebnisse aus deformationsgeregelten DSR-Prüfungen unterschiedlicher Lastpausendauer an Straßenbaubitumen 50/70

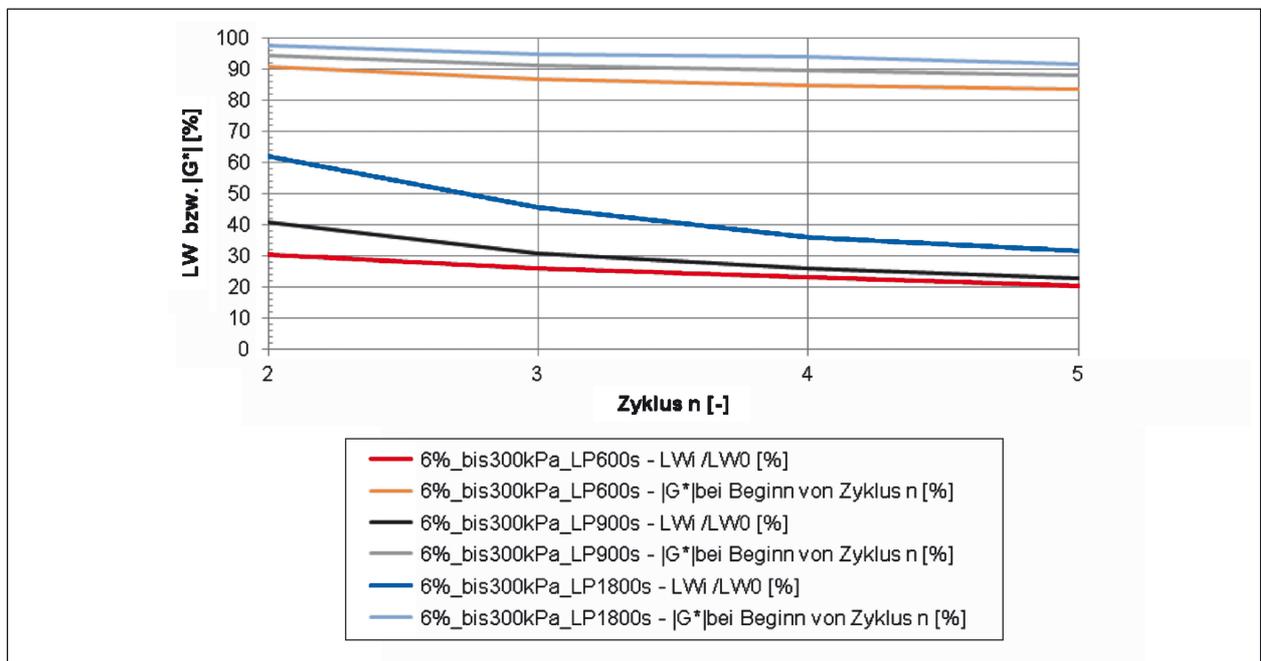


Bild 72: Ergebnisse aus deformationsgeregelten DSR-Prüfungen mit unterschiedlicher Lastpausendauer an Straßenbaubitumen 50/70

	Zyklus	LW bis Abbruchkriterium	LW_i/LW_0 [%]	$ G^* $ bei Beginn von Zyklus n [%]
25kPa_bis300kPa_LP600s	1	17.800	100,0	100,0
	2	1.620	9,1	83,8
	3	1.810	10,2	83,6
	4	1.640	9,2	84,4
	5	1.460	8,2	81,8
25kPa_bis300kPa_LP900s	1	16.900	100,0	100,0
	2	3.590	21,2	88,0
	3	2.620	15,5	88,1
	4	2.180	12,9	84,4
	5	1.860	11,0	84,7
25kPa_bis300kPa_LP1800s	1	8.700	100,0	100,0
	2	3.680	42,3	93,5
	3	2.490	28,6	65,0
	4	1.420	16,3	73,7
	5	3.470	39,9	83,9

Tab. 18: Ergebnisse aus scherspannungsgeregelten DSR-Prüfungen mit unterschiedlicher Lastpausendauer an Straßenbaubitumen 50/70

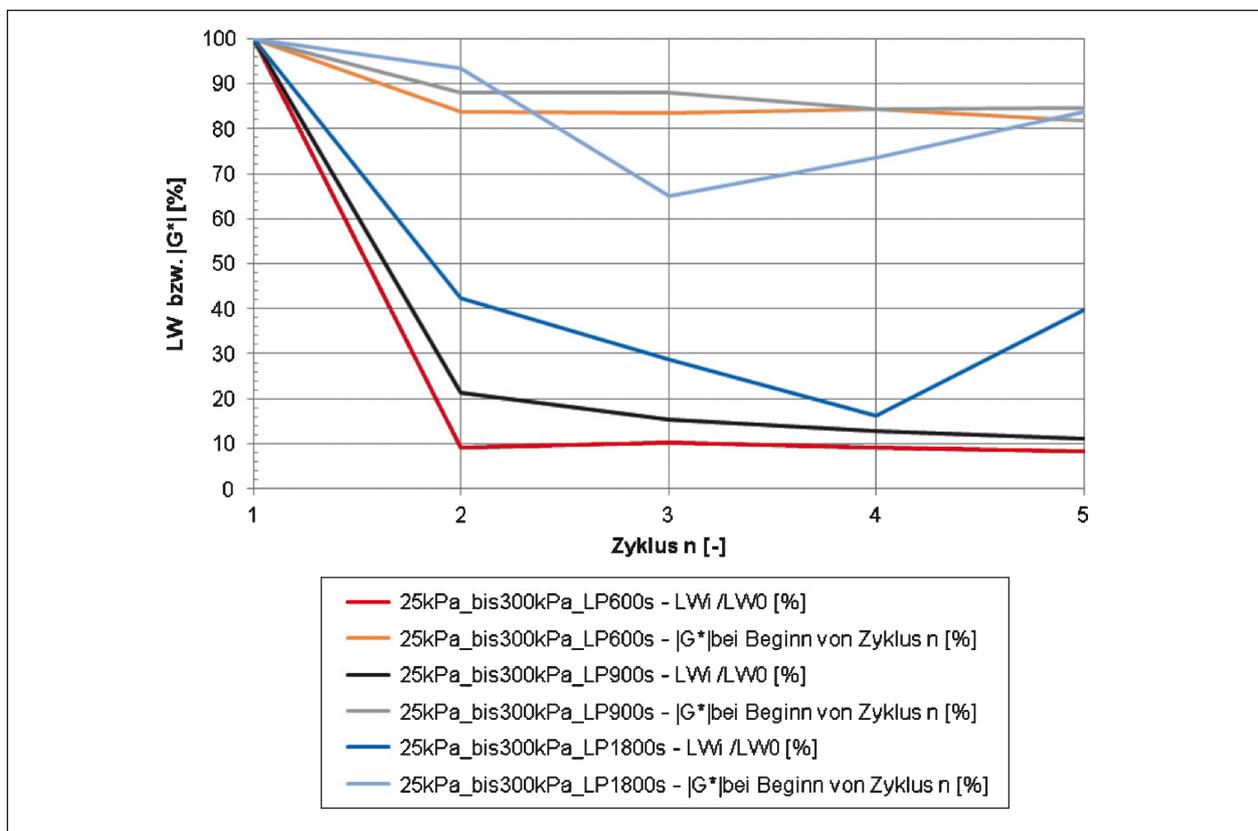


Bild 73: Ergebnisse aus scherspannungsgeregelten DSR-Prüfungen mit unterschiedlicher Lastpausendauer an Straßenbaubitumen 50/70

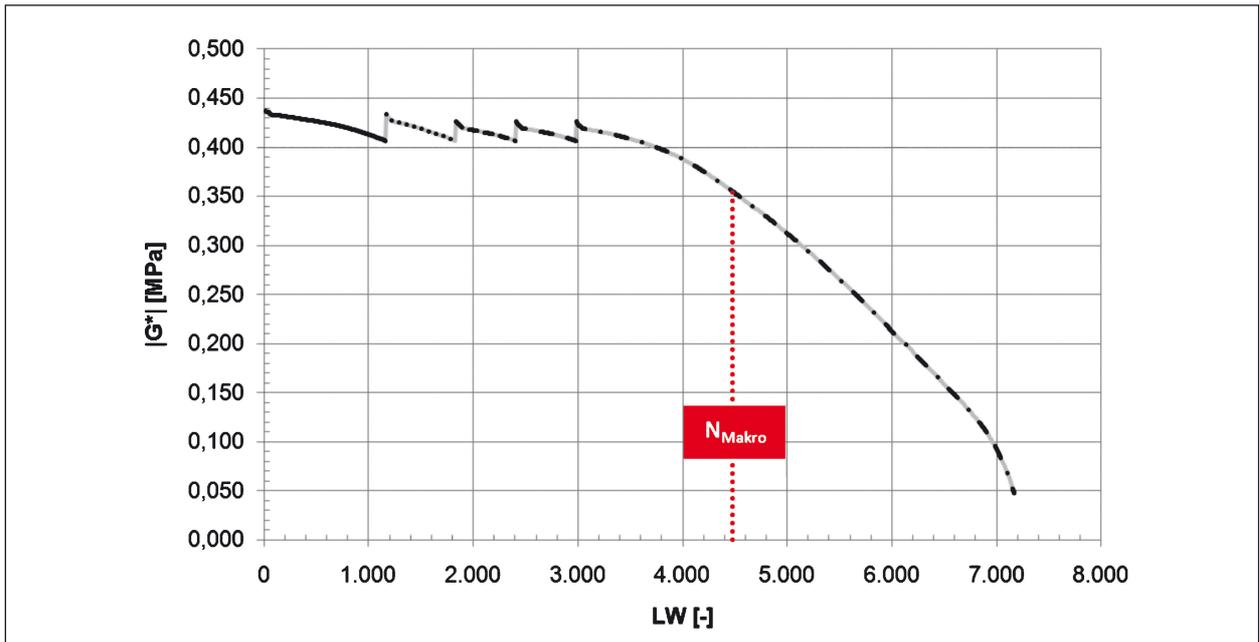


Bild 74: Verlauf des komplexen Schermoduls bei scherspannungsgesteuerter Healing-Prüfung mittels DSR an Straßenbaubitumen 70/100 bei einer Prüftemperatur von 43,5 °C

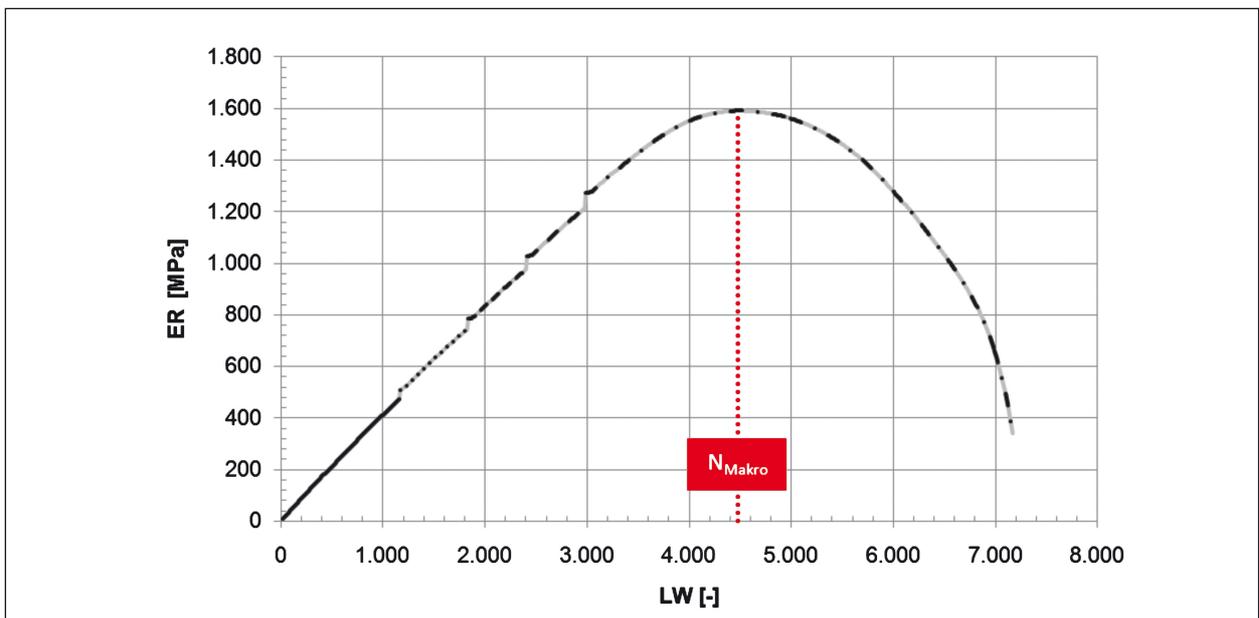


Bild 75: Verlauf der Energy Ratio bei scherspannungsgesteuerter Healing-Prüfung mittels DSR an Straßenbaubitumen 70/100 bei einer Prüftemperatur von 43,5 °C

Es werden jeweils die Straßenbaubitumen 30/45, 70/100, 50/70 und das PmB 25/55-55 sowohl in frischem als auch im gealtertem Zustand geprüft und ausgewertet, siehe Bilder 76 bis 78.

Den Einfluss der Variation der Lastpausendauer auf die ermittelten Healing-Indices und die Zunahme der Lastwechselzahl zeigen Bilder 79 und 80.

Nach Auswertung dieser Ermüdung-Healing-Prüfungen ist festzuhalten, dass zum einen die Vergleichbarkeit verschiedener Bitumen nur bei gleicher Viskosität erfolgen kann. Ob diese Betrachtung Rückschlüsse auf das jeweilige Healing-Verhalten bei gleicher Temperatur zulässt, kann nicht sicher angegeben werden. Zusätzlich kann so nicht geklärt werden, inwiefern die Beanspruchung tatsächlich zu einer Ermüdung der Bitumenprobe führt.

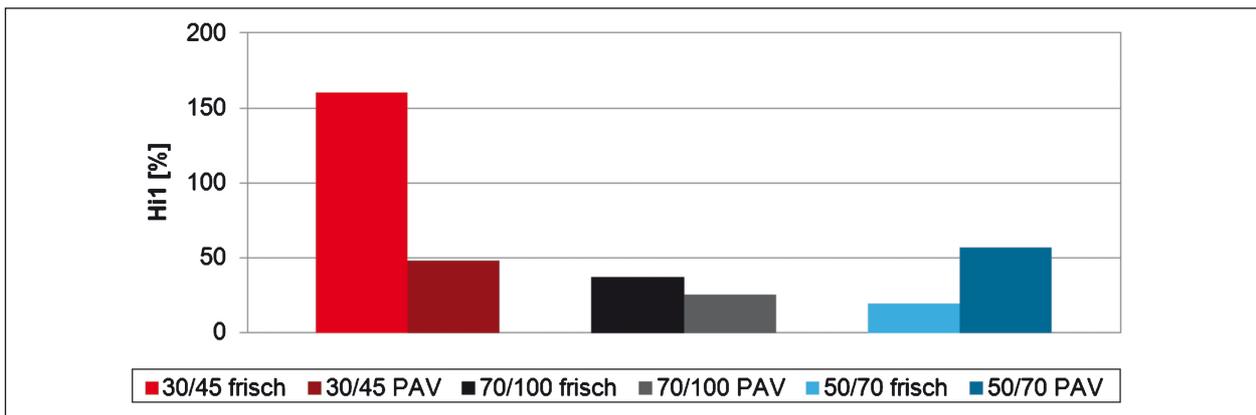


Bild 76: Einfluss der Alterung auf den Healing-Index Hi1 bei Healing-Prüfung mittels DSR bei verschiedenen Straßenbaubitumen

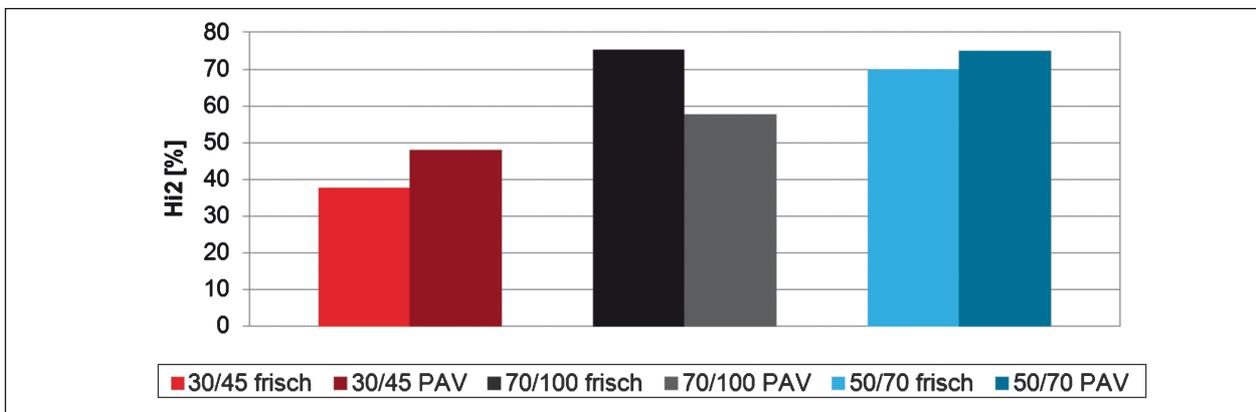


Bild 77: Einfluss der Alterung auf den Healing-Index Hi2 bei Healing-Prüfung mittels DSR bei verschiedenen Straßenbaubitumen

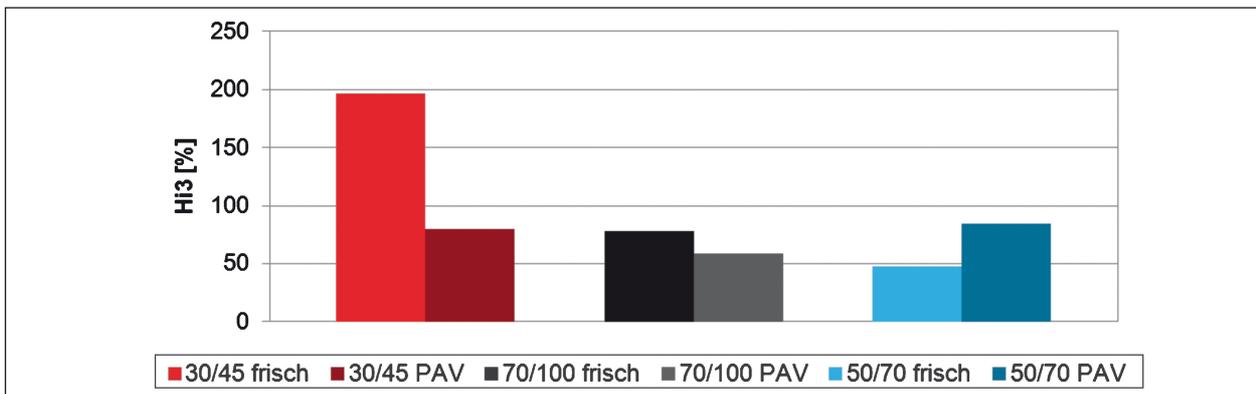


Bild 78: Einfluss der Alterung auf den Healing-Index Hi3 bei Healing-Prüfung mittels DSR bei verschiedenen Straßenbaubitumen

Bitumen	Alterung	Hi1 [%]	Hi2 [%]	Hi3 [%]
30/45	frisch	160,6	37,9	196,3
30/45	RTFOT+PAV	48,3	47,9	79,5
70/100	frisch	36,8	75,2	77,8
70/100	RTFOT+PAV	25,3	57,7	58,7
50/70	frisch	10,5	69,9	37,4
50/70	RTFOT+PAV	56,9	75,0	84,1

Tab. 19: Healing-Indices ermittelt aus Healing-Prüfungen mittels DSR bei annähernd gleicher Ausgangssteifigkeit verschiedener Bitumen ($|G^*| \approx 500$ kPa)

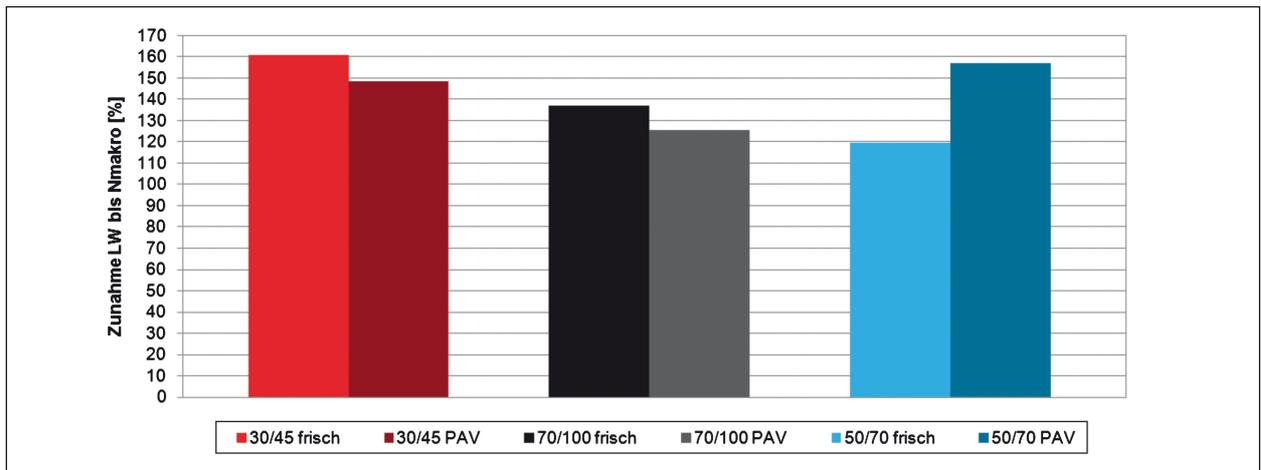


Bild 79: Zunahme der Lastwechselzahl bis zum Erreichen des Ermüdungskriteriums N_{Makro} bei verschiedenen Straßenbaubitumen im frischen und gealterten Zustand

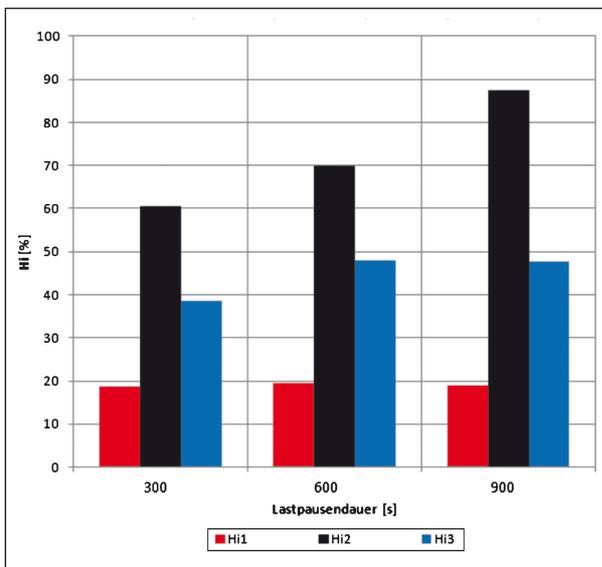


Bild 80: Einfluss der Lastpausendauer auf Healing-Indices ermittelt durch Healing-Prüfungen mittels DSR an Straßenbaubitumen 50/70 bei 40 °C

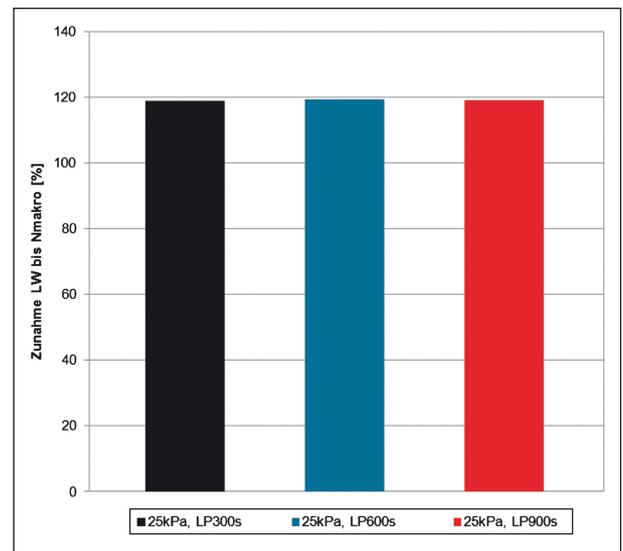


Bild 81: Zunahme der Lastwechselzahl bis zum Erreichen des Ermüdungskriteriums N_{Makro} in Abhängigkeit von der Lastpausendauer bei Healing-Prüfung mittels DSR an Straßenbaubitumen 50/70 im frischen Zustand bei 40 °C

Die Versuchsbedingungen werden daher neu definiert:

Es erfolgt eine Absenkung der Prüftemperatur auf einheitlich 20 °C für alle Bitumen, sowohl im frischen als auch im gealterten Zustand. Die zunehmende Viskosität durch die Absenkung der Temperatur erfordert größere Scherspannungen, um eine Ermüdung innerhalb von ca. 2 h (weniger als 80.000 Lastwechsel) zu bewirken. Das Aufbringen einer erhöhten Scherspannung ist nur durch die Wahl einer kleineren Messgeometrie (Durchmesser 8 mm) zu erreichen. Die unterschiedlichen Viskositäten verschiedener Bitumen

bei gleicher Prüftemperatur erfordern zudem eine Anpassung der Scherspannung je Bitumen und Alterungszustand. Da Heilungseffekte verschiedener Lastpausen nicht voneinander zu trennen bzw. zu unterscheiden sind, erfolgt eine Reduktion der Lastpausenanzahl von vier auf eine Lastpause.

Die Ergebnisse der Healing-Prüfungen mittels DSR unter den so angepassten Versuchsbedingungen sind in Tabelle 20 angegeben und in Kapitel 6.4.1 diskutiert. Damit ist das Ziel der Festlegung geeigneter Prüfbedingungen erreicht.

Bitumen	Alterung	Hi1 [%]	Hi2 [%]	Hi3 [%]	Hi4 [%]	Hi5 [%]
30/45	frisch	-10,03	13,99	29,35	89,02	28,17
30/45	RTFOT+PAV	-34,46	17,56	3,02	65,43	2,87
70/100	frisch	28,73	8,12	12,51	71,62	12,15
70/100	RTFOT+PAV	17,83	19,64	7,76	70,46	8,89
50/70	frisch	24,11	12,73	22,00	78,54	21,02
50/70	RTFOT+PAV	18,38	17,52	8,88	59,82	0,88
25/55-55	frisch	13,0	17,4	4,9	58,5	7,0
25/55-55	RTFOT+PAV	35,06	22,67	6,64	62,70	5,29

Tab. 20: Healing-Indices ermittelt aus Healing-Prüfungen mittels DSR bei 20 °C

5.1.3 Multi Stress Creep Recovery Test

Die Anwendung des MSCR-Test mit variierenden Prüfbedingungen erfolgt an Straßenbaubitumen 50/70.

a) MSCR-Tests mit Entlastungsdauer $t_{LP} = 9$ s

Gemäß FGSV (2012) ist der MSCR-Test bei einer Temperatur von 60 °C und einer Entlastungsdauer von 9 s durchzuführen. Um die Abhängigkeit der ermittelbaren Kenngrößen von der Temperatur zu identifizieren, wurden die MSCR-Test zusätzlich bei 50 °C und bei 40 °C durchgeführt. Die Ergebnisse sind nachfolgend für unterschiedlich große Laststufen (0,1 kPa; 1,6 kPa; 3,2 kPa) gegenübergestellt (Bilder 82 bis 90; siehe auch Tabelle 21).

b) MSCR-Tests mit Entlastungsdauer $t_{LP} = 90$ s und $t_{LP} = 300$ s

Gemäß FGSV (2012) ist beim MSCR-Test nach einer statischen Scherbelastung von 1 s eine Entlastungsphase von 9 s einzulegen. Um die Abhängigkeit der ermittelbaren Kenngrößen von der Lastpausendauer zu identifizieren, wurden die MSCR-Test zusätzlich bei der Lastpausendauer 90 s und 300 s durchgeführt. Die variierten Lastpausendauer wurden ebenfalls bei 60 °C, 50 °C und 40 °C durchgeführt. Die ermittelten Ergebnisse sind nachfolgend „wie oben“ gegenübergestellt (siehe auch Tabelle 21).

Die Änderung der Parameter „prozentuale Rückbildung“ und „verbleibende Kriechdehnung“ durch die Variation von Prüftemperatur und Entlastungsdauer sind in Bild 91 und Bild 92 in Abhängigkeit von der jeweiligen Belastungsstufe grafisch dargestellt.

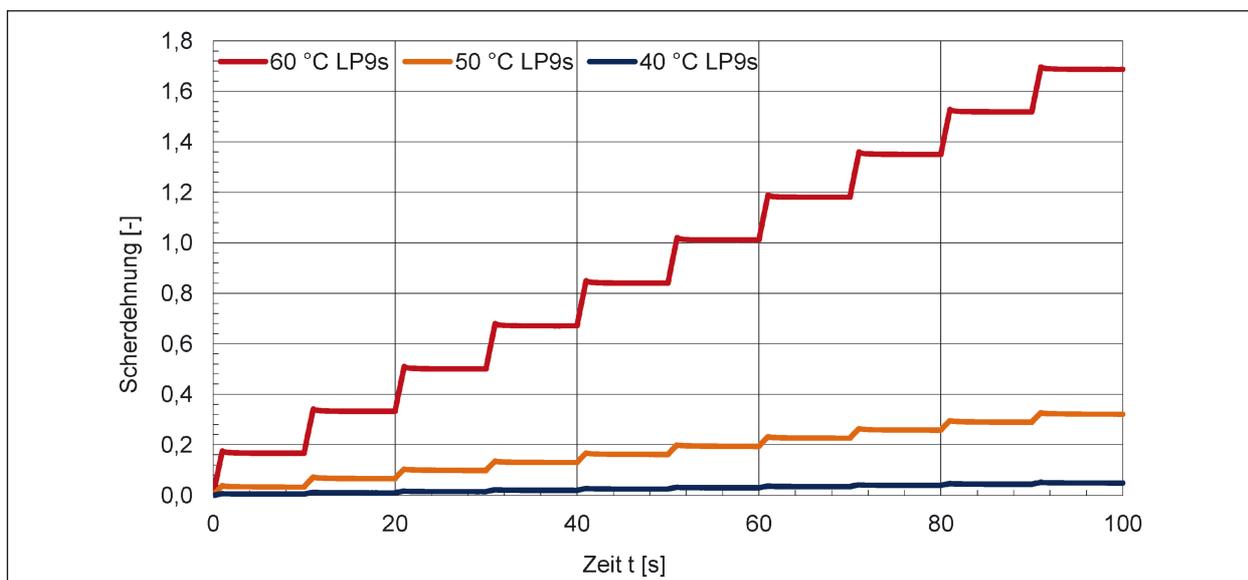


Bild 82: MSCR-Test bei 60, 50 und 40 °C an Straßenbaubitumen 50/70 bei 0,1 kPa Laststufe und 9 s Lastpausendauer

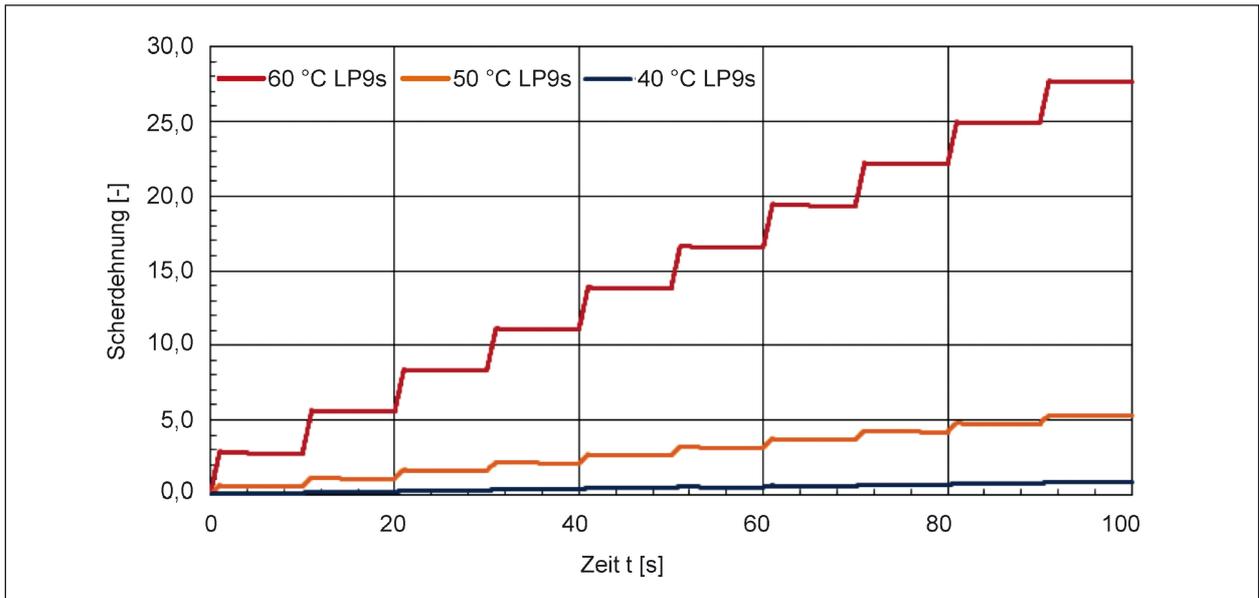


Bild 83: MSCR-Test bei 60, 50 und 40 °C an Straßenbaubitumen 50/70 bei 1,6 kPa Laststufe und 9 s Lastpausendauer

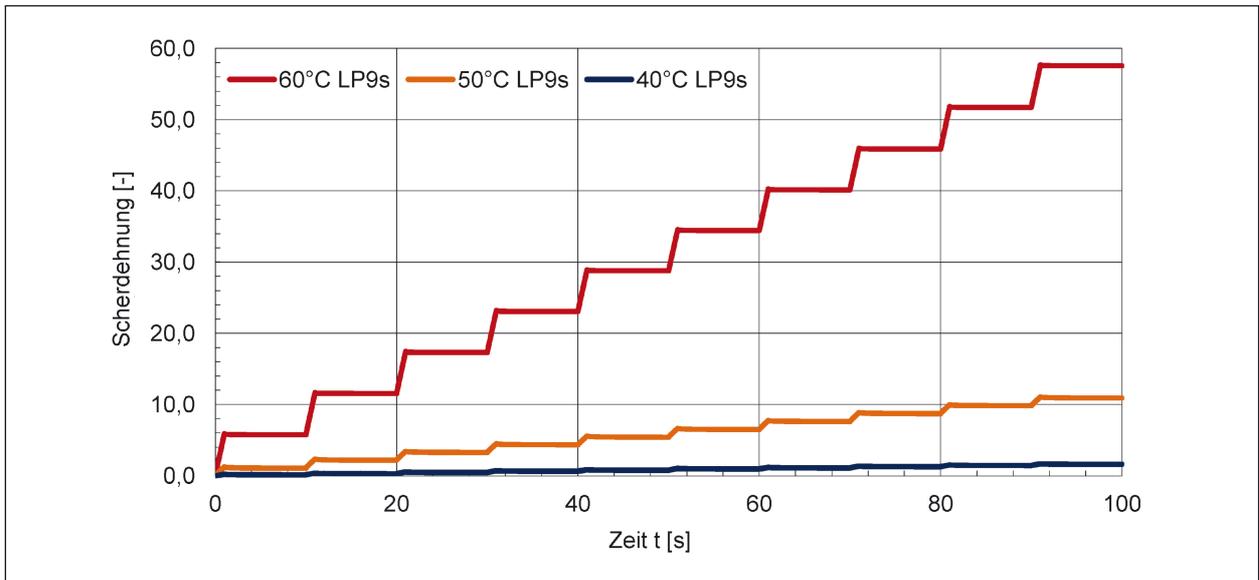


Bild 84: MSCR-Test bei 60, 50 und 40 °C an Straßenbaubitumen 50/70 bei 3,2 kPa Laststufe und 9 s Lastpausendauer

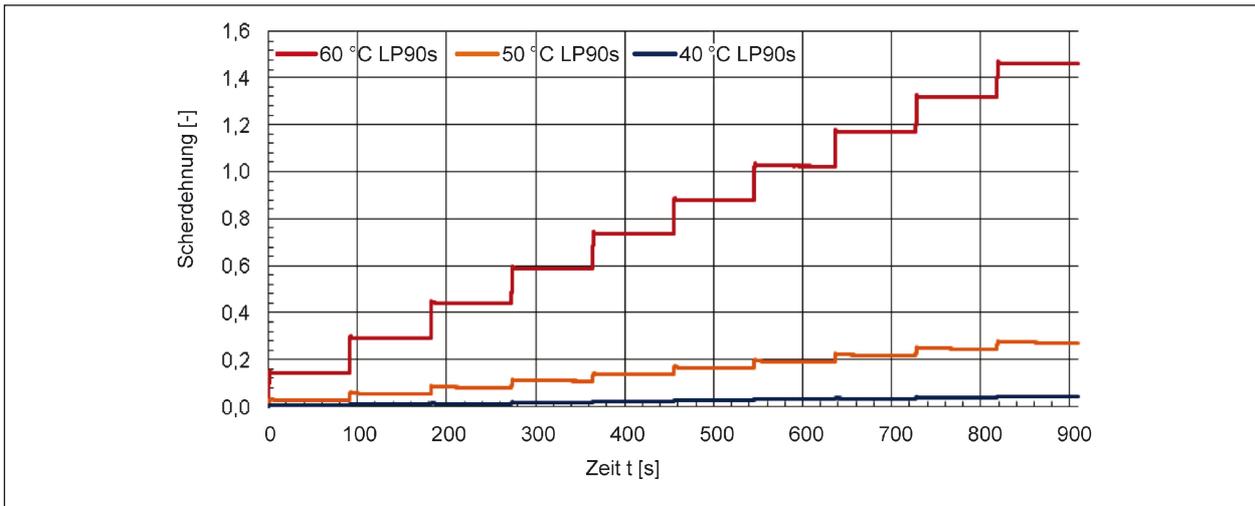


Bild 85: MSCR-Test bei 60, 50 und 40 °C an Straßenbaubitumen 50/70 bei 0,1 kPa Laststufe und 90 s Lastpausendauer

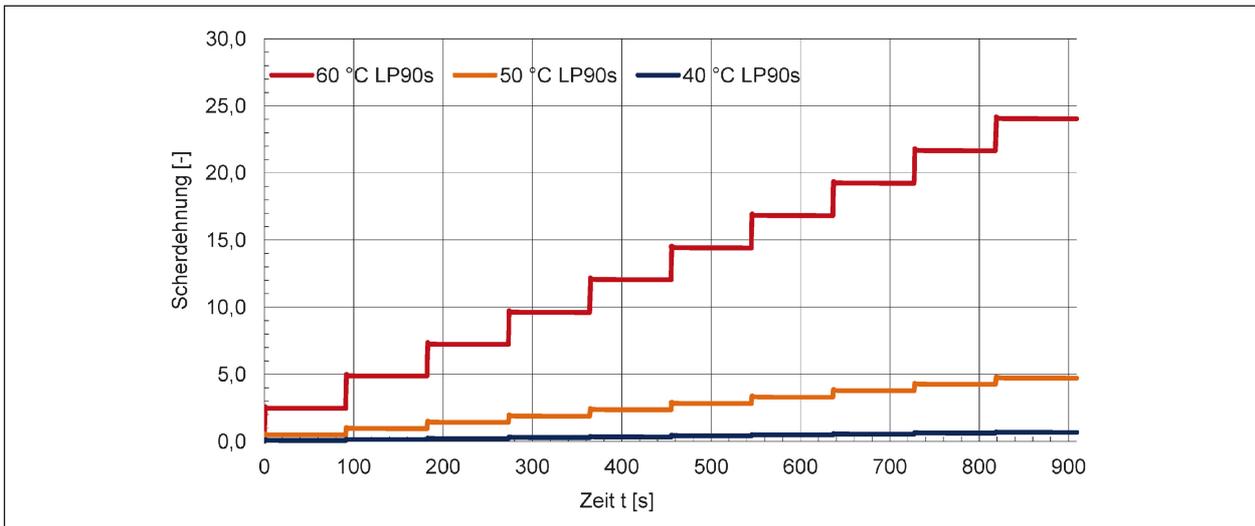


Bild 86: MSCR-Test bei 60, 50 und 40 °C an Straßenbaubitumen 50/70 bei 1,6 kPa Laststufe und 90 s Lastpausendauer

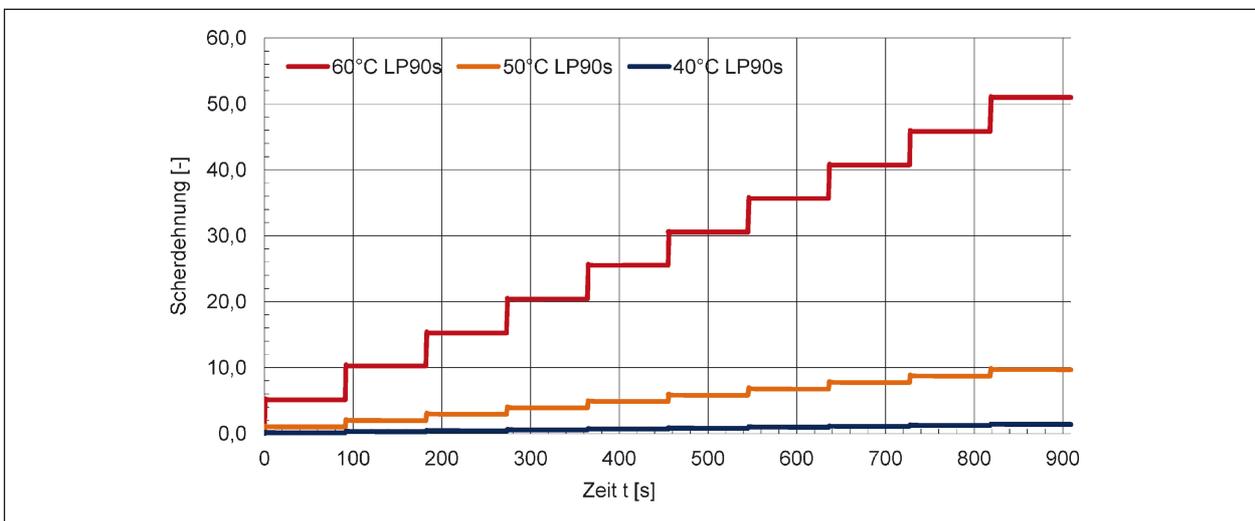


Bild 87: MSCR-Test bei 60, 50 und 40 °C an Straßenbaubitumen 50/70 bei 3,2 kPa Laststufe und 90 s Lastpausendauer

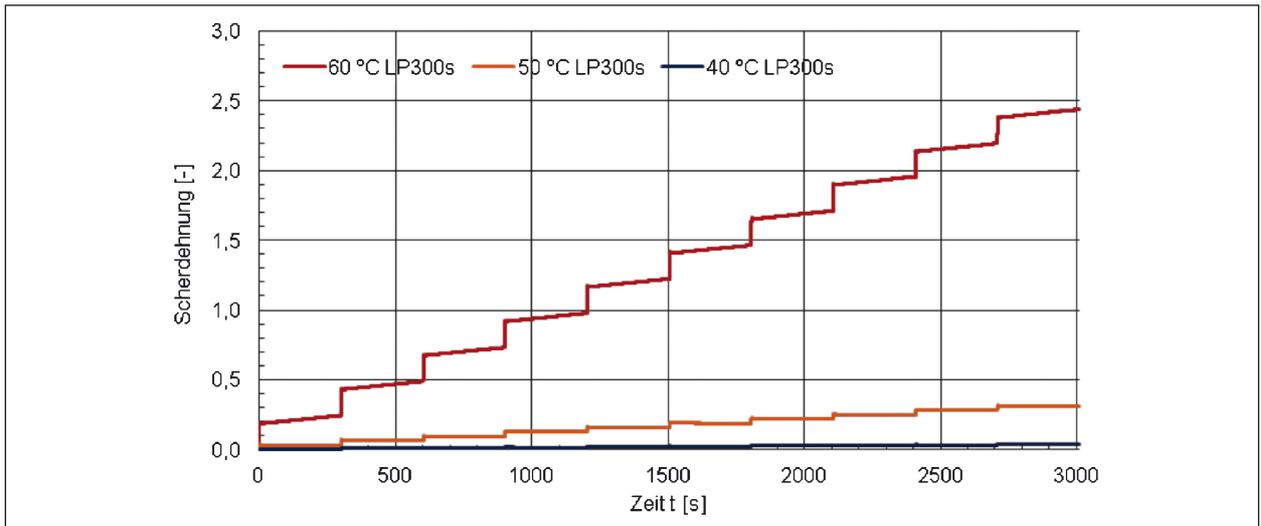


Bild 88: MSCR-Test bei 60, 50 und 40 °C an Straßenbaubitumen 50/70 bei 0,1 kPa Laststufe und 300 s Lastpausendauer

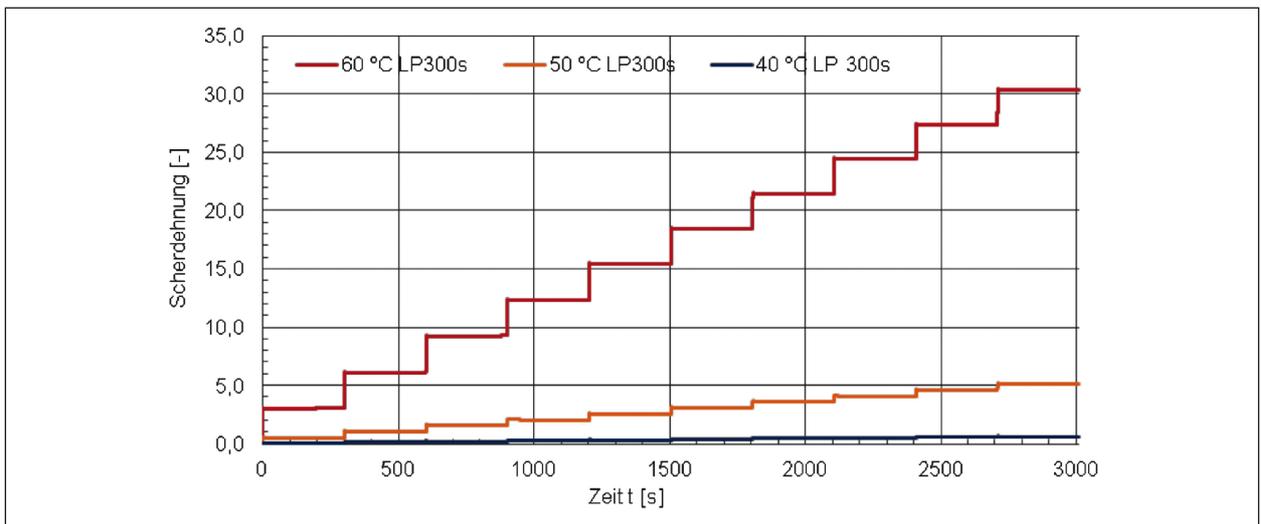


Bild 89: MSCR-Test bei 60, 50 und 40 °C an Straßenbaubitumen 50/70 bei 1,6 kPa Laststufe und 300 s Lastpausendauer

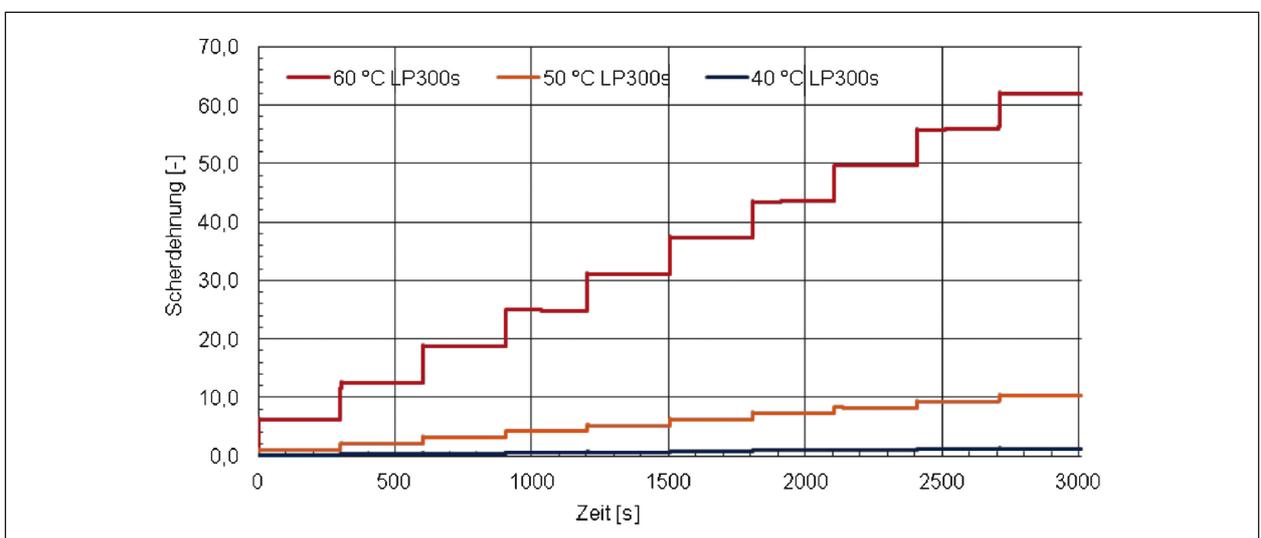


Bild 90: MSCR-Test bei 60, 50 und 40 °C an Straßenbaubitumen 50/70 bei 3,2 kPa Laststufe und 300 s Lastpausendauer

Temperatur [°C]	60			50			40		
	9	90	300	9	90	300	9	90	300
Prozentuale Rückbildung bei 0,1 kPa R100 [%]	5,3	7,3	-25,3	15,4	24,0	19,4	31,2	36,7	44,75
Prozentuale Rückbildung bei 1,6 kPa R1600 [%]	3,7	5,4	2,8	14,2	16,8	19,4	30,1	35,6	38,45
Prozentuale Rückbildung bei 3,2 kPa R3200 [%]	2,1	2,7	2,8	12,4	15,1	14,6	30,1	35,5	37,71
Prozentuale Differenz R100-R1600 R_{diff} [%]	-29,692	-25,917	-111,163	-7,738	-29,862	-17,535	-3,650	-2,935	-14,1
Prozentuale Differenz R100-R3200 R_{diff} [%]	-60,166	-62,818	-111,266	-19,399	-36,870	-24,812	-3,797	-3,141	-15,7
Prozentuale Differenz R1600-R3200 R_{diff} [%]	-43,343	-49,810	0,920	-12,640	-9,992	-8,824	-0,153	-0,212	-1,93
Verbleibende Kriechdehnung $J_{nr_{100}}$ [kPa ⁻¹]	1,686	1,457	2,437	0,320	0,271	0,309	0,049	0,042	0,036
Verbleibende Kriechdehnung $J_{nr_{1600}}$ [kPa ⁻¹]	1,725	1,501	1,894	0,327	0,294	0,317	0,050	0,042	0,039
Verbleibende Kriechdehnung $J_{nr_{3200}}$ [kPa ⁻¹]	1,797	1,591	1,899	0,340	0,302	0,318	0,050	0,042	0,038
Prozentuale Differenz $J_{nr-diff}$ [%]	-2,311	-2,985	22,259	-2,139	-8,453	-2,546	-0,459	-0,032	-8,21
Prozentuale Differenz $J_{nr-diff}$ 100-3.200 [%]	-6,603	-9,199	22,077	-6,121	-11,199	-2,953	-0,167	0,463	-6,89
Prozentuale Differenz $J_{nr-diff}$ 1.600-3.200 [%]	-4,195	-6,034	-0,234	-3,899	-2,532	-0,397	0,290	0,494	1,219

Tab. 21: Ergebnisse der modifizierten MSCR-Tests

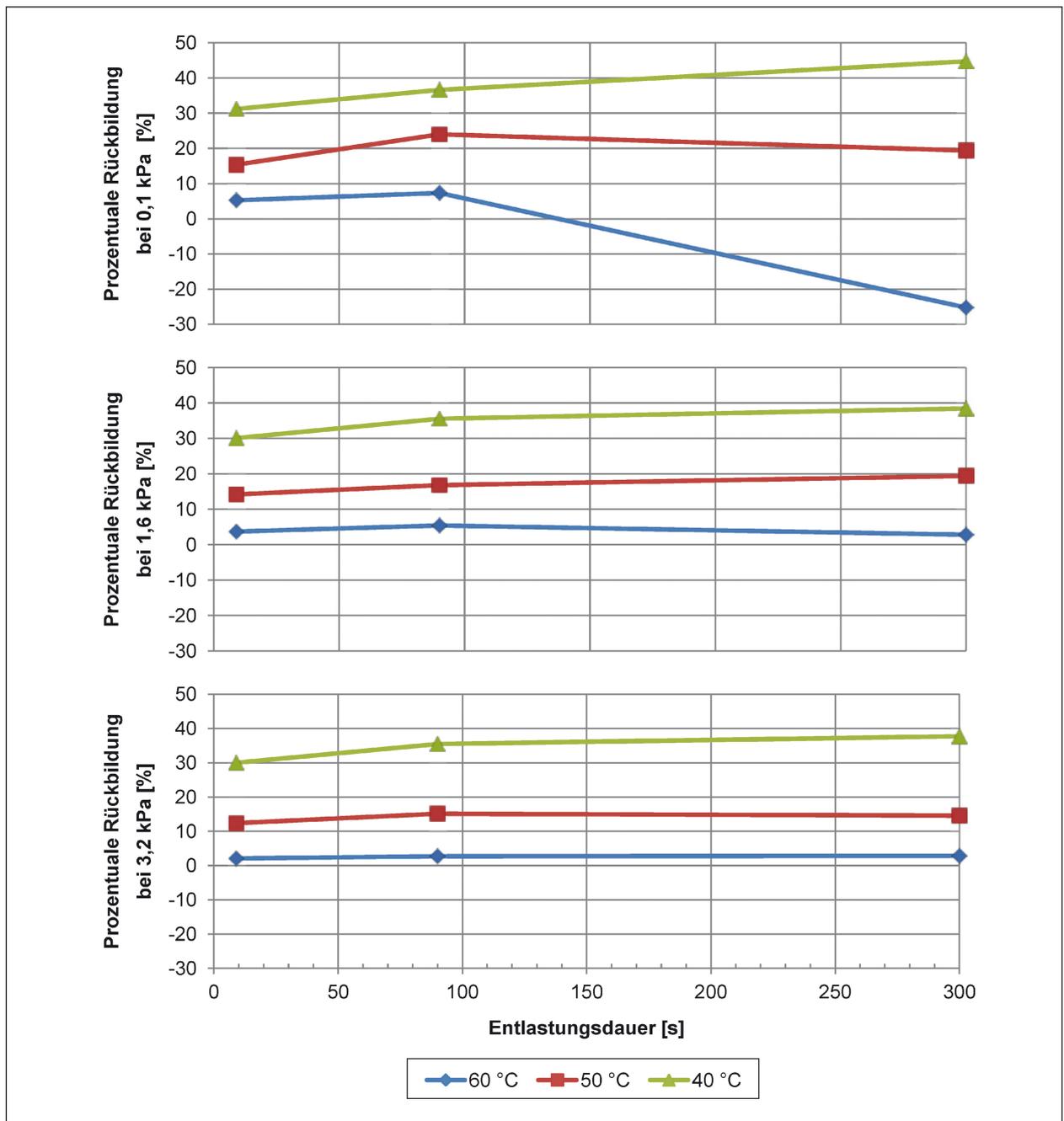


Bild 91: Prozentuale Rückbildung beim MSCR-Test bei 60, 50 und 40 °C an Straßenbaubitumen 50/70 bei 0,1 kPa, 1,6 kPa und 3,2 kPa Laststufe und 9, 90 bzw. 300 s Lastpausendauer

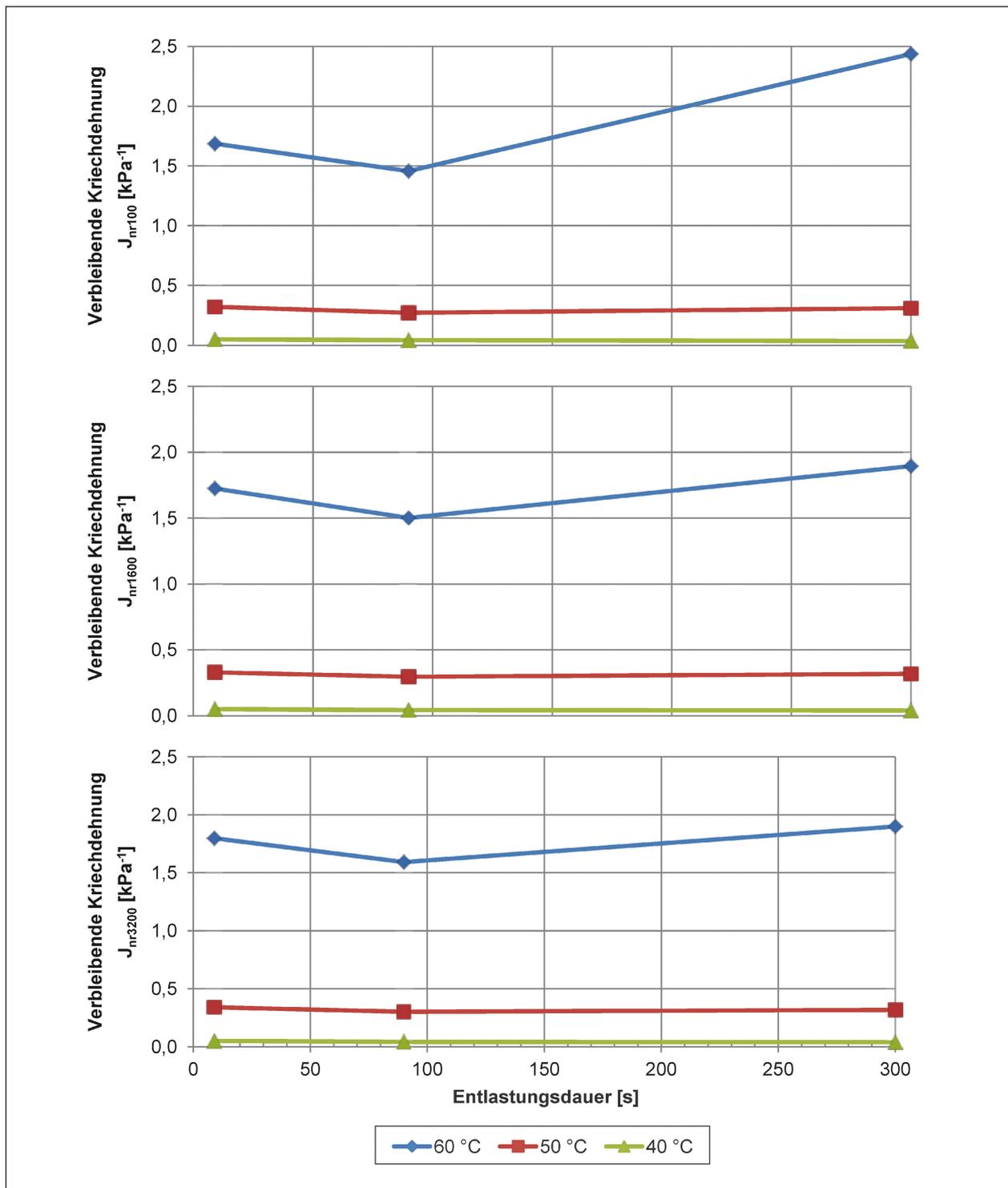


Bild 92: Verbleibende Kriechdehnung beim MSCR-Test bei 60, 50 und 40 °C an Straßenbaubitumen 50/70 bei 0,1 kPa, 1,6 kPa und 3,2 kPa Laststufe und 9, 90 bzw. 300 s Lastpausendauer

5.1.4 Einaxialer Zugversuch

Zur Ermittlung der Zugfestigkeit werden einaxiale Zugversuche an drei Bitumen (70/100, 50/70 und 25/55-55 A) bei einer Temperatur (-5 °C) und bei weggeregelter Belastungsart (0,22 mm/min) durchgeführt. In Bild 93 ist beispielhaft der Spannungs-Dehnungsverlauf der geprüften Bitumen im kontinuierlichen einaxialen Zugversuch dargestellt.

Die Ergebnisse aus den kontinuierlichen einaxialen Zugversuchen sind in Tabelle 22 zusammen mit den daraus ermittelten Eingangsgrößen für wiederholte statische einaxiale Kriech-Erholungsprüfungen dargestellt.

Bei der wiederholten statischen einaxialen Kriech-Erholungsprüfung wird die Probe für eine Dauer von 300 s bei 50 % der Bruchspannung

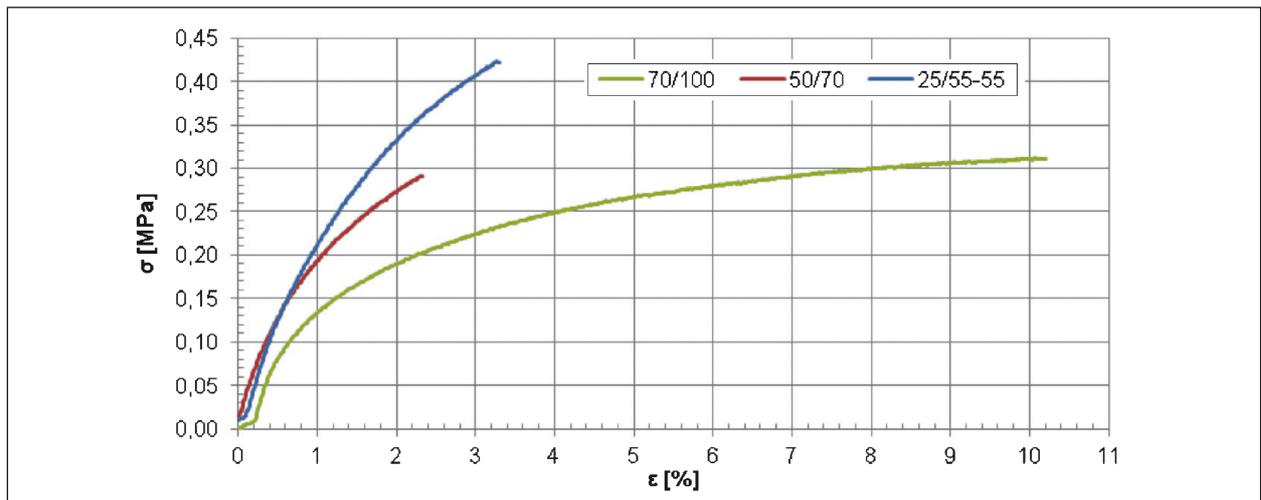


Bild 93: Beispielhafte Darstellung der Spannungs-Dehnungs-Verläufe aus einaxialen Zugversuchen an drei ausgewählten Bitumen bei -5 °C

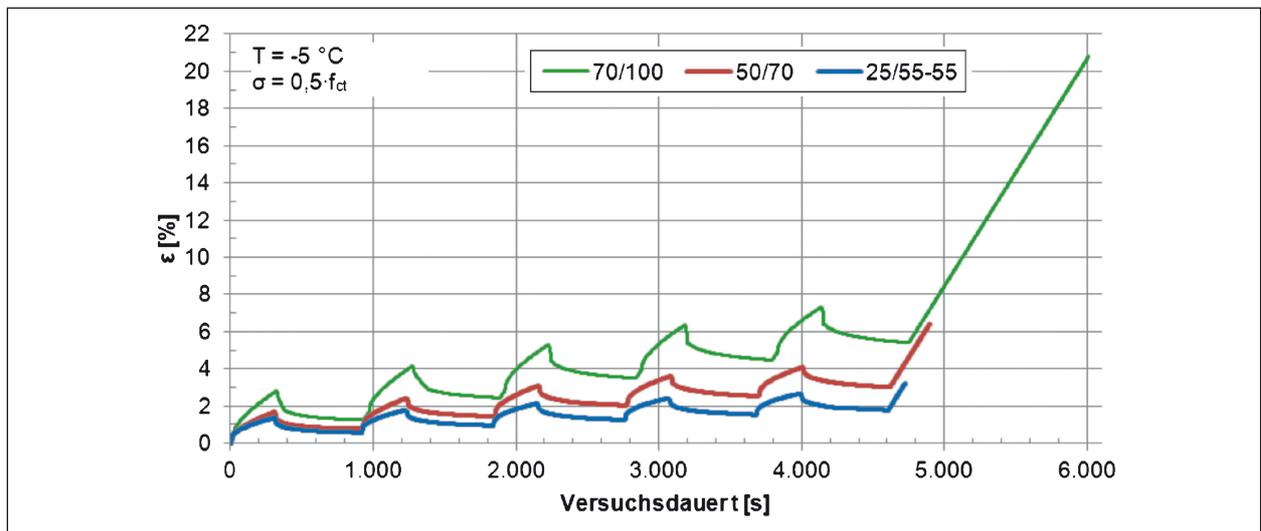


Bild 94: Beispielhafte Darstellung der Dehnungsverläufe verschiedener Bitumen mit 5 Be- und 5 Entlastungsphasen und anschließender Belastung bis zum Bruch der Probe

Bitumen	Bruchdehnung A [%]	Bruchspannung f_{ct} [MPa]	Beanspruchung $\sigma = 0,5 \cdot f_{ct}$ [MPa]
70/100	10,20	0,3344	0,17
50/70	2,33	0,4042	0,15
25/55-55	3,29	0,4232	0,21

Tab. 22: Ergebnisse aus kontinuierlichen einaxialen Zugversuchen als Eingangswerte für Kriech-Erholungsprüfungen

($\sigma = 0,5 \cdot f_{ct}$) beansprucht, gefolgt von einer Entlastungsphase mit einer Dauer von 600 s. Es werden je 5 Be- und 5 Entlastungsphasen auf die Probe aufgebracht und anschließend wird die Probe bis zum Erreichen der Bruchspannung wegeregelt (0,2 mm/min) belastet. Bild 94 zeigt den Dehnungsverlauf.

5.1.5 Chromatografische Analyse

Für die Beanspruchungszustände „frisch“, „gealtert“ und „ermüdet“ erfolgt die anteilmäßige Bestimmung der SARA-Fractionen. Es sind nach Dreifachbelegung jeweils die Mittelwerte grafisch dargestellt und die prozentualen Änderungen bezogen auf das Bitumen im frischen Zustand dargestellt.

Die Signifikanz der Ergebnisse wird durch Anwendung des Mittelwertvergleichs überprüft.

a) Straßenbaubitumen 50/70

Bild 95 zeigt die Anteile von Asphaltene (Asphaltene), polaren Harzen (Resins), Aromaten (Aromates) und gesättigten Kohlenwasserstoffen (Saturates) für die drei Beanspruchungszustände des Straßenbaubitumen 50/70. Darüber hinaus sind die sich durch Beanspruchung (Alterung, Ermüdung) ergebenden prozentualen Änderungen zum Flächenanteil des frischen Zustandes angegeben.

Das Straßenbaubitumen fällt im frischen Zustand durch den hohen Anteil an aromatischen Bestand-

teilen auf (48,4 %). Gesättigte Kohlenwasserstoffe (Saturates) sind im Vergleich anteilmäßig sehr gering enthalten (3,2 %). Asphaltene (21,9 %) und polare Harze (Resins) (26,8 %) sind in vergleichbaren Anteilen vorhanden, wobei der Harzanteil leicht überwiegt.

Bei Betrachtung des Bitumens im gealterten Zustand, kann eine Abnahme der Asphaltene (0,5 %) und der Aromaten (3,9 %) infolge der Alterung festgestellt werden. Dem steht eine Zunahme des Harzanteils (+3,7 %) und der gesättigten Kohlenwasserstoffe (+0,4 %) gegenüber.

Bei Betrachtung des ermüdeten Bitumens lässt sich feststellen, dass infolge der Ermüdung der Asphalteneanteil leicht abnimmt (-0,8 %) und der Anteil der gesättigten Kohlenwasserstoffe zunimmt (+1,3 %). Zudem erhöht sich der Flächenanteil der Aromaten (+0,8 %) und der Anteil der Harze nimmt (-1,6 %) ab.

Nach Anwendung des Mittelwertvergleichs zeigen sich zusammenfassend folgende signifikante Änderungen der SARA-Fractionen durch die Beanspruchung des Straßenbaubitumen 50/70 (siehe auch Tabelle 23):

- Zunahme der Harze infolge Alterung,
- Zunahme gesättigter Kohlenwasserstoffe infolge Alterung und
- Zunahme gesättigter Kohlenwasserstoffe infolge Ermüdung.

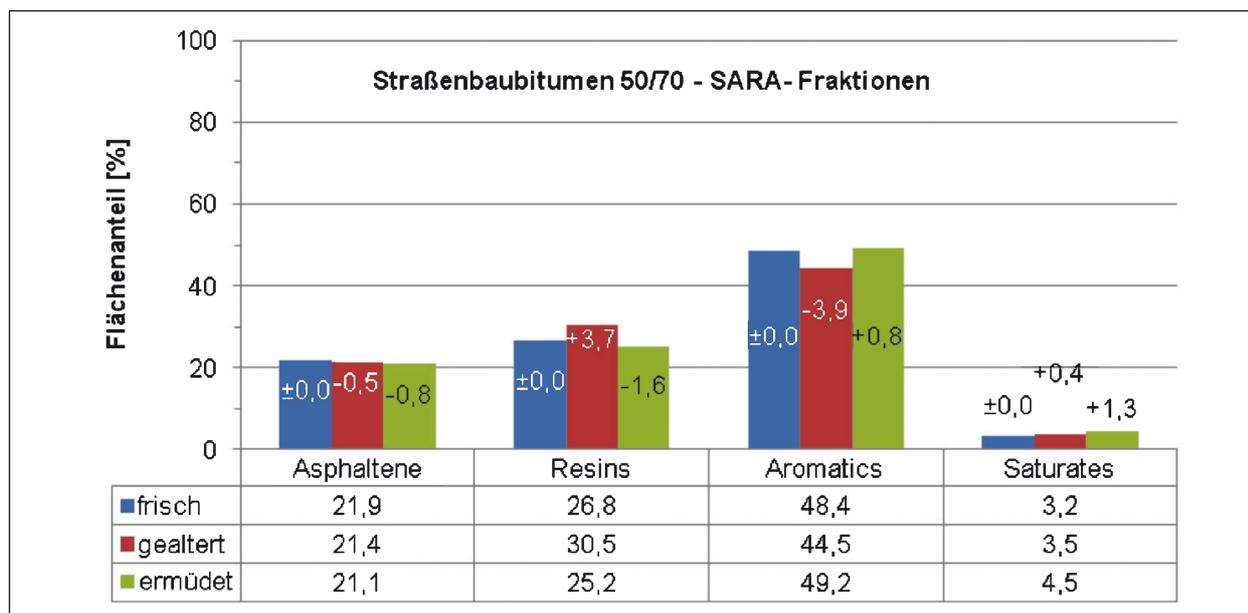


Bild 95: Gegenüberstellung und Vergleich der Ergebnisse der SARA-Analyse für das Straßenbaubitumen 50/70

b) Polymermodifiziertes Bitumen 25/55-55 A

Bild 96 zeigt die Anteile der SARA-Fractionen für die drei Beanspruchungszustände des Polymermodifizierten Bitumen 25/55-55. Es werden die sich durch die Beanspruchung (Alterung, Ermüdung) ergebenden prozentualen Änderungen zum Flächenanteil des frischen Zustandes angegeben.

In der unbeanspruchten Bitumenprobe überwiegt der Anteil der Aromaten (43,0 %). Der Anteil gesättigter Kohlenwasserstoffe (2,6 %) ist vergleichsweise gering. Der Anteil der Harze beträgt 32,5 % und der Anteil der Asphaltene 21,9 %.

Infolge Alterung des Bitumens ist eine Zunahme der Asphaltene um 0,7 % festzustellen. Der Anteil der gesättigten Kohlenwasserstoffe nimmt zu (0,4 %).

Der Anteil der Harze (-0,8 %) sowie der Aromaten (-0,3 %) nimmt ab.

Infolge Ermüdung ist erkennbar, dass der Asphalteneanteil (-0,8 %) und der Anteil der Harze (-4,3 %) abnimmt. Der aromatische Anteil (4,5 %) und der Anteil gesättigter Kohlenwasserstoffe (0,7 %) nehmen zu.

Nach Anwendung des Mittelwertvergleichs zeigen sich zusammenfassend folgende signifikante Änderungen der SARA-Fractionen durch die Beanspruchung des Polymermodifizierten Bitumen 25/55-55 (siehe auch Tabelle 24):

- Abnahme der Harze infolge Ermüdung und
- Zunahme der Aromaten infolge Ermüdung.

Merkmal	Änderung infolge Alterung	Änderung infolge Ermüdung
Asphaltene (Asphaltenes)	-	-
Harze (Resins)	Zunahme	-
Aromate (Aromatics)	-	-
Gesättigte Kohlenwasserstoffe (Saturates)	Zunahme	Zunahme

Tab. 23: Änderungen der SARA-Fractionen durch Beanspruchung des Straßenbaubitumens 50/70

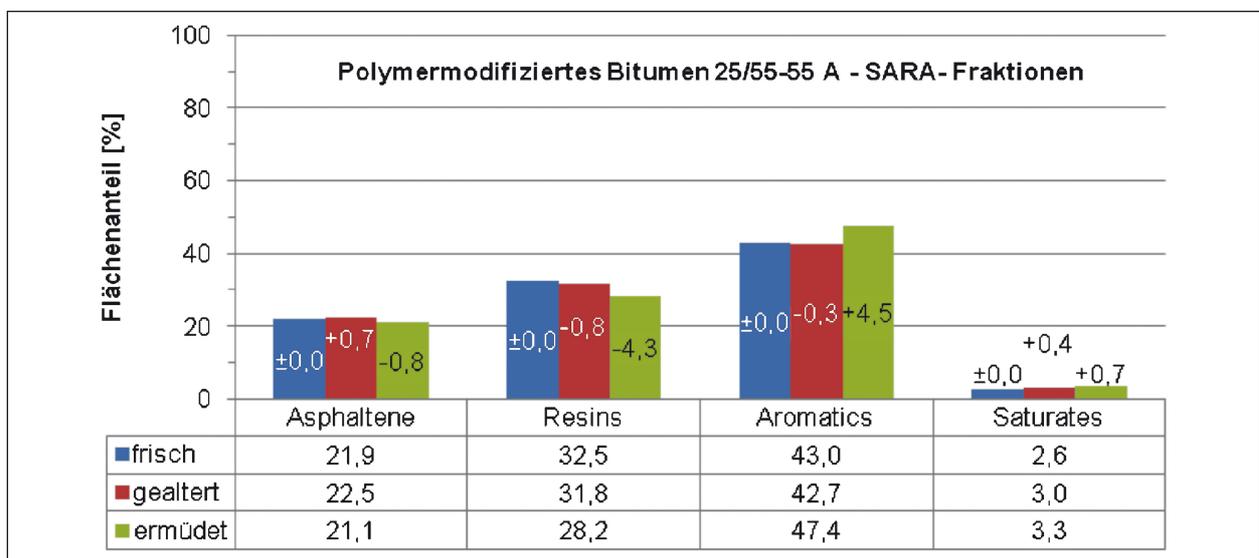


Bild 96: Gegenüberstellung und Vergleich der Ergebnisse der SARA-Analyse für das Polymermodifizierte Bitumen 25/55-55 A

Merkmal	Änderung infolge Alterung	Änderung infolge Ermüdung
Asphaltene (Asphaltenes)	-	-
Harze (Resins)	-	Abnahme
Aromate (Aromatics)	-	Zunahme
Gesättigte Kohlenwasserstoffe (Saturates)	-	-

Tab. 24: Änderungen der SARA-Fractionen durch Beanspruchung des PmB 25/55-55

5.1.6 Spektroskopische Analyse

Für jeden die Beanspruchungszustände frisch, gealtert und ermüdet werden Transmissionsspektren in einem Wellenzahlenbereich von 400 bis 4.000 cm^{-1} analysiert. Es wird eine Dreifachbestimmung der Messergebnisse dargestellt und ausgewertet.

Um Veränderungen in den Intensitäten der Transmissionsspektren der Bitumen infolge Alterung und Ermüdung aufzuzeigen, erfolgt die Auswertung mittels Spektrensubtraktion von Absorbanzspektren (vgl. Bild 97). Ein Absorbanzspektrum stellt logarithmisch das absorbierte Infrarotlicht einer Probe dar.

Die Spektrensubtraktion gibt Veränderungen vom unbeanspruchten zum gealterten sowie zum ermüdeten Zustand wider. Die Transmissionsspektren sind dazu dem Lambert-Beerschen-Gesetz (Gleichung 20) in Absorbanzspektren umzuwandeln und anschließend zu subtrahieren.

$$A = \log_{10} \left(\frac{1}{T} \right) = \varepsilon \cdot c \cdot d \quad \text{Gl. 20}$$

A Absorption/Extinktion

T Transmission

ε Extinktionskoeffizient

c Konzentration eines einzelnen Stoffes

d Dicke/Länge der Probe am ATR- Kristall

Da sich die Absorbanzspektren aus der Summe der Einzelspektren der Gesamtzahl der Stoffe in Bitu-

Wellenzahl [cm^{-1}]	Funktionelle Gruppe
3.700–3.600	Wasser
2325	Kohlendioxid

Tab. 25: Nicht berücksichtigte Absorptionsbanden im Proben-spektrum

men ergeben, kann die Auswertung nur qualitativ erfolgen. Dafür werden an prägnanten Wellenzahlen Veränderungen der Absorbanz herausgearbeitet und gegenüberstellt.

Tabelle 25 zeigt Wellenzahlen mit funktionellen Gruppen die für diese Auswertung keine Berücksichtigung finden.

a) Straßenbaubitumen 50/70

Für das Straßenbaubitumen 50/70 zeigen Bild 98 und Bild 99 die Transmissionsspektren im Wellenzahlenbereich von 4.000 bis 500 cm^{-1} für den Zustand frisch und gealtert bzw. frisch und ermüdet. Bild 100 und Bild 101 beinhalten die ermittelten Absorbanzspektren.

Die Spektrensubtraktion erfolgt im gleichen Wellenzahlbereich. Die Auswertung erfolgt im Detail für den Fingerprintbereich (2.000 bis 500 cm^{-1}) in Bild 102 und Bild 103.

Die Absorbanzspektren im Fingerprintbereich des Straßenbaubitumen 50/70 beider Beanspruchungszustände (gealtert und ermüdet) enthalten farbig markierte Wellenzahlen. Die grün markierten Absorbanzen stellen Wellenzahlenbereiche dar, für die sich in beiden Zuständen eine gleichgerichtete Veränderung der Absorbanzen feststellen lässt. Die roten und lila markierten Bereiche sind spezifisch für einen gealterten bzw. ermüdeten Zustand und zeigen sich im anderen Zustand gegensätzlich.

Für das Straßenbaubitumen 50/70 ist eine Gegenüberstellung der Absorbanzänderungen der gealterten und ermüdeten Bitumenprobe bezogen auf die frische Bitumenprobe in Bild 104 zusammengefasst. Um einen Vergleich vornehmen zu können, ist die frische Bitumenprobe als Referenz auf „Null“ gesetzt.

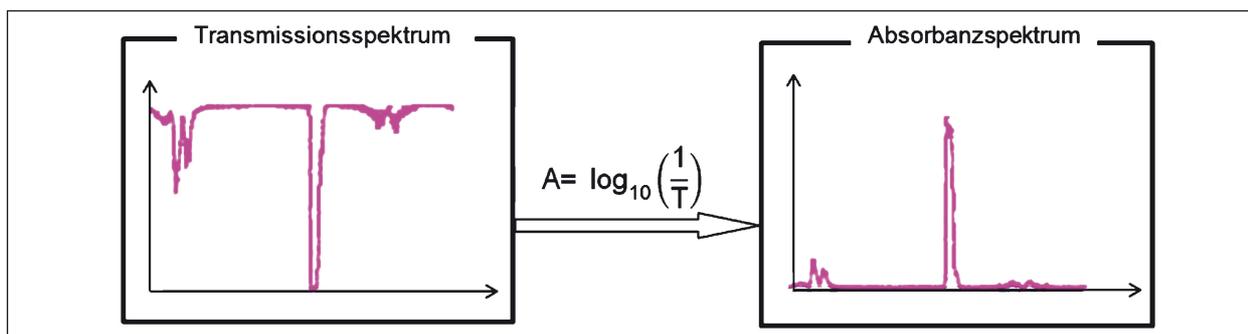


Bild 97: Ermittlung eines Absorptionsspektrums

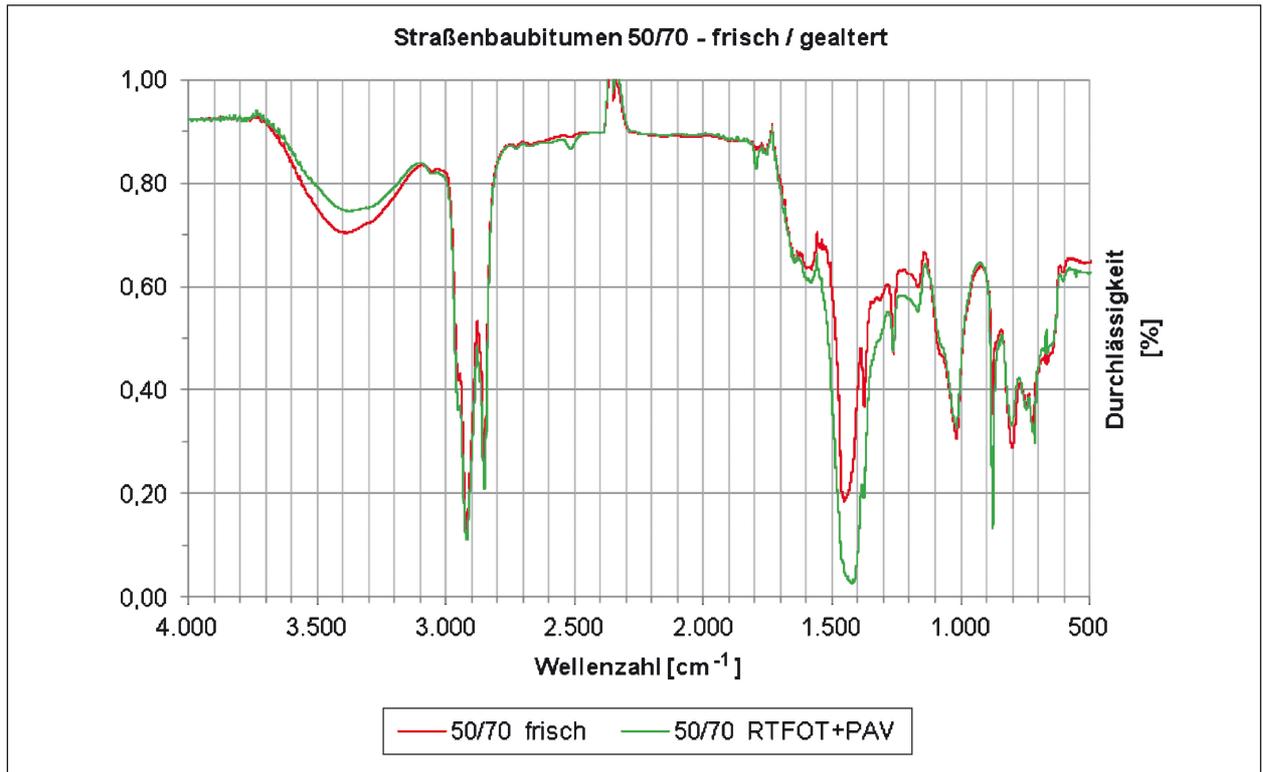


Bild 98: Transmissionsspektrum von Straßenbaubitumen 50/70 im frischen und gealterten Zustand

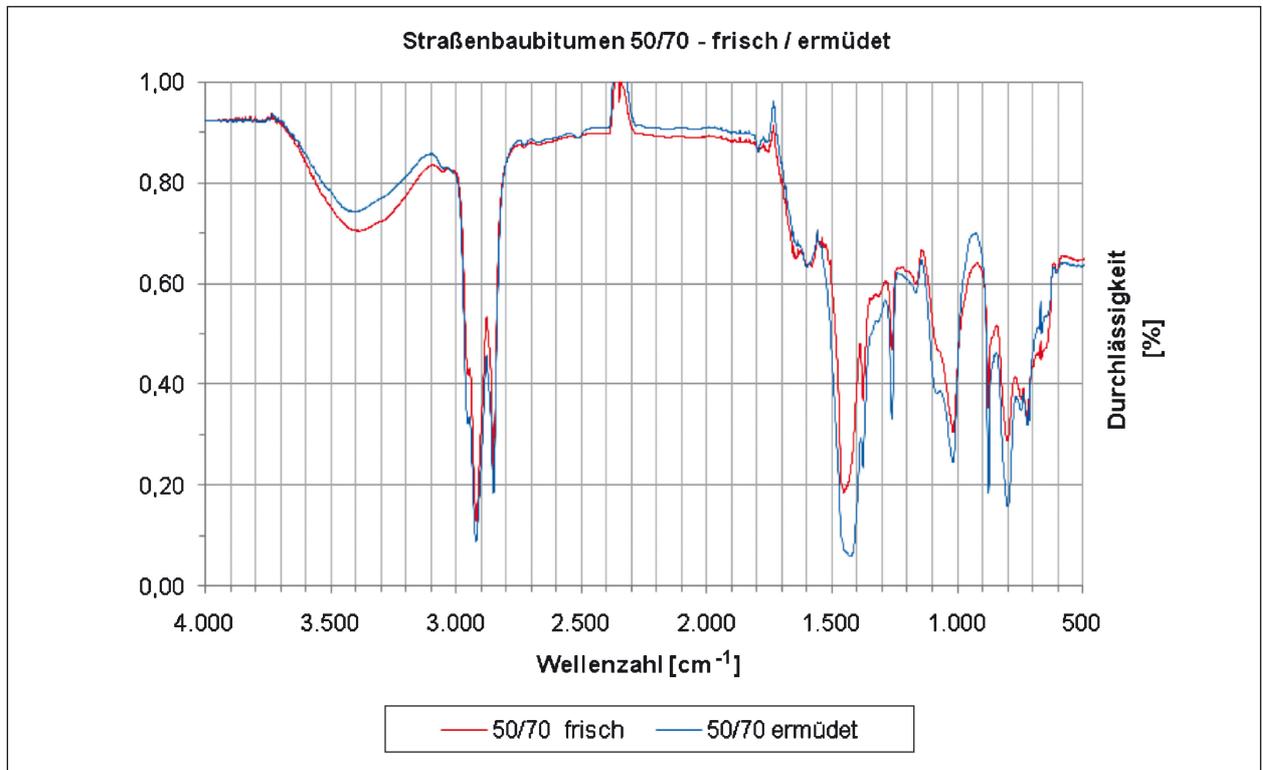


Bild 99: Transmissionsspektrum von Straßenbaubitumen 50/70 im frischen und ermüdeten Zustand

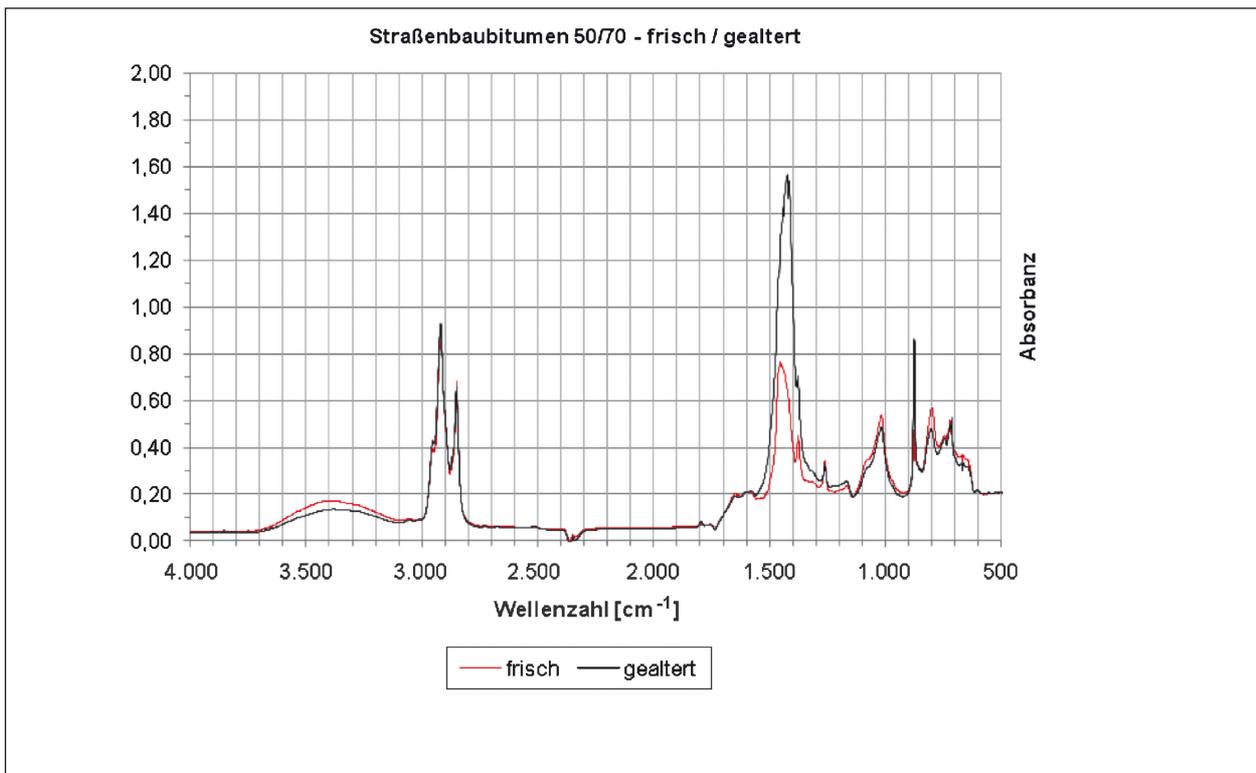


Bild 100: Absorbanzspektrum von Straßenbaubitumen 50/70 im frischen und gealterten Zustand

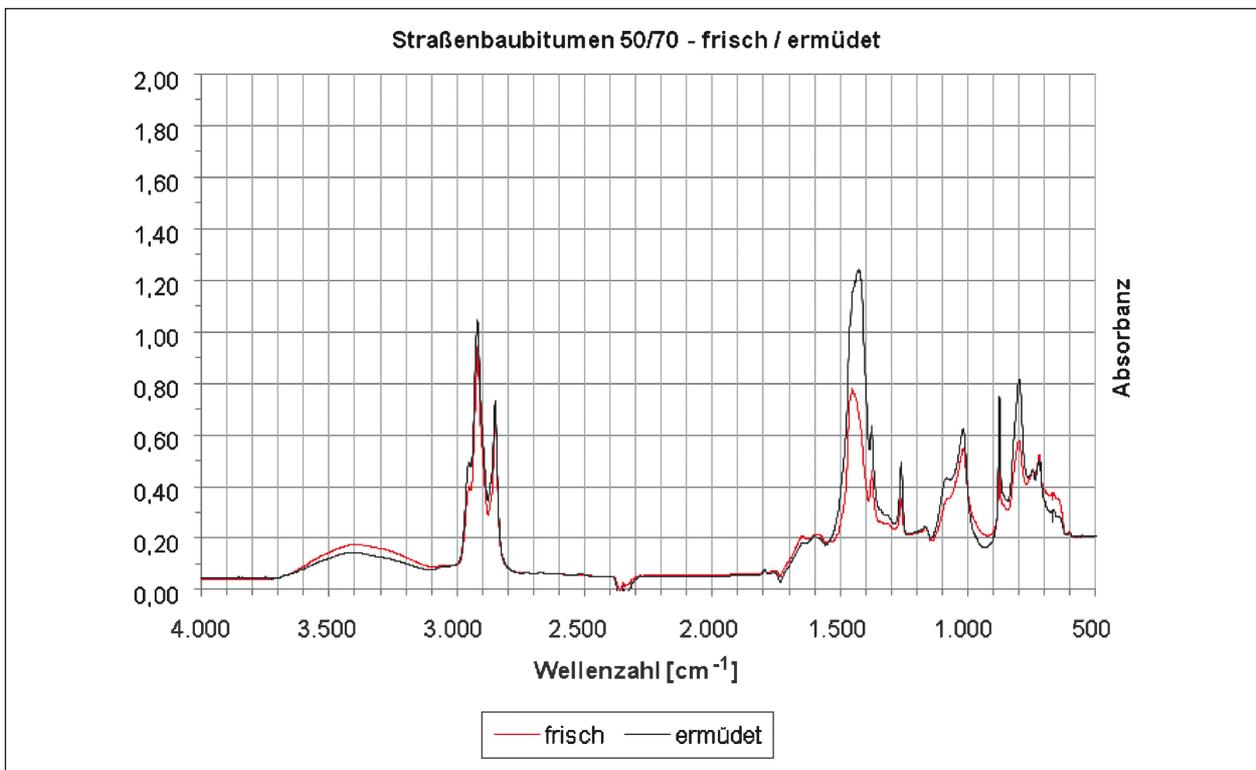


Bild 101: Absorbanzspektrum von Straßenbaubitumen 50/70 im frischen und ermüdeten Zustand

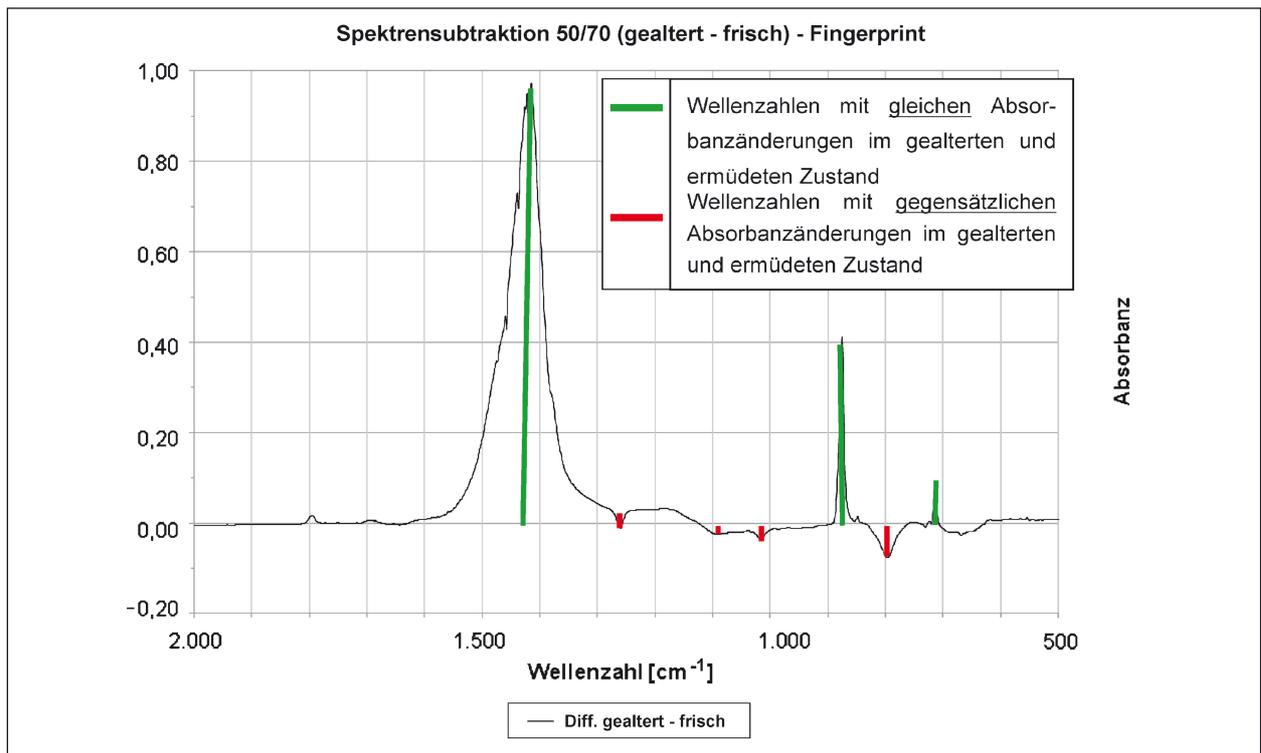


Bild 102: Absorbanzspektrum von Straßenbaubitumen 50/70 nach Spektrensubtraktion (gealterter Zustand – frischer Zustand)

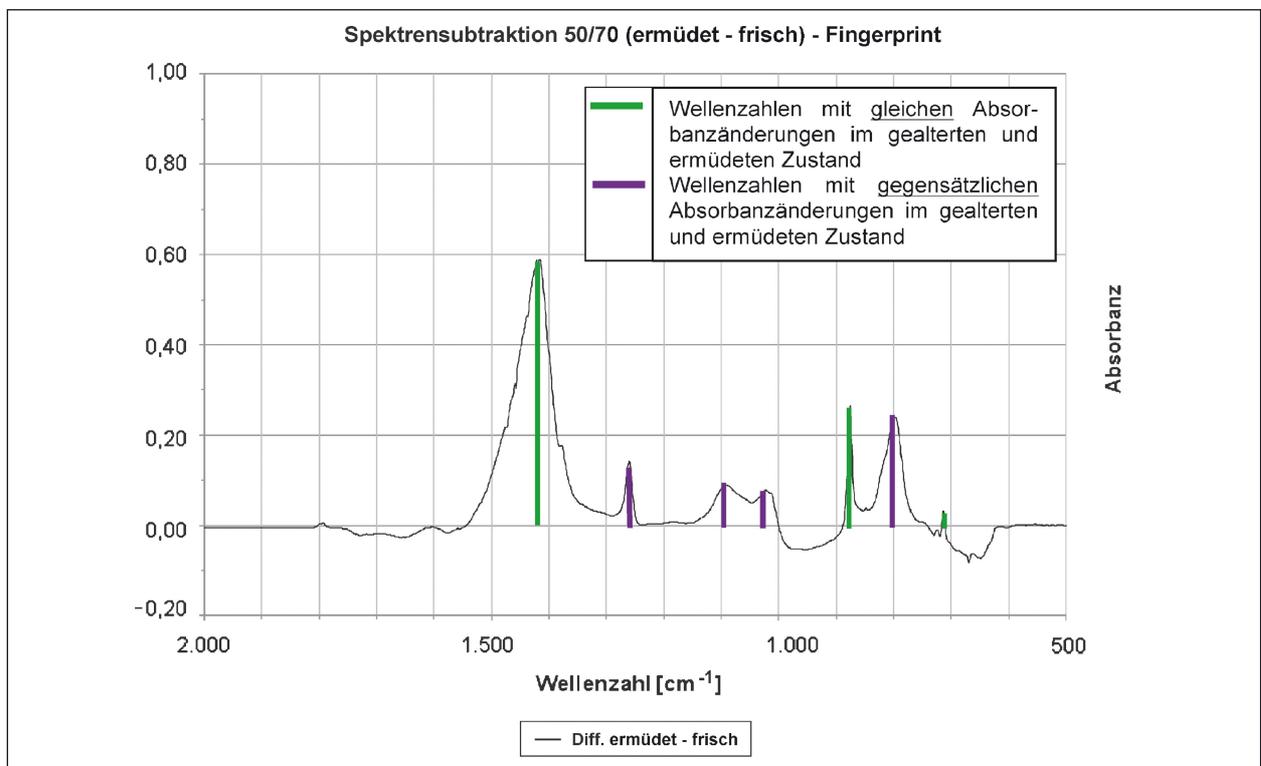


Bild 103: Absorbanzspektrum von Straßenbaubitumen 50/70 nach Spektrensubtraktion (ermüdeten Zustand – frischer Zustand)

Tabelle 26 spiegelt für Bild 104 die prozentualen Änderungen der Transmissionen der beanspruchten Proben gegenüber der unbeanspruchten Probe wider. Diese Änderungen wurden mittels Lambert-

Beerschen-Gesetz von der Absorbanz in die Transmission zurückgerechnet, da die Faktoren der Absorbanz für das Verständnis schwer zugänglich sind. Die funktionellen Gruppen, die bei diesen

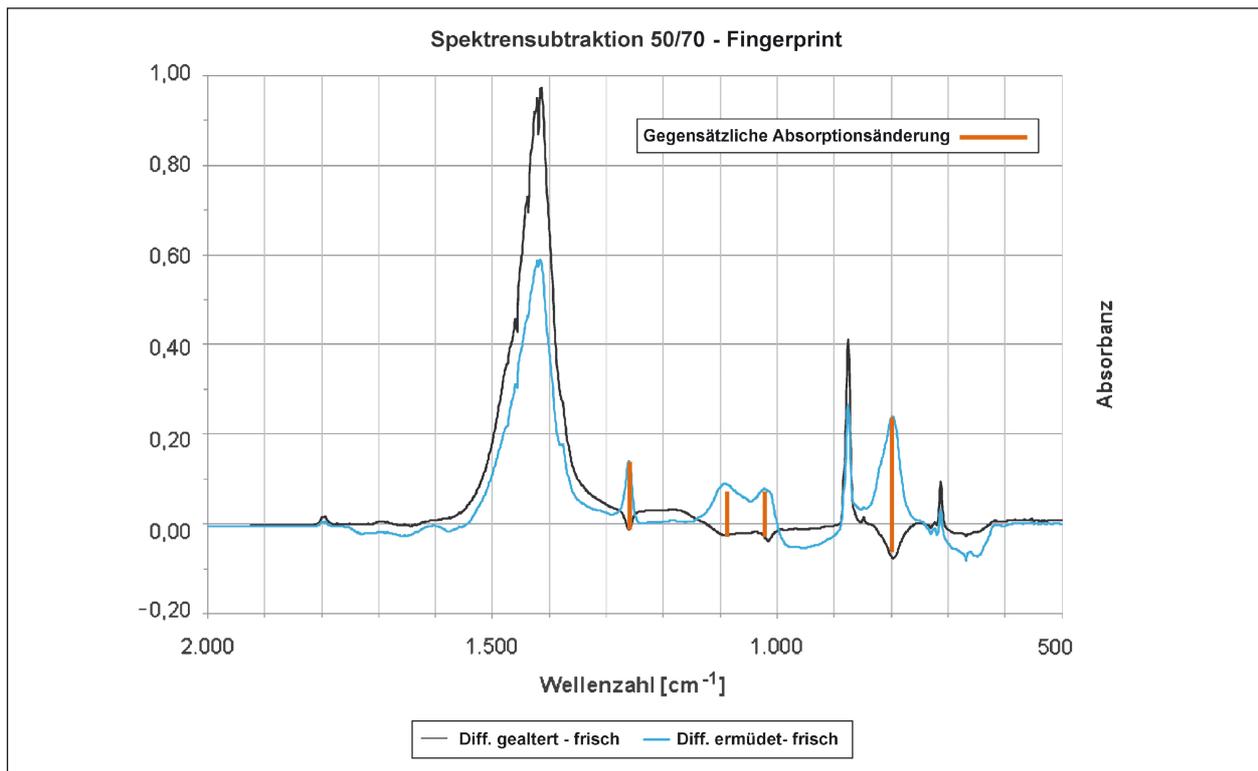


Bild 104: Gegensätzliche Änderungen der Absorptionen für Straßenbaubitumen 50/70 der Zustände frisch/gealtert und frisch/ermüdet

Wellenzahl $\tilde{\nu}$ [cm^{-1}]	Zustand frisch/gealtert	Zustand frisch/ermüdet	Funktionelle Gruppe (Annahme)
	Transmissions- änderung [%]	Transmissions- änderung [%]	
~713	- 18,7	- 6,5	Gesättigte Kohlenwasserstoffe (Alkane) Benzolringe
~800	+ 17,6	- 43,8	Ungesättigte Kohlenwasserstoffe (Alkene)
~875	- 61,1	- 46,2	C-C-Gruppe (Bindung von Aromaten)
~1.020	+ 7,5	- 16,7	Estergruppe (Valenzschwingung)
~1.090	+ 5,2	- 18,7	
~1.260	+ 2,0	- 27,5	O-H-Gruppe (Deformationsschwingungen)
~1.425	- 89,3	- 74,3	C-H-Gruppe (Deformationsschwingungen)

Tab. 26: Prozentuale Änderungen der Transmission der beanspruchten Proben gegenüber der unbeanspruchten Probe und funktionelle Gruppen (50/70)

Wellenzahlen angesprochen werden, sind ebenfalls gegeben. Die Bestimmung der funktionellen Gruppe für diese Wellenzahlen erfolgte mittels HESSE et al. (2012) und British Petroleum (BP), Gelsenkirchen.

Die Spektren der gealterten und ermüdeten Bitumenprobe zeigen an drei Stellen gegensätzliche Veränderungen in der Transmission. Für drei Wellenzahlen sind Abnahmen der Transmissionen erkennbar (vgl. grün markierte Bereiche aus Bild 102 und Bild 103): $\tilde{\nu} = 1.425$, $\tilde{\nu} = 875$ und $\tilde{\nu} = 713$.

Dagegen zeigen sich für die Wellenzahlen $\tilde{\nu} = 1.260$, $\tilde{\nu} = 1.020 - 1.090$ und $\tilde{\nu} = 800$ gegensätzliche Transmissionsveränderungen für den gealterten und ermüdeten Zustand.

Für $\tilde{\nu} = 1.425$ zeigt sich für das Bitumen im gealterten Zustand die größte Transmissionsabnahme mit 89,3 % zur unbeanspruchten Bitumenprobe. Auch für die ermüdete Bitumenprobe zeigt sich im Gegensatz zu den anderen Wellenzahlen die größte Transmissionsabnahme (74,3 %).

b) Polymermodifiziertes Bitumen 25/55-55 A

Für das Polymermodifizierte Bitumen 25/55-55 zeigen Bild 105 und Bild 106 die Transmissionspektren im Wellenzahlenbereich von 4.000 bis 500 cm^{-1} für den Zustand frisch und gealtert bzw. frisch und ermüdet. Bild 107 und Bild 108 beinhalten die ermittelten Absorbanzspektren.

Die Spektrensubtraktion erfolgt im gleichen Wellenzahlbereich. Die Auswertung erfolgt im Detail für den Fingerprintbereich (2.000 bis 500 cm^{-1}) in Bild 109 und Bild 110.

Die Absorbanzspektren im Fingerprintbereich des PmB 25/55-55 beider Beanspruchungszustände (gealtert und ermüdet) enthalten farbig markierte Wellenzahlen. Die grün markierten Absorbanzen stellen Wellenzahlenbereiche dar, für die sich in beiden Zuständen eine gleichgerichtete Veränderung der Absorbanzen feststellen lässt. Die roten und lila markierten Bereiche sind spezifisch für einen gealterten bzw. ermüdeten Zustand und zeigen sich im anderen Zustand gegensätzlich.

Für das PmB 25/55-55 ist eine Gegenüberstellung der Absorbanzänderungen der gealterten und ermüdeten Bitumenprobe bezogen auf die frische Bitumenprobe in Bild 111 zusammengefasst. Um einen Vergleich vornehmen zu können, ist die

frische Bitumenprobe als Referenz auf „Null“ gesetzt. Es stellen sich die Bereiche, für die in beiden Beanspruchungszuständen erhöhte Molekülschwingungen erkennbar sind, gegenüber einer unbeanspruchten Bitumenprobe deutlich heraus.

Tabelle 27 gibt die prozentualen Änderungen der Transmissionen der beanspruchten Proben gegenüber der unbeanspruchten Probe wider. Diese Änderungen wurden mittels Lambert-Beerschen-Gesetz von der Absorbanz in die Transmission zurückgerechnet, da die Faktoren der Absorbanz für das Verständnis schwer zugänglich sind. Die funktionellen Gruppen, die bei diesen Wellenzahlen angesprochen werden, sind ebenfalls gegeben. Die Bestimmung der funktionellen Gruppe für diese Wellenzahlen erfolgte mittels HESSE et al. (2012) und British Petroleum (BP), Gelsenkirchen.

Es zeigen sich für die Wellenzahlen $\tilde{\nu} = 875$, $\tilde{\nu} = 1.380$ und $\tilde{\nu} = 1450$ gegensätzliche Transmissionsänderungen für den gealterten und ermüdeten Zustand. Für folgende Wellenzahlen sind jeweils Abnahmen der Transmission erkennbar (vgl. grün markierte Bereich aus Bild 109 und Bild 110: $\tilde{\nu} = 800$, $\tilde{\nu} = 1.020$, $\tilde{\nu} = 1.090$ und $\tilde{\nu} = 1.260$). Für $\tilde{\nu} = 1.450$ zeigt sich für die ermüdete Bitumenprobe die größte Transmissionszunahme mit 81,2 %.

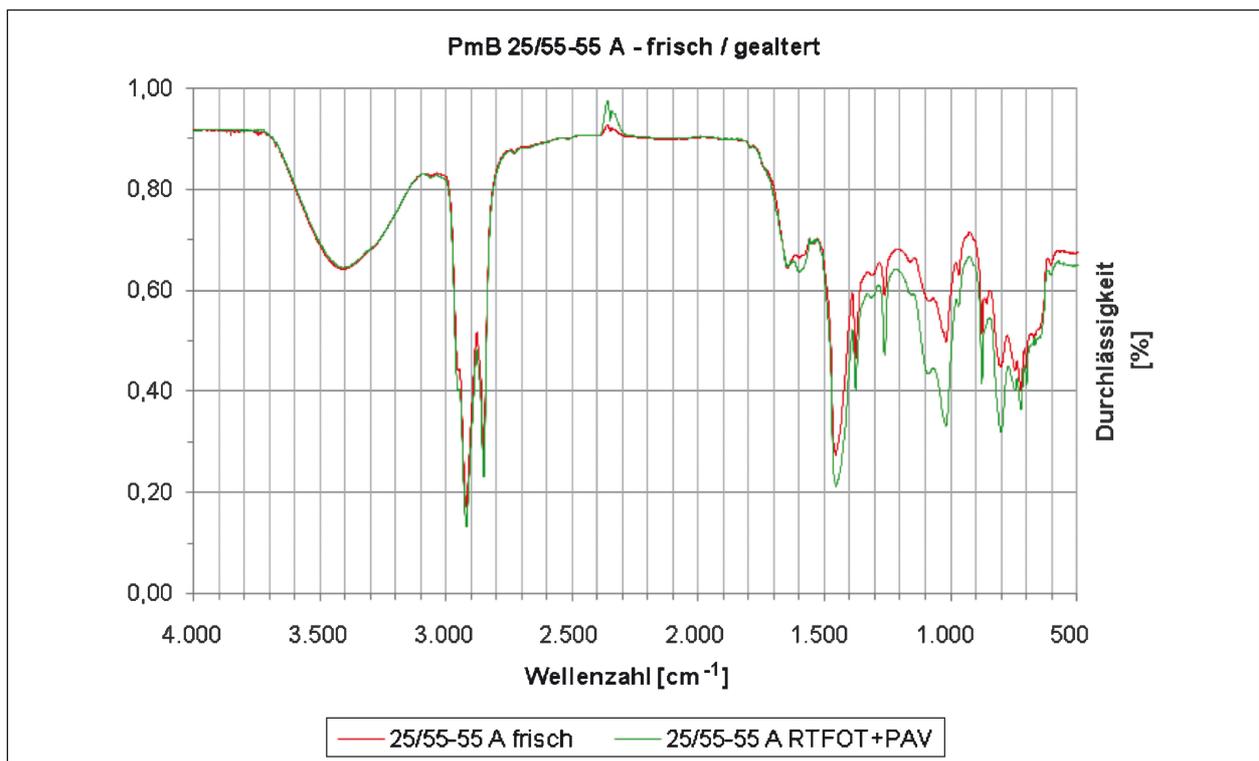


Bild 105: Transmissionsspektrum von PmB 25/55-55 im frischen und gealterten Zustand

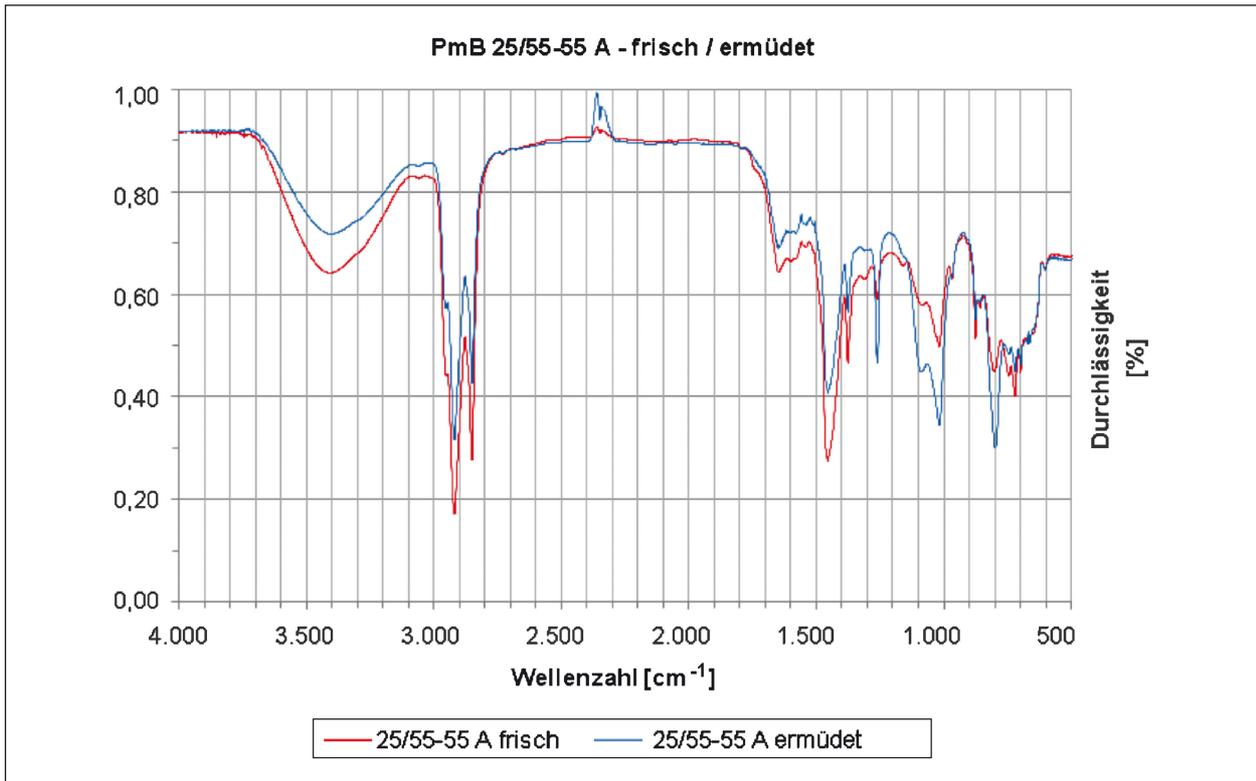


Bild 106: Transmissionsspektrum von PmB 25/55-55 im frischen und ermüdeten Zustand

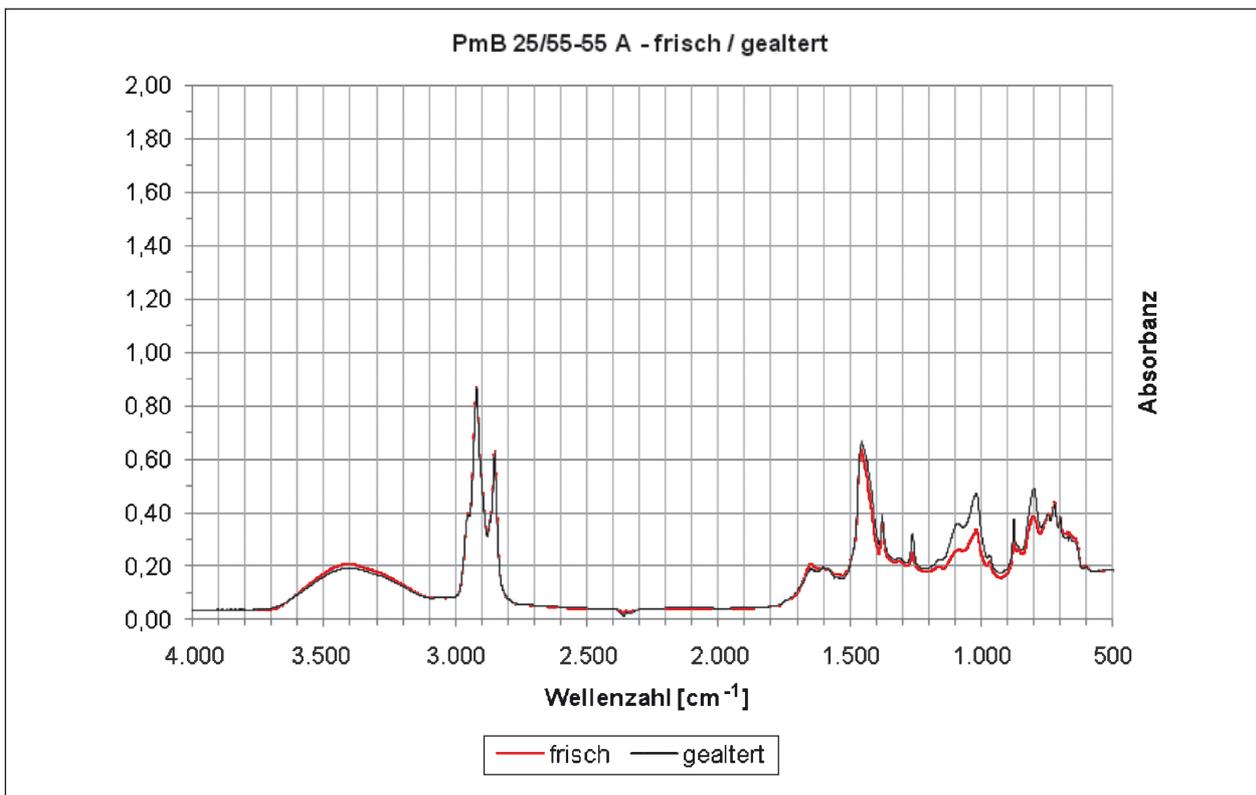


Bild 107: Absorbanzspektrum von PmB 25/55-55 im frischen und gealterten Zustand

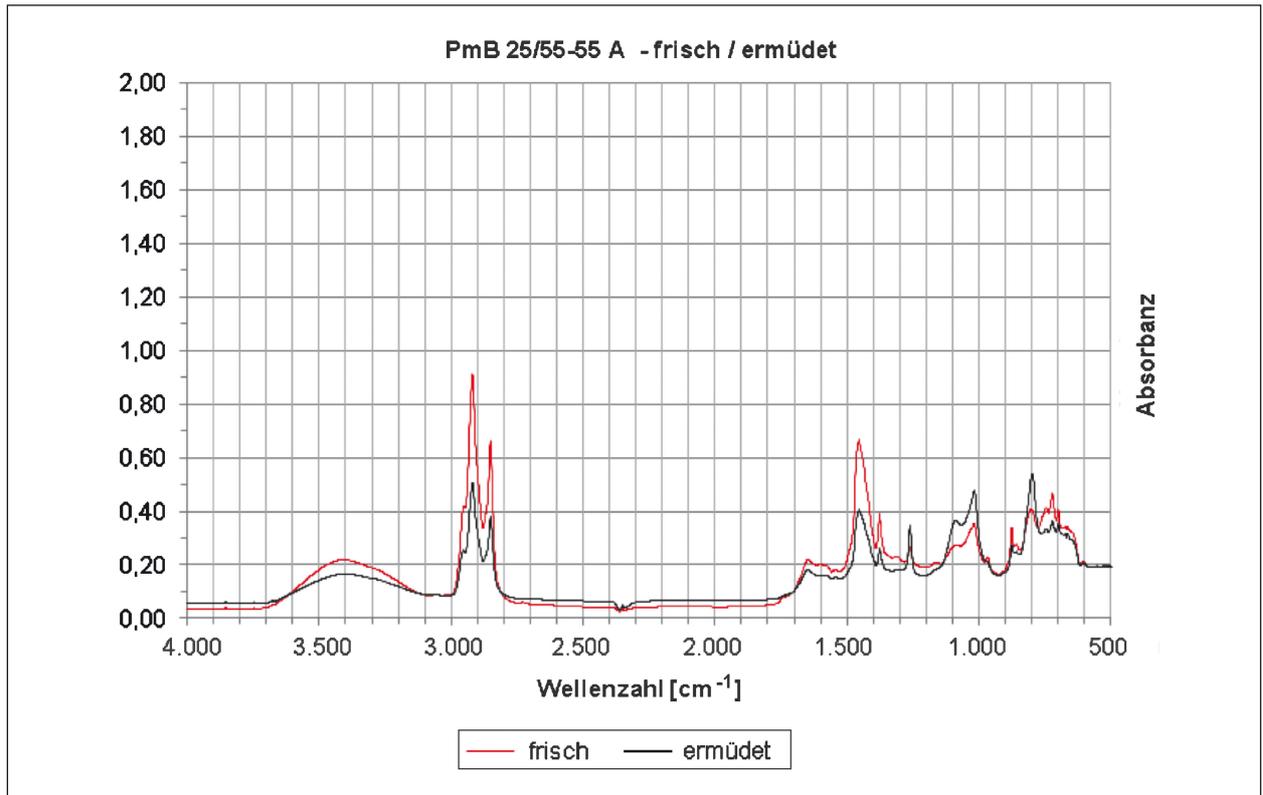


Bild 108: Absorbanzspektrum von PmB 25/55-55 im frischen und ermüdeten Zustand

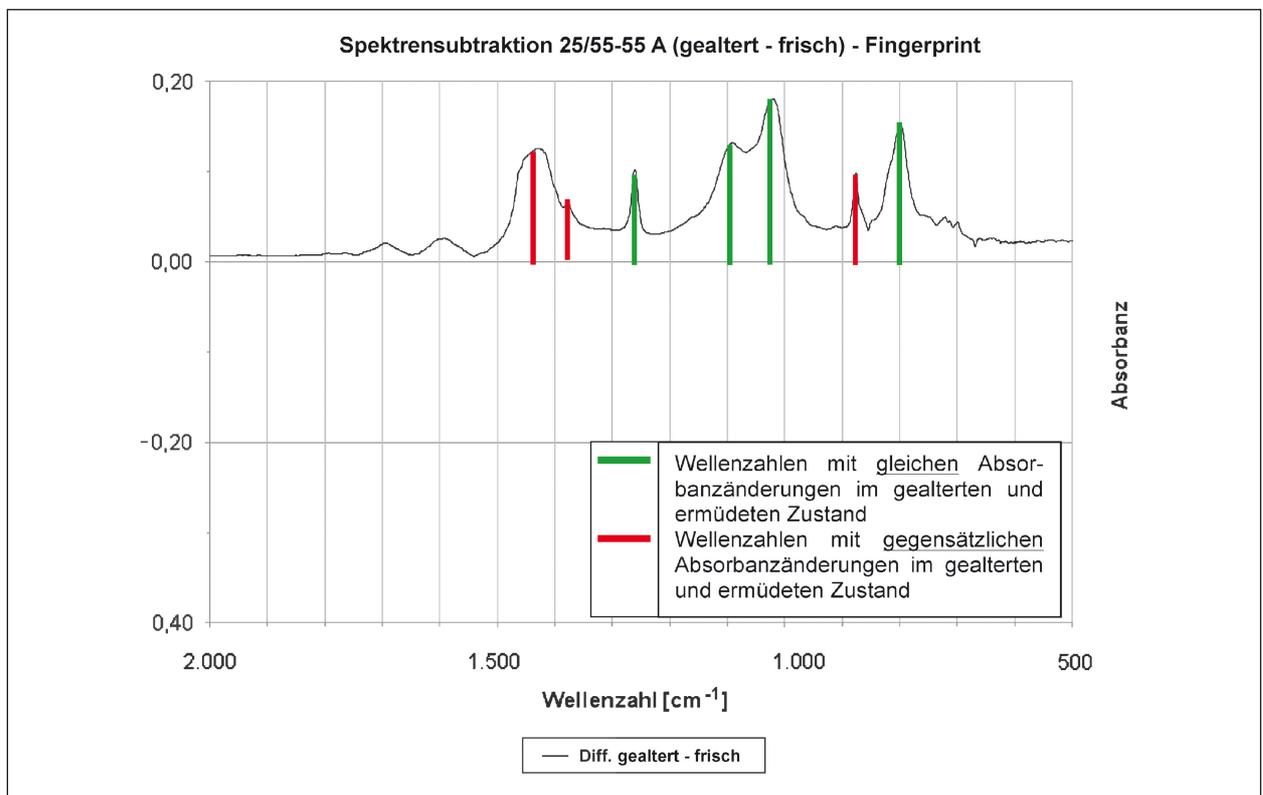


Bild 109: Absorbanzspektrum von PmB 25/55-55 nach Spektrensubtraktion (gealterter Zustand – frischer Zustand)

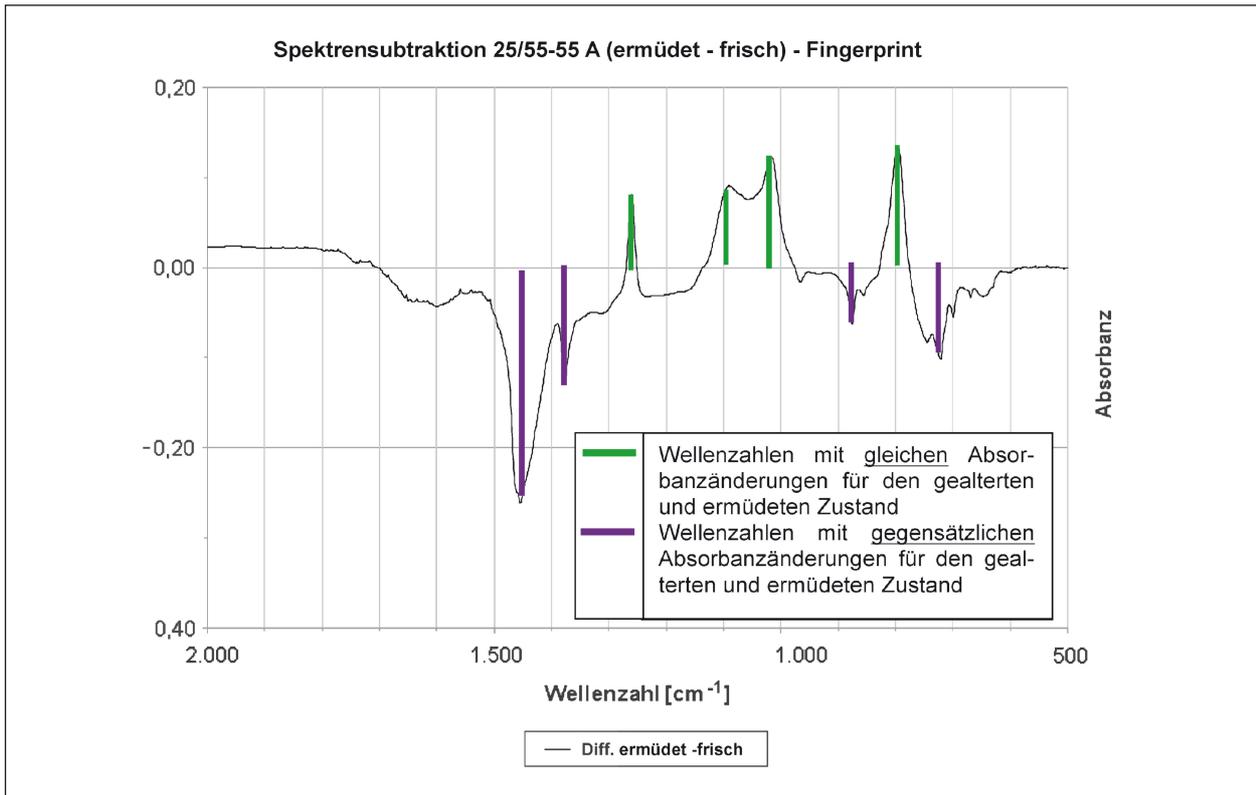


Bild 110: Absorbanzspektrum von PmB 25/55-55 nach Spektrensubtraktion (ermüdeten Zustand – frischer Zustand)

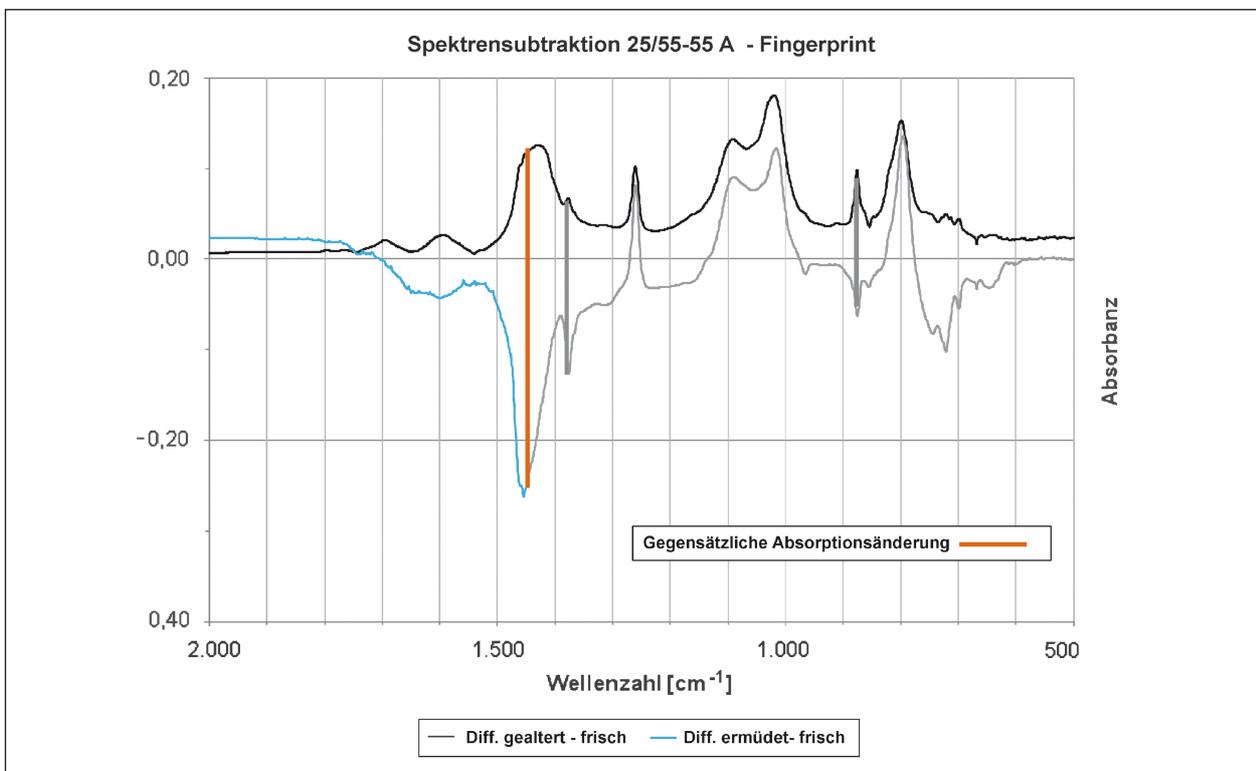


Bild 111: Gegensätzliche Änderungen der Absorptionen für PmB 25/55-55 der Zustände frisch/gealtert und frisch/ermüdet

Wellenzahl [cm ⁻¹]	Zustand frisch/gealtert	Zustand frisch/ermüdet	Funktionelle Gruppe (Annahme)
	Transmissions- änderung [%]	Transmissions- änderung [%]	
~800	-41,3	- 27,5	Ungesättigte Kohlenwasserstoffe (Alkene) Benzolgruppe
~875	-20,6	+14,8	
~1.020	-33,9	-24,1	Estergruppe (Valenzschwingung)
~1.090	-25,8	-18,7	
~1.260	-20,6	-16,8	O-H-Gruppe (Deformationsschwingungen)
~1.380	-12,9	+34,8	
~1.450	-24,1	+81,2	C-H-Gruppe (Deformationsschwingungen)

Tab. 27: Prozentuale Änderungen der Transmission der beanspruchten Proben gegenüber der unbeanspruchten Probe und funktionelle Gruppen (PmB 25/55-55)

5.2 Asphalt

5.2.1 Ermüdungsverhalten in der Zug-Schwellprüfung

Um die Anzahl ertragbarer Lastwechsel bis zum Erreichen des Ermüdungskriteriums auf ein Maximum von 10.000 zu beschränken (siehe Kapitel 3.3.2) und um einen Vergleich mit Ergebnissen aus Zug-Druck-Wechselastprüfungen zu ermöglichen, ist eine geeignete Oberspannung zu wählen. Es wurden daher kontinuierliche Ermüdungsversuche mit variierender Oberspannung durchgeführt und geeignete Oberspannungen durch Wiederholungsversuche verifiziert sowie die Wiederholbarkeit bzw. das Streumaß der Versuchsreihen bestimmt. Die Ermüdungsversuche erfolgten bei einer konstanten Temperatur von 20 °C sowie bei 0 °C.

a) Kraft geregelt mit gelenkiger Lagerung des Lastgestänges

In Bild 112 sind die ertragbaren Lastwechselzahlen bis zum Erreichen des Ermüdungskriteriums in Abhängigkeit von der gewählten Oberspannung bei einer Prüftemperatur von 20 °C dargestellt.

Bei der Oberspannung $\sigma = 0,435$ MPa ergeben sich ertragbare Lastwechselzahlen von ca. 7.000. Es wurden für diese Oberspannung Wiederholungsversuche durchgeführt. In Bild 113 sind die Verläufe der E-Moduln über die Lastwechselzahl für die kontinuierlichen Ermüdungsprüfungen bei 20 °C und bei einer Oberspannung von $\sigma = 0,435$ MPa dargestellt.

In Tabelle 28 sind die Ergebnisse der Ermüdungsprüfungen aus Bild 113 zusammengefasst.

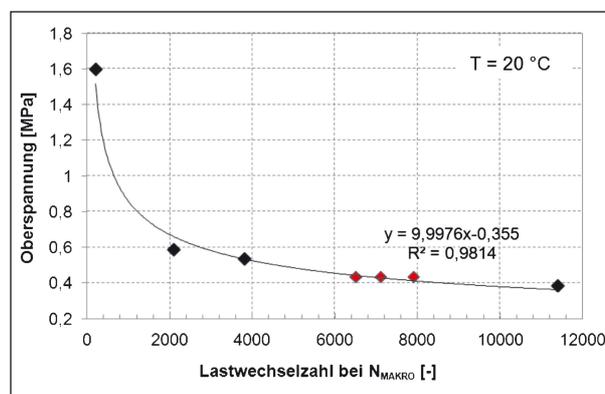


Bild 112: Ertragbare Lastwechselzahlen (N_{Makro}) kraft geregelter Zug-Schwellprüfungen (20 °C) in Abhängigkeit von der gewählten Oberspannung bei Asphaltbeton AC 11 D S mit Straßenbaubitumen 50/70

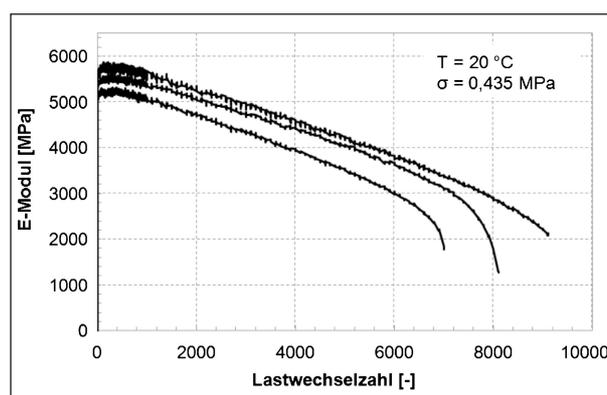


Bild 113: Verlauf des E-Moduls bei kontinuierlichen kraft geregelten Zug-Schwellprüfungen mit gelenkig gelagertem Lastgestänge bei einer Oberspannung von 0,435 MPa und bei einer Prüftemperatur von 20 °C

In Bild 114 sind die ertragbaren Lastwechselzahlen bis zum Erreichen des Ermüdungskriteriums in Abhängigkeit von der gewählten Oberspannung bei einer Prüftemperatur von 0 °C dargestellt.

Lastwechselzahl	$N_{\text{Makro}} [-]$	5.800
		6.507
		7.108
Mittelwert	MW [-]	6.471,67
Standardabweichung	$\sigma [-]$	654,72
Variationskoeffizient	$v [\%]$	10,12

Tab. 28: Ergebnisse kontinuierlicher Zug-Schwellprüfungen mit gelenkig gelagertem Lastgestänge bei 20 °C und einer Oberspannung von 0,435 MPa

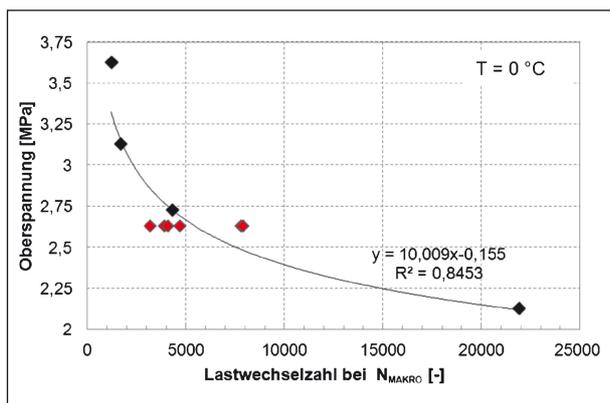


Bild 114: Ertragbare Lastwechselzahlen (N_{Makro}) bei kraftgeregelten Zug-Schwellprüfungen mit gelenkig gelagertem Lastgestänge in Abhängigkeit von der gewählten Oberspannung bei einer Prüftemperatur von 0 °C

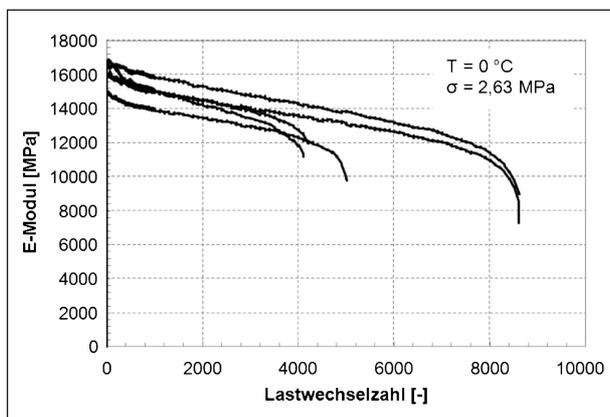


Bild 115: Verlauf des E-Moduls bei kontinuierlichen kraftgeregelten Zug-Schwellprüfungen mit gelenkig gelagertem Lastgestänge bei einer Oberspannung von 2,63 MPa und bei einer Prüftemperatur von 0 °C

Bei der Oberspannung $\sigma = 2,63$ MPa ergeben sich ertragbare Lastwechselzahlen von ca. 7.000. Es wurden für diese Oberspannung Wiederholungsversuche durchgeführt. In Bild 115 sind die Verläufe der E-Moduln über die Lastwechselzahl für die kontinuierlichen Ermüdungsprüfungen bei 0 °C und bei einer Oberspannung von $\sigma = 2,63$ MPa dargestellt.

Lastwechselzahl	$N_{\text{Makro}} [-]$	3.200
		7.804
		3.910
		4.704
		7.904
4.102		
Mittelwert	MW [-]	5.270,67
Standardabweichung	$\sigma [-]$	2.058,07
Variationskoeffizient	$v [\%]$	39,05

Tab. 29: Ergebnisse kontinuierlicher Zug-Schwellprüfungen mit gelenkig gelagertem Lastgestänge bei 0 °C und einer Oberspannung von 2,63 MPa

In Tabelle 29 sind die Ergebnisse der Ermüdungsprüfungen aus Bild 115 zusammengefasst.

b) Kraft geregelt mit starrer Lagerung des Lastgestänges

In Bild 116 sind die ertragbaren Lastwechselzahlen bis zum Erreichen des Ermüdungskriteriums in Abhängigkeit von der gewählten Oberspannung bei einer Prüftemperatur von 20 °C für verschiedene Mischungen dargestellt.

Es zeigt sich eine starke Abhängigkeit der Versuchsergebnisse von der verwendeten Mischung. Für Mischung 6 (blau) ergeben sich bei der Oberspannung $\sigma = 0,435$ MPa ertragbare Lastwechselzahlen von ca. 16.000. Bei Probekörpern der Mischung 7 (rot) ergeben sich ertragbare Lastwechselzahlen von ca. 9.000 bei einer Oberspannung von $\sigma = 0,395$ MPa.

Es wurden Wiederholungsversuche an Probekörpern beider Mischungen durchgeführt. In Bild 117 sind die Verläufe des E-Moduls über die Lastwechselzahl für die kontinuierlichen Ermüdungsprüfungen bei 20 °C und bei einer Oberspannung von $\sigma = 0,435$ MPa (links) und $\sigma = 0,395$ MPa (rechts) dargestellt.

In Tabelle 30 sind die Ergebnisse der Ermüdungsprüfungen aus Bild 117 zusammengefasst.

Für Durchführung der Healing-Prüfungen für kraftgeregelte Zug-Schwellprüfungen bei 20 °C erfolgte mit einer Oberspannung von $\sigma = 0,395$ MPa.

In Bild 118 sind die ertragbaren Lastwechselzahlen bis zum Erreichen des Ermüdungskriteriums in Abhängigkeit von der gewählten Oberspannung bei einer Prüftemperatur von 0 °C für die verschiedenen Mischungen dargestellt.

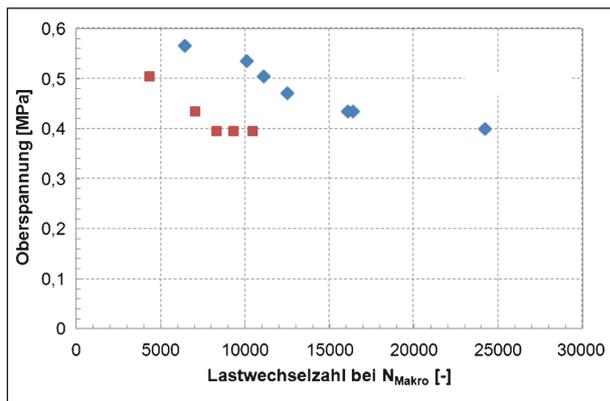


Bild 116: Ertragbare Lastwechselzahlen (N_{Makro}) bei kraftgeregelten Zug-Schwellprüfungen mit starr gelagertem Lastgestänge (20 °C) in Abhängigkeit von der gewählten Oberspannung für Asphaltmischung 6 (blau) und Asphaltmischung 7 (rot)

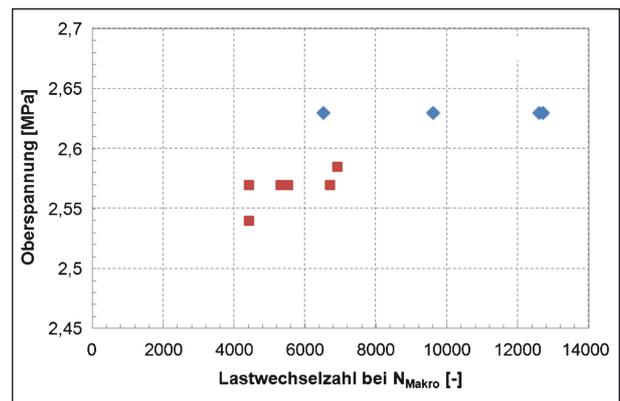


Bild 117: Ertragbare Lastwechselzahlen (N_{Makro}) bei kraftgeregelten Zug-Schwellprüfungen mit starr gelagertem Lastgestänge (0 °C) in Abhängigkeit von der gewählten Oberspannung für Asphaltmischung 5 (blau) und Asphaltmischung 8 (rot)

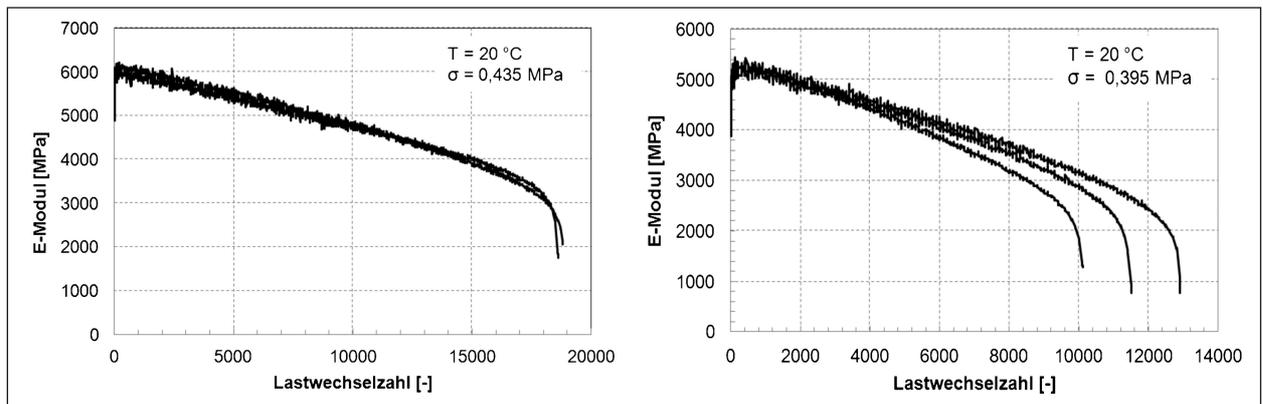


Bild 118: Verlauf von E-Modul bei kontinuierlichen kraftgeregelten Zug-Schwellprüfungen mit starrem Lastgestänge (20 °C) bei einer Oberspannung von 0,435 MPa für Mischung 6 (links) und 0,395 MPa für Mischung 7 (rechts)

		Mischung 6 $\sigma = 0,435 \text{ MPa}$	Mischung 7 $\sigma = 0,395 \text{ MPa}$
Lastwechselzahl	$N_{\text{Makro}} [-]$	16.407 16.105	9.610 10.409 8.105
Mittelwert	MW [-]	16.256,00	9.374,67
Standardabweichung	$\sigma [-]$	213,55	1.169,89
Variationskoeffizient	$v [\%]$	1,31	12,48

Tab. 30: Ergebnisse kontinuierlicher Zug-Schwellprüfungen mit starrem Lastgestänge bei 20 °C und verschiedenen Oberspannungen

Es zeigt sich auch hier eine starke Abhängigkeit der Versuchsergebnisse von der verwendeten Mischung. Für Mischung 5 (blau) ergeben sich bei der Oberspannung $\sigma = 2,63 \text{ MPa}$ ertragbare Lastwechselzahlen von ca. 12.000. Bei Probekörpern der Mischung 8 (rot) ergeben sich ertragbare Lastwechselzahlen von ca. 6000 bei einer Oberspannung von $\sigma = 2,57 \text{ MPa}$.

Es wurden Wiederholungsversuche an Probekörpern beider Mischungen durchgeführt. In Bild 119

sind die Verläufe des E-Moduls über die Lastwechselzahl für die kontinuierlichen Ermüdungsprüfungen bei 0 °C und bei einer Oberspannung von $\sigma = 2,63 \text{ MPa}$ (links) und $\sigma = 2,57 \text{ MPa}$ (rechts) dargestellt.

In Tabelle 31 sind die Ergebnisse der Ermüdungsprüfungen aus Bild 119 zusammengefasst.

Die Durchführung der Healing-Prüfungen mittels kraftgeregelter Zug-Schwellprüfungen bei 0 °C erfolgten bei einer Oberspannung von $\sigma = 2,57 \text{ MPa}$.

		Mischung 5 $\sigma = 2,63 \text{ MPa}$	Mischung 8 $\sigma = 2,57 \text{ MPa}$
Lastwechselzahl	$N_{\text{Makro}} [-]$	12.705 12.601 9.601	6.702 5.510 5.310
Mittelwert	MW [-]	11.635,67	5.840,67
Standardabweichung	$\sigma [-]$	1.762,84	752,61
Variationskoeffizient	$v [\%]$	15,15	12,89

Tab. 31: Ergebnisse kontinuierlicher Zug-Schwellprüfungen mit starrem Lastgestänge bei 0 °C und verschiedenen Oberspannungen

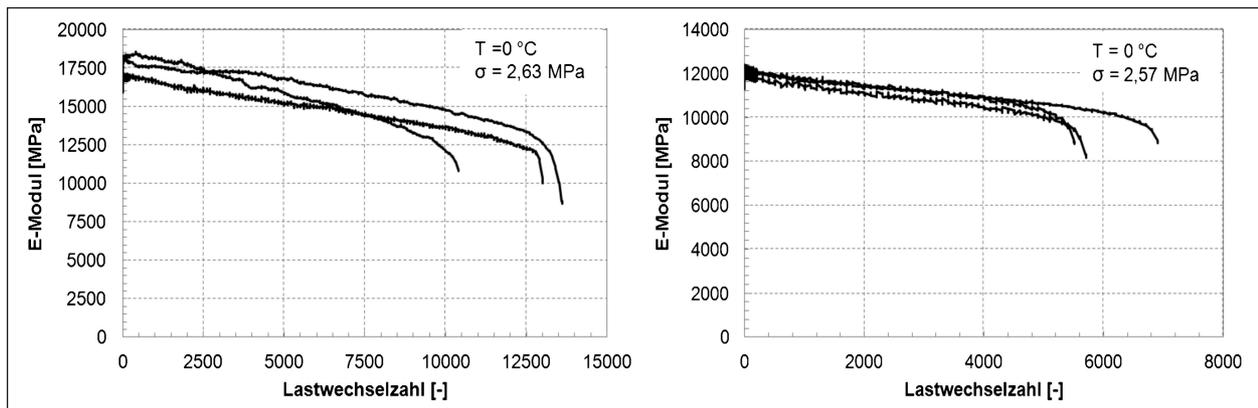


Bild 119: Verlauf des E-Moduls bei kontinuierlichen kraftgeregelten Zug-Schwellprüfungen mit starrem Lastgestänge (0 °C) bei einer Oberspannung von 2,63 MPa bei Mischung 6 (links) und 2,57 MPa bei Mischung 7 (rechts)

5.2.2 Ermüdungsverhalten in der Zug-Druck-Wechselastprüfung

Um die Anzahl ertragbarer Lastwechsel bis zum Erreichen des Ermüdungskriteriums auf ein Maximum von 10.000 zu beschränken (siehe Kapitel 3.3.2) und um einen Vergleich mit Ergebnissen der Zug-Schwellprüfungen zu ermöglichen, musste eine geeignete Oberspannung festgelegt werden. Es wurden kontinuierliche Ermüdungsversuche mit variierender Oberspannung durchgeführt und geeignete Oberspannungen durch Wiederholungsversuche verifiziert sowie die Wiederholbarkeit bzw. das Streumaß der Versuchsreihen bestimmt. Es wurden kontinuierliche Ermüdungsversuche bei einer konstanten Temperatur von 20 °C und von 0 °C durchgeführt.

a) Kraft geregelt mit gelenkiger Lagerung des Lastgestänges

Bei der Oberspannung $\sigma = 2,63 \text{ MPa}$ ergeben sich ertragbare Lastwechselzahlen von ca. 10.000. Es wurden für diese Oberspannung Wiederholungsversuche durchgeführt. In Bild 120 sind die Verläufe des E-Moduls über die Lastwechselzahl für die kontinuierlichen Ermüdungsprüfungen bei 0 °C und bei einer Oberspannung von $\sigma = 2,63 \text{ MPa}$ dargestellt.

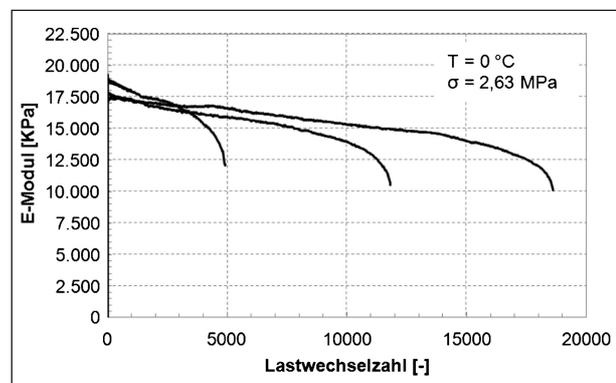


Bild 120: Verlauf des E-Moduls bei kontinuierlichen kraftgeregelten Zug-Druck-Wechselastprüfungen mit gelenkig gelagertem Lastgestänge bei einer Oberspannung von 2,63 MPa und bei einer Prüftemperatur von 0 °C

Lastwechselzahl	$N_{\text{Makro}} [-]$	10.803 4.503 17.402
Mittelwert	MW [-]	10.902,67
Standardabweichung	$\sigma [-]$	6.450,08
Variationskoeffizient	$v [\%]$	59,16

Tab. 32: Ergebnisse kontinuierlicher Zug-Druck-Wechselastprüfungen mit gelenkig gelagertem Lastgestänge bei 0 °C und einer Oberspannung von 2,63 MPa

In Tabelle 32 sind die Ergebnisse der Ermüdungsprüfungen aus Bild 120 zusammengefasst.

b) Kraftgeregelt mit starrer Lagerung des Lastgestänges

In Bild 121 sind die ertragbaren Lastwechselzahlen bis zum Erreichen des Ermüdungskriteriums in Abhängigkeit von der gewählten Oberspannung bei einer Prüftemperatur von 20 °C dargestellt.

Bei der Oberspannung $\sigma = 1,05$ MPa ergeben sich ertragbare Lastwechselzahlen von ca. 8.500. Es wurden für diese Oberspannung Wiederholungsversuche durchgeführt. In Bild 122 sind die Verläufe des E-Moduls über die Lastwechselzahl für die kontinuierlichen Ermüdungsprüfungen bei 20 °C und bei einer Oberspannung von $\sigma = 1,05$ MPa dargestellt.

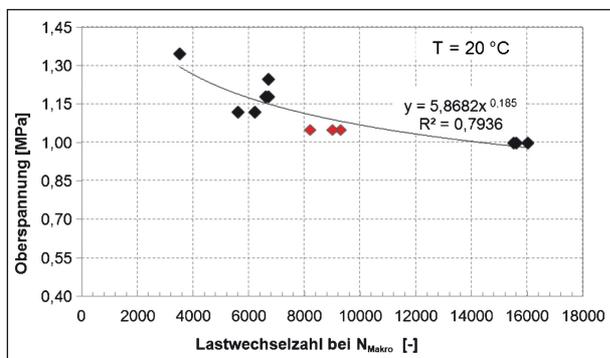


Bild 121: Ertragbare Lastwechselzahlen (N_{Makro}) bei kraftgeregelten Zug-Druck-Wechselastprüfungen (20 °C) in Abhängigkeit von der gewählten Oberspannung

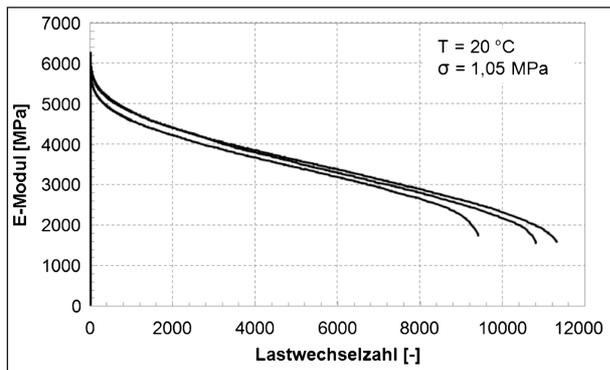


Bild 122: Verlauf des E-Moduls bei kontinuierlichen kraftgeregelten Zug-Druck-Wechselastprüfung mit starr gelagertem Lastgestänge bei einer Oberspannung von 1,05 MPa und bei einer Prüftemperatur von 20 °C

Lastwechselzahl	N_{Makro} [-]	9.301
		8.009
		9.004
Mittelwert	MW [-]	8.771,33
Standardabweichung	σ [-]	676,70
Variationskoeffizient	v [%]	7,71

Tab. 33: Ergebnisse kontinuierlicher Zug-Druck-Wechselastprüfungen mit starrem Lastgestänge bei 20 °C und einer Oberspannung von 1,05 MPa

In Tabelle 33 sind die Ergebnisse der Ermüdungsprüfungen aus Bild 122 zusammengefasst.

In Bild 123 sind die ertragbaren Lastwechselzahlen bis zum Erreichen des Ermüdungskriteriums in Abhängigkeit von der gewählten Oberspannung bei einer Prüftemperatur von 0 °C dargestellt.

Bei der Oberspannung $\sigma = 2,90$ MPa ergeben sich ertragbare Lastwechselzahlen von ca. 8.000. Es wurden für diese Oberspannung Wiederholungsversuche durchgeführt. In Bild 124 sind die Verläufe des E-Moduls über die Lastwechselzahl für die kontinuierlichen Ermüdungsprüfungen bei 0 °C

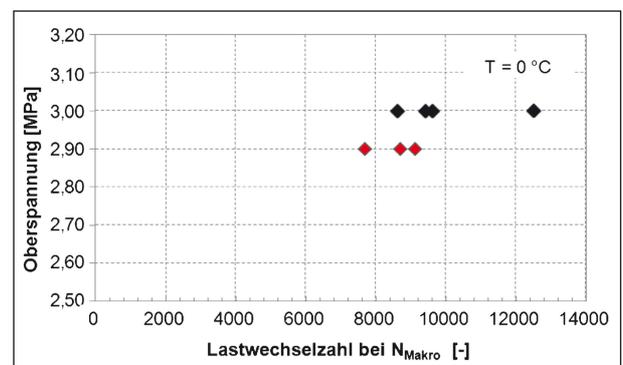


Bild 123: Ertragbare Lastwechselzahlen (N_{Makro}) bei kraftgeregelten Zug-Druck-Wechselastprüfungen in Abhängigkeit von der gewählten Oberspannung und bei einer Prüftemperatur von 0 °C

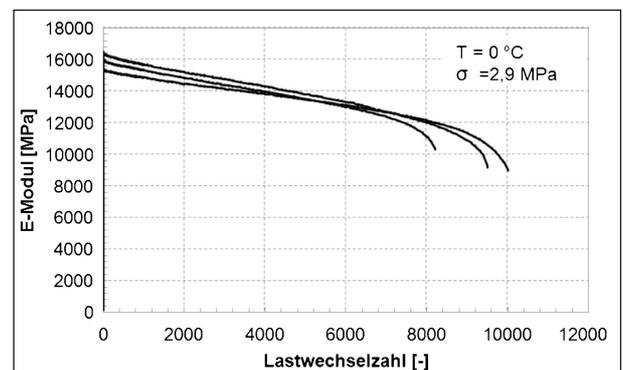


Bild 124: Verlauf des E-Moduls bei kontinuierlichen kraftgeregelten Zug-Druck-Wechselastprüfung mit starr gelagertem Lastgestänge bei einer Oberspannung von 2,90 MPa und bei einer Prüftemperatur von 0 °C

Lastwechselzahl	N_{Makro} [-]	8.700
		9.110
		7.704
Mittelwert	MW [-]	8.504,67
Standardabweichung	σ [-]	723,07
Variationskoeffizient	v [%]	8,50

Tab. 34: Ergebnisse kontinuierlicher Zug-Druck-Wechselastprüfungen mit starrem Lastgestänge bei 0 °C und einer Oberspannung von 2,90 MPa

und bei einer Oberspannung von $\sigma = 2,90$ MPa dargestellt.

In Tabelle 34 sind die Ergebnisse der Ermüdungsprüfungen aus Bild 124 zusammengefasst.

c) Weggeregelt mit starrer Lagerung des Lastgestänges

Um die Anzahl ertragbarer Lastwechsel bis zum Erreichen des Ermüdungskriteriums auf ein Maximum von 10.000 zu beschränken (siehe Kapitel 3.3.2), muss die Festlegung einer geeigneten Dehnungsamplitude erfolgen. Es wurden kontinuierliche Ermüdungsversuche mit variierenden Dehnungsamplituden durchgeführt und geeignete Dehnungsamplituden durch Wiederholungsversuche verifiziert sowie die Wiederholbarkeit bzw. das Streumaß der Versuchsreihen bestimmt.

In Bild 125 sind die ertragbaren Lastwechselzahlen bis zum Erreichen des Ermüdungskriteriums in

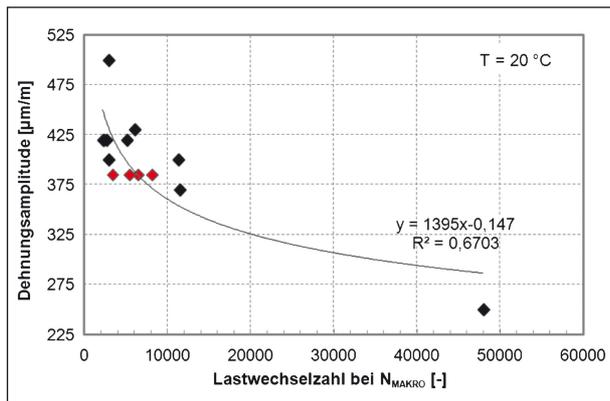


Bild 125: Ertragbare Lastwechselzahlen (N_{Makro}) bei weggeregelten Zug-Druck-Wechselastprüfungen in Abhängigkeit von der gewählten Dehnungsamplitude bei einer Prüftemperatur von 20 °C

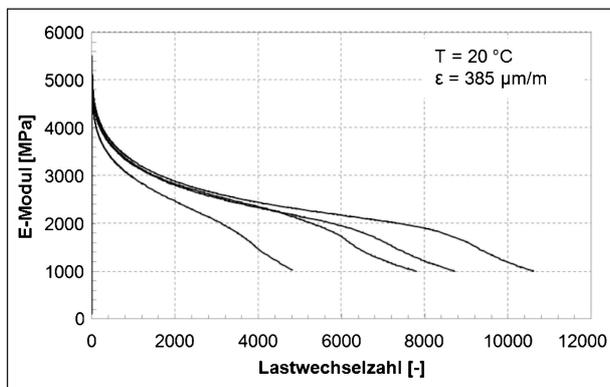


Bild 126: Verlauf des E-Moduls bei kontinuierlichen weggeregelten Zug-Druck-Wechselastprüfung mit starr gelagertem Lastgestänge bei einer Dehnungsamplitude von 385 µm/m bei einer Prüftemperatur von 20 °C

Abhängigkeit von der gewählten Dehnungsamplitude bei einer Prüftemperatur von 20 °C dargestellt.

Bei der Dehnungsamplitude von 385 µm/m ergeben sich ertragbare Lastwechselzahlen von ca. 7.000. Es wurden für diese Dehnungsamplitude Wiederholungsversuche durchgeführt. In Bild 126 sind die Verläufe des E-Moduls über die Lastwechselzahl für die kontinuierlichen Ermüdungsprüfungen bei 20 °C und bei einer Dehnungsamplitude von $\epsilon = 385$ µm/m dargestellt.

In Tabelle 35 sind die Ergebnisse der Ermüdungsprüfungen aus Bild 126 zusammengefasst.

In Bild 127 sind die ertragbaren Lastwechselzahlen bis zum Erreichen des Ermüdungskriteriums in Abhängigkeit von der gewählten Dehnungsamplitude bei einer Prüftemperatur von 0 °C dargestellt.

In Tabelle 36 sind die Ergebnisse der Ermüdungsprüfungen aus Bild 128 zusammengefasst.

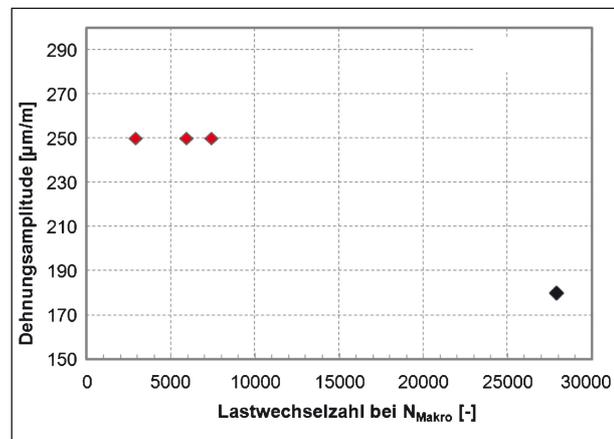


Bild 127: Ertragbare Lastwechselzahlen (N_{Makro}) bei weggeregelten Zug-Druck-Wechselastprüfungen in Abhängigkeit von der gewählten Dehnungsamplitude bei einer Prüftemperatur von 0 °C

		6.504
Lastwechselzahl	N_{Makro} [-]	8.205
		5.503
		3.405
Mittelwert	MW [-]	5.904,25
Standardabweichung	σ [-]	2.005,03
Variationskoeffizient	v [%]	33,96

Tab. 35: Ergebnisse kontinuierlicher Zug-Druck-Wechselastprüfungen mit starrem Lastgestänge bei 20 °C und einer Dehnungsamplitude von 385 µm/m

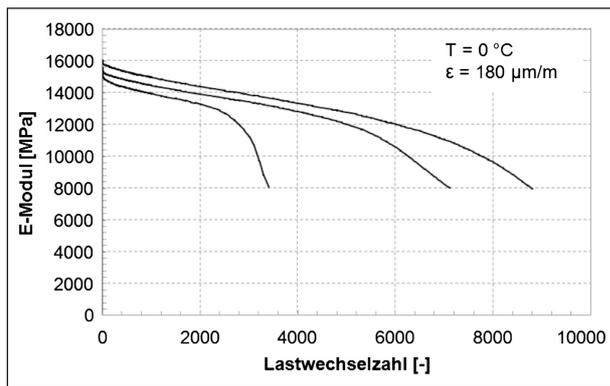


Bild 128: Verlauf des E-Moduls bei kontinuierlichen weggeregelten Zug-Druck-Wechselastprüfung mit starr gelagertem Lastgestänge bei einer Dehnungsamplitude von 180 µm/m bei einer Prüftemperatur von 0 °C

Lastwechselzahl	N_{Makro} [-]	2.904
		5.907
		7.407
Mittelwert	MW [-]	5.406,00
Standardabweichung	σ [-]	2.292,92
Variationskoeffizient	v [%]	42,41

Tab. 36: Ergebnisse kontinuierlicher Zug-Druck-Wechselastprüfungen mit starrem Lastgestänge bei 0 °C und einer Dehnungsamplitude von 180 µm/m

5.2.3 Healing-Verhalten in der Zug-Schwellprüfung

Die Prüfung der Healing-Eigenschaften von Asphalt erfolgte einerseits mittels kraftgeregelten Zug-Schwellprüfungen und andererseits mittels kraftgeregelten Zug-Druck-Wechselastprüfungen (siehe Kapitel 5.2.4) jeweils mit starrer Lagerung des Lastgestänges, jeweils mit Durchführung der Versuchstypen 2 und 3 bei 20 °C und 0 °C.

Die Ergebnisse weggeregelter Zug-Druck-Wechselastprüfungen aus Kapitel 5.2.2c weisen eine deutlich größere Streuung im Ermüdungsverlauf auf und werden daher nicht weiter betrachtet.

a) Versuchstyp 2

Diskontinuierliche kraftgeregelte Zug-Schwell-Ermüdungsprüfungen des Versuchstyps 2 wurden bei 20 °C und 0 °C mit Lastpausendauer von LP2a = 0,5 s und LP2b = 1 s durchgeführt. Beispielhaft sind die E-Modul-Verläufe gemeinsam mit denen der kontinuierlichen Ermüdungsprüfungen (Versuchstyp 1) in Bild 129 (für eine Prüftemperatur von T = 20 °C) und in Bild 130 (für eine Prüftemperatur von T = 0 °C) dargestellt.

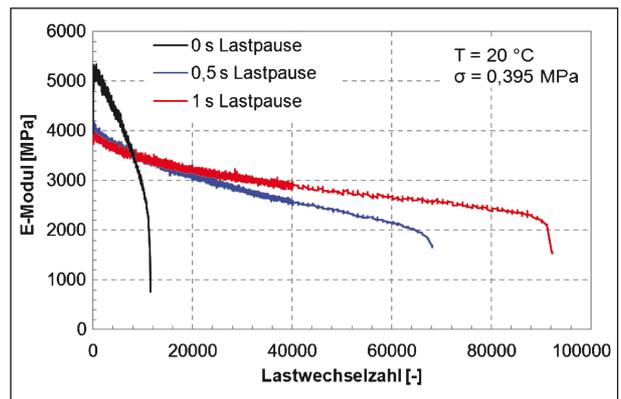


Bild 129: Verlauf des E-Moduls bei kontinuierlichen kraftgeregelten Zug-Schwell-Ermüdungsprüfung (Versuchstyp 1, schwarz) und bei den Healing-Prüfung (Versuchstyp 2) bei LP2a = 0,5 s Lastpause (blau) und LP2b = 1 s (rot) bei einer Prüftemperatur von 20 °C und einer Oberspannung von $\sigma = 0,395$ MPa

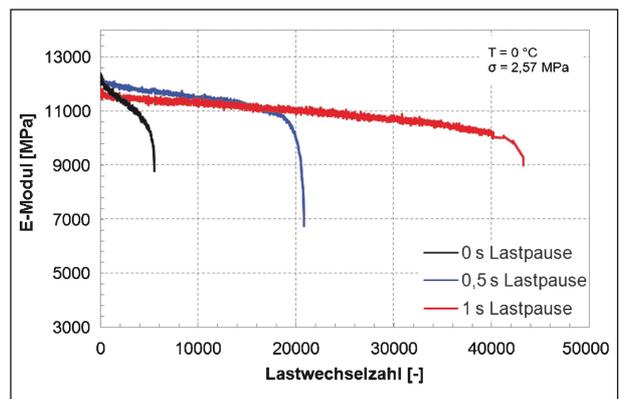


Bild 130: Verlauf des E-Moduls bei kontinuierlicher kraftgeregelter Zug-Schwell-Ermüdungsprüfung (Versuchstyp 1, schwarz) und Healing-Prüfung (Versuchstyp 2) bei LP2a = 0,5 s Lastpause (blau) und LP2b = 1 s (rot) bei einer Prüftemperatur von T = 0 °C und einer Oberspannung von $\sigma = 2,57$ MPa

Temperatur [°C]	Lastpausendauer [s]	N_{Makro} [-]	Hi1 [%]
20	0,5	71.707,50	664,91
	1	81.539,67	769,79
0	0,5	20.408,50	249,42
	1	44.205,50	656,86

Tab. 37: Ergebnisse kraftgeregelter Zug-Schwell-Healing-Prüfungen des Versuchstyps 2

Die Auswertung dieses Versuchstyps erfolgt durch Anwendung des Healing-Index Hi1 (vgl. Kapitel 3.3.4 und ist in Tabelle 37 zusammengefasst.

b) Versuchstyp 3

Bei Versuchstyp 3 ist ein Zeitpunkt bzw. ein Kriterium zu definieren, bei dem die Ermüdungsprüfung durch eine Lastpause unterbrochen wird.

Als Lastpausenkriterium wird jeweils der Abfall des E-Moduls in Prozent zum E-Modul bei Versuchsbeginn gewählt, welcher bei 50 % bzw. 75 % der maximalen Energy Ratio vorliegt (siehe Kapitel

3.3.3b). Die Lastpausenkriterien wurden aus kontinuierlichen Ermüdungsversuchen unter Betrachtung des Verlaufes des relativen E-Moduls über die relative Energy Ratio ermittelt (siehe Kapitel 5.2.1b) und sind zusammen mit der Lastpausendauer (siehe Kapitel 3.3.3b) in Tabelle 38 zusammengefasst. Bild 131 zeigt beispielhaft den Verlauf des relativen E-Moduls über die relative Energy Ratio in der kraftgeregelten Zug-Schwellprüfung.

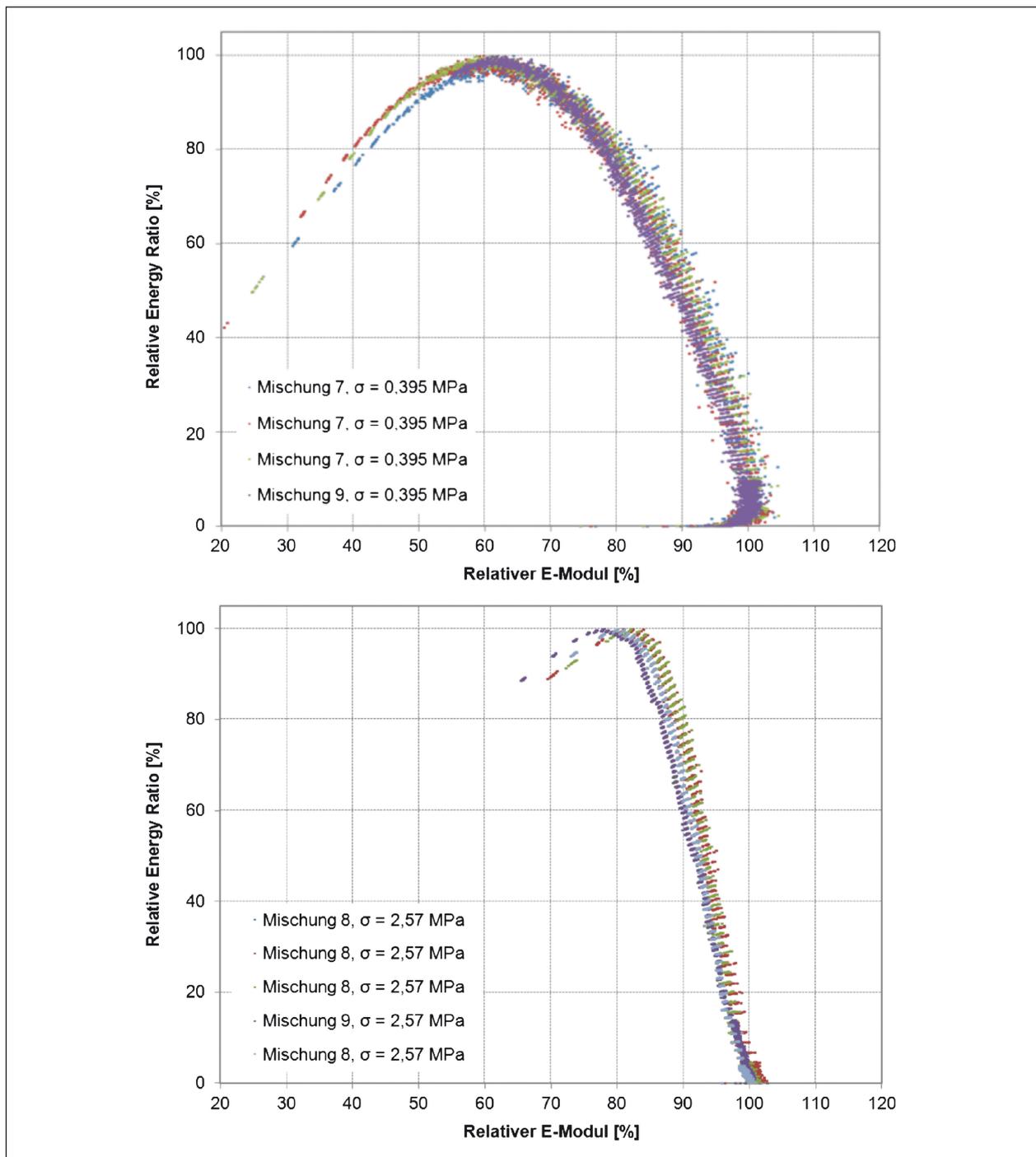


Bild 131: Verlauf des relativen E-Moduls und relativer Energy Ratio in der kraftgeregelten Zug-Schwellprüfung an AC 11 D S mit Straßenbaubitumen 50/70 bei der Prüftemperaturen von 20 °C (oben) und 0 °C (unten)

Temperatur [°C]	LP3a [s]	LP3b [s]	LP3c [s]	E_{ER50} [%]	E_{ER75} [%]	Hi5 [%]
20	9.426	11.000	1.000	89,59	80,75	27,06
0	4.630	1.000	500	92,46	88,80	17,85

Tab. 38: Ergebnisse aus Versuchstyp 1 als Eingangsgrößen für Versuchstyp 3

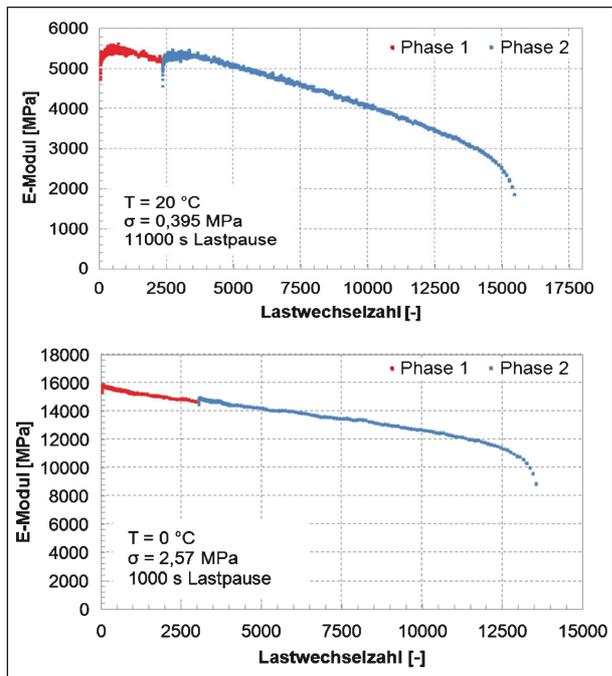


Bild 132: Verlauf von E-Modul bei kraftgeregelter Zug-Schwell-Healing-Prüfung (Versuchstyp 3) bei 20 °C (LP3b = 11.000 s; σ = 0,395 MPa; oben) und 0 °C (LP3b = 1.000 s; σ = 2,57 MPa; unten)

Exemplarisch ist der Verlauf des E-Moduls bei kraftgeregelter Zug-Schwell-Healing-Prüfung gemäß Versuchstyp 3 in Bild 132 für die Prüftemperaturen 20 °C und 0 °C dargestellt. Die erste Belastungsphase ist in rot und die zweite Belastungsphase in blau dargestellt. Deutlich ersichtlich ist die verbesserte Materialrückstellung während der Lastpause bei langer Lastpausendauer (11.000 s) und hoher Temperatur (20 °C) gegenüber einer kürzeren Lastpause (1.000 s) bei niedrigerer Temperatur (0 °C).

Die vollständigen Verläufe des E-Moduls während der ersten und der zweiten Phase sind in Bild 133 für Versuche bei den Prüftemperaturen 20 °C und 0 °C bei Verwendung der Lastpausendauer LP3b jeweils überlagert dargestellt. Auffällig stellt sich der nahezu gleich mit Belastungsphase 1 verlaufende E-Modul der zweiten Belastungsphase bei 20 °C dar. Dies lässt auf eine sehr gute Materialrückstellung während der Lastpause schließen.

Die Verläufe des E-Moduls während der ersten und der zweiten Phase sind in Bild 134 für Versuche bei

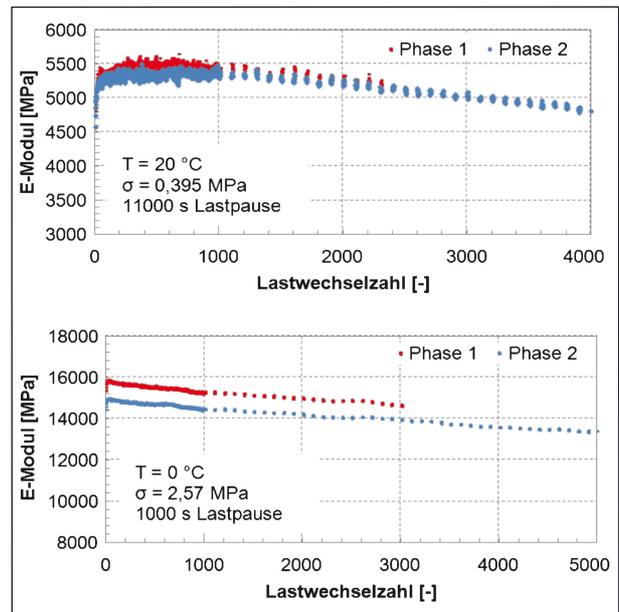


Bild 133: Überlagerung des E-Modul-Verlaufs von Belastungsphase 1 (rot) und 2 (blau) bei Versuchstyp 3 bei kraftgeregelter Zug-Schwell-Healing-Prüfung bei 20 °C (LP3b = 11.000 s; σ = 0,395 MPa; oben) und 0 °C (LP3b = 1.000 s; σ = 2,57 MPa; unten)

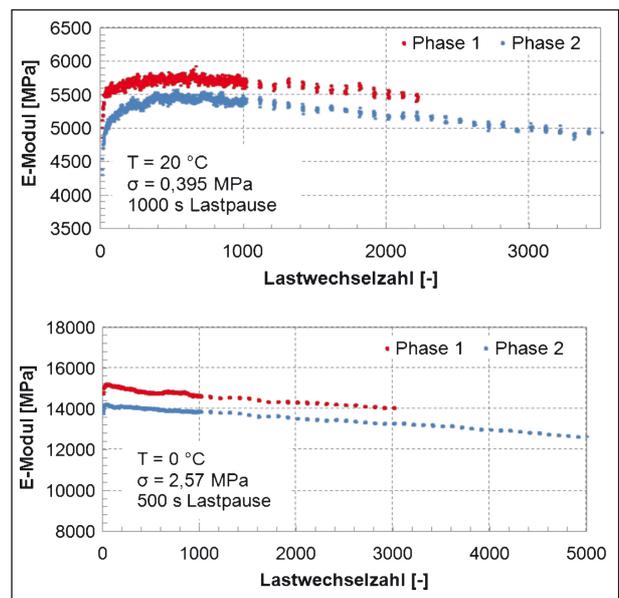


Bild 134: Überlagerung des E-Modul-Verlaufs von Belastungsphase 1 (rot) und 2 (blau) bei Versuchstyp 3 bei kraftgeregelter Zug-Schwell-Healing-Prüfung bei 20 °C (LP3c = 1.000 s; σ = 0,395 MPa; oben) und 0 °C (LP3c = 500 s; σ = 2,57 MPa; unten)

Lastpause[s]	N_{Makro} [-]	Hi1 [%]	Hi2 [%]	Hi3 [%]	Hi4 [%]	Hi5 [%]
1.000	11.815,5	4,73	54,86	24,52	105,25	27,06
9.426	21.162	87,56	76,73	32,81	101,75	35,81
11.000	11.967	6,07	95,85	20,43	93,70	17,85

Tab. 39: Ergebnisse kraft geregelter Zug-Schwell-Healing-Prüfungen (Versuchstyp 3) bei einer Prüftemperatur von 20 °C mit Lastpausenkriterium E_{ER50}

Lastpause[s]	N_{Makro} [-]	Hi1 [%]	Hi2 [%]	Hi3 [%]	Hi4 [%]	Hi5 [%]
1.000	17.260,5	52,98	17,34	13,82	69,49	7,21

Tab. 40: Ergebnisse kraft geregelter Zug-Schwell-Healing-Prüfungen (Versuchstyp 3) bei einer Prüftemperatur von 20 °C mit Lastpausenkriterium E_{ER75}

Lastpause [s]	N_{Makro} [-]	Hi1 [%]	Hi2 [%]	Hi3 [%]	Hi4 [%]	Hi5 [%]
500	11.663,5	75,00	15,69	41,84	98,85	39,38
1.000	11.615	74,27	22,74	40,02	100,31	37,96
4.630	12.361	85,47	53,62	77,12	137,76	75,91

Tab. 41: Ergebnisse kraft geregelter Zug-Schwell-Healing-Prüfungen (Versuchstyp 3) bei einer Prüftemperatur von 0 °C mit Lastpausenkriterium E_{ER50}

Lastpause [s]	N_{Makro} [-]	Hi1 [%]	Hi2 [%]	Hi3 [%]	Hi4 [%]	Hi5 [%]
1.000	8.264	23,99	8,09	15,83	59,84	14,14

Tab. 42: Ergebnisse kraft geregelter Zug-Schwell-Healing-Prüfungen (Versuchstyp 3) bei einer Prüftemperatur von 0 °C mit Lastpausenkriterium E_{ER75}

den Prüftemperaturen 20 °C und 0 °C bei Verwendung der Lastpausendauer LP3c jeweils überlagert dargestellt. Es zeigt sich sowohl bei 0 °C als auch bei 20 °C durch die verkürzte Lastpausendauer eine geringere Materialrückstellung bei Entlastung.

Die Auswertung dieses Versuchstyps erfolgt durch Anwendung der Healing-Indices Hi1 bis Hi5 (vgl. Kapitel 3.3.4. Diese sind in Tabelle 39 bis Tabelle 42 zusammengefasst.

5.2.4 Healing-Verhalten in der Zug-Druck-Wechselastprüfung

Die Prüfung der Healing-Eigenschaften von Asphalt erfolgte neben kraft geregelten Zug-Schwellprüfungen (siehe Kapitel 5.2.3) mittels kraft geregelten Zug-Druck-Wechselastprüfungen jeweils mit starrer Lagerung des Lastgestänges und jeweils mit Durchführung der Versuchstypen 2 und 3 bei den Prüftemperaturen 20 °C und 0 °C.

a) Versuchstyp 2

Diskontinuierliche Zug-Druck-Wechselastprüfungen gemäß Versuchstyp 2 wurden bei den Prüftemperaturen 20 °C und 0 °C mit Lastpausendauer von LP2a = 0,5 s und LP2b = 1 s durchgeführt. Beispielhaft sind die E-Modul-Verläufe gemeinsam mit jenen der kontinuierlichen Ermüdungsprüfungen (Versuchstyp 1) in Bild 135 (Prüftemperatur T = 20 °C) und Bild 136 (Prüftemperatur T = 0 °C) dargestellt.

Die Auswertung dieses Versuchstyps erfolgt durch Anwendung des Healing-Index Hi1 (vgl. Kapitel 3.3.4 wie in Tabelle 43 angegeben.

b) Versuchstyp 3

Bei Versuchstyp 3 ist ein Zeitpunkt bzw. ein Kriterium zu definieren, bei dem die Ermüdungsprüfung durch eine Lastpause unterbrochen wird.

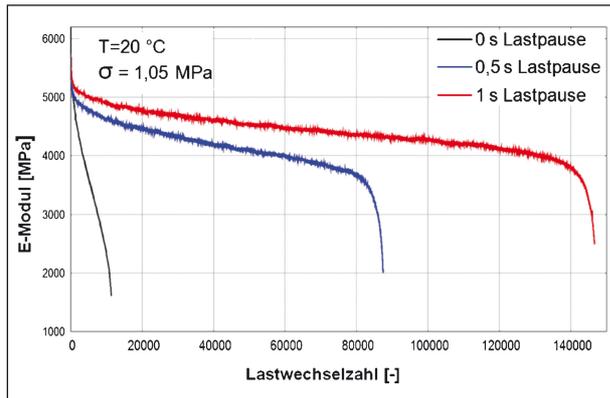


Bild 135: Verlauf des E-Moduls bei kontinuierlicher Zug-Druck-Wechsellast-Ermüdungsprüfung (Versuchstyp 1, schwarz) und Healing-Prüfungen (Versuchstyp 2) bei LP2a = 0,5 s Lastpause (blau) und LP2b = 1 s Lastpause (rot) bei einer Prüftemperatur von 20 °C und einer Oberspannung von $\sigma = 1,05$ MPa

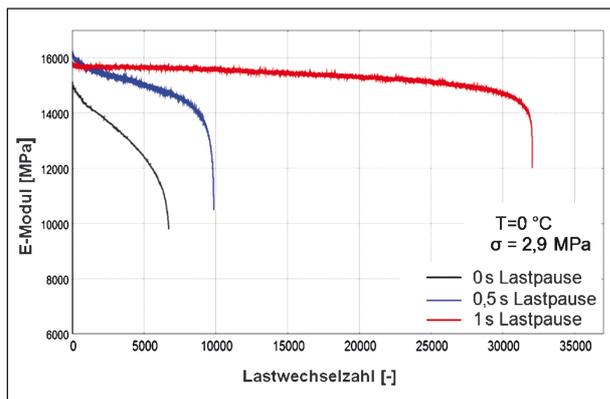


Bild 136: Verlauf des E-Moduls bei kontinuierlicher Zug-Druck-Wechsellast-Ermüdungsprüfung (Versuchstyp 1, schwarz) und Healing-Prüfung (Versuchstyp 2) bei LP2a = 0,5 s Lastpause (blau) und LP2b = 1 s Lastpause (rot) bei einer Prüftemperatur von 0 °C und einer Oberspannung von $\sigma = 2,9$ MPa

Temperatur [°C]	Lastpausendauer [s]	N_{Makro} [-]	Hi1 [%]
20	0,5	90.511,5	1.139,54
	1	1.382.857	1.793,81
0	0,5	10.993,67	71,78
	1	42.103,67	557,87

Tab. 43: Ergebnisse kraft geregelter Zug-Druck-Wechsellast-Healing-Prüfungen gemäß Versuchstyp 2

Als Lastpausenkriterium wird der Abfall des anfänglichen E-Moduls in Prozent zum E-Modul bei Versuchsbeginn gewählt, welcher bei 50 % bzw. 75 % der maximalen Energy Ratio vorliegt (siehe Kapitel 3.3.3b). Die Lastpausenkriterien wurden aus kontinuierlichen Ermüdungsversuchen unter Betrachtung

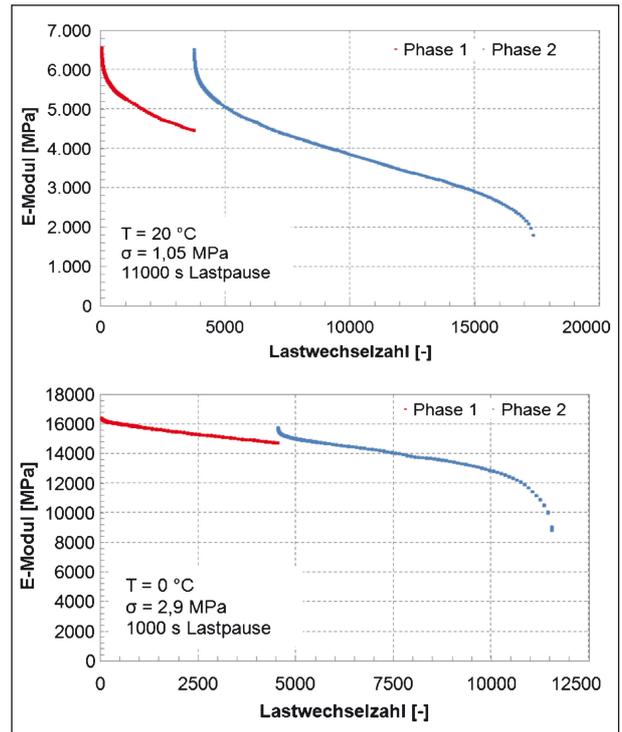


Bild 137: Verlauf von E-Modul bei Zug-Druck-Wechsellast-Healing-Prüfung (Versuchstyp 3) bei 20 °C (LP3b = 11.000 s; $\sigma = 1,05$ MPa; oben) und 0 °C (LP3b = 1.000 s; $\sigma = 2,9$ MPa; unten)

des Verlaufes des relativen E-Moduls über die relative Energy Ratio ermittelt (siehe Kapitel 5.2.2b). Sie sind zusammen mit der Lastpausendauer (siehe Kapitel 3.3.3b) in Tabelle 44 zusammengefasst.

Bild 138 zeigt den Verlauf des relativen E-Moduls über die relative Energy Ratio in der Zug-Druck-Wechsellastprüfung.

Exemplarisch ist der Verlauf des E-Moduls bei Zug-Schwell-Healing-Prüfungen gemäß Versuchstyp 3 in Bild 137 für Prüftemperaturen von 20 °C und 0 °C dargestellt. Die erste Belastungsphase ist rot und die zweite Belastungsphase blau dargestellt.

Die vollständigen Verläufe des E-Moduls während der ersten und der zweiten Phase sind in Bild 139 für Versuche bei Prüftemperaturen von 20 °C und 0 °C bei Verwendung der Lastpausendauer LP3b jeweils überlagert dargestellt.

Die vollständigen Verläufe des E-Moduls der ersten und zweiten Phase sind in Bild 140 für Versuche bei Prüftemperaturen von 20 °C und 0 °C bei Verwendung der Lastpausendauer LP3c jeweils überlagert dargestellt.

Temperatur [°C]	LP3a [s]	LP3b [s]	LP3c [s]	E_{ER50} [%]	E_{ER75} [%]
20	30.000	11.000	7.500	75,03	65,63
	18.725		1.000		
	15.000		500		
0	2.409	1.000	500	91,27	86,52

Tab. 44: Ergebnisse aus Versuchstyp 1 als (Eingangsgrößen für Versuchstyp 3)

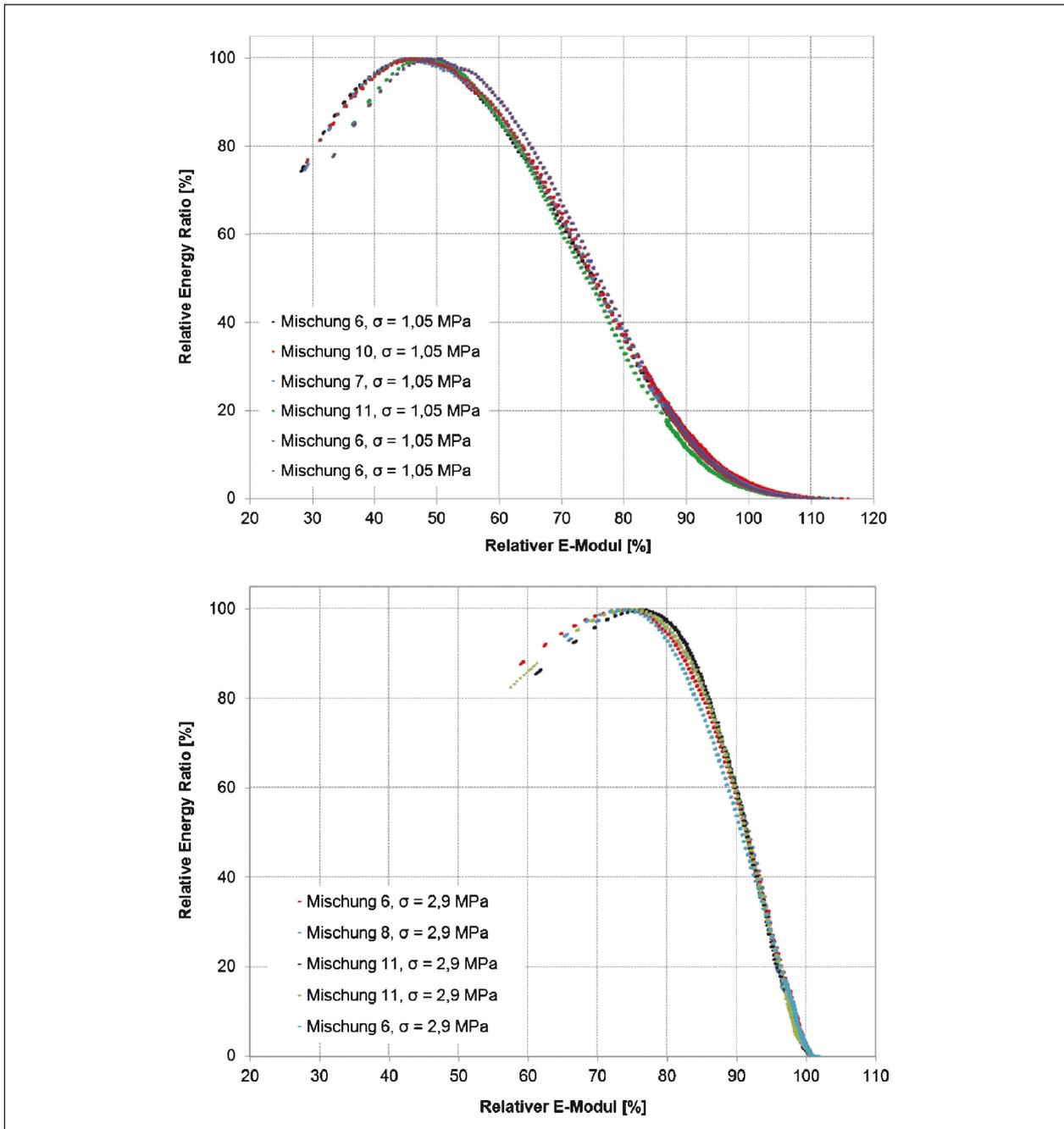


Bild 138: Verlauf des relativen E-Moduls und der relativen Energy Ratio in der Zug-Druck-Wechselastprüfung an AC 11 D S mit Straßenbaubitumen 50/70 bei Prüftemperaturen von 20 °C (oben) und 0 °C (unten)

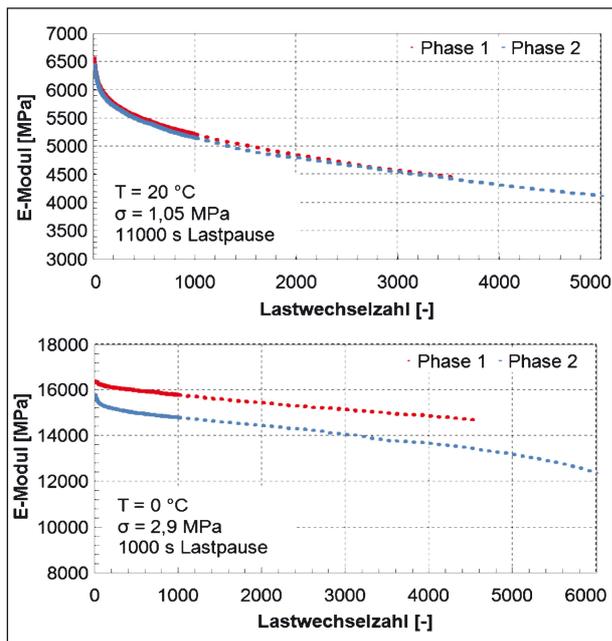


Bild 139: Überlagerung des E-Modul-Verlaufs von Belastungsphase 1 (rot) und 2 (blau) bei Versuchstyp 3 bei kraftgeregelter Zug-Druck-Wechselast-Healing-Prüfung bei 20 °C (LP3b = 11.000 s; $\sigma = 1,05$ MPa; oben) und 0 °C (LP3b = 1.000 s; $\sigma = 2,9$ MPa; unten)

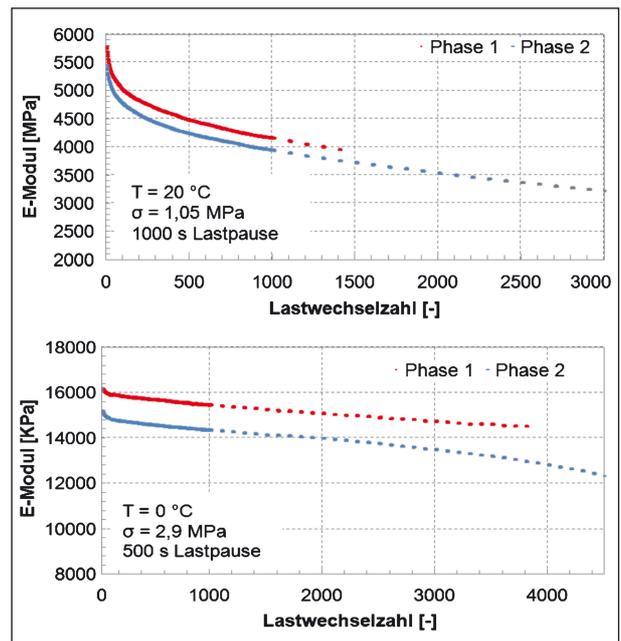


Bild 140: Überlagerung des E-Modul-Verlaufs von Belastungsphase 1 (rot) und 2 (blau) bei Versuchstyp 3 bei kraftgeregelter Zug-Druck-Wechselast-Healing-Prüfung bei 20 °C (LP3c = 1.000 s; $\sigma = 1,05$ MPa; oben) und 0 °C (LP3c = 500 s; $\sigma = 2,9$ MPa; unten)

Lastpause [s]	N_{Makro} [-]	Hi1 [%]	Hi2 [%]	Hi3 [%]	Hi4 [%]	Hi5 [%]
500	8.512	2,90	49,12	-	91,00	14,57
1.000	7.864,5	38,62	63,13	6,86	96,95	26,31
7.500	8.018	-3,07	105,44	-	104,84	31,16
11.000	15.568	54,24	97,89	18,77	106,355	36,02
15.000	9.312	12,58	132,93	13,27	115,95	41,85
18.725	13.413,5	62,16	101,655	12,245	109,06	38,78
30.000	9.013	8,96	121,77	15,19	114,56	41,50

Tab. 45: Ergebnisse kraftgeregelter Zug-Druck-Wechselast-Healing-Prüfungen (Versuchstyp 3) bei 20 °C mit Lastpausenkriterium E_{ER50}

Lastpause [s]	N_{Makro} [-]	Hi1 [%]	Hi2 [%]	Hi3 [%]	Hi4 [%]	Hi5 [%]
1.000	8.165,5	-1,28	59,92	-	79,25	25,72

Tab. 46: Ergebnisse kraftgeregelter Zug-Druck-Wechselast-Healing-Prüfungen (Versuchstyp 3) bei 20 °C mit Lastpausenkriterium E_{ER75}

Die Auswertung dieses Versuchstyps erfolgt durch Anwendung der Healing-Indices Hi2 bis Hi5 (vgl. Kapitel 3.3.4) wie in Tabelle 45 und Tabelle 48 angegeben.

Anhand des Asphaltmischguts der Sorte AC 11 D S mit Straßenbaubitumen 50/70 wurde ein Prüfkonzept zur Beurteilung von Healing-Eigenschaften erarbeitet. Zur Beurteilung der Eignung und

Aussagefähigkeit der Healing-Indices (siehe Kapitel 3.3.4 werden Modifikationen am Asphaltmischgut vorgenommen:

- Erhöhung des Bindemittelgehalts von 5,9 auf 6,4 M.-%,
- Alterung des Asphaltmischguts mittels Braunschweiger Alterungsverfahren (Bitumen am Gestein),

Lastpause [s]	N_{Makro} [-]	Hi1 [%]	Hi2 [%]	Hi3 [%]	Hi4 [%]	Hi5 [%]
500	8.612	-4,60	15,64	1,99	57,50	-1,37
1.000	14.166,5	16,49	26,17	14,31	60,73	3,58
2.409	10.364,5	14,82	41,60	8,67	66,38	9,86

Tab. 47: Ergebnisse kraft geregelter Zug-Druck-Wechselast-Healing-Prüfungen (Versuchstyp 3) bei 0 °C mit Lastpausenkriterium E_{ER50}

Lastpause [s]	N_{Makro} [-]	Hi1 [%]	Hi2 [%]	Hi3 [%]	Hi4 [%]	Hi5 [%]
1.000	11.660,5	29,18	18,75	3,21	38,28	2,02

Tab. 48: Ergebnisse kraft geregelter Zug-Druck-Wechselast-Healing-Prüfungen (Versuchstyp 3) bei 0 °C mit Lastpausenkriterium E_{ER75}

Mischgut	AC 11 D S	AC 16 B S				
Zustand	frisch	gealtert	gealtert	frisch	frisch	frisch
Bindemittel	50/70	50/70	50/70	50/70	50/70	50/70
Bindemittelgehalt [M.-%]	6,4	5,9	5,9	5,9	5,9	4,4
Verdichtung	Standard	Standard	Standard	geringer	höher	Standard
Temperatur [°C]	20	20	20	20	20	20
LP Kriterium ER [%]	50	50	75	50	50	50
LP-Dauer [s]	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
E_{ER} bei Lastpause [%]	74,89	75,26	67,23	74,74	74,1	74,44
N_{Makro} (ohne LP) [-]	7.006	17.003	17.003	6.558	8.808	10.606
N_{Makro} (mit LP) [-]	8.534,5	23.650	30.544	8.286	11.183	8.986
$ E_{\text{anf2}}/E_{\text{anf1}} $ [%]	95,76	90,90	87,20	93,41	93,42	92,44
Hi1 [%]	21,82	39,09	80,97	26,35	26,95	-15,11
Hi2 [%]	80,23	43,34	35,81	68,71	68,99	54,38
Hi3 [%]	13,23	13,82	21,33	5,52	8,12	-
Hi4 [%]	103,83	77,84	66,72	97,15	97,37	71,92
Hi5 [%]	32,90	11,84	22,19	26,59	25,44	5,02

Tab. 49: Ergebnisse von Healing-Prüfungen an AC 11 D S und AC 16 B S mit Straßenbaubitumen 50/70 bei veränderten Mischgutparametern

- Alterung des Asphaltmischguts mittels Braunschweiger Alterungsverfahren und Änderung des Lastpausenkriteriums von ER50 auf ER75,
- geringere Verdichtungsleistung bei Probekörperherstellung,
- höhere Verdichtungsleistung bei Probekörperherstellung,
- Änderung der Asphaltrezeptur von AC 11 D S auf AC 16 B S,
- Änderung des Bindemittels von Straßenbaubitumen 50/70 zu Polymer-modifiziertem Bindemittel 25/55-55,
- Änderung des Bindemittels von Straßenbaubitumen 50/70 zu Polymer-modifiziertem Bindemittel 25/55-55 und Erhöhung der Lastpausendauer von 1.000 s auf 15.000 s,
- Änderung des Bindemittels von Straßenbaubitumen 50/70 zu Polymer-modifiziertem Bindemittel 25/55-55 und Änderung des Lastpausenkriteriums von ER50 auf ER75,
- Änderung des Bindemittels von Straßenbaubitumen 50/70 zu Polymer-modifiziertem Bindemittel 25/55-55 und Änderung der Prüftemperatur von 20 °C auf 0 °C.

Mischgut	AC 11 D S			
Zustand	frisch	frisch	frisch	frisch
Bindemittel	25/55-55	25/55-55	25/55-55	25/55-55
Bindemittelgehalt [M.-%]	5,9	5,9	5,9	5,9
Verdichtung	Standard	Standard	Standard	Standard
Temperatur [°C]	20	20	20	0
LP Kriterium ER [%]	50	50	75	50
LP-Dauer [s]	1.000	15.000	1.000	1.000
E_{ER} bei Lastpause [%]	72,02	72,02	61,32	91,395
N_{Makro} (ohne LP) [-]	10.857	10.857	10.857	12.053
N_{Makro} (mit LP) [-]	12.744	13.010	13.411	15.315
$ E _{anf2}/ E _{anf1}$ [%]	91,92	102,45	88,05	95,66
Hi1 [%]	17,38	19,84	23,53	27,07
Hi2 [%]	67,73	119,24	59,03	36,44
Hi3 [%]	-	6,43	-	10,61
Hi4 [%]	93,87	113,78	77,47	69,01
Hi5 [%]	22,81	43,47	29,02	4,92

Tab. 50: Ergebnisse von Healing-Prüfungen an AC 11 D S mit Polymermodifiziertem Bitumen 25/55-55 bei veränderten Mischgutparametern

Für die Durchführung der Healing-Prüfungen an Asphaltbeton AC 16 B S erfolgte eine Anpassung der Oberspannung, um eine vergleichbare Lastwechselzahl für N_{Makro} zu erzielen. Dazu wurden einzelne Ermüdungsversuche bei verschiedenen Oberspannungen (1,05 MPa; 0,85 MPa; 0,7 MPa) durchgeführt. Die Anwendung der Oberspannung von 1,05 MPa (wie bei AC 11 D S) führte bereits nach ca. 1.500 Lastwechsel zum Versagen der Probekörper. Eine Oberspannung von 0,7 MPa hat sich für den AC 16 B S als geeignet herausgestellt. Alle weiteren Varianten wurden mit einheitlicher Oberspannung von 1,05 MPa geprüft.

Die Ergebnisse der Healing-Prüfungen an Asphaltmischgut AC 11 D S mit Straßenbaubitumen 50/70 sowie an AC 16 B S sind in Tabelle 49 und die Ergebnisse der Healing-Prüfungen an AC 11 D S mit Polymermodifizierten Bitumen 25/55-55 in Tabelle 50 dargestellt.

5.2.5 Healing-Verhalten in der Spaltzug-Schwellprüfung

Das entwickelte Versuchsprogramm zur Untersuchung des Healing-Verhaltens in der Zug-Druck-Wechselastprüfung wurde auf die Spaltzug-Schwellprüfung übertragen (siehe auch Kapitel 6). Es wurden jeweils drei Ermüdungsversuche ohne

Prüftemperatur [°C]	20
Prüffrequenz [Hz]	10
Probekörpergeometrie	Zylinder
Probekörperabmessung [mm]	d = 100, h = 40
Lastpausenkriterium Energy Ratio [%]	50
Lastpausendauer [s]	1.000
Anzahl Lastpausen [-]	1
Oberspannung [MPa]	0,035
Spannungsamplitude [MPa]	0,300

Tab. 51: Geräte- und Prüfparameter für Healing-Prüfungen an AC 11 D S mittels Spaltzug-Schwellprüfung

Lastpause und drei Healing-Versuche an Asphaltbeton AC 11 D S mit Straßenbaubitumen 50/70 durchgeführt sowie (sofern möglich) die Healing-Indices Hi1 bis Hi5 bestimmt. Die wesentlichen Geräte- bzw. Prüfparameter sind in Tabelle 51 zusammengefasst.

Bild 141 zeigt den Verlauf des relativen E-Moduls über die relative Energy Ratio, aus welchem das Lastpausenkriterium (relativer E-Modul bei 50 % Energy Ratio) abgeleitet wurde. Deutlich ersichtlich ist die starke Streuung der Datenpunkte, welche eine präzise Angabe des relativen E-Moduls bei 50 % Energy Ratio erschwert.

Bild 142 zeigt beispielhaft den Verlauf des E-Moduls und der Energy Ratio für einen Healing-

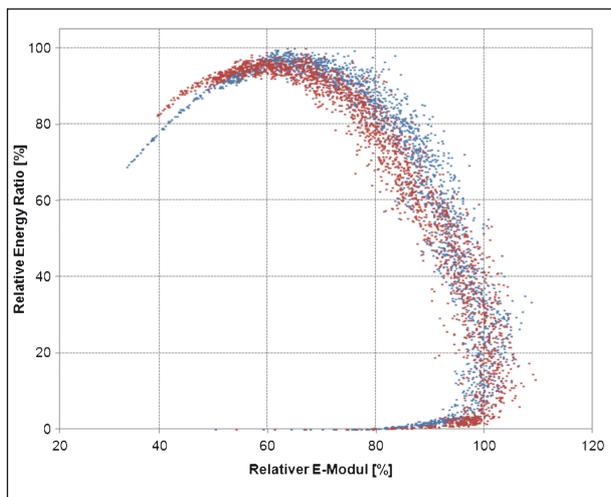


Bild 141: Relativer Verlauf von E-Modul und Energy Ratio bei der Spaltzug-Schwellprüfung (AC 11 D S; 20 °C; LP = 1.000 s; $\sigma = 0,300$ MPa)

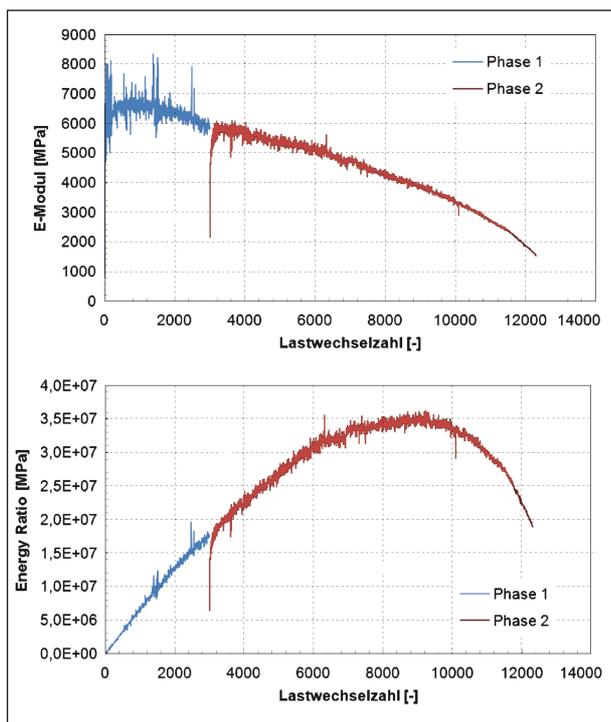


Bild 142: Verlauf des E-Moduls (oben) und der Energy Ratio (unten) bei Spaltzug-Schwellprüfungen (Versuchstyp 3) bei einer Prüftemperatur von 20 °C (AC 11 D S; LP = 1.000 s; $\sigma = 0,300$ MPa)

Versuch in der Spaltzug-Schwellprüfung. Es ist, mit zunehmender Lastwechselzahl ein Abfall des E-Moduls bzw. eine Zunahme der Energy Ratio zu beobachten.

Auffällig sind die Schwankungen im Verlauf des E-Moduls mit teilweise enormen Differenzen zwischen benachbarten Lastwechseln. Diese Schwankungen resultieren aus der unvorteilhaften Prüfgeometrie, welche einen großen Einfluss auf die Präzision der aufnehmbaren Horizontalverformung hat. Weiterhin fällt auf, dass das Materialverhalten sowohl bei Beginn der ersten als auch bei Beginn der zweiten Belastungsphase (Zunahme des E-Moduls) dem Materialverhalten bei Zug-Schwellprüfung ähnelt (vgl. Bild 132).

Für die durchgeführten Spaltzug-Schwellversuche wurden die Healing-Indices Hi1 und Hi3 bis Hi5 ermittelt (siehe Tabelle 52). Eine Ermittlung von Hi2 konnte aufgrund der großen Schwankungen der Messwerte nicht erfolgen.

5.2.6 Healing-Verhalten in der Vier-Punkt-Biegeprüfung

Das entwickelte Versuchsprogramm zur Untersuchung des Healing-Verhaltens in der Zug-Druck-Wechselastprüfung wurde auf die Vier-Punkt-Biegeprüfung übertragen (siehe auch Kapitel 6). Es wurden jeweils drei Ermüdungsversuche ohne Lastpause und drei Healing-Versuche durchgeführt sowie die Healing-Indices Hi1 bis Hi5 bestimmt. Der Wechsel auf die weggeregelter Vier-Punkt-Biege-

Prüftemperatur [°C]	20
Prüffrequenz [Hz]	10
Probekörpergeometrie	Prisma
Probekörperabmessung [mm]	50 x 50 x 460
Lastpausenkriterium Energy Ratio [%]	50
Lastpausendauer [s]	1.000
Anzahl Lastpausen [-]	1
Dehnungsamplitude [$\mu\text{m}/\text{m}$]	350

Tab. 53: Geräte- und Prüfparameter für Healing-Prüfungen an AC 11 D S mittels Vier-Punkt-Biegeprüfung

Lastpausen-kriterium ER [%]	N_{Makro} (ohne LP) [-]	N_{Makro} (mit LP) [-]	E_{ER50} [%]	Hi1 [%]	Hi2 [%]	Hi3 [%]	Hi4 [%]	Hi5 [%]
50	8.555	12.431	93,69	45,33	-	5,21	74,59	11,91

Tab. 52: Healing-Indices in der Spaltzug-Schwellprüfung an Asphaltbeton AC 11 D S bei einer Prüftemperatur von 20 °C (Lastpausendauer 1.000 s)

prüfung erforderte zusätzlich die Ermittlung einer geeigneten Dehnungsamplitude, die eine Ermüdung des Probekörpers mit einer Lastwechselzahl < 60.000 sicherstellt. Die wesentlichen Geräte- bzw. Prüfparameter sind in Tabelle 53 zusammengefasst.

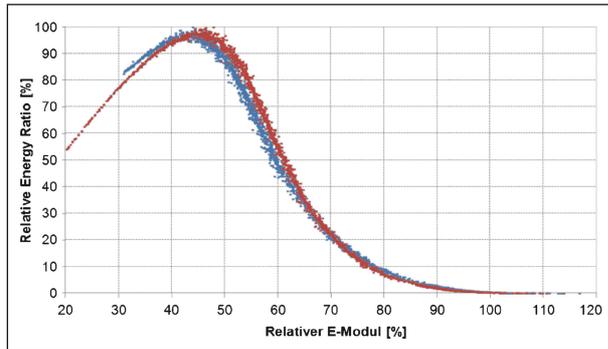


Bild 143: Relativer Verlauf des E-Moduls und der Energy Ratio bei der Vier-Punkt-Biegeprüfung (AC 11 D S; 20 °C; LP = 1.000 s; $\epsilon = 0,350 \mu\text{m/m}$)

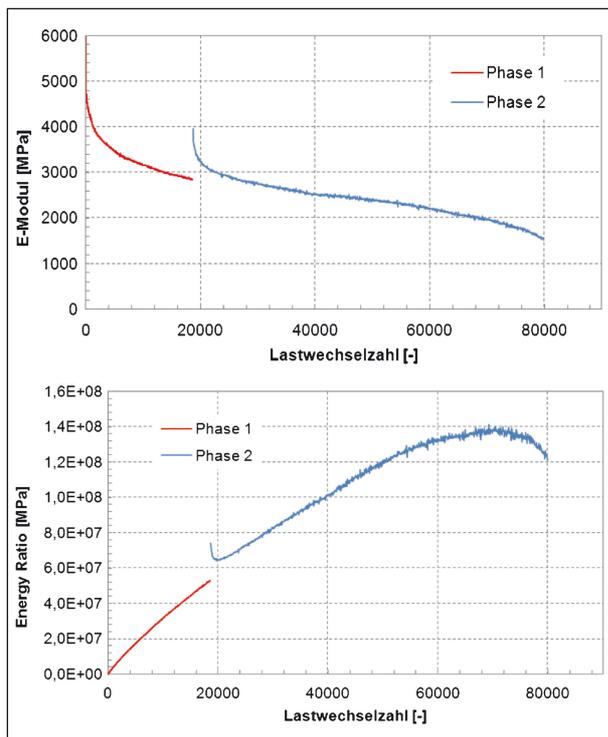


Bild 144: Verlauf des E-Moduls (oben) und der Energy Ratio (unten) bei Vier-Punkt-Biegeprüfung (Versuchstyp 3) bei einer Prüftemperatur von 20 °C (AC 11 D S; LP = 1.000 s; $\epsilon = 0,350 \mu\text{m/m}$)

Bild 143 zeigt den Verlauf des relativen E-Moduls über die relative Energy Ratio, aus welchem das Lastpausenkriterium (relativer E-Modul bei 50 % Energy Ratio) abgeleitet wurde.

Bild 144 zeigt beispielhaft den Verlauf des E-Moduls und der Energy Ratio für einen Healing-Versuch in der Vier-Punkt-Biegeprüfung. Es ist mit zunehmender Lastwechselzahl ein Abfall des E-Moduls bzw. eine Zunahme der Energy Ratio zu beobachten.

Für die durchgeführten Vier-Punkt-Biegeprüfungen wurden die Healing-Indices Hi1 bis Hi5 ermittelt (siehe Tabelle 54).

6 Bewertung der Prüfergebnisse

Anhand der im Rahmen dieses Projekts erhaltenen Prüfergebnisse können nachfolgende Bewertungen bzw. Schlussfolgerungen vorgenommen werden.

6.1 Eignung der Prüfverfahren

6.1.1 Ansprache der Healing-Eigenschaften von Bitumen

Die zyklisch-dynamische Ermüdungsprüfung mittels Dynamischem Scherrheometer (DSR) ist zur Ansprache der Healing-Eigenschaften von Bitumen geeignet.

Die scherspannungsgeregelte (kraftgeregelte) Ermüdungsprüfung ist vorteilhaft gegenüber der deformationsgeregelten (weggeregelten) Ermüdungsprüfung.

An Straßenbaubitumen 50/70 wurde bei einer Prüftemperatur von 20 °C ein Ermüdungsbruch im Bitumen erkannt, bei 40 °C ist keine eindeutige Materialschädigung erkennbar. Bild 145 zeigt beispielhaft den Verlauf des komplexen Schermoduls und der Energy Ratio für Straßenbaubitumen 70/100 im frischen und im gealterten Zustand bei Prüfung

Lastpausen-kriterium ER [%]	N_{Makro} (ohne LP) [-]	N_{Makro} (mit LP) [-]	E_{ER50} [%]	Hi1 [%]	Hi2 [%]	Hi3 [%]	Hi4 [%]	Hi5 [%]
50	55.001	66.151	60,49	20,28	39,32	38,87	107,67	43,21

Tab. 54: Healing-Indices in der Vier-Punkt-Biegeprüfung an Asphaltbeton AC 11 D S bei einer Prüftemperatur von 20 °C (Lastpausendauer 1.000 s)

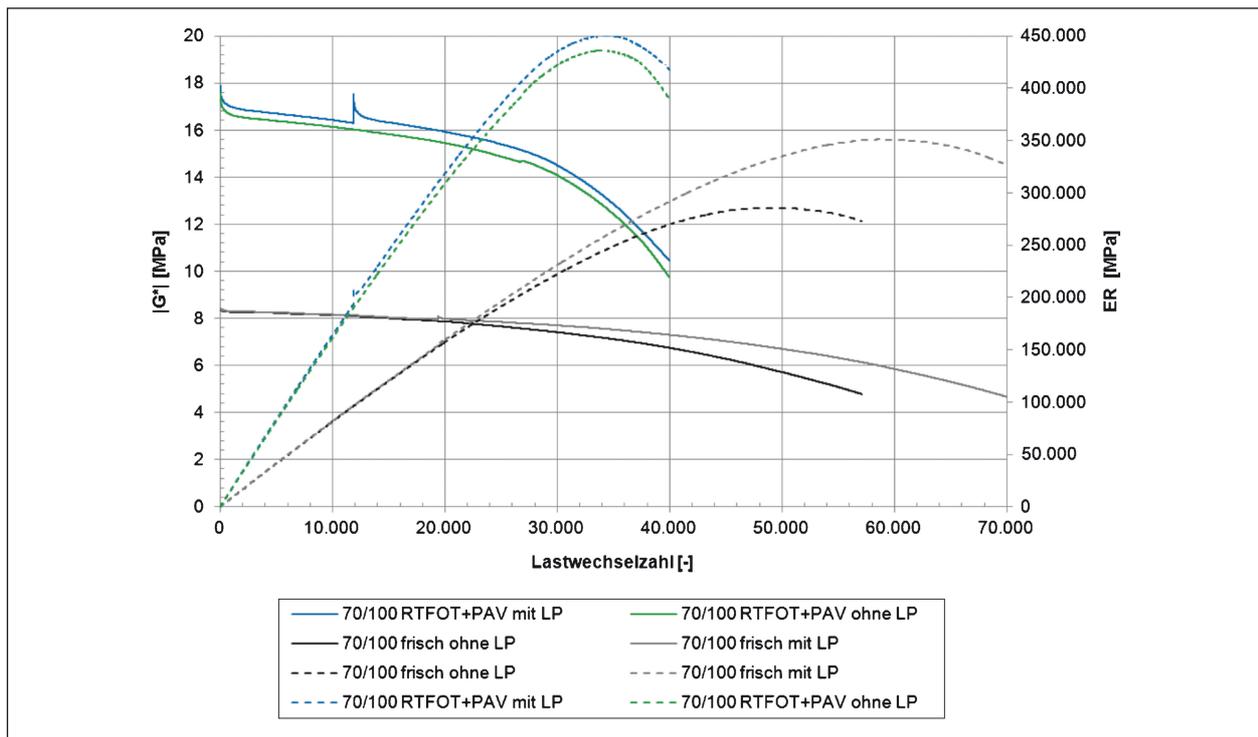


Bild 145: Verlauf des komplexen Schermoduls $|G^*|$ und der Energy Ratio ER für Straßenbaubitumen 70/100 im frischen und gealterten (gestrichelt) Zustand

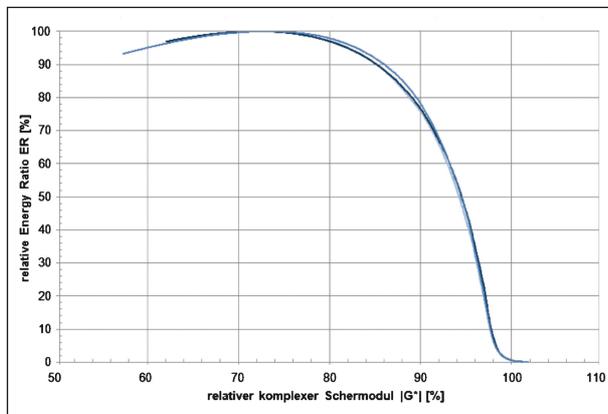


Bild 146: Verlauf der relativen Energy Ratio als Funktion des relativem komplexen Schermoduls $|G^*|$ bei kontinuierlicher Ermüdungsprüfung mittels DSR für Straßenbaubitumen 50/70 bei einer Prüftemperatur von 20 °C

ohne Lastpause und mit einer Lastpause von 600 s Dauer. Bild 146 zeigt den Verlauf des relativen komplexen Schermoduls über die relative Energy Ratio bei kontinuierlicher Ermüdungsprüfung mittels DSR.

Es zeigt sich, dass alle Kenngrößen für die Ermittlung der Healing-Indices Hi1 bis Hi5 sicher bestimmt werden können.

Statische Prüfverfahren sind zur Ansprache der Healing-Eigenschaften von Bitumen kaum geeig-

net, da sämtliche Kenngrößen zur Beschreibung von Healing-Eigenschaften eng mit einer Ermüdung des Materials verknüpft sind. Eine gezielte Materialermüdung erfordert die Anwendung dynamischer Prüfgeräte.

Der statische Zugversuch ist aufgrund des temperaturabhängigen viskosen Materialverhaltens von Bitumen nur bei tiefen Temperaturen einsetzbar. Materialversagen tritt als spontaner Sprödbbruch über den gesamten Probekörperquerschnitt ein und eine Selbstheilung kann nicht festgestellt werden. Die Prüfung erfolgt unter isothermen Bedingungen im Flüssigkeitsbad (Ethanol). Nachteilig ist, dass die Temperierflüssigkeit über Hohlräume (Risse) in den Probekörper eindringen kann. Außerdem gestaltet sich die Probenherstellung aufwändig und fehleranfällig.

Der statische Multiple Stress Creep and Recovery Test (MSCR-Test) eignet sich nicht für Healing-Prüfungen. Der Grad der Schädigung der Probe ist anhand der variierten Parameter nicht eindeutig definierbar.

Chromatografische und Spektroskopische Analysen können im Anschluss an die Ansprache der Healing-Eigenschaften von Bitumen informativ sein.

6.1.2 Ansprache der Healing-Eigenschaften von Asphalt

Die zyklisch-dynamische Ermüdungsprüfung ist zur Ansprache der Healing-Eigenschaften von Asphalt geeignet. Im Rahmen dieses Projekts wurden Zug-Schwellprüfungen (kraftgeregelt), Zug-Druck-Wechselastprüfungen (weg- bzw. kraftgeregelt), Spaltzug-Schwellprüfungen (kraftgeregelt) und Vier-Punkt-Biegeprüfungen (weggeregelt) erprobt.

Materialheilung ist eine Rückbildung von eingepprägten Ermüdungsrissen (siehe Kapitel 2.1). Das Ermüdungs- und Healing-Verhalten bei kontinuierlicher Belastung kann anhand der Veränderung der Steifigkeit und der dissipierten Energie bzw. der Energy Ratio beobachtet werden. Die Steifigkeit von Asphalt wird durch den Verlauf des Absolutwertes des komplexen dynamischen Steifigkeitsmoduls $|E^*|$ (auch „absoluter E-Modul“ oder „Steifigkeitsmodul“) als Funktion von der Versuchszeit oder der Lastimpulszahl beschrieben und ergibt sich als Quotient aus initiiertter Spannung und resultierender Verformung. Als dissipierte Energie werden jene energetischen Anteile zusammengefasst, die bei Belastung des Probekörpers nicht zu dessen äußerer Gestaltänderung verwendet werden, sondern in andere Energieformen (z. B. Wärmeenergie) umgewandelt (dissipiert) werden. Die Energy Ratio (ER) ist der Quotient aus den dissipierten Energien zu Versuchsbeginn und zum n-ten Lastwechsel, multipliziert mit der Lastwechselzahl n.

Die Auswertung von zyklisch-dynamischen Ermüdungsprüfungen mittels Lissajous-Figuren ist sehr aufschlussreich. Das Ermüdungs- und Healing-Verhalten bei kontinuierlicher Belastung kann anhand der Verdrehung der Lissajous-Figur (= Materialveränderung infolge von Ermüdung bzw. Healing) und anhand der Veränderung der eingeschlossenen Fläche der Lissajous-Figur (= dissipierte Energie) analysiert werden.

Nachfolgend sind beispielhaft kraftgeregelt Zug-Schwellprüfungen und kraftgeregelt Zug-Druck-Wechselastprüfungen vergleichend für die Prüftemperaturen $T = 20\text{ °C}$ und $T = 0\text{ °C}$ ausgewertet (siehe Bild 147 bis Bild 154). Die Belastungsgrößen sind dabei für beide Prüfverfahren so eingestellt, dass ein Erreichen des Ermüdungskriteriums bei gleicher Temperatur (20 °C und 0 °C) bei annähernd gleicher Lastwechselzahl erreicht wird.

Dargestellt sind jeweils der Verlauf des E-Moduls und der Energy Ratio, sowie die Lissajous-Figuren jeweils am Anfang der Belastungsphase (100. Lastwechsel), bei ca. 1.000 und ca. 10.000 Lastwechseln sowie bei Erreichen des Ermüdungskriteriums (N_{Makro}).

In Tabelle 55 sind die resultierenden Werte der dissipierten Energie zusammenfassend gegenübergestellt.

Kraftgeregelt Zug-Druck-Wechselastprüfungen resultieren im Vergleich zu Zug-Schwellprüfungen sowohl in einer stärkeren Verdrehung der Lissajous-Figur (größerer Phasenwinkel) als auch in einer größeren eingeschlossenen Fläche (größere dissipierte Energie). Während die elastische Dehnung bei der Zug-Druck-Wechselastprüfung über die Versuchsdauer zunimmt, bleibt sie bei der Zug-Schwellprüfung näherungsweise konstant (Bild 155).

Ermüdung und dissipierte Energie sind somit bei Zug-Druck-Wechselastprüfungen stärker ausgeprägt, sowohl bei einer Prüftemperatur von $T = 0\text{ °C}$ als auch bei $T = 20\text{ °C}$. Folglich sind auch Healing-Effekte eindeutiger zu identifizieren.

Um das Ermüdungsverhalten bei weggeregelter Zug-Druck-Wechselastprüfung beurteilen zu können, wurde an den in Bild 154 markierten Lastwechselzahlen jeweils der Phasenwinkel und die dissipierte Energie ermittelt (siehe Tabelle 56).

Um das Ermüdungsverhalten bei Spaltzug-Schwellprüfung beurteilen zu können, wurde an den in Bild 161 markierten Lastwechseln (100; 1.000; 5.000; N_{Makro}) jeweils der Phasenwinkel und die dissipierte Energie ermittelt (siehe Tabelle 57).

Um das Ermüdungsverhalten bei Vier-Punkt-Biegeprüfung beurteilen zu können, wurde an den in Bild 160 markierten Lastwechseln (100; 10.001; 35.001; N_{Makro}) jeweils der Phasenwinkel und die dissipierte Energie ermittelt (siehe Tabelle 58).

Anhand der Änderung der dissipierten Energie wird infolge eine Reihung aller untersuchten Prüfverfahren bezüglich deren Eignung zur Ansprache von Materialermüdung vorgenommen (siehe Bild 162). Es zeigt sich deutlich, dass die größte prozentuale Änderung der dissipierten Energie infolge Ermüdung mittels kraftgeregelter Zug-Druck-Wechselastprüfung erfolgt. Die Änderung der dissipierten Energie bei kraftgeregelter Zug-Schwellprüfung ist

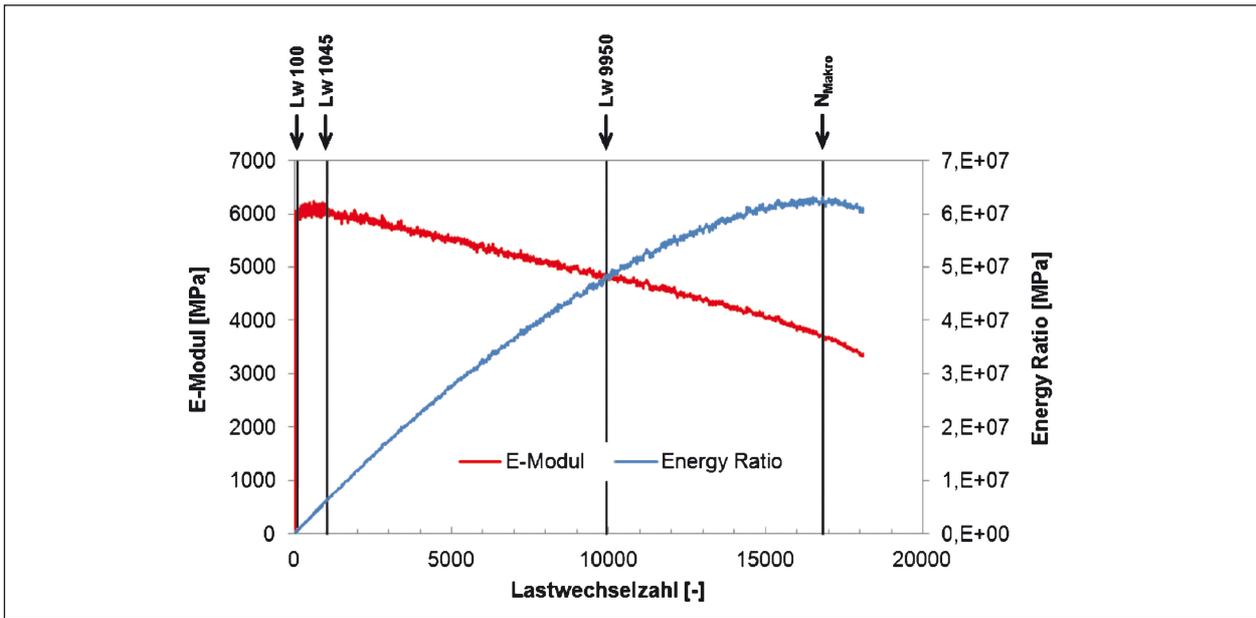


Bild 147: Zug-Schwellprüfung an Asphaltbeton AC 11 D S (T = 20 °C): Verlauf des E-Moduls und der Energy Ratio (für markierte Lastwechselzahlen wurden dissipierte Energie und Phasenwinkel bestimmt)

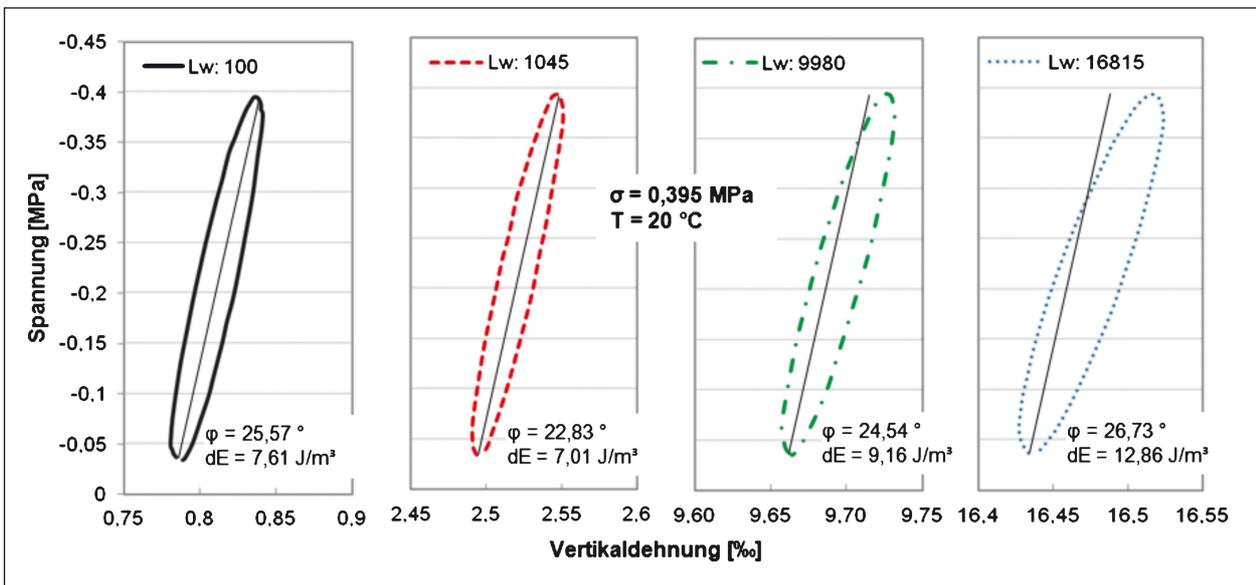


Bild 148: Zug-Schwellprüfung an Asphaltbeton AC 11 D S (T = 20 °C): Lissajous-Figuren am Anfang der Belastungsphase (100. Lastwechsel) und bei zunehmenden Lastwechselzahlen (ca. 1.000 LW und ca. 10.000 LW) bis zum Erreichen des Ermüdungskriteriums (N_{Makro})

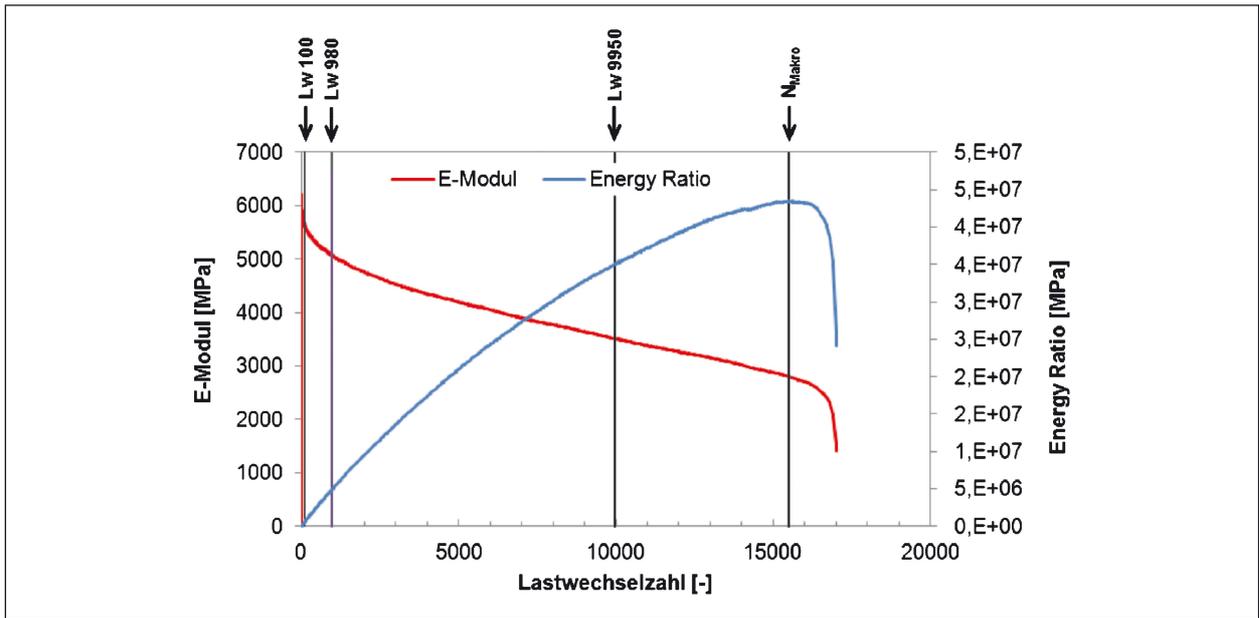


Bild 149: Kraftgeregelte Zug-Druck-Wechselastprüfung an Asphaltbeton AC 11 D S (T = 20 °C): Verlauf des E-Moduls und der Energy Ratio (für markierte Lastwechselzahlen wurden dissipierte Energie und Phasenwinkel bestimmt)

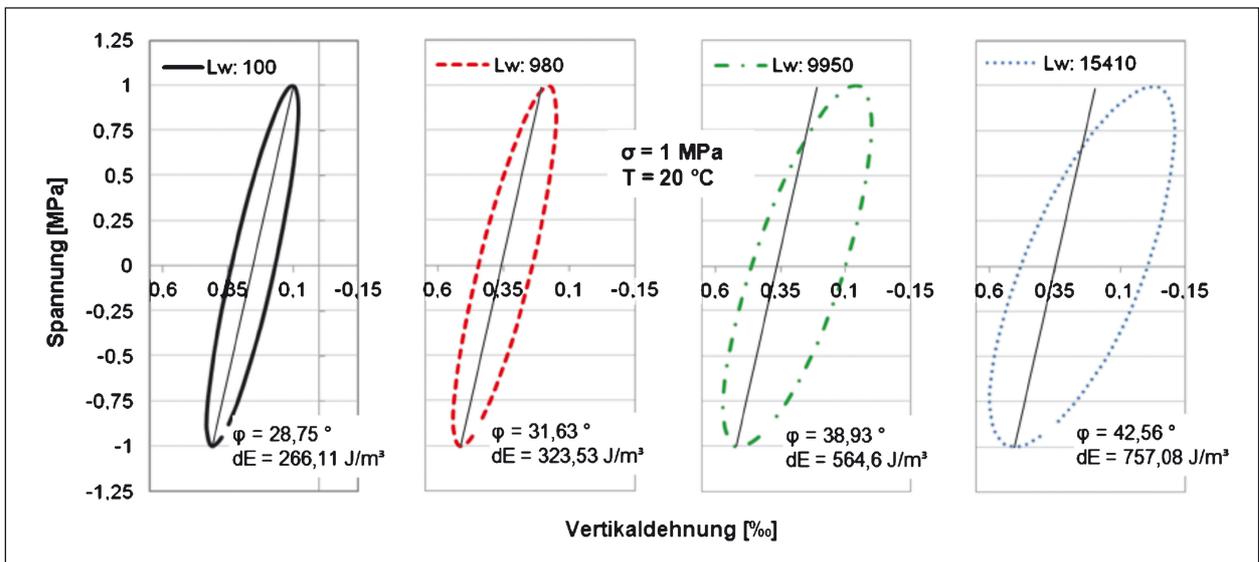


Bild 150: Kraftgeregelte Zug-Druck-Wechselastprüfung an Asphaltbeton AC 11 D S (T = 20 °C): Lissajous-Figuren am Anfang der Belastungsphase (100. Lastwechsel) und bei zunehmenden Lastwechselzahlen (ca. 1.000 LW und ca. 10.000 LW) bis zum Erreichen des Ermüdungskriteriums (N_{Makro})

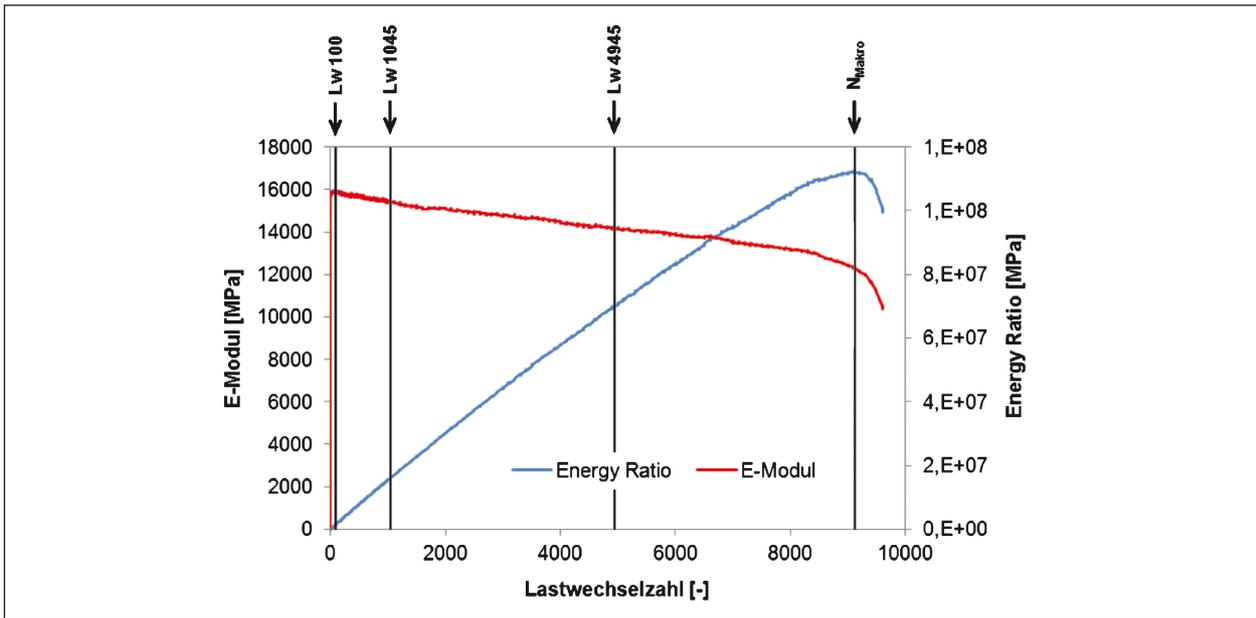


Bild 151: Zug-Schwellprüfung an Asphaltbeton AC 11 D S ($T = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$): Verlauf des E-Moduls und der Energy Ratio (für markierte Lastwechselzahlen wurden dissipierte Energie und Phasenwinkel bestimmt)

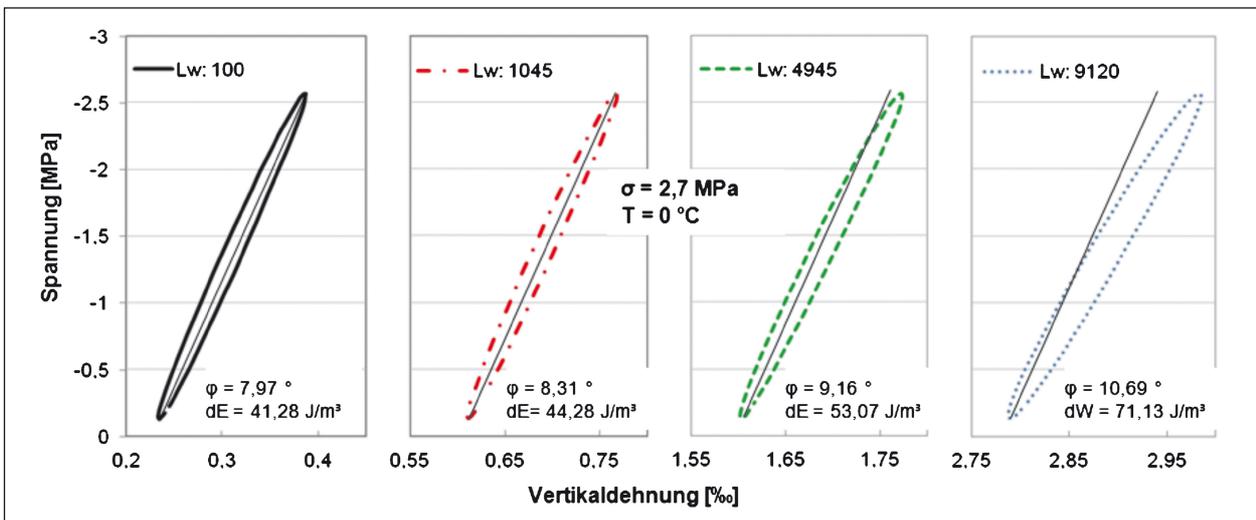


Bild 152: Zug-Schwellprüfung an Asphaltbeton AC 11 D S ($T = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$): Lissajous-Figuren am Anfang der Belastungsphase (100. Lastwechsel) und bei zunehmenden Lastwechselzahlen (ca. 1.000 LW und ca. 10.000 LW) bis zum Erreichen des Ermüdungskriteriums (N_{Makro})

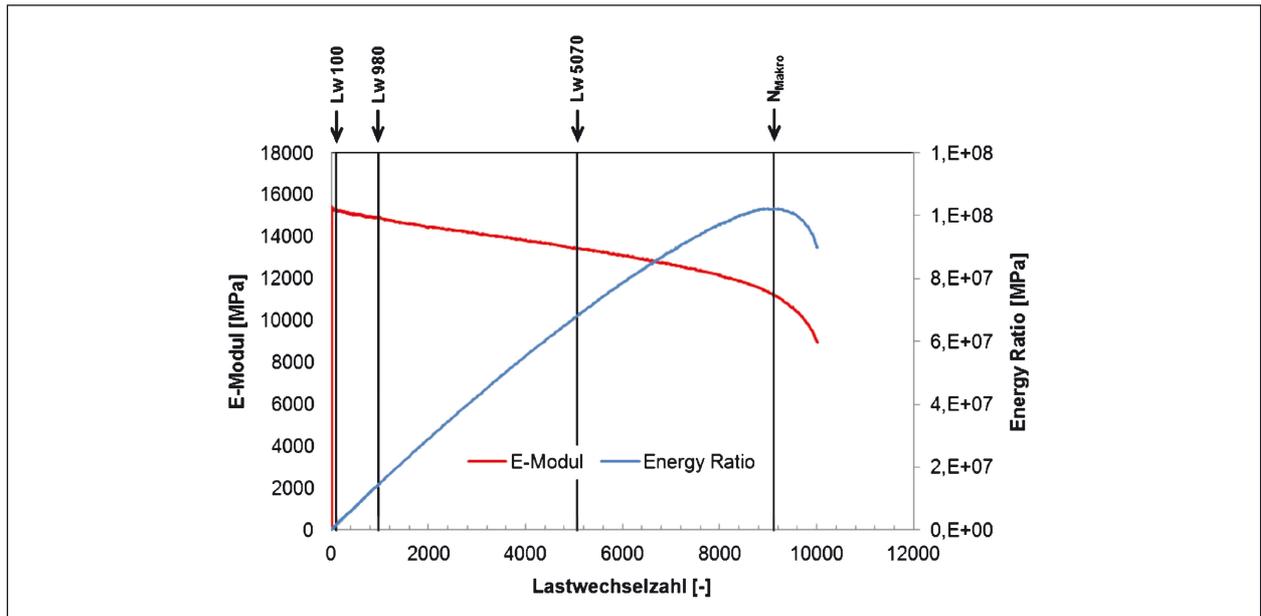


Bild 153: Kraftgeregelte Zug-Druck-Wechselastprüfung an Asphaltbeton AC 11 D S ($T = 0 \text{ }^\circ\text{C}$): Verlauf des E-Moduls und der Energy Ratio (für markierte Lastwechselzahlen wurden dissipierte Energie und Phasenwinkel bestimmt)

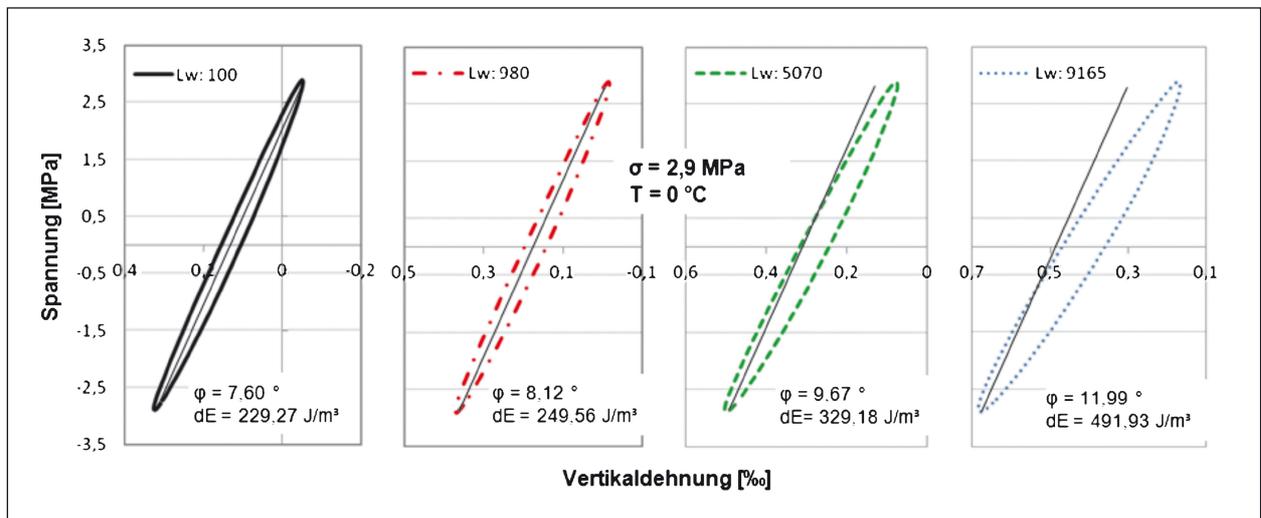


Bild 154: Kraftgeregelte Zug-Druck-Wechselastprüfung an Asphaltbeton AC 11 D S ($T = 0 \text{ }^\circ\text{C}$): Lissajous-Figuren am Anfang der Belastungsphase (100. Lastwechsel) und bei zunehmenden Lastwechselzahlen (ca. 1.000 LW und ca. 10.000 LW) bis zum Erreichen des Ermüdungskriteriums (N_{Makro})

Zug-Druck-Wechselastprüfung			Zug-Schwellprüfung		
20 °C					
Lastwechselzahl [-]	Phasenwinkel [°]	Dissipierte Energie [J/m³]	Lastwechselzahl [-]	Phasenwinkel [°]	Dissipierte Energie [J/m³]
100	28,75	266,11	100	25,57	7,61
980	31,63	323,53	1.045	22,83	7,01
9.950	38,93	564,60	9.980	24,54	9,16
N _{Makro}	42,56	757,08	N _{Makro}	26,73	12,86
Änderung von LW₁₀₀ bis N_{Makro} [%]	48,05	184,50	Änderung von LW₁₀₀ bis N_{Makro} [%]	4,53	68,95
0 °C					
Lastwechselzahl [-]	Phasenwinkel [°]	Dissipierte Energie [J/m³]	Lastwechselzahl [-]	Phasenwinkel [°]	Dissipierte Energie [J/m³]
100	7,60	229,27	100	7,97	41,28
980	8,12	249,56	1.045	8,31	44,28
5.070	9,67	329,18	4.945	9,16	53,07
N _{Makro}	11,99	491,93	N _{Makro}	10,69	71,13
Änderung von LW₁₀₀ bis N_{Makro} [%]	57,75	114,56	Änderung von LW₁₀₀ bis N_{Makro} [%]	34,18	72,32

Tab. 55: Werte der dissipierten Energie aus kraftgeregelten Zug-Druck-Wechselast- und Zug-Schwellprüfungen an Asphaltbeton AC 11 D S bei Prüftemperaturen von 20 °C und 0 °C

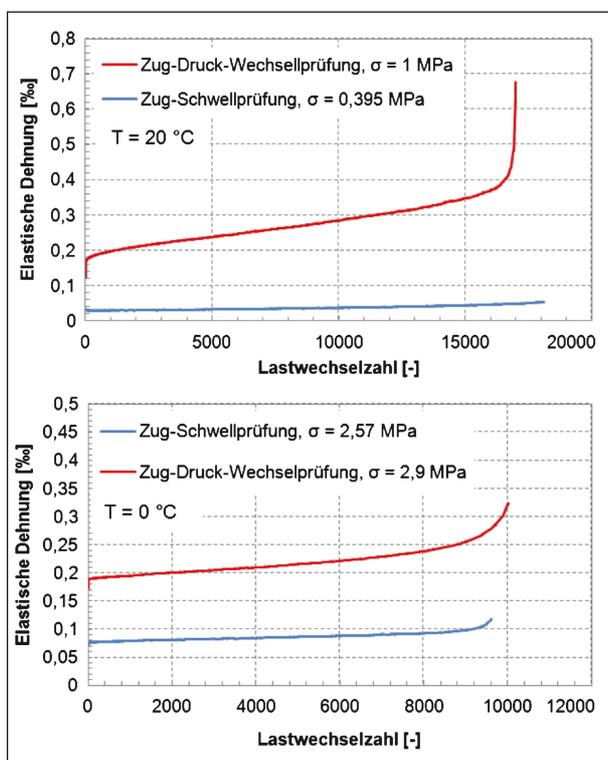


Bild 155: Verlauf der elastischen Dehnung bei Zug-Schwell- und Zug-Druck-Wechselastprüfung bei den Prüftemperaturen 20 °C (oben) und 0 °C (unten)

um ca. 60 % höher als bei der Spaltzug-Schwellprüfung. Die Spaltzugschwellprüfung ist anhand dieser Ergebnisse als diejenige Prüfung mit der ungünstigsten Ansprache von Materialermüdung einzustufen.

Eine vergleichende Betrachtung der Änderung der dissipierten Energie kann nur bei gleicher Belastungsart erfolgen. Somit können die weggeregelten Prüfverfahren (Vier-xPunkt-Biegeprüfung und Zug-Druck-Wechselastprüfung) nur zueinander und nicht mit den kraftgeregelten Prüfverfahren verglichen werden. Hierbei zeigt sich eine geringfügig größere Änderung der dissipierten Energie bei der Ermüdung mittels weggeregelter Vier-Punkt-Biegeprüfung.

Bei kraftgeregelter Ermüdungsprüfung resultiert die Änderung der dissipierten Energie aus der Zunahme der elastischen Dehnung mit fortschreitender Lastwechselzahl bei gleichbleibender Spannungsamplitude. Es muss daher eine Zunahme der dissipierten Energie erfolgen. Die Prüfverfahren kraftgeregelte Zug-Schwellprüfung und Spaltzug-Schwellprüfung zeigen nur eine geringe Zunahme der elastischen Dehnung, jedoch eine deutlich größere plastische Verformung als bei Zug-Druck-Wechsel-

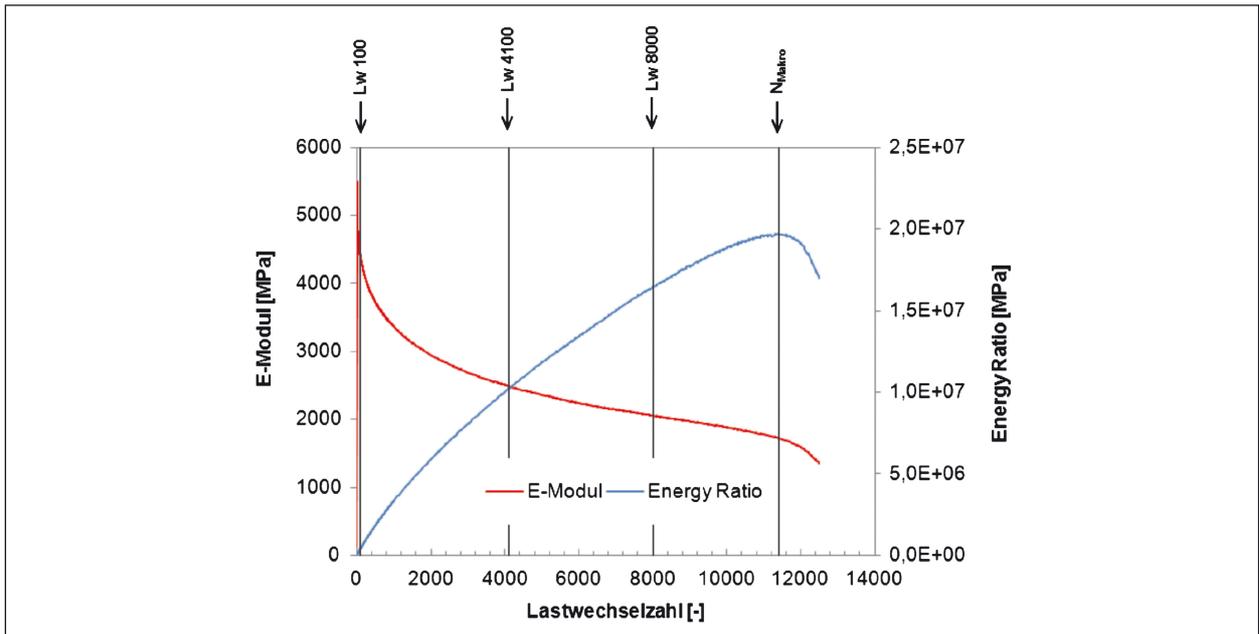


Bild 156: Weggeregelte Zug-Druck-Wechselastprüfung an Asphaltbeton AC 11 D S (T = 20 °C): Verlauf des E-Moduls und der Energy Ratio (für markierte Lastwechselzahlen wurden dissipierte Energie und Phasenwinkel bestimmt)

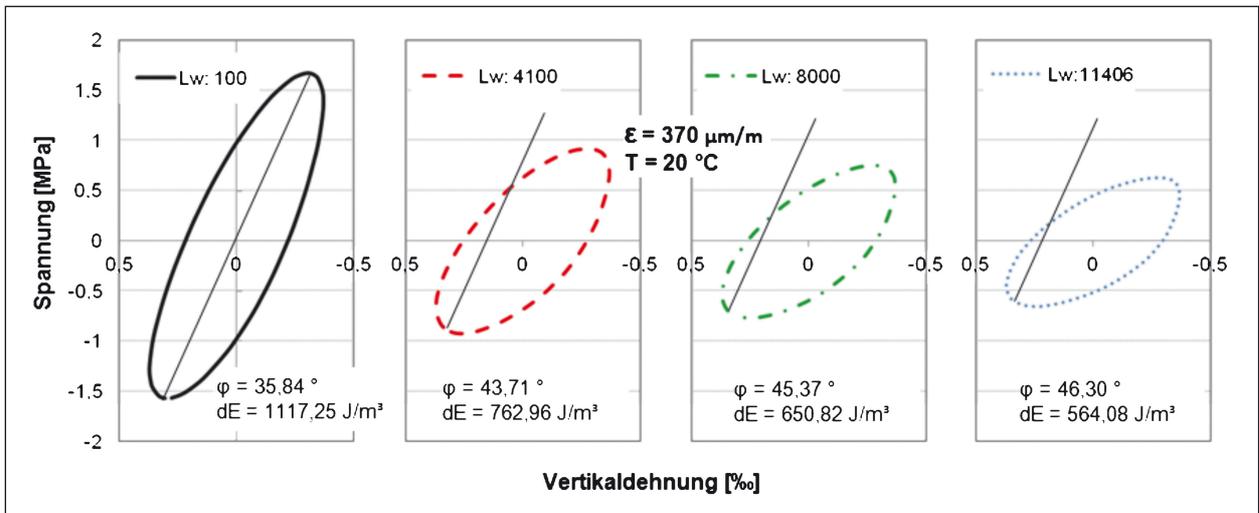


Bild 157: Weggeregelte Zug-Druck-Wechselastprüfung an Asphaltbeton AC 11 D S (T = 20 °C): Lissajous-Figuren am Anfang der Belastungsphase (100. Lastwechsel) und bei zunehmenden Lastwechselzahlen (ca. 4.100 LW und ca. 8.000 LW) bis zum Erreichen des Ermüdungskriteriums (N_{Makro})

Lastwechselzahl [-]	Phasenwinkel [°]	Dissipierte Energie [J/m³]
100	35,84	1.117,25
4.100	43,71	726,96
8.000	45,37	650,82
N_{Makro}	46,30	564,08
Änderung von Lw_{100} bis N_{Makro} [%]	28,98	-49,51

Tab. 56: Werte der dissipierten Energie aus weggeregelten Zug-Druck-Wechselast-prüfungen an Asphaltbeton AC 11 D S bei einer Prüftemperatur von T = 20 °C

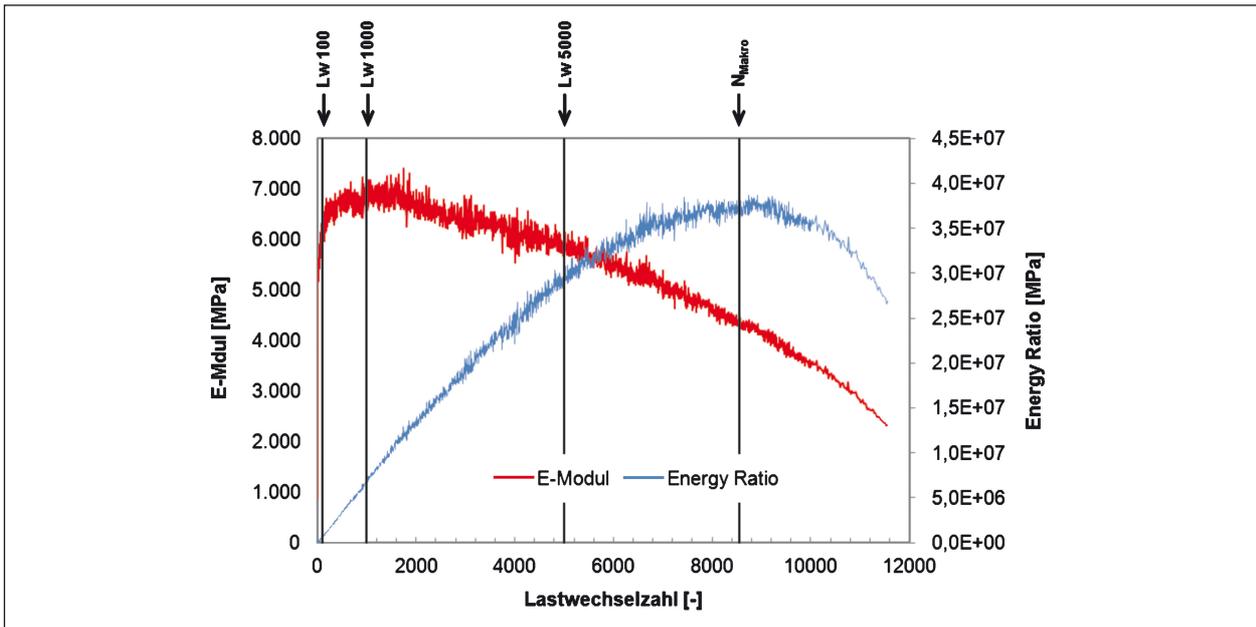


Bild 158: Spaltzug-Schwellprüfung an Asphaltbeton AC 11 D S (T = 20 °C): Verlauf des E-Moduls und der Energy Ratio (für markierte Lastwechselzahlen wurden dissipierte Energie und Phasenwinkel bestimmt)

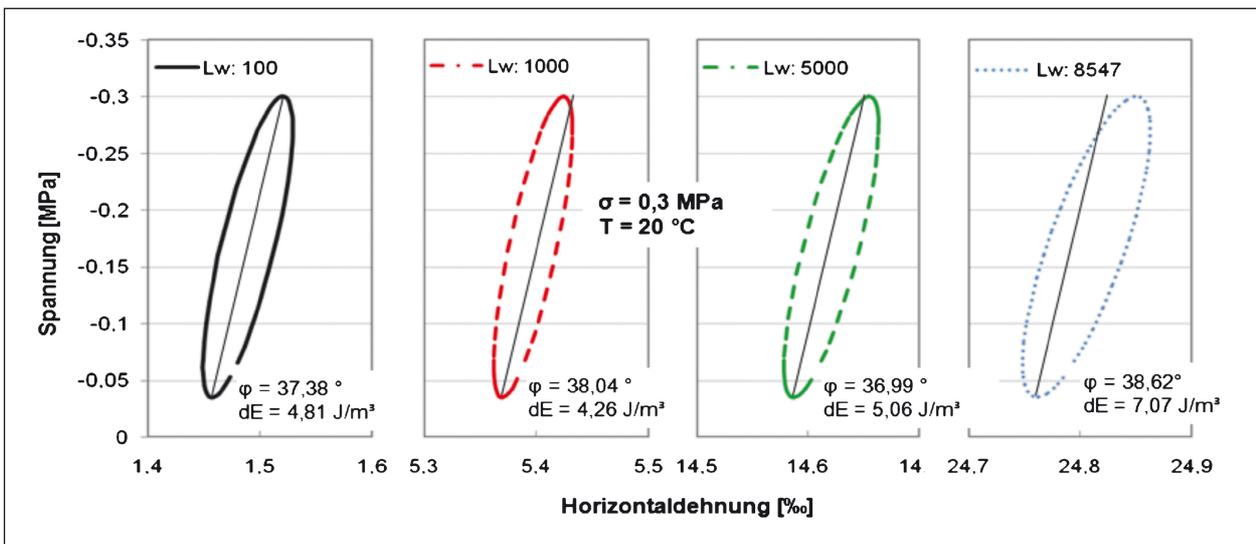


Bild 159: Kraftgeregelte Spaltzug-Schwellprüfung an Asphaltbeton AC 11 D S (T = 20 °C): Lissajous-Figuren am Anfang der Belastungsphase (100. Lastwechsel) und bei zunehmenden Lastwechselzahlen (ca. 1.000 LW und ca. 5.000 LW) bis zum Erreichen des Ermüdungskriteriums (N_{Makro})

Lastwechselzahl [-]	Phasenwinkel [°]	Dissipierte Energie [J/m³]
100	37,38	4,81
1.000	38,04	4,26
5.000	36,99	5,06
N_{Makro}	38,62	7,07
Änderung von Lw_{100} bis N_{Makro} [%]	3,32	47,08

Tab. 57: Werte der dissipierten Energie aus Spaltzug-Schwellprüfungen an Asphaltbeton AC 11 D S bei einer Prüftemperatur von T = 20 °C

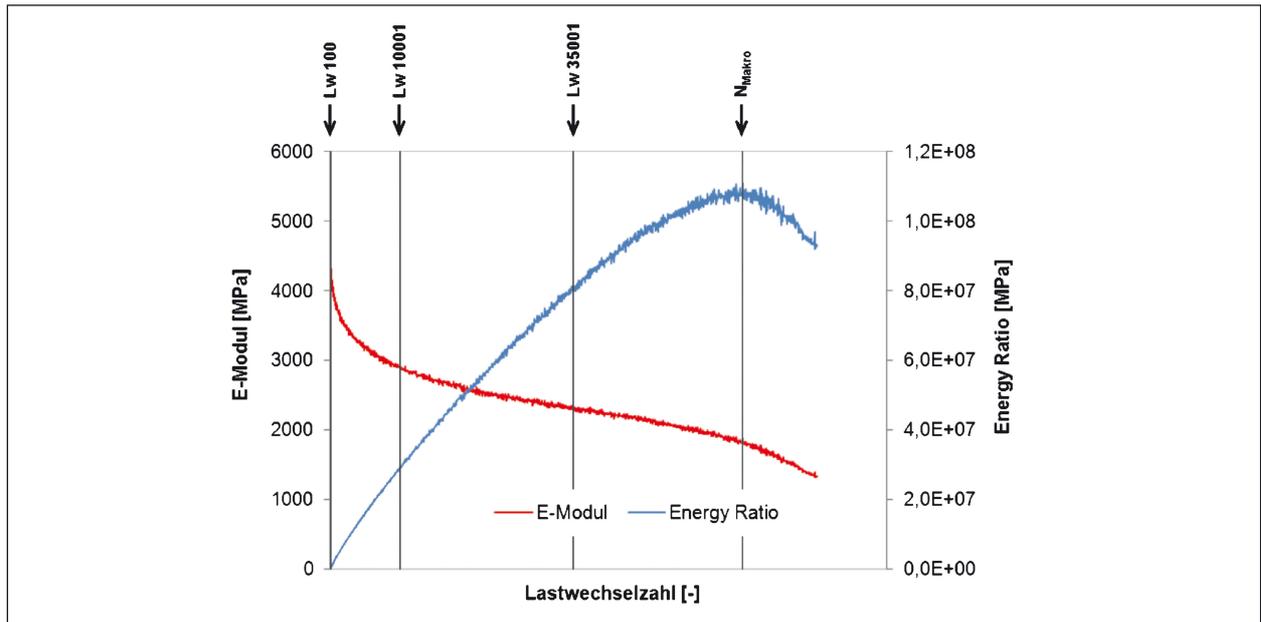


Bild 160: Vier-Punkt-Biegeprüfung an Asphaltbeton AC 11 D S ($T = 20 \text{ °C}$): Verlauf des E-Moduls und der Energy Ratio (für markierte Lastwechselzahlen wurden dissipierte Energie und Phasenwinkel bestimmt)

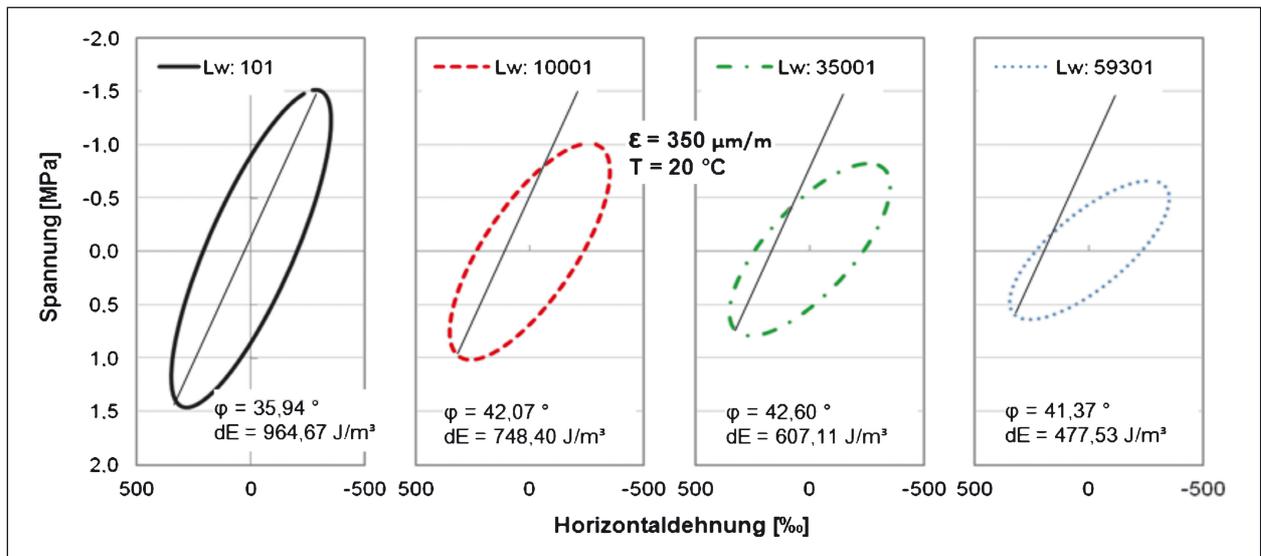


Bild 161: Weggeregelte Vier-Punkt-Biegeprüfung an Asphaltbeton AC 11 D S ($T = 20 \text{ °C}$): Lissajous-Figuren am Anfang der Belastungsphase (100. Lastwechsel) und bei zunehmenden Lastwechselzahlen (ca. 1.000 LW und ca. 3.500 LW) bis zum Erreichen des Ermüdungskriteriums (N_{Makro})

lastprüfung. Bei beiden Prüfverfahren ist die Materialermüdung untergeordnet, da das Bruchversagen des Probekörpers zum überwiegenden Teil eine Folge von überlagerten plastischen Deformationen ist, während die Materialermüdung eine vergleichsweise zu vernachlässigende Bedeutung hat (vgl. auch Di BENEDETTO et al., 2004; Di BENEDETTO, 2013). Daher können sich Heilungseffekte bei beiden Prüfverfahren weniger ausprägen und sind zur Ansprache von Healing-Eigenschaften wenig geeignet.

Bei weggeregelter Ermüdungsprüfung resultiert die Änderung der dissipierten Energie aus der Abnahme der Steifigkeit bei fortschreitender Lastwechselzahl, bei gleichbleibender Dehnungsamplitude. Es muss daher eine Abnahme der dissipierten Energie erfolgen.

Zusammenfassend kann nach der Analyse der Eignung sämtlicher Prüfverfahren zur Ansprache des Ermüdungsverhaltens von Asphalt die kraftgeregelte Zug-Druck-Wechselastprüfung als das am bes-

Lastwechselzahl [-]	Phasenwinkel [°]	Dissipierte Energie [J/m ³]
101	35,94	964,67
10.001	42,07	748,40
35.001	42,60	540,88
N_{Makro}	41,37	477,53
Änderung von Lw_{100} bis N_{Makro} [%]	15,10	-50,50

Tab. 58: Werte der dissipierten Energie aus Vier-Punkt-Biegeprüfung an Asphaltbeton AC 11 D S bei einer Prüftemperatur von $T = 20 \text{ °C}$

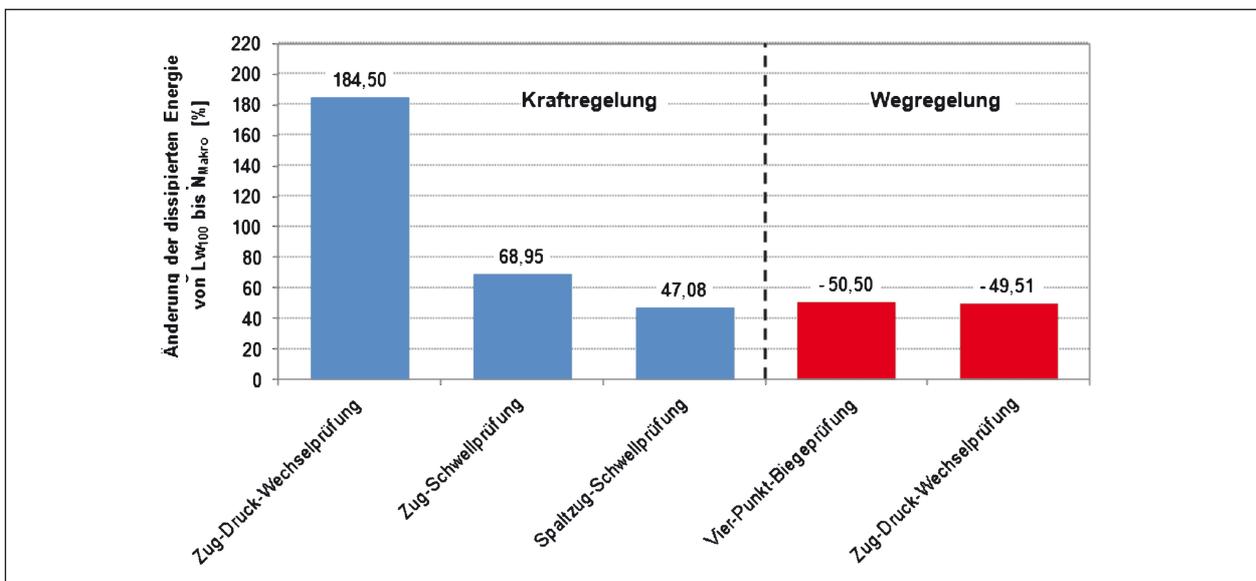


Bild 162: Änderung der dissipierten Energie infolge Materialermüdung von Asphaltprobekörpern bei verschiedenen Prüfverfahren und unterschiedlicher Belastungsart (Kraftregelung – blau, Wegregelung – rot)

ten geeignete Prüfverfahren zur systematischen Untersuchung des Healing-Verhaltens bezeichnet werden. Bei diesem Prüfverfahren wird zudem die beste Wiederholbarkeit bei kontinuierlichen Ermüdungsversuchen innerhalb einer Mischung erreicht.

6.2 Eignung der Healing-Indices

Zur Beurteilung der Healing-Eigenschaften von Bitumen und Asphalt wurden im Rahmen dieses Projektes insgesamt 5 Healing-Indices (Hi1 bis Hi5) ausgewertet (siehe Kapitel 3.3.4). Die Aussagekraft der Indices ist je nach Anwendungsfall unterschiedlich. Sie kann anhand der Übereinstimmung mit folgenden Aussagen beurteilt werden:

- Das Healing-Verhalten nimmt mit steigender Temperatur zu.
- Ein frisches Bindemittel zeigt ein besseres Healing-Verhalten als das gleiche Bindemittel nach Alterung.

- Das Healing-Verhalten nimmt mit zunehmender Lastpause zu.

Die Beurteilung der Eignung der verschiedenen Healing-Indices erfolgt an Ergebnissen der Zug-Druck-Wechselastprüfung am Versuchstyp 3 (längere Lastpause zwischen den Belastungsphasen; vgl. Kapitel 3.3.3) an Asphaltbeton AC 11 D S mit Straßenbaubitumen 50/70.

a) Healing-Index Hi1

Der Healing-Index Hi1 beschreibt die Zunahme der bis zum Erreichen des Ermüdungskriteriums ertragbaren Lastwechselzahl infolge einer oder mehrerer Lastpausen. Hi1 wird größer, je mehr Lastwechsel die Probe infolge der Lastpause bis zum Ermüdungskriterium erreicht.

Der Healing-Index Hi1 ist für Versuchstyp 2 (Lastpause nach jedem Lastimpuls; siehe Kapitel 3.3.3) und Versuchstyp 3 sowie für verschiedene Ermüdungskriterien anwendbar und berücksichtigt die ge-

samte Lebensdauer des geprüften Materials sowie deren Änderung nach Einfügen einer Lastpause.

Eine Auswertung des Healing-Index Hi_1 zeigt Bild 163. Der Healing-Index Hi_1 liefert für das vorliegen-

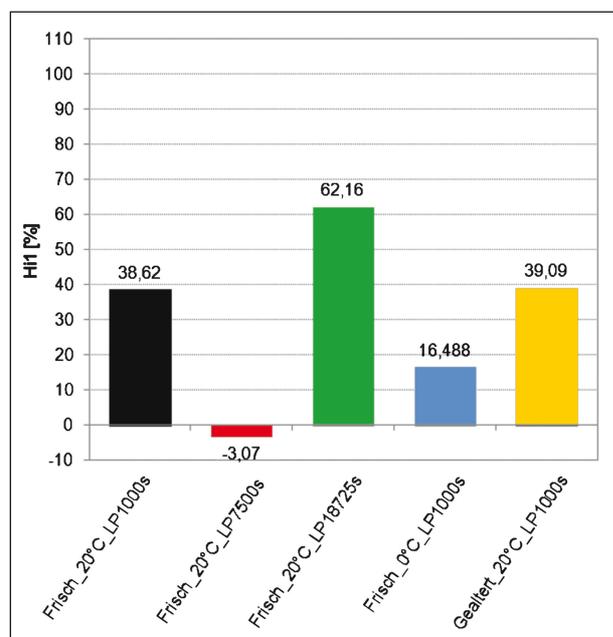


Bild 163: Asphaltbeton AC 11 D S mit Straßenbaubitumen 50/70: Healing-Index Hi_1 bei 20 °C für eine Lastpausendauer von 1.000 s (schwarz), 7.500 s (rot) und 18.725 s (grün); bei Änderung der Prüftemperatur von $T = 20$ °C auf $T = 0$ °C vor (blau) und nach Alterung des Bindemittels (gelb)

de Beispiel plausible Ergebnisse bei Erhöhung der Lastpausendauer von 1.000 s auf 18.725 s und bei Reduktion der Prüftemperatur von 20 °C auf 0 °C, jedoch nicht bei Erhöhung der Lastpausendauer von 1.000 s auf 7.500 s und nicht bei Alterung.

Der Healing-Index Hi_1 kann plausible Ergebnisse liefern, ist jedoch direkt abhängig von der erreichten Homogenität der Probekörper und daher insbesondere bei großer Streuung der Prüfergebnisse unvorteilhaft. Eine große Prüfstreuung kann sich sowohl bei den Versuchen ohne Lastpause als auch bei den Versuchen mit Lastpause ergeben.

Bild 164 (Tabelle 59) zeigt eine in der Praxis vorkommende Streuung der Ergebnisse für gleich konzipierte Asphaltmischungen bei Ermüdungsversuchen ohne Lastpause bei 20 °C bzw. Bild 165 bei 0 °C. Die geprüften Materialien sind nach gleicher Rezeptur, gleichen Mischgutkomponenten und gleichem Verdichtungsregime hergestellt worden. Die Ergebnisse der Ermüdungsversuche zeigen deutliche Unterschiede im Materialverhalten, insbesondere bei N_{Makro} und dem Verlauf der Energy Ratio. So kann der paradoxe Auswertungsfall eintreten, dass einem Probekörper, der einer Ermüdungsprüfung mit Lastpause ausgesetzt wird, letztlich schlechtere mechanische Eigenschaften zugewiesen werden, als einem Probekörper desselben Materials, der einer Ermüdungsprüfung ohne Lastpause ausgesetzt wird.

Mischungsnummer [-]	Temperatur [°C]	Spannungsamplitude [MPa]	N_{Makro} [-]
6	20	1,05	9.004
10	20	1,05	5.909
7	20	1,05	7.302

Tab. 59: Ertragbare Lastwechsel bis zum Eintritt des Ermüdungskriteriums für Asphaltbeton AC 11 D S bei 20 °C

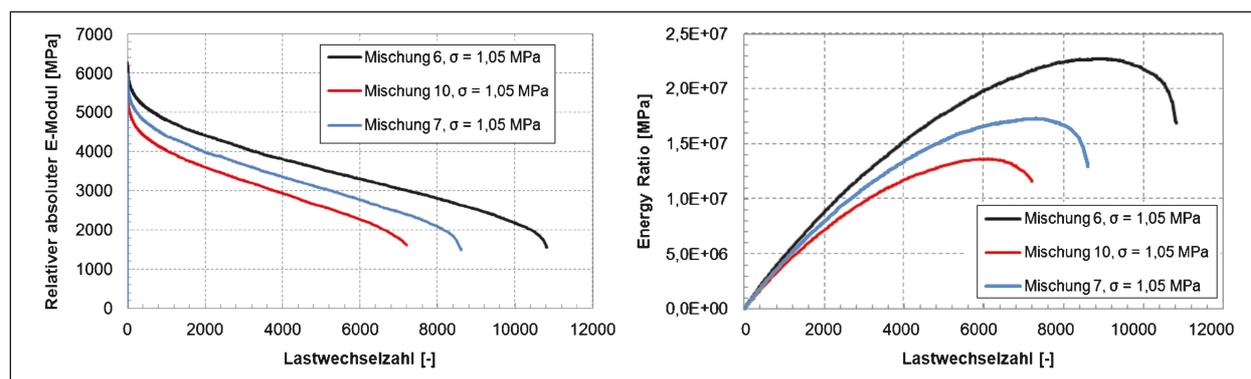


Bild 164: Verlauf von E-Modul (links) und Energy Ratio (rechts) bei gleich konzipierten Asphaltmischungen AC 11 D S bei 20 °C

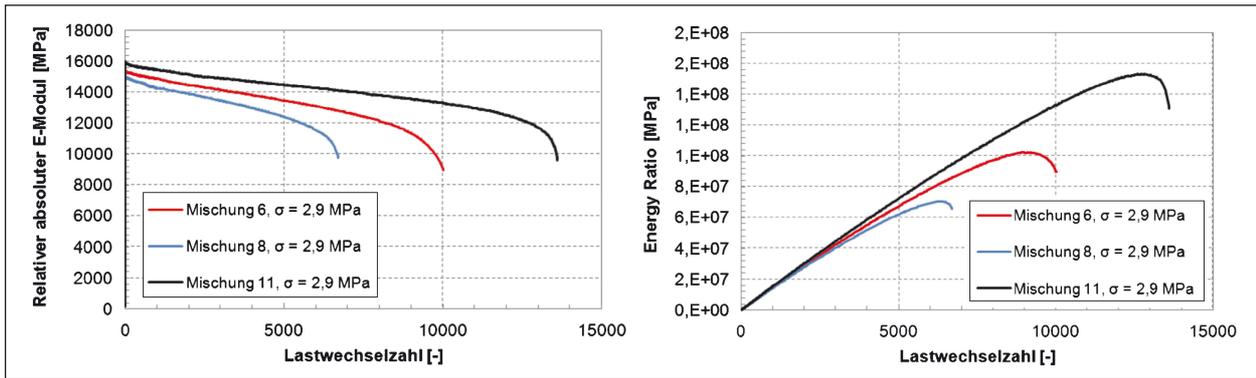


Bild 165: E-Modul (links) und Energy Ratio (rechts) bei gleich konzipierten Asphaltmischungen AC 11 D S bei 0 °C

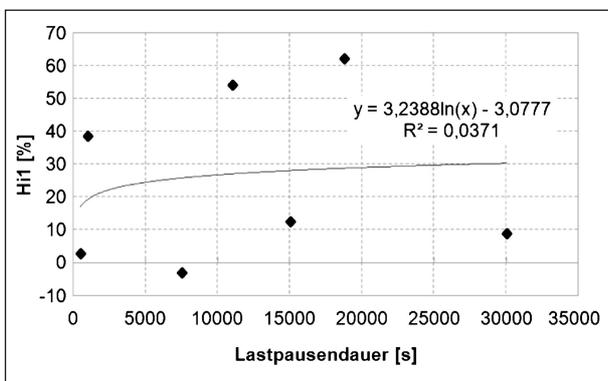


Bild 166: Zug-Druck-Wechselastprüfung an Asphaltbeton AC 11 D S mit Straßenbaubitumen 50/70 bei einer Prüf-temperatur von T = 20 °C: Änderung des Healing-Effekts (Healing-Index Hi1) mit zunehmender Lastpausendauer

Bild 166 zeigt den deutlichen Einfluss der Prüf-streuung auf die Plausibilität von Hi1 bei der Betrachtung der Lastpausendauer. Es wäre eine Zunahme des Healing-Index Hi1 mit zunehmender Lastpausendauer zu erwarten. Tatsächlich scheint die Größe von Hi1 mit zunehmender Lastpausendauer eher zufällig.

Wenn bei Betrachtung der Lastwechselzahlen die Anzahl der Lastwechsel bis zum Erreichen des Ermüdungskriteriums bei Versuchen mit und ohne Lastpause ident ist, so hat sich der Probekörper während der Lastpause nicht erholt. Dieser Fall kann durch den Healing-Index Hi1 bei sehr geringer Prüf-streuung wiedergegeben werden. Bild 167 zeigt genau diesen Fall (in Tabelle 61 zeigt sich,

Mischungsnummer [-]	Temperatur [°C]	Spannungsamplitude [MPa]	N _{Makro} [-]
6	0	2,9	9.110
8	0	2,9	6.400
11	0	2,9	12.810

Tab. 60: Ertragbare Lastwechsel bis zum Eintritt des Ermüdungskriteriums für Asphaltbeton AC 11 D S bei 0 °C

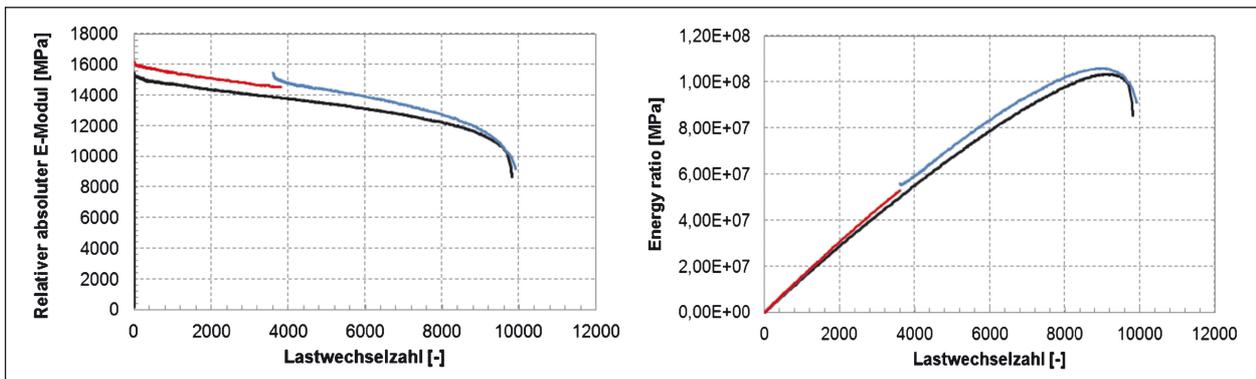


Bild 167: Verlauf von E-Modul (links) und Energy Ratio (rechts) bei sehr geringer Materialrückstellung während der Lastpause bei 0 °C und 500 s Lastpause (Zug-Druck-Wechselastprüfung, σ = 2,9 MPa)

Hi1 [%]	Hi2 [%]	Hi3 [%]	Hi4 [%]	Hi5 [%]
-1,25	13,96	1,99	63,21	4,23

Tab. 61: Healing-Indices bei nahezu keiner Materialrückstellung während der Lastpause

dass Hi1 einen Wert von ca. 0 % annimmt. Für diesen Fall kann davon ausgegangen werden, dass die Lastpause keinen Einfluss auf die Anzahl der ertragenen Lastwechsel bis zum Erreichen des Ermüdungskriteriums hat.

In Folge der Durchführung von Healing-Prüfungen mittels Zug-Druck-Wechselastprüfung unter systematischer Variation der Versuchsbedingungen wird die Eignung des Healing-Index Hi1 zur Beschreibung des Healing-Verhaltens als unzureichend ausgewiesen.

b) Healing-Index Hi2

Der Healing-Index Hi2 charakterisiert den Gewinn an Lastwechseln nach Einführung einer Lastpause. Zur Auswertung wird nach der Lastpause jene Lastwechselzahl ermittelt, die erzielt wird, bis der E-Modul auf den Wert zum Zeitpunkt des Einsetzens der Lastpause abgesunken ist. Hi2 wird größer, je mehr Lastwechsel die Probe nach der Lastpause ertragen kann, um denselben E-Modul wie unmittelbar vor dem Einsetzen der Lastpause zu erreichen. Vorteilhaft erfolgt die Ermittlung von Hi2 an nur einem einzigen Probekörper.

Der Healing-Index Hi2 ist bei Versuchstyp 2 (Lastpause nach jedem Lastimpuls; siehe Kapitel 3.3.3) und ohne zwingende Berücksichtigung von Ermüdungskriterien anwendbar.

Eine Auswertung des Healing-Index Hi2 zeigt Bild 168. Der Healing-Index Hi2 liefert für das vorliegende Beispiel plausible Ergebnisse bei Erhöhung der Lastpausendauer von 1.000 s auf 7.500 s, bei Reduktion der Prüftemperatur von 20 °C auf 0 °C und bei Alterung, jedoch nicht bei Erhöhung der Lastpausendauer von 1.000 s auf 18.725 s. Es ist interessant, dass Hi2 > 100 % betragen kann, was bedeutet, dass während der Lastpause nicht nur eine vollständige Regeneration des Probekörpers stattfindet, sondern dem Material nach Lastpause bessere Materialeigenschaften suggeriert werden als demselben Material ohne Vorbelastung.

Nachteilig beim Healing-Index Hi2 ist, dass die Auswertung auf Healing-Effekte unmittelbar zufol-

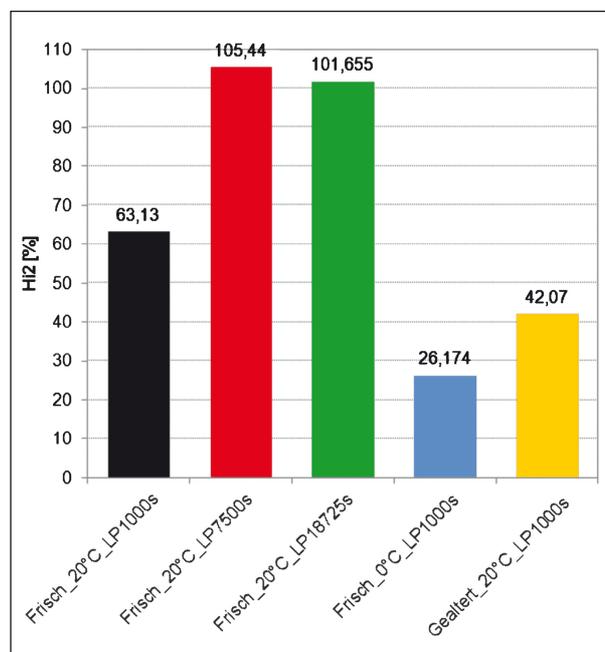


Bild 168: Asphaltbeton AC 11 D S mit Straßenbaubitumen 50/70: Healing-Index Hi2 bei 20 °C für eine Lastpausendauer von 1.000 s (schwarz), 7.500 s (rot) und 18.725 s (grün); bei Änderung der Prüftemperatur von T = 20 °C auf T = 0 °C (blau) und nach Alterung des Bindemittels (gelb)

ge der Lastpause beschränkt bleibt, während die Gesamtlebensdauer keine Berücksichtigung findet.

Wenn bei Betrachtung der Lastwechselzahlen ein Probekörper nach der Lastpause dieselbe Anzahl an Lastzyklen benötigt wie vor der Lastpause, bis zum Abfall des E-Moduls auf einen bestimmten Wert, so hat sich der Probekörper während der Lastpause vollständig erholt. Dieser Fall kann durch den Healing-Index Hi2 sehr exakt wiedergegeben werden. Bild 169 (Tabelle 62) zeigt genau diesen Fall.

Hi2 nimmt erwartungsgemäß den Wert von ca. 100 % an. Für diesen Fall kann davon ausgegangen werden, dass die Anzahl der während der ersten Belastungsphase ertragenen Lastwechsel auf die Lebensdauer des Probekörpers hinzugezählt werden kann. Anhand einer Reihe von Versuchsergebnissen kann gezeigt werden, dass bei einem Healing-Index von Hi2 nahe 100 % der E-Modul nach Lastpause ident dem E-Modul vor der Last-

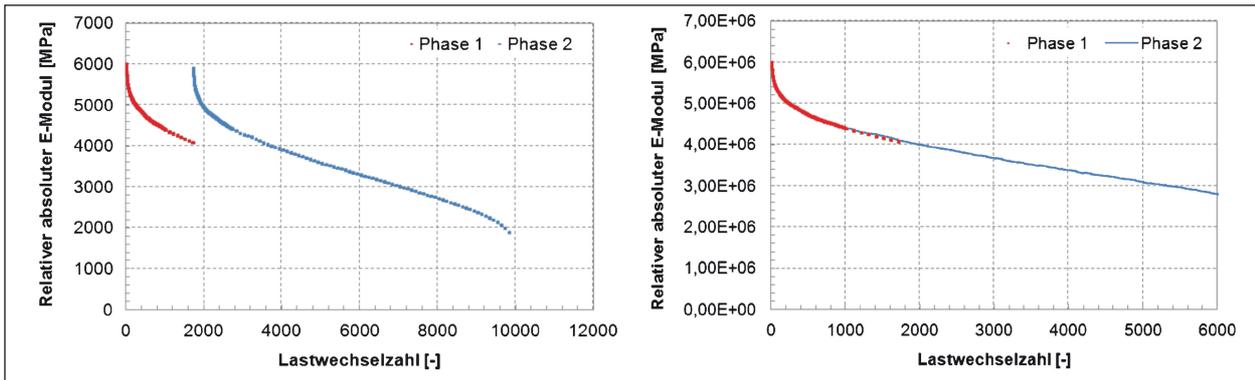


Bild 169: E-Modul bei vollständiger Heilung während der Lastpause bei 20 °C und 7.500 s Lastpause (Zug-Druck-Wechsellastprüfung, $\sigma = 1,05$ MPa), tatsächlicher Versuchsablauf (links) und Überlagerung von Belastungsphase 1 und Belastungsphase 2 (rechts)

Hi1 [%]	Hi2 [%]	Hi3 [%]	Hi4 [%]	Hi5 [%]
15,26	105,44	37,25	105,31	31,74

Tab. 62: Healing-Indices bei vollständiger Heilung während der Lastpause

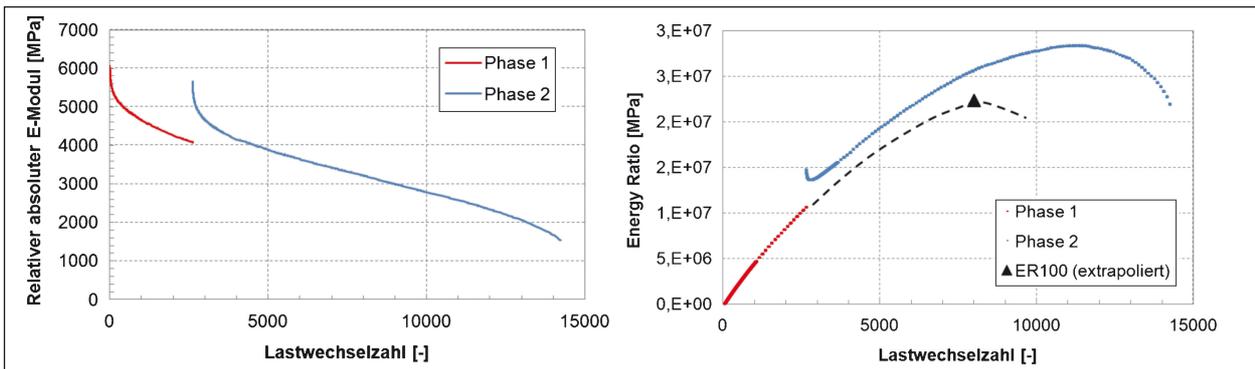


Bild 170: Verlauf von E-Modul (links) und Energy Ratio (rechts) bei eindeutiger Materialrückstellung während der Lastpause (Zug-Druck-Wechsellastprüfung, 20 °C, $\sigma = 1,05$ MPa)

Hi1 [%]	Hi2 [%]	Hi3 [%]	Hi4 [%]	Hi5 [%]
35,56	65,52	8,47	98,43	27,37

Tab. 63: Healing-Indices bei eindeutiger Materialrückstellung

pause verläuft. Wenn Hi2 größer oder kleiner als 100 % ist, lässt sich kein eindeutiger Rückschluss auf den Verlauf des E-Moduls in der zweiten Belastungsphase ziehen. Einen Rückschluss auf die Änderung der Lebensdauer kann daher nicht zuverlässig erfolgen. Bild 170 zeigt die Verläufe des E-Moduls und der Energy Ratio in der ersten und in der zweiten Belastungsphase. Es ergibt sich eine deutliche Materialrückstellung während der Lastpause was sich u. a. durch eine stark erhöhte Energy Ratio in der zweiten Belastungsphase zeigt. Laut Tabelle 63 nimmt die Größe von Hi2 jedoch lediglich 65 %

an. Dies suggeriert eine verhältnismäßig geringe Materialrückstellung während der Lastpause.

In Bild 171 sind für das Beispiel beide Belastungsphasen überlagert. Es zeigt sich, dass das Materialverhalten in der zweiten Phase ein anderes ist, als das in der ersten Phase. Das Material hat sich während der Lastpause nahezu vollständig erholt, jedoch zeigt sich in der zweiten Belastungsphase eine langsamere Abnahme des E-Moduls. Durch den Healing-Index Hi2 kann dies nicht wiedergegeben werden, da die Anzahl der benötigten Last-

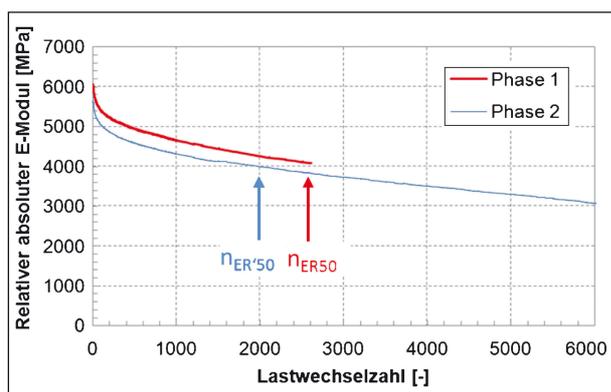


Bild 171: Überlagerung des E-Moduls der Belastungsphase 1 mit dem E-Modul in der Belastungsphase 2 (Zug-Druck-Wechselastprüfung, 20 °C, $\sigma = 1,05$ MPa)

wechsel bis zum Erreichen des Lastpausenkriteriums nach Lastpause geringer ist.

In Folge der Durchführung von Healing-Prüfungen mittels Zug-Druck-Wechselastprüfung unter systematischer Variation der Versuchsbedingungen wurde die Eignung des Healing-Index Hi2 zur Beschreibung des Healing-Verhaltens für die meisten Fälle als unzureichend erkannt. Lediglich für die Angabe von 100 % Materialrückstellung während der Lastpause zeigen sich durchgehend plausible Ergebnisse, sofern der Verlauf des E-Moduls der ersten und zweiten Belastungsphase gleich ist.

Wegen der erkannten Mängel bei Anwendung der Healing-Indices Hi1 und Hi2 wurden 3 weitere Healing-Indices eingeführt und erprobt.

c) Healing-Index Hi3

Der Healing-Index Hi3 ist der Quotient aus der Differenz der Lastwechsel bis zum Erreichen einer Energy Ratio von 50 % mit Lastpause (ER'50) und ohne Lastpause (ER50). Hi3 ist für den Versuchstyp 3 unter Betrachtung der Energy Ratio anwendbar und berücksichtigt die gesamte Lebensdauer des geprüften Materials sowie deren Änderung durch das Einfügen einer Lastpause. Hi3 wird größer, je höher das Maximum der Energy Ratio in der zweiten Belastungsphase ist und je höher die Lastwechselzahl bis zum Erreichen des Ermüdungskriteriums ist.

Eine Auswertung des Healing-Index Hi3 zeigt Bild 172. Der Healing-Index Hi3 liefert für das vorliegende Beispiel plausible Ergebnisse bei Alterung und bei Erhöhung der Lastpausendauer von 1.000 s auf 18.725 s, aber nicht bei Reduktion der Prüftempe-

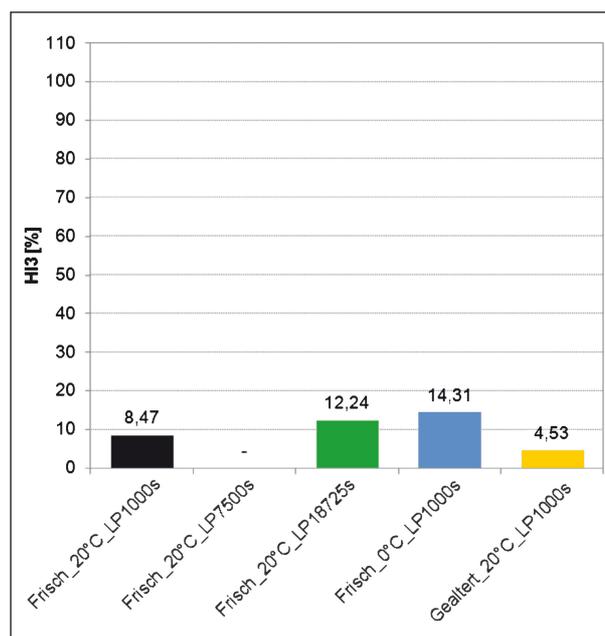


Bild 172: Asphaltbeton AC 11 D S mit Straßenbaubitumen 50/70: Healing-Index Hi3 bei einer Prüftemperatur von 20 °C für eine Lastpausendauer von 1.000 s (schwarz) und 18.725 s (grün); bei Änderung der Prüftemperatur von T = 20 °C auf T = 0 °C vor (blau) und nach Alterung des Bindemittels (gelb)

ratur. Bei einer Erhöhung der Lastpausendauer von 1.000 s auf 7.500 s ist die untere Grenze für Hi3 unterschritten und daher eine Ermittlung von Hi3 nicht möglich (vgl. Bild 175).

Ein großer Vorteil bei der Anwendung von Hi3 ist die relative Betrachtung von E-Modul und Energy Ratio. Die z. T. großen Unterschiede bei den Ergebnissen aus den Ermüdungsprüfungen sind bei Relativbetrachtung deutlich geringer, was sich positiv auf die Streuung daraus ermittelter Ergebnisse auswirkt. Es ergibt sich daher die Möglichkeit den relativen Abfall des E-Moduls bei Erreichen von 50 % Energy Ratio exakt zu bestimmen und als Lastpausenkriterium für Healing-Prüfungen einzusetzen. Eine versuchstechnische Umsetzung der Belastung bis zu 50 % Energy Ratio konnte sehr präzise realisiert werden. Die Größe der Energy Ratio bei N_{Makro} ohne Lastpause (ER100) kann anhand des relativen Abfalls des E-Moduls vor der Lastpause rechnerisch ermittelt (extrapoliert) werden.

Bild 173 zeigt den relativen Verlauf von E-Modul und Energy Ratio für die in Bild 164 dargestellten absoluten Verläufe beider Kenngrößen bei T = 20 °C. Es ist deutlich zu erkennen, dass trotz der stark unterschiedlichen Verläufe der absoluten Werte 50 % der Energy Ratio bei allen Einzelversuchen bei in etwa demselben relativen E-Modul erreicht werden.

Die Ergebnisse der Relativbetrachtungen von E-Modul und Energy Ratio sind in Tabelle 64 den Ergebnissen der Lastwechselzahlen bei Erreichen des Ermüdungskriteriums N_{Makro} gegenübergestellt. Anhand des geringen Variationskoeffizienten von $v = 0,63\%$ wird deutlich, dass eine Angabe des relativen E-Moduls bei 50 % Energy Ratio (E_{ER50}) sehr präzise erfolgen kann. In diesem Beispiel werden 50 % Energy Ratio bei einem Abfall des anfänglichen E-Moduls auf 75,02 % erreicht.

Analoge Ergebnisse resultieren bei einer Prüftemperatur von $T = 0\text{ °C}$. Trotz der enormen Streu-

ung innerhalb der kontinuierlichen Ermüdungsversuche aus Bild 165 ist die Angabe eines relativen E-Moduls bei 50 % Energy Ratio sehr exakt möglich (siehe Bild 174). In diesem Beispiel beträgt der Variationskoeffizient bei E_{ER50} lediglich 0,26 % (siehe Tabelle 65) und ist somit noch geringer als bei 20 °C.

Eine Bestimmung von $Hi3$ ist aber nicht in jedem Fall möglich. Für den Fall, dass 50 % der maximalen Energy Ratio der zweiten Belastungsphase (ER'50) geringer ist, als die Energy Ratio zu Beginn der zweiten Belastungsphase, kann der

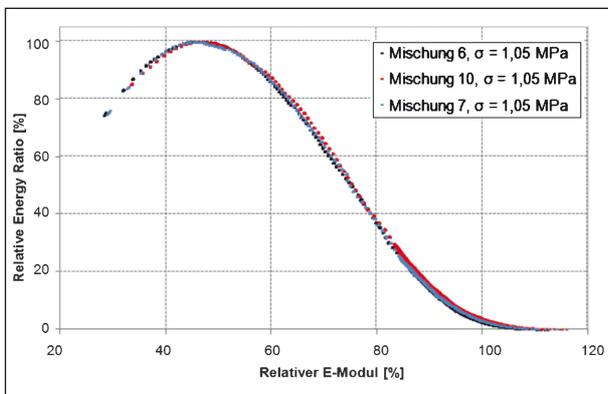


Bild 173: Relative Verläufe von E-Modul und Energy Ratio bei der Zug-Druck-Wechselastprüfung bei gleich konzipierten Asphaltmischungen (AC 11 D S, 20 °C) und unterschiedlichem Verlauf von E-Modul und Energy Ratio

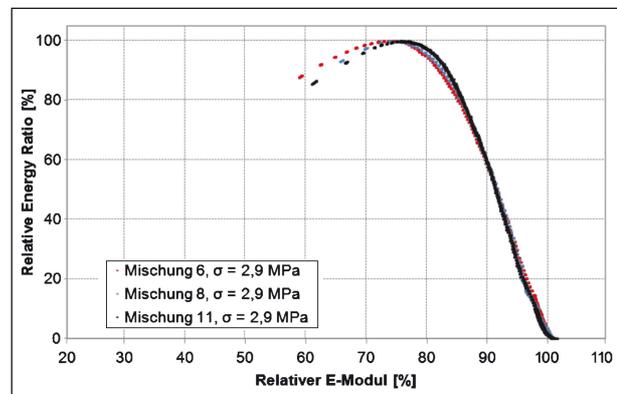


Bild 174: Relative Verläufe von E-Modul und Energy Ratio bei der Zug-Druck-Wechselastprüfung bei gleich konzipierten Asphaltmischungen (AC 11 D S, 0 °C) und unterschiedlichem Verlauf von E-Modul und Energy Ratio

Mischungsnummer [-]	Spannungsamplitude [MPa]	N_{Makro} [-]	E_{ER50} [%]
6	1,05	9.004	74,94
10	1,05	5.909	75,52
7	1,05	7.302	74,59
	MW [-]	7.405	75,02
	σ [-]	1.550	0,47
	v [%]	20,93	0,63

Tab. 64: Ergebnisse kontinuierlicher Ermüdungsprüfungen am AC 11 D S, 50/70 bei 20 °C

Mischungsnummer [-]	Spannungsamplitude [MPa]	N_{Makro} [-]	E_{ER50} [%]
6	2,9	9.110	91,43
8	2,9	6.400	91,73
11	2,9	12.810	91,26
	MW [-]	9.440,00	91,47
	σ [-]	3.217,72	0,24
	v [%]	34,09	0,26

Tab. 65: Ergebnisse kontinuierlicher Ermüdungsprüfungen an AC 11 D S, 50/70 bei 0 °C

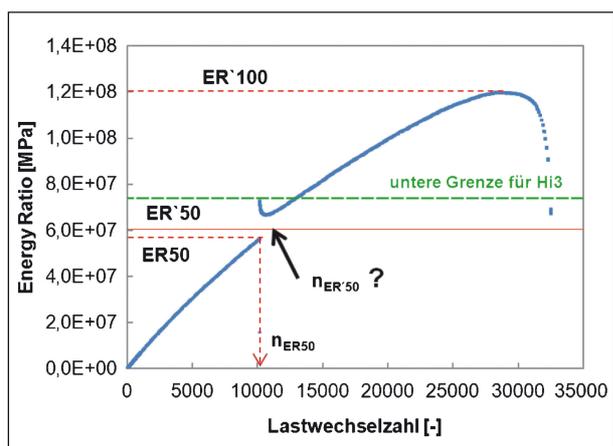


Bild 175: Energy Ratio bei Healing-Prüfung mittels Zug-Druck-Wechsellaastprüfung (AC 11 D S, 50/70, 20 °C, LP = 7.500 s, $\sigma = 1,05$ MPa) – untere Grenze für Hi3

Größe von ER'50 keine Lastwechselzahl $n_{ER'50}$ zugeordnet werden.

Dies inkludiert auch den Bereich zwischen der Energy Ratio zu Beginn der zweiten Belastungsphase und dem Minimum der Energy Ratio in der zweiten Belastungsphase. Liegt ER'50 innerhalb dieses Bereiches, können jeweils zwei Lastwechselzahlen zugeordnet werden. Eine Ausnahme ist der Fall, dass ER'50 exakt dem Minimum der Energy Ratio der zweiten Belastungsphase entspricht. Der anfängliche Abfall der Energy Ratio während der zweiten Belastungsphase resultiert aus dem schnellen Abfall des E-Moduls.

Bild 175 zeigt beispielhaft den Verlauf der Energy Ratio für eine Healing-Prüfung, bei der eine Angabe von Hi3 nicht möglich ist, da ER'50 genau zwischen der ersten und zweiten Belastungsphase liegt.

In Folge der Durchführung von Healing-Prüfungen mittels Zug-Druck-Wechsellaastprüfung unter systematischer Variation der Versuchsbedingungen wurde die Eignung des Healing-Index Hi3 zur Beschreibung des Healing-Verhaltens vielfach als aussagekräftig herausgestellt. In einigen Fällen kann jedoch keine Angabe von Hi3 erfolgen, was die Eignung von Hi3 einschränkt.

d) Healing-Index Hi4

Der Healing-Index Hi4 vergleicht die Energy Ratio des unbeschädigten Materials mit der Energy Ratio des geschädigten Materials nach einer Lastpause.

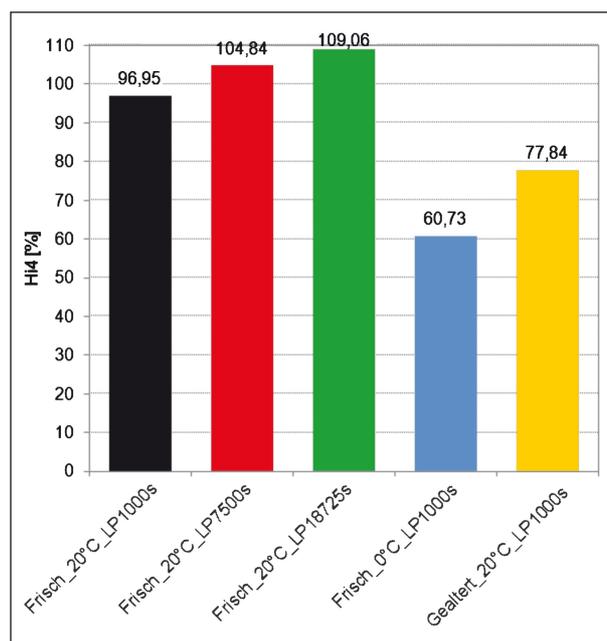


Bild 176: Asphaltbeton AC 11 D S mit Straßenbaubitumen 50/70: Healing-Index Hi4 für eine Lastpausendauer von 1.000 s (schwarz), 7.500 s (rot) und 18.725 s (grün); bei Änderung der Prüftemperatur von $T = 20$ °C auf $T = 0$ °C vor (blau) und nach Alterung des Bindemittels (gelb)

Hi4 wird größer, je größer das Maximum der Energy Ratio der zweiten Belastungsphase ist (unter der Annahme, dass die zweite Belastungsphase ebenfalls bei Lastwechsel 1 beginnt).

Hi4 ist für den Versuchstyp 3 unter Betrachtung der Energy Ratio anwendbar. Die unter Hi3 diskutierten Vorteile bei der Relativbetrachtung des E-Moduls und der Energy Ratio gelten auch für den Healing-Index Hi4.

Eine Auswertung des Healing-Index Hi4 zeigt Bild 176. Der Healing-Index Hi4 liefert für das betrachtete Beispiel plausible Ergebnisse bei Erhöhung der Lastpausendauer, bei Reduktion der Prüftemperatur und bei Alterung.

Sofern der Verlauf des E-Moduls in der ersten und in der zweiten Belastungsphase gleich ist, muss sich dies zwingend im Healing-Index Hi4 widerspiegeln. Dies zeigt sich deutlich bei der Betrachtung des in Bild 169 gezeigten Beispiels. Tabelle 62 zeigt erwartungsgemäß einen Healing-Index von ca. 100 %. Die Plausibilität des Healing-Index Hi4 bei 100 % kann für diesen Fall bestätigt werden. Das Beispiel in Bild 170 zeigt eine deutliche Erholung der Probe während der Lastpause, was durch Hi2 nicht wiedergegeben werden kann. Durch Hi4 kann für dieses Beispiel gezeigt werden, dass sich die Probe tat-

sächlich nahezu vollständig erholt hat (siehe Tabelle 63, $Hi_4 = 98,43\%$). Anhand einer Reihe von Ergebnissen kann gezeigt werden, dass Hi_4 immer dann 100 % annimmt, wenn auch $Hi_2 = 100\%$ beträgt. Bei Hi_4 ungleich 100 % kann das Material nach der Lastpause plausibler beurteilt werden.

Bei Betrachtung des Beispiels aus Bild 167 (keine Materialrückstellung während der Lastpause) ist ersichtlich, dass Hi_4 für die Angabe eines unteren Grenzwertes für das Rückstellungsvermögen eines Probekörpers nur bedingt Anwendung finden kann (siehe Tabelle 61). In diesem Beispiel beträgt der Healing-Index 63,21 %. Ein mögliches Vorgehen zur Ermittlung der unteren Grenze von Hi_4 (0 % Materialrückstellung während der Lastpause) ist die Auswertung der Versuche mit einer Lastpausendauer von 0 s. Diese erweiterte Auswertung von Hi_4 wird im Folgenden jedoch nicht weiter betrachtet.

Von Nachteil ist, dass mittels des Healing-Index Hi_4 keine Aussage zur Veränderung der Lebensdauer getroffen werden kann, sondern lediglich das Materialverhalten nach der Lastpause in Relation zum Materialverhalten vor der Lastpause beurteilt wird.

Nach der Durchführung von Healing-Prüfungen mittels Zug-Druck-Wechselastprüfung unter systematischer Variation der Versuchsbedingungen wird die Eignung des Healing-Index Hi_4 zur Beschreibung des Healing-Verhaltens für nahezu alle Fälle als hinreichend beurteilt. Lediglich für die Angabe keiner Materialrückstellung während der Lastpause ist Hi_4 ungeeignet.

e) Healing-Index Hi_5

Der Healing-Index Hi_5 beschreibt die Zunahme der maximalen Energy Ratio infolge einer Lastpause in Relation zur maximalen Energy Ratio ohne Lastpause (extrapoliert). Hi_5 wird größer, je größer das Maximum der Energy Ratio der zweiten Belastungsphase ist (bei fortwährender Akkumulation der Lastwechselzahlen).

Der Healing-Index Hi_5 ist für den Versuchstyp 3 unter Betrachtung der Energy Ratio anwendbar und berücksichtigt die gesamte Lebensdauer des geprüften Materials sowie deren Änderung durch das Einfügen einer Lastpause. Die unter Hi_3 diskutierten Vorteile bei der Relativbetrachtung des E-Moduls und der Energy Ratio gelten uneingeschränkt auch für den Healing-Index Hi_5 .

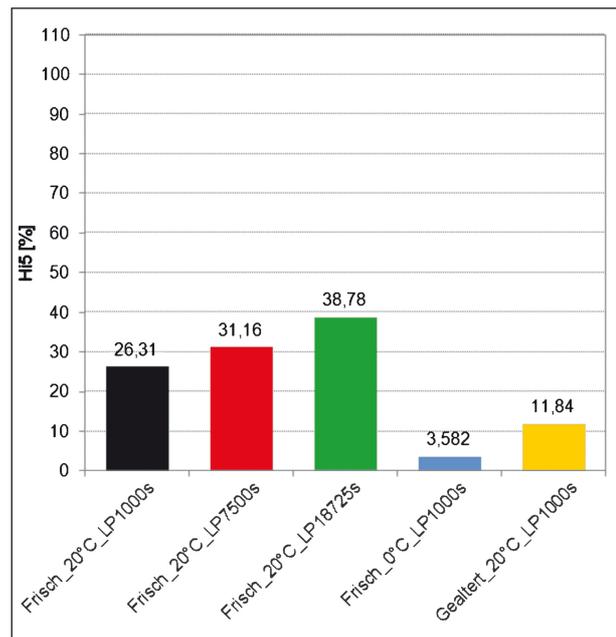


Bild 177: Asphaltbeton AC 11 D S mit Straßenbaubitumen 50/70: Healing-Index Hi_5 für eine Lastpausendauer von 1.000 s (schwarz), 7.500 s (rot) und 18.725 s (grün); bei Änderung der Prüftemperatur von $T = 20\text{ °C}$ auf $T = 0\text{ °C}$ vor (blau) und nach Alterung des Bindemittels (gelb)

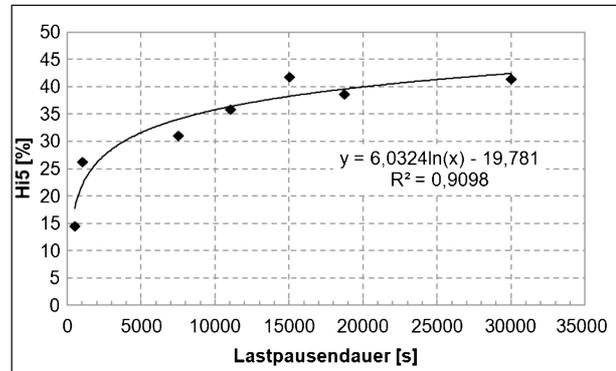


Bild 178: Zug-Druck-Wechselastprüfung an Asphaltbeton AC 11 D S mit Straßenbaubitumen 50/70 bei einer Prüftemperatur von $T = 20\text{ °C}$: Anstieg des Healing-Effekts (Healing-Index Hi_5) mit zunehmender Lastpausendauer

Eine Auswertung des Healing-Index Hi_5 zeigt Bild 177. Der Healing-Index Hi_5 liefert plausible Ergebnisse bei Erhöhung der Lastpausendauer, bei Reduktion der Prüftemperatur und bei Alterung.

Bild 178 zeigt den Einfluss der Lastpausendauer auf die Größe von Hi_5 , dem dieselben Prüfungen zugrunde liegen, wie in Bild 166 für Hi_1 . Es ist ersichtlich, dass durch Hi_5 eine Zunahme der Materialrückstellung bei länger anhaltender Lastpausendauer präzise angegeben werden kann. Es zeigt sich auch, dass sich für das vorliegende Beispiel

	Hi1	Hi2	Hi3	Hi4	Hi5
Eignung für vergleichende Betrachtungen	bedingt	bedingt	nein	bedingt	ja
Betrachtung der gesamten Lebensdauer	ja	nein	ja	nein	ja
Einfluss der Prüfstreuung auf Hi	groß	gering	gering	gering	gering
Charakterisierung des Healing-Verhaltens an einem einzelnen Probekörper	nein	ja	ja	ja	ja
vollständige Materialrückstellung während der Lastpause kann abgebildet werden*	bedingt	ja	bedingt	ja	nein
keine Materialrückstellung während der Lastpause kann abgebildet werden*	bedingt	ja	ja	bedingt	ja
anwendbar bei Versuchstyp 2	ja	nein	nein	nein	nein
anwendbar bei Versuchstyp 3	ja	ja	ja	ja	ja
Vorversuche ohne Lastpause notwendig	ja	nein	ja	ja	ja
Auswertung von Lastwechselzahlen	ja	ja	ja	nein	nein
Auswertung der Energy Ratio	nein	nein	nein	ja	ja
* abhängig von der Healing-Definition					

Tab. 66: Qualitative Aussagekraft der Healing-Indices Hi1 bis Hi5

eine maximale Materialrückstellung bereits bei einer Lastpausendauer von ca. 12.000 s einstellt. Eine noch längere Dauer der Lastpause bewirkt keinen weiteren Anstieg des Healing-Index Hi5.

Bei der Auswertung werden sowohl die Veränderung durch die Lastpause als auch die Veränderung der Gesamtlebensdauer berücksichtigt. Die Durchführung der Prüfung kann an einem einzelnen Probekörper erfolgen.

Erfolgt keine Materialrückstellung während der Lastpause, entspricht die Größe der Energy Ratio der zweiten Belastungsphase der Größe der Energy Ratio des Versuches ohne Lastpause bzw. der des extrapolierten Wertes für ER100. Dies muss sich im Healing-Index Hi5 widerspiegeln (Hi5 muss ca. 0 % sein). Das in Bild 167 gezeigte Beispiel (keine Materialrückstellung während der Lastpause) zeigt diesen Fall. In Tabelle 61 ist ersichtlich, dass Hi5 die nahezu vollständige Regeneration des Probekörpers (4,23 %) gut widerspiegelt. Anhand einer Reihe von Versuchsergebnissen kann gezeigt werden, dass bei einem Healing-Index Hi5 von nahezu 0 % die Verläufe von E-Modul und Energy Ratio durch das Einfügen einer Lastpause nur geringfügig verändert werden. Dies bestätigt die Plausibilität von Hi5.

Nach der Durchführung von Healing-Prüfungen mittels Zug-Druck-Wechselastprüfung unter systematischer Variation der Versuchsbedingungen ist die Eignung des Healing-Index Hi5 zur Beschreibung

des Healing-Verhaltens für die Mehrheit der betrachteten Fälle nachgewiesen. Lediglich für die Angabe vollständiger Materialrückstellung während der Lastpause zeigt sich Hi5 als nur bedingt geeignet.

Eine vergleichende qualitative Bewertung zur Anwendbarkeit und Aussagekraft der einzelnen Healing-Indices Hi1 bis Hi5 zeigt Tabelle 66.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass jeder Probekörper ein unterschiedliches Materialverhalten und somit auch ein anderes Healing-Verhalten aufweisen kann. Die Beurteilung des Healing-Verhaltens eines Mischguts an einem einzelnen Probekörper ist daher zu bevorzugen.

Die für die Beurteilung des Healing-Vermögens betrachteten Indices Hi1 bis Hi5 beschreiben die Rückstellung des Materials während der Lastpause auf unterschiedliche Weise. Nach Diskussion von Vor- und Nachteilen der einzelnen Healing-Indices zeigt sich der Healing-Index Hi5 als diejenige Größe, mit der die Materialrückstellung während der Lastpause plausibel angegeben werden kann. Hi5 ist daher geeignet das Healing-Vermögen unterschiedlicher Materialien untereinander zu vergleichen und zu bewerten. Eine gesicherte Angabe vollständiger Materialrückstellung während der Lastpause kann durch Hi5 nicht erfolgen. Zur Beurteilung der Healing-Eigenschaften eines geprüften Materials muss daher zusätzlich der Healing-Index Hi4 angegeben werden.

6.3 Wahl der Prüfparameter

Zur Ansprache des Healing-Verhaltens von Asphalt können folgende Parameter unabhängig vom gewählten Prüfverfahren u. a. frei gewählt werden:

- Versuchstyp,
- Prüftemperatur,
- Zeitpunkt und
- Dauer der Lastpause.

Die Wahl des Versuchstyps wird in erster Linie durch die Möglichkeiten der maschinentechnischen Regelung bestimmt. Insbesondere sind eine hohe Regelgenauigkeit und eine gleichmäßige Ansteuerung der Belastung sicherzustellen. Dies lässt sich üblicherweise für dynamische Asphaltprüfungen eingesetzte Prüfmaschinen durch das Einfügen einer Lastpause nach einer bestimmten Anzahl kontinuierlicher Lastwechsel (Versuchstyp 3) realisieren.

Das Einfügen von Lastpausen nach jedem Belastungszyklus lässt keinen Rückschluss auf das Materialverhalten während der Lastpause zu. Es kann lediglich eine Änderung der Lebensdauer durch die geänderte Prüfanordnung (ausgedrückt durch den als ungeeignet herausgestellten Healing-Index Hi_1) angegeben werden. Neben der aufwendigeren Prüfanordnung und dem teilweise undefinierbaren Energieeintrag in den Probekörper kann die Versuchsdauer bei Versuchstyp 2 je nach Prüfbedingungen deutlich größer als bei Versuchstyp 3 sein.

Anhand der Versuche aus Kapitel 5.2.4 konnte festgestellt werden, dass sich durch die Zusammenfassung der vielen kurzen Lastpausen zu einer langen Lastpausendauer ein geringeres Healing-Verhalten im Probekörper ergibt. Der Anstieg der Lastwechselzahl bei kontinuierlicher Ermüdungsprüfung in der Zug-Druck-Wechselastprüfung bis zum Erreichen von 50 % Energy Ratio zeigte sich bei Versuchstyp 2 mit 1.596,8 % deutlich ausgeprägter als bei Versuchstyp 3 mit 11,93 %. Vermutlich ist dies darin begründet, dass die elastische Rückstellung der Probe zu Beginn einer Lastpause einen deutlichen Einfluss auf das Healing-Verhalten hat. Bei Versuchstyp 2 hat die Probe fortwährend die Möglichkeit sich um den elastischen Bereich rückzuverformen, bei Versuchstyp 3 hingegen lediglich ein einziges Mal.

Generell lässt sich das Healing-Verhalten bei allen Temperaturen bestimmen, bei denen eine Materialermüdung infolge der zyklisch-dynamischen Belastung erfolgt. Die Wahl einer Prüftemperatur von $T = 20\text{ °C}$ hat sich als vorteilhaft gegenüber $T = 0\text{ °C}$ erwiesen, da Ermüdungs- und Healing-Effekte bei höherer Temperatur stärker ausgeprägt sind.

Messungen mit dem DSR werden bei möglichst hoher Bitumenviskosität durchgeführt, um gesichert eine Ermüdung der Bitumenprobe herbeizuführen. Die Wahl geeigneter Prüftemperaturen und der Messgeometrie für Messungen am DSR wird dabei stark von den Geräteparametern des verwendeten DSR bestimmt.

Der Zeitpunkt des Einsetzens der Lastpause und die Dauer der Lastpause beeinflussen die Größe der resultierenden Healing-Indices. Mit zunehmender Lastpausendauer heilt der Baustoff umso mehr, die Healing-Indices steigen daher an. Bild 178 zeigt beispielhaft die Abhängigkeit des Healing-Index Hi_5 von der Dauer der Lastpause. Bei hinreichend langer Lastpausendauer (ca. 12.000 s, siehe Bild 178) wird ein Maximum der Selbstheilung (Rückstellung) erreicht. Danach nimmt der Healing-Index nicht weiter zu. Bei sehr geringer Lastpausendauer haben elastische und viskose Materialeigenschaften einen großen Einfluss auf die Größe des Healing-Index. Eine Lastpausendauer von $t_{LP} = 1.000\text{ s}$ wird als geeignet angesehen, um für Versuchstyp 3 laborökonomisch Healing-Effekte systematisch zu untersuchen. Eine längere Lastpausendauer von z. B. 30.000 s ist zu empfehlen, wenn der obere Grenzwert des Healing-Index für ein Material bestimmt werden soll.

Bei der Analyse von Healing-Effekten kann die Anzahl der Lastpausen beliebig variiert werden. Für die Bestimmung der Healing-Indices Hi_3 bis Hi_5 müssen der relative Verlauf des E-Moduls bzw. der Energy Ratio der Belastungsphase vor der ersten Lastpause und der absolute Betrag der Energy Ratio für die letzte Belastungsphase bekannt sein. Zwischen der ersten und der letzten Belastungsphase können weitere Belastungs- und Erholungsphasen eingefügt werden, jedoch sind die Einflüsse auf den Healing-Index dann nicht weiter differenzierbar. Vergleichende Betrachtungen werden daher vorteilhaft an Prüfungen mit einer einzigen Lastpause durchgeführt.

6.4 Healing-Verhalten geprüfter Baustoffe im Vergleich

Im Folgenden wird das zur Ansprache von Healing-Eigenschaften entwickelte Verfahren an unterschiedlichen Materialien angewendet. Die geprüften Materialien werden hinsichtlich der Größe von Hi5 beurteilt.

6.4.1 Bitumen

Die Ansprache der Healing-Eigenschaften verschiedener Bitumen erfolgt gemäß Kapitel 6.1.1 mittels der scherspannungsgeregelten DSR-Healing-Prüfung. Die wesentlichen Geräte- bzw. Prüfparameter sind in Tabelle 67 zusammengefasst. Die für Straßenbaubitumen 50/70 entwickelten und optimierten

Prüfparameter sind nicht ohne weiteres für die Prüfung anderer Bitumen verwendbar.

Es erfolgte eine Anpassung der Scherspannung, um einen Kompromiss aus Messung innerhalb des linear-viskoelastischen Bereiches und laborökonomischer Lastwechselzahl bis zum Erreichen des Ermüdungskriteriums zu erzielen.

Bild 179 zeigt die Größe der Healing-Indices Hi4 und Hi5 für alle geprüften Bitumenvarianten im frischen und gealterten Zustand.

Bild 180 zeigt den Healing-Index Hi5 über den komplexen Schermodul zu Beginn der Ermüdungsprüfung. Im frischen Zustand weisen die Bitumen mit dem höheren komplexen Schermodul $|G^*|$ durchgehend höhere Werte für Hi5 und somit ein

Prüftemperatur [°C]	20	
Prüffrequenz [Hz]	10	
Durchmesser der Messgeometrie [mm]	8	
Spaltabstand [mm]	1	
Lastpausenkriterium Energy Ratio [%]	50	
Lastpausendauer [s]	600	
Anzahl Lastpausen [-]	1	
Scherspannung [MPa]	30/45 frisch:	0,250
	30/45 gealtert:	0,650
	70/100 frisch:	0,100
	70/100 gealtert:	0,350
	50/70 frisch:	0,150
	50/70 gealtert:	0,350
	25/55-55 frisch:	0,150
	25/55-55 gealtert:	0,400

Tab. 67: Geräte- und Prüfparameter für Healing-Prüfungen an Bitumen mittels DSR

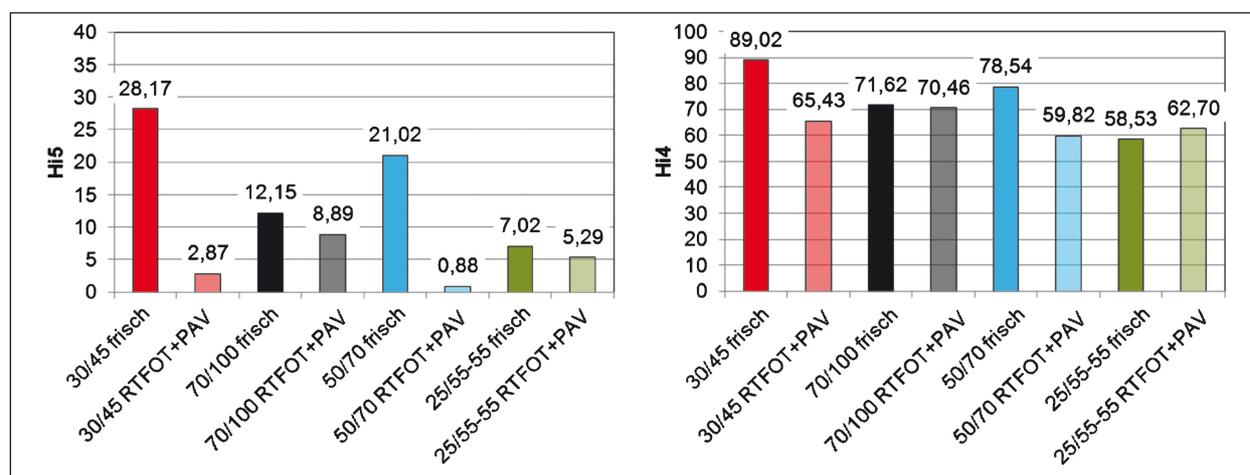


Bild 179: Healing-Index Hi4 (links) und Healing-Index Hi5 (rechts) für Straßenbaubitumen 30/45 (rot), 70/100 (schwarz), 50/70 (blau) und Polymermodifiziertes Bitumen 25/55-55 (grün) im frischen und gealterten Zustand bei einer Prüftemperatur von 20 °C

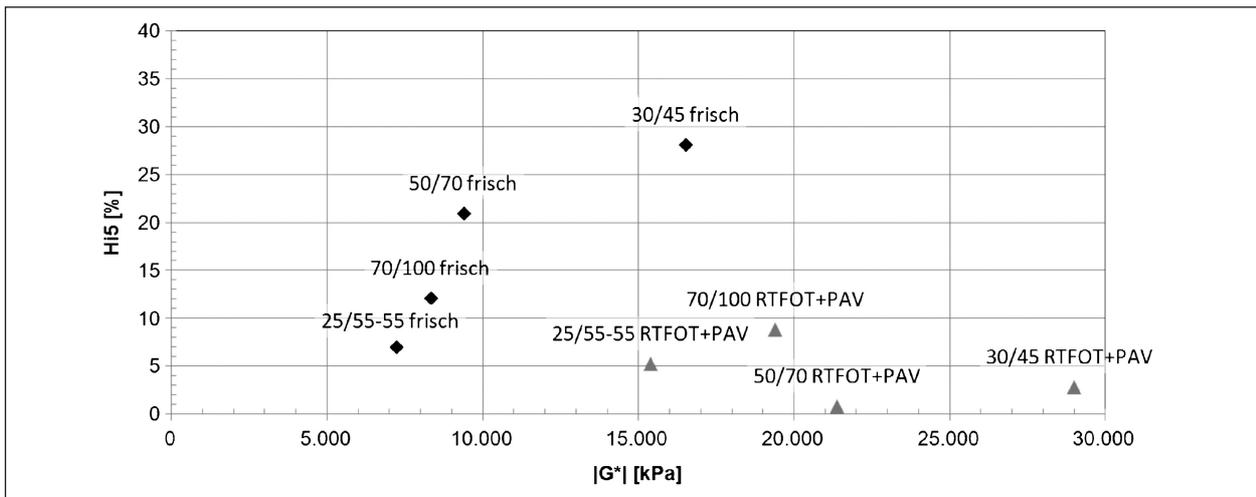


Bild 180: Healing-Index Hi5 in Abhängigkeit vom komplexen Schermodul für Straßenbaubitumen 30/45, 70/100, 50/70 und Polymermodifiziertes Bitumen 25/55-55 im frischen (schwarz) und gealterten (grau) Zustand bei einer Prüftemperatur von 20 °C und einer Prüffrequenz von 10 Hz

besseres Healing-Verhalten. Nach Alterung zeigt sich bei allen Bitumen eine deutliche Reduktion des Healing-Index Hi5, wobei die Straßenbaubitumen 50/70 und 30/40 die größte Steifigkeit und den geringsten Healing-Index Hi5 aufweisen.

Das angewendete Prüfverfahren und die Auswertemethodik weisen frischen Bitumen mit höherem komplexen Schermodul ein günstigeres Healing-Verhalten zu, welches sich nach Alterung bei Straßenbaubitumen deutlich und bei dem untersuchten PmB weniger ausgeprägt zeigt.

6.4.2 Asphalt

Die Ansprache der Healing-Eigenschaften verschiedener Asphalte erfolgte mittels kraft geregelter Zug-Druck-Wechselastprüfungen. Die wesentlichen Geräte- bzw. Prüfparameter sind in Tabelle 68 zusammengefasst. Sämtliche Ergebnisse sind in Tabelle 49 und Tabelle 50 in Kapitel 5.2.4 angegeben.

In Bild 181 sind die Ergebnisse von Hi4 und Hi5 dargestellt. Es erfolgt ein Vergleich der resultierenden Ergebnisse durch die Mischgutvariationen mit der Basisvariante aus Kapitel 5.2.4 (AC 11 D S mit Straßenbaubitumen 50/70, bei Standardverdichtung und 5,9 M.-% Bindemittelgehalt) welches in schwarz dargestellt ist.

Die Healing-Untersuchungen an Asphaltbeton AC 11 D S bzw. AC 16 B S lassen folgende Aussagen zu:

- Der größte Einfluss auf das Healing-Verhalten zeigt sich nach Alterung des Asphaltmischguts.

Die Größe von Hi5 beträgt in diesem Fall nur noch ca. 45 % des Aufgangswertes.

- Eine Abhängigkeit des Healing-Verhaltens von der Verdichtung kann nicht festgestellt werden. Sowohl bei höherer als auch bei geringerer Verdichtung zeigt sich die Größe von Hi5 nahezu unverändert.
- Durch die Zugabe von zusätzlichen 0,5 M.-% an Straßenbaubitumen 50/70 zeigt sich ein Anstieg des Healing-Index von Hi5 um ca. 25 %.
- Durch die Substitution von Straßenbaubitumen 50/70 durch Polymermodifiziertes Bitumen 25/55-55 zeigt sich eine Abnahme des Healing-Index Hi5 um 3,5 %.
- Der geprüfte Asphaltbeton AC 16 B S zeigt im Vergleich zur AC 11 D S ein stark verringertes Healing-Verhalten. Die Größe von Hi5 (5,02 %) zeigt, dass nahezu keine Selbstheilung während der Lastpause stattfindet.

Durch die Angabe von Hi4 kann gezeigt werden, dass sowohl bei der Basisvariante als auch bei variiert Verdichtung und Substitution des Bindemittels eine nahezu vollständige Materialrückstellung während der Lastpause erfolgt. Die Erhöhung des Bindemittelgehaltes zeigt ein verbessertes Materialverhalten in der zweiten Belastungsphase gegenüber der ersten Belastungsphase (Hi4 = 103,83 %). Ein Hi4 größer 100 % suggeriert dem geprüften Material bessere Materialeigenschaften nach der Lastpause als demselben Material ohne Vorbelastung.

Prüftemperatur [°C]	20	
Prüffrequenz [Hz]	10	
Probekörpergeometrie	Prisma	
Probekörperabmessung [mm]	AC 11 D S	40 x 40 x 160
	AC 16 B S	50 x 50 x 160
Lastpausenkriterium Energy Ratio [%]	50	
Lastpausendauer [s]	1.000	
Anzahl Lastpausen [-]	1	
Spannungsamplitude [MPa]	AC 11 D S	1,05
	AC 16 B S	0,70

Tab. 68: Geräte- und Prüfparameter für Healing-Prüfungen mittels Zug-Druck-Wechselastprüfung

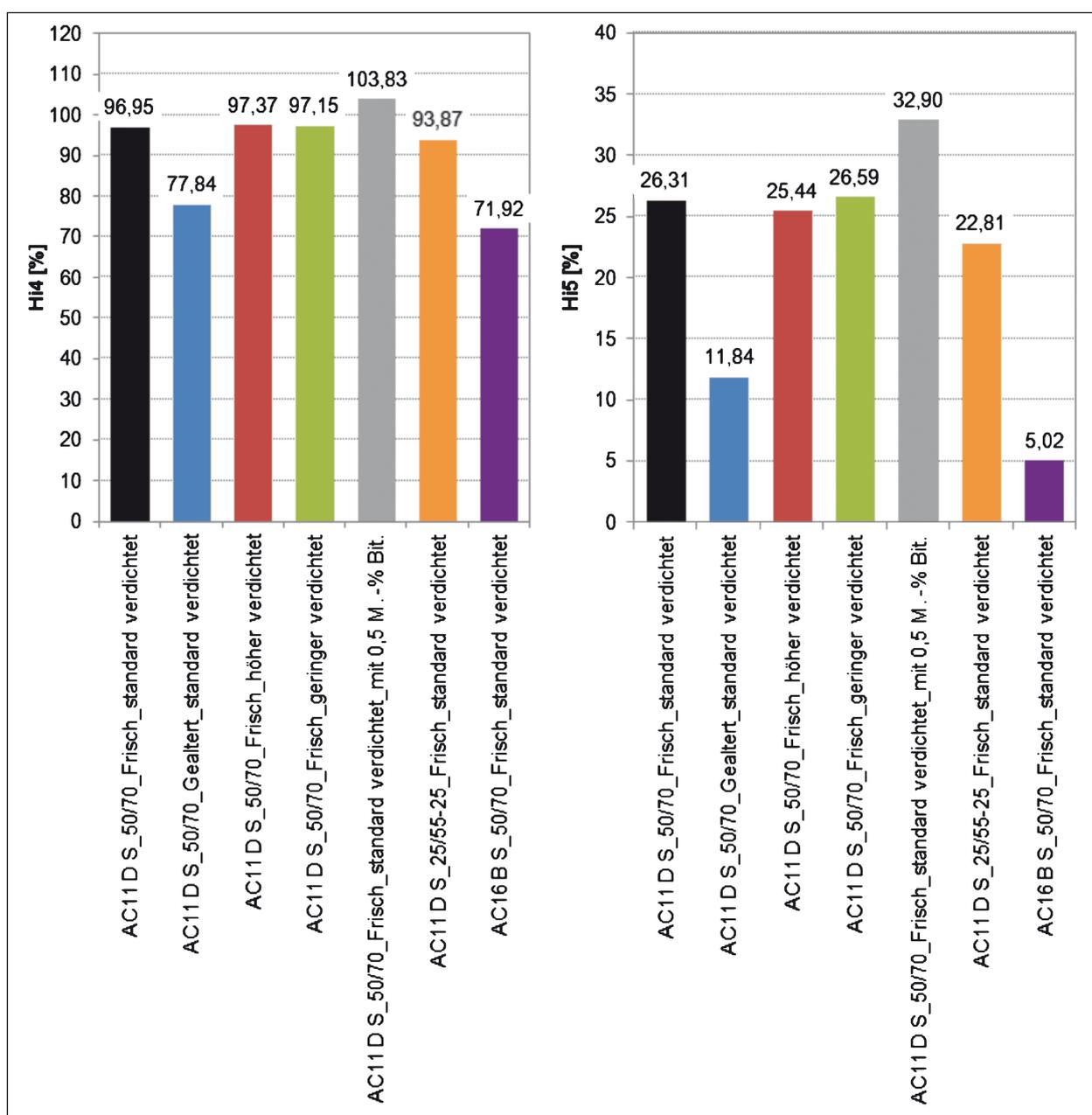


Bild 181: Healing-Index Hi4 (links) und Hi5 (rechts) für verschiedene Asphaltvarianten bei 20 °C, Lastpause bei 50 % Energy Ratio und einer Lastpausendauer von 1.000 s

7 Berücksichtigung von Healing in der rechnerischen Dimensionierung

Die rechnerische Dimensionierung und die Prognose der Lebensdauer von Asphaltstraßen beruht primär auf dem Nachweis einer ausreichenden Ermüdungsfestigkeit der verwendeten Baustoffe. Die Ermüdungsfestigkeit wird im Labor geprüft. Eventuelle Selbstheilungseffekte sind bisher unberücksichtigt. Auf Grundlage der in diesem Projekt erhaltenen Ergebnisse könnte Asphalt-Healing auch bei der rechnerischen Dimensionierung Berücksichtigung finden. Ein erster Ansatz dazu wird im Folgenden, basierend auf dem derzeit gültigen Regelwerk (RDO Asphalt 09), erläutert.

7.1 Rechnerische Dimensionierung gemäß Regelwerk

7.1.1 Vorgehensweise

Auf Grundlage der Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung des Oberbaus von Verkehrsflächen mit Asphaltdeckschicht (RDO Asphalt 09) können Asphaltoberbauten rechnerisch dimensioniert werden – alternativ zur empirischen Festlegung von Standardaufbauten gemäß den RStO 12. Das Ablaufschema der Dimensionierungsrechnung ist in Bild 182 dargestellt.

Der im Rahmen der rechnerischen Dimensionierung gemäß RDO Asphalt 09 durchzuführende rechnerische Nachweis des Ermüdungsverhaltens der Asphalttragschicht beruht auf einer Begrenzung der Biegezug-Beanspruchung an der Unterseite der Asphalttragschicht.

Zur Berechnung der maßgebenden Dehnungen bzw. Spannungen an der Unterseite der Asphalttragschicht wird die linear-elastische Mehrschichtentheorie angewendet. Dazu wird der Fahrbahnoberbau in homogene Schichten eingeteilt. Jede Schicht wird beschrieben durch die Eigenschaften Dicke, E-Modul, Querdehnzahl und Verbund zu der darunter liegenden Schicht. Die unterste Schicht eines Mehrschichtensystems wird mit einem als Halbraum definierten Untergrund festgelegt. Für die Berechnung der auftretenden Beanspruchungen aus der Verkehrslast wird im Modell die Radlast durch eine runde, auf der Oberfläche vertikal angreifende Flächenlast (Topflast) angenähert.

Zur Berücksichtigung der jeweiligen temperaturabhängigen Steifigkeit der Asphalt-schichten werden 13 Temperaturklassen berücksichtigt, die die statistische Verteilung der Asphaltoberflächentemperaturen im Jahresverlauf repräsentieren. Der Temperaturverlauf im Asphalt wird anhand einer Regressionsformel berechnet. Jeder im Mehrschichten-Modell definierten Asphalt-schicht bzw. -lage kann so eine Temperatur zugeordnet werden, anhand derer der entsprechende E-Modul der Schicht abgeleitet werden kann.

Die Temperatur-Steifigkeitsfunktion wird je Asphaltmischgut mittels Laborprüfungen bestimmt (s. u.).

Zur Berücksichtigung der unterschiedlichen Achslasten im Fahrzeugkollektiv werden bis zu 11 Achslastklassen definiert, deren Anteil am Gesamtverkehr in Abhängigkeit der Straßenklasse definiert ist.

Über die angestrebte Lebensdauer und das durchschnittliche tägliche Verkehrsaufkommen des Schwerverkehrs wird die Anzahl an Achsübergängen prognostiziert, die innerhalb der definierten, theoretischen Lebensdauer zu erwarten sind.

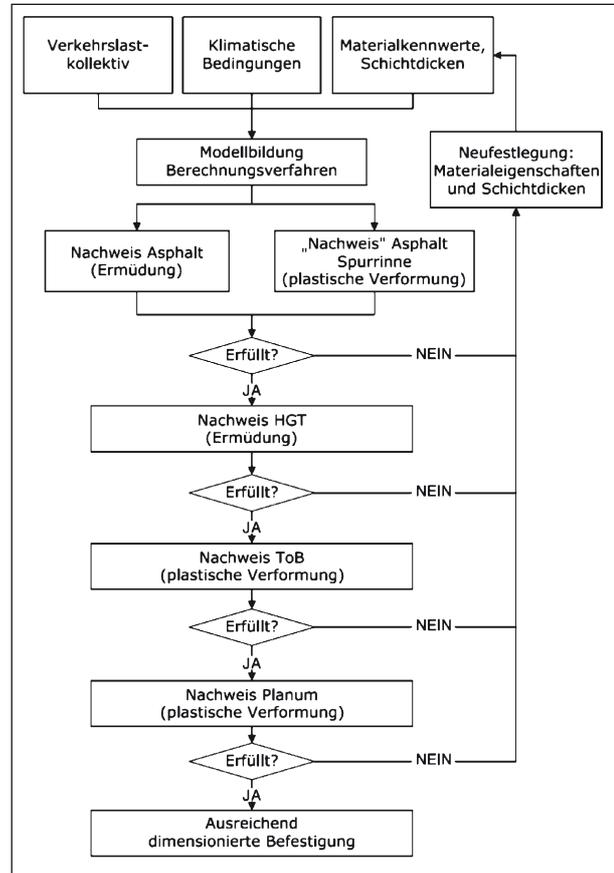


Bild 182: Ablaufschema zur rechnerischen Dimensionierung von Asphaltbefestigungen gemäß Regelwerk (RDO Asphalt 09)

Es ergeben sich insgesamt 143 einzelne Mehrschichten-Modelle bzw. Bemessungsfälle. Für jeden einzelnen Fall sind die Primärwirkungen an der Unterseite der Asphalttragschicht zu berechnen.

7.1.2 Ermittlung der Steifigkeits- und Ermüdungsfunktion

Zur Bestimmung des Steifigkeits- und Ermüdungsverhaltens wird der Spaltzug-Schwellversuch herangezogen (AL Sp-Asphalt 09). Dabei wird in einen zylindrischen Asphalt-Probekörper über zwei auf der Mantelfläche diametral gegenüberliegende Lasteintragungsschienen eine sinusförmige Druck-Schwellbelastung eingebracht.

Zur Lagesicherung des Asphalt-Probekörpers wird beim Steifigkeitsversuch eine Unterspannung mit $\sigma_u = 0,035$ MPa angelegt, während die auf den Asphalt-Probekörper aufgebrauchte Oberspannung σ_o so gewählt wird, dass die resultierenden elastischen horizontalen Dehnungen ε_{el} zwischen 50 und 100 $\mu\text{m/m}$ liegen.

Die Spaltzug-Schwellversuche werden mittels Temperatur-Frequenz-Sweeps durchgeführt. Die Ergebnisse sind die Steifigkeitsmodul-Frequenzfunktion in Form der Isothermen-Darstellung und die daraus ermittelte Master-Curve.

Zur Ermittlung der Ermüdungsfunktion werden 3 unterschiedliche Oberspannungen so gewählt, dass die anfänglichen elastischen Anfangsdehnungen im Bereich von 0,05 bis 0,30 ‰ sowie die Lastwechselzahlen bis zum Erreichen des Ermüdungskriteriums (Abfall des Steifigkeitsmoduls um 50 %) zwischen 103 und 106 Lastwechseln liegen. Die Ergebnisse der Ermüdungsversuche sind die Ermüdungslastwechselzahl und die materialspezifische Ermüdungsfunktion.

Anhand der mit Spaltzug-Schwellversuchen an Asphalttragschichtmaterial ermittelten Ermüdungsfunktion wird die für jede berechnete Dehnung aus dem Berechnungsmodell ertragbare zulässige Lastwechselzahl ($zulN$) abgeleitet, wobei zusätzliche Korrekturfaktoren Berücksichtigung finden:

$$zulN = \frac{SF}{F} \cdot a \cdot \varepsilon^k \quad \text{Gl. 21}$$

zul N zul. Lastwechselzahl bis zur Rissentstehung in der Asphalttragschicht [-]

- a Materialkennwert, durch Regression bestimmt [-]
- ε elastische Anfangsdehnung (nach dem 100. Lastzyklus) [$\mu\text{m/m}$]
- k Materialkennwert, durch Regression bestimmt [-]
- SF Shift-Faktor, für den Spaltzug-Schwellversuch gem. RDO gilt $SF = 1.500$ [-]
- F Sicherheitsbeiwert gem. RDO [-]

Im Regelfall versagt ein Asphalt-Probekörper in der Laborprüfung wesentlich früher als in situ. Dies ist auf die von der Realität abweichenden Randbedingungen im Laborprüfung zurückzuführen, wie beispielsweise das Fehlen von Lastpausen. Daher werden die im Labor ermittelten Ermüdungsfunktionen durch den Shift-Faktoren korrigiert. Für den Spaltzug-Schwellversuch gilt ein Shift-Faktor von 1.500, wenn die in der rechnerischen Dimensionierung erhaltenen Schichtdickenwerte für einen festgelegten Referenzasphalt jenen der empirisch festgelegten Standardaufbauten gemäß RStO 09 entsprechen sollen. Bei Annahme eines Sicherheitsbeiwertes von 1,0 können somit Dehnungsbeanspruchungen in der Praxis 1.500-mal öfter ertragen werden als im Spaltzug-Schwellversuch festgestellt (Bild 183).

Für den Ermüdungsnachweis wird von der Hypothese nach Miner ausgegangen, demzufolge werden die bei unterschiedlichen Primärwirkungen ertragenen Lastwechsel berücksichtigt und zur Grenzlastwechselzahl akkumuliert:

$$\sum_{\text{MINER}} = \frac{\text{vorh } N_a}{\text{zul } N_a} + \frac{\text{vorh } N_b}{\text{zul } N_b} + \frac{\text{vorh } N_c}{\text{zul } N_c} + \dots$$

$$+ \frac{\text{vorh } N_n}{\text{zul } N_n} = \sum \frac{\text{vorh } N_i}{\text{zul } N_i} \leq 1 \quad \text{Gl. 22}$$

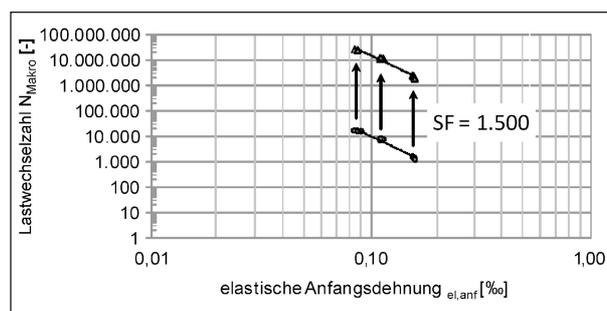


Bild 183: Beispiel für eine Verschiebung der Wöhlerlinie mittels Shift-Faktor SF zur Berücksichtigung der Abweichung von Laborergebnissen zum empirischen Ermüdungsverhalten einer Straßenbefestigung

Der Nachweis der Ermüdungsresistenz der Befestigung gilt als erfüllt, solange die Summe der Quotienten kleiner bzw. gleich 1 ist.

7.2 Korrektur der Ermüdungsfunktion

Die Healing-Eigenschaften von Asphalt können – wie in diesem Projekt nachgewiesen – mittels Ermüdungsprüfungen angesprochen werden, in denen die Belastungsphasen mit Lastpausen unterbrochen sind.

Bereits früher haben LEUTNER et al. (2006) anhand von Spaltzug-Schwellversuchen mit Lastpausen zeigen können, dass die resultierende Wöhlerlinie mit zunehmender Lastpausendauer im Ermüdungsdiagramm verändert wird (näherungsweise parallel nach oben verschoben).

Bild 184 zeigt Ergebnisse für Lastpausen zwischen 0,1 und 1,5 s für ein Asphalttragschichtmischgut AC 22 T. Je länger die Lastpause ist, umso höher ist die ertragbare Lastwechselzahl.

Die vorteilhafte Veränderung der Wöhlerlinie zufolge der Berücksichtigung von Lastpausen in der Ermüdungsprüfung kann zur Korrektur der Ermüdungsprognose und damit zur Steigerung der Genauigkeit der rechnerischen Dimensionierung herangezogen werden.

Gemäß der Veränderung der Wöhlerlinie als Funktion der Lastpausendauer muss der Shift-Faktor SF

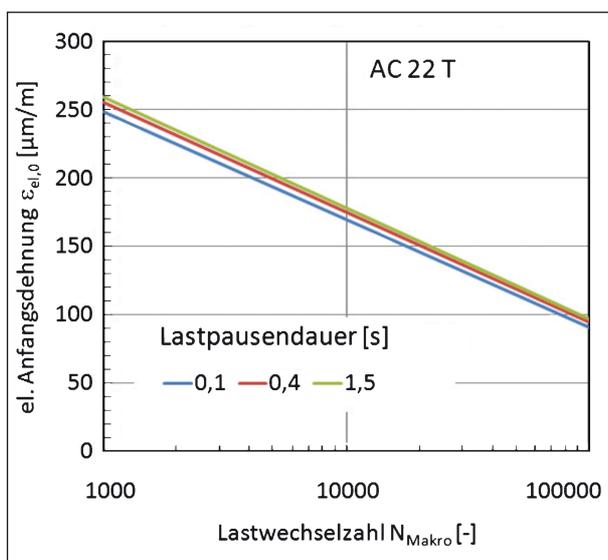


Bild 184: In Spaltzug-Schwellversuchen ($T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$) ermittelte Ermüdungsfunktionen bei Variation der Lastpause zwischen den einzelnen Lastimpulsen (LEUTNER et al., 2006)

(siehe Gleichung 21) angepasst werden, wie auch WEISE (2012) festhält.

Zur Festlegung der um die Healing-Eigenschaften korrigierten Shift-Faktoren sind in weiterführenden Arbeiten systematische Reihenuntersuchungen an verschiedenen Asphalt-Rezepturen notwendig. Die Initiierung eines entsprechenden Forschungsprojekts wird angeregt.

Es ist bekannt, dass der Spaltzug-Schwellversuch aufgrund seiner Prüfanordnung zur Ansprache des Ermüdungsverhaltens von Asphalt unvorteilhaft ist, weil Schädigungsanteile zufolge Materialermüdung durch dominante Schädigungsanteile zufolge irreversibler plastischer Verformung überproportional überlagert sind (vgl. Di BENEDETTO et al., 2004; Di BENEDETTO, 2013). Daher ist der Spaltzug-Schwellversuch auch hinsichtlich der Berücksichtigung und Beurteilung von Healing-Eigenschaften unterschiedlicher Asphaltrezepturen wenig geeignet. In weiterführenden Arbeiten ist daher zu klären, ob die Änderung des Shift-Faktors nach Berücksichtigung der Healing-Eigenschaften in gleicher Weise für unterschiedliche Typen von Ermüdungsprüfungen gilt. Insbesondere ist zu untersuchen, ob bei Wahl eines anderen Typs der Ermüdungsprüfung – abweichend zum Spaltzug-Schwellversuch – näherungsweise gleiche Gesetzmäßigkeiten gelten. Gegebenenfalls ist der Shift-Faktor an die Ergebnisse aus aussagekräftigeren Ermüdungsprüfungen anzupassen.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Der Straßenbaustoff Asphalt ist unter bestimmten Voraussetzungen in der Lage, während Erholungsphasen eine bereits eingetretene Strukturschädigung selbsttätig zum Teil oder vollständig zurückzubilden und so eine Regeneration des Baustoffs zu bewirken. Man spricht von Selbstheilungs- oder Healing-Eigenschaften.

Der Selbstheilungsmechanismus oder Healing-Effekt beruht auf einer Rückführung des Schädigungsprozesses ohne äußere mechanische oder thermische Einwirkungen. Er wird durch die rheologischen Eigenschaften des Bindemittels Bitumen ermöglicht. Innere Fließvorgänge der Mastix (Bitumen-Füller-Gemisch) bewirken ein Verschließen von vorhandenen Mikrorissen, die typischerweise in Folge von Materialermüdung entstanden sind

(nicht Verformung). In der Folge verändern sich Zusammenhalt, Festigkeit und Tragfähigkeit des Asphalts vorteilhaft.

Heilung von im Asphalt aufgetretenen Rissen ist vermutlich eine von mehreren Ursachen dafür, dass die in der Praxis an Asphaltstraßen beobachtete tatsächliche Schädigungsentwicklung deutlich langsamer verläuft, als dies die Ergebnisse von kontinuierlichen Ermüdungsprüfungen an Asphaltprobekörpern im Labor zeigen. Es wird davon ausgegangen, dass in der Realität das Lebensdauerende erst bei einer Lastwechselzahl eintritt, welche die prüftechnisch ertragbare Lastwechselzahl bei weitem übertrifft.

Für eine Steigerung der Dauerhaftigkeit von Straßenbauasphalten wäre es von großem Nutzen, die Healing-Eigenschaften von Bitumen und Asphalt kontrollieren bzw. stimulieren zu können. So könnten etwa bestimmte Baustoffe und Baustoffkomponenten gezielt ausgewählt werden, um die Healing-Eigenschaften zu begünstigen.

Eine systematische Untersuchung der Healing-Eigenschaften von Bitumen und Asphalt sowie geeignete Verfahren zu ihrer prüftechnischen Ansprache waren bisher nicht bekannt. Ziel des Forschungsprojekts war es, zu klären, ob und mit welchen Prüf- und Auswertemethoden die Healing-Eigenschaften von Straßenbauasphalten im Labor angesprochen werden können.

Mit dieser Arbeit werden erstmals Ergebnisse aus systematisch variierten Reihenuntersuchungen zu den Selbstheilungskräften von Bitumen und Asphalt vorgestellt. Rund 500 Bitumenprüfungen wurden an Straßenbaubitumen 30/45, 50/70 und 70/100 und an Polymermodifiziertem Bitumen 25/55-55 durchgeführt sowie rund 280 Asphaltprüfungen an den Asphaltbeton-Sorten AC 11 D S und AC 16 B S.

Es wurden statische und zyklisch-dynamische Laborprüfungen mit Lastpausen (Erholungsphasen) zwischen den Belastungszyklen erprobt. Dabei konnte gezeigt werden, dass die bekannten Prüfverfahren zur Ansprache von Ermüdungseigenschaften prinzipiell auch zur Ansprache von Healing-Eigenschaften geeignet sind.

Mittels Reihenuntersuchungen wurden die Prüfbedingungen, welche die Healing-Eigenschaften beeinflussen, systematisch analysiert. Die Bitumen- bzw. Asphaltproben wurden im frischen und gealterten Zustand geprüft, unter Variation der

Regelungsart (Kraft- und Wegregelung), der Prüftemperatur, der Lastpausendauer und des Zeitpunktes der Lastpause. Ferner wurden bei den zyklisch-dynamischen Asphaltprüfungen die Prüfgeometrie (einaxiale Beanspruchung, Biegebeanspruchung, indirekte Zugbeanspruchung), die Belastungsart (Zug-Druck-Wechselast und Zug-Schwellbeanspruchung), die Lagerungsart (gelenkig und starr) sowie die Mischgut- und Probekorpereigenschaften (Bindemittelgehalt, Alterungszustand, Verdichtungszustand, Querschnittsfläche) variiert.

Asphalt heilt besser, je länger die Lastpause ist, je höher die Prüftemperatur ist, je später die Lastpause einsetzt, je höher der Bindemittelgehalt ist und je öfter die Möglichkeit zur Erholung besteht. Die Verdichtungsintensität stellte sich als unkritisch gegenüber der Selbstheilung dar.

Nach Alterung und bei geringerer Prüftemperatur zeigt sich ein stark verringertes Selbstheilungsvermögen. Analog wurde bezüglich des Selbstheilungsverhaltens von Bitumen festgestellt, dass frisches Bitumen mit hoher Viskosität die besten Heilungseigenschaften aufweist. Auch hier reduziert die Alterung (RTFOT+PAV) das Selbstheilungsvermögen deutlich.

Nach Substitution von Straßenbaubitumen 50/70 mit Polymermodifiziertem Bitumen 25/55-55 wurde keine signifikante Änderung im Healing-Verhalten festgestellt. Allerdings reichen die in diesem Projekt durchgeführten Untersuchungen nicht aus, um eine gesicherte Aussage zur Änderung des Healing-Verhaltens infolge der Zugabe von Polymeren treffen zu können. Dazu sind fortführende Untersuchungen mit Polymermodifizierten Bitumen und deren Basisbitumen notwendig.

An einigen Proben wurde festgestellt, dass durch Beanspruchung und Lastpause die ursprünglichen Materialeigenschaften verbessert wurden. In diesen Fällen ist jeweils die dissipierte Energie zu Beginn der zweiten Belastungsphase (nach der Lastpause) deutlich geringer als zu Beginn der ersten Belastungsphase. Zudem zeigt sich eine langsamere Zunahme der elastischen Verformung zu Beginn der zweiten Belastungsphase. Als Ursache für diesen „Overhealing“-Effekt werden Materialumlagerungen während der ersten Belastungsphase vermutet, welche sich mit Selbstheilungseffekten während der Lastpause überlagern.

Die kraftgeregelte Zug-Druck-Wechselastprüfung an Asphaltprobekörpern zeigte die geringste Prüfstreuung im Ermüdungsverlauf und erwies sich als besonders gut geeignet zur Prüfung von Healing-Eigenschaften von Asphalt. Bei weggeregelter Belastungsart ist die Vier-Punkt-Biegeprüfung gut geeignet – unter der Voraussetzung einer zwangungsfreien Probekörperlagerung während der gesamten Versuchsdurchführung (gemäß Europäischer Prüfnorm). Der Spaltzug-Schwellversuch ist für Untersuchungen zum Ermüdungs- und Healing-Verhalten von Asphalt unvorteilhaft.

Zur Bewertung der Prüfergebnisse wurden neben herkömmlichen Auswerteparametern gänzlich neue Healing-Indices erprobt. Es wurde nachgewiesen, dass die aus der Literatur bisher bekannten Healing-Indices durch die Inhomogenität von Asphalt und durch die damit einhergehende Prüfstreuung bei dynamischer Beanspruchung beeinflusst werden. Daher sind die bisher bekannten Healing-Indices als Kenngrößen zur Bewertung des Healing-Verhaltens wenig geeignet.

Basierend auf dem Nachweis, dass sich die Kurvenverläufe der relativen Steifigkeit und der relativen dissipierten Energie in Form der relativen Energy Ratio in Abhängigkeit der Lastwechsel auch bei großer Prüfstreuung nahezu gleich verhalten, wurde eine neue Auswertemethodik entwickelt, die eine Beurteilung des Healing-Verhaltens an einem einzigen Asphaltprobekörper nach Durchführung einer Ermüdungsprüfung erlaubt. Dies ist von entscheidendem Vorteil, weil sich zwei verdichtete Probekörper aus dem gleichen Asphaltmischgut aufgrund der Inhomogenität des Materials sowohl in ihrem Ermüdungs- als auch im Healing-Verhalten deutlich voneinander unterscheiden können.

In der Arbeit werden schließlich zwei neue, sehr aussagekräftige Healing-Indices vorgestellt. Der Healing-Index Hi4 beschreibt die Veränderung der Ermüdungseigenschaften infolge einer Lastpause. Der Healing-Index Hi5 beschreibt den Gewinn an dissipierter Energie in Form der Energy Ratio in Abhängigkeit der Lastpause.

Zusammenfassend können folgende Laborprüfungen zur Ansprache der Healing-Eigenschaften von Bitumen und Asphalt empfohlen werden: Die Healing-Eigenschaften von Bitumen werden bestmöglich angesprochen durch

- das Prüfverfahren mit dem Dynamischen Scherrheometer (DSR),

- unter kraftgeregelter Beanspruchung,
- mit einer Messgeometrie von 8 mm,
- bei gemäßigter Prüftemperatur (empfohlen: $T = 20 \text{ °C}$),
- mittels einer einzigen Lastpause nach einer Belastungsphase mit kontinuierlicher Belastung,
- bei Einsetzen der Lastpause nach ausreichender Materialschädigung (empfohlen: 50 % der maximalen Energy Ratio),
- mit einer hinreichend langen Lastpausendauer (empfohlen: 600 Sekunden) und
- mit Auswertung der Healing-Indices Hi4 und Hi5.

Die Healing-Eigenschaften von Asphalt werden bestmöglich angesprochen durch

- eine zyklisch-dynamische einaxiale Zug-Druck-Wechselastprüfung,
- unter kraftgeregelter Beanspruchung,
- bei gemäßigter Prüftemperatur (empfohlen: $T = 20 \text{ °C}$),
- einer einzigen Lastpause nach kontinuierlicher Belastung,
- mittels einer einzigen Lastpause nach einer Belastungsphase mit kontinuierlicher Belastung,
- bei Einsetzen der Lastpause nach ausreichender Materialschädigung (empfohlen: 50 % der maximalen Energy Ratio),
- mit einer hinreichend langen Lastpausendauer innerhalb der sich der Asphaltprobekörper elastisch und teilweise viskos rückverformen kann (empfohlen: 1.000 Sekunden) und
- mit Auswertung der Healing-Indices Hi4 und Hi5.

Abschließend wird ein Konzept zur Berücksichtigung der materialspezifischen Healing-Eigenschaften im Rahmen der rechnerischen Dimensionierung vorgestellt. Es beruht auf materialabhängigen, um die Healing-Eigenschaften korrigierten Shift-Faktoren. Für die Weiterentwicklung der rechnerischen Dimensionierung wird empfohlen, die Ermüdungsprüfung mit Untersuchungen zum Healing-Verhalten zu ergänzen. Folglich könnte bei der rechnerischen Dimensionierung ein modifiziertes Materialgesetz verwendet werden, welches auch die materialspezifischen Healing-Eigenschaften abbildet.

9 Literatur

- BHASIN, A.; NARAYAN, A. & LITTLE, D. (2009): Laboratory Investigation of a Novel Method to Accelerate Healing in Asphalt Mixtures Using Thermal Treatment. Research report SWUTC/09/476660-00005-1, University of Texas, Austin
- BODIN, D.; SOENEN, H. & de la ROCHE, C. (2004): Temperature effects in binder fatigue and healing tests. Proc., 3rd Eurasphalt and Eurobitume Congress 2004, Vienna, Vol. II, pp. 1996-2004
- BREYSSE, D.; de la ROCHE, C.; DOMEQ, V. & CHAUVIN, J. J. (2003): Influence of rest time on recovery and damage during fatigue tests on bituminous composites. Proc., 6th RILEM Symposium On Performance Testing and Evaluation of Bituminous Materials PTEBM 2003, Zürich, pp. 416-423
- BUDDRUS, J. (2003): Grundlagen der Organischen Chemie. 3. überarbeitete und aktualisierte Auflage, de GRUYTER, W., Berlin, New York
- CARPENTER, S. H. & SHEN, S. (2006): Dissipated energy approach to study hot-mix asphalt healing in fatigue. Transportation Research Record, No. 1790, pp. 178-185, Washington D.C.
- CASTRO, M. & SÁNCHEZ, J. A. (2006): Fatigue and healing of asphalt mixtures: Discriminate analysis of fatigue curves. Journal Of Transportation Engineering, 132, No. 2/2006, pp. 168-174
- DANIEL, J. S. (1996): Rate Dependent Stiffness of Asphalt Concrete used for Field to Laboratory prediction and Fatigue and Healing Evaluation. MSc-Thesis, North Carolina State University, Raleigh
- Di BENEDETTO H.; de la ROCHE, C.; BAAJ, H.; PRONK, A. & LUNDSTRÖM, R. (2004): Fatigue of bituminous mixtures – RILEM TC 182-PEB “Performance testing and evaluation of bituminous materials”. Materials and Structures, Vol. 37, pp. 202-216
- Di BENEDETTO, H. (2013): Fatigue and other phenomena during cyclic loading of bituminous materials. Keynote, 5th Int. Conference of the European Asphalt Technology Association (EATA), June 4th, 2013, Braunschweig, Germany
- Di BENEDETTO, H.; NGUYEN, Q. T. & SAUZÉAT, C. (2011): Nonlinearity, Heating, Fatigue and Thixotropy during Cyclic Loading of Asphalt Mixtures. Journal of Road Materials and Pavement Design, Vol. 12, No. 1/2011, pp. 129-158
- DIN EN 13589. (2008): Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung der Streckeigenschaften von modifiziertem Bitumen mit dem Kraft-Duktilitäts-Verfahren. Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin
- ERKENS, S.; van VLIET, D.; van DOMMELEN, A. & LEEGWATER, G. A. (2012): Determining the Healing Potential of Asphalt Concrete Mixtures – A Pragmatic Approach. Proc., 7th RILEM Int. Conf. On Cracking in Pavements, June 20-22, 2012, Delft
- FE 06.0090/2008/DGB: Einfluss der feinen Gesteinskörnungen und des Asphaltmörtels auf die Gebrauchseigenschaften von Asphalt. Forschungsprojekt i. A. des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Institut für Straßenwesen, TU Braunschweig. Nicht veröffentlicht
- FGSV (2012): Arbeitsanleitung zur Bestimmung des Verformungsverhaltens von Bitumen und bitumenhaltigen Bindemitteln im Dynamischen Scherrheometer (DSR) – Durchführung der MSCR-Prüfung (Multiple Stress Creep and Recovery Test). Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V., Köln
- HESSE, M.; MEIER, H. & ZEEH, B. (2012): Spektroskopische Methoden in der organischen Chemie. 8. überarbeitete und erweiterte Auflage, Georg Thieme Verlag, Stuttgart, New York
- HOPMAN, P.; KUNST, P. & PRONK, A. (1989): A Renewed Interpretation Model for Fatigue Measurement. Verification of Miner’s Rule. 4th Eurobitumen Symposium, 4th October, 1989, Madrid, Spain
- KIM, B. & ROQUE, R. (2006): Evaluation of healing property of asphalt mixtures. Transportation Research Record, No. 1790, pp. 84-91, Washington D.C.

- KIM, Y. & KIM, Y. R. (1997): In situ evaluation of fatigue damage growth and healing of asphalt concrete pavements using stress wave method. *Transportation Research Record*, No. 1568, pp. 106-113, Washington D.C.
- LEHMANN, T. (2010): IR- Spektroskopie (Infrarotspektroskopie). Institut für Chemie und Biochemie der FU Berlin, Zugriff: 29.10.2012. user.page.chemie.fu-berlin.de/~tlehmann/gp/ir.pdf
- LEUTNER, R.; LORENZL, H.; SCHMOECKEL, K. (2005): Weiterentwicklung von Stoffmodellen zur Voraussage des Verformungswiderstandes und Ermüdungsverhaltens von Asphaltbefestigungen. Schlussbericht, Forschungsprojekt FE 04.187/2001/AGB i. A. des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Institut für Straßenwesen, TU Braunschweig
- LEUTNER, R.; LORENZL, H.; SCHMOECKEL, K.; DONATH, J.; BALD, S.; GRÄTZ, B.; RIEDL, S.; MÖLLER, B.; OESER, M.; WELLNER, F.; WERKMEISTER, S.; LEYKAUF, G. & SIMON, C. (2006): Stoffmodelle zur Voraussage des Verformungswiderstandes und Ermüdungsverhaltens von Asphaltbefestigungen. *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen – Straßenbau*, Heft S45, Wirtschaftsverlag NW, Bergisch Gladbach
- LITTLE, D. N.; LYTTON, R. L.; WILLIAMS, D. & KIM, Y. R. (1999): An analysis of the mechanism of microdamage healing based on the application of micromechanics first principles of fracture and healing. *Asphalt Paving Technology*, 1999, pp. 501-537. Chicago
- LITTLE, D. N.; LYTTON, R. L.; WILLIAMS, D. & CHEN, C. W. (2001): Microdamage Healing in Asphalt and Asphalt Concrete, Volume 1 Microdamage and Microdamage Healing. Project Summary Report FHWA-RD-98-141, Texas Transportation Institute, Texas
- MAILLAD, S.; de la ROCHE, C.; HAMMOUM, F.; GAILLET, L. & SUCH, C. (2004): Experimental investigation of fracture and healing of bitumen at pseudo-contact of two aggregates. *Proc., 3rd Eurasphalt & Eurobitume Congress 2004*, Vienna, Vol. II, pp. 1291-1304
- MOLLENHAUER, K. & WISTUBA, M. (2009): Fatigue effects in uniaxial cyclic tensile stress test: The link between stiffness decrease and accumulation of irreversible strain. *Proc., 7th Int. RILEM Symposium on Advanced Testing and Characterization of Bituminous Materials*, Vol. 2, May 27-29, 2009, Rhodes, Greece, pp. 715-724
- MOLLENHAUER, K. (2008): Dimensionierungsrelevante Prognose des Ermüdungsverhaltens von Asphalt mittels Einaxialer Zug-Schwellversuche. *Schriftenreihe Straßenwesen*, Heft 21, 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
- SANTAGATA, E.; BAGLIERI, O.; DALMAZZO, D. & TSANTILIS (2009): Rheological and chemical investigation on the damage and healing properties of bituminous binders. *Journal of the association of asphalt paving technologists*, 78, pp. 567-596
- SETZ, P. (2005): Infrarotspektroskopie mit modernen FT-IR Spektrometern. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
- Van DIJK, W. (1975): Practical fatigue characterization of bituminous mixes. *Association of Asphalt Paving Technologists, Annual Meeting*, Phoenix, USA
- Van den BERGH, W. & van der VEN, M. F. C. (2012): The Effect of Ageing on the Fatigue and Healing Properties of Bituminous Mortars. *SIIV – 5th International Congress-Sustainability of Road Infrastructures*, 29-31 October, Rome, Italy
- WISTUBA, M. & ALISOV, A. (2013): Laboratory production of asphalt specimens – Influence of compaction mode on resistance to permanent deformation. *Proc., 5th Int. Conference of the European Asphalt Technology Association (EATA)*, 3-5 June 2013, Braunschweig, Germany
- WISTUBA, M. & PERRET, J. (2004): Comparative strain measurement in bituminous layers with the use of alt. *Proc., 2nd Int. Conf. on*

Accelerated Pavement Testing, 25-29
September 2004, Minneapolis, Minnesota

WISTUBA, M. (2004): Analysis of strain data from
alt. Short Term Scientific Mission, COST 347
Improvements in Pavement Research with
Accelerated Load Testing, Final Report

WISTUBA, M.; BLAB, R.; LACKNER, R.; SPIEGL,
M. (2007): Consequences of increasing heavy
goods vehicle traffic on the Austrian alpine road
infrastructure. Final Report, Forschungsprojekt
i. A. der Österreichischen Akademie der
Wissenschaften

WISTUBA, M.; MOLLENHAUER, K. & WALTHER,
A. (2013): Ermittlung der Streuung dimensionie-
rungsrelevanter Eingangsgrößen für Asphalte.
Schlussbericht, Forschungsprojekt FE 04.0204/
2006/AGB i. A. des Bundesministeriums für Ver-
kehr, Bau und Stadtentwicklung, Institut für Stra-
ßenwesen, Technische Universität Braun-
schweig, erschienen in: Forschung Straßenbau
und Straßenverkehrstechnik, Heft 1087

WISTUBA, M.; MOLLENHAUER, K. & WALTHER,
A. (2013): Scatter of asphalt mix characteristics
and its effect on design life. Proc., 5th Int.
Conference of the European Asphalt Technology
Association (EATA), 3-5 June 2013, Braun-
schweig, Germany

WISTUBA, M.; MONISMITH, C.; BAHIA, H. U.;
RENKEN, P.; OLARD, F.; BLAB, R.; MOLLEN-
HAUER, 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

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Straßenbau“

2008

S 49: Zweischichtiger offenporiger Asphalt in Kompaktbauweise
Ripke € 12,50

S 50: Finanzierung des Fernstraßenbaus – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitsausschusses „Straßenrecht“ der FGSV am 25./26. September 2006 in Tecklenburg-Leeden € 15,50

S 51: Entwicklung eines Prüfverfahrens zur Bestimmung der Haftfestigkeit von Straßenmarkierungsfolien
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Killing, Hirsch € 14,50

S 52: Statistische Analyse der Bitumenqualität aufgrund von Erhebungen in den Jahren 2000 bis 2005
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Hirsch € 16,00

S 53: Straßenrecht und Föderalismus – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises „Straßenrecht“ am 24./25. September 2007 in Bonn € 15,50

S 54: Entwicklung langlebiger dünner Deckschichten aus Beton
Silwa, Roßbach, Wenzl € 12,50

S 55: Dicke Betondecke auf Schichten ohne Bindemittel (SoB/STSüB)
Leykauf, Birmann, Weller € 13,50

2009

S 56: Vergangenheit und Zukunft der deutschen Straßenverwaltung – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises „Straßenrecht“ am 22./23. September 2008 in Bonn € 14,00

S 57: Vergleichende Untersuchung zweischichtiger offenporiger Asphaltbauweisen
Ripke € 13,50

S 58: Entwicklung und Untersuchung von langlebigen Deckschichten aus Asphalt
Ludwig € 15,50

S 59: Bestimmung des adhäsiven Potentials von Bitumen und Gesteinsoberflächen mit Hilfe der Kontaktwinkelmessmethode
Hirsch, Friemel-Göttlich € 16,00

2010

S 60: Die Zukunftsfähigkeit der Planfeststellung – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises „Straßenrecht“ am 21./22. September 2009 in Bonn € 15,50

S 61: Modell zur straßenbautechnischen Analyse der durch den Schwerverkehr induzierten Beanspruchung des BAB-Netzes
Wolf, Fielenbach € 16,50

S 62: 41. Erfahrungsaustausch über Erdarbeiten im Straßenbau € 18,50

S 63: Vergleichsuntersuchungen zum Frosthebungsversuch an kalkbehandelten Böden, RC-Baustoffen und industriellen Nebenprodukten
Blume € 16,00

S 64: Griffigkeitsprognose an offenporigen Asphalten (OPA)
Teil 1: Bestandsaufnahme an vorhandenen Strecken
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Rohleder, Kunz, Wasser, Pullwitt, Müller, Ripke, Zöller, Pöppel-Decker € 23,00

S 65: Untersuchungen von Dübellagen zur Optimierung des Betondeckenbaus
Freudenstein, Birmann € 14,00

2011

S 66: Qualitätssicherung von Waschbetonoberflächen
Breitenbücher, Youn € 14,50

S 67: Weiterentwicklung der automatisierten Merkmalerkennung im Rahmen des TP3
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Canzler, Winkler € 16,50

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 zwangsgemischten, 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
Hünger, 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: Längsebenheitsmesssysteme – 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, Klaproth, 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.

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