

## Ansprache und Steuerung von Healing-Effekten bei Asphalt

FA 7.251

Forschungsstelle: Technische Universität Braunschweig,  
Institut für Straßenwesen (Prof. Dr. techn.  
Dipl.-Ing. M. P. Wistuba)

Bearbeiter: Wistuba, M. P. / Alisov, A. / Isai-  
lovic, I.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Bau und  
Stadtentwicklung, Bonn

Abschluss: Dezember 2013

### 1 Aufgabenstellung

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 auftretenden 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 beziehungsweise 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.

### 2 Untersuchungsmethodik

Es wurden statische und zyklisch-dynamische Laborprüfungen mit Lastpausen (Erholungsphasen) zwischen den Belastungszyklen erprobt. Dabei konnte gezeigt werden, dass die bekannt-

ten 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.

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.

Die Bitumen- beziehungsweise Asphaltproben wurden im frischen und gealterten Zustand geprüft, unter Variation der Regelungsart (Kraft- und Wegregelung), der Prüftemperatur, der Lastpausendauer und des Zeitpunkts der Lastpause. Ferner wurden bei den zyklisch-dynamischen Asphaltprüfungen die Prüfgeometrie (einaxiale Beanspruchung, Biegebeanspruchung, indirekte Zugbeanspruchung), die Belastungsart (Zug-Druck-Wechsellast und Zug-Schwell-Beanspruchung), die Lagerungsart (gelenkig und starr) sowie die Mischgut- und Probekörpereigenschaften (Bindemittelgehalt, Alterungszustand, Verdichtungszustand, Querschnittsfläche) variiert.

Zur Bewertung der Prüfergebnisse wurden zunächst herkömmliche Auswerteparameter (Healing-Indizes) untersucht. Darüber hinaus wurden zwei neue Healing-Indizes entwickelt und erprobt, basierend auf dem Nachweis, dass sich die Kurvenverläufe der Steifigkeit und der dissipierten Energie in Form der Energy Ratio in Abhängigkeit der Lastwechsel auch bei großer Prüfstreuung nahezu gleich verhalten.

Schließlich wird in der Arbeit ein Konzept vorgestellt, nach dem die materialspezifischen Healing-Eigenschaften bei der rechnerischen Dimensionierung vorteilhaft berücksichtigt werden können.

### 3 Untersuchungsergebnisse

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:  $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ),
- 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-Indizes Hi4 und Hi5 (siehe unten).

An Asphaltprobekörpern zeigte die kraftgeregelte Zug-Druck-Wechselastprüfung die geringste Prüfstreuung im Ermüdungsverlauf. 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.

Die Healing-Eigenschaften von Asphalt werden bestmöglich angesprochen durch

- eine zyklisch-dynamische einaxiale Zug-Druck-Wechselastprüfung,
- unter kraftgeregelter Beanspruchung,
- bei gemäßigter Prüftemperatur (empfohlen:  $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ),
- 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: 1000 Sekunden)
- und mit Auswertung der Healing-Indizes Hi4 und Hi5 (siehe unten).

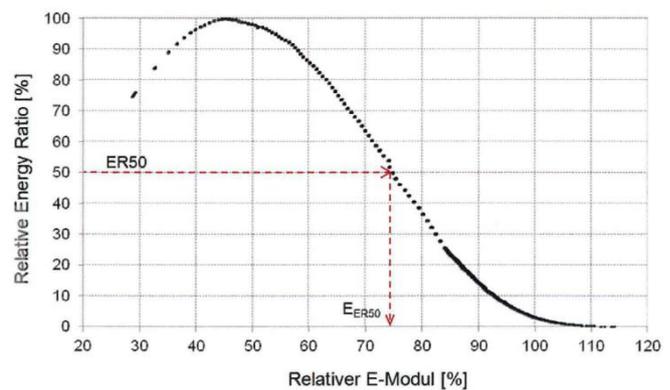
Zur Bewertung der Prüfergebnisse wurden neben herkömmlichen Auswerteparametern gänzlich neue Healing-Indizes (Hi4 und Hi5) erprobt. Es wurde nachgewiesen, dass die aus der Literatur bisher bekannten Healing-Indizes durch die Inhomogenität von Asphalt und durch die damit einhergehende Prüfstreuung bei dynamischer Beanspruchung beeinflusst werden. Daher sind die bisher bekannten Healing-Indizes als Kenngrößen zur Bewertung des Healing-Verhaltens wenig geeignet.

Es 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 zwei neue, sehr aussagekräftige Healing-Indizes vorgestellt. Der Healing-Index Hi4 beschreibt die Veränderung der Ermüdungseigenschaften infolge einer Lastpause. Der Healing-Index Hi5 beschreibt den Gewinn an dissipier-

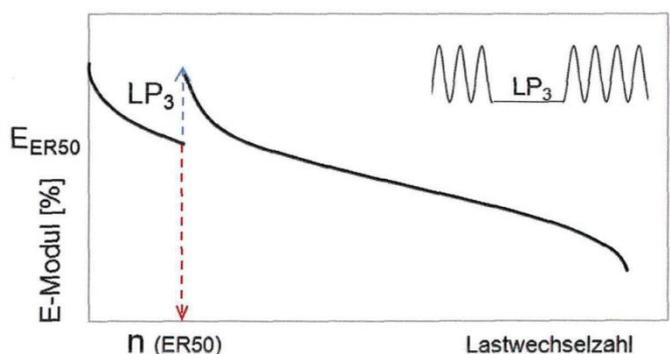
ter Energie in Form der Energy Ratio in Abhängigkeit der Lastpause.

Zur Ermittlung der Selbstheilungseigenschaften eines Materials wird zunächst eine Ermüdungsprüfung ohne Lastpause bis zum Eintritt des Ermüdungsversagens durchgeführt und die zur 50 %igen Ermüdung korrespondierende  $ER_{50}$  wird ausgewertet. Bild 1 zeigt den relativen Verlauf des E-Moduls über den relativen Verlauf der ER bei kontinuierlicher Ermüdungsprüfung. Es lässt sich der relative E-Modul bei 50 % ER ermitteln ( $E_{ER50}$ ). Es wurde gezeigt, dass sich der Verlauf des relativen E-Moduls und der relativen Energy Ratio auch bei großer Prüfstreuung nahezu gleich verhalten. Eine Belastung der Probe bis 50 % Energy Ratio kann daher sehr exakt erfolgen.



**Bild 1:** Beispiel für den Verlauf des relativen E-Moduls über die relative Energy Ratio bei kontinuierlicher Ermüdungsprüfung

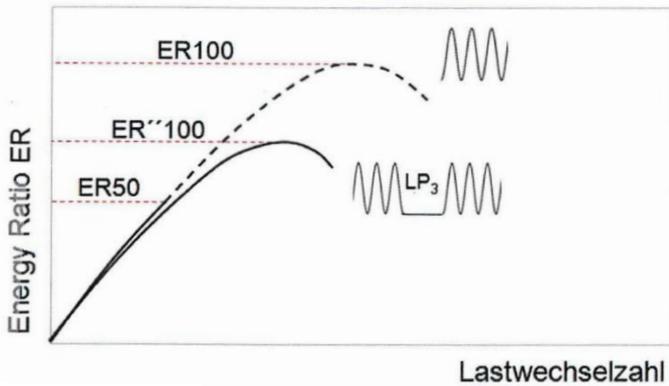
Beim zum  $ER_{50}$  korrespondierenden relativen E-Modul wird bei einem weiteren Probekörper die Ermüdungsprüfung für eine festgelegte Dauer unterbrochen, in der sich das Material erholen kann. Anschließend wird die Ermüdungsprüfung bis zum Versagen der Probe fortgeführt (siehe Bild 2).



**Bild 2:** Schematischer Verlauf des E-Moduls bei einer Ermüdungsprüfung mit Lastpause nach Erreichen einer Energy Ratio von 50 % ( $ER_{50}$ )

Der Healing-Index Hi4 ist der Quotient aus der maximalen Energy Ratio der zweiten Belastungsphase ( $ER''_{100}$ , unter der Annahme, dass die zweite Belastungsphase ebenfalls bei Lastwechsel 1 beginnt) und der extrapolierten maximalen Energy Ratio der ersten Belastungsphase ( $ER_{100}$ ) gemäß Bild 3 und Gleichung 1. Durch Hi4 kann angegeben werden, in wel-

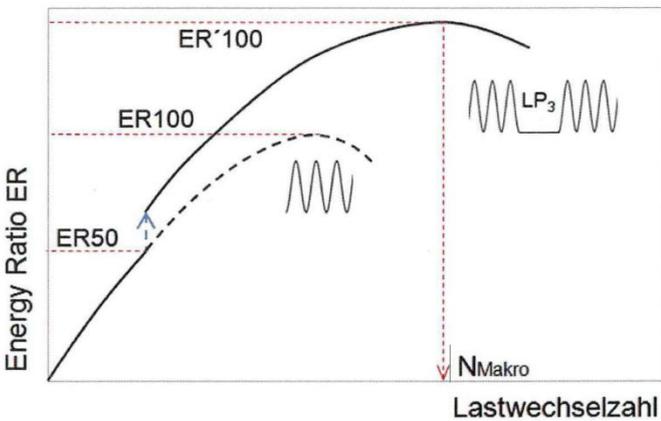
chem Maße sich die untersuchte Materialprobe während der Entlastungsphase selbsttätig rückstellt.



**Bild 3:** Verlauf der Energy Ratio (ER) bei unterbrochener Ermüdungsprüfung

$$Hi4 = \frac{ER''_{100}}{ER_{100}} \cdot 100 [\%] \quad \text{Gleichung 1}$$

Der Healing-Index Hi5 ist der Quotient aus der Differenz der maximalen Energy Ratio der zweiten Belastungsphase (ER''100, bei fortwährender Akkumulation der Lastwechselzahlen) und der extrapolierten maximalen Energy Ratio der ersten Belastungsphase (ER100) und ER100 gemäß Bild 4 und Gleichung 2. Durch Hi5 kann angegeben werden, in welchem Maße sich die eingefügte Lastpause auf die Lebensdauer der Materialprobe auswirkt.



**Bild 4:** Schematischer Verlauf der Energy Ratio (ER) bei Versuchstyp 3

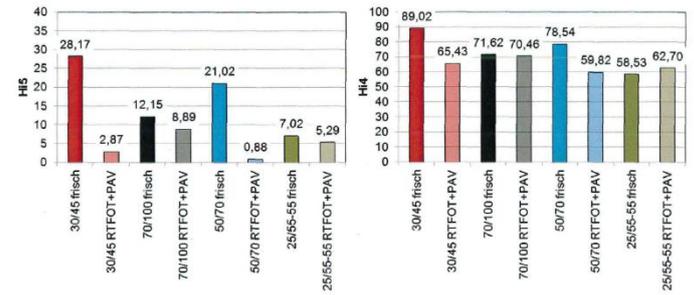
$$Hi5 = \frac{ER'_{100} - ER_{100}}{ER_{100}} \cdot 100 [\%] \quad \text{Gleichung 2}$$

Aus den Prüfergebnissen können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

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 weitgehend unkritisch gegenüber der Selbstheilung dar.

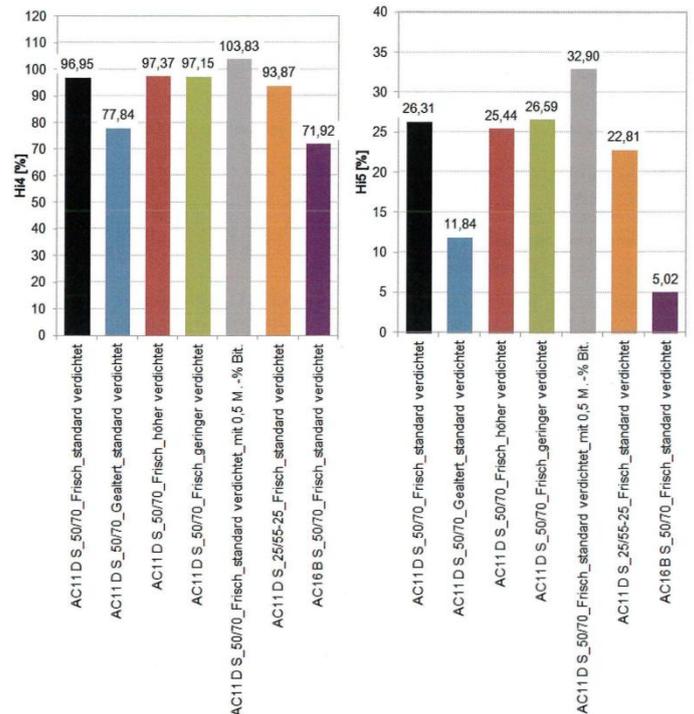
Nach Alterung und bei geringerer Prüftemperatur zeigt sich ein stark verringertes Selbstheilungsvermögen. Analog wurde bezüglich des Selbstheilungsverhaltens von Bitumen festgestellt,

dass frisches Bitumen mit hoher Viskosität die besten Heilungseigenschaften aufweist. Auch hier reduziert die Alterung (RTFOT + PAV) das Selbstheilungsvermögen deutlich (Bild 5).



**Bild 5:** 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

Nach Substitution von Straßenbaubitumen 50/70 mit Polymermodifiziertem Bitumen 25/55-55 wurde keine signifikante Änderung im Healing-Verhalten festgestellt (siehe Bild 6). 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.



**Bild 6:** Healing-Indizes Hi4 (links) und Hi5 (rechts) für verschiedene Asphaltvarianten bei einer Prüftemperatur von 20 °C, Einsetzen der Lastpause bei 50 % Energy Ratio und einer Lastpausendauer von 1000 s.

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 Belas-

tungsphase. 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.

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.

#### 4 Folgerungen für die Praxis

Mit 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-Indizes vorgestellt.

Somit konnte gezeigt werden, dass die Selbstheilungskräfte von Bitumen und Asphalt unter Anwendung der neu entwickelten Prüf- und Auswerteverfahren mithilfe von bekannten, weit verbreiteten Prüfgeräten und -geometrien nachgewiesen werden können. Das entwickelte Instrumentarium kann von Prüfinstituten unmittelbar in die Prüfpraxis übernommen werden.

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 sein kann. So liegt eine zukünftige Nutzung in der Praxis der Mischgutzusammensetzung nahe. Es ist denkbar, die Selbstheilungseigenschaften vorteilhaft bei der Baustoffauswahl und -konzeption zu kontrollieren beziehungsweise zu stimulieren, um die Dauerhaftigkeit von Straßenbauasphalten zu steigern.

Die Nutzung der Untersuchungsergebnisse in der Praxis der rechnerischen Dimensionierung wird in der Arbeit explizit ange-regt. Das vorgestellte Konzept beruht auf der Berücksichtigung von Healing-Eigenschaften in Form von materialabhängigen, um die Healing-Eigenschaften korrigierten Shift-Faktoren beziehungsweise auf einem modifizierten Materialgesetz, das die materialspezifischen Healing-Eigenschaften abbildet.