

Materialsteifigkeit des Straßenbetons im Verlauf des Ermüdungsprozesses

FA 4.306

Forschungsstelle: Biertgemeinschaft Technische Universität Dresden, Gesellschaft für Akustikforschung Dresden mbh

Bearbeiter: Schulze, C. / Wellner, F. / Bolz, P. G. / Lindner, P. G.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Bonn

Abschluss: August 2021

1 Einleitung

Beton unterliegt als Baustoff in zahlreichen Anwendungsbereichen nicht nur statischen, sondern auch zeitlich veränderlichen beziehungsweise sich wiederholenden Belastungen, was zu einer Ermüdung des Baustoffs führt. In Anbetracht der stetig zunehmenden Verkehrsdichte, insbesondere des wachsenden Schwerlastverkehrs, sowie steigender klimatischer Belastungen ist die genaue Kenntnis des Beton-Ermüdungsverhaltens für die hinreichend exakte Bemessung beziehungsweise die Prognose der Nutzungsdauer von Betonfahrbahndecken von höchster Bedeutung.

Generell wird die Verringerung der Steifigkeit in der Literatur häufig mit einer Entstehung und Akkumulation von Schädigungen des Betongefüges in Verbindung gebracht und infolgedessen als geeigneter Indikator für das Ermüdungsversagen diskutiert (Hohberg, 2004), (Oneschkow, 2014), (Thiele, 2016). Es ist daher anzunehmen, dass sich Schädigungen des Baustoffgefüges infolge zyklischer Beanspruchungen anhand der Änderung des Verformungs- und Steifigkeitsverhaltens detektieren lassen. Dieses lässt sich durch den E-Modul charakterisieren. Die ermüdungsbedingte Entwicklung des E-Moduls im Zuge eines zyklischen, spannungsgesteuerten Belastungsversuchs weist grundsätzlich den dreiphasigen s-förmigen Verlauf der "cyclic creep curve" aus Bild 1 auf.

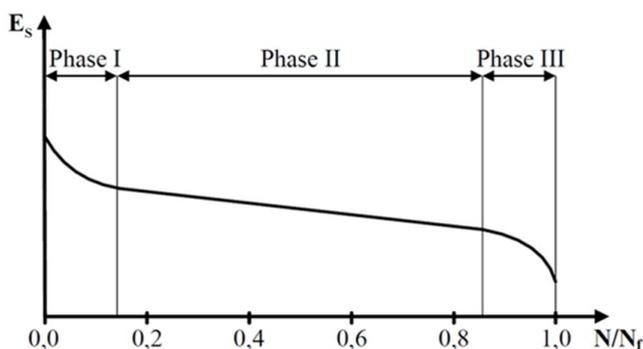


Bild 1: Steifigkeitsentwicklung bei Ermüdungsbeanspruchung (Oneschkow, 2014)

Das effektive Monitoring des E-Moduls über die Gesamtnutzungsdauer eines Bauteils stellt somit eine vielversprechende Vorgehensweise für die Analyse der Bauteilnutzungsdauer dar. Im Rahmen des Vorhabens wurde die Eignung des E-Moduls bestätigt, qualitative Aussagen über den Ermüdungszustand des Baustoffs Straßenbeton zu ermöglichen. Zu diesem Zweck erfolgte eine systematische Ermüdung sowohl labor- als auch großmaßstäblicher Beton-Probekörper bei zeitgleicher Messung des Elastizitätsmoduls (E-Moduls) mittels unterschiedlicher Verfahren.

2 Labormaßstäbliche Untersuchungen

2.1 Spaltzug-Schwellversuch

Für die Ermüdung zylindrischer Probekörper (PK) wurde der Spaltzug-Schwellversuch (SZSV) in Anlehnung an (TP Asphalt-StB, 2018) genutzt. Hierbei wird der PK durch zwei sich gegenüberliegende Lastschneiden mit einer zyklischen Druckbelastung beaufschlagt. Anhand der während der zyklischen Belastung mittels induktiver Wegaufnehmer (IWA) gemessenen Radialverformungen wird die Probekörperdehnung und daraus der Zug-E-Modul des Betons bestimmt. Durch die Optimierung des Versuchsprogramms konnte die Ermüdung der PK gezielt unterbrochen werden, um innerhalb systematischer Lastpausen zerstörungsfreie Messungen des E-Moduls mittels des Ultraschalllaufzeit- (US-) und des Eigenfrequenz- (EF-)Verfahrens am eingebauten PK durchzuführen. Bei Erreichen eines minimalen E-Moduls wurde der PK ausgebaut und anschließend dessen Restfestigkeit bestimmt.

2.2 Ultraschalllaufzeit-Verfahren

Der Messaufbau des SZSV sowie des US-Verfahrens ist in Bild 2 dargestellt. Die Änderung des dynamischen E-Moduls E_{dyn} kann über eine Änderung der US-Geschwindigkeit c festgehalten werden:

$$E_{dyn} = c^2 \cdot \frac{\rho \cdot (1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu)}{(1 - \nu)} \quad (1)$$

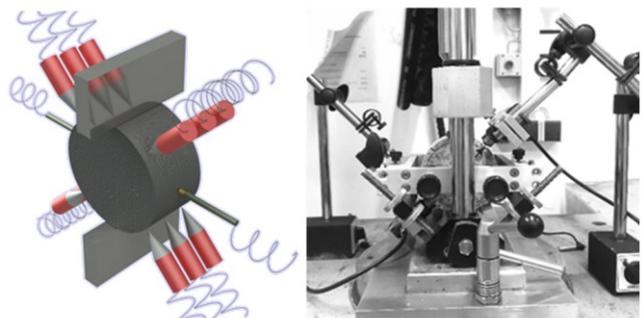


Bild 2: Lastschneiden des SZSV, induktive Wegaufnehmer und US-Prüfköpfe

2.3 Eigenfrequenz-Verfahren

Bei Festkörpern bilden sich bei bestimmten geometrie- und materialabhängigen Frequenzen (Eigenfrequenzen) Eigenmoden aus. Dieser Umstand wird bei dem im Zuge des Vorhabens entwickelten EF-Verfahren genutzt. Für die labormaßstäblichen Untersuchungen wurden Eigenformen ausgewählt, die durch den Einbau der PK in den SZSV nicht oder nur wenig beeinflusst werden. Mittels Mikrofon beziehungsweise Beschleunigungssensor erfolgte die Messung der Eigenformen, die sich nach impulsartiger Anregung (F) des PK einstellen. Das Verfahren wurde mit drei Methoden (M1, M2 und M3) angewandt, die in Bild 3 dargestellt sind. Hierbei unterscheiden sich einerseits die betrachtete Eigenform und andererseits die Art der Messung (M1, M2: kontaktlose Messung des Drucks p mittels Mikrofon; M3: kontaktbehaftete Messung der Beschleunigung a mittels Beschleunigungssensor). Mithilfe eines hybriden Modells aus einer Simulation der Eigenfrequenzen eines Referenz-PK beliebiger Materialeigenschaften mittels der Finite-Elemente-Methode (FEM) sowie einer analytischen Berechnung des Frequenzparameters Ω gemäß (Senjanovic, 2014) wird aus den gemessenen Eigenfrequenzen des zylindrischen PK der dynamische E-Modul bestimmt. Diese hybride Vorgehensweise ist Bild 5 zu entnehmen.

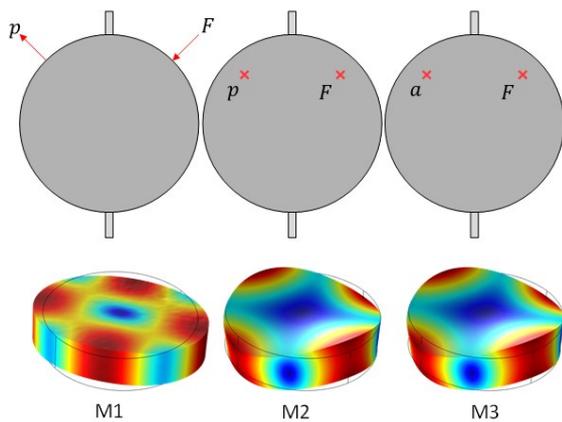


Bild 3: EF-Verfahren mit Methoden M1, M2 und M3

2.4 Ergebnisse

Die Werte des ermittelten E-Moduls in Abhängigkeit von der Lastwechselzahl (LW) sind exemplarisch für einen zylindrischen Beton-PK Bild 4 zu entnehmen. Hierin stellt die grüne Kurve den mittels der IWA ermittelten E-Modul dar. Die blaue, rote und gelbe Kurve zeigen die Ergebnisse des EF-Verfahrens mit Methode M1, M2 und M3. Die hellvioletten Kurven beschreiben die Ergebnisse der US-Messungen an sechs Anregungs- und Messpositionen, während die dunkelvioletten Kurven den Mittelwert der einzelnen US-Messergebnisse wiedergibt. Die Kreuze in entsprechender Farbe entsprechen dem Minimal- und Maximalwert der Messergebnisse im ausgebauten Zustand.

Anhand der Messergebnisse der IWA im SZSV ist der s-förmige Verlauf aus Bild 1 auch im Verlauf des E-Moduls des

untersuchten PK deutlich erkennbar. Der plötzliche Anstieg des E-Moduls bei ca. 8 000 LW verbunden mit der ebenso abrupten Verringerung des E-Moduls bei ca. 25 000 LW ist auf einen Fehler beim Applizieren der IWA nach Durchführung der EF- und US-Messungen zurückzuführen und wurde beim erneuten Applizieren behoben. In den Messergebnissen der EF-Methode zeigt sich ebenfalls der s-förmige Verlauf des E-Moduls. Hier ist beobachtbar, dass die Messergebnisse im eingebauten Zustand vor allem vor Beginn der Belastung unwesentlich von denen im ausgebauten Zustand abweichen. Auch ist der anfängliche E-Modul ähnlich dem mittels der IWA bestimmten Wert, wobei die Eigenfrequenzmessung tendenziell geringfügig höhere Werte des E-Moduls wiedergibt. Dabei liefert Methode M3 die geringsten E-Moduln, was anhand der Beeinflussung der Eigenfrequenz durch die zusätzliche Masse des Beschleunigungssensors erklärbar ist. Zu hohen Lastwechselzahlen hin zeigt M1 eine stärkere Abnahme des E-Moduls als M2 und M3. Dies deutet auf einen unterschiedlichen Einfluss der inhomogenen Ermüdung des PK auf die jeweilige Eigenform hin. Das US-Verfahren ergibt tendenziell höhere E-Moduln als die anderen beiden Verfahren. Dies kann unter Umständen auf eine Beeinflussung des Messergebnisses durch die PK-Geometrie zurückzuführen sein. Die Kurvenverläufe des US-Verfahrens zeigen jedoch ebenso wie die Ergebnisse der IWA und der EF-Messungen den s-förmigen Verlauf der "cyclic creep curve".

Es zeigte sich im Rahmen der Untersuchungen, dass die relative Änderung des E-Moduls zwischen den genutzten Verfahren unterschiedlich stark ausfällt. Hierbei gibt das US-Verfahren die geringste Abnahme des E-Moduls im Zuge der Ermüdung wieder. Das EF-Verfahren resultiert in einer höheren Reduzierung des E-Moduls, während sich anhand der Messwerte der IWA die stärkste Verminderung des E-Moduls zeigt.

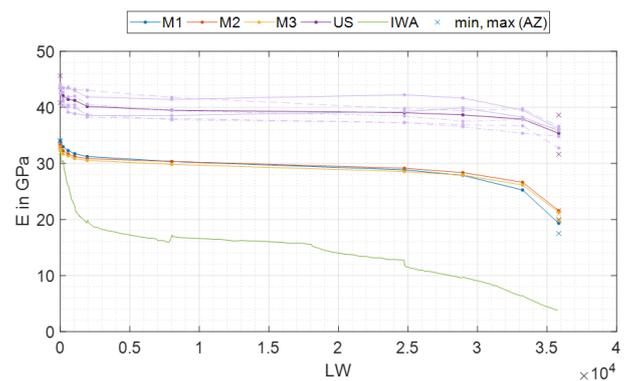


Bild 4: Verlauf des E-Moduls in Abhängigkeit von LW

Es ist davon auszugehen, dass dieser Effekt durch die Schädigung des PK in einem begrenzten geometrischen Bereich bedingt ist. Während das Verfahren mittels IWA primär den E-Modul dieses geschädigten Bereichs beschreibt, wird mittels EF beziehungsweise US-Verfahren ein über die Geometrie des PK gemittelter E-Modul bestimmt.

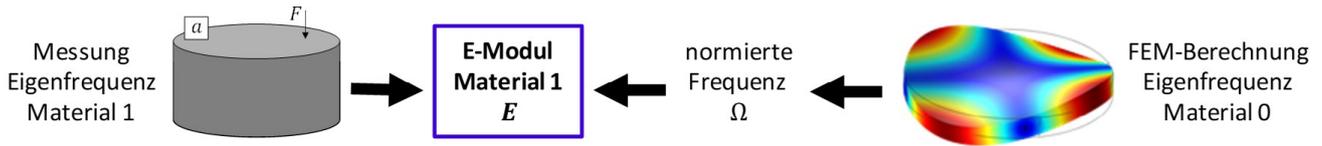


Bild 5: Hybrides Modell zur Bestimmung des E-Moduls zylindrischer PK aus gemessenen Eigenfrequenzen

Durch ein Normieren und Überlagern der anhand der Messwerte der IWA bestimmten Verläufe des E-Moduls konnten material-spezifische charakteristische Verläufe für die Verminderung des E-Moduls im Zuge der Ermüdung ermittelt werden. Diese sind in Bild 6 dargestellt.

Während der Untersuchungen wurde festgestellt, dass längere Lastpausen in der zyklischen Belastung einen signifikanten Einfluss auf den ermüdungsbedingten Verlauf des E-Moduls haben können. Weiterhin legen die Untersuchungen nahe, dass es im Zuge einer starken Ermüdung zu einer zum Teil signifikanten Verminderung der Spaltzugfestigkeit kommt. Das Beanspruchungsniveau der PK im SZSV wird infolgedessen möglicherweise stark überschätzt. Der Einfluss längerer Lastpausen sowie die Verminderung der Betonfestigkeit im Zuge der Materialermüdung wurden daraufhin tiefergehend untersucht.

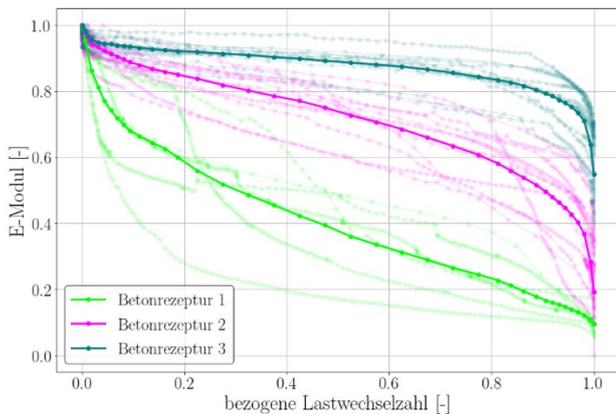


Bild 6: Charakteristische Verläufe der drei untersuchten Betonrezepturen

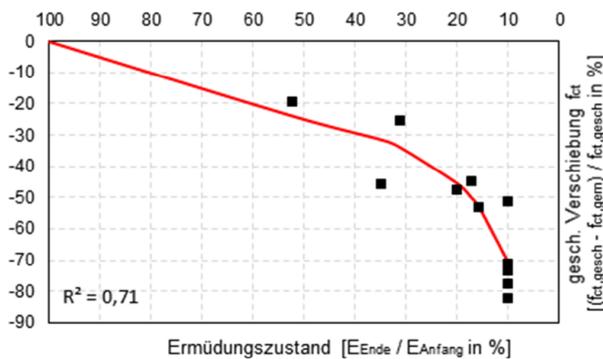


Bild 7: Abgeschätzte Verschiebung der Spaltzugfestigkeit in Abhängigkeit vom Ermüdungszustand

Auf Grundlage dessen erfolgte die Entwicklung einer Vorgehensweise zur abschätzenden Ermittlung der ursprünglichen PK-Festigkeiten aus den anfänglichen E-Moduln der PK (siehe Bild 7).

3 Großmaßstäbliche Untersuchungen

3.1 Vorgehensweise

Die Untersuchungen zur Materialermüdung wurden auf großmaßstäbliche Probekörper – eine Beton-Platte sowie einen Beton-Plattenstreifen – ausgedehnt, die mithilfe von FEM-Simulationen dimensioniert wurden. Während der zyklischen Belastung der PK erfolgte die Messung der resultierenden Dehnung und Verformung mittels Dehnmessstreifen (DMS) und IWA. Der Krafteintrag geschah mittels eines Laststempels (LS) mit einem Durchmesser von 30 cm (siehe Bild 8).

In regelmäßigen Lastpausen fanden Messungen des E-Moduls statt. Hierbei kam die in (Lindner, 2020) erarbeitete und auf der Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW) basierende Phase-Shift-Methode (PSM) zum Einsatz, um den Ermüdungsverlauf der großmaßstäblichen PK zerstörungsfrei zu erfassen. Am Plattenstreifen erfolgten zusätzlich Messungen des E-Moduls mithilfe des US-Verfahrens.



Bild 8: Großmaßstäbliche PK im Versuchsstand (schematische Darstellung)

3.2 Phase-Shift-Methode

Die auf der MASW und der Wellenfeldtransformation basierende Phase-Shift-Methode ist ein Verfahren zur Ermittlung der Phasengeschwindigkeit von Oberflächenwellen (vgl. (McMechan, 1981), (Park, 1998), (Park, 1999)). Bei der PSM erfolgt an einer oder mehreren definierten Anregungspositionen ein Krafteintrag, der zur Ausbreitung einer Welle im Material führt. Mittels einer beliebigen Anzahl von Sensoren findet die Aufzeichnung

der daraus resultierenden orts- und zeitabhängigen Oberflächenschwingung statt. Das Schwingungssignal erfährt eine Fourier-Transformation, sodass sich das ortsabhängige Spektrum der Schwingung $U(x, \omega)$ ergibt, aus dem durch Anwendung der folgenden Integraltransformation der Term $V(\omega, k')$ ermittelt werden kann:

$$V(\omega, k') = \int e^{ik'x} \left[\frac{U(x, \omega)}{|U(x, \omega)|} \right] dx. \quad (2)$$

$V(\omega, k')$ ist entsprechend [Park,1998] zu verstehen als die Summe über die Spektren an den verschiedenen Positionen x unter Annahme einer Kreiswellenzahl k' beziehungsweise einer Phasenverschiebung φ' . Stimmt die angenommene Wellenzahl mit der realen Wellenzahl überein, ergibt sich in $V(\omega, k')$ ein lokales Maximum. Das heißt, es existiert ein Signalanteil mit der entsprechenden Phasengeschwindigkeit c . Anhand dieser frequenzabhängigen Phasengeschwindigkeit lässt sich auf den E-Modul schließen. Im vorliegenden Vorhaben wurde das Verfahren zur Bestimmung der Entwicklung des E-Moduls im Zuge der Materialermüdung an der Beton-Platte sowie an dem Beton-Plattenstreifen angewandt.

Die Versuchsaufbauten sind Bild 9 zu entnehmen. Während am Plattenstreifen vier Kraft-Anregungspositionen und vier Beschleunigungs-Messpositionen Verwendung fanden, wurden an der Platte zwei verschiedene Setups realisiert. Bei Setup 1 erfolgte der Krafteintrag an 14 Anregungspositionen und die Messung an einer Beschleunigungsmessposition. Bei Setup 2 wurden sechs Anregungspositionen und sechs Messpositionen realisiert. Das Auslesen der lokalen Maxima aus der jeweiligen Phase-Shift-Matrix $V(\omega, k')$ sowie das Aussortieren der Maxima und das Lösen der Gleichung der Lamb-Welle erfolgten entsprechend der Vorgehensweise in [Lindner, 2020].

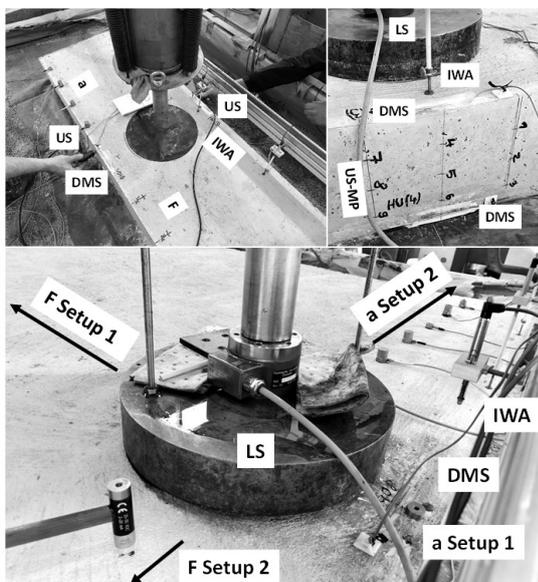


Bild 9: Messaufbau großmaßstäbliche PK; oben: IWA, DMS, US und PSM am Plattenstreifen; unten: IWA, DMS und PSM an der Platte

3.3 Ergebnisse

Bild 10 zeigt das Messergebnis der PSM exemplarisch für die Beton-Platte vor Belastungsbeginn. Während oben das Dispersionsdiagramm, also die dreidimensionale Darstellung der Phase-Shift-Matrix $V(\omega, k')$, abgebildet ist, enthält das untere Diagramm das Ergebnis des E-Moduls nach Aussortieren der lokalen Maxima und Anwendung des Algorithmus zur Lösung der Lamb-Wellengleichung.

Im Dispersionsdiagramm ist das Hauptmaximum über nahezu den gesamten betrachteten Frequenzbereich deutlich erkennbar. Daraus resultiert der nahezu lückenlose spektrale Verlauf des E-Moduls. Es zeigt sich eine Abnahme des E-Moduls mit steigender Frequenz. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass sich im Herstellungsprozess der PK schwere Gesteinskörner nach unten absetzen, wodurch sich in diesem Bereich ein höherer E-Modul einstellt als in den höheren Plattenschichten. Dadurch, dass die Lamb-Welle mit steigender Frequenz zunehmend der Rayleigh-Welle entspricht und deren Eindringtiefe zu höheren Frequenzen hin abnimmt, ergibt sich der fallende Verlauf des E-Moduls mit steigender Frequenz beziehungsweise geringer werdender betrachteter Plattentiefe.

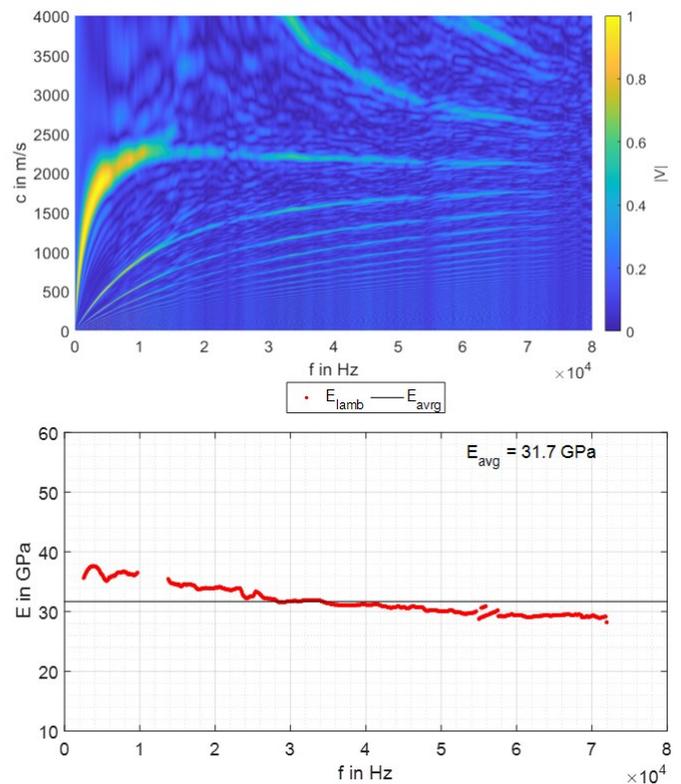


Bild 10: Messergebnis Beton-Platte vor Belastungsbeginn; oben: Dispersionsdiagramm; unten: E-Modul in Abhängigkeit von der Frequenz

Durch Messung zu verschiedenen Ermüdungszuständen der PK stellen sich die in Bild 11 enthaltenen Verläufe des E-Moduls ein. Hierin ist im oberen Diagramm das Ergebnis für die PSM und das US-Verfahren am Plattenstreifen und im unteren Diagramm das Ergebnis für die beiden Setups der PSM an der Platte

dargestellt. Es zeigt sich grundlegend eine Abnahme des E-Moduls im Zuge der zyklischen Belastung. Diese fällt am Plattenstreifen höher aus als an der Platte, was auf eine geringere Ermüdung der Platte gegenüber dem Plattenstreifen zurückzuführen ist.

Während sich am Plattenstreifen der konvexe Verlauf der Phase I der "cyclic creep curve" sowie der Übergang in Phase II zeigt, ist dies aufgrund der geringen Ermüdung an der Platte nicht zu beobachten. Jedoch zeigt sich hier eine größere Abnahme für Setup 2 als für Setup 1. Dies deutet auf eine lokale Ermüdung der Platte hin, die nahe am Plattenrand am höchsten ist. Dadurch enthält die Messstrecke von Setup 2 einen größeren Anteil ermüdeten Materials, was die stärkere Abnahme des E-Moduls für Setup 2 erklärt. Das Versagen des Plattenstreifens nach ca. 0,98 Mio. LW infolge einer Erhöhung der Kraft resultiert in dem stark reduzierten E-Modul, der sich aus der letzten US-Messung bei ca. 1,2 Mio. LW ergibt.

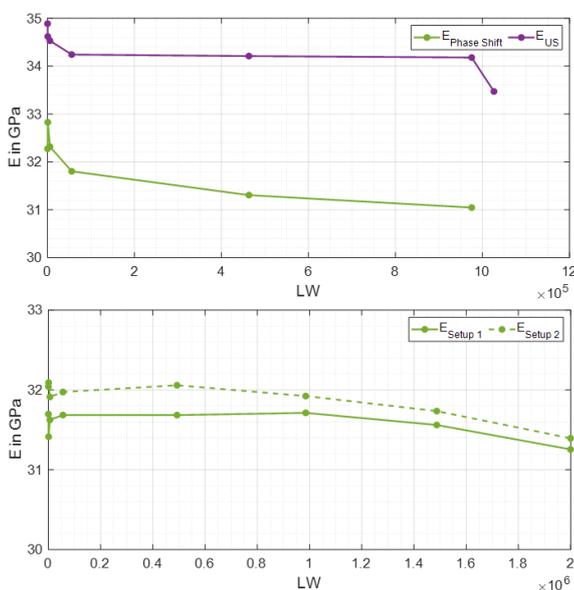


Bild 11: E-Modul in Abhängigkeit von der Lastwechselzahl; oben: Plattenstreifen; unten: Platte; violett: US-Verfahren; grün: PSM

3.4 FEM-Berechnungen

Anhand von FEM-Simulationen zeigte sich, dass eine Verminderung des E-Moduls infolge der Ermüdung zu einer lokalen Konzentration der Beanspruchung einer Betonplatte unter Last führt. Weiterhin ergab sich, dass die ermüdungsbedingte Verminderung der Beanspruchung der Betonplatte in einer Erhöhung der Beanspruchungen der Beton-Unterlage resultiert. Dadurch bedingt kann es zu einer Verschlechterung der Auflagerungsbedingungen der Betonplatte kommen, was sich wiederum auf deren Beanspruchung und somit auf deren Nutzungsdauer auswirken kann.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde der E-Modul anhand umfangreicher labormaßstäblicher Untersuchungen als Parameter identifiziert, der eine qualitative Aussage über den Schädigungszustand des Baustoffes Straßenbeton ermöglicht.

Unter Anwendung der Phase-Shift-Methode zur nicht-invasiven messtechnischen Erfassung der Entwicklung des E-Moduls konnten die Erkenntnisse hinsichtlich der Materialermüdung auf zwei großmaßstäbliche Probekörper übertragen und die Praxistauglichkeit der eingesetzten Phase-Shift-Methode bestätigt werden. Mit der Phase-Shift-Methode steht ein vielversprechendes Mittel zur Verfügung, um in einem üblichen Turnus den E-Modul ausgesuchter Streckenabschnitte zerstörungsfrei zu monitoren. Dies ermöglicht in Kombination mit den charakteristischen Verläufen perspektivisch den Aufbau und die Anwendung eines Prognosemodells für die einfache und zielsichere Bewertung vorhandener Betonfahrbahndecken hinsichtlich ihrer Restnutzungsdauer sowie neuer Betonfahrbahndecken in Bezug auf ihre Dauerhaftigkeit.

5 Literatur

- Hohberg, R.: "Zum Ermüdungsverhalten von Beton", Dissertation TU Berlin, 2004
- Lindner, P. G.: "Messverfahren zur Bestimmung des dynamischen Elastizitätsmoduls zylindrischer und plattenförmiger Probekörper", Hochschule Mittweida, Masterarbeit, 2020
- McMechan, G. A., Yedlin, M. J.: "Analysis of Waves by Wave-Field Transformation." GEOPHYSICS (1981), 46(6):869
- Oneschkow, N.: "Analyse des Ermüdungsverhaltens von Beton anhand der Dehnungsentwicklung", Berichte aus dem Institut für Baustoffe, Leibniz Universität Hannover, 2014
- Park, C. B., Miller, R. D., Xia, J.: "Imaging dispersion curves of surface waves on multichannel record." SEG Technical Program Expanded Abstracts 1998. January 1998, 1377-1380
- Park, C. B., Miller, R. D., Xia, J.: "Multichannel analysis of surface waves." GEOPHYSICS (1999), 64(3):800
- Senjanovic, I.; et al.: "Natural vibrations of thick circular plates based on the modified Mindlin theory", Arch. Mech., 66, 6, pp. 389-409, Warszawa 2014
- Technische Prüfvorschriften für Asphalt (TP Asphalt-StB), Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen, FGSV 756, Ausgabe 2018, FGSV Verlag, Köln
- Thiele, M.: "Experimentelle Untersuchung und Analyse der Schädigungsevolution in Beton unter hochzyklischen Ermüdungsbeanspruchungen", Dissertation TU Berlin, 2016