

Vergleichende Bewertung der Restsubstanz von Asphaltbefestigungen nach langjähriger Verkehrsnutzung

FA 4.199
 Forschungsstelle: Universität Stuttgart, Institut für Straßen- und Verkehrswesen (Prof. Dr.-Ing. W. Ressel) / Technische Universität Dresden, Institut für Stadtbauwesen und Straßenbau (Prof. Dr.-Ing. F. Wellner)
 Bearbeiter: Ressel, W. / Benner, A. / Wellner, F. / Werkmeister, S. / Lipke, S.
 Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Bonn
 Abschluss: Februar 2008

erfassten Oberflächenmerkmalen "Flickstellen", "Netzrisse", "Querunebenheiten" und "Ausmagerungen" abgeleitet. Diese sind oberflächenbezogen und geben keinerlei Aufschluss über den tatsächlichen Zustand der Substanz.

Aus der oben beschriebenen Problemstellung ergab sich für das Forschungsvorhaben das Ziel der Entwicklung eines Substanzwerts, der die Faktoren Belastung, Alter, Klima und Materialeigenschaften berücksichtigt und somit eine ganzheitliche, strukturelle Bewertung einer Straßenbefestigung ermöglicht. Der Ansatz besteht darin, die Restnutzungsdauer beziehungsweise den Nutzungsausfallzeitpunkt (NAZ) einer Asphaltbefestigung zu prognostizieren und auf dieser Grundlage die Restsubstanz zu bewerten.

Zusätzlich sollte im Rahmen des Forschungsprojekts neben der strukturellen auch eine monetäre Bewertung der Restsubstanz erfolgen, die schließlich in die Funktionsbauverträge eingebunden wird.

Die Zielstellungen für das Forschungsprojekt waren im Einzelnen:

1. Entwicklung eines Prognoseverfahrens zur möglichst genauen Bestimmung der Restnutzungsdauer von Asphaltbefestigungen in Abhängigkeit von Klima, Verkehrsbelastung und Materialeigenschaften.
2. Entwicklung eines Bewertungshintergrunds zur strukturellen und monetären Bewertung der Restsubstanz.

Die folgende Tabelle zeigt die an dem Projekt beteiligten Forschungseinrichtungen:

1 Aufgabenstellung

Der Zustandserfassung und -bewertung (ZEB) kommt im Zusammenhang mit den neu entwickelten Vertragsformen im Straßenbau eine besonders hohe Bedeutung zu. Im Gegensatz zu den herkömmlichen Vertragsformen im Straßenbau ist der Auftragnehmer innerhalb der Funktionsbauverträge verpflichtet, die Funktionen einer Straße, definiert durch den Gebrauchswert und den Substanzwert, über die vereinbarte Vertragslaufzeit zu erhalten. Die dadurch herbeigeführte Risikoverschiebung von Auftraggeber auf Auftragnehmer fordert deshalb mehr denn je die realistische Einschätzung des Substanzwerts.

Bei der Zustandsbewertung nach ZTV-ZEB stellt sich allerdings die Bildung des Substanzwerts als problematisch dar. Dieser soll garantieren, dass bei der Abnahme des Bauwerks eine gewisse Mindest- bzw. Restsubstanz vorhanden ist. Momentan wird der Substanzwert im System ZEB jedoch von den visuell

Tabelle 1: Beteiligte Forschungseinrichtungen

Forschungsstelle	Bearbeiter	Aufgaben
Universität Stuttgart Lehrstuhl für Straßenplanung und Straßenbau	Prof. Dr.-Ing. Wolfram Ressel Dipl.-Ing. Anne Benner	Projektleitung, Entwicklung eines Bewertungshintergrunds zur Bewertung der Restsubstanz und zur monetären Bewertung der Restsubstanz
TU Dresden Professur für Straßenbau	Prof. Dr.-Ing. Frohmüt Wellner Dipl.-Ing. Sebastian Lipke Dr.-Ing. Sabine Werkmeister	Entwicklung eines Prognoseverfahrens zur möglichst genauen Bestimmung der Restnutzungsdauer von Asphaltbefestigungen, Mischgutuntersuchungen, Spaltzugschwellversuche
TU Braunschweig Institut für Straßenwesen	Prof. Dr.-Ing. Peter Renken	Abkühlversuche

2 Untersuchungsmethodik

Grundlage des Forschungsprojekts zur Bewertung der Restsubstanz von Asphaltbefestigungen bilden die Ergebnisse von Laborversuchen. Dabei wurden im Rahmen des Projekts aus 10 definierten Versuchsstrecken (VS) (Tabelle 2) Bohrkerne entnommen, aus denen im Labor Probekörper für Spaltzugschwell- und Abkühlversuche hergestellt wurden.

Tabelle 2: Übersicht über den Schichtenaufbau der ausgewählten und beprobten Versuchsstrecken

VS	ADS [mm]	ABI [mm]	oATS [mm]	uATS [mm]	Unterlage
1	40	80	90	75	Asphalt
2	4	80	110	65	HGT
3	40	80	80	100	FSS
4	40	80	100	120	FSS
5	40	80	-	140	FSS
6	40	90	-	140	FSS
7	40	40	110	65	HGT
8	40	80	-	120	FSS
9	40	70	135	110	HGT
10	40	90	120	100	FSS

Für die den Strecken entnommenen Asphaltgemische wurden zunächst allgemeine Materialkenndaten (Mischgutuntersuchung) sowie der komplexe E-Modul anhand der Ergebnisse von Spaltzugschwellversuchen (Multi-Stage-Versuche) bestimmt. Im zweiten Teil der Untersuchungen wurden ebenfalls anhand von Ergebnissen der Spaltzugschwellversuche die Ermüdungsfunktionen für die Asphalttragschichten (ATS) ermittelt. Weiterhin erfolgte eine Bestimmung der kryogenen Spannungen für die ATS.

Auf Grundlage der Ergebnisse der Laborversuche wurde anschließend mit dem Programm PaDesTo eine rechnerische Abschätzung der ertragbaren Lastwechselzahlen der Befestigungen vorgenommen, um die NAZ der Befestigungen zu bestimmen. Weiterhin wurde parallel das Verfahren nach Zander zur Abschätzung der Restnutzungsdauer der Befestigungen herangezogen.

Im folgenden Text werden die Asphaltgemische, die der Rollspur entnommen wurden, mit der Gemischbezeichnung_R und die Asphaltgemische, die neben der Rollspur entnommen wurden, mit der Gemischbezeichnung_N bezeichnet (z. B. ATS_R und ATS_N).

3 Untersuchungsergebnisse

3.1 Bestimmung der E-Moduln

In Zusammenfassung der Ergebnisse der Spaltzugschwellversuche zur Bestimmung der E-Moduln kann zunächst festgestellt werden, dass bei allen untersuchten Temperaturen die ermittelten E-Moduln der Asphaltdeckschichten (ADS)_R durchschnittlich um 10 % höher sind im Vergleich zu den ADS_N (Bild 1). Weiterhin haben die Ergebnisse der Multi-Stage-Versuche gezeigt, dass bei allen geprüften Temperaturen die ermittelten E-Moduln der unteren

ATS_R im Vergleich zu den ermittelten die E-Moduln der unteren ATS_N durchschnittlich um 6 % niedriger sind.

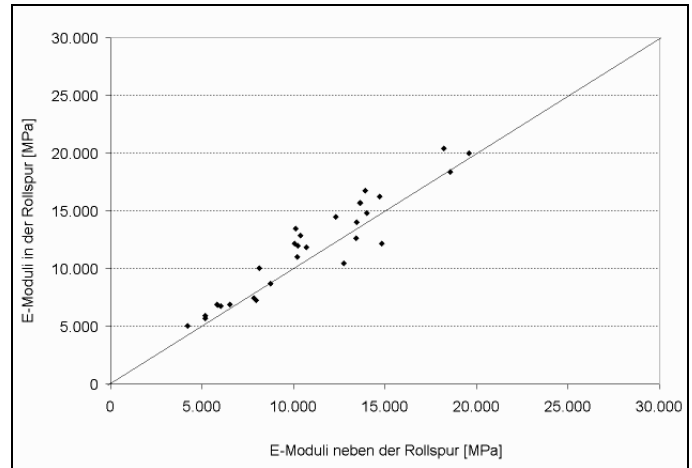


Bild 1: Vergleich der E-Moduln der ADS_R und ADS_N

Ferner wurden anhand der Ergebnisse der Ermüdungsversuche der unteren ATS die Höhe der E-Moduln zu Versuchsbeginn bestimmt. Zum Teil wurden deutlich unterschiedliche E-Moduln für die ATS_R und ATS_N ermittelt. Dabei kann eine Schwankungsbreite der E-Moduln in Höhe von $\pm 10\%$ als zu gering eingeschätzt werden, um signifikante Auswirkungen auf das Ermüdungsverhalten erwarten zu können. Die festgestellten Schwankungen hinsichtlich der Steifigkeiten von $\pm 10\%$ sind wahrscheinlich einbaubedingt. So können z. B. die Schichtdicken und Verdichtungsgrade zwischen der ATS_R und ATS_N schwanken, sodass die Ermüdung (Rissbildung) der ATS infolge Verkehrsbelastung durch andere Effekte überlagert wird. Dadurch können sich geringfügige Verschiebungen / Verdrehungen der Ermüdungsfunktionen ergeben, die jedoch nicht aus einer Ermüdung des Materials aus Verkehrsbelastung herrühren müssen. Lediglich für die Versuchsstrecken 7 und 8 konnten deutlich geringere E-Moduln für die ATS_R im Vergleich zur ATS_N ermittelt werden. Für alle anderen Versuchsstrecken wurde kein signifikanter Unterschied hinsichtlich der Höhe der E-Moduln der ATS_R und der ATS_N festgestellt (Bild 2).

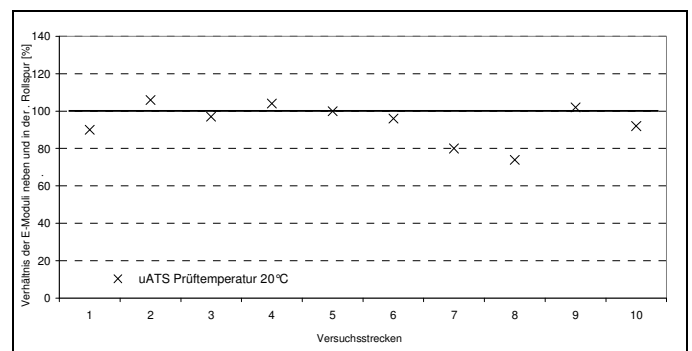


Bild 2: Verhältnisse der E-Moduln für die ATS_R und ATS_N der Versuchsstrecken 1 bis 10

Anhand der Ergebnisse der Multi-Stage-Versuche war für die Ermüdungsversuche zu erwarten, dass:

- bei den Versuchsstrecken 7 und 8 eine deutlich geringere Ermüdungsfestigkeit der ATS_R im Vergleich zur ATS_N auftritt und
- für die übrigen Versuchsstrecken für die ATS_R und ATS_N aufgrund der geringen Schwankungsbreite der E-Moduln kein signifikanter Unterschied hinsichtlich des Ermüdungsverhaltens festzustellen ist.

3.2 Ermüdungsfunktionen

Bei der Auswertung der Ergebnisse der Ermüdungsversuche war zunächst zu beachten, dass ein direkter Vergleich der dehnungsabhängigen Ermüdungsfunktionen der ATS_R und ATS_N (gleicher Befestigungsaufbau) nur möglich war, insofern die E-Moduln die gleiche Höhe aufweisen. Bei unterschiedlichen Steifigkeiten stellen sich unterschiedliche Dehnungsniveaus bei identischem Belastungsniveau ein, was bei einem Vergleich des Ermüdungsverhaltens anhand von dehnungsabhängigen Ermüdungsfunktionen zu berücksichtigen ist. Dies kann im Rahmen eines analytischen Dimensionierungsverfahrens durchgeführt werden. Andernfalls ist es anhand der spannungsabhängigen Ermüdungsfunktionen (bei einem Temperaturniveau – hier 20 °C) möglich, vergleichende Aussagen hinsichtlich der Ermüdungsfestigkeit der ATS_R und ATS_N zu erhalten.

Bei zwei Versuchsstrecken (VS 7 und 8) war für die ATS_R und ATS_N ein deutlicher Unterschied im Ermüdungsverhalten wahrscheinlich infolge unterschiedlicher Verkehrsbelastung feststellbar (Bild 3).

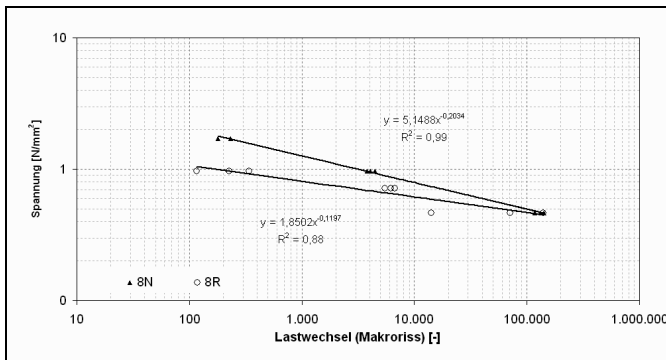


Bild 3: Spannungsabhängige Ermüdungsfunktionen für die ATS_N (7N) ATS_R (7R), Versuchsstrecke 7

Bei den übrigen Versuchsstrecken waren keine signifikanten Unterschiede zwischen der ATS_R und der ATS_N sowohl hinsichtlich des E-Moduls als auch hinsichtlich der Ermüdungsfunktionen feststellbar. Es wird vermutet, dass die festgestellten Unterschiede hauptsächlich auf Materialschwankungen zurückzuführen sind.

Dabei wird der unterschiedliche Grad der Ermüdung zum einen bereits bei einem Vergleich der Höhe der Steifigkeiten (E-Modul Abfall) sowie zum anderen bei einem Vergleich der spannungsabhängigen Ermüdungsfunktionen direkt deutlich. Im Rahmen der Betrachtung der Restlebensdauer kann für diese Strecken anhand der dehnungsabhängigen Ermüdungsfunktionen sowie der E-Moduln ebenfalls ein deutlich unterschiedlicher Ermüdungsfortschritt (NAZ) festgestellt werden.

Nach den vorliegenden Erkenntnissen zeigt sich eine Ermüdung des Asphalts in situ (Rissbildung) bei Betrachtung der

spannungsabhängigen Ermüdungsfunktionen durch eine Drehung der Funktion nach unten, das heißt eine Verringerung der Lastwechselzahl bis zum Eintreten des Risses insbesondere bei einem sehr hohen Beanspruchungsniveau.

Weiterhin wurde ein direkter Vergleich der einzelnen Ermüdungsfunktionen der Versuchsstrecken 1 bis 10 untereinander nicht vorgenommen, da anhand dieser Funktionen keine eindeutigen Aussagen zur Restlebensdauer der Befestigungen getroffen werden können, beziehungsweise keine Abschätzung der Ermüdung der Asphalttragschicht vorgenommen werden kann. Zur Bestimmung der Restnutzungsdauer der Befestigungen wurden Berechnungen mit dem Programm PaDesTo vorgenommen, um somit die Befestigungen diesbezüglich vergleichen zu können (siehe Kapitel 4).

Zudem war zu beobachten, dass die Korrelationskoeffizienten der Ermüdungsfunktionen für die ATS_R niedriger sind als die der ATS_N. Dabei können die niedrigeren Korrelationskoeffizienten der Ermüdungsfunktionen der ATS_R ein Hinweis auf eine erfolgte Materialermüdung beziehungsweise Veränderung sein.

Da bei den Versuchsstrecken 7 und 8 ein deutlicher Unterschied in der Höhe der E-Moduln der ATS_R und ATS_N zu erkennen war, wurde hier ein Vergleich der spannungsabhängigen Ermüdungsfunktionen vorgenommen. Dabei hat sich gezeigt, dass bei den beiden Versuchsstrecken die ATS_R eine deutlich geringere Ermüdungsfestigkeit aufweist als die ATS_N.

3.3 Bestimmung der kryogenen Spannungen

Zunächst war anhand der Ergebnisse der Abkühlversuche zu erkennen, dass sich bei den einzelnen ATS der Versuchsstrecken unterschiedliche Bruchspannungen einstellen bzw. ein Versagen der Probekörper bei unterschiedlichen Temperaturen auftritt. Weiterhin wird deutlich, dass für die ATS_R der Versuchsstrecke 8 (VS 8R) die geringsten kryogenen Spannungen aller untersuchten Gemische ermittelt wurden.

Ebenso wurde die Differenz der kryogenen Spannungen der ATS_R und ATS_N betrachtet. Dabei zeigte sich, dass der größte Unterschied zwischen den kryogenen Spannungen der Probekörper für die der ATS_R und ATS_N für die Versuchsstrecke 8 ermittelt werden konnte. Alle anderen der ATS_R und ATS_N verhalten sich bezüglich des Unterschieds der kryogenen Spannungen ähnlich, wobei während der Abkühlversuche für die überwiegende Zahl der ATS_R (außer VS 10) – im Vergleich zur ATS_N (Bild 4) – geringere kryogene Spannungen gemessen wurden.

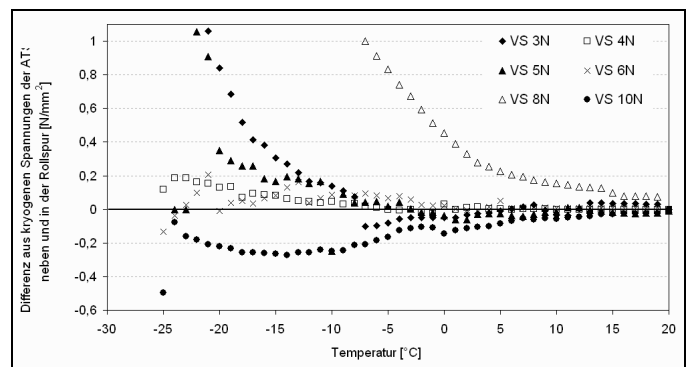


Bild 4: Differenz der kryogenen Spannungen der ATS_R und ATS_N

Anhand der Ergebnisse der Abkühlversuche wird deutlich, dass eine starke Materialermüdung eines Asphalts auch anhand des Verlaufs der kryogenen Spannungen erkennbar ist. Sehr niedrige kryogene Spannungen bzw. ein starker Abfall der kryogenen Spannungen im Verlauf des NAZ deuten auf eine Materialermüdung (Mikrorissbildung) hin. Bei Bewertung der Absolutwerte ist jedoch der Ausgangszustand (Höhe der kryogenen Spannungen des nicht ermüdeten Asphaltgemisches) zu berücksichtigen.

3.4 Bestimmung der Nutzungsausfallzeitpunkte (NAZ)

Die Ermittlung der NAZ erfolgte mit dem Programm PaDesTo für alle Versuchsstrecken, bei denen eine ungebundene Schicht (Tragschicht ohne Bindemittel) direkt unter dem Asphaltpaket angeordnet war. Zu bemerken ist, dass der berechnete Nutzungsausfallzeitpunkt den Nutzungsausfall aus Sicht der Ermüdungsrissbildung anzeigt. Er beschreibt nicht das eigentliche Nutzungsende der Straßenbefestigung.

Für die Versuchsstrecke 8 wurde – aufgrund des anhand der Ergebnisse der Laborversuche festgestellten sehr unterschiedlichen Ermüdungsverhaltens der ATS – eine getrennte Betrachtung der NAZ (in und neben der Rollspur) vorgenommen. Dabei war festzustellen, dass bei der Versuchsstrecke 8 die Asphaltbefestigung in der Rollspur einen deutlich höheren Ermüdungsstatus aufweist als die Befestigung neben der Rollspur. Für die Versuchsstrecke 8 beträgt die Differenz der NAZ bei gleicher angenommener Verkehrsbelastung für die Befestigung in und neben der Rollspur ca. 6 Jahre.

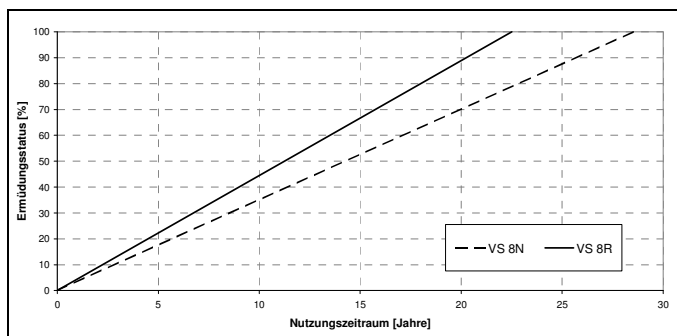


Bild 5: Ermüdungsstatus der Versuchsstrecke 8 (neben und in der Rollspur) in Abhängigkeit vom Nutzungszeitraum

Für alle übrigen Versuchsstrecken wurden die NAZ in und neben der Rollspur nicht separat betrachtet. Vielmehr wurden die E-Moduln und die Ermüdungsfunktionen der ATS_R und ATS_N gemittelt und anhand dieser die Ermittlung der NAZ vorgenommen. Die Ergebnisse der Berechnungen zeigen, dass die Versuchsstrecken 4, 5, 6 und 7 die geringsten Nutzungszeiträume aufweisen, wohingegen für die Versuchsstrecken 3 und 10 die höchsten Nutzungszeiträume ermittelt wurden.

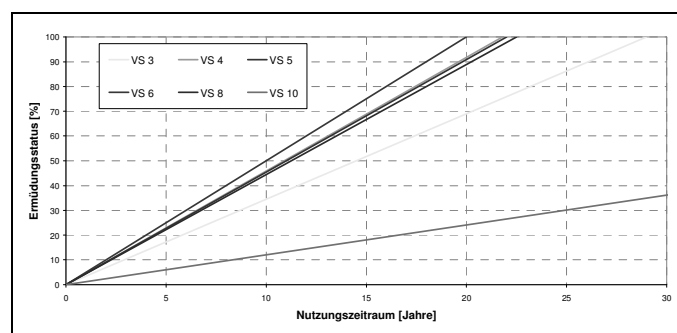


Bild 6: Ermüdungsstatus der Versuchsstrecken 3, 4, 5, 6, 8 und 10 in Abhängigkeit vom Nutzungszeitraum

Diese Untersuchungen machen deutlich, dass nur anhand dieser detaillierten Betrachtungen im Zusammenhang mit einem Dimensionierungsverfahren eine Abschätzung der NAZ für flexible Befestigungen vorgenommen werden kann. Eine Abschätzung, beziehungsweise vergleichende Einschätzung der NAZ flexibler Befestigungen, nur anhand von Ermüdungsfunktionen ist in der Regel nicht möglich und führt zu falschen Aussagen (siehe Kapitel 4).

Schließlich sind Überlegungen angestellt worden, ob die anhand der Ergebnisse der Spaltzugschwellversuche aufgestellte Ermüdungsfunktion als die tatsächliche Ermüdungsfunktion für statistische Auswertungen angesehen werden kann. Daher sind Mutungsbereiche für die Ermüdungsfunktionen der Versuchsstrecken gebildet worden, mithilfe derer prozentuale Ausfallwahrscheinlichkeiten angegeben werden können.

3.5 Vergleich der E-Modul-Kennlinien

Wie bereits erläutert, wurden Mischgutanalysen durchgeführt, um die Eingangswerte für die Bestimmung der E-Modul-Kennlinien nach dem Verfahren nach Francken und Verstraeten zu ermitteln. So wurden u. a. die Erweichungspunkte Ring und Kugel, die Nadelpenetrationswerte, die Raumdichten, die Rohdichten und die Bindemittelgehalte für die Asphaltgemische bestimmt. Diese E-Modul-Kennlinien sollen nun mit den E-Modul-Kennlinien, die anhand der Multi-Stage-Versuche für die einzelnen Gemische aufgestellt wurden, verglichen werden, um so die Genauigkeit des Verfahrens nach Francken und Verstraeten zur E-Modul-Bestimmung am gealterten und ermüdeten Asphalt abschätzen zu können.

In Bild 7 ist beispielhaft der E-Modul-Vergleich für die ADS dargestellt. Es ist sehr deutlich zu erkennen, dass das Aufstellen der E-Modul-Kennlinien nach dem Verfahren nach Francken und Verstraeten auf Grundlage der ermittelten Materialparameter wesentlich höhere E-Moduln im Vergleich zu den anhand der Laborversuche ermittelten Werte liefert. Dies wurde ebenfalls für die ATS und die ABi festgestellt. Vor allem im Temperaturbereich unter 0°C wurden wesentlich geringere E-Moduln anhand der Ergebnisse der Laborversuche ermittelt (Bild 8).

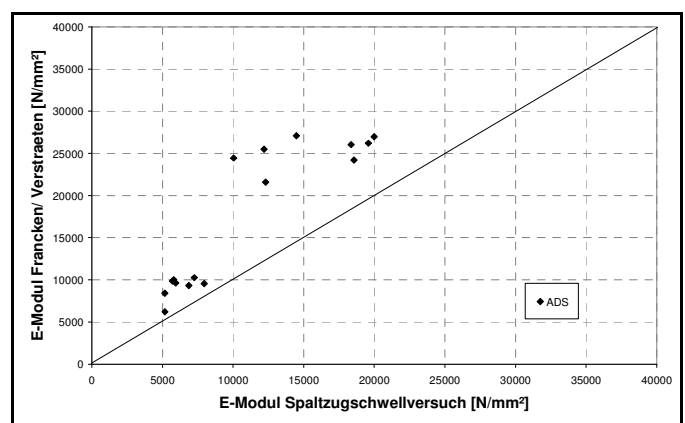


Bild 7: Gegenüberstellung der E-Moduln – ADS

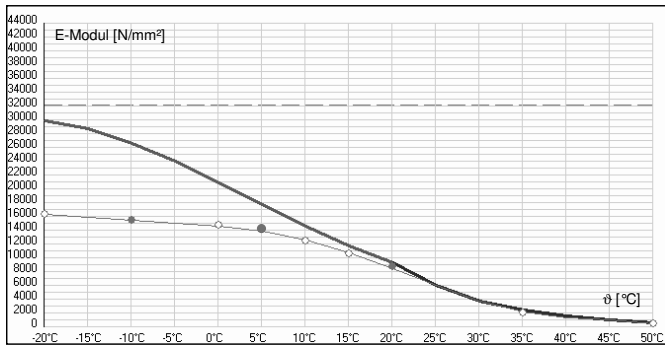


Bild 8: Vergleich der E-Modul-Kennlinien am Beispiel der ABi_R der Versuchsstrecke 5

3.6 Strukturelle und monetäre Bewertung auf Basis der Restnutzungsdauer

Im weiteren Verlauf des Forschungsprojekts wurden zwei Verfahren entwickelt, um eine Asphaltbefestigung auf Grundlage der im Labor bestimmten Parameter zu bewerten.

Die zwei hergeleiteten Verfahren unterscheiden sich minimal. Die aus der Restnutzungsdauer abgeleitete Zustandsgröße ist in beiden Fällen der sogenannte Restsubstanzwert. Dieser beschreibt den prozentualen Anteil der prognostizierten Restnutzungsdauer an der Gesamtnutzungsdauer.

Das Verfahren A stützt sich bei der Berechnung des Restsubstanzwerts ausschließlich auf die kumulierten Belastungen während der Vertragslaufzeit und der Restnutzungsdauer und stellt diese in Relation zur bemessungsrelevanten Belastung nach RStO 01.

Im Verfahren B bilden die ermittelte Restnutzungsdauer in Jahren und die zugrunde liegenden Verkehrssteigerungen den Restsubstanzwert. Nachteilig bei diesem Verfahren wirkt sich aus, dass die Bewertung auf einem planmäßigen Substanzabbau basiert, der für jedes einzelne Jahr des Nutzungszeitraums einen Substanzabbau gemäß RStO definiert. Außerdem wird mit einem Mittelwert für die Verkehrssteigerung gerechnet. Das Verfahren ist aus diesem Grund wesentlich unflexibler. Dem Verfahren A ist deshalb der Vorzug zu geben.

Neben der Zustandsbewertung wurde des Weiteren ein Verfahren zur monetären Bewertung erarbeitet. Dieses stützt sich im Wesentlichen auf die Zustandsbewertung und leitet aus der Soll-Ist-Differenz der Restsubstanzwerte die entsprechenden Ausgleichszahlungen für die Bonus-Malus-Regelung ab.

4 Folgerungen für die Praxis

Anhand der Ergebnisse des Multi-Stage-Versuchs und der Ermüdungsversuche im Zusammenhang mit Berechnungen mit dem Dimensionierungsprogramm PaDesTo war es möglich, Aussagen zum voraussichtlichen NAZ und der Restnutzungsdauer der untersuchten Versuchsstrecken zu treffen. Dabei wurde jedoch mangels detaillierter Kenntnisse vereinfacht ein linearer Verlauf der Ermüdungsstatuskurven angenommen. Möglicherweise ist jedoch ein exponentieller Verlauf ebenso realistisch. Aussagen dazu sind aber nur anhand von Ergebnissen von weiteren Felduntersuchungen möglich. Dazu müssten den bereits untersuchten Versuchsstrecken zu einem späteren Zeitpunkt (vorzugsweise in 3–4 Jahren) Bohrkerne entnommen werden und auf die gleiche Art und Weise untersucht werden wie bereits im vorliegenden Projekt. Dadurch ist es möglich, genaue Erkenntnisse zu Ermüdungsfortschritt / Rissentwicklung der untersuchten Asphaltbefestigungen zu erhalten. Aus diesem Grund wird dringend empfohlen, diese Untersuchungen durchzuführen. Voraussetzung dafür ist

jedoch, dass im Hinblick auf die Vergleichbarkeit an den Versuchsstrecken keine weiteren Erhaltungsmaßnahmen durchgeführt werden.

Eine weitere Absicherung der Ergebnisse ist auch im Zusammenhang mit den entwickelten strukturellen und monetären Bewertungsverfahren wünschenswert. Je zuverlässiger die Abschätzung des Nutzungsausfallzeitpunkts ist, desto höher ist die Akzeptanz eines solchen Bewertungsverfahrens bei den Beteiligten in einem Funktionsbauvertrag. Dies gilt insbesondere für die monetäre Bewertung.

Abschließend sei noch einmal hervorgehoben, dass das Modell zur Ermittlung des NAZ auf der beginnenden Rissbildung an der Unterseite der ATS basiert. Durch die Kalibrierung des Berechnungsverfahrens an den Schichtdicken der Befestigungen nach den RStO und dementsprechend der Festlegung von Sicherheitsbeiwerten wird jedoch der NAZ mit dem Sicherheitsniveau der RStO abgeschätzt. Hier ist jedoch in jedem Falle zur weiteren Detaillierung der Kenntnisse insbesondere über das Rissausbreitungsverhalten erheblicher Forschungsbedarf zu erkennen.