

## Weiterführende Untersuchungen zur Vervollständigung des Verfahrens zur Substanzbewertung von Asphaltbefestigungen

FA 4.227

Forschungsstelle: Karlsruher Institut für Technologie (KIT),  
Institut für Straßen- und Eisenbahnwesen  
(ISE) (Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. R. Roos)  
Bearbeiter: Roos, R. / Jähnig, J. / Plachkova-  
Dzhurova, P.  
Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Bau und  
Stadtentwicklung, Bonn  
Abschluss: Dezember 2013

- Durchführung von Steifigkeitsversuchen mit dem Spaltzug-Schwellversuch (SZV) nach AL Sp-Asphalt 09 an allen Asphaltschichten beziehungsweise -lagen
- Untersuchung des Schichtenverbunds mit dem Abscherversuch nach TP Asphalt-StB, Teil 80, zwischen allen Asphaltschichten beziehungsweise -lagen
- Bestimmung der kryogenen Zugspannungen mit Abkühlversuchen nach TP Asphalt-StB [4] an der (unteren Lage der) Asphalttragschicht

### 1 Aufgabenstellung

Ziel des Forschungsvorhabens war die Weiterentwicklung des Verfahrens zur Berechnung des Nutzungsausfallzeitpunkts (NAZ) auf Basis von zerstörenden Materialuntersuchungen und zerstörungsfreien Tragfähigkeitsmessungen. Dazu wurden insgesamt 12 Bundesfernstraßen untersucht, wobei zwei Untersuchungstrecken bereits im Forschungsvorhaben 04.0199/2004/ARB enthalten waren. Die grundlegende Vorgehensweise bei der Projektbearbeitung erfolgte nach dem Verfahren der RDO Asphalt beziehungsweise in Anlehnung an die deterministische Vorgehensweise des aktuellen Entwurfs der RSO Asphalt.

Ein weiteres Ziel war es, eine Systematik zu entwickeln, mit welcher die Ergebnisse der Bewertung der Restsubstanz von homogenen Untersuchungsabschnitten gegebenenfalls auf benachbarte Bereiche und sogar Netze extrapoliert werden können.

Zusätzlich sollen weitere Erkenntnisse zur Rissentstehung und -ausbreitung gewonnen werden.

### 2 Untersuchungsmethodik

Die grundlegende Vorgehensweise bei der Projektbearbeitung erfolgte in Anlehnung an das Forschungsvorhaben FE 04.0199 [8]. Zunächst wurden zehn Versuchsstrecken (VS) entsprechend der Anforderungen aus Tabelle 1 ausgewählt. Zwei weitere Versuchsstrecken wurden aus dem Untersuchungskollektiv des o. g. Projekts bestimmt.

Nach Festlegung der Strecken wurden zerstörungsfreie HWD-Messungen im Vorfeld der Bohrkernentnahmen durchgeführt, um Aussagen zur Homogenität der Untersuchungsabschnitte und zum Zustand bezüglich der Tragfähigkeit treffen zu können.

Für die umfassenden Laboruntersuchungen wurden jeweils 20 Bohrkern mit einem Durchmesser von 150 mm und ein Bohrkern mit einem Durchmesser von  $\geq 250$  mm in der rechten Rollspur je Streckenabschnitt entnommen.

Das primäre Untersuchungsprogramm im Labor sah vor:

- Durchführung von Ermüdungsversuchen nach AL Sp-Asphalt 09 [2] an der (unteren Lage der) Asphalttragschicht

Auf der Grundlage dieser Laboruntersuchungen und der weiteren dimensionierungsrelevanten Eingangsgrößen (zum Beispiel Schichtdicken, Verkehr, Klimazone etc.) wurde anschließend der NAZ mithilfe des Programms PaDesTo ermittelt. Ergänzt wurde diese Vorgehensweise durch eine stochastische Betrachtung der Berechnungseingangsparameter zum Beispiel aus Ermüdungsfunktionen. Mithilfe von konventionellen Mischgutuntersuchungen (Zusammensetzung, Bindemittelhärte, Rohdichte etc.) konnten dann die Ergebnisse verifiziert und eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt werden.

Danach konnte der NAZ berechnet werden, der dann für den gesamten homogenen Untersuchungsabschnitt gültig ist. Damit sollte eine Extrapolation von einer Bohrkernentnahmestelle in einem homogenen Abschnitt auf größere Streckenlängen mit klar definierten, noch zu erarbeitenden Kenngrößen erfolgen. Mit einer entsprechenden Systematik könnten die Ergebnisse auch auf ein Netz übertragen werden, um hierüber eine Einschätzung treffen zu können.

Im Rahmen von erweiterten Untersuchungen kam der Halbzylinder-Biegeversuch (HBV) nach DIN EN 12679-44 [1] zum Einsatz, mit welchem eine weiterführende Einschätzung der Rissentstehung und -fortpflanzung in einem ersten Schritt für die hier vorliegenden Untersuchungstrecken ermöglicht werden sollte.

#### 2.1 Untersuchungstrecken

Das Untersuchungskollektiv wurde mit Streckenabschnitten unterschiedlicher Länge aus Rheinland-Pfalz, Baden-Württemberg, Nordbayern, Brandenburg und Sachsen, deren Bauweisen den Zeilen 1, 2 und 6 der RStO 86/89 entsprechen, gemäß Tabelle 2 zusammengesetzt. Die Versuchsstrecken VS 1 bis VS 6 haben einen Aufbau gemäß Zeile 1 der RStO 86/89 (bitumenhaltige Deck-, Binder- und Tragschicht auf Frostschutzschicht) und die VS 7 bis VS 10 einen Aufbau gemäß Zeile 2 der RStO 86/89 (bitumenhaltige Tragschicht auf Bodenverfestigung). Die beiden Strecken aus dem Untersuchungskollektiv des Forschungsvorhabens FE 04.0199 wurden als Untersuchungsbereiche VS 11 und VS 12 einbezogen und besitzen einen Aufbau gemäß Zeile 6 der RStO 86/89 (bitumenhaltige Tragschicht auf HGT).

Tabelle 1: Auswahlkriterien für die Versuchsstrecken

<b>Fahrbahndecke</b>	Asphalt
<b>Bauklasse</b>	Strecken der Bauklasse SV, I und II
<b>Bauweise</b>	RStO 86/89, Zeile 1 und Zeile 6
<b>Alter der Tragschicht</b>	Zwischen 10 und 15 Jahre
<b>Verkehrsbelastung</b>	BK SV und I: kumulierte Belastung > 10 Mio. äquiv. 10 t-Achsübergänge BK II: kumulierte Belastung > 5 Mio. und ≤ 10 Mio. äquiv. 10 t-Achsübergänge
<b>SV-Anteil</b>	> 15 %
<b>Weitere Randbedingungen</b>	Keine Verwindungsbereiche; keine starke Längsneigung

zum Teil eine ähnliche Belastung ertragen haben, unterschiedliche Eigenschaften bezüglich der Tragfähigkeit aufweisen.

Tabelle 2: Zusammenstellung der ausgewählten Versuchsstrecken

VS	Bauklasse (RStO 86/89)	Bauweise (RStO 86/89)	Baujahr ATS	SV-Anteil [%]	B-Zahl [äquiv. 10 t-AÜ]
1	SV	Zeile 1	2000	14,9	ca. 22 Mio.
2	SV		1996	14,4	ca. 8 Mio.
3	SV		1996	21,8	ca. 8 Mio.
4	I		1999	13,8	ca. 7 Mio.
5	I		1998	20,9	ca. 33 Mio.
6	II		2001	6,1	ca. 3 Mio.
7	SV	Zeile 2	2000	26,8	ca. 23 Mio.
8	SV		1997	7,8	ca. 11 Mio.
9	I		1996	16,7	ca. 33 Mio.
10	II	Zeile 6	1993	26,0	ca. 12 Mio.
11	I		1980	16,8	ca. 62 Mio.
12	SV		1980	16,1	ca. 69 Mio.

## 2.2 Untersuchungen in situ und Bohrkernentnahme

Die Tragfähigkeitsmessungen erfolgten mit dem Heavy Weight Deflectometer (HWD). Aus den erhobenen Messdaten wurden die Zustandsindikatoren D0, Tz, UI, R0 nach Roos et al. [9] für jeden Messpunkt berechnet.

Mit den Erkenntnissen aus den Tragfähigkeitsmessungen und vor allem mit dem Zustandsindikator D0 (maximale Einsenkung im Lastzentrum) wurden auf Grundlage des Arbeitspapiers "Grundlagen zur Ermittlung homogener Abschnitte zur Bewertung der strukturellen Substanz von Straßenbefestigungen" [3] die kumulativen Summen ermittelt und die Untersuchungsstrecken in homogene Abschnitte unterteilt, wie für VS 6 beispielhaft in Bild 1, oben, dargestellt. Gemäß der Vorgehensweise des Arbeitspapiers wurden dann benachbarte Abschnitte, wenn sich die Mittelwerte nicht signifikant voneinander unterschieden, zusammengefasst.

Für die Bohrkernentnahme wurde jeweils ein Bereich ausgewählt, der die mittleren Tragfähigkeitskennwerte im homogenen Untersuchungsabschnitt am besten repräsentiert. Des Weiteren wurden die Ergebnisse der visuellen Zustandserfassung (Flickstellen, Längs- beziehungsweise Quernähte) vor Ort während der Tragfähigkeitsmessungen und sicherheitsrelevante Aspekte (Bereiche von Anschlussstellen) hinzugezogen. Um die vorgesehenen Laboruntersuchungen nach Art und Umfang durchführen zu können, wurden je Abschnitt 20 Bohrkern mit Nenndurchmesser 150 mm und ein Bohrkern mit Nenndurchmesser ≥ 250 mm entnommen. Alle Bohrkern wurden zunächst im Labor vermessen, visuell begutachtet und fotografiert.

Zur ersten Einschätzung der Untersuchungsstrecken bezüglich des Gesamtzustands wurden die Ergebnisse der Untersuchungen und der gesammelten Informationen zusammengeführt und interpretiert. Daraus ist erkennbar, dass die untersuchten Strecken, auch wenn sie einen ähnlichen Aufbau aufweisen und

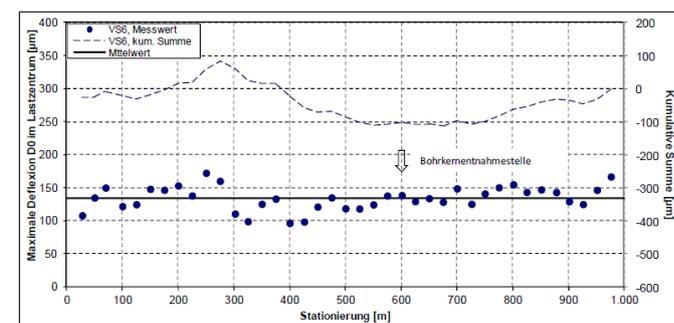
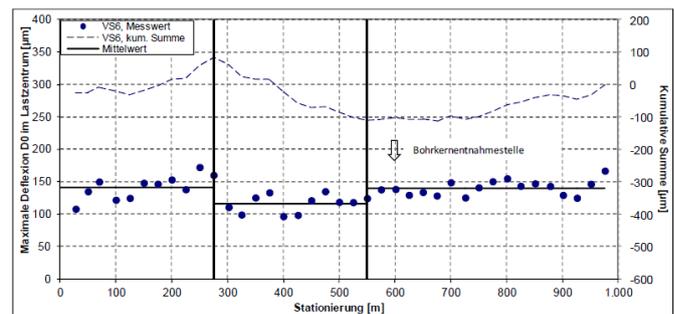


Bild 1: Grafische Darstellung der Messwerte mit der kumulativen Summe und Ermittlung der homogenen Abschnitte nach [3] am Beispiel von VS 6

## 3 Ergebnisse der Laboruntersuchungen

Das Ergebnis der Untersuchungen zur Steifigkeit der Asphalt-schichten sind die Hauptkurven der Strecken. Die Deckschicht hat dabei erwartungsgemäß i. A. die geringste Steifigkeit. Tendenziell ist eine Abstufung der Asphaltsteifigkeit von der Deckschicht in Richtung der Tragschichten festzustellen. Dabei haben beide Asphalttragschichtlagen einer Strecke zum Teil ein ähnliches Verhalten (zum Beispiel VS 1 und VS 7) und zum Teil

unterscheiden sie sich erheblich voneinander (zum Beispiel VS 2 und VS 4).

Bei einem Vergleich der verschiedenen Ermüdungsfunktionen untereinander wird deutlich, dass diese hinsichtlich ihrer Lage, die durch die Parameter C1 und C2 definiert wird, teilweise deutlich voneinander abweichen. So sind im Einzelfall vergleichsweise flache Ermüdungsfunktionen, die durch einen Parameter  $C2 \leq 3$  charakterisiert werden (VS 11), erkennbar. In anderen Fällen wurden relativ steile Ermüdungskurven ermittelt ( $C2 > 4$  bei VS 12).

Weiterhin wird beim Vergleich deutlich, dass die Bestimmtheitsmaße der Ermüdungsfunktionen bei einigen Untersuchungsstrecken sehr hoch ausfallen ( $R^2 = 0,99$  bei VS 2), was auf geringe Streuungen hindeutet.

Bei den ermittelten kryogenen Spannungen ist die typische Form derartiger Spannungsverläufe in Abhängigkeit der Asphalttemperatur zu erkennen. Beginnend mit einem flachen Anstieg bei +20 °C, steigt die temperaturinduzierte (kryogene) Zugspannung in den Proben mit andauernder Abkühlung progressiv an. Ab einem gewissen Punkt wird das Ende der Kurve erreicht, was in der Regel auf einen Bruch des Probekörpers hindeutet.

Als Ergebnis der Halbzylinder-Biegeversuche wird die Bruchzähigkeit  $K_{Ic}$  als Mittelwert von vier Einzelwerten berechnet. Das ist der kritische Wert des sogenannten Spannungsintensitätsfaktors  $K_{Ic}$ , der als "Maß" für die Belastung im Rissspitzenbereich dient [6]. Diese Materialkenngröße hängt unter anderem von den Bindemittleigenschaften und der Korngrößenzusammensetzung der einzelnen Probekörper ab. Für die erste Asphalttragschichtlage von VS 11 und VS 12 liegen die Ergebnisse deutlich unter denen der anderen Strecken. Für die übrigen Asphaltsschichten sind zunächst unterschiedliche Zusammenhänge zu vermuten, die noch zu untersuchen sind.

Die visuelle Begutachtung der Bohrkerne und die Ergebnisse der Scherversuche zeigen, dass der Schichtenverbund, auch innerhalb eines kleinen Abschnitts, erheblich streuen kann.

### 3.1 Lösungsansätze Rissentwicklung und -ausbreitung

Die Ergebnisse des Spaltzug-Schwellversuchs wurden zusätzlich dahingehend ausgewertet, dass der Zeitpunkt des Auftretens der ersten Mikrorisse  $N_{Mikro}$  die zu einem Steifigkeitsabfall führen, ermittelt wurde.

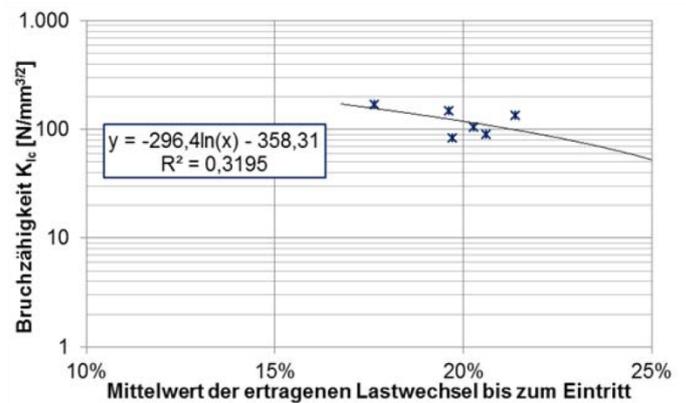
Die Ergebnisse des Halbzylinder-Biegeversuchs werden anhand der ermittelten Bruchzähigkeit  $K_{Ic}$  bewertet. Je größer diese ist, desto größer ist die Spannung, die ein Probekörper bis zum Auftreten des Makrorisses ertragen kann.

Ein Vergleich zwischen den beiden Verfahren zur Beschreibung der Rissentwicklung und -ausbreitung kann im vorliegenden Fall nur auf der Grundlage von sechs Wertepaaren erfolgen. Die Tendenzen sind in Bild 2 grafisch dargestellt. Mit steigender Bruchzähigkeit nimmt der Anteil der Lastwechsel  $N_{Mikro}$  bis zum Eintreten der Mikrorisse ab. Das heißt, der Anteil an Lastwechseln zwischen  $N_{Mikro}$  und  $N_{Makro}$  wächst und somit auch der Rissausbreitungswiderstand. Um den Zusammenhang mit

größerer Sicherheit beschreiben zu können, sind weitere Untersuchungen notwendig.

### 3.2 Berechnung des NAZ

Der NAZ wird auf der Grundlage der ermittelten dimensionierungsrelevanten Eingangsgrößen mithilfe des Programms PaDesTo 2008 Enterprise [7] abgeschätzt, welches auf den RDO Asphalt 09 basiert. Hierzu wurden die materialspezifischen Kennwerte der untersuchten Asphalte in einer Materialdatenbank abgespeichert. Dieser Zeitpunkt ist durch die Anzahl an Lastwechseln definiert, die eine Asphaltbefestigung ab einem bestimmten Bewertungszeitpunkt für festgelegte Verkehrs- und Temperaturprognosewerte bis zur Rissinitiierung an der Unterseite der untersten Asphaltsschichtlage noch ertragen kann [5].



**Bild 2:** Zusammenhang zwischen den Ergebnissen des Spaltzug-Schwellversuchs und des Halbzylinder-Biegeversuchs zur Charakterisierung der Rissausbreitung

Ergebnis der Berechnungen mit PaDesTo zur Abschätzung der strukturellen Substanz ist in erster Linie der Ermüdungsindex der Asphaltsschichten. Er stellt das Verhältnis der für den Nutzungszeitraum prognostizierten zu den insgesamt zulässigen Lastwechseln bis zum Eintritt von Ermüdungsrissen dar.

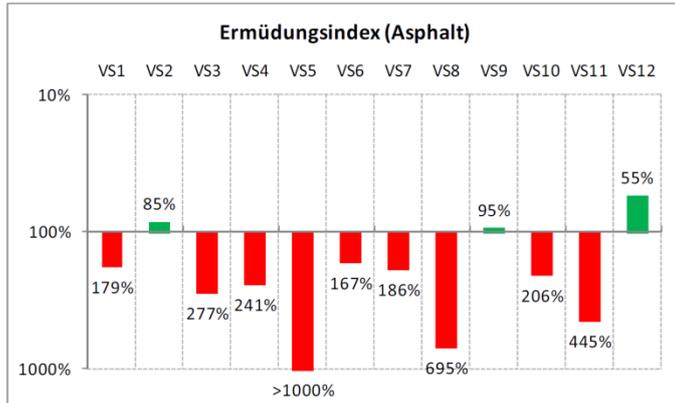
In Bild 3 sind die berechneten Ermüdungsindizes für die Untersuchungsstrecken VS 1 bis VS 12 dargestellt. Die grün gekennzeichneten Ergebnisse lassen erkennen, dass für VS 2, VS 9 und VS 12 die angenommene Nutzungsdauer von  $N = 30$  Jahren erreicht werden kann und Ermüdungsrisse in den Asphalttragschichten innerhalb dieses Zeitraums nicht zu erwarten sind (Bild 4).

Bei ausgewählten Strecken der Bauweise Asphalt aus Frostschuttschicht wurden die  $E_{v2}$ -Moduln und bei den Strecken der Bauweise Asphalt auf HGT wurden die E-Moduln der HGT variiert. Daraus folgte, dass der Einfluss der unterschiedlichen  $E_{v2}$ -Werte der Frostschuttschicht auf den Ermüdungsindex vergleichsweise groß und der Einfluss der unterschiedlichen Steifigkeiten der HGT dagegen vergleichsweise gering ist.

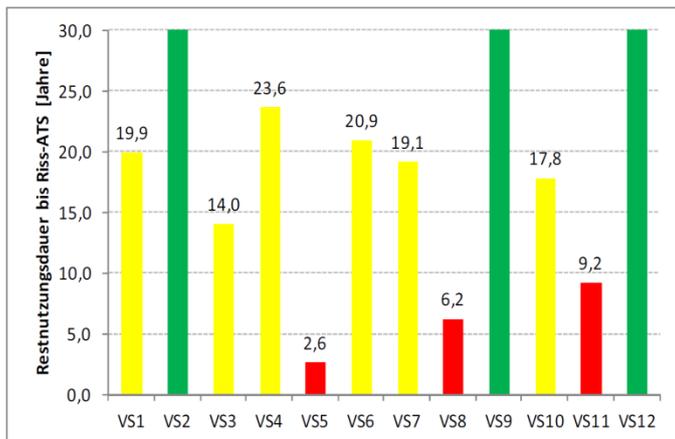
Aus der grafischen Ergebnisdarstellung in PaDesTo 2008 werden die einzelnen Jahreszahlen dazu abgelesen, sodass die entsprechenden Rest- und anschließend die Gesamtnutzungsdauern ermittelt werden können.

Bevor die Ergebnisse auf ein größeres Netz übertragen werden können, sollte zunächst die Streuung von Dimensionierungs-

eingangswerten ausgewählter Streckenabschnitte analysiert werden, sodass daraus auf die Streuung der Grundgesamtheit geschlossen werden kann, aus der diese stammen. An ausgewählten Strecken werden deshalb Variationen der maßgeblichen Eingangswerte vorgenommen und die Ergebnisse beschrieben. Somit würde ausgehend von der Ausgangsvariante für die Untersuchungsstrecke VS 11 die Restnutzungsdauer um  $\pm 5$  Jahre variieren, wenn die jeweils minimalen oder maximalen ermittelten Steifigkeiten statt der Mittelwerte zugrunde gelegt wurden.



**Bild 3: Ermüdungsindizes der Asphaltsschichten für VS 1 bis VS 12 (PaDesTo 2008)**



**Bild 4: Restnutzungsdauern bis zum Auftreten von Ermüdungsrisen in den ATS (PaDesTo 2008)**

Die Berücksichtigung von Vertrauensbereichen bei der Ermüdungsfunktion und die Darstellung des Schädigungsverlaufs bei VS 7 und VS 11 erlaubten anhand differenzierter Ausfallraten eine wesentlich detailliertere Beurteilung der Restsubstanz. Ergänzend zur herkömmlichen Betrachtungsweise, bei welcher eine Restnutzungsdauer allein aus einer mittleren Ermüdungsfunktion ermittelt wird, kann anhand der Intervallgrenzen der Zeitpunkt definierter Ausfallraten bestimmt werden. Wesentlicher Vorteil einer solchen Vorgehensweise ist es, dass Streuungen relevanter Eingangswerte bewusst berücksichtigt werden (in diesem Fall: Streuungen der Ermüdungsversuche).

## 4 Übertragung der Ergebnisse von Projektebene auf Netzebene

Die Übertragung der Ergebnisse auf das Gesamtnetz sollte auf der Grundlage von Zusammenhängen zwischen der Restnutzungsdauer und den Streckeninformationen beziehungsweise Laborergebnissen erfolgen. Dazu wurden benachbarte Abschnitte aus dem Netz mit der gleichen Kombination der ZEB-Merkmale gesucht. Das Hauptaugenmerk fiel dabei auf die Zustandsmerkmale ZWRISS und ZWAUN sowie den Teilwert TWSUB, da bei den Korrelationsanalysen Tendenzen zwischen diesen Merkmalen und der Restnutzungsdauer auftraten. Eindeutige, statistisch abgesicherte Zusammenhänge zwischen den Laboruntersuchungen und dem NAZ konnten mit dem relativ geringen Datenkollektiv nicht ermittelt werden, sodass ein Verfahren, das als "Schnelltest" für die Ermittlung der Restnutzungsdauer dienen soll, zunächst nicht vorgeschlagen werden kann. Über die Berücksichtigung der Streuungen der Eingangswerte konnten zwar bestimmte Bereiche für die Ergebnisse mit Versagenswahrscheinlichkeiten definiert werden, diese können jedoch zum aktuellen Zeitpunkt Bohrkernentnahmen und Laboruntersuchungen zur Bestimmung dimensionierungsrelevanter Eingangsparameter nicht ersetzen. Die Kombination von Zustandswerten und Tragfähigkeitswerten hat sich in diesem Zusammenhang bewährt.

Die Ergebnisse aus den Untersuchungen in situ, die Streckeninformationen, die Ergebnisse der Laboruntersuchungen und die der weiteren Berechnungen wurden in zwei Gruppen unterteilt. Dabei wurden Korrelationen innerhalb und zwischen den Gruppen untersucht.

Nach aktuellem Kenntnisstand liegt in der Kombination zerstörungsfreier Prüfverfahren (wie ZEB und HWD) und Materialprüfungen an Bohrkernen zur Bestimmung der dimensionierungsrelevanten Kenngrößen die Zukunft. Durch diese Verknüpfung besteht die Möglichkeit, die punktuell und räumlich nur für einen kleinen Bereich gültigen Kennwerte auf größere Bereiche zu extrapolieren, solange diese Abschnitte vergleichbares Tragverhalten und ähnliche Zustandswerte aufweisen. Erste Ansätze für eine solche Verfahrensweise wurden anhand eines Beispiels exemplarisch gezeigt.

## 5 Schlussfolgerungen

Die Tragfähigkeitsmessungen lieferten schon erste Tendenzen zur Beurteilung der Untersuchungsstrecken. So gaben bei einigen Untersuchungsstrecken einzelne Indikatoren zum Beispiel Hinweise auf eine relativ geringe Tragfähigkeit von hydraulisch gebundenen Tragschichten. Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass aus den Tragfähigkeitskennwerten wertvolle Informationen zu Bauabschnittsgrenzen und zu Änderungen der Art und der Eigenschaften der Schichten gewonnen werden können.

Die Restnutzungsdauer, welche hier die verbleibende Zeit bis zum Auftreten von Ermüdungsrisen in der Asphalttragschicht beschreibt, variiert für die 12 Untersuchungsstrecken zwischen 3 und über 30 Jahren (Bild 4).

Wesentliche Erkenntnisse der Korrelationsanalysen waren die zum Teil guten Zusammenhänge ( $r > 0,900$ ) zwischen der Streuung der Steifigkeiten, ausgedrückt durch die Variationsko-

effizienten der E-Moduln der Schichten und den ZEB-Merkmalen. Mäßige Zusammenhänge ( $0,900 > r > 0,700$ ) konnten zwischen den Untersuchungen in situ, den Streckeninformationen, den im Labor bestimmten dimensionierungsrelevanten Eingangsgrößen und dem NAZ ermittelt werden. Darüber hinaus zeigen visuell an Bohrkernen festgestellte Auffälligkeiten ebenso einen Zusammenhang zum NAZ.

Zum Abschluss der Untersuchungen wurde versucht, erste Grundzüge einer Systematik zu entwickeln, mit welcher die Ergebnisse der Bewertung der Restsubstanz von homogenen Untersuchungsabschnitten gegebenenfalls auf benachbarte Bereiche oder größere Netzabschnitte extrapoliert werden können. An einem Beispiel wurde gezeigt, wie die Analyse von benachbarten Abschnitten einer Strecke durchgeführt werden kann und wie die Ergebnisse zu interpretieren sind.

In diesem Zusammenhang ist jedoch zu erwähnen, dass zu dieser Problematik aktuell noch verschiedene Forschungsthemen bearbeitet werden. Hervorzuheben ist dabei das Forschungsvorhaben 04.0249/2011/FGB "Entwicklung einer Systematik zur Ermittlung von repräsentativen Substanzwerten in homogenen Abschnitten", welches gewissermaßen als Nachfolgethema des hier vorliegenden Forschungsthemas bearbeitet wird. Die Projektpartner von FE 04.0227 sind auch in diesem Vorhaben eingebunden, sodass zukünftig eine Kontinuität sichergestellt wird.

## 6 Literatur

- [1] DIN EN 12697-44: Asphalt- Prüfverfahren für Heiasphalt- Teil 44: Bestimmung des Risswachstums durch eine Biegeprüfung unter Aufbringung einer Dreipunkt- Belastung (SCB-Prüfung), 2010
- [2] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Arbeitsanleitung zur Bestimmung des Steifigkeits- und Ermüdungsverhaltens von Asphalten mit dem Spaltzug- Schwellversuch als Eingangsgröße in die Dimensionierung von Asphaltbefestigungen (AL Sp-Asphalt 09), FGSV-Arbeitsgruppe Infrastrukturmanagement, Ausgabe 2009.
- [3] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Arbeitspapier Grundlagen zur Ermittlung homogener Abschnitte zur Bewertung der strukturellen Substanz von Straßenbefestigungen, Köln 2009
- [4] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Technische Prüfvorschrift für Asphalt im Straßenbau (TP A-StB), Teil: Verhalten von Asphalten bei tiefen Temperaturen, Köln 1994
- [5] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Richtlinien zur Bewertung der strukturellen Substanz des Oberbaues von Verkehrsflächen mit Asphaltdeckschicht, RSO Asphalt 12, Entwurf März 2013
- [6] Grass, D.; Seelig, T.: Bruchmechanik – Mit einer Einführung in die Mikromechanik. 4. bearbeitete Ausgabe, Springer Verlag, Berlin, 2007
- [7] Pavement Design Tool (PaDesTo): Software und Handbuch, Dimensionierung von Asphaltbefestigungen für Verkehrsflächen, Version 2008
- [8] Ressel, W., Senner, A., Wellner, F., Werkmeister, S., Lipke, S.: Vergleichende Bewertung der Restsubstanz von Asphaltbefestigungen nach langjähriger Verkehrsnutzung, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, BMV, Bann, Heft 1003, 2008
- [9] Roos, R., Freund, H.-J., Thiele, T.: Erarbeitung eines Bewertungshintergrundes für Tragfähigkeitsmessungen auf Basis von Zustandsindikatoren nach JENDIA, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, BMV, Bonn, Heft 989, 2008.