

## Ermittlung der Streuung dimensionierungsrelevanter Eingangsgrößen für Asphalte

FA 4.204

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

Bearbeiter: Mollenhauer, K./ Wistuba, M.P./ Walther, A.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Bonn

Abschluss: September 2011

### 1 Einleitung und Zielsetzung

#### 1.1 Problemstellung

In Deutschland erfolgt die Dimensionierung von Straßenbefestigungen im Regelfall auf empirische Weise gemäß den Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen (RStO). In Abhängigkeit von der Bauklasse (Verkehrsbelastung) steht in Form eines Katalogs mit standardisierten Aufbauten eine begrenzte Auswahl vergleichbarer Bauweisen zur Verfügung, die erfahrungsgemäß der berechneten Belastung innerhalb des Nutzungszeitraums standhalten.

Aufgrund ansteigender Verkehrsbeanspruchung sowie der Einführung neuer Vertragsformen (z. B. Funktionsbauverträge) und der Notwendigkeit des gezielten Einsatzes reduzierter Finanzierungsmittel im Straßenbau, wurden mit der Richtlinie für die rechnerische Dimensionierung des Oberbaus von Verkehrsflächen mit Asphaltdeckschicht (RDO Asphalt 09) entsprechende Instrumente zur analytischen Dimensionierung von Verkehrsbefestigungen bereitgestellt. Schichtaufbau und Materialzusammensetzungen können dabei an die tatsächlich auftretenden Belastungen bestmöglich angepasst werden. Über die Nachweise der Ermüdungsresistenz und des Verformungswiderstands wird für flexible Straßenbefestigungen rechnerisch sichergestellt, dass die optimierte Fahrbahnbefestigung innerhalb der angestrebten Lebensdauer gebrauchstauglich bleibt. Mögliche Streuungen der verwendeten Materialkennwerte werden in Form von Sicherheitsbeiwerten berücksichtigt. Für eine Angabe der Größe dieser Sicherheitsbeiwerte fehlte bisher die Grundlage.

In der Baupraxis ist eine gewisse Streuung der Asphaltzusammensetzung unvermeidlich. Jedoch sind daraus wesentliche Einflüsse auf das resultierende Gebrauchsverhalten zu erwarten. Bei der rechnerischen Dimensionierung, in der das zukünftige Gebrauchsverhalten der Straße möglichst realitätsnah prognostiziert werden soll, sind daher die Streuungen der Eingangsparameter, die sich aus der Streuung der Asphaltzusammensetzung ergeben, zu quantifizieren. Dazu sind Laboruntersuchungen an Asphaltvariationen notwendig, welche die in der Praxis auftretenden Streuungen der Zusammensetzung gezielt wiedergeben.

#### 1.2 Forschungsziel

Ziel des Forschungsprojekts ist die Ermittlung der Streuung der dimensionierungsrelevanten Eingangsgrößen für Asphalte. Daraus sollen Präzisierungen und Grenzwerte für die Anforderungen an die Material- bzw. Schichteigenschaften abgeleitet werden, wodurch die Lebensdauerprognose mithilfe der rechnerischen Dimensionierung verbessert wird.

rungen an die Material- bzw. Schichteigenschaften abgeleitet werden, wodurch die Lebensdauerprognose mithilfe der rechnerischen Dimensionierung verbessert wird.

#### 1.3 Untersuchungsmethodik

Zunächst wurden im Rahmen dieser Arbeit jene Einflussgrößen zusammengestellt, die das Gebrauchsverhalten von Asphalt maßgeblich bestimmen. Jene Streuungen, die in der Praxis durch Mischgut-Herstellung, Einbau und Verdichtung auftreten und produktions- bzw. baustellenbedingt nicht zu vermeiden sind, wurden anhand der Analyse von Ergebnissen aus Kontrollprüfungen ermittelt.

Folglich wurden Asphaltdeck-, Asphaltbinder- und Asphalttragschichtmischgut in jeweils fünf Variationen im Labor hergestellt. Neben einer Soll-Variante wurden gute ("best case") und schlechte ("worst case") Mischgutvarianten zusammengesetzt. Zur Analyse des Verdichtungs-Einflusses wurden jeweils die Soll-Varianten unter dreifacher Variation der Verdichtungsenergie zu Asphalt-Probepplatten verdichtet.

An den Asphalt-Probepplatten wurden statische und zyklisch-dynamische Laborversuche zur Gewinnung von Dimensionierungs-Eingangsgrößen durchgeführt:

zur Ermittlung der Rissresistenz durch Materialermüdung im Normal- und Tieftemperaturbereich:

- Spaltzug-Schwellversuche,
- Zug- und Abkühlversuche und
- Einaxiale Zug-Schwellversuche;

zur Ermittlung des Verformungswiderstands:

- Einaxiale Druck-Schwellversuche,
- Dynamische Stempel Eindringversuche und
- Triaxiale Druck-Schwellversuche mit dynamischer Radialspannung.

### 2 Untersuchungsmaterialien

Zur Auswahl der in Laborprüfungen zu untersuchenden Asphaltvarianten wurden vorab die maßgebenden Auswirkungen von Mischguteigenschaften auf die Ergebnisse von Asphaltprüfungen für die Ermittlung von Dimensionierungs-Eingangsgrößen untersucht. Um vom Soll abweichende Materialien zu untersuchen, wurden die Ergebnisse von Kontrollprüfungen in Niedersachsen ausgewertet.

#### 2.1 Einfluss der kompositionellen Eigenschaften auf das mechanische Verhalten von Asphalt

In zahlreichen internationalen Forschungsarbeiten wurden die Auswirkungen verschiedener Variationen der Asphaltzusammensetzung auf die Ergebnisse von Prüfverfahren, die auch bei der Ermittlung von Eingangsgrößen für Dimensionierungs-

verfahren Verwendung finden, systematisch untersucht (vgl. Mollenhauer et al., 2008 b).

Zusammenfassend ergeben sich aus der Literaturstudie folgende Trends aus geänderten Asphaltzusammensetzungen auf das Ermüdungsverhalten:

- Ein steigender Bindemittelgehalt führt zu höheren ertragbaren Lastwechselzahlen bzw. bis zu einem Maximum.
- Ein Gesteinskörnungsgemisch mit erhöhtem Feinkornanteil führt zu höheren ertragbaren Lastwechselzahlen.
- Weichere Bindemittel führen zu höheren Lastwechselzahlen und bewirken eine Verschiebung der maximal erträglichen Lastwechselzahl zu tieferen Temperaturen.
- Eine Verhärtung des Bindemittels (Viskositätsänderung) bewirkt bei positiven Temperaturen eine höhere bzw. bei negativen Temperaturen eine geringere ertragbare Lastwechselzahl.
- Höhere Verdichtungsgrade führen zu höheren Bruchlastwechselzahlen.

Die Auswirkungen der unterschiedlichen Asphalteigenschaften auf den Verformungswiderstand können wie folgt zusammengefasst werden:

- Ein steigender Bindemittelgehalt führt zu einem geringeren Verformungswiderstand.
- Eine Korngrößenverteilung mit hohem Feinkornanteil führt zu einem hohen Verformungswiderstand. Die Gesteinskörnungszusammensetzung bildet dabei die maßgebende Einflussgröße.
- Weichere Bindemittel führen bei sonst gleicher Zusammensetzung tendenziell zu einer Verringerung des Verformungswiderstands. Dieser Einfluss ist jedoch weniger bedeutend als die anderen Größen.
- Höhere Verdichtungsgrade führen in der Regel zu einer Erhöhung des Verformungswiderstands. Leicht verdichtbare Asphalte können eine Verringerung des Verformungswiderstands bei hohem Verdichtungsgrad aufweisen.

In Tabelle 1 sind die genannten Auswirkungen in ihrer Wirkungstendenz zusammengestellt. Abgesehen vom Verdichtungsgrad, der sowohl den Ermüdungswiderstand als auch die Verformungsresistenz in gleicher Richtung verändert, bewirken Änderungen der Mischgutzusammensetzung entgegen gesetzte Einflüsse auf die beiden Materialeigenschaften. Innerhalb gewisser Grenzen beeinflusst ein steigender Bindemittelgehalt und ein steigender Feinkornanteil die Ermüdungsbeständigkeit in positiver, jedoch den Verformungswiderstand in negativer Richtung. Das gleiche gilt für einen Anstieg der Bindemittelviskosität (für die Ermüdung bei tiefen Temperaturen). Ein höherer Verdichtungsgrad begünstigt dagegen sowohl den Verformungs- als auch den Ermüdungswiderstand.

### 2.2 In der Baupraxis übliche Streuungen der Asphalteigenschaften

In der täglichen Baupraxis können Abweichungen zwischen den Eigenschaften des tatsächlichen eingebauten Mischguts von den in der Erstprüfung definierten Materialzusammensetzungen nicht vermieden werden (siehe dazu z. B. Leutner et al., 2006 und Opel, 2007). Im Rahmen dieses Projekts wurden die Abweichungen der Mischguteigenschaften anhand der in einer Datenbank seit 1996 zusammengestellten Ergebnisse der Kontrollprüfungen für Baumaßnahmen auf niedersächsischen Autobahnen, Bundesstraßen und Landesstraßen festgestellt. Diese Daten wurden von der Niedersächsischen Landesbehörde für Straßenbau und Verkehr zur Verfügung gestellt. Für die Auswertungen standen somit insgesamt 40 900 Mischgut- und 27 800 Bohrkernanalysen von Baumaßnahmen zur Verfügung. Die Datensätze wurden nach Mischgutart und -sorte, Bindemittelart sowie den Soll-Werten der Mischgutzusammensetzung gruppiert und ausgewertet (vgl. Mollenhauer et al., 2008a).

Exemplarisch zeigt Bild 1 (links) die statistische Auswertung der in Kontrollprüfungen ermittelten Bindemittelgehalte aller in der Datenbank enthaltenen Datensätze von SMA 8 S- (bzw. SMA 0/8 S-) Mischgutvarianten mit dem Soll-Bindemittelgehalt von 7,0 M.-%. Die Punkte zeigen jeweils die Häufigkeit der jeweiligen Bindemittelgehalte, die sich mit einer normalverteilten Häufigkeitsverteilung (schwarz gestrichelte Linie) beschreiben lassen. Anhand der Summenlinie (Kreise bzw. grau gestrichelte Linie) können direkt die Erwartungswerte für Über- und Unterschreitenswahrscheinlichkeiten von 5 % abgelesen werden. Es ergeben sich bei einem mittleren Bindemittelgehalt von 6,99 M.-% und einer Standardabweichung von 0,222 M.-% Abweichungen von ca.  $\pm 0,38$  M.-% vom Sollwert. Zusammenfassend zeigt Tabelle 2 Mittelwert und Standardabweichungen der an verschiedenen Asphaltmischgutarten und -sorten in Kontrollprüfungen gemessenen Bindemittel- und Füllergehalte in Vergleich zu den jeweils in der Eignungsprüfung definierten Soll-Anteilen.

Für die Verteilung der an Asphaltdeckschichten aus SMA 8 S gemessenen Verdichtungsgrad  $k$  (vgl. Bild 1, rechts) ergeben sich hohe Abweichungen zu der gestrichelt dargestellten Normalverteilung. Hier führt die Anwendung einer rechtsschiefen Weibull-Verteilung zu einer besseren Anpassung an die Verteilung der tatsächlich gemessenen Verdichtungsgrade. Die für vier näher betrachtete Asphaltmischgutarten ermittelten Erwartungs- und Quantilwerte sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

### 2.3 Auswahl der untersuchten Asphaltvarianten

Zur Ermittlung der Auswirkungen der in der Praxis auftretenden Materialstreuungen auf die versuchstechnisch gewonnenen Dimensionierungs-Eingangsgößen wurden je ein Deck-, Binder- und Tragschichtasphaltmischgut untersucht. Dabei wurden jene Asphaltarten ausgewählt, die anhand der Datenbankauswertung am häufigsten beim Bau von hochbeanspruchten Verkehrsflächen zur Anwendung kamen:

- Asphaltdeckschichtmischgut: SMA 8 S (SMA 0/8 S)
- Asphaltbindervariante: AC 16 B S (ABi 0/16 S)

- Asphalttragschichtmaterial:  
AC 22 T S (ATS 22 CS).

Für jede der drei Asphaltarten wurden insgesamt fünf Mischgutvariationen hergestellt, deren Zusammensetzung jeweils aus den Ergebnissen der statistischen Auswertung der Mischgutstreuungen ableitbar ist:

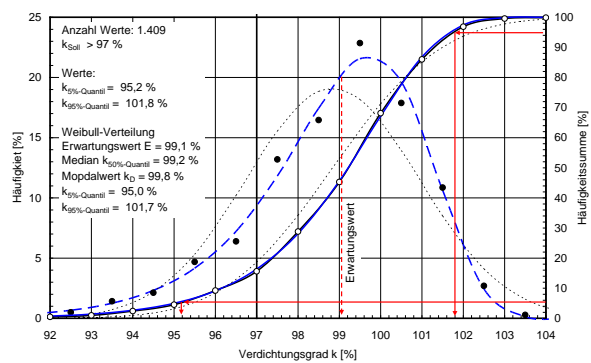
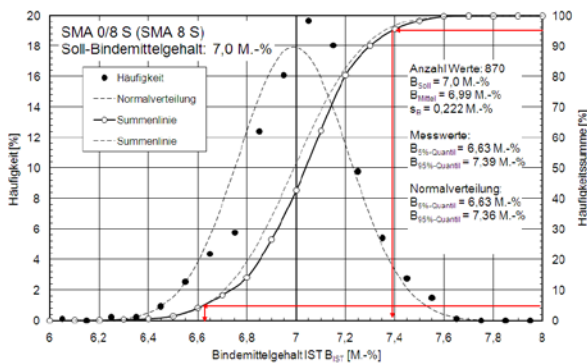
- Variante 1: Soll-Mischgutvariante, Verdichtungsgrad  $k_{V1}$  = Erwartungswert
- Variante 2: Soll-Mischgutvariante, Verdichtungsgrad  $k_{V2}$  =  $k_{5\%}$ -Quantil

- Variante 3: Soll-Mischgutvariante, Verdichtungsgrad  $k_{V3}$  =  $k_{95\%}$ -Quantil
- Variante 4: ermüdungsempfindlich ( $B_{5\%}$ -Quantil,  $KG_{95\%}$ -Quantil)
- Variante 5: verformungsempfindlich ( $B_{95\%}$ -Quantil,  $KG_{5\%}$ -Quantil)

**Tabelle 1: Übersicht der Einflüsse einer geänderten Asphaltzusammensetzung auf die Gebrauchseigenschaften des Ermüdungs- und Verformungswiderstands**

	Steigender Bindemittelgehalt	Korngrößenverteilung: verringerter Feinkornanteil	Höhere Bindemittelviskosität	Höherer Verdichtungsgrad k
Steifigkeitsmodul	↓	k. A.	↑	↑
Ermüdungswiderstand	↑ <sup>1)</sup>	↓	↓ <sup>2)</sup> / ↑ <sup>3)</sup>	↑
Verformungswiderstand	↓ <sup>4)</sup>	↑	↑	↑

1) Bei SMA führen sehr hohe Bindemittelgehalte nach Durchlaufen eines Maximums zu einer Verringerung des Ermüdungswiderstands  
 2) Für tiefe Temperaturen  
 3) Für hohe Temperaturen  
 4) In einzelnen Fällen konnte eine Verbesserung des Verformungswiderstands beobachtet werden



**Bild 1: Verteilung der an 870 Asphaltmischgutproben mit einem Soll-Bindemittelgehalt von 7,0 M-% ermittelten Bindemittelgehalte (links) sowie Verteilung der an 1 409 Asphaltdeckschichten gemessenen Verdichtungsgrade k (rechts) der Asphaltart SMA 8 S (SMA 0/8 S)**

**Tabelle 1: Unter Annahme von Normalverteilungen berechnete Mittelwerte und Standardabweichungen verschiedener Asphaltmischgutarten und -sorten in Abhängigkeit des Soll-Bindemittelgehalts**

Asphaltmischgutart und -sorte:		AC 32 T S	AC 22 T S	AC 22 B S	AC 16 B S	AC 11 D S	SMA 11 S	SMA 8 S
Bindemittelgehalt [%]	Soll	3,6	3,6	4,0	4,2	5,9	6,5	7,0
	Mittelwert	3,66	3,71	4,04	4,24	5,90	6,42	6,99
	Standardabweichung	0,354	0,343	0,300	0,262	0,253	0,243	0,222
	Anzahl der Einzelwerte	3.046	677	1.406	1.446	1.180	4.812	870
Füllergehalt [%]	Soll	6,1	6,7	8,0	6,0	7,5	9,0	10,0
	Mittelwert	7,12	8,99	8,15	7,11	7,81	9,16	9,87
	Standardabweichung	0,967	1,054	1,061	1,075	1,177	1,053	1,144
	Anzahl der Einzelwerte	449	101	597	485	378	1.876	461

**Tabelle 2: An der Verteilung abgelesene und unter Annahme der Weibull-Verteilung berechnete Erwartungs- und Quantilwerte der Verdichtungsgrade**

Asphaltsorte	Verdichtungsgrad k [%]					
	Sollwert	Erwartungs- wert	Quantil-Werte		Weibull-Verteilung	
			5 %	95 %	5 %	95 %
SMA 8 S	≥ 97	99,1	95,2	101,8	95,0	101,7
AC 11 D S	≥ 97	99,2	95,5	101,2	95,5	101,2
AC 16 B S	≥ 97	98,9	96,1	103,4	95,5	103,3
AC 22 T S	≥ 97	99,1	97,2	103,8	96,8	103,9

**Tabelle 4: Gewählte Mischgutvariationen**

Variantenbezeichnung:		1	2	3	4	5
SMA 0/8 S SMA 8 S	Bindemittel	25/55-55A (PmB 45 A)				
	Bindemittelgehalt B [M.-%]	7,0			6,6	7,4
	Gestein	Gabbro				
	Korngrößenverteilung	Mittel			Grob	Fein
	Verdichtungsgrad k [%]	99,7	96,6	102,7	-	-
ABi 0/16 S AC 16 S	Bindemittel	25/55-55A (PmB 45 A)				
	Bindemittelgehalt B [M.-%]	4,2			3,8	4,7
	Gestein	Gabbro				
	Korngrößenverteilung	Mittel			Grob	Fein
	Verdichtungsgrad k [%]	99,2	97,0	101,1	-	-
ATS 0/22 CS AC 22 TS	Bindemittel	50/70				
	Bindemittelgehalt B [M.-%]	3,6			3,2	4,3
	Gestein	Kalkstein				
	Korngrößenverteilung	Mittel			Grob	Fein
	Verdichtungsgrad k [%]	99,9	97,0	101,2	-	-

Bei der Herstellung von Asphalt-Probepplatten aus den Varianten 4 und 5 wurde das identische Verdichtungsprogramm verwendet wie für Variante 1. Die kompositionellen Eigenschaften der Mischgutvariationen, die sich aus der Auswertung der Datenbank ergeben, sind in Tabelle 4 zusammengefasst.

2.4 Prüfverfahren

Die im Rahmen der Dimensionierungsrechnung verwendeten Steifigkeitsmodule wurden für die Asphalttragschichtvarianten mit dem Verfahren nach Francken und Verstraeten (1974) (vgl. Hürtgen 1982) aus der Mischgutzusammensetzung berechnet.

An den SMA 8- und AC 16 B S-Varianten wurden Spaltzug-Schwellversuche zur Ermittlung der Steifigkeitsmodul-Hauptkurve gemäß AL Sp 2009 durchgeführt. An jedem Probekörper wurden dabei Spaltzug-Schwellversuche bei verschiedenen Frequenzen (0,2, 1, 2, 5, 10 und 20 Hz) und Temperaturen (20, 10, 0, -10 °C) durchgeführt.

Zur Ermittlung der Rissresistenz bei tiefen Temperaturen wurden zunächst Zug- und Abkühlversuche gemäß prEN 12697-46 durchgeführt (vgl. Wistuba et al., 2009). Die in den Abkühlversuchen gemessene kryogene Spannung wurde in den einaxialen Zug-Schwellversuchen als Unterspannung angewendet.

Die Ermüdungsresistenz wurde bei den Temperaturen 5, -5 und -15 °C mit dem einaxialen Zug-Schwellversuch gemäß prEN 12697-46 (vgl. Mollenhauer, 2008), für die Temperatur von 20 °C mit Spaltzug-Schwellversuchen gemäß AL-SP 2009 geprüft.

Zur Ansprache des Verformungswiderstands kamen drei Versuchstypen zur Anwendung (vgl. Schindler, 2009), deren Versuchsbedingungen in Tabelle 5 zusammengefasst sind:

- triaxialer Druck-Schwellversuch mit dynamischer Radialspannung (TDSV),
- dynamischer Stempelleindringversuch (DSEV) und
- einaxialer Druck-Schwellversuch (DSV).

Tabelle 5: Prüfbedingungen der Versuche zur Ansprache des Verformungswiderstands (TDSV – triaxialer Druck-Schwellversuch, DSV – einaxialer Druck-Schwellversuch, DSEV – dynamischer Stempelleindringversuch)

Prüfverfahren	Axialspannung [MPa]		Radialspannung [MPa]		Temperatur T [°C]	Frequenz f [Hz]
	$\sigma_u$	$\sigma_o$	$\sigma_u$	$\sigma_o$		
TDSV	0,03	1,0	0,05	0,2 / 0,4 / 0,6 (0,3 / 0,6 / 0,9)*	+50°C	10 Hz ohne Last-pause
DSV		0,15 / 0,30 / 0,45	0,0			
DSEV		0,3 / 0,6 / 0,9	Einspannung			

\* Die in Klammern gesetzten Radialspannungen wurden für die AC 22 – Varianten eingesetzt. Die hohe Radialspannung von 0,9 MPa führte jedoch zu häufig auftretenden Schäden der Gummimembran, sodass das Versuchsprogramm für die anderen Asphaltvarianten modifiziert wurde

3 Prüfergebnisse und Interpretation

3.1 Steifigkeitsmodul

An den SMA 8- und AC 16-Varianten wurden Spaltzug-Schwellversuche zur Ermittlung der Steifigkeitsmoduln durchgeführt. Für die Ermittlung der Steifigkeit der AC 22-Varianten wurde das Berechnungsverfahren nach Francken und Verstraeten angewendet. Die Parameter der ermittelten Steifigkeitsmodul-Hauptkurven sind in Tabelle 6 zusammengestellt. Bild 2 zeigt die daraus resultierenden Steifigkeitsmodule für die Frequenz von f = 10 Hz in Abhängigkeit von der Temperatur.

3.2 Ermüdungswiderstand bei 20 °C

Die Ergebnisse der Spaltzug-Schwellversuche zur Ermittlung des Ermüdungswiderstands der AC 22-Varianten sind in Tabelle 7 in Form von Ermüdungsfunktionen zusammengefasst. Diese Ermüdungsfunktionen wurden im Folgenden für die Berechnung der zulässigen Lastwechselzahl im Rahmen der Dimensionierung verwendet. Zum Vergleich sind die Parameter

der Ermüdungsfunktion für den RDO-Referenzasphalt angegeben.

3.3 Risswiderstand bei tiefen Temperaturen (Abkühl- und Zugversuch)

Exemplarisch für die Ergebnisse der Abkühl- und Zugversuche zeigt Bild 3 die Verläufe der an den Asphaltvarianten bestimmten Zugfestigkeitsreserven. Die Bruchtemperatur  $T_{Br}$  (hier dargestellt als Schnittpunkt der Zugfestigkeitsreserve mit der Temperatur-Achse) wird nur sehr geringfügig durch die gewählten Asphaltvariationen beeinflusst. Dieser Kennwert hängt maßgebend vom eingesetzten Bindemittel – das in den Varianten 1 bis 5 nicht variiert wurde – ab.

Somit weisen alle Varianten einen vergleichbaren Widerstand gegen alleinig durch Temperaturänderung resultierende Rissbildung auf. Wie Bild 3 jedoch zeigt, bewirken die hier variierten Eigenschaften erhebliche Unterschiede im Betrag der Zugfestigkeitsreserve und somit im Widerstand gegen einzelne bei tiefen Temperaturen auftretende Belastungsereignisse.

## 3.4 Ermüdungswiderstand bei tiefen Temperaturen (Zug-Schwellversuch)

Bild 4 zeigt exemplarisch die an den jeweiligen SMA 8-Varianten bei +5, -5 und -15 °C gemessenen Lastwechselzahlen bis zur Makrorissbildung  $N_{\text{Makro}}$  in Abhängigkeit von der jeweils aufgetragenen Spannungsdifferenz  $\Delta\sigma$ .

Bei allen Prüftemperaturen kann beobachtet werden, dass Variante SMA 8-5 bei gleicher Spannungsdifferenz die höchsten Lastwechselzahlen erträgt, während Asphaltvariante SMA 8-4 jeweils am frühesten versagt. Für die aus demselben Mischgut mit unterschiedlichen Verdichtungsarbeiten hergestellten SMA 8-Varianten kann beobachtet werden, dass die am höchsten verdichtete Variante SMA 8-3 höhere Lastwechselzahlen erträgt als SMA 8-1 und SMA 8-2.

Bei gleicher wirkender Spannungsdifferenz  $\Delta\sigma = 1,0 \text{ MPa}$  ergeben sich dadurch erhebliche Abweichungen der ertragbaren Lastwechselzahl, wie für die SMA 8-Varianten und die AC 16-Varianten in Bild 5 gezeigt.

Während bei einer Temperatur von -5 °C die Soll-Variante des SMA 8 ca. 6 000 000 Lastwechsel erträgt, versagen die schlechter verdichtete Variante SMA 8-2 bereits nach ca. 1 000 000 Lastwechseln und die Variante SMA 8-4 mit grober Kornzusammensetzung und geringem Bindemittelgehalt bei ca. 300 000 Lastwechseln. Für die AC 16-Varianten verringern sich die entsprechenden Lastwechselzahlen von 30 000 (AC 16-1) auf 20 000 (AC 16-4) bzw. 4 000 (AC 16-2).

### 3.4.1 Verformungswiderstand bei hohen Temperaturen

Die Versuche zur Ansprache des Verformungswiderstands wurden nach den bei bestimmten Lastwechselzahlen gemessenen Dehnungen  $\varepsilon$  und Dehnraten  $d\varepsilon$  ausgewertet. Weiterhin erfolgte die Anpassung der gemessenen Dehnungsverläufe an Gleichung 1. In den Triaxialen Druck-Schwellversuchen und Dynamischen Stempel Eindringversuchen sowie einigen einaxialen Druck-Schwellversuchen weisen die Dehnungsverläufe keinen Wendepunkt auf, sodass die Parameter  $b$  und  $c$  zu null gesetzt wurden.

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + a \cdot N^k + b \cdot (e^{c \cdot N} - 1) \quad \text{Gleichung 1}$$

Bild 6 zeigt die für die jeweils mittleren Beanspruchungswerte ermittelten Dehnungsverläufe für die SMA 8- und AC 16-Varianten.

In Tabelle 9 sind die Reihungen der Verformungswiderstände der fünf Asphaltvarianten jeder Mischgutsorte wiedergegeben, die aus den gezeigten Dehnungsverläufen sowie aus den Ergebniswerten Dehnung  $\varepsilon(N)$  und Dehnraten  $d\varepsilon(N)$  resultieren. Dabei werden zunächst die Varianten mit Variation des Verdichtungsgrads Varianten 2 und 3 mit der Referenzvariante 1 verglichen. Unabhängig davon erfolgt der Vergleich der Varianten 4 und 5, die sich durch die Veränderung der Mischgutzusammensetzung ergeben, mit der Referenzvariante. Die Prüfergebnisse, die der erwarteten Reihung der jeweils drei Asphaltvarianten entsprechen sind fett gedruckt. Reihungen der Prüfergebnisse, die die Erwartungen nicht bestätigen, sind grau hinterlegt und mögliche Erklärungen sind angegeben.

Der Einfluss des Verdichtungsgrads auf den aus den Prüfergebnissen abgeleiteten Verformungswiderstand kann bei allen Prüfverfahren plausibel nachgewiesen werden. Bei der variierten Mischgutzusammensetzung führen die verschiedenen Prüfverfahren zum Teil zu unterschiedlicher Einschätzung des Verformungswiderstands.

## 4 Dimensionierungsrechnungen

Unter Verwendung der mit Spaltzug-Schwellversuchen ermittelten Ermüdungsfunktionen sowie Steifigkeitsmoduln (vgl. Kapitel 3.1 und 3.2) wurden Dimensionierungsrechnungen gemäß den Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung des Oberbaus von Verkehrsflächen mit Asphaltdeckschicht RDO Asphalt 09 für fünf Straßenabschnitte mit unterschiedlicher Verkehrsbeanspruchung durchgeführt, vgl. Tabelle 10. Für jeden betrachteten Straßenabschnitt wurden zwei Befestigungsvarianten berechnet:

- Asphalttragschicht auf Frostschutzschicht (FSS) (vgl. Zeile 1, RStO 01),
- Asphalttragschicht auf Schottertragschicht auf FSS (vgl. Zeile 3, RStO 01).

Bei den Berechnungen wurden je Straßenabschnitt lediglich die Materialparameter der Asphalttragschicht variiert. Zusätzlich zu den Asphalttragschichtvarianten AC 22-1 bis -5 wurde der RDO-Referenz-Tragschichtasphalt untersucht. Als Kenngrößen der Asphaltdeck- und Asphaltbinderschichten wurden die für die RDO-Referenzasphalte angegebenen Werte verwendet.

Die Ergebnisse der Dimensionierungsrechnungen für die Befestigungen der Bauweise Asphalttragschicht auf Frostschutzschicht sind in Tabelle 11 zusammengestellt.

Daraus abgeleitet zeigt Bild 7 die berechneten Auswirkungen der Materialstreuung aus Verdichtungsgrad und Zusammensetzung auf die theoretische Lebensdauer im Vergleich zur Lebensdauer, berechnet mit der Soll-Variante gemäß Erstprüfung.

Für die Befestigungen der verschiedenen Bauklassen gemäß RStO 01 ergeben sich einheitliche relative Unterschiede der theoretischen Lebensdauer.

Infolge unzureichender Verdichtung ( $k = 96 \%$ ) reduziert sich die theoretische Lebensdauer gegenüber der Soll-Variante um 60 %, während das gleiche Asphaltmischgut bei besserer Verdichtung ( $k = 104 \%$ ) zu einer Verlängerung der theoretischen Lebensdauer von über 20 % führt.

Mischgutabweichungen in Form von geringerem Bindemittelgehalt und grob zusammengesetztem Gesteinskörnungsgemisch können zu einer Verkürzung der rechnerischen Lebensdauer um bis zu 80 % führen.

Für die Befestigungsvariante Asphalttragschicht auf Frostschutzschicht wurden die Auswirkungen von Schichtdickenunterschieden systematisch untersucht. Demnach führen die gemäß ZTV Asphalt zulässigen Dickenschwankungen ( $\leq 10 \%$ ) vor allem bei Befestigungen kleinerer Bauklassen zu erheblichen Abweichungen der theoretischen Lebensdauern von bis zu 8 Jahren bei direktem Bezug des Zahlenwerts der Miner-Summe auf die Lebensdauer.

Tabelle 3: Regressionsparameter der Steifigkeits-Masterfunktionen der SMA 8-Varianten

Variante	Regressionsfaktoren: $S_{Mix} = \frac{W}{1 + e^{-\frac{\ln(f_R) - x_0}{z}}}$			Bestimmtheitsmaß
	W [MPa]	$x_0$	z	
SMA 8-1	36.579	12,1	4,46	99 %
SMA 8-2	22.018	9,5	4,02	98 %
SMA 8-3	41.836	13,0	4,94	98 %
SMA 8-4	15.334	6,9	3,37	99 %
SMA 8-5	33.517	11,1	4,03	99 %
AC 16-1	23.257	7,5	3,97	98 %
AC 16-2	17.709	7,1	3,70	96 %
AC 16-3	21.145	6,0	4,21	99 %
AC 16-4	16.731	6,4	3,33	98 %
AC 16-5	21.936	5,6	2,67	95 %
AC 22-1	38.323	9,015*	3,675*	100 %*
AC 22-2	32.618			
AC 22-3	41.153			
AC 22-4	33.139			
AC 22-5	38.554			

\* Steifigkeitsmoduln der AC 22-Varianten wurden nach Francken und Verstraeten berechnet. Da alle Varianten dasselbe Bindemittel enthalten, ergibt sich lediglich ein Unterschied im Glasmodul, der dem Wert W entspricht.

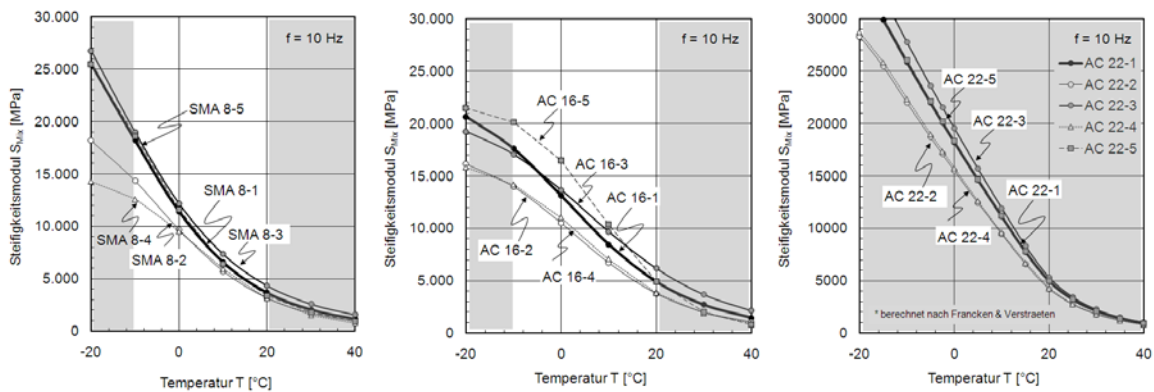
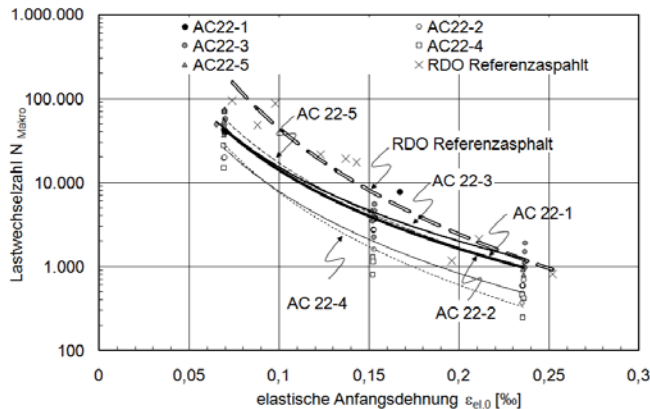


Bild 2: Steifigkeitsmoduln der untersuchten Asphaltvarianten in Abhängigkeit von der Temperatur (Frequenz f = 10 Hz) (extrapolierte/berechnete Bereiche sind grau hinterlegt)

Tabelle 4: Parameter der an den AC 22-Varianten in Spaltzug-Schwellversuchen ermittelten Ermüdungsfunktionen

Asphaltvariante	Parameter $C_1$ [-]	Exponent $C_2$ [-]	$R^2$ [%]
AC 22-1	10,817	-3,114	93
AC 22-2	4,458	-3,244	95
AC 22-3	18,039	-2,925	96
AC 22-4	1,664	-3,657	91
AC 22-5	7,657	-3,347	99
RDO-Referenz	2,821	-4,196	92



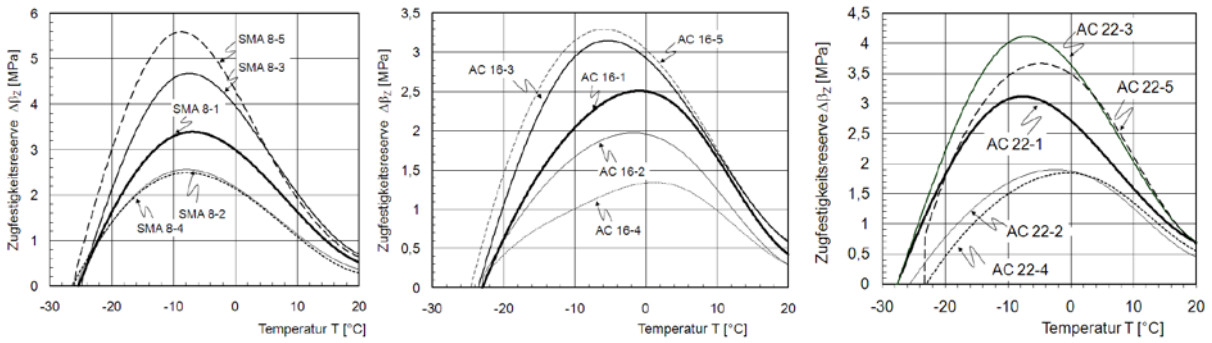


Bild 3: Zugfestigkeitsreserven der untersuchten Asphaltvarianten in Abhängigkeit von der Temperatur T

Tabelle 5: Relativer Einfluss der variierten Asphalteeigenschaften auf die Zugfestigkeitsreserve  $\Delta\beta_z$  (T = -10 °C)

Variante	Prozentualer Unterschied der bei T = -10°C gemessenen Zugfestigkeitsreserve $\Delta\beta_z$ zur Soll-Variante (1)			
	2 geringe Verdichtung	3 hohe Verdichtung	4 bindemittelarm, grobe KGV	5 bindemittelreich, feine KGV
SMA 8 S	-24 %	+39 %	-24 %	+69 %
AC 16 B S	-18 %	+44 %	-51 %	+55 %
AC 22 T S	-43 %	+33 %	-50 %	+17 %

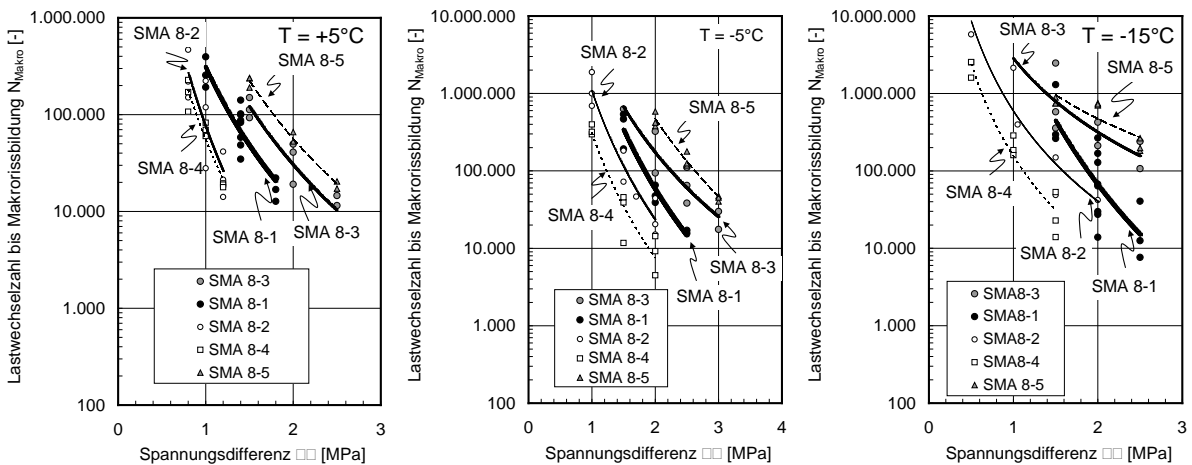


Bild 4: Ergebnisse der einaxialen Zug-Schwellversuche an den SMA 8-Varianten bei T = +5 °C, -5 °C und -15 °C

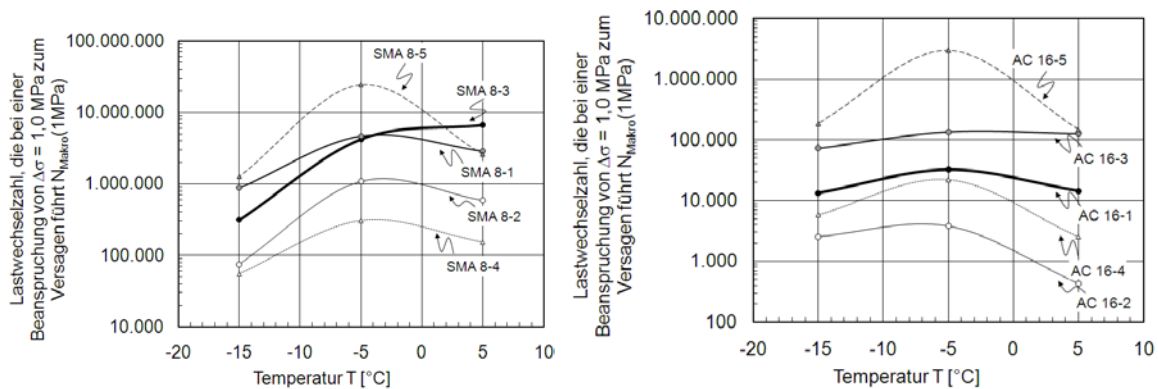
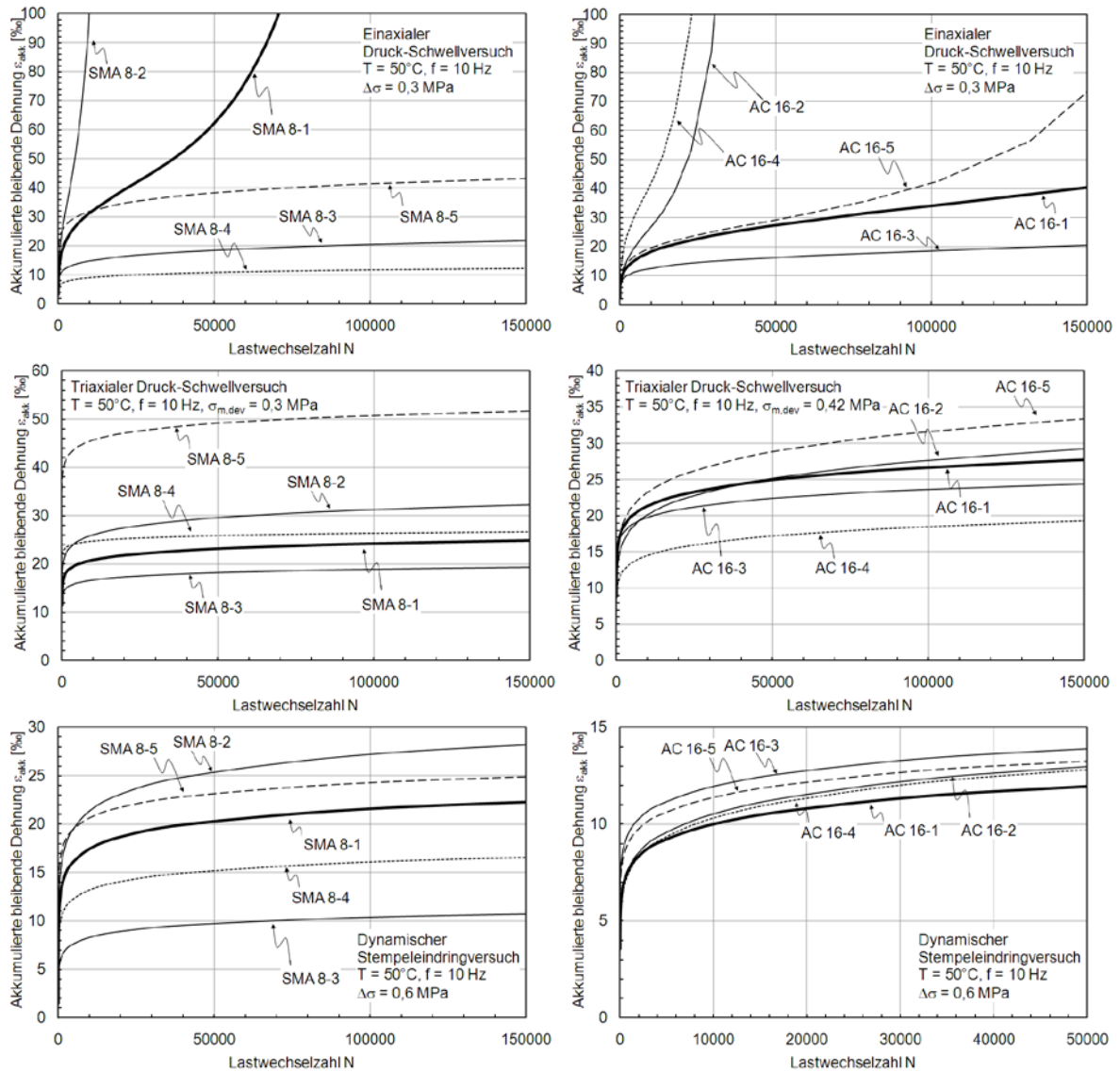


Bild 5: Einfluss praxisadäquater Mischgut-Abweichungen auf die Ergebnisse des einaxialen Zug-Schwellversuchs





**Bild 6:** Mittlere Verläufe der akkumulierten bleibenden Dehnung der SMA 8-Varianten (links) und der AC 16-Varianten (rechts) in einaxialen Druck-Schwellversuchen (oben), triaxialen Druck-Schwellversuchen (Mitte) und dynamischen Stempelversuchen (unten) bei ausgewählten Spannungszuständen

Tabelle 6: Reihung des Verformungswiderstands der Asphaltvarianten nach den Messwerten aus unterschiedlichen Prüfverfahren und Vergleich mit dem erwarteten Verformungsverhalten

Prüfverfahren	Messwert	Verformungswiderstand				
		1	2	3	4	5
Asphaltvariante		1	2	3	4	5
Erwarteter Verformungswiderstand		o	-	+	+	-
<b>SMA 8 – Varianten</b>		<b>SMA 8-1</b>	<b>SMA 8-2</b>	<b>SMA 8-3</b>	<b>SMA 8-4</b>	<b>SMA 8-5</b>
Einaxialer Druck-Schwellversuch	s. Bild 87	-	--	+	++	o
	$d\varepsilon_{WP}(0,3 \text{ MPa})$	-	--	o	++	+ <sup>1</sup>
	$\varepsilon_{WP}(0,3 \text{ MPa})$	o	--	++	+	-
Triaxialer Druck-Schwellversuch	s. Bild 87	+	-	++	o	--
	$d\varepsilon_{ax}(10 \text{ 000})$	o	-	+	++	--
	$\varepsilon_{ax}(10 \text{ 000})^*$	o	+ <sup>2</sup>	++	- <sup>2</sup>	--
Dynamischer Stempel- eindringversuch	s. Bild 87	o	--	++	+	-
	$d\varepsilon(150 \text{ 000})^*$	-	--	++	o <sup>3</sup>	+ <sup>3</sup>
	$\varepsilon(150 \text{ 000})$	o	--	++	+	-
<b>AC 16 – Varianten</b>		<b>AC 16-1</b>	<b>AC 16-2</b>	<b>AC 16-3</b>	<b>AC 16-4</b>	<b>AC 16-5</b>
Einaxialer Druck-Schwellversuch	s. Bild 87	+	-	++	- <sup>4</sup>	o <sup>4</sup>
	$d\varepsilon_{WP}(0,3 \text{ MPa})$	+	--	++	- <sup>4</sup>	o <sup>4</sup>
	$\varepsilon_{WP}(0,3 \text{ MPa})$	+	-	++	- <sup>4</sup>	o <sup>4</sup>
Triaxialer Druck-Schwellversuch	s. Bild 87	o	-	+	++	--
	$d\varepsilon_{ax}(10 \text{ 000})$	o	-	++	+	--
	$\varepsilon_{ax}(10 \text{ 000})^*$	-	o <sup>2</sup>	+	++	--
Dynamischer Stempel- eindringversuch	s. Bild 87	++ <sup>2</sup>	o <sup>2</sup>	- <sup>2</sup>	+ <sup>2</sup>	- <sup>2</sup>
	$d\varepsilon(40 \text{ 000})^*$	o	-	++	- <sup>4</sup>	+ <sup>4</sup>
	$\varepsilon(40 \text{ 000})^*$	-	--	+	o <sup>4</sup>	++ <sup>4</sup>
<b>AC 22 – Varianten</b>		<b>AC 22-1</b>	<b>AC 22-2</b>	<b>AC 22-3</b>	<b>AC 22-4</b>	<b>AC 22-5</b>
Einaxialer Druck-Schwellversuch	$d\varepsilon_{WP}(0,3 \text{ MPa})$	o	--	++	+	-
	$\varepsilon_{WP}(0,3 \text{ MPa})$	+	o	++	- <sup>2</sup>	--
Triaxialer Druck-Schwellversuch	$d\varepsilon_{ax}(10 \text{ 000})$	+	-	o <sup>2</sup>	++	--
	$\varepsilon_{ax}(10 \text{ 000})^*$	o	-	+	++	--
Dynamischer Stempel- eindringversuch	$d\varepsilon(150 \text{ 000})$	o	-	++	+	--
	$\varepsilon(150 \text{ 000})$	o	-	+	++	--

Legende:

++, +, o, -, -- Reihung des Verformungswiderstandes (von hoch nach niedrig).

**Fett** Prüfergebnisse stimmen mit erwarteter Verformungsresistenz überein.

Grau hinterlegt unplausibles Ranking der Prüfergebnisse.

\*, kursiv variierte Spannungsstufen führen zum Teil zu anderem Ranking.

<sup>1</sup> Es wurde kein Wendepunkt beobachtet, sodass hier die Dehnraten am Versuchsende berücksichtigt wurden (Vergleich mit  $\varepsilon_{WP}$  erscheint unzulässig).

<sup>2</sup> Abweichungen aufgrund hoher Prüfstreuung nicht signifikant.

<sup>3</sup> Bei verformungsanfälliger Variante (5) werden zu Beginn des Versuchs hohe Dehnungen zu gemessen – im weiteren Verlauf ergeben sich geringere Dehnungszunahmen.

<sup>4</sup> Splittreiche Zusammensetzung des AC 16-1 an der Grenze der Anforderungen der TL Asphalt kann ursächlich für unplausible Ergebnisse sein.

	Berechnung der Bauklasse nach RStO 01				
	SV <sub>1</sub>	SV <sub>2</sub>	I	II	III
DTV [Kfz/24h]	82 838	35 000	15 908	7 968	6 470
SV-Anteil [%]	22,1	15,0	18,7	7,7	6,4
Fahrstreifenfaktor $f_1$ [-]	0,45	0,45	0,45	0,5	0,5
Fahrstreifenbreitenfaktor $f_2$ [-]	1,0	1,0	1,1	1,40	1,80
Steigungsfaktor $f_3$ [-]	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Mittlere jährliche Zunahme des Schwerverkehrs $p$ [-]	0,03	0,03	0,02	0,01	0,01
Achszahlfaktor $f_A$ [-]	4,2	4,2	3,7	3,1	3,1
Nutzungszeitraum $N$ [a]	30	30	30	30	30
Lastkollektivquotient $q_{Bm}$ [-]	0,26	0,26	0,20	0,18	0,18
Bemessungsrelevante Beanspruchung $B$ [-]	156,2 Mio	40,0 Mio	16,1 Mio	3,0 Mio	2,6 Mio
Gewählte Eingangsgrößen für die Dimensionierungsrechnung nach den RDO Asphalt					
Achslastkollektiv	BAB Fernverkehr		BAB Mischverkehr		BAB Stadtn. Verkehr
Temperaturzone	Zone I				
Sicherheitsbeiwert F	2,1				

Tabelle 7: Eingangsgrößen zur Festlegung der Bauklasse

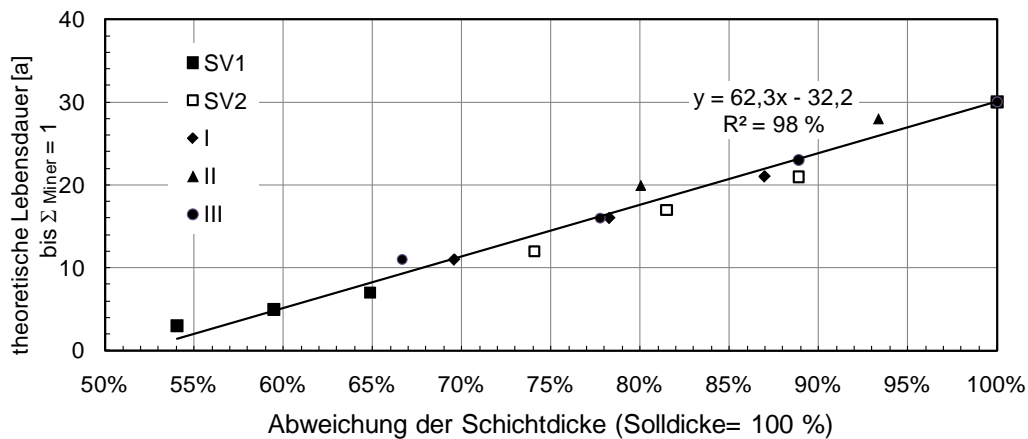


Bild 7: Theoretische Lebensdauer in Abhängigkeit der relativen Schichtdickenabweichung

Tabelle 11: Ergebnisse der rechnerischen Dimensionierung nach RDO Asphalt 09: Schädigungssumme einer Befestigung gemäß RStO 01 nach 30 Jahren, rechnerische Lebensdauer der Befestigung gemäß RStO 01, Tafel 1, Zeile 1 bis Schädigungssumme von  $\Sigma_{\text{Miner}} = 1$  und rechnerisch notwendige Schichtdicke der Asphalttragschicht für eine rechnerische Lebensdauer von 30 Jahren

<b>Bauweise Asphalttragschicht auf Frostschuttschicht (RStO 01, Tafel 1, Zeile 1)</b>					
<b>Asphalttragschicht auf Frostschuttschicht</b>					
Befestigung:	SV <sub>1</sub>	SV <sub>2</sub>	I	II	III
<b>Befestigungsaufbau nach RStO: Schädigungssumme <math>\Sigma_{\text{Miner}}</math> (30 Jahre) [-]</b>					
AC22-1	8,8	2,3	2,4	1,1	2,0
AC22-2	22,4	5,7	6,1	2,9	5,7
AC22-3	7,1	1,8	1,8	0,8	1,4
AC22-4	24,1	6,2	7,4	4,0	8,8
AC22-5	7,2	1,8	2,1	1,0	2,0
Schädigungssumme $\Sigma_{\text{Miner}}$ (30 Jahre): Absoluter Unterschied zu AC 22-1 [-]					
AC22-2	13,6	3,4	3,7	1,8	3,7
AC22-3	-1,7	-0,5	-0,6	-0,3	-0,6
AC22-4	15,3	3,9	5,0	2,9	6,8
AC22-5	-1,6	-0,5	-0,3	-0,1	0,0
Schädigungssumme $\Sigma_{\text{Miner}}$ (30 Jahre): Relativer Unterschied zu AC 22-1 [%]					
AC22-2	154,5	147,8	154,2	163,6	185,0
AC22-3	-19,3	-21,7	-25,0	-27,3	-30,0
AC22-4	173,9	169,6	208,3	263,6	340,0
AC22-5	-18,2	-21,7	-12,5	-9,1	0,0
<b>Theoretische Lebensdauer eines Befestigungsaufbau nach RStO [a]</b>					
AC22-1	5	16	16	28	18
AC22-2	2	7	7	13	7
AC22-3	6	19	19	34	23
AC22-4	1	7	5	10	5
AC22-5	6	19	17	29	18
Theoretische Lebensdauer: Absoluter Unterschied zu AC 22-1 [a]					
AC22-2	-3,0	-9,0	-9,0	-15,0	-11,0
AC22-3	1,0	3,0	3,0	6,0	5,0
AC22-4	-4,0	-9,0	-11,0	-18,0	-13,0
AC22-5	1,0	3,0	1,0	1,0	0,0
Theoretische Lebensdauer: Relativer Unterschied zu AC 22-1 [%]					
AC22-2	-60,0	-56,3	-56,3	-53,6	-61,1
AC22-3	20,0	18,8	18,8	21,4	27,8
AC22-4	-80,0	-56,3	-68,8	-64,3	-72,2
AC22-5	20,0	18,8	6,3	3,6	0,0
<b>Theoretische Schichtdicke der Asphalttragschicht für <math>\Sigma_{\text{Miner}}</math> (30 a) = 1 [cm]</b>					
AC22-1	37	27	23	15	18
AC22-2	43	33	29	20	23
AC22-3	36	26	22	13	16
AC22-4	41	32	28	20	23
AC22-5	34	26	22	15	17
Rechnerisch notwendige Schichtdicke: Absoluter Unterschied zu AC 22-1 [cm]					
AC22-2	6,0	6,0	6,0	5,0	5,0
AC22-3	-1,0	-1,0	-1,0	-2,0	-2,0
AC22-4	4,0	5,0	5,0	5,0	5,0
AC22-5	-3,0	-1,0	-1,0	0,0	-1,0
Rechnerisch notwendige Schichtdicke: Relativer Unterschied zu AC 22-1 [%]					
AC22-2	16,2	22,2	26,1	33,3	27,8
AC22-3	-2,7	-3,7	-4,3	-13,3	-11,1
AC22-4	10,8	18,5	21,7	33,3	27,8
AC22-5	-8,1	-3,7	-4,3	0,0	-5,6

## 5 Interpretation

Die Materialeigenschaften der im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Asphaltvarianten wurden anhand der in der Praxis vorkommenden und in Kontrollprüfungen ermittelten Abweichungen von der in der Erstprüfung definierten Rezeptur variiert. Obwohl dabei die Variationen des Verdichtungsgrads sowie der Zusammensetzung (Bindemittelgehalt und Korngrößenverteilung) innerhalb der Toleranzen gemäß ZTV Asphalt-StB lagen, wurden erhebliche Abweichungen zu den aus der rechnerischen Dimensionierung abgeleiteten theoretischen Soll-Lebensdauern um bis zu 80 % festgestellt. Diese aus den Streuungen der Asphalttragschichten resultierenden Unterschiede des Dimensionierungsergebnisses wurden in vergleichbarer Größenordnung auch in den Ergebnissen fortführender Prüfungen zur Ermittlung des Gebrauchsverhaltens (Risswiderstand bei tiefen Temperaturen, Verformungswiderstand) nachgewiesen (vgl. Kapitel 3).

Weiterhin wurde die Folge von Schichtdickenschwankungen auf die theoretische Lebensdauer untersucht. Es wurde festgestellt, dass die gemäß den ZTV Asphalt-StB 07 zulässige Toleranz von 10 % der Schichtdicke zu einer Verringerung der theoretischen Lebensdauer von 30 Jahren auf 24 Jahre und somit zu einer relativen Abnahme der Lebensdauer um 20 % führt.

Eine Minderung der die im Rahmen dieses Forschungsprojekts quantifizierten negativen Auswirkungen der Misch- und Einbauqualität auf das Gebrauchsverhalten bzw. eine Erhöhung der theoretischen Lebensdauer kann durch eine Verbesserung des Qualitätsmanagements erreicht werden.

### 5.1 Ergebnisse und Ausblick

Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass bei praxisadäquater Variation der Asphalteigenschaften beachtliche Unterschiede sowohl im Ermüdungs- als auch im Verformungswiderstand auftreten. Dies ist festzustellen, auch wenn die Abweichungen der Mischguteigenschaften innerhalb der in den ZTV Asphalt-StB festgelegten Toleranzbereiche liegen. So führen die zu geringen Bindemittelgehalte der im Rahmen dieses Projekts untersuchten Varianten mit der Kennzahl "4" zu einer Reduzierung der in Ermüdungsversuchen ertragbaren Lastwechselzahl auf ein Fünftel im Vergleich zu der für die Referenzvariante "1" festgestellten ertragbaren Lastwechselzahl. Die Abweichung der Zusammensetzung der Varianten "5" mit einem höheren Bindemittelgehalt und einer feineren Korngrößenverteilung bewirkt eine Zunahme der ertragbaren Lastwechselzahl bis zum Achtfachen der an der Referenzvariante "1" ermittelten Lebensdauer.

Vergleichbare Abweichungen des Gebrauchsverhaltens können bei Variation des Verdichtungsgrades beobachtet werden.

Dies gilt generell unabhängig vom angewandten Prüfverfahren, so auch für Spaltzug-Schwellversuche, die zur Ermittlung der Eingangsgrößen für die rechnerische Dimensionierung nach RDO Asphalt 09 vorgeschrieben sind. Die Ergebnisse der Dimensionierungsrechnungen zeigen erhebliche Abweichungen der prognostizierten rechnerischen Lebensdauer zwischen den variierten Asphaltvarianten und den Referenzasphalten. So bewirken die Varianten mit geringem Verdichtungsgrad und

jene mit niedrigem Bindemittelgehalt und grobe Gesteinskörnungszusammensetzung eine deutliche Abnahme der prognostizierten Lebensdauer.

Das in den RDO Asphalt 09 implementierte Sicherheitskonzept berücksichtigt anhand der Kalibrierung an den RStO 01 bereits die möglichen Schwankungen in den Asphalteigenschaften, die innerhalb der vertraglich festgelegten Toleranzen liegen.

Durch ein verbessertes Qualitätsmanagement bei der Asphaltmischgutherstellung sowie bei Einbau und Verdichtung können diese Schwankungen reduziert werden.

Die hier erarbeiteten Forschungsergebnisse können in zukünftigen Forschungsprojekten weiterführend ausgewertet werden. So erlauben die Ergebnisse der Zug- und Abkühlversuche sowie der Einaxialen Zug-Schwellversuche die Ermittlung von probabilistischen Verteilungen der Rissresistenz bei Kälte. Die Ergebnisse der Einaxialen und Triaxialen Druck-Schwellversuche sowie der Dynamischen Stempel Eindringversuche erlauben die Berücksichtigung der Unsicherheiten für die Spurrinnenprognose.

## 6 Literaturverzeichnis

- FGSV. 2001. Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen für den Bau von Fahrbahndecken aus Asphalt. ZTV Asphalt-StB 2001. Köln.
- FGSV. 2007. Technische Lieferbedingungen für Asphaltmischgut für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen. TL Asphalt-StB 2007. Köln.
- FGSV. 2009. Arbeitsanleitung zur Bestimmung des Steifigkeits- und Ermüdungsverhaltens von Asphalten mit dem Spaltzug-Schwellversuch als Eingangsgröße in die Dimensionierung von Asphaltbefestigungen. AL-SP – ASPHALT 09. Köln.
- FGSV. 2009a. Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung des Oberbaues von Verkehrsflächen mit Asphaltdecke RDO - Asphalt 09. Köln.
- Francken, L. and Verstraeten, J. 1974. Methods for Predicting Moduli and Fatigue Laws of Bituminous Road Mixes under Repeated Bending. Transportation Research Record No. 515, pp. 114-123, Washington D.C.
- Leutner, R., Renken, P. und Dröge, C. 2002. Überprüfung der Toleranzen für Bindemittelgehalt und Korngrößenverteilung gemäß ZTV Asphalt-StB und ZTV T-StB. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 838, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Wohnungswesen, Bonn.
- Mollenhauer, K. 2008. Dimensionierungsrelevante Prognose des Ermüdungsverhaltens von Asphalt mittels einaxialer Zug-Schwellversuche. Dissertation. Schriftenreihe Straßenwesen, 21, Institut für Straßenwesen - Braunschweig Pavement Engineering Centre, Technische Universität Braunschweig, ISBN 3-932164-09-1.
- Mollenhauer, K. und Lorenzl, H. 2008a. Ermittlung der Abweichung kompositioneller Eigenschaften von Asphalt gegenüber der Soll-Zusammensetzung. Straße & Autobahn 9/2008, S. 551-557, Kirschbaum Verlag, Bonn.

- Mollenhauer, K. und Lorenzl, H. 2008b. Auswirkung kompositioneller Asphalteeigenschaften auf dimensionierungsrelevante mechanische Stoffkennwerte. *Straße & Autobahn* 11/2008, S. 706-712, Kirschbaum Verlag, Bonn.
- Opel, A. 2007. Laboranalytische Überprüfung der Rezepturtreue bei der Asphaltherstellung im praktischen Mischanlagenbetrieb. Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen und Raumplanung, Universität der Bundeswehr München, Nr. 50, München.
- prDIN EN 12697-46. Asphalt – Prüfverfahren für Heißasphalt – Teil 46: Widerstand gegen Kälterisse und Tieftemperaturverhalten – Entwurf 2009.
- Schindler, K. 2008. Untersuchung des Verformungsverhaltens von Asphalt zur Bestimmung von Materialkennwerten für die Dimensionierung, Dissertation. Schriftenreihe Straßenwesen, 22, Institut für Straßenwesen - Braunschweig Pavement Engineering Centre, Technische Universität Braunschweig, ISBN 3-932164-10-5.
- Wistuba, M., Monismith, C., Bahia, H.U., Renken, P., Olard, F., Blab, R., Mollenhauer, K., Metzker, K., Büchler, S., Grönniger, J., Zeng, M. & Nam, K. 2009. Asphaltverhalten bei tiefen Temperaturen / Asphalt material behaviour at low temperatures. Festschrift zu Ehren des 80. Geburtstags von Professor Wolfgang Arand / Essays in honour of Professor Wolfgang Arand on the occasion of his 80th birthday. Schriftenreihe Straßenwesen, 23, Institut für Straßenwesen - Braunschweig Pavement Engineering Centre, Technische Universität Braunschweig, ISBN 3-932164-11-3.